

**ESTUDO EM TÚNEL DE VENTO DAS CARACTERÍSTICAS  
AERODINÂMICAS DE TORRES METÁLICAS TRELIÇADAS**

**Tanise Klein**

Porto Alegre  
Abril de 2004

**TANISE KLEIN**

**ESTUDO EM TÚNEL DE VENTO DAS CARACTERÍSTICAS  
AERODINÂMICAS DE TORRES METÁLICAS TRELIÇADAS**

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 na modalidade Acadêmico

Porto Alegre  
Abril de 2004

K64e Klein, Tanise

Estudo em túnel de vento das características aerodinâmicas de torres metálicas treliçadas / Tanise Klein . – 2004.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2004.

Orientação : Prof. Acir Mércio Loredou-Souza.

1. Vento – Estruturas. 2. Torres metálicas treliçadas . I. Souza, Acir Mércio Loredou, orient. II. Título.

CDU-624.042.4(043)

**TANISE KLEIN**

**ESTUDO EM TÚNEL DE VENTO DAS CARACTERÍSTICAS  
AERODINÂMICAS DE TORRES METÁLICAS TRELIÇADAS**

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

Porto Alegre, 27 de abril de 2004

**Prof. Acir Mércio Loredou-Souza**  
Ph.D., University of Western Ontario, Canadá

**Prof. Américo Campos Filho**  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof<sup>a</sup>. Edith Beatriz Camaño Schettini (UFRGS)**  
Ph.D. pelo Institut National Polytechnique de Grenoble

**Prof. Mário José Paluch (UPF)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes**  
Dr. Techn., Universität Innsbruck, Áustria

*Aos meus pais, Wilson e Tânia,  
por todo amor, apoio e compreensão,  
dedico este trabalho.*

## **Agradecimentos**

Aos amigos que encontrei no Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul que, seja através de incentivo, colaboração ou paciência, contribuíram para que este dia chegasse. Uma menção especial, a uma pessoa muito importante, Paulo Francisco Bueno, pela atenção, dedicação e boa vontade na etapa experimental deste trabalho.

À fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pela bolsa de estudos concedida.

A quem dediquei este trabalho e jamais cansarei de agradecer, meus pais, pelo exemplo de pessoas maravilhosas que são, pela confiança, compreensão, incentivo e amor que sempre tiveram comigo em todos os momentos da minha vida.

Um agradecimento muito especial ao meu “mestre-professor-orientador-amigo”, Prof. Acir, pela paciência no esclarecimento das dúvidas, pelo incentivo, apoio e por ter aceito me orientar.

## Sumário

<b>Lista de Tabelas</b>	vii
<b>Lista de Figuras</b>	ix
<b>Lista de Símbolos</b>	xiv
<b>Resumo</b>	xvii
<b>Abstract</b>	xviii
<b>1 Introdução</b>	1
<b>1.1 Introdução</b>	1
<b>1.2 Histórico de Acidentes</b>	2
<b>1.3 Revisão bibliográfica</b>	3
<b>1.4 Objetivos do trabalho</b>	7
<b>2 Considerações Gerais sobre a Ação do Vento</b>	8
<b>2.1 Ações que produzem carregamentos</b>	8
<b>2.2 Fatores que Governam o Carregamento do Vento em Estruturas Reticuladas</b>	9
<b>2.3 Características Gerais do Vento</b>	10
<b>2.4 Forças Devidas ao Vento em Torres Metálicas</b>	13
2.4.1 Ação do Vento nas Estruturas	13
2.4.1.1 Forças devidas ao vento	13
2.4.1.2 Determinação do Coeficiente de Força	17
2.4.1.2.1 Barras Isoladas	17
2.4.1.2.2 Reticulados planos isolados e paralelos	21
2.4.1.2.3 Torres Reticuladas	27
<b>3 Análise Experimental</b>	33
<b>3.1 Características do Túnel de Vento</b>	33
<b>3.2 Medição das Pressões</b>	36
<b>3.3 Modelos de Torres Treliçadas</b>	40
<b>3.4 Ensaios</b>	41

3.4.1 Etapa 1: Modelos Isolados	42
3.4.2 Etapa 2: Interação entre os Modelos	46
3.4.3. Etapa 3: Módulos de Torres Treliçadas	47
<b>4 Resultados</b>	<b>52</b>
<b>4.1 Etapa 1: Modelos Isolados</b>	<b>52</b>
4.1.1 Coeficientes de Força ( $C_f$ )	53
4.1.2 Coeficientes de Torção ( $C_t$ )	58
<b>4.2 Etapa 2: Interação entre os Modelos</b>	<b>59</b>
4.2.1 Coeficientes de Força ( $C_f$ )	59
4.2.1.1 Comparação com valores da NBR-6123	64
4.2.2 Coeficientes de Torção ( $C_t$ )	75
<b>4.3 Etapa 3: Módulos de Torres Treliçadas</b>	<b>77</b>
4.3.1 Módulos de Torres de Secção Transversal Triangular	78
4.3.2 Módulos de Torres de Secção Transversal Quadrada	83
<b>5 Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>88</b>
5.1 Conclusões	88
5.2 Trabalhos Futuros	92
<b>6 Referencias bibliográficas</b>	<b>93</b>
<b>APÊNDICE A – Cálculo da Primeira Etapa de Ensaio</b>	<b>96</b>
<b>APÊNDICE B – Cálculo da Segunda Etapa de Ensaio</b>	<b>108</b>
<b>APÊNDICE C – Registro Fotográfico</b>	<b>114</b>



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores do fator de redução $K$ .....	p.18
Tabela 2: Coeficientes de força nas direções $x$ e $y$ , $C_{fx}$ e $C_{fy}$ .....	p.18
Tabela 3: Valores de $C_a$ segundo COHEN e PERRIN (1957).....	p.29
Tabela 4: Afastamentos, $x$ , entre os reticulados ensaiados.....	p.46
Tabela 5: Relação do coeficientes de força com a posição do modelo.....	p.55
Tabela 6: Coeficientes de força nas direções $x$ e $y$ , com ângulo de incidência do vento de $45^\circ$ e $-135^\circ$ .....	p.56
Tabela 7: Coeficientes de força resultantes, $C_{FR}$ , com ângulo de incidência do vento de $45^\circ$ e $-135^\circ$ .....	p.56
Tabela 8: Áreas dos módulos das torres $A$ , $B$ e $C$ de secção triangular.....	p.78
Tabela 9: Coeficientes de arrasto e índices de área exposta dos módulos da torre de secção triangular, com $\alpha = 0^\circ$ .....	p.79
Tabela 10: Coeficientes de arrasto e índices de área exposta dos módulos da torre de secção triangular, com $\alpha = 60^\circ$ .....	p.79
Tabela 11: Coeficientes de arrasto e índices de área exposta dos módulos da torre de secção triangular, com $\alpha = 180^\circ$ .....	p.79
Tabela 12: Áreas dos módulos das torres $A$ , $B$ e $C$ de secção quadrada.....	p.83
Tabela 13: Coeficientes de arrasto, $C_a$ , e índices de área exposta, $\phi$ , dos módulos da torre de secção quadrada, com $\alpha = 0^\circ$ .....	p.83
Tabela 14: Coeficientes de arrasto, $C_a$ , e índices de área exposta, $\phi$ , dos módulos da torre de secção quadrada, com $\alpha = 45^\circ$ .....	p.85
Tabela A1: Coeficientes de pressão médios, $C_p$ , modelo E1, escoamento suave.....	p.98
Tabela A2: Coeficientes de pressão médios, $C_p$ , modelo E1, escoamento turbulento.....	p.100
Tabela A3: Coeficientes de pressão médios, $C_p$ , modelo E2, escoamento suave.....	p.102
Tabela A4: Coeficientes de pressão médios, $C_p$ , modelo E2, escoamento turbulento.....	p.104
Tabela A5: Coeficientes de força nas direções $x$ e $y$ , $C_{fx}$ e $C_{fy}$ , nos modelos.....	p.106
Tabela A6: Coeficientes de torção, $C_t$ .....	p.107

Tabela B1: Coeficientes de pressão médios, $C_p$ , posição P1, escoamentos suave e turbulento.....	p.110
Tabela B2: Coeficientes de pressão médios, $C_p$ , posição P2, escoamentos suave e turbulento.....	p.111
Tabela B3: Coeficientes de pressão médios, $C_p$ , posição P3, escoamentos suave e turbulento.....	p.112
Tabela B4: Coeficientes de força nas direções $x$ e $y$ , $C_{fx}$ e $C_{fy}$ .....	p.113
Tabela B5: Coeficientes de torção.....	p.113

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Torre metálica treliçada acidentada.....	p.3
Figura 2: Velocidade média do vento e suas flutuações.....	p.10
Figura 3: Isopletas da velocidade básica $V_o$ (m/s).....	p.15
Figura 4: Largura de sombra.....	p.17
Figura 5: Convenção adotada.....	p.18
Figura 6: Gráfico comparativo entre $C_{fx}$ de perfil secção quadrada e tipo cantoneira (COOK,1985).....	p.20
Figura 7: $C_{fx}$ e $C_{fy}$ para perfis tipo cantoneira de abas iguais e desiguais (COOK, 1985).....	p.21
Figura 8: Coeficiente de arrasto, $C_a$ , para reticulados planos formados por barras prismáticas planas.....	p.24
Figura 9: Efeito de proteção em treliças paralelas. Ensaios de Flachsbart.....	p.24
Figura 10: Fator de proteção em função do índice de área exposta, $\phi$ , e do afastamento relativo, $e/h$ , entre dois reticulados, segundo ensaios de Flachsbart.....	p.25
Figura 11: Fator de proteção $\eta$ para dois ou mais reticulados planos paralelos igualmente afastados.....	p.27
Figura 12: Coeficiente de arrasto, $C_a$ , para torres reticuladas de secção quadrada e triangular equilátera, formadas por barras prismáticas de cantos vivos ou levemente arredondados.....	p.31
Figura 13: Coeficientes de arrasto, $C_a$ , em torres reticuladas de secção quadrada.....	p.31
Figura 14: Túnel de Vento <i>Prof. Joaquim Blessmann</i> .....	p.34
Figura 15: Circuito aerodinâmico do túnel de vento LAC/UFRGS.....	p.35
Figura 16: Tomada de pressão.....	p.37
Figura 17: Visualização em corte das tomadas de pressão.....	p.37
Figura 18: Caixa dos transdutores elétricos de pressão e conexões das tomadas de pressão.....	p.38
Figura 19: Equipamentos utilizados nos ensaios.....	p.39
Figura 20: Foto do multimanômetro, resultados de um ensaio.....	p.40
Figura 21a: Dimensões em [mm] do modelo E1.....	p.43

Figura 21b: Dimensões em [mm] do modelo E2.....	p.43
Figura 22: Localização das tomadas de pressão nos modelos.....	p.43
Figura 23: Posição das linhas de tomadas de pressão na cantoneira.....	p.44
Figura 24: Convenção dos eixos e indicação dos ângulos de incidência do vento.....	p.45
Figura 25: Foto do ensaio com perfil submetido a escoamento turbulento, com gerador de turbulência tipo grelha.....	p.45
Figura 26: Foto do ensaio com perfil submetido a escoamento suave.....	p.45
Figura 27 : Ilustração do posicionamento (P1, P2 e P3) dos reticulados na segunda etapa de ensaios.....	p.47
Figura 28: Vista frontal dos módulos A, B e C de secção triangular e quadrada.....	p.48
Figura 29: Balança de força unidirecional, instrumentada com LVDT's.....	p.49
Figura 30: Ajuste de função linear aos pontos de calibração da balança de força unidirecional horizontal.....	p.50
Figura 31: Referência para o ângulo de incidência do vento e para aplicação dos coeficientes de arrasto para os módulos de secção triangular e quadrada.....	p.51
Figura 32: Áreas de referência do módulo de uma torre de secção triangular utilizadas no cálculo dos coeficientes de arrasto.....	p.51
Figura 33: Convenção adotada, conforme COOK (1985).....	p.53
Figura 34: Comparação entre os coeficientes de força dos modelos E1 e E2, submetidos aos escoamentos suave e turbulento em função dos ângulos de incidência do vento, $-180^\circ$ a $180^\circ$ , (a) $C_{fx}$ e, (b) $C_{fy}$ .....	p.54
Figura 35: Comparação entre coeficientes de força experimentais, norma brasileira (NBR-6123) e Cook em função do ângulo de incidência do vento.(a) $C_{fx}$ , e (b) $C_{fy}$ ....	p.57
Figura 36: Comparação entre o coeficiente de torção, $C_t$ , dos modelos E1 e E2, submetidos aos escoamentos suave e turbulento.....	p.58
Figura 37: Afastamentos ( $x/c$ ) x coeficientes de força, com modelo na posição 1, submetido aos escoamentos suave e turbulento, sendo que em (a) $C_{fx}$ , e em (b), $C_{fy}$ ..	p.60
Figura 38: Afastamentos ( $x/c$ ) x coeficientes de força, com modelo na posição 2, submetido aos escoamentos suave e turbulento, sendo que em (a) $C_{fx}$ , e em (b), $C_{fy}$ ..	p.62
Figura 39: Afastamentos ( $x/c$ ) x coeficientes de força, com modelo na posição 3, submetido aos escoamentos suave e turbulento, sendo que em (a) $C_{fx}$ , e em (b), $C_{fy}$ ..	p.64

- Figura 40: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 1, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=0^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção..... p.67
- Figura 41: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 1, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=180^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção. .... p.67
- Figura 42: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 1, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=0^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção..... p.68
- Figura 43: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 1, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=180^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção..... p.68
- Figura 44: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 2, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=0^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção..... p.69
- Figura 45: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 2, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=180^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção..... p.70
- Figura 46: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 2, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=0^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção..... p.71
- Figura 47: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 2, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=180^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção..... p.71
- Figura 48: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 3, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=10^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção..... p.73
- Figura 49: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 3, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=-170^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção..... p.73

Figura 50: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção $y$ , $C_{fy}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 3, e os coeficientes de perfis isolados (com $\alpha=10^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção.....	p.74
Figura 51: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção $y$ , $C_{fy}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 3, e os coeficientes de perfis isolados (com $\alpha=-170^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção.....	p.74
Figura 52: Afastamento ( $x / c$ ) x coeficiente de torção, $C_t$ , para os escoamentos suave e turbulento, aos quais foi submetido o reticulado na posição 1.....	p.76
Figura 53: Afastamento ( $x / c$ ) x coeficiente de torção, $C_t$ , para os escoamentos suave e turbulento, aos quais foi submetido o reticulado na posição 2.....	p.76
Figura 54: Afastamento ( $x / c$ ) x coeficiente de torção, $C_t$ , para os escoamentos suave e turbulento, aos quais foi submetido o reticulado na posição 3.....	p.77
Figura 55: Gráfico do coeficiente de arrasto, $C_a$ , em função do índice de área exposta, $\phi$ , com vento a $0^\circ$ , em secção triangular.....	p.80
Figura 56: Gráfico do coeficiente de arrasto, $C_a$ , em função do índice de área exposta, $\phi$ , com vento a $60^\circ$ , em secção triangular.....	p.80
Figura 57: Gráfico do coeficiente de arrasto, $C_a$ , em função do índice de área exposta, $\phi$ , com vento a $180^\circ$ , em secção triangular.....	p.81
Figura 58: Comparação entre os $C_a$ indicados por algumas normas e os obtidos através de estudos, com ângulo de incidência do vento à $0^\circ$ .....	p.82
Figura 59: Comparação entre os $C_a$ indicados por algumas normas e os obtidos através de estudos, com ângulo de incidência do vento à $180^\circ$ ou $60^\circ$ .....	p.82
Figura 60: Gráfico do coeficiente de arrasto, $C_a$ , em função do índice de área exposta, $\phi$ , com vento a $0^\circ$ , em secção quadrada.....	p.84
Figura 61: Gráfico do coeficiente de arrasto, $C_a$ , em função do índice de área exposta, $\phi$ , com vento a $45^\circ$ em secção quadrada.....	p.85
Figura 62: Comparação entre os $C_a$ indicados por algumas normas e os obtidos através de estudos, com ângulo de incidência do vento à $0^\circ$ .....	p.86
Figura 63: Comparação entre os $C_a$ indicados por algumas normas e os obtidos através de estudos, com ângulo de incidência do vento à $45^\circ$ .....	p.87
Figura A1: Numeração das tomadas de pressão do modelo E1.....	p.97
Figura A2: Numeração das tomadas de pressão do modelo E2.....	p.97

Figura B1: Posições dos modelos na etapa 2 dos ensaios.....	p.109
Figura C1 : Colocação das mangueiras para medição das pressões estáticas.....	p.115
Figura C2: Detalhe da colocação das mangueiras.....	p.115
Figura C3: Colocação do modelo no túnel de vento, primeira etapa dos ensaios.....	p.116
Figura C4: Detalhe da fixação do modelo no túnel.....	p.116
Figura C5: Modelo E2, submetido à escoamento turbulento, com ângulo de incidência do vento de $-135^\circ$ .....	p.117
Figura C6: Segunda etapa de ensaios, modelos na posição 1, P1, com afastamento $x/c=4,43$ e submetidos ao escoamento turbulento.....	p.117
Figura C7: Modelos na posição 1, P1, com afastamento $x/c=13,78$ e submetidos ao escoamento turbulento.....	p.118
Figura C8: Modelos na posição 2, P2, com afastamento $x/c=4,43$ e submetidos ao escoamento turbulento.....	p.118
Figura C9: Modelos na posição 2, P2, com afastamento $x/c=7,87$ , submetidos ao escoamento suave.....	p.119
Figura C10: Modelos na posição 2, P2, com afastamento $x/c=13,78$ , submetidos ao escoamento suave.....	p.119
Figura C11: Modelos na posição 3, P3, com afastamento $x/c=4,43$ , submetidos ao escoamento suave.....	p.120
Figura C12: Modelos na posição 3, P3, com afastamento $x/c=7,87$ , submetidos ao escoamento turbulento.....	p.120
Figura C13: Módulo A, da terceira etapa de ensaios. Modelos seccionais reduzidos de torre de secção triangular.....	p.121
Figura C14: Módulo B, da terceira etapa de ensaios. Modelos seccionais reduzidos de torre de secção triangular.....	p.121
Figura C15: Modelos seccionais reduzidos de torre. (a) Módulo C, secção transversal triangular, (b) Módulo C, secção transversal quadrada.....	p.122
Figura C16: Módulo A, da terceira etapa de ensaios. Modelos seccionais reduzidos de torre de secção quadrada.....	p.123
Figura C17: Módulo B, da terceira etapa de ensaios. Modelos seccionais reduzidos de torre de secção quadrada.....	p.123

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Romanas Maiúsculas:

$A$	<i>Área</i>
$A_e$	<i>área frontal efetiva</i>
$A_i$	<i>área de influencia de cada ponto de tomada de pressão</i>
$C$	<i>fator de correção em função da temperatura do ar e pressão atmosférica</i>
$C_a$	<i>coeficiente de arrasto = <math>F_a / q A</math></i>
$C_f$	<i>coeficiente de força</i>
$C_{fR}$	<i>coeficiente de força resultante</i>
$C_p$	<i>coeficiente de pressão</i>
$C_t$	<i>coeficiente de momento torçor</i>
$C_{fx}$	<i>coeficiente de força ao longo do eixo X</i>
$C_{fy}$	<i>coeficiente de força ao longo do eixo Y</i>
$F$	<i>força resultante</i>
$F_a$	<i>força de arrasto</i>
$F_i$	<i>força total devida ao vento, para a coordenada i, para um determinado modo de vibração</i>
$L$	<i>dimensão característica, comprimento</i>
$S1$	<i>fator topográfico</i>
$S2$	<i>rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o solo</i>
$S3$	<i>fator estatístico</i>
$V$	<i>velocidade média do vento</i>
$V_k$	<i>velocidade característica do vento</i>



$V_o$                     *velocidade básica do vento*

**Letras Romanas Minúsculas:**

$c_{pe}$                     *coeficiente de pressão externa =  $\Delta p_e / q$*

$h$                         *altura da edificação, modelo ou protótipo*

$k_o$                     *coeficiente do túnel de vento que vincula  $q$  e  $\Delta p_a$*

$q$                         *pressão dinâmica ao longe =  $(1/2)\rho V^2$*

$q_p$                     *pressão dinâmica de projeto*

$z$                         *cota acima de um nível de referência*

$z_{ref}$                     *cota de referência = 10m*

**Letras Gregas Minúsculas:**

$\alpha$                     *ângulo de incidência do vento*

$\phi$                         *índice de área exposta*

$\rho$                         *massa específica do ar*

$\eta$                         *fator de proteção*

**Letras Gregas Maiúsculas:**

$\Delta p_a$                     *pressão de referência (diferença de pressão entre os anéis piezométricos)*

$\Delta p_e$                     *pressão estática efetiva média na superfície externa*

**LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS**

AISC                    American Institute of Steel Construction

ASCE	American Society of Civil Engineers
LAC	Laboratório de Aerodinâmica das Construções
NBR	Norma Brasileira Registrada

## RESUMO

O avanço intenso e constante que vem tendo os sistemas de telecomunicação e de transmissão de energia elétrica tem levado à instalação de uma quantidade considerável de torres metálicas treliçadas, desde as zonas menos povoadas até os grandes centros urbanos. Apesar dos vários estudos existentes nesta área, ocorrências de tombamento de torres deste tipo continuam sendo registradas, o que implica na necessidade de mais estudos. Por se tratar de estruturas esbeltas e de baixo peso, o principal carregamento para elaboração do projeto estrutural de torres metálicas treliçadas é a força do vento. Pergunta-se então: a norma brasileira de vento (NBR-6123/88) é clara e atende a todas as situações e dúvidas ou são os projetos que não estão seguindo suas recomendações adequadamente?

Este trabalho é então dividido em três etapas de ensaios experimentais no Túnel de Vento do LAC. Estudou-se, numa primeira fase, o comportamento de perfis isolados, com vários ângulos de incidência do vento e dois tipos de escoamento: suave e turbulento. Percebeu-se que a terminação das cantoneiras não possui influência, também não ocorreram diferenças quanto aos tipos de escoamentos e uma leve divergência do coeficiente de força  $C_f$ , com a norma para alguns ângulos de incidência. Na segunda etapa, foi verificado o efeito de proteção de um perfil a barlavento sobre um a sotavento, com diversos afastamentos entre eles e submetidos aos escoamentos suave e turbulento. O efeito de proteção foi comprovado, apesar de não ter sido possível determinar exatamente o momento em que ele deixa de existir. O mesmo fenômeno foi verificado nos coeficientes de torção,  $C_t$ . Também verificou-se a possibilidade da utilização da figura 8 da NBR-6123 para barras isoladas, percebendo-se que para os afastamentos intermediários ensaiados a discrepância entre os valores dos coeficientes de arrasto,  $C_a$ , indicados pela norma e os obtidos nos ensaios foi maior. Na terceira etapa, estudou-se módulos de torres treliçadas, submetidos a diferentes velocidades e ângulos de incidência do vento. Para efeito de comparação, escolheram-se duas diferentes áreas: uma considerando somente a área frontal e a outra sendo a área efetiva (frontal mais sombra). Perceberam-se diferenças entre os próprios métodos indicados pela NBR-6123 e entre esta e os experimentos e normas e, principalmente, a importância do cálculo correto das áreas para a determinação da força atuante. Verificou-se que os valores obtidos nos ensaios, para alguns módulos, são maiores que aqueles recomendados pela norma.

Com este trabalho pôde-se verificar a diferença entre os valores indicados pelas mais diversas normas e valores encontrados experimentalmente, provando que estudos nesta área devem continuar sendo incentivados.

## ABSTRACT

The intense and constant progress of telecommunication systems and electric power transmission result in the installation of a considerable amount of lattice towers, from the less populated areas to the great urban centers. In spite of the several existent studies in this area, occurrences of wind accidents with towers of this type continue being registered, which implicates the need for more studies. Concerning slender structures of low weight, the main loading for elaboration of the structural designs of lattice towers is the force of the wind. The question is: does the Brazilian wind code (NBR-6123/88) clear? Does it attend all situations and doubts, or the new projects being designed not following their recommendations appropriately?

This work is divided into three stages of experimental testing in the Wind Tunnel of LAC. It was studied, in a first phase, the behavior of a single isolated member, with several angles of incidence of the wind and two types of flow: smooth and turbulent. It was noticed that the member's ending types are not important; there was no occurrence of differences in the types of flow and a light divergence of the force coefficient,  $C_f$ , with the code for some wind direction. In the second stage, the protection effect was examined from the shielding of the windward member in the leeward member, under smooth and turbulent flow. The protection effect was proven, in spite of not being possible to determine exactly the moment that it stops existing. The same phenomenon was verified in the torsion coefficients,  $C_t$ . Also the possibility of the use of the Figure 8 of the NBR-6123 was verified for a single isolated member, being noticed that for the experiments with intermediate separations, the discrepancies of the drag coefficient values,  $C_a$ , from the code values and from experiments were bigger. In the third stage, sections of lattice towers were studied. They were submitted to different wind speeds and wind directions. For a comparison, two different areas were chosen, firstly just the frontal area was considered and, secondly, the effective area (shadow plus frontal) was adopted. Differences were noticed among the methods in NBR-6123 and between these, the results of the experiments and the indications of other codes. It was verified that the values obtained in the tests, for some modules, are larger than those recommended by the code.

With this work, a difference was verified between the different code values and the actual values found experimentally, proving evidence that studies in this area should be continued.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. INTRODUÇÃO

Com o término da Segunda Guerra Mundial a construção de torres de rádio no continente norte americano utilizando estruturas de aço treliçadas, estaiadas ou auto portantes, ganhou força. A vantagem destas estruturas sobre as demais está, principalmente, na rapidez da sua execução, na menor quantidade de mão de obra, material, equipamentos e custo. E, com o crescimento populacional, surgiu a necessidade de ampliar as linhas de transmissão de energia elétrica.

Os avanços na área de telecomunicações, tais como TV a cabo, Internet, telefonia celular, transmissões via satélites, diversificação do sistema de telefonia fixa e outros, acentuaram-se muito nos últimos anos, incentivados pelos inúmeros investimentos no setor por parte do governo e da iniciativa privada.

Este desenvolvimento constante do sistema de telecomunicações, bem como dos sistemas de linhas de transmissão, tem levado à instalação de uma quantidade considerável de torres metálicas treliçadas, desde as zonas menos povoadas até os grandes centros urbanos, o que implica no estudo de novos produtos que atendam às exigências do mercado, critérios de segurança, funcionalidade, durabilidade e que sejam economicamente viáveis.

Mas, apesar da grande quantidade de construção de torres deste tipo, continuam sendo registradas ocorrências de tombamento das mesmas frente a ventos fortes.

Por serem estruturas muito esbeltas e de baixo peso, uma das principais fontes de carregamento é o vento, sendo o principal responsável pelo colapso de torres metálicas treliçadas.

Visto que ainda existem dificuldades no cálculo estrutural quanto à determinação da carga de projeto, justifica-se a motivação para estudos adicionais abordando a interação do vento com estas estruturas.

## 1.2 HISTÓRICO DE ACIDENTES

Os principais responsáveis pelo colapso de torres metálicas são os eventos ocasionados por fenômenos meteorológicos, principalmente os relacionados com ventos fortes.

Boudreaux (1962) anunciou um prejuízo de mais de 1,5 milhões de dólares causados por um furacão, “Hurricane Carla”, em setembro de 1961 no Houston Lighting Power Company. Entre os anos de 1963 a 1973, segundo estudos realizados por MONK (1980), 36 torres do sistema de linhas de transmissão da Nova Zelândia ruíram devido a ventos com altas velocidades ocorridos durante tempestades.

Entre os dias 10 e 22 de setembro de 1989 o furacão Hugo causou destruição numa faixa entre Guadalupe e Virgínia, provocando o colapso de torres de linhas de transmissão. Também neste mesmo ano, no Rio Grande do Sul, tombaram torres entre Bagé e Pelotas (Menezes, 2004). Em abril de 1996 ventos fortes causaram a ruína de torres de transmissão em Ontario, no Canadá.

No Brasil, no dia 2 de novembro de 1997, ventos de até 130 km/h (36m/s) provocaram a queda de 10 torres nas linhas de transmissão da usina de Itaipu, entre Foz do Iguaçu e Ivaiporã, no Paraná, conforme reportagem do dia 4 daquele mês no jornal O Estado de São Paulo.

Reportagem da Folha de São Paulo de 10 de abril de 1998 relata a reconstrução de 7 torres de transmissão de Furnas Centrais Elétricas, tombadas no dia 6 deste mesmo mês, novamente por motivo de vendaval. Este fato causou transtornos às populações do Sudeste, Sul e Centro-Oeste brasileiro que tiveram racionamento de energia. Informações de discussões nos fóruns da CIGRE, relatam a queda de 600 torres no Canadá, em 1998, e também de outras 600, porém em outra ocasião, na França (Menezes, 2004).

Em Porto Alegre, no ano 2000, uma tempestade com altas rajadas de vento levou ao colapso uma torre de uma emissora de rádio. Estudos posteriores comprovaram que o projeto não respeitou a estimativa de carga de vento recomendada pela norma (figura 1). Em julho de 2001, um vendaval, além de vários outros prejuízos, também provocou a queda de torres de transmissão, levando novamente a cortes de energia elétrica.



Figura 1: Torre metálica treliçada acidentada (Porto Alegre, 2000).

### 1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As estruturas reticuladas vêm sendo utilizadas há mais de um século e vários estudos já foram realizados nesta área, tais como os listados a seguir.

O efeito de proteção entre duas treliças foi estudado por EIFFEL (1911), através de experimentos considerando diferentes distâncias entre elas, porém sem levar em consideração o alongamento, variação do ângulo de incidência do vento e o índice de área exposta. Já FLACHSBART (1932) realizou vários ensaios, estudando o efeito do vento em reticulados planos considerando o afastamento entre dois reticulados planos paralelos, o índice de área exposta, a influência do alongamento da treliça em função do índice de área exposta sobre o coeficiente de arrasto. Foram investigados diferentes modelos de reticulados, sempre com o

vento incidindo perpendicularmente ao plano do reticulado. Os ensaios foram realizados no túnel de vento aerodinâmico de Göttingen, na Alemanha. FLACHSBART concluiu, entre outras coisas, que o coeficiente de força independe da forma e da disposição das barras (exceto para barras de secção circular) e da forma externa do reticulado, que o efeito de proteção entre reticulados existe e que a influência do tipo de escoamento nestes ensaios foi mínima. Os resultados obtidos nestes ensaios, realizados no túnel de vento aerodinâmico de Göttingen, na Alemanha, são referência até hoje para muitos autores, dentre eles, BLESSMANN (1990).

Em 1979, DAVENPORT publicou um artigo relacionando a resposta do fator de rajada com o carregamento do vento em linhas de transmissão, baseado em métodos estatísticos que levavam em conta a correlação espacial e o espectro de energia da velocidade do vento e a resposta dinâmica do sistema de linhas de transmissão. O principal foco era o carregamento transversal, mas a influência da variação do coeficiente de arrasto também foi analisada.

MONK (1980) estudou o efeito causado pela ação de ventos fortes em uma torre de transmissão típica da Nova Zelândia. Constatou que as tensões de tração excederam ao limite elástico do material (aço) do montante devido à concentração de tensões em uma junta parafusada. Também foi investigada a possibilidade de vibração de elementos da torre, mas não encontrou nenhuma evidência a respeito.

KEMPNER e LAURSEN (1981) investigaram, em escala real, a resposta dinâmica de uma torre metálica treliçada de linha de transmissão ao carregamento do vento. O estudo iniciou em 1975 e o relatório apresentou o resultados dos mais recentes e significativos registros e resumos de resultados que se tinha até aquela época. Entre eles, citavam que havia aproximadamente uma diferença de 15% entre as tensões axiais de elementos de torres medidas em campo e as obtidas por análise computacional. Além disto, a torre parece responder de uma maneira quase estática para os tipos de vento observados. As respostas dos fatores de rajadas variaram entre 1,1 e 1,7. As correspondentes respostas dos fatores de tensão apresentaram valores típicos que variaram entre 1,14 e 2,0. KRISHNASAMY (1981) também fez investigações em escala real, desde 1975. Concluiu em seus estudos que o uso de especificações de projetos daquela época poderiam resultar em estruturas com resistência maior que a exigida e que uma avaliação mais aprofundada da carga em relação ao tempo em torres de transmissão, combinada com métodos de projeto que levam em conta variações



estatísticas da carga e resistência, iriam conduzir a reduções nos custos deste tipo de construção. No mesmo ano, KEMPNER, STROUD e SMITH (1981) apresentaram resultados de um novo estudo, em escala real, de testes dinâmicos e estáticos. Os objetivos destes testes eram: caracterizar as propriedades estáticas e dinâmicas de um conjunto de oito condutores e uma das torres suspensas; desenvolver e verificar técnicas dinâmicas de elementos finitos usadas para modelos de torres de transmissão e investigar e desenvolver testes experimentais e métodos analíticos para aplicação da tecnologia da dinâmica estrutural em sistemas de linha de transmissão.

WHITBREAD (1981), propôs um modelo empírico para determinação do efeito de proteção nas forças do vento em estruturas reticuladas levando em consideração o índice de área exposta, o espaçamento entre treliças e o tipo de barra do reticulado, atualizando o modelo proposto anteriormente por FLACHBART. Mas um trabalho ainda mais profundo foi apresentado por GEORGIU e VICKERY (1979) que considerava o efeito de proteção entre reticulados, a influência do ângulo de incidência do vento, o índice de área exposta, o afastamento entre os reticulados, a razão de aspecto e o número de reticulados. Além disto, GEORGIU (1979) provou também que a influência da turbulência atmosférica nos resultados médios é mínima e pode ser desconsiderada e mostrou que existiam divergências entre os resultados dos seus experimentos e as diversas normas existentes na época.

FERRARO (1983) investigou a resposta de torres, com medições naturais, à ação de ventos turbulentos em dois sistemas de linhas de transmissão localizados em Oregon e Ontario. Verificou a relação existente entre os valores da velocidade média do vento e o ângulo de giro transversal. Os dados também foram submetidos à análise dinâmica e comparados a dois modelos: um era um modelo dinâmico de dois graus de liberdade sugerido por DAVENPORT, e o segundo, um modelo complementar determinístico de dois graus de liberdade desenvolvido no estudo. Os resultados indicaram que o modelo simplificado geralmente responde bem quando os procedimentos com torres de transmissão forem governados pelos modos fundamentais da torre e do condutor. O modelo complementar confirmou as suposições e aplicações do modelo simplificado, e também obteve bons resultados nas respostas das medições naturais do ângulo de giro transversal e da resposta da tensão a elementos de torres.

BAYAR (1986) investigou, em túnel de vento, os coeficientes de arrasto de duas torres treliçadas auto portantes de secção quadrada. Foram recomendadas equações para

determinar o coeficiente de arrasto em torres treliçadas com índice de área exposta entre um determinado valor. Com ângulo de incidência do vento à  $45^\circ$ , verificou-se que o arrasto independe do índice de área exposta, assim sendo, recomendou-se um fator multiplicador. Um fator multiplicador também foi indicado para torres cujo eixo vertical não tenha uma inclinação exagerada.

LIEW e NORVILLE (1989) mostraram um método para estudar a resposta de sistemas estruturais de torres de transmissão à ação do vento. A ação da velocidade do vento e a carga originada pelos condutores foram considerados como sendo o carregamento das torres. A tensão em alguns elementos da torre foram considerados a resposta. O sistema foi submetido a vários carregamentos, para que se obtivesse resultados significativos. Os dados foram utilizados para determinar a função de resposta no domínio da frequência, que forneceria o valor da resposta. Concluíram que a resposta das torres de transmissão são mais exatas considerando dois carregamentos distintos e não apenas um único; a resposta encontrada para a torre foi aproximadamente linear e que o efeito causado pela carga dos condutores é mais importante que o efeito direto da ação da velocidade do vento nos sistemas de linhas de transmissão. Este último está em desacordo com as conclusões de LOREDO-SOUZA (1996).

KATOH et al. (1995) estudaram a vibração induzida do vento em torres de linha de transmissão, em escala natural, localizadas em regiões montanhosas, mas com velocidade menor que 25 m/s. Observaram que a direção do vento exerce uma forte influência sobre as características do vento e também as características das vibrações da torres com os condutores são extremamente influenciadas pela ação dos condutores. O amortecimento aerodinâmico é obtido para mostrar o importante papel no seu amortecimento total.

Em 1996, SIMIU e SCANLAN divulgaram estudos sobre estruturas reticuladas, incluindo torres treliçadas de secção triangular e quadrada compostas por elementos circulares ou de arestas vivas, em seu livro sobre o efeito do vento nas estruturas.

Com isto, percebe-se que existem vários estudos no que se refere à ação do vento em estruturas de torres treliçadas e de seus elementos e que no seu projeto estrutural deve haver um estudo detalhado das características do vento naquela região. Também percebe-se que, ainda hoje, testes em túnel de vento, com modelos seccionais, não estão com total concordância com as medidas naturais. Sabe-se que acidentes com torres de transmissão, frente a vento fortes, continuam acontecendo e muitas vezes desconhece-se a razão do seu

colapso. Ainda é duvidoso o verdadeiro comportamento destas estruturas frente a ação do vento, assim como os parâmetros de maior importância para o cálculo da resposta ao carregamento do vento (LOREDO-SOUZA, 1996). A razão para isto é que tanto as medidas naturais feitas durante a ocorrência de ventos fortes quanto testes em túnel de vento com seções de torres ainda possuem deficiências, o que justifica mais estudos nesta área.

#### 1.4. OBJETIVOS

Este trabalho situa-se dentro de uma linha de pesquisa do Laboratório de Aerodinâmica das Construções, mais especificamente o estudo da ação do vento sobre torres de linhas de transmissão. Ele constitui mais uma parte desta pesquisa e para tanto, é dividido em três etapas.

Na primeira delas, estudar-se-á o comportamento de perfis tipo cantoneira isolados, verificando-se a influência da terminação destes e da escala de turbulência na determinação das forças devidas ao vento.

Na segunda etapa será investigado o efeito de proteção dos perfis isolados, pois a Norma Brasileira, NBR-6123 fornece indicações apenas para grupos de reticulados.

Já na terceira etapa, serão realizados estudos de módulos de torres treliçadas, com diversas configurações para posterior comparação com a NBR-6123. Esta fase corresponde à determinação dos coeficientes de arrasto para trechos de módulos de torres com seção transversal quadrada e triangular.

## 2. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A AÇÃO DO VENTO

### 2.1. AÇÕES QUE PRODUZEM CARREGAMENTOS

São três os principais eventos que resultam em carregamento nas torres metálicas de linhas de transmissão:

- Eventos acidentais, como sabotagem, impactos, defeito em algum componente e outros fenômenos imprevistos.

- Eventos que ocorrem durante a etapa de construção e/ou manutenção, os quais estão diretamente relacionados com o método construtivo, podendo ser, na maioria dos casos, controláveis. São os carregamentos atuantes no processo de montagem, instalação de antenas, condutores, isoladores, içamento da torre, substituição de elementos estruturais.

- Eventos relacionados com o clima, estes de grande interesse para o engenheiro estrutural. Um deles é o gelo, que, mesmo em países onde a ocorrência do acúmulo dele é um fenômeno raro, não deve ser desprezado. Outro evento relacionado ao clima é a variação da temperatura e o de maior interesse, no que diz respeito à este estudo, é o vento.

Devido ao baixo peso da estrutura de uma torre metálica, o vento é o principal agente que determina o projeto de torres metálicas treliçadas e são os ventos fortes os principais responsáveis pela maioria dos colapsos.

## 2.2. FATORES QUE GOVERNAM O CARREGAMENTO DO VENTO EM ESTRUTURAS RETICULADAS

Alguns dos principais fatores que governam o carregamento do vento em estruturas reticuladas são, a seguir, apresentados.

- A orientação da estrutura treliçada, ou seja, o ângulo de incidência do vento em relação à direção média do vento .

- O índice de área exposta, que corresponde à relação entre a área efetiva frontal da estrutura e a área total correspondente à área limitada pelos seus contornos.

- A relação entre o comprimento e a largura da estrutura, chamada de razão de aspecto ou alongamento.

- A inclinação das barras principais da torre, que modifica a razão de aspecto (alongamento), mas que ainda hoje é uma incerteza quanto à sua interferência no carregamento do vento.

- A turbulência do vento. Este efeito na força de arrasto em estruturas constituídas por barras prismáticas de cantos vivos, segundo FLACHSBART (1932), é relativamente pequeno na maioria dos casos práticos.

- A forma das barras da treliça. Nas treliças constituídas por barras prismáticas de cantos vivos, os efeitos do número de Reynolds e da rugosidade da superfície são mínimos, podendo ser desconsiderados no cálculo. Já nas barras arredondadas, o número de Reynolds e a rugosidade da superfície destes elementos podem influenciar as forças do vento.

- O efeito de proteção exercido pelo reticulado a barlavento sobre o reticulado localizado a sotavento.

### 2.3. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO VENTO

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

O vento pode soprar tão devagar que mal é percebido, ou então, de modo tão rápido e forte a ponto de arrancar grandes árvores e causar danos em edificações. Por este motivo, a ação do vento em estruturas metálicas jamais deve ser esquecida.

O vento não é constante, mas consiste de componentes médias e flutuantes (ou rajadas), vide equação 1 e figura 2. Estas duas componentes são importantes para avaliar o carregamento do vento em linhas de transmissão.

$$V(t) = \bar{V} + v(t) \quad (1)$$

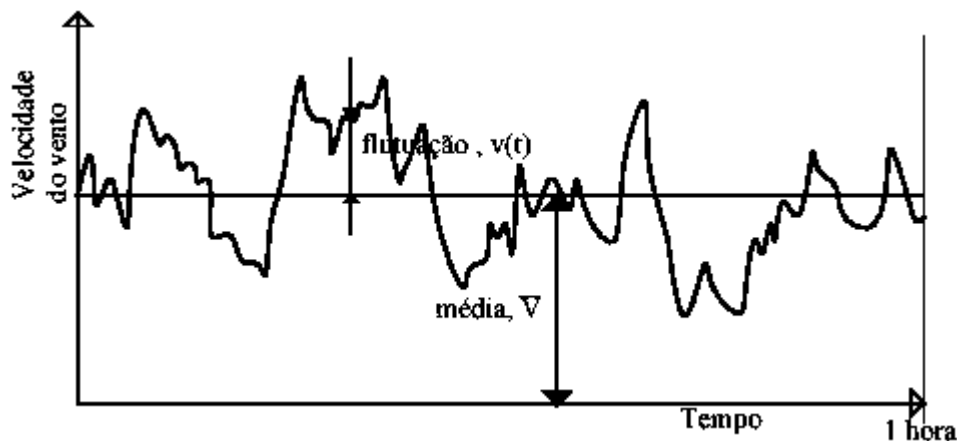


Figura 2: Velocidade média do vento e suas flutuações

A velocidade média do vento depende dos dados meteorológicos existentes e é geralmente estimada a partir de um intervalo de tempo entre 10 minutos e 1 hora. Este intervalo de tempo, segundo DAVENPORT (1978), é suficientemente longo, pois conduz a valores médios muito estáveis, o que permite uma distinção nítida entre velocidade média (associada à uma ação estática) e rajadas (associada à ação dinâmica).

Para fins dinâmicos, a norma brasileira de vento, NBR-6123/88, especifica uma velocidade média do vento calculada sobre um intervalo de tempo de 10 minutos, enquanto que, para efeitos estáticos, corresponde a rajadas de 3 segundos, conhecida como velocidade básica,  $V_o$ .

A parte flutuante da velocidade do vento pode ser definida pela distribuição de probabilidade, pelo espectro de potência e pelas funções de correlação cruzada. Para melhor compreender o significado destes termos, algumas considerações à respeito do vento.

A turbulência, no caso do vento natural, tem sua origem em:

- movimentos circulatorios da atmosfera, causados por transformações termodinâmicas e pela rotação da terra (forças de Coriolis);
- rugosidade superficial, constituída por todos obstáculos criados pelo homem ou naturais, tais como: florestas, montanhas, plantações, árvores isoladas ou em forma de quebra-ventos, morros, ilhas, ondas, edificações, etc (BLESSMANN, 1990).

Quando as condições de estabilidade são neutras, as flutuações da velocidade são normalmente causadas por agitação mecânica do ar, formando-se um grande número de turbilhões. Estes turbilhões, que ocorrem em uma seqüência aleatória de freqüências e intensidades, são de dimensões bem diversas, desde os maiores, da ordem de grandeza da altura da camada limite atmosférica, até os menores, da ordem de grandeza do milímetro. Quanto mais veloz for uma rajada, menor será seu tempo de atuação (fração de segundos), menores as dimensões do turbilhão correspondente e atuará sobre uma pequena região.

Parte da energia cinética, retirada pelos maiores turbilhões do escoamento médio, é transferida, por um processo em cascata, até os menores, terminando por dissipar-se em calor, pela viscosidade do ar. Este processo, nada mais é, que a desagregação dos grandes turbilhões em turbilhões cada vez menores. (BLESSMANN, 1995).

A energia contida em uma seqüência de rajadas é mais importante que a intensidade de uma única rajada, no que diz respeito à resposta da estrutura, e serão mais importantes as componentes em ressonância com a estrutura. A componente da turbulência mais estudada é a componente longitudinal. Turbilhões menores provocam as rajadas mais violentas que agem local e desordenadamente. Com freqüências mais altas, mas de menor intensidade, não terão

muita influência na estrutura como um todo. Já os turbilhões maiores, que envolvam toda a estrutura, ocasionam forças de baixa frequência, podendo estar em fase ao longo de toda estrutura.

Atualmente não é possível modelar completamente escoamentos com alta turbulência, não permitindo, assim, que seja feito um tratamento determinístico. Se faz necessário estudar estes escoamentos por meio da teoria da probabilidade e de médias estatísticas. Tanto para que possa realizar uma simulação correta da ação do vento em túnel de vento, quanto para o cálculo matemático da resposta dinâmica das estruturas às rajadas do vento, é necessário um conhecimento tão exato quanto possível das propriedades da turbulência.

Para a Engenharia Civil, admite-se que as rajadas de vento constituem um processo aleatório estacionário ergódico. É aleatório ou estocástico, pois pode ser definido como uma seqüência infinita de variáveis aleatórias cujos registros ou amostras diferem entre si (rajadas diferentes no espaço e no tempo). Porém, se o número de amostras for suficientemente grande, elas poderão apresentar alguma regularidade estatística. É estacionário porque seus parâmetros estatísticos, tais como: média, variância, desvio padrão, auto-correlação, que foram determinados sobre a totalidade dos registros possíveis, são invariantes para qualquer deslocamento da origem do tempo. E, como é possível igualar qualquer um destes parâmetros estatísticos calculados sobre um conjunto de amostras possíveis com o correspondente parâmetro calculado ao longo do tempo sobre qualquer registro representativo deste processo, estamos lidando com um processo também ergódico, (BLESSMANN, 1998).

Com os comentários feitos anteriormente, percebe-se que a análise do vento para uso em engenharia estrutural deve incluir a determinação das seguintes propriedades estatísticas de turbulência, (MOZER E STROUD, 1980):

- o espectro de potência das flutuações da velocidade de vento: que indica a distribuição de energia contida nas rajadas entre os diversos comprimentos de onda ou frequências. A partir da frequência de pico da curva do espectro, pode-se determinar a escala integral da turbulência.

- as correlações espaciais entre as flutuações: que definem as características espaciais da turbulência. Estuda a ação não uniforme das rajadas sobre as estruturas. Constitui uma medida da escala de turbulência, ou seja, do tamanho dos vórtices ou das rajadas do vento.



- as distribuições de probabilidade das flutuações: que fornece a frequência relativa de ocorrência das velocidades. Uma distribuição de Gauss em geral fornece uma representação adequada da distribuição de velocidades na turbulência atmosférica. E esta distribuição pode ser definida por dois valores: a velocidade média e o desvio padrão.

## 2.4. FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM TORRES METÁLICAS

O número de torres de transmissão aumentou muito após a Segunda Guerra Mundial no continente norte americano. Naquela época os códigos recomendavam que a força do vento fosse calculada baseada na aplicação de uma pressão uniforme ao longo de toda estrutura. Mas a partir de 1950 foram realizados vários estudos e experimentos, permitindo uma reformulação das normas.

Baseado nestes novos conhecimentos, atualmente é exigido que o carregamento do vento seja determinado levando em consideração a variação do perfil de pressão dinâmica. Este aumenta com a altura e depende da velocidade básica do vento e do tipo do terreno.

### 2.4.1 Ação do Vento nas Estruturas

O cálculo das cargas devidas a ação do vento é realizado segundo a Norma Brasileira NBR-6123/88 (Forças devidas ao vento nas edificações).

#### 2.4.1.1. Forças devidas ao vento

As forças externas devidas ao vento são determinadas por:

$$F = C q A \quad (2)$$

Sendo:

$C$  – coeficiente aerodinâmico do elemento para o qual está sendo determinada a força  $F$  do vento;

$A$  – área da zona em estudo para a qual está sendo determinada a força  $F$  do vento

$q$  – pressão dinâmica na altura de referência

Em condições normais de temperatura (15°C) e de pressão (1 atm = 1,013x10<sup>5</sup> Pa) a pressão dinâmica do vento é obtida por:

$$q = 0,613 V_k^2 \quad [q \text{ em N / m}^2, V_k \text{ em m/s}] \quad (3)$$

Sendo:

$V_k$  – velocidade característica

A velocidade característica do vento  $V_k$ , é obtida pela multiplicação da velocidade básica  $V_o$  pelos fatores  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ , então:

$$V_k = V_o S_1 S_2 S_3 \quad (4)$$

A velocidade básica do vento,  $V_o$ , é a velocidade de uma rajada de três segundos, a 10 metros acima do terreno, em campo aberto e plano e é excedida em média uma vez em 50 anos, é o chamado intervalo de recorrência ou período de retorno.

A determinação destas velocidades básicas foram obtidas por processo estatístico, levando em consideração as velocidades máximas anuais de 49 cidades do Brasil, entre os anos de 1954 a 1974. Também foram usadas considerações de caráter estatístico, levando em conta a vida útil média das edificações, que é cerca de 50 anos.

A velocidade de cada parte do Brasil pode ser observada no gráfico das isopleias da velocidade básica, figura 3. Como regra geral é admitido que o vento básico possa soprar em qualquer direção com igual probabilidade e sempre no sentido horizontal. Em obras de importância excepcional a norma recomenda um estudo específico para a determinação de  $V_o$ ,

podendo, uma vez justificado, ser consideradas direções preferenciais para o vento básico. No Brasil a  $V_o$  varia entre 30 e 50 m/s, sendo que velocidades inferiores a 30 m/s foram desprezadas pela NBR-6123.

A figura 3 contém o gráfico das isopletas da velocidade básica no Brasil, com intervalos de 5 m/s. Para a cidade de Porto Alegre adota-se um valor de  $V_o = 46$  m/s.

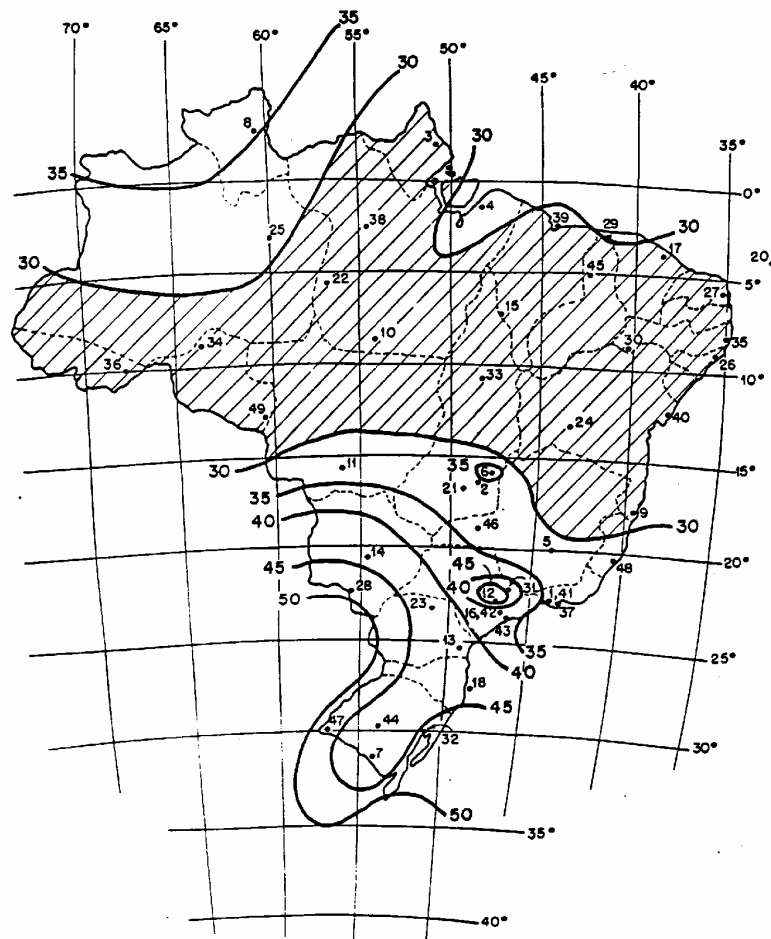


Figura 3: Isopletas da velocidade básica  $V_o$  (m/s)

O fator topográfico  $S_I$  depende somente das características do relevo do terreno, levando em consideração o aumento da velocidade do vento na presença de morros e taludes. Então,  $S_I$  será menor que a unidade nos raros casos de proteção topográfica, igual à unidade

para terrenos ao menos aproximadamente em nível e maior que um quando o terreno apresentar morros, taludes, colinas.

Para inclinações até  $17^\circ$  o aumento da velocidade causada por esse efeito Venturi aumenta com a inclinação. Alguns autores (COOK, 1985) afirmam que para inclinações maiores o perfil de velocidades médias permanece constante, independentemente da inclinação. Isto porque forma-se um vórtice na base na face de barlavento do morro ou talude que mantém praticamente inalteradas as linhas de corrente que se formaram com inclinação de  $17^\circ$ .

Além da NBR-6123, existem outras metodologias consagradas para a determinação do fator  $S_1$ , como a Norma Canadense (1990).

O fator  $S_2$  depende do efeito combinado da rugosidade média geral do terreno em grandes extensões, da variação da velocidade do vento com a altura sobre o terreno e do intervalo de tempo considerado na determinação da velocidade. Este intervalo de tempo está relacionado com as dimensões da edificação. As edificações pequenas ou elementos componentes de edificações são mais afetados por rajadas de curta duração (mais velozes) do que grandes edificações.

No que diz respeito às dimensões, a NBR-6123 define três classes de edificações, partes de edificações e seus elementos, com intervalos de tempo usados para o cálculo de  $S_2$  de, respectivamente, três, cinco e dez segundos. Estas classes são denominadas de classe A, B e C.

A norma classifica a rugosidade do terreno em cinco categorias, numeradas de I a V, em ordem crescente de rugosidade.

O fator estatístico  $S_3$  baseia-se em conceitos probabilísticos (período de recorrência de 50 anos para determinação da velocidade  $V_o$  e a probabilidade de 63% de que a velocidade seja igualada ou excedida nesse período) e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação ou de suas partes. Para o caso de torres, é considerado de valor unitário.

## 2.4.1.2. Determinação do Coeficiente de força

### 2.4.1.2.1. Barras Isoladas

Os coeficientes de força,  $C_f$ , resultantes da ação do vento, referem-se a barras prismáticas de comprimento infinito (escoamento bidimensional) e dependem do comprimento  $l$  e da forma da secção transversal da barra.

O escoamento é bidimensional quando o comprimento da barra é infinito ou é obtido colocando-se placas nas duas extremidades da barra de forma que fiquem perpendiculares ao seu eixo. Com estas condições, as características do escoamento são iguais para qualquer plano perpendicular ao eixo da barra, desprezando-se as alterações próximas às extremidades.

Segundo a NBR-6123, para barras prismáticas de comprimento finito, caracterizando escoamento tridimensional, os coeficientes de força devem ser multiplicados por um fator de redução  $K$ , que depende da relação  $l/c_\alpha$ , sendo, (equação 5):

$l$  - comprimento da barra prismática

$c_\alpha$  - largura da barra prismática medida em direção perpendicular à do vento (projeção ortogonal da secção da barra sobre uma reta perpendicular à direção do vento), figura 4.

Os valores do fator de redução  $K$  encontram-se na tabela 1, conforme dados da tabela 11 da NBR-6123.

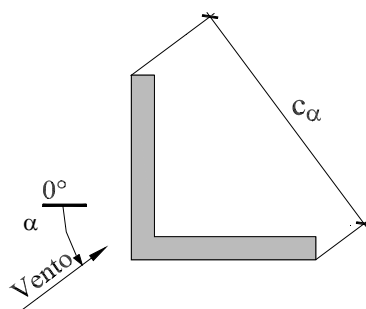


Figura 4: Largura de sombra

$$F = C_f \cdot q \cdot l \cdot c \cdot K \quad (5)$$

Tabela 1: Valores do fator de redução  $K$ 

$l/c_\alpha$	2	5	10	20	40	50	100	$\infty$
<b>Barras Prismáticas de face plana</b>	0,62	0,66	0,69	0,81	0,87	0,90	0,95	1,00

Já na tabela 2 são dados os coeficientes de força,  $C_{fx}$  e  $C_{fy}$ , que referem-se a duas direções mutuamente perpendiculares,  $x$  e  $y$ . Nesta tabela, constam dados da tabela 12 da NBR-6123, porém conforme convenção adotada neste trabalho, vide figura 5.

Tabela 2: Coeficientes de força nas direções  $x$  e  $y$ ,  $C_{fx}$  e  $C_{fy}$ :

$\alpha$	0°	+45°	+90°	+135°	+180°	-135°	-90°	-45°
$C_{fx}$	+0,3	-1,4	-2,0	-1,9	+2,1	+1,8	+1,8	-1,0
$C_{fy}$	-2,0	-1,4	+0,3	-1,0	+1,8	+1,8	+2,1	-1,9

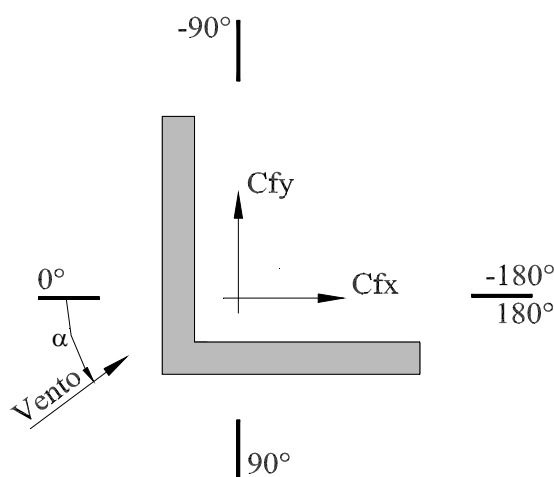


Figura 5: Convenção adotada

Considerando o vento agindo perpendicularmente ao eixo da barra prismática, surge uma força também perpendicular a este eixo que pode ser decomposta segundo os eixos

coordenados  $x$  e  $y$ , ou, decompondo em uma componente na direção do vento, chamada de força de arrasto,  $F_a$ , e outra perpendicular a esta direção, a força de sustentação, ou força lateral,  $F_s$  ou  $F_l$ .

Obtendo-se o coeficiente de força,  $C_f$ , através de normas, ensaios ou manuais, é possível calcular as forças correspondentes por:

$$F = C_f \cdot q \cdot l \cdot c \quad (6)$$

Sendo:

$c$  – dimensão de referência na secção transversal

$q$  – pressão dinâmica de referência

$l$  – comprimento da barra

A figura 6 ilustra resultados de estudos realizados por MODI e SLATER (1983), citados em COOK (1985), de dados comparativos entre os coeficientes de força na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , de uma secção tipo cantoneira com abas iguais e comprimento infinito e um cilindro de secção quadrada para todos os ângulos  $\alpha$ . Para ambos os casos, o coeficiente de força na direção  $y$ ,  $C_{fy}$  correspondente, é determinado por anti-simetria pela equação:

$$C_{fy} \{ \alpha \} = C_{fx} \{ 90^\circ - \alpha \} \quad (7)$$

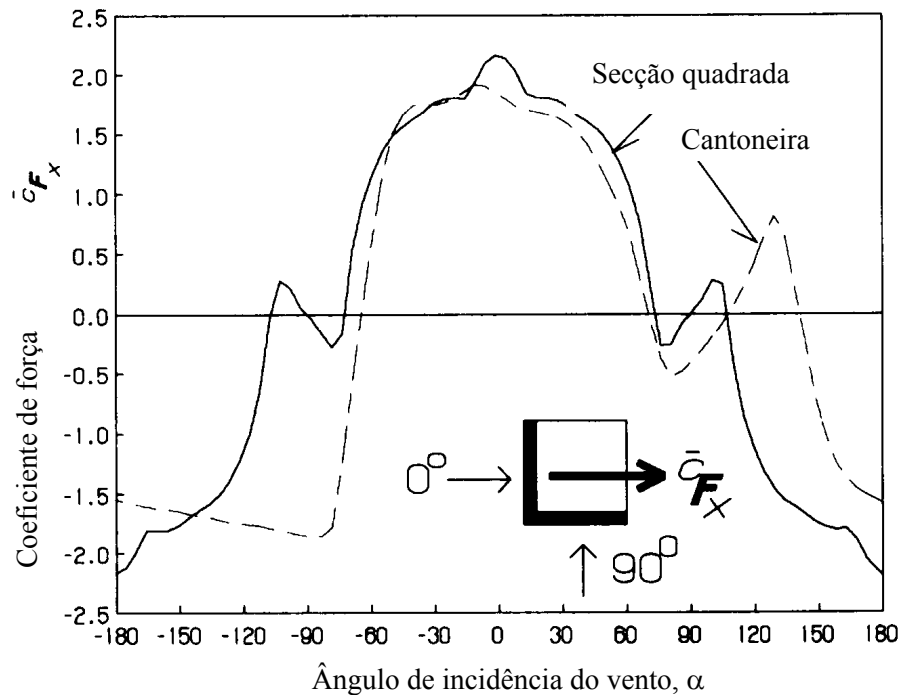


Figura 6: Gráfico comparativo entre  $C_{fx}$  de perfil seção quadrada e tipo cantoneira (COOK, 1985)

A forma geral das duas curvas é notavelmente semelhante, cada uma com valor máximo de  $C_{fx} \cong 2$ . Enquanto há, porém, simetria exata em  $\alpha = 0^\circ$  para o quadrado, refletindo a simetria da seção, o mesmo não ocorre com o perfil cantoneira. A reversão da força local só acontece uma vez em toda a extensão do ângulo  $\alpha$ , em vez de dois casos simétricos observados no quadrado. Este efeito, embora pequeno, é muito significativo, visto que a reversão da inclinação torna estruturas dinâmicas suscetíveis a oscilações galopantes. Para a cantoneira, a face plana vertical do perfil está a barlavento e o escoamento em torno da face frontal é semelhante àquele do quadrado. O efeito é maior e está deslocado de aproximadamente  $\alpha = 90^\circ$  para aproximadamente  $\alpha = 110^\circ$ .

Semelhantemente, este efeito correspondente em  $C_{fy}$  só acontece para  $\alpha = -20^\circ$ , o que é visto melhor na figura 7, onde  $C_{fx}$  e  $C_{fy}$  estão representados para perfis tipo cantoneiras de abas iguais e com abas desiguais, na proporção de 2:1. A semelhança entre estes dois pares de curvas para seções tipo cantoneiras de proporções muito diferentes demonstra que a definição dos coeficientes de força usando a área frontal de cada lado,  $A_x$  e  $A_y$ , levam estas curvas a coincidirem.



Para alguns ângulos  $\alpha$ , particularmente entre  $-180^\circ < \alpha < -90^\circ$ , figura 6, quando uma aba da cantoneira está voltada para o vento, os coeficientes são opostos. Ao invés da variação ser aproximadamente senoidal,  $C_{fx}$  muda rapidamente para um cume mínimo de  $C_{fx} = -2,0$  em  $\alpha = -90^\circ$  e que reduz lentamente até  $C_{fx} = -1,6$  em  $\alpha = -180^\circ$ , onde o cume mínimo ocorre para o quadrado. A figura 7 ilustra que  $C_{fx}$  e  $C_{fy}$  estão simultaneamente perto do valor mínimo sobre a maior parte desta região. Em  $\alpha = -135^\circ$ , quando o escoamento incide diretamente no vértice interno da cantoneira,  $C_{fx} = C_{fy} = -1,6$ , ocasionando em um arrasto resultante de  $C_a = 2,3$ , ou seja, superior ao valor de cada face.

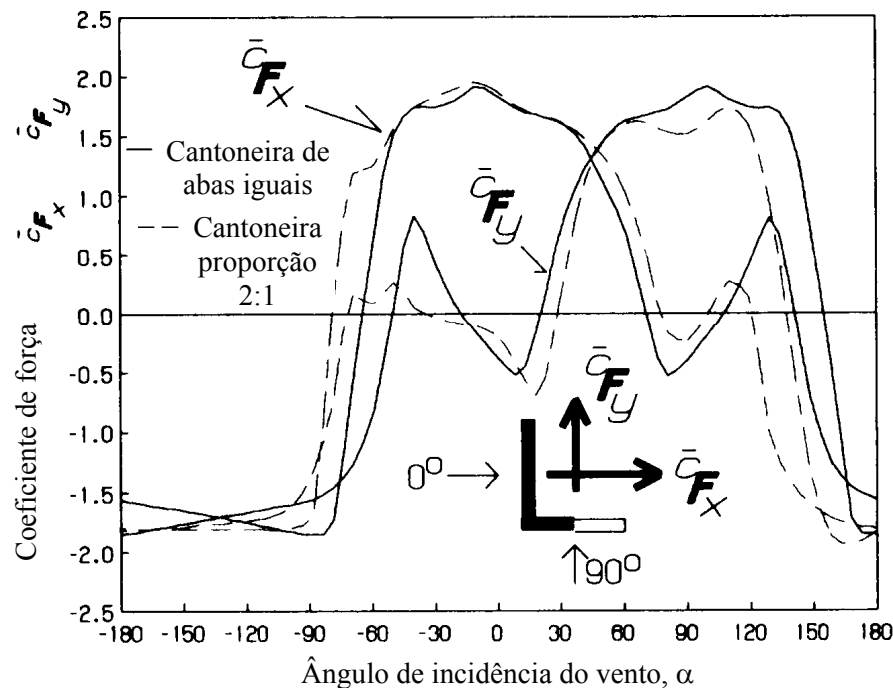


Figura 7:  $C_{fx}$  e  $C_{fy}$  para perfis tipo cantoneiras de abas iguais e desiguais (COOK, 1985)

#### 2.4.1.2.2. Reticulados planos isolados e paralelos

Um conceito fundamental é o índice de área exposta ( $\phi$ ), definido como a relação entre a área frontal total de todos os elementos individuais (área efetiva ou sólida),  $A_e$ , e a área

limitada pelo contorno da torre,  $A$ , isto é, a área da superfície limite que inclui todos os elementos individuais:

$$\phi = A_e / A \quad (8)$$

As áreas frontais são as áreas projetadas em um plano perpendicular ao vento (área de sombra). O índice de área exposta deve estar na gama de  $0 \leq \phi \leq 1$ , com  $\phi = 1$  representando um corpo sólido.

As forças de arrasto em módulos de torres, por sua vez, poderão ser determinadas utilizando o túnel de vento. O coeficiente de arrasto pode ser obtido dividindo-se a força total obtida nos ensaios,  $F$ , pela pressão dinâmica,  $q$ , e pela área efetiva,  $A_e$ :

$$C_a = F / q \cdot A_e \quad (9)$$

A carga do vento em torres treliçadas pode ser calculada de dois modos (Loredou-Souza,1996):

a) O primeiro método consiste em determinar o carregamento em cada membro da torre e somá-los para determinar a carga total. Ou seja, obtém-se  $F_1, F_2, \dots, F_n$  para cada elemento e faz-se  $F = \Sigma F_i$ , e  $A_e = \Sigma A_{ei}$ , ( $i=1, \dots, n$ ), onde  $n$  é o número de elementos da torre. A força em cada barra é determinada pela equação:

$$F_i = C_{fi} \cdot q \cdot A_{ei} \quad (10)$$

Para isso, é preciso conhecer as propriedades geométricas de cada elemento bem como os coeficientes de força aerodinâmicos ( $C_{fi}$ ), que variam em função do ângulo de incidência do vento e da velocidade de projeto do vento. Para uma torre típica, constituída por muitos elementos estruturais, este é um processo muito cansativo, além de consumir muito tempo.

b) O outro método consiste em dividir a estrutura em vários módulos, formados por vários elementos reticulados, onde em cada módulo é determinado um coeficiente de arrasto o qual é associado a um índice de área exposta ( $\phi$ ), conforme item 2.4.1.2.3, referente a torres reticuladas. Este método apresenta a vantagem de ser um procedimento mais prático e rápido.

FLACHSBART, na década de 30, realizou vários ensaios com reticulados planos no túnel aerodinâmico situado em Göttingen, na Alemanha. Primeiramente foram ensaiados modelos seccionais, com as condições de escoamento bidimensional, com vento incidindo perpendicularmente ao plano do reticulado. Verificou-se que o coeficiente de força para reticulados com arestas vivas não depende da disposição e da forma das barras e nem da forma externa do reticulado. Os resultados destes ensaios continuam, até hoje, servindo de base para muitas normas de vento, inclusive para a norma brasileira. A curva interpolada por FLACHSBART (1932) entre os pontos experimentais, assemelha-se muito com o gráfico da figura 6 da NBR-6123, que fornece os valores do coeficiente de arrasto,  $C_a$ , para um reticulado plano, formado por barras prismáticas planas. O valor mínimo, porém, encontrado por FLACHSBART ( $C_a = 1,47$ ), é um pouco menor que o fornecido pela norma brasileira ( $C_a = 1,6$ ), vide figura 8.

Entretanto, ao tratar-se de estruturas constituídas por mais de um reticulado plano paralelo, faz-se necessário levar em consideração, no cálculo do coeficiente de arrasto, os efeitos dos esforços causados por elementos frontais em outros elementos localizados em suas esteiras.

Os resultados dos ensaios realizados por FLACHSBART (1932) e FLACHSBART e WINTER (1935), comprovaram este efeito de proteção do reticulado a barlavento sobre o de sotavento e também da pequena influência do índice de área exposta e da disposição das barras internas. Os reticulados protegidos por aqueles que estão localizados na parte frontal tiveram seus coeficientes de arrasto,  $C_a$ , diminuídos. Esta mesma diminuição dos valores dos coeficientes de arrasto ocorreu, porém em proporções bem menores, com o aumento do índice de área exposta e modificando-se a distribuição das barras internas, como percebe-se ao visualizar a figura 9.

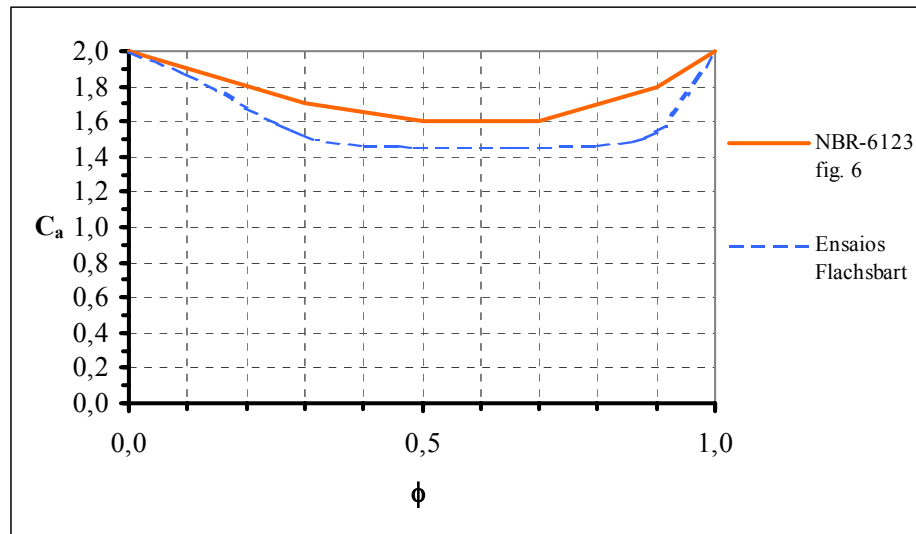


Figura 8: Coeficiente de arrasto,  $C_a$ , para reticulados planos formados por barras prismáticas planas

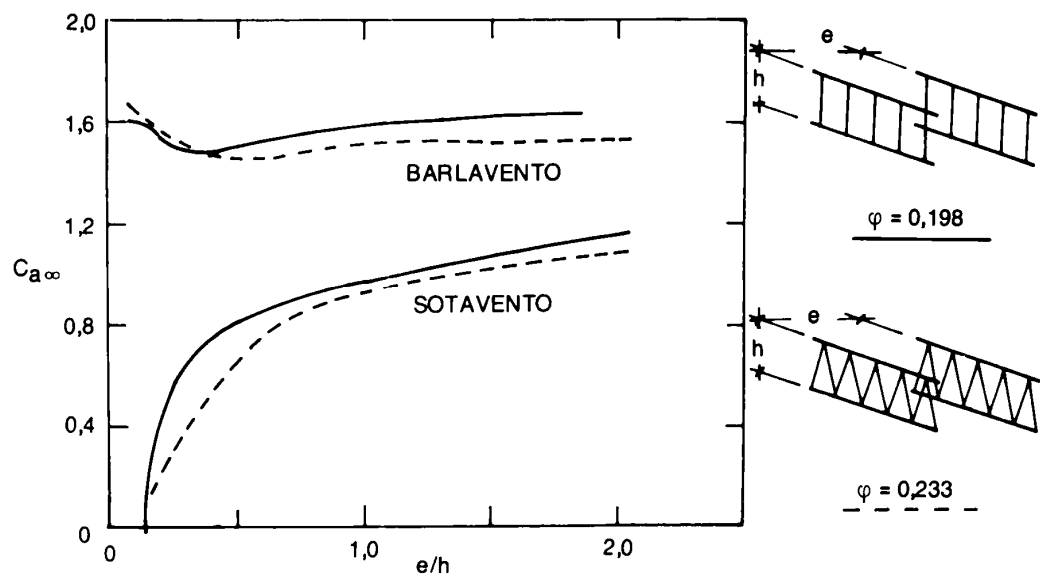


Figura 9: Efeito de proteção em treliças paralelas. Ensaios de Flachsbart (BLESSMANN, 1990)

FLACHSBART e WINTER (1935) sugerem a seguinte expressão para determinação do fator de proteção:

$$\eta = 1,15 [1 - 1,45\phi (e/h)^{-0,25}]; \quad \phi < 0,6 \quad (11)$$

Os valores resultantes desta equação podem ser visualizados no gráfico da figura 10.

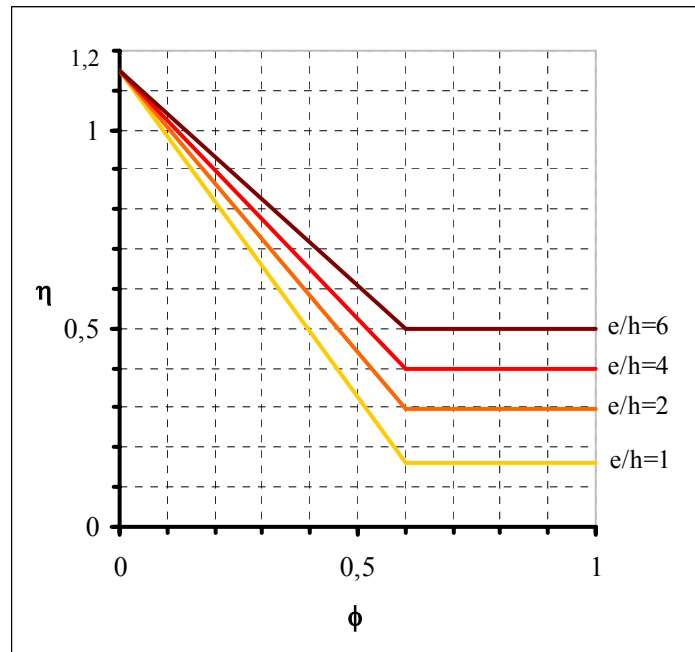


Figura 10: Fator de proteção em função do índice de área exposta,  $\phi$ , e do afastamento relativo,  $e/h$ , entre dois reticulados, segundo ensaios de Flachsbart

Já WHITBREAD (1979), realizou ensaios com modelos bidimensionais de reticulados isolados e em grupo com até cinco reticulados iguais compostos por barras tipo cantoneiras e tubos circulares. Os estudos visaram a influência do afastamento relativo, do número de reticulados, do índice de área exposta e do tipo de barras. Obteve, então, a seguinte expressão para reticulados de cantoneiras:

$$\eta = (n - 1) - [\phi^{0,45} (e/h)^{\varphi - 0,5} (n-1)^{1,1}]; \quad 0 < \phi < 0,5 \quad (12)$$

$n$ : número de reticulados

E concluiu que os métodos existentes para determinação de  $\eta$  eram deficientes, pois superestimavam os fatores de proteção.

A NBR-6123 recomenda que as forças do vento nas partes protegidas devem ser multiplicadas por um fator de proteção  $\eta$ , que depende do índice de área exposta e do afastamento relativo  $e/h$  do reticulado situado imediatamente a barlavento do reticulado em estudo. Sendo  $e$  a distância entre os reticulados paralelos e  $h$  a largura da seção do reticulado, figura 11.

Então, a expressão para o cálculo do coeficiente de arrasto é:

$$C_a = C_{a1}(1 + \eta) \quad (13)$$

Onde:

$C_{a1}$  = coeficiente de arrasto para o reticulado isolado

$\eta$  = fator de proteção

E, para os casos onde existirem  $n$  reticulados iguais e igualmente afastados, o coeficiente de arrasto do conjunto dos  $n$  reticulados,  $C_{an}$ , será:

$$C_{an} = C_{a1} [1 + (n - 1)\eta] \quad (14)$$

Sendo:

$C_{a1}$ : coeficiente de arrasto de um reticulado isolado

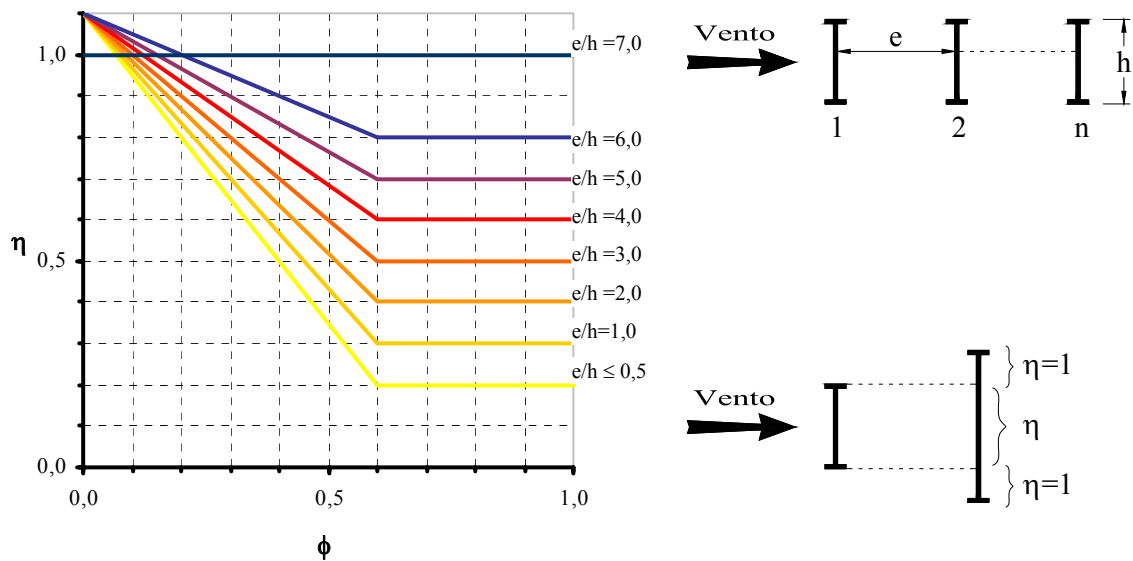


Figura 11: Fator de proteção  $\eta$  para dois ou mais reticulados planos paralelos igualmente afastados

#### 2.4.1.2.3. Torres reticuladas

Reticulados espaciais são estruturas compostas por mais de um plano, geralmente são torres de secção horizontal triangular equilátera ou retangular com faces podendo ser verticais ou inclinadas.

Há vários estudos realizados com reticulados espaciais no sentido de determinar a força total do vento sobre todo o conjunto e, embora a grande maioria deles tenha sido feita com torres de secção constante, os resultados poderão ser aplicados para as que tiverem faces verticais desde que estas não possuam inclinação exagerada.

Com o vento incidindo perpendicularmente a um par de faces paralelas de uma torre retangular as forças nestes devem ser calculadas como para reticulados planos paralelos, mesmo que haja uma certa inclinação, desconsiderando o fator de proteção. Já para as faces que encontram-se paralelas ao vento desconsidera-se a força de arrasto por seu valor ser pequeno e, em alguns casos, até mesmo negativo. Isto ocorre por motivo de uma esteira formada atrás da treliça de barlavento, por efeito de interação, provocando forças no sentido

contrário ao do vento nas treliças laterais. O coeficiente de arrasto é então obtido pela equação 13.

Existem vários estudos experimentais realizados com torres de secção quadrada e triangular equilátera afim de determinar a força total resultante da ação do vento incidindo perpendicularmente e obliquamente sobre a estrutura.

COHEN e PERRIN (1957), encontraram, para torres de secção quadrada, diferentes expressões para o cálculo do coeficiente de arrasto, que dependem do ângulo de incidência do vento, do índice de área exposta e do tipo de perfil. Com ângulo de incidência do vento à  $90^\circ$  com a face a barlavento e com  $\phi$  entre 0,1 e 0,4, sugerem a equação 15. Já com ângulo de incidência de  $45^\circ$ , sugerem a equação 16 que refere-se a perfis simples, angulosos ou arredondados. Para torres de secção triangular equilátera, os maiores valores do coeficiente de arrasto surgem com o vento incidindo perpendicularmente à face de barlavento e utilizaram para o cálculo a equação 17.

$$C_a(90^\circ) = 4,0 - 5\phi \quad (15)$$

$$C_a(45^\circ) = (1,1 + 0,4\phi) C_a(90^\circ) \quad (16)$$

$$C_a = 3,65 - 4,65\phi \quad (17)$$

Com estas expressões pode-se calcular o coeficiente de arrasto,  $C_a$ , segundo COHEN e PERRIN (1957), para torres de secção quadrada e triangular equilátera, para perfis simples, tabela 3:



Tabela 3: Valores de  $C_a$  segundo COHEN e PERRIN (1957)

	$\phi$	0,1	0,2	0,3	0,4
<i>Secção Quadrada</i>	$C_a (90^\circ)$	3,5	3,0	2,5	2,0
	$C_a (45^\circ)$	3,99	3,54	3,05	2,52
	$\frac{C_a (45^\circ)}{C_a (90^\circ)}$	1,14	1,18	1,22	1,26
<i>Secção Triangular Equilátera</i>	$C_a$	3,19	2,72	2,26	1,79

Percebe-se que houve um aumento entre 14% e 26% dos valores do coeficiente de arrasto quando o ângulo de incidência do vento em relação à face de barlavento passa de  $90^\circ$  a  $45^\circ$ . E que os valores de  $C_a$  para torres com secção triangular equilátera são menores.

Com a investigação experimental realizada por GEORGIU e VICKERY (1979), utilizada na elaboração da NBR-6123, comprovaram grandes divergências entre as diversas normas existentes na época e entre as normas e os ensaios, no que diz respeito aos valores dos fatores de proteção. Concluíram que as maiores disparidades ocorriam com valores de afastamento relativo superiores a um e com altos índices de área exposta.

Modelos seccionais de torres de secção quadrada em forma de tronco de pirâmide, com barras de faces planas, foram ensaiados em túnel de vento por BAYAR (1986). Com os resultados obtidos em seus ensaios e comparando com resultados de outros autores, BAYAR chegou as equações 18 para índices de área exposta variando entre 0,10 e 0,20 e à equação 19, com  $\phi$  variando entre 0,20 e 0,24.

$$C_a = 4,2 - 7\phi \quad (18)$$

$$C_a = 3,5 - 3,5\phi \quad (19)$$

Para o cálculo estrutural de torres metálicas de linhas de transmissão, as normas mais utilizadas são a NBR-5422 e IEC-826. Estas, assim como a NBR-6123 apresentam gráficos que relacionam o índice de área exposta ( $\phi$ ) com o coeficiente de arrasto ( $C_a$ ), para torres com secção quadrada ou triangular equilátera, com reticulados iguais em todas as faces. A figura

---

Estudo em Túnel de Vento das Características Aerodinâmicas de Torres Metálicas Treliçadas

12 fornece os valores dos coeficientes de arrasto,  $C_a$ , para torres ou módulos de torres reticulados de secção quadrada ou triangular equilátera, constituídos por barras prismáticas de faces planas, com cantos vivos ou levemente arredondados, para ventos incidindo perpendicularmente a uma das faces. Porém, quando o ângulo de incidência do vento em relação à face de barlavento, em torres de secção quadrada, for diferente de  $90^\circ$ , o  $C_a$  deverá ser multiplicado por  $K_\alpha$ , conforme recomendado pela NBR-6123, vide equação 20, para  $0^\circ < \alpha \leq 20^\circ$  e equação 21 para  $20^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ . Como pode-se visualizar na figura 12, os valores recomendados pela NBR-5422 e IEC-826 são muito similares aos indicados pela NBR-6123, utilizada para os cálculos deste trabalho.

$$K_\alpha = 1 + \alpha^\circ / 125 \quad (20)$$

$$K_\alpha = 1,16 \quad (21)$$

Os valores dos coeficientes de arrasto de torres reticuladas de secção quadrada, indicados por pesquisadores e normas, são comparados por BLESSMANN (1990) na figura 13. Nesta figura, NBR-6123 é a norma brasileira (1988), DIN4131 uma norma alemã (1969) e NV-65 uma norma francesa (1980). Em outro trabalho, BLESSMANN (2001) descreve acidentes em torres treliçadas devido ao uso inadequado dos coeficientes aerodinâmicos.

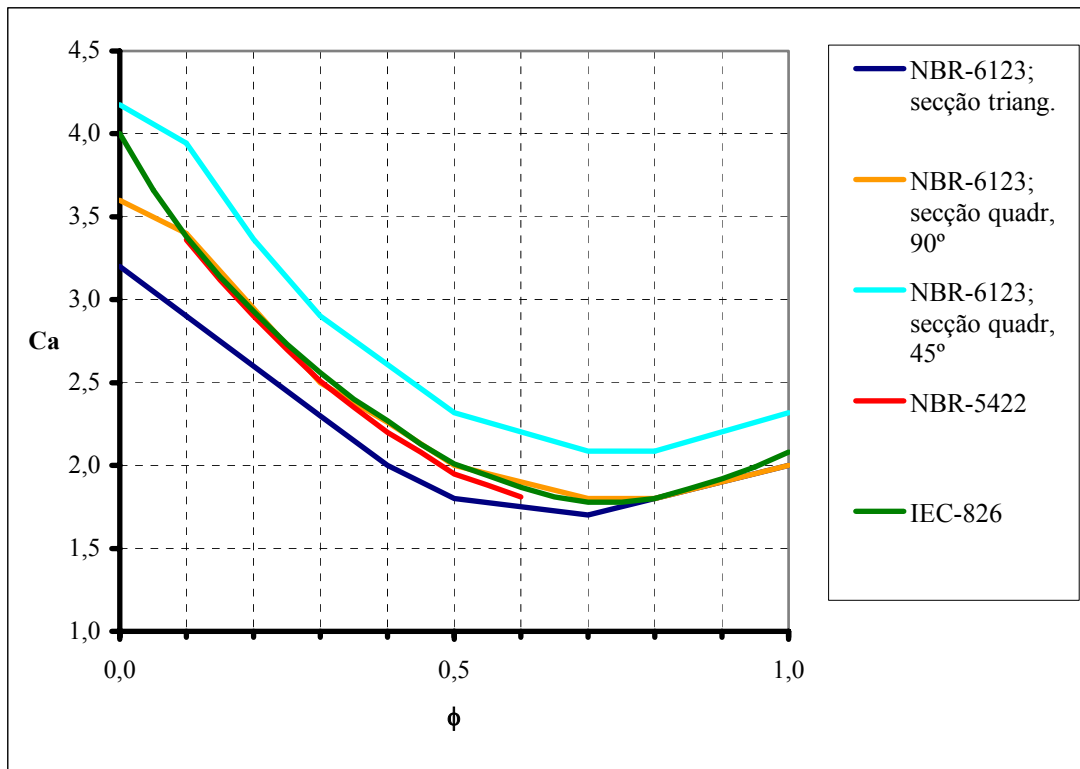


Figura 12: Coeficiente de arrasto,  $C_a$ , para torres reticuladas de secção quadrada e triangular equilátera, formadas por barras prismáticas de cantos vivos ou levemente arredondados

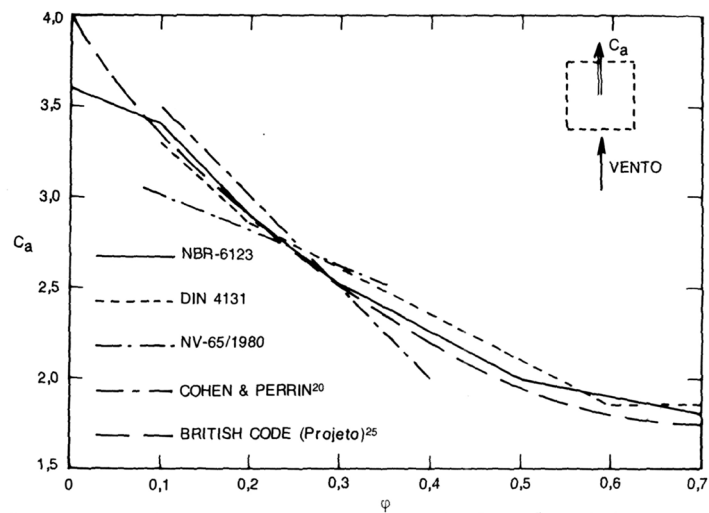


Figura 13: Coeficientes de arrasto,  $C_a$ , em torres reticuladas de secção quadrada (BLESSMANN, 1990)

Os valores dos coeficientes de arrasto apresentados em relatórios e normas valem somente para a forma específica (configuração) da parte da torre testada e dependem diretamente do valor da área efetiva de referência utilizada no cálculo de  $C_a$ . Percebe-se que a determinação correta e criteriosa da área efetiva de referência do reticulado tem um papel determinante na recomposição do carregamento a partir dos valores de  $C_a$  disponíveis.

Transcreve-se, da NBR-6123/88, a seguinte recomendação para torres reticuladas:

*“7.7.2 Torres reticuladas de secção quadrada ou triangular equilátera, com reticulados iguais em todas as faces, constituem casos especiais para os quais pode ser conveniente determinar a força global do vento diretamente. Para estes casos a força de arrasto é calculada por:*

$$F_a = C_a q A_e \quad (22)$$

*sendo:  $A_e$  – área frontal efetiva de uma das faces da torre reticulada: área da projeção ortogonal das barras de uma das faces da torre reticulada sobre um plano paralelo a esta face.”*

Além disso, os valores da norma não consideram a existência de membros internos em planos horizontais de contraventamento, os quais acrescentam uma parcela adicional à força de arrasto.

### 3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

#### 3.1. CARACTERÍSTICAS DO TÚNEL DE VENTO

O método probabilístico determina a resposta de uma estrutura à turbulência longitudinal do vento através de cálculos. Porém, quando trata-se de uma estrutura rodeada por construções ou obstáculos naturais de grande porte esse processo sofre alterações importantes. O espectro de energia das rajadas incidentes sofre influência sensível quando estes obstáculos encontram-se a barlavento e quando a sotavento, as características da turbulência sofrem alterações significativas, causadas pela própria estrutura, provocando alterações nas respectivas pressões.

Nestes casos, quando as construções ou obstáculos vizinhos causam uma perturbação importante, ou quando não existem informações sobre o comportamento aerodinâmico da mesma, recomenda-se fazer ensaios em túnel de vento.

O túnel de vento tem como finalidade simular as principais características do vento natural no local da construção e o espectro de energia das rajadas, inclusive a ação das rajadas laterais (e, em certos casos, verticais) que no processo manual seria necessário um cálculo adicional. Para que os resultados sejam precisos é importante que os obstáculos vizinhos sejam representados corretamente e que o modelo tenha as características elásticas (semi-rígido, aeroelástico ou seccional, conforme o caso). Se a combinação destes requisitos não for adequada os resultados obtidos poderão estar consideravelmente afastados da realidade o que não serviria para a aplicação na Engenharia Civil, DAVENPORT e ISYUMOV (1967).

Além de simular o vento natural, o túnel também permite a pesquisa de efeitos estáticos e dinâmicos do vento em estruturas, paredes, telhados, vidros, painéis de revestimento, esquadrias. Efeitos sobre transeuntes, veículos e plantas, efeitos sobre os usuários das edificações e poluição (dispersão de gases e resíduos sólidos da atmosfera).

O túnel utilizado para os ensaios foi o Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (BLESSMANN, 1982) que está em operação

desde 1977, (figura 14). Este túnel, que produz vento de camada limite, tem, ao longo destes anos, viabilizado o desenvolvimento de estudos de efeitos estáticos e dinâmicos de modelos de construção civil, reproduzindo as principais características naturais do vento.



Figura 14: Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann*

A câmara principal possui dimensões 1,30m x 0,90m x 9,32m (largura x altura x comprimento), três mesas giratórias (cada uma com aplicações específicas) e relação comprimento x altura da câmara principal de ensaios de 10,3. Um motor elétrico de 100 HP aciona as hélices do ventilador e a velocidade do escoamento é controlada manualmente através de aletas radiais metálicas que obstruem a passagem do ar. O ventilador está diretamente montado no eixo do motor elétrico, de forma que a velocidade máxima do escoamento do ar seja de 42 m/s sobre as plataformas giratórias M-I e M-II, 28 m/s sobre a plataforma giratória M-III, e 9 m/s sobre a plataforma giratória M-IV. É possível aumentar a velocidade máxima em ~16%, mudando as lâminas e usando o mesmo motor elétrico, BLESSMANN (1982), ver figura 15.

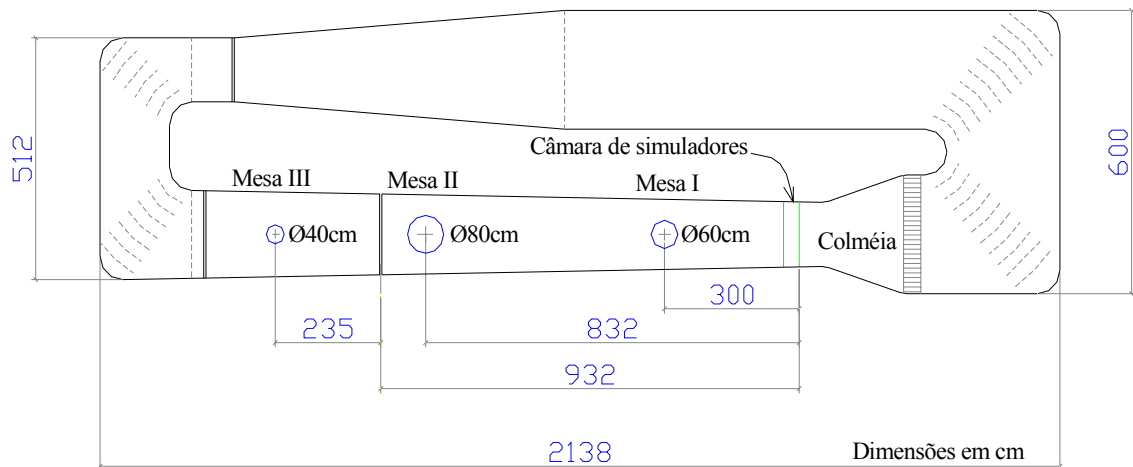


Figura 15: Circuito aerodinâmico do túnel de vento LAC/UFRGS

A mesa M-I é utilizada para ensaios do tipo aeronáutico no piso do túnel, com camada limite de pequena espessura e escoamento do ar de baixa turbulência; pesquisas básicas em formas geométricas simples, em modelos bi ou tridimensionais; ensaios para a construção civil com geradores de turbulência colocados na câmara de simuladores.

A mesa M-II é utilizada em ensaios do tipo aeronáutico no eixo do túnel; ensaios para a construção civil, com blocos colocados no piso e/ou geradores de turbulência na câmara de simuladores e ou em outras seções. Aferição de anemômetros, tubos de Pitot-Prandtl, etc.

A mesa M-III é de grande rigidez, situada no primeiro divergente do túnel. As frequências naturais, segundo os três eixos ortogonais usuais, estão acima de 500Hz. Esta mesa foi construída especificamente para estudos dinâmicos em estruturas de grande alteamento, tais como chaminés, pilares de viadutos, torres de televisão, de microondas e mastros.

A velocidade do vento é controlada através da medida diferencial de pressão estática,  $\Delta p_a$ , podendo ser visualizada em dois anéis piezométricos situados nos extremos do convergente, na entrada da seção principal de trabalho. Estas leituras são feitas através de um micromanômetro à água tipo Betz, podendo ser acompanhadas pelos transdutores elétricos de pressão ou pelos multimanômetros à álcool. A pressão dinâmica e a velocidade de escoamento em qualquer ponto da seção transversal pode ser determinada através da leitura da pressão de referência. Isso é possível, pois foram determinados coeficientes  $k_o$  para todos os

perfis de velocidade dos ventos simulados no túnel, relacionando a pressão dinâmica,  $q$ , no eixo do túnel e a pressão de referência  $\Delta pa$ , como mostra a equação 23:

$$q = k_o \Delta pa \quad (23)$$

Onde:

$q$  – pressão dinâmica ao longe =  $(1/2) \rho V^2$  [ $N/m^2$ ];

$k_o$  – coeficiente que vincula  $q$  e  $\Delta pa$ ;

$\Delta pa$  – pressão de referência (diferença de pressão entre os anéis piezométricos) [ $mmH_2O$ ]

$V$  – velocidade média do vento [ $m/s$ ];

Os modelos ensaiados em túnel de vento são instrumentados para fornecerem registros das grandezas de interesse para posterior avaliação, determinando-se valores médios e análise das flutuações.

A obtenção de valores médios pode ser feita através de uma instrumentação mais simplificada dos modelos, mas para avaliação das flutuações são necessários instrumentos e equipamentos eletrônicos mais sofisticados para aquisição e análise dos registros.

Os aparelhos utilizados para obtenção das flutuações são o anemômetro, para registros da velocidade e transdutores, para registros de pressão e força.

### 3.2. MEDIÇÃO DAS PRESSÕES

Para a maior parte das estruturas a ação dominante do vento produz uma pressão normal à superfície. Elas podem ser medidas através de transdutores de pressão que são instalados diretamente na superfície a ser examinada, ou através de tomadas de pressão, instaladas na superfície do modelo (figura 16). Caso seja usado um transdutor, ele deverá substituir parte da superfície, nivelado com a mesma de forma que o escoamento não seja



afetado. Da mesma forma, as tomadas de pressão também devem estar niveladas e normais à superfície, como mostrado pelos exemplos (i)-(iii) da figura 17. Deixando as tomadas salientes, como ilustrado no exemplo (iv) da figura 17, o escoamento fica perturbado e essa situação deve ser evitada. A tomada de pressão que não estiver normal à superfície, exemplo (v), terá influência na direção do escoamento local. Em alguns casos, como nos que o acesso dentro do modelo é restringido, principalmente em regiões próximas aos cantos, esta instalação deverá ser substituída pela tomada ilustrada no exemplo (i).

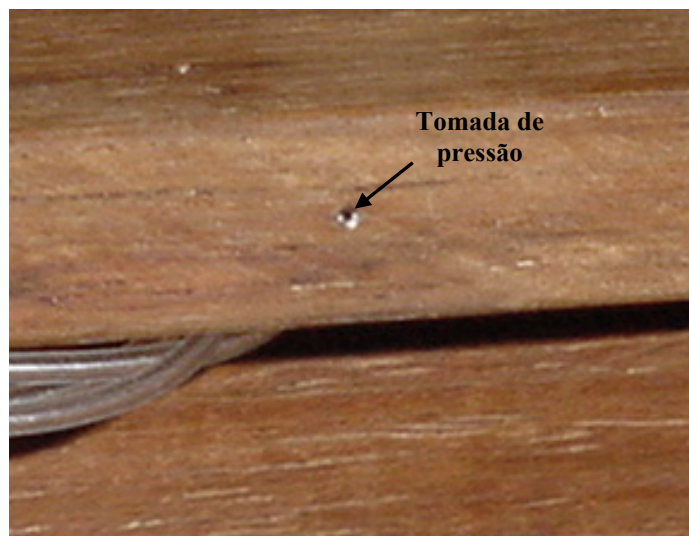


Figura 16: Tomada de pressão

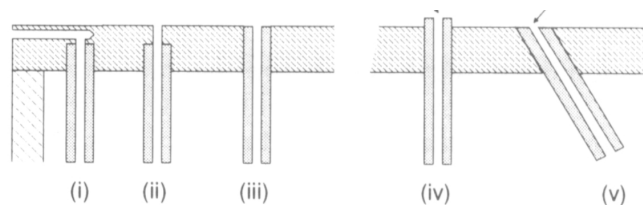


Figura 17: Visualização em corte das tomadas de pressão

Para este estudo de pressões médias foram utilizados equipamentos simples, porém eficientes. Cada uma das tomadas de pressão e o anel piezométrico foram ligados à caixa dos transdutores elétricos de pressão (figura 18), do tipo Honeywell, através de conectores. A saída do transdutor fornece a pressão diferencial entre o valor medido e uma pressão de

referência, a qual é transmitida simultaneamente através de um sistema analítico-digital ao computador. Para tanto, o transdutor deve ser alimentado por uma fonte de tensão contínua. No computador, através do programa HP-VEE os registros de cada tomada são lidos, processados e armazenados em disco rígido. A aquisição dos registros se deu a uma frequência de 1024 Hz, sobre intervalos de amostragem de 8s.

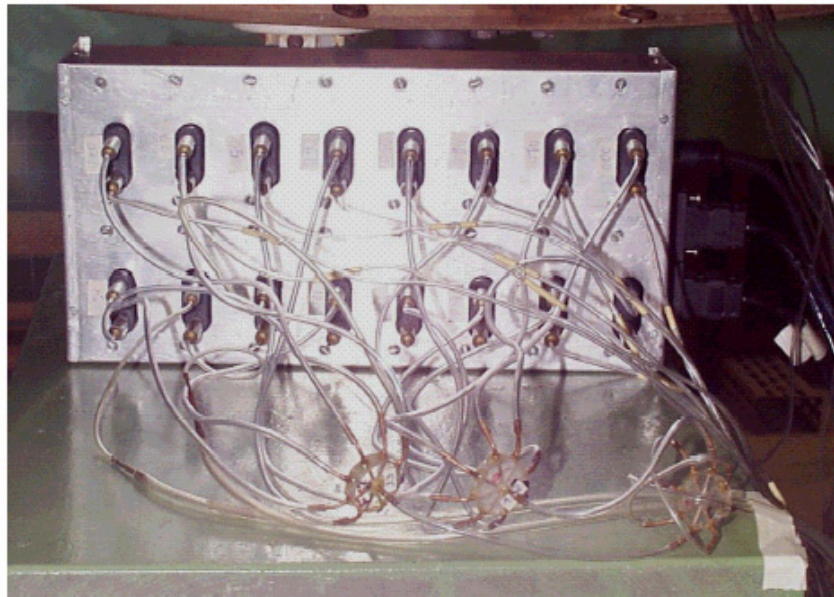


Figura 18: Caixa dos transdutores elétricos de pressão e conexões das tomadas de pressão

Para que se pudesse descartar qualquer possibilidade de equívocos durante as medições, os mesmos ensaios foram realizados com o multimanômetro a álcool e assim calculados os coeficientes de pressão. Não observou-se variação significativa entre os métodos de processamento, legitimando o uso dos transdutores elétricos. O esquema de conexão dos equipamentos acima descritos é mostrado na figura 19.

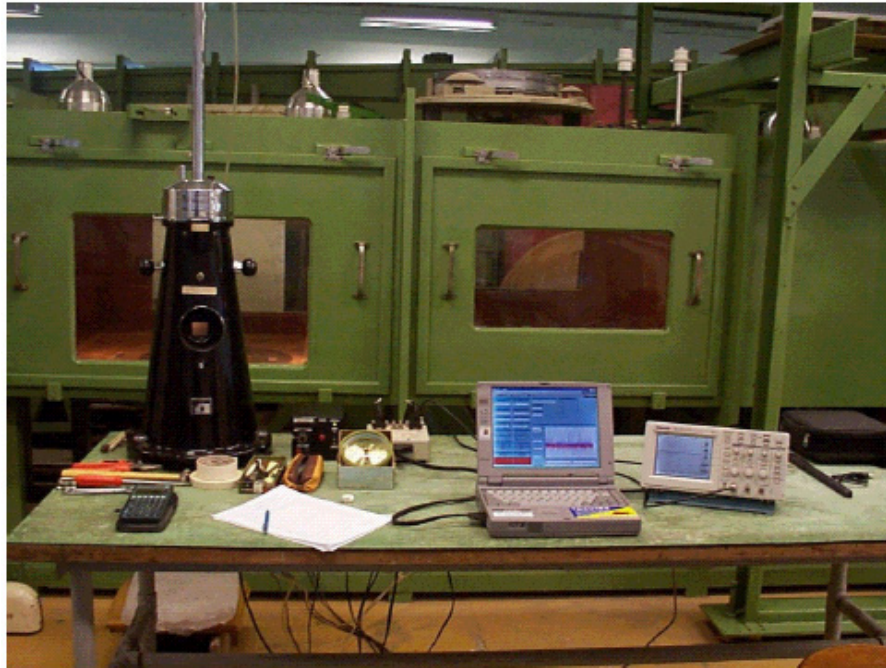


Figura 19: Equipamentos utilizados nos ensaios estáticos

O modelo mais simples de manômetro é o com tubo de vidro em forma de “U” que contém uma certa quantidade de água ou outro líquido satisfatório. Um lado do tubo, a referência, permanece em contato com a pressão atmosférica do ambiente, ou é conectado à tomada de pressão estática numa parede do túnel de vento afim de prover a pressão de referência. Quando uma pressão é aplicada ao outro lado do tubo, o líquido é deslocado até que a pressão fique equilibrada. A diferença entre a altura do líquido em cada lado do tubo é a medida direta da pressão de referência, COOK (1985).

O multimanômetro é uma ferramenta muito utilizada para experimentos com modelos em túnel de vento. Formados por um grande número de tubos ativos individuais, paralelos entre si, montados sobre uma chapa plana com escala, conectados a um único membro passivo comum com um reservatório de diâmetro grande.

Normalmente o primeiro e o último tubos são conectados à referência, os dois próximos são as pressões  $A1$  e  $A2$  e os tubos restantes são conectados com os vários pontos de medição de pressão na superfície do modelo. A diferença entre as pressões estáticas de  $A1$  e  $A2$  resultará no  $\Delta p_a$ . A pressão em cada ponto na superfície do modelo será determinada a partir de uma pressão estática de referência, figura 20.

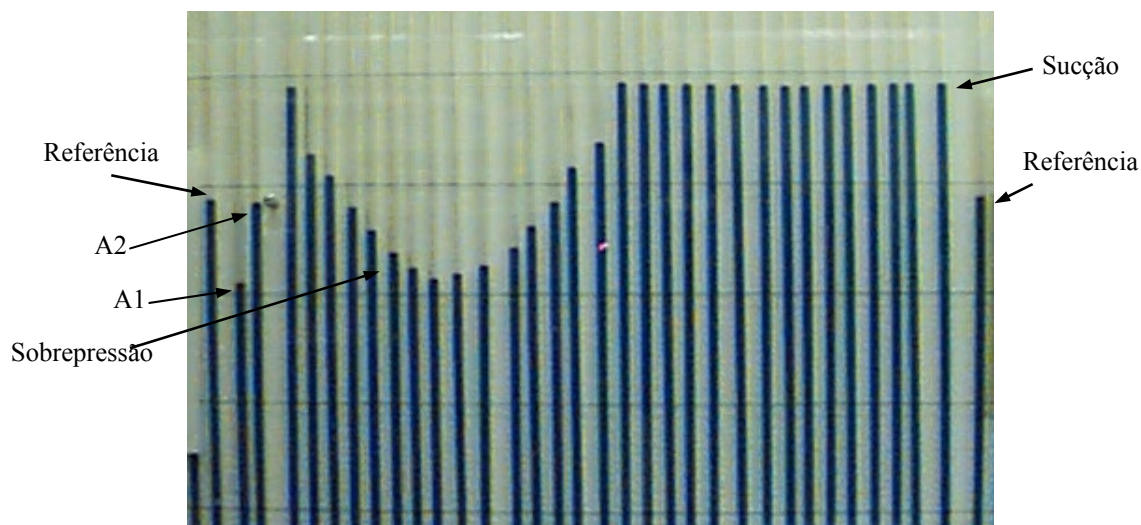


Figura 20: Foto do multimanômetro, resultados de um ensaio.

### 3.3. MODELOS DE TORRES TRELIÇADAS

A principal dificuldade na confecção de modelos reduzidos de torres treliçadas está na grande diferença existente entre a altura total da estrutura e as dimensões transversais dos membros individuais. Para uma escala típica de 1:500, por exemplo, para um perfil, tipo cantoneira de abas iguais, com dimensões de 101,6mm x 101,6mm (4" x 4") as dimensões seriam de aproximadamente 0,2mm x 0,2mm (0,008" x 0,008") para o modelo reduzido. Aparte do problema de construir cada membro, o Número de Reynolds (Re) local é reduzido para aproximadamente 200 e as características aerodinâmicas não irão se igualar com as do protótipo. A variação de carga com a velocidade de vento pode diferir significativamente em relação ao protótipo. Em tais circunstâncias o teste aeroelástico provavelmente não irá conduzir a resultados significativos.

Uma aproximação que provavelmente conduzirá a prognósticos seguros é a utilização de dados aerodinâmicos obtidos de testes com modelos seccionais reduzidos, construídos em uma escala adequada para reproduzir os detalhes necessários e encontrar um número de Reynolds local cuja variação tenha pouco efeito nos resultados. Dados sobre formas com bordas pontegudas (arestas vivas) sugerem que o número de Reynolds local maior que 1000 seja suficiente para que os efeitos da redução da escala não sejam significativos, VICKERY (1982).

Algo semelhante foi esboçado por DAVENPORT e VICKERY (1968), em estudo de uma torre estaiada e por DAVENPORT (1969) em estudos de ponte, onde os problemas são muito parecidos a esses surgidos nos estudos de torres treliçadas, citados por VICKERY (1982).

Para torres treliçadas constituídas por elementos de seções circulares ou com arestas vivas surgem dificuldades no dimensionamento de protótipos, o que poderá ser superado com a utilização da expressão (VICKERY, 1982):

$$\frac{(C_a \cdot D)_M}{(C_a \cdot D)_P} = \frac{L_M}{L_P} \quad (24)$$

Onde:

$C_a$  = coeficiente de arrasto do modelo

$D$  = diâmetro para seções circulares e altura de projeção para seções rombudas

$L$  = comprimento do elemento

$(...)_M$  = características do modelo

$(...)_P$  = características do protótipo

Contanto que a resposta dos membros individuais não seja de nenhum interesse, esta técnica é adequada para treliças com baixo índice de área exposta, questionável para treliças com índice moderado e é claramente inadequada para aquelas com alto índice de área exposta.

### 3.4. ENSAIOS

Quando estudos dos efeitos do vento são realizados ainda numa etapa de concepção, é possível se atingir maiores níveis de confiabilidade e segurança em uma obra. Este processo preventivo é, geralmente, o de menor custo e o de maior eficiência.

Apesar do grande número de estudos realizados sobre a ação do vento em torres treliçadas e das leis existentes, ainda surgem dúvidas no momento do cálculo estrutural de tais estruturas. Uma alternativa para encontrar as respostas é a realização de testes em túnel de vento, apesar de que as dificuldades encontradas também são consideráveis.

Basicamente há dois tipos de testes efetuados em túnel de vento: o teste estático e o dinâmico. No teste estático as forças aerodinâmicas médias são obtidas colocando-se modelos, em escala reduzida, em balanças de força, onde serão determinados os coeficientes de arrasto e de sustentação. Já no teste dinâmico são confeccionados modelos aeroelásticos em escala reduzida onde são reproduzidas as principais características da estrutura real, como massa, rigidez e amortecimento. Também pode ser utilizada a balança de força dinâmica ou instrumentação com acelerômetros ou extensômetros de resistência elétrica.

Foram realizados ensaios estáticos divididos em três etapas. Num primeiro momento foi analisado no túnel de vento do LAC o comportamento dos coeficientes nas direções dos eixos coordenados  $x$  e  $y$ , para dois perfis tipo cantoneira inseridos no túnel isoladamente. Numa segunda fase de ensaios estes mesmos modelos foram dispostos em pares para verificação da interação existente entre eles. E, na terceira etapa, foram ensaiados modelos seccionais de módulos de torres.

### 3.4.1 Etapa 1: Modelos isolados

Para esta primeira etapa foram confeccionados dois modelos em madeira de cantoneiras com abas iguais com dimensões de 101,6mm x 12,7mm (largura x espessura da aba) e comprimento de lado a lado do túnel de vento, 1200mm, a fim de caracterizar comprimento infinito, ou seja, escoamento bidimensional. A diferença entre cada modelo está na forma do acabamento das abas. O modelo 1, E1, tem a terminação da aba com ângulos retos, figura 21a e o modelo 2, E2, possui a finalização da aba boleada, figura 21b.

Cada modelo foi instrumentado com tomadas de pressão estática dispostas nos lados internos e externos das abas das cantoneiras com afastamento entre elas conforme ilustrado na figura 22. Estas tomadas foram distribuídas numa linha com uma distância de 450 mm da parede do túnel, com uma distância de 300 mm entre as internas e externas, figura 23. As tomadas de pressão são constituídas por tubos de PVC com 600 mm de comprimento ligados

a um estricor de 20 mm que por sua vez é unido a uma mangueira com 200 mm de comprimento, sendo que ambas mangueiras com diâmetro interno de 1 mm. Elas foram instaladas diretamente nos modelos, normais à superfície, através de furos nas abas. Essas mangueiras plásticas foram ligadas, através de conectores, a transdutores elétricos de pressão.

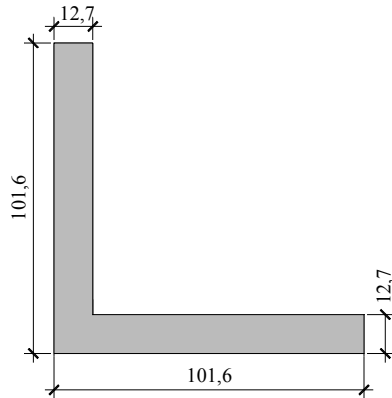


Figura 21a: Dimensões em [mm] do modelo E1

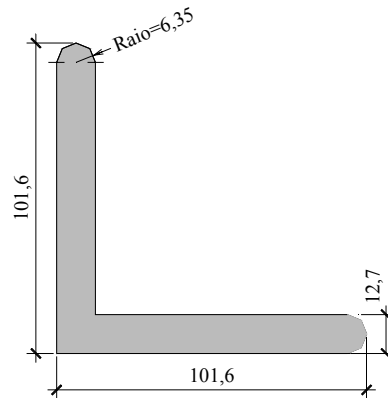


Figura 21b: Dimensões em [mm] do modelo E2

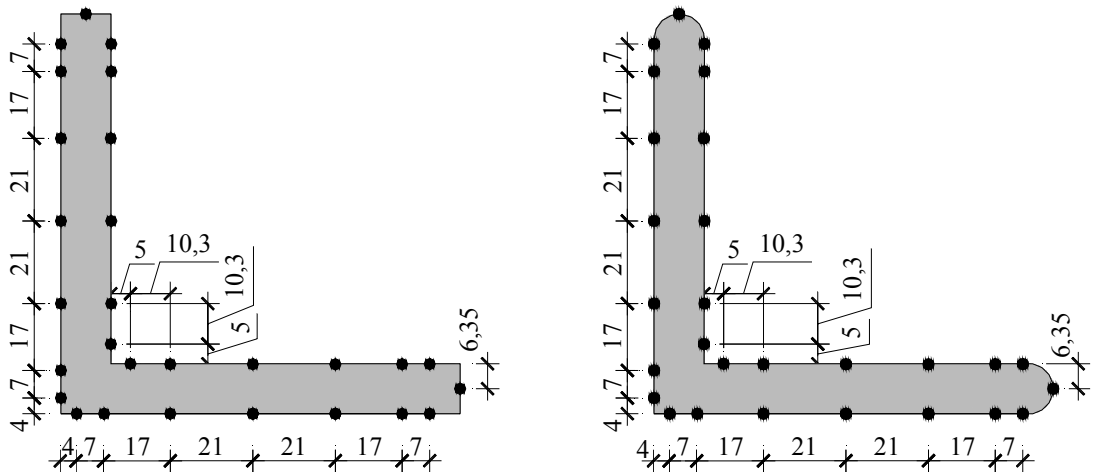


Figura 22: Localização das tomadas de pressão nos modelos

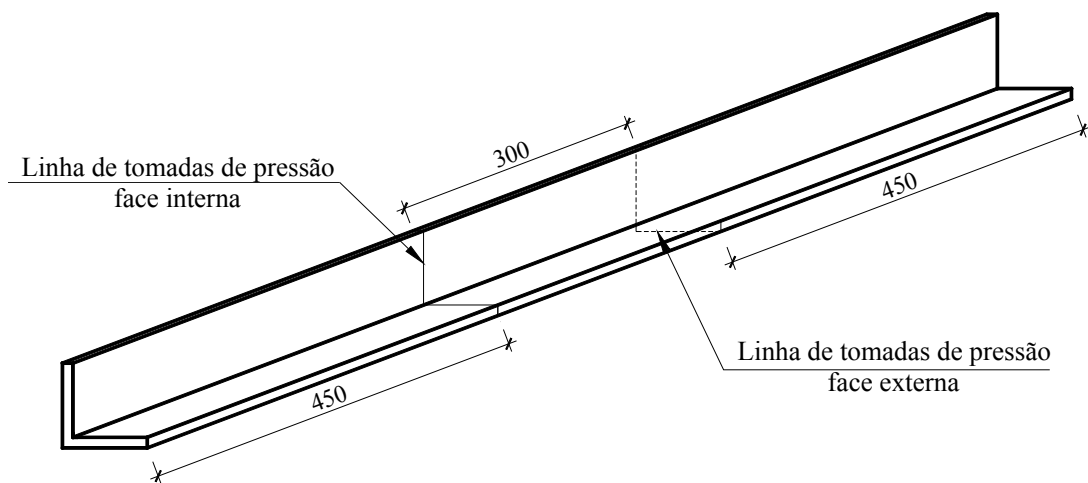


Figura 23: Posição das linhas de tomadas de pressão na cantoneira

Para efeitos de comparação de resultados os modelos foram submetidos às mesmas condições de ensaio. Estes foram realizados com vento incidindo de  $0^\circ$  até  $180^\circ$  e de  $-180^\circ$  até  $0^\circ$ , com leituras a cada  $15^\circ$ , sendo submetidos a dois tipos de escoamentos: suave e turbulento. As tabelas de cálculo dos coeficientes de força obtidos encontram-se no apêndice A. O esquema apresentado na figura 24 identifica a referência para o ângulo de incidência do vento.

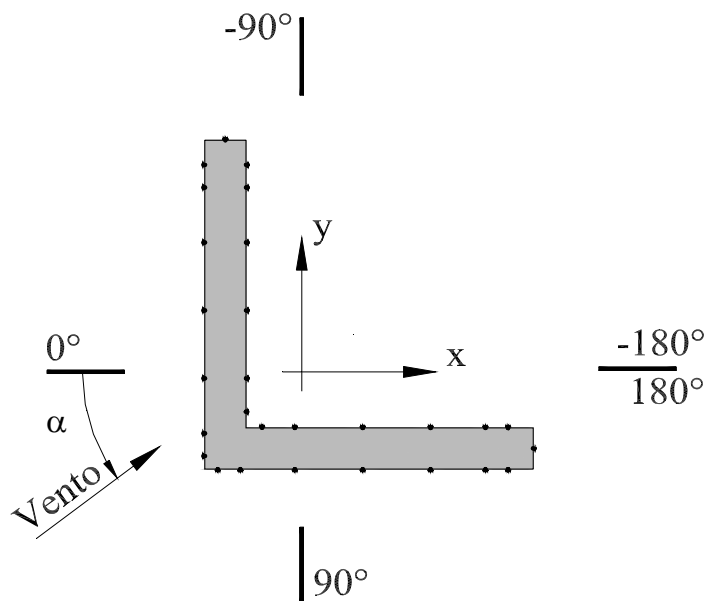


Figura 24: Convenção dos eixos e indicação dos ângulos de incidência do vento



Na câmara de simuladores, situada no início da câmara de ensaios, foi utilizado o quadro de simulação n.º 2 (gaveta 2), com o gerador de turbulência tipo grelha, como pode-se visualizar ao fundo da figura 25. A intensidade da componente longitudinal da turbulência, no eixo do túnel, na altura da mesa M-I, é de 10,5% e a escala da componente longitudinal da turbulência é de 60 mm.



Figura 25: Foto do ensaio com perfil submetido a escoamento turbulento, com gerador de turbulência tipo grelha



Figura 26: Foto do ensaio com perfil submetido a escoamento suave

Na figura 26, ensaio com escoamento suave, a grelha foi retirada e a intensidade longitudinal da turbulência na mesa M-I é de aproximadamente 0,5%. Mais fotografias destes ensaios encontram-se no apêndice C.

### 3.4.2 Etapa 2: Interação entre os modelos

Já na segunda fase, foram ensaiados perfis tipo cantoneiras em pares, de forma que um exercesse a função de proteção sobre o outro quanto ao efeito do vento. Estudou-se, além da proteção do perfil de barlavento sobre o de sotavento, a influência do afastamento entre ambos e do ângulo de incidência do vento sobre as cantoneiras.

Novamente ensaiou-se com o vento de escoamento suave e turbulento, utilizando-se a mesa M-II. Na câmara de simuladores utilizou-se o quadro de simulação número 2 (gaveta 2), com gerador de turbulência tipo grelha (grelha 1). O perfil instrumentado estava na posição de sotavento, sendo o multimanômetro a álcool o equipamento que mediu os coeficientes de pressão. As tabelas contendo os cálculos dos coeficientes de força encontram-se no apêndice B.

Determinou-se três posições (P1, P2 e P3) e quatro afastamentos ( $x$ ) medidos entre as extremidades dos modelos, conforme tabela 4 e ilustrado na figura 27. Fotografias destes ensaios encontram-se no apêndice C.

Tabela 4: Afastamentos,  $x$ , entre os reticulados ensaiados

Posições	Afastamento [mm]			
	$x1$	$x2$	$x3$	$x4$
P1	450	800	1400	2510
P2	465	810	1410	2475
P3	442	788	1390	2455

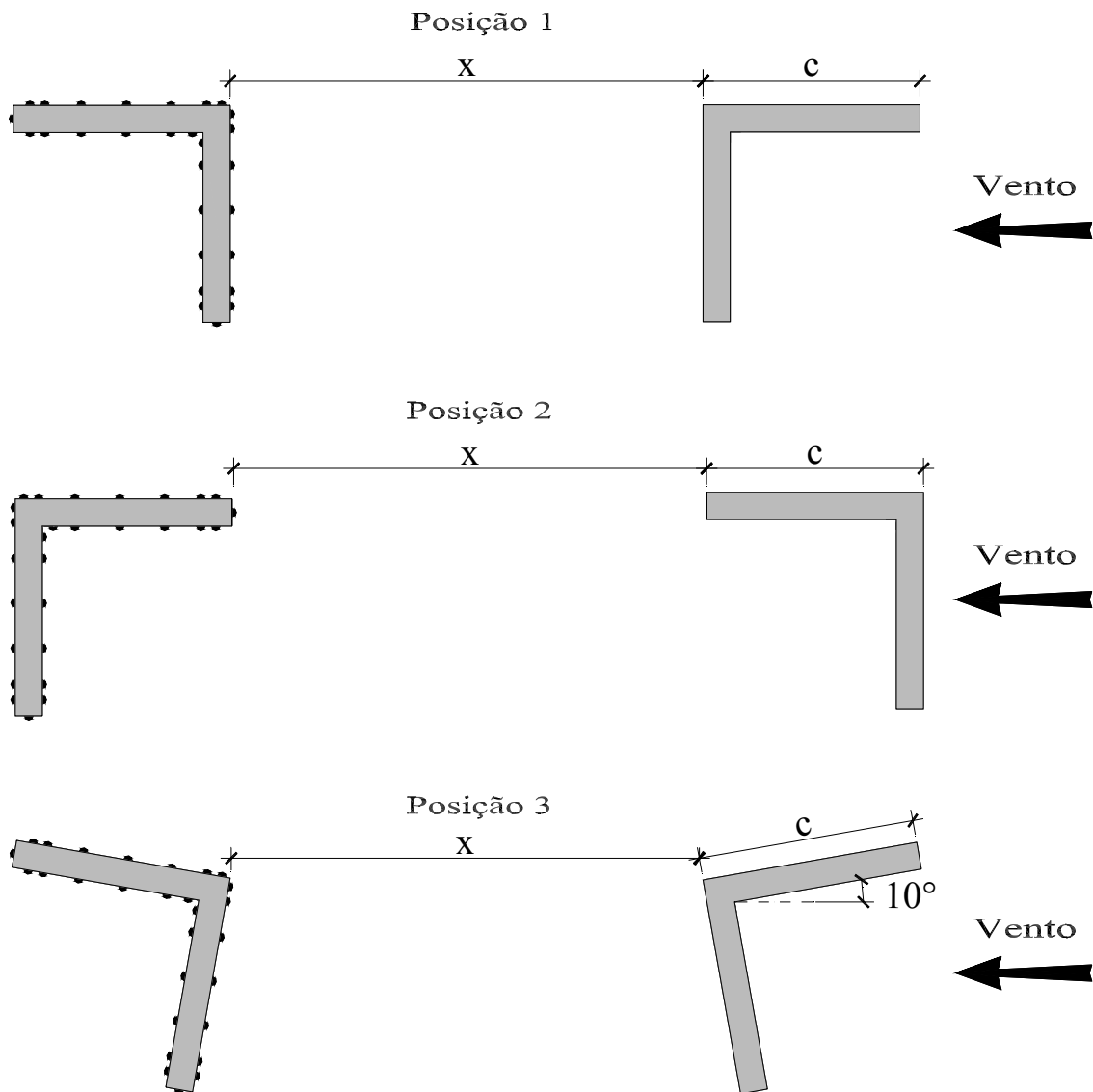


Figura 27: Ilustração do posicionamento (P1, P2 e P3) dos reticulados na segunda etapa de ensaios

### 3.4.3. Etapa 3: Módulos de torres treliçadas

Nesta fase foram realizados estudos em túnel de vento de módulos seccionais de torres treliçadas no que diz respeito à determinação dos coeficientes de arrasto. Confeccionou-se os modelos A, B e C tanto para secção transversal triangular como para secção transversal quadrada, tendo os montantes perfis abertos (arestas vivas), e as faces são iguais para as duas

secções. A figura 28 ilustra a vista frontal dos módulos seccionais A, B e C. Os modelos têm escala 1:8 e foram projetados respeitando-se as condições de semelhança necessária para este tipo de estudo, VICKERY (1982). Fotografias dos modelos ensaiados são mostradas no apêndice C.

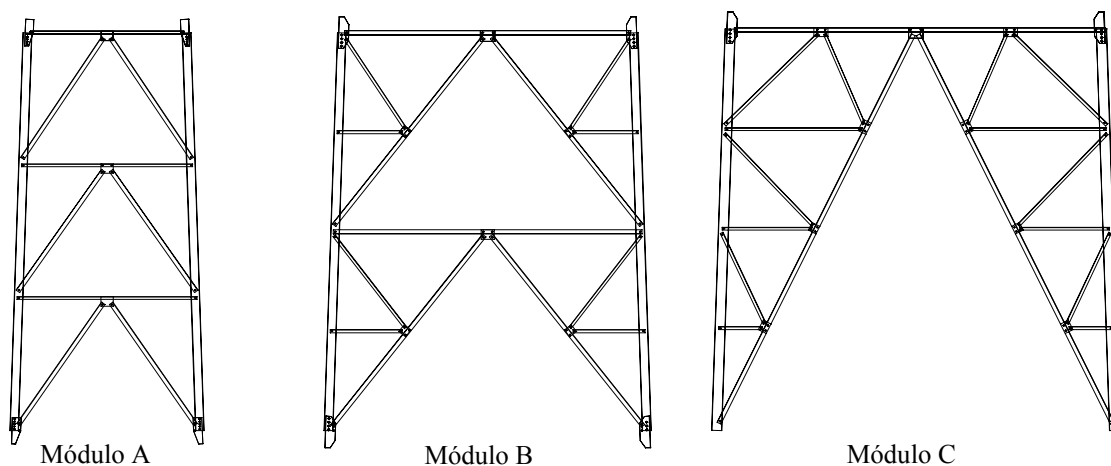


Figura 28: Vista frontal dos módulos A, B e C de seção triangular e quadrada.

Para a determinação da força de arrasto aerodinâmico sobre o modelo foi utilizada uma balança de força unidirecional horizontal, instalada na base do modelo e alinhada com o eixo do túnel. Na figura 29 pode-se visualizar esta balança.

Esta balança de força possui duas placas rígidas horizontais, unidas por lâminas verticais de aço inox temperado, sendo que a placa inferior é fixada rigidamente ao piso das instalações do Túnel de Vento. Já a placa superior é fixada à base do modelo, deslocando-se junto com este no sentido do escoamento, na mesma proporção da força de arrasto aerodinâmico atuante. As lâminas verticais têm sua flexibilidade criteriosamente escolhida, de forma a que o deslocamento da placa superior tenha uma magnitude adequada à sensibilidade de transdutores de deslocamento, sem contudo incorrer em não-linearidades físicas ou geométricas.

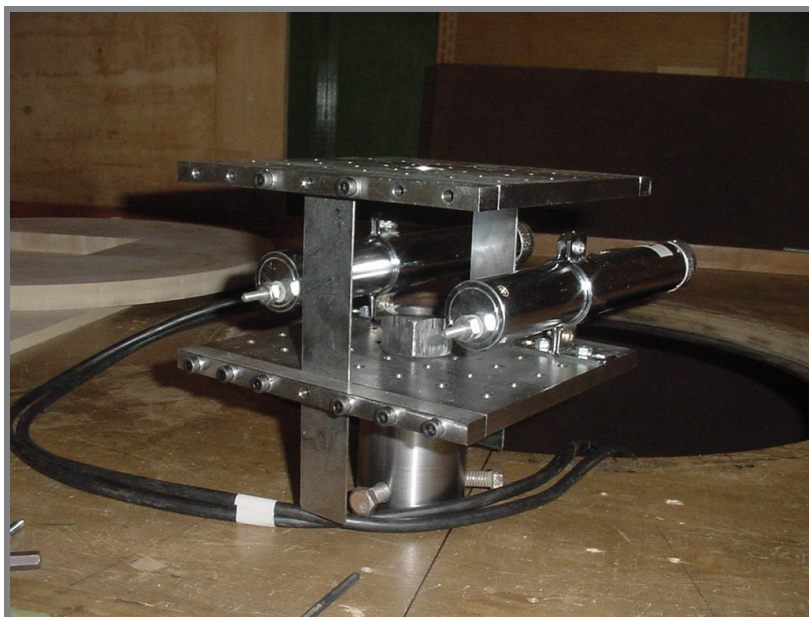


Figura 29: Balança de força unidirecional, instrumentada com LVDT's.

Foram utilizados dois LVDT's marca Kyowa, condicionados e amplificados por um equipamento desenvolvido pelo Laboratório de Instrumentação do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS, para a medição do deslocamento relativo entre as placas rígidas da balança. Um osciloscópio digital TekTronix, modelo TDS210, de dois canais, registrou, por meio de um sistema de aquisição de dados, e monitorou o sinal amplificado.

Este sistema de aquisição é composto por uma placa de conversão A/D de 12 bits e 16 canais, da Computerboards, modelo DAS12/330, e um *notebook* Toshiba. A placa de conversão é controlada pelo software HPVEE, versão 3.21, da Hewlett-Packard. A leitura da placa de conversão foi mapeada numa faixa de tensão de -5 a +5V, resultando em uma resolução de aproximadamente 2,4mV. Após sua instalação na câmara de ensaios do Túnel de Vento, a balança foi estaticamente calibrada por meio de forças conhecidas. Desta forma, foi traçada uma reta de calibração, vide figura 30, relacionando diretamente a força horizontal aplicada e a tensão registrada no sistema de aquisição de dados.

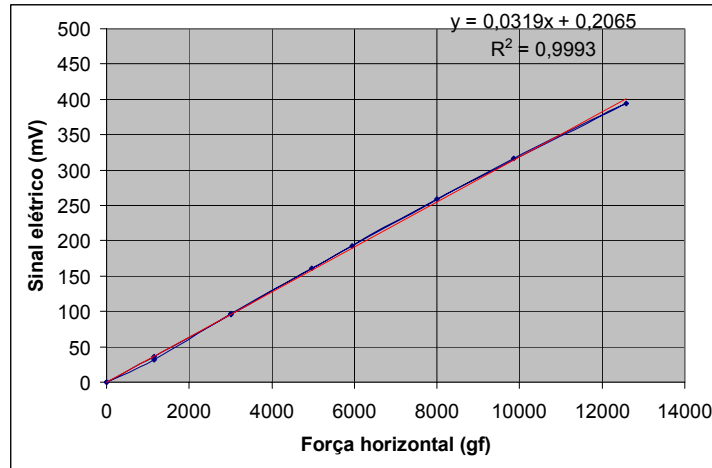


Figura 30: Ajuste de função linear aos pontos de calibração da balança de força unidirecional horizontal.

Deste ajuste encontra-se uma constante de calibração igual a 31,35gf/mV, ou seja, multiplicando-se a leitura em tensão por este número conhece-se a força de arrasto atuante no modelo. Para reduzir o erro de medição foi efetuada a média entre as leituras dos dois LVDT's acoplados à balança. Considerando-se a resolução do sistema de aquisição, observa-se que o sistema de medição de uma resolução não inferior a 76gf. Esta resolução é considerada adequada para a magnitude das forças medidas (da ordem de até 12500gf).

Foram realizados ensaios com quatro diferentes valores de velocidade de escoamento, com vento incidindo a 0° e 45° para seção quadrada e a 0°, 60° e 180° para seção triangular. A referência para o ângulo de incidência do vento e para aplicação dos coeficientes de arrasto é indicada na figura 31.

Para o cálculo dos coeficientes de arrasto a partir das forças medidas foram utilizadas duas áreas de referência, indicadas na figura 32. Elas foram escolhidas justamente para que se possa visualizar a importância da determinação correta e criteriosa da área efetiva de referência do reticulado no cálculo do coeficiente de arrasto.

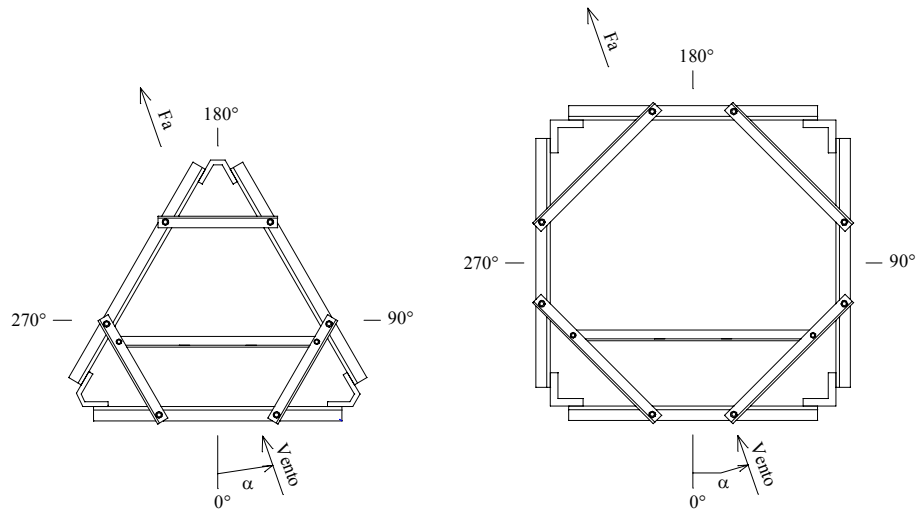


Figura 31: Referência para o ângulo de incidência do vento e para aplicação dos coeficientes de arrasto para os módulos de seção triangular e quadrada

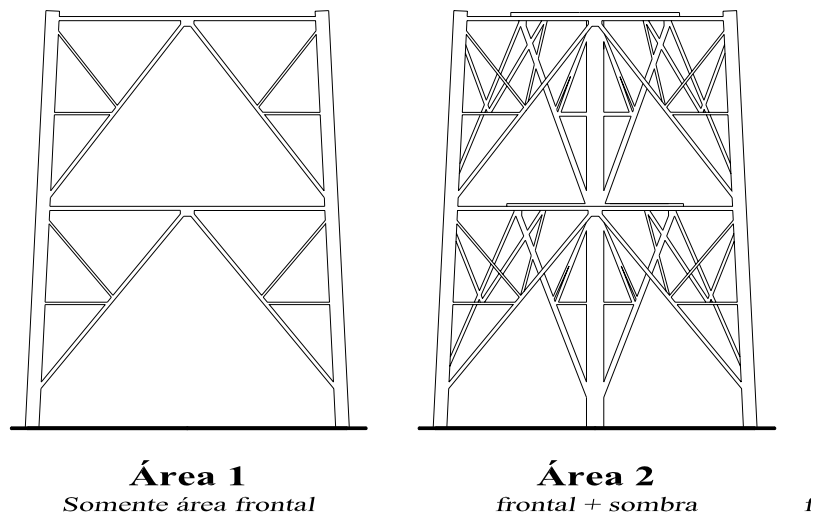


Figura 32: Áreas de referência do módulo de uma torre de seção triangular utilizadas no cálculo dos coeficientes de arrasto.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. ETAPA 1: MODELOS ISOLADOS

Na primeira etapa de experimentos realizados no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC), onde foram ensaiados modelos de cantoneiras isoladas, com terminações diferentes, foram obtidos os coeficientes de pressão de cada tomada de pressão instalada. Através destes, calculou-se os respectivos coeficientes de força, que por sua vez foram somados nas direções  $x$  e  $y$ , resultando nos coeficientes de força  $C_{fx}$  e  $C_{fy}$  para os dois tipos de escoamentos ensaiados, o suave e o turbulento. Eles foram comparados entre si, com a norma brasileira, NBR-6123, e com bibliografia internacional, COOK (1985).

Também é importante o conhecimento dos efeitos de torção devidos ao vento na barra isolada. Então, primeiramente foram calculados os coeficientes de torção,  $C_t$ , de cada tomada de pressão (equação 25) e, posteriormente somados, obtendo-se assim, o valor do  $C_t$  do perfil, para cada ângulo de incidência do vento e escoamentos aos quais os modelos foram expostos.

$$C_t = \frac{C_p \cdot l_{inf}}{c^2} \cdot CE \quad (25)$$

Sendo:

$C_p$  – coeficiente de pressão;

$l_{inf}$  – largura de influência de cada tomada de pressão;

$CE$  – centro de excentricidade do perfil;

$c$  – largura da aba da cantoneira.



Com todos estes dados confeccionou-se gráficos para uma melhor visualização dos comportamentos, seguindo a convenção adotada por COOK (1985), visualizada na figura 33.

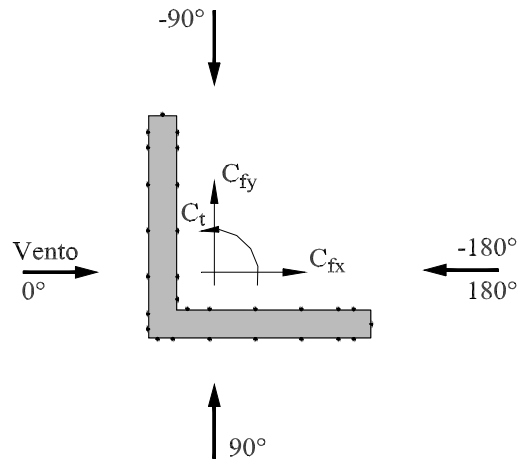
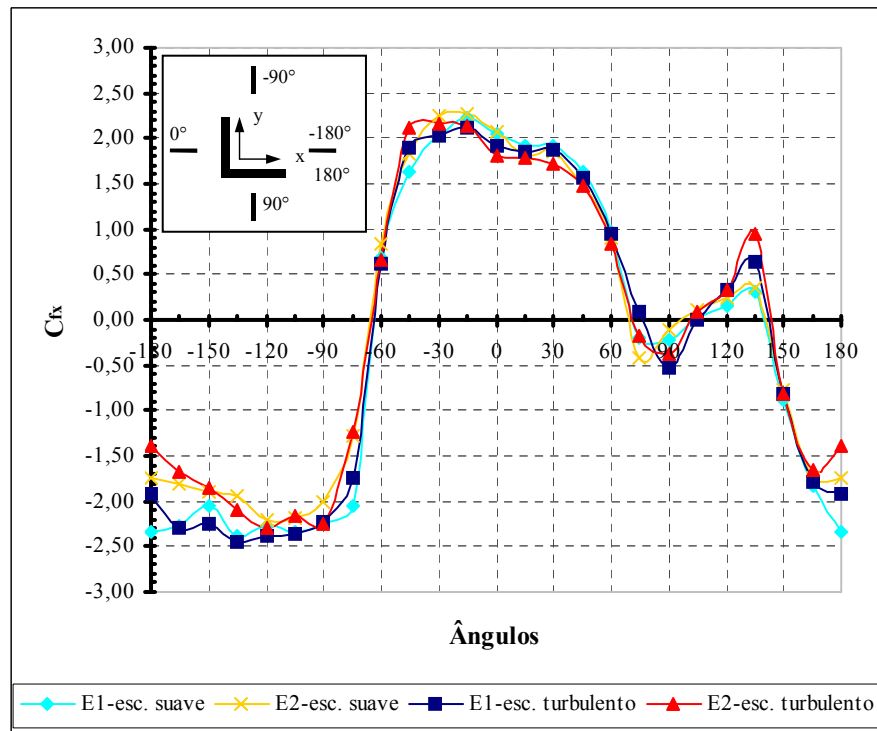


Figura 33: Convenção adotada, conforme COOK (1985)

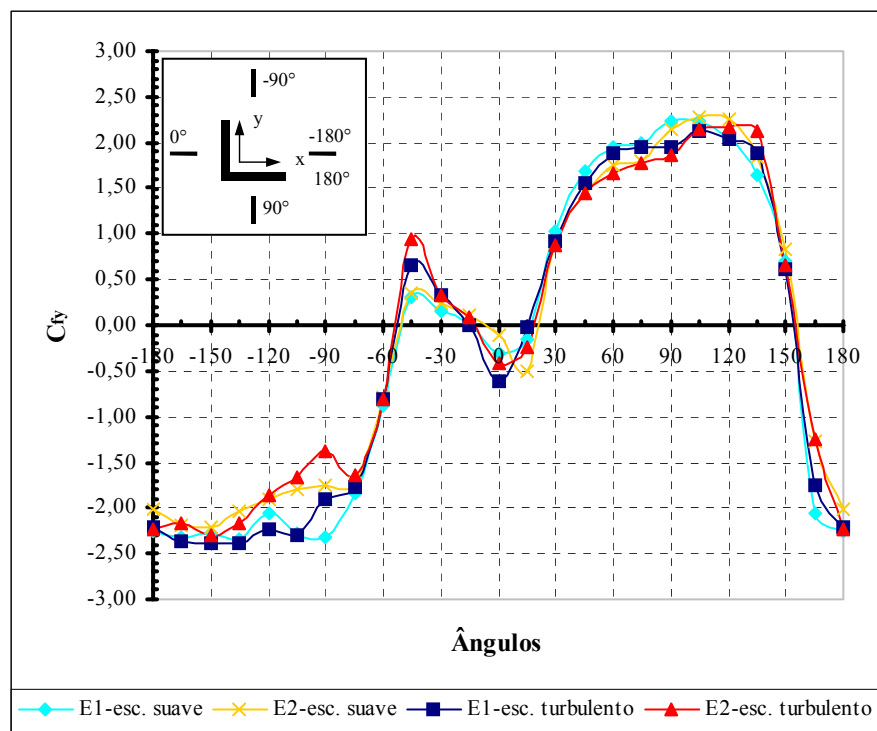
#### 4.1.1. Coeficientes de força ( $C_f$ )

Na primeira etapa dos experimentos foram verificadas possíveis diferenças entre terminações de perfis tipo cantoneira. Lembrando que o primeiro modelo, E1, tem terminação com ângulos retos e o segundo, E2, com bordas arredondadas. Com os resultados, confeccionou-se gráficos comparativos, tendo no eixo horizontal os ângulos de incidência do vento, de  $-180^\circ$  à  $180^\circ$ , e no eixo vertical os coeficientes de força na direção  $x$ , figura 34(a) e na direção  $y$ , figura 34(b). Estes resultados serão mais tarde incluídos nos gráficos da segunda etapa de ensaios para ilustrar o comportamento do perfil isolado submetido aos escoamentos suave e turbulento.

Os gráficos (a) e (b) da figura 34 ilustram os resultados obtidos nos ensaios com os dois perfis tipo cantoneira isolados. Neles observa-se que a diferença entre um e outro é muito pequena, quase desprezável, no sentido em que, em termos práticos, não é preciso considerar em uma norma as diferenças entre terminações de cantoneiras. Do mesmo modo tem-se a diferença entre escoamento suave e turbulento. Já nos ensaios de FLACHSBART (1932), para elementos treliçados, verificou-se que as escalas de turbulência não exerciam influência considerável.



(a)



(b)

Figura 34: Comparação entre os coeficientes de força dos modelos E1 e E2, submetidos aos escoamentos suave e turbulento em função dos ângulos de incidência do vento,  $-180^\circ$  a  $180^\circ$ , (a)  $C_{fx}$  e, (b)  $C_{fy}$

Entretanto, analisando com maior detalhe, apesar de serem valores pequenos, para alguns ângulos a diferença percentual chega a passar os 100%, como é o caso percebido nos ângulos de  $0^\circ$  e  $15^\circ$ , para o coeficiente na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ , e no ângulo de  $90^\circ$  para o coeficiente em  $x$ ,  $C_{fx}$ , ambos no escoamento suave. As maiores diferenças são observadas entre o modelo 1 submetido ao escoamento suave e o modelo 2 submetido ao escoamento turbulento.

WHITBREAD (1979), em seus ensaios com elementos isolados, percebeu que os coeficientes de força dos perfis posicionados com suas abas de encontro ao vento (neste ensaio corresponde aos ângulos de  $-90^\circ$  e  $180^\circ$ ) eram inferiores aos dos perfis com as abas contrárias à direção do vento (para este ensaio, corresponde aos ângulos de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ ). Neste experimento, salvo o modelo E1 submetido ao escoamento suave, também é possível perceber este fenômeno, vide tabela 5. Os valores dos coeficientes de força na direção dos ventos, para os ângulos de incidência de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , são maiores que os obtidos nos ângulos opostos  $180^\circ$  e  $-90^\circ$ , respectivamente.

Tabela 5: Relação do coeficientes de força com a posição do modelo

Modelo – Tipo de escoamento	Ângulo de incidência do vento			
	$0^\circ$	$180^\circ$	$90^\circ$	$-90^\circ$
	$C_{fx}$		$C_{fy}$	
<b>E1 – esc. suave</b>	2,05	-2,33	2,23	-2,33
<b>E1 – esc. turb.</b>	1,93	-1,91	1,94	-1,91
<b>E2 – esc. suave</b>	2,08	-1,75	2,14	-1,75
<b>E2 – esc. turb.</b>	1,80	-1,39	1,87	-1,39

Pode-se verificar, a variação existente entre os valores de  $C_{fx}$  nos ângulos de  $135^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $-180^\circ$  e nos valores de  $C_{fy}$ , nos ângulos de  $-45^\circ$  e  $-90^\circ$ , obtidos nos ensaios de E1 e E2. Por exemplo, com  $\alpha = 135^\circ$ , a diferença entre  $C_{fx}$  para escoamento suave ( $C_{fx}=0,31$ ) e turbulento ( $C_{fx}=0,65$ ), para o modelo E1, apesar dos valores serem pequenos, ultrapassa os 100%. Entretanto, a diferença entre os tipos de escoamentos e de terminação das bordas da cantoneira (E1-esc. suave e E2-esc. turbulento), com  $\alpha = 180^\circ$ , em termos percentuais é menor, 68%, mas em termos de valores, é praticamente 1 ponto, de  $C_{fx}=-2,33$  para  $C_{fx}=-1,39$ .

Outra situação a ser analisada, é também com os ângulos opostos de  $45^\circ$  e  $-135^\circ$ . Seus respectivos valores de coeficiente de força estão na tabela 6. Percebe-se que quando o escoamento incide diretamente no vértice interno da cantoneira,  $\alpha = -135^\circ$ , os valores dos

coeficientes de força são superiores aos adquiridos com  $\alpha = 45^\circ$  e resulta em um coeficiente de arrasto resultante superior ao valor de cada face, como COOK (1985) também já havia comentado, ver tabela 7.

Tabela 6: Coeficientes de força nas direções  $x$  e  $y$ , com ângulo de incidência do vento de  $45^\circ$  e  $-135^\circ$

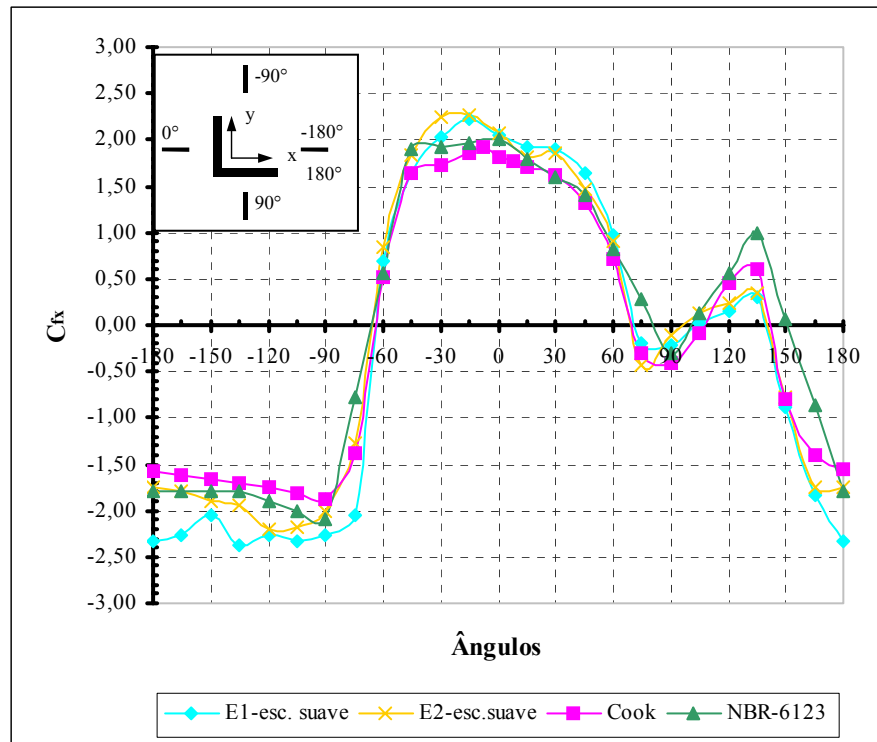
Modelo – Tipo de escoamento	Ângulo de incidência do vento			
	$45^\circ$		$-135^\circ$	
	$C_{fx}$	$C_{fy}$	$C_{fx}$	$C_{fy}$
<b>E1 – esc. Suave</b>	1,63	1,68	-2,38	-2,35
<b>E1 – esc. Turb.</b>	1,57	1,55	-2,44	-2,39
<b>E2 – esc. Suave</b>	1,47	1,45	-1,95	-2,04
<b>E2 – esc. Turb.</b>	1,47	1,44	-2,09	-2,16

Tabela 7: Coeficientes de força resultantes,  $C_{FR}$ , com ângulo de incidência do vento de  $45^\circ$  e  $-135^\circ$

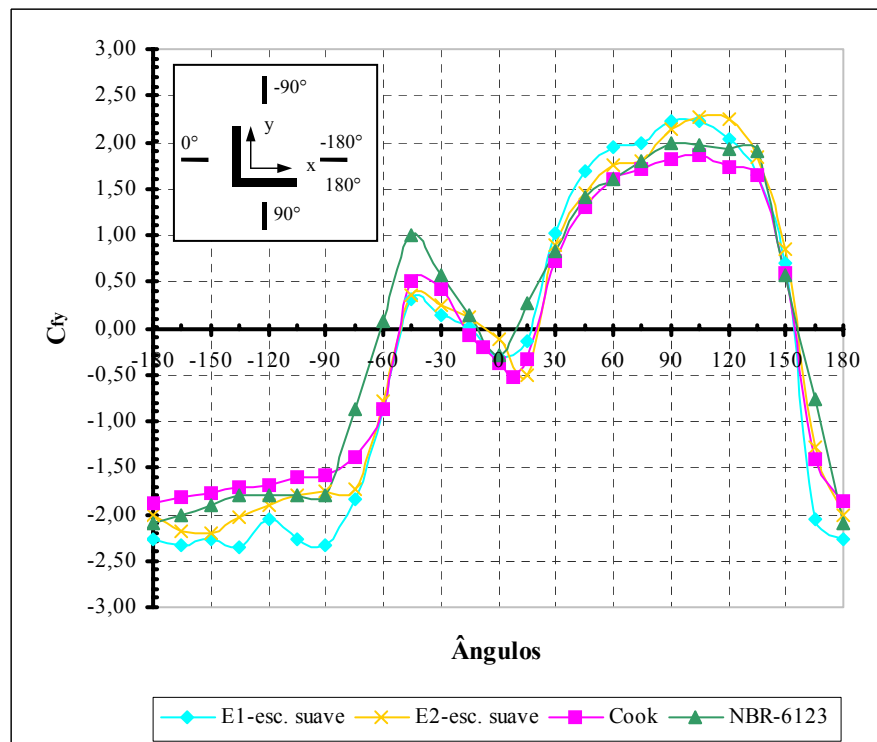
Modelo – Tipo de escoamento	Ângulos, $\alpha$	
	$45^\circ$	$-135^\circ$
	$C_{FR}$	$C_{FR}$
<b>E1 – esc. suave</b>	2,34	3,34
<b>E1 – esc. turb.</b>	2,21	3,42
<b>E2 – esc. suave</b>	2,06	2,82
<b>E2 – esc. turb.</b>	2,06	3,01

Nos gráficos da figura 35 verifica-se que os resultados obtidos nos ensaios do Túnel de Vento foram extremamente coerentes com a Norma Brasileira, NBR-6123 e com os resultados apresentados em Cook (1985). A figura 35(a) mostra os coeficientes de força na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , em função dos ângulos de incidência do vento, e a figura 35(b), os coeficientes na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ .

Novamente percebe-se que, apesar dos valores serem pequenos, para alguns ângulos as diferenças entre norma, Cook e ensaios, ultrapassa os 100%. As diferenças mais críticas estão nos ângulos de  $-75^\circ$ ,  $150^\circ$  e  $165^\circ$  e  $-60^\circ$ ,  $-75^\circ$  e  $165^\circ$ , para os coeficientes em  $x$ ,  $C_{fx}$  e em  $y$ ,  $C_{fy}$ , respectivamente, sendo que as maiores são entre o modelo 1 submetido ao escoamento suave e a norma brasileira, NBR-6123. Pelos resultados obtidos seria interessante realizar-se mais ensaios afim de verificar uma possível modificação na norma no que diz respeito aos coeficientes de força para alguns ângulos.



(a)



(b)

Figura 35: Comparação entre coeficientes de força experimentais, norma brasileira (NBR-6123) e Cook em função do ângulo de incidência do vento. (a)  $C_{fx}$ , e (b)  $C_{fy}$ .

#### 4.1.2. Coeficientes de torção ( $C_t$ )

Com os resultados obtidos nesta primeira fase de ensaios, também foi possível calcular o coeficiente de torção,  $C_t$  e representá-lo em gráfico, vide figura 36. Seguem estes, então, tendo no eixo das abscissas os ângulos de incidência do vento e no eixo das ordenadas o coeficiente  $C_t$  correspondente. A convenção adotada foi a mesma da figura 33.

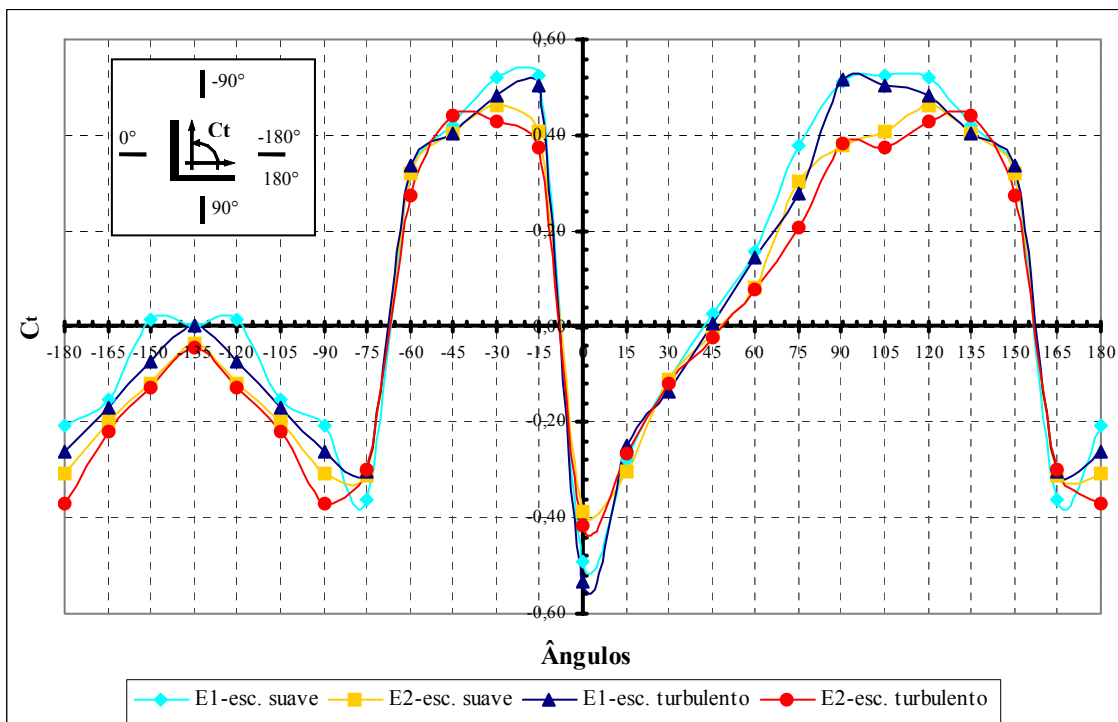


Figura 36: Comparação entre o coeficiente de torção,  $C_t$ , dos modelos E1 e E2, submetidos aos escoamentos suave e turbulento.

Na figura 36 estão os resultados dos coeficientes de torção,  $C_t$ , dos dois ensaios, E1 e E2, para os ângulos de incidência do vento ensaiados. Percebe-se que entre os ângulos de  $-75^\circ$  e  $-60^\circ$ ,  $-15^\circ$  e  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e depois ainda entre  $150^\circ$  e  $165^\circ$  há reversão no sentido da torção.

Verifica-se também que principalmente nos ângulos de  $-15^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $105^\circ$  a cantoneira do ensaio 2, E2, obteve um melhor desempenho no que se refere à torção. Já nos ângulos  $-180^\circ$ ,  $-90^\circ$  e  $180^\circ$  a cantoneira do ensaio 1, E1, em especial a submetida ao escoamento suave, obteve um menor valor no coeficiente de torção.

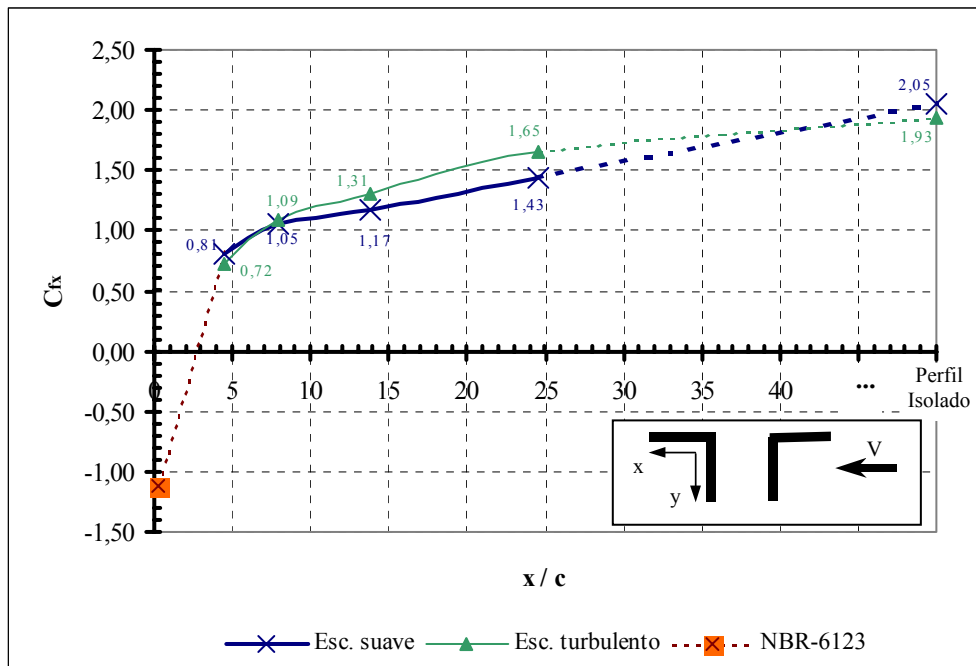
## 4.2. ETAPA 2: INTERAÇÃO ENTRE MODELOS

Na segunda etapa dos experimentos, verificou-se a influência que um perfil a barlavento exerce sobre outro a sotavento. Também foram confeccionados gráficos ilustrando os coeficientes de força e de torção calculados através dos resultados obtidos nos ensaios com diversos afastamentos entre os modelos. Estes afastamentos variaram entre aproximadamente 4 a 25 vezes a dimensão da aba da cantoneira,  $c$ , até o valor obtido nos primeiros ensaios com o perfil isolado. Experimentos com distâncias maiores entre os perfis não foram realizados devido à limitações do Túnel de Vento do LAC no que se refere às dimensões do mesmo. O trecho representado nos gráficos por um linha tracejada justifica-se justamente por não se saber o verdadeiro comportamento desde o último afastamento ensaiado até os valores de um perfil isolado. Por outro lado entre os afastamentos  $x/c=0$ , onde um perfil estaria encostado no outro, e  $x/c=4,43$ , que foi o primeiro valor de afastamento ensaiado, pois devido a influência da esteira do perfil a barlavento, não se sabe o comportamento que as curvas destes gráficos terão. Por este motivo a linha que traça a curva é interrompida.

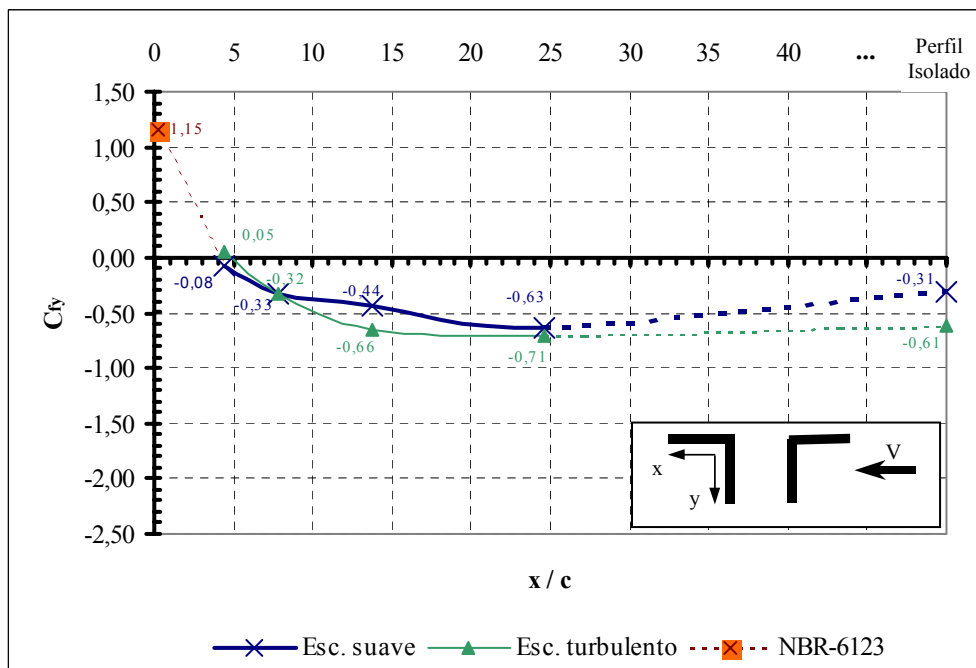
### 4.2.1. Coeficientes de força ( $C_f$ )

Na figura 37 estão os coeficientes de força em função do afastamento ( $x/c$ ) para o perfil na posição 1, submetido aos escoamentos suave e turbulento, correspondentes a cada afastamento experimentado. Na figura 37(a) encontram-se os coeficientes de força na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , e em (b) os coeficientes na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ . Esta situação corresponde a posição de  $0^\circ$  para o caso do perfil isolado.

Entre  $x/c=4,43$  e  $x/c=0$ , obteve-se os coeficientes de força nas direções  $x$  e  $y$ , para  $x/c=0,22$ . Os valores destes coeficientes, bem como do afastamento, foram extraídos da tabela 12 da NBR-6123, do modelo composto por duas cantoneiras. Através da diferença entre os coeficientes do perfil isolado e do conjunto, determinou-se os respectivos valores de  $C_{fx}$  e  $C_{fy}$ . Percebe-se a brusca mudança na tendência das curvas, tanto na figura 37(a), quanto na 37(b). Estes são valores de norma e para que seja comprovada esta característica é necessário se fazer mais ensaios, com distâncias menores.



(a)



(b)

Figura 37: Afastamentos ( $x/c$ ) x coeficientes de força, com modelo na posição 1, submetido aos escoamentos suave e turbulento, sendo que em (a)  $C_{fx}$ , e em (b),  $C_{fy}$

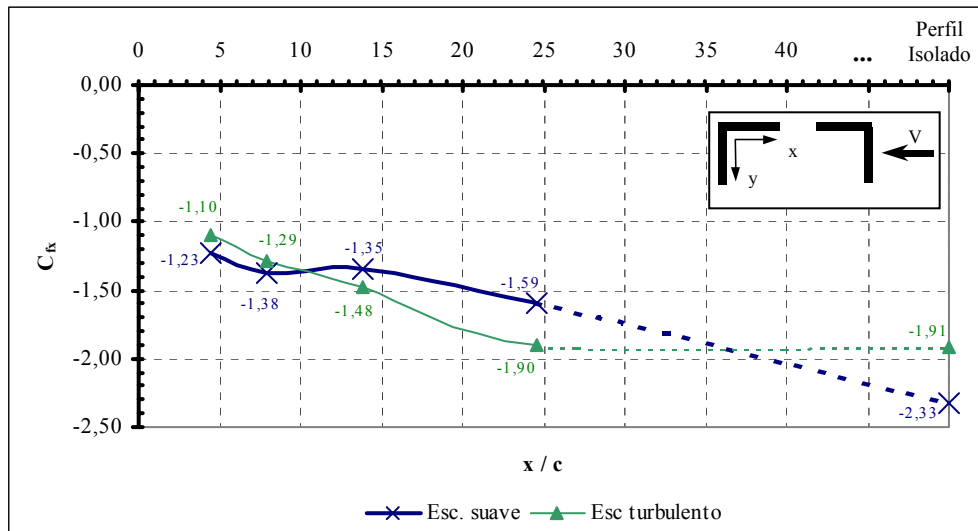


Como um todo, as diferenças entre os dois tipos de escoamento não são muito grandes. Porém, ao analisar mais detalhadamente, verifica-se que para alguns afastamentos, por exemplo para o perfil isolado, o coeficiente na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ , figura 37(b), apesar da diferença entre escoamentos ser mínima, ela chega a quase 100%, de  $-0,31$  para  $-0,61$ . No caso dos coeficientes na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ , a influência do tipo de escoamento é maior. O escoamento turbulento tende a apresentar disparidades não muito grandes, enquanto que as disparidades são maiores no escoamento suave, ou seja, a influência do efeito de proteção é maior.

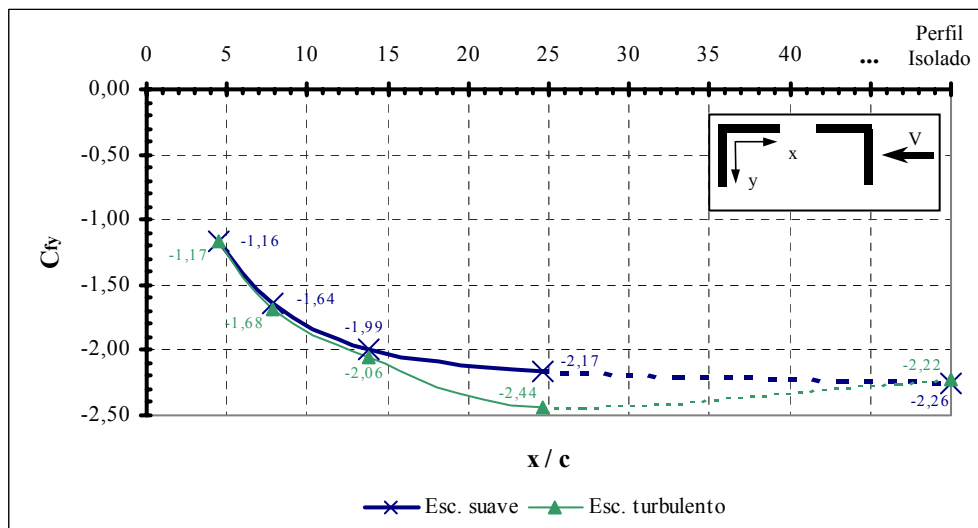
Também é possível visualizar a influência de proteção que a cantoneira de barlavento exerce sobre a de sotavento. A medida que o valor do afastamento ( $x/c$ ) entre as cantoneiras aumenta, o efeito de proteção diminui, tendendo a um coeficiente de força como se o perfil estivesse isolado. Existe, então, um determinado afastamento para o qual o coeficiente de força do perfil de sotavento será igual ao de um perfil isolado. O valor exato desta distância não pôde ser determinado nestes ensaios devido à limitações experimentais. A distância máxima ensaiada entre os perfis foi de aproximadamente 25 vezes a dimensão da aba da cantoneira, e é por este motivo que depois deste valor a linha do gráfico deixa de ser contínua e passa a ser apresentada tracejada. Comparando os gráficos do coeficiente na direção  $x$ ,  $C_{fx}$  e na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ , observa-se que o efeito de proteção para  $C_{fx}$  foi benéfico, houve redução do coeficiente com a proteção. O mesmo não ocorreu para o coeficiente  $C_{fy}$ , especialmente para o escoamento suave, pois pelos resultados obtidos para o perfil isolado, o efeito provocado com um perfil a barlavento foi prejudicial a partir da distância de aproximadamente 14 vezes a dimensão da aba da cantoneira.

Na figura 38 visualiza-se os valores obtidos para os coeficientes de força nos ensaios com os perfis na posição 2, submetidos aos escoamentos suave e turbulento. Na figura 38(a) estão representados os  $C_f$  na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , e na figura 38(b), os valores referentes à direção  $y$ ,  $C_{fy}$ . Para o caso do perfil ensaiado isoladamente, corresponde ao ângulo de  $180^\circ$ .

No gráfico que traça a curva formada pelos pontos que constituem os coeficientes na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , figura 38(a), os valores obtidos foram contrários aos ilustrados no ensaio anterior, para a posição 1, pois os dois perfis estão em posições contrárias, assim como seus eixos  $x$ . Percebe-se também que as diferenças entre os dois tipos de escoamento continuam sendo amenas.



(a)



(b)

Figura 38: Afastamentos ( $x/c$ ) x coeficientes de força, com modelo na posição 2, submetido aos escoamentos suave e turbulento, sendo que em (a)  $C_{fx}$ , e em (b),  $C_{fy}$

Novamente não se pode afirmar o comportamento da curva entre a origem  $x/c=0$  e o primeiro afastamento ensaiado,  $x/c=4,43$ . Assim como também não se sabe com qual afastamento o perfil de barlavento deixa de proteger o de sotavento, todavia, o fenômeno do efeito de proteção segue. Percebe-se um aumento mais significativo nos valores dos coeficientes na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ , ao serem comparados com os valores obtidos nos ensaios para da posição 1. Porém, percebe-se na figura 38(b), que no escoamento turbulento, para um afastamento ( $x/c$ ) de aproximadamente 25 vezes a dimensão da aba da cantoneira ensaiada, o

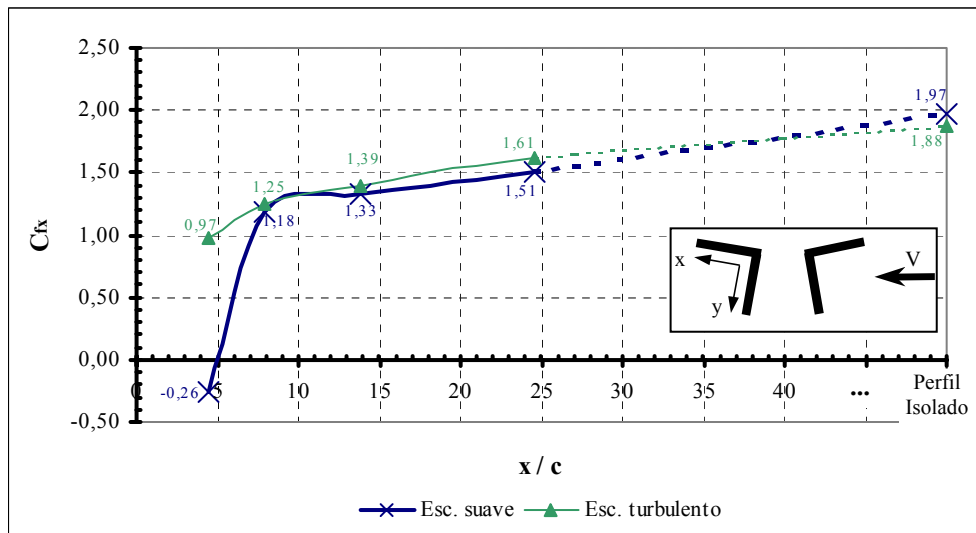
efeito de proteção mostrou-se prejudicial, pois o valor de  $C_{fy}$  obtido para o perfil isolado, com as mesmas condições, foi inferior ao resultado para esta distância.

Nos ensaios da posição 3, figura 39, o perfil também foi submetido ao escoamento suave e depois ao turbulento. A situação assemelha-se à da posição 1, contudo os perfis possuem uma inclinação de  $10^\circ$ , correspondendo aos resultados obtidos com este ângulo para o caso do perfil ensaiado isoladamente. Este ensaio, na prática, representa a situação dos elementos de barra de uma torre, que possuem uma certa inclinação em relação à vertical.

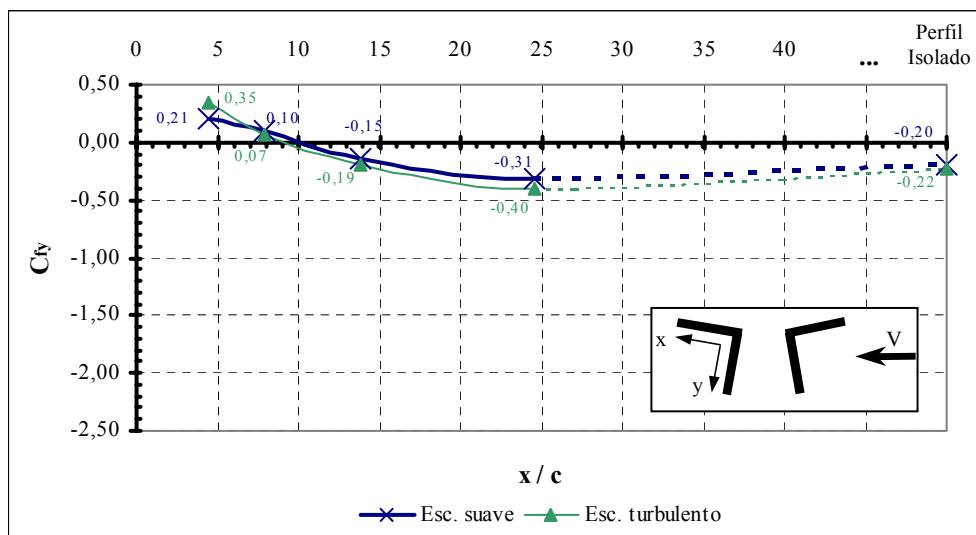
Nestes gráficos já percebe-se uma reversão no efeito de proteção. A diferença entre o escoamento suave e turbulento foi marcante para o primeiro afastamento,  $x/c=4,43$ , para o coeficiente  $C_{fx}$ , figura 39(a), nos demais pontos a diferença foi desprezável.

A influência quanto à proteção continua visível, principalmente para os coeficientes  $C_{fy}$ , para os quais continua sendo benéfica. Infelizmente não se pode determinar em qual ponto o perfil de sotavento deixa de sofrer influência.

Já a curva com os coeficientes  $C_{fy}$ , figura 39(b), inicia com valores positivos nos dois primeiros afastamentos e depois passa para valores negativos, devido a efeitos aerodinâmicos. Para um melhor entendimento deve-se estudar a esteira. Novamente o efeito de proteção deixa de ser benéfico, pois os coeficientes  $C_{fy}$ , para o perfil isolado, são menores que os obtidos com um afastamento de aproximadamente 25.



(a)



(b)

Figura 39: Afastamentos ( $x/c$ ) x coeficientes de força, com modelo na posição 3, submetido aos escoamentos suave e turbulento, sendo que em (a)  $C_{fx}$ , e em (b),  $C_{fy}$

#### 4.2.1.1. Comparação com valores da NBR-6123

A figura 8 da NBR-6123 fornece o fator de proteção para dois ou mais reticulados planos paralelos igualmente afastados. Este gráfico, porém, contém valores de índice de área exposta variando entre 0 e 1, este último, referente à placas, usado neste trabalho, para os perfis isolados. A questão é: qual a possibilidade de se utilizar estes dados, ou seja, este

Tanise Klein – Dissertação de Mestrado – Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2004

gráfico da norma fornece valores apropriados do fator de proteção também para perfis paralelos?

O método indicado pela norma diz que para se obter a força no conjunto de barras, deve-se saber o coeficiente de arrasto do reticulado à barlavento e corrigir este valor multiplicando-o por um fator de proteção, de acordo com o índice de área exposta e afastamento. O resultado da soma desta multiplicação com o coeficiente de arrasto do reticulado à barlavento é o coeficiente de arrasto do conjunto. Este cálculo está representado pela equação 13.

Utilizando-se a figura 8 da NBR-6123, figura 11 deste trabalho, obteve-se valores de fator de proteção,  $\eta$ , sendo  $(e/h)=(x/c)$  e índice de área exposta,  $\phi=1$ , para os afastamentos ensaiados na segunda fase dos ensaios. Posteriormente, multiplicou-se este valor de  $\eta$  pelo coeficiente de força da barra isolada obtido na primeira fase de ensaios, resultando no coeficiente de força de um perfil protegido. Também utilizou-se o gráfico sugerido por FLACHSBART (1932), figura 10, para obter-se outros valores de fator de proteção e os coeficientes de força, da mesma maneira descrita acima.

Com estes dados, confeccionou-se gráficos comparando os valores obtidos nestes cálculos conforme a equação 13, com os valores dos coeficientes de arrasto obtidos na segunda fase de ensaios, valores estes referentes à barras submetidas ao efeito de proteção. Incluiu-se, também, os valores dos coeficientes de arrasto para barras isoladas, indicados pela norma brasileira, multiplicados pelos respectivos fatores de proteção.

Existe, porém, mais um detalhe a ser considerado. A norma informa valores para o fator de proteção para reticulados iguais, com mesmo ângulo de incidência do vento, o que não acontece nos ensaios da segunda etapa. Verificou-se, então, os valores de coeficientes de arrasto para os perfis protegidos para todas as opções de posições possíveis, em relação à segunda etapa dos ensaios.

Na figura 40 estão os valores dos coeficientes de força na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , multiplicados por um fator de proteção encontrados segundo o método recomendado por FLACHSBART, “E. Flachsbar”, os encontrados na segunda fase dos ensaios, com os perfis na posição 1, P1, para escoamento suave (S), “ $C_{fx}$  P1-esc. S”, e turbulento (T), “ $C_{fx}$  P1-esc. T”, os valores indicados pela norma para perfis isolados e multiplicados por fator de proteção, “ $C_{fx}$  (NBR-6123) .  $\eta$ ” e os resultados obtidos na primeira fase dos ensaios, para o modelo E1, com ângulo

de incidência do vento à  $0^\circ$ , conforme posição do perfil localizado à sotavento, submetido aos escoamentos suave (S), “ $C_{fx}$  (E1- $0^\circ$ -esc. S) .  $\eta$ ” e turbulento (T), “ $C_{fx}$  (E1- $0^\circ$ -esc. T) .  $\eta$ ”. Na figura seguinte, figura 41, encontram-se os mesmos coeficientes, porém considerando os resultados obtidos na primeira fase dos ensaios, para o modelo E1, a posição do perfil localizado à barlavento, ou seja, com ângulo de incidência do vento de  $180^\circ$ , submetido aos escoamentos suave (S), “ $C_{fx}$  (E1- $180^\circ$ -esc. S) .  $\eta$ ” e turbulento (T), “ $C_{fx}$  (E1- $180^\circ$ -esc. T) .  $\eta$ ”.

A diferença entre as figuras 40 e 41 é mínima, com exceção da curva formada pelos valores dos coeficientes de força do modelo E1, submetidos ao escoamento suave (S). Na figura 40, onde as curvas obtidas com os coeficientes de arrasto multiplicados pelos fatores de proteção consideram os dois perfis conforme posição do perfil de sotavento, ou seja, com ângulo de incidência do vento de  $0^\circ$  foram levemente mais próximas aos resultados da segunda etapa dos ensaios para os afastamentos  $x/c=4,43$  e  $x/c=7,87$ , para a posição 1. Entretanto, para afastamentos maiores ( $x/c=13,78$  e  $x/c=24,61$ ) a figura 41 apresentou valores mais aproximados. Os valores dos ensaios da primeira fase e os indicados pela norma também foram mais coerentes entre si no gráfico da figura 40. Os resultados obtidos através do método de Flachsbart apresentaram valores mais próximos daqueles adquiridos para os perfis ensaiados na posição 1, P1, na figura 40. Já na figura 41 a curva que representa o método de Flachsbart está entre as curvas dos dois ensaios deste trabalho.

Nas figuras 42 e 43 estão os coeficientes de arrasto, para os mesmos casos das figuras acima, porém na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ . Os valores representados na figura 42, referentes aos perfis posicionados conforme o perfil localizado à sotavento, com  $\alpha=0^\circ$ , estão visivelmente mais coerentes com as curvas obtidas para a posição 1. As curvas encontram-se muito próximas umas das outras, chegando a coincidir os valores de  $C_{fy}$  dos últimos afastamentos com os valores encontrados nos ensaios da etapa 1, multiplicados pelos fatores de proteção, o que não ocorre na figura 43, com ângulo de incidência do vento de  $180^\circ$ . Os valores obtidos utilizando o método de Flachsbart também estão mais coerentes com os resultados experimentais na figura 42.

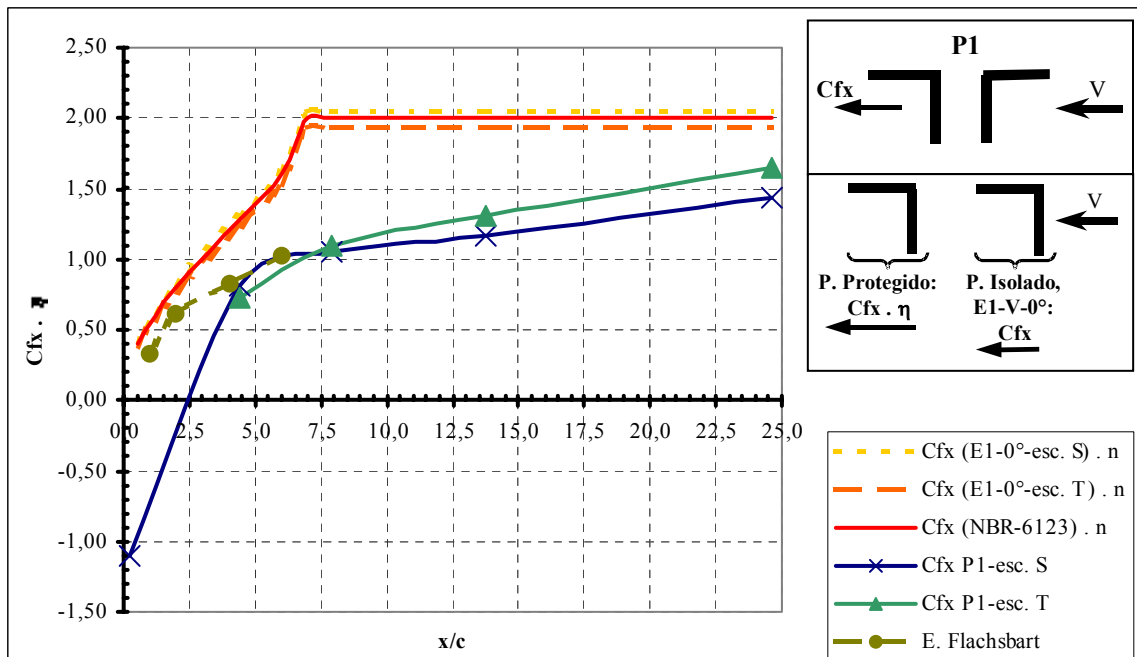


Figura 40: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 1, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=0^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção.

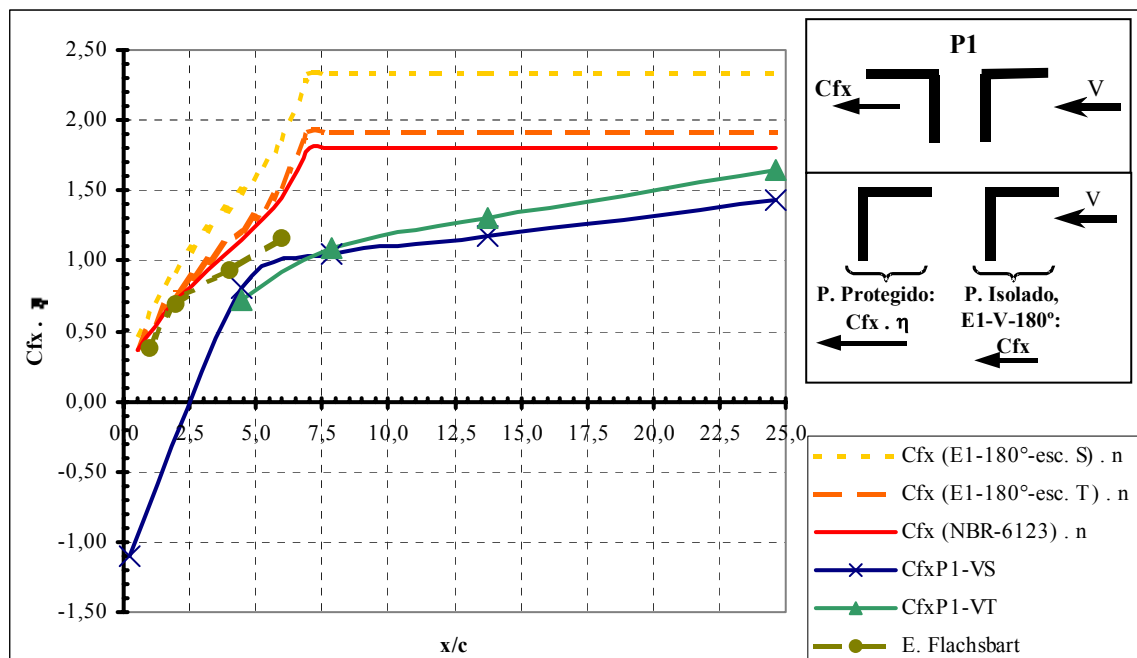


Figura 41: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 1, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=180^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção.

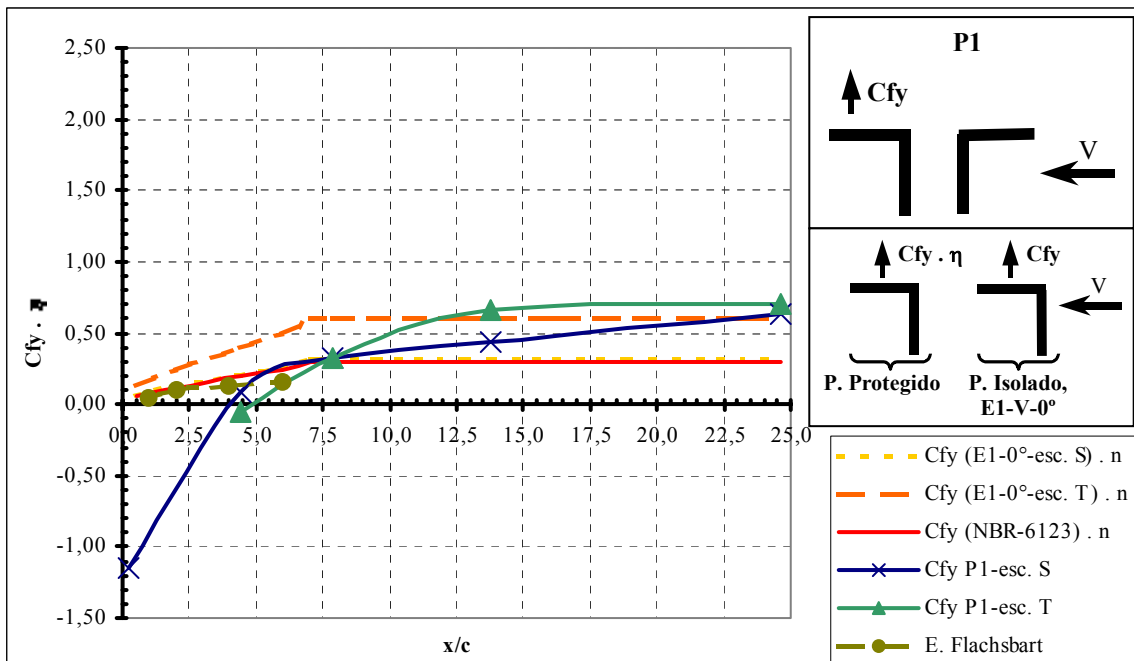


Figura 42: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 1, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=0^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção.

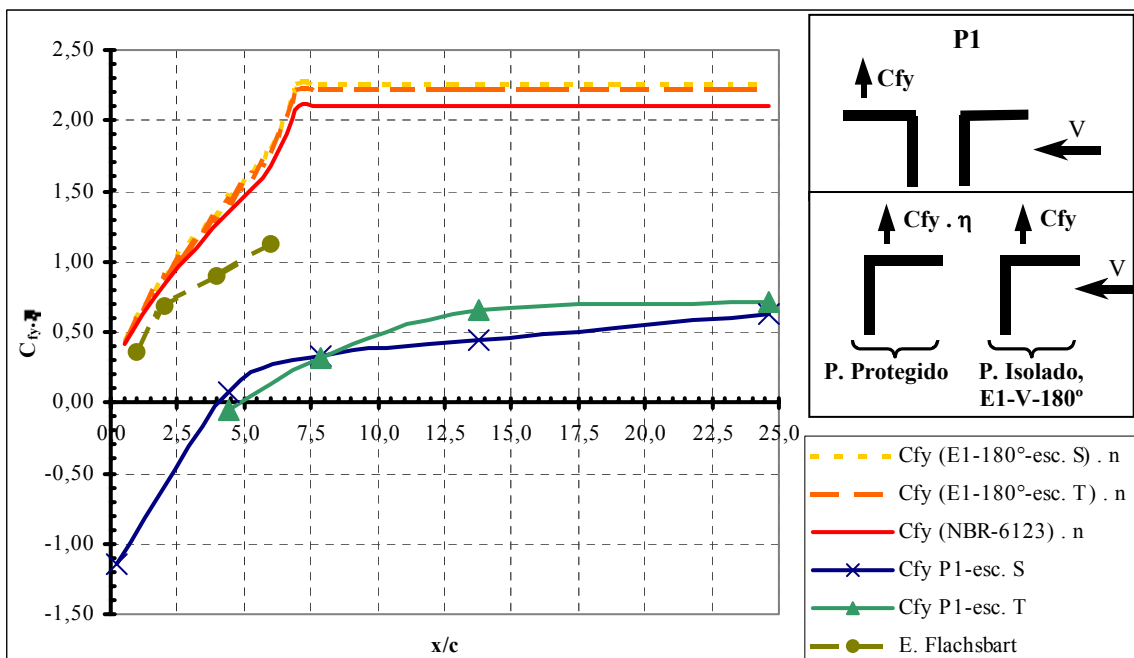


Figura 43: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 1, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=180^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção.



Nas figuras que seguem, figuras 44 a 47 estão as comparações dos mesmos resultados, mas com os perfis na posição 2, P2, primeiramente em relação aos coeficiente de força na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , e depois na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ .

Comparando os gráficos das figuras 44 e 45, apesar de serem muito parecidos, as curvas da figura 45, com exceção da curva que representa o coeficiente de força do modelo E1, submetido ao escoamento suave (S), multiplicado pelo fator de proteção, estão com os valores mais próximos aos obtidos no ensaio com os perfis na posição 2, P2. Inclusive os valores que representam o método de Flachsbart e da norma brasileira estão mais coerentes com as demais curvas. Quanto maior o valor do afastamento entre os perfis, mais as curvas se aproximam.

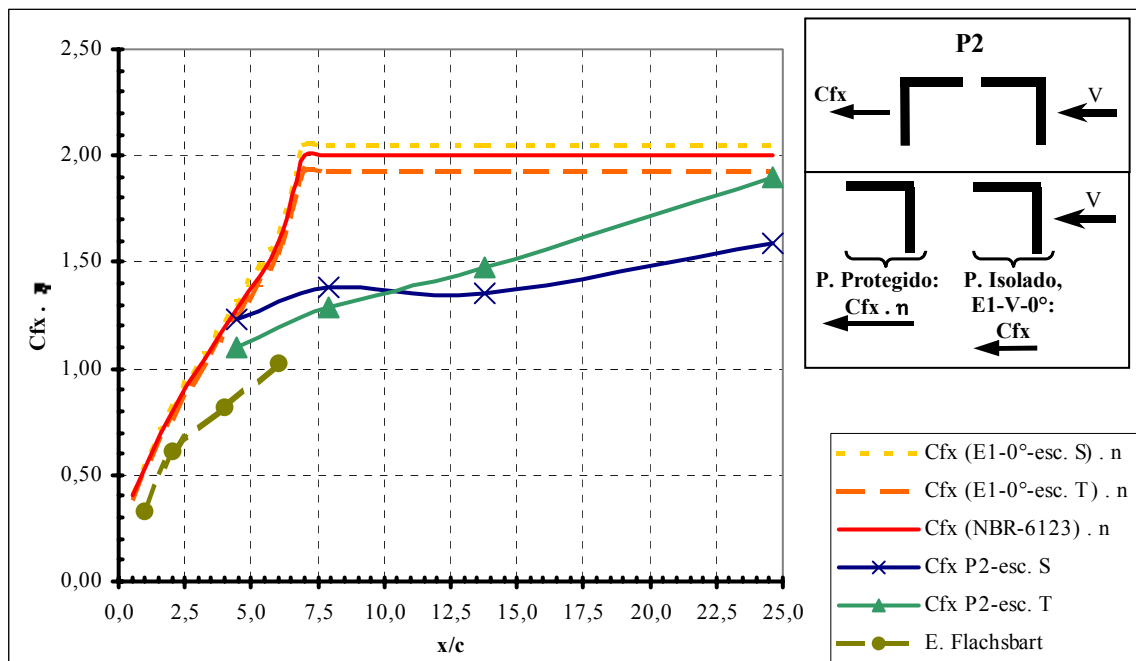


Figura 44: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 2, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=0^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção.

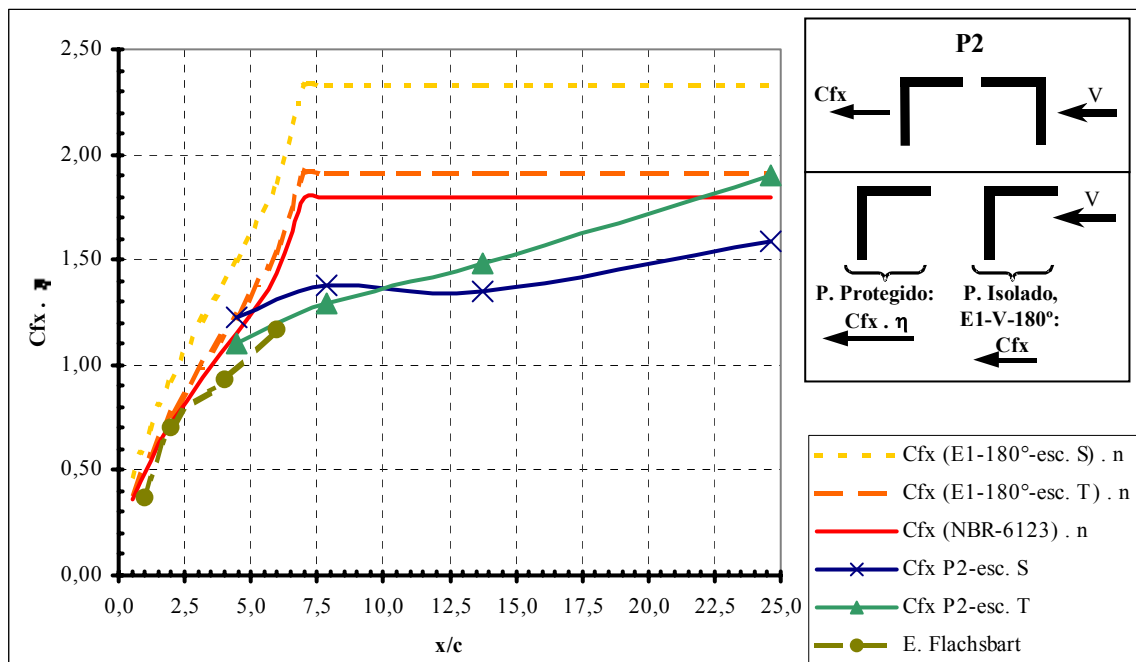


Figura 45: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 2, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=180^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção.

Nas figuras 46 e 47 estão as curvas que representam os coeficientes de força na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ , multiplicados pelos respectivos fatores de proteção, bem como os resultados obtidos nos ensaios, para a posição 2. Ao analisar os gráficos, fica evidente que a posição que melhor representa os valores obtidos experimentalmente, na posição P2, é com ângulo de incidência do vento de  $180^\circ$ , ou seja, com os perfis na mesma posição que o localizado à sotavento. Com exceção do afastamento  $x/c=24,61$  (escoamento turbulento), os demais estão todos abaixo dos valores obtidos para as outras curvas. Os valores obtidos pelo método de Flachsbart são menores aos encontrados nos ensaios. Percebe-se, novamente, que as curvas da figura 47 acabam todas se aproximando, na medida em que os valores de  $x/c$  aumentam, havendo um afastamento maior entre as curvas somente em  $x/c=7,87$ .

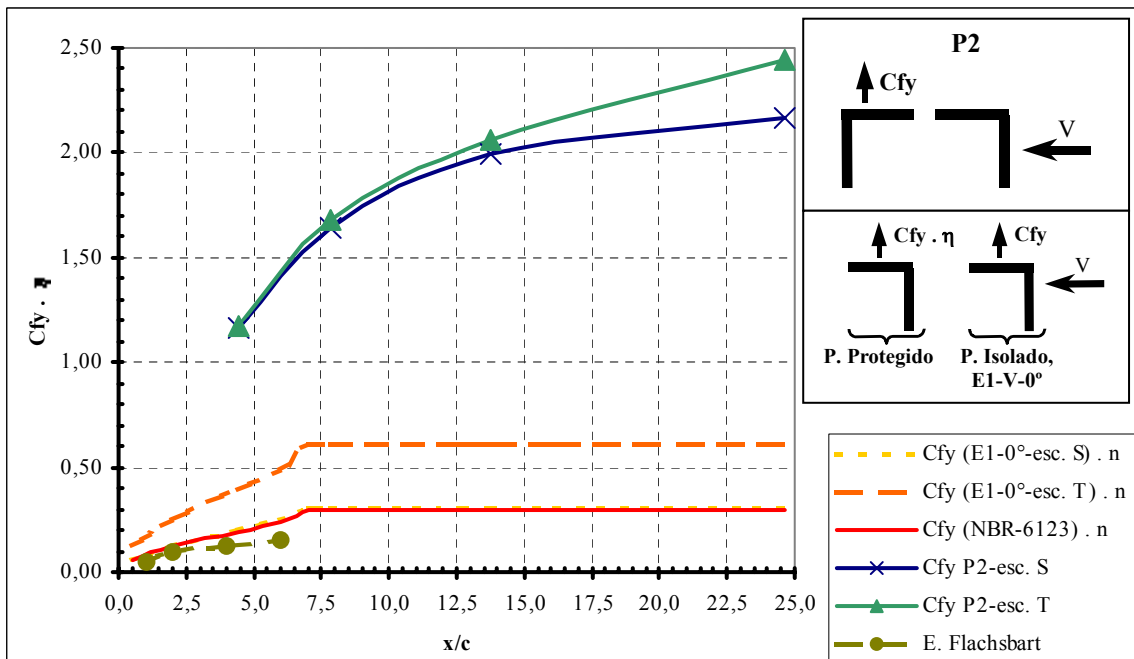


Figura 46: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 2, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=0^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção.

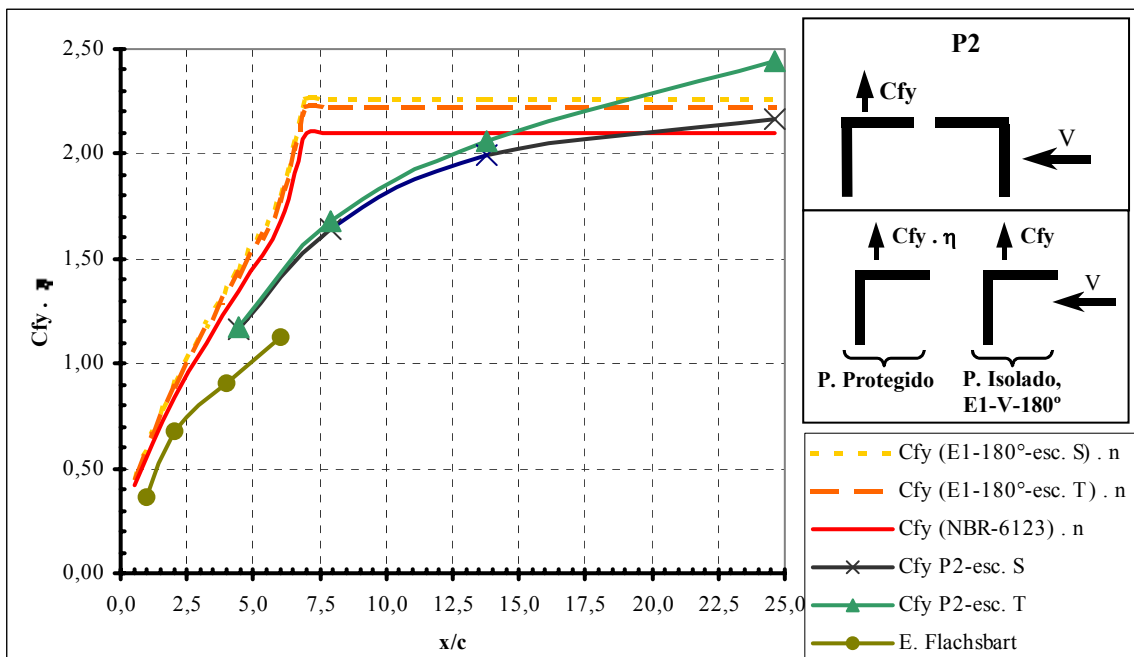


Figura 47: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 2, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=180^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção.

Por fim, os gráficos que contêm a comparação entre os coeficientes de força obtidos experimentalmente para a posição 3, P3, e os demais métodos, estão nas figuras 48 a 51. Para estes, a posição referente ao perfil de sotavento na posição P3 é a mesma do modelo E1, com ângulo de incidência do vento à  $10^\circ$ , ensaiado na primeira fase isoladamente. A posição do perfil de barlavento em P3, refere-se ao modelo E1, submetido à um vento com ângulo de incidência de  $-170^\circ$ , conforme pode ser visualizado na figura 33.

As figuras 48 e 49 referem-se aos coeficientes de força na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ . O gráfico que contém os valores dos coeficientes de força do perfil protegido na mesma posição do perfil localizado à sotavento na posição 3, P3, é o que possui os valores mais próximos aos adquiridos nos ensaios da etapa 2, figura 48. Novamente ao multiplicar os coeficientes de força dos perfis isolados pelos fatores de proteção indicados pela NBR-6123, obteve-se valores superiores aos obtidos experimentalmente e conforme aumenta o valor de  $x/c$ , as curvas se aproximam. Seguindo o método de Flachsbart, é na figura 49 que seus valores praticamente coincidem com os da posição P3, submetidos ao escoamento turbulento.

Para as figuras contendo os valores dos coeficientes de força na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ , as curvas contendo os valores referentes à um perfil posicionado conforme o perfil de sotavento da posição P3 obtiveram resultados muito próximos aos obtidos experimentalmente. Percebe-se, entretanto, que para os dois primeiros afastamentos do ensaio P3 os valores dos coeficientes de força na direção  $y$  são negativos. Utilizando-se o método indicado por Flachsbart, os valores foram muito próximos aos indicados pela norma brasileira. Com exceção do último afastamento, os demais resultados experimentais possuem todos valores inferiores aos calculados seguindo indicação da NBR-6123.

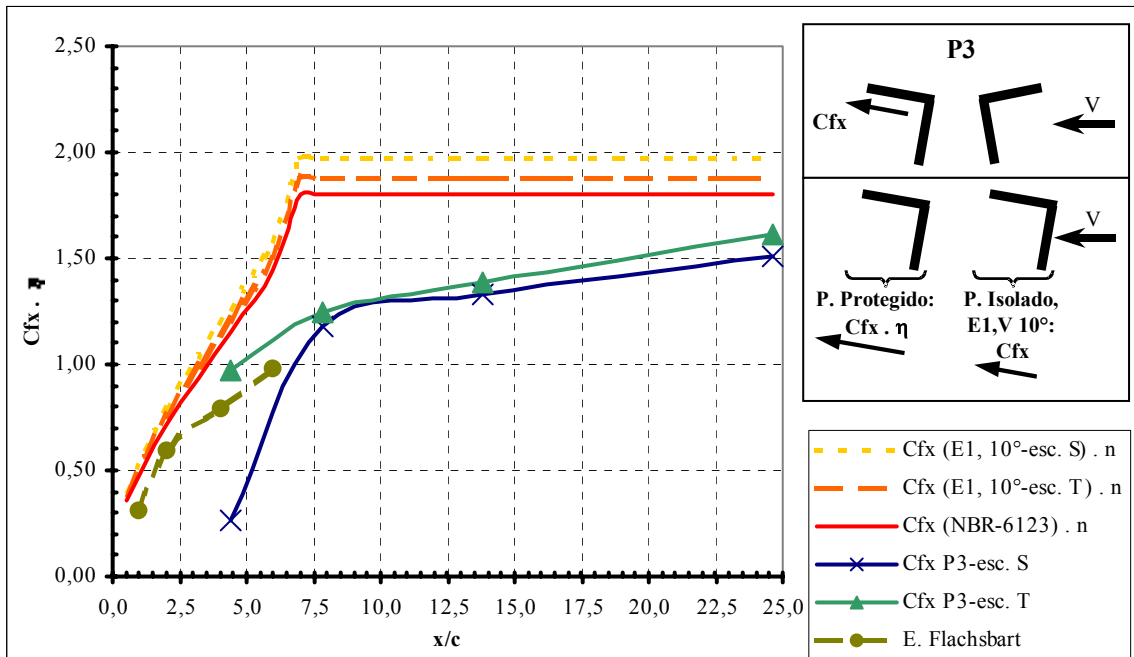


Figura 48: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 3, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=10^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção.

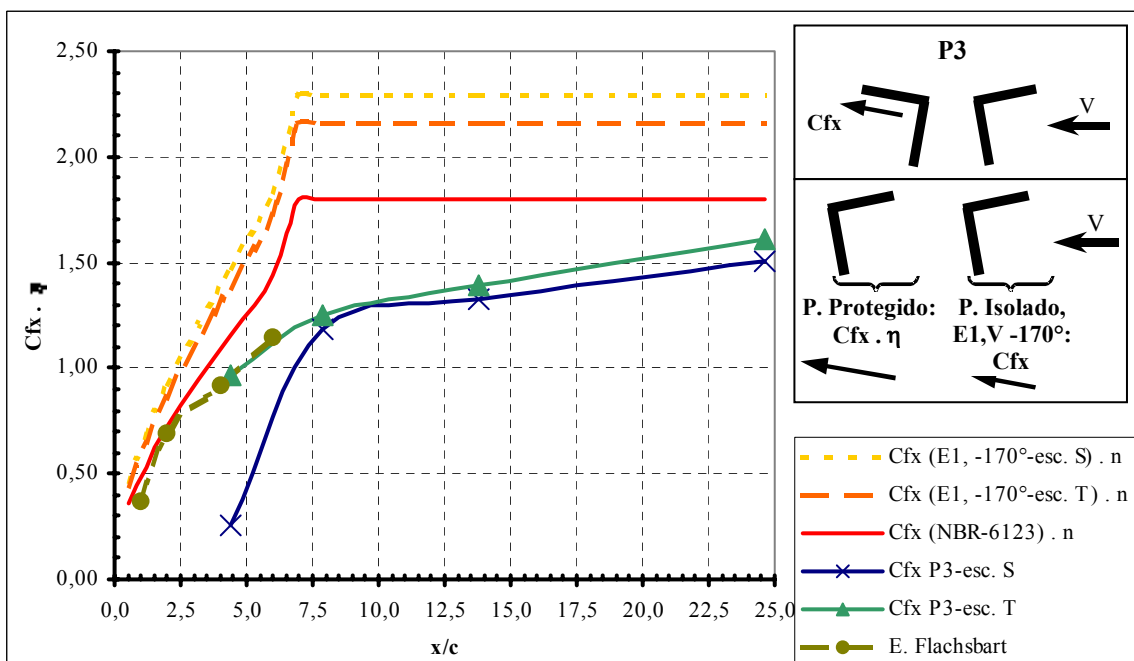


Figura 49: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 3, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=-170^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção.

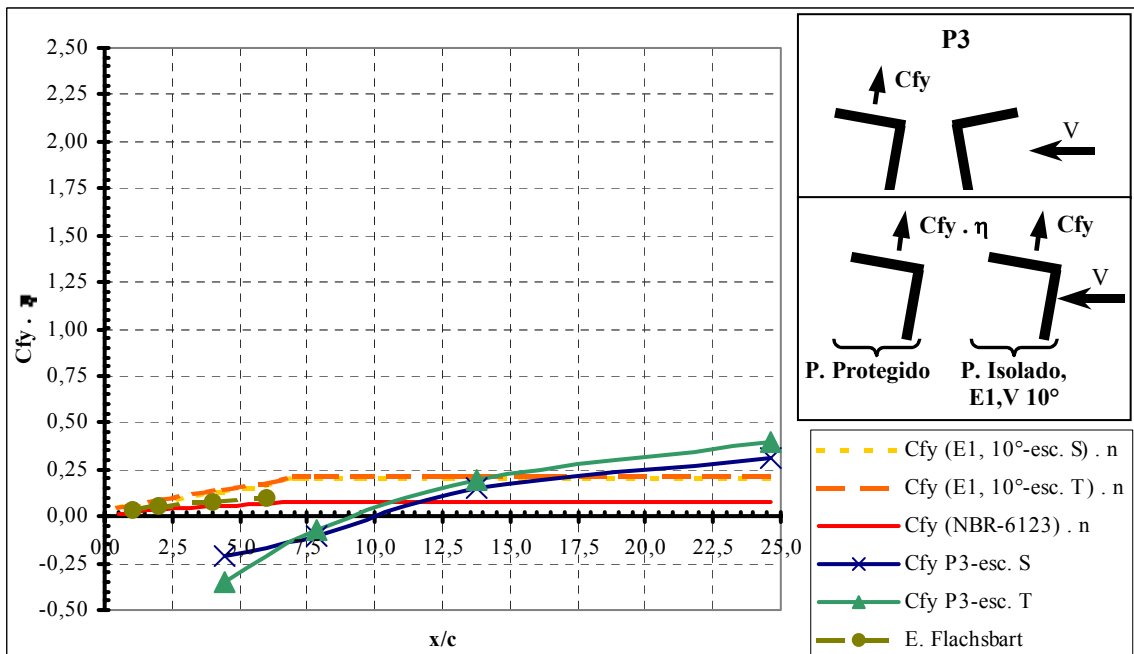


Figura 50: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 3, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=10^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção.

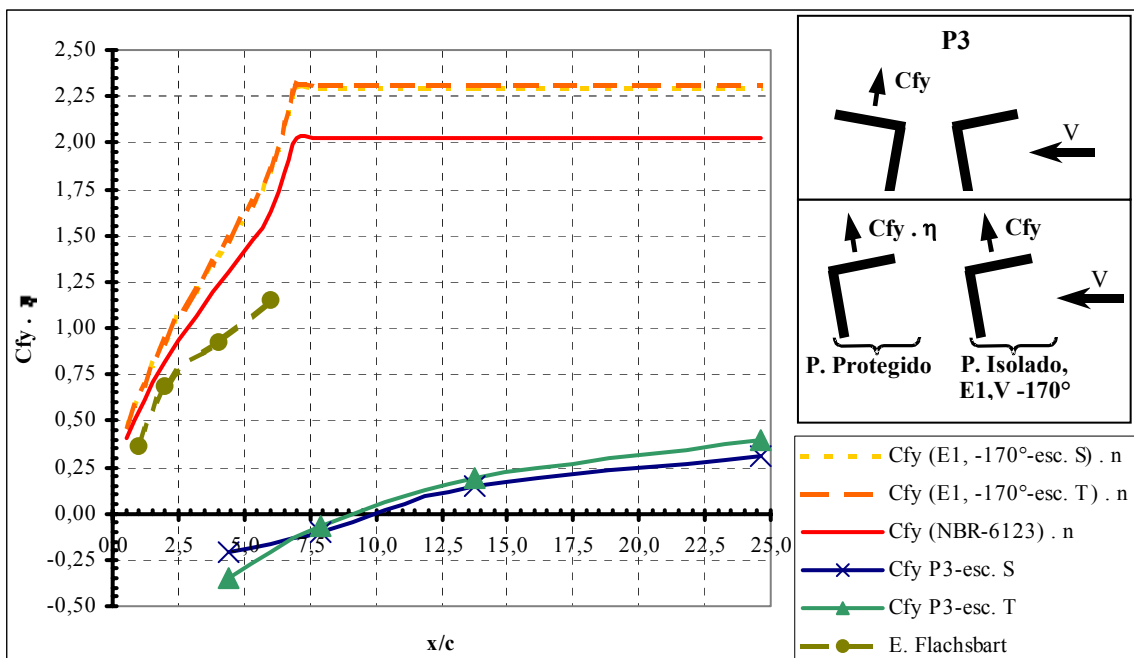


Figura 51: Comparação entre os coeficientes de arrasto na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ , obtidos na segunda etapa de ensaios, para a posição 3, e os coeficientes de perfis isolados (com  $\alpha=-170^\circ$ ), da primeira etapa dos ensaios, da NBR-6123 e dos ensaios de Flachsbart, multiplicados por fatores de proteção.

Em geral, verifica-se facilmente que a melhor opção para ser comparada com os perfis ensaiados na segunda etapa dos ensaios é sempre considerando um conjunto com duas barras posicionadas igualmente, com ângulo de incidência do vento conforme o perfil localizado à sotavento das posições P1, P2 e P3. Os valores obtidos experimentalmente, principalmente para os valores de afastamentos intermediários ( $x/c=7,87$  e  $x/c=13,78$ ), são menores que os calculados.

#### 4.2.2. Coeficientes de torção ( $C_t$ )

Através dos resultados obtidos nos ensaios também foi possível calcular o coeficiente de torção para cada afastamento e para o perfil ensaiado isoladamente na primeira fase de ensaios. Nestes próximos gráficos, então, no eixo horizontal estão as distâncias ensaiadas e no vertical o coeficiente de torção,  $C_t$ , correspondente. Lembrando que a convenção adotada foi a mesma da ilustrada na figura 33.

As mesmas observações podem ser feitas no que diz respeito ao comportamento da curva entre a origem,  $x/c=0$ , e o primeiro afastamento ensaiado,  $x/c=4,43$ , e entre o último afastamento,  $x/c=24,61$ , até o perfil isolado.

O gráfico da figura 52 representa o coeficiente de torção para os diversos afastamentos ensaiados na posição 1. Observa-se que, também para o coeficiente de torção houve uma redução, ou seja, ocorreu o fenômeno de proteção. A diferença entre os escoamentos suave e turbulento se apresentou um pouco maior no afastamento de aproximadamente 25, onde o coeficiente de torção com escoamento suave foi em torno de 20% menor que o turbulento.

Já para a posição 2, figura 53, apesar de não aparentar, a diferença entre os escoamentos suave e turbulento, para o afastamento de aproximadamente 8, segunda distância ensaiada, foi de 50%. Os resultados deste ensaio mostram que o efeito de proteção foi prejudicial para alguns afastamentos, tendo coeficiente de torção,  $C_t$ , maior que para o perfil isolado.

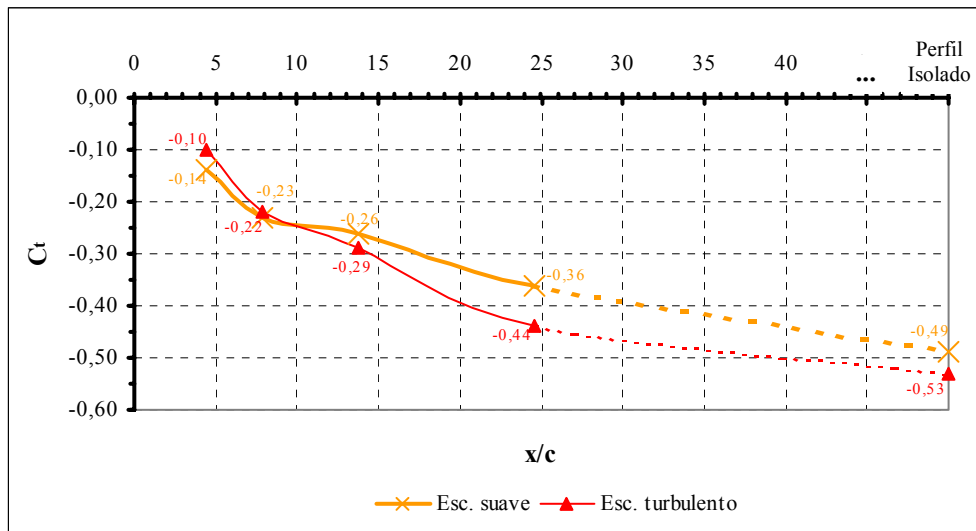


Figura 52: Afastamento ( $x/c$ ) x coeficiente de torção,  $C_t$ , para os escoamentos suave e turbulento, aos quais foi submetido o perfil na posição 1.

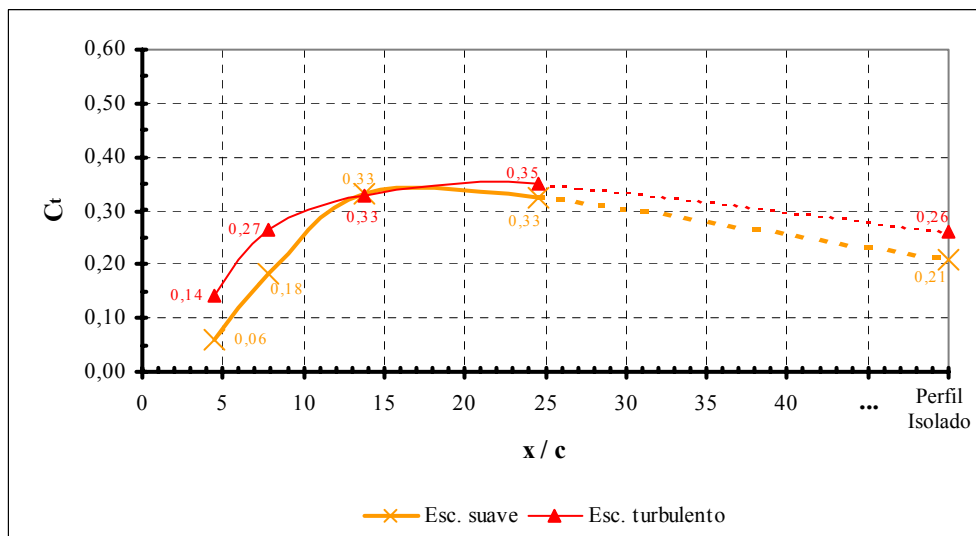


Figura 53: Afastamento ( $x/c$ ) x coeficiente de torção,  $C_t$ , para os escoamentos suave e turbulento, aos quais foi submetido o perfil na posição 2.

O último gráfico, figura 54, representa os valores de  $C_t$  ao longo dos afastamentos ensaiados para o perfil na posição 3. Percebe-se facilmente que a maior disparidade encontra-se logo no primeiro afastamento, onde para o escoamento suave obteve-se uma torção positiva enquanto que para o escoamento turbulento, uma negativa. O efeito de troca de sinais



observado no gráfico do coeficiente de força volta a aparecer. Já o fenômeno do efeito de proteção permanece evidente.

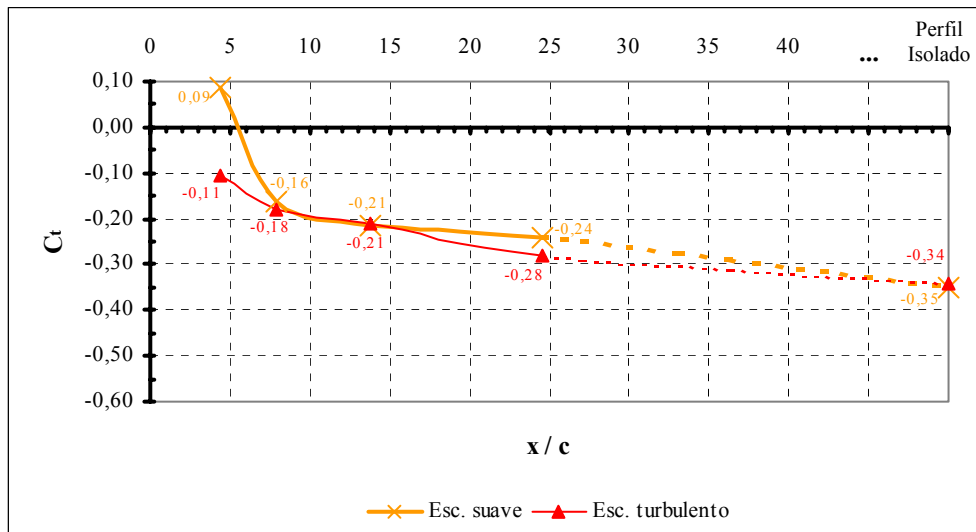


Figura 54: Afastamento ( $x/c$ ) x coeficiente de torção,  $C_t$ , para os escoamentos suave e turbulento, aos quais foi submetido o perfil na posição 3.

### 4.3. ETAPA 3: MÓDULOS DE TORRES TRELICADAS

Esta etapa do trabalho apresenta os resultados referentes ao estudo em túnel de vento de modelos seccionais de torres treliçadas. Esta fase corresponde à determinação dos coeficientes de arrasto para trechos de módulos de torres com seção transversal quadrada e triangular, sendo os montantes constituídos por perfis abertos (arestas vivas).

Foram feitos ensaios com quatro diferentes valores de velocidades de escoamento, com ângulos de incidência do vento a  $0^\circ$  e  $45^\circ$  para secção quadrada e  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $180^\circ$  para secção triangular e foram utilizadas duas áreas de referência diferentes (Área 1 ( $A_1$ ) = somente área frontal, Área 2 ( $A_2$ ) = área frontal + sombra). Na figura 32, localizada no capítulo anterior, pode-se visualizar o efeito causado pela correta determinação da área efetiva. A força final é, obviamente, a mesma desde que seja utilizada a mesma área adotada na geração do coeficiente de arrasto para a recomposição da força de arrasto. Valores incorretos podem resultar em forças de arrasto menores, barateando o custo das obras, porém sob um grande

risco de tombamento. Chama-se aqui, novamente a atenção para o texto do item 7.7.2 da NBR-6123, transcrito no capítulo 2 deste trabalho que, por não ser absolutamente claro na definição da área efetiva,  $A_e$ , provoca erros na sua interpretação, acarretando em uma força resultante incorreta.

#### 4.3.1. Módulos de torres de secção transversal triangular

Nos módulos de torres de secção transversal triangular  $A$ ,  $B$  e  $C$  a diferença entre as áreas  $A_1$  (somente área frontal) e  $A_2$  (área frontal + área de sombra) é grande, como percebe-se na tabela 8.

Tabela 8: Áreas dos módulos das torres  $A$ ,  $B$  e  $C$  de secção triangular

Módulo	Áreas [m <sup>2</sup> ]		
	$A_1$	$A_2$	$A_{Total}$
<b>A</b>	0,052	0,099	0,260
<b>B</b>	0,072	0,142	0,448
<b>C</b>	0,075	0,156	0,563

Os valores dos coeficientes de arrasto, bem como os índices de área exposta dos ensaios dos módulos de secção transversal triangular com ângulo de incidência do vento de  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $180^\circ$  estão, de maneira compacta, apresentadas nas tabelas 9 a 11 e ilustrados nos gráficos das figuras 55 a 57.

Ao observar os gráficos das figuras 55 a 57, percebe-se claramente a importância de uma correta determinação das áreas a serem utilizadas para o cálculo da força de arrasto atuante. O índice de área exposta,  $\phi$ , quando calculado fazendo-se uso somente da área frontal,  $A_1$ , tem como resultado valores menores e conseqüentemente, os valores dos coeficientes de arrasto,  $C_a$ , maiores, acima daqueles recomendados pela NBR-6123. No entanto, quando calculado utilizando-se a área correta,  $A_2$ , correspondente a soma da área frontal e da sombra, resulta em valores significativamente menores de  $C_a$  e inferiores aos recomendados pela norma brasileira de vento. Neste último caso, a norma apresenta valores de  $C_a$  altos se comparados aos obtidos nos ensaios.

Apesar de mínimo, percebe-se que os valores obtidos com vento incidindo a  $0^\circ$  são maiores do que os encontrados com vento à  $60^\circ$  e  $180^\circ$ . Já era esperado que os valores com ângulos de incidência do vento de  $60^\circ$  e  $180^\circ$  fossem praticamente iguais, já que se trata de um triângulo com lados iguais.

Tabela 9: Coeficientes de arrasto e índices de área exposta dos módulos da torre de secção triangular, com  $\alpha = 0^\circ$

Módulo	Índice de área		Coeficiente de arrasto	
	$\phi_1$	$\phi_2$	$C_{a1}$	$C_{a2}$
<b>A</b>	0,20	0,39	2,81 – 2,89	1,47 – 1,51
<b>B</b>	0,16	0,32	3,32 – 3,38	1,69 – 1,72
<b>C</b>	0,13	0,28	3,08 – 3,22	1,49 – 1,55

Tabela 10: Coeficientes de arrasto e índices de área exposta dos módulos da torre de secção triangular, com  $\alpha = 60^\circ$

Módulo	Índice de área exposta		Coeficiente de arrasto	
	$\phi_1$	$\phi_2$	$C_{a1}$	$C_{a2}$
<b>A</b>	0,20	0,39	2,68 – 2,75	1,40 – 1,43
<b>B</b>	0,16	0,32	3,05 – 3,11	1,55 – 1,58
<b>C</b>	0,13	0,28	3,01 – 3,10	1,45 – 1,50

Tabela 11: Coeficientes de arrasto e índices de área exposta dos módulos da torre de secção triangular, com  $\alpha = 180^\circ$

Módulo	Índice de área exposta		Coeficiente de arrasto	
	$\phi_1$	$\phi_2$	$C_{a1}$	$C_{a2}$
<b>A</b>	0,20	0,39	2,75 – 2,81	1,43 – 1,47
<b>B</b>	0,16	0,32	3,02 – 3,09	1,53 – 1,57
<b>C</b>	0,13	0,28	3,01 – 3,12	1,45 – 1,51

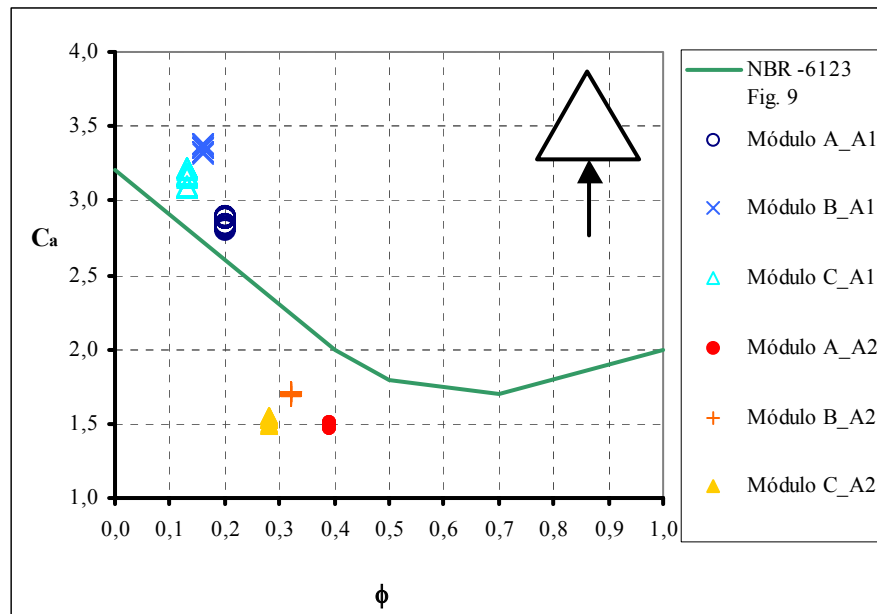


Figura 55: Gráfico do coeficiente de arrasto,  $C_a$ , em função do índice de área exposta,  $\phi$ , com vento a  $0^\circ$ , em secção triangular

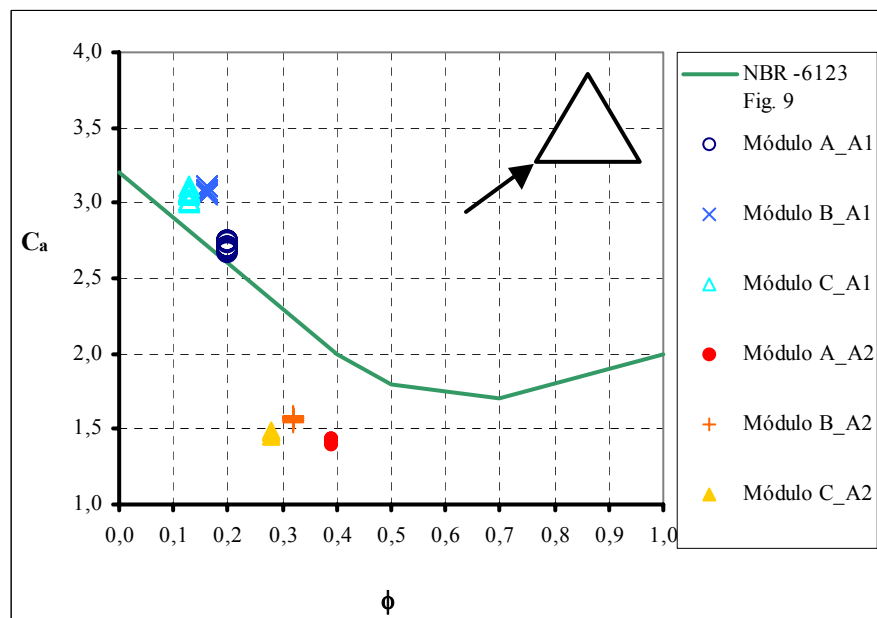


Figura 56: Gráfico do coeficiente de arrasto,  $C_a$ , em função do índice de área exposta,  $\phi$ , com vento a  $60^\circ$ , em secção triangular

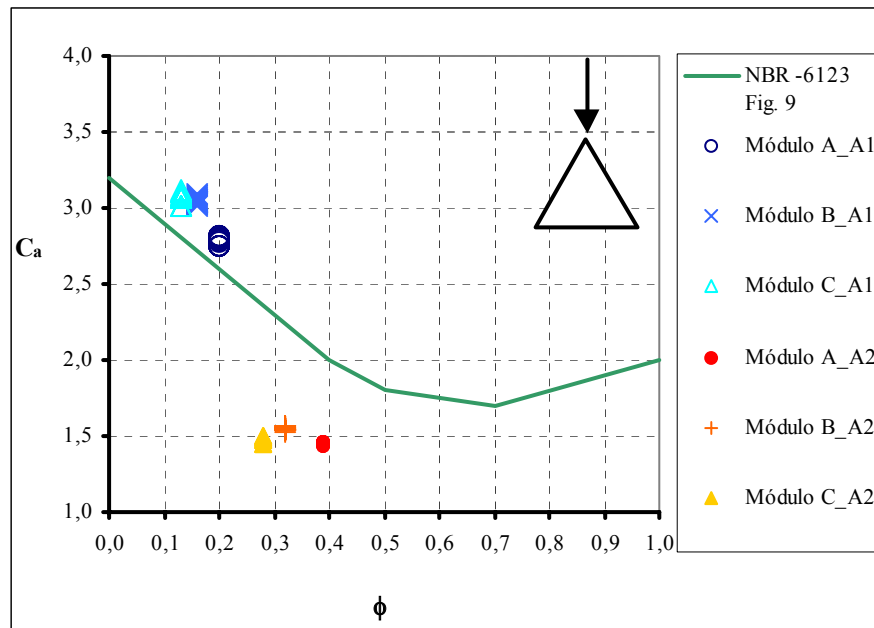


Figura 57: Gráfico do coeficiente de arrasto,  $C_a$ , em função do índice de área exposta,  $\phi$ , com vento a  $180^\circ$ , em secção triangular

Confeccionou-se, também, gráficos comparando estes resultados obtidos, indicações da NBR-6123, da norma francesa, da norma alemã, resultados de COHEN e PERRIN (para ângulo de incidência do vento a  $0^\circ$ ) e resultados de ensaios realizados por Joukoff e Tonglet, informações estas retiradas de BLESSMANN (1990). Nas figuras 58 e 59 pode-se visualizar o desencontro dos valores obtidos pelos mais diversos métodos. Este dado pode ser um indicativo de que ainda existem muitas divergências no que diz respeito à determinação dos coeficientes de arrasto.

Na figura 58 percebe-se que a curva cujos valores foram retirados de ensaios de Cohen e Perrin é a que mais se aproxima dos valores obtidos experimentalmente.

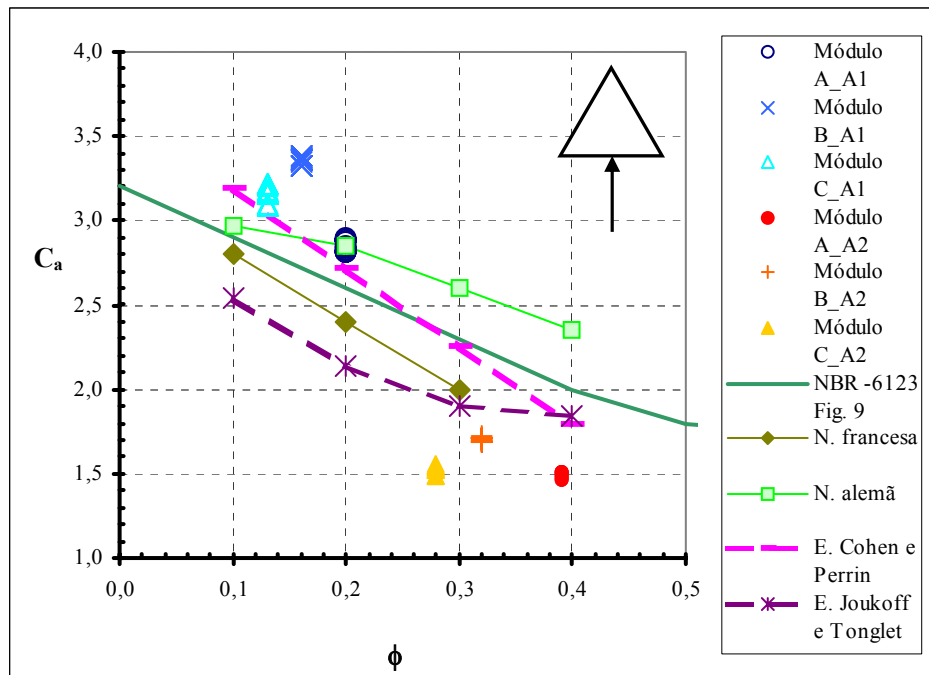


Figura 58: Comparação entre os  $C_a$  indicados por algumas normas e os obtidos através de estudos, com ângulo de incidência do vento à  $0^\circ$

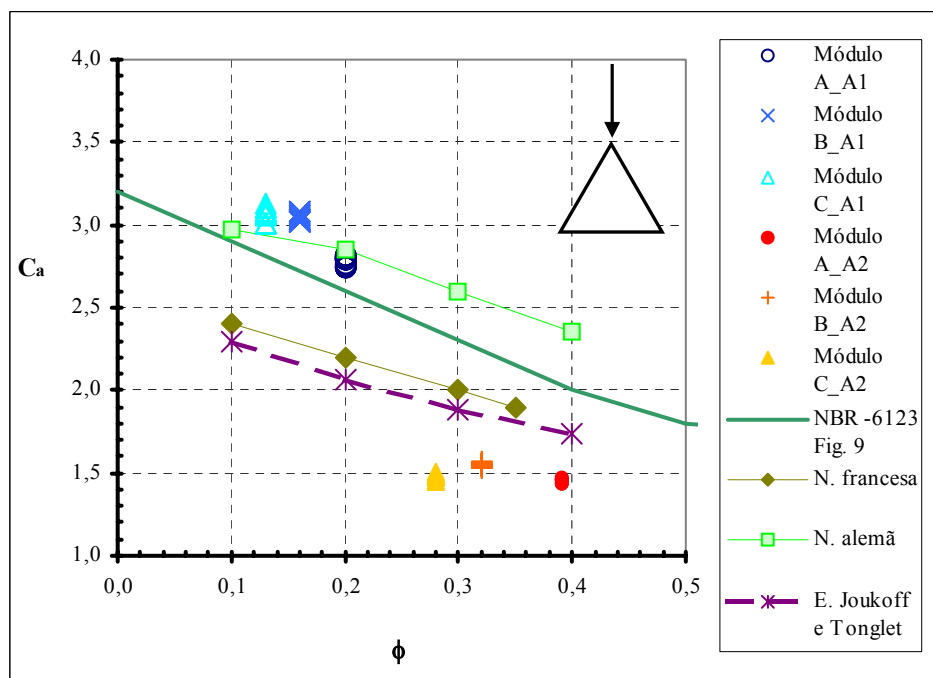


Figura 59: Comparação entre os  $C_a$  indicados por algumas normas e os obtidos através de estudos, com ângulo de incidência do vento à  $180^\circ$  ou  $60^\circ$

### 4.3.2. Módulos de torres de secção transversal quadrada

Nos ensaios dos módulos de torres de secção transversal quadrada, a diferença entre as áreas  $A_1$  e  $A_2$  não foi tão significativa quanto a dos ensaios anteriores, com secção triangular, como percebe-se na tabela 12.

Tabela 12: Áreas dos módulos das torres  $A$ ,  $B$  e  $C$  de secção quadrada

Módulo	Áreas [m <sup>2</sup> ]		
	$A_1$	$A_2$	$A_{Total}$
<b>A</b>	0,049	0,053	0,258
<b>B</b>	0,069	0,084	0,445
<b>C</b>	0,066	0,083	0,558

Os valores dos coeficientes de arrasto,  $C_a$ , bem como os índices de áreas expostas,  $\phi$ , dos ensaios dos módulos de secção transversal quadrada com ângulo de incidência do vento de  $0^\circ$  estão, de maneira compacta, na tabela 13 e ilustrados no gráfico da figura 60.

Tabela 13: Coeficientes de arrasto,  $C_a$ , e índices de área exposta,  $\phi$ , dos módulos da torre de secção quadrada, com  $\alpha = 0^\circ$

Módulo	Índice de área exposta		Coeficiente de arrasto	
	$\phi_1$	$\phi_2$	$C_{a1}$	$C_{a2}$
<b>A</b>	0,19	0,21	3,38 - 3,48	3,13 - 3,22
<b>B</b>	0,16	0,19	3,82 - 3,92	3,15 - 3,23
<b>C</b>	0,12	0,15	4,34 - 4,47	3,49 - 3,59

Na figura 60 estão os resultados do coeficiente de arrasto,  $C_a$ , para os respectivos índices de área expostas,  $\phi$ , calculados conforme as áreas  $A_1$  e  $A_2$  dos ensaios realizados com os módulos  $A$ ,  $B$  e  $C$ , de secção quadrada, com ângulo de incidência do vento de  $0^\circ$ , colocados juntamente com os valores indicados pela NBR-6123, segundo a figura 9 e de acordo com as figuras 6 e 8, pelo procedimento do fator de proteção. Estas figuras da norma estão representadas neste trabalho pelas figuras 12, 8 e 11, respectivamente.

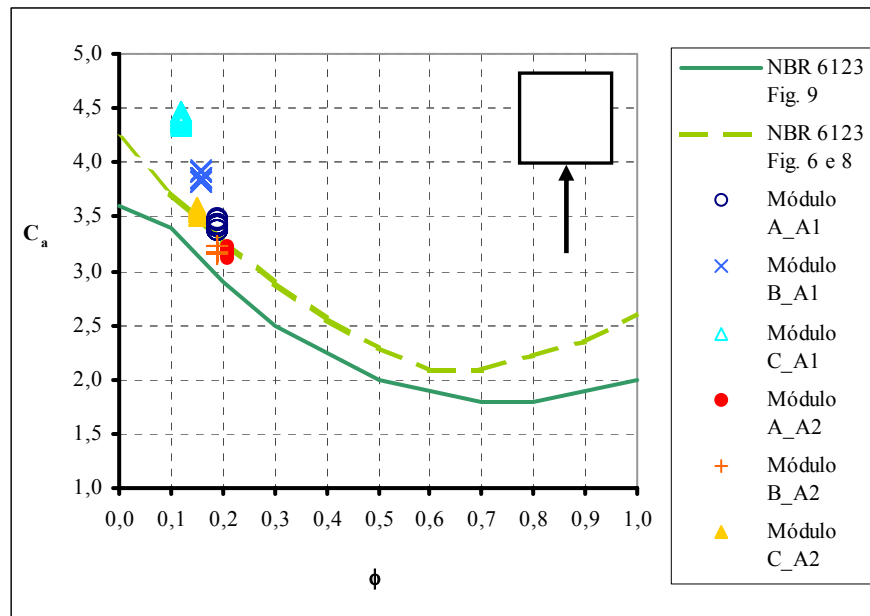


Figura 60: Gráfico do coeficiente de arrasto,  $C_a$ , em função do índice de área exposta,  $\phi$ , com vento a  $0^\circ$ , em secção quadrada

Primeiramente, percebe-se uma diferença entre os dois métodos de cálculo indicados pela norma brasileira de vento, NBR-6123. Calculando-se pelo processo do fator de proteção (figuras 6 e 8 da norma), os valores indicados pela figura 9 da NBR-6123 seriam menores que estes. Usando como referência a linha representativa da figura 9 da norma, todos os valores obtidos nos ensaios estariam maiores que estes, enquanto que pelo outro método, alguns ensaios já estariam incluídos nos limites da norma brasileira de vento. É o caso dos índices de área exposta,  $\phi$ , determinados com a área efetiva correta,  $A_2$ .

É possível também visualizar a diferença entre os valores dos coeficientes de arrasto resultantes de cálculos utilizando somente a área frontal,  $A_1$ , e os valores utilizando-se a área frontal acrescida da sombra,  $A_2$ . O modelo C obteve maior valor de  $C_a$ , inclusive muito superior ao admitido pela NBR-6123.

Na tabela 14 estão representados os valores dos índices de área exposta,  $\phi$ , e dos respectivos coeficientes de arrasto,  $C_a$ , dos ensaios dos módulos de secção transversal quadrada com ângulo de incidência do vento de  $45^\circ$ . Os mesmos resultados estão ilustrados no gráfico da figura 61.

Novamente percebe-se uma diferença entre os dois métodos de cálculo indicados pela NBR-6123. E os resultados dos ensaios obtidos utilizando-se a  $A_2$  estão em maior



concordância com os valores da norma, tanto no que diz respeito ao método de cálculo pela figura 9 da NBR-6123 quanto às figuras 6 e 8 da mesma. O módulo  $C$  é o que mais se distancia, em termos de valores dos demais.

A grande diferença entre os valores de  $C_a$  obtidos nas secções triangulares não foi repetido aqui, por motivo da área de sombra ser menor. Porém, a correta interpretação da área efetiva deve continuar sendo observada.

Tabela 14: Coeficientes de arrasto,  $C_a$ , e índices de área exposta,  $\phi$ , dos módulos da torre de secção quadrada, com  $\alpha = 45^\circ$

Módulo	Índice de área exposta		Coeficiente de arrasto	
	$\phi_1$	$\phi_2$	$C_{a1}$	$C_{a2}$
A	0,19	0,21	3,61 - 3,74	3,34 - 3,46
B	0,16	0,19	3,66 - 3,76	3,01 - 3,11
C	0,12	0,15	4,26 - 4,40	3,43 - 3,54

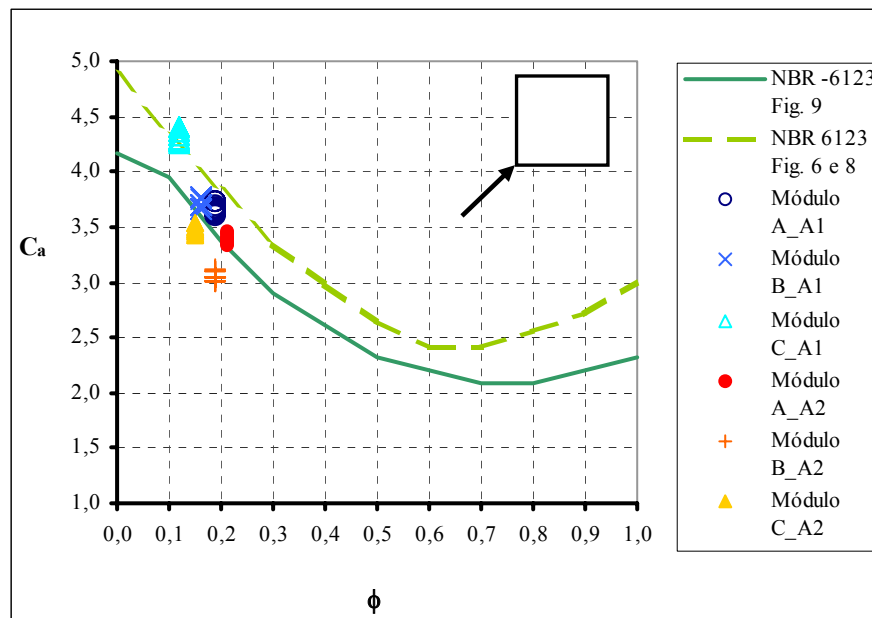


Figura 61: Gráfico do coeficiente de arrasto,  $C_a$ , em função do índice de área exposta,  $\phi$ , com vento a  $45^\circ$  em secção quadrada

As figuras 62 e 63 apresentam valores de coeficientes de arrasto em relação ao índice de área exposta, obtidos por outras normas além da brasileira, como a norma alemã (DIN 4131), a norma francesa (NV-65/1990), ensaios de Cohen e Perrin e de Bayar, dados retirados de BLESSMANN (1990). Assim como para secções triangulares, para as secções quadradas também os diversos métodos divergem entre si.

Para o vento incidindo perpendicularmente à face de barlavento, figura 62, as curvas obtidas são mais coerentes, com exceção da norma francesa, que apresenta valores um pouco mais distantes dos demais, para índices de área exposta menores. Os valores resultantes dos ensaios, entretanto, continuam excedendo os limites recomendados por estes métodos ilustrados.

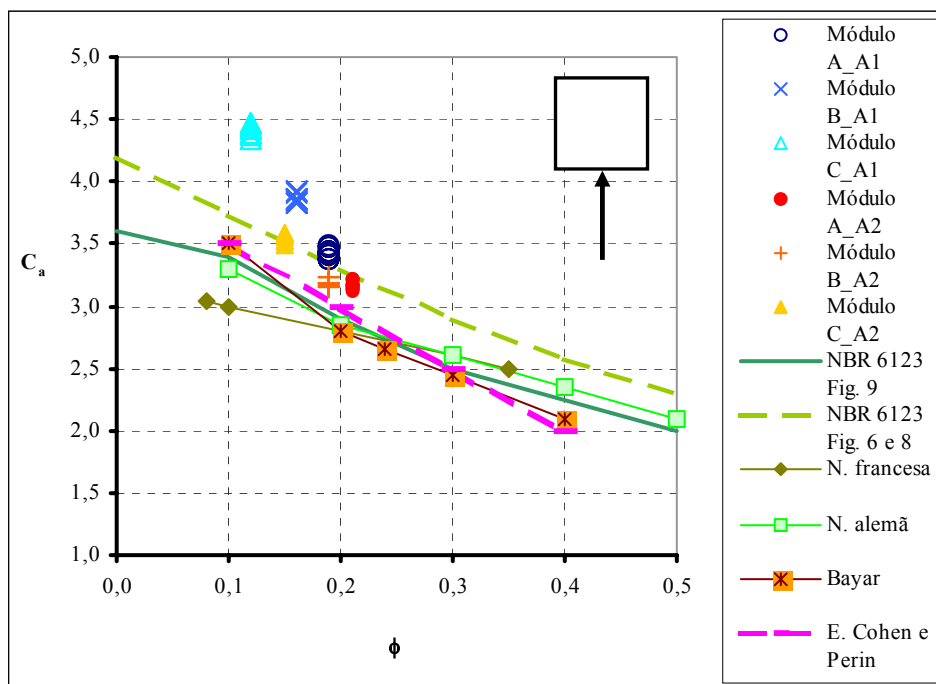


Figura 62: Comparação entre os  $C_a$  indicados por algumas normas e os obtidos através de estudos, com ângulo de incidência do vento à  $0^\circ$

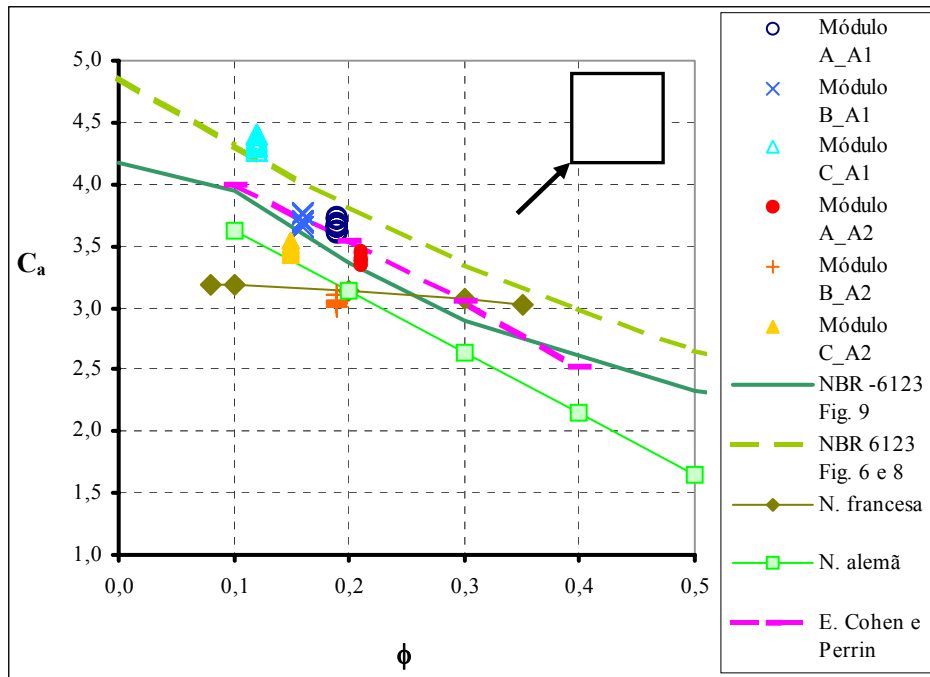


Figura 63: Comparação entre os  $C_a$  indicados por algumas normas e os obtidos através de estudos, com ângulo de incidência do vento à  $45^\circ$

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1. CONCLUSÕES

Esta dissertação teve como objetivo principal obter mais informações, através de estudos experimentais, a respeito do comportamento dos elementos que compõem uma torre metálica treliçada, bem como de modelos seccionais das mesmas frente a ação de ventos fortes. Para tanto, os ensaios realizados no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann, foram divididos em três etapas.

Na primeira fase de ensaios, verificou-se o comportamento dos valores dos coeficientes de força de perfis tipo cantoneira isolados com terminações diferentes e submetidos aos escoamentos suave e turbulento. As conclusões obtidas nesta primeira etapa foram as seguinte:

- Apesar das diferenças entre os tipos de terminação das abas dos perfis, em termos de coeficientes de força, serem pequenas, praticamente desprezáveis, analisando com mais detalhe, percebeu-se que para alguns ângulos elas ultrapassam os 100%. É o caso dos coeficientes de força na direção  $x$ ,  $C_{fx}$ , para o ângulo de incidência do vento de  $90^\circ$  e os coeficientes de força na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ , para ângulos de incidência de  $0^\circ$  e  $15^\circ$ , ambos modelos submetidos ao escoamento suave.
- Observou-se que não existe uma diferença significativa entre as respostas dos modelos submetidos ao escoamento suave e entre aqueles submetidos ao escoamento turbulento no que diz respeito aos coeficientes de força.
- Os valores dos coeficientes de força são sensivelmente maiores quando o vento incide na cantoneira com sua aba voltada para sotavento, ou seja, ângulos de incidência do vento de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , segundo a convenção adotada neste trabalho.
- Com o vento incidindo diretamente no vértice interno da cantoneira,  $\alpha = -135^\circ$ , o coeficiente de força resultante é maior do que aquele obtido em cada face do perfil.

- Os ângulos de incidência do vento, cujos coeficientes de força resultam em valores mais altos, são:  $-135^\circ$ ,  $-120^\circ$ ,  $-30^\circ$  e  $-15^\circ$  para coeficientes na direção  $x$ , e  $-150^\circ$ ,  $-135^\circ$ ,  $105^\circ$  e  $120^\circ$  para os coeficientes na direção  $y$ .
- Os resultados obtidos nos ensaios seguem as tendências das curvas da NBR-6123 e de resultados apresentados em COOK (1985), porém existem alguns valores, que apesar da pequena diferença, passa os 100% em alguns ângulos, sendo que as maiores diferenças são entre os ensaios e a norma brasileira. Para alguns ângulos a NBR-6123 recomenda valores abaixo dos encontrados por COOK e dos apresentados neste trabalho, como é o caso do ângulos  $-75^\circ$  e  $150^\circ$  para  $C_{fx}$  e  $-75^\circ$  e  $165^\circ$  para  $C_{fy}$ . Entretanto, também existem ângulos para os quais a norma extrapola valores. É o caso dos ângulos  $135^\circ$  e  $-45^\circ$ , para  $C_{fx}$  e  $C_{fy}$  respectivamente.
- Observou-se uma zona de instabilidade maior entre os resultados apresentados para o modelo E1 e E2, submetidos aos escoamentos suave e turbulento. Este fato ocorre nos ângulos  $180^\circ$  e  $135^\circ$  para  $C_{fx}$  e nos ângulos de  $-45^\circ$  e  $-90^\circ$  para  $C_{fy}$ .
- No gráfico do coeficiente de torção, observou-se uma reversão no sentido da torção entre os ângulos  $-75^\circ$  e  $60^\circ$ ,  $-15^\circ$  e  $0^\circ$ , em aproximadamente  $45^\circ$  e entre  $150^\circ$  e  $165^\circ$ .

Na segunda fase de ensaios, investigou-se o efeito de proteção dos perfis isolados. Realizou-se ensaios em túnel de vento com dois perfis dispostos um a barlavento e outro a sotavento, separados por várias distâncias. As conclusões desta etapa foram:

- Novamente percebeu-se que a diferença entre os dois tipos de escoamento foi praticamente nula, exceto para os casos das figuras 41 e 45, o que poderá ser um indicativo de que a influência da turbulência nos coeficientes de força de perfis isolados e de elementos de estruturas treliçadas seja de menor importância, podendo ser desprezada nos cálculos.
- O efeito do fenômeno de proteção do reticulado de barlavento sobre o de sotavento foi confirmado. A medida que o valor do afastamento ( $x/c$ ) entre as cantoneiras

aumentou, o efeito de proteção diminuiu, tendendo a um valor de coeficiente de força de um perfil isolado.

- Com o perfil posicionado conforme a posição 3 ensaiada, com  $\alpha = 10^\circ$ , os valores dos coeficientes de força passaram a sofrer influência de efeitos aerodinâmicos. Este fenômeno ocorreu principalmente com o coeficiente de força na direção  $y$ ,  $C_{fy}$ , que passou de valores positivos, nos menores afastamentos, para valores negativos, nos maiores afastamentos.
- Para a posição 1, P1, foi possível incluir um valor de coeficiente de arrasto, retirado da tabela 12 da NBR-6123, para um conjunto de duas cantoneiras. Este valor demonstra a influência que o perfil localizado à barlavento poderá exercer sobre o que está à sotavento.
- Ao verificar possibilidade da utilização da figura 8 da NBR-6123, figura 11 deste trabalho, para barras isoladas submetidas ao efeito de proteção, percebeu-se que os coeficientes de força recomendados pela norma brasileira, principalmente para os valores intermediários de afastamentos ensaiados ( $x/c=7,87$  e  $x/c=13,78$ ), são superiores aos resultados obtidos experimentalmente. Para algumas situações, entretanto, os valores foram muito parecidos, é o caso, por exemplo, do  $C_{fy}$ , da figura 8, comparando os valores obtidos nos ensaios para a posição 1, P1, com valores de coeficientes de força para perfis isolados, com  $\alpha=0^\circ$ , multiplicados pelos fatores de proteção indicados pela norma.
- O efeito de proteção também pôde ser percebido nos gráficos representativos dos coeficientes de torção. Porém, para a posição 2, o efeito de proteção mostrou-se prejudicial para alguns afastamentos, pois o valor do coeficiente de torção,  $C_t$  para perfil isolado é menor.

Na terceira e última etapa dos ensaios, determinou-se os coeficiente de arrasto para trechos de módulos de torres com secção transversal quadrada e triangular. Foram estudadas diversas configurações para posteriormente serem comparadas a outros resultados existentes e a normas. Concluiu-se que:

Para os modelos de secção transversal triangular:

- Nos gráficos que apresentaram os resultados dos modelos com secção transversal triangular percebeu-se claramente a importância de uma correta determinação das áreas a serem utilizadas no cálculo da força de arrasto atuante. A soma da área de sombra com a área frontal resulta em valores significativamente menores do coeficiente de arrasto.
- Os valores de  $C_a$  obtidos utilizando-se somente a área frontal encontram-se todos acima dos valores indicados pela NBR-6123.
- Pelas figuras 58 e 59 percebe-se a grande disparidade existente entre alguns métodos indicados por algumas normas e estudos realizados nesta área, no que se refere aos valores dos coeficientes de arrasto, ficando claro a necessidade de ainda mais estudos.

Para os modelos de secção transversal quadrada:

- Primeiramente observou-se uma disparidade entre os valores recomendados pela norma brasileira, NBR-6123, seguindo o método da figuras 9 e o das figuras 6 e 8.
- Apesar de pequena, a diferença entre os valores de  $C_a$  obtidos utilizando a  $A_1$  e  $A_2$  existe, ressaltando a importância da inclusão da área de sombra na soma das áreas efetivas.
- Os valores obtidos experimentalmente, com ângulo de incidência do vento de  $0^\circ$ , encontram-se todos acima dos limites recomendados pela NBR-6123, principalmente seguindo a figura 9 da mesma.
- Com ângulo de incidência do vento a  $45^\circ$  e baseando-se nos limites encontrados utilizando as figuras 6 e 8 da norma, com exceção do módulo C, todos os demais obtiveram valores de  $C_a$  abaixo dos recomendados pela NBR-6123. Porém, seguindo as indicações da figura 9 da mesma norma, apenas os módulos B e C estariam com valores de  $C_a$  admissíveis.
- O módulo C, que possui menores valores de índice de área exposta, foi o que obteve maiores valores de  $C_a$ .

- Comparando os resultados obtidos neste trabalho com os de outros estudos e normas, verificou-se que os valores dos coeficientes de arrasto,  $C_a$ , indicados pelos diversos métodos são aproximados, com exceção da norma francesa e da NBR-6123 seguindo o procedimento do fator de proteção das figuras 6 e 8 da mesma norma, que apresentaram valores diferentes, figura 62. Entretanto, os valores de  $C_a$  resultantes dos ensaios, principalmente para os modelos B e C utilizando somente a área frontal, excedem os limites recomendados por todos estes métodos. Já com o vento incidindo à 45° na secção, a divergência entre valores de coeficientes de arrasto é maior, inclusive entre os diversos métodos, figura 63

É extremamente importante ressaltar um ponto: o item 7.7.2 da NBR-6123. Seu texto, por não apresentar a clareza necessária, acarreta em erros na sua interpretação, no que diz respeito ao entendimento do conceito da área efetiva,  $A_e$ . A norma descreve que a área efetiva deve ser a área frontal somada à área de sombra, mas não são todos que assim o entendem, deixando de somar a área de sombra o que resulta em uma força resultante inferior à recomendada. Este “detalhe” poderá causar danos ou até mesmo o colapso das estruturas.

## 6.2. TRABALHOS FUTUROS

Vários são os fatores que poderão contribuir para resultados diferentes dos esperados, quando se trata de ensaios experimentais, sendo o erro humano, a inexperiência e a falta de material adequado alguns destes. Portanto, novos estudos experimentais devem ser realizados afim de confirmar os resultados aqui obtidos e corrigir possíveis erros.

Além disto, algumas investigações mais aprofundadas como:

- Verificar para qual afastamento o perfil de barlavento deixa de exercer proteção sobre o de sotavento.
- Verificar o que acontece com os valores dos coeficientes de arrasto com pequenas distâncias entre os perfis, até que os dois estejam encostados.
- Realizar mais ensaios com módulos de trechos de torres, afim de averiguar qual o valor mais adequado para o coeficiente de arrasto deste conjunto.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – **NBR – 6123 – Forças Devidas ao Vento em Edificações**, 1987. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT – **NBR – 5422 – Projeto de Linhas Aéreas de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica. Rio de Janeiro**, 1985. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- AISC – **Load & Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings**. Commentary on the AISC LRFD Specification, 2000.
- ASCE – **Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading**. Manuals and Reports on Engineering Practice n° 74. American Society of Civil Engineers. New York, N.Y.
- ASCE – **Design of Latticed Steel Transmission Structures**. Published by the American Society of Civil Engineers. New York, N.Y., 1991.
- BAYAR, D.C. - **Drag Coefficients of Latticed Towers**. Journal of Structural Engineering – ASCE. Volume 112 – Number 2, page 417 – Feb 1986.
- BLESSMANN, Joaquim (1982) – **The Boundary Layer TV-2 Wind Tunnel of the UFRGS**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 10 (1982) 231-248.
- BLESSMANN, Joaquim – **Tópicos de normas de vento**. 2ª edição. Ed. Universidade/UFRGS, 1990. Porto Alegre, RS.
- BLESSMANN, Joaquim – **Aerodinâmica das construções**. 2ª edição. Ed. Sagra, 1990. Porto Alegre, RS.
- BLESSMANN, Joaquim – **O Vento na Engenharia Estrutural**. Ed. Universidade/UFRGS, 1995. Porto Alegre, RS.
- BLESSMANN, Joaquim – **Introdução ao Estudo das Ações Dinâmicas do Vento**. Ed. Universidade/UFRGS, 1998. Porto Alegre, RS.

- BLESSMANN, Joaquim – **Acidentes causados pelo Vento**. 4ª edição. Ed. Universidade/UFRGS, 2001. Porto Alegre, RS.
- COOK, N.J. – **The designer's guide to wind loading of building structures**. Part 1. Butterworths, London, 1985.
- DAVENPORT, A.G. – **Gust Response Factors for Transmission Line Loading – Transmission Line Loading (colorado, 1979)**.
- DAVENPORT, A. G.; ISYMOV, 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. Ottawa, Canada. September 11-15. Vol. 1 pp. 201-230. 1967
- DAVENPORT, A.G., **Wind Structure and Wind Climate**, Safety of Structures Under Dynamic Loading, Vol. 1, TAPIR Publishers, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, 1978.
- EIFFEL, G. – **Résistance de l'air et l'aviation** : expériences effectuées au laboratoire du Champ-de-Mars. Paris, Dunod, 1911.
- FARRARO, V. – **Transverse Response of Transmission Lines to Turbulent Wind**. – Master of Engineering Thesis. The University of Western Ontario. London, Canada, 1983.
- FLACHSBART, O. – **Wind pressure on solid-walled and framed structures – Mémoires**. Association Internationale des Ponts et Charpentes, V.1, p. 153-72, 1932.
- GEORGIOU, P.N. – **A study of the wind loads on building frames**. London, 1979. 182p. These (Master degree). Faculty of Engineering Science, University of Western Ontario.
- GEORGIOU, P.N.; VICKERY, B.J. – **Wind loads on building frames**. In: International Conference, 5., Fort Collins, 1979. Proceedings. Oxford, Pergamon, 1980. V.1, p.421-33.
- INTERNACIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – **IEC-60826 – Loading and Strength of Overhead Transmission Lines**. Second Edition, Genève, Swiss, 1991.
- KATOH, T., MOMOMURA, Y., IZAWA, K., OKAMURA, T. and OKHUMA, T. – **Full-Scale Measurements of Wind-Induced Vibration of Transmission Line System in Mountaineous Area**. Proceedings of the Ninth International Conference on Wind Engineering. New Delhi, India. January 9-13, 1995, Vol. I. pp.433-444.

- KEMPNER Jr., L., STROUD, R. C. and SMITH, S. – **Transmission Line Dynamic/Static Structural Testing**. Journal of the Structural Division, ASCE, 1981, Vol. 107. No.ST10, October p. 1895-1906
- KEMPNER Jr., L. and LAURSEN, H. I. – **Measured Dynamic Response of a Latticed Transmission Line Tower and Conductors to Wind Loading**. In: Pre-prints of the Fourth U.S. National Conference on Wind Engineering. Seattle, Washington. July 27-29, 1981. Pp.348-355.
- KRISHNASAMY, S. – **Wind and Ice Loading on Overhead Transmission Lines**. In: Pre-prints of the Fourth U.S. National Conference on Wind Engineering. Seattle, Washington. July 27-29, 1981. Pp.356-364.
- LOREDO-SOUZA, Acir M. – **The Behaviour of Transmission Lines Under High Winds** - Tese de Doutorado. Faculty of Graduate Studies. The University of Western Ontario, 1996, London, Ontario, Canada.
- LIEW, S. H. and NORVILLE, H. S. – **Frequency Response Function of a Transmission Tower Subjected to Multiple Loadings**. In: Proceedings of the Sixth U.S. National Conference on Wind Engineering. Houston, Texas. March 8-10, 1989. Vol. I. pp.B3-27 to B3-35.
- MENEZES, R. C. R. (2004) - Depoimento pessoal.
- MONK, P.E. – **Structural Failure of Transmission Towers Under High Wind Loads**. A project submitted in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Master of Engineering in the University of Canterbury – New Zealand – 1980.
- MOZER, J.D.; STROUD, R.C. **Transmission line wind loading research**. Research Project RP 1277, Interim Report, April 1980.
- SIMI, E. and SCANLAN, R.H. – **Wind Effects on Structures. An Introduction to Wind Engineering**, 2<sup>o</sup> ed. , John Wiley and Sons, New York, N.Y. 1996.
- VICKERY, B.J. (1982) **Aeroelastic Modeling of Chimneys and Towers**. In: **Proceedings of the International Workshop on Wind Tunnel Modeling Criteria and Techniques in Civil Engineering Applications**, Gaithersburg, Maryland, USA, April 1982.
- WHITBREAD, R.E. – **The influence of shielding on the wind forces experienced by arrays of lattice frames**. In: International Conference on Wind Engineering. 5. Fort Collins, Colorado, USA, 1979. Proceedings. V.1. Paper IV-6.

## **APÊNDICE A – COEFICIENTES AERODINÂMICOS, ETAPA 1**

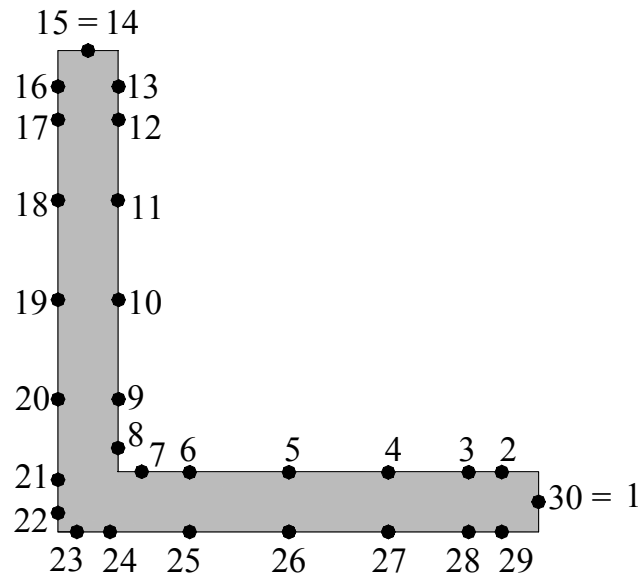


Figura A1: Numeração das tomadas de pressão do modelo E1.

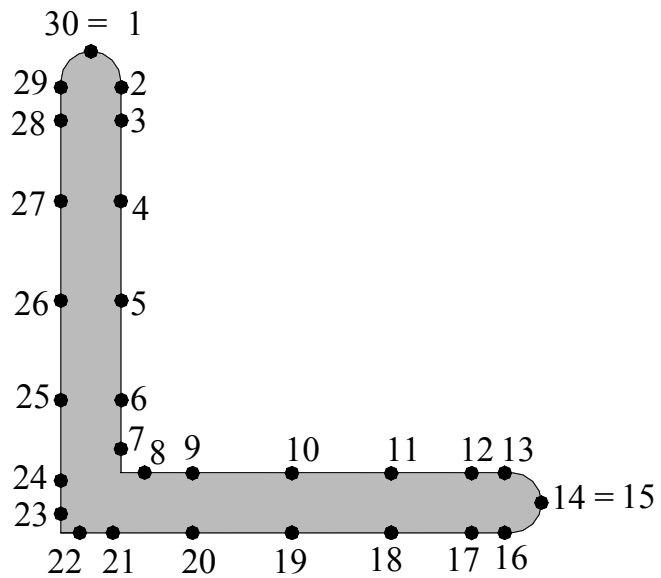


Figura A2: Numeração das tomadas de pressão do modelo E2.

Tabela A1: Coeficientes de pressão médios,  $C_p$ , modelo E1, escoamento suave.

Tomada	Cp médio									
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°
1	-1,53	-1,30	-1,37	-1,44	-1,39	-1,35	-1,50	-1,50	-1,49	-1,32
2	-1,50	-1,29	-1,37	-1,41	-1,36	-1,35	-1,48	-1,51	-1,40	-1,13
3	-1,43	-1,29	-1,37	-1,41	-1,36	-1,34	-1,47	-1,51	-1,42	-1,13
4	-1,38	-1,26	-1,37	-1,41	-1,36	-1,32	-1,47	-1,51	-1,43	-1,13
5	-1,34	-1,26	-1,37	-1,41	-1,36	-1,32	-1,46	-1,52	-1,42	-1,13
6	-1,32	-1,24	-1,35	-1,41	-1,34	-1,29	-1,45	-1,53	-1,44	-1,13
7	-1,30	-1,23	-1,35	-1,38	-1,33	-1,29	-1,44	-1,51	-1,43	-1,13
8	-1,30	-1,23	-1,35	-1,38	-1,33	-1,29	-1,44	-1,50	-1,43	-1,13
9	-1,29	-1,23	-1,35	-1,40	-1,33	-1,32	-1,46	-1,53	-1,43	-1,13
10	-1,32	-1,24	-1,34	-1,40	-1,35	-1,33	-1,52	-1,53	-1,43	-1,13
11	-1,33	-1,26	-1,37	-1,42	-1,35	-1,35	-1,58	-1,56	-1,46	-1,15
12	-1,34	-1,25	-1,37	-1,42	-1,37	-1,37	-1,69	-1,62	-1,49	-1,18
13	-1,32	-1,25	-1,37	-1,42	-1,37	-1,38	-1,74	-1,68	-1,55	-1,21
14	-1,35	-1,27	-1,39	-1,42	-1,37	-1,40	-1,72	-1,81	-1,60	-1,05
15	-1,42	-1,29	-1,37	-1,44	-1,39	-1,38	-1,80	-1,78	-1,55	-1,08
16	0,28	0,08	-0,33	-0,70	-0,95	-1,06	-1,91	-1,71	-1,51	-0,91
17	0,65	0,46	0,03	-0,39	-0,72	-0,98	-1,87	-1,65	-1,44	-0,90
18	0,97	0,82	0,48	0,05	-0,37	-1,26	-1,87	-1,59	-1,37	-0,89
19	1,06	1,01	0,79	0,35	-0,14	-1,93	-1,82	-1,57	-1,33	-0,89
20	0,97	1,03	0,97	0,59	0,03	-2,00	-1,80	-1,55	-1,30	-0,89
21	0,55	0,74	1,03	0,83	-0,55	-1,93	-1,78	-1,53	-1,29	-0,86
22	-0,22	0,05	0,83	0,91	-0,49	-1,92	-1,77	-1,53	-1,29	-0,87
23	-1,69	-1,86	-0,52	0,98	0,83	0,08	-0,21	-0,40	-0,55	-0,46
24	-1,69	-1,87	-0,36	0,83	1,01	0,67	0,46	0,19	-0,04	-0,13
25	-1,73	-1,92	0,08	0,66	1,00	1,00	0,93	0,74	0,50	0,31
26	-1,75	-1,77	-0,15	0,38	0,79	0,99	1,07	0,97	0,81	0,63
27	-1,79	-1,05	-0,37	0,09	0,51	0,84	1,02	1,04	0,99	0,87
28	-1,75	-0,84	-0,64	-0,29	0,09	0,48	0,74	0,88	0,98	0,99
29	-1,76	-0,92	-0,81	-0,58	-0,20	0,14	0,41	0,65	0,85	1,00
30	-1,59	-1,30	-1,35	-1,41	-1,35	-1,33	-1,53	-1,46	-1,47	-1,30

Tomada	Cp médio					
	150°	165°	180°	-165°	-150°	-135°
1	0,62	0,86	0,44	-0,45	-2,74	-1,76
2	-0,48	0,78	1,01	1,01	0,82	0,70
3	-0,50	0,85	0,98	1,03	0,96	0,89
4	-0,53	0,91	0,98	1,02	0,99	0,99
5	-0,58	0,93	0,98	1,02	0,99	1,02
6	-0,47	0,94	0,99	1,02	1,01	1,02
7	-0,40	0,94	0,99	1,02	1,02	1,02
8	-0,44	0,93	0,99	1,02	1,02	1,02
9	-0,51	0,94	0,99	1,02	1,02	1,02
10	-0,54	0,93	1,15	1,00	1,02	1,02
11	-0,40	0,83	0,87	0,93	0,98	1,00
12	0,08	0,46	0,51	0,63	0,77	0,86
13	0,12	0,19	0,20	0,36	0,54	0,67
14	-1,23	-1,05	-1,48	-1,55	-1,58	-1,76
15	-1,21	-1,11	-1,56	-1,58	-1,59	-1,83
16	-1,15	-1,10	-1,57	-1,58	-1,59	-1,71
17	-1,12	-1,10	-1,58	-1,61	-1,61	-1,72
18	-1,14	-1,11	-1,59	-1,63	-1,62	-1,73
19	-1,14	-1,10	-1,58	-1,63	-1,64	-1,82
20	-1,12	-1,11	-1,60	-1,63	-1,66	-1,88
21	-1,07	-1,09	-1,60	-1,64	-1,71	-1,96
22	-1,08	-1,09	-1,66	-1,72	-1,78	-2,09
23	-0,83	-1,00	-1,75	-1,79	-1,87	-2,02
24	-0,61	-0,9	-1,72	-1,77	-1,78	-1,93
25	-0,17	-0,93	-1,66	-1,71	-1,71	-1,84
26	0,14	-1,59	-1,64	-1,68	-1,66	-1,79
27	0,41	-1,86	-1,62	-1,66	-1,61	-1,71
28	0,60	-1,81	-1,61	-1,64	-1,59	-1,70
29	0,75	-1,79	-1,60	-1,64	-1,59	-1,71
30	0,65	0,87	0,41	-0,42	-2,12	-1,82

Tabela A2: Coeficientes de pressão médios,  $C_p$ , modelo E1, escoamento turbulento.

Tomada	Cp médio									
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°
1	-1,36	-1,30	-1,29	-1,32	-1,33	-1,27	-1,23	-1,45	-1,64	-1,39
2	-1,24	-1,24	-1,29	-1,30	-1,30	-1,27	-1,20	-1,41	-1,38	-1,35
3	-1,18	-1,24	-1,30	-1,29	-1,30	-1,27	-1,17	-1,41	-1,38	-1,35
4	-1,17	-1,22	-1,30	-1,28	-1,30	-1,24	-1,18	-1,40	-1,38	-1,38
5	-1,14	-1,19	-1,30	-1,28	-1,27	-1,24	-1,16	-1,41	-1,38	-1,40
6	-1,12	-1,17	-1,27	-1,28	-1,27	-1,22	-1,14	-1,41	-1,36	-1,32
7	-1,12	-1,17	-1,27	-1,28	-1,27	-1,21	-1,15	-1,40	-1,36	-1,32
8	-1,11	-1,17	-1,27	-1,28	-1,27	-1,21	-1,14	-1,39	-1,36	-1,34
9	-1,11	-1,17	-1,27	-1,28	-1,27	-1,21	-1,16	-1,40	-1,38	-1,37
10	-1,15	-1,19	-1,28	-1,27	-1,28	-1,22	-1,21	-1,43	-1,40	-1,46
11	-1,14	-1,19	-1,28	-1,28	-1,28	-1,24	-1,23	-1,48	-1,44	-1,48
12	-1,14	-1,21	-1,29	-1,28	-1,28	-1,27	-1,28	-1,56	-1,52	-1,38
13	-1,13	-1,20	-1,29	-1,28	-1,28	-1,29	-1,30	-1,58	-1,58	-1,35
14	-1,17	-1,23	-1,33	-1,28	-1,28	-1,32	-1,43	-1,54	-1,37	-0,95
15	-1,18	-1,26	-1,34	-1,32	-1,33	-1,31	-1,42	-1,64	-1,42	-1,02
16	0,47	0,12	-0,27	-0,58	-0,87	-1,02	-1,66	-1,65	-1,34	-0,82
17	0,80	0,47	0,09	-0,30	-0,66	-0,90	-1,66	-1,59	-1,28	-0,80
18	1,08	0,83	0,56	0,12	-0,34	-0,76	-1,86	-1,52	-1,19	-0,78
19	1,11	0,97	0,83	0,41	-0,14	-1,08	-1,92	-1,49	-1,14	-0,79
20	1,00	0,98	1,01	0,68	0,06	-1,81	-1,83	-1,48	-1,13	-0,79
21	0,50	0,70	1,02	0,87	-0,28	-1,92	-1,79	-1,46	-1,10	-0,77
22	-0,34	-0,01	0,78	0,96	-0,58	-0,87	-1,78	-1,46	-1,10	-0,75
23	-1,81	-1,91	-0,71	0,94	0,85	0,18	-0,20	-0,36	-0,38	-0,37
24	-1,82	-1,94	-0,24	0,81	1,03	0,76	0,47	0,21	0,09	-0,04
25	-1,88	-1,86	0,03	0,63	1,01	1,03	0,94	0,73	0,58	0,40
26	-1,95	-1,16	-0,41	0,36	0,80	1,00	1,06	0,96	0,88	0,69
27	-1,87	-0,79	-0,33	0,09	0,54	0,83	1,02	1,03	1,02	0,91
28	-1,69	-0,83	-0,60	-0,26	0,12	0,49	0,78	0,90	1,00	1,02
29	-1,65	-0,91	-0,78	-0,52	-0,19	0,18	0,47	0,67	0,82	0,97
30	-1,40	-1,26	-1,28	-1,28	-1,30	-1,22	-1,22	-1,41	-1,66	-1,20



Tomada	Cp médio					
	150°	165°	180°	-165°	-150°	-135°
1	0,63	0,89	0,37	-0,22	-1,51	-2,19
2	-0,35	0,70	0,92	0,94	0,78	0,71
3	-0,37	0,77	0,88	0,96	0,90	0,92
4	-0,41	0,85	0,89	0,96	0,98	1,01
5	-0,51	0,90	0,92	0,96	1,01	1,03
6	-0,37	0,90	0,94	0,98	1,03	1,06
7	-0,30	0,94	0,97	1,00	1,06	1,06
8	-0,32	0,95	0,96	1,03	1,06	1,09
9	-0,42	0,95	0,97	1,03	1,03	1,06
10	-0,51	0,98	0,94	0,99	1,02	1,05
11	-0,21	0,82	0,81	0,89	0,92	1,03
12	0,12	0,48	0,49	0,60	0,66	0,88
13	0,07	0,21	0,21	0,30	0,40	0,67
14	-1,08	-1,08	-1,14	-1,54	-1,68	-2,19
15	-1,08	-1,07	-1,20	-1,55	-1,63	-2,21
16	-1,02	-1,05	-1,19	-1,55	-1,59	-1,72
17	-1,00	-1,03	-1,19	-1,58	-1,61	-1,72
18	-1,00	-1,03	-1,20	-1,62	-1,67	-1,80
19	-0,98	-1,03	-1,21	-1,64	-1,73	-1,92
20	-0,98	-1,03	-1,23	-1,64	-1,73	-2,00
21	-0,97	-1,00	-1,29	-1,69	-1,80	-2,15
22	-0,96	-1,01	-1,39	-1,80	-1,96	-2,32
23	-0,74	-0,95	-1,63	-1,95	-2,01	-2,24
24	-0,54	-0,92	-1,56	-1,92	-1,96	-2,09
25	-0,11	-0,70	-1,61	-1,80	-1,85	-1,94
26	0,18	-0,68	-1,69	-1,75	-1,78	-1,87
27	0,43	-1,67	-1,63	-1,70	-1,71	-1,75
28	0,62	-1,75	-1,58	-1,70	-1,69	-1,69
29	0,74	-1,72	-1,56	-1,69	-1,67	-1,66
30	0,67	0,88	0,41	-0,21	-1,30	-2,06

Tabela A3: Coeficientes de pressão médios,  $C_p$ , modelo E2, escoamento suave.

Tomada	Cp médio									
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°
1	-1,38	-1,19	-1,38	-1,27	-1,27	-1,20	-1,79	-1,90	-1,93	-1,28
2	-1,36	-1,14	-1,31	-1,23	-1,25	-1,18	-1,81	-1,77	-1,68	-1,33
3	-1,34	-1,14	-1,29	-1,22	-1,24	-1,16	-1,60	-1,61	-1,57	-1,25
4	-1,33	-1,11	-1,26	-1,22	-1,24	-1,15	-1,48	-1,54	-1,47	-1,20
5	-1,31	-1,11	-1,26	-1,22	-1,24	-1,14	-1,42	-1,46	-1,47	-1,19
6	-1,28	-1,11	-1,26	-1,22	-1,23	-1,12	-1,36	-1,46	-1,46	-1,17
7	-1,30	-1,08	-1,25	-1,22	-1,23	-1,12	-1,35	-1,44	-1,45	-1,18
8	-1,29	-1,09	-1,26	-1,22	-1,21	-1,11	-1,34	-1,44	-1,45	-1,17
9	-1,33	-1,11	-1,26	-1,22	-1,21	-1,13	-1,34	-1,44	-1,46	-1,17
10	-1,35	-1,11	-1,26	-1,21	-1,21	-1,13	-1,36	-1,45	-1,46	-1,17
11	-1,41	-1,14	-1,26	-1,22	-1,24	-1,13	-1,38	-1,44	-1,45	-1,15
12	-1,48	-1,14	-1,27	-1,23	-1,24	-1,15	-1,38	-1,44	-1,45	-1,17
13	-1,64	-1,14	-1,28	-1,22	-1,26	-1,15	-1,40	-1,43	-1,46	-1,17
14	-1,69	-1,15	-1,28	-1,25	-1,30	-1,17	-1,41	-1,48	-1,47	-1,22
15	-1,71	-1,19	-1,31	-1,27	-1,26	-1,21	-1,43	-1,47	-1,46	-1,24
16	-1,74	-1,31	-1,42	-1,27	-1,09	-0,67	-0,44	0,03	0,53	0,96
17	-1,69	-1,08	-0,88	-0,52	-0,16	0,26	0,50	0,76	0,96	1,05
18	-1,70	-1,46	-0,44	0,01	0,44	0,81	0,93	1,05	1,01	0,90
19	-1,66	-2,13	-0,15	0,34	0,79	1,01	1,02	1,00	0,86	0,69
20	-1,63	-2,14	0,02	0,62	0,96	1,01	0,92	0,79	0,57	0,38
21	-1,61	-2,08	-0,55	0,84	1,03	0,76	0,53	0,32	0,09	-0,03
22	-1,61	-2,07	-0,52	0,93	0,86	0,14	-0,08	-0,29	-0,53	-0,46
23	-0,17	0,00	0,89	0,91	-0,55	-1,99	-1,66	-1,47	-1,29	-0,95
24	0,55	0,71	1,09	0,79	-0,58	-2,03	-1,66	-1,47	-1,32	-0,96
25	0,93	1,03	1,01	0,60	0,03	-2,08	-1,69	-1,50	-1,35	-0,98
26	1,01	1,02	0,79	0,33	-0,15	-2,05	-1,72	-1,53	-1,37	-0,98
27	0,90	0,82	0,44	0,00	-0,42	-1,44	-1,78	-1,57	-1,44	-0,98
28	0,42	0,29	-0,16	-0,51	-0,80	-1,09	-1,79	-1,64	-1,51	-1,01
29	-0,26	-0,40	-0,81	-0,98	-1,12	-1,25	-1,86	-1,73	-1,62	-1,02
30	-1,35	-1,13	-1,28	-1,23	-1,23	-1,24	-1,91	-1,94	-1,79	-1,28

Tomada	Cp médio					
	150°	165°	180°	-165°	-150°	-135°
1	-1,28	-1,23	-1,31	-1,49	-1,60	-1,52
2	-0,74	-1,21	-1,10	-1,01	-0,69	-0,14
3	0,11	0,23	0,32	0,41	0,58	0,73
4	-0,31	0,84	0,83	0,90	0,93	0,91
5	-0,51	0,90	0,99	0,99	0,99	0,93
6	-0,46	0,82	0,99	1,02	0,99	0,93
7	-0,39	0,85	0,99	1,02	0,99	0,93
8	-0,37	0,88	0,99	1,02	0,99	0,93
9	-0,45	0,82	0,99	1,02	0,99	0,93
10	-0,51	0,83	0,98	1,02	1,00	0,93
11	-0,46	0,83	0,98	1,02	1,00	0,92
12	-0,44	0,80	0,98	1,02	0,96	0,81
13	-0,42	0,80	1,02	1,01	0,67	0,29
14	0,06	0,85	-0,46	-1,39	-1,68	-1,52
15	-0,14	0,88	-0,37	-1,41	-1,83	-1,63
16	0,87	-1,52	-1,43	-1,62	-1,68	-1,57
17	0,76	-1,19	-1,43	-1,61	-1,68	-1,57
18	0,47	-0,55	-1,44	-1,61	-1,68	-1,59
19	0,22	-0,55	-1,45	-1,62	-1,73	-1,66
20	-0,08	-0,67	-1,46	-1,66	-1,79	-1,71
21	-0,43	-0,83	-1,48	-1,74	-1,85	-1,77
22	-0,80	-1,04	-1,53	-1,76	-1,92	-1,89
23	-1,14	-1,13	-1,40	-1,67	-1,89	-1,93
24	-1,14	-1,16	-1,35	-1,61	-1,80	-1,79
25	-1,17	-1,16	-1,34	-1,55	-1,73	-1,71
26	-1,20	-1,16	-1,33	-1,55	-1,69	-1,63
27	-1,20	-1,16	-1,34	-1,55	-1,63	-1,57
28	-1,20	-1,16	-1,33	-1,50	-1,59	-1,55
29	-1,21	-1,19	-1,34	-1,50	-1,57	-1,54
30	-1,24	-1,26	-1,40	-1,55	-1,61	-1,61

Tabela A4: Coeficientes de pressão médios,  $C_p$ , modelo E2, escoamento turbulento.

Tomada	Cp médio									
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°
1	-1,12	-1,19	-1,28	-1,26	-1,19	-1,27	-1,49	-1,92	-1,80	-1,18
2	-1,05	-1,12	-1,20	-1,23	-1,16	-1,23	-1,35	-1,78	-1,76	-1,52
3	-1,03	-1,11	-1,18	-1,23	-1,16	-1,18	-1,23	-1,61	-1,61	-1,54
4	-1,01	-1,08	-1,16	-1,20	-1,13	-1,13	-1,15	-1,48	-1,49	-1,77
5	-1,00	-1,07	-1,15	-1,20	-1,13	-1,11	-1,11	-1,41	-1,46	-1,76
6	-0,99	-1,06	-1,13	-1,18	-1,11	-1,09	-1,09	-1,37	-1,43	-1,56
7	-1,01	-1,08	-1,16	-1,20	-1,13	-1,11	-1,10	-1,36	-1,41	-1,53
8	-1,01	-1,07	-1,15	-1,20	-1,13	-1,10	-1,09	-1,36	-1,41	-1,51
9	-1,01	-1,08	-1,16	-1,20	-1,13	-1,11	-1,09	-1,36	-1,41	-1,48
10	-1,02	-1,08	-1,15	-1,19	-1,12	-1,10	-1,09	-1,36	-1,42	-1,65
11	-1,05	-1,11	-1,18	-1,22	-1,14	-1,13	-1,11	-1,36	-1,42	-1,62
12	-1,07	-1,11	-1,17	-1,22	-1,15	-1,13	-1,11	-1,36	-1,42	-1,52
13	-1,11	-1,14	-1,17	-1,22	-1,16	-1,14	-1,12	-1,36	-1,42	-1,52
14	-1,29	-1,17	-1,20	-1,29	-1,22	-1,18	-1,17	-1,43	-1,49	-1,70
15	-1,34	-1,17	-1,27	-1,22	-1,21	-1,16	-1,15	-1,39	-1,48	-1,82
16	-1,50	-1,36	-1,37	-1,25	-1,07	-0,69	-0,33	0,01	0,49	0,86
17	-1,45	-1,01	-0,82	-0,52	-0,15	0,26	0,53	0,73	0,94	1,05
18	-1,63	-0,92	-0,41	0,01	0,44	0,78	0,94	1,01	1,01	0,97
19	-1,70	-1,41	-0,10	0,36	0,76	0,97	1,02	0,99	0,89	0,75
20	-1,64	-2,05	0,09	0,62	0,96	1,00	0,92	0,79	0,61	0,46
21	-1,58	-1,98	-0,26	0,82	1,01	0,74	0,54	0,36	0,16	0,09
22	-1,57	-1,96	-0,55	0,93	0,86	0,17	-0,07	-0,22	-0,38	-0,31
23	-0,18	0,03	0,86	0,94	-0,63	-1,98	-1,62	-1,40	-1,16	-0,77
24	0,54	0,73	1,02	0,82	-0,32	-2,02	-1,63	-1,40	-1,18	-0,77
25	0,95	1,03	0,96	0,62	0,02	-2,03	-1,68	-1,43	-1,20	-0,80
26	1,04	1,01	0,74	0,36	-0,14	-1,35	-1,74	-1,45	-1,23	-0,80
27	0,96	0,82	0,41	0,03	-0,39	-0,90	-1,71	-1,49	-1,31	-0,80
28	0,55	0,30	-0,18	-0,49	-0,77	-1,00	-1,57	-1,55	-1,41	-0,81
29	-0,08	-0,37	-0,81	-0,96	-1,08	-1,22	-1,60	-1,67	-1,56	-0,85
30	-1,06	-1,12	-1,27	-1,22	-1,20	-1,24	-1,52	-1,88	-1,78	-1,06

Tomada	Cp médio					
	150°	165°	180°	-165°	-150°	-135°
1	-1,16	-1,14	-1,00	-1,38	-1,58	-1,76
2	-0,80	-1,14	-0,82	-0,90	-0,60	-0,24
3	0,04	0,17	0,40	0,41	0,57	0,69
4	-0,08	0,75	0,84	0,83	0,89	0,91
5	-0,45	0,96	0,98	0,95	0,98	0,97
6	-0,39	0,94	1,04	1,00	1,01	1,00
7	-0,28	0,92	1,05	1,02	1,04	1,03
8	-0,23	0,94	1,04	1,01	1,03	1,02
9	-0,34	0,87	1,02	1,00	1,02	1,01
10	-0,49	0,90	0,97	0,94	0,97	0,97
11	-0,37	0,85	0,96	0,95	0,97	0,94
12	-0,32	0,71	0,96	0,95	0,92	0,79
13	-0,31	0,55	0,97	0,88	0,66	0,28
14	0,09	0,80	-0,96	-1,49	-1,95	-1,81
15	-0,12	0,71	-0,93	-1,29	-1,89	-1,77
16	0,83	-1,63	-1,86	-1,61	-1,74	-1,63
17	0,72	-0,74	-1,83	-1,60	-1,73	-1,64
18	0,48	-0,53	-1,82	-1,64	-1,78	-1,72
19	0,23	-0,51	-1,67	-1,64	-1,81	-1,79
20	-0,02	-0,62	-1,45	-1,67	-1,91	-1,88
21	-0,36	-0,76	-1,29	-1,76	-2,00	-1,98
22	-0,69	-0,95	-1,33	-1,81	-2,10	-2,13
23	-0,99	-1,04	-1,14	-1,58	-1,95	-2,18
24	-1,01	-1,05	-1,07	-1,47	-1,78	-2,00
25	-1,03	-1,05	-1,04	-1,42	-1,70	-1,90
26	-1,03	-1,05	-1,01	-1,40	-1,65	-1,81
27	-1,05	-1,06	-1,00	-1,39	-1,60	-1,72
28	-1,06	-1,05	-1,00	-1,35	-1,52	-1,65
29	-1,08	-1,06	-1,00	-1,34	-1,50	-1,63
30	-1,13	-1,12	-1,08	-1,42	-1,59	-1,76

Tabela A5: Coeficientes de força nas direções  $x$  e  $y$ ,  $C_{fx}$  e  $C_{fy}$ , nos modelos.

Modelo	Escoamento	0°		15°		30°		45°		60°	
		$C_{fx}$	$C_{fy}$	$C_{fx}$	$C_{fy}$	$C_{fx}$	$C_{fy}$	$C_{fx}$	$C_{fy}$	$C_{fx}$	$C_{fy}$
E1	suave	2,05	-0,31	1,93	-0,15	1,91	1,03	1,63	1,68	0,97	1,94
	turbulento	1,93	-0,61	1,86	-0,03	1,87	0,92	1,57	1,55	0,95	1,89
E2	suave	2,08	-0,11	1,81	-0,50	1,86	0,90	1,47	1,45	0,90	1,76
	turbulento	1,80	-0,42	1,78	-0,23	1,72	0,87	1,47	1,44	0,84	1,66

Modelo	Escoamento	75°		90°		105°		120°		135°	
		$C_{fx}$	$C_{fy}$	$C_{fx}$	$C_{fy}$	$C_{fx}$	$C_{fy}$	$C_{fx}$	$C_{fy}$	$C_{fx}$	$C_{fy}$
E1	suave	-0,20	2,00	-0,22	2,23	0,02	2,23	0,15	2,03	0,31	1,64
	turbulento	0,09	1,95	-0,53	1,94	0,00	2,12	0,32	2,03	0,65	1,89
E2	suave	-0,43	1,80	-0,10	2,14	0,12	2,27	0,24	2,25	0,35	1,83
	turbulento	-0,18	1,78	-0,37	1,87	0,08	2,15	0,33	2,16	0,94	2,12

Modelo	Escoamento	150°		165°		180°		-165°		-150°	
		$C_{fx}$	$C_{fy}$	$C_{fx}$	$C_{fy}$	$C_{fx}$	$C_{fy}$	$C_{fx}$	$C_{fy}$	$C_{fx}$	$C_{fy}$
E1	suave	-0,88	0,69	-1,83	-2,06	-2,33	2,26	-2,27	-2,33	-2,06	-2,27
	turbulento	-0,81	0,62	-1,78	-1,75	-1,91	-2,22	-2,29	-2,36	-2,24	-2,38
E2	suave	-0,78	0,84	-1,74	-1,28	-1,75	-2,01	-1,80	-2,19	-1,90	-2,21
	turbulento	-0,81	0,66	-1,65	-1,24	-1,39	-2,24	-1,67	-2,17	-1,86	-2,30

Modelo	Escoamento	-135°	
		$C_{fx}$	$C_{fy}$
E1	suave	-2,38	-2,35
	turbulento	-2,44	-2,39
E2	suave	-1,95	-2,04
	turbulento	-2,09	-2,16

Tabela A6: Coeficientes de torção,  $C_t$ .

Modelo	Escoamento	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°
		Ct	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct
E1	suave	-0,49	-0,28	-0,11	0,03	0,16	0,38	0,51	0,52	0,52	0,42
	turbulento	-0,53	-0,26	-0,13	0,02	0,14	0,27	0,52	0,51	0,49	0,42
E2	suave	-0,39	-0,30	-0,11	-0,01	0,08	0,30	0,38	0,41	0,46	0,40
	turbulento	-0,41	-0,26	-0,12	-0,02	0,08	0,20	0,38	0,38	0,43	0,44

Modelo	Escoamento	150°	165°	180°	-165°	-150°	-135°
		Ct	Ct	Ct	Ct	Ct	Ct
E1	suave	0,32	-0,36	-0,21	-0,15	0,01	0,00
	turbulento	0,33	-0,30	-0,26	-0,17	-0,06	0,00
E2	suave	0,32	-0,31	-0,31	-0,20	-0,12	-0,03
	turbulento	0,27	-0,30	-0,37	-0,22	-0,13	-0,04

## **APÊNDICE B – COEFICIENTES AERODINÂMICOS, ETAPA 2**



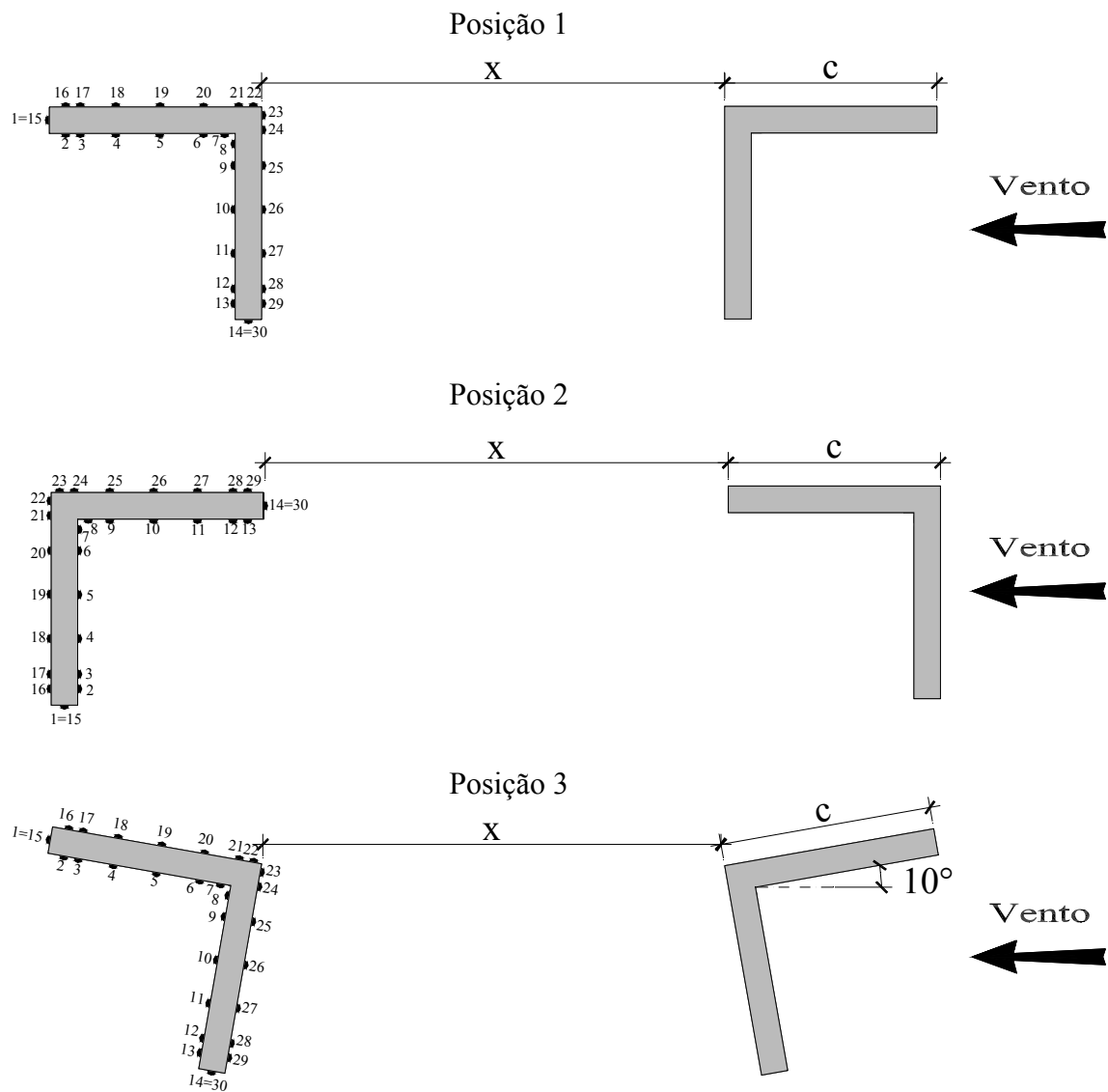


Figura B1: Posições dos modelos na etapa 2 dos ensaios.

Tabela B1: Coeficientes de pressão médios,  $C_p$ , posição P1, escoamentos suave e turbulento.

Tomada	Cp médio, esc. suave				Cp médio, esc. turbulento			
	x=45	x=80	x=140	x=251	x=45	x=80	x=140	x=251
1	-0,95	-0,83	-0,83	-0,99	-0,64	-0,74	-0,84	-1,10
2	-0,72	-0,71	-0,78	-0,87	-0,52	-0,68	-0,77	-1,00
3	-0,64	-0,67	-0,75	-0,82	-0,49	-0,65	-0,74	-0,95
4	-0,61	-0,64	-0,72	-0,77	-0,48	-0,62	-0,70	-0,91
5	-0,58	-0,61	-0,68	-0,74	-0,47	-0,60	-0,67	-0,88
6	-0,52	-0,58	-0,64	-0,71	-0,44	-0,56	-0,66	-0,86
7	-0,51	-0,57	-0,64	-0,70	-0,43	-0,55	-0,64	-0,86
8	-0,51	-0,56	-0,64	-0,69	-0,41	-0,55	-0,64	-0,85
9	-0,51	-0,57	-0,64	-0,70	-0,41	-0,56	-0,63	-0,87
10	-0,58	-0,61	-0,66	-0,72	-0,47	-0,59	-0,64	-0,87
11	-0,65	-0,65	-0,70	-0,74	-0,51	-0,61	-0,66	-0,90
12	-0,69	-0,68	-0,72	-0,75	-0,53	-0,63	-0,68	-0,90
13	-0,68	-0,68	-0,72	-0,75	-0,54	-0,63	-0,68	-0,90
14	-0,69	-0,79	-0,78	-0,79	-0,57	-0,72	-0,73	-0,93
15	-0,93	-0,89	-0,89	-1,00	-0,66	-0,70	-0,91	-1,12
16	-0,62	-0,71	-0,78	-1,02	-0,41	-0,61	-0,88	-1,20
17	-0,61	-0,69	-0,79	-1,07	-0,36	-0,61	-0,94	-1,27
18	-0,58	-0,74	-0,69	-1,11	-0,32	-0,68	-1,16	-1,57
19	-0,65	-0,97	-1,25	-1,66	-0,35	-0,90	-1,57	-1,89
20	-0,78	-1,26	-1,64	-1,80	-0,44	-1,27	-1,78	-1,91
21	-0,93	-1,47	-1,74	-1,76	-0,67	-1,55	-1,74	-1,85
22	-1,01	-1,53	-1,71	-1,72	-0,87	-1,57	-1,70	-1,84
23	-0,17	-0,23	-0,35	-0,26	0,04	-0,20	-0,24	-0,20
24	0,13	0,28	0,27	0,44	0,28	0,35	0,45	0,57
25	0,26	0,52	0,59	0,81	0,34	0,61	0,79	0,95
26	0,26	0,57	0,69	0,94	0,30	0,67	0,89	1,07
27	0,25	0,56	0,69	0,93	0,27	0,65	0,87	0,99
28	0,14	0,43	0,55	0,76	0,11	0,49	0,68	0,74
29	0,04	0,28	0,36	0,54	0,10	0,31	0,49	0,47
30	-0,75	-0,84	-0,84	-0,59	-0,61	-0,72	-0,75	-0,96

Tabela B2: Coeficientes de pressão médios,  $C_p$ , posição P2, escoamentos suave e turbulento.

Tomada	Cp médio, esc. suave				Cp médio, esc. turbulento			
	x=46,5	x=81	x=141	x=247,5	x=46,5	x=81	x=141	x=247,5
1	-0,92	-0,91	-0,73	-0,71	-0,78	-0,73	-0,66	-0,85
2	0,19	0,38	0,41	0,56	0,23	0,38	0,48	0,60
3	0,36	0,59	0,62	0,79	0,41	0,59	0,71	0,88
4	0,51	0,76	0,81	1,00	0,52	0,76	0,92	1,14
5	0,53	0,82	0,92	1,09	0,59	0,85	1,01	1,25
6	0,55	0,84	0,95	1,14	0,63	0,89	1,06	1,31
7	0,58	0,86	0,95	1,12	0,65	0,88	1,04	1,28
8	0,59	0,86	0,95	1,12	0,65	0,88	1,04	1,28
9	0,53	0,79	0,90	1,08	0,60	0,84	1,01	1,25
10	0,46	0,73	0,85	1,05	0,55	0,79	0,97	1,22
11	0,36	0,65	0,79	1,01	0,49	0,72	0,93	1,16
12	0,23	0,53	0,74	1,00	0,38	0,66	0,92	1,16
13	0,14	0,45	0,70	0,99	0,30	0,59	0,91	1,18
14	-0,33	-0,08	0,06	0,43	-0,19	0,12	0,32	0,54
15	-0,93	-0,83	-0,70	-0,70	-0,80	-0,74	-0,68	-0,85
16	-0,82	-0,74	-0,64	-0,66	-0,68	-0,63	-0,65	-0,83
17	-0,84	-0,74	-0,62	-0,66	-0,68	-0,63	-0,64	-0,83
18	-0,84	-0,73	-0,61	-0,66	-0,67	-0,61	-0,64	-0,83
19	-0,85	-0,75	-0,65	-0,69	-0,68	-0,63	-0,67	-0,88
20	-0,94	-0,82	-0,70	-0,73	-0,71	-0,67	-0,70	-0,93
21	-0,98	-0,85	-0,74	-0,78	-0,71	-0,68	-0,73	-0,99
22	-1,00	-0,89	-0,78	-0,82	-0,71	-0,71	-0,76	-1,02
23	-1,01	-1,03	-0,98	-1,02	-0,73	-0,82	-0,90	-1,18
24	-0,88	-0,94	-0,93	-0,98	-0,62	-0,77	-0,87	-1,14
25	-0,83	-0,98	-1,08	-1,20	-0,65	-0,88	-1,08	-1,37
26	-0,95	-1,19	-1,45	-1,59	-0,78	-1,13	-1,41	-1,76
27	-1,00	-1,31	-1,71	-1,43	-0,93	-1,11	-1,63	-1,57
28	-1,07	-1,45	-1,76	-1,70	-1,11	-1,69	-1,66	-1,80
29	-1,08	-1,48	-1,70	-1,64	-1,25	-1,72	-1,60	-1,75
30	-0,39	-0,23	0,15	0,36	-0,16	-0,01	0,31	0,39

Tabela B3: Coeficientes de pressão médios,  $C_p$ , posição P3, escoamentos suave e turbulento.

Tomada	Cp médio, esc. suave				Cp médio, esc. turbulento			
	x=44,2	x=78,8	x=139	x=245,5	x=44,2	x=78,8	x=139	x=245,5
1	-0,41	-1,14	-1,12	-1,01	-1,11	-1,08	-1,01	-0,95
2	-0,28	-0,94	-0,94	-0,89	-0,88	-0,93	-0,87	-0,86
3	-0,25	-0,86	-0,87	-0,85	-0,81	-0,86	-0,81	-0,86
4	-0,23	-0,81	-0,81	-0,80	-0,78	-0,83	-0,78	-0,84
5	-0,22	-0,77	-0,78	-0,78	-0,76	-0,80	-0,76	-0,84
6	-0,19	-0,72	-0,73	-0,76	-0,71	-0,75	-0,73	-0,81
7	-0,19	-0,70	-0,71	-0,74	-0,70	-0,75	-0,72	-0,81
8	-0,18	-0,70	-0,70	-0,73	-0,68	-0,75	-0,71	-0,81
9	-0,19	-0,72	-0,72	-0,73	-0,69	-0,75	-0,71	-0,81
10	-0,22	-0,77	-0,75	-0,76	-0,75	-0,79	-0,73	-0,83
11	-0,25	-0,82	-0,80	-0,78	-0,83	-0,85	-0,77	-0,83
12	-0,28	-0,86	-0,83	-0,79	-0,86	-0,88	-0,78	-0,84
13	-0,30	-0,87	-0,84	-0,81	-0,87	-0,88	-0,79	-0,84
14	-0,38	-0,96	-0,88	-0,84	-0,93	-0,96	-0,82	-0,87
15	-0,42	-1,10	-1,18	-1,00	-1,14	-1,09	-0,96	-1,00
16	-0,10	-0,70	-0,79	-0,76	-0,61	-0,71	-0,70	-0,78
17	-0,04	-0,63	-0,72	-0,73	-0,51	-0,64	-0,64	-0,74
18	0,03	-0,57	-0,73	-0,79	-0,40	-0,59	-0,64	-0,81
19	0,04	-0,65	-0,84	-1,04	-0,40	-0,67	-0,84	-1,24
20	0,01	-0,80	-1,16	-1,56	-0,42	-0,87	-1,27	-1,87
21	-0,11	-1,01	-1,51	-1,81	-0,48	-1,14	-1,70	-1,94
22	-0,25	-1,12	-1,61	-1,80	-0,51	-1,31	-1,73	-1,89
23	-0,75	0,02	-0,07	-0,02	0,04	0,00	-0,05	-0,02
24	-0,64	0,36	0,47	0,65	0,22	0,42	0,56	0,72
25	-0,53	0,51	0,70	0,94	0,25	0,57	0,81	1,05
26	-0,51	0,51	0,74	0,98	0,25	0,58	0,85	1,08
27	-0,47	0,45	0,67	0,90	0,19	0,51	0,78	0,97
28	-0,47	0,26	0,47	0,65	0,04	0,34	0,55	0,66
29	-0,49	0,08	0,24	0,42	-0,11	0,12	0,31	0,38
30	-0,39	-0,95	-0,94	-0,86	-0,97	-0,96	-0,83	-0,88

Tabela B4: Coeficientes de força nas direções  $x$  e  $y$ ,  $C_{fx}$  e  $C_{fy}$ .

Posição	Escoamento	x = 45		x = 80		x = 140		x = 250	
		$C_{fx}$	$C_{fy}$	$C_{fx}$	$C_{fy}$	$C_{fx}$	$C_{fy}$	$C_{fx}$	$C_{fy}$
P1	suave	0,81	-0,08	1,05	-0,33	1,17	-0,44	1,43	-0,63
	turbulento	0,72	0,05	1,09	-0,32	1,31	-0,66	1,65	-0,71
P2	suave	-1,23	-1,16	-1,38	-1,64	-1,35	-1,99	-1,59	-2,17
	turbulento	-1,10	-1,17	-1,29	-1,68	-1,48	-2,06	-1,90	-2,44
P3	suave	-0,26	0,21	1,18	0,10	1,33	-0,15	1,51	-0,31
	turbulento	0,97	0,35	1,25	0,07	1,39	-0,19	1,61	-0,40

Tabela B5: Coeficientes de torção,  $C_t$ .

Posição	Escoamento	x=45	x=80	x=140	x=250
		$C_t$	$C_t$	$C_t$	$C_t$
P1	suave	-0,14	-0,23	-0,26	-0,36
	turbulento	-0,10	-0,22	-0,34	-0,44
P2	suave	0,06	0,18	0,33	0,33
	turbulento	0,14	0,27	0,33	0,35
P3	suave	0,09	-0,16	-0,21	-0,24
	turbulento	-0,11	-0,18	-0,21	-0,28

## **APÊNDICE C – REGISTRO FOTOGRÁFICO**



Figura C1 : Colocação das mangueiras para medição das pressões estáticas.



Figura C2: Detalhe da colocação das mangueiras.



Figura C3: Colocação do modelo no túnel de vento, primeira etapa dos ensaios.



Figura C4: Detalhe da fixação do modelo no túnel.





Figura C5: Modelo E2, submetido à escoamento turbulento, com ângulo de incidência do vento de  $-135^\circ$ .



Figura C6: Segunda etapa de ensaios, modelos na posição 1, P1, com afastamento  $x/c= 4,43$  e submetidos ao escoamento turbulento.



Figura C7: Modelos na posição 1, P1, com afastamento  $x/c=13,78$  e submetidos ao escoamento turbulento.



Figura C8: Modelos na posição 2, P2, com afastamento  $x/c=4,43$  e submetidos ao escoamento turbulento.



Figura C9: Modelos na posição 2, P2, com afastamento  $x/c=7,87$ , submetidos ao escoamento suave.



Figura C10: Modelos na posição 2, P2, com afastamento  $x/c=13,78$ , submetidos ao escoamento suave.



Figura C11: Modelos na posição 3, P3, com afastamento  $x/c=4,43$ , submetidos ao escoamento suave.



Figura C12: Modelos na posição 3, P3, com afastamento  $x/c=7,87$ , submetidos ao escoamento turbulento.

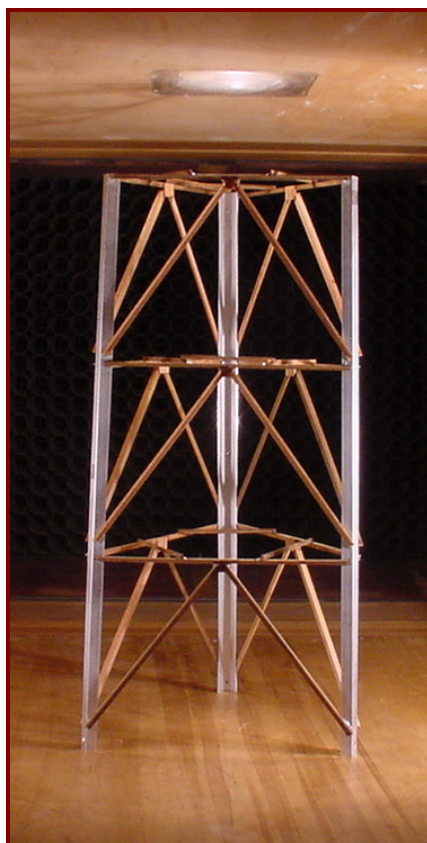


Figura C13: Módulo A, da terceira etapa de ensaios. Modelos seccionais reduzidos de torre de secção triangular.

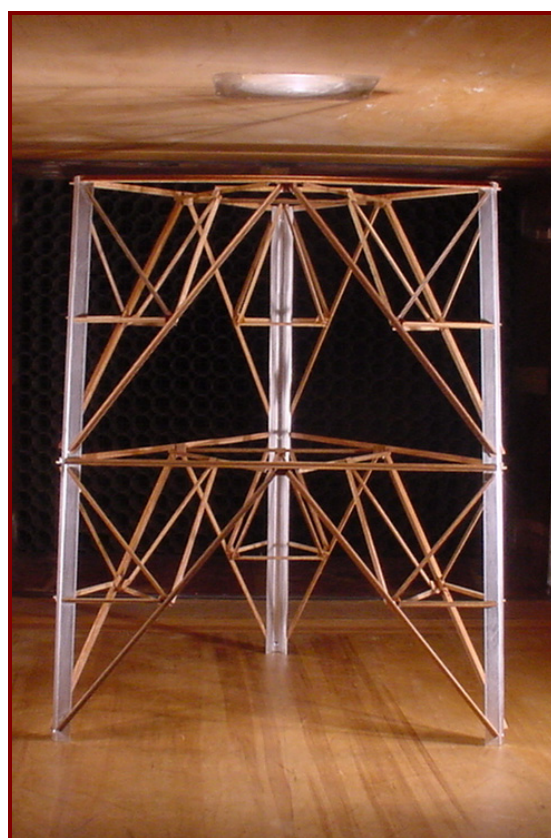


Figura C14: Módulo B, da terceira etapa de ensaios. Modelos seccionais reduzidos de torre de secção triangular.

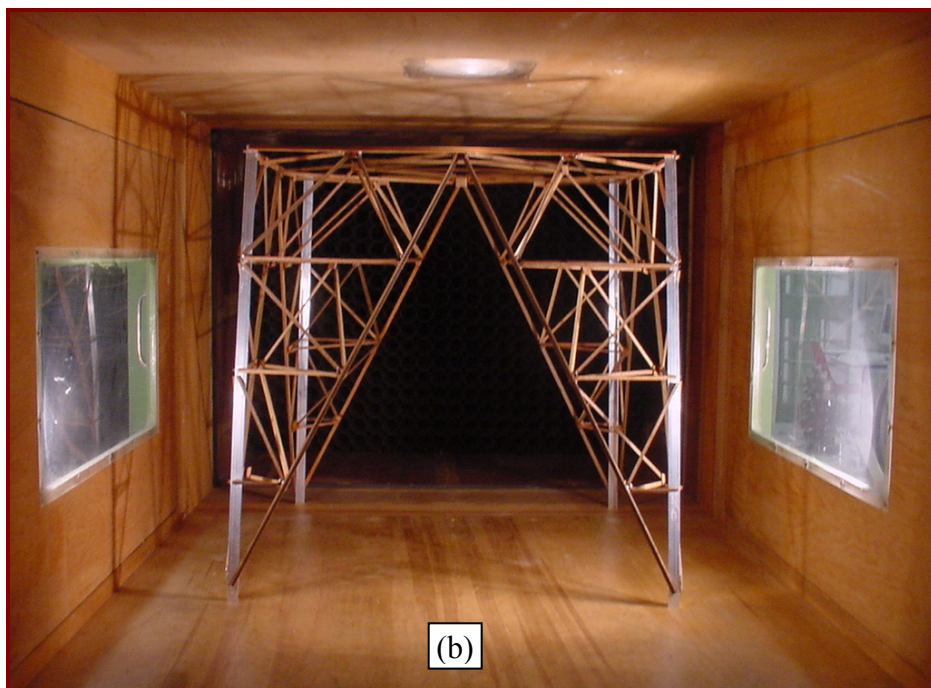
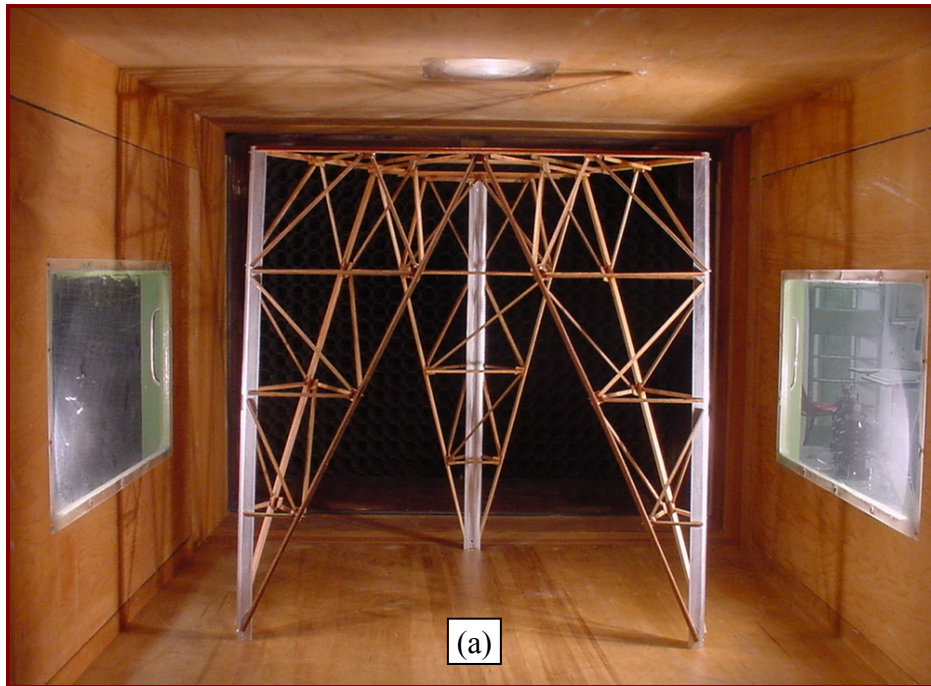


Figura C15: Modelos seccionais reduzidos de torre. (a) Módulo C, secção transversal triangular, (b) Módulo C, secção transversal quadrada.

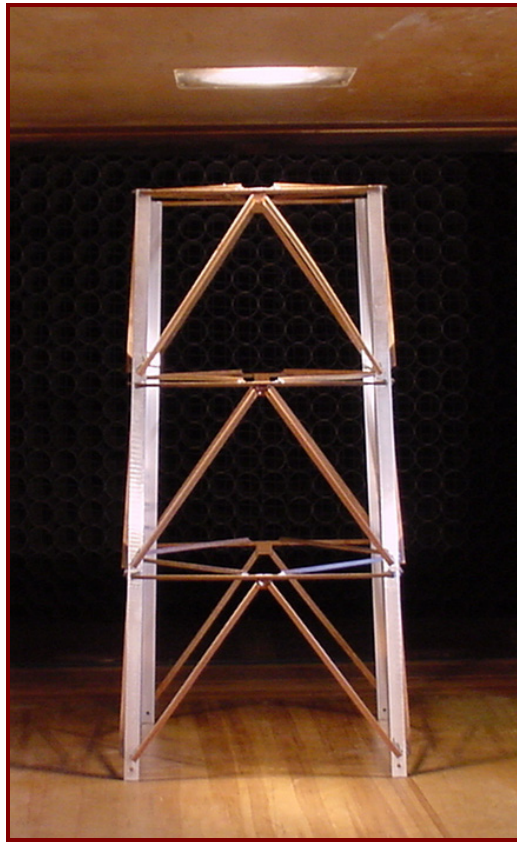


Figura C16: Módulo A, da terceira etapa de ensaios. Modelos seccionais reduzidos de torre de secção quadrada.

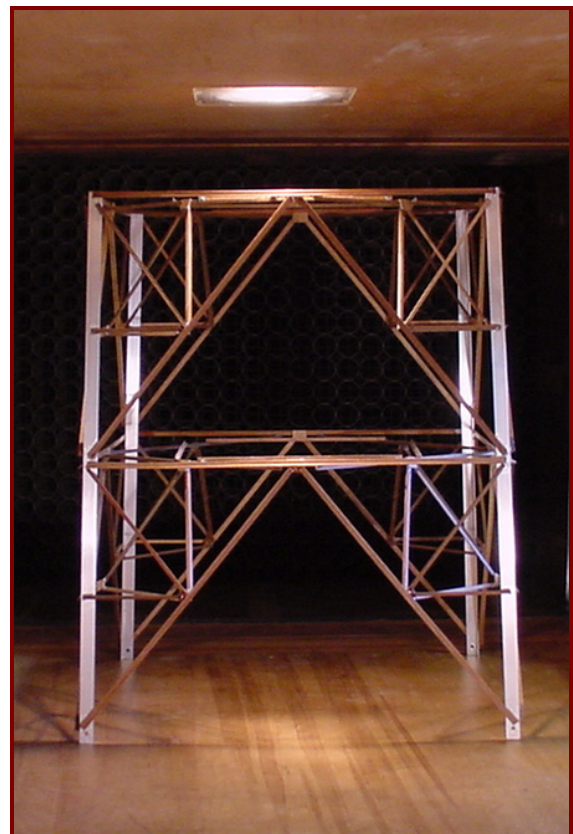


Figura C17: Módulo B, da terceira etapa de ensaios. Modelos seccionais reduzidos de torre de secção quadrada.