

**ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE UM EDIFÍCIO
ALTO SUBMETIDO À AÇÃO DINÂMICA DO VENTO**

Leandro Fleck Fadel Miguel

Porto Alegre
Novembro 2003

LEANDRO FLECK FADEL MIGUEL

**ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE UM EDIFÍCIO
ALTO SUBMETIDO À AÇÃO DINÂMICA DO VENTO**

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
Novembro 2003

M636e

Miguel, Leandro Fleck Fadel

Estudo teórico e experimental de um edifício alto submetido à ação dinâmica do vento / Leandro Fleck Fadel Miguel ; orientadores, Acir Mércio Loredo-Souza, Marcelo Maia Rocha – Porto Alegre, 2003.

Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

1. Edifícios Altos. 2. Vento – Estruturas – Ensaios. I. Souza, Acir Mércio Loredo, orient. II. Rocha, Marcelo Maia, orient. III. Título.

CDU 624.042.4(043)

LEANDRO FLECK FADEL MIGUEL

**ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE UM EDIFÍCIO
ALTO SUBMETIDO À AÇÃO DINÂMICA DO VENTO**

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, 05 de Novembro de 2003

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

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

Prof. Américo Campos Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof^a . 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. Ronald José Ellwanger (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Aos meus pais
Aos meus amigos
À minha namorada

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores e amigos, Prof. Acir Mércio Loredo-Souza e Prof. Marcelo Maia Rocha, agradeço pela dedicação e estímulo durante minha formação e realização deste trabalho.

A todos os professores e funcionários da Escola de Engenharia e do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, pelos ensinamentos.

Ao pessoal do Laboratório de Aerodinâmica das Construções, os engenheiros Gustavo Núñez e Élviz Carpeggiani, pelas dicas essenciais, o técnico Paulo Francisco Bueno e os bolsistas Renê e Aloísio pelo auxílio prestado para a parte experimental desse trabalho.

A minha família, meus pais pelo incentivo e amizade, minha irmã pelas dicas e sugestões, ao colega de toda a graduação Tiago Filomena, e a minha namorada Viviane Spadoni, fundamental nesse ano de dissertação.

À CAPES, pela bolsa de estudos concedida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xv
RESUMO	xxiii
ABSTRACT	xxiv
1. INTRODUÇÃO	p.1
1.1. GENERALIDADES.....	p.1
1.2. OBJETIVOS.....	p.2
1.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	p.3
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	p.5
2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS	p.7
2.1. RESPOSTA NA DIREÇÃO LONGITUDINAL AO VENTO.....	p.7
2.1.1. Turbulência Atmosférica.....	p.7
2.1.2. Parâmetros Estatísticos.....	p.9
2.1.3. Ação Dinâmica.....	p.11
2.2. RESPOSTA NA DIREÇÃO TRANSVERSAL AO VENTO.....	p.14
2.2.1. Forças em Corpos Imersos em Fluidos em Movimento.....	p.14
2.2.2. Desprendimento de Vórtices.....	p.17
3. MODELOS MATEMÁTICOS	p.22
3.1. MODELOS PARA RESPOSTA LONGITUDINAL AO VENTO.....	p.22

3.1.1. Norma Brasileira - NBR 6123.....	p.22
3.1.2. Norma Canadense - NBCC 1985.....	p.30
3.2. MODELOS PARA RESPOSTA TRANSVERSAL AO VENTO.....	p.36
3.2.1. Norma Canadense - NBCC 1985.....	p.36
4. ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO.....	p.39
4.1. TÚNEL DE VENTO <i>Prof. JOAQUIM BLESSMANN</i>	p.39
4.2. SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL.....	p.42
4.3. ENSAIOS DINÂMICOS.....	p.45
4.3.1. Modelagem Aeroelástica.....	p.45
4.3.1.1. Descrição do Modelo Aeroelástico Equivalente.....	p.46
4.3.1.2. Descrição do Edifício Alto em Estudo.....	p.52
4.3.1.2.1. <i>Geometria</i>	p.52
4.3.1.2.2. <i>Propriedades Dinâmicas</i>	p.54
4.3.1.3. Condições de Semelhança.....	p.55
4.3.1.3.1. <i>Escala de comprimento</i>	p.55
4.3.1.3.2. <i>Escala de massa</i>	p.55
4.3.1.3.3. <i>Escala de momento de inércia de massa</i>	p.56
4.3.1.3.4. <i>Escala de frequência</i>	p.56
4.3.1.3.5. <i>Escala de tempo</i>	p.57
4.3.1.3.6. <i>Escala de velocidades</i>	p.57
4.3.1.3.7. <i>Escala de acelerações</i>	p.58
4.3.1.3.8. <i>Escala de forças</i>	p.58
4.3.1.3.9. <i>Escala de momentos fletores</i>	p.59
4.3.1.3.10. <i>Escala de amortecimento</i>	p.59
4.3.2. Procedimento Experimental.....	p.60
4.3.2.1. Escala Utilizada.....	p.60
4.3.2.2. Modelo Construído.....	p.61
4.3.2.2. Calibração de Frequência e Amortecimento.....	p.62
4.3.2.2.1. <i>Procedimentos realizados</i>	p.62
4.3.2.2.2. <i>Resultados obtidos</i>	p.65
4.3.3. Procedimento nos Ensaio em Túnel de Vento.....	p.69

4.4. ENSAIOS ESTÁTICOS.....	p.71
4.4.1. Balança de Momentos Fletores.....	p.72
4.4.2. Procedimentos nos Ensaios em Túnel de Vento.....	p.76
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	p.79
5.1. RESPOSTA NA DIREÇÃO LONGITUDINAL AO VENTO.....	p.79
5.1.1. Vento Incidindo na Face de Maior Área.....	p.80
5.1.1.1. NBR - 6123.....	p.80
5.1.1.2. NBCC - 1985.....	p.81
5.1.1.3. Resultados do Túnel de Vento.....	p.82
5.1.1.3.1. <i>Resposta Média</i>	p.82
5.1.1.3.2. <i>Resposta Flutuante - RMS</i>	p.83
5.1.1.4. Comparação dos resultados.....	p.85
5.1.2. Vento Incidindo na Face de Menor Área.....	p.86
5.1.2.1. NBR - 6123.....	p.86
5.1.2.2. NBCC - 1985.....	p.87
5.1.2.3. Resultados do Túnel de Vento.....	p.88
5.1.2.3.1. <i>Resposta Média</i>	p.88
5.1.2.3.2. <i>Resposta Flutuante - RMS</i>	p.88
5.1.2.4. Comparação dos resultados.....	p.90
5.2. RESPOSTA NA DIREÇÃO TRANSVERSAL AO VENTO.....	p.92
5.2.1. Vento Incidindo na Face de Maior Área.....	p.92
5.2.1.1. Número de Strouhal.....	p.92
5.2.1.2. NBCC - 1985.....	p.92
5.2.1.3. Resultados do Túnel de Vento.....	p.94
5.2.1.4. Comparação dos resultados.....	p.95
5.2.2. Vento Incidindo na Face de Menor Área.....	p.97
5.2.2.1. Número de Strouhal.....	p.97
5.2.2.2. NBCC - 1985.....	p.97
5.2.2.3. Resultados do Túnel de Vento.....	p.98
5.2.2.4. Comparação dos resultados.....	p.99
5.3. COMPARAÇÃO ENTRE AS RESPOSTAS LONGITUDINAL E TRANSVERSAL À DIREÇÃO DO VENTO.....	p.101

5.3.1. Vento Incidindo na Face de Maior Área.....	p.101
5.3.2. Vento Incidindo na Face de Menor Área.....	p.103
6. CONCLUSÕES.....	p.105
6.1. GENERALIDADES.....	p.105
6.2. TRABALHOS FUTUROS.....	p.106
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	p.107
8. ANEXOS.....	p.110
Anexo A – Resposta Média Experimental.....	p.110
Anexo B – Resposta Longitudinal pela NBR - 6123 com vento incidindo na face de maior área.....	p.113
Anexo C – Resposta Longitudinal pela NBR - 6123 com vento incidindo na face de menor área.....	p.119
Anexo D – Resposta Longitudinal pelo NBCC - 1985 com vento incidindo na face de maior área.....	p.125
Anexo E – Resposta Longitudinal pelo NBCC - 1985 com vento incidindo na face de menor área.....	p.131
Anexo F – Resposta Transversal pelo NBCC - 1985.....	p.137

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Divisão da função de velocidade do vento em média e flutuante (Macdonald, 1975).....	p.8
Figura 2.2: Parâmetros Básicos (Blessmann, 2001).....	p.9
Figura 2.3: Escoamento de um fluido ideal (Macdonald, 1975).....	p.14
Figura 2.4: Escoamento de um fluido ideal em um aerofólio (Macdonald, 1975).....	p.15
Figura 2.5: Escoamento de um fluido real em um aerofólio (Macdonald, 1975).....	p.15
Figura 2.6: Escoamento de um fluido real em um cilindro circular (Macdonald, 1975).....	p.16
Figura 2.7: Forças oblíquas de sucção devido ao desprendimento de vórtices (Macdonald, 1975).....	p.18
Figura 2.8: Número de Strouhal para diversas seções (Blessmann, 1998)...	p.20
Figura 2.9: Variação do número Strouhal com o número de Reynolds para cilindros circulares (Macdonald, 1975).....	p.21
Figura 3.1: Coeficiente de amplificação dinâmica (ξ) para categoria I (L=1800 e h em metros) (NBR - 6123).....	p.27
Figura 3.2: Coeficiente de amplificação dinâmica (ξ) para categoria II (L=1800 e h em metros) (NBR - 6123).....	p.28
Figura 3.3: Coeficiente de amplificação dinâmica (ξ) para categoria III (L=1800 e h em metros) (NBR - 6123).....	p.28
Figura 3.4: Coeficiente de amplificação dinâmica (ξ) para categoria IV (L=1800 e h em metros) (NBR - 6123).....	p.29
Figura 3.5: Coeficiente de amplificação dinâmica (ξ) para categoria V (L=1800 e h em metros) (NBR - 6123).....	p.29
Figura 3.6: Fator de redução de dimensão, como uma função da largura, altura e frequência reduzida da estrutura (NBCC, 1985).....	p.35

Figura 3.7: Fator da energia de rajada como uma função do número de onda (NBCC, 1985).....	p.35
Figura 3.8: Fator de resposta turbulenta, função da largura e da altura da estrutura (NBCC, 1985).....	p.36
Figura 4.1: Túnel de Vento <i>Prof. Joaquim Blessmann</i>	p.39
Figura 4.2: Circuito aerodinâmico do Túnel de Vento <i>Prof. Joaquim Blessmann</i> (Blessmann, 1990).....	p.40
Figura 4.3: Gaveta colocada no início da câmara de ensaios para representação do vento natural.....	p.43
Figura 4.4: Blocos disseminados no piso para representação do vento natural.....	p.44
Figura 4.5: Perfil de velocidades médias e intensidade da componente longitudinal de turbulência.....	p.44
Figura 4.6: Espectro de potência da componente longitudinal de turbulência.....	p.45
Figura 4.7: Foto da base do modelo.....	p.47
Figura 4.8: Determinação da rigidez rotacional K_q - medidas em mm.....	p.48
Figura 4.9: Acelerômetros fixados na parte inferior do modelo.....	p.50
Figura 4.10: Equipamento utilizado para aquisição de sinal.....	p.50
Figura 4.11: Modelo Aeroelástico Equivalente e edifício alto em estudo....	p.51
Figura 4.12: Vista lateral e planta baixa.....	p.52
Figura 4.13: Prisma retangular.....	p.53
Figura 4.14: Modelo do edifício alto em MDF, escala 1:400.....	p.62
Figura 4.15: Pesos de chumbo utilizados no ajuste da frequência.....	p.63
Figura 4.16: Pás de diferentes dimensões dos amortecedores.....	p.64
Figura 4.17: Espectro de potência gerado no programa em HPVEE 3.2 para determinação da frequência em torno do eixo y.....	p.65

Figura 4.18: Espectro de potência gerado no programa em HPVVEE 3.2 para determinação da frequência em torno do eixo x.....	p.65
Figura 4.19: A curva superior mostra o sinal da vibração em torno do eixo x.....	p.67
Figura 4.20: A curva inferior mostra o sinal da vibração em torno do eixo x.....	p.68
Figura 4.21: Função exponencial para a aproximação do amortecimento....	p.68
Figura 4.22: Decaimento do sinal em torno de x.....	p.69
Figura 4.23: Modelo montado e instrumentado em túnel de vento.....	p.70
Figura 4.24: Modelo pronto para ensaio.....	p.70
Figura 4.25: Deslocamento no topo nas direções longitudinal e transversal ao vento em função do tempo.....	p.71
Figura 4.26: Perspectiva da Balança de Momentos Fletores.....	p.72
Figura 4.27: Vista lateral da Balança de Momentos Fletores.....	p.73
Figura 4.28: Calibração da Balança.....	p.74
Figura 4.29: Função de Calibração.....	p.75
Figura 4.30: Equipamento utilizado para aquisição de sinal.....	p.75
Figura 4.31: Correção do momento fletor.....	p.77
Figura 4.32: Balança posicionada no túnel de vento.....	p.78
Figura 4.33: Modelo sobre a balança pronto para ensaio.....	p.78
Figura 5.1: Comparação entre os resultados obtidos para a resposta longitudinal para vento incidindo na face de maior área.....	p.86
Figura 5.2: Comparação entre os resultados obtidos para a resposta longitudinal para vento incidindo na face de menor área.....	p.91
Figura 5.3: Comparação entre os resultados obtidos para a resposta transversal para vento incidindo na face de maior área.....	p.96
Figura 5.4: Comparação entre os resultados obtidos para a resposta transversal para vento incidindo na face de menor área.....	p.101

Figura 5.5: Comparação entre as respostas experimentais longitudinal e transversal para vento incidindo na face de maior área..... p.102

Figura 5.6: Comparação entre as respostas experimentais longitudinal e transversal para vento incidindo na face de menor área..... p.104

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Velocidade no topo do modelo e do protótipo em função da pressão de referência.....	p.42
Tabela 4.2: Fatores de escala com valores experimentais.....	p.66
Tabela 4.3: Fator de amortecimento crítico experimental.....	p.67
Tabela 5.1: Resposta longitudinal para vento incidindo na face de maior área pela NBR - 6123.....	p.81
Tabela 5.2: Resposta longitudinal para vento incidindo na face de maior área pelo NBCC - 1985.....	p.82
Tabela 5.3: Resposta média experimental para vento incidindo na face de maior área.....	p.83
Tabela 5.4: Resposta longitudinal experimental RMS para vento incidindo na face de maior área.....	p.83
Tabela 5.5: Resposta experimental média x RMS para vento incidindo na face de maior área.....	p.84
Tabela 5.6: Resposta longitudinal experimental máxima x RMS para vento incidindo na face de maior área.....	p.84
Tabela 5.7: Comparação entre os resultados obtidos para a resposta longitudinal para vento incidindo na face de maior área.....	p.85
Tabela 5.8: Resposta longitudinal para vento incidindo na face de menor área pela NBR - 6123.....	p.86
Tabela 5.9: Resposta longitudinal para vento incidindo na face de menor área pelo NBCC - 1985.....	p.87
Tabela 5.10: Resposta longitudinal experimental média para vento incidindo na face de menor área.....	p.88
Tabela 5.11: Resposta longitudinal experimental RMS para vento incidindo na face de menor área.....	p.89
Tabela 5.12: Resposta experimental média x RMS para vento incidindo na face de menor área.....	p.89

Tabela 5.13: Resposta longitudinal experimental máxima x RMS para vento incidindo na face de menor área.....	p.90
Tabela 5.14: Comparação entre os resultados obtidos para a resposta longitudinal para vento incidindo na face de menor área.....	p.90
Tabela 5.15: Resposta transversal experimental para vento incidindo na face de maior área.....	p.94
Tabela 5.16: Resposta transversal experimental máxima x RMS para vento incidindo na face de maior área.....	p.94
Tabela 5.17: Comparação entre os resultados obtidos para a resposta transversal para vento incidindo na face de maior área.....	p.95
Tabela 5.18: Resposta transversal experimental para vento incidindo na face de menor área.....	p.98
Tabela 5.19: Resposta transversal experimental máxima x RMS para vento incidindo na face de menor área.....	p.99
Tabela 5.20: Comparação entre os resultados obtidos para a resposta transversal para vento incidindo na face de menor área.....	p.100
Tabela 5.21: Comparação entre as respostas experimentais longitudinal e transversal para vento incidindo na face de maior área.....	p.102
Tabela 5.22: Comparação entre as respostas experimentais longitudinal e transversal para vento incidindo na face de menor área.....	p.103

SÍMBOLOS

LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS:

A	<i>área frontal</i>
A_i	<i>área de influência para a coordenada i</i>
A_0	<i>área arbitrária de referência</i>
B	<i>fator de resposta turbulenta</i>
C	<i>fator de correção em função da temperatura do ar e pressão atmosférica</i>
C_{ai}	<i>coeficiente de arrasto para a coordenada i;</i>
C_e	<i>fator de exposição</i>
C_{eH}	<i>fator de exposição para o topo da edificação</i>
C_g	<i>fator de efeito da rajada</i>
C_m	<i>coeficiente de momento fletor</i>
D_L	<i>dimensão no sentido da deflexão</i>
F	<i>fator de energia de rajada</i>
$F_{i,j}$	<i>força total, na direção da coordenada i, para o modo de vibração j</i>

\bar{F}_i	<i>força média, na direção da coordenada i</i>
$\hat{F}_{i,j}$	<i>força flutuante, na direção da coordenada i, para o modo de vibração j</i>
\bar{F}_H	<i>força referente a força flutuante</i>
F_m	<i>força do modelo</i>
F_p	<i>força do protótipo</i>
H	<i>altura da edificação</i>
I_m	<i>momento de inércia de massa</i>
I_1	<i>intensidade da componente longitudinal da turbulência = \mathbf{s}_1/V</i>
K	<i>constante elástica da mola</i>
K	<i>fator relacionado com o coeficiente da rugosidade superficial do terreno</i>
L	<i>largura da edificação</i>
\bar{L}	<i>deflexão na direção X ou Y</i>
L_m	<i>comprimento do modelo</i>
L_p	<i>comprimento do protótipo</i>

M	<i>massa por unidade de comprimento no terço superior</i>
M	<i>momento fletor em torno do eixo da base</i>
M_B	<i>momento fletor médio na lâmina da balança</i>
M_M	<i>momento fletor médio na base do modelo</i>
P	<i>pressão atmosférica</i>
Re	<i>número de Reynolds = $(V d)/\nu$</i>
S_1	<i>fator topográfico</i>
S_3	<i>fator estatístico</i>
St	<i>Número de Strouhal = $(f_s d)/V$</i>
T	<i>temperatura</i>
V	<i>velocidade média do vento</i>
V	<i>velocidade média horária de referência</i>
V_{cr}	<i>velocidade crítica do vento = $(f_n d)/St$</i>
V_H	<i>velocidade média horária no topo da edificação</i>
V_o	<i>velocidade básica do vento</i>

V_p	<i>velocidade de projeto</i>
V_r	<i>velocidade reduzida ou adimensional = $V / (f_n d)$</i>
V_{ref}	<i>velocidade média em uma altura de referência</i>
$V(z)$	<i>velocidade média do vento na altura z</i>
V_t	<i>tensão</i>

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS:

a	<i>dimensão linear</i>
b	<i>dimensão linear</i>
b	<i>parâmetro de correção definido pela NBR - 6123 para passagem de categoria</i>
c	<i>dimensão linear</i>
d	<i>dimensão linear característica</i>
d	<i>ponto de aplicação da força</i>
$d_{normalizado}$	<i>deslocamento normalizado</i>
f	<i>frequência</i>
f_m	<i>frequência do modelo</i>

f_n	<i>freqüência natural ou fundamental de vibração da estrutura, também denominada de n_o</i>
f_p	<i>freqüência do protótipo</i>
f_s	<i>freqüência de desprendimento de um par de vórtices (freqüência de Strouhal)</i>
g	<i>fator de pico</i>
g_p	<i>fator de pico do efeito total do carregamento</i>
k_o	<i>coeficiente do túnel de vento que vincula q e Δp_a</i>
k_q	<i>rigidez rotacional</i>
m_i	<i>massa discreta referente a coordenada i</i>
m_o	<i>massa arbitrária de referência</i>
m_m	<i>massa do modelo</i>
m_p	<i>massa do protótipo</i>
n_o	<i>freqüência natural ou fundamental de vibração da estrutura</i>
p	<i>expoente da curva de potência teórica ajustada ao perfil de velocidades médias</i>
q	<i>pressão dinâmica ao longe = $(1/2) \rho V^2$</i>

q	<i>pressão dinâmica de projeto</i>
q_H	<i>pressão dinâmica correspondente a V_H</i>
\bar{q}_p	<i>pressão dinâmica de projeto</i>
s	<i>fator de redução de dimensão</i>
t_m	<i>tempo do modelo</i>
t_p	<i>tempo do protótipo</i>
v_m	<i>velocidade do modelo</i>
v_p	<i>velocidade do protótipo</i>
x_i	<i>deslocamento correspondente a coordenada i</i>
z_i	<i>cota da coordenada i</i>
z_{ref}	<i>cota de referência = 10m</i>
z_{ref}	<i>altura de referência</i>

LETRAS GREGAS MINÚSCULAS:

z	<i>razão de amortecimento crítico</i>
q	<i>ângulo de giro</i>

- l** *comprimento de onda*
- l** *alteamento= H/D*
- l_a** *fator de escala de aceleração*
- l_L** *fator de escala de comprimento*
- l_F** *fator de escala de força*
- l_f** *fator de escala de frequência*
- l_M** *fator de escala de massa*
- l_r** *fator de escala de massa específica*
- l_{Im}** *fator de escala de momento de inércia de massa*
- l_{MF}** *fator de escala de momento fletor*
- l_T** *fator de escala de tempo*
- l_v** *fator de escala de velocidade*
- m** *valor médio do efeito total do carregamento*
- n** *viscosidade cinemática do ar*

<i>n</i>	<i>razão de flutuação</i>
<i>x</i>	<i>fator de amplificação dinâmica</i>
<i>r</i>	<i>massa específica do ar</i>
<i>r_m</i>	<i>massa específica do modelo</i>
<i>r_p</i>	<i>massa específica do protótipo</i>
<i>s</i>	<i>desvio padrão do efeito total do carregamento</i>

LETRAS GREGAS MAIÚSCULAS:

Δp_a	<i>pressão de referência (diferença de pressão entre os anéis piezométricos)</i>
Ψ_i	<i>razão entre as massas m_i e m_o</i>

RESUMO

MIGUEL, L.F.F. Estudo teórico e experimental de um edifício alto submetido à ação dinâmica do vento. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A crescente valorização dos imóveis nos centros de grandes cidades, com o custo do metro quadrado cada vez mais elevado, assim como o aprimoramento de técnicas e materiais construtivos, levaram a uma tendência mundial da construção de edificações altas. Contudo essas edificações altas, leves e esbeltas são suscetíveis a problemas dinâmicos, que podem levar a um comprometimento de confiabilidade das mesmas ou ao desconforto de seus usuários. Dentre as ações dinâmicas o vento trata-se de uma das mais importantes. A previsão da resposta induzida pela ação dinâmica do vento por métodos analíticos é complexa e de difícil resolução, principalmente para os efeitos transversais ao sentido da velocidade média do vento. Assim a construção de modelos aeroelásticos para a análise do comportamento dinâmico de edifícios altos em túnel de vento é, ainda hoje, a maneira mais confiável e precisa para chegar-se na resposta. Na presente dissertação é apresentado um estudo teórico e experimental de um edifício alto submetido a ação dinâmica do vento. As respostas obtidas em túnel de vento, através de um modelo aeroelástico equivalente de dois graus fundamentais de liberdade, são comparadas com as formulações da Norma Brasileira NBR - 6123, para a resposta longitudinal ao vento, e da Norma Canadense NBCC - 1985, para as respostas longitudinal e transversal ao vento.

Palavras-chave: modelagem aeroelástica, vento, ação dinâmica, edifício alto.

ABSTRACT

MIGUEL, L.F.F. Estudo teórico e experimental de um edifício alto submetido à ação dinâmica do vento. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The growing valorization of the properties in the centers of great cities and the rising cost of the square meter, as well as the improvement of techniques and constructive materials, leads to a world tendency of high constructions. However those high, light and slender constructions are susceptible to dynamic problems, that can take to a loss of reliability or its users' discomfort. Among dynamic actions the wind is one of the most important. The wind induced dynamic response's prediction by analytic methods is complex and of difficult resolution, mainly for the across-wind response. Like this the construction of aeroelastic models for the analysis of the dynamic behavior of high buildings in wind tunnel is, still, the most reliable and precise way to reach the response. In the present dissertation a theoretical and experimental study of a tall building submitted to the dynamic action of the wind is presented. The responses obtained in wind tunnel, through a aeroelastic equivalent model of two fundamental degrees of freedom, are compared with Brazilian Code formulations NBR - 6123, for along-wind response, and of Canadian Code NBCC - 1985, for the along-wind and across-wind responses.

Key-words: aeroelastic modeling, wind, dynamic action, tall building

1. INTRODUÇÃO

1.1. GENERALIDADES

Embora os primeiros estudos da ação do vento em edifícios altos datem da virada do século XIX, os mais substanciais foram feitos por volta de 1930, coincidindo com o estouro da construção dos "arranha-céus". Estes estudos identificaram muitos dos maiores problemas, resultando em alguns métodos estáticos de projeto. Esse tratamento puramente estático de edifícios altos desconsiderava as características mecânicas da estrutura, como rigidez, amortecimento e distribuição das massas, sendo possível graças a utilização de generosos fatores de segurança, que escondiam as amplificações dinâmicas não consideradas.

O vento não era um problema em construções baixas e pesadas de grossas paredes, mas passou a ser, e em medida crescente, quando as construções foram-se tornando mais esbeltas, e as estruturas usando cada vez menos quantidade de material (Blessmann, 2001).

A necessidade de projetos mais econômicos, o surgimento de novas técnicas e materiais de construção assim como o aprimoramento do dimensionamento causado pelo surgimento de programas computacionais foram os principais responsáveis pelo aparecimento de construções alteadas e com massa reduzida, que são muito mais suscetíveis a problemas de vibração. Essas oscilações, quando são acima de certos níveis, geram desconforto aos seus usuários e até mesmo danos na estrutura. Portanto é de responsabilidade do engenheiro prever essa situação e ser capaz de evitá-la. Blessmann (2001), diz que a importância dos efeitos do vento nas construções está intimamente ligado ao desenvolvimento da tecnologia dos materiais, e da ciência e técnica das construções, bem como a um melhor aproveitamento dos terrenos, com a construção de edifícios cada vez mais altos.

Davenport (1962) foi o pioneiro nas pesquisas relacionadas à resposta longitudinal do vento, em estruturas de edifícios altos, pontes, linhas de transmissão e torres. A questão da resposta transversal recebeu menos atenção, embora seus problemas fossem reconhecidos.

No caso de edifícios altos, esbeltos e flexíveis a excitação devida ao vento na estrutura pode ser amplificada e a resposta dinâmica pode tornar-se ressonante. Em situações desse tipo o componente da resposta dinâmica representa tipicamente de 1/2 a 2/3 da resposta total e representa um importante papel em consideração a integridade da estrutura. Uma outra freqüente consideração é a necessidade de limitar a aceleração horizontal induzida pelo vento para níveis aceitáveis baseados na percepção e conforto do usuário (Isyumov, 1982).

O movimento provocado no topo destas estruturas, pela ação dinâmica do vento, descreve uma trajetória (envelope) elíptica, com grande amplitude na direção transversal à incidência do vento. Modelos matemáticos para determinação da resposta longitudinal induzida pelo vento são baseados na metodologia de Davenport (1962), porém esses métodos não levam a resultados precisos para estruturas com geometrias não usuais. Para a resposta transversal têm se mostrado bastante complexos devido a dependência existente entre as forças resultantes e parâmetros como número de Reynolds, rugosidade superficial, intensidade da turbulência e efeitos de tridimensionalidade. A aplicação de qualquer teoria para a determinação da resposta de um edifício alto à ação do vento, em condições atmosféricas naturais, é complicada pela variação da velocidade do vento com a altura sobre o terreno e pela existência de forças resultantes do movimento da estrutura.

Nesse sentido, os ensaios em túnel de vento têm se mostrado a ferramenta mais confiável e precisa nesse tipo de estudo. Nesse tipo de experimento é possível a representação da estrutura e suas características peculiares, como vizinhança, fato não considerado nos métodos de cálculo. Para isso é necessário uma correta simulação das propriedades geométricas e dinâmicas da estrutura, além da representação das características do vento natural.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo a determinação das respostas longitudinal e transversal através de um estudo teórico e experimental, em modelo reduzido, da ação e efeitos do vento sobre um edifício alto de seção transversal retangular. Este edifício possui 180 m de altura com seção transversal de 45 m por 30 m.

A proposta de estudo é a comparação entre as respostas longitudinais obtidas pela metodologia teórica das normas brasileira e canadense com a resposta obtida pelos ensaios em

túnel de vento, assim como a comparação da formulação da norma canadense para resposta transversal com os valores experimentais.

A realização dos ensaios em túnel de vento do modelo reduzido do edifício ocorreram em duas etapas: ensaios estáticos e ensaios dinâmicos.

Os ensaios dinâmicos foram realizados com um modelo aeroelástico equivalente de dois graus de liberdade para a determinação das respostas flutuantes longitudinal e transversal. Os ensaios estáticos foram realizados para determinação da resposta média na direção do vento. Para isso utilizou-se uma balança de momentos, para a determinação do momento fletor na base do modelo, e através da sua rigidez rotacional, seu deslocamento.

1.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversas pesquisas teóricas e experimentais têm sido realizadas nos últimos anos sobre vibrações em edifícios altos induzidas pelo vento. A seguir apresenta-se uma breve cronologia desses estudos.

- a) Isyumov (1975), realizando estudos na University of Western Ontario, fez uma análise de vibrações devidas ao vento do edifício The First National City Corporation construído no bairro de Manhattan, em Nova York, obtendo resultados muito importantes que serviram para seu projeto.
- b) Melbourne (1980), em experiências realizadas na Monash University, Austrália, utilizou um modelo reduzido comparando com respostas dinâmicas induzidas pelo vento de cinco estudos feitos anteriormente. Seus resultados apresentaram uma precisão razoável, ficando dentro da faixa de tolerância experimental.
- c) Jeary et al. (1983), apresenta o resultado de medições de vibrações causadas pelo vento realizadas em doze edifícios altos na Inglaterra. Informações genéricas são apresentadas e respostas são comparadas com as previstas por modelos matemáticos.

- d) Tanaka et al. (1983), mostra os efeitos da utilização de amortecedores de massa sintonizada ("tuned mass dampers") na redução das amplitudes dos movimentos em edifícios altos, através de análises teóricas e experimentais em túnel de vento.
- e) Blessmann et al. (1985), apresenta um estudo experimental dos efeitos de vizinhança em edifícios altos. Os resultados indicam que tanto a máxima resposta dinâmica como a carga de vento média aumentam significativamente devido à interação entre os edifícios.
- f) Blackmore (1986), realiza estudos experimentais para comparar a resposta dinâmica induzida pelo vento através de diferentes técnicas de modelagem. Esses resultados são comparados com modelos matemáticos mostrando uma boa concordância entre as respostas.
- g) Kwok (1988), mostra a influência da forma do edifício na resposta dinâmica induzida pelo vento em um edifício de seção transversal retangular. Foi encontrado que aberturas horizontais, aberturas nos cantos e cantos chanfrados provocam a redução das repostas longitudinal e transversal ao vento.
- h) Isyumov et al. (1992), apresenta estudos da previsão da resposta dinâmica em um edifício alto de 390 m de altura. Estudos experimentais são realizados sendo discutidos alguns aspectos como amortecimento aerodinâmico e efeitos de vizinhança.
- i) Xu et al.(1992), através de testes experimentais e análises teóricas investiga a resposta torsional de edifícios altos submetidos à ação do vento, comparando com resultados existentes na literatura. Essa comparação indicou que o tipo de modelagem utilizada é eficiente para previsão da resposta torsional induzida pelo vento em edifícios altos.
- j) Kawai (1993), propõe para a análise de desprendimento de vórtices e galope de edifícios altos um modelo reduzido para a análise de flexão e torção separadamente. No trabalho são utilizados quatro modelos com diferentes seções transversais, para a investigação da influência da forma na resposta da estrutura.

- k) Zhang et al.(1994), para investigar os efeitos de vizinhança de prédios com diferentes formas e tamanhos na resposta torsional de um edifício alto, propõe uma série de estudos experimentais em modelo reduzido. De acordo com a situação de vizinhança é encontrado uma resposta torsional 2,2 vezes maior de quando o edifício encontrava-se isolado.
- l) Thepmongkorn et al. (1999), em trabalho conjunto da University of Sydney com Structural Engineering Research Centre, Índia, apresenta um estudo experimental, simulando translação e torção simultaneamente. A parte de translação desse estudo é comparativo com modelo apresentado por Melbourne (1980), levando a excelentes resultados. Ambos estudos utilizam o mesmo edifício para a tomada dos resultados.
- m) Liang et al. (2002), propõe formulações empíricas e analíticas para a determinação da resposta transversal ao vento em edifícios altos de seção transversal retangular. Os resultados são comparados aos obtidos em túnel de vento apresentando boa concordância.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente dissertação está dividida em seis capítulos, sendo esta introdução o primeiro.

O capítulo 2 contém conceitos fundamentais, sendo discutidos aspectos sobre as respostas longitudinal e transversal ao sentido do vento. São abordados temas como turbulência atmosférica e desprendimento de vórtices.

O capítulo 3 apresenta as formulações da normas brasileira NBR - 6123, para a resposta longitudinal, e da norma canadense NBCC - 1985, para as respostas longitudinal e transversal ao sentido do vento.

O capítulo 4 mostra a parte experimental da dissertação. É descrito o modelo aeroelástico equivalente construído que foi utilizado nos ensaios, bem como a balança de momentos fletores. As características desses instrumentos, sua forma de utilização e a simulação do vento natural são discutidos detalhadamente.

No capítulo 5 são feitas análises e comparações entre os resultados das diferentes fontes. Tabelas e gráficos são apresentados para a visualização das respostas.

O capítulo 6 contém as conclusões do trabalho bem como algumas sugestões de trabalhos futuros.

Nos anexos são apresentadas as planilhas de cálculo dos diferentes modelos matemáticos utilizados para alguns dos perfis de velocidade de vento ensaiado em túnel de vento.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1. RESPOSTA NA DIREÇÃO LONGITUDINAL AO VENTO

2.1.1. Turbulência Atmosférica

O movimento do ar sobre a superfície terrestre tem como causa imediata principal as diferenças na pressão atmosférica, causadas pela energia proveniente do sol que origina variações na temperatura do ar. As pressões desequilibradas originam forças que deslocam parcelas do ar atmosférico das zonas de maior pressão para as de menor pressão.

Esse movimento do ar é conhecido como vento e para a engenharia estrutural é de principal interesse conhecer a sua velocidade média e flutuações em torno dela. A formação das flutuações em torno da velocidade média ocorre quase que exclusivamente por agitação mecânica do ar (turbulência) com a formação de um grande número de turbilhões ou redemoinhos. A turbulência é originada pela rugosidade natural e artificial da superfície terrestre. Esses turbilhões gerados pela turbulência vão desde a ordem de grandeza da altura da camada limite atmosférica até a ordem de grandeza do milímetro. Parte da energia cinética, retirada do escoamento médio pelos turbilhões, é transferida por um processo em cascata, até os menores, onde é dissipada em calor pela viscosidade dinâmica. Porém a maior parte dessa energia é transferida pelas tensões de Reynolds para o terreno, onde é dissipada pela rugosidade da superfície.

As flutuações da velocidade do vento em torno de um valor médio, causadas pela turbulência atmosférica, são chamadas de rajadas. Estas flutuações ocorrem em uma seqüência aleatória de freqüências e intensidades. As rajadas mais velozes são de menor duração, da ordem de fração de segundo, e atuam sobre uma pequena região. Correspondem à chegada simultânea, ao ponto em estudo, de turbilhões de diversas dimensões e em condições tais que seus efeitos se superpõem.

A velocidade média do vento é responsável pela ação estática e as rajadas, dependendo da energia cinética e de como essa energia se distribui pelas diversas frequências, pela ação dinâmica. A resposta da estrutura depende muito mais da energia contida em uma seqüência de rajadas do que da intensidade de uma única rajada. E, nesta seqüência, serão mais importantes as componentes em ressonância com a estrutura. A figura 2.1 ilustra a divisão da velocidade do vento em velocidade média e flutuante.

Segundo Blessmann (1995), turbilhões de dimensões tais que envolvam toda a estrutura ocasionarão forças de baixa frequência, que poderão estar em fase, ao menos aproximadamente, ao longo de toda a estrutura. Por outro lado, as rajadas mais violentas são oriundas de turbilhões de dimensões bem menores, que agem local e desordenadamente. As forças são de frequência mais altas que as anteriores, porém de intensidades menores, tendo pouca influência na excitação da estrutura como um todo, devendo ser consideradas no estudo de painéis de revestimento, vidros e estrutura das janelas, etc.

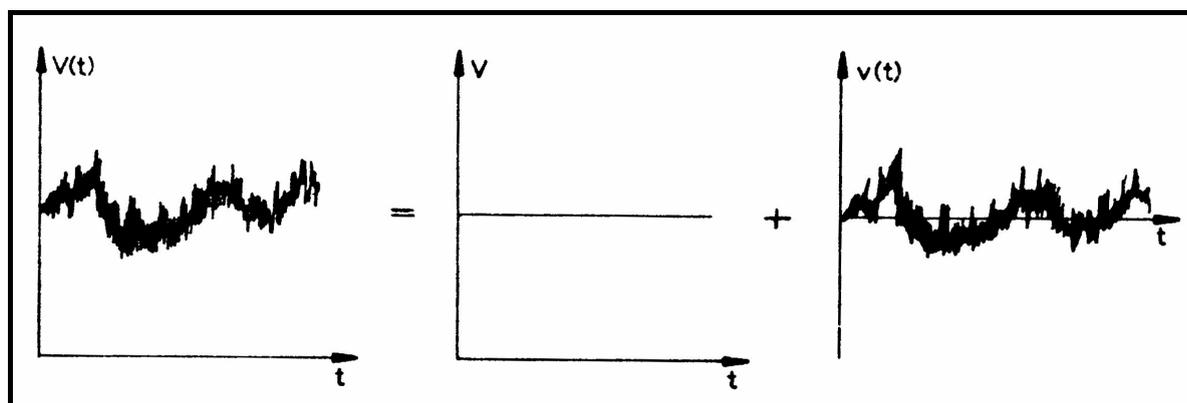


Figura 2.1: Divisão da função de velocidade do vento em média e flutuante (Macdonald, 1975).

A irregularidade das flutuações não permite um tratamento determinístico, conduzindo a um estudo por meio da teoria da probabilidade e de médias estatísticas. A turbulência do vento se constitui em um fenômeno de processo aleatório estacionário ergódico. É aleatório ou estocástico porque pode ser definido como uma seqüência infinita de variáveis aleatórias cujos registros ou amostras diferem entre si (rajadas diferentes no espaço e no tempo), no entanto, se o número de amostras for suficientemente grande ele poderá apresentar uma certa regularidade estatística. É estacionário porque seus parâmetros estatísticos tais como média, variância, desvio padrão, auto-correlação, etc., são determinados sobre a totalidade dos

registros possíveis e são invariantes para qualquer deslocamento da origem do tempo. E é ergódico porque admite-se que qualquer um de seus parâmetros estatísticos, calculados sobre um conjunto de registros possíveis, é igual ao correspondente parâmetro calculado ao longo do tempo sobre qualquer registro representativo do processo. Esta hipótese da turbulência ser um fenômeno de processo aleatório estacionário ergódico é admitida nos casos da prática em que se analisa um único registro no tempo do fenômeno em estudo, considerando-o como representativo de todos os registros possíveis.

2.1.2. Parâmetros Estatísticos

Abaixo estão definidos alguns parâmetros estatísticos, conforme a figura 2.2, necessários para o estudo do comportamento da velocidade do vento no tempo. É conveniente lembrar que o vento é considerado uniforme em cada plano horizontal, com sua velocidade variando apenas com a altura.

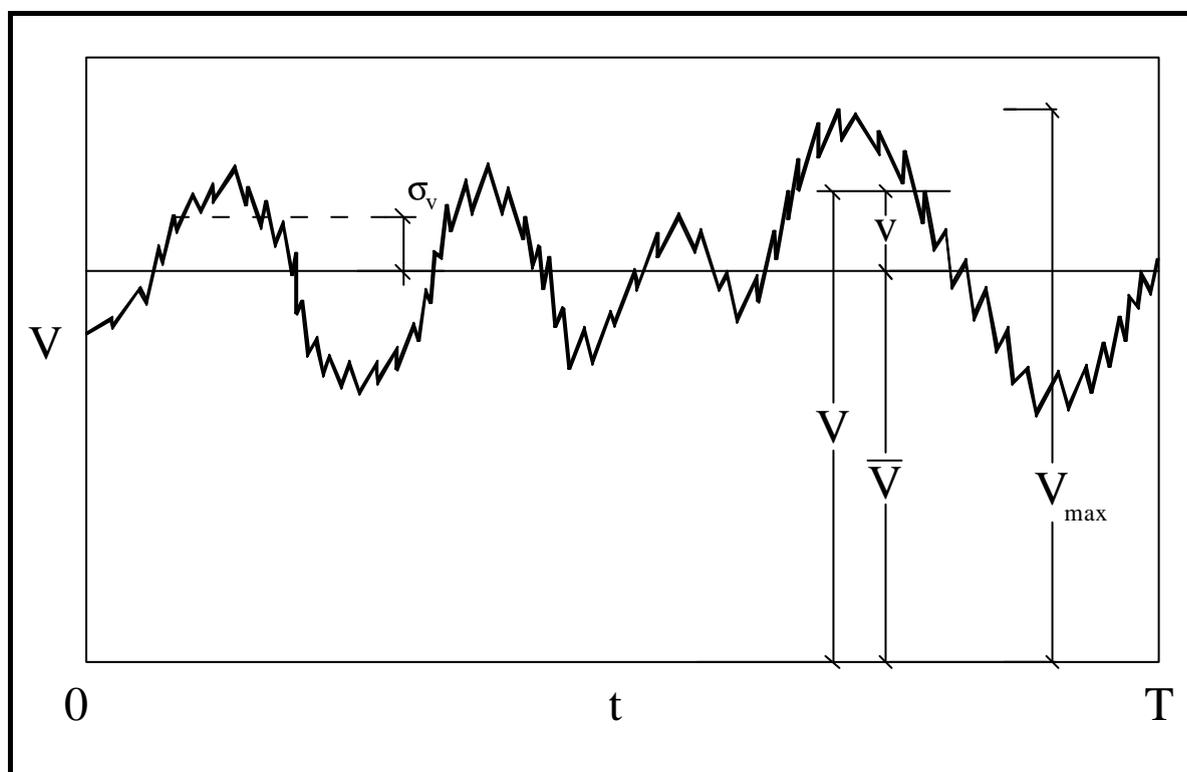


Figura 2.2: Parâmetros Básicos (Blessmann, 2001)

a) Valor Médio

$$\overline{V}(z) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V(z;t) dt = \langle V(z;t) \rangle \quad (\text{Equação 2.1})$$

b) Valor Quadrático Médio

$$\overline{V^2}(z) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V^2(z;t) dt = \langle V^2(z;t) \rangle \quad (\text{Equação 2.2})$$

c) Variância

$$\mathbf{s}_v^2(z) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(z;t) dt = \langle v^2(z;t) \rangle \quad (\text{Equação 2.3})$$

d) Desvio Padrão

$$\mathbf{s}_v(z) = \langle v^2(z;t) \rangle^{1/2} \quad (\text{Equação 2.4})$$

O intervalo de tempo T , é um intervalo de tempo suficientemente longo para ser obtido um valor representativo como média estatística. Para fins de engenharia estrutural a velocidade média é calculada para um intervalo de tempo que vai de alguns minutos a uma hora. Consideram-se como flutuações (rajadas) as variações de duração entre alguns segundos e algumas dezenas de segundos, de acordo com a finalidade. O intervalo de tempo T deve ser suficientemente longo em relação à duração das flutuações consideradas. Por outro lado, deve ser pequeno em relação às oscilações lentas do vento, para que essas não influam na velocidade média.

A variância coincide com o valor quadrático médio quando a média é nula. O valor rms ("root mean square"), ou média quadrática, é o valor positivo da raiz quadrada do valor quadrado médio. O desvio padrão coincide com o valor rms quando são estudadas apenas as flutuações em torno da velocidade média, ou quando esta for nula. Tanto variância e desvio padrão são medidas da dispersão das flutuações da velocidade em torno da média.

2.1.3. Ação Dinâmica

A ação do vento além de apresentar característica aleatória, é fundamentalmente um carregamento dinâmico. Como visto anteriormente, no vento natural tanto o módulo como a orientação da velocidade instantânea do ar apresentam flutuações em torno da velocidade média, sendo estas flutuações denominadas rajadas.

A excitação dinâmica na direção longitudinal de uma estrutura ocorre devido às flutuações da velocidade do vento em torno de sua média, superposta ao deslocamento médio causado pela componente média do vento. Essas flutuações, chamadas de rajadas, ocorrem pela turbulência atmosférica, sendo capaz de excitar resposta dinâmica em um limitado campo de estruturas que apresentam baixo amortecimento e frequência natural menor que 1 Hz. A turbulência do vento é um fenômeno complexo que possui um largo número de frequências de excitação. Como estruturas respondem dinamicamente somente a carregamentos periódicos que flutuam na mesma frequência da sua própria frequência natural, a vibração de uma particular estrutura é causada por uma pequena parte da total turbulência do vento.

Uma estrutura particular responderá da total turbulência do vento àquelas partes que originam flutuação próximas a sua própria frequência natural somente. Para calcular a magnitude da

Estudo Teórico e Experimental de um Edifício Alto Submetido à Ação Dinâmica do Vento

resposta dinâmica de uma estrutura, as características de um simples componente de turbulência capaz de excitar dinamicamente deve ser precisamente especificado.

Os primeiros estudos matemáticos para previsão da resposta longitudinal devido aos efeitos do vento foram desenvolvidos na década de 1960 por Davenport e Vickery. As formulações por eles desenvolvidas, empregando considerações de correlação espectral e espacial para a previsão da resposta na direção do vento, estão atualmente muito desenvolvidos, sendo o método do fator de rajada utilizado em diversas normas.

Para prever a resposta de uma estrutura a um vento turbulento é necessário definir-se o espectro das cargas induzidas pelas rajadas. Para avaliar a relação entre o espectro das cargas sobre um edifício e o espectro da flutuação da velocidade é conveniente pensar em termos de comprimento de onda ao invés de frequências. Desta forma têm-se uma medida linear do tamanho das rajadas produzindo flutuações de carga em determinada frequência.

A capacidade que uma rajada possui de produzir carga em uma estrutura de grande porte depende principalmente do tamanho da rajada em relação ao tamanho da estrutura ou seja, da relação entre o comprimento de onda e a dimensão do edifício ou entre a frequência de rajada e a dimensão do edifício. No caso de componentes de alta frequência, esta relação é muito menor que 1 e as pressões produzidas são bem organizadas ou correlacionadas apenas sobre pequenas áreas da edificação; o efeito global é desprezável, sendo importante em regiões isoladas. Por outro lado, componentes de frequência muito baixa, ou seja com a relação entre o comprimento de onda e a dimensão do edifício iguais ou maior que 1, a rajada envolverá toda a estrutura.

O comprimento de onda é uma medida linear que indica as dimensões dos turbilhões que produzem cargas flutuantes de frequência para determinadas alturas sobre o terreno (ASCE, 1980).

$$I = V / f \quad (\text{Equação 2.5})$$

Onde: f frequência de incidência de rajadas;

- I comprimento de onda;
- V velocidade média do vento.

Assim, para que o turbilhão seja efetivo e gere um campo de pressões plenamente desenvolvidas em torno da edificação, é necessário que este seja bem maior que a edificação (Blessmann, 1989). Portanto a efetividade da rajada para produzir efeitos dinâmicos sobre o sistema estrutural dependerá da relação entre as dimensões da edificação e a do turbilhão.

Simplificadamente descreve-se a ação do vento sobre uma estrutura como um carregamento estático equivalente, dividindo-se este carregamento em duas parcelas sendo uma estática e outra flutuante (dinâmica). A velocidade média do vento é a parcela de carga que gera na estrutura efeitos puramente estáticos, e assim a resposta a esta ação é designada como resposta média. Admite-se que esta velocidade média mantém-se constante por um intervalo de tempo igual ou superior a 10 minutos, apesar das pequenas variações instantâneas. A componente flutuante corresponde às rajadas. Estas flutuações podem produzir em estruturas muito flexíveis, principalmente nas altas e esbeltas, oscilações importantes na direção da velocidade média, designada como resposta flutuante. Portanto a resposta total da estrutura é a superposição da resposta média e dinâmica.

Para edificações com frequência fundamental superior a um Hertz, a parcela da resposta flutuante é pouco significativa. Contudo, para edifícios com frequência fundamental igual ou inferior a um Hertz, principalmente se for fracamente amortecido, esta parcela poderá representar uma componente significativa da resposta total do sistema.

2.2. RESPOSTA NA DIREÇÃO TRANSVERSAL AO VENTO

2.2.1. Forças em Corpos Imersos em Fluidos em Movimento

Em casos de corpos imersos em escoamentos de fluidos ideais, somente surgirão forças pela assimetria desse corpo. Isso acontece porque em fluidos ideais desconsidera-se a presença de viscosidade. Nesse tipo de fluido, as características da corrente dependem apenas da forma dos contornos entre ou em torno dos quais o fluido se move. Todavia, com a presença da viscosidade a situação é diferente. O fluido em contato com o sólido terá velocidade nula: uma película muito fina de fluido adere à superfície, enquanto que a uma certa distância o fluido tem a velocidade V da corrente não perturbada. A figura 2.3 apresenta o padrão de escoamento de um fluido ideal em torno de um cilindro circular.

Em fluidos como o ar, que apresenta baixa viscosidade, apenas uma camada muito fina tem efeito sobre o corpo. Fora dessa camada a influência da viscosidade é desprezável, podendo o escoamento ser considerado como se o fluido fosse ideal. Essa fina camada nas proximidades da superfície do corpo é conhecida por camada limite.

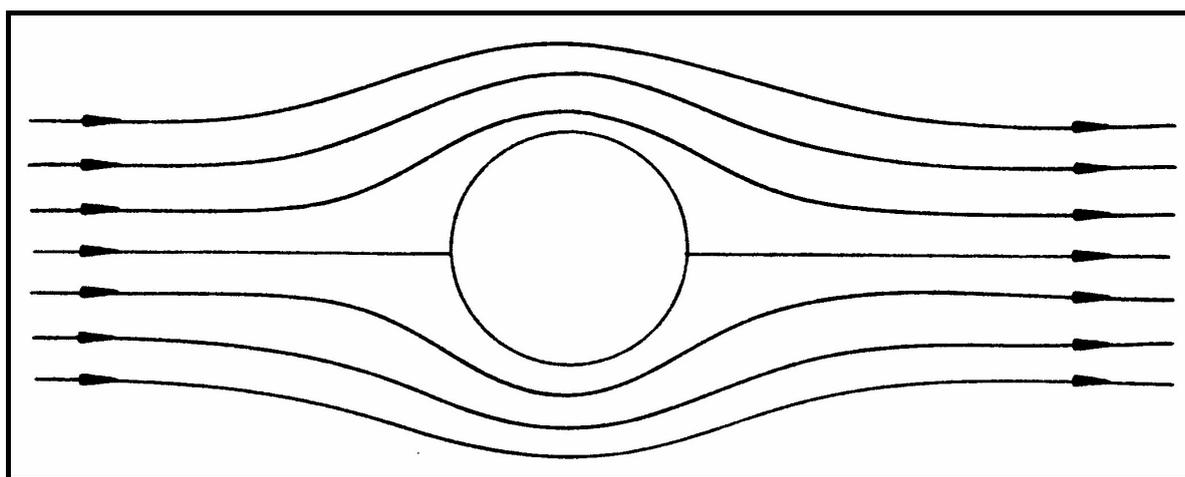


Figura 2.3: Escoamento de um fluido ideal (Macdonald, 1975).

Em casos de corpos com forma aerodinâmica, como os aerofólios, o padrão do escoamento ideal é muito próximo ao padrão do escoamento real, sendo a única diferença a presença da camada limite, conforme ilustram as figuras 2.4 e 2.5.

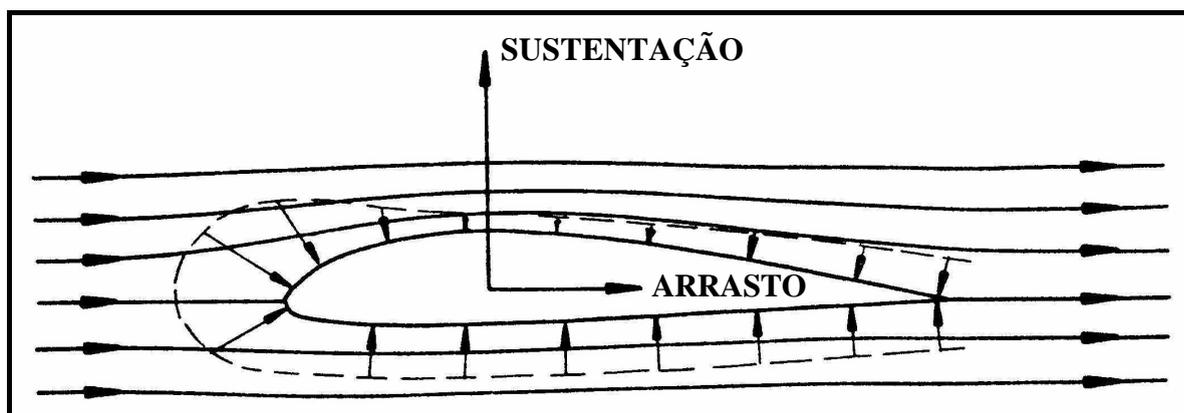


Figura 2.4: Escoamento de um fluido ideal em um aerofólio (Macdonald, 1975).

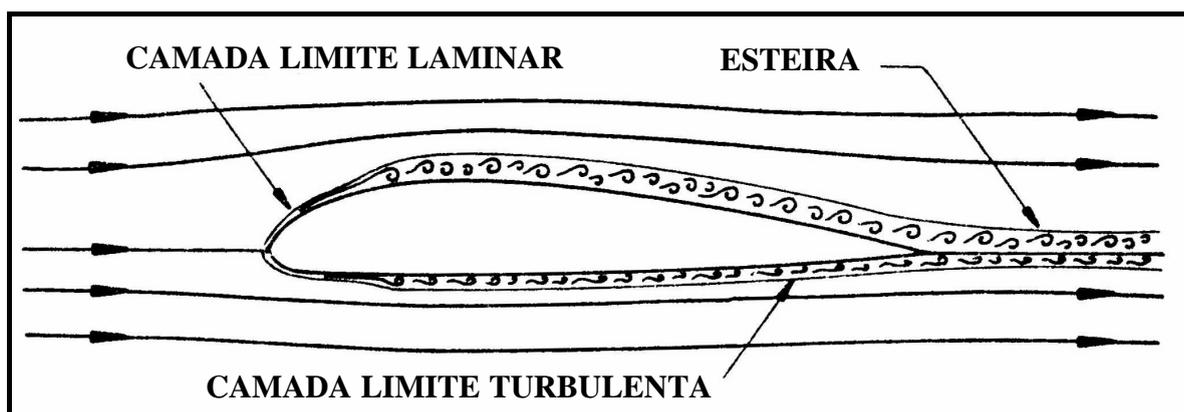


Figura 2.5: Escoamento de um fluido real em um aerofólio (Macdonald, 1975).

Em contrapartida, para corpos conhecidos como rombudos ("bluff body"), o padrão do escoamento ideal é diferente do padrão do escoamento real, ocorrendo um fenômeno conhecido como separação. Segundo Blessmann (1990), esse é o ponto onde se inicia a reversão do movimento e o descolamento do fluido, sofrendo o escoamento a montante desse ponto modificações, até surgir uma configuração desequilibrada, sendo essas modificações muito menores que as de sotavento da separação.

A separação, mostrada na figura 2.6, é causada pela ação combinada das pequenas velocidades existentes na camada limite, próximas à superfície, e de um gradiente adverso de pressão, sendo essas duas condições necessárias para que ela ocorra. Assim, a separação só

ocorre em fluidos reais, nos quais a viscosidade produz a camada limite. O descolamento é, portanto, indiretamente causado pela viscosidade.

Depois do ponto de separação formam-se grandes e lentos turbilhões, dissipando-se a energia em calor. Esses turbilhões dão origem a uma grande turbulência no fluido a sotavento do corpo, sendo essa região chamada de esteira.

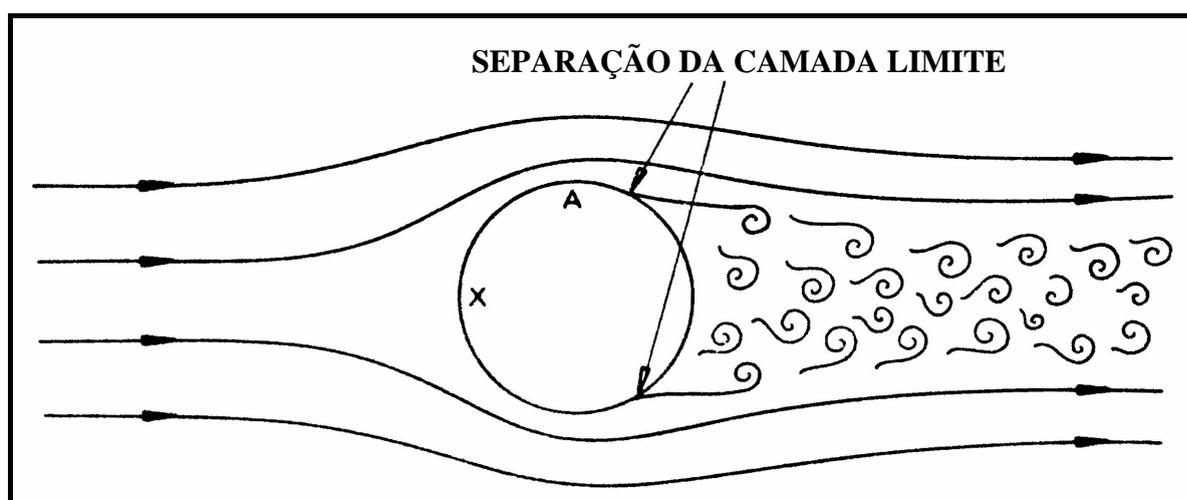


Figura 2.6: Escoamento de um fluido real em um cilindro circular (Macdonald, 1975).

Para corpos rombudos com seção transversal circular a posição de separação do escoamento depende do número de Reynolds. O número de Reynolds, é um parâmetro que estabelece uma relação entre as forças de inércia e as de viscosidade atuantes no escoamento.

$$\Re_e = \frac{Vd}{\mathbf{n}} \quad (\text{Equação 2.6})$$

Onde: \Re_e Número de Reynolds;

V velocidade média do vento;

\mathbf{n} Viscosidade cinemática do ar;

d dimensão linear característica.

De maneira geral, para corpos cilíndricos ou com formas arredondadas, quando $\Re_e < 10^5$, a esteira é larga e o padrão de desprendimento de vórtices é regular. Quando $10^5 < \Re_e < 3,5 \cdot 10^6$ o ponto de separação tende a variar aleatoriamente. Novamente para $\Re_e > 3,5 \cdot 10^6$ o padrão de desprendimento de vórtices torna-se regular. Para corpos com cantos vivos, a separação do escoamento dá-se nesses pontos, independentemente do número de Reynolds, sempre apresentando um padrão de desprendimento de vórtices regular.

2.2.2. Desprendimento de Vórtices

Apesar do martelamento por rajadas na direção longitudinal do vento ser a mais óbvia fonte de excitação dinâmica em estruturas, ele pode não ser a mais séria. Segundo Blessmann (1998), em corpos rombudos sujeitos à escoamentos com determinado número de Reynolds, ocorre o fenômeno de desprendimento alternado de vórtices, apresentando frequência característica bem definida. São os chamados vórtices de Kármán, que originam forças periódicas, oblíquas em relação à direção do vento médio, ilustradas na figura 2.7. Considerando suas componentes, as forças alternadas na direção do vento ocorrem na frequência do desprendimento individual dos vórtices, enquanto que as forças alternadas na direção transversal ao vento ocorrem na frequência de desprendimento de cada par de vórtices. Essas componentes das forças tendem a produzir oscilações nas direções em que agem. Entretanto, as forças na direção do vento são pequenas em comparação com as forças na direção transversal do vento. Na prática, oscilações importantes na direção do vento, por desprendimento de vórtices alternados, raramente acontecem. Por outro lado, oscilações causadas pelas forças periódicas transversais ocorrem em muitas edificações cilíndricas ou quase cilíndricas (seção transversal variando suavemente). Prismas de seção retangular (incluindo a quadrada), triangular ou com outras formas de cantos vivos estão sujeitas à excitações mais fortes por desprendimento de vórtices que o próprio cilindro circular.

Para que o fenômeno do desprendimento cadenciado de vórtices, em um corpo imerso no escoamento, ocorra de forma efetiva é necessário que a forma do corpo seja rombuda de contorno curvo ou poligonal, que o corpo seja alteado (relação entre o comprimento do eixo e a largura) e que exista uma boa correlação do desprendimento ao longo de todo o cilindro. O

Estudo Teórico e Experimental de um Edifício Alto Submetido à Ação Dinâmica do Vento

escoamento deve ser de baixa turbulência (suave) e aproximadamente uniforme (em termos de velocidade média). Não deve haver recolamento do escoamento após a primeira separação.

Em termos práticos diversos fatores, como a variação de diâmetro e o perfil de velocidades, impedem uma correlação perfeita no processo de desprendimento de vórtices.

Determinados mecanismos que explicam o fenômeno de desprendimento de vórtices (Daly, 1986) sugerem que o escoamento reverso, que inicia no ponto de separação, dá origem aos vórtices que têm o seu aumento em tamanho alimentado pela camada limite separada. Quando estes vórtices aumentam em tamanho e força, eventualmente tornam-se bastante fortes e capazes de deslocar a camada separada através da esteira. Neste estágio, o vórtice cessa seu desenvolvimento e desloca-se à sotavento dentro da esteira. A ação de deslocar a camada separada através da esteira resulta na formação de um outro vórtice, com sentido de rotação contrário, no outro ponto de separação e assim sucessivamente. A forma do escoamento formado é denominada de "*Von Kármán Vortex Street*", que dá origem às forças flutuantes que atuam no cilindro. Na região da esteira, consideráveis pressões negativas (sucções) são criadas atrás dos vórtices que são desprendidos, o que gera uma sucção ao longo da face de sotavento do cilindro, contribuindo em grande parte para o aumento da força de arrasto.

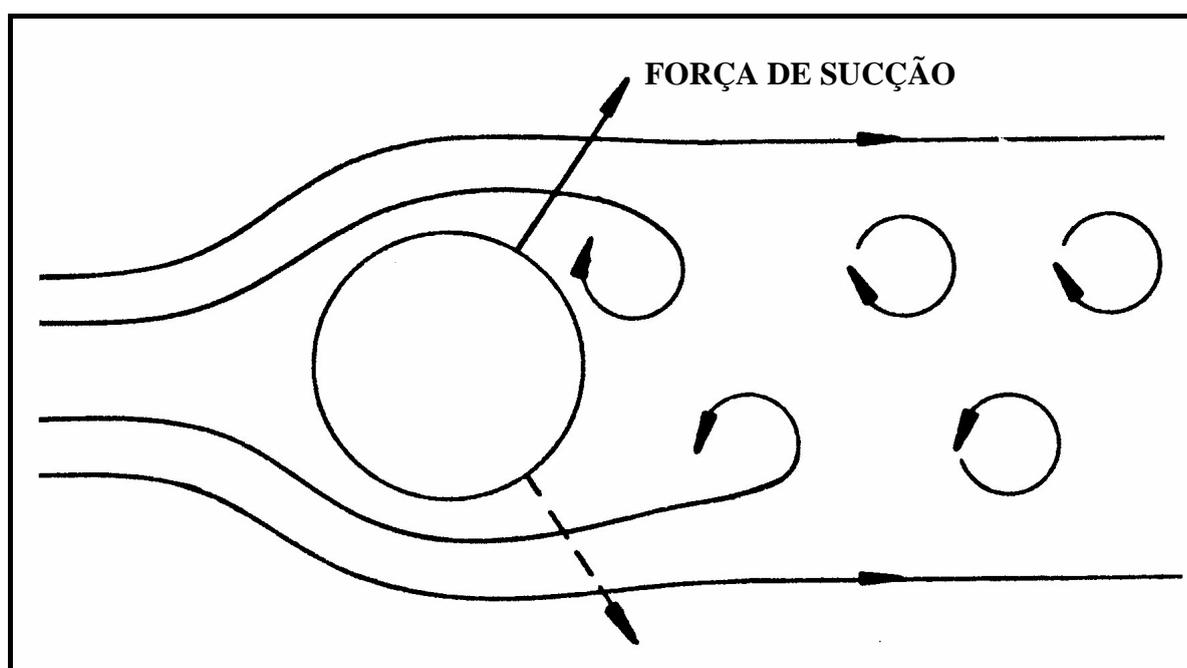


Figura 2.7: Forças oblíquas de sucção devido ao desprendimento de vórtices (Macdonald, 1975).

A frequência de oscilação da força periódica na direção transversal ao vento depende de uma adimensional quantidade chamada de número de Strouhal (Macdonald, 1975). Esse número, estabelece uma relação entre a frequência de desprendimento de um par de vórtices, uma dimensão característica, e a velocidade média do vento. Esta relação pode ser expressa como:

$$St = \frac{f_s d}{V} \quad (\text{Equação 2.7})$$

Onde:

- St Número de Strouhal;
- f_s frequência de desprendimento de um par de vórtices;
- V velocidade média do vento;
- d dimensão linear característica.

Este parâmetro é utilizado para determinar a velocidade crítica do vento, V_{cr} , para qual a frequência de desprendimento de um par de vórtices, numa dada seção da estrutura, coincide com uma das frequências naturais da estrutura, ou de algum elemento. A figura 2.8 apresenta o número de Strouhal para diversas formas de seções.

$$V_{cr} = \frac{f_n d}{St} \quad (\text{Equação 2.8})$$

Onde: f_n frequência natural da estrutura.

Para corpos com cantos vivos, nos quais o ponto de separação da camada limite independe do número de Reynolds, o número de Strouhal também é invariante com Reynolds, porém

Estudo Teórico e Experimental de um Edifício Alto Submetido à Ação Dinâmica do Vento

depende da forma do corpo. A maioria dos corpos com cantos vivos apresenta um número de Strouhal aproximadamente 0,15. Para corpos com seção transversal circular o número de Strouhal depende do número Reynolds, como é mostrado no gráfico da figura 2.9.

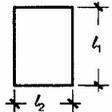
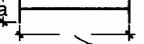
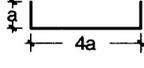
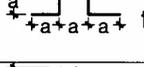
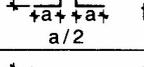
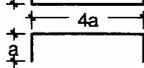
Direção do vento	Forma da seção	S_ζ
Qualquer	 $Re = 70\,000 \bar{V}d$ $(\bar{V} \text{ sobre } 10 \text{ min})$	$10^3 \leq Re \leq 2 \times 10^6$ 0,20
		$Re \geq 10^6$ 0,28 (interpol linearmente)
	Placa	0,16
		0,15
		$l1 / l2 = 0,5$ 0,15
		1,0 0,12
		1,5 0,09
		2,0 0,07
		2,5 0,07
		3,0 0,15
		4,0 0,13
4,5 0,12		
	 $t = a / 25$	0,12
		0,14
	 $\begin{cases} 2a : t = a / 25 \\ 4a : t \cong a / 8 \end{cases}$	0,14
	 $t = a / 25$	0,14
		0,15
	 $t = a / 12,5$	0,15
		0,17
	 $t = a / 50$	0,15
		0,14
		0,15
	 $t = a / 25$	0,13
		0,13
		0,14
	 $t = a / 50$	0,16
	 $t = a / 25$	0,11
		0,15
	 $t = a / 25$	0,12
		0,14
	 $t = a / 25$	0,14
	 $t = a / 12,5$	0,15

Figura 2.8: Número de Strouhal para diversas seções (Blessmann, 1998).

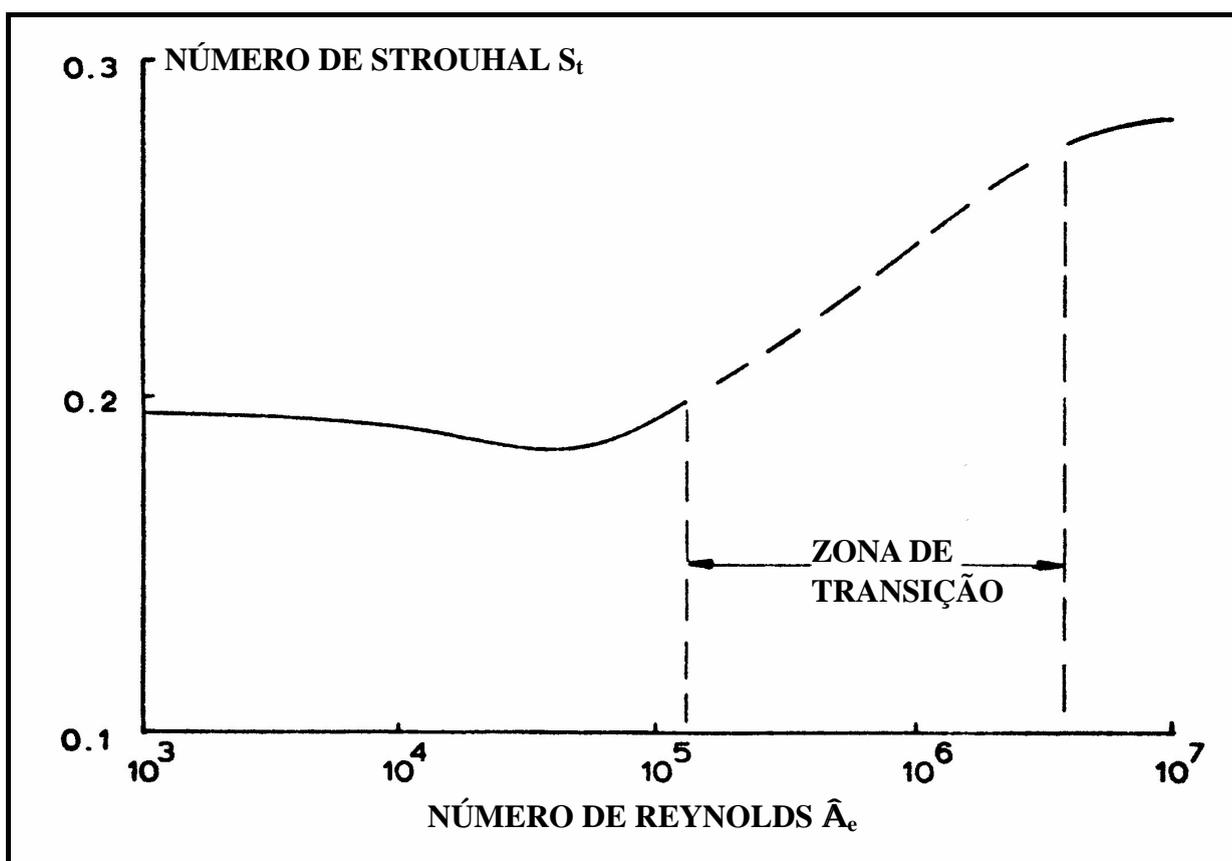


Figura 2.9: Variação do número Strouhal com o número de Reynolds para cilindros circulares (Macdonald, 1975).

3. MODELOS MATEMÁTICOS

3.1. MODELOS PARA RESPOSTA LONGITUDINAL AO VENTO

3.1.1. Norma Brasileira - NBR 6123

A norma brasileira determina uma ação estática equivalente à ação dinâmica do vento, tomando como referência o método da vibração aleatória proposto por Davenport, mas diferindo na determinação dos parâmetros que definem essa ação, além de destacar que a vibração da estrutura ocorre em torno da posição deformada gerada pela componente estática da força do vento, causada pela velocidade média.

O capítulo nove da norma brasileira NBR - 6123 dedica-se inteiramente aos estudos dos efeitos dinâmicos devidos à turbulência atmosférica, permitindo-se trabalhar com um modelo contínuo simplificado ou com um modelo discreto. O modelo contínuo apresenta algumas restrições não aplicáveis ao caso em estudo, portanto será apresentado o modelo discreto. Esta norma toma como referência a chamada velocidade de projeto \bar{V}_p , que é determinada a partir da velocidade básica do vento para cada região em função do mapa das isopletas, aplicando-se os fatores de correção para que possam ser determinados a influência das características topográficas, estatísticas e da localização específica da edificação sobre essa velocidade.

Como o objetivo dessa dissertação é a comparação dos modelos matemáticos com os resultados de túnel de vento, serão utilizadas as velocidades de ensaio do túnel para aplicação no modelo, permitindo, assim, uma comparação direta dos dados. Apresenta-se a seguir o procedimento para a determinação da velocidade de projeto.

$$V_p = 0,69V_oS_1S_3 \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde:

- V_p velocidade de projeto [m/s];
- 0,69 fator de rajada;
- V_o velocidade básica [m/s];
- S_1 fator topográfico;
- S_3 fator estatístico.

A velocidade básica do vento segundo a NBR - 6123 é a velocidade de uma rajada de três segundos, que será excedida na média uma vez a cada 50 anos, a 10 metros acima do terreno, em campo aberto e plano.

Ainda segundo a Norma Brasileira, o fator topográfico (S_1) leva em consideração as variações do relevo e de uma forma geral majorando a velocidade quando a edificação se encontra no topo de morros ou taludes e minorando-as a medida que estas se localizam em vales.

O fator estatístico (S_3) para a probabilidade P_m e vida útil da edificação de m anos, reflete estatisticamente a vida útil da edificação e o grau de segurança exigido da mesma.

O coeficiente 0,69 corresponde a um fator de rajada que corrige a velocidade média em m/s, V_o , sobre 3s para a velocidade média sobre 10 min, V_p .

O valor da pressão dinâmica de projeto, \bar{q}_p é definida para a categoria II, a 10 m de altura sobre o solo, e posteriormente corrigida:

$$\overline{q}_p = 0,613(V_p)^2 \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde: \overline{q}_p pressão dinâmica de projeto [N/m^2];
 0,613 fator de correção em função da massa específica do ar, válido para as condições normais de temperatura e pressão;

Para as demais categorias a pressão dinâmica de projeto é obtida através do parâmetro de correção b , como a seguir:

$$\overline{q}_p = 0,613b(V_p)^2 \quad (\text{Equação 3.3})$$

Onde: b parâmetro de correção definido pela NBR - 6123 para passar da categoria II para as demais categorias.

Para cada modo de vibração j , com componentes $x_i = (x_i)_j$, ou seja, os deslocamentos correspondentes à coordenada i devido a cada um dos modos de vibração j , existe uma força total $F_{i,j}$, devida ao vento na direção desta coordenada i , sendo $F_{i,j}$:

$$F_{i,j} = \overline{F}_i + \hat{F}_{i,j} \quad (\text{Equação 3.4})$$

Onde: $F_{i,j}$ força total devida ao vento, na direção da coordenada i , para o modo de vibração j [N];
 \overline{F}_i força média, na direção da coordenada i [N];

$\hat{F}_{i,j}$ força flutuante, na direção da coordenada i , para o modo de vibração j [N].

Sendo que a parcela da força total referente à velocidade média do vento, acima designada como força média, \overline{F}_i , é determinada como segue:

$$\overline{F}_i = \overline{q}_p b^2 C_{ai} A_i \left(\frac{z_i}{z_{ref}} \right)^{2p} \quad (\text{Equação 3.5})$$

Onde:

- C_{ai} coeficiente de arrasto para a coordenada i ;
- A_i área de influência correspondente à coordenada i [m²];
- z_i cota da coordenada i [m];
- z_{ref} altura de referência, $z_{ref} = 10m$;
- p expoente da lei potencial do perfil de velocidades médias do vento.

A componente relativa à parcela referente à componente dinâmica é dada por $\hat{F}_{i,j}$, designada como componente flutuante da força total para um determinado modo de vibração, é calculada através da seguinte formulação:

$$\hat{F}_{i,j} = F_H \Psi_i x_i \quad (\text{Equação 3.6})$$

Onde: F_H força referente à parcela flutuante [N];
 x_i deslocamento correspondente a coordenada i [m];

Determina-se Ψ_i por:

$$\Psi_i = \frac{m_i}{m_o} \quad (\text{Equação 3.7})$$

Onde: Ψ_i razão entre as massas m_i e m_o ;
 m_i massa discreta referente à coordenada i ;
 m_o massa arbitrária de referência.

A força chamada de F_H , referente à força flutuante $\hat{F}_{i,j}$, é dada pela equação 3.8:

$$F_H = \bar{q}_p b^2 A_o \left(\frac{\sum_{i=1}^N \mathbf{b}_i x_i}{\sum_{i=1}^N \Psi_i x_i^2} \right) \mathbf{x} \quad (\text{Equação 3.8})$$

Onde: A_o área arbitrária de referência [m²];
 N número de coordenadas discretizadas;

x fator de amplificação dinâmica da NBR - 6123.

Assim, **b** é definido como:

$$\mathbf{b} = C_{ai} \left(\frac{A_i}{A_o} \right) \left(\frac{z_i}{z_{ref}} \right)^p \quad (\text{Equação 3.9})$$

As figuras 3.1 a 3.5 apresentam os gráficos para o coeficiente de amplificação dinâmica ξ , sendo definido em função da razão de amortecimento crítico ζ e da frequência f , através da relação adimensional $\bar{V}_p/f_j L$, para os cinco tipos de rugosidade de terreno apresentados pela NBR - 6123.

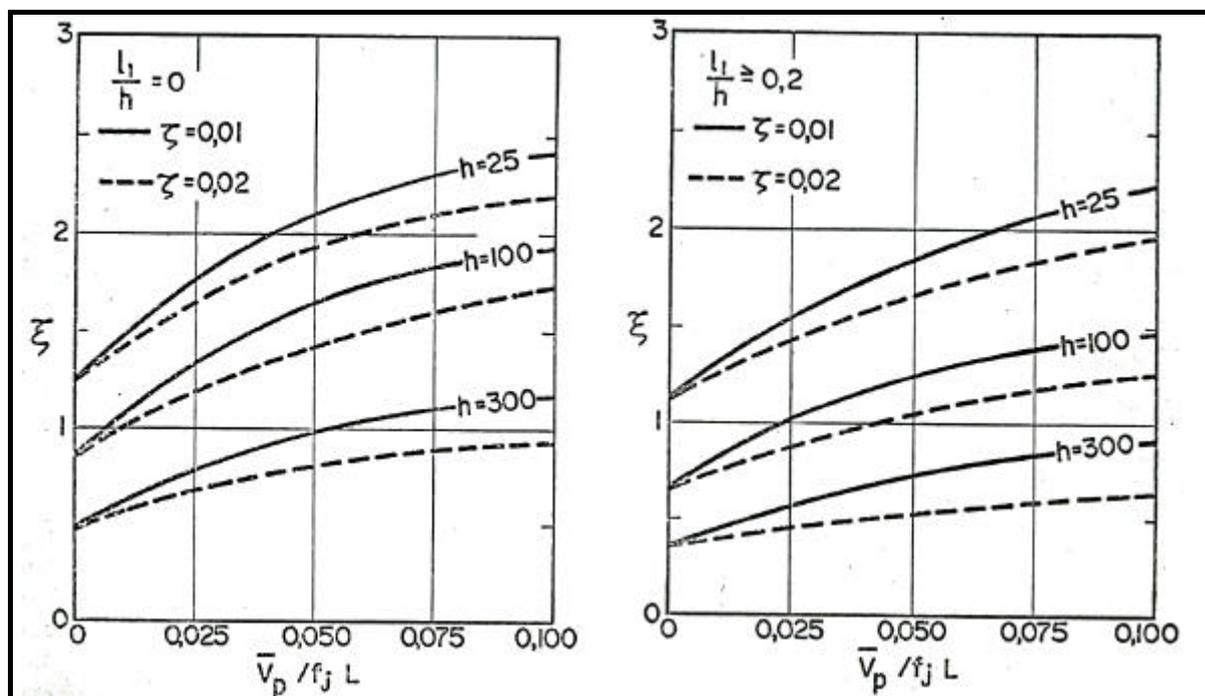


Figura 3.1: Coeficiente de amplificação dinâmica (ξ) para categoria I ($L=1800$ e h em metros) (NBR - 6123).

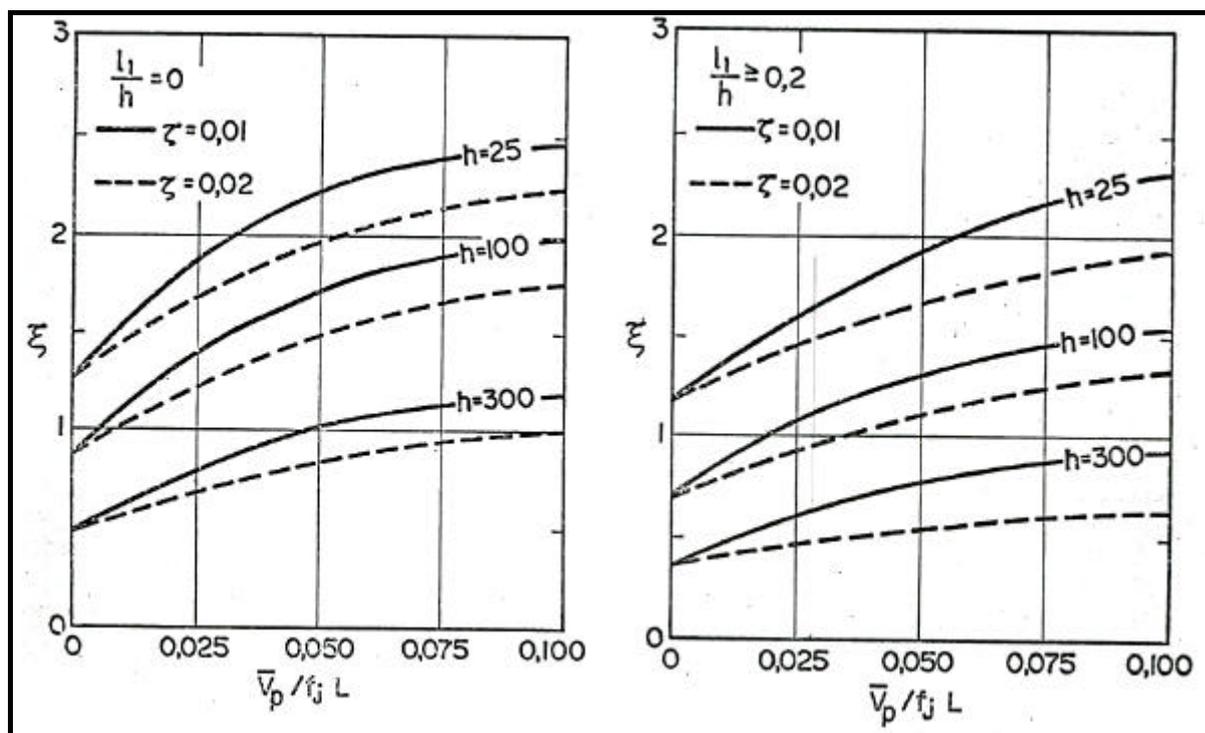


Figura 3.2: Coeficiente de amplificação dinâmica (ξ) para categoria II ($L=1800$ e h em metros) (NBR - 6123).

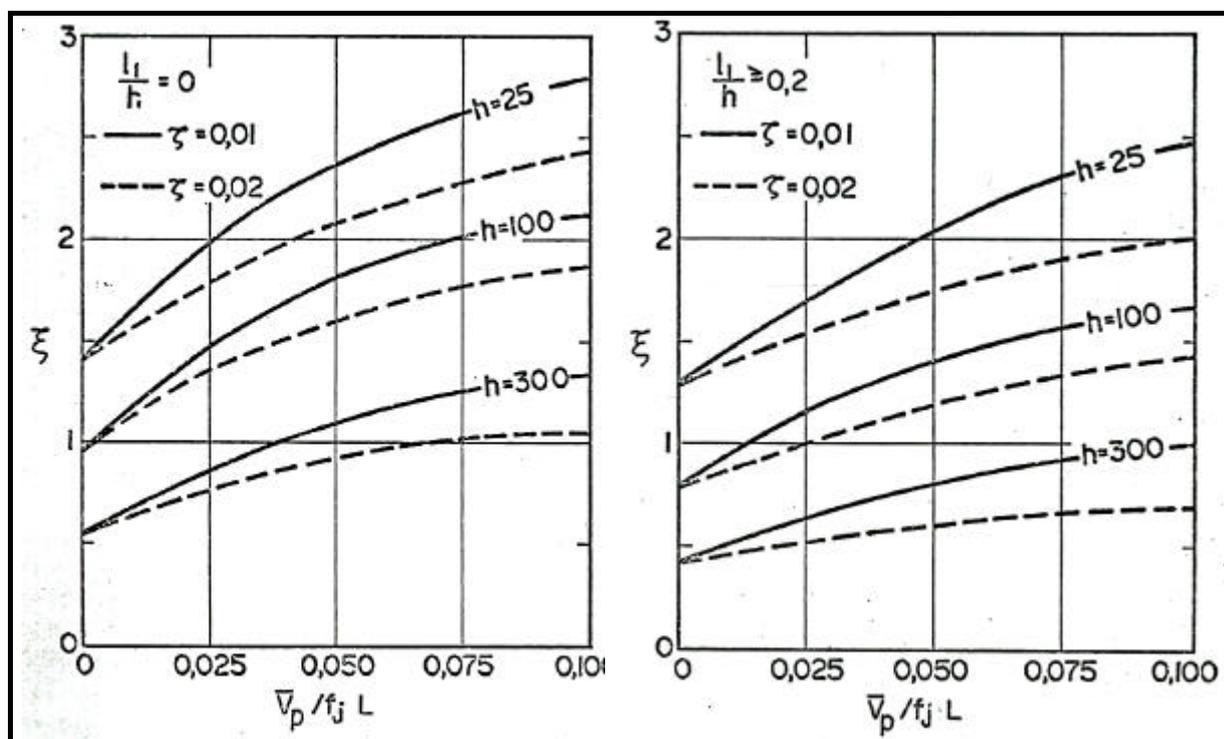


Figura 3.3: Coeficiente de amplificação dinâmica (ξ) para categoria III ($L=1800$ e h em metros) (NBR - 6123).

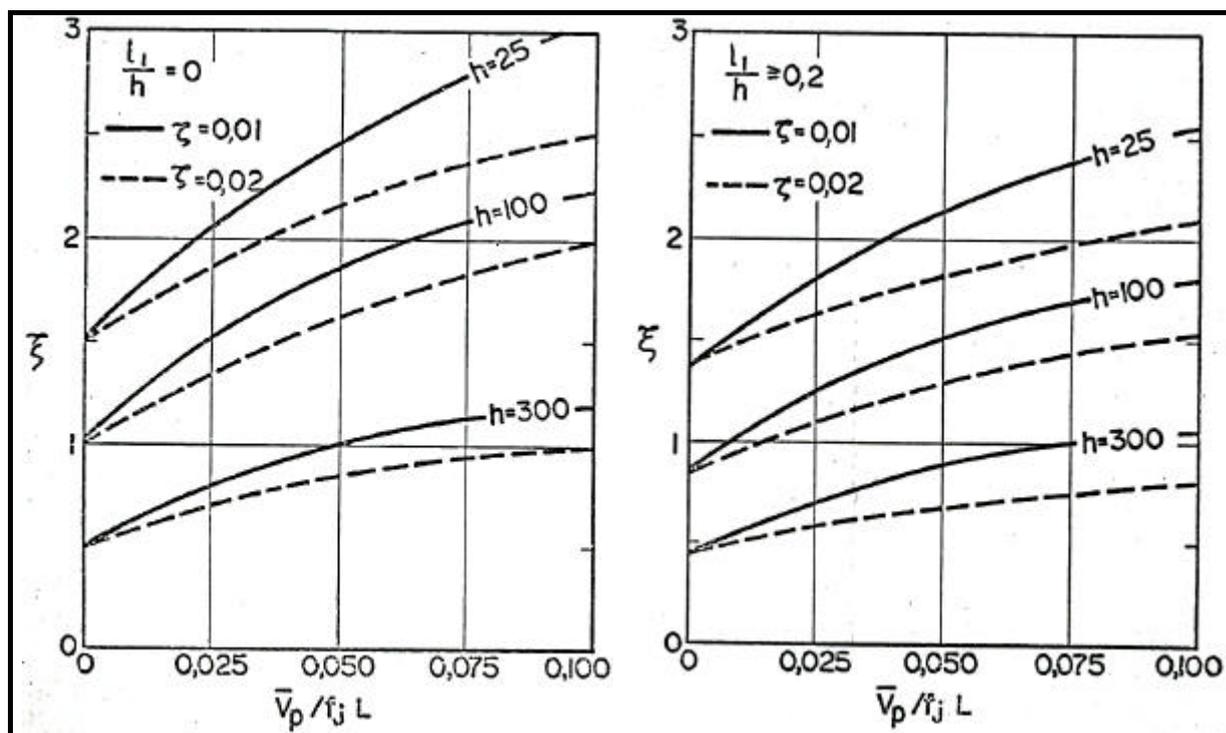


Figura 3.4: Coeficiente de amplificação dinâmica (ξ) para categoria IV ($L=1800$ e h em metros) (NBR - 6123).

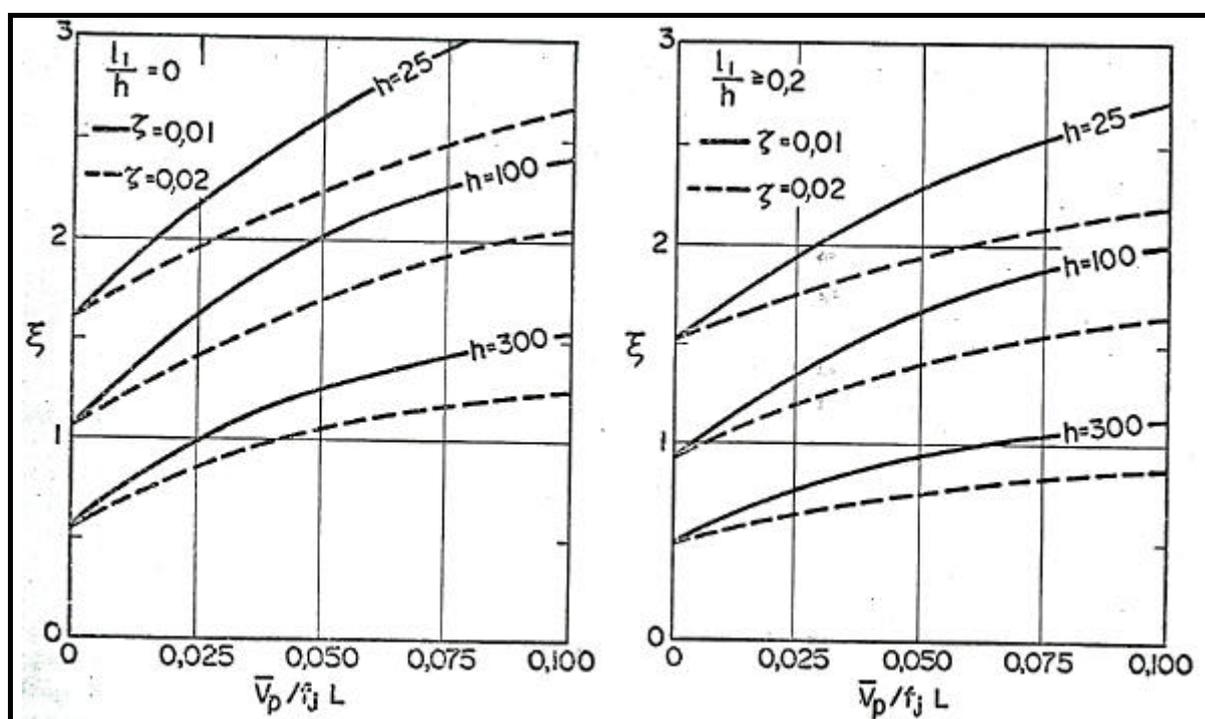


Figura 3.5: Coeficiente de amplificação dinâmica (ξ) para categoria V ($L=1800$ e h em metros) (NBR - 6123).

3.1.2. Norma Canadense - NBCC 1985

Assim como a NBR - 6123, o NBCC (National Building Code of Canada) 1985 além de basear-se no processo probabilístico apresentado por Davenport, também apresenta um processo simplificado e outro detalhado, sendo este último definido nesse item.

Este processo da norma canadense destina-se principalmente à determinação das cargas globais devidas ao vento e da resposta de edifícios altos e estruturas esbeltas. Os parâmetros que regem esse procedimento são a intensidade da turbulência para o local onde estará instalada a edificação, que é função da altura e da rugosidade superficial da vizinhança; assim como as características da edificação, como altura, largura, frequência natural de vibração e amortecimento. Por fim, se determina o fator de rajada que multiplica a pressão de referência do vento, o fator de exposição, para a correção do perfil de velocidades, e o coeficiente de pressão, este último equivalendo ao coeficiente de arrasto da norma brasileira.

Novamente salienta-se que serão utilizadas as velocidades de ensaio do túnel para aplicação no modelo, permitindo, assim, uma comparação direta dos dados. Dessa forma, o valor de pressão dinâmica já é calculado considerando o perfil de velocidades do vento, não sendo necessário a aplicação do fator C_e . A seguir é apresentado o procedimento para a determinação da velocidade de projeto.

A pressão de referência do vento, que equivale à pressão dinâmica da NBR, dada em kPa, é assim determinada:

$$q = C(V)^2 \quad \text{(Equação 3.10)}$$

Onde:	q	pressão dinâmica de projeto [kPa];
	C	fator de correção em função da temperatura do ar e da pressão atmosférica;
	V	velocidade média horária de referência [m/s].

O valor da constante C para valores normais de temperatura e pressão é:

$$C = 50 \times 10^{-6} \text{ – se a velocidade for medida em km/h;}$$

$$C = 650 \times 10^{-6} \text{ – se a velocidade for medida em m/s.}$$

Para obtermos os valores em N/m^2 e para a velocidade em m/s teremos então a seguinte equação:

$$q = 0,650(V)^2 \quad \text{(Equação 3.11)}$$

O fator de exposição C_e é o coeficiente que corrige o perfil da velocidade em função da rugosidade do terreno, equivalendo ao fator S_2 da NBR - 6123. Porém esse coeficiente é elevado ao quadrado e aplicado diretamente sobre a pressão, enquanto o S_2 é aplicado sobre a velocidade que é elevada ao quadrado. Sendo C_e definido a seguir:

- Fator de exposição A:

$$C_e = (z/10)^{0,28}, C_e \geq 1,0 \quad \text{(Equação 3.12)}$$

- Fator de exposição B:

$$C_e = 0,5(z/12,7)^{0,50}, C_e \geq 0,5 \quad \text{(Equação 3.13)}$$

- Fator de exposição C:

$$C_e = 0,4(z/30)^{0,72}, C_e \geq 0,4 \quad \text{(Equação 3.14)}$$

Onde: z cota em relação ao solo [m].

Uma das aplicações, além da definição do perfil da velocidade, é determinar a velocidade média horária no topo da edificação, V_H :

$$V_H = V \sqrt{C_{eH}} \quad (\text{Equação 3.15})$$

Onde: V_H velocidade média horária no topo da edificação [m/s];

C_{eH} fator de exposição para o topo da edificação.

Traçando, mais uma vez, um paralelo com a NBR - 6123 o fator de efeito da rajada, C_g , se apresenta como a soma da parcela média com a parcela flutuante, mas na forma de coeficientes de ponderação, como a seguir:

$$C_g = 1 + g_p \left(\frac{\mathbf{s}}{\mathbf{m}} \right) \quad (\text{Equação 3.16})$$

Onde: C_g fator de efeito da rajada;

1 parcela referente à componente média;

$g_p(\mathbf{s}/\mathbf{m})$ parcela referente a componente flutuante, sendo:

g_p fator de pico do efeito total do carregamento;

s desvio padrão do efeito total do carregamento;

m valor médio do efeito total do carregamento.

O fator de pico, g_p , é da dado pela equação 3.17:

$$g_p = \sqrt{2 \log_e (\mathbf{u}T)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \log_e (\mathbf{u}T)}} \quad (\text{Equação 3.17})$$

Onde: T 3600 s;

u razão de flutuação:

Sendo:

$$\mathbf{u} = n_o \sqrt{\frac{sF}{(sF + zB)}} \quad (\text{Equação 3.18})$$

Onde: **u** razão de flutuação;

n_o frequência natural de vibração [Hz];

s fator de redução de dimensão (ver figura 3.6, função de L/H e da frequência reduzida);

F fator de energia da rajada para a frequência natural da estrutura (ver figura 3.7, é função do número de onda);

- z razão de amortecimento crítico;
- B fator de resposta turbulenta (ver figura 3.8, função de L/H):
- L largura da edificação da face de barlavento [m],
- H altura da edificação da face de barlavento [m].

E por fim:

$$\left(\frac{s}{m}\right) = \sqrt{\frac{K}{C_{eH}} \left(B + \frac{sF}{z}\right)} \quad (\text{Equação 3.19})$$

- Onde: (s/m) coeficiente de variação de pressão;
- K fator relacionado com o coeficiente da rugosidade superficial do terreno, sendo:
- $K=0,08$ fator de exposição A;
- $K=0,10$ fator de exposição B;
- $K=0,14$ fator de exposição C.

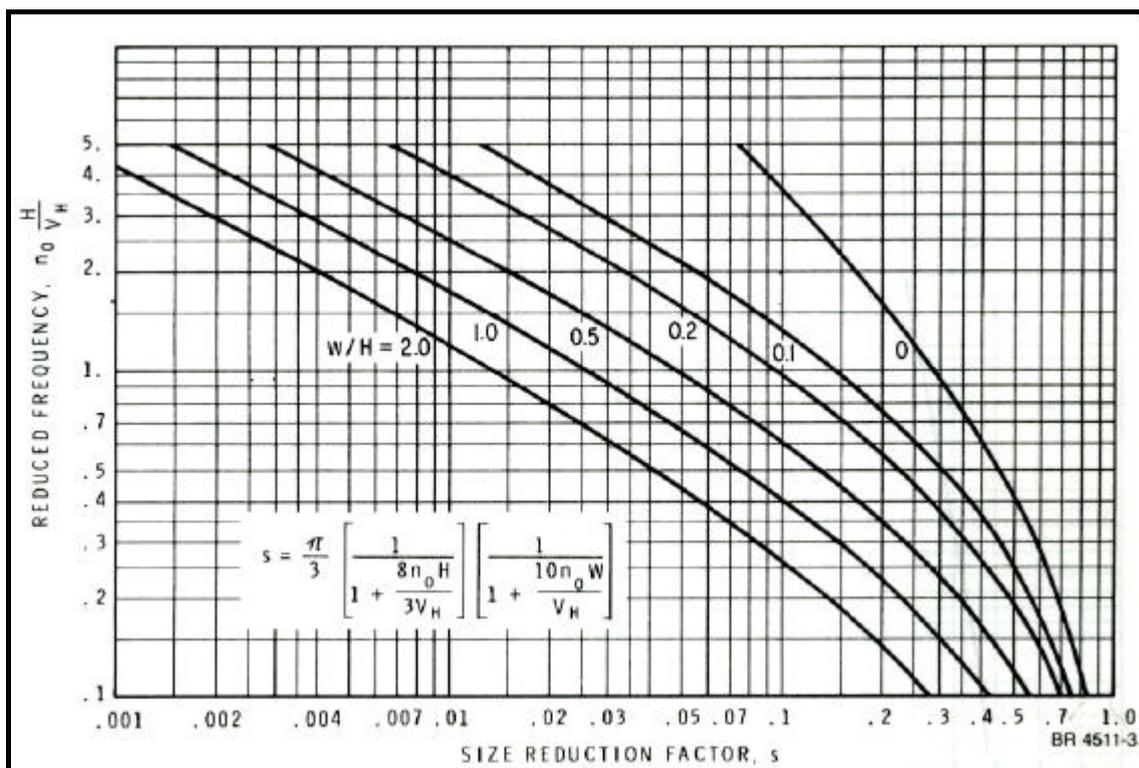


Figura 3.6: Fator de redução de dimensão, como uma função da largura, altura e frequência reduzida da estrutura (NBCC, 1985)

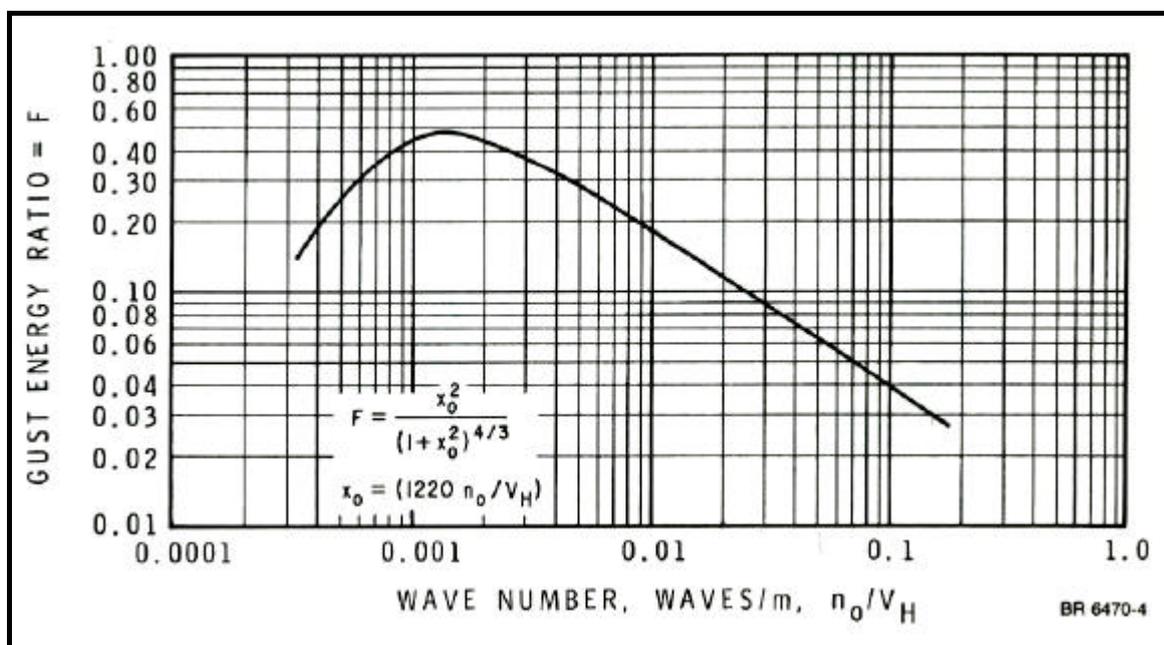


Figura 3.7: Fator da energia de rajada como uma função do número de onda (NBCC, 1985).

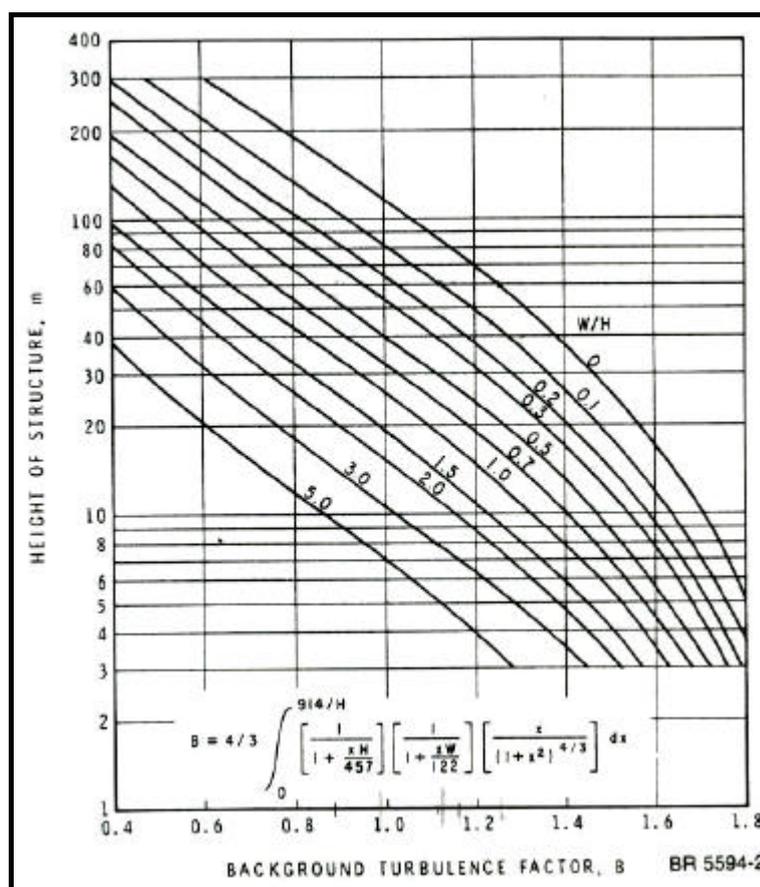


Figura 3.8: Fator de resposta turbulenta, função da largura e da altura da estrutura (NBCC, 1985).

3.2. MODELOS PARA RESPOSTA TRANSVERSAL AO VENTO

3.2.1. Norma Canadense - NBCC 1985

A norma canadense apresenta uma formulação para previsão da força gerada na estrutura devida ao desprendimento cadenciado de vórtices. Este método é baseado no número de Strouhal para a determinação da velocidade crítica (equação 2.8) apresentando uma equação empírica para a estimativa da força.

Os efeitos dinâmicos causados pelo desprendimento de vórtices em uma estrutura cilíndrica podem ser substituídos por uma força estática agindo no terço superior. Essa força é dada por unidade de altura e vale:

$$F_L = \frac{C_1}{\sqrt{I} \sqrt{z - C_2 \frac{\rho D^2}{M}}} q_H D \quad (\text{Equação 3.20})$$

Onde:

- ζ fator de amortecimento crítico;
- λ alteamento (H/D);
- D dimensão característica [m];
- H altura da estrutura [m];
- q_H pressão dinâmica correspondente a V_H ;
- M massa média por unidade de comprimento no terço superior da estrutura [kg/m];
- ρ densidade do ar = 1,25 kg/m.

$$C_1 = 3 \quad \text{para } \lambda > 16;$$

$$C_1 = \frac{3\sqrt{I}}{4} \quad \text{para } \lambda < 16$$

$$C_2 = 0,6$$

Segundo o NBCC - 1985, a aplicação dessa equação fornecerá uma estimativa grosseira dos efeitos do desprendimento de vórtices se a carga for aplicada sobre um comprimento de até $1/3$ do comprimento total e em uma posição centrada sobre a localização do deslocamento máximo para o modo de vibração em estudo.

4. ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

4.1. TÚNEL DE VENTO *Prof. JOAQUIM BLESSMANN*

Os ensaios foram realizados no Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann* da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Blessmann, 1982), mostrado na figura 4.1. Trata-se de um túnel de vento de camada limite de retorno fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis. Este túnel permite a simulação das principais características de ventos naturais. Tem relação comprimento/altura da câmara principal de ensaios superior a 10, e dimensões 1,30m x 0,90m x 9,32m (largura x altura x comprimento). A velocidade máxima do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme e suave, sem modelos, é de 42 m/s. As hélices do ventilador são acionadas por um motor elétrico de 100 HP e a velocidade do escoamento é controlada manualmente através de aletas radiais metálicas que obstruem a passagem do ar.



Figura 4.1: Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann*.

O túnel de vento dispõe de quatro mesas giratórias para a realização de ensaios estáticos e dinâmicos. A localização destas mesas e outras características físicas do túnel de vento podem ser vistas na figura 4.2. Maiores detalhes e outras informações sobre o túnel de vento podem ser encontrados em Blessmann (1982, 1990).

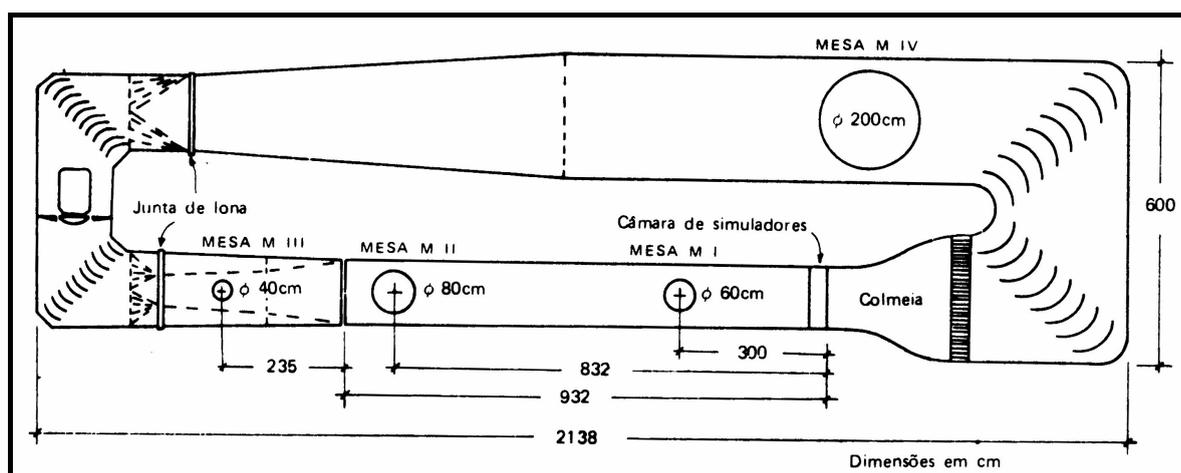


Figura 4.2: Circuito aerodinâmico do Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann* (Blessmann, 1990).

Durante a realização dos testes a velocidade do túnel é monitorada através da medida diferencial de pressão estática, Δpa , lida em dois anéis piezométricos posicionados nos extremos do convergente situado na entrada da seção principal de trabalho. Estas leituras foram feitas por meio de um micromanômetro à água tipo Betz. Para cada perfil de velocidades do vento simulados no túnel foram determinados os coeficientes k_o , que vinculam a pressão dinâmica, q , no eixo do túnel e a pressão de referência Δpa . Desta forma é possível calcular a pressão dinâmica e a velocidade do escoamento em qualquer ponto da seção transversal, devidamente mapeada, pela simples leitura da pressão de referência. Esta relação é mostrada na equação 4.1.

$$q = k_o \Delta pa \quad (\text{equação 4.1})$$

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

V	velocidade média do vento;
k_0	coeficiente que vincula q e Δpa ;
Δpa	pressão de referência (diferença de pressão entre os anéis piezométricos).

Assim calcula-se a velocidade para uma dada temperatura e pressão, pela equação 4.2:

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta pa k_0 (273 + T)}{(0,0474 P_{atm})}} \quad (\text{equação 4.2})$$

Onde:	V	velocidade média do vento [m/s];
	Δpa	pressão de referência [mmH ₂ O];
	k_0	coeficiente que vincula q e Δpa ;
	T	temperatura dentro do túnel no momento do ensaio [C°];
	P_{atm}	Pressão atmosférica no momento do ensaio [mmHg].

Foram mapeados dezoito perfis de velocidades do vento, para a mesma rugosidade e turbulência, cada um com um valor de Δpa diferente. Para cada perfil mediu-se a velocidade a cada 50 mm de altura, até a cota 500 mm, 50 mm acima do edifício. Esses pontos foram medidos no eixo central do túnel, que é o mesmo do modelo. A tabela 4.1 mostra os valores de velocidade no topo do modelo e do protótipo, para cada perfil medido, em função da pressão de referência Δpa , em uma condição de temperatura e pressão atmosférica ensaiada.

Tabela 4.1: Velocidade no topo do modelo e do protótipo em função da pressão de referência Δp_a

ΔP_a (mmH ₂ O)	$P_{dinâmica}$ (mmH ₂ O)	k_o	P_{atm} (mmHg)	T (°C)	V_m (m/s)	V_p (m/s)	V_p (km/h)
0,20	0,21	1,05	763,5	35,1	1,9	21,8	78,5
0,30	0,35	1,17	763,5	38,8	2,5	28,3	102,0
0,40	0,45	1,13	763,5	40,1	2,8	32,2	115,8
0,60	0,71	1,18	764,0	33,5	3,5	40,0	144,0
0,80	0,90	1,12	764,0	36,7	3,9	45,2	162,7
1,00	1,10	1,10	764,0	37,9	4,3	50,1	180,4
1,20	1,30	1,08	763,5	38,7	4,7	54,6	196,5
1,40	1,60	1,14	763,5	23,0	5,1	59,0	212,4
1,60	1,75	1,09	763,5	24,4	5,4	61,8	222,7
1,80	1,95	1,08	763,5	27,1	5,7	65,6	236,1
2,20	2,41	1,09	763,5	29,3	6,3	73,1	263,2
2,60	2,80	1,08	763,5	32,2	6,9	79,3	285,3
2,80	3,00	1,07	763,5	35,6	7,2	82,5	297,0
3,00	3,40	1,13	763,5	39,3	7,7	88,3	318,0
3,50	3,95	1,13	763,5	41,1	8,3	95,5	343,8
5,00	5,70	1,14	763,0	42,5	10,0	115,0	414,0
6,40	7,20	1,13	763,0	43,5	11,2	129,5	466,1
8,20	9,28	1,13	763,0	44,4	12,8	147,2	529,9

4.2. SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL

A simulação correta das principais características do vento natural em túneis de vento é requisito básico para aplicações em Engenharia Civil (Davenport e Isyumov, 1967), sem a qual os resultados obtidos podem se afastar consideravelmente da realidade.

A reprodução das características do vento é obtida através da combinação adequada de obstáculos colocados em uma gaveta no início da câmara de ensaios (figura 4.3) e blocos disseminados no piso da seção principal de ensaios (figura 4.4). Uma outra possibilidade da reprodução da estrutura do vento natural é através de jatos de ar lançados perpendicularmente ao vento gerado no túnel, a partir de seu piso. Maiores informações sobre a representação do vento natural no túnel em questão podem ser obtidas em Blessmann (1982, 1990).

O modelo foi ensaiado em um tipo de escoamento na mesa M-II. Foi simulado o vento deslizante e turbulento com perfil potencial de velocidade média de expoente $p=0,19$. As principais características deste vento simulado podem ser vistas na figura 4.5: perfil vertical das velocidades médias, em percentagem da velocidade média no eixo longitudinal do túnel

(pontos experimentais e curva potencial teórica), intensidade (II) da componente longitudinal da turbulência. A figura 4.6 mostra o espectro de potência da componente longitudinal da turbulência.

O perfil das velocidades médias é expresso, aproximadamente, pela lei potencial:

$$\frac{V(z)}{V_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^p \quad (\text{equação 4.3})$$

- Onde:
- $V(z)$ velocidade média na altura z ;
 - V_{ref} velocidade média em uma altura de referência;
 - z_{ref} 450mm - altura de referência (cota do eixo longitudinal do túnel);
 - p expoente da curva de potência.



Figura 4.3: Gaveta colocada no início da câmara de ensaios para representação do vento natural



Figura 4.4: Blocos disseminados no piso para representação do vento natural

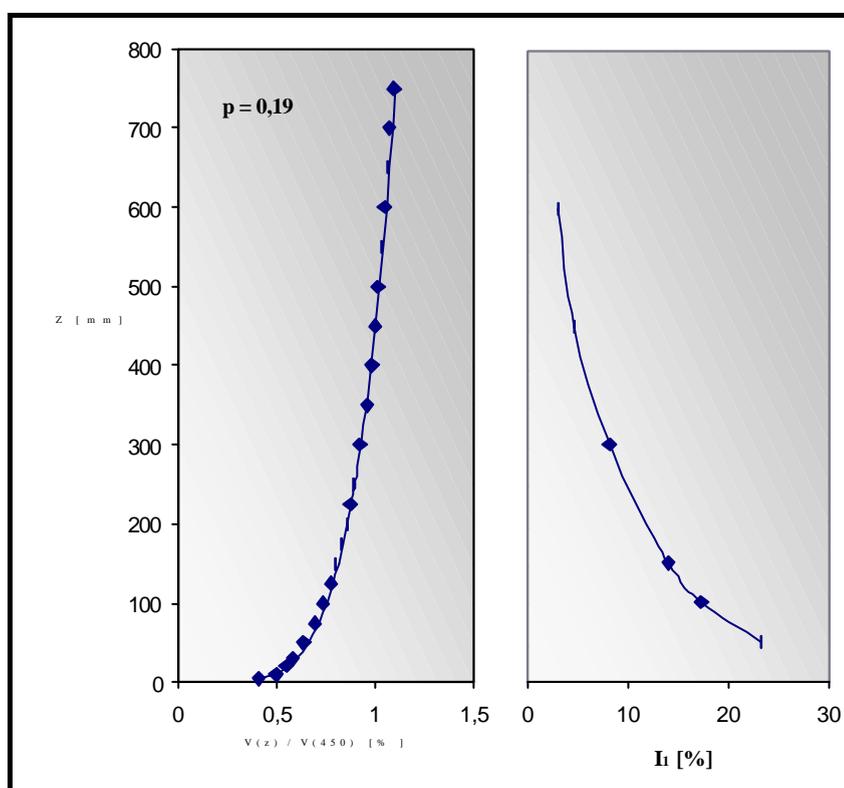


Figura 4.5: Perfil de velocidades médias e intensidade da componente longitudinal de turbulência

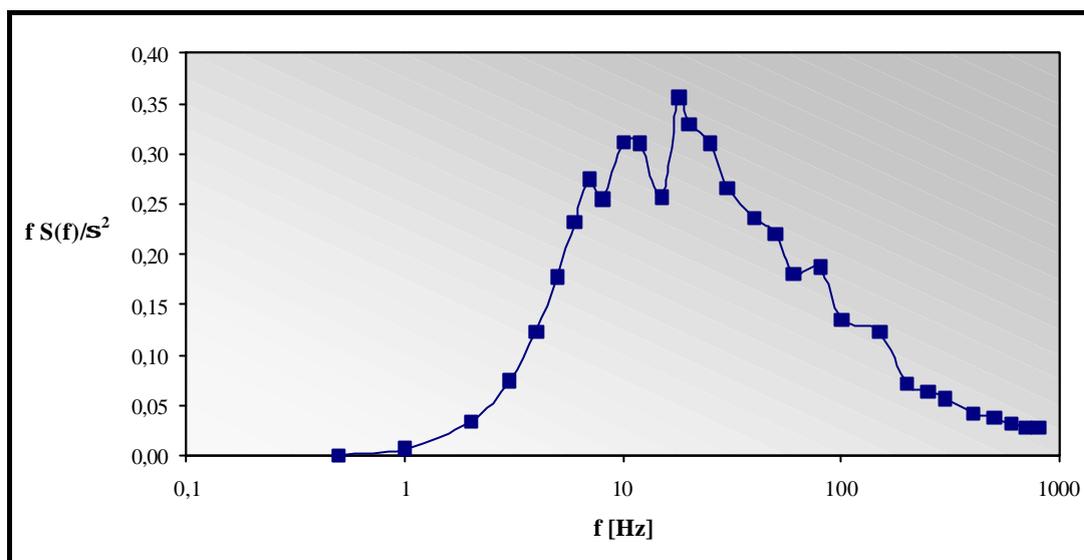


Figura 4.6: Espectro de potência da componente longitudinal de turbulência

4.3. ENSAIOS DINÂMICOS

4.3.1. Modelagem Aeroelástica

Modelagem aeroelástica de edifícios altos é uma técnica experimental que leva em consideração a resposta dinâmica induzida pelo vento em estruturas. De acordo com Simiu e Scanlan (1978), aeroelasticidade é a disciplina que estuda o fenômeno no qual forças aerodinâmicas e movimentos estruturais interagem significativamente.

Além da simulação do escoamento natural do vento, da geometria externa e das forças aerodinâmicas, estes estudos necessitam a reprodução de inércia, rigidez e amortecimento característicos da estrutura. Felizmente a ação do vento em edifícios altos é restringida aos mais baixos modos de vibração, sendo assim os aspectos dominantes da ação do vento podem ser estudados com modelos de relativa simplicidade dinâmica.

Os modelos aeroelásticos equivalentes são utilizados para simular a estrutura completa usando alguma analogia mecânica para representar certos aspectos selecionados das características

dinâmicas da estrutura protótipo. Usualmente, modelos semelhantes utilizam uma "casca" não estrutural para manter a similaridade da geometria externa global e forças aerodinâmicas. Um sistema estrutural equivalente é utilizado para modelar as propriedades de rigidez e amortecimento.

Nesse sentido, para a realização de ensaios dinâmicos, foi construído um modelo aeroelástico equivalente de dois graus fundamentais de liberdade, onde os movimentos são reproduzidos na base por um conjunto de molas e rolamentos estrategicamente posicionados. O modelo rígido do edifício é construído de madeira podendo ser facilmente modificado de acordo com o projeto em estudo. A técnica de simulação reproduz os dois modos fundamentais de vibração linearmente. De acordo com ASCE (1980), para um edifício alto, que é uma estrutura apertada, o modo fundamental de vibração, composto de uma combinação da ação de flexão e corte, pode ser aproximado por uma linha reta. Em termos de modelagem aerodinâmica não importa como esse modo é atingido.

4.3.1.1. Descrição do Modelo Aeroelástico Equivalente

O modelo aeroelástico equivalente construído é composto por uma base em alumínio, representando os dois graus de liberdade da estrutura e uma "casca" rígida, em madeira, para dar forma ao edifício em estudo.

A base em alumínio é formada por dois eixos transversais que podem girar independentemente em torno do mesmo ponto. Nas extremidades dos eixos estão fixadas molas, que dão a rigidez rotacional ao sistema. Portanto, com uma simples troca de molas altera-se a rigidez do sistema. Em seu centro, esta base é composta por um prisma quadrado, que é o que permite a independência dos movimentos através do adequado posicionamento de seis rolamentos. Ainda no eixo são fixadas hastes com placas de acrílico para o amortecimento. Um dos eixos, chamado de x, atravessa o prisma quadrado central, o outro, chamado de y, é cortado pelo mesmo. Na figura 4.7, mostra-se a base e seus componentes.

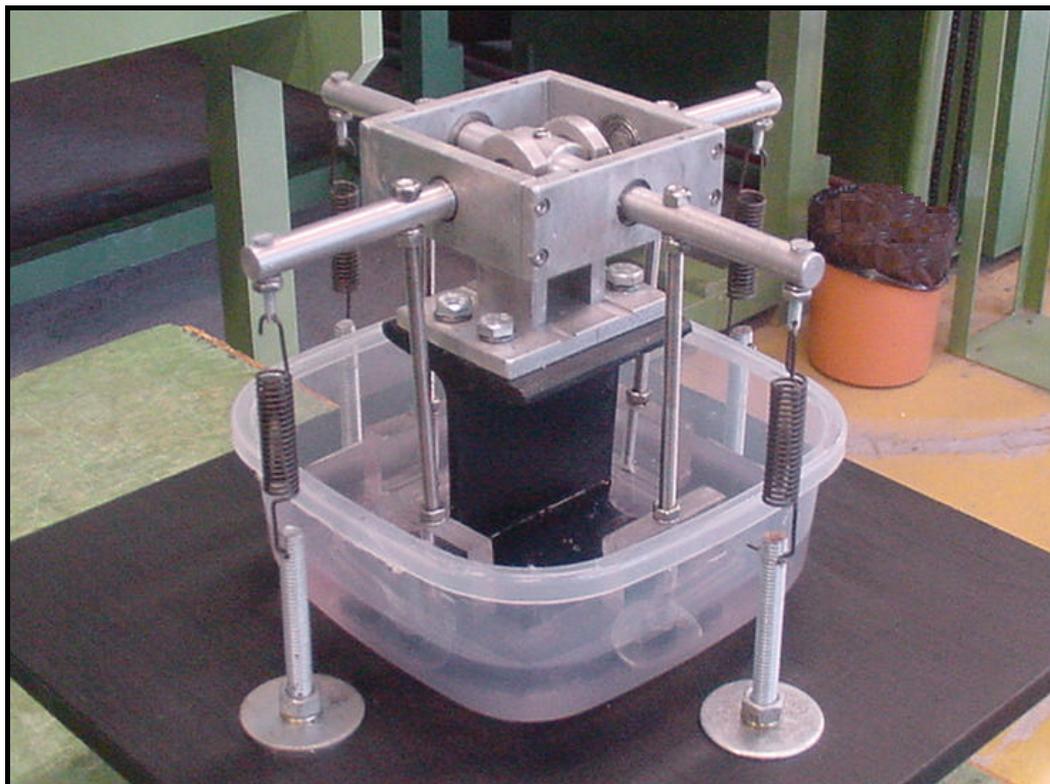


Figura 4.7: Foto da base do modelo.

Próximo às extremidades de cada eixo estão localizadas molas de tração, que são as responsáveis pela rigidez rotacional e, conseqüentemente, pela freqüência de vibração do modelo. Para o funcionamento do sistema é necessário que as molas sejam previamente tracionadas. A freqüência de vibração do modelo em cada direção pode ser obtida pela equação 4.4:

$$f_m = \frac{1}{2\delta} \sqrt{\frac{K_q}{Im_m}} \quad (\text{Equação 4.4})$$

Onde:

- f_m freqüência de vibração do modelo na direção considerada [Hz];
- K_q rigidez rotacional [Nm];
- Im_m momento de inércia de massa do modelo acoplado a base, em relação ao eixo considerado [kgm²].

A rigidez rotacional, K_q pode ser determinada através da geometria da base e da constante elástica K das molas utilizadas. Com base na figura 4.8, esse parâmetro pode ser facilmente deduzido:

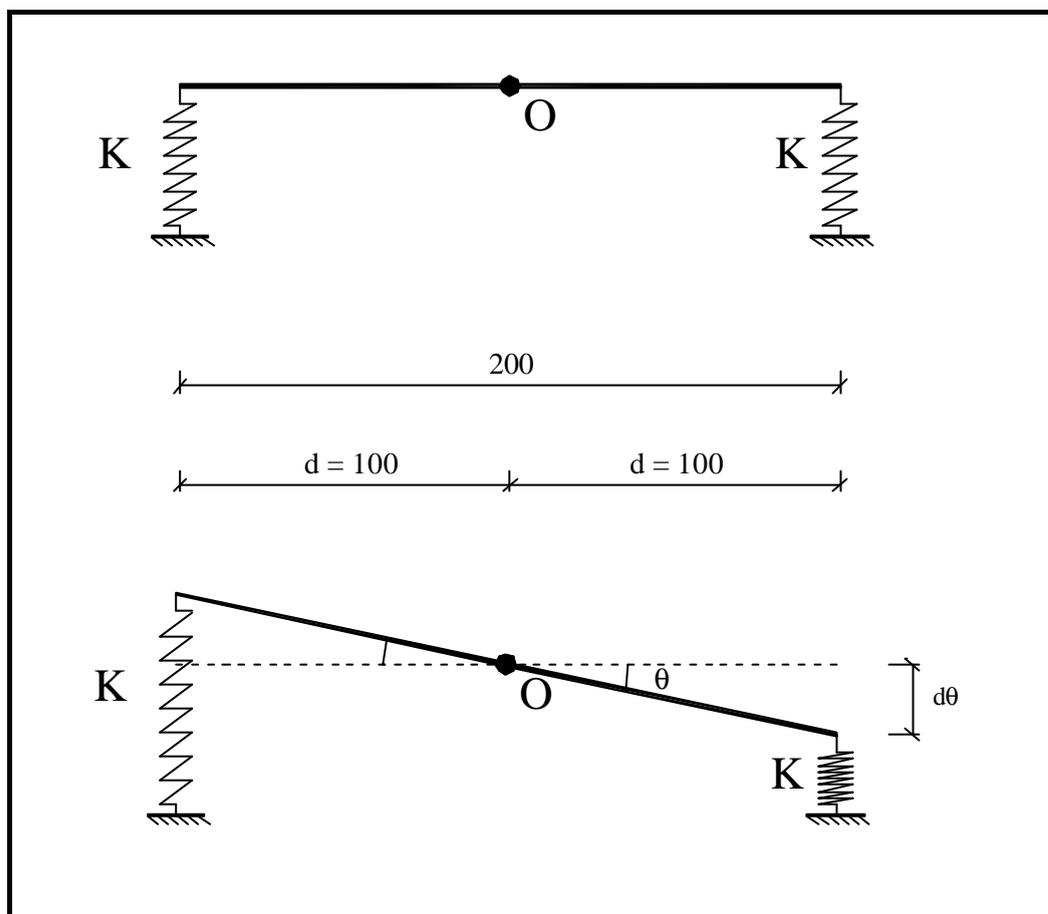


Figura 4.8: Determinação da rigidez rotacional K_q - medidas em mm

$$F = d q K \quad (\text{Equação 4.5})$$

$$M_o = 2 F d = 2 d^2 q K \quad (\text{Equação 4.6})$$

$$K = \frac{M_o}{\mathbf{q}} = 2d^2 K \quad (\text{Equação 4.7})$$

Onde:

F	força na mola [N];
d	braço de alavanca [m];
\mathbf{q}	ângulo de giro [rad];
K	constante elástica da mola [N/m];
M_o	momento fletor em torno do eixo de giro [Nm];

E substituindo-se 4.7 em 4.4 tem-se:

$$f_m = \frac{1}{2\mathbf{P}} \sqrt{\frac{2d^2 K}{Im_m}} \quad (\text{Equação 4.8})$$

O amortecimento é formado por hastes, duas por eixo, em aço inoxidável com placas de acrílico nas suas extremidades inferiores. Essas hastes são mergulhadas em um recipiente contendo detergente, marca Fontana. Esse líquido foi escolhido pela sua viscosidade, e fácil limpeza. A água é um líquido de mais fácil trabalho, mas com pouca viscosidade e o óleo mineral é um fluido extremamente viscoso, porém de muito difícil manuseio. De acordo com o nível de amortecimento desejado, pode-se alterar o nível de amortecimento com variações do número de amortecedores, dimensões das placas, viscosidade ou do nível de líquido.

A instrumentação do conjunto é feita com dois acelerômetros piezoelétricos, marca Brüel & Kjaer, fixados no fundo do modelo, conforme figura 4.9, sendo que cada um é posicionado

sobre a projeção de um dos eixos. Cada acelerômetro é ligado a um amplificador de sinal, ajustado para suas características. Dos amplificadores o sinal é enviado a um microcomputador equipado com uma placa de aquisição de sinais adequada. Esses equipamentos são mostrados na figura 4.10. Para aquisição do sinal é utilizado um programa em HPVEE 3.2. Para interpretação do sinal obtido é utilizado outro programa desenvolvido em MATLAB 6.0. A foto do modelo aeroelástico equivalente construído com o edifício alto em estudo é apresentada na figura 4.11.



Figura 4.9: Acelerômetros fixados na parte inferior do modelo.



Figura 4.10: Equipamento utilizado para aquisição de sinal.

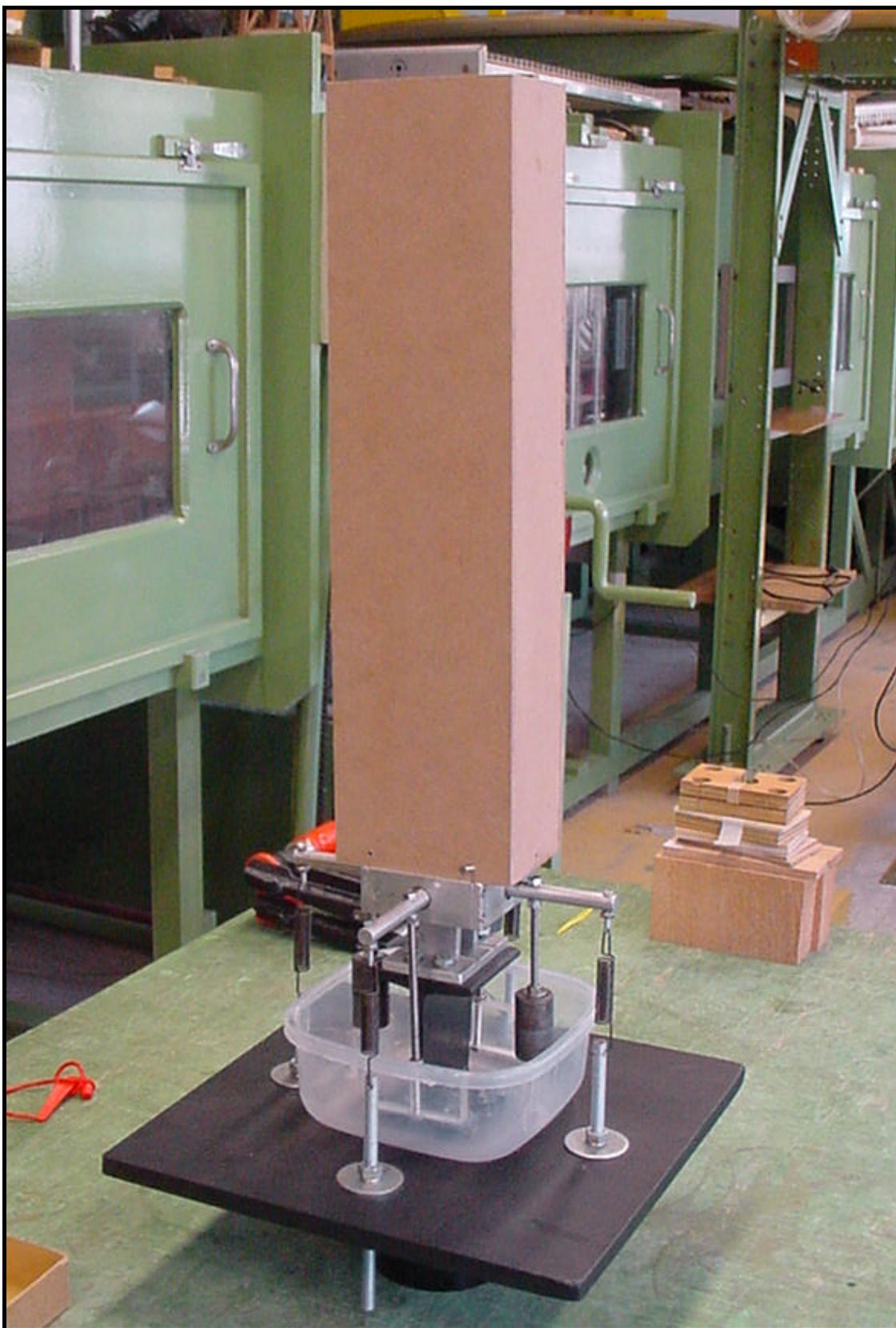


Figura 4.11: Modelo Aeroelástico Equivalente e edifício alto em estudo

4.3.1.2. Descrição do Edifício Alto em Estudo

Foi escolhido para o estudo um edifício alto, padrão, com seção transversal retangular. Suas dimensões e propriedades são descritas abaixo.

4.3.1.2.1. Geometria

O edifício tem forma prismática retangular possuindo altura de 180 metros e seção transversal de 45 metros por 30 metros, conforme a figura 4.12. O edifício apresenta paredes externas lisas sem janelas, parapeitos ou qualquer outro detalhe geométrico. A massa é distribuída uniformemente a uma razão de 160 kg/m^3 , o que faz com que a inércia de massa possa ser determinada, segundo Beer and Johnston (1980), com base nas equações de um prisma retangular, de acordo com a figura 4.13.

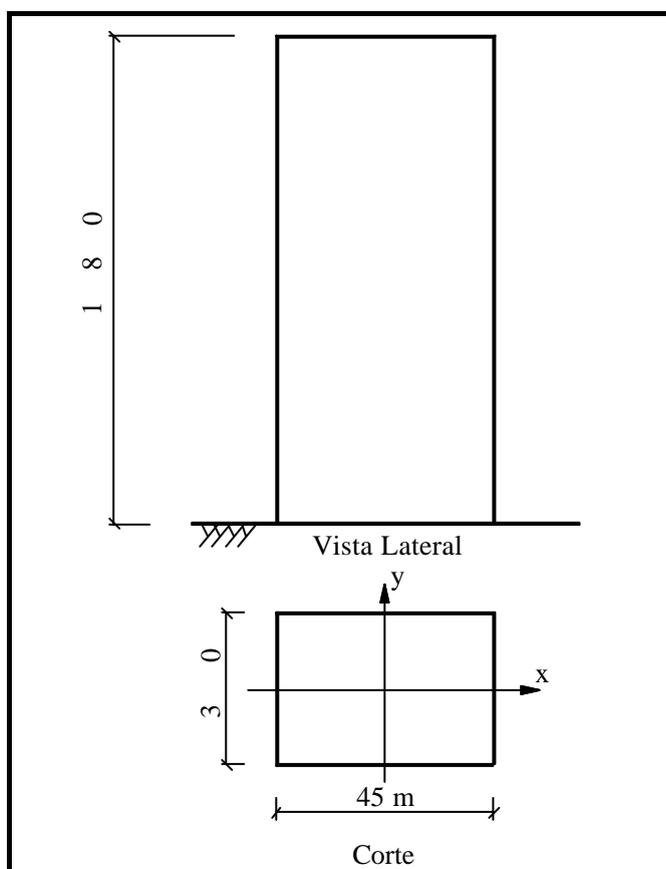


Figura 4.12: Vista lateral e planta baixa

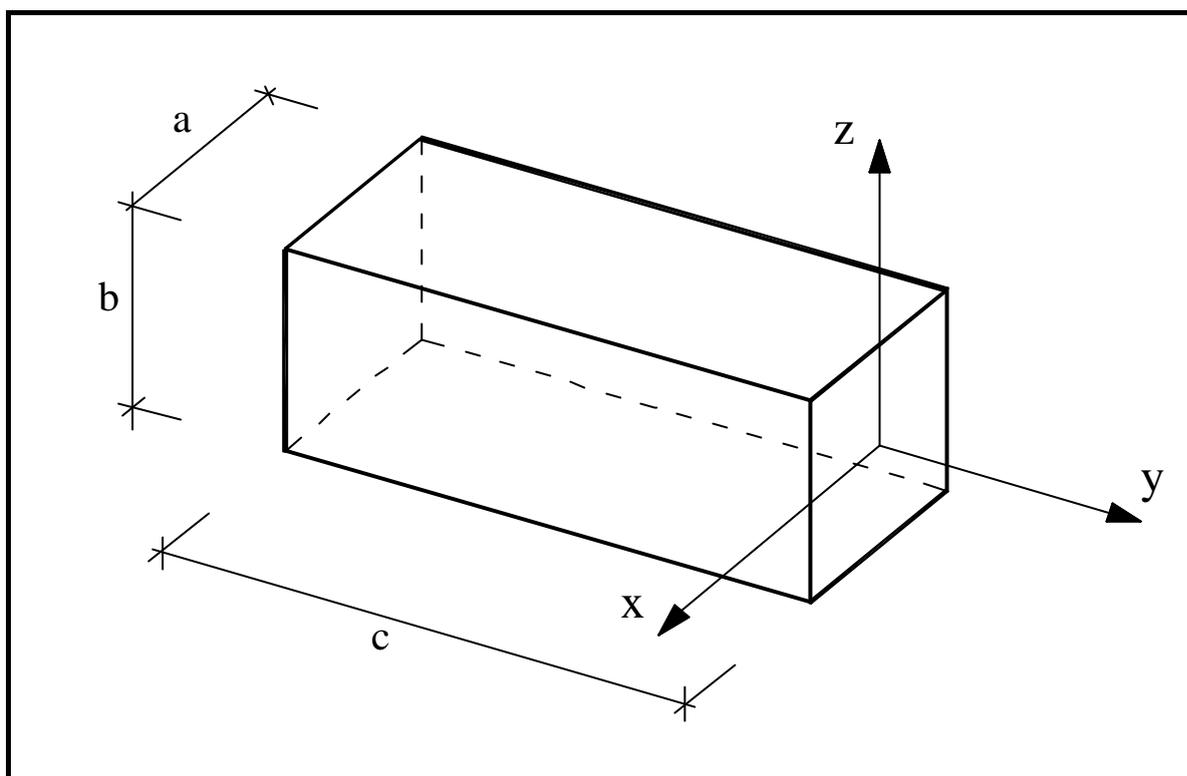


Figura 4.13: Prisma retangular.

$$I_{m_x} = \frac{1}{12} m(b^2 + c^2) + m\left(\frac{c}{2}\right)^2 \quad (\text{equação 4.9})$$

$$I_{m_y} = \frac{1}{12} m(a^2 + c^2) + m\left(\frac{c}{2}\right)^2 \quad (\text{equação 4.10})$$

Onde: I_{m_x} momento de inércia de massa do protótipo em relação à x;

I_{m_y} momento de inércia de massa do protótipo em relação à y;

m massa do protótipo;

a largura;

b comprimento;

c altura.

Sendo a massa total *m* do protótipo:

$$m = 38880000 \text{ kg} = 38880 \text{ t}$$

Então, aplicando-se a massa do protótipo dada acima e as dimensões tiradas da figura 4.12 nas equações 4.9 e 4.10 encontra-se:

$$Im_x = 4228200000 \text{ kgm}^2 = 422820000 \text{ tm}^2$$

$$Im_y = 4264650000 \text{ kgm}^2 = 426465000 \text{ tm}^2$$

4.3.1.2.2. *Propriedades Dinâmicas*

O edifício oscila somente em seu modo fundamental, aproximadamente em forma linear e com eixo de rotação na base. A frequência fundamental é tomada como 0,2 Hz nas duas direções e o amortecimento estrutural, referido pelo fator de amortecimento crítico é de 1%.

4.3.1.3. Condições de Semelhança

Como mencionado anteriormente a modelagem aeroelástica de uma estrutura envolve, além da simulação do escoamento natural do vento, uma correta correspondência de suas características geométricas e dinâmicas, como inércia, rigidez e amortecimento.

4.3.1.3.1. Escala de comprimento

O fator de escala de comprimento, dado pela equação 4.11, é a razão entre um comprimento do modelo e o seu correspondente no protótipo:

$$\dot{\epsilon}_L = \frac{L_m}{L_p} \quad (\text{equação 4.11})$$

Onde: \mathbf{I}_L fator de escala de comprimento;

L_m comprimento do modelo;

L_p comprimento do protótipo.

4.3.1.3.2. Escala de massa

A escala de massa é determinada pela razão entre a massa do modelo e a do protótipo:

$$\mathbf{I}_m = \frac{m_m}{m_p} = \left(\frac{\mathbf{r}_m L_m^3}{\mathbf{r}_p L_p^3} \right) = \mathbf{I}_r \mathbf{I}_L^3 \quad (\text{equação 4.12})$$

Onde:

\mathbf{I}_L	fator de escala de comprimento;
m_m	massa do modelo;
m_p	massa do protótipo;
\mathbf{r}_m	massa específica do modelo;
\mathbf{r}_p	massa específica do protótipo;
\mathbf{I}_r	fator de escala de massa específica.

4.3.1.3.3. Escala de momento de inércia de massa

O fator de correspondência de escala para o momento de inércia de massa é assim obtido:

$$\mathbf{I}_{I_m} = \left(\frac{\mathbf{r}_m L_m^5}{\mathbf{r}_p L_p^5} \right) = \mathbf{I}_r \mathbf{I}_L^5 \quad (\text{equação 4.13})$$

Onde: \mathbf{I}_{I_m} fator de escala de momento de inércia de massa.

4.3.1.3.4. Escala de frequência

O fator de escala da frequência é dado pela razão entre a frequência do modelo e a do protótipo. Com isso, pode-se notar que esse fator é independente da escala utilizada para comprimentos, o que torna livre sua escolha.

Como será mostrado a seguir, a escala de velocidades depende da escala de frequência, tornando-se, então, a faixa de velocidades do túnel de vento um importante fator na escolha da escala de frequência. Outro fato que deve ser levado em consideração nesta escolha é que a frequência de vibração do modelo deve ser preferencialmente muito inferior a frequência

natural dos seus componentes. Tomando-se esse cuidado, evita-se que haja ressonância e minimiza-se a presença de ruídos no sinal de interesse, oriundo de vibrações em modos espúrios.

A escala de frequência é dada pela equação a seguir:

$$\mathbf{I}_f = \frac{f_m}{f_p} \quad (\text{equação 4.14})$$

Onde: \mathbf{I}_f fator de escala de frequência;

f_m frequência do modelo;

f_p frequência do protótipo.

4.3.1.3.5. Escala de tempo

É dada simplesmente pelo inverso da escala de frequência:

$$\mathbf{I}_T = \frac{1}{\mathbf{I}_f} \quad (\text{equação 4.15})$$

Onde: \mathbf{I}_T fator de escala de tempo.

4.3.1.3.6. Escala de velocidades

É dada pela razão entre a velocidade no modelo e a velocidade no protótipo:

$$\mathbf{I}_v = \frac{v_m}{v_p} = \frac{\frac{L_m}{t_m}}{\frac{L_p}{t_p}} = \frac{\mathbf{I}_L}{\mathbf{I}_T} = \mathbf{I}_L \cdot \mathbf{I}_f \quad (\text{equação 4.16})$$

Onde: \mathbf{I}_V fator de escala de velocidades;

v_m velocidade do modelo;

v_p velocidade do protótipo;

t_m tempo do modelo;

t_p tempo do protótipo.

4.3.1.3.7. Escala de acelerações

Fazendo-se uma análise de grandezas chega-se a:

$$\mathbf{I}_a = \frac{\mathbf{I}_v}{\mathbf{I}_T} = \frac{\mathbf{I}_L \cdot \mathbf{I}_f}{\mathbf{I}_T} = \mathbf{I}_L \cdot \mathbf{I}_f^2 \quad (\text{equação 4.17})$$

Onde: \mathbf{I}_a fator de escala de acelerações.

4.3.1.3.8. Escala de forças

O fator de escala de forças também pode ser obtido por uma relação entre grandezas:

$$\mathbf{I}_F = \frac{F_m}{F_p} = \frac{m_m \cdot a_m}{m_p \cdot a_p} = \mathbf{I}_m \cdot \mathbf{I}_a = \mathbf{I}_r \cdot \mathbf{I}_L^3 \cdot \mathbf{I}_L \cdot \mathbf{I}_f^2 = \mathbf{I}_r \cdot \mathbf{I}_L^4 \cdot \mathbf{I}_f^2 \quad (\text{equação 4.18})$$

Onde: \mathbf{I}_F fator de escala de forças;

F_m força do modelo;

F_p força do protótipo.

4.3.1.3.9. Escala de momentos fletores

Lembrando-se que momento fletor é o produto de uma força pela distância do ponto de aplicação ao centro giro tem-se:

$$\mathbf{I}_{Mf} = \frac{F_m \cdot L_m}{F_p \cdot L_p} = \mathbf{I}_F \cdot \mathbf{I}_L = \mathbf{I}_r \cdot \mathbf{I}_L^4 \cdot \mathbf{I}_f^2 \cdot \mathbf{I}_L = \mathbf{I}_r \cdot \mathbf{I}_L^5 \cdot \mathbf{I}_f^2 \quad (\text{equação 4.19})$$

Onde: \mathbf{I}_{Mf} fator de escala de momentos fletores.

4.3.1.3.10. Escala de amortecimento

A razão de amortecimento crítico no modelo deve ser a mesma que no protótipo, ou seja, $\mathbf{z}_m = \mathbf{z}_p$, e o fator de escala de amortecimento deve ser igual a 1.

4.3.2. Procedimento Experimental

4.3.2.1. Escala Utilizada

O modelo foi construído em escala de comprimento 1:400. Essa escala foi escolhida em função da escala do vento natural simulado no túnel de vento, e das dimensões do modelo em relação às dimensões da seção transversal do túnel na mesa - II (mesa onde foram realizados os ensaios).

A representação da distribuição de massa pode ser feita de várias maneiras em um modelo aeroelástico. Quando a massa específica do ar no modelo é a mesma do protótipo, deve-se manter a mesma relação na massa específica da estrutura, a fim de se manter uma relação compatível para as forças de inércia. Entretanto, para estruturas como edifícios altos é freqüentemente suficiente representar a massa por unidade de comprimento em escala, e essa distribuição de massa pode ser substituída pela representação do momento de inércia de massa em escala sobre o eixo no qual a rotação ocorre.

O modo fundamental de vibração de um edifício alto, formado pela combinação das ações de corte e flexão, pode ser aproximado por uma linha reta. Em termos de modelagem aerodinâmica não é relevante como esse modo é alcançado. Usando esta aproximação, não é necessário que se represente a correta distribuição de massa específica, contanto que o momento de inércia de massa seja representado como se a massa específica estivesse corretamente distribuída (ASCE, 1980).

A escala de freqüência foi escolhida de acordo com as características citadas. Para uma boa relação com a escala de velocidades e com a freqüência natural do sistema (base, hastes, modelo) optou-se por uma freqüência de vibração do modelo de 7 Hz. Assim, para se determinar a rigidez das molas fez-se o caminho inverso. Aplicando-se na equação 4.8 os momentos de inércia de massa multiplicados pelo fator de escala dessa grandeza, e a freqüência desejada, são encontradas as constantes das molas a serem utilizadas:

$$K_x = 4028,19 \text{ N/m}$$

$$K_y = 3993,75 \text{ N/m}$$

As quatro molas foram encomendadas à empresa TECNOMOLA LTDA. com constante de elasticidade igual a 4000 N/m. Assim, as frequências nas duas direções, dadas pela equação 4.8 ficam:

$$f_y = 6,97 \text{ Hz}$$

$$f_x = 7,00 \text{ Hz}$$

4.3.2.2. Modelo Construído

O modelo utilizado foi construído na oficina do Laboratório de Aerodinâmica das Construções. Foram utilizadas chapas de MDF com espessura de 3 mm para construção das paredes externas e 6 mm para o topo, mostrado na figura 4.14. Para o fundo de fixação à base utilizou-se compensado de 15 mm de espessura.

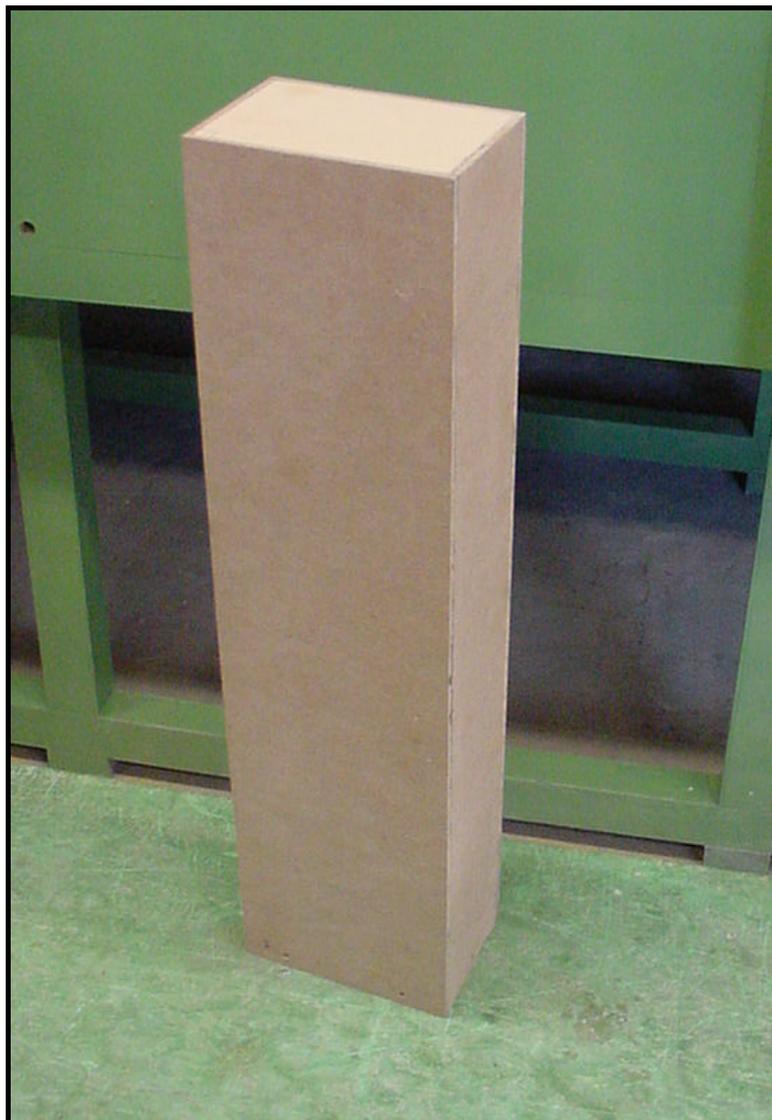


Figura 4.14: Modelo do edifício alto em MDF, escala 1:400.

4.3.2.2. Calibração de Frequência e Amortecimento

4.3.2.2.1. Procedimentos realizados

O processo de calibração do modelo se inicia com o acerto da frequência, visto que tendo-se este valor correto, conseqüentemente o momento de inércia de massa estará certo. Esse ajuste é feito com a adição de pesos de chumbo que são fixados nas hastes dos amortecedores, ilustrado na figura 4.15. Como os movimentos nas duas direções são independentes, quando

adiciona-se os pesos sobre um eixo, a inércia de massa do outro sentido não altera-se, logo a frequência também permanece constante.

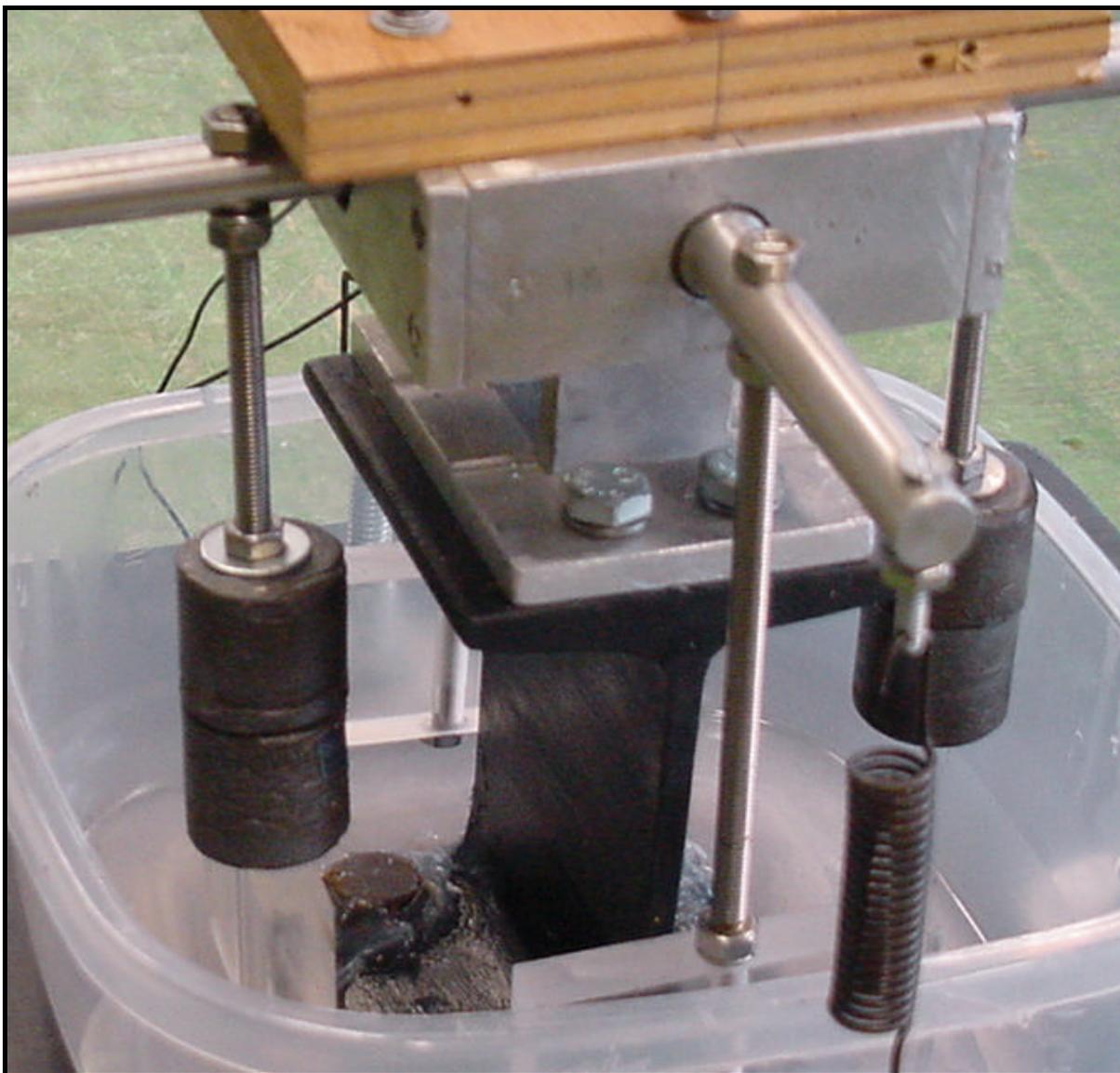


Figura 4.15: Pesos de chumbo utilizados no ajuste da frequência.

Uma vez ajustado o momento de inércia de massa do modelo nas duas direções, através da frequência, calibrou-se o amortecimento. Isso foi feito através da mudança do nível do líquido viscoso, neste caso detergente de glicerina, e da mudança da área das pás dos amortecedores. A figura 4.16 mostra as pás de diferentes dimensões utilizadas durante o acerto do amortecimento.

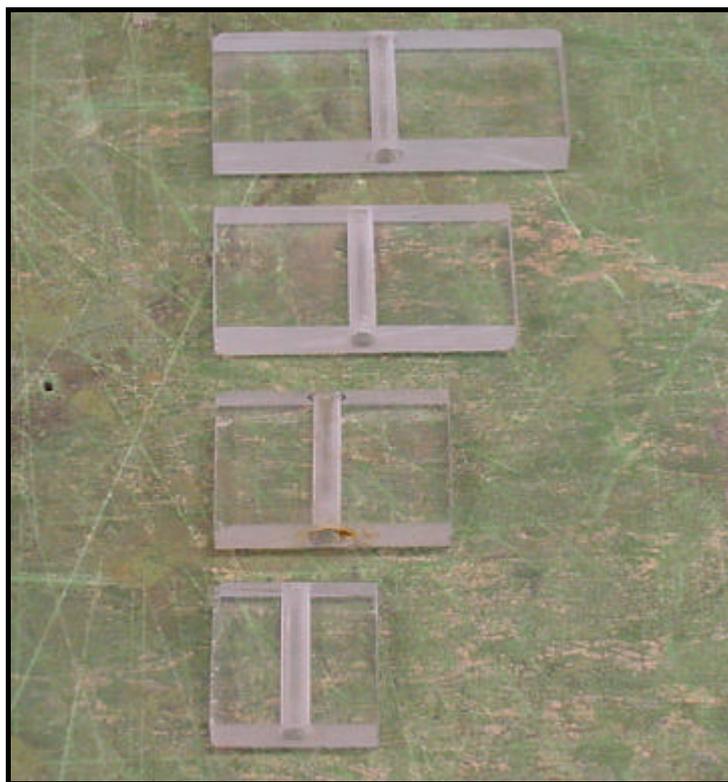


Figura 4.16: Pás de diferentes dimensões dos amortecedores.

Tanto o amortecimento como a frequência foram ajustados experimentalmente, a partir de registros de sinal gerados pelos acelerômetros piezoelétricos situados na base do modelo. Esse sinal foi obtido através de uma excitação impulsiva.

As frequências foram calculadas diretamente pelo programa em HPVEE 3.2, através de espectro de potência.

O amortecimento foi estimado por curvas de decaimento do sinal. Para tanto, utilizou-se o programa em MatLab 6.0 para transformar a forma matricial do sinal gerada pelo HPVEE 3.2 em pares ordenados de pontos. Após, selecionou-se os picos da curva do sinal, podendo-se, então, fazer uma aproximação exponencial na forma da equação 4.20. O coeficiente b representa o produto da razão de amortecimento crítico (ζ) pela frequência angular (ω_n). Essas aproximações foram feitas com a utilização do programa comercial CurveExpert 1.3.

$$y(t) = ae^{-bt} \quad (\text{equação 4.20})$$

4.3.2.2.2. Resultados obtidos

Após a adição dos pesos de chumbo, chegou-se à frequência de 6,937 Hz nas duas direções, conforme mostram as figuras 4.17 e 4.18. A taxa de aquisição de sinal utilizada neste experimento foi de 1024 pontos por segundo e um intervalo de medição de 16 segundos, totalizando 32768 pontos.

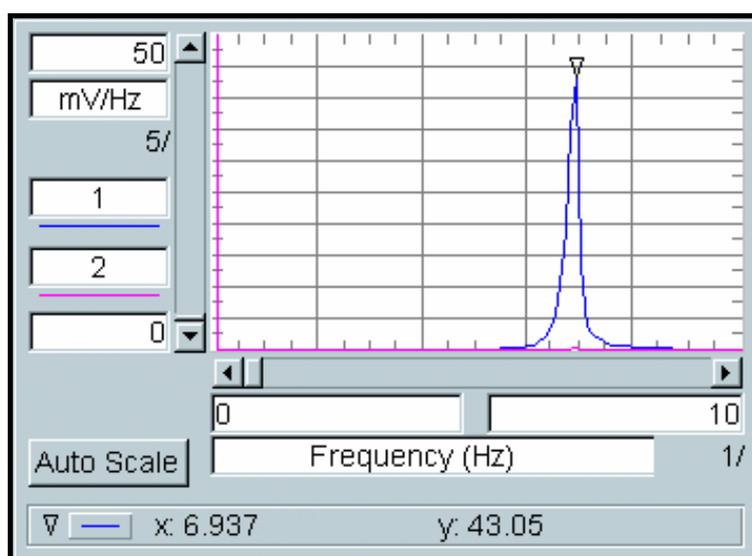


Figura 4.17: Espectro de potência gerado no programa em HPVEE 3.2 para determinação da frequência em torno do eixo y.

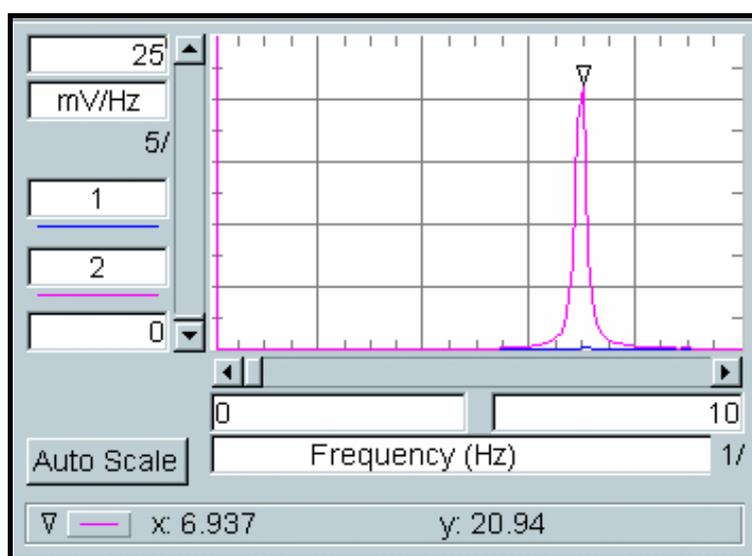


Figura 4.18: Espectro de potência gerado no programa em HPVEE 3.2 para determinação da frequência em torno do eixo x.

Uma vez que o valor experimental da frequência difere do esperado, os fatores de escala diferem dos teóricos. A tabela 4.2 mostra os fatores de escala com valores experimentais:

Tabela 4.2: Fatores de escala com valores experimentais

Parâmetro	Escala	Valor
Comprimento	$I_L = \frac{L_m}{L_p}$	$\frac{1}{400}$
Momento de Inércia de massa	$I_{I_m} = I_r I_L^5$	$\frac{1}{1,024E13}$
Frequência	$I_f = \frac{f_m}{f_p}$	34,68
Tempo	$I_T = \frac{1}{I_f}$	$\frac{1}{34,72}$
Velocidades	$I_v = I_L I_f$	$\frac{1}{11,53}$
Acelerações	$I_a = I_L I_f^2$	3,00
Forças	$I_F = I_r I_L^4 I_f^2$	$\frac{1}{2,1E7}$
Momentos fletores	$I_{Mf} = I_r I_L^5 I_f^2$	$\frac{1}{8,5E9}$

Após a frequência, ajustou-se o amortecimento. Foram feitas cinco aquisições de dados para cada direção, conforme mostra a tabela 4.3, obtendo-se 1,00% para o amortecimento em torno de x e 0,97% para o amortecimento em torno de y.

Tabela 4.3: Fator de amortecimento crítico experimental

Em torno de x		Em torno de y	
b	ζ (%)	b	ζ (%)
0,4402	1,01	0,4228	0,97
0,4402	1,01	0,4184	0,96
0,4315	0,99	0,4271	0,98
0,4533	1,04	0,4271	0,98
0,4228	0,97	0,4228	0,97
MÉDIA	1,00	MÉDIA	0,97

Abaixo tem-se curvas de variação do sinal em função do tempo, obtidas com o programa em HPVEE 3.2. A curva superior representa o movimento em torno do eixo x, e a inferior em torno do eixo y. A figura 4.19 representa o movimento devido à uma excitação impulsiva em torno do eixo x, e a figura 4.20 representa o movimento em torno de y devido à aplicação do mesmo tipo de carga. Pode-se notar a baixa interferência de um movimento em relação ao outro.

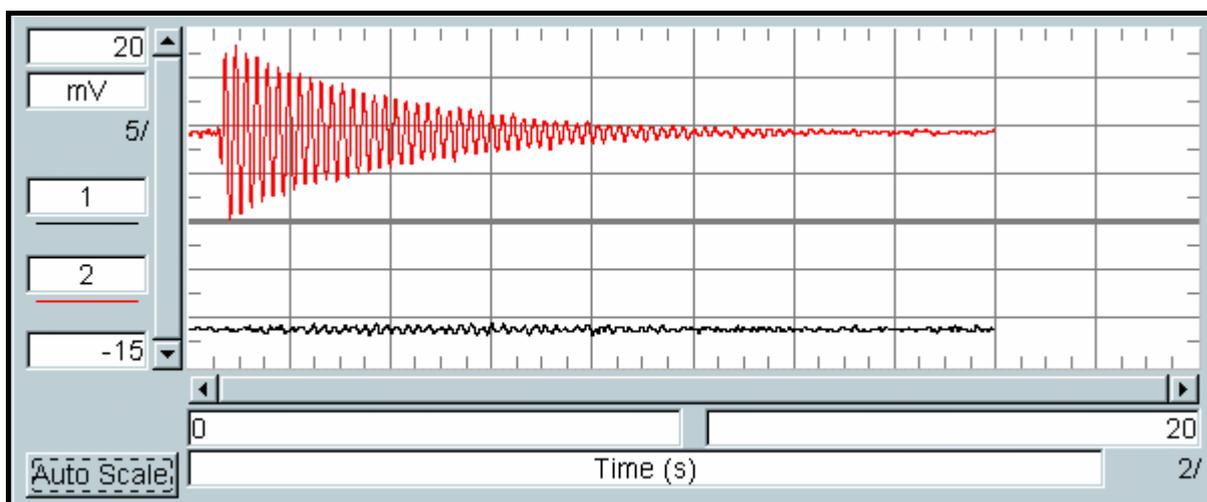


Figura 4.19: A curva superior mostra o sinal da vibração em torno do eixo x.

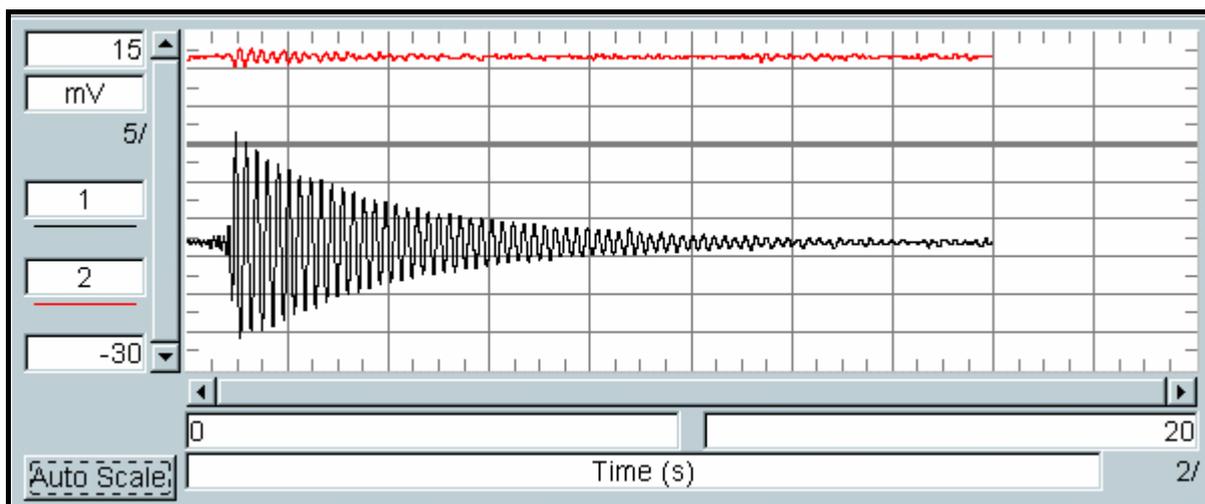


Figura 4.20: A curva inferior mostra o sinal da vibração em torno do eixo y.

As figuras 4.21 e 4.22 apresentam a aproximação do decaimento do sinal por uma função exponencial, através do programa CurveExpert 1.3, conforme procedimento descrito no item anterior.

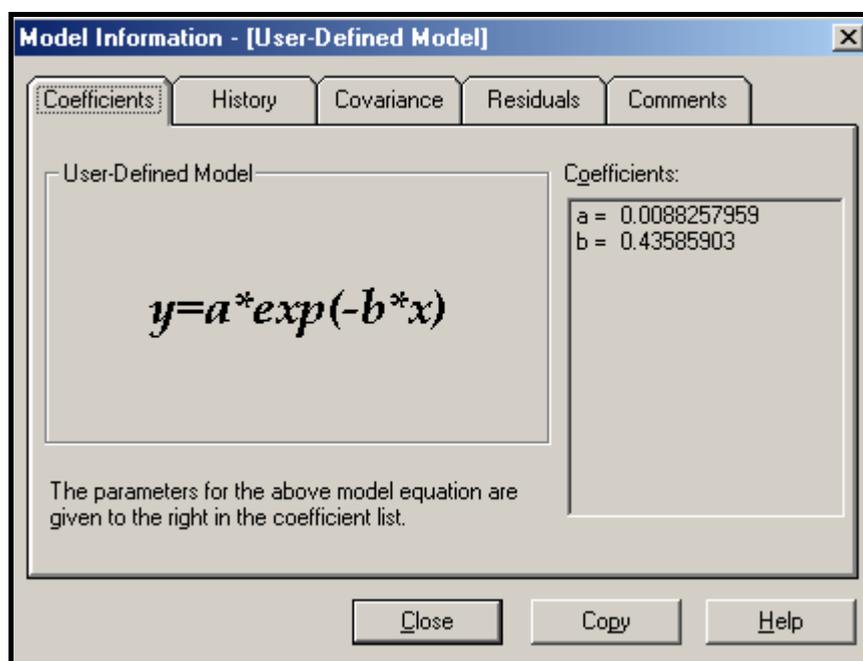


Figura 4.21: Função exponencial para a aproximação do amortecimento.



Figura 4.23: Modelo montado e instrumentado em túnel de vento.



Figura 4.24: Modelo pronto para ensaio

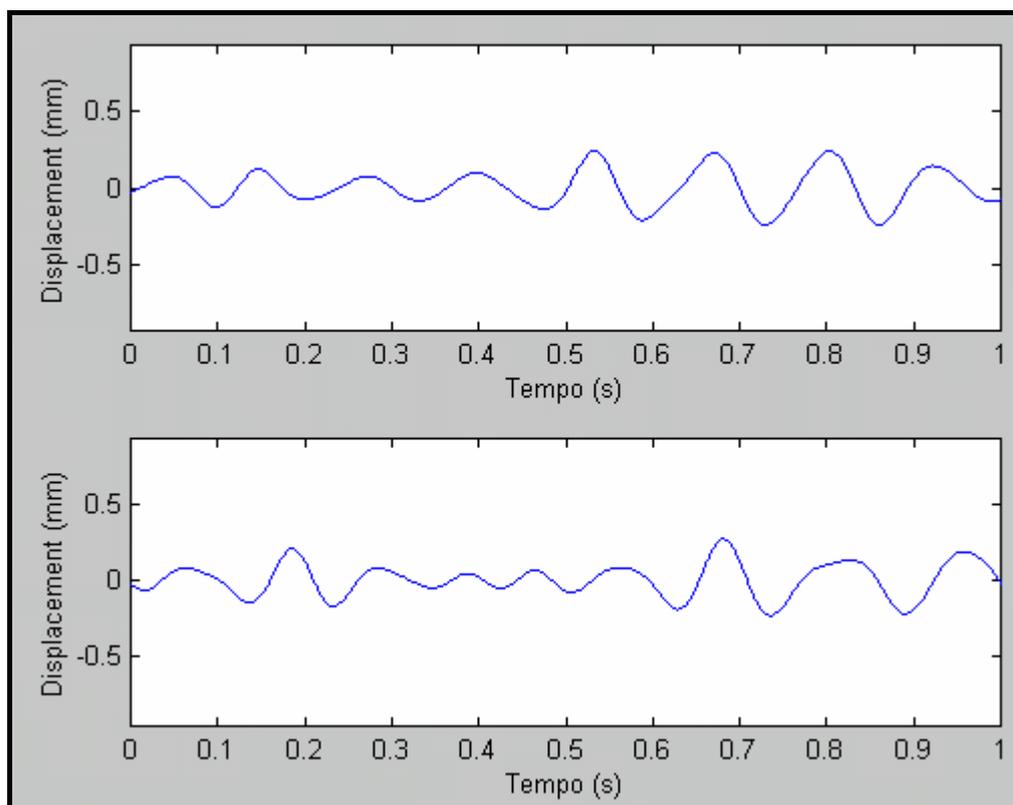


Figura 4.25: Deslocamento no topo nas direções longitudinal e transversal ao vento em função do tempo.

4.4. ENSAIOS ESTÁTICOS

Os acelerômetros utilizados na instrumentação do modelo apenas fornecem os valores das respostas flutuantes devido à ação do vento. Para a resposta transversal esta informação é suficiente pois o modelo oscila em torno da posição inicial de equilíbrio estático com valor médio nulo. Porém, para a direção longitudinal já foi visto que o modelo oscila em torno de uma posição já deformada devido à força média estática do vento. Assim, para se obter esse valor experimental de considerável importância, foi utilizada uma balança estática para a medição de momentos fletores. Dessa forma, dividindo-se esse momento fletor pela rigidez rotacional conhecida, encontra-se o valor do deslocamento médio no topo.

4.4.1. Balança de Momentos Fletores

Para a determinação do momento fletor sobre o modelo foi utilizada uma balança de momento unidirecional horizontal, instalada na base do modelo e alinhada com o eixo do túnel. A balança é constituída de um corpo relativamente rígido ao qual se fixa uma lâmina de aço inoxidável. A lâmina por sua vez é fixada pelo seu centro ao piso das instalações do Túnel de Vento, enquanto o corpo rígido é fixado à base do modelo, girando em torno de um eixo horizontal transversal ao escoamento na proporção do momento fletor atuante. A figura 4.26 apresenta uma perspectiva da balança de momentos fletores.



Figura 4.26: Perspectiva da Balança de Momentos Fletores

A flexão da lâmina produz uma deformação, que por sua vez também é proporcional ao momento fletor. Esta deformação é medida por meio de extensômetros de resistência elétrica (strain gages) instalados em ponte de Wheatstone completa e auto-compensável. A ponte de extensômetros marca Kyowa é condicionada por um equipamento BAM (Vishay Electronics) com amplificação da saída de aproximadamente 250 vezes. Esse sinal ainda passa por um

Leandro Fleck Fadel Miguel (leandrofm@myway.com.br) Dissertação de Mestrado - Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2003

amplificador, onde é ampliado em mais cinco vezes. O sinal amplificado é monitorado por um osciloscópio digital TekTronix, modelo TDS210, de dois canais, e registrado por meio de um sistema de aquisição de dados. Este sistema de aquisição é composto por uma placa de conversão A/D de 12 bits e 16 canais, da Computerboards, modelo DAS12/330, e um notebook Toshiba. A placa de conversão é controlada pelo software HPVEE, versão 3.2, da Hewlett-Packard. A figura 4.27 mostra a balança em vista lateral, com detalhes para a lâmina e os extensômetros. A figura 4.30 apresenta os equipamentos utilizados na aquisição do sinal.



Figura 4.27: Vista lateral da Balança de Momentos Fletores

Após sua instalação na câmara de ensaios do Túnel de Vento, a balança de momentos fletores foi estaticamente calibrada por meio de forças conhecidas, mostrada na figura 4.28. Essas forças conhecidas geram momentos fletores conhecidos na lâmina da balança. Desta forma, foi traçada uma reta de calibração relacionando diretamente momento fletor aplicado e a tensão registrada no sistema de aquisição de dados, apresentada na figura 4.29.



Figura 4.28: Calibração da Balança

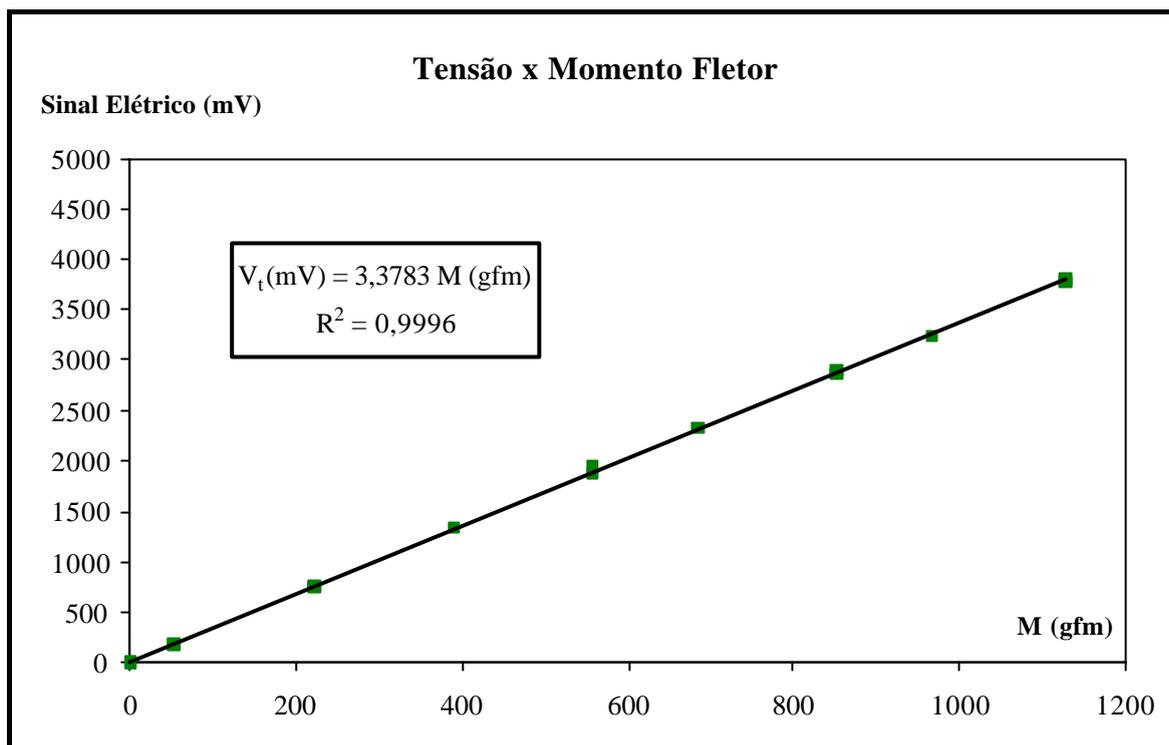


Figura 4.29: Função de Calibração.



Figura 4.30: Equipamento utilizado para aquisição de sinal.

4.4.2. Procedimentos nos Ensaio em Túnel de Vento

Para cada Δpa de ensaio dinâmico foi feito um ensaio estático para determinação do momento fletor. Porém, como a pressão atmosférica e a temperatura nos momentos dos ensaios não foram as mesmas, a velocidade sofre uma pequena alteração. Isso é corrigido através da determinação de um coeficiente de momento fletor adimensionalizado, mostrado na equação 4.21. Esse coeficiente é calculado de acordo com as condições de temperatura e pressão do ensaio estático e aplicado para a velocidade do ensaio dinâmico.

$$C_m = \frac{M}{q A H} \quad (\text{equação 4.21})$$

Onde:	M_m	momento fletor médio na base do modelo [Nm];
	A	área frontal [m ²];
	H	dimensão de referência [m];
	$q = \frac{1}{2} \rho V^2$	pressão dinâmica correspondente à velocidade média de referência do ensaio estático [N/m ²];
	ρ	massa específica do ar [kg/m ³];
	V	velocidade do vento nas condições do ensaio estático [m/s].

Devido ao fato do momento medido ser na lâmina da balança, e o momento de interesse ser na cota zero do modelo, é feita uma pequena correção, sendo assim encontrado o momento procurado. A figura 4.31 ilustra a correção.

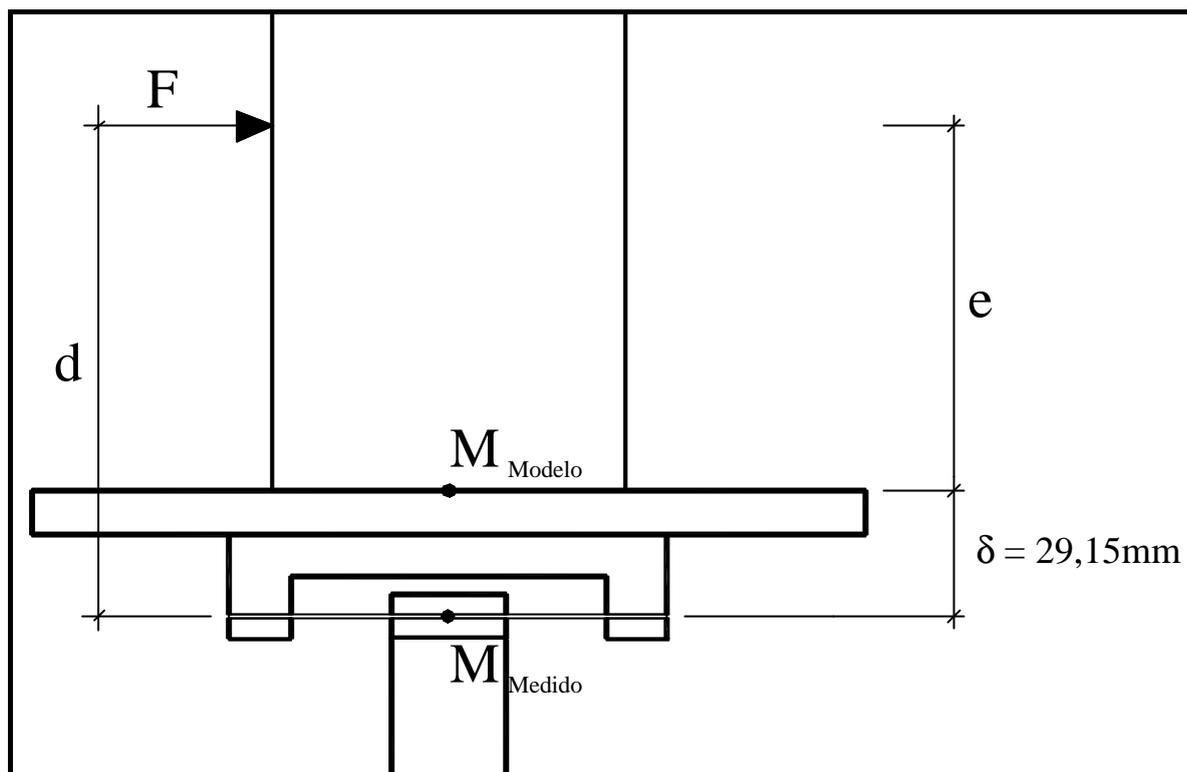


Figura 4.31: Correção do momento fletor.

Aplicando F à uma distância d , o momento na base do modelo fica:

$$M_m = \frac{M_B \cdot (d - \mathbf{d})}{d} \quad (\text{equação 4.22})$$

Onde: M_m momento fletor médio na base do modelo [Nm];

M_B momento fletor medido na balança [Nm];

d ponto de aplicação da força [m];

\mathbf{d} Distância entre a lâmina da balança e a cota zero do modelo [m].

As figuras 4.32 e 4.33 mostram a balança posicionada na mesa do túnel de vento.

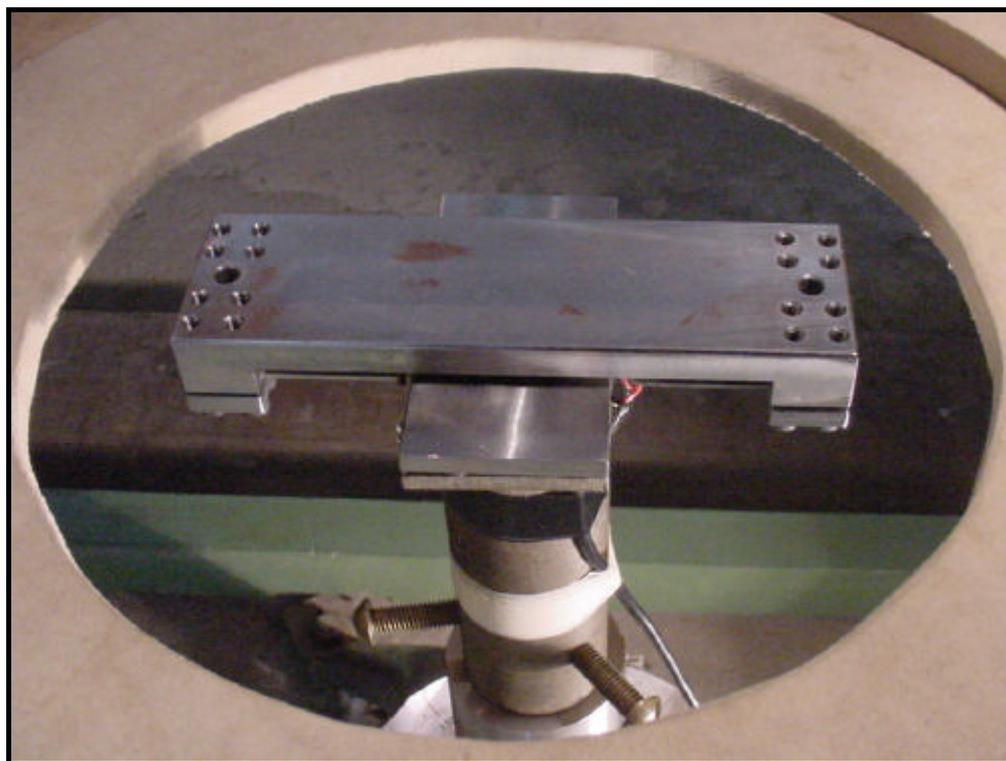


Figura 4.32: Balança posicionada no túnel de vento.



Figura 4.33: Modelo sobre a balança pronto para ensaio.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. RESPOSTA NA DIREÇÃO LONGITUDINAL AO VENTO

A seguir são apresentados os resultados obtidos pelas formulações da NBR - 6123 e NBCC - 1985, e pelos ensaios em túnel de vento. Para isso utiliza-se os conceitos de velocidade reduzida e deslocamento normalizado apresentados nas equações 5.1 e 5.2.

$$V_r = \frac{V}{f_n \cdot b} \quad (\text{equação 5.1})$$

Onde:

- V_r velocidade reduzida;
- V Velocidade [m/s];
- f_n frequência fundamental [0,2 Hz ou 6,937 Hz];
- b maior dimensão da seção transversal [45m ou 0,1125m].

$$d_{normalizada} = \frac{\bar{L}}{D_L} \quad (\text{equação 5.2})$$

Onde:

- $d_{normalizada}$ deslocamento normalizado;
- \bar{L} deflexão na direção x ou y;

D_L dimensão no sentido da deflexão (45m ou 0,1125m)

É conveniente salientar que a velocidade reduzida e o deslocamento normalizado são os mesmos tanto para o modelo como para o protótipo.

5.1.1. Vento Incidindo na Face de Maior Área

5.1.1.1. NBR - 6123

O processo da norma brasileira foi calculado para cada perfil de velocidade medido em túnel de vento. Para cada perfil obtém-se um valor de deslocamento no topo, sendo comparado com os demais resultados. A velocidade de entrada desse método é a velocidade de projeto a 10 m do solo. Porém, como os valores de velocidades medidos em túnel estão espaçados por 50 mm, correspondendo em escala a 20 m, encontra-se pela equação 5.3 a velocidade a 10 m:

$$V(10) = \frac{V(z)}{\left(\frac{z}{10}\right)^{0,19}} \quad (\text{equação 5.3})$$

Onde: $V(10)$ velocidade a 10 m do solo de referência para o cálculo;

$V(z)$ velocidade conhecida para o perfil;

z cota da velocidade de referência;

$0,19$ expoente da curva de potência.

As planilhas de cálculo para alguns perfis de velocidade de ensaio encontram-se nos anexos. A tabela 5.1 mostra para cada valor de velocidade no topo do edifício um valor de deslocamento, correspondente à soma do deslocamento médio mais flutuante. A divisão do momento fletor obtido no método pela rigidez rotacional conhecida fornece o ângulo de giro, que multiplicado pela altura do modelo ou do protótipo resulta no deslocamento no topo.

Tabela 5.1: Resposta longitudinal para vento incidindo na face de maior área pela NBR - 6123

$V_{\text{Topo do Protótipo}}(\text{m/s})$	$V_{\text{Topo do Modelo}}(\text{m/s})$	$V_{\text{Reduzida no Topo}}$	$d_{\text{Topo do Protótipo}}(\text{m})$	$d_{\text{Topo do Modelo}}(\text{m})$	$d_{\text{Normalizado}}$
21,81	1,89	2,423	0,113	0,000282	0,003757
28,32	2,46	3,147	0,197	0,000493	0,006573
32,18	2,79	3,576	0,255	0,000636	0,008486
40,00	3,47	4,445	0,400	0,001001	0,013347
45,20	3,92	5,022	0,511	0,001278	0,017042
50,12	4,35	5,569	0,640	0,001599	0,021322
54,57	4,73	6,064	0,758	0,001896	0,025280
59,00	5,12	6,555	0,902	0,002254	0,030057
61,85	5,36	6,872	0,991	0,002477	0,033030
65,58	5,69	7,287	1,133	0,002833	0,037770
73,11	6,34	8,124	1,408	0,003521	0,046944
79,25	6,87	8,806	1,655	0,004137	0,055156

5.1.1.2. NBCC - 1985

Igualmente o procedimento da norma canadense, NBCC - 1985, foi calculado para todas os perfis de velocidades de ensaio em túnel de vento. Assim, como para o método da NBR - 6123, discretizou-se a estrutura a cada 5 m. Como foi explicado, as velocidades foram medidas a cada 50 mm (em escala 20 m) durante o ensaio. Assim, para as cotas intermediárias, utilizou-se o expoente 0,19 para a determinação da velocidade.

Esse método utiliza-se de um fator de pico, C_g , para a amplificação da resposta estática. Da mesma forma que para a NBR - 6123, as planilhas de cálculo para alguns perfis de velocidade de ensaio encontram-se nos anexos.

A tabela 5.2 mostra para cada valor de velocidade no topo do edifício um valor de deslocamento, correspondente à soma do deslocamento médio mais flutuante. Da mesma forma, esse deslocamento é o produto do ângulo de giro, obtido com a divisão do momento

fletor calculado no método pela rigidez rotacional conhecida, pela altura do modelo ou do protótipo.

Tabela 5.2: Resposta longitudinal para vento incidindo na face de maior área pelo NBCC - 1985

$V_{\text{Topo do Protótipo}}(\text{m/s})$	$V_{\text{Topo do Modelo}}(\text{m/s})$	$V_{\text{Reduzida no Topo}}$	$d_{\text{Topo do Protótipo}}(\text{m})$	$d_{\text{Topo do Modelo}}(\text{m})$	$d_{\text{Normalizado}}$
21,81	1,89	2,423	0,121	0,000301561	0,00402082
28,32	2,46	3,147	0,218	0,000545256	0,00727007
32,18	2,79	3,576	0,303	0,000758359	0,01011145
40,00	3,47	4,445	0,505	0,00126208	0,01682773
45,20	3,92	5,022	0,689	0,001723366	0,02297821
50,12	4,35	5,569	0,894	0,002234643	0,02979524
54,57	4,73	6,064	1,113	0,002781446	0,03708595
59,00	5,12	6,555	1,346	0,003365304	0,04487073
61,85	5,36	6,872	1,525	0,003812537	0,05083382
65,58	5,69	7,287	1,771	0,004427772	0,05903696
73,11	6,34	8,124	2,318	0,005794055	0,07725407
79,25	6,87	8,806	2,836	0,007089736	0,09452982

5.1.1.3. Resultados do Túnel de Vento

Os valores experimentais são fornecidos pela balança de momentos fletores e pelo modelo aeroelástico equivalente construído. A balança apresenta o deslocamento médio devido à força média estática do vento, encontrado através do produto da altura do modelo pela razão do momento fletor medido sobre a rigidez rotacional conhecida. O modelo aeroelástico equivalente fornece o deslocamento flutuante, adquirido no programa desenvolvido em MatLab.

5.1.1.3.1. Resposta Média

A resposta média experimental é obtida pela balança de momentos fletores. A tabela 5.3 mostra os deslocamentos no topo em função da velocidade.

Tabela 5.3: Resposta média experimental para vento incidindo na face de maior área

$V_{\text{Topo do Protótipo}} \text{ (m/s)}$	$V_{\text{Topo do Modelo}} \text{ (m/s)}$	$V_{\text{Reduzida no Topo}}$	$d_{\text{Média Topo do Modelo}} \text{ (m)}$	$d_{\text{Média no Topo do Protótipo}} \text{ (m)}$	$d_{\text{Normalizado}}$
21,81	1,89	2,423	0,000187489	0,074995	0,002500
28,32	2,46	3,147	0,000352480	0,140992	0,004700
32,18	2,79	3,576	0,000394079	0,157631	0,005254
41,63	3,47	4,445	0,000622519	0,249008	0,008300
45,20	3,92	5,022	0,000817036	0,326814	0,010894
50,12	4,35	5,569	0,001053497	0,421399	0,014047
54,57	4,73	6,064	0,001257240	0,502896	0,016763
59,00	5,12	6,555	0,001299893	0,519957	0,017332
61,85	5,36	6,872	0,001648284	0,659314	0,021977
65,58	5,69	7,287	0,001751126	0,700451	0,023348
73,11	6,34	8,124	0,002322874	0,929150	0,030972
79,25	6,87	8,806	0,002715152	1,086061	0,036202

5.1.1.3.2. Resposta Flutuante - RMS

A resposta flutuante é adquirida através de um programa desenvolvido em MatLab. Esse programa processa os dados dos acelerômetros passando de aceleração para deslocamento, e através de uma lei de semelhança, passando o deslocamento da base para o topo. A seguir é apresentada a tabela 5.4 que fornece diretamente os valores de velocidade por deslocamento RMS no topo. A tabela 5.5 mostra a relação entre a resposta RMS e a resposta média.

Tabela 5.4: Resposta longitudinal experimental RMS para vento incidindo na face de maior área

$V_{\text{Topo do Protótipo}} \text{ (m/s)}$	$V_{\text{Topo do Modelo}} \text{ (m/s)}$	$V_{\text{Reduzida no Topo}}$	$d_{\text{RMS no Topo do Modelo}} \text{ (m)}$	$d_{\text{RMS no Topo do Protótipo}} \text{ (m)}$	$d_{\text{Normalizado}}$
21,81	1,89	2,423	0,0000860	0,03440	0,00115
28,32	2,46	3,147	0,0000917	0,03668	0,00122
32,18	2,79	3,576	0,0001043	0,04172	0,00139
41,63	3,47	4,445	0,0001439	0,05756	0,00192
45,20	3,92	5,022	0,0001843	0,07372	0,00246
50,12	4,35	5,569	0,0002870	0,11480	0,00383
54,57	4,73	6,064	0,0003697	0,14788	0,00493
59,00	5,12	6,555	0,0003715	0,14860	0,00495
61,85	5,36	6,872	0,0003947	0,15788	0,00526
65,58	5,69	7,287	0,0004909	0,19636	0,00655
73,11	6,34	8,124	0,0006107	0,24428	0,00814
79,25	6,87	8,806	0,0006919	0,27676	0,00923

Tabela 5.5: Resposta experimental média x RMS para vento incidindo na face de maior área

$V_{\text{Topo do Modelo}} \text{ (m/s)}$	$d_{\text{Média Topo do Modelo}} \text{ (m)}$	$d_{\text{RMS noTopo do Modelo}} \text{ (m)}$	$d_{\text{RMS}}/d_{\text{Média}}$
1,89	0,000187	0,0000860	0,459
2,46	0,000352	0,0000917	0,260
2,79	0,000394	0,0001043	0,265
3,47	0,000623	0,0001439	0,231
3,92	0,000817	0,0001843	0,226
4,35	0,001053	0,0002870	0,272
4,73	0,001257	0,0003697	0,294
5,12	0,001300	0,0003715	0,286
5,36	0,001648	0,0003947	0,239
5,69	0,001751	0,0004909	0,280
6,34	0,002323	0,0006107	0,263
6,87	0,002715	0,0006919	0,255

A tabela 5.5 mostra a importância do valor RMS na resposta total. Esse valor representa em torno de 20% a 30% do valor da resposta média, comprovando que uma análise dinâmica para o edifício em estudo é fundamental.

A relação entre o deslocamento máximo e deslocamento RMS, aqui definido como fator de pico, apresenta uma média de 3,35, como mostra a tabela 5.6. O valor do deslocamento médio é somado ao produto desse fator pelo valor do deslocamento RMS para a comparação dos resultados com os apresentados pelas formulações dos modelos matemáticos.

Tabela 5.6: Resposta longitudinal experimental máxima x RMS para vento incidindo na face de maior área

$V_{\text{Topo do Protótipo}} \text{ (m/s)}$	$V_{\text{Topo do Modelo}} \text{ (m/s)}$	$V_{\text{Reduzida no Topo}}$	$d_{\text{RMS noTopo do Modelo}} \text{ (mm)}$	$d_{\text{Máximo noTopo do Modelo}} \text{ (mm)}$	Fator de Pico
21,81	1,89	2,423	0,0860	0,3659	4,25
28,32	2,46	3,147	0,0917	0,3131	3,41
32,18	2,79	3,576	0,1043	0,3797	3,64
41,63	3,47	4,445	0,1439	0,4641	3,23
45,20	3,92	5,022	0,1843	0,6683	3,63
50,12	4,35	5,569	0,2870	0,9582	3,34
54,57	4,73	6,064	0,3697	1,0760	2,91
59,00	5,12	6,555	0,3715	1,3920	3,75
61,85	5,36	6,872	0,3947	1,5729	3,99
65,58	5,69	7,287	0,4909	1,6775	3,42
73,11	6,34	8,124	0,6107	2,4463	4,01

79,25	6,87	8,806	0,6919	3,2901	4,76
82,49	7,15	9,165	1,2929	4,0174	3,11
88,34	7,66	9,816	14,3109	24,1546	1,69
95,49	8,28	10,610	14,7773	27,0015	1,83
115,01	9,97	12,778	4,6553	15,1893	3,26
129,46	11,23	14,384	4,7891	14,7566	3,08
147,18	12,76	16,354	5,0011	14,9345	2,99
				Média	3,35

5.1.1.4. Comparação dos resultados

Os resultados obtidos pelos modelos matemáticos da normas brasileira e canadense são comparados com as respostas experimentais. A tabela 5.7 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos.

Tabela 5.7: Comparação entre os resultados obtidos para a resposta longitudinal para vento incidindo na face de maior área

$V_{\text{Reduzida no Topo}}$	NBR6123	NBCC1985	Túnel (Média+g.RMS)	NBR6123/Túnel	NBCC1985/Túnel
	$d_{\text{Normalizado}}$	$d_{\text{Normalizado}}$	$d_{\text{Normalizado}}$		
2,423	0,003757	0,004021	0,006341	0,593	0,634
3,147	0,006573	0,007270	0,008796	0,747	0,827
3,576	0,008486	0,010111	0,009913	0,856	1,020
4,445	0,013347	0,016828	0,014728	0,906	1,143
5,022	0,017042	0,022978	0,019126	0,891	1,201
5,569	0,021322	0,029795	0,026866	0,794	1,109
6,064	0,025280	0,037086	0,033276	0,760	1,114
6,555	0,030057	0,044871	0,033926	0,886	1,323
6,872	0,033030	0,050834	0,039607	0,834	1,283
7,287	0,037770	0,059037	0,045275	0,834	1,304
8,124	0,046944	0,077254	0,058250	0,806	1,326
8,806	0,055156	0,094530	0,067107	0,822	1,409

A figura 5.1 apresenta a comparação dos resultados. Os valores obtidos pelos ensaios em túnel de vento apresentam valores intermediários entre as formulações da norma canadense e da norma brasileira. Os resultados obtidos pela NBR - 6123 são inferiores aos encontrados experimentalmente e os valores da NBCC - 1985 são ligeiramente superiores, aumentando para velocidades mais altas.

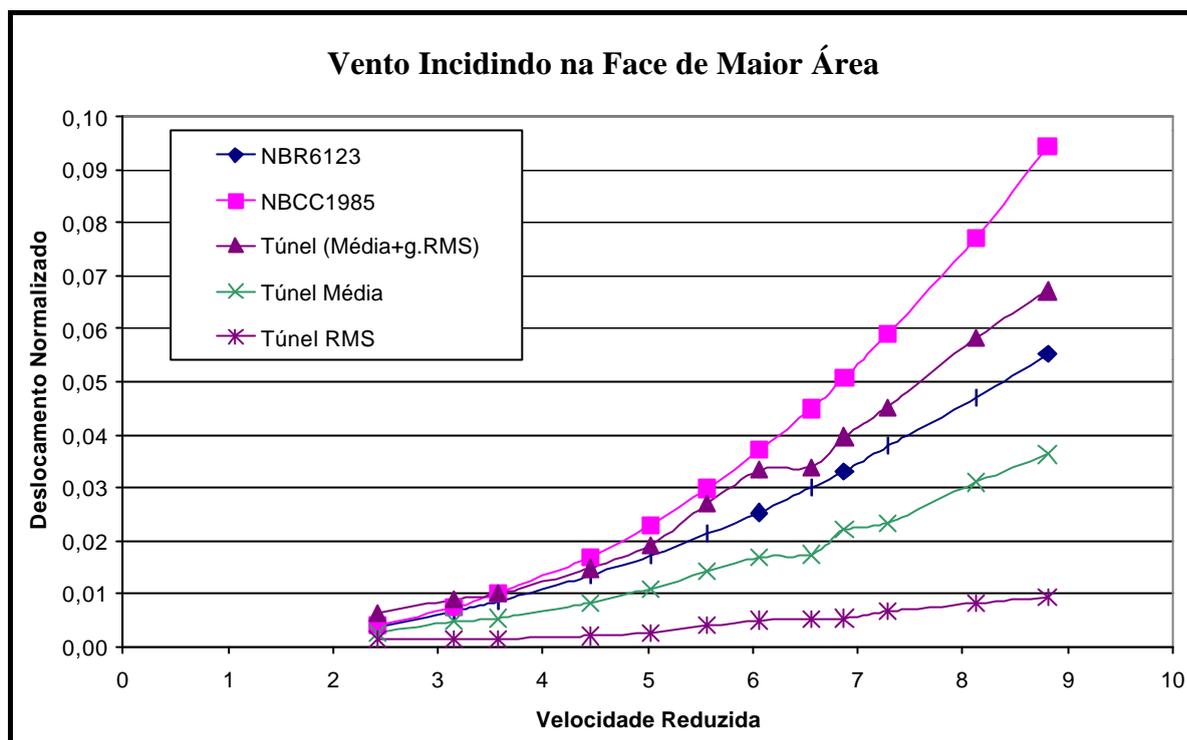


Figura 5.1: Comparação entre os resultados obtidos para a resposta longitudinal para vento incidindo na face de maior área

5.1.2. Vento Incidindo na Face de Menor Área

5.1.2.1. NBR - 6123

Os procedimentos realizados foram iguais aos da situação anterior. A tabela 5.8 mostra para cada valor de velocidade no topo do edifício um valor de deslocamento.

Tabela 5.8: Resposta longitudinal para vento incidindo na face de menor área pela NBR - 6123

$V_{\text{Topo do Protótipo}}(\text{m/s})$	$V_{\text{Topo do Modelo}}(\text{m/s})$	$V_{\text{Reduzida no Topo}}$	$d_{\text{Topo do Protótipo}}(\text{m})$	$d_{\text{Topo do Modelo}}(\text{m})$	$d_{\text{Normalizado}}$
21,83	1,89	2,425	0,067	0,000168	0,001494
28,36	2,46	3,151	0,115	0,000288	0,002559
32,22	2,79	3,580	0,149	0,000373	0,003315

39,96	3,47	4,440	0,238	0,000595	0,005286
45,02	3,90	5,003	0,307	0,000768	0,006828
49,91	4,33	5,545	0,384	0,000960	0,008535
54,41	4,72	6,045	0,456	0,001141	0,010143
58,88	5,11	6,542	0,544	0,001359	0,012081
61,86	5,36	6,873	0,602	0,001505	0,013379
65,66	5,69	7,296	0,678	0,001696	0,015074
73,15	6,34	8,128	0,842	0,002105	0,018710
79,14	6,86	8,793	0,985	0,002463	0,021896
82,06	7,12	9,118	1,059	0,002649	0,023544
88,16	7,64	9,795	1,223	0,003057	0,027173
95,30	8,26	10,588	1,429	0,003572	0,031751
114,68	9,94	12,742	2,069	0,005173	0,045979

5.1.2.2. NBCC - 1985

Os procedimentos realizados foram iguais aos da situação anterior. A tabela 5.9 mostra para cada valor de velocidade no topo do edifício um valor de deslocamento.

Tabela 5.9: Resposta longitudinal para vento incidindo na face de menor área pelo NBCC - 1985

$V_{\text{Topo do Protótipo}}(\text{m/s})$	$V_{\text{Topo do Modelo}}(\text{m/s})$	$V_{\text{Reduzida no Topo}}$	$d_{\text{Topo do Protótipo}}(\text{m})$	$d_{\text{Topo do Modelo}}(\text{m})$	$d_{\text{Normalizado}}$
21,83	1,89	2,425	0,073	0,000182123	0,00161887
28,36	2,46	3,151	0,131	0,000328644	0,00292128
32,22	2,79	3,580	0,183	0,000456344	0,00405639
39,96	3,47	4,440	0,302	0,00075414	0,00670347
45,02	3,90	5,003	0,409	0,001021406	0,00907917
49,91	4,33	5,545	0,529	0,001323347	0,01176308
54,41	4,72	6,045	0,660	0,001649893	0,01466571
58,88	5,11	6,542	0,800	0,002000629	0,01778337
61,86	5,36	6,873	0,911	0,002278506	0,02025339
65,66	5,69	7,296	1,061	0,002652107	0,02357428
73,15	6,34	8,128	1,385	0,003463208	0,03078407
79,14	6,86	8,793	1,686	0,004215819	0,03747394
82,06	7,12	9,118	1,847	0,004617225	0,04104200
88,16	7,64	9,795	2,217	0,00554156	0,04925831
95,30	8,26	10,588	2,696	0,006741224	0,05992199
114,68	9,94	12,742	4,195	0,010487553	0,09322269

5.1.2.3. Resultados do Túnel de Vento

Da mesma forma, os resultados do túnel de vento são dados através da balança de momentos fletores e do modelo aeroelástico equivalente.

5.1.2.3.1. Resposta Média

A resposta média foi obtida pela balança de momentos fletores. Abaixo é mostrada a tabela 5.10 onde são apresentados os deslocamentos no topo em função da velocidade.

Tabela 5.10: Resposta longitudinal experimental média para vento incidindo na face de menor área

$V_{\text{Topo do Protótipo}} \text{ (m/s)}$	$V_{\text{Topo do Modelo}} \text{ (m/s)}$	$V_{\text{Reduzida no Topo}}$	$d_{\text{Média Topo do Modelo}} \text{ (m)}$	$d_{\text{Média no Topo do Protótipo}} \text{ (m)}$	$d_{\text{Normalizado}}$
21,83	1,89	2,425	0,0001372735	0,054909	0,001220
28,36	2,46	3,151	0,0001729337	0,069173	0,001537
32,22	2,79	3,580	0,0001902467	0,076099	0,001691
39,96	3,47	4,440	0,0003352729	0,134109	0,002980
45,02	3,90	5,003	0,0004938571	0,197543	0,004390
49,91	4,33	5,545	0,0005530727	0,221229	0,004916
54,41	4,72	6,045	0,0006729642	0,269186	0,005982
58,88	5,11	6,542	0,0007389247	0,295570	0,006568
61,86	5,36	6,873	0,0008815607	0,352624	0,007836
65,66	5,69	7,296	0,0011114981	0,444599	0,009880
73,15	6,34	8,128	0,0013226464	0,529059	0,011757
79,14	6,86	8,793	0,0015353016	0,614121	0,013647
82,06	7,12	9,118	0,0016816089	0,672644	0,014948
88,16	7,64	9,795	0,0019021601	0,760864	0,016908
95,30	8,26	10,588	0,0022827315	0,913093	0,020291
114,68	9,94	12,742	0,0031224318	1,248973	0,027755

5.1.2.3.2. Resposta Flutuante - RMS

Os procedimentos realizados foram iguais aos da situação anterior. A tabela 5.11 mostra para cada valor de velocidade no topo do edifício um valor de deslocamento. A tabela 5.12 mostra a relação entre a resposta RMS e a resposta média.

Tabela 5.11: Resposta longitudinal experimental RMS para vento incidindo na face de menor área

$V_{\text{Topo do Protótipo}}(\text{m/s})$	$V_{\text{Topo do Modelo}}(\text{m/s})$	$V_{\text{Reduzida no Topo}}$	$d_{\text{RMS noTopo do Modelo}}(\text{m})$	$d_{\text{RMS noTopo do Protótipo}}(\text{m})$	$d_{\text{Normalizado}}$
21,83	1,89	2,425	0,0000811	0,03244	0,0007209
28,36	2,46	3,151	0,0000959	0,03836	0,0008524
32,22	2,79	3,580	0,0001175	0,04700	0,0010444
39,96	3,47	4,440	0,0001079	0,04316	0,0009591
45,02	3,90	5,003	0,0001462	0,05848	0,0012996
49,91	4,33	5,545	0,0001905	0,07620	0,0016933
54,41	4,72	6,045	0,0002119	0,08476	0,0018836
58,88	5,11	6,542	0,0002459	0,09836	0,0021858
61,86	5,36	6,873	0,0002801	0,11204	0,0024898
65,66	5,69	7,296	0,0003346	0,13384	0,0029742
73,15	6,34	8,128	0,0004489	0,17956	0,0039902
79,14	6,86	8,793	0,0005428	0,21712	0,0048249
82,06	7,12	9,118	0,0005476	0,21904	0,0048676
88,16	7,64	9,795	0,0006382	0,25528	0,0056729
95,30	8,26	10,588	0,0007746	0,30984	0,0068853
114,68	9,94	12,742	0,0012267	0,49068	0,0109040

Tabela 5.12: Resposta experimental média x RMS para vento incidindo na face de menor área

$V_{\text{Topo do Modelo}}(\text{m/s})$	$d_{\text{Média Topo do Modelo}}(\text{m})$	$d_{\text{RMS noTopo do Modelo}}(\text{m})$	$d_{\text{RMS}}/d_{\text{Média}}$
1,89	0,000137	0,0000811	0,591
2,46	0,000173	0,0000959	0,555
2,79	0,000190	0,0001175	0,618
3,47	0,000335	0,0001079	0,322
3,90	0,000494	0,0001462	0,296
4,33	0,000553	0,0001905	0,344
4,72	0,000673	0,0002119	0,315
5,11	0,000739	0,0002459	0,333
5,36	0,000882	0,0002801	0,318
5,69	0,001111	0,0003346	0,301
6,34	0,001323	0,0004489	0,339
6,86	0,001535	0,0005428	0,354
7,12	0,001682	0,0005476	0,326
7,64	0,001902	0,0006382	0,336
8,26	0,002283	0,0007746	0,339
9,94	0,003122	0,0012267	0,393

Como mostra a tabela 5.13, o fator de pico, nesse caso 3,57, é multiplicado ao deslocamento RMS e esse produto é adicionado ao deslocamento médio para a comparação dos resultados.

Tabela 5.13: Resposta longitudinal experimental Máxima x RMS para vento incidindo na face de menor área

$V_{\text{Topo do Protótipo}}(\text{m/s})$	$V_{\text{Topo do Modelo}}(\text{m/s})$	$V_{\text{Reduzida no Topo}}$	$d_{\text{RMS no Topo do Modelo}}(\text{mm})$	$d_{\text{Máximo no Topo do Modelo}}(\text{mm})$	Fator de Pico
21,83	1,89	2,425	0,0811	0,2949	3,64
28,36	2,46	3,151	0,0959	0,3427	3,57
32,22	2,79	3,580	0,1175	0,3957	3,37
39,96	3,47	4,440	0,1079	0,4482	4,15
45,02	3,90	5,003	0,1462	0,4993	3,42
49,91	4,33	5,545	0,1905	0,6421	3,37
54,41	4,72	6,045	0,2119	0,8136	3,84
58,88	5,11	6,542	0,2459	0,8024	3,26
61,86	5,36	6,873	0,2801	0,9059	3,23
65,66	5,69	7,296	0,3346	1,1970	3,58
73,15	6,34	8,128	0,4489	1,7225	3,84
79,14	6,86	8,793	0,5428	2,1968	4,05
82,06	7,12	9,118	0,5476	1,7381	3,17
88,16	7,64	9,795	0,6382	2,2114	3,47
95,30	8,26	10,588	0,7746	2,5264	3,26
114,68	9,94	12,742	1,2267	4,6743	3,81
129,11	11,20	14,346	1,5844	5,8299	3,68
				Média	3,57

5.1.2.4. Comparação dos resultados

Para a comparação entre os resultados dos diferentes métodos obtidos, é apresentada a tabela 5.14:

Tabela 5.14: Comparação entre os resultados obtidos para a resposta longitudinal para vento incidindo na face de menor área

$V_{\text{Reduzida no Topo}}$	NBR6123	NBCC1985	Túnel (Média+g.RMS)	NBR6123/Túnel	NBCC1985/Túnel
	$d_{\text{Normalizado}}$	$d_{\text{Normalizado}}$	$d_{\text{Normalizado}}$		
2,425	0,001494	0,001619	0,003794	0,394	0,427
3,151	0,002559	0,002921	0,004580	0,559	0,638
3,580	0,003315	0,004056	0,005420	0,612	0,748
4,440	0,005286	0,006703	0,006404	0,825	1,047
5,003	0,006828	0,009079	0,009029	0,756	1,006
5,545	0,008535	0,011763	0,010961	0,779	1,073
6,045	0,010143	0,014666	0,012706	0,798	1,154
6,542	0,012081	0,017783	0,014371	0,841	1,237
6,873	0,013379	0,020253	0,016725	0,800	1,211

7,296	0,015074	0,023574	0,020498	0,735	1,150
8,128	0,018710	0,030784	0,026002	0,720	1,184
8,793	0,021896	0,037474	0,030872	0,709	1,214
9,118	0,023544	0,041042	0,032325	0,728	1,270
9,795	0,027173	0,049258	0,037160	0,731	1,326
10,588	0,031751	0,059922	0,044872	0,708	1,335
12,742	0,045979	0,093223	0,066682	0,690	1,398

A figura 5.2 mostra a comparação dos diferentes resultados para o vento incidindo na face de menor área. Os valores experimentais são superiores aos apresentados pela NBR - 6123. Já os resultados da norma canadense são inferiores aos do túnel de vento para velocidades iniciais e superiores para velocidades mais altas.

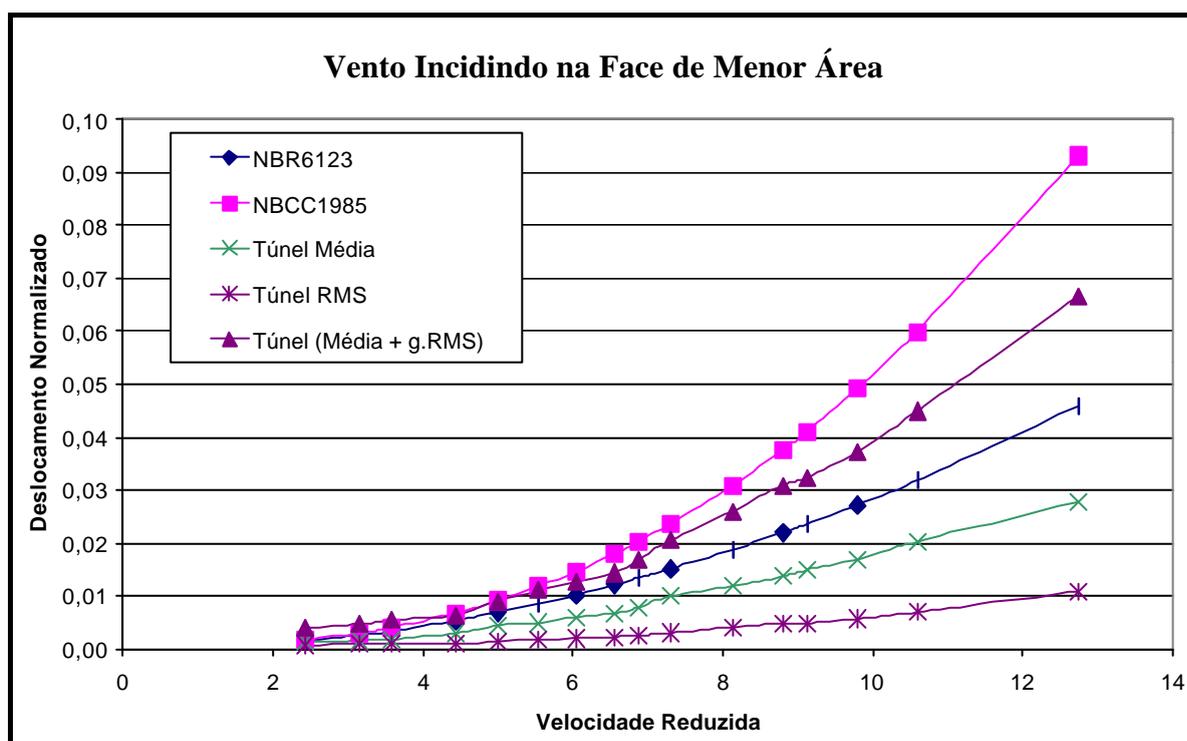


Figura 5.2: Comparação entre os resultados obtidos para a resposta longitudinal para vento incidindo na face de menor área

5.2. RESPOSTA NA DIREÇÃO TRANSVERSAL AO VENTO

A seguir são apresentados os resultados obtidos pelo método da norma canadense, NBCC - 1985, e pelos ensaios em túnel. Os valores experimentais são dados pelo modelo aeroelástico equivalente construído, visto que a resposta transversal apenas apresenta resposta flutuante.

5.2.1. Vento Incidindo na Face de Maior Área

5.2.1.1. Número de Strouhal

Esse número estabelece uma relação entre a frequência de desprendimento de um par de vórtices, uma dimensão característica, e a velocidade média do vento. Quando a frequência de desprendimento dos pares de vórtices é igual a frequência natural da estrutura tem-se a velocidade crítica. O número de Strouhal (figura 2.8) para esta situação é $S_t = 0,09$. Utilizando esse número na equação 2.8, encontra-se a velocidade crítica para o modelo. Assim, tem-se:

$$V_{cr} = \frac{6,937 \cdot 0,1125}{0,09} = 8,67 \text{ m/s}$$

Essa é a velocidade crítica de desprendimento de vórtices, que corresponde a uma velocidade reduzida $V_r = 11,11$.

5.2.1.2. NBCC - 1985

A metodologia da norma canadense para a resposta transversal apresenta uma equação empírica para a estimativa da força gerada pelo desprendimento cadenciado de vórtices. Essa equação deve ser aplicada para a velocidade crítica dada pelo número de Strouhal.

Então, substituindo os dados do edifício em estudo na equação 3.20, para a velocidade crítica de Strouhal calculada em 5.2.1.1, tem-se o valor de força por unidade de comprimento:

$$F_L = 3797059N/m$$

Aplicando essa força no topo do edifício o momento fletor na base fica:

$$M_f = 41008245961Nm$$

Conhecendo a rigidez rotacional, encontra-se o ângulo de giro:

$$q = 0,060223rad$$

Multiplicando o ângulo pela altura do modelo, encontra-se o deslocamento no topo:

$$d_{Topo\ do\ Modelo} = 0,02708m$$

O deslocamento normalizado é:

$$d_{Normaliza\phi} = 0,2407$$

5.2.1.3. Resultados do Túnel de Vento

As respostas experimentais são fornecidas pelo programa desenvolvido em MatLab. A tabela 5.15 apresenta os resultados RMS obtidos pelos ensaios em túnel de vento. A tabela 5.16 ilustra a comparação entre os valores máximos e RMS experimentais.

Tabela 5.15: Resposta transversal experimental RMS para vento incidindo na face de maior área

$V_{\text{Topo do Protótipo}}(\text{m/s})$	$V_{\text{Topo do Modelo}}(\text{m/s})$	$V_{\text{Reduzida no Topo}}$	$d_{\text{RMS no Topo do Modelo}}(\text{m})$	$d_{\text{RMS no Topo do Protótipo}}(\text{m})$	$d_{\text{Normalizado}}$
21,81	1,89	2,423	0,0000790	0,03160	0,000702
28,32	2,46	3,147	0,0000946	0,03784	0,000841
32,18	2,79	3,576	0,0001135	0,04540	0,001009
40,00	3,47	4,445	0,0001741	0,06964	0,001548
45,20	3,92	5,022	0,0002138	0,08552	0,001900
50,12	4,35	5,569	0,0003535	0,14140	0,003142
54,57	4,73	6,064	0,0005449	0,21796	0,004844
59,00	5,12	6,555	0,0005909	0,23636	0,005252
61,85	5,36	6,872	0,0006916	0,27664	0,006148
65,58	5,69	7,287	0,0009215	0,36860	0,008191
73,11	6,34	8,124	0,0014314	0,57256	0,012724
79,25	6,87	8,806	0,0031720	1,26880	0,028196
82,49	7,15	9,165	0,0100161	4,00644	0,089032
88,34	7,66	9,816	0,0269815	10,79260	0,239836
95,49	8,28	10,610	0,0287798	11,51192	0,255820
115,01	9,97	12,778	0,0081248	3,24992	0,072220
129,46	11,23	14,384	0,0075513	3,02052	0,067123
147,18	12,76	16,354	0,0070820	2,83280	0,062951

Tabela 5.16: Resposta transversal experimental máxima x RMS para vento incidindo na face de maior área

$V_{\text{Topo do Protótipo}}(\text{m/s})$	$V_{\text{Topo do Modelo}}(\text{m/s})$	$V_{\text{Reduzida no Topo}}$	$d_{\text{RMS no Topo do Modelo}}(\text{mm})$	$d_{\text{Máximo no Topo do Modelo}}(\text{mm})$	Fator de Pico
21,81	1,89	2,423	0,0790	0,2817	3,57
28,32	2,46	3,147	0,0946	0,3249	3,43
32,18	2,79	3,576	0,1135	0,4011	3,53
40,00	3,47	4,445	0,1741	0,6056	3,48
45,20	3,92	5,022	0,2138	0,8016	3,75
50,12	4,35	5,569	0,3535	1,1960	3,38
54,57	4,73	6,064	0,5449	1,6170	2,97
59,00	5,12	6,555	0,5909	1,7788	3,01
61,85	5,36	6,872	0,6916	2,2990	3,32
65,58	5,69	7,287	0,9215	2,8996	3,15

73,11	6,34	8,124	1,4314	4,2265	2,95
79,25	6,87	8,806	3,1720	8,7568	2,76
82,49	7,15	9,165	10,0161	20,7023	2,07
88,34	7,66	9,816	26,9815	44,9369	1,67
95,49	8,28	10,610	28,7798	47,2037	1,64
115,01	9,97	12,778	8,1248	30,1980	3,72
129,46	11,23	14,384	7,5513	22,8053	3,02
147,18	12,76	16,354	7,0820	18,0481	2,55
				Média	3,24

Em valores muito próximos a velocidade crítica de Strouhal, ocorre um pico bem definido de desprendimento de vórtices. Nesse ponto o fator de pico aproxima-se a um de pico de uma senóide, que vale $\sqrt{2}$. Assim, nesses pontos serão utilizados os próprios valores máximos. Para os demais pontos o valor de pico médio é 3,24. Esse valor é multiplicado pelo valor do deslocamento RMS e comparado ao resultado da norma canadense.

5.2.1.4. Comparação dos resultados

Para a comparação entre o resultado do método da norma canadense e os apresentados em túnel de vento, é apresentada a tabela 5.17:

Tabela 5.17: Comparação entre os resultados obtidos para a resposta transversal para vento incidindo na face de maior área

V _{Reduzida no} Topo	Túnel (g.RMS)
	d _{Normalizado}
2,423	0,002107
3,147	0,002523
3,576	0,003027
4,445	0,004643
5,022	0,005701
5,569	0,009427
6,064	0,014531
6,555	0,015757
6,872	0,018443
7,287	0,024573
8,124	0,038171
8,806	0,084587
9,165	0,267096

9,816	0,719507
10,610	0,767461
12,778	0,216661
14,384	0,201368
16,354	0,188853

A figura 5.3 mostra a comparação entre as respostas da metodologia da norma canadense e os valores experimentais. A resposta fornecida pela metodologia da norma canadense fornece o deslocamento estático equivalente gerado no topo pelo desprendimento de vórtices para a velocidade crítica. Esse valor é um terço inferior ao deslocamento máximo verificado experimentalmente. Nos ensaios em túnel fica claro o comportamento ilustrado pelo gráfico. O edifício apresenta movimentos transversais contínuos até uma velocidade crítica onde a amplitude dos movimentos é amplificada significativamente. É praticamente nesse ponto que foi encontrada a velocidade crítica pelo número de Strouhal. Após essa velocidade crítica os movimentos diminuem, retomando seu comportamento inicial.

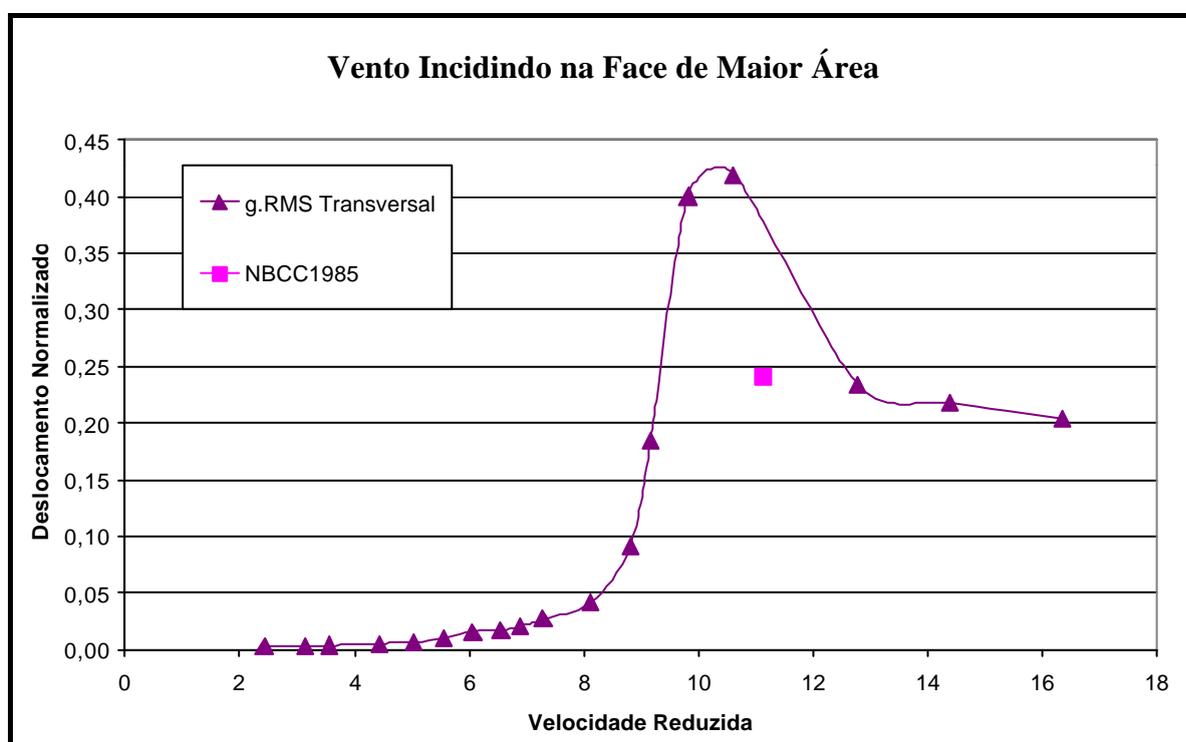


Figura 5.3: Comparação entre os resultados obtidos para a resposta transversal para vento incidindo na face de maior área

5.2.2. Vento Incidindo na Face de Menor Área

5.2.2.1. Número de Strouhal

O número de Strouhal (figura 2.8) para esta situação é $S_t = 0,14$. Utilizando esse número na equação 2.8, encontra-se a velocidade crítica para o modelo. Assim, tem-se:

$$V_{cr} = \frac{6,937 \cdot 0,075}{0,14} = 3,72 \text{ m/s}$$

Essa, é a velocidade crítica de desprendimento de vórtices, que corresponde a uma velocidade reduzida $V_r = 4,76$.

5.2.2.2. NBCC - 1985

Substituindo os dados do edifício em estudo na equação 3.20, para a velocidade crítica de Strouhal calculada em 5.2.2.1, tem-se o valor de força por unidade de comprimento:

$$F_L = 249463 \text{ N/m}$$

Aplicando essa força no topo do edifício o momento fletor na base fica:

$$M_f = 2694208467 \text{ Nm}$$

Conhecendo a rigidez rotacional, encontra-se o ângulo de giro:

$$q = 0,003956 \text{ rad}$$

Multiplicando o ângulo pela altura do modelo, encontra-se o deslocamento no topo:

$$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,00178 \text{ m}$$

O deslocamento normalizado é:

$$d_{\text{Normalizado}} = 0,0237$$

5.2.2.3. Resultados do Túnel de Vento

As respostas experimentais são fornecidas pelo programa desenvolvido em MatLab. A tabela 5.18 apresenta os resultados RMS obtidos pelos ensaios em túnel de vento. A tabela 5.19 ilustra a comparação entre os valores máximos e RMS experimentais.

Tabela 5.18: Resposta transversal experimental para vento incidindo na face de menor área

$V_{\text{Topo do Protótipo}} \text{ (m/s)}$	$V_{\text{Topo do Modelo}} \text{ (m/s)}$	$V_{\text{Reduzida no Topo}}$	$d_{\text{RMS no Topo do Modelo}} \text{ (m)}$	$d_{\text{RMS no Topo do Protótipo}} \text{ (m)}$	$d_{\text{Normalizado}}$
21,83	1,89	2,425	0,000091	0,036360	0,0012120
28,36	2,46	3,151	0,000099	0,039560	0,0013187
32,22	2,79	3,580	0,000127	0,050840	0,0016947
39,96	3,47	4,440	0,000193	0,077280	0,0025760
45,02	3,90	5,003	0,000246	0,098320	0,0032773
49,91	4,33	5,545	0,000360	0,143840	0,0047947
54,41	4,72	6,045	0,000418	0,167000	0,0055667
58,88	5,11	6,542	0,000662	0,264800	0,0088267

61,86	5,36	6,873	0,000954	0,381480	0,0127160
65,66	5,69	7,296	0,000997	0,398600	0,0132867
73,15	6,34	8,128	0,001596	0,638240	0,0212747
79,14	6,86	8,793	0,002120	0,848000	0,0282667
82,06	7,12	9,118	0,002445	0,977880	0,0325960
88,16	7,64	9,795	0,003428	1,371120	0,0457040
95,30	8,26	10,588	0,003791	1,516560	0,0505520
114,68	9,94	12,742	0,006231	2,492240	0,0830747
129,11	11,20	14,346	0,007724	3,089520	0,1029840

Tabela 5.19: Resposta transversal experimental máxima x RMS para vento incidindo na face de menor área

$V_{\text{Topo do Protótipo}} \text{ (m/s)}$	$V_{\text{Topo do Modelo}} \text{ (m/s)}$	$V_{\text{Reduzida no Topo}}$	$d_{\text{RMS no Topo do Modelo}} \text{ (mm)}$	$d_{\text{Máximo no Topo do Modelo}} \text{ (mm)}$	Fator de Pico
21,83	1,89	2,425	0,0909	0,3307	3,64
28,36	2,46	3,151	0,0989	0,3203	3,24
32,22	2,79	3,580	0,1271	0,4449	3,50
39,96	3,47	4,440	0,1932	0,6787	3,51
45,02	3,90	5,003	0,2458	0,7740	3,15
49,91	4,33	5,545	0,3596	1,3264	3,69
54,41	4,72	6,045	0,4175	1,3272	3,18
58,88	5,11	6,542	0,6620	2,2471	3,39
61,86	5,36	6,873	0,9537	3,4743	3,64
65,66	5,69	7,296	0,9965	3,1197	3,13
73,15	6,34	8,128	1,5956	5,3089	3,33
79,14	6,86	8,793	2,1200	6,8226	3,22
82,06	7,12	9,118	2,4447	7,6633	3,13
88,16	7,64	9,795	3,4278	9,6446	2,81
95,30	8,26	10,588	3,7914	13,2665	3,50
114,68	9,94	12,742	6,2306	16,6553	2,67
129,11	11,20	14,346	7,7238	24,3507	3,15
				Média	3,29

Nesse caso o fator de pico médio é de 3,29. Esse fator é multiplicado ao deslocamento RMS, comparado-se ao resultado do modelo matemático.

5.2.2.4. Comparação dos resultados

Para a comparação entre o resultados do método da norma canadense e os apresentados em túnel de vento, é apresentada a tabela 5.20:

Tabela 5.20: Comparação entre os resultados obtidos para a resposta transversal para vento incidindo na face de menor área

$V_{\text{Reduzida no Topo}}$	Túnel (g.RMS)
	$d_{\text{Normalizado}}$
2,425	0,003987
3,151	0,004338
3,580	0,005575
4,440	0,008475
5,003	0,010782
5,545	0,015774
6,045	0,018314
6,542	0,029040
6,873	0,041836
7,296	0,043713
8,128	0,069994
8,793	0,092997
9,118	0,107241
9,795	0,150366
10,588	0,166316
12,742	0,273316
14,346	0,338817

A figura 5.4 apresenta a comparação dos resultados. Nesse caso a velocidade crítica calculada por Strouhal não coincidiu com os valores ensaiados. Experimentalmente não foi encontrada uma velocidade crítica, os deslocamentos foram aumentando gradativamente de acordo com o aumento da velocidade. Por esse motivo, o deslocamento fornecido pela metodologia da norma canadense, dado para a velocidade crítica teórica, é 260% superior aos verificados em túnel de vento, nessa dada velocidade.

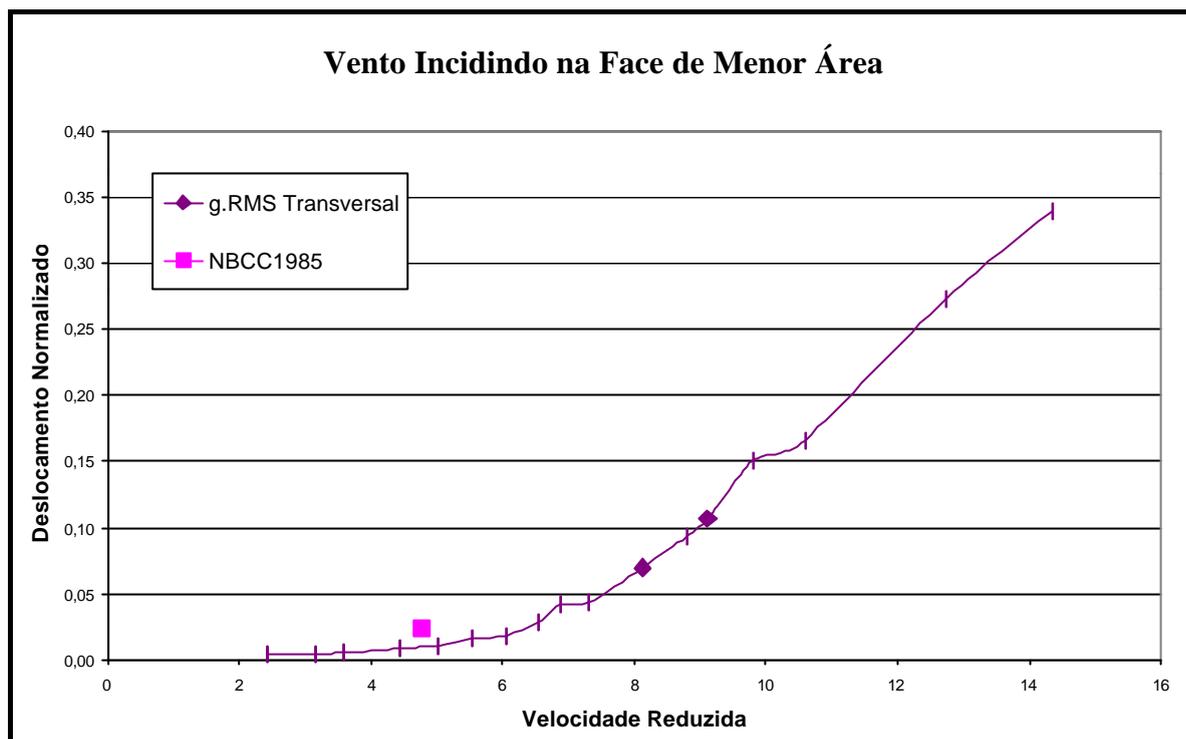


Figura 5.4: Comparação entre os resultados obtidos para a resposta transversal para vento incidindo na face de menor área

5.3. COMPARAÇÃO ENTRE AS RESPOSTAS LONGITUDINAL E TRANSVERSAL À DIREÇÃO DO VENTO

As tabelas a seguir mostram os valores das respostas experimentais obtidas através dos ensaios em túnel de vento, nas direções longitudinal e transversal ao vento.

5.3.1. Vento Incidindo na Face de Maior Área

A tabela 5.21 apresenta uma comparação entre as respostas experimentais longitudinal média mais flutuante transversal flutuante para o vento incidindo na face de maior área.

Tabela 5.21: Comparação entre as respostas experimentais longitudinal e transversal para vento incidindo na face de maior área

$V_{\text{Topo do Modelo}}$ (m/s)	Túnel Longitudinal (Média+g.RMS)	Túnel Transversal (g.RMS)	Longitudinal/Transversal
	$d_{\text{Topo do Modelo}}$ (mm)	$d_{\text{Topo do Modelo}}$ (mm)	
1,891	0,475589	0,2370	1,858059
2,456	0,659675	0,2838	2,152255
2,790	0,743484	0,3405	2,021764
3,469	1,104584	0,5223	1,958191
3,919	1,434441	0,6414	2,070761
4,346	2,014947	1,0605	1,759256
4,732	2,495735	1,6347	1,413633
5,116	2,544418	1,7727	1,329014
5,363	2,970529	2,0748	1,325665
5,687	3,395641	2,7645	1,137317
6,340	4,368719	4,2942	0,941994
6,872	5,033017	9,5160	0,489723

A figura 5.5 mostra a comparação entre as respostas longitudinal e transversal, para a incidência do vento na face de maior área. A resposta longitudinal foi truncada em uma velocidade no topo do modelo de 6,87 m/s porque esse foi o ponto máximo em que dados com a balança de momentos puderam ser adquiridos. Isso aconteceu devido à sua flexibilidade na direção transversal ao escoamento, pois caso as velocidades fossem ainda maiores, os resultados poderiam não ser representativos pelo movimento transversal, não desejado, do equipamento.

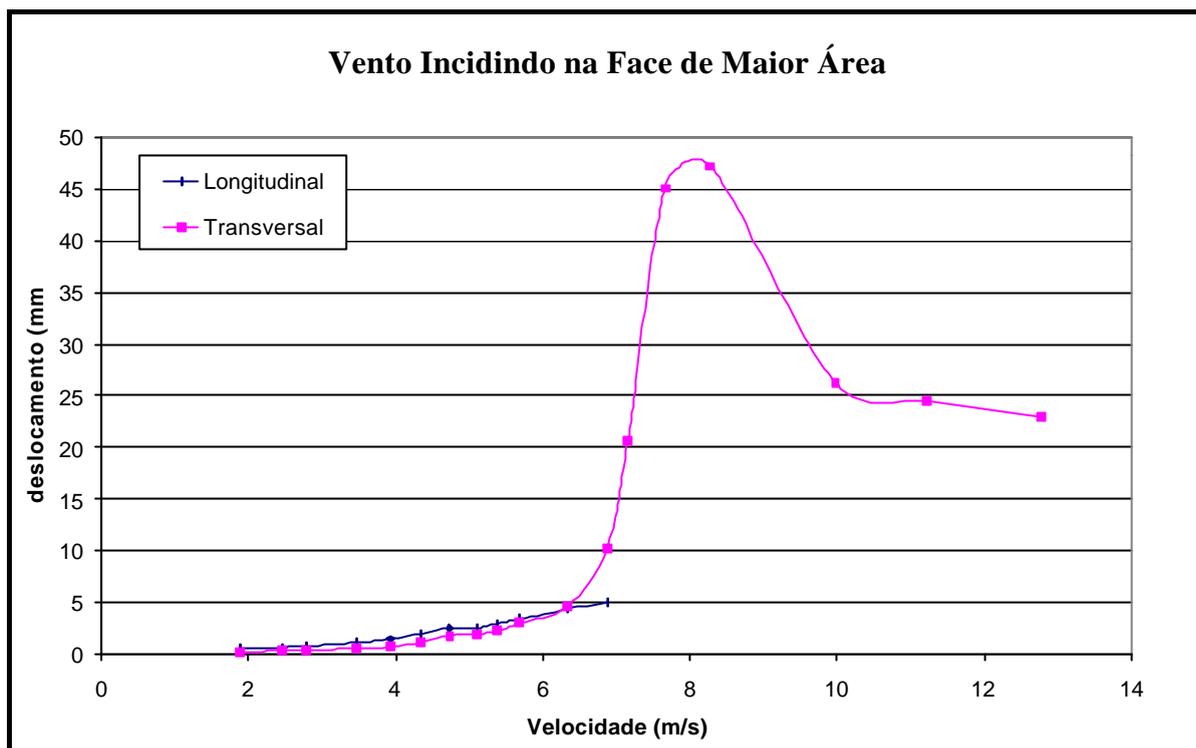


Figura 5.5: Comparação entre as respostas experimentais longitudinal e transversal para vento incidindo na face de maior área

5.3.2. Vento Incidindo na Face de Menor Área

A tabela 5.22 apresenta uma comparação entre as respostas experimentais longitudinal média mais flutuante transversal flutuante para o vento incidindo na face de menor área.

Tabela 5.22: Comparação entre as respostas experimentais longitudinal e transversal para vento incidindo na face de menor área

$V_{\text{Topo do Modelo}}$ (m/s)	Túnel Longitudinal (Média+g.RMS)	Túnel Transversal (g.RMS)	Longitudinal/Transversal
	$d_{\text{Topo do Modelo}}$ (mm)	$d_{\text{Topo do Modelo}}$ (mm)	
1,89	0,42680	0,29906	1,427135
2,46	0,51530	0,32538	1,583672
2,79	0,60972	0,41816	1,458110
3,47	0,72048	0,63563	1,133487
3,90	1,01579	0,80868	1,256107
4,33	1,23316	1,18308	1,042325
4,72	1,42945	1,37358	1,040677
5,11	1,61679	2,17798	0,742334

5,36	1,88152	3,13767	0,599654
5,69	2,30602	3,27849	0,703380
6,34	2,92522	5,24952	0,557235
6,86	3,47310	6,97480	0,497949
7,12	3,63654	8,04306	0,452134
7,64	4,18053	11,27746	0,370698
8,26	5,04805	12,47371	0,404696
9,94	7,50175	20,49867	0,365963

A figura 5.6 mostra a comparação entre as respostas longitudinal e transversal, para a incidência do vento na face de menor área.

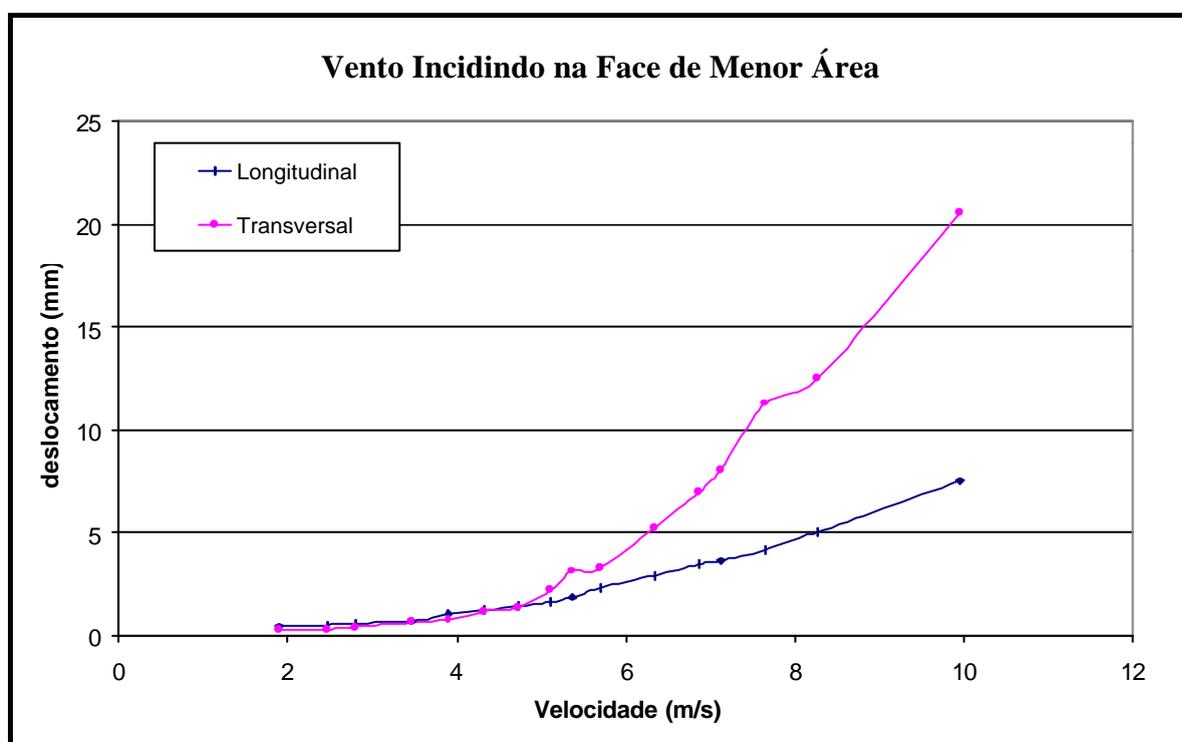


Figura 5.6: Comparação entre as respostas experimentais longitudinal e transversal para vento incidindo na face de menor área

6. CONCLUSÕES

6.1. GENERALIDADES

Os modelos matemáticos das normas brasileira e canadense para previsão da resposta longitudinal apresentam valores aproximados, se comparados aos apresentados em túnel de vento. Para a resposta transversal, a formulação da norma canadense apresenta uma discrepância muito elevada aos obtidos experimentalmente. Isso acontece pois a NBCC - 1985 apresenta uma equação empírica, apenas fornecendo uma noção da dimensão da força transversal.

Os valores experimentais encontrados são coerentes, mostrando que a modelagem em túnel de vento é uma ferramenta confiável e precisa para a previsão das respostas longitudinal e transversal induzidas pela ação dinâmica do vento em edifícios altos. Para a resposta longitudinal a NBR - 6123 e NBCC - 1985 ainda apresentam valores satisfatórios, podendo ser empregadas para formas geométricas convencionais quando da não possibilidade de modelagem experimental em túnel de vento. Cabe salientar que a formulação da NBR - 6123 apresentou resultados inferiores se comparados aos valores experimentais. Para a resposta transversal ainda não existem formulações analíticas que conduzam a uma satisfatória previsão da resposta.

Experimentalmente foi verificado que a resposta longitudinal flutuante apresenta grande importância na resposta total nesse sentido, chegando a valores em torno de 50% da resposta média. Além disso a resposta transversal também se mostrou considerável, comprovando a importância da análise dinâmica para o edifício em estudo.

O valor rms da resposta transversal é sempre maior do que esse valor para resposta longitudinal. Porém, com a parcela média incluída, a resposta longitudinal torna-se superior para o vento incidindo na face de maior área até velocidades da ordem de 260 Km/h em escala real, quando a resposta transversal passa a ser predominante. Para a incidência do vento na face de menor área, os valores das respostas longitudinal média mais flutuante são superiores

à resposta flutuante transversal, até velocidades em torno de 210 Km/h, na qual o deslocamento transversal passa a ser maior.

Para a incidência do vento a face de maior área, percebe-se claramente a velocidade crítica de desprendimento de vórtices com um pico bem definido. Essa velocidade coincide com a velocidade crítica determinada pelo número de Strouhal. Quando o vento incide na outra direção, não percebe-se um pico definido de oscilação transversal, com o deslocamento sempre crescendo com o aumento de velocidade.

6.2. TRABALHOS FUTUROS

Com a comprovada importância da análise dinâmica de edifícios altos submetidos a ação do vento, alguns estudos podem ser feitos.

- Estudos da resposta à torção, com a construção de um modelo aeroelástico equivalente;
- Construção de um modelo aeroelástico equivalente com n-graus de liberdade para a verificação da influência dos altos modos de vibração;
- A influência da vizinhança é outro assunto de difícil resposta analítica e de grande importância.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASCE **Monograph on Planning and Design of Tall Buildings**. Cap. CL-3, Wind Loading and Wind Effects. American Society of Civil Engineers, New York, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT **Norma Brasileira NBR-6123 (NB-599): Forças de vidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.

BEER, F.P.; JOHNSTON, E.R. Jr. **Mecânica vetorial para engenheiros – v. 1. Estática**. 3ª.ed. São Paulo. Editora McGraw-Hill do Brasil, 1980. 456p.

BLACKMORE, P.A. Comparision of experimental methods for estimating dynamic response of buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, vol.23, 1986 - pp.365-377.

BLESSMANN, J. **Ação do vento em edifícios**. Série Engenharia Estrutural/7. Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS, 1989.

____. **Acidentes causados pelo vento**. Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS, 2001.

____. **Aerodinâmica das Construções**. Porto Alegre: Sagra, 1990.

____. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS, 1998.

____. **O vento na engenharia estrutural**. Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS, 1995.

____. The boundary layer TV-2 wind tunnel of the UFRGS. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, vol. 10, p.231-248, 1982.

____; RIERA, J.D. Wind excitation of neighbouring tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, vol. 18, p.91-103, 1985.

CANADIAN STRUCTURAL DESIGN MANUAL. **Supplement N° 4 to the National Building Code of Canada**, Associate Committee on the National Building Code and National Research Council of Canada, Ottawa, 1985.

DALY, A. F. **The response of chimneys to wind-induced loads and the evaluation of the resulting fatigue damage.** Ph.D. Thesis, University of Western Ontario London, Ontario, Canada, 1986.

DAVENPORT, A. G.; ISYUMOV, N. The application of the boundary layer wind tunnel to the prediction of wind loading. **Proceedings of the International Research Seminar: Wind Effects on Buildings and Structures.** Ottawa, Canada, September 11-15, vol. 1. p.201-230, 1967.

ISYUMOV, N. The aeroelastic modelling of tall buildings. **Proceedings of the International Workshop on Wind Tunnel Modeling Criteria and Techniques in Civil Engineering Applications.** Gaithersburg, Maryland, USA. April. pp. 373-407. 1982.

ISYUMOV, N.; HOLMES, J.D.; SURRY, D.; DAVENPORT, A.G. A study of wind effects for The First National City Corporation Project. **Research Report BLWT-SS1-75.** The University of Western Ontario. London, Ontario, Canada. 1975.

ISYUMOV, N.; FEDIW, A.A.; COLACO, J.; BANAVALKAR, P.V. Performance of a tall building under wind action. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,** Amsterdam, vol. 41-44, p.1053-1064, 1992.

JEARY, A.P.; MIERE, C.; ELLIS, B.R. On predicting the response of tall buildings to wind excitation. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,** Amsterdam, vol.13, 1983 - pp.173-182.

KAWAI, H. Bending and torsional vibration of tall buildings in strong wind. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,** Amsterdam, vol.50, 1993 - pp.281-288.

KWOK, K.C.S. Effect of building shape on wind-induced response of tall building. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,** Amsterdam, vol.28, 1988 - pp.381-390.

LIANG, S.; LIU, S; LI, Q.S.; ZHANG, L.; GU, M. Mathematical model of across wind dynamic loads on rectangular tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,** Amsterdam, vol.90, 2002 - pp.1757-1770.

MACDONALD, A. J. **Wind loading on buildings.** Londres: Applied Science, 1975.

MELBOURNE, W.H. Comparison of measurements on the CAARC standard tall building model in simulated model wind flows. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Amsterdam**, vol.6, 1980 - pp.73-88.

MIGUEL, L. F. F. **Estudo teórico e experimental de amortecedores de vibração por atrito**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SIMIU, E.; SCANLAN, R. **Wind Effects on Structures**. Second Edition.. USA: A Wiley-Interscience Publication, 1986.

TANAKA, H.; MAK, C.Y. Effect of tuned mass dampers on wind induced response of tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, vol.14, 1983 - pp.357-368.

THEPMONGKORN, S.; KWOK, K.C.S.; LAKSHMANAN N. A two-degree-of-freedom base hinged aeroelastic (BHA) model for response predictions. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, vol.83, 1999 - pp.171-181.

XU, Y.L.; KWOK, K.C.S.; SAMALI, B. Torsion response and vibration suppression of wind-excited buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, vol.41-44, 1992 - pp.1997-2008.

ZHANG, W.J.; KWOK, K.C.S.; XU, Y.L. Aeroelastic torsional behavior of tall buildings in wakes. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, vol.51, 1994 - pp.229-248.

Anexo A – Resposta Média Experimental

VENTO INCIDINDO NA FACE DE MAIOR ÁREA

Δp_a (mm H ₂ O)	Zero _i (mV)	Zero _f (mV)	Tensão medida (mV)	Tensão corrigida (mV)	M _{balança} (gf.m)	M _{pé modelo} (gf.m)	K	P _{atm} (mm HG)	T(°C)	V _{ensaio} (m/s)
0,20	86	89	97	11	3,26	3,16	1,05	769,5	21,5	1,8
0,30	86	89	108	20,5	6,07	5,89	1,17	769,5	21,6	2,4
0,40	86	89	112	23	6,81	6,61	1,13	769,5	23,4	2,7
0,60	88	91	125	37	10,95	10,63	1,18	769,5	23,6	3,4
0,80	88	91	138	49	14,50	14,08	1,14	769,5	24,2	3,9
1,00	88	91	152	62	18,35	17,82	1,10	769,5	24,9	4,2
1,20	88	91	165	74	21,90	21,27	1,08	769,5	25,9	4,6
1,40	102	104	183	81	23,98	23,28	1,14	769,5	27,5	5,1
1,60	102	104	205	102,6	30,37	29,49	1,09	769,5	28,6	5,4
1,80	102	104	211	108,2	32,03	31,09	1,08	769,5	29,1	5,7
2,20	102	104	244	140,8	41,68	40,46	1,08	769,5	29,3	6,3
2,60	102	104	269	165,4	48,96	47,53	1,08	769,5	29,9	6,8

q	C _m	V _{ensaio din.} (m/s)	M _{calculado} (gf.m)	K _q (gf.m)	q	desloc. _m (mm)	desloc. _p (mm)	desloamento normalizado	velocidade reduzida
2,08	66,75	1,9	3,33	8000	0,000417	0,19	75,00	0,0025	2,4
3,48	74,40	2,5	6,27	8000	0,000783	0,35	140,99	0,0047	3,1
4,50	64,43	2,8	7,01	8000	0,000876	0,39	157,63	0,0053	3,6
7,09	65,87	3,5	11,07	8000	0,001383	0,62	249,01	0,0083	4,4
9,13	67,71	3,9	14,53	8000	0,001816	0,82	326,81	0,0109	5,0
11,01	71,01	4,3	18,73	8000	0,002341	1,05	421,40	0,0140	5,6
13,06	71,47	4,7	22,35	8000	0,002794	1,26	502,90	0,0168	6,1
16,16	63,23	5,1	23,11	8000	0,002889	1,30	519,96	0,0173	6,6
17,74	72,95	5,4	29,30	8000	0,003663	1,65	659,31	0,0220	6,9
19,80	68,93	5,7	31,13	8000	0,003891	1,75	700,45	0,0233	7,3
24,14	73,57	6,3	41,30	8000	0,005162	2,32	929,15	0,0310	8,1
28,51	73,19	6,9	48,27	8000	0,006034	2,72	1086,06	0,0362	8,8

VENTO INCIDINDO NA FACE DE MENOR ÁREA

Δp_a (mm H ₂ O)	Zero _i (mV)	Zero _f (mV)	Tensão medida (mV)	Tensão corrigida (mV)	M _{balança} (gf.m)	M _{pé modelo} (gf.m)	K	P _{atm} (mm HG)	T(°C)	V _{ensaio} (m/s)
0,20	68	74	76	8	2,37	2,30	1,05	769,5	20,1	1,8
0,30	68	74	81	10	2,96	2,87	1,17	769,5	21,5	2,4
0,40	68	74	85	11	3,26	3,16	1,13	769,5	22,6	2,7
0,60	96	99	116	20	5,92	5,75	1,18	769,5	24,1	3,4
0,80	96	99	127	30	8,88	8,62	1,14	769,5	25,7	3,9
1,00	96	99	131	33	9,77	9,48	1,10	769,5	26,5	4,3
1,20	96	99	139	40	11,84	11,50	1,08	769,5	27,0	4,6
1,40	99	101	147	46	13,62	13,22	1,14	769,5	26,0	5,1
1,60	99	101	154	54,6	16,16	15,69	1,09	769,5	27,2	5,4
1,80	99	101	168	68,2	20,19	19,60	1,08	769,5	27,7	5,7
2,20	99	101	180	79,8	23,62	22,93	1,08	769,5	28,2	6,3
2,60	99	101	194	93,4	27,65	26,84	1,08	769,5	28,6	6,8
2,80	99	101	203	102	30,19	29,31	1,07	769,5	28,8	7,0
3,00	104	105	217	113	33,45	32,47	1,13	769,5	28,0	7,5
3,50	104	105	240	135,5	40,11	38,94	1,13	769,5	29,5	8,1
5,00	104	105	290	185	54,76	53,16	1,14	769,5	30,0	9,7

q	C _m	V _{ensaio d in.} (m/s)	M _{calculado} (gf.m)	K _q (gf.m)	θ	desloc. _m (mm)	desloc. _p (mm)	desloc. _{p/h_p}	velocidade reduzida
2,07	73,17	1,9	2,44	8000	0,000305	0,14	54,91	0,0012	2,4
3,46	54,61	2,5	3,07	8000	0,000384	0,17	69,17	0,0015	3,2
4,47	46,55	2,8	3,38	8000	0,000423	0,19	76,10	0,0017	3,6
7,10	53,32	3,5	5,96	8000	0,000745	0,34	134,11	0,0030	4,4
9,18	61,87	3,9	8,78	8000	0,001097	0,49	197,54	0,0044	5,0
11,07	56,39	4,3	9,83	8000	0,001229	0,55	221,23	0,0049	5,5
13,11	57,74	4,7	11,96	8000	0,001495	0,67	269,19	0,0060	6,0
16,08	54,13	5,1	13,14	8000	0,001642	0,74	295,57	0,0066	6,5
17,66	58,51	5,4	15,67	8000	0,001959	0,88	352,62	0,0078	6,9
19,71	65,48	5,7	19,76	8000	0,002470	1,11	444,60	0,0099	7,3
24,05	62,77	6,3	23,51	8000	0,002939	1,32	529,06	0,0118	8,1
28,39	62,26	6,9	27,29	8000	0,003412	1,54	614,12	0,0136	8,8
30,43	63,42	7,1	29,90	8000	0,003737	1,68	672,64	0,0149	9,1
34,40	62,16	7,6	33,82	8000	0,004227	1,90	760,86	0,0169	9,8
40,16	63,84	8,3	40,58	8000	0,005073	2,28	913,09	0,0203	10,6
58,05	60,30	9,9	55,51	8000	0,006939	3,12	1248,97	0,0278	12,7

**Anexo B – Resposta Longitudinal pela NBR - 6123 com vento incidindo na
face de maior área**

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 21,80 m/s

$$V_p = 12,59 \text{ m/s}$$

$$f_1 = 0,2 \text{ Hz}$$

$$q_0^* = 97,20 \text{ N/m}^2$$

$$F_H = 2844497,04 \text{ N}$$

$$z = 0,01$$

$$x = 1,1$$

seção	Z _i (m)	Ca	A (m ²)	\bar{F}_i (N)	b _i	x _i	b _i x _i	m _i (Kg)	y _i	y _i x _i ²	\hat{F}_i (N)	F _i (N)	M _{base} (Nm)
1	5	1,4	225	23527	0,03	0,03	0,001	1080000	0,028	0,0000	2195	25722	64305
2	10	1,4	225	30617	0,04	0,06	0,002	1080000	0,028	0,0001	4390	35006	262547
3	15	1,4	225	35717	0,04	0,08	0,004	1080000	0,028	0,0002	6584	42301	528766
4	20	1,4	225	39843	0,04	0,11	0,005	1080000	0,028	0,0003	8779	48622	850886
5	25	1,4	225	43369	0,05	0,14	0,006	1080000	0,028	0,0005	10974	54343	1222710
6	30	1,4	225	46480	0,05	0,17	0,008	1080000	0,028	0,0008	13169	59649	1640340
7	35	1,4	225	49284	0,05	0,19	0,010	1080000	0,028	0,0011	15364	64648	2101044
8	40	1,4	225	51849	0,05	0,22	0,011	1080000	0,028	0,0014	17559	69408	2602786
9	45	1,4	225	54222	0,05	0,25	0,013	1080000	0,028	0,0017	19753	73976	3143972
10	50	1,4	225	56437	0,05	0,28	0,015	1080000	0,028	0,0021	21948	78386	3723315
11	55	1,4	225	58519	0,05	0,31	0,016	1080000	0,028	0,0026	24143	82662	4339751
12	60	1,4	225	60486	0,05	0,33	0,018	1080000	0,028	0,0031	26338	86824	4992379
13	65	1,4	225	62354	0,06	0,36	0,020	1080000	0,028	0,0036	28533	90887	5680427
14	70	1,4	225	64135	0,06	0,39	0,022	1080000	0,028	0,0042	30728	94863	6403223
15	75	1,4	225	65839	0,06	0,42	0,024	1080000	0,028	0,0048	32922	98761	7160178
16	80	1,4	225	67473	0,06	0,44	0,026	1080000	0,028	0,0055	35117	102591	7950766
17	85	1,4	225	69046	0,06	0,47	0,028	1080000	0,028	0,0062	37312	106358	8774519
18	90	1,4	225	70562	0,06	0,50	0,030	1080000	0,028	0,0069	39507	110069	9631014
19	95	1,4	225	72027	0,06	0,53	0,031	1080000	0,028	0,0077	41702	113728	10519866
20	100	1,4	225	73444	0,06	0,56	0,033	1080000	0,028	0,0086	43897	117341	11440727
21	105	1,4	225	74819	0,06	0,58	0,035	1080000	0,028	0,0095	46091	120910	12393274
22	110	1,4	225	76153	0,06	0,61	0,037	1080000	0,028	0,0104	48286	124439	13377213
23	115	1,4	225	77450	0,06	0,64	0,040	1080000	0,028	0,0113	50481	127931	14392271
24	120	1,4	225	78713	0,06	0,67	0,042	1080000	0,028	0,0123	52676	131389	15438194
25	125	1,4	225	79944	0,06	0,69	0,044	1080000	0,028	0,0134	54871	134814	16514746
26	130	1,4	225	81144	0,06	0,72	0,046	1080000	0,028	0,0145	57066	138209	17621708
27	135	1,4	225	82316	0,06	0,75	0,048	1080000	0,028	0,0156	59260	141576	18758873
28	140	1,4	225	83462	0,06	0,78	0,050	1080000	0,028	0,0168	61455	144917	19926047
29	145	1,4	225	84582	0,06	0,81	0,052	1080000	0,028	0,0180	63650	148232	21123049
30	150	1,4	225	85679	0,07	0,83	0,054	1080000	0,028	0,0193	65845	151523	22349707
31	155	1,4	225	86753	0,07	0,86	0,056	1080000	0,028	0,0206	68040	154793	23605858
32	160	1,4	225	87806	0,07	0,89	0,059	1080000	0,028	0,0219	70234	158040	24891348
33	165	1,4	225	88839	0,07	0,92	0,061	1080000	0,028	0,0233	72429	161268	26206033
34	170	1,4	225	89852	0,07	0,94	0,063	1080000	0,028	0,0248	74624	164476	27549773
35	175	1,4	225	90847	0,07	0,97	0,065	1080000	0,028	0,0263	76819	167666	28922437
36	180	1,4	225	91825	0,07	1,00	0,067	1080000	0,028	0,0278	79014	170839	30323899
			8100				1,1409			0,3474		3897166	426427951

$$I_f = 1,17485E-10$$

$$M_m = 0,0501 \text{ Nm}$$

$$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$$

$$q = 0,000626238 \text{ rad}$$

$$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,000281807 \text{ m}$$

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 28,32 m/s

$$V_p = 16,35 \text{ m/s}$$

$$f_1 = 0,2 \text{ Hz}$$

$$q_0^* = 163,94 \text{ N/m}^2$$

$$F_H = 5233921,56 \text{ N}$$

$$z = 0,01$$

$$x = 1,2$$

seção	Z_i (m)	Ca	A (m ²)	\bar{F}_i (N)	b_i	x_i	$b_i x_i$	m_i (Kg)	y_i	$y_i x_i^2$	\hat{F}_i (N)	F_i (N)	M_{base} (Nm)
1	5	1,4	225	39683	0,03	0,03	0,001	1080000	0,028	0,0000	4039	43721	109303
2	10	1,4	225	51641	0,04	0,06	0,002	1080000	0,028	0,0001	8077	59718	447882
3	15	1,4	225	60243	0,04	0,08	0,004	1080000	0,028	0,0002	12116	72358	904480
4	20	1,4	225	67202	0,04	0,11	0,005	1080000	0,028	0,0003	16154	83356	1458731
5	25	1,4	225	73149	0,05	0,14	0,006	1080000	0,028	0,0005	20193	93342	2100185
6	30	1,4	225	78397	0,05	0,17	0,008	1080000	0,028	0,0008	24231	102628	2822261
7	35	1,4	225	83126	0,05	0,19	0,010	1080000	0,028	0,0011	28270	111396	3620357
8	40	1,4	225	87453	0,05	0,22	0,011	1080000	0,028	0,0014	32308	119761	4491035
9	45	1,4	225	91456	0,05	0,25	0,013	1080000	0,028	0,0017	36347	127803	5431608
10	50	1,4	225	95192	0,05	0,28	0,015	1080000	0,028	0,0021	40385	135577	6439906
11	55	1,4	225	98703	0,05	0,31	0,016	1080000	0,028	0,0026	44424	143126	7514132
12	60	1,4	225	102021	0,05	0,33	0,018	1080000	0,028	0,0031	48462	150483	8652769
13	65	1,4	225	105171	0,06	0,36	0,020	1080000	0,028	0,0036	52501	157672	9854514
14	70	1,4	225	108175	0,06	0,39	0,022	1080000	0,028	0,0042	56539	164715	11118233
15	75	1,4	225	111049	0,06	0,42	0,024	1080000	0,028	0,0048	60578	171627	12442933
16	80	1,4	225	113806	0,06	0,44	0,026	1080000	0,028	0,0055	64616	178422	13827727
17	85	1,4	225	116458	0,06	0,47	0,028	1080000	0,028	0,0062	68655	185113	15271824
18	90	1,4	225	119015	0,06	0,50	0,030	1080000	0,028	0,0069	72693	191709	16774512
19	95	1,4	225	121486	0,06	0,53	0,031	1080000	0,028	0,0077	76732	198218	18335142
20	100	1,4	225	123877	0,06	0,56	0,033	1080000	0,028	0,0086	80770	204647	19953125
21	105	1,4	225	126195	0,06	0,58	0,035	1080000	0,028	0,0095	84809	211004	21627920
22	110	1,4	225	128446	0,06	0,61	0,037	1080000	0,028	0,0104	88847	217293	23359027
23	115	1,4	225	130634	0,06	0,64	0,040	1080000	0,028	0,0113	92886	223520	25145987
24	120	1,4	225	132764	0,06	0,67	0,042	1080000	0,028	0,0123	96924	229688	26988373
25	125	1,4	225	134839	0,06	0,69	0,044	1080000	0,028	0,0134	100963	235802	28885786
26	130	1,4	225	136864	0,06	0,72	0,046	1080000	0,028	0,0145	105002	241866	30837856
27	135	1,4	225	138841	0,06	0,75	0,048	1080000	0,028	0,0156	109040	247881	32844234
28	140	1,4	225	140773	0,06	0,78	0,050	1080000	0,028	0,0168	113079	253852	34904594
29	145	1,4	225	142663	0,06	0,81	0,052	1080000	0,028	0,0180	117117	259780	37018628
30	150	1,4	225	144513	0,07	0,83	0,054	1080000	0,028	0,0193	121156	265668	39186048
31	155	1,4	225	146324	0,07	0,86	0,056	1080000	0,028	0,0206	125194	271519	41406579
32	160	1,4	225	148100	0,07	0,89	0,059	1080000	0,028	0,0219	129233	277333	43679963
33	165	1,4	225	149842	0,07	0,92	0,061	1080000	0,028	0,0233	133271	283114	46005952
34	170	1,4	225	151552	0,07	0,94	0,063	1080000	0,028	0,0248	137310	288862	48384315
35	175	1,4	225	153231	0,07	0,97	0,065	1080000	0,028	0,0263	141348	294579	50814828
36	180	1,4	225	154880	0,07	1,00	0,067	1080000	0,028	0,0278	145387	300266	53297280
			8100				1,1409			0,3474		6797416	745958030

$$I_f = 1,17485E-10$$

$$M_m = 0,0876 \text{ Nm}$$

$$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$$

$$q = 0,001095489 \text{ rad}$$

$$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,000493 \text{ m}$$

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 32,18 m/s

$$V_p = 18,58 \text{ m/s}$$

$$f_1 = 0,2 \text{ Hz}$$

$$q_0^* = 211,66 \text{ N/m}^2$$

$$F_H = 6757384,56 \text{ N}$$

$$z = 0,01$$

$$x = 1,2$$

seção	Z _i (m)	Ca	A (m ²)	\bar{F}_i (N)	b _i	x _i	b _i x _i	m _i (Kg)	y _i	y _i x _i ²	\hat{F}_i (N)	F _i (N)	M _{base} (Nm)
1	5	1,4	225	51233	0,03	0,03	0,001	1080000	0,028	0,0000	5214	56447	141118
2	10	1,4	225	66672	0,04	0,06	0,002	1080000	0,028	0,0001	10428	77100	578249
3	15	1,4	225	77778	0,04	0,08	0,004	1080000	0,028	0,0002	15642	93420	1167752
4	20	1,4	225	86763	0,04	0,11	0,005	1080000	0,028	0,0003	20856	107619	1883332
5	25	1,4	225	94441	0,05	0,14	0,006	1080000	0,028	0,0005	26070	120511	2711496
6	30	1,4	225	101216	0,05	0,17	0,008	1080000	0,028	0,0008	31284	132500	3643750
7	35	1,4	225	107322	0,05	0,19	0,010	1080000	0,028	0,0011	36498	143820	4674152
8	40	1,4	225	112908	0,05	0,22	0,011	1080000	0,028	0,0014	41712	154620	5798263
9	45	1,4	225	118076	0,05	0,25	0,013	1080000	0,028	0,0017	46926	165003	7012613
10	50	1,4	225	122900	0,05	0,28	0,015	1080000	0,028	0,0021	52140	175040	8314401
11	55	1,4	225	127432	0,05	0,31	0,016	1080000	0,028	0,0026	57354	184787	9701307
12	60	1,4	225	131716	0,05	0,33	0,018	1080000	0,028	0,0031	62568	194285	11171372
13	65	1,4	225	135784	0,06	0,36	0,020	1080000	0,028	0,0036	67782	203567	12722915
14	70	1,4	225	139662	0,06	0,39	0,022	1080000	0,028	0,0042	72996	212659	14354472
15	75	1,4	225	143372	0,06	0,42	0,024	1080000	0,028	0,0048	78210	221583	16064758
16	80	1,4	225	146932	0,06	0,44	0,026	1080000	0,028	0,0055	83425	230357	17852630
17	85	1,4	225	150356	0,06	0,47	0,028	1080000	0,028	0,0062	88639	238995	19717068
18	90	1,4	225	153658	0,06	0,50	0,030	1080000	0,028	0,0069	93853	247510	21657151
19	95	1,4	225	156847	0,06	0,53	0,031	1080000	0,028	0,0077	99067	255914	23672041
20	100	1,4	225	159935	0,06	0,56	0,033	1080000	0,028	0,0086	104281	264215	25760978
21	105	1,4	225	162927	0,06	0,58	0,035	1080000	0,028	0,0095	109495	272422	27923263
22	110	1,4	225	165833	0,06	0,61	0,037	1080000	0,028	0,0104	114709	280542	30158253
23	115	1,4	225	168658	0,06	0,64	0,040	1080000	0,028	0,0113	119923	288581	32465352
24	120	1,4	225	171408	0,06	0,67	0,042	1080000	0,028	0,0123	125137	296545	34844010
25	125	1,4	225	174088	0,06	0,69	0,044	1080000	0,028	0,0134	130351	304438	37293713
26	130	1,4	225	176702	0,06	0,72	0,046	1080000	0,028	0,0145	135565	312267	39813981
27	135	1,4	225	179254	0,06	0,75	0,048	1080000	0,028	0,0156	140779	320033	42404365
28	140	1,4	225	181749	0,06	0,78	0,050	1080000	0,028	0,0168	145993	327741	45064443
29	145	1,4	225	184188	0,06	0,81	0,052	1080000	0,028	0,0180	151207	335395	47793821
30	150	1,4	225	186576	0,07	0,83	0,054	1080000	0,028	0,0193	156421	342997	50592122
31	155	1,4	225	188916	0,07	0,86	0,056	1080000	0,028	0,0206	161635	350551	53458994
32	160	1,4	225	191209	0,07	0,89	0,059	1080000	0,028	0,0219	166849	358058	56394102
33	165	1,4	225	193458	0,07	0,92	0,061	1080000	0,028	0,0233	172063	365521	59397129
34	170	1,4	225	195665	0,07	0,94	0,063	1080000	0,028	0,0248	177277	372942	62467773
35	175	1,4	225	197832	0,07	0,97	0,065	1080000	0,028	0,0263	182491	380323	65605748
36	180	1,4	225	199961	0,07	1,00	0,067	1080000	0,028	0,0278	187705	387666	68810779
			8100				1,1409			0,3474		8775973	963087663

$$I_f = 1,17485E-10$$

$$M_m = 0,1131 \text{ Nm}$$

$$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$$

$$q = 0,001414358 \text{ rad}$$

$$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,00064 \text{ m}$$

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 40,00 m/s

$$V_p = 23,10 \text{ m/s}$$

$$f_1 = 0,2 \text{ Hz}$$

$$q_0^* = 327,05 \text{ N/m}^2$$

$$F_H = 10876435,82 \text{ N}$$

$$z = 0,01$$

$$x = 1,25$$

seção	Z _i (m)	Ca	A (m ²)	\bar{F}_i (N)	b _i	x _i	b _i x _i	m _i (Kg)	y _i	y _i x _i ²	\hat{F}_i (N)	F _i (N)	M _{base} (Nm)
1	5	1,4	225	79164	0,03	0,03	0,001	1080000	0,028	0,0000	8392	87557	218892
2	10	1,4	225	103020	0,04	0,06	0,002	1080000	0,028	0,0001	16785	119805	898535
3	15	1,4	225	120181	0,04	0,08	0,004	1080000	0,028	0,0002	25177	145358	1816975
4	20	1,4	225	134064	0,04	0,11	0,005	1080000	0,028	0,0003	33569	167633	2933585
5	25	1,4	225	145928	0,05	0,14	0,006	1080000	0,028	0,0005	41962	187890	4227515
6	30	1,4	225	156397	0,05	0,17	0,008	1080000	0,028	0,0008	50354	206751	5685640
7	35	1,4	225	165832	0,05	0,19	0,010	1080000	0,028	0,0011	58746	224578	7298778
8	40	1,4	225	174463	0,05	0,22	0,011	1080000	0,028	0,0014	67138	241602	9060070
9	45	1,4	225	182449	0,05	0,25	0,013	1080000	0,028	0,0017	75531	257980	10964155
10	50	1,4	225	189902	0,05	0,28	0,015	1080000	0,028	0,0021	83923	273825	13006704
11	55	1,4	225	196906	0,05	0,31	0,016	1080000	0,028	0,0026	92315	289222	15184133
12	60	1,4	225	203526	0,05	0,33	0,018	1080000	0,028	0,0031	100708	304233	17493414
13	65	1,4	225	209811	0,06	0,36	0,020	1080000	0,028	0,0036	109100	318911	19931949
14	70	1,4	225	215804	0,06	0,39	0,022	1080000	0,028	0,0042	117492	333296	22497478
15	75	1,4	225	221536	0,06	0,42	0,024	1080000	0,028	0,0048	125885	347421	25188015
16	80	1,4	225	227036	0,06	0,44	0,026	1080000	0,028	0,0055	134277	361313	28001794
17	85	1,4	225	232328	0,06	0,47	0,028	1080000	0,028	0,0062	142669	374997	30937237
18	90	1,4	225	237429	0,06	0,50	0,030	1080000	0,028	0,0069	151062	388491	33992921
19	95	1,4	225	242357	0,06	0,53	0,031	1080000	0,028	0,0077	159454	401811	37167554
20	100	1,4	225	247128	0,06	0,56	0,033	1080000	0,028	0,0086	167846	414974	40459960
21	105	1,4	225	251752	0,06	0,58	0,035	1080000	0,028	0,0095	176239	427991	43869058
22	110	1,4	225	256242	0,06	0,61	0,037	1080000	0,028	0,0104	184631	440873	47393855
23	115	1,4	225	260607	0,06	0,64	0,040	1080000	0,028	0,0113	193023	453631	51033431
24	120	1,4	225	264856	0,06	0,67	0,042	1080000	0,028	0,0123	201415	466272	54786935
25	125	1,4	225	268997	0,06	0,69	0,044	1080000	0,028	0,0134	209808	478805	58653573
26	130	1,4	225	273036	0,06	0,72	0,046	1080000	0,028	0,0145	218200	491236	62632604
27	135	1,4	225	276980	0,06	0,75	0,048	1080000	0,028	0,0156	226592	503572	66723334
28	140	1,4	225	280834	0,06	0,78	0,050	1080000	0,028	0,0168	234985	515819	70925112
29	145	1,4	225	284604	0,06	0,81	0,052	1080000	0,028	0,0180	243377	527981	75237325
30	150	1,4	225	288294	0,07	0,83	0,054	1080000	0,028	0,0193	251769	540064	79659396
31	155	1,4	225	291909	0,07	0,86	0,056	1080000	0,028	0,0206	260162	552071	84190777
32	160	1,4	225	295452	0,07	0,89	0,059	1080000	0,028	0,0219	268554	564006	88830953
33	165	1,4	225	298927	0,07	0,92	0,061	1080000	0,028	0,0233	276946	575873	93579432
34	170	1,4	225	302338	0,07	0,94	0,063	1080000	0,028	0,0248	285339	587676	98435749
35	175	1,4	225	305686	0,07	0,97	0,065	1080000	0,028	0,0263	293731	599417	103399460
36	180	1,4	225	308976	0,07	1,00	0,067	1080000	0,028	0,0278	302123	611099	108470144
			8100				1,1409			0,3474		13784033	1514786442

$$I_f = 1,17485E-10$$

$$M_m = 0,1780 \text{ Nm}$$

$$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$$

$$q = 0,002224564 \text{ rad}$$

$$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,001001 \text{ m}$$

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 45,20 m/s

$$V_p = 26,10 \text{ m/s}$$

$$q_0^* = 417,57 \text{ N/m}^2$$

$$z = 0,01$$

$$F_1 = 0,2 \text{ Hz}$$

$$F_H = 13886823,37 \text{ N}$$

$$x = 1,25$$

seção	Z _i (m)	Ca	A (m ²)	\bar{F}_i (N)	b _i	x _i	b _i x _i	m _i (Kg)	y _i	y _i x _i ²	\hat{F}_i (N)	F _i (N)	M _{base} (Nm)
1	5	1,4	225	101076	0,03	0,03	0,001	1080000	0,028	0,0000	10715	111791	279477
2	10	1,4	225	131534	0,04	0,06	0,002	1080000	0,028	0,0001	21430	152964	1147232
3	15	1,4	225	153445	0,04	0,08	0,004	1080000	0,028	0,0002	32145	185590	2319879
4	20	1,4	225	171171	0,04	0,11	0,005	1080000	0,028	0,0003	42861	214031	3745545
5	25	1,4	225	186318	0,05	0,14	0,006	1080000	0,028	0,0005	53576	239894	5397610
6	30	1,4	225	199684	0,05	0,17	0,008	1080000	0,028	0,0008	64291	263975	7259316
7	35	1,4	225	211731	0,05	0,19	0,010	1080000	0,028	0,0011	75006	286737	9318939
8	40	1,4	225	222751	0,05	0,22	0,011	1080000	0,028	0,0014	85721	308473	11567722
9	45	1,4	225	232948	0,05	0,25	0,013	1080000	0,028	0,0017	96436	329384	13998821
10	50	1,4	225	242463	0,05	0,28	0,015	1080000	0,028	0,0021	107151	349615	16606708
11	55	1,4	225	251406	0,05	0,31	0,016	1080000	0,028	0,0026	117867	369273	19386808
12	60	1,4	225	259857	0,05	0,33	0,018	1080000	0,028	0,0031	128582	388439	22335253
13	65	1,4	225	267883	0,06	0,36	0,020	1080000	0,028	0,0036	139297	407180	25448728
14	70	1,4	225	275534	0,06	0,39	0,022	1080000	0,028	0,0042	150012	425546	28724346
15	75	1,4	225	282853	0,06	0,42	0,024	1080000	0,028	0,0048	160727	443580	32159571
16	80	1,4	225	289876	0,06	0,44	0,026	1080000	0,028	0,0055	171442	461318	35752150
17	85	1,4	225	296631	0,06	0,47	0,028	1080000	0,028	0,0062	182157	478789	39500067
18	90	1,4	225	303145	0,06	0,50	0,030	1080000	0,028	0,0069	192873	496017	43401505
19	95	1,4	225	309437	0,06	0,53	0,031	1080000	0,028	0,0077	203588	513025	47454816
20	100	1,4	225	315528	0,06	0,56	0,033	1080000	0,028	0,0086	214303	529831	51658496
21	105	1,4	225	321432	0,06	0,58	0,035	1080000	0,028	0,0095	225018	546450	56011167
22	110	1,4	225	327165	0,06	0,61	0,037	1080000	0,028	0,0104	235733	562898	60511559
23	115	1,4	225	332738	0,06	0,64	0,040	1080000	0,028	0,0113	246448	579187	65158500
24	120	1,4	225	338163	0,06	0,67	0,042	1080000	0,028	0,0123	257163	595327	69950902
25	125	1,4	225	343450	0,06	0,69	0,044	1080000	0,028	0,0134	267879	611329	74887751
26	130	1,4	225	348607	0,06	0,72	0,046	1080000	0,028	0,0145	278594	627201	79968100
27	135	1,4	225	353643	0,06	0,75	0,048	1080000	0,028	0,0156	289309	642951	85191066
28	140	1,4	225	358564	0,06	0,78	0,050	1080000	0,028	0,0168	300024	658588	90555815
29	145	1,4	225	363377	0,06	0,81	0,052	1080000	0,028	0,0180	310739	674116	96061565
30	150	1,4	225	368089	0,07	0,83	0,054	1080000	0,028	0,0193	321454	689543	101707579
31	155	1,4	225	372704	0,07	0,86	0,056	1080000	0,028	0,0206	332169	704873	107493159
32	160	1,4	225	377228	0,07	0,89	0,059	1080000	0,028	0,0219	342885	720112	113417646
33	165	1,4	225	381664	0,07	0,92	0,061	1080000	0,028	0,0233	353600	735264	119480413
34	170	1,4	225	386019	0,07	0,94	0,063	1080000	0,028	0,0248	364315	750334	125680865
35	175	1,4	225	390294	0,07	0,97	0,065	1080000	0,028	0,0263	375030	765324	132018436
36	180	1,4	225	394495	0,07	1,00	0,067	1080000	0,028	0,0278	385745	780240	138492587
			8100				1,1409			0,3474		17599188	1934050097

$$I_f = 1,17485E-10$$

$$q = 0,00284028 \text{ rad}$$

$$M_m = 0,2272 \text{ Nm}$$

$$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,001278 \text{ m}$$

$$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$$

**Anexo C – Resposta Longitudinal pela NBR - 6123 com vento incidindo na
face de menor área**

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 21,83 m/s

$$V_p = 12,60 \text{ m/s}$$

$$f_1 = 0,2 \text{ Hz}$$

$$q_0^* = 97,38 \text{ N/m}^2$$

$$F_H = 1696450,28 \text{ N}$$

$$z = 0,01$$

$$x = 1,1$$

seção	Z_i (m)	Ca	A (m ²)	\bar{F}_i (N)	b_i	x_i	$b_i x_i$	m_i (Kg)	y_i	$y_i x_i^2$	\hat{F}_i (N)	F_i (N)	M_{base} (Nm)
1	5	1,25	150	14031	0,03	0,03	0,001	1080000	0,028	0,0000	1309	15340	38351
2	10	1,25	150	18260	0,03	0,06	0,002	1080000	0,028	0,0001	2618	20878	156582
3	15	1,25	150	21301	0,04	0,08	0,003	1080000	0,028	0,0002	3927	25228	315355
4	20	1,25	150	23762	0,04	0,11	0,004	1080000	0,028	0,0003	5236	28998	507466
5	25	1,25	150	25865	0,04	0,14	0,006	1080000	0,028	0,0005	6545	32410	729221
6	30	1,25	150	27720	0,04	0,17	0,007	1080000	0,028	0,0008	7854	35574	978294
7	35	1,25	150	29393	0,04	0,19	0,009	1080000	0,028	0,0011	9163	38556	1253057
8	40	1,25	150	30923	0,05	0,22	0,010	1080000	0,028	0,0014	10472	41395	1552295
9	45	1,25	150	32338	0,05	0,25	0,012	1080000	0,028	0,0017	11781	44119	1875056
10	50	1,25	150	33659	0,05	0,28	0,013	1080000	0,028	0,0021	13090	46749	2220575
11	55	1,25	150	34900	0,05	0,31	0,015	1080000	0,028	0,0026	14399	49299	2588215
12	60	1,25	150	36074	0,05	0,33	0,016	1080000	0,028	0,0031	15708	51782	2977441
13	65	1,25	150	37188	0,05	0,36	0,018	1080000	0,028	0,0036	17017	54205	3387791
14	70	1,25	150	38250	0,05	0,39	0,020	1080000	0,028	0,0042	18326	56576	3818865
15	75	1,25	150	39266	0,05	0,42	0,021	1080000	0,028	0,0048	19635	58901	4270311
16	80	1,25	150	40241	0,05	0,44	0,023	1080000	0,028	0,0055	20944	61185	4741815
17	85	1,25	150	41179	0,05	0,47	0,025	1080000	0,028	0,0062	22253	63432	5233099
18	90	1,25	150	42083	0,05	0,50	0,026	1080000	0,028	0,0069	23562	65645	5743910
19	95	1,25	150	42956	0,05	0,53	0,028	1080000	0,028	0,0077	24871	67827	6274020
20	100	1,25	150	43802	0,05	0,56	0,030	1080000	0,028	0,0086	26180	69982	6823218
21	105	1,25	150	44622	0,05	0,58	0,032	1080000	0,028	0,0095	27489	72110	7391315
22	110	1,25	150	45417	0,05	0,61	0,033	1080000	0,028	0,0104	28798	74215	7978133
23	115	1,25	150	46191	0,06	0,64	0,035	1080000	0,028	0,0113	30107	76298	8583511
24	120	1,25	150	46944	0,06	0,67	0,037	1080000	0,028	0,0123	31416	78360	9207297
25	125	1,25	150	47678	0,06	0,69	0,039	1080000	0,028	0,0134	32725	80403	9849350
26	130	1,25	150	48394	0,06	0,72	0,041	1080000	0,028	0,0145	34034	82428	10509539
27	135	1,25	150	49093	0,06	0,75	0,043	1080000	0,028	0,0156	35343	84436	11187741
28	140	1,25	150	49776	0,06	0,78	0,045	1080000	0,028	0,0168	36652	86428	11883840
29	145	1,25	150	50444	0,06	0,81	0,046	1080000	0,028	0,0180	37961	88405	12597729
30	150	1,25	150	51098	0,06	0,83	0,048	1080000	0,028	0,0193	39270	90368	13329304
31	155	1,25	150	51739	0,06	0,86	0,050	1080000	0,028	0,0206	40579	92318	14078469
32	160	1,25	150	52367	0,06	0,89	0,052	1080000	0,028	0,0219	41888	94255	14845132
33	165	1,25	150	52983	0,06	0,92	0,054	1080000	0,028	0,0233	43197	96180	15629207
34	170	1,25	150	53588	0,06	0,94	0,056	1080000	0,028	0,0248	44506	98093	16430609
35	175	1,25	150	54181	0,06	0,97	0,058	1080000	0,028	0,0263	45815	99996	17249262
36	180	1,25	150	54764	0,06	1,00	0,060	1080000	0,028	0,0278	47124	101888	18085091
			5400				1,0187			0,3474		2324259	254320468

$$I_f = 1,17485E-10$$

$$M_m = 0,0299 \text{ Nm}$$

$$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$$

$$q = 0,000373486 \text{ rad}$$

$$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,00016807 \text{ m}$$

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 28,36 m/s

$$V_p = 16,37 \text{ m/s}$$

$$f_1 = 0,2 \text{ Hz}$$

$$q_0^* = 164,36 \text{ N/m}^2$$

$$F_H = 2967251,76 \text{ N}$$

$$z = 0,01$$

$$x = 1,14$$

seção	Z_i (m)	Ca	A (m ²)	\bar{F}_i (N)	b_i	x_i	$b_i x_i$	m_i (Kg)	y_i	$y_i x_i^2$	\hat{F}_i (N)	F_i (N)	M_{base} (Nm)
1	5	1,25	150	23681	0,03	0,03	0,001	1080000	0,028	0,0000	2290	25971	64927
2	10	1,25	150	30817	0,03	0,06	0,002	1080000	0,028	0,0001	4579	35396	265473
3	15	1,25	150	35951	0,04	0,08	0,003	1080000	0,028	0,0002	6869	42819	535244
4	20	1,25	150	40104	0,04	0,11	0,004	1080000	0,028	0,0003	9158	49262	862085
5	25	1,25	150	43653	0,04	0,14	0,006	1080000	0,028	0,0005	11448	55100	1239761
6	30	1,25	150	46784	0,04	0,17	0,007	1080000	0,028	0,0008	13737	60522	1664344
7	35	1,25	150	49607	0,04	0,19	0,009	1080000	0,028	0,0011	16027	65634	2133089
8	40	1,25	150	52189	0,05	0,22	0,010	1080000	0,028	0,0014	18316	70505	2643943
9	45	1,25	150	54578	0,05	0,25	0,012	1080000	0,028	0,0017	20606	75184	3195303
10	50	1,25	150	56807	0,05	0,28	0,013	1080000	0,028	0,0021	22895	79703	3785874
11	55	1,25	150	58902	0,05	0,31	0,015	1080000	0,028	0,0026	25185	84087	4414583
12	60	1,25	150	60882	0,05	0,33	0,016	1080000	0,028	0,0031	27475	88357	5080526
13	65	1,25	150	62763	0,05	0,36	0,018	1080000	0,028	0,0036	29764	92527	5782924
14	70	1,25	150	64555	0,05	0,39	0,020	1080000	0,028	0,0042	32054	96609	6521101
15	75	1,25	150	66270	0,05	0,42	0,021	1080000	0,028	0,0048	34343	100613	7294464
16	80	1,25	150	67915	0,05	0,44	0,023	1080000	0,028	0,0055	36633	104548	8102485
17	85	1,25	150	69498	0,05	0,47	0,025	1080000	0,028	0,0062	38922	108420	8944691
18	90	1,25	150	71024	0,05	0,50	0,026	1080000	0,028	0,0069	41212	112236	9820656
19	95	1,25	150	72499	0,05	0,53	0,028	1080000	0,028	0,0077	43501	116000	10729994
20	100	1,25	150	73926	0,05	0,56	0,030	1080000	0,028	0,0086	45791	119716	11672353
21	105	1,25	150	75309	0,05	0,58	0,032	1080000	0,028	0,0095	48080	123389	12647411
22	110	1,25	150	76652	0,05	0,61	0,033	1080000	0,028	0,0104	50370	127022	13654869
23	115	1,25	150	77958	0,06	0,64	0,035	1080000	0,028	0,0113	52660	130617	14694453
24	120	1,25	150	79229	0,06	0,67	0,037	1080000	0,028	0,0123	54949	134178	15765908
25	125	1,25	150	80467	0,06	0,69	0,039	1080000	0,028	0,0134	57239	137706	16868997
26	130	1,25	150	81676	0,06	0,72	0,041	1080000	0,028	0,0145	59528	141204	18003498
27	135	1,25	150	82855	0,06	0,75	0,043	1080000	0,028	0,0156	61818	144673	19169202
28	140	1,25	150	84008	0,06	0,78	0,045	1080000	0,028	0,0168	64107	148116	20365917
29	145	1,25	150	85136	0,06	0,81	0,046	1080000	0,028	0,0180	66397	151533	21593457
30	150	1,25	150	86240	0,06	0,83	0,048	1080000	0,028	0,0193	68686	154926	22851652
31	155	1,25	150	87321	0,06	0,86	0,050	1080000	0,028	0,0206	70976	158297	24140336
32	160	1,25	150	88381	0,06	0,89	0,052	1080000	0,028	0,0219	73265	161647	25459355
33	165	1,25	150	89421	0,06	0,92	0,054	1080000	0,028	0,0233	75555	164976	26808563
34	170	1,25	150	90441	0,06	0,94	0,056	1080000	0,028	0,0248	77845	168285	28187820
35	175	1,25	150	91443	0,06	0,97	0,058	1080000	0,028	0,0263	80134	171577	29596994
36	180	1,25	150	92427	0,06	1,00	0,060	1080000	0,028	0,0278	82424	174850	31035958
			5400				1,0187			0,3474		3976208	435598212

$$I_f = 1,17485E-10$$

$$M_m = 0,0512 \text{ Nm}$$

$$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$$

$$q = 0,000639705 \text{ rad}$$

$$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,00028787 \text{ m}$$

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 32,21 m/s

$$V_p = 18,60 \text{ m/s}$$

$$f_1 = 0,2 \text{ Hz}$$

$$q_0^* = 212,13 \text{ N/m}^2$$

$$F_H = 3863276,74 \text{ N}$$

$$z = 0,01$$

$$x = 1,15$$

seção	Z _i (m)	Ca	A (m ²)	\bar{F}_i (N)	b _i	x _i	b _i x _i	m _i (Kg)	y _i	y _i x _i ²	\hat{F}_i (N)	F _i (N)	M _{base} (Nm)
1	5	1,25	150	30564	0,03	0,03	0,001	1080000	0,028	0,0000	2981	33545	83863
2	10	1,25	150	39774	0,03	0,06	0,002	1080000	0,028	0,0001	5962	45736	343021
3	15	1,25	150	46400	0,04	0,08	0,003	1080000	0,028	0,0002	8943	55343	691784
4	20	1,25	150	51760	0,04	0,11	0,004	1080000	0,028	0,0003	11924	63684	1114465
5	25	1,25	150	56340	0,04	0,14	0,006	1080000	0,028	0,0005	14905	71245	1603013
6	30	1,25	150	60382	0,04	0,17	0,007	1080000	0,028	0,0008	17886	78268	2152363
7	35	1,25	150	64025	0,04	0,19	0,009	1080000	0,028	0,0011	20866	84891	2758968
8	40	1,25	150	67357	0,05	0,22	0,010	1080000	0,028	0,0014	23847	91205	3420181
9	45	1,25	150	70441	0,05	0,25	0,012	1080000	0,028	0,0017	26828	97269	4133933
10	50	1,25	150	73318	0,05	0,28	0,013	1080000	0,028	0,0021	29809	103127	4898550
11	55	1,25	150	76022	0,05	0,31	0,015	1080000	0,028	0,0026	32790	108812	5712651
12	60	1,25	150	78578	0,05	0,33	0,016	1080000	0,028	0,0031	35771	114349	6575065
13	65	1,25	150	81005	0,05	0,36	0,018	1080000	0,028	0,0036	38752	119757	7484791
14	70	1,25	150	83318	0,05	0,39	0,020	1080000	0,028	0,0042	41733	125051	8440954
15	75	1,25	150	85532	0,05	0,42	0,021	1080000	0,028	0,0048	44714	130245	9442788
16	80	1,25	150	87655	0,05	0,44	0,023	1080000	0,028	0,0055	47695	135350	10489613
17	85	1,25	150	89698	0,05	0,47	0,025	1080000	0,028	0,0062	50676	140374	11580818
18	90	1,25	150	91667	0,05	0,50	0,026	1080000	0,028	0,0069	53657	145324	12715853
19	95	1,25	150	93570	0,05	0,53	0,028	1080000	0,028	0,0077	56638	150208	13894222
20	100	1,25	150	95412	0,05	0,56	0,030	1080000	0,028	0,0086	59618	155030	15115467
21	105	1,25	150	97197	0,05	0,58	0,032	1080000	0,028	0,0095	62599	159797	16379174
22	110	1,25	150	98931	0,05	0,61	0,033	1080000	0,028	0,0104	65580	164511	17684958
23	115	1,25	150	100616	0,06	0,64	0,035	1080000	0,028	0,0113	68561	169177	19032465
24	120	1,25	150	102257	0,06	0,67	0,037	1080000	0,028	0,0123	71542	173799	20421365
25	125	1,25	150	103855	0,06	0,69	0,039	1080000	0,028	0,0134	74523	178378	21851352
26	130	1,25	150	105415	0,06	0,72	0,041	1080000	0,028	0,0145	77504	182919	23322140
27	135	1,25	150	106937	0,06	0,75	0,043	1080000	0,028	0,0156	80485	187422	24833461
28	140	1,25	150	108426	0,06	0,78	0,045	1080000	0,028	0,0168	83466	191891	26385064
29	145	1,25	150	109881	0,06	0,81	0,046	1080000	0,028	0,0180	86447	196328	27976711
30	150	1,25	150	111306	0,06	0,83	0,048	1080000	0,028	0,0193	89428	200733	29608181
31	155	1,25	150	112701	0,06	0,86	0,050	1080000	0,028	0,0206	92409	205110	31279262
32	160	1,25	150	114069	0,06	0,89	0,052	1080000	0,028	0,0219	95390	209459	32989755
33	165	1,25	150	115411	0,06	0,92	0,054	1080000	0,028	0,0233	98370	213781	34739469
34	170	1,25	150	116728	0,06	0,94	0,056	1080000	0,028	0,0248	101351	218079	36528226
35	175	1,25	150	118020	0,06	0,97	0,058	1080000	0,028	0,0263	104332	222353	38355854
36	180	1,25	150	119291	0,06	1,00	0,060	1080000	0,028	0,0278	107313	226604	40222191
			5400				1,0187			0,3474		5149155	564261992

$$I_f = 1,17485E-10$$

$$M_m = 0,0663 \text{ Nm}$$

$$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$$

$$q = 0,000828656 \text{ rad}$$

$$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,0003729 \text{ m}$$

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 39,96 m/s

$$V_p = 23,07 \text{ m/s}$$

$$f_1 = 0,2 \text{ Hz}$$

$$q_0^* = 326,41 \text{ N/m}^2$$

$$F_H = 6461395,40 \text{ N}$$

$$z = 0,01$$

$$x = 1,25$$

seção	Z_i (m)	Ca	A (m ²)	\bar{F}_i (N)	b_i	x_i	$b_i x_i$	m_i (Kg)	y_i	$y_i x_i^2$	\hat{F}_i (N)	F_i (N)	M_{base} (Nm)
1	5	1,25	150	47029	0,03	0,03	0,001	1080000	0,028	0,0000	4986	52015	130038
2	10	1,25	150	61201	0,03	0,06	0,002	1080000	0,028	0,0001	9971	71173	533795
3	15	1,25	150	71396	0,04	0,08	0,003	1080000	0,028	0,0002	14957	86353	1079416
4	20	1,25	150	79644	0,04	0,11	0,004	1080000	0,028	0,0003	19943	99586	1742764
5	25	1,25	150	86692	0,04	0,14	0,006	1080000	0,028	0,0005	24928	111620	2511452
6	30	1,25	150	92911	0,04	0,17	0,007	1080000	0,028	0,0008	29914	122825	3377685
7	35	1,25	150	98516	0,04	0,19	0,009	1080000	0,028	0,0011	34900	133416	4336006
8	40	1,25	150	103644	0,05	0,22	0,010	1080000	0,028	0,0014	39885	143529	5382342
9	45	1,25	150	108388	0,05	0,25	0,012	1080000	0,028	0,0017	44871	153259	6513507
10	50	1,25	150	112816	0,05	0,28	0,013	1080000	0,028	0,0021	49856	162672	7726930
11	55	1,25	150	116977	0,05	0,31	0,015	1080000	0,028	0,0026	54842	171819	9020481
12	60	1,25	150	120909	0,05	0,33	0,016	1080000	0,028	0,0031	59828	180737	10392363
13	65	1,25	150	124643	0,05	0,36	0,018	1080000	0,028	0,0036	64813	189456	11841030
14	70	1,25	150	128203	0,05	0,39	0,020	1080000	0,028	0,0042	69799	198002	13365141
15	75	1,25	150	131609	0,05	0,42	0,021	1080000	0,028	0,0048	74785	206393	14963516
16	80	1,25	150	134876	0,05	0,44	0,023	1080000	0,028	0,0055	79770	214647	16635106
17	85	1,25	150	138019	0,05	0,47	0,025	1080000	0,028	0,0062	84756	222775	18378973
18	90	1,25	150	141050	0,05	0,50	0,026	1080000	0,028	0,0069	89742	230792	20194272
19	95	1,25	150	143978	0,05	0,53	0,028	1080000	0,028	0,0077	94727	238705	22080236
20	100	1,25	150	146812	0,05	0,56	0,030	1080000	0,028	0,0086	99713	246525	24036164
21	105	1,25	150	149559	0,05	0,58	0,032	1080000	0,028	0,0095	104699	254258	26061417
22	110	1,25	150	152227	0,05	0,61	0,033	1080000	0,028	0,0104	109684	261911	28155403
23	115	1,25	150	154820	0,06	0,64	0,035	1080000	0,028	0,0113	114670	269490	30317577
24	120	1,25	150	157344	0,06	0,67	0,037	1080000	0,028	0,0123	119655	276999	32547432
25	125	1,25	150	159804	0,06	0,69	0,039	1080000	0,028	0,0134	124641	284445	34844496
26	130	1,25	150	162203	0,06	0,72	0,041	1080000	0,028	0,0145	129627	291830	37208331
27	135	1,25	150	164546	0,06	0,75	0,043	1080000	0,028	0,0156	134612	299159	39638522
28	140	1,25	150	166836	0,06	0,78	0,045	1080000	0,028	0,0168	139598	306434	42134685
29	145	1,25	150	169076	0,06	0,81	0,046	1080000	0,028	0,0180	144584	313659	44696453
30	150	1,25	150	171268	0,06	0,83	0,048	1080000	0,028	0,0193	149569	320837	47323485
31	155	1,25	150	173415	0,06	0,86	0,050	1080000	0,028	0,0206	154555	327970	50015456
32	160	1,25	150	175520	0,06	0,89	0,052	1080000	0,028	0,0219	159541	335061	52772059
33	165	1,25	150	177585	0,06	0,92	0,054	1080000	0,028	0,0233	164526	342111	55593001
34	170	1,25	150	179611	0,06	0,94	0,056	1080000	0,028	0,0248	169512	349122	58478007
35	175	1,25	150	181600	0,06	0,97	0,058	1080000	0,028	0,0263	174498	356097	61426814
36	180	1,25	150	183554	0,06	1,00	0,060	1080000	0,028	0,0278	179483	363038	64439169
			5400				1,0187			0,3474		8188720	899893522

$$I_f = 1,17485E-10$$

$$M_m = 0,1057 \text{ Nm}$$

$$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$$

$$q = 0,001321553 \text{ rad}$$

$$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,0005947 \text{ m}$$

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 45,02 m/s

$$V_p = 26,00 \text{ m/s}$$

$$q_0^* = 414,33 \text{ N/m}^2$$

$$z = 0,01$$

$$F_1 = 0,2 \text{ Hz}$$

$$F_H = 8529986,11 \text{ N}$$

$$x = 1,3$$

seção	Z _i (m)	Ca	A (m ²)	\bar{F}_i (N)	b _i	x _i	b _i x _i	m _i (Kg)	y _i	y _i x _i ²	\hat{F}_i (N)	F _i (N)	M _{base} (Nm)
1	5	1,25	150	59698	0,03	0,03	0,001	1080000	0,028	0,0000	6582	66280	165699
2	10	1,25	150	77687	0,03	0,06	0,002	1080000	0,028	0,0001	13164	90851	681381
3	15	1,25	150	90628	0,04	0,08	0,003	1080000	0,028	0,0002	19745	110374	1379672
4	20	1,25	150	101098	0,04	0,11	0,004	1080000	0,028	0,0003	26327	127425	2229934
5	25	1,25	150	110044	0,04	0,14	0,006	1080000	0,028	0,0005	32909	142953	3216444
6	30	1,25	150	117939	0,04	0,17	0,007	1080000	0,028	0,0008	39491	157429	4329305
7	35	1,25	150	125053	0,04	0,19	0,009	1080000	0,028	0,0011	46072	171126	5561592
8	40	1,25	150	131563	0,05	0,22	0,010	1080000	0,028	0,0014	52654	184217	6908133
9	45	1,25	150	137585	0,05	0,25	0,012	1080000	0,028	0,0017	59236	196821	8364886
10	50	1,25	150	143205	0,05	0,28	0,013	1080000	0,028	0,0021	65818	209023	9928587
11	55	1,25	150	148487	0,05	0,31	0,015	1080000	0,028	0,0026	72400	220886	11596531
12	60	1,25	150	153478	0,05	0,33	0,016	1080000	0,028	0,0031	78981	232460	13366437
13	65	1,25	150	158218	0,05	0,36	0,018	1080000	0,028	0,0036	85563	243782	15236344
14	70	1,25	150	162737	0,05	0,39	0,020	1080000	0,028	0,0042	92145	254882	17204549
15	75	1,25	150	167060	0,05	0,42	0,021	1080000	0,028	0,0048	98727	265787	19269553
16	80	1,25	150	171208	0,05	0,44	0,023	1080000	0,028	0,0055	105308	276516	21430026
17	85	1,25	150	175198	0,05	0,47	0,025	1080000	0,028	0,0062	111890	287088	23684777
18	90	1,25	150	179045	0,05	0,50	0,026	1080000	0,028	0,0069	118472	297517	26032733
19	95	1,25	150	182762	0,05	0,53	0,028	1080000	0,028	0,0077	125054	307815	28472920
20	100	1,25	150	186359	0,05	0,56	0,030	1080000	0,028	0,0086	131636	317994	31004450
21	105	1,25	150	189846	0,05	0,58	0,032	1080000	0,028	0,0095	138217	328064	33626510
22	110	1,25	150	193232	0,05	0,61	0,033	1080000	0,028	0,0104	144799	338031	36338349
23	115	1,25	150	196524	0,06	0,64	0,035	1080000	0,028	0,0113	151381	347905	39139275
24	120	1,25	150	199728	0,06	0,67	0,037	1080000	0,028	0,0123	157963	357691	42028645
25	125	1,25	150	202850	0,06	0,69	0,039	1080000	0,028	0,0134	164544	367395	45005861
26	130	1,25	150	205896	0,06	0,72	0,041	1080000	0,028	0,0145	171126	377022	48070363
27	135	1,25	150	208870	0,06	0,75	0,043	1080000	0,028	0,0156	177708	386578	51221629
28	140	1,25	150	211777	0,06	0,78	0,045	1080000	0,028	0,0168	184290	396067	54459168
29	145	1,25	150	214620	0,06	0,81	0,046	1080000	0,028	0,0180	190872	405491	57782517
30	150	1,25	150	217402	0,06	0,83	0,048	1080000	0,028	0,0193	197453	414856	61191241
31	155	1,25	150	220128	0,06	0,86	0,050	1080000	0,028	0,0206	204035	424163	64684928
32	160	1,25	150	222800	0,06	0,89	0,052	1080000	0,028	0,0219	210617	433417	68263188
33	165	1,25	150	225421	0,06	0,92	0,054	1080000	0,028	0,0233	217199	442619	71925651
34	170	1,25	150	227992	0,06	0,94	0,056	1080000	0,028	0,0248	223780	451773	75671966
35	175	1,25	150	230518	0,06	0,97	0,058	1080000	0,028	0,0263	230362	460880	79501798
36	180	1,25	150	232999	0,06	1,00	0,060	1080000	0,028	0,0278	236944	469943	83414829
			5400				1,0187			0,3474		10563121	1162389871

$$I_f = 1,17485E-10$$

$$q = 0,001707046 \text{ rad}$$

$$M_m = 0,1366 \text{ Nm}$$

$$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,00076817 \text{ m}$$

$$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$$

**Anexo D – Resposta Longitudinal pelo NBCC - 1985 com vento incidindo
na face de maior área**

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 21,81 m/s

$s/m = 0,2166$

$n = 0,1507$

$g_p = 3,711$

$C_g = 1,8040$

seção	Z_i (m)	V_k (m/s)	Ca	A (m ²)	q_0 (N/m ²)	F (N)	Braço (m)	M_{base} (Nm)
1	5	11,04	1,4	225	134,74	42441,67	2,5	106104,17
2	10	12,59	1,4	225	175,34	55231,12	7,5	414233,40
3	15	13,60	1,4	225	204,54	64431,54	12,5	805394,29
4	20	15,05	1,4	225	250,41	78880,22	17,5	1380403,84
5	25	14,99	1,4	225	248,37	78234,99	22,5	1760287,38
6	30	15,51	1,4	225	266,18	83847,46	27,5	2305805,26
7	35	15,98	1,4	225	282,24	88905,72	32,5	2889435,95
8	40	17,16	1,4	225	325,54	102544,29	37,5	3845410,71
9	45	16,76	1,4	225	310,52	97814,81	42,5	4157129,36
10	50	17,10	1,4	225	323,21	101810,47	47,5	4835997,47
11	55	17,41	1,4	225	335,13	105565,42	52,5	5542184,50
12	60	18,43	1,4	225	375,62	118320,33	57,5	6803418,95
13	65	17,97	1,4	225	357,09	112484,05	62,5	7030252,88
14	70	18,22	1,4	225	367,29	115696,74	67,5	7809529,72
15	75	18,47	1,4	225	377,05	118770,10	72,5	8610832,49
16	80	19,03	1,4	225	400,66	126208,35	77,5	9781147,24
17	85	18,91	1,4	225	395,41	124555,54	82,5	10275831,98
18	90	19,12	1,4	225	404,10	127290,50	87,5	11137919,14
19	95	19,31	1,4	225	412,49	129932,81	92,5	12018784,74
20	100	19,62	1,4	225	425,70	134096,37	97,5	13074396,41
21	105	19,68	1,4	225	428,47	134969,55	102,5	13834378,49
22	110	19,86	1,4	225	436,12	137376,70	107,5	14767995,07
23	115	20,03	1,4	225	443,55	139716,93	112,5	15718154,59
24	120	20,19	1,4	225	450,74	141984,40	117,5	16683166,46
25	125	20,35	1,4	225	457,82	144214,74	122,5	17666305,97
26	130	20,50	1,4	225	464,70	146380,20	127,5	18663475,15
27	135	20,65	1,4	225	471,41	148494,61	132,5	19675535,65
28	140	20,74	1,4	225	475,79	149872,42	137,5	20607457,39
29	145	20,93	1,4	225	484,39	152582,14	142,5	21742954,61
30	150	21,06	1,4	225	490,67	154560,51	147,5	22797674,72
31	155	21,20	1,4	225	496,82	156498,40	152,5	23866005,87
32	160	21,28	1,4	225	500,83	157760,44	157,5	24847269,19
33	165	21,45	1,4	225	508,76	160260,96	162,5	26042406,78
34	170	21,57	1,4	225	514,57	162089,34	167,5	27149963,85
35	175	21,69	1,4	225	520,27	163884,66	172,5	28270104,38
36	180	21,81	1,4	225	525,87	165648,46	177,5	29402601,88
								456319949,95

$I_f = 1,17485E-10$

$q = 0,0006701 \text{ rad}$

$M_m = 0,0536 \text{ Nm}$

$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,0003016 \text{ m}$

$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 28,32 m/s

$$s/m = 0,2604$$

$$n = 0,1674$$

$$g_p = 3,739$$

$$C_g = 1,9739$$

seção	Z _i (m)	V _k (m/s)	Ca	A (m ²)	q ₀ (N/m ²)	F (N)	Braço (m)	M _{base} (Nm)
1	5	14,34	1,4	225	248,67	78329,50	2,5	195823,74
2	10	16,35	1,4	225	323,60	101933,45	7,5	764500,89
3	15	17,66	1,4	225	377,50	118913,57	12,5	1486419,60
4	20	20,31	1,4	225	499,13	157226,14	17,5	2751457,40
5	25	19,46	1,4	225	458,38	144388,94	22,5	3248751,20
6	30	20,15	1,4	225	491,26	154747,20	27,5	4255548,09
7	35	20,75	1,4	225	520,90	164082,62	32,5	5332685,23
8	40	20,87	1,4	225	526,86	165960,92	37,5	6223534,60
9	45	21,76	1,4	225	573,10	180525,06	42,5	7672314,86
10	50	22,20	1,4	225	596,51	187899,37	47,5	8925220,27
11	55	22,61	1,4	225	618,51	194829,43	52,5	10228544,93
12	60	21,41	1,4	225	554,59	174695,71	57,5	10045003,21
13	65	23,34	1,4	225	659,04	207598,31	62,5	12974894,19
14	70	23,67	1,4	225	677,87	213527,58	67,5	14413111,95
15	75	23,98	1,4	225	695,87	219199,73	72,5	15891980,32
16	80	21,94	1,4	225	582,32	183430,49	77,5	14215863,24
17	85	24,56	1,4	225	729,77	229877,21	82,5	18964870,10
18	90	24,83	1,4	225	745,79	234924,81	87,5	20555920,94
19	95	25,08	1,4	225	761,27	239801,39	92,5	22181628,87
20	100	22,96	1,4	225	637,78	200900,06	97,5	19587756,26
21	105	25,56	1,4	225	790,78	249097,10	102,5	25532452,41
22	110	25,79	1,4	225	804,89	253539,69	107,5	27255516,51
23	115	26,01	1,4	225	818,60	257858,77	112,5	29009111,93
24	120	24,87	1,4	225	748,70	235839,21	117,5	27711106,69
25	125	26,43	1,4	225	844,95	266159,85	122,5	32604581,16
26	130	26,62	1,4	225	857,64	270156,37	127,5	34444936,67
27	135	26,81	1,4	225	870,03	274058,68	132,5	36312775,30
28	140	26,22	1,4	225	831,88	262043,56	137,5	36030989,78
29	145	27,18	1,4	225	893,98	281602,54	142,5	40128362,42
30	150	27,36	1,4	225	905,57	285253,78	147,5	42074932,77
31	155	27,53	1,4	225	916,92	288830,32	152,5	44046623,38
32	160	27,50	1,4	225	915,07	288247,92	157,5	45399047,12
33	165	27,86	1,4	225	938,97	295774,43	162,5	48063345,40
34	170	28,02	1,4	225	949,68	299148,84	167,5	50107430,58
35	175	28,17	1,4	225	960,20	302462,26	172,5	52174739,56
36	180	28,32	1,4	225	970,53	305717,49	177,5	54264854,31
								825076635

$$I_f = 1,17485E-10$$

$$q = 0,0012117 \text{ rad}$$

$$M_m = 0,0969 \text{ Nm}$$

$$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,0005453 \text{ m}$$

$$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$$

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 32,18 m/s

$$s/m = 0,2876$$

$$n = 0,1737$$

$$g_p = 3,749$$

$$C_g = 2,0785$$

seção	Z _i (m)	V _k (m/s)	Ca	A (m ²)	q ₀ (N/m ²)	F (N)	Braço (m)	M _{base} (Nm)
1	5	16,29	1,4	225	338,05	106486,25	2,5	266215,62
2	10	18,58	1,4	225	439,92	138575,01	7,5	1039312,58
3	15	20,07	1,4	225	513,20	161658,89	12,5	2020736,16
4	20	21,45	1,4	225	586,40	184716,61	17,5	3232540,71
5	25	22,12	1,4	225	623,15	196291,78	22,5	4416565,16
6	30	22,89	1,4	225	667,85	210373,48	27,5	5785270,79
7	35	23,58	1,4	225	708,14	223064,66	32,5	7249601,57
8	40	26,27	1,4	225	879,60	277074,92	37,5	10390309,43
9	45	24,73	1,4	225	779,10	245417,58	42,5	10430247,31
10	50	25,23	1,4	225	810,93	255442,72	47,5	12133528,99
11	55	25,69	1,4	225	840,84	264863,88	52,5	13905353,89
12	60	27,56	1,4	225	967,56	304782,41	57,5	17524988,58
13	65	26,52	1,4	225	895,95	282222,74	62,5	17638920,94
14	70	26,89	1,4	225	921,53	290283,38	67,5	19594128,36
15	75	27,25	1,4	225	946,01	297994,47	72,5	21604598,88
16	80	29,18	1,4	225	1084,84	341725,73	77,5	26483744,27
17	85	27,90	1,4	225	992,10	312510,14	82,5	25782086,50
18	90	28,21	1,4	225	1013,88	319372,17	87,5	27945065,21
19	95	28,50	1,4	225	1034,93	326001,72	92,5	30155159,06
20	100	29,57	1,4	225	1114,16	350961,56	97,5	34218752,40
21	105	29,05	1,4	225	1075,04	338638,91	102,5	34710488,03
22	110	29,31	1,4	225	1094,22	344678,46	107,5	37052934,22
23	115	29,55	1,4	225	1112,86	350550,10	112,5	39436886,69
24	120	29,96	1,4	225	1143,48	360197,39	117,5	42323193,76
25	125	30,03	1,4	225	1148,68	361835,13	122,5	44324803,04
26	130	30,25	1,4	225	1165,93	367268,26	127,5	46826702,85
27	135	30,47	1,4	225	1182,77	372573,32	132,5	49365965,02
28	140	30,34	1,4	225	1172,80	369433,22	137,5	50797068,34
29	145	30,88	1,4	225	1215,33	382828,94	142,5	54553124,05
30	150	31,08	1,4	225	1231,09	387792,67	147,5	57199419,27
31	155	31,28	1,4	225	1246,52	392654,85	152,5	59879864,62
32	160	31,09	1,4	225	1231,44	387904,89	157,5	61095019,46
33	165	31,65	1,4	225	1276,49	402095,14	162,5	65340459,60
34	170	31,83	1,4	225	1291,06	406682,52	167,5	68119322,88
35	175	32,01	1,4	225	1305,36	411187,00	172,5	70929758,10
36	180	32,18	1,4	225	1319,40	415612,38	177,5	73771196,97
								1147543333

$$I_f = 1,17485E-10$$

$$q = 0,0016852 \text{ rad}$$

$$M_m = 0,1348 \text{ Nm}$$

$$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,0007584 \text{ m}$$

$$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$$

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 40,00 m/s

$$s/m = 0,3434$$

$$n = 0,1820$$

$$g_p = 3,762$$

$$C_g = 2,2915$$

seção	Z _i (m)	V _k (m/s)	Ca	A (m ²)	q ₀ (N/m ²)	F (N)	Braço (m)	M _{base} (Nm)
1	5	20,25	1,4	225	575,90	181407,37	2,5	453518,43
2	10	23,10	1,4	225	749,44	236073,00	7,5	1770547,53
3	15	24,95	1,4	225	874,28	275398,14	12,5	3442476,76
4	20	25,79	1,4	225	934,11	294245,03	17,5	5149287,96
5	25	27,49	1,4	225	1061,58	334397,89	22,5	7523952,53
6	30	28,46	1,4	225	1137,74	358387,13	27,5	9855646,01
7	35	29,31	1,4	225	1206,37	380007,51	32,5	12350244,16
8	40	28,83	1,4	225	1167,64	367806,28	37,5	13792735,61
9	45	30,74	1,4	225	1327,26	418087,40	42,5	17768714,57
10	50	31,36	1,4	225	1381,48	435165,97	47,5	20670383,63
11	55	31,93	1,4	225	1432,43	451215,64	52,5	23688821,26
12	60	29,54	1,4	225	1226,02	386196,60	57,5	22206304,34
13	65	32,96	1,4	225	1526,31	480787,76	62,5	30049234,89
14	70	33,43	1,4	225	1569,90	494519,68	67,5	33380078,50
15	75	33,87	1,4	225	1611,61	507656,10	72,5	36805066,97
16	80	33,81	1,4	225	1605,50	505733,64	77,5	39194357,03
17	85	34,69	1,4	225	1690,11	532384,64	82,5	43921732,84
18	90	35,07	1,4	225	1727,22	544074,63	87,5	47606530,55
19	95	35,43	1,4	225	1763,07	555368,57	92,5	51371592,44
20	100	34,72	1,4	225	1693,08	533319,11	97,5	51998613,26
21	105	36,11	1,4	225	1831,42	576896,97	102,5	59131939,61
22	110	36,43	1,4	225	1864,08	587185,80	107,5	63122473,73
23	115	36,74	1,4	225	1895,84	597188,59	112,5	67183716,93
24	120	35,31	1,4	225	1751,46	551709,42	117,5	64825857,38
25	125	37,32	1,4	225	1956,87	616413,48	122,5	75510651,84
26	130	37,60	1,4	225	1986,25	625669,23	127,5	79772827,26
27	135	37,87	1,4	225	2014,94	634706,81	132,5	84098652,26
28	140	35,89	1,4	225	1809,84	570099,74	137,5	78388714,07
29	145	38,39	1,4	225	2070,41	652178,03	142,5	92935369,69
30	150	38,64	1,4	225	2097,25	660634,13	147,5	97443533,60
31	155	38,88	1,4	225	2123,55	668917,21	152,5	102009874,83
32	160	37,59	1,4	225	1984,99	625270,68	157,5	98480132,28
33	165	39,35	1,4	225	2174,60	684999,45	162,5	111312411,06
34	170	39,57	1,4	225	2199,41	692814,42	167,5	116046414,67
35	175	39,79	1,4	225	2223,77	700488,14	172,5	120834203,47
36	180	40,00	1,4	225	2247,71	708027,09	177,5	125674809,33
								1909771421

$$I_f = 1,17485E-10$$

$$q = 0,0028046 \text{ rad}$$

$$M_m = 0,2244 \text{ Nm}$$

$$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,0012621 \text{ m}$$

$$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$$

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 45,20 m/s

$$s/m = 0,3799$$

$$n = 0,1854$$

$$g_p = 3,766$$

$$C_g = 2,4307$$

seção	Z _i (m)	V _k (m/s)	Ca	A (m ²)	q ₀ (N/m ²)	F (N)	Braço (m)	M _{base} (Nm)
1	5	22,879	1,4	225	779,96	245687,95	2,5	614219,89
2	10	26,100	1,4	225	1015,00	319724,02	7,5	2397930,14
3	15	28,190	1,4	225	1184,08	372983,78	12,5	4662297,20
4	20	29,579	1,4	225	1303,65	410649,47	17,5	7186365,69
5	25	31,063	1,4	225	1437,75	452889,72	22,5	10190018,78
6	30	32,158	1,4	225	1540,89	485379,40	27,5	13347933,48
7	35	33,114	1,4	225	1633,84	514660,83	32,5	16726477,13
8	40	33,032	1,4	225	1625,80	512125,51	37,5	19204706,80
9	45	34,733	1,4	225	1797,57	566234,10	42,5	24064949,16
10	50	35,435	1,4	225	1871,00	589364,35	47,5	27994806,79
11	55	36,083	1,4	225	1940,00	611101,13	52,5	32082809,21
12	60	34,506	1,4	225	1774,12	558848,30	57,5	32133777,17
13	65	37,247	1,4	225	2067,15	651151,94	62,5	40696996,24
14	70	37,775	1,4	225	2126,19	669749,69	67,5	45208103,78
15	75	38,273	1,4	225	2182,67	687540,91	72,5	49846715,82
16	80	38,125	1,4	225	2165,80	682225,65	77,5	52872487,87
17	85	39,194	1,4	225	2288,99	721031,86	82,5	59485128,42
18	90	39,622	1,4	225	2339,25	736864,13	87,5	64475611,50
19	95	40,031	1,4	225	2387,81	752160,00	92,5	69574799,90
20	100	39,527	1,4	225	2328,03	733328,69	97,5	71499547,75
21	105	40,800	1,4	225	2480,37	781316,86	102,5	80084978,30
22	110	41,162	1,4	225	2524,61	795251,48	107,5	85489533,61
23	115	41,511	1,4	225	2567,61	808798,70	112,5	90989853,33
24	120	40,767	1,4	225	2476,35	780051,48	117,5	91656048,76
25	125	42,174	1,4	225	2650,27	834835,81	122,5	102267386,35
26	130	42,490	1,4	225	2690,07	847371,27	127,5	108039837,38
27	135	42,795	1,4	225	2728,92	859611,26	132,5	113898491,83
28	140	42,186	1,4	225	2651,80	835315,77	137,5	114855918,60
29	145	43,380	1,4	225	2804,04	883273,30	142,5	125866445,67
30	150	43,661	1,4	225	2840,40	894725,76	147,5	131972049,71
31	155	43,934	1,4	225	2876,01	905943,91	152,5	138156445,83
32	160	43,279	1,4	225	2790,97	879154,88	157,5	138466894,19
33	165	44,459	1,4	225	2945,16	927724,79	162,5	150755278,49
34	170	44,711	1,4	225	2978,76	938308,94	167,5	157166747,12
35	175	44,958	1,4	225	3011,75	948701,79	172,5	163651059,41
36	180	45,200	1,4	225	3044,17	958912,14	177,5	170206904,15
								2607789555

$$I_f = 1,17485E-10$$

$$q = 0,0038297 \text{ rad}$$

$$M_m = 0,3064 \text{ Nm}$$

$$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,0017234 \text{ m}$$

$$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$$

**Anexo E – Resposta Longitudinal pelo NBCC - 1985 com vento incidindo na
face de menor área**

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 21,83 m/s

$s/m = 0,2232$

$n = 0,1464$

$g_p = 3,703$

$C_g = 1,82670$

seção	Z _i (m)	V _k (m/s)	Ca	A (m ²)	q ₀ (N/m ²)	F (N)	Braço (m)	M _{base} (Nm)
1	5	11,05	1,25	150	136,70	25631,90	2,5	64079,76
2	10	12,60	1,25	150	177,90	33355,87	7,5	250169,01
3	15	13,61	1,25	150	207,53	38912,30	12,5	486403,77
4	20	15,06	1,25	150	254,07	47638,33	17,5	833670,72
5	25	15,00	1,25	150	251,99	47248,65	22,5	1063094,72
6	30	15,53	1,25	150	270,07	50638,21	27,5	1392550,68
7	35	15,99	1,25	150	286,36	53693,05	32,5	1745024,22
8	40	17,17	1,25	150	330,29	61929,82	37,5	2322368,42
9	45	16,77	1,25	150	315,06	59073,54	42,5	2510625,44
10	50	17,11	1,25	150	327,93	61486,65	47,5	2920615,94
11	55	17,43	1,25	150	340,02	63754,39	52,5	3347105,22
12	60	18,45	1,25	150	381,11	71457,49	57,5	4108805,67
13	65	17,99	1,25	150	362,31	67932,77	62,5	4245798,05
14	70	18,24	1,25	150	372,66	69873,02	67,5	4716428,64
15	75	18,48	1,25	150	382,56	71729,12	72,5	5200361,41
16	80	19,05	1,25	150	406,51	76221,32	77,5	5907152,50
17	85	18,93	1,25	150	401,19	75223,14	82,5	6205908,68
18	90	19,13	1,25	150	410,00	76874,87	87,5	6726551,12
19	95	19,33	1,25	150	418,51	78470,64	92,5	7258534,46
20	100	19,64	1,25	150	431,92	80985,16	97,5	7896052,63
21	105	19,70	1,25	150	434,73	81512,49	102,5	8355030,49
22	110	19,88	1,25	150	442,49	82966,25	107,5	8918871,87
23	115	20,05	1,25	150	450,02	84379,59	112,5	9492704,07
24	120	20,21	1,25	150	457,33	85748,99	117,5	10075506,07
25	125	20,37	1,25	150	464,51	87095,97	122,5	10669255,95
26	130	20,52	1,25	150	471,49	88403,76	127,5	11271478,81
27	135	20,67	1,25	150	478,30	89680,72	132,5	11882695,01
28	140	20,76	1,25	150	482,74	90512,82	137,5	12445512,82
29	145	20,95	1,25	150	491,46	92149,31	142,5	13131276,48
30	150	21,08	1,25	150	497,84	93344,11	147,5	13768256,21
31	155	21,22	1,25	150	504,08	94514,47	152,5	14413456,08
32	160	21,30	1,25	150	508,14	95276,65	157,5	15006072,88
33	165	21,47	1,25	150	516,20	96786,80	162,5	15727855,28
34	170	21,59	1,25	150	522,09	97891,01	167,5	16396744,97
35	175	21,71	1,25	150	527,87	98975,27	172,5	17073234,21
36	180	21,83	1,25	150	533,55	100040,49	177,5	17757186,24
								275586438

$I_f = 1,17485E-10$

$q = 0,0004047 \text{ rad}$

$M_m = 0,0324 \text{ Nm}$

$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,0001821 \text{ m}$

$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 28,36 m/s

$$s/m = 0,2661$$

$$n = 0,1641$$

$$g_p = 3,734$$

$$C_g = 1,9936$$

seção	Z _i (m)	V _k (m/s)	Ca	A (m ²)	q ₀ (N/m ²)	F (N)	Braço (m)	M _{base} (Nm)
1	5	14,35	1,25	150	251,80	47211,80	2,5	118029,50
2	10	16,37	1,25	150	327,67	61438,69	7,5	460790,19
3	15	17,69	1,25	150	382,26	71673,17	12,5	895914,67
4	20	20,34	1,25	150	505,42	94765,44	17,5	1658395,15
5	25	19,49	1,25	150	464,15	87028,03	22,5	1958130,71
6	30	20,18	1,25	150	497,45	93271,30	27,5	2564960,78
7	35	20,77	1,25	150	527,46	98898,07	32,5	3214187,26
8	40	20,89	1,25	150	533,49	100030,18	37,5	3751131,89
9	45	21,79	1,25	150	580,31	108808,47	42,5	4624360,08
10	50	22,23	1,25	150	604,02	113253,22	47,5	5379527,96
11	55	22,64	1,25	150	626,29	117430,19	52,5	6165085,21
12	60	21,44	1,25	150	561,57	105294,93	57,5	6054458,49
13	65	23,37	1,25	150	667,34	125126,42	62,5	7820401,51
14	70	23,70	1,25	150	686,40	128700,20	67,5	8687263,32
15	75	24,01	1,25	150	704,63	132118,99	72,5	9578626,62
16	80	21,97	1,25	150	589,65	110559,68	77,5	8568374,95
17	85	24,59	1,25	150	738,96	138554,66	82,5	11430759,78
18	90	24,86	1,25	150	755,18	141597,02	87,5	12389739,19
19	95	25,12	1,25	150	770,86	144536,30	92,5	13369607,59
20	100	22,99	1,25	150	645,81	121089,17	97,5	11806194,05
21	105	25,60	1,25	150	800,74	150139,13	102,5	15389260,70
22	110	25,82	1,25	150	815,02	152816,83	107,5	16427808,91
23	115	26,04	1,25	150	828,91	155420,08	112,5	17484759,36
24	120	24,91	1,25	150	758,12	142148,16	117,5	16702408,30
25	125	26,46	1,25	150	855,59	160423,42	122,5	19651868,59
26	130	26,66	1,25	150	868,44	162832,25	127,5	20761112,25
27	135	26,85	1,25	150	880,98	165184,31	132,5	21886920,89
28	140	26,25	1,25	150	842,36	157942,40	137,5	21717079,36
29	145	27,22	1,25	150	905,23	169731,25	142,5	24186702,51
30	150	27,39	1,25	150	916,97	171931,97	147,5	25359965,39
31	155	27,56	1,25	150	928,47	174087,67	152,5	26548369,09
32	160	27,54	1,25	150	926,60	173736,63	157,5	27363519,99
33	165	27,89	1,25	150	950,79	178273,12	162,5	28969381,43
34	170	28,05	1,25	150	961,64	180306,98	167,5	30201419,75
35	175	28,21	1,25	150	972,29	182304,09	172,5	31447455,83
36	180	28,36	1,25	150	982,75	184266,13	177,5	32707237,70
								497301208

$$I_f = 1,17485E-10$$

$$q = 0,0007303 \text{ rad}$$

$$M_m = 0,0584 \text{ Nm}$$

$$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,0003286 \text{ m}$$

$$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$$

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 32,22 m/s

$$s/m = 0,2928$$

$$n = 0,1709$$

$$g_p = 3,745$$

$$C_g = 2,0965$$

seção	Z _i (m)	V _k (m/s)	Ca	A (m ²)	q ₀ (N/m ²)	F (N)	Braço (m)	M _{base} (Nm)
1	5	16,31	1,25	150	341,75	64078,27	2,5	160195,69
2	10	18,60	1,25	150	444,73	83387,74	7,5	625408,05
3	15	20,09	1,25	150	518,82	97278,50	12,5	1215981,31
4	20	21,48	1,25	150	592,82	111153,53	17,5	1945186,69
5	25	22,14	1,25	150	629,97	118118,90	22,5	2657675,35
6	30	22,92	1,25	150	675,16	126592,59	27,5	3481296,21
7	35	23,60	1,25	150	715,89	134229,53	32,5	4362459,67
8	40	26,30	1,25	150	889,23	166730,29	37,5	6252385,79
9	45	24,76	1,25	150	787,63	147680,43	42,5	6276418,48
10	50	25,26	1,25	150	819,80	153713,07	47,5	7301371,03
11	55	25,72	1,25	150	850,04	159382,28	52,5	8367569,58
12	60	27,59	1,25	150	978,15	183403,32	57,5	10545690,70
13	65	26,55	1,25	150	905,75	169828,00	62,5	10614249,69
14	70	26,92	1,25	150	931,62	174678,50	67,5	11790798,97
15	75	27,28	1,25	150	956,37	179318,66	72,5	13000602,91
16	80	29,21	1,25	150	1096,71	205634,02	77,5	15936636,67
17	85	27,94	1,25	150	1002,95	188053,49	82,5	15514412,96
18	90	28,24	1,25	150	1024,97	192182,73	87,5	16815988,96
19	95	28,53	1,25	150	1046,25	196172,07	92,5	18145916,56
20	100	29,60	1,25	150	1126,36	211191,70	97,5	20591190,54
21	105	29,08	1,25	150	1086,81	203776,52	102,5	20887093,26
22	110	29,34	1,25	150	1106,19	207410,83	107,5	22296664,11
23	115	29,59	1,25	150	1125,04	210944,10	112,5	23731211,43
24	120	29,99	1,25	150	1156,00	216749,37	117,5	25468051,46
25	125	30,06	1,25	150	1161,25	217734,88	122,5	26672523,13
26	130	30,28	1,25	150	1178,69	221004,28	127,5	28178045,46
27	135	30,50	1,25	150	1195,72	224196,61	132,5	29706050,65
28	140	30,37	1,25	150	1185,64	222307,05	137,5	30567219,42
29	145	30,92	1,25	150	1228,63	230367,94	142,5	32827432,12
30	150	31,12	1,25	150	1244,56	233354,88	147,5	34419844,63
31	155	31,31	1,25	150	1260,16	236280,70	152,5	36032807,03
32	160	31,12	1,25	150	1244,92	233422,40	157,5	36764028,45
33	165	31,69	1,25	150	1290,46	241961,41	162,5	39318729,03
34	170	31,87	1,25	150	1305,18	244721,88	167,5	40990914,58
35	175	32,04	1,25	150	1319,64	247432,46	172,5	42682098,60
36	180	32,22	1,25	150	1333,84	250095,43	177,5	44391939,12
								690536088

$$I_f = 1,17485E-10$$

$$q = 0,0010141 \text{ rad}$$

$$M_m = 0,0811 \text{ Nm}$$

$$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,0004563 \text{ m}$$

$$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$$

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 39,96 m/s

$$s/m = 0,3472$$

$$n = 0,1798$$

$$g_p = 3,758$$

$$C_g = 2,3049$$

seção	Z _i (m)	V _k (m/s)	Ca	A (m ²)	q ₀ (N/m ²)	F (N)	Braço (m)	M _{base} (Nm)
1	5	20,23	1,25	150	578,12	108397,68	2,5	270994,19
2	10	23,08	1,25	150	752,33	141062,43	7,5	1057968,24
3	15	24,92	1,25	150	877,66	164560,67	12,5	2057008,36
4	20	25,76	1,25	150	937,72	175822,39	17,5	3076891,77
5	25	27,46	1,25	150	1065,68	199815,22	22,5	4495842,49
6	30	28,43	1,25	150	1142,13	214149,69	27,5	5889116,38
7	35	29,28	1,25	150	1211,03	227068,67	32,5	7379731,89
8	40	28,80	1,25	150	1172,15	219777,98	37,5	8241674,38
9	45	30,71	1,25	150	1332,39	249822,83	42,5	10617470,21
10	50	31,33	1,25	150	1386,82	260027,91	47,5	12351325,79
11	55	31,90	1,25	150	1437,96	269618,19	52,5	14154954,95
12	60	29,51	1,25	150	1230,76	230766,88	57,5	13269095,75
13	65	32,93	1,25	150	1532,21	287288,63	62,5	17955539,51
14	70	33,40	1,25	150	1575,97	295493,97	67,5	19945842,90
15	75	33,84	1,25	150	1617,83	303343,47	72,5	21992401,35
16	80	33,77	1,25	150	1611,71	302194,73	77,5	23420091,35
17	85	34,65	1,25	150	1696,64	318119,70	82,5	26244874,86
18	90	35,03	1,25	150	1733,89	325104,90	87,5	28446679,03
19	95	35,39	1,25	150	1769,89	331853,45	92,5	30696444,05
20	100	34,68	1,25	150	1699,62	318678,08	97,5	31071112,40
21	105	36,07	1,25	150	1838,49	344717,47	102,5	35333541,16
22	110	36,39	1,25	150	1871,28	350865,43	107,5	37718034,25
23	115	36,70	1,25	150	1903,16	356842,48	112,5	40144778,66
24	120	35,28	1,25	150	1758,22	329666,98	117,5	38735869,57
25	125	37,29	1,25	150	1964,43	368330,07	122,5	45120433,09
26	130	37,57	1,25	150	1993,92	373860,72	127,5	47667242,00
27	135	37,84	1,25	150	2022,73	379261,01	132,5	50252083,91
28	140	35,86	1,25	150	1816,83	340655,87	137,5	46840182,70
29	145	38,35	1,25	150	2078,40	389700,72	142,5	55532352,42
30	150	38,60	1,25	150	2105,35	394753,55	147,5	58226148,64
31	155	38,84	1,25	150	2131,75	399703,00	152,5	60954707,97
32	160	37,55	1,25	150	1992,65	373622,57	157,5	58845555,04
33	165	39,31	1,25	150	2183,00	409312,74	162,5	66513320,61
34	170	39,53	1,25	150	2207,91	413982,47	167,5	69342064,47
35	175	39,75	1,25	150	2232,36	418567,81	172,5	72202947,00
36	180	39,96	1,25	150	2256,39	423072,62	177,5	75095389,69
								1141159711

$$I_f = 1,17485E-10$$

$$q = 0,0016759 \text{ rad}$$

$$M_m = 0,1341 \text{ Nm}$$

$$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,0007541 \text{ m}$$

$$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$$

VELOCIDADE NO TOPO DO PROTÓTIPO = 45,02 m/s

$$s/m = 0,3824$$

$$n = 0,1835$$

$$g_p = 3,764$$

$$C_g = 2,4392$$

seção	Z _i (m)	V _k (m/s)	Ca	A (m ²)	q ₀ (N/m ²)	F (N)	Braço (m)	M _{base} (Nm)
1	5	22,79	1,25	150	776,61	145614,39	2,5	364035,98
2	10	26,00	1,25	150	1010,64	189494,10	7,5	1421205,76
3	15	28,08	1,25	150	1178,99	221060,11	12,5	2763251,33
4	20	29,46	1,25	150	1298,05	243383,82	17,5	4259216,80
5	25	30,94	1,25	150	1431,57	268418,78	22,5	6039422,58
6	30	32,03	1,25	150	1534,27	287674,77	27,5	7911056,16
7	35	32,99	1,25	150	1626,82	305029,30	32,5	9913452,15
8	40	32,90	1,25	150	1618,81	303526,66	37,5	11382249,85
9	45	34,60	1,25	150	1789,84	335595,75	42,5	14262819,37
10	50	35,30	1,25	150	1862,96	349304,59	47,5	16591968,25
11	55	35,94	1,25	150	1931,67	362187,55	52,5	19014846,43
12	60	34,37	1,25	150	1766,50	331218,33	57,5	19045054,13
13	65	37,10	1,25	150	2058,27	385924,88	62,5	24120304,69
14	70	37,63	1,25	150	2117,05	396947,39	67,5	26793948,90
15	75	38,12	1,25	150	2173,29	407491,90	72,5	29543162,51
16	80	37,98	1,25	150	2156,49	404341,65	77,5	31336477,75
17	85	39,04	1,25	150	2279,15	427341,32	82,5	35255659,01
18	90	39,47	1,25	150	2329,20	436724,80	87,5	38213419,62
19	95	39,88	1,25	150	2377,55	445790,35	92,5	41235607,72
20	100	39,37	1,25	150	2318,02	434629,41	97,5	42376367,70
21	105	40,64	1,25	150	2469,71	463071,05	102,5	47464782,57
22	110	41,00	1,25	150	2513,76	471329,82	107,5	50667955,61
23	115	41,35	1,25	150	2556,58	479358,99	112,5	53927886,31
24	120	40,61	1,25	150	2465,71	462321,08	117,5	54322727,16
25	125	42,01	1,25	150	2638,88	494790,67	122,5	60611857,06
26	130	42,32	1,25	150	2678,51	502220,19	127,5	64033074,61
27	135	42,63	1,25	150	2717,20	509474,59	132,5	67505383,22
28	140	42,02	1,25	150	2640,40	495075,14	137,5	68072831,13
29	145	43,21	1,25	150	2791,99	523498,62	142,5	74598552,74
30	150	43,49	1,25	150	2828,19	530286,26	147,5	78217223,48
31	155	43,76	1,25	150	2863,65	536935,03	152,5	81882592,74
32	160	43,11	1,25	150	2778,97	521057,71	157,5	82066589,34
33	165	44,29	1,25	150	2932,50	549844,13	162,5	89349671,65
34	170	44,54	1,25	150	2965,96	556117,15	167,5	93149622,30
35	175	44,78	1,25	150	2998,81	562276,79	172,5	96992745,93
36	180	45,02	1,25	150	3031,08	568328,26	177,5	100878265,43
								1545585287

$$I_f = 1,17485E-10$$

$$q = 0,0022698 \text{ rad}$$

$$M_m = 0,1816 \text{ Nm}$$

$$d_{\text{Topo do Modelo}} = 0,0010214 \text{ m}$$

$$K_q = 80 \text{ Nm/rad}$$

Anexo F – Resposta Transversal pelo NBCC - 1985

VENTO INCIDINDO NA FACE DE MAIOR ÁREA

$V_{crítica}$ (m/s)	F(N/m)	Momento (Nm)	I_f	M_m (Nm)	K_q (Nm/rad)	q (rad)	d_{topo} do Modelo (m)	d_{topo} normalizado
100	3797059,8	41008245962	1,17E-10	4,817865	80	0,0602233	0,027084113	0,240747667

VENTO INCIDINDO NA FACE DE MENOR ÁREA

$V_{crítica}$ (m/s)	F(N/m)	Momento (Nm)	I_f	M_m (Nm)	K_q (Nm/rad)	q (rad)	d_{topo} do Modelo (m)	d_{topo} normalizado
42,86	249463,75	2694208467,64	1,2E-10	0,3165	80	0,0039566	0,001780476	0,023739675