

**ESTUDO EM TÚNEL DE VENTO DO ARRASTO
AERODINÂMICO SOBRE TORRES TRELIÇADAS DE
LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Leandro Inácio Rippel

Porto Alegre
Dezembro 2005

LEANDRO INÁCIO RIPPEL

**ESTUDO EM TÚNEL DE VENTO DO ARRASTO
AERODINÂMICO SOBRE TORRES TRELIÇADAS DE
LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre
Dezembro 2005

R593e Rippel, Leandro Inácio
Estudo em túnel de vento do arrasto aerodinâmico sobre torres
treliçadas de linhas de transmissão / Leandro Inácio Rippel – 2005.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande
do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2005.

Orientador: Prof. Dr. Acir Mércio Loredou-Souza
Co-Orientador: Prof. Dr. Marcelo Maia Rocha

1. Túnel de vento. 2. Linhas de transmissão. 3. Torres metálicas.
4. Estruturas treliçadas. I. Loredou-Souza, Acir Mércio, orient.
II. Rocha, Marcelo Maia, co-orient. III. Título.

CDU-624.042.4(043)

LEANDRO INÁCIO RIPPEL

**ESTUDO EM TÚNEL DE VENTO DO ARRASTO
AERODINÂMICO SOBRE TORRES TRELIÇADAS DE
LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Esta dissertação de Mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA** e aprovada em sua forma final pelos professores Orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

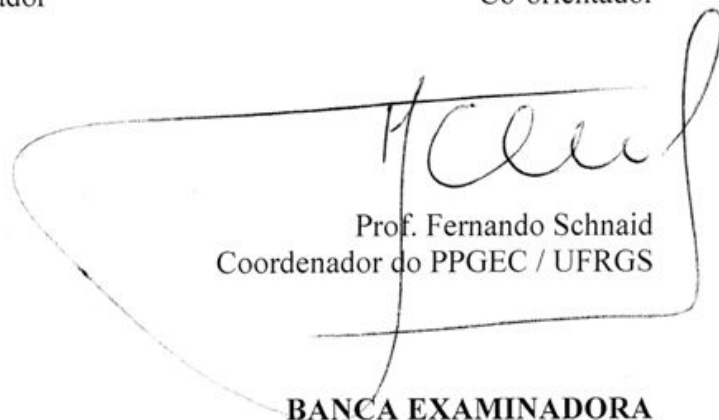
Porto Alegre, 21 de dezembro de 2005



Prof. Acir Mércio Loredo-Souza
Ph.D., University of Western Ontario, Canadá
Orientador



Prof. Marcelo Maia Rocha
Dr. techn., Universität Innsbruck, Áustria
Co-orientador



Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC / UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Joaquim Blessmann (UFRGS)
D.Sc., Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil

Prof. Mario José Paluch (UPF)
D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes (UFRGS)
Dr. techn., Universität Innsbruck, Áustria

*Aos meus pais Aloisio e Rovená, aos meus irmãos João,
Susane, André e Jaqueline e, em especial, às minhas
sobrinhas Alicia e Marina, dedico este trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Durante a elaboração e execução do presente trabalho, houve o envolvimento de um grande número de pessoas, cujas contribuições foram decisivas para o cumprimento dos objetivos propostos.

Inicio esta seqüência de agradecimentos, me dirigindo aos grandes amigos do Laboratório de Aerodinâmica das Construções, em especial, ao Orientador Prof. Acir Mércio Loredou-Souza pelo aprendizado e, principalmente, pelo desejo constante de querer nos ajudar, ao estimado Téc. Paulo Francisco Bueno, pelo incentivo e confiança depositada no nosso trabalho, assim como aos colegas doutorando Eng.º Gustavo Javier Zani Núñez e Eng.º Elvis Antônio Carpeggiani pelo companheirismo e significativa cooperação prestada no cumprimento das atividades pertinentes ao projeto. Junto a essa equipe de pessoas, num período de convivência diária de quatro anos, fui privilegiado com uma série de ensinamentos que contribuíram para minha formação humana e contínuo crescimento profissional.

Entretanto, conforme mencionado, a execução deste projeto foi viabilizada graças a atuação de um grupo grande de pessoas, altamente competentes e qualificadas, constituído pelo Co-orientador Prof. Marcelo Mais Rocha, Eng.º Aloísio Maggi Fin e Eng.º Henrique Luiz Rupp, mestrandos Eng.º Matheus Antônio Corrêa Ribeiro, Eng.ª Karin Ceroni Malcum e Eng.º Fabrício de Paoli, doutoranda Eng.ª Lisandra Fraga Limas, assim como pelos bolsistas Gabriela Miralha da Silveira, Maria Cristina Dolz Bênia e Renê André Muraro.

À empresa FURNAS Centrais Elétricas pelo subsídio financeiro proporcionado através do Projeto *P&D*, em especial, aos engenheiros Afonso de Oliveira e Silva e Julio César Pinto de Medeiros pelo assessoramento técnico oferecido, qualificando significativamente a elaboração do presente trabalho.

Ao Eng.º Vilson Renato da Silva, pelas valiosas sugestões, assim como aos seus queridos familiares Carolina, Jussara e Revisson. Agradecimento especial ao Eng.º Vilson pelos diversos conhecimentos transmitidos e experiências profissionais proporcionadas.

Ao Prof. Joaquim Blessmann e ao Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes pelos preciosos comentários, esclarecimentos e orientações, assim como pelo vínculo de amizade.

SUMÁRIO

RESUMO	<i>ii</i>
ABSTRACT	<i>iii</i>
LISTA DE SÍMBOLOS	<i>iv</i>
LISTA DE TABELAS	<i>viii</i>
LISTA DE FIGURAS	<i>x</i>
LISTA DE SIGLAS	<i>xv</i>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Aspectos Gerais	1
1.2 Histórico de Alguns Acidentes	3
1.3 Histórico do Assunto	5
1.4 Objetivos	8
1.4.1 Objetivo Geral	8
1.4.2 Objetivos Específicos	11
2 AÇÃO DO VENTO COMO CARREGAMENTO	13
2.1 Características Gerais do Vento	13
2.1.1 Aspectos Gerais	13
2.1.2 Tipos de Fenômenos Meteorológicos.....	13
2.1.2.1 <i>Tormentas EPS</i>	14
2.1.2.2 <i>Tormentas TS</i>	14
2.1.2.3 <i>Linhas de Tormentas</i>	15
2.1.2.4 <i>Tornados</i>	15
2.1.2.5 <i>Ventos regionais</i>	16
2.1.2.6 <i>Ciclones Tropicais</i>	16
2.2 Carregamentos em Estruturas Reticuladas Devido ao Vento	17
2.2.1 Ações que Geram Carregamentos	17
2.2.2 Ação do Vento em Torres Reticuladas	17
2.2.2.1 <i>Efeitos de Proteção</i>	19
2.2.2.2 <i>Dependência do Número de Reynolds</i>	20
2.2.3 Coeficientes de Força para Torres Reticuladas	21

2.2.4	Métodos Teóricos de Cálculo	24
2.2.4.1	<i>Método Estatístico Usando Linhas de Influência</i>	25
2.2.4.1.1	Resposta Média	25
2.2.4.1.2	Resposta Não Ressonante	26
2.2.4.1.3	Resposta Ressonante	26
2.2.4.1.4	Resposta Total.....	26
2.2.4.2	<i>Método do Fator de Velocidade de Rajada</i>	27
2.2.4.3	<i>Método do Fator de Resposta de Rajada</i>	28
2.2.5	Procedimentos Normativos	29
2.2.5.1	<i>NBR 5422/1985</i>	30
2.2.5.2	<i>NBR 6123/1988</i>	31
2.2.5.3	<i>IEC 60826/1991</i>	32
2.2.5.4	<i>ENV 1991-2-4 (1998)</i>	33
2.2.5.5	<i>ASCE Manual 74 (1991)</i>	33
2.2.5.6	<i>ANSI/ASCE 7-95 (1996)</i>	34
3	ESTUDOS EXPERIMENTAIS.....	35
3.1	Características do Túnel de Vento.....	35
3.2	Modelos Reduzidos de Ensaio	38
3.2.1	Definição dos Modelos.....	38
3.2.2	Estimativa de Áreas	40
3.2.3	Listagem dos Módulos Estudados	41
3.2.3.1	<i>Módulo do Tronco Comum</i>	41
3.2.3.2	<i>Módulo da Cabeça</i>	43
3.2.3.2.1	Viga, Mísulas e Pára-Raios	44
3.2.3.2.2	Delta.....	46
3.2.3.3	<i>Módulo das Extensões</i>	48
3.2.3.4	<i>Módulo das Pernas</i>	50
3.2.3.4.1	Perna Isolada.....	50
3.2.3.4.2	Conjunto de Pernas	51
3.3	Sistema de Instrumentação e Medição das Forças de Arrasto.....	53
3.3.1	Medidas das Forças de Arrasto.....	53
3.3.1.1	<i>Forças de Arrasto</i>	54
3.3.1.2	<i>Velocidades de Ensaio</i>	55
3.3.2	Balança de Força	55
3.3.2.1	<i>Célula de Carga</i>	56
3.3.2.2	<i>Calibração</i>	56
3.3.2.3	<i>Aquisição de Dados</i>	58
4	APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	60
4.1	Aspectos Gerais.....	60
4.2	Medidas de Arrasto em Túnel de Vento.....	61

4.3	Coefficientes de Arrasto	63
4.3.1	Torre Autoportante A33	64
4.3.1.1	Área de Referência: Área Calculada.....	64
4.3.1.2	Área de Referência: Área Projetada	66
4.3.2	Torre Autoportante A55	69
4.3.2.1	Área de Referência: Área Calculada.....	69
4.3.2.2	Área de Referência: Área Projetada	71
4.3.2.3	Coefficiente de Arrasto Ponderado	74
4.4	Comparativo Entre Referências Diversas	75
4.4.1	Memória de Cálculo (MC)	75
4.4.1.1	Torre Autoportante A33	75
4.4.1.2	Torre Autoportante A55	77
4.4.2	Normas e Procedimentos	79
4.5	Estimativa da Força de Arrasto Usando Coeficientes Experimentais.....	83
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	86
5.1	Conclusões	86
5.2	Trabalhos Futuros	88
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
APÊNDICE A	94
APÊNDICE B	96
APÊNDICE C	99
APÊNDICE D	102
APÊNDICE E	107
APÊNDICE F	111
APÊNDICE G	114
APÊNDICE H	116
APÊNDICE I	119
APÊNDICE J	121
APÊNDICE L	126

RESUMO

RIPPEL, L. I. **ESTUDO EM TÚNEL DE VENTO DO ARRASTO AERODINÂMICO SOBRE TORRES TRELIÇADAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Estruturas treliçadas de linhas de transmissão submetidas à ação do vento têm sido utilizadas de forma rotineira em aplicações da engenharia estrutural há mais de um século. Entretanto, o conhecimento dos efeitos do vento sobre este tipo de estrutura é, ainda hoje, imperfeito e as prescrições das normas a respeito destes efeitos são, em muitos casos, mutuamente inconsistentes e em desacordo com os dados experimentais. Partindo deste contexto, no caso particular de estruturas para linhas de transmissão, podemos acrescentar que as normas existentes não são, em princípio, aplicáveis à maior parte das geometrias utilizadas nos projetos das torres. Além disso, maiores níveis de segurança e confiabilidade são atingidos quando a consideração criteriosa dos efeitos do vento é feita a partir da etapa de concepção sendo, geralmente, este o processo de menor custo e de maior eficiência. Sabe-se também que o modelo físico adotado para consideração dos carregamentos difere do real, seja pela forma de atuação ou pela complexidade para estimativa da interação entre fluido-estrutura. Nesse sentido, através do presente trabalho procurou-se: desenvolver e aperfeiçoar instrumentos e técnicas de medição de coeficientes de arrasto; verificar a aplicabilidade dos critérios de estimativa do carregamento devido ao vento sobre trechos de estruturas treliçadas; propor coeficientes de arrasto compatíveis com geometrias tradicionalmente utilizadas em torres de linhas de transmissão determinados a partir da aplicação de dois critérios de área de referência, a saber, área calculada e área projetada; além de comparar os resultados experimentais com outras referências como normas técnicas de projeto. Este trabalho de pesquisa contempla o estudo de duas torres de suspensão autoportantes em túnel de vento. Para a realização dos ensaios, através de modelos reduzidos, cada torre foi dividida em módulos. Os módulos foram ensaiados para diferentes ângulos de incidência do vento e também para diferentes níveis de velocidade do vento. As forças de arrasto sobre os modelos foram determinadas através de uma balança de forças unidirecional instalada na base da câmara de ensaios.

Palavras-chave: coeficientes de arrasto; linhas de transmissão; torres treliçadas; túnel de vento; normas de projeto.

ABSTRACT

RIPPEL, L. I. **WIND TUNNEL STUDY OF THE AERODYNAMIC DRAG FORCES ON TRANSMISSION LINES LATTICE TOWERS**. 2005. Dissertation (Master in Civil Engineering) – Graduate Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

Transmission lines lattice structures submitted to wind action have been widely used in structural engineering applications for more than a century. However, the knowledge of the wind effect on this type of structure is yet imperfect, being the codes recommendations, in several cases, inconsistent and in disagreement with the experimental data. From this point of view, in the particular case of transmission lines structures, we can add that the existing codes are not, in principle, applicable to a large amount of geometries used in the towers design. Furthermore, largest safety and reliability levels are reached when careful consideration of the wind effects is made from the conception stage, being this process, in general, the less costly and the most efficient. It is also known that the physical model adopted for the consideration of the loads differs from the real, either for the way in which the load is really applied or the complexity for an accurate estimate of the fluid-structure interaction. In this sense, the present work had the aim of: developing and improving instrumentation and measurement techniques for drag coefficients; verifying the applicability of the criteria for estimating wind loads on modules of lattice structures; proposing drag coefficients applicable to geometries traditionally adopted in transmission lines towers, obtained from the application of the two reference areas criteria, calculated area and projected area; as well as comparing experimental results with other references such as design codes. The research contemplates wind tunnel studies of two self-supported suspension towers. For the accomplishment of the tests, through scaled models, each tower was divided in modules. The modules had been tested for different angles of incidence of the wind and also for different wind speeds. The drag forces on the models were measured through a unidirectional force balance installed in the base of the models.

Key-words: drag coefficients; transmission lines; lattice towers; wind tunnel; design codes.

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Maiúsculas do Alfabeto Romano

A_c : área frontal total delimitada pelo contorno do reticulado

A_e : área frontal efetiva do reticulado

A_{ec} : área efetiva calculada

A_{ep} : área efetiva projetada

A_{ref} : área efetiva de referência adotada para o reticulado

A_T : força de arrasto sobre torres treliçadas

A_{tc} : área efetiva dos elementos expostos ao vento na face transversal

B_T : resposta adimensional

C : coeficiente de calibração

C_a : coeficiente de arrasto

C_{tc} : coeficiente de arrasto para vento perpendicular à face transversal da mísula

C_{xT1} , C_{xT2} : coeficiente de arrasto próprio das faces 1 e 2, respectivamente, o qual já leva em conta as faces a sotavento e a barlavento

E_x : fator de exposição

F : força lateral instantânea

F_a : força de arrasto

\bar{F}_D : força de arrasto média do vento

F_g : força global

F_l : força lateral

G_q : fator de resposta de rajada

G_T : fator de resposta de rajada para a torre

G_T : fator de ressonância estrutural

H : altura da torre

I_u : intensidade da componente longitudinal da turbulência

kV: unidade de medida (quilovolt) de tensão elétrica equivalente a 1000 V

L_v : escala integral transversal da turbulência

L_v : escala vertical longitudinal da turbulência

MW: unidade de medida (megawatt) de potência elétrica equivalente a 1.000.000 W

N: unidade de medida (newton) de força

P_a : pressão atmosférica

Q_{wic} : força de arrasto

Re : número adimensional de *Reynolds*

R_f : ressonante adimensional

$S_{Q_j}(f_j)$: espectro de força generalizada em função da frequência natural no *j-ésimo* modo de vibração

S_{T1}, S_{T2} : área líquida (efetiva) total das faces 1 e 2, respectivamente

T : tempo

T : temperatura do ar (°C)

V : velocidade do vento

\bar{V}_H : velocidade média na altura de referência H

\bar{V}_o : velocidade média do vento

W : unidade de medida (watt) de potência elétrica

Letras Minúsculas do Alfabeto Romano

a : coeficiente angular da reta

d : dimensão característica do elemento

ddp: diferença de potencial elétrico

L : escala

e : distância entre reticulados paralelos

f_j : frequência natural no *j-ésimo* modo de vibração

f_r : frequência natural

g_f : Unidade de medida (grama-força) de massa

g_s : fator estatístico de pico

h : altura do reticulado

h_o : altura efetiva

i_r : valor da linha de influência da resposta

i_r : coeficiente de influência

k : dimensão de um grão de areia

l : uma dimensão característica

mV : unidade de medida (milivolt) de tensão elétrica equivalente a 0,001 V

Ω : unidade de medida (ohm) de resistência elétrica

q : pressão dinâmica de referência, a qual é dada por $\frac{1}{2} \rho V^2$

q_h : pressão dinâmica

q_o : pressão dinâmica de referência (q)

r : raio de curvatura da aresta

\bar{r} : resposta média no tempo

\tilde{r} : valor *rms* da resposta flutuante

V : Unidade de medida (volt) de tensão elétrica

z, z' : alturas acima do solo

z_{rd} : altura de referência

w : largura da torre

Letras do Alfabeto Grego

p : expoente de lei potencial

α : ângulo de incidência do vento

β : ângulo de aplicação da carga

ζ : amortecimento total

η : fator de proteção para reticulados formados por planos múltiplos

κ : coeficiente de arrasto superficial

μ_j : coordenada modal no j -ésimo modo

ν : viscosidade cinemática do ar igual a $14,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (15°C)

ρ : massa específica do ar igual a $1,2253 \text{ kg}/\text{m}^3$ (15°C)

σ_v^2 : variância

υ : taxa de ultrapassagem

φ : índice de área exposta

ω_j : frequência angular de vibração no j -ésimo modo de vibração

Δp_a : pressão de referência (diferença de pressão entre duas seções específicas do túnel).

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Grupos de modelos ensaiados para a Torre A55.....	p.39
Tabela 3.2: Grupos de modelos ensaiados para a Torre A33.....	p.40
Tabela 3.3: Áreas de contorno e efetivas para o tronco comum das torres A33 e A55....	p.43
Tabela 3.4: Áreas de contorno e efetivas para viga, mísulas e pára-raios das torres A33 e A55.....	p.45
Tabela 3.5: Áreas de contorno e efetivas para o delta inferior completo das torres A33 e A55.	p.46
Tabela 3.6: Áreas de contorno e efetivas para as extensões das torres A33 e A55.....	p.49
Tabela 3.7: Áreas de contorno e efetivas para as alturas de pernas 9,00 m (Torre A33) e 10,50 m (Torre A55).....	p.51
Tabela 3.8: Áreas de contorno e efetivas para as alturas de pernas 9,00 m (Torre A33) e 10,50 m (Torre A55).....	p.53
Tabela 4.1: Razão entre forças medidas (módulos principais) e forças somadas (módulos simples) para a Torre A33.....	p.62
Tabela 4.2: Razão entre forças medidas (módulos principais) e forças somadas (módulos simples) para a Torre A55.....	p.63
Tabela 4.3: Coeficiente de arrasto ponderado para os trechos do tronco comum e extensões.....	p.74
Tabela 4.4: Valores de φ , C_a e forças medidas para a Torre A33.....	p.76
Tabela 4.5: Valores de φ , C_a e forças calculadas (MC) para a Torre A33.....	p.76
Tabela 4.6: Valores de φ , C_a e forças medidas para a Torre A55.....	p.77
Tabela 4.7: Valores de φ , C_a e forças calculadas (MC) para a Torre A55.....	p.78
Tabela 4.8: Valores de C_a para o ângulo 0° da Torre A33 com base em outras referências.....	p.80
Tabela 4.9: Valores de C_a para o ângulo 90° da Torre A33 com base em outras referências.....	p.80
Tabela 4.10: Valores de C_a para o ângulo 0° da Torre A55 com base em outras referências.....	p.81
Tabela 4.11: Valores de C_a para o ângulo 90° da Torre A55 com base em outras referências.....	p.82

Tabela 4.12: Relação entre forças medidas e forças calculadas para vento oblíquo 45° sobre a Torre A33, usando coeficientes de arrasto experimentais.....	p.84
Tabela 4.13: Relação entre forças medidas e forças calculadas para ventos oblíquos 30° e 56° sobre a Torre A55, usando coeficientes de arrasto experimentais.....	p.84
Tabela F.1: Áreas de contorno e efetivas para os modelos adicionais da Torre A33.....	p.112
Tabela F.2: Áreas de contorno e efetivas para os modelos adicionais da Torre A55.....	p.113
Tabela H.1: Coeficientes de arrasto experimentais para os modelos da Torre A33.....	p.117
Tabela H.2: Coeficientes de arrasto experimentais para os modelos da Torre A55.....	p.118

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Exemplos típicos de colapso de torres de linhas de transmissão.....	p.03
Figura 1.2: Silhueta da torre quadrada autoportante A33 (dimensões em metros).....	p.09
Figura 1.3: Silhueta da torre quadrada autoportante A55 (dimensões em metros).....	p.10
Figura 2.1: Efeitos de proteção do reticulado de barlavento sobre o de sotavento na determinação do arrasto aerodinâmico BLESSMANN (1990).....	p.19
Figura 2.2: Influência da variação do número de Reynolds sobre o coeficiente de arrasto de acordo com a forma da seção transversal. (a) $r/d = 0,021$; (b) $r/d = 0,167$; (c) $r/d = 0,333$; (d) $r/d = 0,5$ (seção circular).....	p.21
Figura 2.3: Coeficiente de arrasto em torres reticuladas de seção quadrada.....	p.23
Figura 2.4: Resposta típica de estruturas ao vento; (a) Histórico no tempo; (b) Espectro de potência (LOREDO-SOUZA, 1996).....	p.24
Figura 2.5: Coeficiente de arrasto para painéis de suportes treliçados (NBR 5422, 1985).....	p.31
Figura 3.1: Vista do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann.....	p.35
Figura 3.2: Circuito aerodinâmico do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann.....	p.36
Figura 3.3: Características do escoamento do ar na mesa M-I. (a) Perfil de velocidades médias; (b) Intensidades da componente longitudinal da turbulência.....	p.37
Figura 3.4: Equipamentos utilizados nos ensaios e registro das velocidades.....	p.38
Figura 3.5: Projeção do tronco comum da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$	p.42
Figura 3.6: Projeção do tronco comum completo da Torre A55; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$; Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$	p.42
Figura 3.7: Projeção da viga, mísulas e pára-raios da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.	p.44
Figura 3.8: Projeção da viga, mísulas e pára-raios da Torre A55. Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$. (c) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$	p.44
Figura 3.9: Projeção do delta inferior completo da Torre A33. (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.	p.46

- Figura 3.10: Projeção do delta da Torre A55; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$;
 (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$ (d) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$ p.47
- Figura 3.11: Projeção da extensão 6,0 m da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$;
 (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$ p.48
- Figura 3.12: Projeção da extensão 12,0 m da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$;
 (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$ p.48
- Figura 3.13: Projeção da extensão 12,0 m da Torre A55; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$;
 (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$ (d) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$ p.48
- Figura 3.14: Projeção isolada da perna 9,0 m da Torre A33;
 (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$ p.50
- Figura 3.15: Projeção isolada da perna 10,50 m da Torre A55;
 (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$
 (d) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$ p.51
- Figura 3.16: Projeção do conjunto das quatro pernas 9,0 m da Torre A33;
 (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$ p.52
- Figura 3.17: Projeção do conjunto das quatro pernas 10,50 m da Torre A55;
 (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$;
 (d) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$ p.52
- Figura 3.18: Referência para o ângulo de incidência do vento e para aplicação dos
 coeficientes de arrasto. (a) Torre A33. (b) Torre A55..... p.54
- Figura 3.19: Balança de força unidirecional: (a) detalhe da instrumentação;
 (b) instalação sob a base do túnel de vento..... p.55
- Figura 3.20: Resultados da calibração da balança para diferentes ângulos de aplicação
 da carga..... p.57
- Figura 3.21: Esquema geral do sistema de aquisição de dados utilizado com a balança
 de força unidirecional..... p.59
- Figura 4.1: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A33 para vento longitudinal
 (0°), considerando área de referência isolada..... p.64
- Figura 4.2: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A33 para vento transversal
 (90°), considerando área de referência isolada..... p.65
- Figura 4.3: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A33 para vento longitudinal
 (0°), considerando área de referência projetada..... p.66
- Figura 4.4: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A33 para vento oblíquo
 (45°), considerando área de referência projetada..... p.67

Figura 4.5: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A33 para vento transversal (90°), considerando área de referência projetada.....	p.68
Figura 4.6: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A55 para vento longitudinal (0°), considerando área de referência isolada.....	p.70
Figura 4.7: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A55 para vento transversal (90°), considerando área de referência isolada.....	p.70
Figura 4.8: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A55 para vento longitudinal (0°), considerando área de referência projetada.....	p.71
Figura 4.9: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A55 para vento oblíquo (30°), considerando área de referência projetada.....	p.72
Figura 4.10: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A55 para vento oblíquo (56°), considerando área de referência projetada.....	p.72
Figura 4.11: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A55 para vento transversal (90°), considerando área de referência projetada.....	p.73
Figura A.1: Identificação dos grupos de modelos ensaiados. (a) Torre A33. (b) Torre A55.....	p.95
Figura B.1: Vista transversal dos módulos. (a) Cabeça; (b) Tronco comum; (c) Extensão 6,0 m; (d) Extensão 12,0 m; (e) Pernas 9,00 m.....	p.97
Figura B.2: Vista longitudinal dos módulos. (a) Cabeça; (b) Tronco comum; (c) Extensão 6,0 m; (d) Extensão 12,0 m; (e) Pernas 9,00 m.....	p.98
Figura C.1: Vista transversal dos módulos. (a) Cabeça; (b) Tronco comum; (c) Extensão 12,0 m; (d) Pernas 10,50 m.....	p.101
Figura C.2: Vista longitudinal dos módulos. (a) Cabeça; (b) Tronco comum; (c) Extensão 12,0 m; (d) Pernas 10,50 m.....	p.100
Figura D.1: Projeção do pára-raios isolado da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$	p.103
Figura D.2: Projeção da mísula isolada da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$	p.103
Figura D.3: Projeção da viga isolada da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$	p.103
Figura D.4: Projeção da viga com uma mísula da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$	p.103
Figura D.5: Projeção da viga com duas mísulas da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$	p.103

Figura D.6: Projeção do delta superior parcial da Torre A33;
 (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$ p.104

Figura D.7: Projeção do delta superior completo da Torre A33;
 (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$ p.104

Figura D.8: Projeção do delta parcial da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$;
 (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$ p.104

Figura D.9: Projeção do delta completo da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$;
 (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$ p.105

Figura D.10: Projeção do delta superior completo, viga, mísulas e pára-raios da
 Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$;
 (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$ p.105

Figura D.11: Projeção do delta inferior parcial da Torre A33;
 (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$ p.105

Figura D.12: Projeção da cabeça da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$;
 (b) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$ p.106

Figura D.13: Projeção da cabeça da Torre A33: face oblíqua $\alpha = 45^\circ$ p.106

Figura E.1: Projeção do pára-raios isolado da Torre A55; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$;
 (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$; (d) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$... p.108

Figura E.2: Projeção da mísula isolada da Torre A55; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$;
 (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$; (d) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$... p.108

Figura E.3: Projeção da viga isolada da Torre A55; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b)
 Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$; (d) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$ p.108

Figura E.4: Projeção do delta inferior parcial da Torre A55;
 (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$;
 (d) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$ p.109

Figura E.5: Projeção do tronco comum superior da Torre A55;
 (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$;
 (d) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$ p.109

Figura E.6: Projeção do tronco comum inferior da Torre A55;
 (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$;
 (d) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$ p.109

Figura E.7: Projeção da cabeça da Torre A55; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$;
 (b) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$ p.110

- Figura E.8: Projeção da cabeça da Torre A55; (a) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$;
 (b) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$ p.110
- Figura G.1: Retas de calibração da balança, mostrando a influência do efeito de segunda ordem..... p.115
- Figura I.1: Identificação dos níveis de aplicação das cargas (dimensões em metros).
 (a) Torre A33. (b) Torre A55..... p.120
- Figura J.1: Fotos dos modelos da Torre A33 no interior do túnel de vento.
 (a) Pára-raios isolado [esc.: 1/8]; (b) Mísula isolada [esc.: 1/8]; (c) Viga isolada [esc.: 1/13]; (d) Viga com uma mísula [esc.: 1/13]; (e) Viga com duas mísulas [esc.: 1/13]; (f) Pára-raios, mísulas e viga [esc.: 1/13]..... p.122
- Figura J.2: Fotos dos modelos da Torre A33 no interior do túnel de vento.
 (a) Delta superior parcial [esc.: 1/17]; (b) Delta superior completo [esc.: 1/17];
 (c) Delta inferior parcial [esc.: 1/8]; (d) Delta inferior completo [esc.: 1/17];
 (e) Delta inferior completo [esc.: 1/8]; (f) Delta parcial [esc.: 1/17]..... p.123
- Figura J.3: Fotos dos modelos da Torre A33 no interior do túnel de vento.
 (a) Delta completo [esc.: 1/17]; (b) Pára-raios, mísulas, viga e delta superior [esc.: 1/17]; (c) Cabeça completa [esc.: 1/17]; (d) Tronco comum completo [esc.: 1/11]; (e) Extensão 6,0 m [esc.: 1/15]; (f) Extensão 12,0 m [esc.: 1/15]..... p.124
- Figura J.4: Fotos dos modelos da Torre A33 no interior do túnel de vento.
 (a) Pernas H = 9,00 m / Conjunto [esc.: 1/13]; (b) Pernas H = 9,00 m / Isolada [esc.: 1/13]..... p.125
- Figura L.1: Fotos dos modelos da Torre A55 no interior do túnel de vento.
 (a) Pára-raios isolado [esc.: 1/10]; (b) Mísula isolada [esc.: 1/10]; (c) Viga isolada [esc.: 1/13]; (d) Pára-raios, mísulas e viga [esc.: 1/20]; (e) Delta inferior parcial [esc.: 1/10]; (f) Delta inferior completo [esc.: 1/20]..... p.127
- Figura L.2: Fotos dos modelos da Torre A55 no interior do túnel de vento.
 (a) Delta inferior completo [esc.: 1/10]; (b) Cabeça completa [esc.: 1/20];
 (c) Tronco comum completo [esc.: 1/18]; (d) Tronco comum superior [esc.: 1/11];
 (e) Tronco comum inferior [esc.: 1/11]; (f) Extensão 12,0 m [esc.: 1/15]..... p.128
- Figura L.3: Fotos dos modelos da Torre A55 no interior do túnel de vento.
 (a) Pernas H = 10,50 m / Conjunto [esc.: 1/13]; (b) Pernas H = 10,50 m / Isolada [esc.: 1/13]..... p.129

LISTA DE SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AENOR: Asociación Española de Normalización y Certificación

ANSI: *American National Standards Institute*

ASCE: *American Society of Civil Engineers*

BAM: *Bridge Amplifier and Meter*

CEEE: Companhia Estadual de Energia Elétrica

CHESF: Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

COPEL: Companhia Paranaense de Energia

CTEEP: Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista

DIN: Deutsches Institut für Normung (Norma Alemã)

ELETROSUL: Empresa Transmissora de Energia Elétrica do Sul do Brasil

ENV: Norma Européia Experimental

EPS: *Extended Pressure Systems*

FVR: Fator de Velocidade de Rajada

FRR: Fator de Resposta de Rajada

IEC: *International Electrotechnical Commission*

LAC: Laboratório de Aerodinâmica das Construções

LT: Linha de transmissão

MC: Memória de Cálculo

NBR: Norma Brasileira

NV: Neige Vent (Norma Francesa)

O&M: Operação & Manutenção

prENV: Norma Européia Experimental

SNPTEE: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica

TS: *Thunderstorm*

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

1 INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos Gerais

Atualmente, as diversas atividades ligadas à agricultura, indústria e comércio, entre outras, estão fortemente dependentes da necessidade de consumo de energia elétrica para sua execução, de modo que se pode admitir que no atual estágio de desenvolvimento da humanidade, a energia elétrica representa um elemento imprescindível para manutenção da ordem e do bem estar do ser humano.

Acidentes em linhas de transmissão (LT's) devidos a ventos fortes são constantemente registrados desde a época que estas estruturas começaram a ser construídas. Dentro deste contexto, uma possível interrupção do fornecimento de energia pode gerar graves problemas a alguns setores específicos da sociedade, conforme podemos exemplificar:

- a) desligamento de equipamentos hospitalares de funcionamento contínuo, passando a ser alimentados por geradores de emergência;
- b) parada repentina de elevadores entre andares, induzindo alguns usuários ao pânico;
- c) desativação de alarmes, propiciando a ocorrência de furtos;
- d) desligamento de sistemas eletroeletrônicos de comunicação;
- e) semáforos de ruas inoperantes causando tumulto no trânsito e possíveis acidentes entre veículos;
- f) desligamento de equipamentos elétricos industriais paralisando a produção.

Agregado aos problemas acima mencionados e que atingem principalmente a população, ainda resta quantificar os custos gerados pela reparação dos danos na linha de transmissão (LT) causados diretamente ou indiretamente pelo vento. Adicionalmente, em alguns casos, ainda se somam aos prejuízos acima os custos de compra de energia de outras distribuidoras para repor temporariamente a falta de energia até a conclusão das atividades de reparo na LT (torres e cabos) danificada.

Nesse sentido, considerando o grau de importância que representa um fornecimento contínuo de energia elétrica, os governantes procuram não somente produzi-la nas usinas hidrelétricas, termoeletricas, nucleares ou através das fontes de energia alternativas (eólica, biomassa, solar), mas também disponibilizá-la ao consumidor, transportando-a através das LT's, ao mais diversos locais do nosso País.

Deste modo, com o intuito de não interromper o processo contínuo de fornecimento de energia elétrica, torna-se importante que o sistema de transmissão apresente um bom nível de confiabilidade, isto é, as LT's (cabos e estruturas) são projetadas a fim de resistirem (dentro de certos limites) a ação de fenômenos meteorológicos, como ventos extremos (fortes), por exemplo.

Além disso, as empresas concessionárias de energia elétrica tendem atualmente a diversificar a utilização destas estruturas, disponibilizando estas para a prestação de serviços ligados a rede de telecomunicações como o suporte de cabos de fibra ótica, beneficiando a transmissão de dados e informações em maior volume e velocidade.

As torres, em sua maioria, são estruturas de aço autoportantes e/ou estaiadas, sendo que, quando comparadas a outros tipos de torres, apresentam como vantagem uma maior velocidade de execução da montagem, com uma menor mobilização de pessoal, material e equipamentos. Na área de linhas de transmissão, as torres apresentam várias configurações e geometrias, sendo que estruturas autoportantes metálicas são as mais utilizadas.

Estes fatores associados ao desenvolvimento tecnológico, junto com o crescimento populacional em todo mundo, refletiu-se em um incremento amplo da utilização de torres metálicas treliçadas tanto em regiões menos povoadas, assim como em grandes centros urbanos. Agregado a esse desenvolvimento, surge a necessidade de uma maior disponibilidade de fornecimento de energia elétrica, conjeturando na necessidade de ampliação do sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica a fim de suprir os aumentos da carga de consumo.

Do ponto de vista de projeto, as torres metálicas são estruturas relativamente esbeltas e leves (baixo peso próprio), de modo que o vento representa o principal agente na determinação dos carregamentos. Embora seja rotina comum a consideração de tais carregamentos nos procedimentos de cálculo atualmente empregados no meio técnico, ainda

ocorrem colapsos de torres de LT's pelo mundo inteiro, e muitas vezes por razões desconhecidas. Dentro desse contexto, é de grande importância uma adequada estimativa dos carregamentos devidos ao vento, em relação a sua magnitude que depende da região na qual a torre será construída, forma de atuação (modelo físico admitido), geometria da torre (concepção estrutural) e direção de incidência do vento.

1.2 Histórico de Alguns Acidentes

Há vários registros de acidentes com torres de linhas de transmissão no Brasil nos últimos anos, como estes ilustrados na Figura 1.1., sendo a maioria deles associados a ações climáticas. Nesse sentido, a título de informação, relacionamos a seguir alguns registros noticiados sobre o assunto.



Figura 1.1: Exemplos típicos de colapso de torres de linhas de transmissão.

Em novembro de 1997, a queda de 10 torres do sistema de transmissão de Itaipu (LT Foz do Iguaçu-Ivaiporã de 750 kV), provocada pela ação de ventos médios de 130 km/h, acarretou em racionamento de energia para as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do país. O acidente interrompeu a transmissão de 5000 MW ao sistema interligado, obrigando o corte de energia para cerca de 1 milhão de pessoas no Estado de São Paulo (Folha Online, 1997).

Por sua vez em abril de 1998, ventos com mais de 80 km/h derrubaram 7 torres da usina hidrelétrica de Itaipu em Campina da Lagoa (oeste do Paraná) e danificaram duas linhas de transmissão que levam energia para as regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste, as quais foram afetadas, reduzindo em 12% a capacidade de fornecimento para os Estados dessas regiões (Folha Online, 1998).

Em outubro de 2001, a ocorrência de um temporal provocou estragos em 4 torres de transmissão no Sul do país afetando o sistema interligado de transmissão de energia. Duas destas torres de transmissão pertencem a COPEL (Companhia Paranaense de Energia), sendo que uma das torres que caíram transferia energia para o Sudeste do país, reduzindo à metade a capacidade de transmissão da empresa, que é de 1240 MW, para o sistema interligado. As duas outras torres pertencem a ELETROSUL (Empresa Transmissora de Energia Elétrica do Sul do Brasil), que também foi afetada pelas chuvas no mesmo final de semana danificando uma linha de transmissão de 500 kV. Idem ao caso anterior, também uma das torres danificadas transferia energia da região Sul para a região Sudeste. Com a operação paralisada, a empresa deixou de transferir 2000 MW para o Sudeste devido à queda da torre (O&M, 2001).

Já em maio de 2002, no Estado do Mato Grosso do Sul, foi registrado o colapso de 3 torres operadas pela ELETROSUL, as quais foram danificadas por um forte temporal provocando o desarme do sistema e conseqüente corte de fornecimento de energia (O&M, 2002).

Já em outubro de 2002, após forte vendaval, novamente 5 torres metálicas LT que interliga as cidades de Cianorte e Campo Mourão, na região noroeste do Estado do Paraná foram danificadas. Os coordenadores das equipes de manutenção da COPEL estimaram aproximadamente um período de 15 dias para reconstrução das torres e a reativação da linha (O&M, 2002).

Já em fevereiro 2004, por conta de fortes chuvas, duas LT's foram desligadas em caráter de urgência devido ao risco de queda de duas torres, uma de 230 kV da LT Paulo Afonso III-Angelim C4, e outra de 500 kV da LT Sobral III-Fortaleza II, da CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco), na região nordeste do Brasil (O&M, 2004).

Um mês depois (março/2004), dois circuitos da LT Jupiá-Bauru (SP), de 440 kV, da CTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista), ficaram fora de operação, em função da queda de 31 torres, nas proximidades do município de Jupiá (SP), causadas por vendaval, voltando um dos circuitos a operar somente 15 dias depois através de utilização de torres provisórias (O&M, 2004).

Mais recentemente (junho/2005), um vendaval no entorno do município de Cascavel (região Oeste do Paraná), derrubou 9 torres de dois circuitos de 750 kV da LT Foz

do Iguazu-Ivaiporã pertencente a FURNAS Centrais Elétricas, desligando automaticamente o funcionamento de quatro unidades geradoras da usina de Itaipu, reduzindo em 25% a sua capacidade produtiva. As torres danificadas haviam sido recentemente reforçadas para resistir a ventos de 180 km/h (O&M, 2005).

No Estado do Rio Grande do Sul, assim como em outras regiões, também há registros de acidentes com torres de linhas de transmissão. Destes registros, um exemplo típico é o acidente que ocorreu na LT de circuito duplo (230 e 138 kV) da CEEE (Companhia Estadual de Energia Elétrica) entre a Usina Termelétrica Presidente Médici e Quinta, em dezembro de 1979, no qual ruíram 5 torres metálicas, sendo que a torre central do conjunto foi arrancada das suas fundações (BLESSMANN, 2001). Porém, conforme levantamento realizado por MENEZES (1988), em setembro de 1987 colapsaram 13 torres da LT Alegrete 2-Uruguaiana 5 de 230 kV da CEEE, sendo este o maior registro em número de torres danificadas até data daquele levantamento.

1.3 Histórico do Assunto

A utilização de torres metálicas treliçadas como estruturas se intensificou após a Segunda Guerra Mundial, quando um grande número de torres retransmissoras de rádio foram construídas no continente norte-americano. Desde 1950, a realização de um grande número de estudos, em vários países, tem contribuído para agregar aos códigos de norma previsões mais realísticas quanto aos carregamentos devido ao vento sobre tais estruturas. Através destes estudos verificou-se que os carregamentos devido ao vento deviam ser determinados considerando-se um perfil de velocidades (crescente com a altura), o qual depende da velocidade básica do vento, do tipo de terreno e das propriedades dinâmicas da estrutura (BAYAR, 1986).

Indicações históricas sugerem que os primeiros estudos referentes a este assunto foram idealizados por EIFFEL (1911). Os seus estudos se concentraram na determinação de coeficientes de força aerodinâmicos, principalmente focado na questão da influência do alongamento e do ângulo de incidência do vento sobre uma placa retangular plana. Além disso, também realizou estudos em relação ao efeito de proteção entre reticulados, variando unicamente o espaçamento entre os painéis.

Já na década de 30, importantes estudos referentes ao mesmo assunto foram realizados por FLACHSBART, através de extensos ensaios de configurações contemplando reticulados isolados, dois reticulados paralelos e quatro reticulados formando uma torre de seção retangular. Foram ensaiados reticulados planos de várias formas, no qual se variava a disposição dos montantes e/ou diagonais. Inicialmente, foram realizados estudos com modelos seccionais situados entre duas placas paralelas ao vento simulando condições de escoamento bidimensional. Por sua vez, numa segunda série de ensaios, FLACHSBART compilou uma série de curvas mostrando a variação, com o índice de área exposta, da razão entre o coeficiente de arrasto em fluxo tridimensional e bidimensional (FLACHSBART, 1932, *apud* BLESSMANN, 1990). Além disso, a partir de ensaios realizados em conjunto com WINTER (1935, *apud* BLESSMANN, 1990), FLACHSBART também identificou o fenômeno do efeito de proteção dos reticulados situados a barlavento sobre os de sotavento.

Na década de 70, WHITBREAD (1979), trabalhando na mesma linha de pesquisa de FLACHSBART e WINTER (1935), realizou uma série de ensaios adicionais em relação ao efeito de proteção entre reticulados. WHITBREAD conduziu uma série de ensaios em reticulados isolados e em grupo, com até cinco reticulados iguais a fim de avaliar a influência: do índice de área exposta, do afastamento relativo entre reticulados, do número de reticulados e do tipo de barra (cantoneiras ou tubos cilíndricos).

Ainda no final da década de 70, GEORGIU e VICKERY (1979), publicaram um trabalho de grande relevância prática, o qual serviu de referência para elaboração de parte de NBR 6123 na época de sua redação (BLESSMANN, 1990). Estes autores realizaram uma série de estudos acerca do efeito de proteção entre reticulados nos quais buscaram avaliar as influências do ângulo de incidência do vento, do índice de área exposta, do número e espaçamento relativo entre reticulados e da relação de alongamento. Dentre as conclusões apresentadas no trabalho, destaca-se a comparação feita entre os fatores de proteção de algumas normas e os ensaios realizados, a partir dos quais concluíram que haviam discrepâncias muito grandes entre os fatores recomendados pelos códigos de norma e os ensaios experimentais.

BAYAR (1986) realizou uma série de ensaios com modelos seccionais de trechos treliçados (barras de faces planas) de uma torre de seção quadrada em forma de tronco de pirâmide, típico de torres de telecomunicações. A determinação dos coeficientes de arrasto foi realizada, adotando-se como área de referência, a área projetada sobre um plano vertical

perpendicular a direção do vento. Os ensaios foram divididos em três etapas conforme a finalidade do estudo: influência considerando duas configurações de montantes (cantoneira simples e dupla), variação na magnitude do arrasto considerando escoamento bidimensional e tridimensional e influência da incidência não horizontal do vento médio (morros) através da inclinação do eixo principal do modelo com a vertical. Com base nos resultados obtidos, foi proposto um equacionamento para estimativa prática da magnitude do coeficiente de arrasto em função do índice de área exposta do módulo treliçado considerado.

HOLDO, em 1992, usando um modelo de torre treliçada de seção quadrada de dupla simetria investigou para diferentes ângulos de incidência do vento, a influência do número de *Reynolds* sobre o coeficiente de arrasto para escoamento suave e turbulento. Com base nesses ensaios, HOLDO sugeriu para escoamento suave valores de *Re* superiores a 1800. Por sua vez, para a condição de escoamento turbulento foi verificado que o aumento da intensidade de turbulência influenciava a magnitude do coeficiente de arrasto até um valor limite de *Re* em torno de 2200, passando a se manter praticamente invariável para valores acima deste patamar. Além disso, o autor ainda propôs uma equação para cálculo do coeficiente de arrasto em função do número de *Reynolds* para qualquer ângulo de incidência do vento.

MACHADO (2003), em seu trabalho de Mestrado, estudou um modelo seccional de seção quadrada, referente a um trecho de uma torre treliçada de telecomunicações, realizando uma série de ensaios em regime de escoamento suave e turbulento, cujos resultados indicaram diferenças insignificantes em termos de resposta entre os dois regimes de escoamento. Além disso, também investigou a variação do nível de proteção considerando: (a) afastamentos relativos distintos entre os diversos reticulados; (b) três valores de índices de área exposta distintos. Por fim, ainda ensaiou um modelo seccional (seção quadrada) para o qual determinou os correspondentes coeficientes aerodinâmicos (arrasto, sustentação, torção).

Mais recentemente, KLEIN (2004), na elaboração de sua dissertação de Mestrado, apresentou um estudo que consistiu em três etapas: estudo do comportamento de perfis cantoneira isolados, verificando a influência da forma das arestas (viva ou boleada) e da escala de turbulência na determinação das forças devidas ao vento; efeitos de proteção para perfis isolados, uma vez que a NBR 6123/88 fornece indicações somente para grupos de reticulados; ensaio de módulos de torres de seção quadrada e triangular, através da determinação dos coeficientes de arrasto para posterior comparação com a NBR 6123/88.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Atualmente, no Brasil existem duas normas da ABNT que apresentam diretrizes para a estimativa de forças devidas ao vento em estruturas treliçadas:

- a) Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica (NBR 5422/1985): fixa as condições básicas para projeto de linhas áreas de transmissão de energia elétrica, para o qual fornece um procedimento específico para o cálculo das cargas de vento que atuam sobre estruturas treliçadas;
- b) Forças Devidas ao Vento em Edificações (NBR 6123/1987): fixa as condições exigíveis na consideração das forças devidas à força estática e dinâmica do vento, para fins de cálculo de edificações. Dentro desse contexto, fornece diretrizes para se determinar as cargas de vento em torres dentro de um contexto mais geral.

Entretanto, as recomendações e os coeficientes constantes nestas normas para fins de projeto de linhas de transmissão são, a rigor, aplicáveis somente a estruturas que apresentam faces aproximadamente verticais e de seção transversal quadrada ou triangular equilátera, com treliçamentos iguais em todas as faces.

Partindo desta contextualização procurou-se neste trabalho, dentro de um âmbito mais geral, determinar o arrasto aerodinâmico de componentes típicos de estruturas treliçadas de linhas de transmissão, tais como mísulas, vigas, deltas, troncos e pernas, visando o aprimoramento do cálculo das forças exercidas pelo vento sobre estas estruturas. Ficou então estabelecido que a determinação do arrasto aerodinâmico dar-se-ia através da realização de ensaios de duas torres típicas de suspensão (figuras 1.2 e 1.3), utilizadas por FURNAS Centrais Elétricas em alguns de seus sistemas de transmissão.

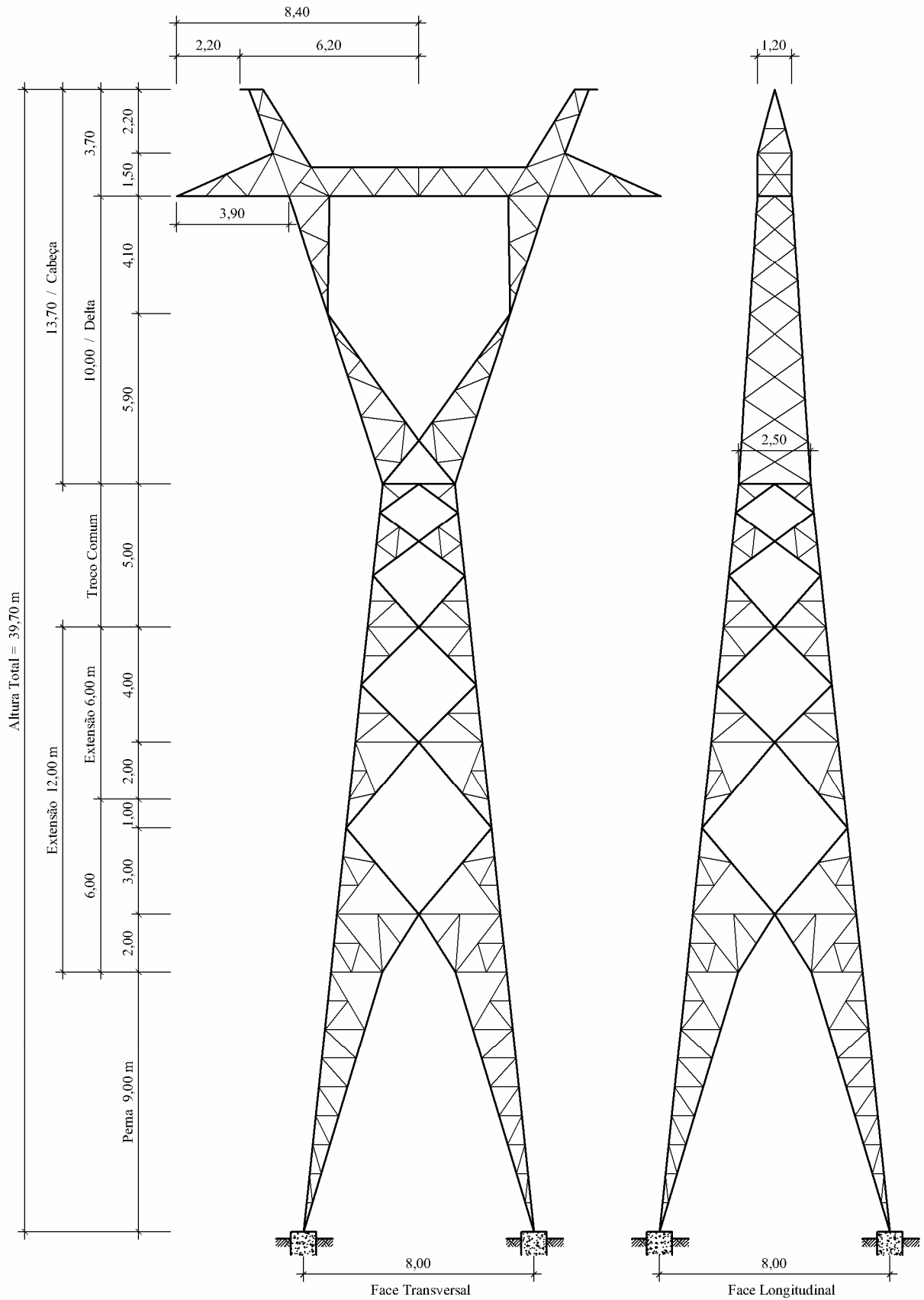


Figura 1.2: Silhueta da torre quadrada autoportante A33 (dimensões em metros).

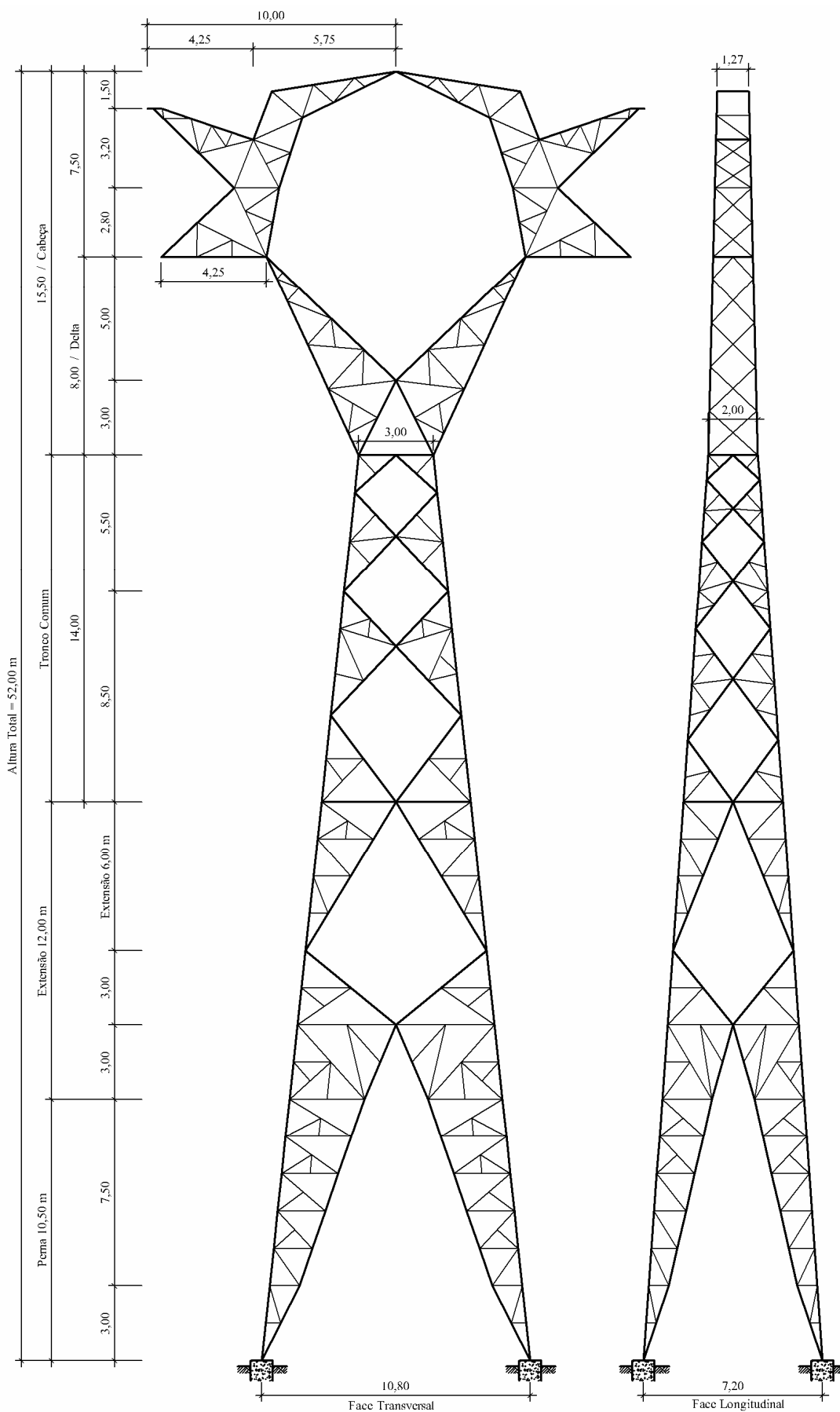


Figura 1.3: Silhueta da torre quadrada autoportante A55 (dimensões em metros).

A primeira torre, identificada por Torre A33, é uma torre autoportante de seção quadrada do tipo “delta”, usada em sistemas de transmissão de 345 kV. Esta apresenta treliçamento igual nas quatro faces e as medições foram determinadas para os ângulos de incidência do vento de 0°, 45° e 90° com relação ao eixo da linha. Por sua vez, a outra torre, Torre A55, é uma torre autoportante de seção retangular do tipo “cabeça de gato”, adequada para operar em sistemas de 500 kV, tendo-se realizado as medições para os ângulos de incidência do vento referentes a 0°, 30°, 56° e 90°.

1.4.2 Objetivos Específicos

Maiores níveis de segurança e confiabilidade são atingidos quando a consideração criteriosa dos efeitos do vento é feita a partir da etapa de concepção sendo, geralmente, este o processo de menor custo e de maior eficiência. Dentro deste contexto, ocorrem incertezas associadas a vários fatores conforme segue:

- a) parâmetros meteorológicos associados a estimativa da velocidade básica, rugosidade do terreno, tratamento estatístico dos dados de vento e extrapolação destes à região (local) da LT;
- b) resistência mecânica dos materiais e das ligações (aparafusadas ou soldadas), montagem das estruturas e análise estrutural das torres;
- c) modelo físico para estimativa qualitativa e quantitativa dos carregamentos com base em algum critério de área exposta e um coeficiente de arrasto associado.

Ainda dentro deste mesmo contexto, sabe-se que o modelo físico adotado para aplicação dos carregamentos difere do real, seja pela forma de atuação (cargas concentradas em determinados níveis), ou pela complexidade para estimativa da interação entre fluido-estrutura (área exposta ao vento, efeitos de proteção). Nesse sentido, partindo do objetivo geral proposto, porém agora em um âmbito mais direcionado, procurou-se focar basicamente os seguintes objetivos específicos na execução do trabalho:

- a) desenvolver e aperfeiçoar instrumentos e técnicas de medição de coeficientes de arrasto aerodinâmico em túnel de vento, que sejam adequadas para estes tipos de estruturas;

- b) verificar a aplicabilidade dos critérios de estimativa do carregamento devido ao vento sobre módulos (trechos) de estruturas reticuladas, tais como mísulas, vigas, deltas, troncos e pernas, especialmente naqueles segmentos de geometria não regular, visando aprimorar o cálculo das forças exercidas pelo vento sobre tais estruturas;
- c) propor coeficientes de arrasto compatíveis com as geometrias das diversas partes das torres utilizadas em LT's, servindo de subsídio para a revisão das Normas Brasileiras NBR 5422 (Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica) e NBR 6123 (Forças Devidas ao Vento em Edificações). A fim de visualizar o nível de dispersão associado aos coeficientes experimentais, estes estarão sobrepostos aos ábacos ($\varphi \times C_a$) das Normas Brasileiras, como função do índice de área exposta (φ) determinado para cada trecho;
- d) comparar os resultados das medidas experimentais (forças medidas no túnel) com os carregamentos (forças calculadas) usados no dimensionamento das torres, extraídos das memórias de cálculo das estruturas obtidas junto a concessionária FURNAS Centrais Elétricas;
- e) comparar os valores dos coeficientes experimentais com os valores propostos por outras normas e referências da literatura, em função do índice de área exposta previsto para o trecho;
- f) empregando coeficientes de arrasto experimentais, verificar a aplicabilidade do equacionamento previsto para o vento oblíquo conforme a NBR 5422/85.

2 AÇÃO DO VENTO COMO CARREGAMENTO

2.1 Características Gerais do Vento

2.1.1 Aspectos Gerais

A irradiação de calor da superfície terrestre para a atmosfera somado ao calor absorvido diretamente pela atmosfera (numa parcela menor) provoca variações locais na temperatura do ar, assim como um aquecimento não uniforme da terra. Estas diferenças causadas na pressão atmosférica originam o movimento do ar, que consiste no deslocamento de parcelas do ar atmosférico das zonas de maior pressão para as de menor pressão, caracterizando o vento atmosférico ou vento natural. Em linhas gerais, podemos dizer que o vento natural consiste de um escoamento de ar médio ao qual se superpõem flutuações de velocidade, conhecidas por rajadas (BLESSMANN, 1988, 1995).

A região na qual o vento é influenciado pela topografia do terreno, da forma, dimensões e distribuição dos obstáculos naturais (morros, vegetação, etc.) e artificiais (edificações em geral) e da variação da temperatura (direção vertical) é chamada de camada limite atmosférica.

2.1.2 Tipos de Fenômenos Meteorológicos

Considerando o vento como o agente principal dos carregamentos que atuam sobre as LT's, procurou-se nos subitens seguintes detalhar e caracterizar alguns fenômenos meteorológicos. Destes, há alguns que ainda ocorrem em menor frequência como os tornados. Em contrapartida, as tormentas EPS e TS são bem mais frequentes. Às tormentas TS, de acordo com RIERA (2002), são atribuídos a maioria dos acidentes provocados pelo vento em LT's.

Ainda segundo RIERA (2002), na Região Sul do Brasil, de cada cinco registros de velocidades máximas, quatro estão associados a tormentas EPS e em extensas áreas do

Centro-Sul e Sul do Brasil, aproximadamente um em cada cinco registros da velocidade máxima anual do vento é causado por uma tormenta TS.

2.1.2.1 Tormentas EPS

Também conhecidas por ciclones extratropicais, as tormentas EPS (*extended pressure systems* / sistemas extensos de pressão) caracterizam-se por movimentos circulatorios de ar em torno de centros de baixa pressão, originados devido a ação mecânica de cadeias de montanhas sobre correntes atmosféricas de grandes dimensões ou devido a interação de massas de ar ao longo de frentes (BLESSMANN, 1995), tendo como principais características:

- a) atmosfera verticalmente estável;
- b) velocidade média aproximadamente constante durante a ocorrência da tormenta;
- c) a duração da tormenta é grande em relação ao período fundamental do sistema estrutural de interesse, variando de algumas horas até alguns dias;
- d) a área abrangida pela tormenta alcança grandes dimensões (ordem de centenas de quilômetros quadrados).

2.1.2.2 Tormentas TS

Da sigla TS (*thunderstorms*) origina a designação tormentas elétricas, as quais são caracterizadas por uma atmosfera verticalmente instável (gradiente térmico vertical considerável), resultando em uma corrente descendente sobre a superfície terrestre oriunda do núcleo de nuvens tipo cumulonimbus (nuvens densas e muito altas). As tormentas TS podem se desenvolver a partir da caracterização de três estágios distintos:

- a) elevação de ar quente e úmido (aproximadamente 8000 m), com formação de nuvens cúmulos, sendo a temperatura do ar circundante menor que a do ar ascendente;
- b) transformação da nuvem cúmulos em cumulonimbus (aproximadamente 12000 m), com formação de gotas de água, cristais de neve e partículas de gelo

devido às baixas temperaturas nessa altitude. Devido ao desequilíbrio entre os elementos mais densos com o ar ascendente dá-se o início da precipitação, formando-se assim uma forte corrente descendente, acompanhada de chuva ou granizo, com duração de uns 5 a 30 minutos;

- c) as correntes descendentes aumentam em área transversal a passam a fazer parte de toda a nuvem, entretanto, como não existe mais ar quente e úmido subindo, a precipitação diminui e cessa (BLESSMANN, 1995).

A denominação usual de tormenta elétrica surge das descargas elétricas produzidas entre as nuvens ou entre nuvens e o solo, resultantes da diferença de potencial induzida pela fricção entre as partículas sólidas descendentes com o ar circundante. As descargas elétricas constituem um elemento importante na identificação do tipo de tormenta causativa do vento.

2.1.2.3 Linhas de Tormentas

Quando o movimento rápido de uma frente fria encontra uma massa de ar quente, úmido e de acentuada instabilidade formam-se as denominadas linhas de instabilidade (*squall lines*), que podem também ser causa de tormentas violentas com ventos muito fortes. RIERA (2002) sugere que o escoamento nas linhas de tormenta é similar ao observado nas tormentas TS, com uma nuvem cumulonimbus deslocando-se rapidamente devido a ação do vento de fundo provocado pela frente fria.

As linhas de tormenta atuam como linhas de instabilidade de grande extensão na direção transversal à direção de movimento de uma frente fria, com tormentas em diversos estágios de desenvolvimento (BLESSMANN, 1995)

2.1.2.4 Tornados

Os tornados são movimentos ciclônicos que concentram grande energia em uma região relativamente pequena. Caracterizam-se por apresentar a forma de um funil, que se estende a partir da base da nuvem até a superfície terrestre, sendo visível devido às partículas de materiais levantadas do solo e pelo vapor de água condensado. O diâmetro de um tornado situa-se geralmente entre 100 e 3000 m. A componente horizontal da velocidade tangencial

pode superar os 110 m/s O desenvolvimento de um tornado ocorre a partir de duas condições meteorológicas:

- a) fortes células convectivas, geralmente tormentas elétricas frontais;
- b) ventos fortes no topo da célula.

A inércia do vento agindo no topo da célula atrai o ar para cima reduzindo a pressão estática no núcleo da célula. A força centrífuga expulsa o ar do centro de rotação gerando, de cima para baixo, uma nuvem em forma de funil, que da origem ao movimento giratório. O núcleo funciona também como uma chaminé onde ocorrem correntes ascendentes de ar com velocidades de até uns 80 m/s. Os tornados, como as tormentas TS, podem se formar isoladamente ou em grupos (*clusters*), sendo a última situação a mais frequente (RIERA, 2002).

2.1.2.5 Ventos regionais

São ventos com características peculiares, fortemente influenciadas pela orografia (características das montanhas) ou condições locais. Exemplo deste vento é o *Zonda*, que acontece no fim do inverno ou início da primavera nas regiões da pré-cordilheira dos Andes, na Argentina. A orientação é norte-sul, sendo um vento quente e seco, possivelmente produzido por causas semelhantes às que produzem o *Föhn* no norte da África e na costa mediterrânea da Europa, afetando até os vales alpinos. No Brasil, a região de Santa Maria, no RS, está sujeita a ventos semelhantes aos acima mencionados (RIERA, 2002).

2.1.2.6 Ciclones Tropicais

Os ciclones tropicais são semelhantes aos ciclones extratropicais, porém são mais intensos e mais localizados. Formam-se a partir de uma depressão de forma alongada, para a qual convergem tormentas tropicais, dando início ao movimento de rotação da massa de ar em torno de um núcleo.

Os ciclones tropicais se formam nas regiões dos oceanos próximas ao Equador, entre as latitudes 5° e 30°, em que a temperatura da água excede os 27°C. Nessas latitudes a força de *Coriolis* (massas de ar em movimento em relação à superfície da Terra,

BLESSMANN, 1995) pode ser significativa e dar início ao movimento circulatório do ar. O ar quente e úmido é levado para o centro de circulação, forçando a ascensão do ar, até este se expandir e esfriar, com o qual grande quantidade de vapor de água é condensado. O processo continua enquanto houver uma fonte de ar quente e úmido. No Brasil há poucas ocorrências documentadas sobre ciclones tropicais, cujo registro mais importante refere-se ao furacão Catarina, ocorrido em março de 2004 no Sul do Brasil, o qual atingiu a velocidade de 180 km/h, tendo sido o primeiro furacão oficialmente registrado no Brasil.

2.2 Carregamentos em Estruturas Reticuladas Devido ao Vento

2.2.1 Ações que Geram Carregamentos

Na elaboração de um projeto para uma linha de transmissão procura-se ponderar as diversas cargas que venham compor as hipóteses de carregamentos sobre a linha de transmissão (torres e cabos).

Tais hipóteses de carregamentos estão associadas a cargas de peso próprio (torre, ferragens, isoladores, cabos condutores e pára-raios) e cargas externas, tais como as operações de construção (montagem) da linha, carga transversal devido à deflexão do eixo da linha, carga longitudinal devido ao desbalanço da tração nos cabos (condutores e pára-raios), carga de torção devido à ruptura de cabos e vento transversal sobre torres e cabos, sendo esta a ação climática preponderante para elaboração dos projetos no Brasil.

2.2.2 Ação do Vento em Torres Reticuladas

Conforme BLESSMANN (1990), podemos definir como reticulado toda estrutura constituída por barras retas, podendo-se determinar a ação do vento tanto a partir das ações sobre cada barra considerada isoladamente assim como sobre o conjunto de barras.

O estudo mais racional da ação do vento através da aerodinâmica tem permitido chegar a formas mais aerodinâmicas. Dentro deste contexto, são levados em consideração vários fatores em nível de projeto para uma correta determinação do carregamento do vento em torres reticuladas (treliçadas), entre os quais podemos citar:

- a) o alteamento da torre referente a relação altura/largura da mesma, a fim de verificar a condição de fluxo bidimensional ou tridimensional em torno da estrutura;
- b) o índice de área exposta (φ) referente a relação entre a área efetiva líquida do reticulado (A_e), e a área total de contorno (A_c), a qual corresponde a área limitada pelas bordas do reticulado da torre;
- c) forma das barras isoladas, uma vez que barras de geometria arredondada, possuem dependência do número de *Reynolds* (Re), assim como da rugosidade da superfície destes elementos, enquanto que em barras prismáticas de cantos vivos, os efeitos associados ao número de *Reynolds* e à rugosidade são minimizados, podendo serem, na maioria das vezes, desprezados nos cálculos;
- d) efeito de proteção de reticulados a barlavento exercido sobre reticulados a sotavento;
- e) orientação da estrutura reticulada em relação ao ângulo de incidência do vento;
- f) inclinação das barras da torre, devido a sua influência na determinação do alongamento, uma vez que a maioria das torres treliçadas de linhas de transmissão possuem seções que variam com a altura. Este parâmetro, atualmente, representa ainda uma incerteza, pois não se dispõe de um estudo que apresente a interferência desta inclinação no carregamento do vento;
- g) turbulência contida no escoamento. Conforme estudos realizados por SIMIU e SCANLAN (1996), o efeito da turbulência sobre a magnitude da força de arrasto em estruturas constituídas de barras prismáticas de cantos vivos é relativamente pequeno na maioria dos casos práticos, podendo assim ser desconsiderado.

A literatura faz referência a alguns métodos para consideração da ação do vento em torres treliçadas, assim como para a estimativa do coeficiente de força aerodinâmico, dos quais são apresentados e comentados dois processos (LOREDO-SOUZA, 1996), conforme segue:

- a) através da determinação separada do carregamento sobre cada elemento do reticulado da torre, somando-se as forças individuais de todos os elementos para obter a força total, implicando na necessidade de se conhecer as

propriedades geométricas de cada elemento, assim como do seu correspondente coeficiente de força aerodinâmico. Contudo, para uma estrutura treliçada típica (torre), constituída de diversos elementos (barras prismáticas), este é um processo bastante dispendioso;

- b) através da divisão da estrutura da torre em trechos reticulados (módulos), determinando-se as forças de arrasto sobre estas partes. A força total é obtida a partir da soma das forças parciais, porém de uma maneira mais prática e rápida em relação ao processo descrito no item (a), sendo que o presente estudo foi conduzido com base nesta metodologia.

2.2.2.1 Efeitos de Proteção

Sempre que dispomos de barras ou painéis reticulados que estejam alinhados em relação à direção média do escoamento, têm-se efeitos de interferência à passagem do vento. No caso de torres treliçadas (reticulados de planos múltiplos), é necessário se considerar estes efeitos de proteção do reticulado de barlavento sobre o de sotavento na determinação do arrasto aerodinâmico, conforme ilustrado na Figura 2.1. Deve-se sempre procurar ponderar este efeito, independentemente do método utilizado para a determinação do coeficiente de arrasto.

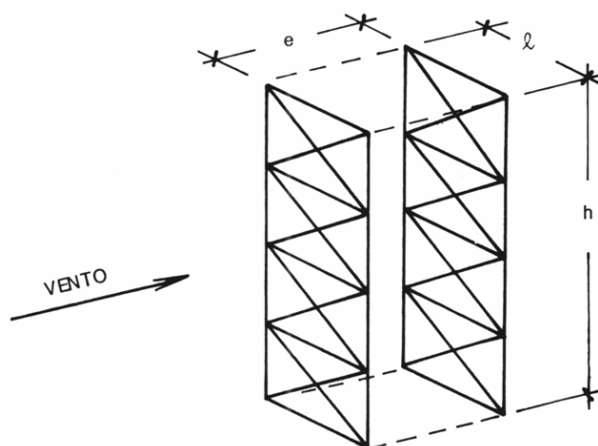


Figura 2.1: Efeitos de proteção do reticulado de barlavento sobre o de sotavento na determinação do arrasto aerodinâmico BLESSMANN (1990).

Os pesquisadores procuram quantificar numericamente este efeito através de um parâmetro denominado fator de proteção (η), o qual indica o quanto um reticulado situado à barlavento protege os demais situados na esteira. Sendo que a sua estimativa depende do

índice de área exposta (φ) do reticulado situado na face de barlavento da torre em estudo e do respectivo afastamento relativo (e/h) entre os painéis.

Vários estudos, em especial aqueles realizados por FLACHSBART (1932), que serviram de base para estudos posteriores, demonstraram que a incidência perpendicular do vento ao plano do reticulado cria uma zona de proteção na região à sotavento. Entretanto, esta proteção tenderá a diminuir na medida em que aumentar o afastamento (e) entre os dois painéis e/ou na medida em que houver redução da área efetiva.

2.2.2.2 Dependência do Número de *Reynolds*

Sempre que são realizados estudos que envolvam escoamento de fluidos, um parâmetro adimensional muito importante a ser controlado e avaliado é o número de *Reynolds* (Re), uma vez que valores muito baixos deste parâmetro podem afetar a magnitude e validade dos resultados das medições. Este parâmetro relaciona as forças de inércia com as forças viscosas, podendo ser expresso através da Equação 2.1.

$$Re = \frac{V l}{\nu} \quad (\text{Equação 2.1})$$

onde, a variável V representa a velocidade média do vento, l é uma dimensão característica e ν a viscosidade cinemática do ar, a qual varia com a temperatura T (em Celsius), de modo que a sua estimativa foi obtida a partir da expressão (Equação 2.2) recomendada por BLESSMANN (1990), a qual é válida para temperaturas situadas no intervalo de -10°C a $+60^{\circ}\text{C}$, com erro inferior a 1%, e cuja unidade também é dada por m^2/s .

$$\nu = (13 + 0,1T) \times 10^{-6} \quad (\text{Equação 2.2})$$

Durante a execução dos ensaios, o número de *Reynolds* oscilou aproximadamente entre 3400 e 10000 para a Torre A33 e 3300 a 8200 no caso da Torre A55, intervalo de valores considerados adequados para escoamento suave, conforme verificado por HOLDO (1992) em seus estudos acerca do assunto.

2.2.3 Coeficientes de Força para Torres Reticuladas

As torres aqui estudadas são constituídas por elementos de arestas vivas e, portanto, são pouco sensíveis ao parâmetro adimensional denominado número de *Reynolds* (Re), definido pela Equação 2.1, o qual influencia a forma do escoamento e, conseqüentemente, a distribuição de pressões e a força exercida sobre o sólido imerso no escoamento.

Partindo dessa premissa, tem-se que para uma determinada dimensão característica, Re depende fundamentalmente da velocidade, ou seja, quando se varia a velocidade, Re sofre uma variação equivalente, isto é, a velocidade do escoamento definida para os ensaios deve ter pouca influência sobre os coeficientes de arrasto, conforme é ilustrado na Figura 2.2.

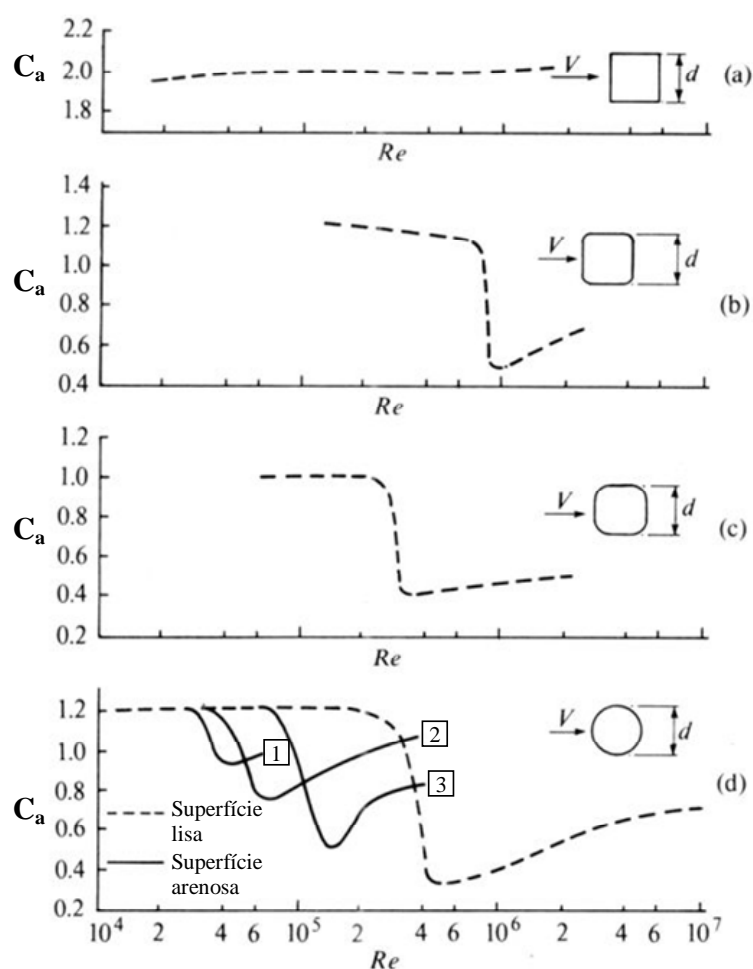


Figura 2.2: Influência da variação do número de *Reynolds* sobre o coeficiente de arrasto de acordo com a forma da seção transversal. (a) $r/d = 0,021$; (b) $r/d = 0,167$; (c) $r/d = 0,333$; (d) $r/d = 0,5$ (seção circular).

A Figura 2.2 mostra a influência de *Reynolds* considerando a forma da arresta (r/d) e também a rugosidade da superfície, avaliada a partir da razão k/d , onde k representa a dimensão de um grão de areia (SCRUTON, 1981). Assim, os números 1 ($k/d = 0,002$), 2 ($k/d = 0,07$) e 3 ($k/d = 0,02$) da Figura 2.2.(d) representam diferentes rugosidades da superfície da seção circular e têm efeito semelhante ao de uma variação da turbulência no escoamento incidente. Deste modo, procurando-se confirmar a pressuposta independência de Re , foram realizadas medidas de arrasto para diferentes níveis de velocidade do escoamento.

Um conceito fundamental para a análise aerodinâmica de estruturas treliçadas é o de índice de área exposta, representado pela letra grega φ . Conforme a Equação 2.3, este parâmetro é definido como a razão entre a área frontal efetiva do reticulado, A_e , e a área frontal total da superfície limitada pelo contorno do reticulado, A_c , de modo que a sua magnitude varia entre 0 e 1, onde esse último valor representa uma estrutura totalmente sólida (placa).

$$\varphi = \frac{A_e}{A_c} \quad \text{(Equação 2.3)}$$

No presente estudo, o vento foi considerado como agindo perpendicularmente ao eixo das barras de treliça, sendo que a força, por ele exercida, chamada de força global (F_g), também será perpendicular a este eixo. Todavia, na prática esta força global não coincide com a direção do vento, logo a mesma pode ser decomposta em uma componente na direção do vento e a outra perpendicular a esta direção, designadas respectivamente por força de arrasto (F_a) e força lateral (F_l) (BLESSMANN, 1990).

As forças de arrasto sobre os módulos das torres são determinadas através do ensaio de modelos seccionais em túnel de vento, os quais são instalados sobre uma base, sendo esta, por sua vez, acoplada a uma balança de força. A força total média obtida, F_a , é então dividida pela pressão dinâmica de referência, q , e pela área frontal efetiva, A_e (área de referência, A_{ref}), obtendo-se o coeficiente de arrasto C_a , definido na Equação 2.4, que correspondente à força resultante total medida na direção do vento, denominada neste caso de força de arrasto. Para a correta determinação de C_a , a força de arrasto média é dada em newtons (N), a A_e em metros quadrados (m^2) e a pressão dinâmica de referência em pascais

(Pa), sendo esta igual $q = \frac{1}{2} \rho V^2$, onde ρ é massa específica do ar (kg/m^3), V a velocidade média de referência (m/s) na metade da altura do módulo considerado.

$$C_a = \frac{F_a}{q A_e} \quad (\text{Equação 2.4})$$

O coeficiente de arrasto é então associado com o correspondente índice de área exposta do correspondente módulo testado, tornando-se adequado para fins de codificação. O processo automaticamente inclui efeitos de proteção causados pelos elementos a barlavento sobre outros elementos a sotavento localizados em suas esteiras. BLESSMANN (1990) aplicando esse processo realizou um estudo comparativo (Figura 2.3) para uma torre reticulada de seção transversal quadrada, no qual apresenta diversos coeficientes de arrasto obtidos conforme algumas normas (brasileira NBR 6123/1988, alemã DIN 4131/1969 e francesa NV 65/1980) e indicações de outros pesquisadores do assunto. Mais recentemente, BLESSMANN (2001) em outra publicação de trabalho, relata e comenta uma série de acidentes com torres de estrutura reticulada, devido à adoção de coeficientes aerodinâmicos impróprios.

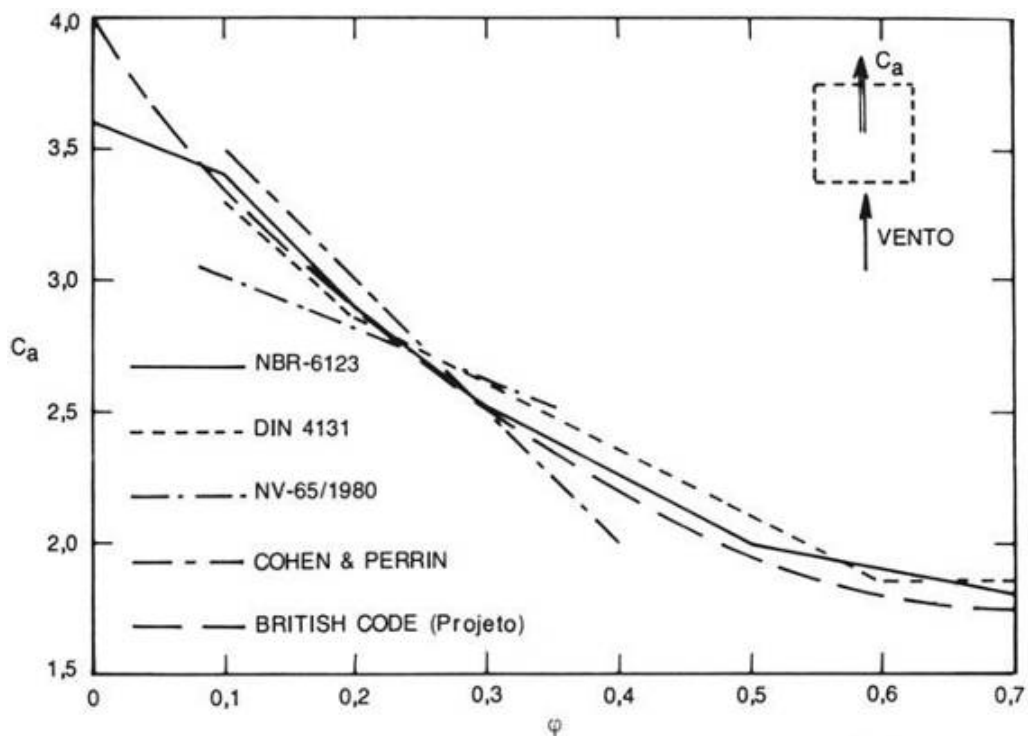


Figura 2.3: Coeficiente de arrasto em torres reticuladas de seção quadrada BLESSMANN (1990).

Os valores dos coeficientes de arrasto (C_a) apresentados em normas e relatórios valem somente para a forma geométrica específica do módulo da torre ensaiado e dependem diretamente do valor da área efetiva (A_e) adotada como referência para o cálculo de C_a . Nesse sentido, verifica-se que é de suma importância que a determinação do valor de A_e seja feita de uma forma adequada, usando um critério coerente, uma vez que a mesma é usada para a recomposição dos carregamentos sobre a torre a partir dos valores de C_a disponíveis.

2.2.4 Métodos Teóricos de Cálculo

Sistemas de linhas de transmissão têm o vento como um de seus principais carregamentos. O carregamento do vento ao longo de uma estrutura consiste de uma componente média devido à ação da velocidade média do vento e de uma componente flutuante devido às flutuações da velocidade do vento em torno da média. Deste modo, o carregamento induzido sobre uma estrutura pode apresentar uma componente média (estática), uma componente flutuante não ressonante (*background response*) e uma componente flutuante ressonante (dinâmica). A resposta de uma estrutura sujeita ao carregamento do vento é ilustrada na Figura 2.3.

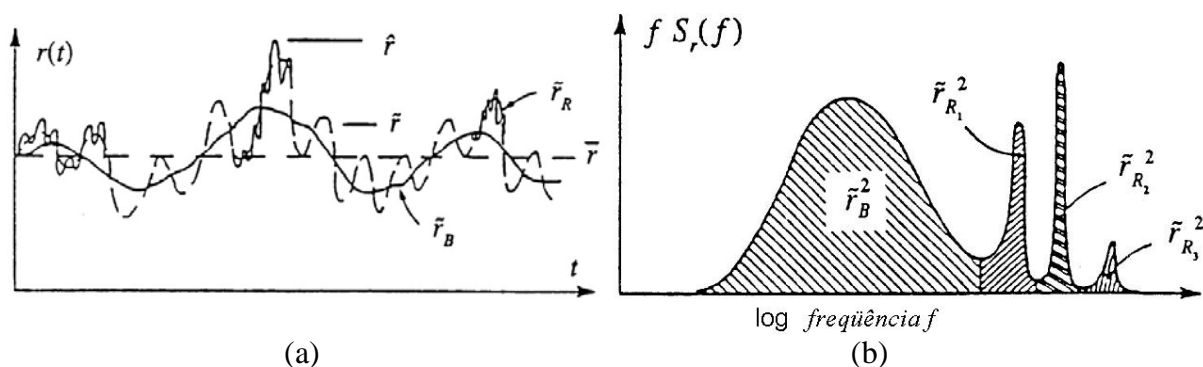


Figura 2.4: Resposta típica de estruturas ao vento; (a) Histórico no tempo; (b) Espectro de potência (LOREDO-SOUZA, 1996).

A Figura 2.3 representa de maneira esquemática a resposta de uma estrutura à ação do vento, decomposta em suas componentes média e flutuantes, bem como o espectro genérico da resposta (forma como a energia da resposta flutuante se distribui com relação à frequência) correspondente. A resposta de estruturas sob a ação do vento pode envolver uma ampla variedade de ações estruturais, incluindo forças resultantes, momentos fletores em seções críticas de membros, tensões em cabos, ou até mesmo deslocamentos e acelerações (DAVENPORT, 1988). Uma importante ferramenta de análise da resposta é o uso de funções ou linhas de influência, tal como se observa nos métodos a seguir citados.

2.2.4.1 Método Estatístico Usando Linhas de Influência

Em função da variedade de respostas estruturais é possível descrever os efeitos do carregamento do vento atuando na estrutura através do uso das linhas de influência. DAVENPORT (1993), utilizando este conceito, simplificou o processo para calcular o fator de rajadas de estruturas esbeltas como torres, pontes e estruturas suspensas. Neste método ele considerou um coeficiente de arrasto médio constante ao longo da altura.

LOREDO-SOUZA (1996), desenvolvendo o método de Davenport, considerou a variação dos coeficientes de arrasto e do índice de área exposta da torre ao longo da altura. O método mostra que a resposta instantânea em um dado ponto da estrutura devido à força do vento pode ser expressa pela Equação 2.5.

$$r(t) = F(z, t) i_r(z) dz \quad (\text{Equação 2.5})$$

onde, $F(z, t)$ é a força lateral instantânea na elevação z e no tempo t e $i_r(z)$ é o valor da linha de influência da resposta requerida (momento, cortante, etc). O desenvolvimento, em detalhe, das respostas média, não ressonante e ressonantes pode ser visto na Tese de LOREDO-SOUZA (1996), para qual apresentaremos, na seqüência, um breve resumo.

2.2.4.1.1 Resposta Média

A resposta média da estrutura, considerando o vento constante é dada por:

$$\bar{r} = \frac{1}{2} \rho_a \bar{V}_H^2 \int_0^H \left(\frac{z}{H} \right)^{2p} C_a(z) \varphi(z) w(z) i_r(z) dz \quad (\text{Equação 2.6})$$

onde, H é a altura da torre; $C_a(z)$ é o coeficiente de arrasto em função da elevação z ; $w(z)$ é a largura da torre em função da elevação z ; $\varphi(z)$ é o índice de área exposta em função da elevação z ; \bar{V}_H é a velocidade média na altura de referência H e p é o expoente de lei potencial.

2.2.4.1.2 Resposta Não Ressonante

É tomado como a resposta quadrática média “quasi-estática” para correlação parcial do carregamento flutuante, sendo expressa por:

$$\tilde{r}_B = \sqrt{\rho_a^2 \sigma_v^2 \bar{V}_H^2 \int_0^H \int_0^H C_a(z) C_a(z') \varphi(z) \varphi(z') \left(\frac{z}{H}\right)^p \left(\frac{z'}{H}\right)^p e^{-(\Delta z/L_v)} i_r(z) i_r(z') w(z) w(z') dz dz'} \quad (\text{Equação 2.7})$$

onde, σ_v^2 é a variância; z e z' são a altura acima do solo, de modo que $\Delta z = |z-z'|$; L_v são a escala vertical longitudinal da turbulência; $C_a(z')$ é o coeficiente de arrasto função da elevação z' ; $w(z')$ é a largura da torre função da elevação z' ; $\varphi(z')$ é o índice de área exposta também função da elevação z' e $i_r(z')$ é o valor da linha de influência da resposta na altura z' .

2.2.4.1.3 Resposta Ressonante

A resposta ressonante para efeitos locais (cortante, momento fletor, etc.) é definida através da Equação 2.8:

$$\tilde{r}_{Rj} = \sqrt{\frac{\pi f_j \cdot S_{Qj}(f_j)}{4 (\zeta_{aer} + \zeta_e)} \frac{\int_0^H m(z) \omega_j^2 \mu_j(z) i(z) dz}{\int_0^H m(z) \omega_j^2 \mu_j^2(z) dz}} \quad (\text{Equação 2.8})$$

onde, f_j é a frequência natural no j -ésimo modo de vibração; $S_{Qj}(f_j)$ é o espectro de força generalizada em função da frequência natural no j -ésimo modo de vibração; ω_j é a frequência angular de vibração no j -ésimo modo de vibração e $\mu_j(z)$ é a coordenada modal na altura z no j -ésimo modo.

2.2.4.1.4 Resposta Total

Para o projeto estrutural nos interessa obter a resposta dinâmica total ou de pico que pode ser obtida a partir da Equação 2.9:

$$\hat{r} = \bar{r} + g_s \cdot \tilde{r} \quad (\text{Equação 2.9})$$

onde, \bar{r} é a resposta média no tempo; \tilde{r} é o valor *rms* da resposta flutuante e g_s é o fator estatístico de pico, geralmente varia de 3 a 4. A resposta flutuante total \tilde{r} (valor *rms*) é dada expressa por:

$$\tilde{r} = \sqrt{\tilde{r}_B^2 + \sum_j \tilde{r}_{Rj}^2} \quad (\text{Equação 2.10})$$

E ainda o fator de pico estatístico g_s , o qual é dado pela Equação 2.11.

$$g_s = \sqrt{2 \ln(vt)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(vt)}} \quad (\text{Equação 2.11})$$

O tempo T é estimado em torno de 1200 s a 3600 s e a taxa de ultrapassagem v é estimada através da Equação 2.12.

$$v^2 = \frac{\sum f_j^2 \tilde{r}_{Rj}^2}{\tilde{r}_B^2 + \sum \tilde{r}_{Rj}^2} \quad (\text{Equação 2.12})$$

2.2.4.2 Método do Fator de Velocidade de Rajada

O presente método de projeto de estruturas de linhas de transmissão é amplamente baseado na hipótese de um comportamento estático da estrutura. Um determinado padrão de carregamento do vento é admitido, geralmente com um perfil de velocidades variando segundo uma lei potencial, de modo que os coeficientes de força aerodinâmicos são determinados, e as correspondentes pressões calculadas. A velocidade de pico do vento utilizada pode ser estimada segundo a Equação 2.13.

$$\hat{V} = \bar{V} + g_s \sigma_v \quad (\text{Equação 2.13})$$

No método do fator de velocidade de rajada (FVR), a velocidade média horária do vento é multiplicada por um fator de rajada e , portanto, a correspondente pressão média pelo quadrado deste.

2.2.4.3 Método do Fator de Resposta de Rajada

O presente método, proposto por DAVENPORT (1979), é uma tentativa de considerar os efeitos dinâmicos na resposta das estruturas de linha de transmissão. Razão pela qual, o mesmo foi incorporado às recomendações da ASCE (1991) para o carregamento de estruturas de transmissão, porém com a componente ressonante negligenciada. A abordagem é baseada em métodos estatísticos os quais levam em conta a correlação espacial e o espectro de energia da velocidade do vento e a resposta dinâmica do sistema de transmissão. A resposta de pico é estimada a partir da Equação 2.14.

$$\hat{r} = \bar{F}_D i_r G_t \quad (\text{Equação 2.14})$$

Onde \bar{F}_D é a força de arrasto média do vento, i_r é um coeficiente de influência e G_t é o fator de resposta de rajada para a torre, o qual é expresso segundo a Equação 2.15.

$$G_t = 1 + 0,75 g_s E_x \sqrt{B_t + R_t} \quad (\text{Equação 2.15})$$

O fator de exposição E_x é dado pela Equação 2.16.

$$E_x = \sqrt{24 \kappa} \left(\frac{z_{ref}}{h_o} \right)^p \quad (\text{Equação 2.16})$$

Onde z_{rd} é a altura de referência, h_o é a altura efetiva (aproximadamente no centro de pressão para a estrutura), p é o expoente da lei de potência e κ é o coeficiente de arrasto superficial. A Equação 2.17 define o termo ressonante adimensional, R_t , conforme segue:

$$R_t = 0,0123 \left(\frac{f_T h_o}{\bar{V}_o} \right)^{-5/3} \frac{1}{\zeta} \quad \text{(Equação 2.17)}$$

onde, f_T é a frequência natural da torre; \bar{V}_o é a velocidade média do vento na altura efetiva h_o e ζ é o amortecimento total da torre (estrutural mais aerodinâmico).

O termo da resposta adimensional correspondendo ao carregamento de vento não-ressonante sobre a torre, B_t , é dado por:

$$B_t = \frac{1}{1 + 0,375 H / L_v} \quad \text{(Equação 2.18)}$$

onde, H é a altura total da torre e L_v é a escala integral transversal da turbulência.

Existem, entretanto, algumas simplificações no método FRR, como por exemplo, o fato deste não ponderar efeitos de carregamentos não balanceados, ou cargas axiais e esforços cortantes, nem o efeito de modos de vibração superiores no cálculo dos fatores de resposta.

2.2.5 Procedimentos Normativos

Atualmente, muitos países já dispõem de normas ou procedimentos que orientam de como considerar a ação do vento sobre estruturas treliçadas. No Brasil, conforme referência realizada no Item 1.4.1, dispõe-se de dois procedimentos normalizados pela ABNT, a saber, NBR 5422/85 e NBR 6123/88. No entanto, a elaboração destas baseia-se em diferentes origens, de modo que suas abordagens também diferem.

Além destas normas brasileiras, também existem outras referências internacionais que versam sobre o presente assunto. Neste âmbito, dispõe-se da IEC 60826/91, um importante procedimento internacional, o qual é adotado como base para a maioria dos projetos realizados na área de linhas de transmissão, servindo inclusive de referência para a elaboração da NBR 5422/85. Além desta, apresenta-se nos itens seguintes, uma breve exposição de mais algumas normas e referências, as quais servirão de referência de comparação com os resultados experimentais do presente trabalho.

2.2.5.1 NBR 5422/1985

A presente Norma Brasileira fixa as condições para projeto de linhas aéreas de linhas de transmissão de energia elétrica. O Item 8.2.4.1 da respectiva Norma fornece os procedimentos para determinação do esforço devido à ação do vento sobre suportes metálicos treliçados (torres) de seção retangular, aplicado no centro de gravidade do trecho considerado. A força de arrasto, estimada com base na Norma, é calculada através da Equação 2.19. Ainda no mesmo item, a NBR 5422/85 apresenta a figura 4 (Figura 2.5), a qual fornece a curva que correlaciona o índice de área exposta e o coeficiente de arrasto, sendo que esta mesma curva foi reproduzida no presente trabalho na parte dos resultados para fins comparativos entre normas e resultados experimentais.

$$A_t = q_0 (1 + 0,2 \operatorname{sen}^2 2\alpha) (S_{T1} C_{xT1} \operatorname{sen}^2 \alpha + S_{T2} C_{xT2} \cos^2 \alpha) \quad (\text{Equação 2.19})$$

Onde, A_t (N) é força de arrasto na direção do vento; q_0 (N/m²) é a pressão dinâmica; S_{T1} e S_{T2} (m²) são as áreas de referência efetivas das faces longitudinal e transversal, respectivamente; C_{xT1} e C_{xT2} são os coeficientes de arrasto das faces longitudinal e transversal, respectivamente e α é o ângulo de incidência o vento.

A presente Norma apresenta quatro graus de rugosidades de terreno (A, B, C e D). A velocidade básica do vento é referida a um período de retorno de 50 anos, a 10 m de altura do solo, com período de integração de 10 minutos, medida em terreno com grau de rugosidade B (ABNT NBR 5422, 1985).

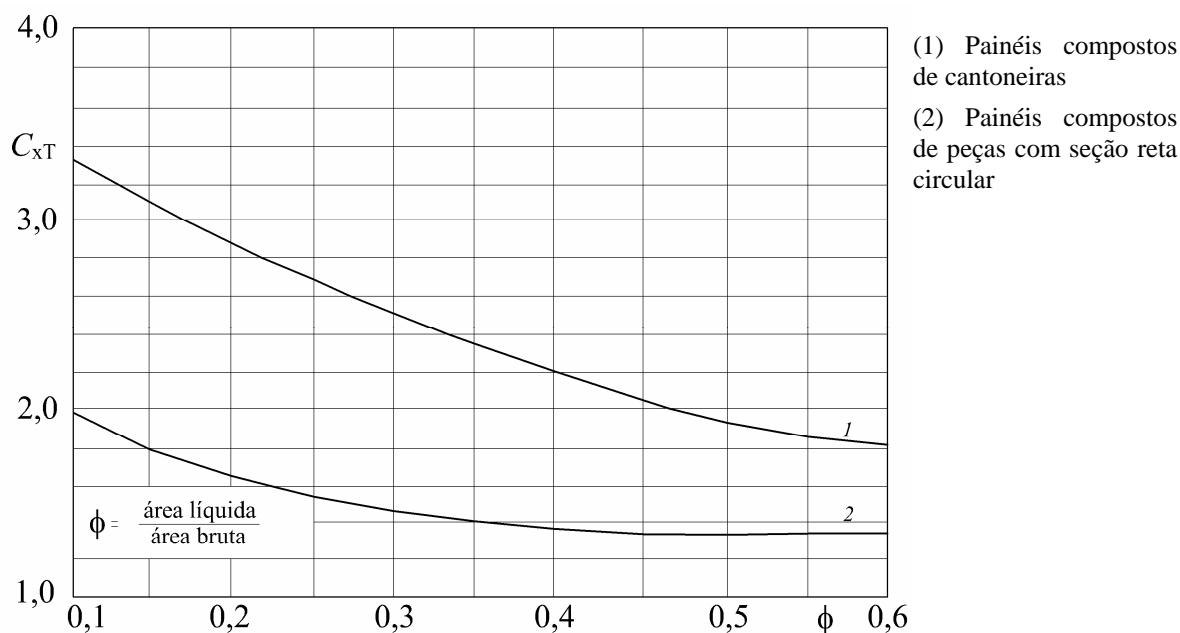


Figura 2.5: Coeficiente de arrasto para painéis de suportes treliçados (NBR 5422, 1985).

2.2.5.2 NBR 6123/1988

Esta Norma fixa as condições exigíveis para estimativa e cálculo das forças devidas a ação estática e dinâmica do vento em edificações em geral. Dentro deste propósito, mais especificamente no Capítulo 7 da respectiva Norma, é apresentado um conjunto de recomendações para projeto de reticulados planos isolados ou reticulados planos múltiplos (torres treliçadas), fornecendo valores de coeficientes de arrasto para torres de seção quadrada ou triangular, de barras prismáticas de cantos vivos ou de seção circular. A presente Norma define a área de referência como sendo aquela formada pela projeção ortogonal das barras de uma das faces do reticulado sobre um plano paralelo a esta face.

No capítulo referente aos resultados, estará reproduzida a curva da figura 9 da NBR 6123/88, relacionando o índice de área exposta com o coeficiente de arrasto correspondente. Usando uma abordagem diferente da NBR 5422/85, a presente Norma apresenta cinco categorias de rugosidades de terreno (I, II, III, IV e V). A velocidade básica do vento é definida como a velocidade de rajada sobre 3 segundos, excedida a cada 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano (ABNT NBR 6123, 1988).

2.2.5.3 IEC 60826/1991

O presente Procedimento, na forma de um relatório técnico foi preparado e publicado pela *International Electrotechnical Commission* (IEC). Sob a denominação de *Loading and Strength of Overhead Transmission Lines*, a presente compilação fornece um conjunto de recomendações para o projeto de linhas aéreas de transmissão com base em métodos probabilísticos. Desta maneira, os métodos propostos no procedimento IEC permitem projetar para diferentes níveis de confiabilidade e segurança, associados a diferentes períodos de recorrência dos carregamentos, dependendo da importância da linha no sistema, ou em relação a garantias adicionais de segurança para população.

Em relação aos carregamentos climáticos, a presente compilação foi elaborada tanto para a consideração de cargas de gelo como de vento, sendo esta última preponderante para as condições do Brasil.

A abordagem referente ao carregamento do vento sobre torres está descrita no item 3.2.6.3 do Procedimento, o qual fornece a Equação 2.6, expressão esta muito similar àquela definida para a NBR 5422. Estas diferem pela definição do sentido de incidência do vento (sentido anti-horário na IEC) e pelo fator de rajada G_t , parâmetro este que leva em consideração o nível de turbulência do escoamento, de modo que o mesmo varia com a altura. Ainda no mesmo item é fornecida a curva que correlaciona o índice de área exposta e o coeficiente de arrasto (Figura 10 do Procedimento), a qual também foi reproduzida no presente trabalho na parte dos resultados para fins comparativos entre normas e resultados experimentais.

$$A_t = q_0 (1 + 0,2 \operatorname{sen}^2 2\alpha) (S_{T1} C_{xT1} \cos^2 \alpha + S_{T2} C_{xT2} \operatorname{sen}^2 \alpha) G_t \quad (\text{Equação 2.6})$$

De forma análoga a NBR 5422/85, o Procedimento IEC 60826 também apresenta quatro categorias de rugosidade (A, B, C e D). Conforme o IEC (1991), a velocidade do vento V é definida como uma velocidade média sobre um período de 10 minutos, a uma altura de 10 m acima do terreno em campo aberto com poucos obstáculos (rugosidade B).

2.2.5.4 ENV 1991-2-4 (1998)

A presente Norma Européia Experimental (ENV), denominada de “*Bases de Proyecto y Acciones en Estructuras*”, compreende um dos nove Eurocódigos, os quais apresentam recomendações elaboradas para o projeto de edificações em geral, dos pontos de vista estrutural e geotécnico. Mais especificamente, a Parte 2-4 da ENV contém as recomendações para a estimativa de cargas de vento sobre as estruturas.

Em relação a estruturas treliçadas, esta Norma apresenta um conjunto de ábacos ($\varphi \times C_a$) que contemplam estruturas de seção quadrada ou triangular, isoladas ou espaciais, podendo estas ainda ser formadas por barras de arestas vivas ou circulares.

Para o caso de treliçadas isoladas, esta Norma adota como definição de área de referência a área projetada das barras, e quando se tratar de estruturas espaciais, a Norma recomenda adotar somente a área formada pelas barras contidas no painel a barlavento.

2.2.5.5 ASCE Manual 74 (1991)

A elaboração deste Manual pela ASCE objetivou apresentar uma metodologia de projeto voltada especificamente para o projeto de linhas de transmissão. Intitulado de “*Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading*”, a sua abordagem é baseada em métodos estatísticos de estimativa de carregamento (vento e gelo) como o “*Load and Resistance Factor Design*” (Método dos Estados Limites) e o “*Gust Response Factor*” (Fator de Resposta de Rajada).

Os coeficientes de arrasto apresentados pelo Manual foram extraídos do procedimento ASCE *Standard* 7-88 (1990). Conforme este procedimento, estes coeficientes são aplicáveis àquelas estruturas treliçadas de painéis múltiplos de seção quadrada ou triangular, assim como de arestas vivas ou circulares. Além disso, a fim de ponderar o efeito da direção (ângulo) de incidência do vento sobre a força atuante na estrutura, este Manual também incorporou a Equação 2.6 da IEC 60826.

Para determinação do índice de área exposta, este Manual sugere adotar-se como área de referência (efetiva e contorno) somente aquela formada pelas barras situadas na face à barlavento da torre.

2.2.5.6 ANSI/ASCE 7-95 (1996)

Denominada de “*Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*”, esta Norma Americana incorpora uma série de recomendações da ASCE, possibilitando a estimativa de uma série de carregamentos associados a vento, neve, sismos e impactos (trem), tanto de característica estática assim como dinâmica.

Para a estimativa de carregamento em estruturas treliçadas, a Norma apresenta ajustes em função do índice de área exposta, para estruturas de seção triangular e quadrada, formadas por barras de arestas vivas. Quando estas estruturas forem formadas por barras de superfície circular ou seção quadrada, as forças referentes a estas barras devem ser multiplicadas por um fator de ajuste específico, também função de φ . Além disso, conforme a Norma, a área de referência a ser tomada para cálculo de φ é aquela formada pelas barras situadas na face de barlavento.

3 ESTUDOS EXPERIMENTAIS

3.1 Características do Túnel de Vento

Os ensaios que contemplam o presente trabalho foram realizados no Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann* do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), mostrado na Figura 3.1 (BLESSMANN, 1982). Trata-se de um túnel de vento de camada limite de retorno fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis.



Figura 3.1: Vista do Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann*.

Este túnel permite a simulação das principais características de ventos naturais. Apresenta a relação “comprimento/altura” da câmara de ensaios superior a 10, sendo que a velocidade máxima do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme e sem modelos, é da ordem 42 m/s (150 km/h). A simulação correta das principais características do vento natural em túneis de vento é requisito básico para aplicações em Engenharia Civil (DAVENPORT; ISYUMOV, 1967), sem a qual os resultados obtidos podem se afastar consideravelmente da realidade.

Na Figura 3.2 apresenta-se uma planta baixa esquemática do túnel, na qual podemos observar que o mesmo apresenta quatro seções de testes compostas de mesas giratórias, permitindo a realização de estudos de efeitos do vento para diversos tipos de modelos e escoamentos de características diversas (BLESSMANN, 1990).

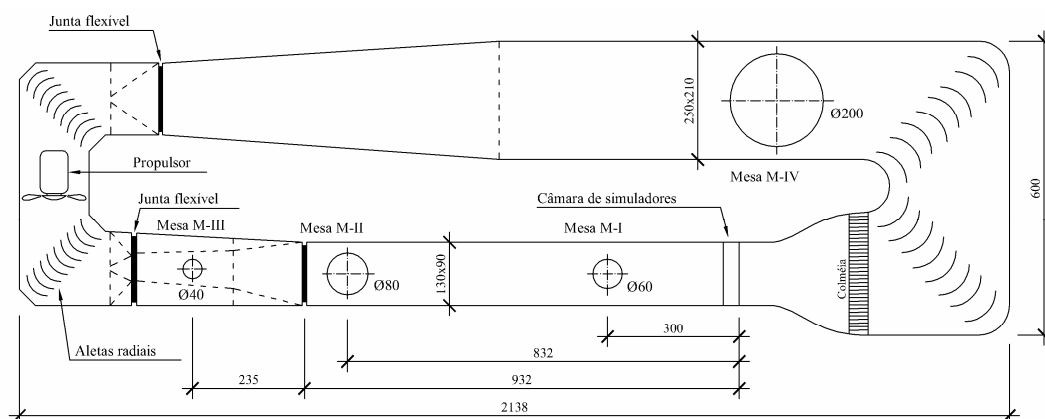


Figura 3.2: Circuito aerodinâmico do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann.

Nas mesas M-I e M-II podem ser realizados tanto ensaios estáticos como dinâmicos, sendo que a velocidade máxima atingida, em fluxo uniforme e suave e sem modelos, é da ordem de 42 m/s. Mais especificamente a mesa M-I é utilizada para ensaios aerodinâmicos do tipo aeronáutico, uma vez que a camada limite é de pequena espessura e o escoamento apresenta baixa turbulência (escoamento uniforme). Além disso, este tipo de escoamento é adequado para estudos em modelos de forma e geometria simples e modelos bi e tridimensionais. Em alguns ensaios, para determinados tipos de edificações para os quais se necessita um escoamento turbulento, são usados geradores de turbulência (grelhas), os quais são colocados na entrada da câmara de ensaios (câmara de simuladores). As dimensões do túnel nesta seção são 1240 mm de largura por 900 mm de altura.

A mesa M-II também é utilizada em ensaios do tipo aeronáutico no eixo do túnel. Já para os ensaios de modelos de edificações, são fixados painéis de blocos sobre o piso do túnel que combinados com geradores de turbulência na câmara de simuladores (gavetas) geram o perfil de vento natural.

A mesa M-III é uma mesa de grande rigidez, situada no primeiro divergente do túnel, atinge a velocidade máxima de 29 m/s (105 km/h). As frequências naturais, segundo os três eixos ortogonais usuais, estão acima de 500 Hz. Esta mesa foi construída especificamente

para estudos dinâmicos em estruturas de grande alteamento, tais como chaminés, pilares de viadutos, torres de televisão e de microondas e mastros.

A mesa M-IV está situada na seção de retorno do túnel, a qual apresenta 2510 mm de largura e 2120 mm de altura, atingindo-se uma velocidade máxima de 9 m/s (32 km/h). Esta mesa é adequada para realização de estudos de poluição do ar, dispersão de fumaça e influência de topografia local sobre as características do vento.

Os ensaios referentes ao presente trabalho foram realizados em escoamento suave e uniforme na seção da mesa M-I, para a qual são apresentadas, na Figura 3.3, as principais características do escoamento do ar.

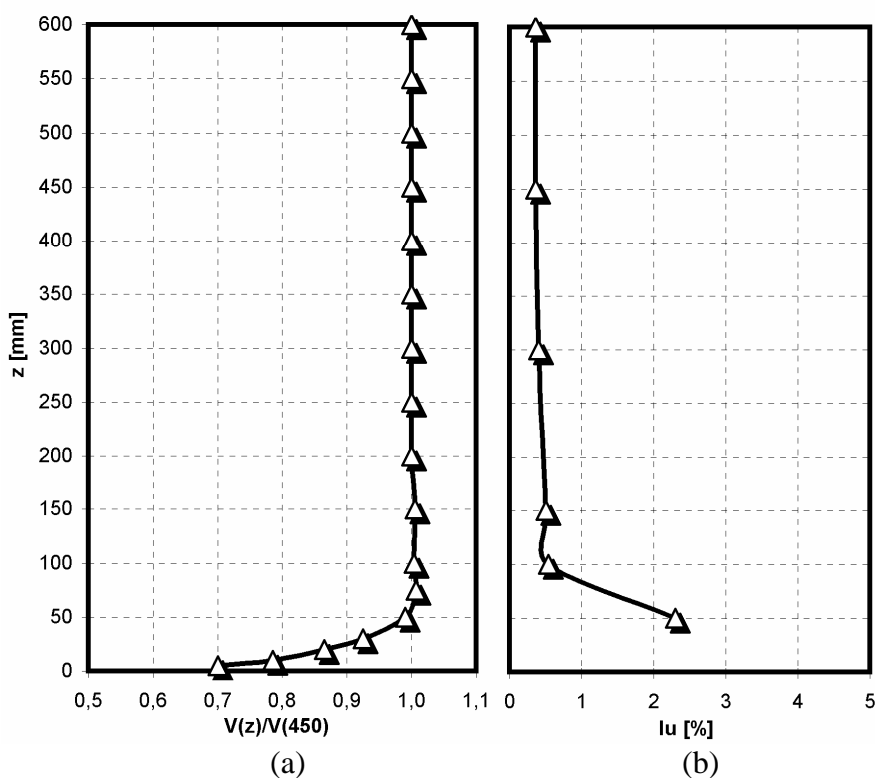


Figura 3.3: Características do escoamento do ar na mesa M-I.

(a) Perfil de velocidades médias; (b) Intensidade da componente longitudinal da turbulência.

O parâmetro I_u (intensidade da componente longitudinal da turbulência) é definido pelo quociente entre o desvio padrão das flutuações da velocidade e uma velocidade de referência (BLESSMANN,1990), a qual, para o Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann*, corresponde a velocidade registrada a meia altura do piso (450 mm) no eixo longitudinal do túnel.

O controle da velocidade no interior da câmara de ensaios é feito através de um dispositivo manual de giro, ao qual está acoplado um conjunto de aletas, as quais têm por finalidade obstruir a passagem do ar, diminuindo assim a velocidade do vento. O registro dos valores referentes às variáveis necessárias para o cálculo das velocidades foi obtido através da leitura da diferença de pressão (Δp_a) em um manômetro do tipo *Betz*, entre duas seções específicas do túnel, leitura da temperatura do ar (T) no interior do túnel (termômetro digital) e leitura da pressão atmosférica (P_a) no instante do ensaio, através de um barômetro, conforme ilustrado na Figura 3.4.



Figura 3.4: Equipamentos utilizados nos ensaios e registro das velocidades.

3.2 Modelos Reduzidos de Ensaio

3.2.1 Definição dos Modelos

Todo o programa experimental foi conduzido com base em um cronograma de atividades elaborado no início do projeto, que permitia flexibilizar e redirecionar os trabalhos

conforme fosse necessário. O cronograma contemplava a realização das seguintes atividades (etapas) gerais:

- a) seleção dos desenhos necessários para o detalhamento da geometria das torres;
- b) divisão das torres em trechos (módulos para ensaios) adequados para fins de análises e comparações;
- c) seleção e estabelecimento de escalas adequadas para os ensaios dos modelos;
- d) impressão dos desenhos nas respectivas escalas, preparação e corte da madeira de acordo com a seção transversal (cantoneira) das barras e montagem dos modelos;
- e) ensaios dos modelos das torres nas suas diversas configurações (escalas, ângulos e velocidades);
- f) aquisição e processamento dos resultados;
- g) análise e comparações com Normas, métodos e outras referências da literatura.

Na etapa de divisão das torres em trechos, os modelos foram agrupados em cinco grupos, conforme divisão apresentada no Apêndice A. A descrição dos módulos referentes a cada modelo, assim como a sua nomenclatura e escalas estão apresentados tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1: Grupos de modelos ensaiados para a Torre A55.

Grupo	Módulo	Modelo	Escala
I	Pára-raios Isolado	Tor. A55-1	1/10
	Mísula Isolada	Tor. A55-2	1/10
	Viga Isolada	Tor. A55-3	1/13
	Viga + Mísulas + Pára-raios	Tor. A55-6	1/20
II	Delta Inferior Parcial	Tor. A55-9	1/10
	Delta Inferior Completo	Tor. A55-10a	1/20
	Delta Inferior Completo	Tor. A55-10b	1/10
	Cabeça Completa (pára-raios, mísulas, viga e delta)	Tor. A55-14	1/20
III	Tronco Comum Completo	Tor. A55-15a	1/18
	Tronco Comum Superior	Tor. A55-15b	1/11
	Tronco Comum Inferior	Tor. A55-15c	1/11
IV	Extensão de 12,00 m	Tor. A55-17	1/15
V	Perna H = 10,50 m / Conjunto	Tor. A55-18a	1/13
	Perna H = 10,50 m / Isolada	Tor. A55-18c	1/13

Tabela 3.2: Grupos de modelos ensaiados para a Torre A33.

Grupo	Módulo	Modelo	Escala
I	Pára-raios Isolado	Tor. A33-1	1/8
	Mísula Isolada	Tor. A33-2	1/8
	Viga Isolada	Tor. A33-3	1/13
	Viga + 1 Mísula (barlavento)	Tor. A33-4	1/13
	Viga + 2 Mísulas	Tor. A33-5	1/13
	Viga + Mísulas + Pára-raios	Tor. A33-6	1/13
II	Delta Superior Parcial	Tor. A33-7	1/17
	Delta Superior Completo	Tor. A33-8	1/17
	Delta Inferior Parcial	Tor. A33-9	1/8
	Delta Inferior Completo	Tor. A33-10a	1/17
	Delta Inferior Completo	Tor. A33-10b	1/8
	Delta Parcial	Tor. A33-11	1/17
	Delta Completo	Tor. A33-12	1/17
	Viga + Mísulas + Pára-raios + Delta Superior	Tor. A33-13	1/17
Cabeça Completa (pára-raios, mísulas, viga e delta)	Tor. A33-14	1/17	
III	Tronco Comum Completo	Tor. A33-15a	1/11
IV	Extensão de 6,00 m	Tor. A33-16	1/15
	Extensão de 12,00 m	Tor. A33-17	1/15
V	Perna H = 9,00 m / Conjunto	Tor. A33-18a	1/13
	Perna H = 9,00 m / Isolada	Tor. A33-18c	1/13

Com base nas tabelas 3.1 e 3.2 verifica-se que durante a realização do presente estudo, foram sucessivamente confeccionados e ensaiados 34 modelos, contemplando a cabeça da torre, tronco comum, extensões e pernas. Nesse sentido, ao se considerar as distintas configurações, escalas, ângulos, níveis de velocidades e as três leituras por velocidade, efetuaram-se no total 2.736 medições de força de arrasto.

3.2.2 Estimativa de Áreas

Tendo sido definidos os modelos de ensaio, é necessário agora estimar-se os valores das áreas de referência (efetivas e de contorno) para o cálculo do índice de área exposta de cada modelo.

Nesse sentido, procurou-se determinar para cada modelo dois valores de área efetiva, conforme critério a seguir:

- a) área efetiva calculada (A_{ec}): definida pelo produto da largura da aba pelo comprimento da barra, medidas estas obtidas diretamente nos desenhos de projeto;
- b) área efetiva projetada (A_{ep}): obtida a partir da projeção das barras dos desenhos tridimensionais das torres sobre um plano vertical perpendicular a direção do ângulo considerado.

A fim de otimizar a apresentação das diversas configurações assumidas pelos módulos conforme o ângulo de incidência do vento, convencionou-se apresentar nos itens subsequentes somente os valores de área projetada referentes aos módulos principais de formação das torres (viga, delta, tronco, extensão e pernas). Deste modo, as configurações dos módulos isolados das torres A33 e A55 estão apresentadas nos apêndices B e C, respectivamente. Por sua vez, as demais configurações referentes à área projetada dos módulos das torres A33 e A55 estão apresentadas nos apêndices D e E, respectivamente.

Os valores referentes às áreas de referência e de contorno serão apresentados em forma de tabelas. Para o caso da área efetiva calculada, apresentar-se-ão os valores das áreas para ambas as faces, transversal (T) e longitudinal (L), correspondendo respectivamente ao vento longitudinal (0°) e vento transversal (90°). Para o caso área efetiva projetada, estar-se-á fornecendo a área projetada na direção do ângulo considerado. Para a determinação dos valores das áreas de contorno, adotar-se-á o mesmo critério referido nas alíneas acima, mantendo-se a coerência na definição de áreas.

3.2.3 Listagem dos Módulos Estudados

3.2.3.1 Módulo do Tronco Comum

Os trabalhos de confecção de modelo se iniciaram a partir deste trecho (Grupo III), uma vez que este apresenta um treliçamento mais simples e também pelo fato de ser uma seção que já foi objeto de diversos estudos na literatura e no meio técnico. As figuras 3.5 e 3.6 apresentam uma vista do tronco comum das torres A33 e A55. Nestas, estão indicadas as configurações geométricas que o módulo assume, quando é considerado o critério de área projetada. Nos apêndices B e C, estão apresentadas as vistas transversal e

longitudinal, considerando somente a primeira face do módulo em verdadeira grandeza das torres A33 e A55, respectivamente.

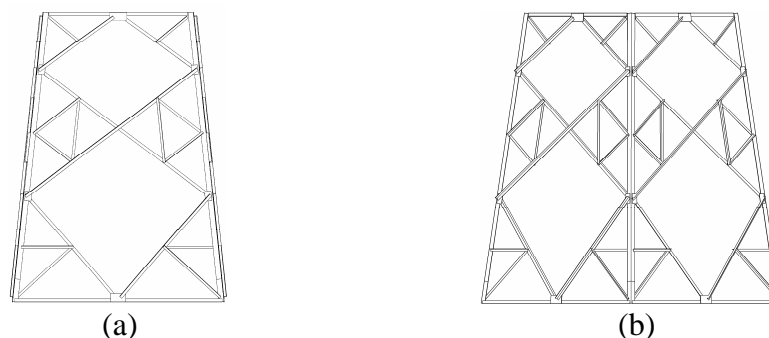


Figura 3.5: Projeção do tronco comum da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$.

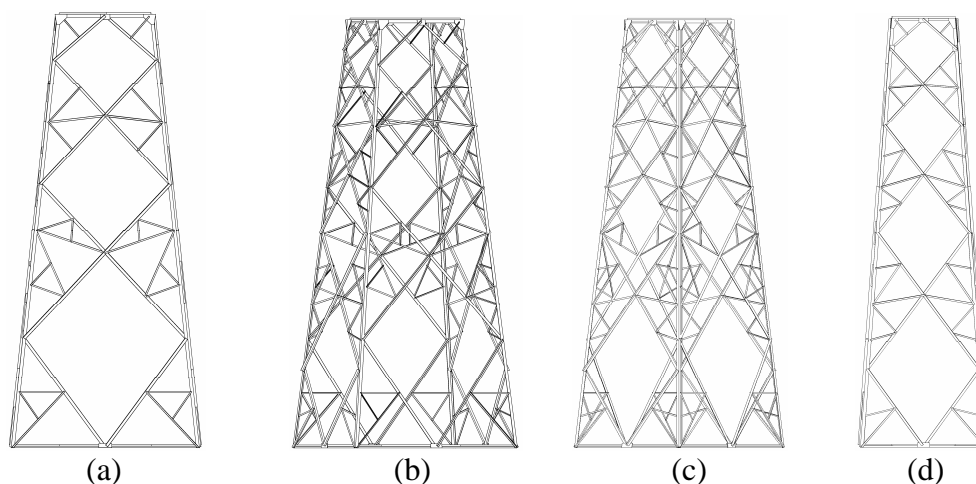


Figura 3.6: Projeção do tronco comum completo da Torre A55; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$; (d) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

Observando-se as figuras, verifica-se que este módulo se caracteriza por apresentar uma forma tronco-piramidal, de pequena inclinação (em torno de $6,0^\circ$), de modo que a face à sotavento permanece coberta (protegida) pelas barras da face à barlavento. Segundo a Norma Alemã (DIN 4131, 1969), para inclinações da face inferiores a 20° , pode-se considerar o conjunto de ambas as faces como um plano vertical único.

Este trecho, para ambas as torres, foi ensaiado na sua altura total na escala 1/11 para a Torre A33 e 1/18 para a Torre A55. Além disso, a fim de avaliar o efeito de escala em relação aos resultados das medidas, optou-se em dividir o tronco comum da Torre A55 em dois trechos identificados por tronco comum superior (Figura E.5) e tronco comum inferior (Figura E.6), os quais foram ensaiados na escala 1/11. Os valores das áreas de contorno e

efetivas e respectivos índices de área exposta para o tronco comum completo estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Áreas de contorno e efetivas para o tronco comum das torres A33 e A55.

Modelo	α (°)	Área de Contorno (m ²)		Área Efetiva (m ²)		Índice de Área Exposta	
		A_{cc}	A_{cp}	A_{ec}	A_{ep}	ϕ_{ec}	ϕ_{ep}
Tor. A33-15a	0	0,1306	0,1345	0,0218	0,0251	0,17	0,19
	45	-	0,1838	-	0,0336	-	0,18
	90	0,1306	0,1345	0,0218	0,0251	0,17	0,19
Tor. A55-15a	0	0,1992	0,2059	0,0263	0,0333	0,13	0,16
	30	-	0,2403	-	0,0689	-	0,29
	56	-	0,2231	-	0,0619	-	0,28
	90	0,1339	0,1415	0,0231	0,0278	0,17	0,20

Nota-se também pela Tabela 3.3, que os valores de índice de área exposta para a condição de vento oblíquo são bem maiores em relação àqueles das faces perpendiculares para o modelo Tor. A55-15a. Tal razão provavelmente está associada à geometria retangular da seção transversal do trecho, conduzindo a uma maior exposição de barras nas direções oblíquas. Em contrapartida, para no modelo Tor. A33-15a não se identificou o mesmo comportamento, obtendo-se valores de índice de área exposta semelhantes para as três direções de incidência do vento.

3.2.3.2 Módulo da Cabeça

Conforme a divisão apresentada no Apêndice A, este trecho forma o Grupo I de modelos. Analisando-se a estrutura como um todo, podemos admitir que este trecho seja o que apresenta maior complexidade em termos de estimativa de áreas e, principalmente, em termos de estimativa dos efeitos de interação vento-estrutura. O trecho apresenta faces com inclinações e geometrias diversas, tornando-se difícil propor um único fator que pondere adequadamente o arrasto sobre os diversos trechos da torre. Além disso, os treliçamentos das faces transversal e longitudinal são muito diferentes em ambas as torres.

Nesse sentido, procurou-se estudar o arrasto sobre a cabeça de ambas das torres partindo-se de alguns elementos mais simples de sua formação, isto é, ensaiaram-se as

mísulas, pára-raios, vigas e deltas separadamente, comparando-se estes depois com o ensaio do conjunto.

3.2.3.2.1 Viga, Mísulas e Pára-Raios

As mísulas e os pára-raios costumam apresentar uma geometria complexa, porém pouco densa em termos de volume de barras. Em relação à viga, por sua vez, se tomarmos como exemplo a Torre A33, esta apresenta uma viga com a forma de um prisma retangular, de modo que para a condição de vento transversal se torna difícil estimar o valor da força de arrasto, uma vez que a passagem do vento ao longo das treliças da viga é significativamente influenciada pelos efeitos de proteção das barras situadas à barlavento, aspecto este que tem representado uma enorme dificuldade aos projetistas para estimar o arrasto sobre este conjunto, incrementando o nível de incerteza associado a elaboração do projeto. A viga da Torre A55, por sua vez, possui uma geometria bastante diferente comparativamente a viga da Torre A33, conforme se pode observar nas figuras 3.7 e 3.8. Na Tabela 3.4 estão apresentados os valores das áreas efetiva e de contorno para o conjunto (pára-raios, mísulas e viga) de cada uma das torres.

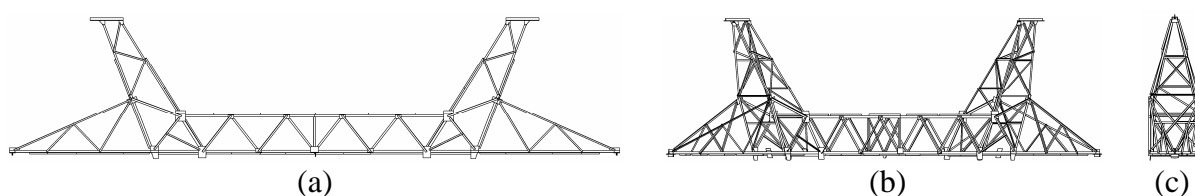
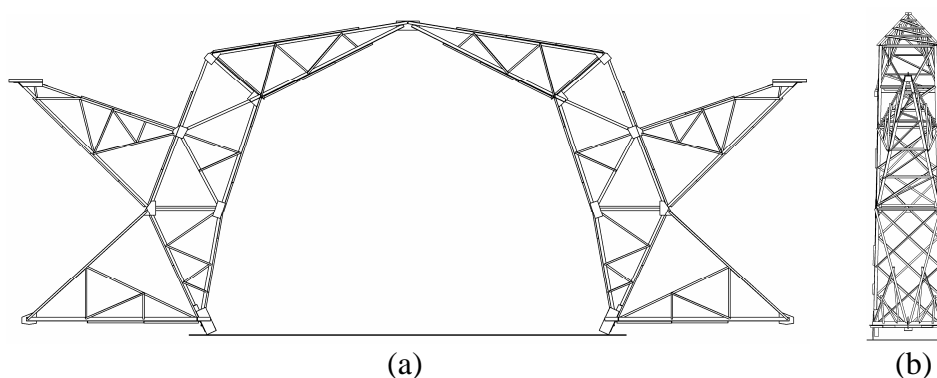


Figura 3.7: Projeção da viga, mísulas e pára-raios da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$. (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.



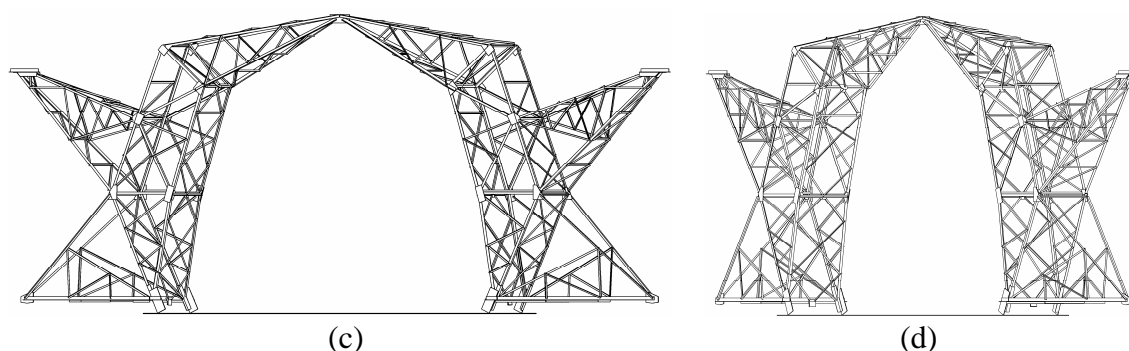


Figura 3.8: Projeção da viga, mísulas e pára-raios da Torre A55. (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$. (b) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$. (c) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (d) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$.

Tabela 3.4: Áreas de contorno e efetivas para viga, mísulas e pára-raios das torres A33 e A55.

Modelo	α ($^\circ$)	Área de Contorno (m^2)		Área Efetiva (m^2)		Índice de Área Exposta	
		A_{cc}	A_{cp}	A_{ec}	A_{ep}	φ_{ec}	φ_{ep}
Tor. A33-6	0	0,1265	0,1316	0,0302	0,0333	0,24	0,25
	45	-	0,1124	-	0,0466	-	0,41
	90	0,0479	0,0337	0,0162	0,0125	0,34	0,52
Tor. A55-6	0	0,1176	0,1230	0,0351	0,0299	0,30	0,24
	30	-	0,1283	-	0,0488	-	0,38
	56	-	0,1069	-	0,0440	-	0,41
	90	0,0850	0,0286	0,0176	0,0139	0,21	0,49

Observando-se os valores constantes nas tabelas constata-se que os valores das áreas transversais, para ambas as torres, assim como para ambos os critérios estão relativamente próximos, conduzindo a índices de área exposta também próximos, apesar da geometria destes trechos não apresentar nenhuma semelhança. Entretanto, conforme já salientado, devido a complexidade da geometria, obtém-se valores de áreas longitudinais bem diferentes através de cada critério, tendo-se, conseqüentemente, índices de área exposta bem distintos também. As figuras D.12 (Torre A33) e E.7 (Torre A55) apresentam as vistas das projeções referentes as área de sombra das cabeças das torres. Nota-se que devido às inclinações acentuadas das faces tem-se uma concentração maior de barras, provenientes das faces de barlavento e sotavento.

3.2.3.2.2 Delta

Situado entre a viga e o tronco comum, este trecho também apresenta um treliçamento bastante complexo. No caso da Torre A33, o mesmo foi dividido em duas partes: delta inferior completo (Figura 3.9) e delta superior completo (Figura D.7), os quais foram ensaiados em diversas configurações conforme indicado na Tabela 3.2 e ilustrado nas figuras do Apêndice D.

O delta inferior, em particular, é relativamente semelhante em ambas as torres, conforme se pode observar nas figuras 3.9 e 3.10. Este módulo foi construído e ensaiado em duas escalas distintas para verificar a independência do fator de escala nas medidas de arrasto. Deste modo, para a Torre A33 foram confeccionados dois modelos nas escalas 1/17 (Tor. A33-10a) e 1/8 (Tor. A33-10b). Devido a pequena inclinação da face transversal do painel ($\beta = 3,6266^\circ$), observa-se que a face isolada (Figura B.1a) e a projetada (Figura 3.9a) são muito semelhantes, caracterizando uma sobreposição de faces e, possivelmente, um efeito de proteção sobre a face na esteira.

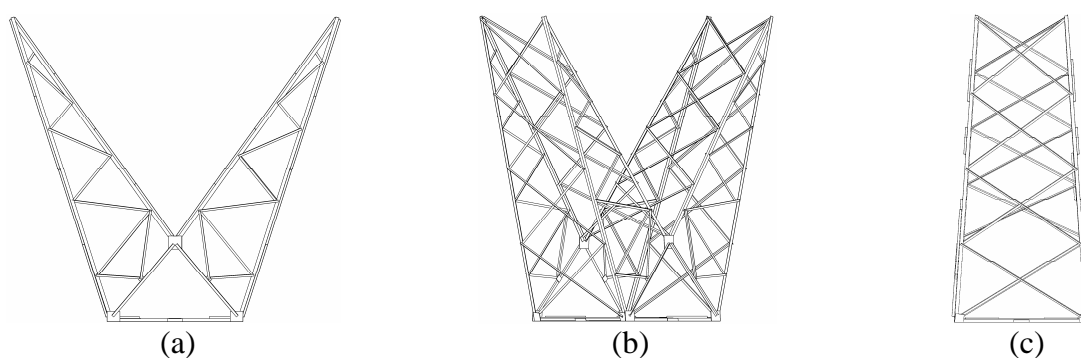


Figura 3.9: Projeção do delta inferior completo da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

Em contrapartida, observando-se as figuras 3.9c e B.2a, nas quais estão indicadas as faces longitudinais, verifica-se que o critério de área projetada conduz a uma geometria mais densa em termos de barras expostas (A_e) comparativamente à projeção da face isolada somente. Tal constatação fica ainda mais evidente quando a condição de vento oblíquo é analisada. A Tabela 3.5 apresenta os valores das áreas de contorno e efetivas do delta inferior completo referente ao modelo Tor. A33-10a.

Além disso, foram ainda confeccionados modelos adicionais formados somente por um único ramo do delta: Tor. A33-9 (Figura D.11) e Tor. A55-9 (Figura E.4). Estes foram

ensaiados com o intuito de avaliar os efeitos de interferência entre os ramos, principalmente para a condição de vento transversal. Os valores das áreas para cada um dos modelos do delta inferior parcial estão indicados no Apêndice F.

Tabela 3.5: Áreas de contorno e efetivas para o delta inferior completo das torres A33 e A55.

Modelo	α (°)	Área de Contorno (m ²)		Área Efetiva (m ²)		Índice de Área Exposta	
		A _{cc}	A _{cp}	A _{ec}	A _{ep}	Φ_{ec}	Φ_{ep}
Tor. A33-10a	0	0,0454	0,0489	0,0130	0,0141	0,29	0,29
	45	-	0,0809	-	0,0282	-	0,35
	90	0,0478	0,0457	0,0068	0,0108	0,14	0,24
Tor. A55-10a	0	0,0737	0,0774	0,0159	0,0193	0,22	0,25
	30	-	0,0985	-	0,0402	-	0,41
	56	-	0,0966	-	0,0367	-	0,38
	90	0,0517	0,0485	0,0121	0,0152	0,23	0,31

Em relação a Torre A55, esta apenas possui o delta inferior, o qual está apresentado na Figura 3.10. Observa-se pela mesma que o delta para esta torre é muito similar ao da Torre A33, possuindo adicionalmente uma escada de degraus acoplada a sua estrutura principal. Analogamente ao caso anterior, também foram confeccionados dois modelos em escalas distintas (Tor. A55-10a e Tor. A55-10b) e um modelo (Tor. A55-9) formado somente por um ramo, entretanto para fins de simulação, este ramo isolado não possui a escada acoplada (Figura E.4). Pela análise dos valores de índice de área exposta da Tabela 3.5, tem-se uma maior área exposta, para a Torre A33, na face transversal, enquanto que para a Torre A55 essa maior exposição é observada na face longitudinal.

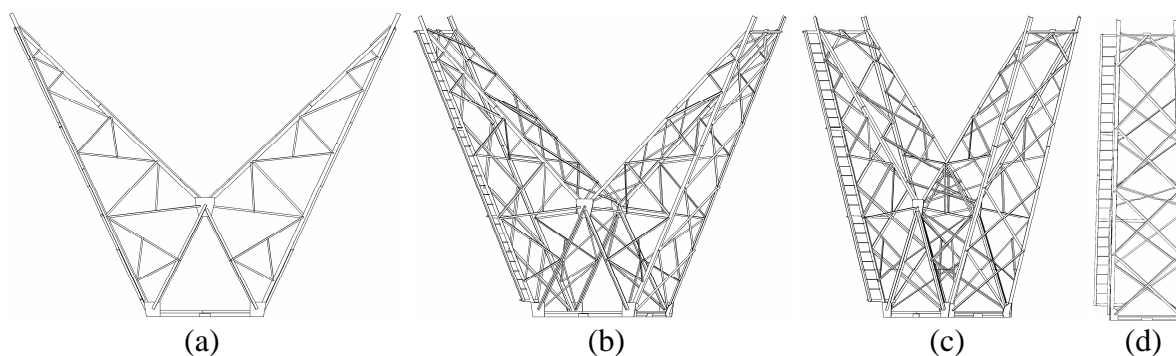


Figura 3.10: Projeção do delta da Torre A55; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$ (d) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

3.2.3.3 Módulo das Extensões

As torres treliçadas de linhas de transmissão normalmente são projetadas na forma de módulos, isto é, trechos independentes e/ou combinados, que permitem ao projetista selecionar a configuração que melhor se adapte a seu projeto. Um destes trechos são as extensões, as quais foram agrupadas no Grupo IV (Apêndice A) de modelos, para o qual se dispõem de duas alturas (6,00 e 12,00 m) para ambas as torres, as quais apresentam uma geometria muito similar entre elas. Nesse sentido, estar-se-á apresentando para a Torre A55 somente os resultados referentes à extensão 12,0 m.

As figuras 3.11 e 3.12 apresentam as projeções das faces das extensões 6,0 m e 12,0 m para a Torre A33, respectivamente. A Figura 3.13, por sua vez, apresenta as projeções correspondentes à extensão 12,0 m da Torre A55. Nos apêndices C e D estão indicadas as faces isoladas das extensões para cada uma das torres.

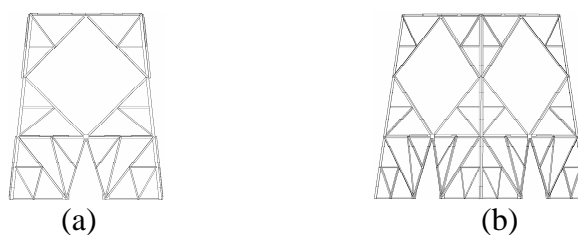


Figura 3.11: Projeção da extensão 6,0 m da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$;
(b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$.

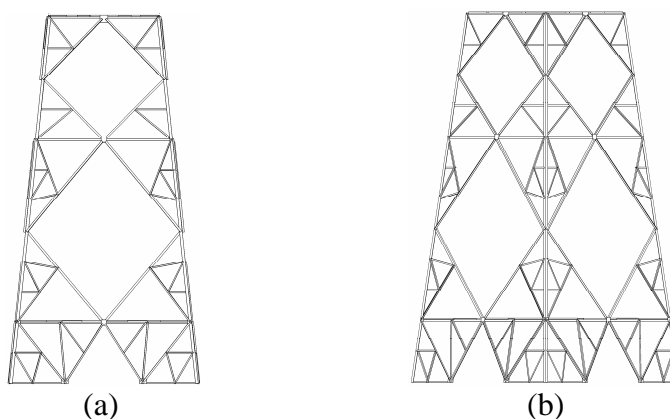


Figura 3.12: Projeção da extensão 12,0 m da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$;
(b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$.

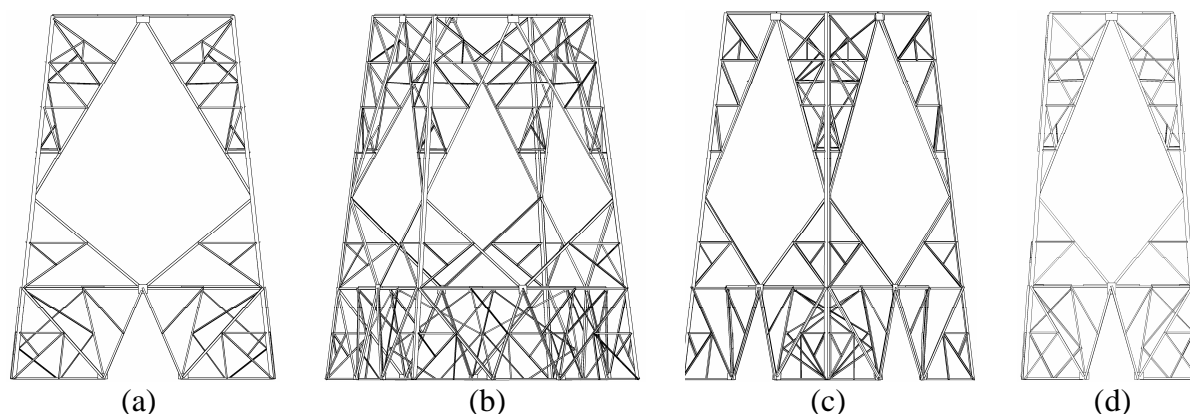


Figura 3.13: Projeção da extensão 12,0 m da Torre A55; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$; (d) Face transversal $\alpha = 90^\circ$.

Em relação à Torre A33, comparando-se as figuras 3.11 e 3.12 com a Figura 3.5 (tronco comum), verifica-se que as extensões apresentam um treliçamento muito semelhante ao do tronco comum. Porém, o mesmo não ocorre em relação às figuras 3.13 e 3.6 da Torre A55, na qual a extensão apresenta uma geometria diferenciada e mais densa.

A Tabela 3.6 apresenta os valores das áreas de referência para as faces das torres. Nesta observa-se que os valores das áreas, assim como do índice de área exposta, estão relativamente próximos entre os dois critérios adotados. Além disso, analogamente ao tronco comum, estes painéis apresentam uma inclinação pequena da face, conduzindo a sobreposição das faces.

Tabela 3.6: Áreas de contorno e efetivas para as extensões das torres A33 e A55.

Modelo	α ($^\circ$)	Área de Contorno (m^2)		Área Efetiva (m^2)		Índice de Área Exposta	
		A_{cc}	A_{cp}	A_{ec}	A_{ep}	Φ_{ec}	Φ_{ep}
Tor. A33-16	0	0,1158	0,1180	0,0179	0,0197	0,16	0,17
	45	-	0,1640	-	0,0271	-	0,17
	90	0,1158	0,1180	0,0179	0,0197	0,16	0,17
Tor. A33-17	0	0,2648	0,2692	0,0317	0,0369	0,12	0,14
	45	-	0,3741	-	0,0552	-	0,15
	90	0,2648	0,2692	0,0317	0,0369	0,12	0,14
Tor. A55-17	0	0,3796	0,3815	0,0431	0,0551	0,11	0,14
	30	-	0,4766	-	0,1301	-	0,27
	56	-	0,4270	-	0,0896	-	0,21
	90	0,2558	0,2607	0,0364	0,0475	0,14	0,18

3.2.3.4 Módulo das Pernas

3.2.3.4.1 Perna Isolada

Este conjunto de modelos compõe o Grupo V (Apêndice A). Normalmente para cada torre existe um conjunto de pernas de diversas alturas. No caso das torres em estudo, ocorre um incremento de 1,50 m em cada altura, de modo que a Torre A33 dispõem de seis alturas de pernas (1,50 – 9,00 m) e a Torre A55 dispõem de sete alturas (1,50 – 10,50 m).

Em geral, as pernas usadas em torres metálicas autoportantes apresentam a forma de um triedro (sólido de três faces), aspecto este que dificulta bastante estimar a força de arrasto sobre estes elementos, conforme se observa nas figuras 3.14 e 3.15.

Para fins de confecção de modelo e ensaio, selecionou-se, dentre o conjunto de pernas disponíveis, a perna de maior altura de composição da torre. Contudo, as pernas não possuem a mesma altura, isto é, a perna da Torre A33 (Tor. A33-18c) possui 9,00 m de altura, enquanto que a perna da Torre A55 (Tor. A55-18c) apresenta 10,50 m de altura total. Além disso, a perna 10,50 m (Torre A55) apresenta uma pequena transição (Figura 3.15) na sua geometria, conduzindo a um incremento adicional, porém diferenciado, no valor das áreas de referência.



Figura 3.14: Projeção isolada da perna 9,0 m da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$.

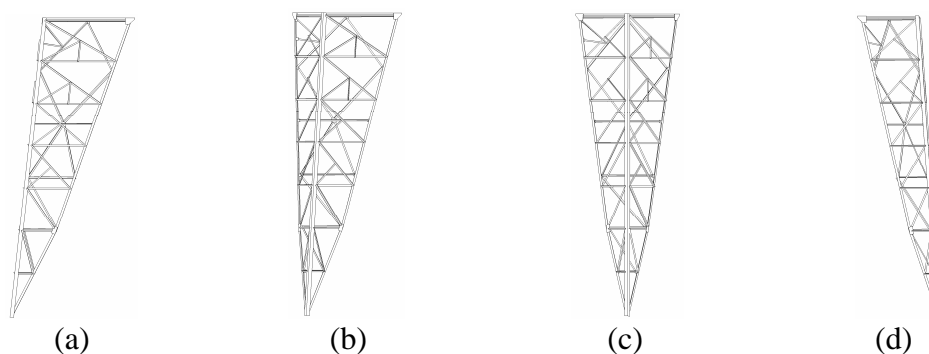


Figura 3.15: Projeção isolada da perna 10,50 m da Torre A55; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$; (d) Face transversal $\alpha = 90^\circ$.

Analisando as figuras 3.14 e 3.15 (áreas projetadas) com as figuras dos apêndices B e C (áreas isoladas), observa-se que, ao ignorarmos a existência das barras da face interna da perna, está-se admitindo uma geometria para a perna que se afasta consideravelmente da real. O mesmo se verifica em termos de valores numéricos, conforme indicado na Tabela 3.7, na qual os valores de área efetiva destoam bastante entre ambos os critérios, refletindo-se o mesmo efeito nos valores do índice de área exposta. Ainda assim, em relação à face longitudinal, os valores de índice de área exposta das duas torres são praticamente iguais, inclusive para os dois critérios de área de referência.

Tabela 3.7: Áreas de contorno e efetivas para as alturas de pernas 9,00 m (Torre A33) e 10,50 m (Torre A55).

Modelo	α ($^\circ$)	Área de Contorno (m ²)		Área Efetiva (m ²)		Índice de Área Exposta	
		A_{cc}	A_{cp}	A_{ec}	A_{ep}	φ_{ec}	φ_{ep}
Tor. A33-18c	0	0,0514	0,0537	0,0135	0,0188	0,26	0,35
	45	-	0,0731	-	0,0247	-	0,34
	90	0,0514	0,0537	0,0135	0,0188	0,26	0,35
Tor. A55-18c	0	0,1093	0,1093	0,0217	0,0306	0,20	0,28
	30	-	0,1313	-	0,0403	-	0,31
	56	-	0,1222	-	0,0380	-	0,31
	90	0,0745	0,0767	0,0195	0,0274	0,26	0,36

3.2.3.4.2 Conjunto de Pernas

Nesta etapa, as quatro pernas foram ensaiadas em conjunto, reproduzindo a disposição que estas possuem, quando da montagem das torres. Entretanto, durante a

realização dos ensaios estas foram ensaiadas de “cabeça para baixo” a fim de facilitar o processo de fixação das mesmas sobre a mesa de ensaios.

As figuras 3.16 e 3.17 apresentam as projeções das pernas 9,00 m e 10,50 m das torres A33 e A55, respectivamente. Conforme já mencionado anteriormente, a existência do treliçamento da face interna altera significativamente a característica da geometria projetada. Este aspecto é mais saliente na Figura 3.17b, referente ao ângulo de incidência do vento de 30° da Torre A55, no qual se observa uma alta densidade de barras.

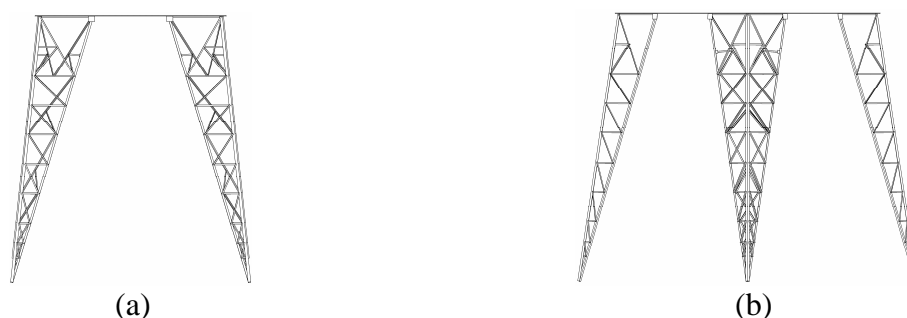


Figura 3.16: Projeção do conjunto das quatro pernas 9,0 m da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$.

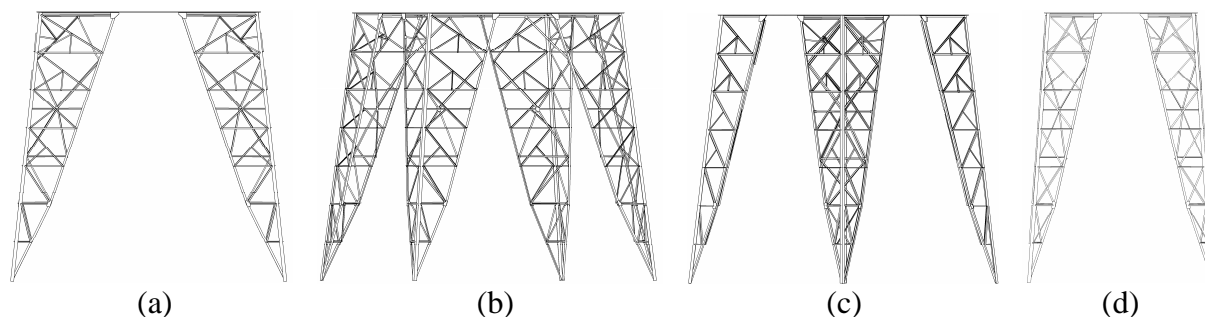


Figura 3.17: Projeção do conjunto das quatro pernas 10,50 m da Torre A55; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$; (d) Face transversal $\alpha = 90^\circ$.

A Tabela 3.8 apresenta os valores das áreas de referência para o conjunto de quatro pernas de ambas as torres. Importante ressaltar que se estabeleceu, em relação ao critério de área calculada, que a área de contorno para esta configuração representa o perímetro externo das duas pernas da face, de modo a formarem um “trapézio”. Todavia, para o cálculo da área efetiva calculada adotou-se a mesma sistemática aplicada para o caso da perna isolada. Conforme a Tabela 3.8, a adoção deste critério no cálculo da área de contorno, resultou em um valor de índice de área exposta para a área calculada muito pequeno, em média quatro vezes menor em relação ao índice obtido através do critério de área projetada.

Interessante aspecto se verifica para o critério de área projetada, a qual conduz a índices de área exposta idênticos para as faces longitudinal e transversal em ambas as configurações, perna isolada e conjunto de quatro pernas.

Tabela 3.8: Áreas de contorno e efetivas para as alturas de pernas 9,00 m (Torre A33) e 10,50 m (Torre A55).

Modelo	α ($^{\circ}$)	Área de Contorno (m ²)		Área Efetiva (m ²)		Índice de Área Exposta	
		A _{cc}	A _{cp}	A _{ec}	A _{ep}	Φ_{cc}	Φ_{ep}
Tor. A33-18a	0	0,3845	0,1074	0,0269	0,0376	0,07	0,35
	45	-	0,1513	-	0,0501	-	0,33
	90	0,3845	0,1074	0,0269	0,0376	0,07	0,35
Tor. A55-18a	0	0,6127	0,2189	0,0433	0,0612	0,07	0,28
	30	-	0,4419	-	0,1507	-	0,34
	56	-	0,2597	-	0,1062	-	0,41
	90	0,4116	0,1534	0,0389	0,0548	0,10	0,36

Um estudo mais direcionado contemplando outras alturas de pernas pode ser encontrado no trabalho apresentado no XVIII SNPTEE (Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica), elaborado por OLIVEIRA E SILVA *et al* (2005). Neste trabalho, os autores apresentam um comparativo, em termos de valores medidos, entre várias configurações contemplando à posição destas (barlavento, sotavento ou alinhadas) e ao número de pernas (isolada ou em conjunto de duas e quatro).

3.3 Sistema de Instrumentação e Medição das Forças de Arrasto

3.3.1 Medidas das Forças de Arrasto

Durante a realização dos ensaios foram medidos valores de força de arrasto (força paralela à direção do vento), para diferentes valores de velocidade do escoamento, de forma a se verificar uma eventual influência do número de *Reynolds* (*Re*). Os ângulos de incidência do vento para os ensaios foram pré-definidos, de modo que os modelos da Torre A33 foram ensaiados para os ângulos 0° (vento longitudinal), 45° (montantes alinhados com a direção do vento) e 90° (vento transversal), enquanto que os modelos da Torre A55 foram ensaiados para

os ângulos 0° (vento longitudinal), 30° , 56° (montantes alinhados com a direção do vento) e 90° (vento transversal).

Para as medidas das forças de arrasto, o eixo da balança ficava alinhado com o eixo longitudinal do túnel (adotado como eixo de referência). A referência para definição do ângulo de incidência do vento e para aplicação dos coeficientes de arrasto para ambas as torres estão indicadas na Figura 3.18.

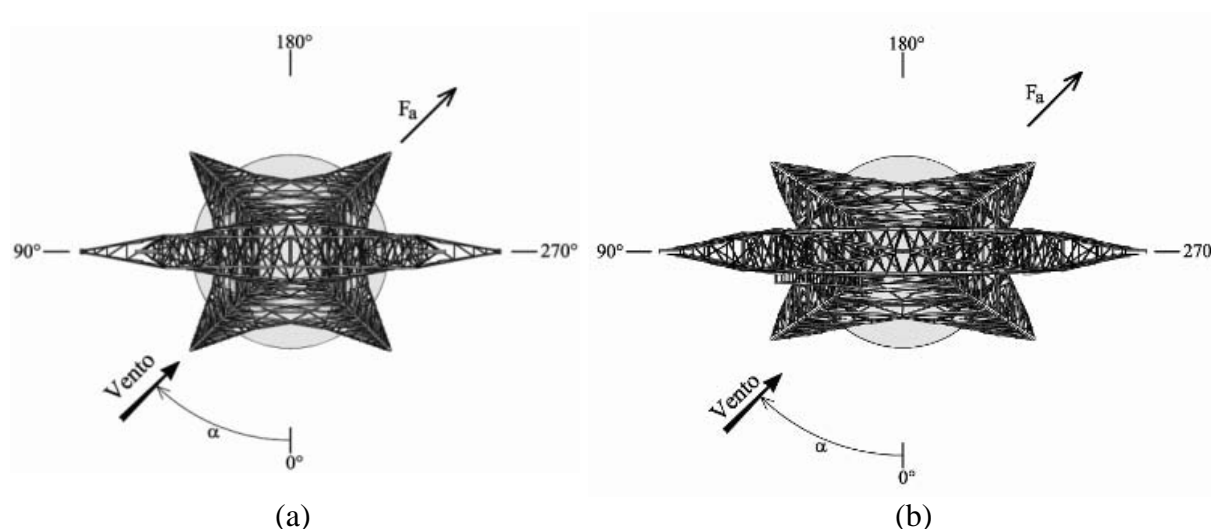


Figura 3.18: Referência para o ângulo de incidência do vento e para aplicação dos coeficientes de arrasto. (a) Torre A33. (b) Torre A55.

3.3.1.1 Forças de Arrasto

Por definição, a força de arrasto é aquela força que atua na direção do vento, desta maneira, a medição das forças de arrasto sempre foi realizada com o eixo da balança de forças alinhado com o eixo do túnel. Assim, mantinha-se a balança sempre fixa e se girava somente a mesa de ensaios com os modelos posicionados nos ângulos correspondentes a cada torre.

Com o intuito de alcançar uma maior precisão nas medidas experimentais, procurou-se descontar da força de arrasto total medida, o arrasto gerado pela mesa (base) de ensaios, assim como pela presença de eventuais dispositivos, como suportes (apoios) para os modelos ou tirantes usados para fornecer estabilidade aos modelos. Sendo estes dispositivos de seção circular, a estimativa do número de *Reynolds* associado foi extraída de SCHLICHTING (1987), obtendo-se assim o valor de força de arrasto a ser descontado.

3.3.1.2 Velocidades de Ensaio

Conforme comentado anteriormente, a fim de se verificar a não influência do número de *Reynolds* no valor do C_a , as medidas de força de arrasto foram realizadas para quatro valores distintos de velocidades com intervalos variados, os quais variavam conforme o modelo ensaiado, uma vez que se evitava ultrapassar o limite de carregamento (força) determinado durante a calibração da balança.

3.3.2 Balança de Força

Para a determinação da força de arrasto aerodinâmico sobre os modelos das torres foi confeccionada uma balança de força unidirecional instrumentada com extensômetros. Conforme a Figura 3.19, a balança é constituída de duas placas rígidas horizontais, unidas por quatro lâminas verticais de aço inox temperado. A placa inferior é rigidamente acoplada a um tripé fixo sobre o piso das instalações do túnel de vento, enquanto a placa superior é acoplada à mesa de ensaios (base dos modelos), a qual se desloca em conjunto com os modelos no sentido do escoamento, na proporção da força de arrasto aerodinâmico atuante.



Figura 3.19: Balança de força unidirecional: (a) detalhe da instrumentação; (b) instalação sob a base do túnel de vento.

Adotando-se o eixo longitudinal do túnel como referência, esta balança apresenta basicamente dois eixos principais: o eixo longitudinal (eixo de maior flexibilidade) e o eixo transversal (eixo de sensibilidade desprezável). As lâminas verticais tiveram sua flexibilidade criteriosamente escolhida, de forma que o deslocamento da placa superior tenha uma

magnitude de deformação adequada à sensibilidade dos extensômetros elétricos sem, contudo, incorrer em não-linearidades físicas ou geométricas. Além disso, a fim de reduzir ao máximo a sensibilidade da balança à transmissão de esforços transversais, procedeu-se à solda das lâminas flexíveis verticais da balança nas placas rígidas horizontais de modo a proporcionar uma maior rigidez ao conjunto da balança.

3.3.2.1 Célula de Carga

Para a medição das forças de arrasto utilizou-se um sistema redundante, constituído de dois pares de lâminas cada um, instrumentadas com extensômetros em ponte completa, denominados de célula de barlavento e célula de sotavento. A força de arrasto horizontal atuante sobre o modelo é transferida à placa superior da balança, provocando a flexão das lâminas de aço inoxidável. Dentro de certos limites, que não devem ser ultrapassados durante os ensaios, as deformações nas lâminas são linearmente dependentes da força horizontal a ser medida. Estas deformações, por sua vez, são medidas por meio dos extensômetros elétricos de resistência, os quais tendem a se deformar sempre que o eixo das lâminas sofrer uma translação.

Extensômetros elétricos de resistência (*strain gages*) são pequenos sensores que têm como característica principal alterar sua resistência elétrica sempre que sofrerem uma deformação, uma vez que a variação na resistência é proporcional à deformação sofrida. Geralmente o extensômetro compõe um circuito chamado *Ponte de Wheatstone*, onde a variação da resistência desequilibra o circuito causando o aparecimento de uma diferença de potencial elétrico (ddp) que é proporcional à força que provocou a deformação no extensômetro. No presente trabalho foram montadas duas pontes de *Wheatstone* completas (quatro extensômetros em cada ponte), de modo a criar uma redundância de medição, aumentando a confiabilidade das medidas de força de arrasto.

3.3.2.2 Calibração

Após sua instalação na câmara de ensaios do túnel de vento, a balança foi estaticamente calibrada por meio de um conjunto de massas conhecidas. Tomando-se o eixo de menor rigidez da balança (eixo longitudinal) como referência, calibrou-se a mesma para

quatro ângulos distintos (0° , 30° , 45° e 60°), objetivando-se identificar a ocorrência de alguma sensibilidade transversal significativa. Como procedimento padrão de ensaio, realizaram-se sempre duas calibrações diárias, uma no início e outra no final da série de ensaios previstos, a fim de garantir a normalidade de funcionamento das células de medição.

Desta forma, para cada ângulo, foi ajustada uma reta de calibração, relacionando linearmente a força horizontal aplicada e a tensão registrada no sistema de aquisição de dados, conforme mostrado no gráfico da Figura 3.20. Destes ajustes obtêm-se uma constante de calibração (N/mV) para cada ângulo (inverso do coeficiente angular da reta) que possibilita relacionar a leitura de tensão (mV) no sistema de aquisição de dados com a força de arrasto atuante no modelo (N) durante o ensaio.

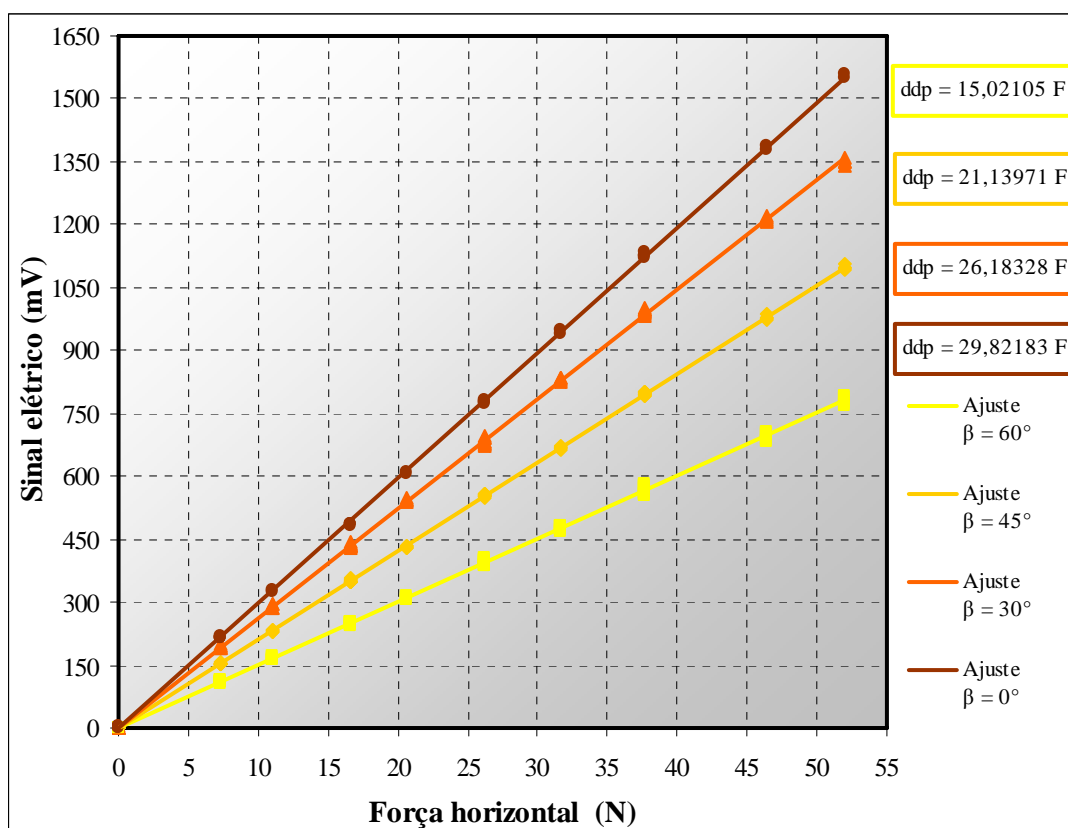


Figura 3.20: Resultados da calibração da balança para diferentes ângulos de aplicação da carga.

Extraindo-se o coeficiente angular (a) da equação ajustada na Figura 3.20, e inserindo-se este na Equação 3.1 podemos obter o coeficiente de calibração (C) para qualquer ângulo de aplicação da carga (β). Em geral se observam constantes de calibração da ordem de 0,0333 N/mV, nesse sentido, considerando-se a resolução do sistema de aquisição, verifica-se

que o sistema de medição apresenta uma resolução não inferior a 0,0981 N, sendo esta considerada adequada para a magnitude das forças medidas, que podem chegar a magnitude de até 51 N.

$$C = \frac{1}{a} \cos(\beta) \quad (\text{Equação 3.1})$$

No Apêndice G são apresentados, de forma gráfica, os resultados referentes ao estudo da consideração de efeitos de segunda ordem (tipo *P-Delta*) nos coeficientes de calibração da balança, induzidos pelo peso dos modelos instalados sobre a balança, assim como pela mesa de ensaios (plataforma de fixação), causando distorções de até 3,0% na magnitude das forças medidas. Deste modo, procede-se a calibração com uma carga vertical de valor aproximadamente igual à carga máxima presente durante a realização dos ensaios, minimizando a influência (já pequena) deste tipo de efeito.

3.3.2.3 Aquisição de Dados

O esquema geral do sistema de aquisição de dados utilizado com a balança de medição de força de arrasto, provida da instrumentação redundante está mostrado na Figura 3.21. Para a medição da deformação das lâminas decorrente do deslocamento relativo entre as placas rígidas da balança foram utilizados oito extensômetros de 350 Ω , dispostos em ponte completa. Estas pontes foram condicionadas e amplificadas por dois condicionadores BAM (*Bridge Amplifier and Meter*).

O sinal amplificado foi monitorado por um osciloscópio digital (*TekTronix*, modelo TDS210), de dois canais, e registrado por meio de um sistema de aquisição de dados. Este sistema de aquisição é composto por uma placa de conversão A/D de 12 bits e 16 canais (*Computerboards*, modelo DAS12/330), instalada no computador. A placa de conversão é controlada pelo programa *HPVEE*, da *HP*. A leitura da placa de conversão foi mapeada numa faixa de tensão de -5000 a +5000 mV, resultando em uma resolução de aproximadamente 2,40 mV.

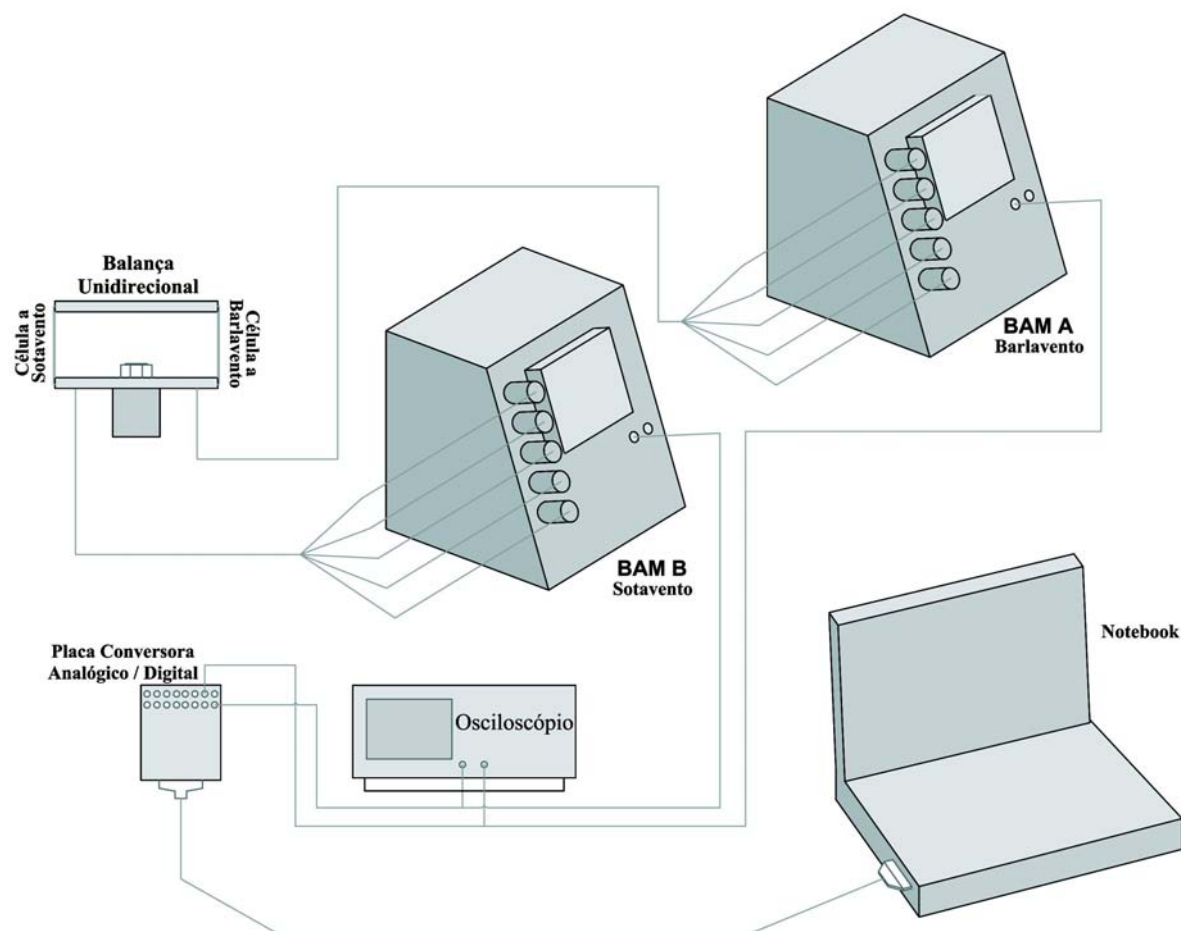


Figura 3.21: Esquema geral do sistema de aquisição de dados utilizado com a balança de força unidirecional.

4 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

4.1 Aspectos Gerais

Neste Capítulo são apresentadas algumas análises, tanto em termos de valores de coeficientes de arrasto calculados, assim como em termos de forças de arrasto medidas. Nesse sentido, partindo da contextualização apresentada no item referente aos objetivos (item 1.4) do presente trabalho, estas análises foram centralizadas nos seguintes pontos:

- a) verificar a eficácia das técnicas de medição de arrasto em túnel de vento sobre os modelos estudados no decorrer da elaboração do presente trabalho;
- b) cálculo do coeficiente de arrasto relativo ao ângulo de incidência de cada um dos trechos ensaiados e, correspondente comparativo gráfico dos coeficientes de arrasto experimentais com os as curvas normalizadas das NBR's e da IEC;
- c) comparativo numérico das forças experimentais medidas em túnel de vento com as forças apresentadas na Memória de Cálculo de projeto da torre e outras referências constantes na literatura;
- d) razão numérica entre forças experimentais medidas em túnel de vento e forças calculadas, para a hipótese de vento oblíquo, usando coeficientes de arrasto experimentais.

Na realização de análises que envolvam comparações entre medidas de distintos modelos, requer-se que os dados adquiridos estejam referenciados a uma mesma velocidade de escoamento e escala. Considerando-se que os modelos foram ensaiados em diferentes níveis de velocidades de vento, assim como em escalas distintas, converteram-se todas as forças medidas e calculadas para a velocidade de referência de 35 m/s e para a escala real das torres (1:1), facilitando assim, a análise e comparação dos resultados. A conversão destas medidas foi realizada através do emprego da Equação 4.1, na qual o subíndice "A" se refere ao valor da medida corrente (atual), e o subíndice "N" ao novo valor de interesse. As letras F , L e V , representam as variáveis de força, escala e velocidade, respectivamente.

$$F_N = \left(\frac{L_A}{L_N} \right)^2 \left(\frac{V_N}{V_A} \right)^2 F_A \quad (\text{Equação 4.1})$$

A estimativa do coeficiente de arrasto associado a cada modelo foi realizada via Equação 2.4, enquanto que o cálculo da força foi obtido através da Equação 2.5 da NBR 5422/85. Entretanto, para a mísula isolada, existe um procedimento específico na Norma Européia prEN 50.341-1 (prEN, 2000), cuja recomendação foi adotada no presente trabalho, podendo-se estimar a força de arrasto devido ao vento usando a Equação 4.2, conforme segue:

$$Q_{wtc} = q_h G_q G_t C_{tc} A_{tc} [\text{sen}(90 - \alpha) + 0,4 \cos(90 - \alpha)] \quad (\text{Equação 4.2})$$

onde, Q_{wtc} representa a força de arrasto; q_h é a pressão dinâmica; G_q é o fator de resposta de rajada (adotado igual a 1); G_t é o fator de ressonância estrutural (adotado igual a 1); C_{tc} é o coeficiente de arrasto para vento perpendicular à face transversal da mísula; A_{tc} representa a área efetiva dos elementos expostos ao vento na face transversal e α é o ângulo de incidência do vento (ajustado de acordo com a referência da NBR 5422).

Analisando-se a Equação 4.2, e comparando-se esta com a Equação 2.5 da NBR 5422/85, é possível concluir que a expressão proposta pela Norma Européia conduz a uma estimativa de força de arrasto transversal que representa somente 40% da força calculada pela expressão da NBR 5422/85.

4.2 Medidas de Arrasto em Túnel de Vento

As medidas de arrasto em túnel de vento foram obtidas a partir da aplicação do método quantitativo comentado por LOREDO-SOUZA (1996). Conforme este método divide-se a estrutura da torre em trechos (módulos), determinando-se as forças de arrasto sobre estas partes, de modo que a força total é obtida então a partir da soma das forças parciais atuantes sobre estes módulos.

No sentido de comprovar a eficácia do presente método, apresenta-se nas tabelas seguintes um conjunto de relações baseadas no somatório (composição) das forças atuantes sobre módulos mais simples (elementares), e comparando-se estes somatórios com a força total medida sobre o conjunto (módulo principal) do correspondente trecho. No caso daqueles módulos, cuja força foi considerada mais de uma vez no módulo composto, estão seguidos por parênteses, onde é indicado o número de vezes que esta força foi multiplicada.

Tabela 4.1: Razão entre forças medidas (módulos principais) e forças somadas (módulos simples) para a Torre A33.

Módulo		Razão		
Principal	Composto	0°	45°	90°
Tor. A33-4	Tor. A33-2 + Tor. A33-3	0,92	0,88	0,70
Tor. A33-5	Tor. A33-2 (2X) + Tor. A33-3	0,88	0,83	0,59
	Tor. A33-2 + Tor. A33-4	0,94	0,93	0,78
Tor. A33-6	Tor. A33-1 (2X) + Tor. A33-2 (2X) + Tor. A33-3	0,82	0,82	0,61
	Tor. A33-1 (2X) + Tor. A33-2 + Tor. A33-4	0,75	0,68	0,45
	Tor. A33-1 (2X) + Tor. A33-5	0,91	0,94	0,83
Tor. A33-8	Tor. A33-7 (2X)	0,99	1,03	0,87
Tor. A33-10a	Tor. A33-10b	0,94	1,05	1,01
Tor. A33-11	Tor. A33-7 + Tor. A33-9	1,12	1,12	1,16
Tor. A33-12	Tor. A33-8 + Tor. A33-10a	1,04	1,02	0,99
	Tor. A33-8 + Tor. A33-10b	1,00	1,05	1,00
	Tor. A33-7 (2X) + Tor. A33-10b	0,99	1,06	0,95
Tor. A33-13	Tor. A33-6 + Tor. A33-8	1,00	1,01	0,98
	Tor. A33-1 (2X) + Tor. A33-5 + Tor. A33-8	0,93	0,97	0,88
Tor. A33-14	Tor. A33-10b + Tor. A33-13	1,00	1,03	0,99
	Tor. A33-12 + Tor. A33-13 - Tor. A33-8	1,00	1,00	0,99
	Tor. A33-6 + Tor. A33-12	1,00	1,00	0,98
	Tor. A33-1 (2X) + Tor. A33-5 + Tor. A33-12	0,95	0,98	0,93
	Tor. A33-6 + Tor. A33-8 + Tor. A33-10b	1,00	1,03	0,98
Tor. A33-18a	Tor. A33-18c (4X)	0,87	0,78	0,87

Nestas relações, é desejado que a razão entre o módulo principal e o módulo composto se mantenha em torno de um. Observando-se os valores da Tabela 4.1, constata-se que para alguns casos, principalmente aqueles associados aos trechos do Grupo I de modelos (pára-raios, mísulas e viga), na condição de vento transversal, ocorreram valores bastante

afastados da razão unitária. Ainda assim, para a mesma condição (vento transversal), é possível notar um nítido efeito de proteção sobre as faces a sotavento.

Contudo, nos demais casos, a soma das forças sobre os módulos mais simples se mostrou bastante satisfatória, resultando diversas vezes em razões praticamente unitárias, como foi o caso dos trechos referentes ao delta (diversas configurações) em combinação com o da viga (para-raios, mísulas, viga).

Por sua vez, na Tabela 4.2 seguem os valores referentes à razão módulo principal/módulo composto da Torre A55. Dispõe-se de poucas combinações para esta torre, entretanto, estas também apresentam uma boa correspondência, uma vez que os valores oscilaram, em média, entre 0,90 e 1,00.

Tabela 4.2: Razão entre forças medidas (módulos principais) e forças somadas (módulos simples) para a Torre A55.

Módulo		Razão			
Principal	Composto	0°	30°	56°	90°
Tor. A55-10a	Tor. A55-10b	0,88	0,88	0,92	0,94
Tor. A55-14	Tor. A55-6 + Tor. A55-10a	1,00	1,01	1,01	1,00
	Tor. A55-6 + Tor. A55-10b	0,95	0,96	0,98	0,97
Tor. A55-15a	Tor. A55-15b + Tor. A55-15c	0,96	0,92	0,93	0,89
Tor. A55-18a	Tor. A55-18c (4X)	0,88	0,99	0,85	0,86

4.3 Coeficientes de Arrasto

Os coeficientes de arrasto que os projetistas dispõem para o cálculo das forças exercidas pelo vento sobre as estruturas de LT's foram obtidos a partir de configurações de painéis treliçados típicos daqueles encontradas nas construções civis, constituídos, basicamente, por painéis retangulares. Entretanto, a grande maioria das configurações encontradas nas estruturas de LT's afasta-se, na maioria dos casos, da condição de painéis retangulares, como são os casos das mísulas, vigas, deltas e pernas das estruturas. Nesse sentido, estaremos apresentando, para cada torre, valores de coeficientes de arrasto experimentais obtidos com base nos índices de área exposta determinados no Capítulo 3 referente às distintas geometrias ensaiadas.

São apresentados na seqüência, em forma gráfica, os valores dos coeficientes de arrasto experimentais comparando-se estes com as curvas das NBR's e da IEC, as quais estão sendo usadas como padrão de referência neste trabalho. Os coeficientes de força para cada uma das torres estão fornecidos em função do critério de A_{ref} adotado, isto é, área calculada (área de projeto) e área projetada (área de sombra), e também em função do ângulo considerado para cada modelo ensaiado. Adicionalmente, os valores dos coeficientes também estão apresentados numericamente no Apêndice H na forma de tabelas.

4.3.1 Torre Autoportante A33

4.3.1.1 Área de Referência: Área Calculada

Através das figuras do Apêndice B é possível identificar e situar cada uma das faces isoladas, para as quais são apresentados nos gráficos das figuras 4.1 e 4.2 os correspondentes coeficientes de arrasto experimentais para os ventos longitudinal (0°) e transversal (90°) da Torre A33.

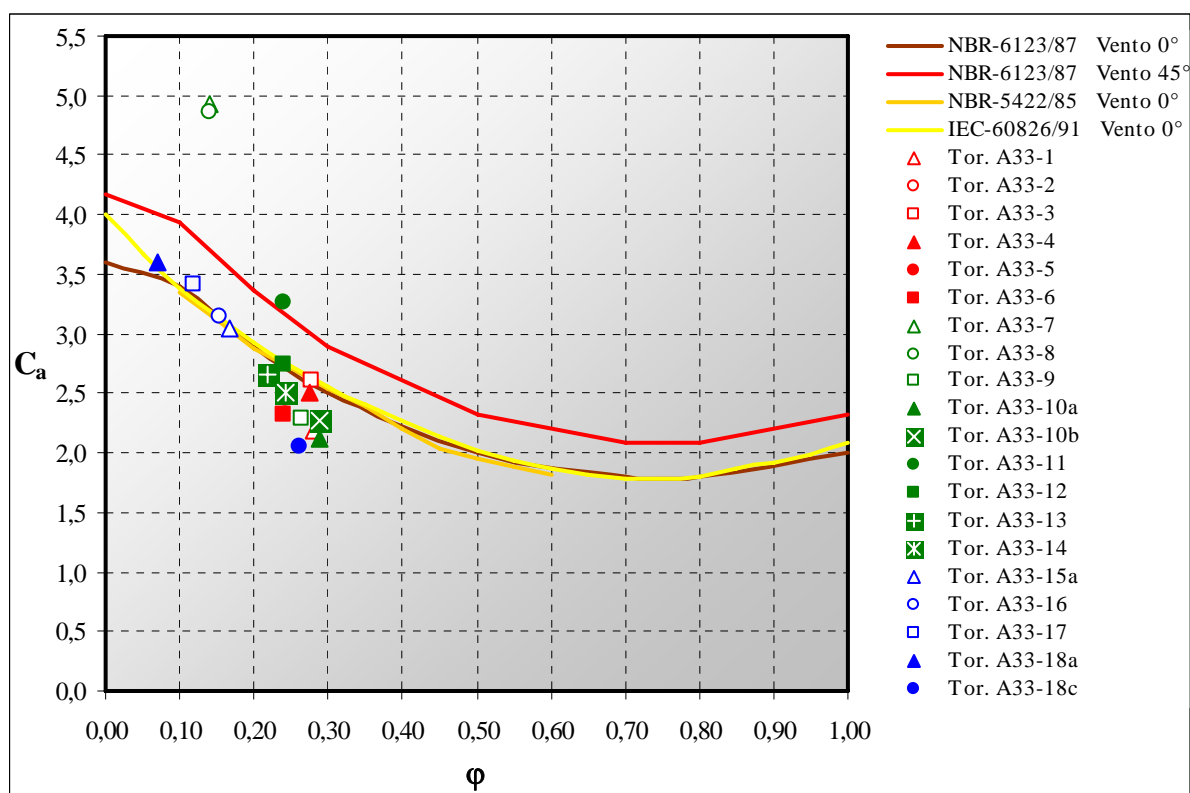


Figura 4.1: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A33 para vento longitudinal (0°), considerando área de referência calculada.

Observando-se a Figura 4.1, constata-se que em termos de índice de área exposta, ocorre uma maior concentração de pontos (coeficientes de arrasto) no intervalo compreendido entre 0,20 a 0,30. Além disto, para vento longitudinal, a maioria destes pontos ficou situada sobre ou abaixo das curvas das normas, porém próximos a estas. Somente os pontos referentes aos modelos do delta superior parcial e completo (Tor. A33-7 e Tor. A33-8) estão bem superiores às curvas das normas, assim como aos demais valores experimentais. Atenta-se para o fato dos módulos referentes ao tronco comum (Tor. A33-15a) e às extensões (Tor. A33-16 e Tor. A33-17) se situarem aproximadamente sobre as curvas das normas, confirmando a premissa de que estas curvas são válidas para trechos com faces aproximadamente verticais e treliçamentos idênticos em todas as faces.

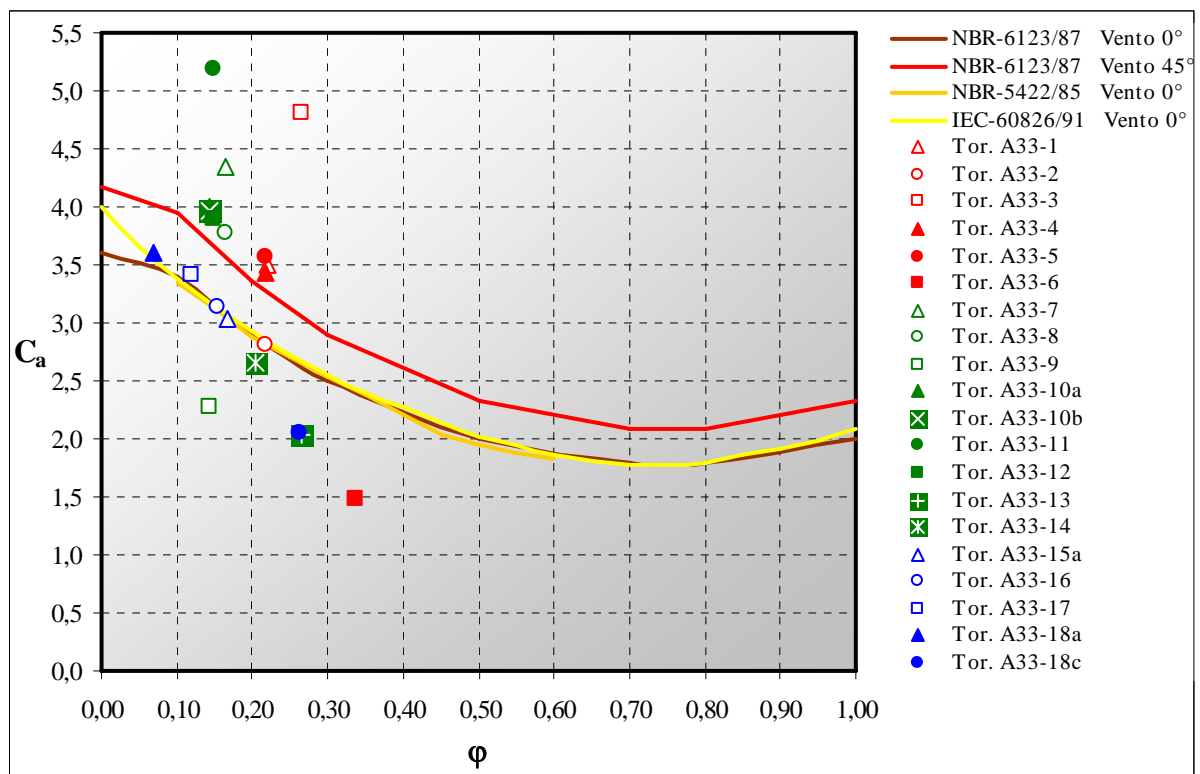


Figura 4.2: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A33 para vento transversal (90°), considerando área de referência calculada.

Diferentemente da condição de vento longitudinal, os coeficientes experimentais relativos ao vento transversal (Figura 4.2) apresentam uma dispersão maior, tendo como C_a mínimo o valor de 1,49 (Tor. A33-6) correspondente ao módulo da viga completa (viga, pára-raios e mísulas) e como valor máximo de C_a igual a 5,19, correspondente ao módulo do delta parcial (Tor. A33-11). Os deltas, os quais foram ensaiados em duas escalas distintas (1:17 e 1:8), conduziram a coeficientes muito próximos, considerando-se cada uma das duas direções

0° e 90°, todavia, entre estas (direções), os coeficientes ficaram bastante afastados (75%), devido às acentuadas diferenças entre os treliçamentos de cada uma das faces.

Os trechos referentes ao tronco comum, extensões e pernas apresentam os mesmos valores para ambos os ângulos de incidência do vento, uma vez que sendo a torre de seção quadrada, esta apresenta o mesmo treliçamento em ambas as faces para aqueles trechos.

4.3.1.2 Área de Referência: Área Projetada

As figuras referentes aos painéis projetados da Torre A33, apresentadas no Capítulo 3, juntamente com as figuras do Apêndice D identificam e situam cada um dos painéis considerados (área de sombra), nos gráficos das figuras 4.3 e 4.4. Nestas estão indicados os coeficientes de arrasto experimentais para os ventos longitudinal (0°), oblíquo (45°) e transversal (90°) da Torre A33, conforme o critério em questão.

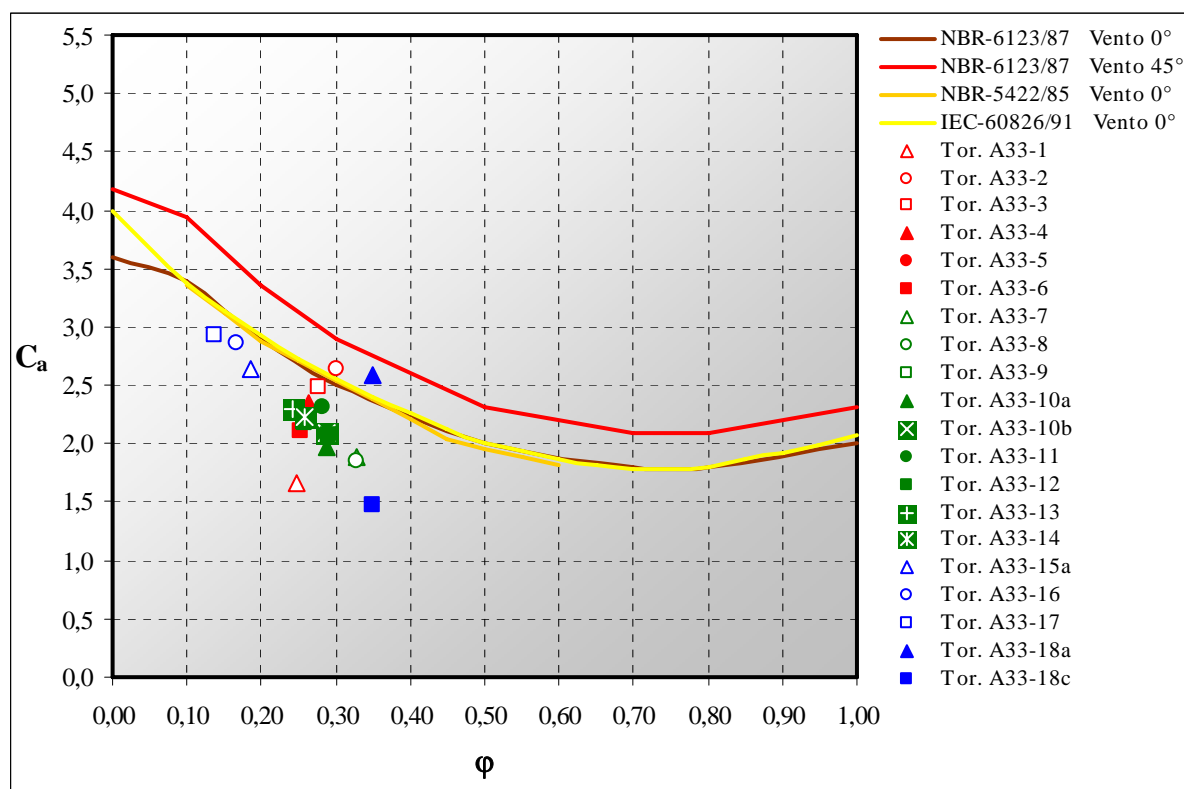


Figura 4.3: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A33 para vento longitudinal (0°), considerando área de referência projetada.

Analisando-se a Figura 4.3 (área projetada) e comparando-se esta com a Figura 4.1 (área calculada) é possível identificar duas semelhanças qualitativas, entre as

mesmas, as quais são: a maioria dos pontos experimentais se situou sobre ou abaixo das curvas das normas, assim como a maioria destes pontos estão situados entre o intervalo 0,25 e 0,35 do índice de área exposta. Porém, para o presente critério (área de sombra), não ocorreram valores discrepantes, cujo maior valor de C_a medido foi 2,93 correspondente à extensão 12,0 m.

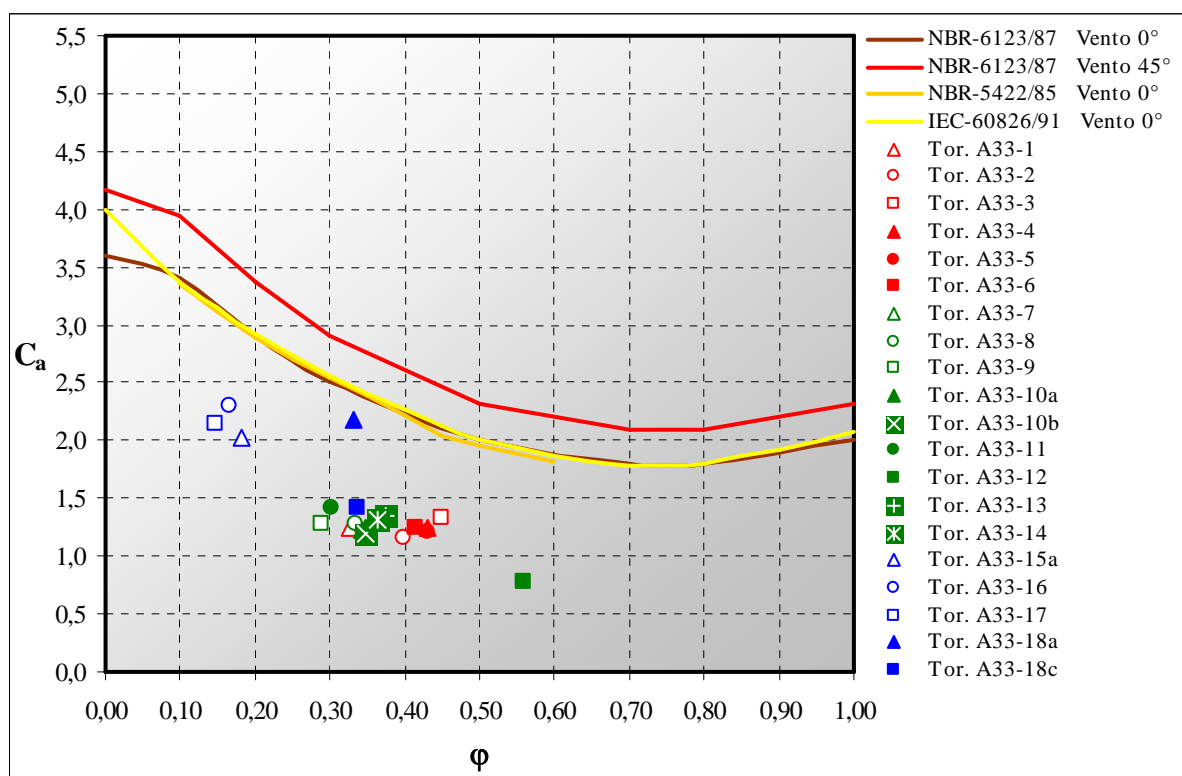


Figura 4.4: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A33 para vento oblíquo (45°), considerando área de referência projetada.

A Figura 4.4 apresenta os coeficientes experimentais para o vento oblíquo sobre os modelos da Torre A33. Estes são, para todas as configurações, menores que os coeficientes determinados para os ventos perpendiculares, inclusive muito abaixo da curva correspondente a 45° da NBR 6123. Além disso, a projeção oblíqua comparativamente à projeção perpendicular, tende a conduzir a uma densidade maior de barras, implicando no aumento do valor da A_e do módulo, e dependendo da característica do módulo, também elevar a magnitude do índice de área exposta. No caso da Torre A33, a maioria dos modelos apresentam o índice de área exposta maiores que 0,30, chegando a 0,56 para o modelo do delta completo (Tor. A33-12).

Analogamente ao comportamento observado na Figura 4.1 (área calculada), na Figura 4.5 também se observa que os coeficientes medidos estão mais dispersos, principalmente devido à ampla gama de índices de área exposta (0,14 a 0,54) obtidos pelo presente critério. Ainda na mesma figura, nota-se que o coeficiente medido (4,42) referente ao pára-raios (Tor. A33-1) destoa dos demais. Tal discrepância é motivada, parcialmente, devido à pequena área efetiva obtida para esta configuração.

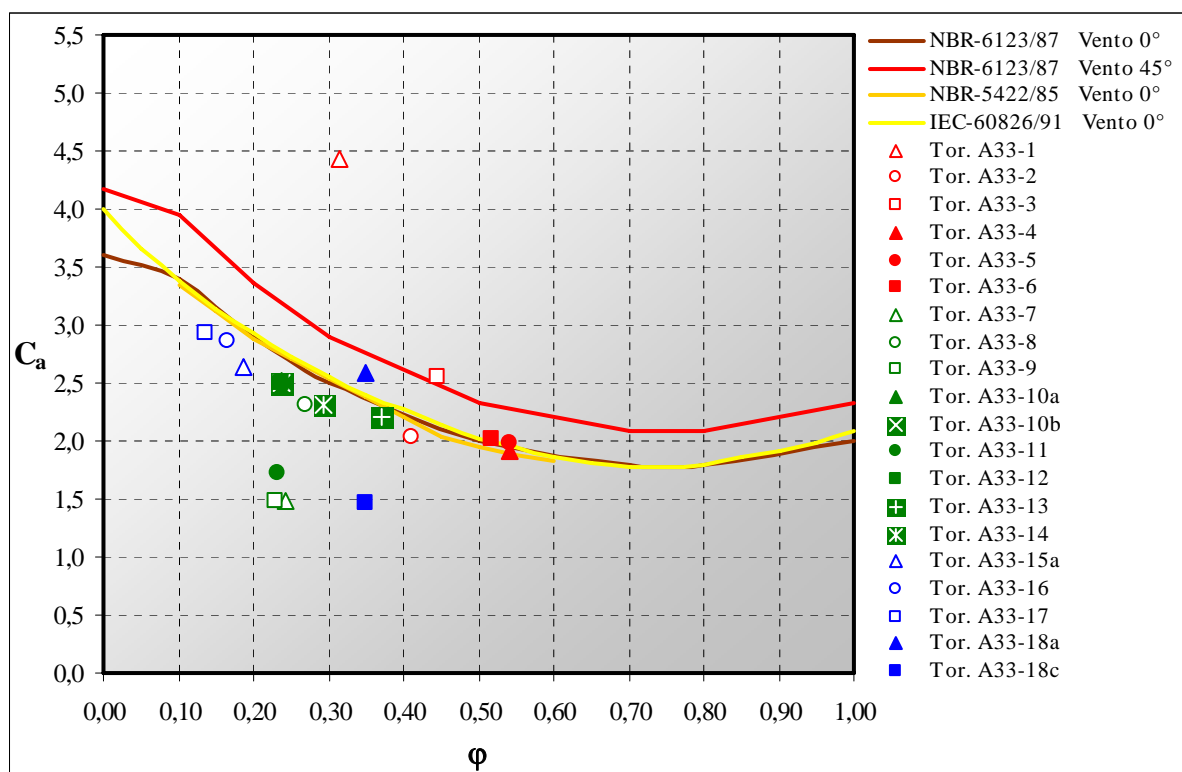


Figura 4.5: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A33 para vento transversal (90°), considerando área de referência projetada.

Fazendo-se novamente uma avaliação qualitativa dos coeficientes obtidos para o delta inferior (Tor. A33-10a e Tor A33-10b) para o presente critério, em particular, em relação àqueles obtidos para o vento transversal, verifica-se que estes são 63% menores do que aqueles determinados através do critério da área calculada. Tal redução é devido ao alto valor da A_e determinada com base no critério de área de sombra, conduzindo a um valor de C_a menor, uma vez que estes dois parâmetros apresentam características inversamente proporcionais.

Por fim, em relação à recomendação da Norma Européia prEN (2000) para estimativa da força de arrasto sobre a mísula (Tor. A33-2) e o pára-raios (Tor. A33-1),

comparando-se os resultados obtidos na aplicação de cada critério, notou-se que a recomendação apresentou uma maior coerência na aplicação sobre o trecho da mísula isolada, em especial para o vento longitudinal, cujo coeficiente para ambos os critérios se situou em torno de 2,60. Por sua vez, no caso do pára-raios isolado, não se observou a mesma tendência, para o qual se obteve valores dispersos, indicando que o uso da recomendação para este elemento é inadequado.

4.3.2 Torre Autoportante A55

4.3.2.1 Área de Referência: Área Calculada

Conforme já foi citado anteriormente, a Torre A55 é uma estrutura de seção retangular, de modo que as suas faces não apresentam o mesmo treliçamento. O Apêndice C contém as figuras que identificam e situam cada uma das faces isoladas, para as quais são apresentados, nos gráficos das figuras 4.6 e 4.7, os coeficientes de arrasto experimentais para os ventos longitudinal (0°) e transversal (90°). A região situada acima do delta é totalmente diferente do trecho similar da Torre A33, dificultando assim a realização de comparações entre as mesmas. Este aspecto fica evidente, por exemplo, para a viga isolada da Torre A55, para a qual (Figura 4.7) obteve-se um coeficiente para ao vento transversal muito afastado dos demais. Tal divergência é acentuada devido à característica particular dessa viga, a qual apresenta as faces inclinadas e unidas em um único ponto por uma chapa de ligação.

Em relação às figuras 4.6 e 4.7, considerando-se os trechos parciais do tronco comum (Tor. A55-15b e Tor. A55-15c), os quais apresentam alturas distintas, e conseqüentemente coeficientes distintos, oscilando em torno do valor médio de C_a igual a 3,12, ainda assim estes estão próximos as curvas das normas. Por sua vez, em relação ao delta, o qual foi ensaiado em duas escalas distintas (Tor. A55-10a e Tor. A55-10b), os coeficientes divergiram bastante entre as duas configurações. Em relação a esta tendência divergente, acredita-se que esteja associada à presença da escada (manutenção) na lateral do delta gerando alguma perturbação adicional no escoamento. Além disso, também devido à presença da escada aumentando a área de exposição, o coeficiente para o vento transversal é bem menor do que aquele obtido para a mesma configuração da Torre A33.

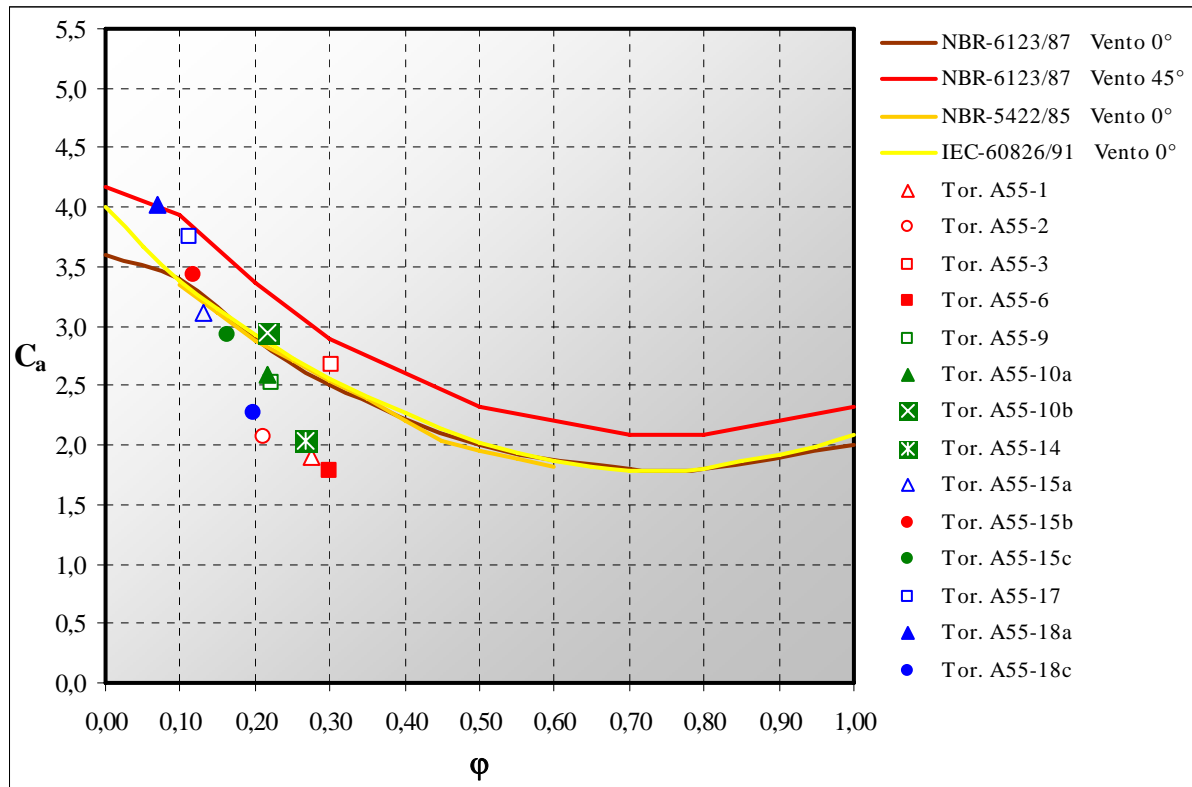


Figura 4.6: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A55 para vento longitudinal (0°), considerando área de referência calculada.

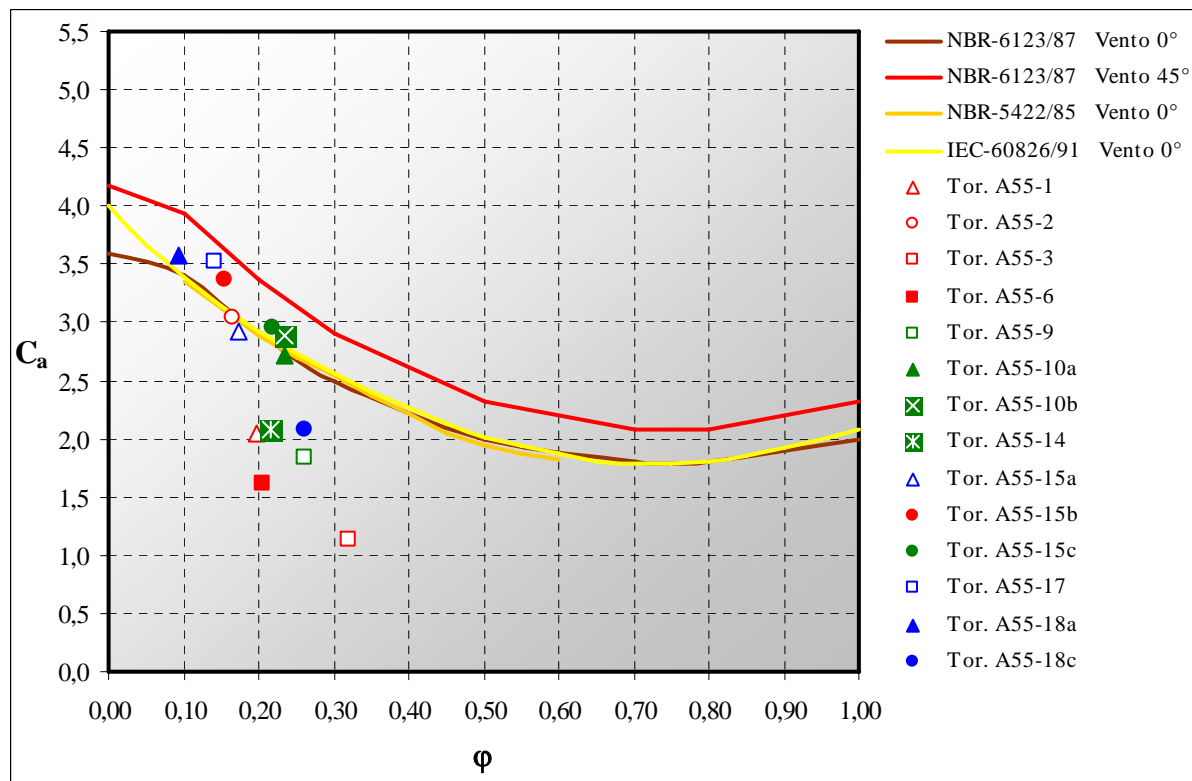


Figura 4.7: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A55 para vento transversal (90°), considerando área de referência calculada.

4.3.2.2 Área de Referência: Área Projetada

As figuras referentes aos painéis projetados da Torre A55, apresentadas no Capítulo 3, juntamente com as figuras do Apêndice E identificam e situam cada um dos painéis considerados (área de sombra), nos gráficos das figuras 4.8 a 4.11, estando indicados nestas os coeficientes de arrasto experimentais para os ventos longitudinal (0°), oblíquo (30° e 56°) e transversal (90°) da Torre A55, conforme o critério em questão.

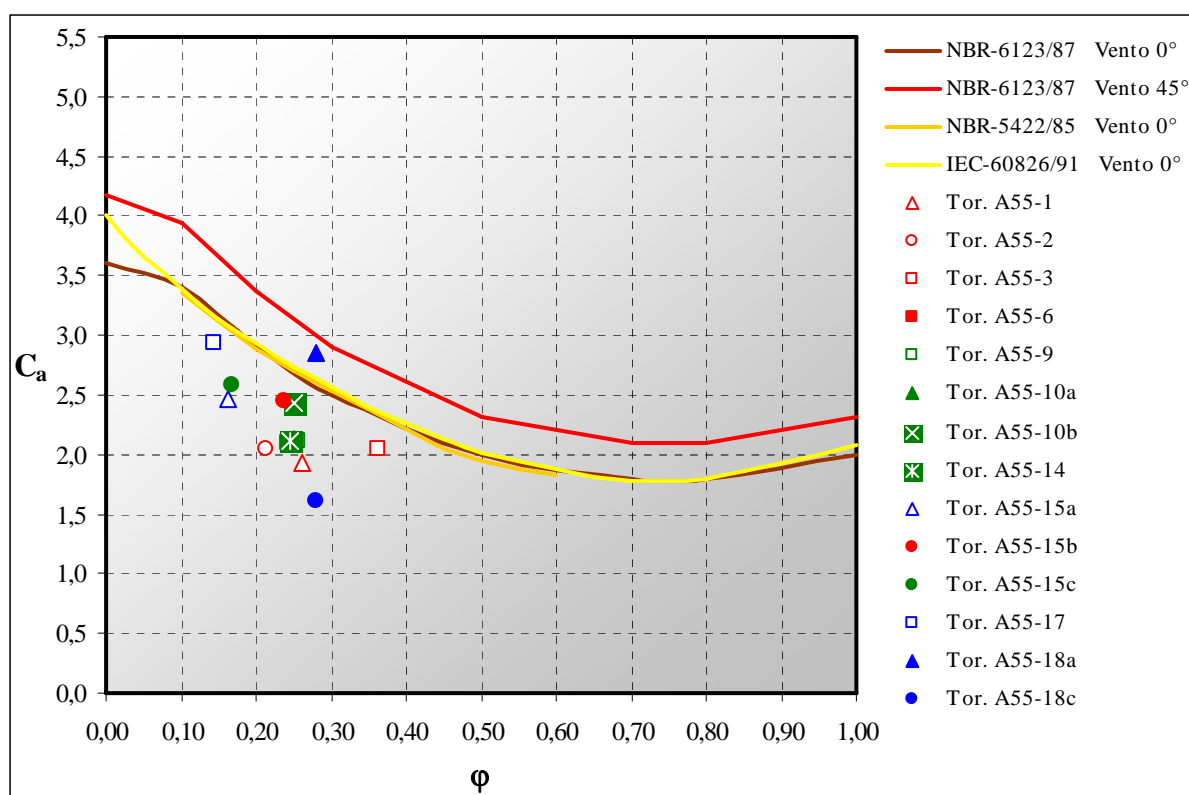


Figura 4.8: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A55 para vento longitudinal (0°), considerando área de referência projetada.

Analisando-se a Figura 4.8, nota-se que a maioria dos valores de coeficiente de arrasto se situaram no intervalo de índice de área exposta compreendido entre 0,20 e 0,30, coincidente com o da Figura 4.1 (Torre A33). Por sua vez, em relação à Figura 4.11, já se observou uma dispersão maior, cuja variação oscilou de 0,20 a 0,40. Ainda nas mesmas figuras, em relação ao tronco comum, observa-se que se obteve um coeficiente médio de 2,50 para ambas as configurações (trecho completo e dividido), cujo valor é próximo ao encontrado para a Torre A33. Por fim, em relação à recomendação da Norma Européia prEN (2000), novamente se verificou-se que o critério por ela proposto para as mísulas conduziu a valores de coeficientes de arrasto coerentes com os das normas.

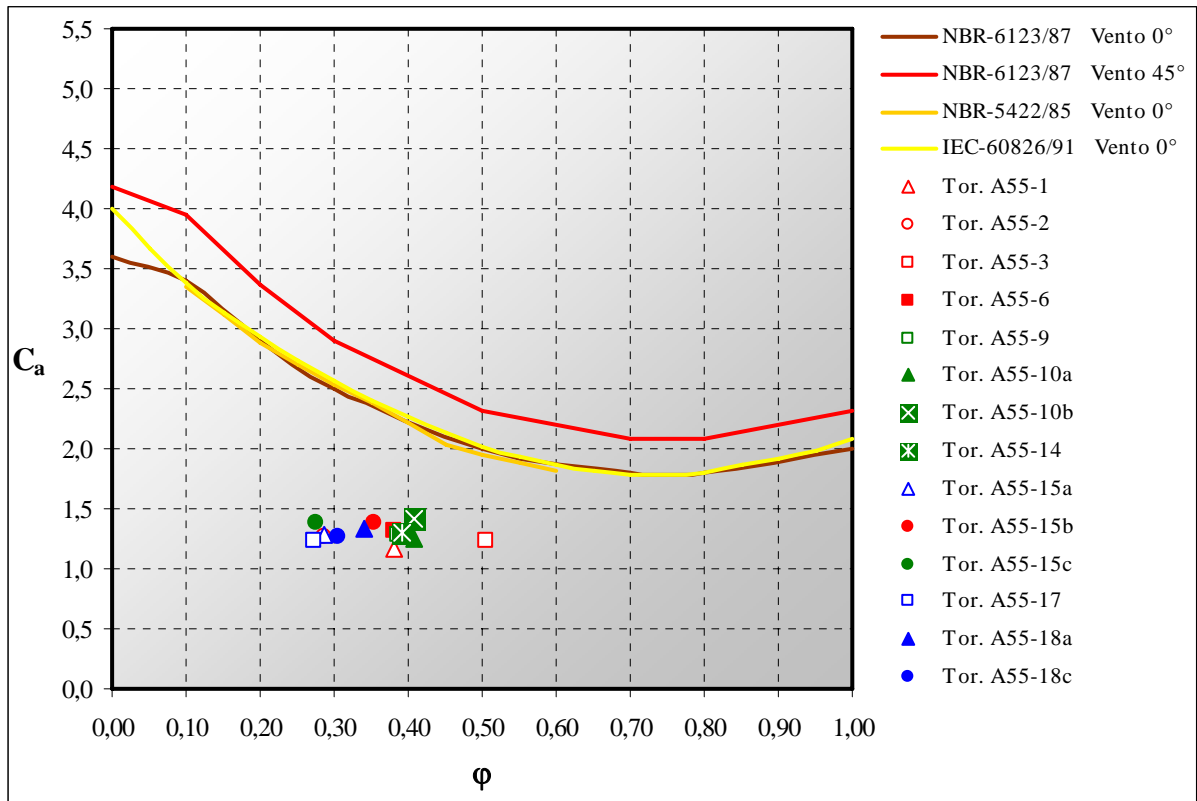


Figura 4.9: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A55 para vento oblíquo (30°), considerando área de referência projetada.

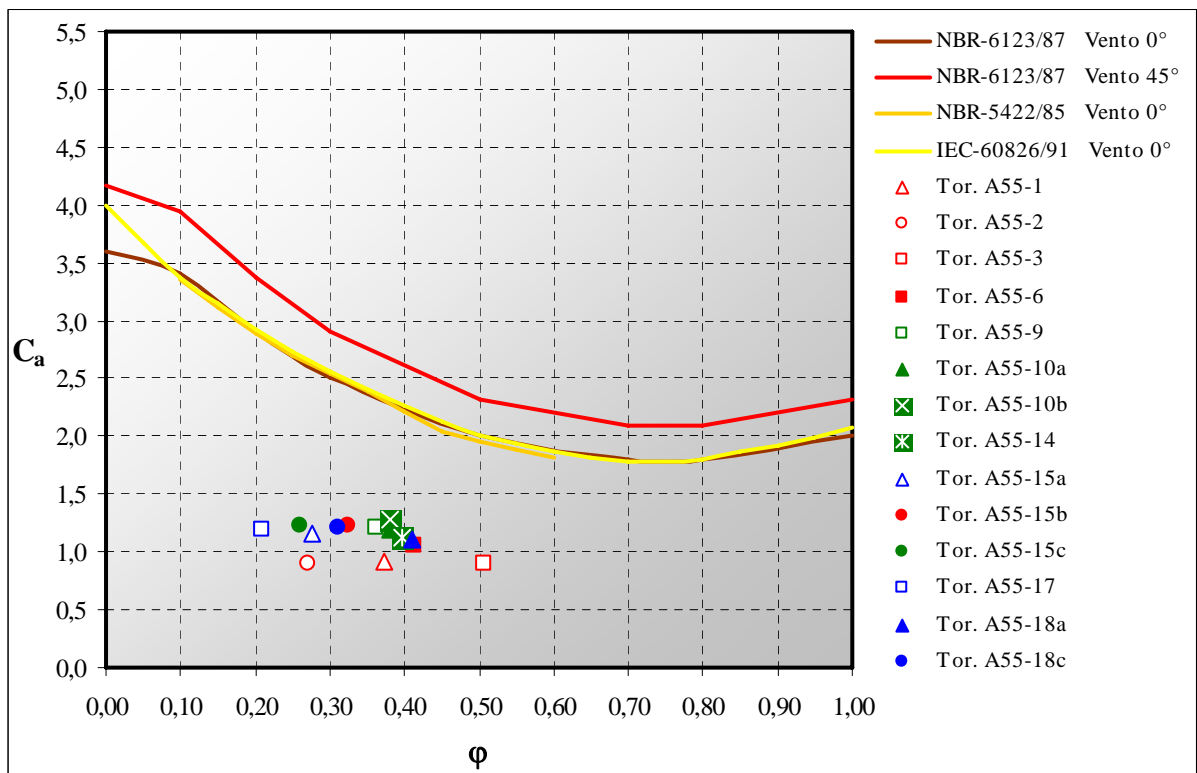


Figura 4.10: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A55 para vento oblíquo (56°), considerando área de referência projetada.

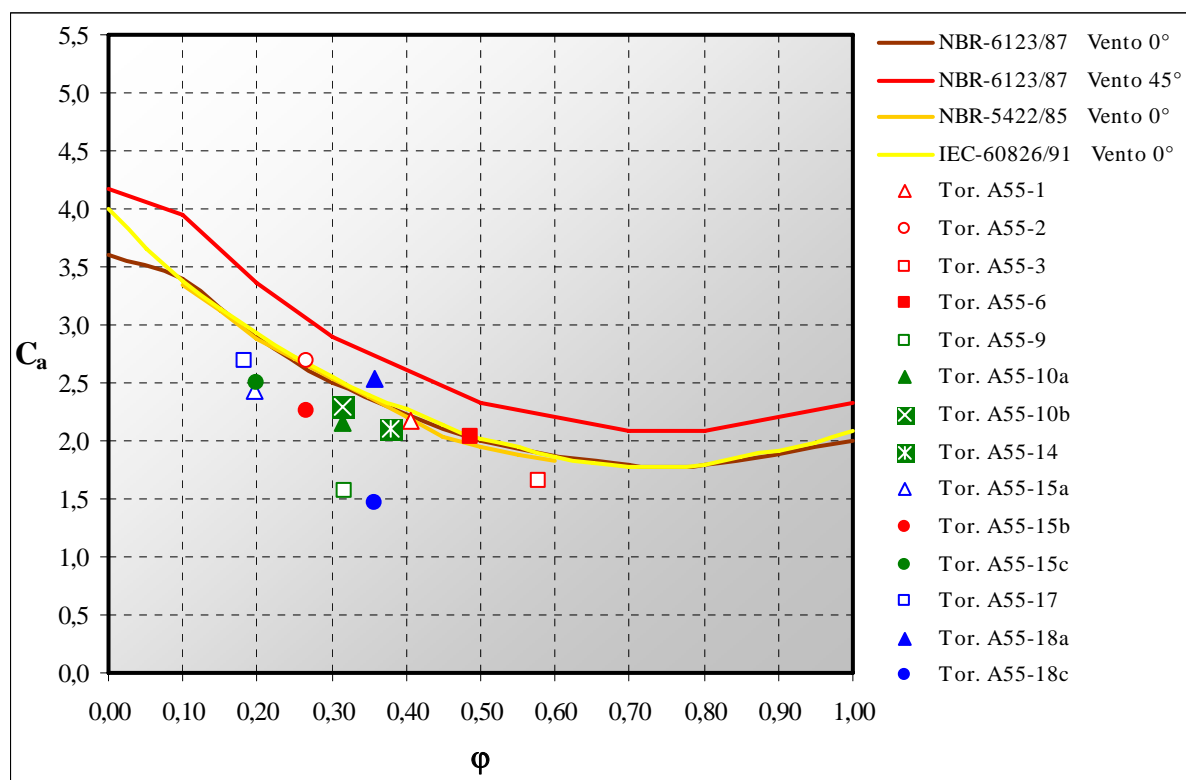


Figura 4.11: Coeficientes de arrasto dos módulos da Torre A55 para vento transversal (90°), considerando área de referência projetada.

A aplicação do presente critério para o vento oblíquo (figuras 4.9 e 4.10) conduziu a coeficientes de arrasto bem menores do que aqueles obtidos para os ventos longitudinal e transversal, registrando-se o maior valor de arrasto sobre o módulo do delta de escala maior (Tor. A55-10b), ainda assim este não foi superior a 1,42 (direção 30°). Conforme já foi exposto, esse coeficiente pequeno sugere a existência física de uma grande densidade de barras (A_e) na direção considerada, além disso, pela Equação 2.4, percebe-se que C_a e A_e são inversamente proporcionais, isto é, na medida em que a área efetiva tende a aumentar o coeficiente de arrasto diminui. Por sua vez, para os ventos perpendiculares, os coeficientes são maiores, tendo-se os valores de 2,93 (direção 0°) e 2,69 (direção 90°), ambos sobre o módulo referente à extensão (Tor. A55-17). Além disso, naqueles trechos nos quais ocorre sobreposição de faces, configurando o efeito de proteção sobre a face à sotavento, normalmente têm-se coeficientes de arrasto maiores devido ao aspecto da diminuição do número de barras expostas diretamente a ação do vento.

Considerando-se somente os ângulos 0° e 90° , referentes aos trechos situados abaixo da cabeça da torre (tronco comum, extensão e pernas), nota-se que os coeficientes obtidos para o vento transversal foram sempre maiores que os correspondentes ao vento

longitudinal. Por sua vez, no caso do vento oblíquo, os coeficientes obtidos para o vento 30° foram, para todos os módulos, maiores do que àqueles registrados para o vento 56° . Novamente, partindo da contextualização associada à característica inversa das duas variáveis, tal fato sugere que há uma maior exposição de barras, assim como uma maior interação física entre estas e o vento para o ângulo 56° .

Em relação à recomendação da Norma Européia para estimativa da força de arrasto sobre a mísula (Tor. A55-2) e o pára-raios (Tor. A55-1), tem-se, para a Torre A55, que a recomendação apresentou uma boa coerência na aplicação sobre o trecho da mísula isolada, em especial para o vento longitudinal, cujo coeficiente médio para ambos os critérios se situou em torno de 2,06. Em contrapartida, no caso do pára-raios isolado, os valores dos coeficientes para ambos os critérios ficaram muito próximos, para ambas as direções, tendência esta não condizente ao que foi observado para a Torre A33.

4.3.2.3 Coeficiente de Arrasto Ponderado

Neste tópico, a referida análise se restringiu aos trechos do tronco comum e das extensões das torres A33 e A55. Nesse sentido, partindo-se da determinação do coeficiente de arrasto individual para uma barra prismática de faces planas (conforme procedimento indicado na NBR 6123/88) e da inclinação da face do respectivo painel, procurou-se obter um coeficiente de arrasto ponderado, dado pelo somatório do produto do C_a pela correspondente A_e da barra. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.3, na qual também está sendo apresentado o C_a previsto para o referido painel na condição isolada, conforme critério da NBR 6123.

Tabela 4.3: Coeficiente de arrasto ponderado para os trechos do tronco comum e extensões.

Modelo	Módulo	Ângulo	C_a Ponderado	C_a NBR 6123
Tor. A33-15a	Tronco comum	$0^\circ / 90^\circ$	1,88	1,83
Tor. A33-17	Extensão	$0^\circ / 90^\circ$	1,91	1,83
Tor. A55-15a	Tronco comum	0°	1,93	1,87
		90°	1,94	1,87
Tor. A55-17	Extensão	0°	1,96	1,82
		90°	1,95	1,87

4.4 Comparativo Entre Referências Diversas

Nesta seção, além das três Normas já supracitadas, as quais foram adotadas como padrões principais de referência para fins comparativos com as medidas experimentais obtidas em túnel de vento, também se estará apresentando valores obtidos em referências diversas, em termos de coeficientes ou forças de arrasto, conforme o caso.

4.4.1 Memória de Cálculo (MC)

A primeira das comparações se refere ao carregamento devido ao vento previsto pelo projetista da torre (extraído da MC). Faz-se a importante ressalva que esta análise de maneira alguma está buscando avaliar a validade das estimativas de carregamentos feitos pelo projetista para a estrutura em questão. Na verdade, objetiva-se somente parametrizar as medidas experimentais, servindo a memória de cálculo como um referencial. Como em alguns casos as geometrias dos módulos ensaiados não coincidiam exatamente com os trechos (painéis) adotados para a distribuição das cargas, fez um ajuste dos níveis de carregamento conforme apresentado no Apêndice I.

4.4.1.1 Torre Autoportante A33

A estimativa de carga de vento para esta torre contempla dois níveis de pressão de vento, a saber, vento máximo ($627,2 \text{ N/m}^2$) e vento de alta intensidade ($1769,8 \text{ N/m}^2$). Sendo que, para fins de comparação, considerou-se uma pressão normalizada, a qual foi arbitrada em $750,3 \text{ N/m}^2$ ($35,00 \text{ m/s}$). No cálculo das forças devido ao vento longitudinal, transversal e oblíquo, o projetista adotou a Equação 2.6, a qual é proveniente da Norma IEC 60826/91.

Nas tabelas a seguir apresentam-se valores de força de arrasto para cada nível (ponto) de aplicação de carga sobre a Torre A33, assim como os índices de área exposta e coeficientes de arrasto correspondentes. Na Tabela 4.4 estão apresentados os parâmetros experimentais (C_a e F_a) obtidos a partir das medições experimentais em túnel, enquanto que na Tabela 4.5 os valores apresentados foram extraídos da MC da Torre A33 para cada um dos seis níveis de carregamento definidos no Apêndice I.

Tabela 4.4: Valores de φ , C_a e forças medidas para a Torre A33.

Painel	Nível	$\alpha = 0^\circ$			$\alpha = 45^\circ$			$\alpha = 90^\circ$		
		φ	C_a	F_a (N)	φ	C_a	F_a (N)	φ	C_a	F_a (N)
A	1	0,24	2,65	4451	-	-	3647	0,34	2,04	1520
	2			7651			7283			4451
B	3	0,24	2,12	6212	-	-	6727	0,15	4,00	5943
	4			12143			13124			12143
D	5	0,12	3,42	15273	-	-	16950	0,12	3,42	15273
	6			6142			6917			6142

Tabela 4.5: Valores de φ , C_a e forças calculadas (MC) para a Torre A33.

Painel	Nível	$\alpha = 0^\circ$			$\alpha = 45^\circ$			$\alpha = 90^\circ$		
		φ	C_a	F_a (N)	φ	C_a	F_a (N)	φ	C_a	F_a (N)
A	1	0,22	2,85	4578	-	-	3554	0,31	2,52	1345
	2			8868			9593			7120
B	3	0,23	2,80	7080	-	-	9388	0,15	3,18	8566
	4			11827			14192			11827
D	5	0,11	3,36	11602	-	-	13922	0,11	3,36	11602
	6			7588			9105			7588

Efetuada a razão entre as forças medidas/calculadas, para cada um dos níveis nas três direções de incidência do vento, tanto para as medidas parciais assim como para as totais, observou-se os seguintes aspectos:

- a) em termos de valores de índice de área exposta, os valores estão relativamente próximos para todos os painéis considerados, entretanto os correspondentes coeficientes de arrasto não seguem a mesma tendência;

- b) efetuando-se o somatório das forças parciais por nível (força global de arrasto aerodinâmico), verifica-se que a diferença (razão) entre os valores totais é relativamente pequena, situando-se em torno de 5,36% (vento transversal), 0,64% (vento longitudinal) e 8,55% para o vento oblíquo (45°);
- c) uma grande dispersão entre os valores medidos e calculados para o caso das forças parciais, a qual oscilou entre 2,60% ($\alpha = 45^\circ$, nível 1) e 37,50% ($\alpha = 90^\circ$, nível 2).

4.4.1.2 Torre Autoportante A55

Analogamente ao caso da Torre A33, o projeto desta torre também contempla dois níveis de pressão de vento: vento máximo (588,6 N/m²) e vento de alta intensidade (1922,8 N/m²). Novamente, para fins de comparação, considerou-se também a mesma pressão normalizada adotada anteriormente, 750,3 N/m² (35,00 m/s).

Tabela 4.6: Valores de φ , C_a e forças medidas para a Torre A55.

Painel	Nível	$\alpha = 0^\circ$			$\alpha = 30^\circ$			$\alpha = 56^\circ$			$\alpha = 90^\circ$		
		φ	C_a	F_a (N)	φ	C_a	F_a (N)	φ	C_a	F_a (N)	φ	C_a	F_a (N)
A	1	0,30	1,79	9431	-	-	9667	-	-	7728	0,21	1,62	4258
	2			16479			18223			15483			9489
B	3	0,22	2,95	10705	-	-	12738	-	-	11473	0,23	2,88	8447
C	4	0,16	2,93	10337	-	-	11684	-	-	10425	0,22	2,95	9158
D	5	0,12	3,43	20304	-	-	20989	-	-	19782	0,16	3,36	16737
E	6	0,11	3,75	24664	-	-	26169	-	-	23585	0,14	3,52	19627
F	7	0,07	4,02	11040	-	-	12683	-	-	10511	0,10	3,58	8833

No projeto da torre foram consideradas as hipóteses de vento longitudinal (0°), transversal (90°) e oblíquo, incidindo a 45°, de modo que para este último ângulo não se dispõem de resultados experimentais para fins de comparação. Contudo, considerado o fato do projetista também ter adotado a Equação 2.6 para o cálculo dos ventos perpendiculares,

empregar-se-á a mesma expressão para a determinação do arrasto aerodinâmico sobre a estrutura nos ângulos oblíquos ensaiados. Não se utilizou a expressão para vento oblíquo empregada pelo projetista, uma vez que a mesma se mostrou inadequada para a estimativa do carregamento para outras direções de incidência do vento.

Tabela 4.7: Valores de φ , C_a e forças calculadas (MC) para a Torre A55.

Painel	Nível	$\alpha = 0^\circ$			$\alpha = 30^\circ$			$\alpha = 56^\circ$			$\alpha = 90^\circ$		
		φ	C_a	F_a (N)	φ	C_a	F_a (N)	φ	C_a	F_a (N)	φ	C_a	F_a (N)
A	1	0,20	2,94	12896	-	-	12033	-	-	7278	0,22	2,86	3169
	2			11730			11498			8166			4802
B	3	0,22	2,87	9496	-	-	9954	-	-	8421	0,23	2,83	6135
	4			9586			10568			9959			8003
C	5	0,14	3,19	22778	-	-	24947	-	-	23197	0,20	2,96	18436
	6			16221			17718			16387			12965
D	7	0,12	3,29	9470	-	-	10427	-	-	9801	0,16	3,14	7860
	E			0,11			3,36			-			-
E	6	0,11	3,36	16221	-	-	17718	-	-	16387	0,13	3,26	12965
	F			0,07			3,55			-			-

As tabelas 4.6 e 4.7 apresentam os valores de índice de área exposta, coeficiente e força de arrasto para cada nível de carregamento da Torre A55, referentes às medições experimentais em túnel e aos valores extraídos da memória de cálculo, respectivamente. Os níveis de carregamento para a Torre A55 também estão indicados no Apêndice I.

A partir da análise dos resultados da tabela acima em termos da razão forças medidas/calculadas, observam-se os seguintes aspectos:

- a) os valores de índice de área exposta estão relativamente próximos, exceto para o painel A (para-raios, mísulas e viga), Além disso, os coeficientes apresentam uma tendência uniforme, exceto, para o painel A novamente, para o qual, na condição de vento transversal, obteve-se um C_a experimental bem menor que o teórico, indicando claramente a ocorrência do efeito de proteção devido à face a sotavento;

- b) analisando as forças totais sobre a estrutura, observa-se que a diferença entre os valores medidos e calculados não seguiu a mesma tendência dos resultados da torre quadrada A33, observando-se uma grande dispersão na magnitude global dos carregamentos. Para o vento longitudinal e transversal, os valores variaram de 11,70% a 24,70%, respectivamente, e para os ventos oblíquos, em 15,40% (ângulo 30°) e 19,00% (ângulo 56°);
- c) em relação as forças parciais (por nível), analogamente ao caso da Torre A33, também houve uma grande dispersão na razão entre os valores medidos e calculados, a qual oscilou entre 6,20% ($\alpha = 56^\circ$, nível 1) e 97,6% ($\alpha = 90^\circ$, nível 2).

4.4.2 Normas e Procedimentos

Na mesma linha de raciocínio da seção anterior, neste também são apresentadas e comentadas algumas comparações com base em algumas referências já citadas anteriormente. Deste modo, segue nas tabelas 4.8 a 4.11, o cálculo de coeficientes de arrasto a partir das recomendações (expressões ou ábacos) apresentadas em cada referência, em função do índice de área exposta usado na determinação dos coeficientes aerodinâmicos experimentais. As comparações foram feitas considerando as faces longitudinal e transversal e aplicando-se o critério da área de referência calculada. Além disso, em relação àqueles trechos que apresentam alguma similaridade com a forma triangular como as mísulas, pára-raios e pernas, determinou-se dois coeficientes de arrasto, correspondentes às recomendações relativas a seções quadradas e triangulares. Os coeficientes referentes a seção triangular são aqueles, cujos valores estão assinalados entre parênteses.

Nas tabelas, além daqueles medidos experimentalmente em túnel de vento, estão contemplados o cálculo dos coeficientes conforme as normas IEC 60829/91, NBR 6123/88, ENV 1991-2-4 (1998), ASCE N° 74 (1991), ANSI/ASCE 7-95 (1996) e também o método proposto por BAYAR (1986). Não se apresenta a NBR 5422/85, basicamente por duas razões: os coeficientes determinados através das normas IEC 60286/91 e NBR 5422/85 apresentam, em média, diferenças de 1,00% somente e o ábaco fornecido pela NBR 5422/85, é válido para trechos que apresentam índices de área exposta situados entre 0,10 e 0,60, enquanto que a Norma IEC 60826/91 contempla o intervalo completo ($0,00 \leq \varphi \leq 1,00$).

Tabela 4.8: Valores de C_a para o ângulo 0° da Torre A33 com base em outras referências.

Modelo	ϕ	C_a						
		Exp.	IEC 60826	NBR 6123	ENV 1991-2-4	ASCE N° 74	ANSI / ASCE 7-95	Bayar (1986)
Tor. A33-1	0,28	2,19	2,62	2,58	2,96	2,64	2,66	2,52
			-	(2,36)	(2,44)	(2,44)	(2,35)	-
Tor. A33-2	0,22	2,66	2,85	2,81	3,10	2,95	2,89	2,72
			-	(2,53)	(2,62)	(2,70)	(2,52)	-
Tor. A33-6	0,24	2,32	2,78	2,74	3,06	2,86	2,82	2,66
Tor. A33-7	0,14	4,93	3,22	3,19	3,29	3,38	3,26	3,23
Tor. A33-10b	0,29	2,26	2,60	2,55	2,94	2,61	2,64	2,49
Tor. A33-12	0,24	2,74	2,77	2,73	3,05	2,85	2,81	2,66
Tor. A33-15a	0,17	3,04	3,08	3,05	3,22	3,23	3,13	3,03
Tor. A33-17	0,12	3,42	3,31	3,46	3,33	3,48	3,35	3,36
Tor. A33-18a	0,07	3,60	3,57	3,46	-	3,74	3,61	4,00
			-	(2,99)	-	(3,39)	(3,09)	-
Tor. A33-18c	0,26	2,06	2,69	2,65	3,00	2,74	2,73	2,58
			-	(2,41)	(2,49)	(2,52)	(2,40)	-

Tabela 4.9: Valores de C_a para o ângulo 90° da Torre A33 com base em outras referências.

Modelo	ϕ	C_a						
		Exp.	IEC 60826	NBR 6123	ENV 1991-2-4	ASCE N° 74	ANSI / ASCE 7-95	Bayar (1986)
Tor. A33-1	0,22	1,87	2,86	2,82	3,09	2,94	2,89	2,72
			-	(2,54)	(2,62)	(2,70)	(2,52)	-
Tor. A33-2	0,22	2,81	2,87	2,83	3,11	2,97	2,91	2,74
			-	(2,55)	(2,64)	(2,73)	(2,54)	-
Tor. A33-6	0,34	1,49	2,42	2,38	2,83	2,34	2,46	2,32
Tor. A33-7	0,16	4,34	3,10	3,07	3,23	3,25	3,14	3,05
Tor. A33-10b	0,14	3,96	3,20	3,17	3,28	3,36	3,24	3,20
Tor. A33-12	0,15	3,90	3,17	3,14	3,26	3,32	3,21	3,15
Tor. A33-15a	0,17	3,04	3,08	3,05	3,22	3,23	3,13	3,03
Tor. A33-17	0,12	3,42	3,31	3,29	3,33	3,48	3,35	3,36
Tor. A33-18a	0,07	3,60	3,57	3,46	-	3,74	3,61	4,00
			-	(2,99)	-	(3,39)	(3,09)	-
Tor. A33-18c	0,26	2,06	2,69	2,65	3,00	2,74	2,73	2,58
			-	(2,41)	(2,49)	(2,52)	(2,40)	-

A análise das tabelas 4.8 e 4.9, referentes a alguns modelos da Torre A33, indica que as metodologias propostas (seção quadrada) pela norma europeia ENV e pelo Manual da ASCE N° 74 conduzem aos maiores valores de coeficientes de arrasto em relação aos medidos em túnel, tendo-se registrado as diferenças mais extremas na direção transversal. Ainda assim, os modelos Tor. A33-15a (tronco comum), Tor. A33-17 (extensão 12,0 m) e Tor. A33-18a (conjunto quatro pernas) apresentaram em média diferenças inferiores a 3,00%. Os valores encontrados usando o critério de seção triangular das normas na avaliação de alguns modelos sugerem que os mesmos não são adequados, observando-se uma grande dispersão entres os resultados.

Uma análise preliminar das tabelas 4.10 e 4.11 sugere que de uma maneira geral, os coeficientes de arrasto determinados para a Torre A55 através das diversas referências seguiram uma tendência semelhante àquela identificada para a Torre A33. Entretanto, verifica-se um acréscimo na diferença entre os valores medidos e os calculados (teóricos) para a maioria das referências, tendo-se novamente registrado os maiores valores para a norma europeia ENV e o Manual da ASCE N° 74.

Tabela 4.10: Valores de C_a para o ângulo 0° da Torre A55 com base em outras referências.

Modelo	ϕ	Exp.	C_a					
			IEC 60826	NBR 6123	ENV 1991-2-4	ASCE N° 74	ANSI / ASCE 7-95	Bayar (1986)
Tor. A55-1	0,28	1,90	2,64	2,59	2,97	2,67	2,68	2,53
			-	(2,37)	(2,45)	(2,46)	(2,36)	-
Tor. A55-2	0,21	2,08	2,89	2,85	3,12	3,00	2,93	2,76
			-	(2,56)	(2,65)	(2,75)	(2,56)	-
Tor. A55-6	0,30	1,79	2,56	2,51	2,92	2,55	2,60	2,46
Tor. A55-10b	0,22	2,95	2,87	2,83	3,11	2,98	2,91	2,74
Tor. A55-15a	0,13	3,12	3,25	3,23	3,31	3,41	3,29	3,28
Tor. A55-17	0,11	3,75	3,34	3,32	3,35	3,51	3,38	3,41
Tor. A55-18a	0,07	4,02	3,56	3,46	-	3,73	3,60	4,00
			-	(2,99)	-	(3,38)	(3,08)	-
Tor. A55-18c	0,20	2,27	2,95	2,91	3,15	3,07	2,99	2,81
			-	(2,61)	(2,69)	(2,81)	(2,60)	-

Tabela 4.11: Valores de C_a para o ângulo 90° da Torre A55 com base em outras referências.

Modelo	φ	C_a						
		Exp.	IEC 60826	NBR 6123	ENV 1991-2-4	ASCE N° 74	ANSI / ASCE 7-95	Bayar (1986)
Tor. A55-1	0,18	0,56	2,95	2,92	3,19	3,16	3,06	2,93
			-	(2,61)	(2,74)	(2,89)	(2,66)	-
Tor. A55-2	0,17	3,04	3,09	3,06	3,23	3,24	3,13	3,04
			-	(2,70)	(2,80)	(2,96)	(2,72)	-
Tor. A55-6	0,21	1,62	2,91	2,87	3,13	3,03	2,95	2,78
Tor. A55-10b	0,23	2,88	2,80	2,76	3,07	2,88	2,84	2,68
Tor. A55-15a	0,17	2,92	3,06	3,03	3,21	3,20	3,10	2,99
Tor. A55-17	0,14	3,52	3,20	3,18	3,28	3,36	3,24	3,21
Tor. A55-18a	0,09	3,58	3,44	3,41	-	3,61	3,48	4,00
			-	(2,92)	-	(3,28)	(2,99)	-
Tor. A55-18c	0,26	2,07	2,69	2,65	3,00	2,74	2,73	2,59
			-	(2,42)	(2,50)	(2,53)	(2,40)	-

Os modelos Tor. A55-10b (delta inferior completo) e Tor. A55-15a (tronco comum completo) apresentaram em média diferenças inferiores a 3,00% e 6,00%, respectivamente. Além disso, para o caso da face transversal, observou-se que o conjunto de quatro pernas (Tor. A55-18a), usando o critério de seção quadrada, apresentou em média diferenças menores que 1,00%, enquanto que a mísula (Tor. A55-2), usando o critério de seção triangular, apresentou diferenças inferiores a 3,00%.

Por fim, em relação a ambas as torres, as normas IEC 602826/91 e a NBR 6123/87, apresentaram valores de coeficientes muito próximos, reflexo da semelhança observada entre as curvas dos ábacos, sendo que as diferenças foram inferiores a 2,00%, exceto para o conjunto de quatro pernas da Torre A33, cuja diferença foi de quase 3,00%.

A partir da análise dos coeficientes obtidos com a adoção do critério de seção triangular, para alguns trechos, mostrou que os mesmos são para ambas as torres, em média, 11,00% menores do que aqueles calculados através do critério de seção quadrada, exceto para o conjunto de quatro pernas, cujo percentual se situa em torno dos 16,00%.

4.5 Estimativa da Força de Arrasto Usando Coeficientes Experimentais

Nesta última seção, a qual contém considerações acerca dos resultados encontrados, pretende-se, a partir de uma breve análise da Equação 2.5 da NBR 5422/85, salientar uma importante questão para as discussões futuras.

Analisando-se a estrutura da Equação 2.5, fica evidente que a mesma possibilita estimar a força de arrasto para qualquer direção de incidência do vento, tanto que o Manual da ASCE 74 (1991) recomenda empregar a mesma para avaliar as hipóteses de vento oblíquo.

Contudo, concentrando-se a análise mais precisamente na primeira parcela entre parênteses da Equação 2.5, dada por $(1+0,2\text{sen}^2 2\alpha)$, cujo resultado varia de 1,00 até o máximo de 1,20, conforme o valor do ângulo α de incidência do vento, sugere que a maior majoração, em termos de estimativa de carregamento para a condição de vento oblíquo, que a equação da NBR 5422/85 fornecerá nunca será maior que 20% em relação a mesma estimativa para o vento perpendicular às faces. Além disso, sendo esse coeficiente sempre constante, aparentemente o mesmo não reflete nenhuma outra característica da estrutura em análise, esteja ela associada à geometria ou forma do escoamento em torno da estrutura.

Com base nas considerações acima, apresenta-se nas tabelas 4.12 e 4.13 uma avaliação para a força de arrasto usando coeficientes de força experimentais na Equação 2.5, na qual se fixou o valor da primeira parcela em 1,0, isto é, excluiu-se da equação original o fator de majoração 0,20. Nesse sentido, nas tabelas a seguir, estão indicadas para cada modelo as áreas efetivas calculadas das faces, os coeficientes experimentais determinados para vento perpendicular a cada face e a força de arrasto normalizada (velocidade de 35,00 m/s e escala 1:1) medida em túnel de vento, e as razão dos valores medidos (M) e calculados (C) para os casos em que a parcela $(1+0,2\text{sen}^2 2\alpha)$ é fixada no valor igual a 1,00.

Partindo-se dos modelos considerados na análise da Tabela 4.12, é possível verificar que a maioria deles com exceção da mísula (Tor. A33-2) e do pára-raios isolado (Tor. A33-1), para o caso em que a Equação 2.5 foi usada sem majoração (S/ Majoração), o valor calculado é maior do que o medido, sendo que esta razão apresentou um valor médio (sem considerar a mísula e o pára-raios) em torno de 1,21, próximo ao que a literatura apresenta. Ainda assim, para o modelo Tor. A33-8 (delta superior completo) obteve-se o valor

1,41 para a presente avaliação. Além disso, para a hipótese de vento 45° , a equação original da NBR 5422/85 majora as cargas no máximo em 20%, fator este que ainda permanece aquém de alguns valores observados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Relação entre forças medidas e forças calculadas para vento oblíquo 45° sobre a Torre A33, usando coeficientes de arrasto experimentais.

Modelo	S_{T1} (m^2)	S_{T2} (m^2)	C_{xT1}	C_{xT2}	F_a (N)	M/C S/ Majoração
Tor. A33-1	0,86	0,64	3,49	2,19	1.085	0,66
Tor. A33-2	0,70	0,72	2,81	2,66	1.070	0,73
Tor. A33-3	0,55	3,01	4,81	2,61	4.567	1,16
Tor. A33-5	0,70	4,18	3,57	2,46	5.565	1,16
Tor. A33-6	2,73	5,11	1,49	2,32	7.293	1,22
Tor. A33-7	0,54	0,43	4,34	4,93	2.123	1,27
Tor. A33-8	1,08	0,86	3,78	4,86	4.366	1,41
Tor. A33-10b	1,97	3,77	3,96	2,26	7.271	1,19
Tor. A33-11	1,53	2,31	5,19	3,26	6.930	1,19
Tor. A33-12	3,05	4,63	3,90	2,74	12.211	1,32
Tor. A33-14	5,87	9,81	2,66	2,50	19.570	1,30
Tor. A33-15a	2,64	2,64	3,04	3,04	6.181	1,03
Tor. A33-17	7,12	7,12	3,42	3,42	20.066	1,10
Tor. A33-18a	4,55	4,55	3,60	3,60	13.834	1,13
Tor. A33-18c	2,28	2,28	2,06	2,06	4.439	1,26

Tabela 4.13: Relação entre forças medidas e forças calculadas para ventos oblíquos 30° e 56° sobre a Torre A55, usando coeficientes de arrasto experimentais.

Modelo	S_{T1} (m^2)	S_{T2} (m^2)	C_{xT1}	C_{xT2}	F_a (N)		M/C S/ Majoração	
					30°	56°	30°	56°
Tor. A55-1	1,74	1,40	2,05	1,90	2.023	1.594	0,93	0,65
Tor. A55-2	1,11	1,42	3,04	2,08	2.072	1.461	0,90	0,60
Tor. A55-3	1,98	2,21	1,13	2,67	3.964	2.871	1,06	1,13
Tor. A55-6	7,02	14,04	1,62	1,79	19.334	15.454	1,19	1,32
Tor. A55-10b	4,84	6,37	2,88	2,95	17.112	15.510	1,30	1,34
Tor. A55-14	11,86	20,41	2,07	2,04	34.949	30.201	1,24	1,34
Tor. A55-15a	7,48	8,51	2,92	3,12	21.586	19.456	1,14	1,11
Tor. A55-17	8,18	9,69	3,52	3,75	26.973	26.148	1,04	1,12
Tor. A55-18a	6,58	7,32	3,58	4,02	25.364	21.021	1,21	1,10
Tor. A55-18c	3,29	3,66	2,07	2,27	6.423	6.172	1,08	1,13

Fazendo-se uma análise análoga em relação aos modelos da Tabela 4.13, observa-se novamente que os valores relativos à mísula e o pára-raios isolado se afastaram da tendência observada em relação aos demais modelos, principalmente para o ângulo 56° . Os valores médios encontrados para este conjunto de modelos foram de 1,16 e 1,20, respectivamente para 30° e 56° , tendo-se alcançado o valor extremo de 1,34 para os modelos do delta inferior (Tor. A55-10b) e da cabeça completa (Tor. A55-14). Um último aspecto a ser considerado, referente à parcela $(1 + 0,2 \operatorname{sen}^2 2\alpha)$ da equação original da NBR 5422/85, é que a mesma para os ângulos 30° e 56° , resulta em fatores de majoração iguais a 1,15 e 1,17, respectivamente, os quais estão bem abaixo dos obtidos de alguns modelos, de acordo com a avaliação apresentada na Tabela 4.13.

Uma análise final dos valores determinados para os modelos considerados nas tabelas 4.12 e 4.13 para ambas as torres, dentro do contexto em que a Equação 2.5 foi empregada, evidencia a necessidade de se adotar fatores de majoração diferenciados na estimativa da força devido ao vento oblíquo. Porém, o aspecto mais importante, esta associada a magnitude deste fator para uma correta e segura estimativa do carregamento, o qual, deve ser compatibilizado e adequado às características do trecho em questão.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

No âmbito de execução do presente trabalho, o qual está inserido em um projeto P&D realizado em conjunto com FURNAS Centrais Elétricas, buscou-se interagir com especialistas do meio acadêmico e profissional do setor elétrico, de modo a se abordar tópicos específicos, cuja abrangência forneça subsídios para a abertura de novas linhas de pesquisa científica, assim como indicações em nível de projeto para fins de otimização do desempenho das estruturas de linhas de transmissão, em termos de segurança, confiabilidade e custo. Na seqüência são apresentadas, em forma de tópicos, algumas considerações conclusivas extraídas das análises:

- a) a comprovação da eficácia da metodologia adotada para a previsão da força aerodinâmica sobre as estruturas treliçadas, na qual as torres foram divididas em trechos, ensaiando-se estes na forma de modelos reduzidos, para obtenção das forças de arrasto sobre cada trecho, cujo somatório das mesmas conduz com boa aproximação do valor atuante sobre o conjunto;
- b) a análise realizada envolvendo dois critérios de determinação da área de referência (A_{ref}), a saber, área calculada (área em verdadeira grandeza) e área projetada (área de sombra), mostrou claramente a variação, as vezes expressiva, dos valores dos coeficientes de arrasto experimentais, em função do critério de área efetiva adotado. Esta comparação evidencia a necessidade de se convencionar um critério claro e explícito de determinação da área de referência (efetiva e de contorno), de modo a assegurar a correta recomposição das forças de arrasto a partir dos coeficientes disponíveis;
- c) o dimensionamento das estruturas treliçadas de linhas de transmissão é realizado por trechos (painéis), isto é, as treliças de cada painel são dimensionadas para resistirem à solicitações proporcionais ao carregamento estimado para aquele trecho, cuja magnitude estará associada basicamente às características geométricas do trecho e da interação fluido-estrutura. Nesse sentido, apesar da força global resultar em valores semelhantes, a magnitude

das discrepâncias observadas nos valores parciais por nível sugere uma má concordância entre os valores das forças obtidas experimentalmente e aquelas que constam na memória de cálculo das torres estudadas;

- d) a expressão apresentada pela NBR 5422/85, para a estimativa do carregamento devido ao vento sobre as estruturas de linhas de transmissão, não traduz adequadamente a magnitude do carregamento para a hipótese de vento oblíquo, uma vez que a mesma admite no máximo a majoração de 20%, entretanto, os ensaios experimentais mostraram que esse percentual, para alguns trechos, foi bem maior;
- e) considerando-se que as mísulas e o pára-raios são elementos de geometria complexa para a estimativa do carregamento, optou-se por adotar a equação proposta pela Norma Européia prEN 50341-1 (2000). Os resultados encontrados para ambos os elementos sugerem que a equação é adequada somente para as mísulas, cujos valores calculados estão próximos aos medidos experimentalmente, aspecto este não verificado para os pára-raios;
- f) não se pode usar um único parâmetro adimensional para estimar o carregamento sobre uma estrutura, uma vez que, pelo modo como este parâmetro é concebido, ele não traduz (reflete) nenhuma informação segura quanto à geometria ou característica do trecho (inclinação, densidade de barras, efeitos de proteção). Nesse sentido, entende-se que é mais coerente, inicialmente, agrupar estruturas com características geométricas semelhantes (inclinação dos painéis, tipo de cabeça, tipo de mísulas e pára-raios) e a partir daí associar medidas de arrasto aos índices de área exposta correspondentes.

Além disso, com base na proposição anterior e já considerando o aspecto da disponibilidade de um pré-conhecimento, com base nos trabalhos desenvolvidos no projeto P&D em conjunto com FURNAS Centrais Elétricas, espera-se que as empresas financiem um maior número de projetos de pesquisa voltadas para esta área com a finalidade de parametrizar melhor os resultados e disponibilizá-los aos projetistas para incrementar os índices de segurança e confiabilidade.

5.2 Trabalhos Futuros

Considerando a complexidade do escoamento em torno dos elementos de torres treliçadas, ficam pendentes ainda algumas dúvidas sobre o comportamento dessas estruturas quando sujeitas a ação do vento. Nesse sentido, propõem-se alguns tópicos apontados por profissionais da área de linhas de transmissão, como sendo de grande importância para estudos adicionais e mais detalhados:

- a) estudo da ação do vento sobre a torre considerando como módulos de ensaio os painéis considerados nas memórias de cálculo das torres;
- b) estudos adicionais sobre a condição de vento oblíquo, em termos da razão de forças medidas e forças calculadas, desconsiderando-se a parcela original da NBR 5422/85, que introduz uma majoração na estimativa do carregamento; propõe-se a realização de ensaios adicionais sobre trechos com características geométricas semelhantes e, a partir destes, ajustar coeficientes que traduzam (reflitam) mais adequadamente a resposta estática da estrutura na condição de vento oblíquo;
- c) realização de ensaios adicionais contemplando principalmente o trecho da cabeça, tanto para torres do tipo suspensão (estruturas mais leves), assim como de ancoragem (estruturas mais robustas), tendo em vista as diferentes proporções entre as suas dimensões. Os resultados já obtidos e os novos métodos de ensaio desenvolvidos permitirão que os futuros ensaios sejam definidos com maior objetividade;
- d) realizar estudos adicionais contemplando o trecho da viga em conjunto com as mísulas, buscando uma melhor compreensão dos efeitos de proteção entre os elementos, principalmente para a hipótese de vento transversal, a fim de se propor uma recomendação específica para este trecho;
- e) a realização de ensaios específicos contemplando outras configurações de torres (estaiadas e circuito duplo), considerando que há uma gama enorme de estruturas de geometrias diversas;
- f) propor um critério único e adequado para área de referência, cuja definição seja coerente com a maneira pela qual os coeficientes experimentais são

determinados e que, principalmente, permita aos projetistas determinar os seus valores de um modo prático, tornando-se adequado para a recomposição dos carregamentos;

g) aprofundar o conhecimento em relação aos efeitos dinâmicos devidos ao vento em Linhas de Transmissão.

Ao se propor os trabalhos adicionais acima, é de consciência plena que de modo algum se está exaurindo os questionamentos acerca do assunto, reforçando-se a necessidade de estudos contínuos, uma vez que existem poucos trabalhos realizados no âmbito experimental com relação a ação do vento em torres de linhas de transmissão e, que por parte dos projetistas, pende uma série de dúvidas referentes à correta e segura consideração dos carregamentos devidos ao vento sobre estruturas treliçadas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

AENOR - ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE-ENV 1991-2-4 / EUROCÓDIGO I: Bases de Proyecto y Acciones en Estructuras. Acciones del Viento**. Madrid, España, Mayo 1998.

ASCE - AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ANSI/ASCE 7-95: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures**. New York, USA, June 1996.

ASCE - AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Manuals and Reports on Engineering Practice N° 74: Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading**. New York, USA, 1991.

BAYAR, D. C. **Drag Coefficients of Lattice Towers**. Journal of Structural Engineering, vol. 112, n° 2, p. 417-430, 1986.

BLESSMANN, J. **Acidentes Causados pelo Vento**. Ed. Universidade / UFRGS, 4° ed., Porto Alegre, 2001.

BLESSMANN, J. **O Vento na Engenharia Estrutural**. Ed. Universidade / UFRGS, 2° ed., Porto Alegre, 1995.

BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das Construções**. Ed. Sagra, 2° ed., Porto Alegre, 1990.

BLESSMANN, J. **Tópicos de Normas de Vento**. Ed. Universidade / UFRGS, 2° ed., Porto Alegre, 1990.

BLESSMANN, J. **Intervalo de Tempo para Cálculo da Velocidade Básica do Vento**. Ed. Universidade / UFRGS, 3° ed., Porto Alegre, 1988.

BLESSMANN, J. **The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 10, p. 231-248, 1982.

BRITISH CODE: Code of Practice. **Lattice Towers Loading**. Third Draft, 1978.

- COHEN, E. AND PERRIN H. **Design of Multi-level Guyed Towers: Wind Loading.** Proceedings of the ASCE, Journal of the Structural Division Building Research, n° 5, September 1957.
- COOK, N. J. **The Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures. Part 2: Static Structures.** Building Research Establishment, London, UK, 1990.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 4131: Antennentragwerke aus Stahl,** Berlin, Deutschland, März 1969.
- DAVENPORT, A. G. **How Can We Simplify and Generalize Wind Loads.** Presented at the Third Asia Pacific Symposium on Wind Engineering. Hong Kong, China, December 13-15. 1993.
- DAVENPORT, A. G. **The Response of Tension Structures to Turbulent Wind: the Role of Aerodynamic Damping.** In: 1st International Oleg Kerensky Memorial Conference on Tension Structures. London, England, June 20-22. 1988.
- DAVENPORT, A. G. **Gust response factors for transmission line loading.** Proceedings of the Fifth International Conference on Wind Engineering. Colorado, USA, July. 1979.
- DAVENPORT, A. G. AND ISYUMOV, N. **The Application of The Boundary Layer Wind Tunnel to the Prediction of Wind Loading.** In: Proceedings of the International Research Seminar: Wind Effects on Buildings and Structures, vol. 1, p. 201-230, Ottawa, Canadá, 11-15 set. 1967.
- EIFFEL, G. **Résistance de L'air et L'aviation: Expériences Effectuées au Laboratoire du Champ-de-Mars.** Paris, France, 1911.
- FLASCHBART, O. **Winddruck auf Vollwandige Bauwerke und Gitterfachwerke.** Mémoires Association International des Ponts et Charpentes, p. 153-172, Deutschland, 1932.
- FLASCHBART, O. AND WINTER, H. **Modellversuche Über die Belastung von Gitterfachwerken Durch Windkräfte.** p. 153-172, Berlin, Deutschland, 1935.
- FOLHA ON LINE. **Arquivos da Folha,** <Disponível em: <http://www1.uol.com.br/cgi-bin/bibliot/arquivo.cgi?html=fsp1998&banner=bannersarqfolha>>. Acesso em: 16/06/2005, São Paulo, Novembro / 1998.
- FOLHA ON LINE. **Arquivos da Folha,** <Disponível em: <http://www1.uol.com.br/cgi-bin/bibliot/arquivo.cgi?html=fsp1997&banner=bannersarqfolha>>. Acesso em: 16/06/2005, São Paulo, Abril / 1997.
- GEORGIU, P.N. AND VICKERY, B.J. **Wind Loads on Building Frames.** In: International Conference on Wind Engineering (Proceedings), vol. 1, p. 421-433, Fort Collins, Colorado, USA, 1979.

HOLDO, A. E. **Reynolds Number Effects on Lattice Structures Forming Part of a Wind Tunnel Model**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 45, p. 229-238, 1993.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60826: Loading and Strength of Overhead Transmission Lines**. Genoa, Switzerland, 1991.

KLEIN, T. **Estudo em Túnel de Vento das Características Aerodinâmicas de Torres Metálicas Treliçadas**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / UFRGS, p. 123, Porto Alegre, 2004. (Submetido à homologação).

LOREDO-SOUZA, A. M. **The Behaviour of Transmission Lines Under High Winds**. Thesis (Ph.D.), University of Western Ontario, London, Canada, 1996.

MACHADO, A. C. **Caracterização das Propriedades Aerodinâmicas de Torres Metálicas para Determinação da Resposta Devida ao Vento**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / UFRGS, p. 137, Porto Alegre, 2003.

MENEZES, R. C. R. **Estudos de Confiabilidade de Linhas de Transmissão Submetidas à Ação do Vento**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / UFRGS, p. 85, Porto Alegre, 1988.

NEIGE VENT 65. **NV 65: Règles de Calcul Définissant les Effets de la Neige et du Vent sur les Constructions**, Paris, França, 2000.

OLIVEIRA E SILVA, A.O.; LOREDO-SOUZA, A. M.; RIPPEL, L. I. *et al.* **Coefficientes de Arrasto Aerodinâmico em Estruturas Treliçadas de Linhas de Transmissão**. In: XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, CD-ROM, Curitiba, 2005.

OPERAÇÃO&MANUTENÇÃO (O&M). **Agência Canal Energia: Notícias**, <Disponível em: <http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/OeM.asp?id=47091>>. Acesso em: 16/06/2005, Rio de Janeiro, Junho / 2005.

OPERAÇÃO&MANUTENÇÃO (O&M). **Agência Canal Energia: Notícias**, <Disponível em: <http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Busca.asp?id=41981>>. Acesso em: 16/06/2005, Rio de Janeiro, Setembro / 2004.

OPERAÇÃO&MANUTENÇÃO (O&M). **Agência Canal Energia: Notícias**, <Disponível em: <http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Busca.asp?id=37467>>. Acesso em: 16/06/2005, Rio de Janeiro, Março / 2004.

OPERAÇÃO&MANUTENÇÃO (O&M). **Agência Canal Energia: Notícias**, <Disponível em: <http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Busca.asp?id=36890>>. Acesso em: 16/06/2005, Rio de Janeiro, Fevereiro / 2004.

OPERAÇÃO&MANUTENÇÃO (O&M). **Agência Canal Energia: Notícias**, <Disponível em: <http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Busca.asp?id=32144>>. Acesso em: 16/06/2005, Rio de Janeiro, Outubro / 2002.

OPERAÇÃO&MANUTENÇÃO (O&M). **Agência Canal Energia: Notícias**, <Disponível em: <http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Busca.asp?id=29393>>. Acesso em: 16/06/2005, Rio de Janeiro, Maio / 2002.

OPERAÇÃO&MANUTENÇÃO (O&M). **Agência Canal Energia: Notícias**, <Disponível em: <http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Busca.asp?id=25339>>. Acesso em: 16/06/2005, Rio de Janeiro, Outubro / 2001.

prEN 50.341-1. **Electrical Lines Exceeding AC 45 kV - Part 1: General Requirements**. Common Specifications, September / 2000.

RIERA, J. D. **Considerações dos Carregamentos Induzidos pela Ação do Vento no Projeto de Linhas de Transmissão**. In: Seminário Internacional Ventos em Linhas de Transmissão, CD-ROM, Belo Horizonte, 2002.

SCHLICHTING, H. **Boundary-Layer Theory**. McGraw-Hill Classic Textbook Reissue, Seventh Edition, USA, 1987.

SCRUTON, C. **An Introduction to Wind Effects on Structures**. Oxford University Press, Oxford, UK, p.79, 1981.

SIMIU, E. AND SCANLAN, R. H. **Wind Effects on Structures. An Introduction to Wind Engineering**. 3^o ed., John Wiley and Sons, p. 420-445, New York, USA, 1996.

WHITBREAD, R. E. **The Influence of Shielding on the Wind Forces Experienced by Arrays of Lattice Frames**. In: International Conference on Wind Engineering (Proceedings), vol. 1, p. 405-420, Fort Collins, Colorado, USA, 1979.

APÊNDICE A

Identificação dos Grupos de Modelos

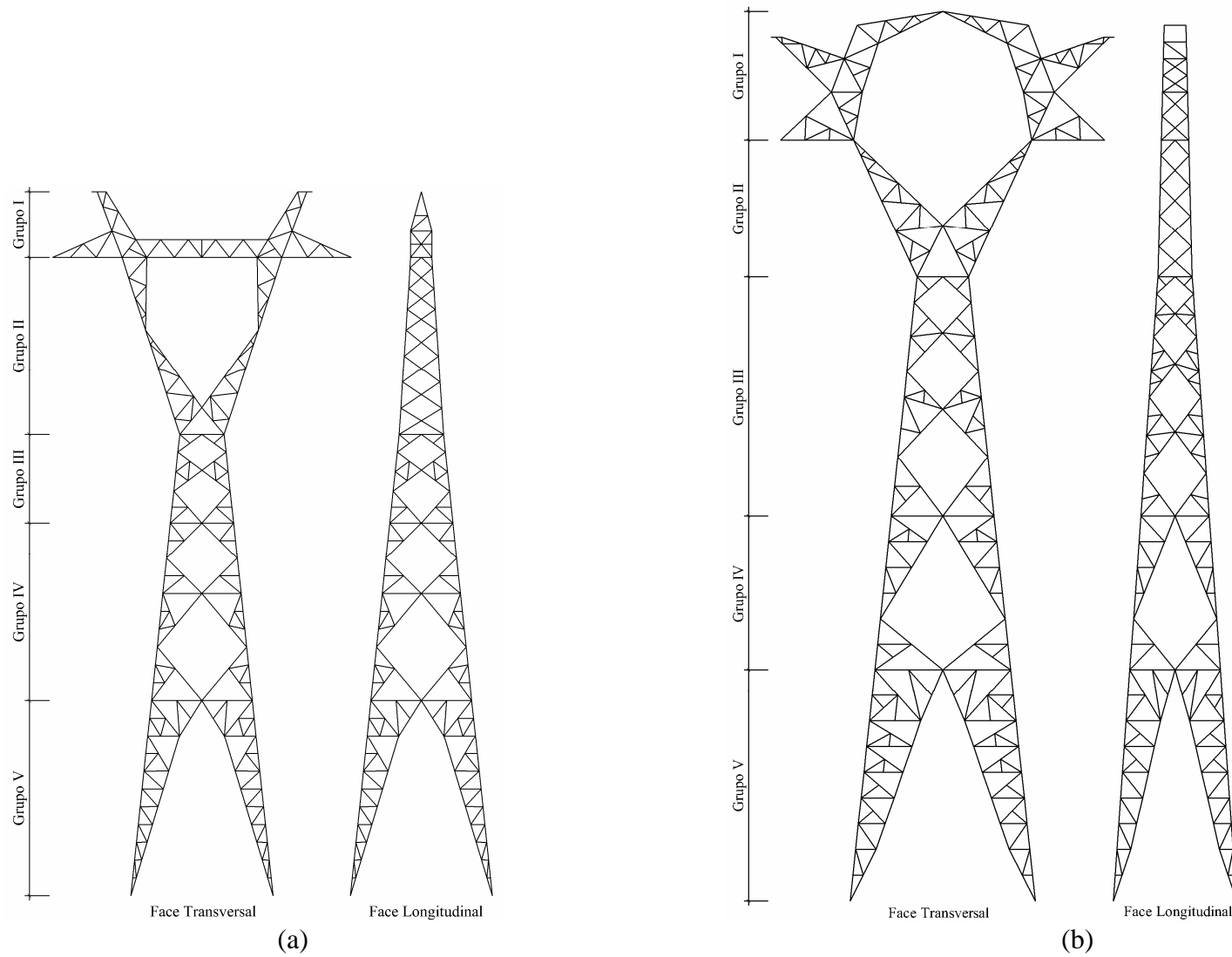


Figura A.1: Identificação dos grupos de modelos ensaiados. (a) Torre A33. (b) Torre A55.

APÊNDICE B

Vista Isolada dos Módulos da Torre A33

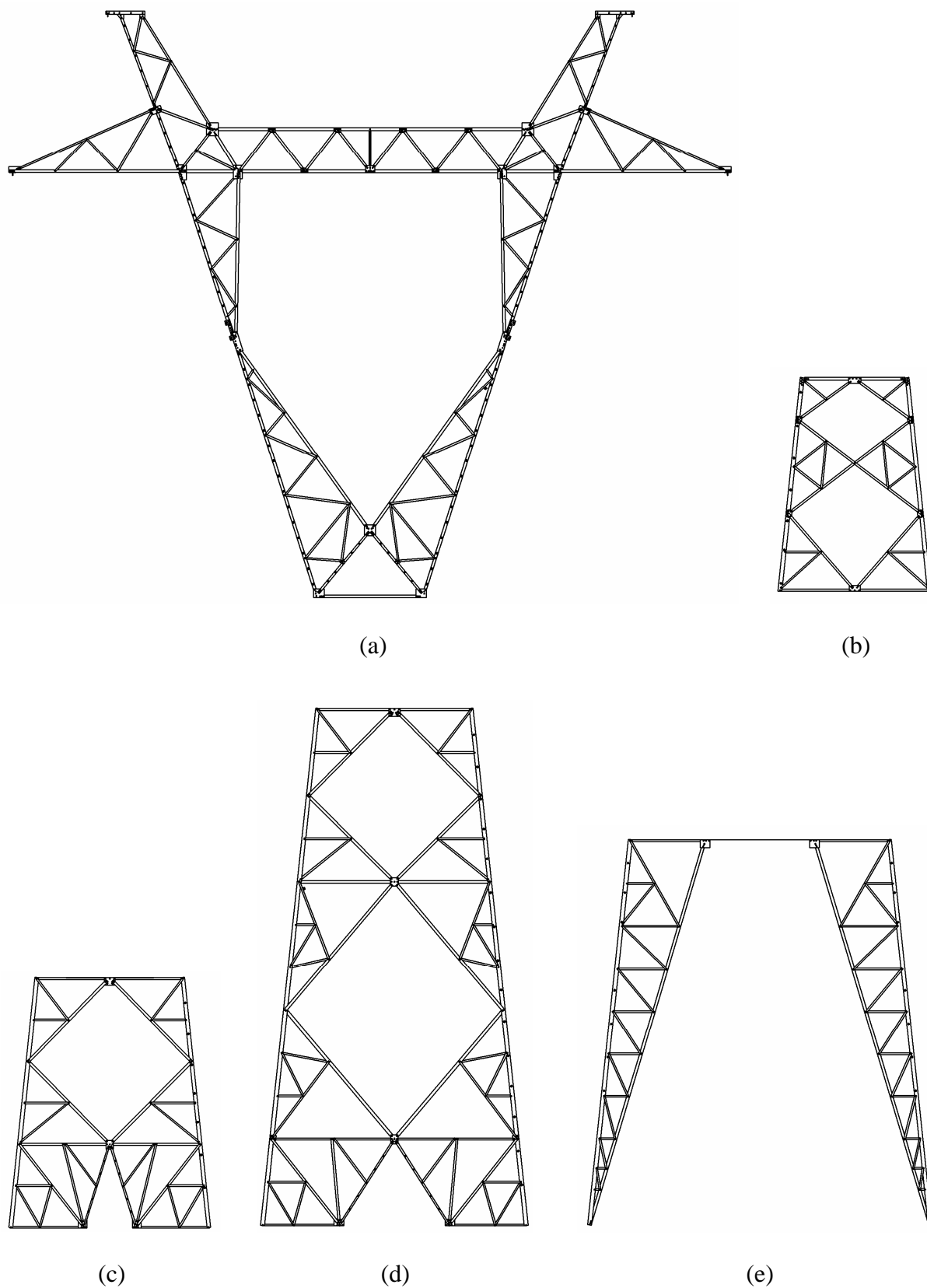
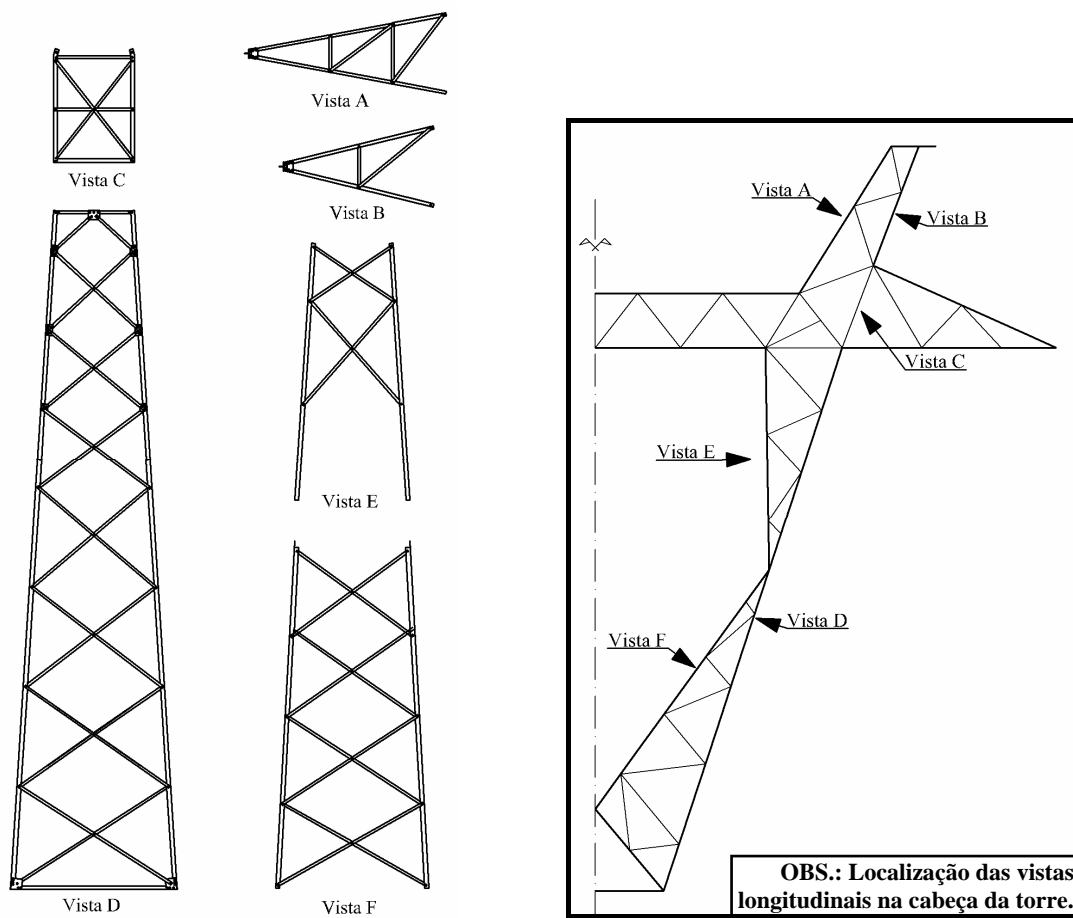
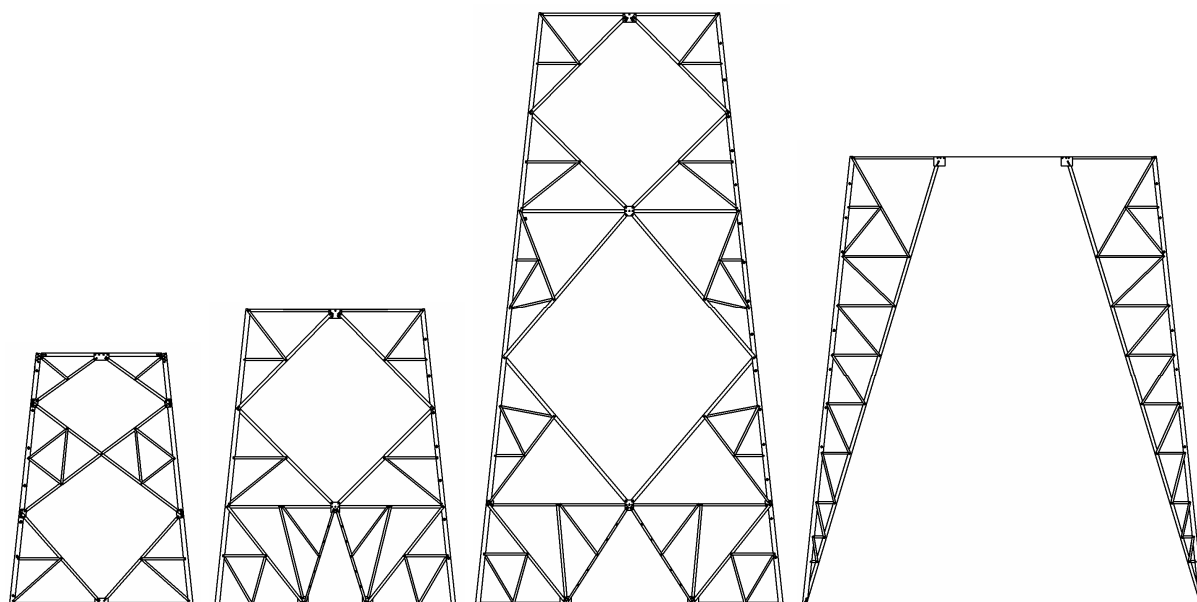


Figura B.1: Vista transversal dos módulos. (a) Cabeça; (b) Tronco comum; (c) Extensão 6,0 m; (d) Extensão 12,0 m; (e) Pernas 9,00 m.



(a)



(b)

(c)

(d)

(e)

Figura B.2: Vista longitudinal dos módulos. (a) Cabeça; (b) Tronco comum; (c) Extensão 6,0 m; (d) Extensão 12,0 m; (e) Pernas 9,00 m.

APÊNDICE C

Vista Isolada dos Módulos da Torre A55

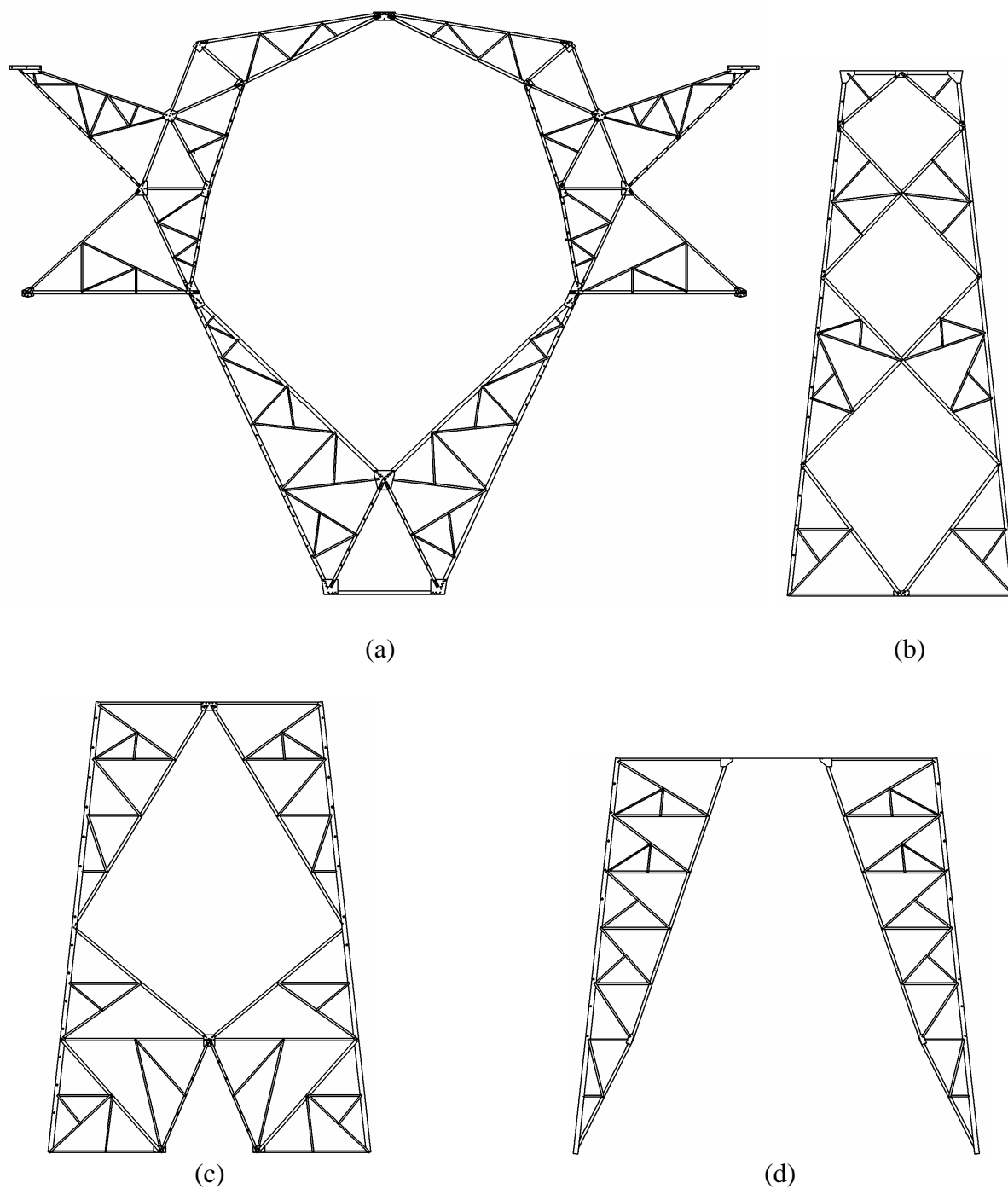


Figura C.1: Vista transversal dos módulos. (a) Cabeça; (b) Tronco comum; (c) Extensão 12,0 m; (d) Pernas 10,50 m.

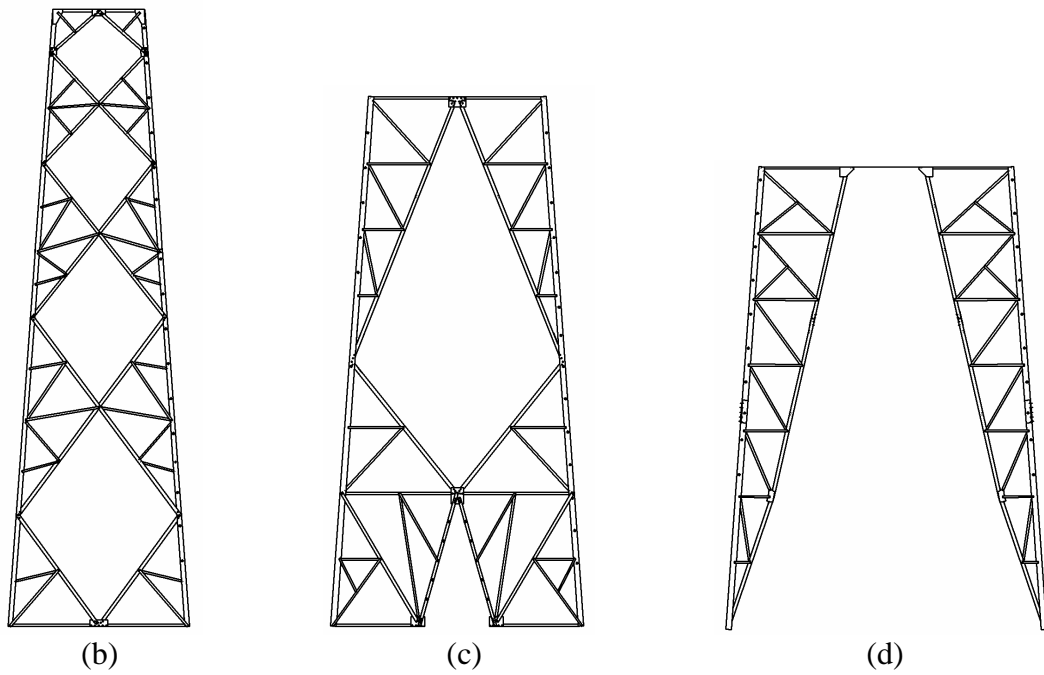
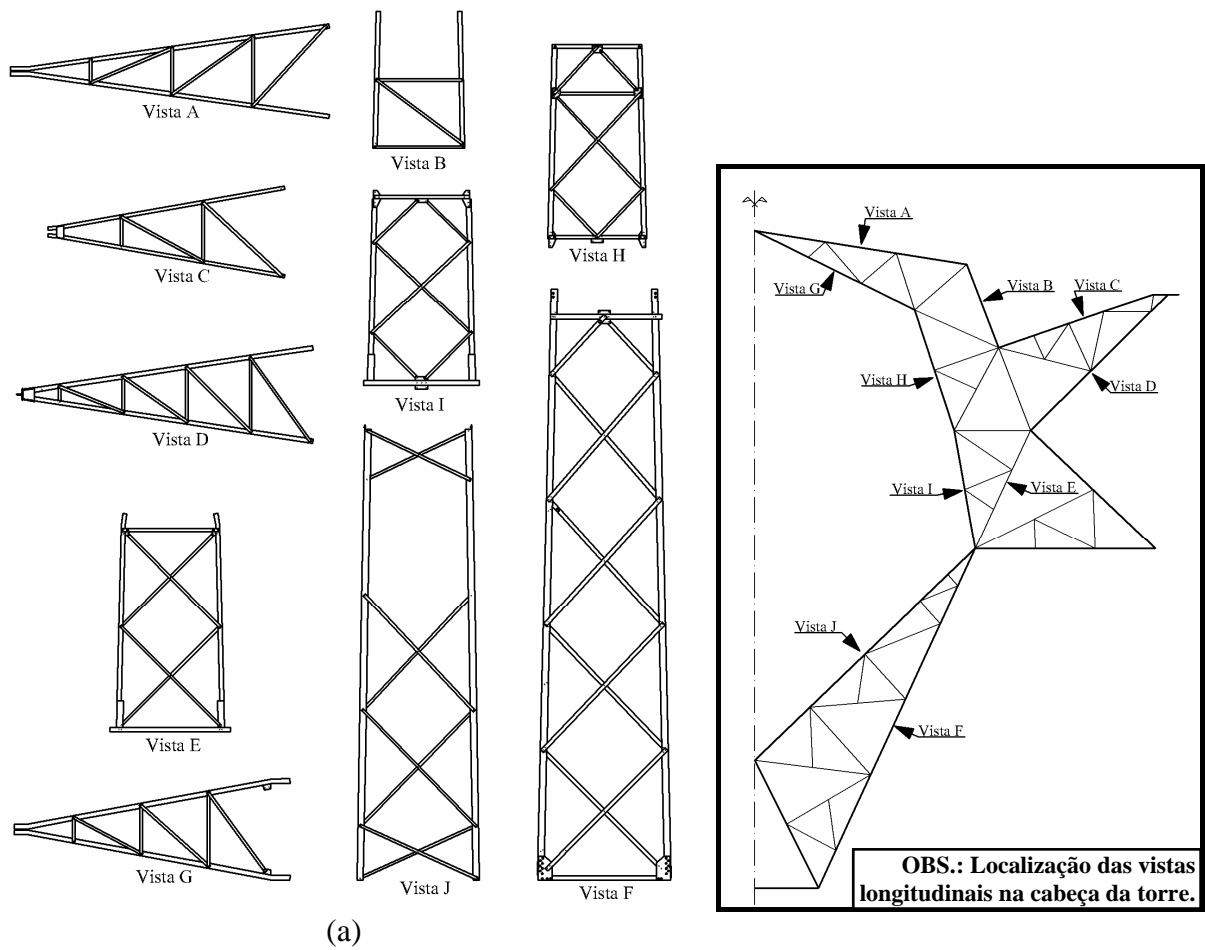


Figura C.2: Vista longitudinal dos módulos. (a) Cabeça; (b) Tronco comum; (c) Extensão 12,0 m; (d) Pernas 10,50 m.

APÊNDICE D

Vista Projetada dos Módulos Adicionais da Torre A33

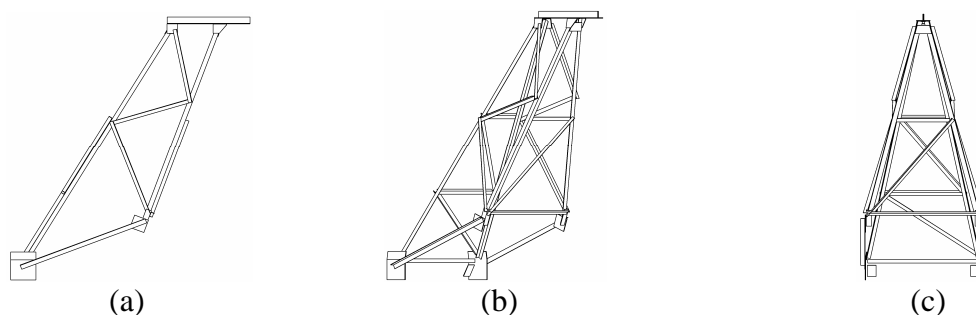


Figura D.1: Projeção do pára-raios isolado da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

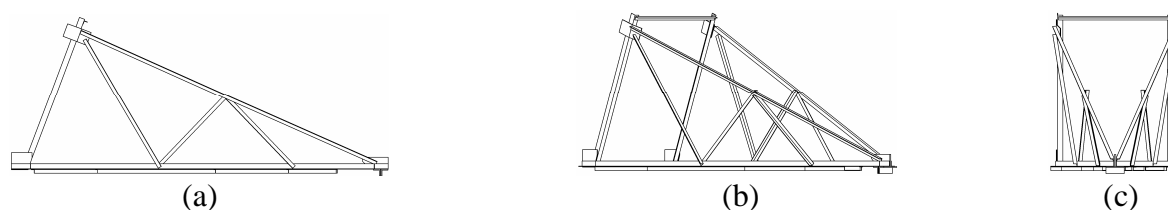


Figura D.2: Projeção da mísula isolada da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

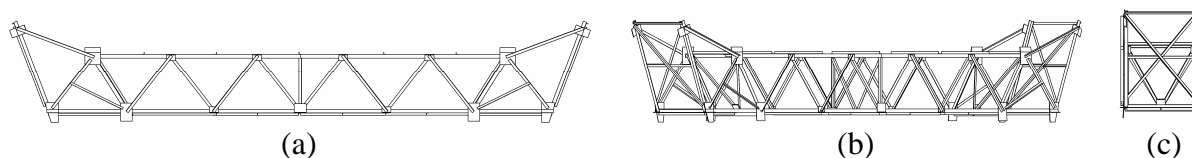


Figura D.3: Projeção da viga isolada da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

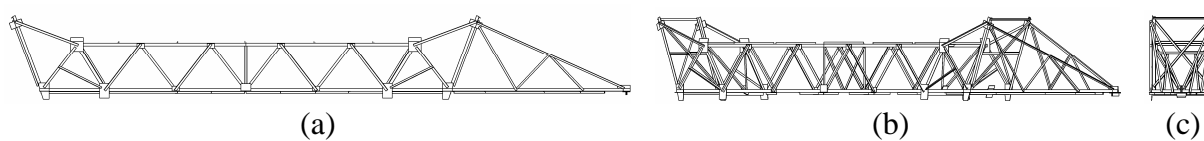


Figura D.4: Projeção da viga com uma mísula da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

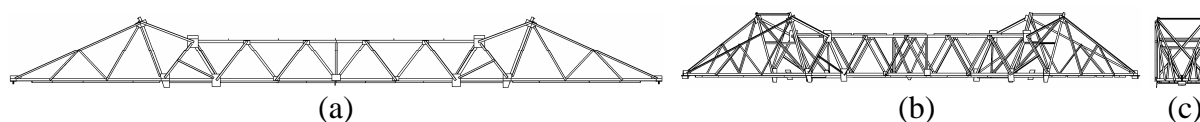


Figura D.5: Projeção da viga com duas mísulas da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

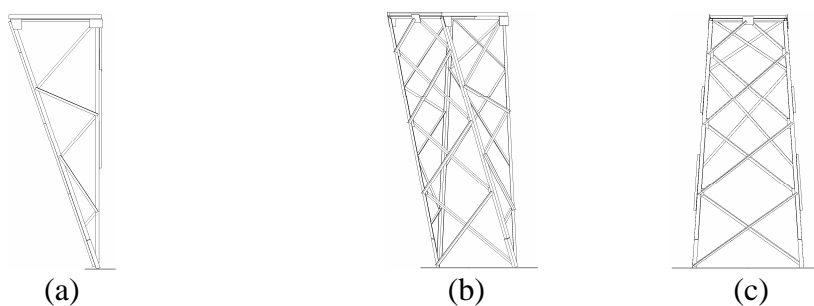


Figura D.6: Projeção do delta superior parcial da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

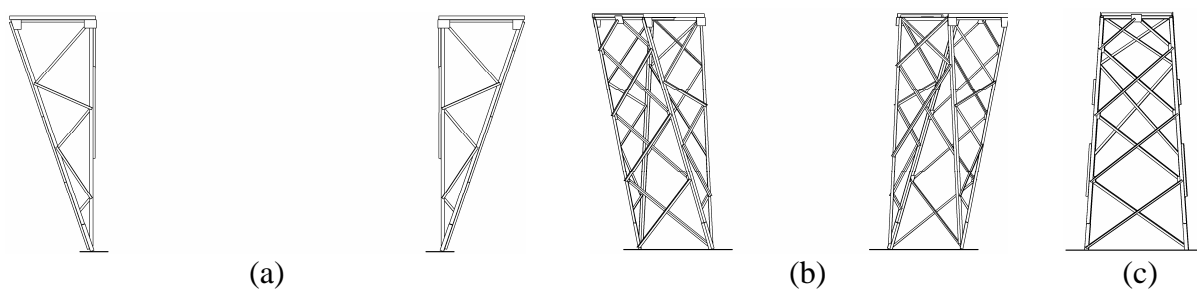


Figura D.7: Projeção do delta superior completo da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

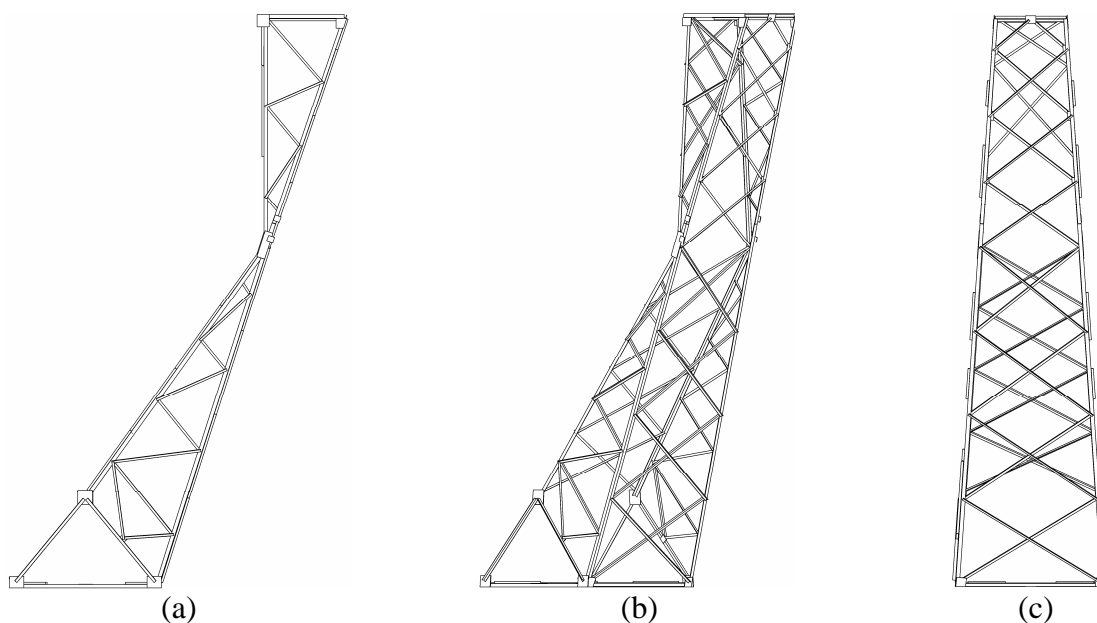


Figura D.8: Projeção do delta parcial da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

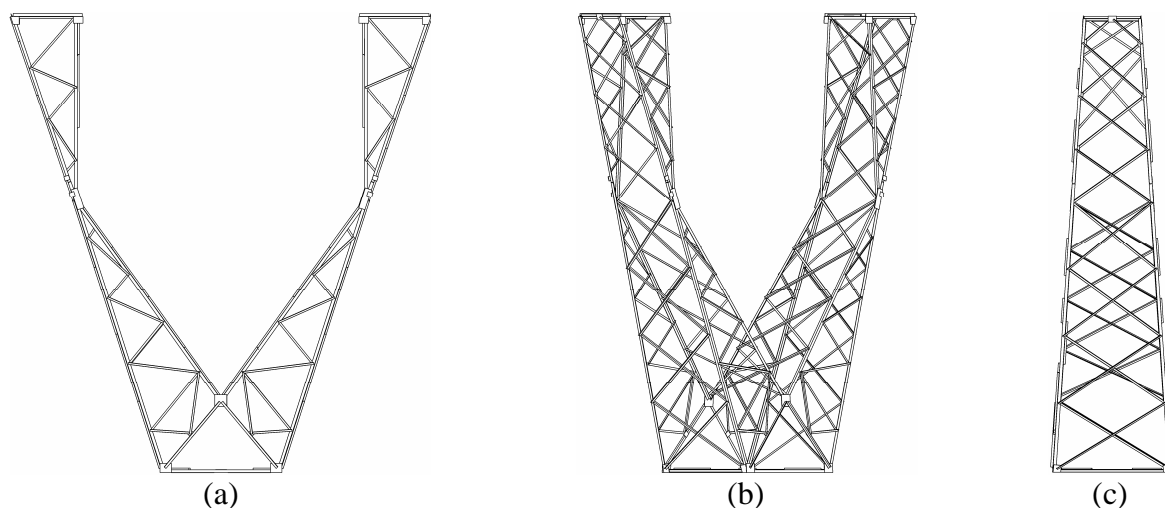


Figura D.9: Projeção do delta completo da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

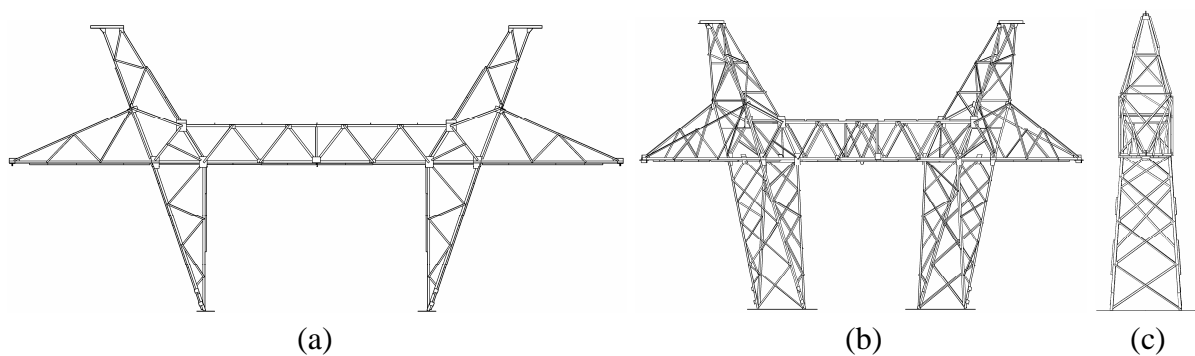


Figura D.10: Projeção do delta superior completo, viga, mísulas e pára-raios da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$. (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

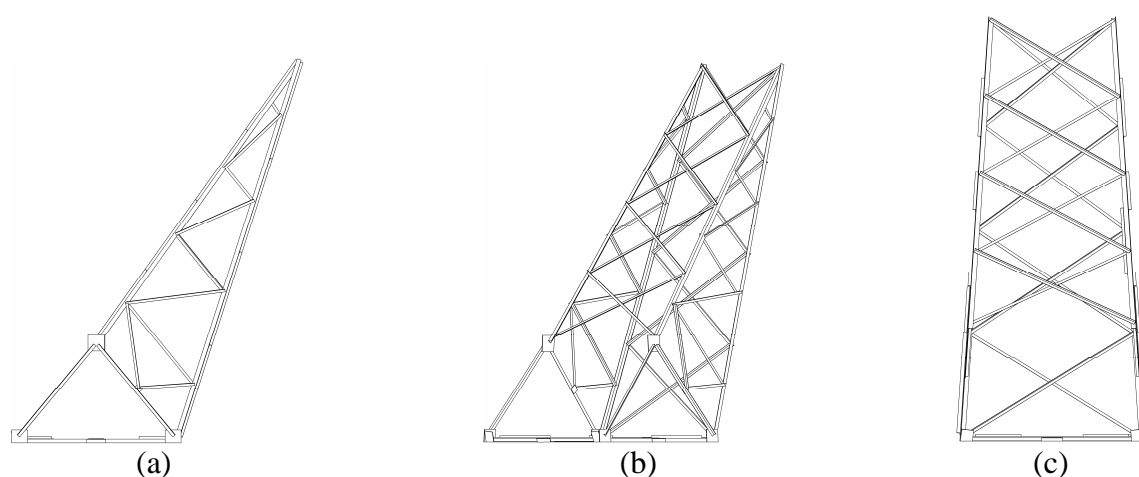


Figura D.11: Projeção do delta inferior parcial da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 45^\circ$; (c) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

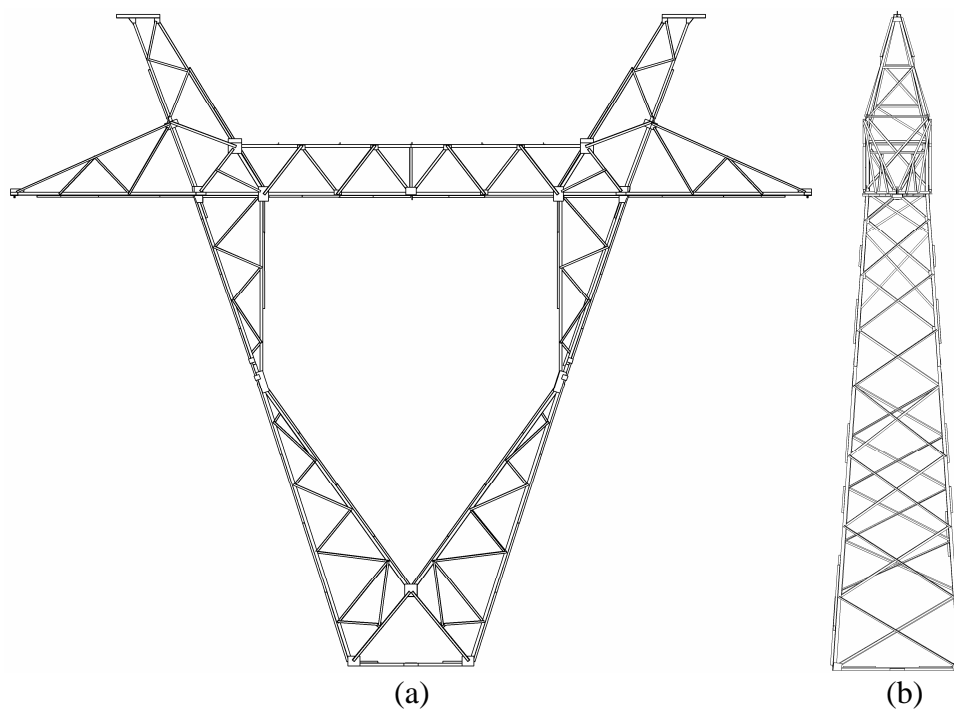


Figura D.12: Projeção da cabeça da Torre A33; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$;
(b) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

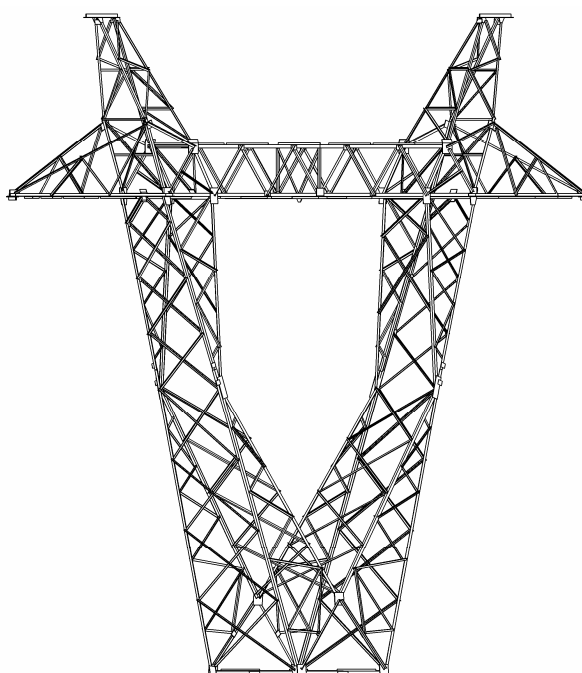


Figura D.13: Projeção da cabeça da Torre A33: face oblíqua $\alpha = 45^\circ$.

APÊNDICE E

Vista Projetada dos Módulos Adicionais da Torre A55

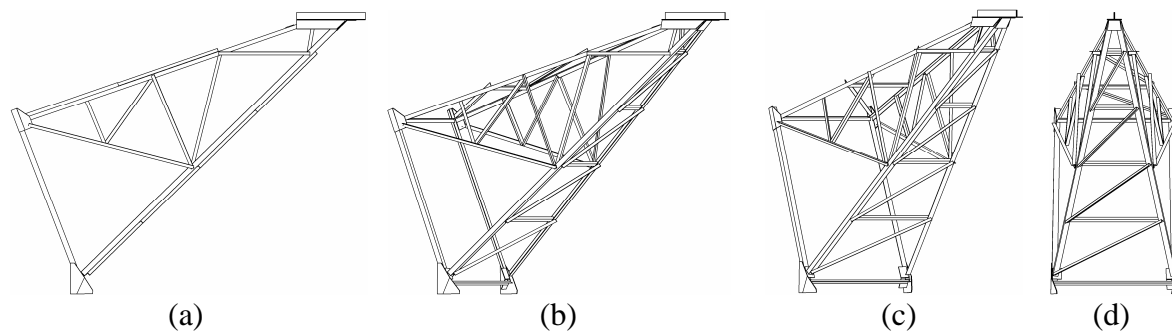


Figura E.1: Projeção do pára-raios isolado da Torre A55; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$; (d) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

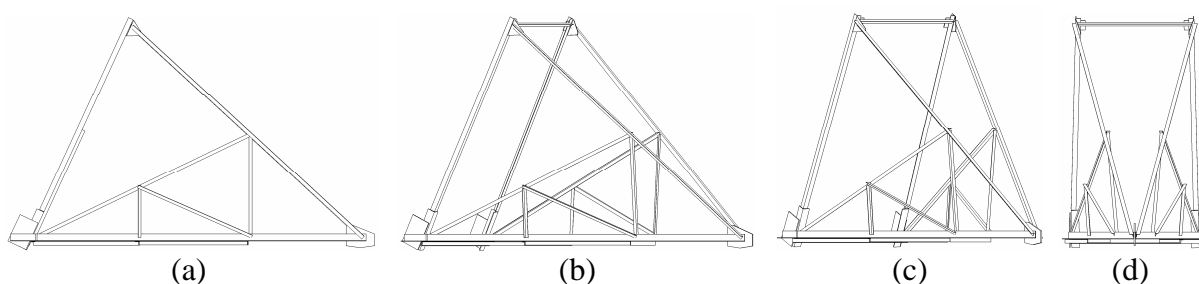


Figura E.2: Projeção da mísula isolada da Torre A55; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$; (d) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

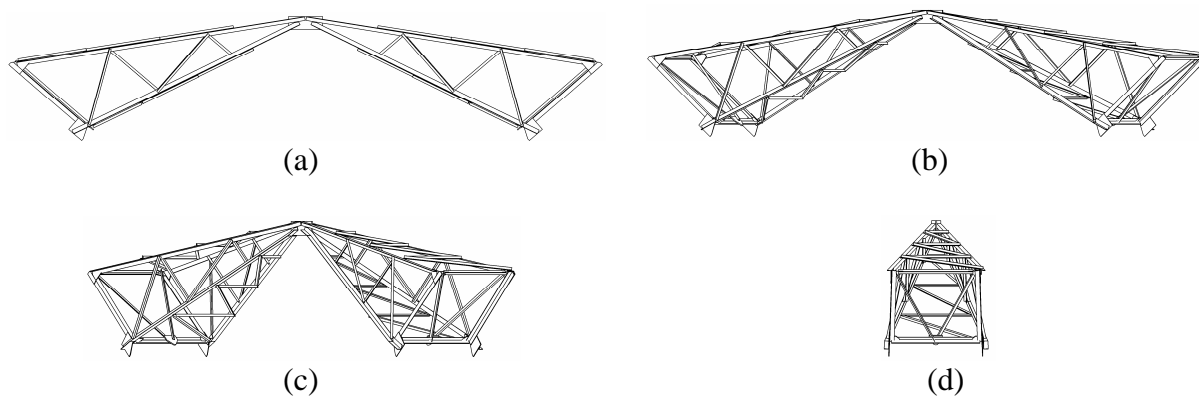


Figura E.3: Projeção da viga isolada da Torre A55; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$; (d) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

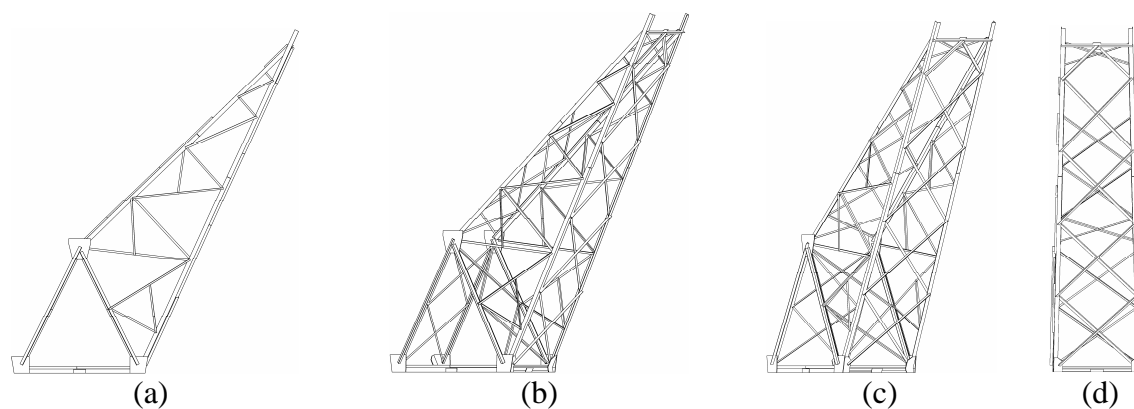


Figura E.4: Projeção do delta inferior parcial da Torre A55; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$; (d) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

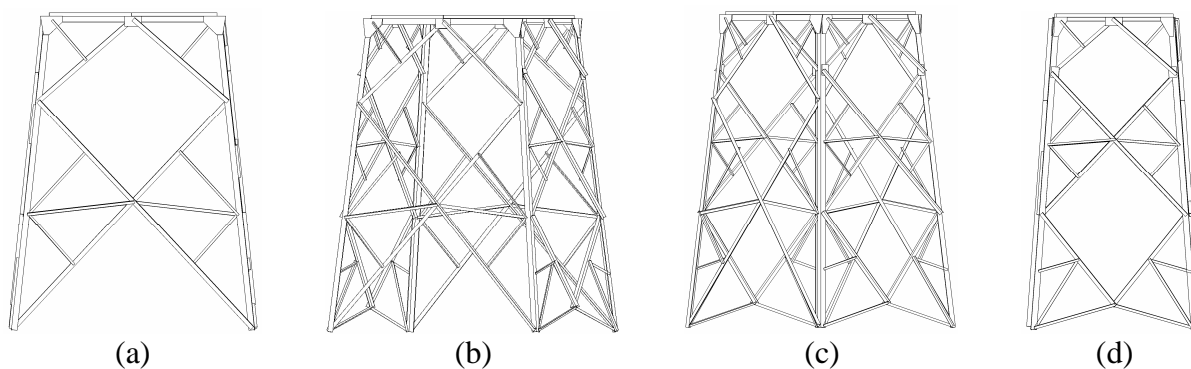


Figura E.5: Projeção do tronco comum superior da Torre A55; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$; (d) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

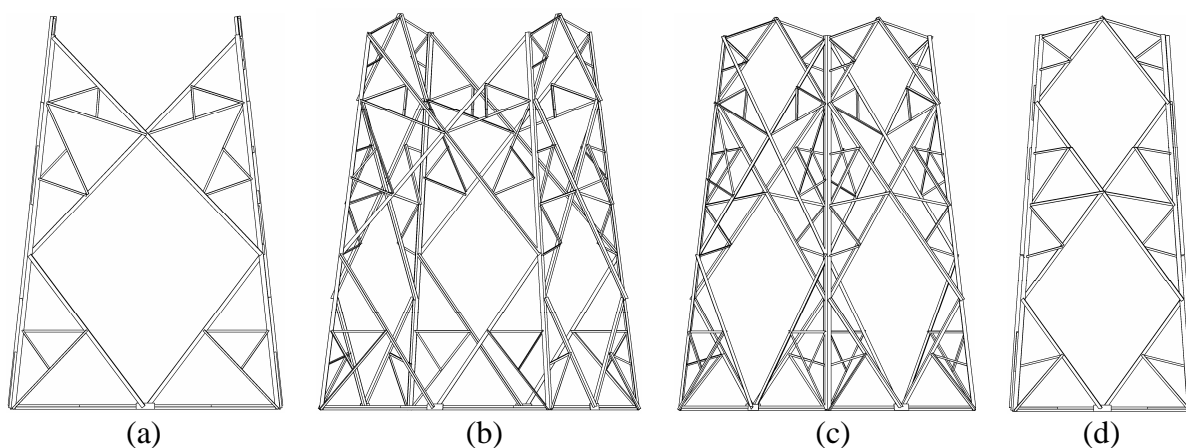


Figura E.6: Projeção do tronco comum inferior da Torre A55; (a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (c) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$; (d) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

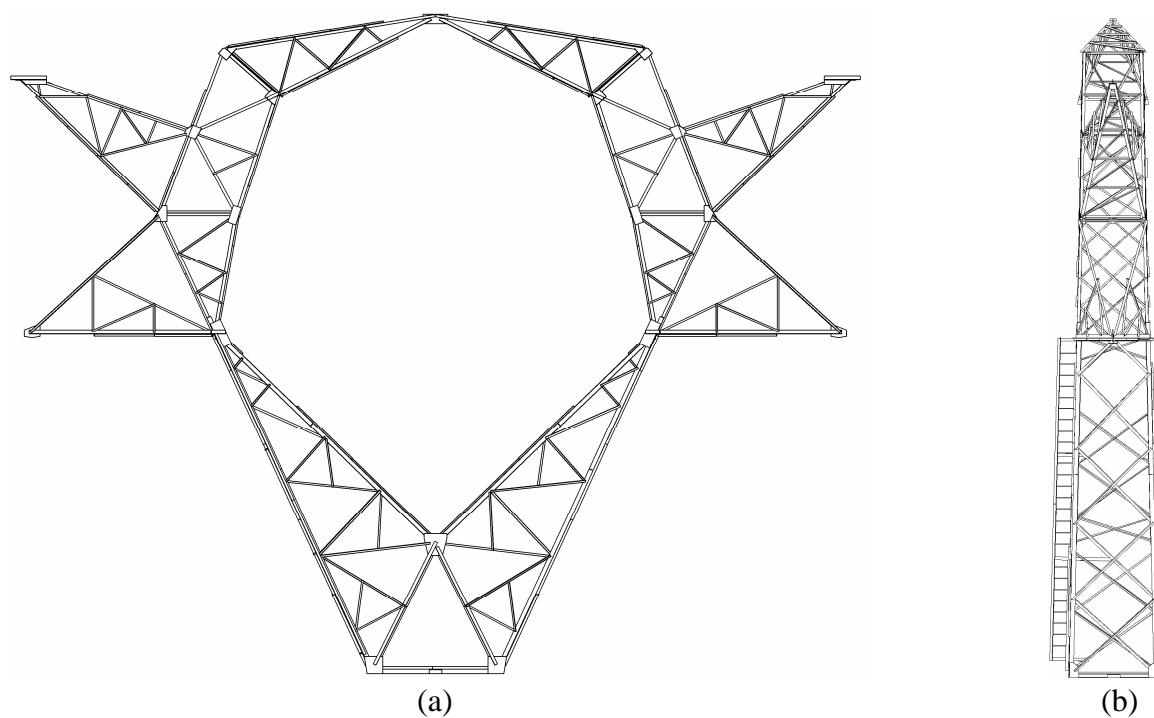


Figura E.7: Projeção da cabeça da Torre A55;
(a) Face transversal $\alpha = 0^\circ$; (b) Face longitudinal $\alpha = 90^\circ$.

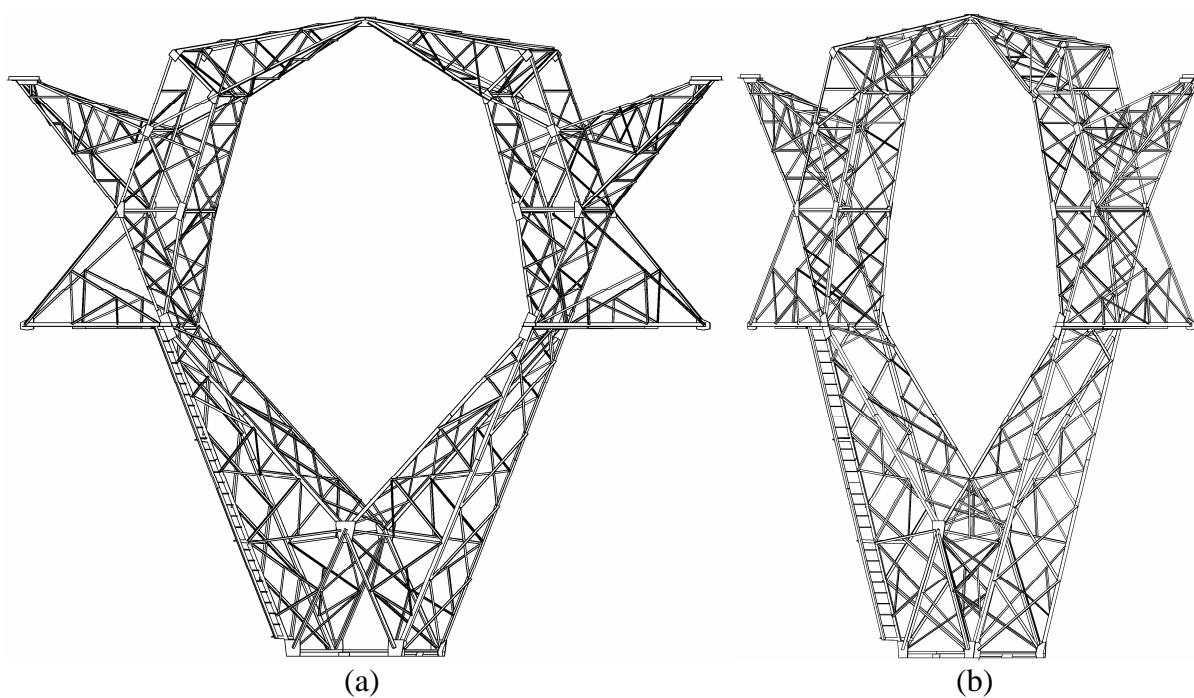


Figura E.8: Projeção da cabeça da Torre A55;
(a) Face oblíqua $\alpha = 30^\circ$; (b) Face oblíqua $\alpha = 56^\circ$.

APÊNDICE F

Áreas de Referência e Índice de Área Exposta dos Modelos Adicionais das Torres

Tabela F.1: Áreas de contorno e efetivas para os modelos adicionais da Torre A33.

Modelo	α (°)	Área de Contorno (m ²)		Área Efetiva (m ²)		Índice de Área Exposta	
		A _{cc}	A _{cp}	A _{ec}	A _{ep}	Φ_{ec}	Φ_{ep}
Tor. A33-1	0	0,0358	0,0531	0,0100	0,0132	0,28	0,25
	45	-	0,0561	-	0,0182	-	0,32
	90	0,0967	0,0336	0,0215	0,0106	0,22	0,31
Tor. A33-2	0	0,0507	0,0376	0,0112	0,0113	0,22	0,30
	45	-	0,0481	-	0,0191	-	0,40
	90	0,1013	0,0370	0,0212	0,0152	0,21	0,41
Tor. A33-3	0	0,0640	0,0676	0,0178	0,0187	0,28	0,28
	45	-	0,0607	-	0,0272	-	0,45
	90	0,0123	0,0138	0,0033	0,0061	0,27	0,45
Tor. A33-4	0	0,0776	0,0864	0,0213	0,0227	0,27	0,26
	45	-	0,0721	-	0,0311	-	0,43
	90	0,0384	0,0138	0,0080	0,0075	0,21	0,54
Tor. A33-5	0	0,1014	0,1051	0,0247	0,0267	0,24	0,25
	45	-	0,0841	-	0,0361	-	0,43
	90	0,0384	0,0139	0,0080	0,0075	0,21	0,54
Tor. A33-7	0	0,0107	0,0119	0,0015	0,0039	0,14	0,33
	45	-	0,0235	-	0,0080	-	0,34
	90	0,0114	0,0226	0,0019	0,0055	0,16	0,24
Tor. A33-8	0	0,0213	0,0239	0,0030	0,0078	0,14	0,33
	45	-	0,0470	-	0,0157	-	0,33
	90	0,0228	0,0227	0,0037	0,0061	0,16	0,27
Tor. A33-9	0	0,1198	0,1286	0,0209	0,0332	0,24	0,26
	45	-	0,2288	-	0,0664	-	0,29
	90	0,2166	0,2064	0,0308	0,0475	0,14	0,23
Tor. A33-10b	0	0,2051	0,2207	0,0589	0,0635	0,29	0,29
	45	-	0,3654	-	0,1273	-	0,35
	90	0,2158	0,2064	0,0308	0,0488	0,14	0,24
Tor. A33-11	0	0,0334	0,0400	0,0080	0,0113	0,24	0,28
	45	-	0,0742	-	0,0224	-	0,30
	90	0,0353	0,0688	0,0053	0,0159	0,15	0,23
Tor. A33-12	0	0,0668	0,0726	0,0160	0,0211	0,24	0,29
	45	-	0,1290	-	0,0421	-	0,33
	90	0,0706	0,0691	0,0106	0,0165	0,15	0,24
Tor. A33-13	0	0,0951	0,0994	0,0209	0,0241	0,22	0,24
	45	-	0,1081	-	0,0404	-	0,37
	90	0,0510	0,0337	0,0135	0,0125	0,26	0,37
Tor. A33-14	0	0,1405	0,1483	0,0342	0,0382	0,24	0,26
	45	-	0,1890	-	0,0686	-	0,36
	90	0,0988	0,0794	0,0203	0,0233	0,21	0,29

Tabela F.2: Áreas de contorno e efetivas para os modelos adicionais da Torre A55.

Modelo	α (°)	Área de Contorno (m ²)		Área Efetiva (m ²)		Índice de Área Exposta	
		A _{cc}	A _{cp}	A _{ec}	A _{ep}	Φ_{ec}	Φ_{ep}
Tor. A55-1	0	0,0506	0,0526	0,01040	0,0138	0,28	0,26
	30	-	0,0607	-	0,0231	-	0,38
	56	-	0,0564	-	0,0211	-	0,37
	90	0,1391	0,0406	0,0253	0,0165	0,18	0,40
Tor. A55-2	0	0,0671	0,0676	0,0142	0,0145	0,21	0,21
	30	-	0,0764	-	0,0218	-	0,29
	56	-	0,0676	-	0,0182	-	0,27
	90	0,1342	0,0471	0,0222	0,0126	0,17	0,27
Tor. A55-3	0	0,0435	0,0471	0,0131	0,0171	0,30	0,36
	30	-	0,0500	-	0,0252	-	0,50
	56	-	0,0435	-	0,0221	-	0,51
	90	0,0366	0,0138	0,0117	0,0080	0,32	0,58
Tor. A55-9	0	0,1740	0,1820	0,0388	0,0466	0,22	0,26
	30	-	0,2301	-	0,0890	-	0,39
	56	-	0,2269	-	0,0821	-	0,36
	90	0,1675	0,1619	0,0439	0,0514	0,26	0,32
Tor. A55-10b	0	0,2949	0,3096	0,0637	0,0774	0,22	0,25
	30	-	0,3940	-	0,1609	-	0,41
	56	-	0,3863	-	0,1468	-	0,38
	90	0,2068	0,1940	0,0484	0,610	0,23	0,31
Tor. A55-14	0	0,1913	0,2004	0,0510	0,0493	0,27	0,25
	30	-	0,2268	-	0,0890	-	0,39
	56	-	0,2035	-	0,0807	-	0,40
	90	0,1462	0,0771	0,0296	0,0292	0,20	0,38
Tor. A55-15b	0	0,1689	0,1384	0,0272	0,0330	0,16	0,24
	30	-	0,1882	-	0,0668	-	0,36
	56	-	0,1826	-	0,0590	-	0,32
	90	0,1091	0,1170	0,0240	0,0312	0,22	0,27
Tor. A55-15c	0	0,3671	0,3410	0,0429	0,0571	0,12	0,17
	30	-	0,4343	-	0,1196	-	0,28
	56	-	0,4168	-	0,1088	-	0,26
	90	0,2514	0,2634	0,0389	0,0525	0,16	0,20

APÊNDICE G

Curva de Ajuste do Coeficiente de Calibração

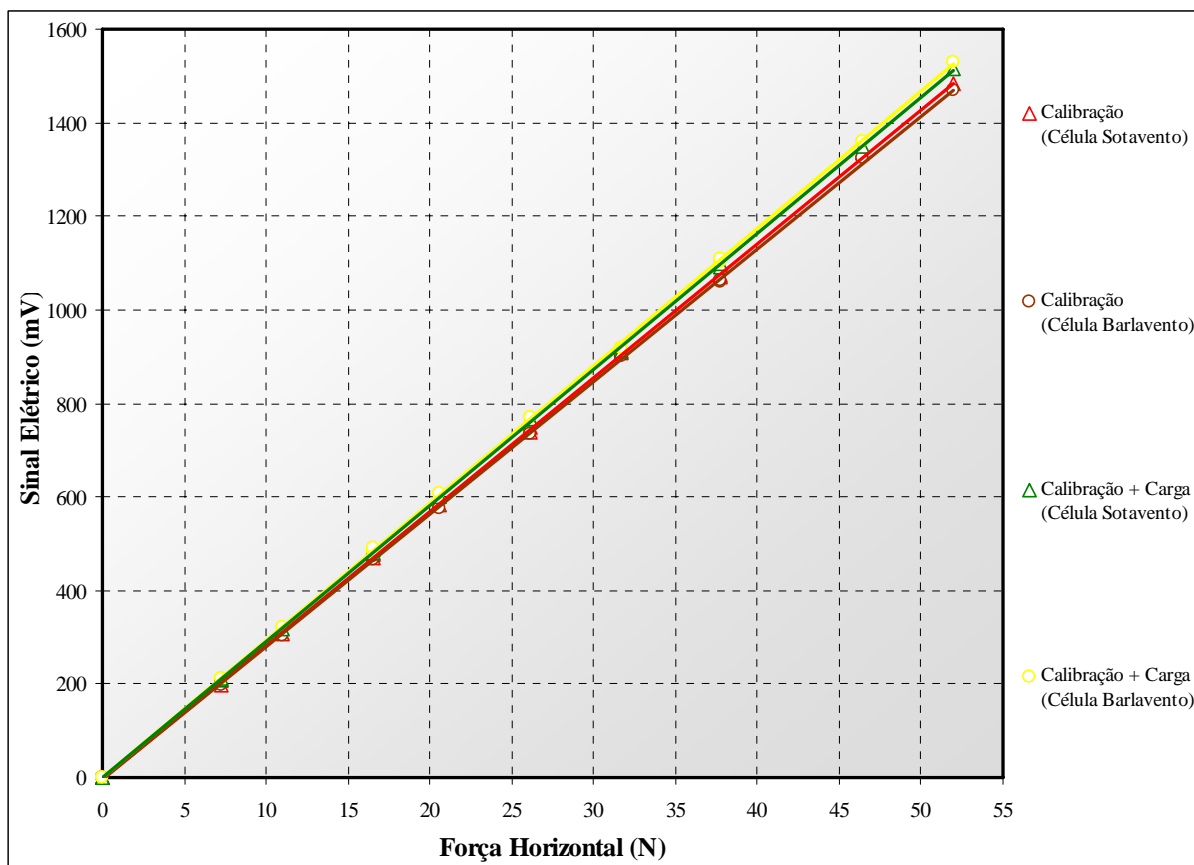


Figura G.1: Retas de calibração da balança, mostrando a influência dos efeitos de segunda ordem (P - Δ).

APÊNDICE H

Coeficientes de Arrasto Experimentais dos Modelos das Torres

Tabela H.1: Coeficientes de arrasto experimentais para os modelos da Torre A33.

Modelo	Coeficientes de Arrasto Medidos				
	Área Calculada		Área Projetada		
	0°	90°	0°	45°	90°
Tor. A33-1	2,19	3,49	4,42	1,24	1,67
Tor. A33-2	2,66	2,81	2,03	1,17	2,63
Tor. A33-3	2,61	4,81	2,56	1,32	2,49
Tor. A33-4	2,50	3,44	1,91	1,25	2,34
Tor. A33-5	2,46	3,57	1,98	1,22	2,28
Tor. A33-6	2,32	1,49	2,02	1,25	2,11
Tor. A33-7	4,93	4,34	1,48	1,22	1,88
Tor. A33-8	4,86	3,78	2,31	1,28	1,85
Tor. A33-9	2,29	2,28	1,48	1,28	2,18
Tor. A33-10a	2,12	4,00	2,52	1,25	1,97
Tor. A33-10b	2,26	3,96	2,50	1,19	2,10
Tor. A33-11	3,26	5,19	1,72	1,43	2,31
Tor. A33-12	2,74	3,90	2,50	0,78	2,08
Tor. A33-13	2,65	2,04	2,20	1,35	2,29
Tor. A33-14	2,50	2,66	2,32	1,32	2,22
Tor. A33-15a	3,04	3,04	2,64	2,03	2,64
Tor. A33-16	3,14	3,14	2,86	2,31	2,86
Tor. A33-17	3,42	3,42	2,93	2,15	2,93
Tor. A33-18a	3,60	3,60	2,58	2,18	2,58
Tor. A33-18c	2,06	2,06	1,47	1,42	1,47

Tabela H.2: Coeficientes de arrasto experimentais para os modelos da Torre A55.

Modelo	Coeficientes de Arrasto Medidos					
	Área Calculada		Área Projetada			
	0°	90°	0°	30°	56°	90°
Tor. A55-1	1,90	2,05	1,93	1,17	0,92	2,17
Tor. A55-2	2,08	3,04	2,04	1,27	0,89	2,68
Tor. A55-3	2,67	1,13	2,05	1,24	0,90	1,66
Tor. A55-6	1,79	1,62	2,10	1,32	1,06	2,04
Tor. A55-9	2,52	1,84	2,10	1,29	1,21	1,57
Tor. A55-10a	2,60	2,72	2,14	1,25	1,19	2,16
Tor. A55-10b	2,95	2,88	2,43	1,42	1,28	2,29
Tor. A55-14	2,04	2,07	2,11	1,31	1,13	2,11
Tor. A55-15a	3,12	2,92	2,47	1,29	1,16	2,43
Tor. A55-15b	3,43	3,36	2,44	1,38	1,23	2,27
Tor. A55-15c	2,93	2,95	2,58	1,38	1,23	2,49
Tor. A55-17	3,75	3,52	2,93	1,23	1,19	2,69
Tor. A55-18a	4,02	3,58	2,84	1,33	1,10	2,54
Tor. A55-18c	2,27	2,07	1,61	1,26	1,21	1,47

APÊNDICE I

Alturas dos Níveis de Carregamento

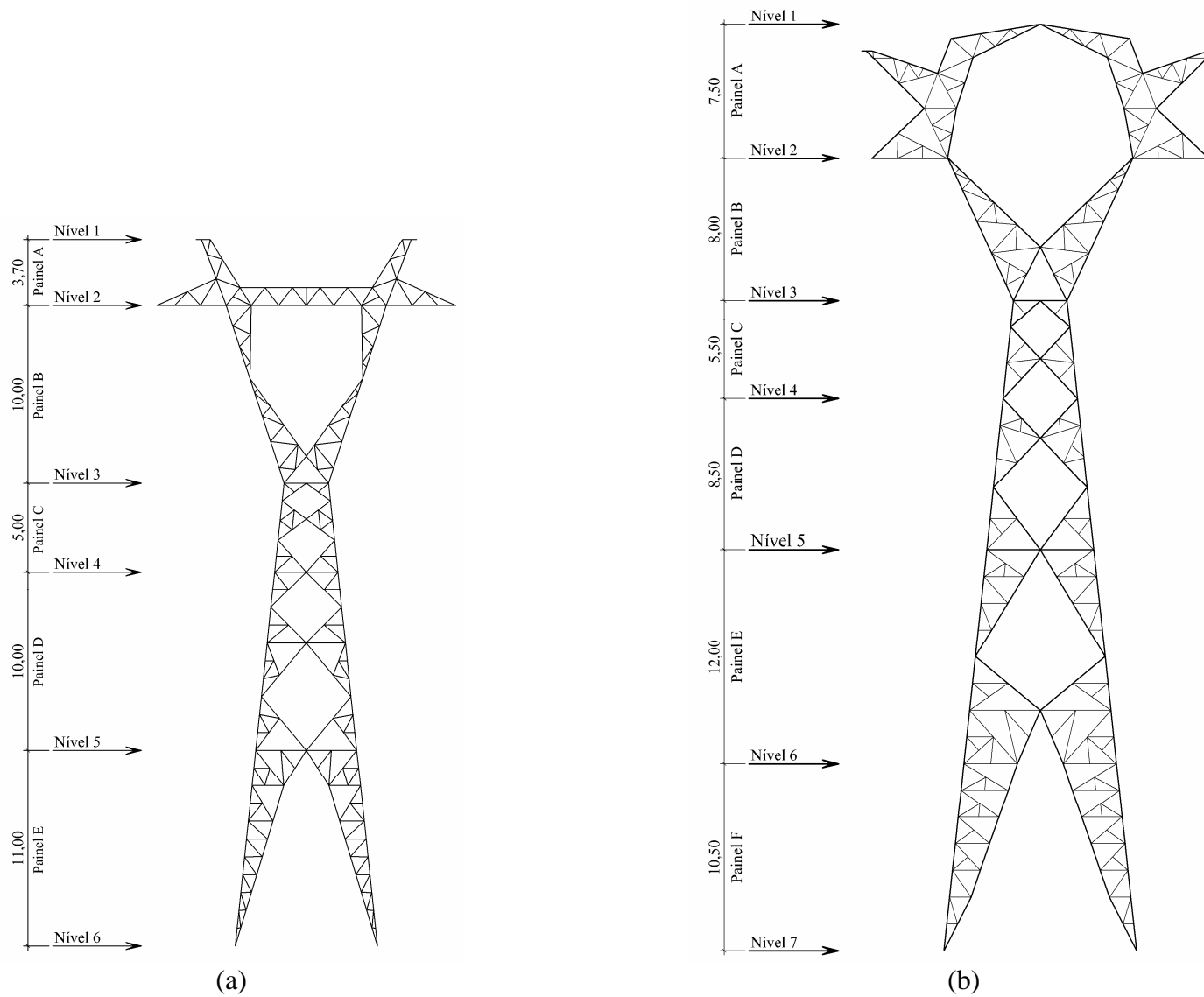


Figura I.1: Identificação dos níveis de aplicação das cargas (dimensões em metros). (a) Torre A33. (b) Torre A55.

APÊNDICE J

Fotos dos Modelos da Torre A33



(a)



(d)



(b)



(e)



(c)



(f)

Figura J.1: Fotos dos modelos da Torre A33 no interior do túnel de vento.
(a) Pára-raios isolado [esc.: 1/8]; (b) Mísula isolada [esc.: 1/8]; (c) Viga isolada [esc.: 1/13];
(d) Viga com uma mísula [esc.: 1/13]; (e) Viga com duas mísulas [esc.: 1/13];
(f) Pára-raios, mísulas e viga [esc.: 1/13].



(a)



(d)



(b)



(e)



(c)



(f)

Figura J.2: Fotos dos modelos da Torre A33 no interior do túnel de vento. (a) Delta superior parcial [esc.: 1/17]; (b) Delta superior completo [esc.: 1/17]; (c) Delta inferior parcial [esc.: 1/8]; (d) Delta inferior completo [esc.: 1/17]; (e) Delta inferior completo [esc.: 1/8]; (f) Delta parcial [esc.: 1/17].



(a)



(d)



(b)



(e)



(c)



(f)

Figura J.3: Fotos dos modelos da Torre A33 no interior do túnel de vento.
(a) Delta completo [esc.: 1/17]; (b) Pára-raios, mísulas, viga e delta superior [esc.: 1/17];
(c) Cabeça completa [esc.: 1/17]; (d) Tronco comum completo [esc.: 1/11];
(e) Extensão 6,0 m [esc.: 1/15]; (f) Extensão 12,0 m [esc.: 1/15].



(a)



(b)

Figura J.4: Fotos dos modelos da Torre A33 no interior do túnel de vento.
(a) Pernas $H = 9,00$ m / Conjunto [esc.: 1/13]; (b) Pernas $H = 9,00$ m / Isolada [esc.: 1/13].

APÊNDICE L

Fotos dos Modelos da Torre A55



(a)



(d)



(b)



(e)



(c)



(f)

Figura L.1: Fotos dos modelos da Torre A55 no interior do túnel de vento.
(a) Pára-raios isolado [esc.: 1/10]; (b) Mísula isolada [esc.: 1/10]; (c) Viga isolada [esc.: 1/13];
(d) Pára-raios, mísulas e viga [esc.: 1/20]; (e) Delta inferior parcial [esc.: 1/10];
(f) Delta inferior completo [esc.: 1/20].



(a)



(d)



(b)



(e)



(c)



(f)

Figura L.2: Fotos dos modelos da Torre A55 no interior do túnel de vento.
(a) Delta inferior completo [esc.: 1/10]; (b) Cabeça completa [esc.: 1/20];
(c) Tronco comum completo [esc.: 1/18]; (d) Tronco comum superior [esc.: 1/11];
(e) Tronco comum inferior [esc.: 1/11]; (f) Extensão 12,0 m [esc.: 1/15]



(a)



(b)

Figura L.3: Fotos dos modelos da Torre A55 no interior do túnel de vento.
(a) Pernas $H = 10,50$ m / Conjunto [esc.: 1/13]; (b) Pernas $H = 10,50$ m / Isolada [esc.: 1/13].