

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC

***Modelagem Dinâmica Equivalente de
Edifícios Altos Submetidos à Ação do Vento***

Cristiano Augusto Trein

Dissertação para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

**Porto Alegre
Março de 2005**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC

***Modelagem Dinâmica Equivalente de
Edifícios Altos Submetidos à Ação do Vento***

Cristiano Augusto Trein

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

**Porto Alegre
Março de 2005**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de *Mestre em Engenharia* e aprovada em sua forma final pelos Orientadores e pela banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Prof. Acir Mércio Loredou-Souza
Ph.D., University of Western Ontario, Canadá
Orientador da dissertação

Prof. Mário José Paluch
D.Sc., UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador da dissertação

Prof. Américo Campos Filho
Coordenador do PPGEC / UFRGS

Banca Examinadora:

- *Prof. Moacir Kripka*
Doutor (D.Sc.) pela USP-EESC
Universidade de Passo Fundo
- *Prof. Marcelo Maia Rocha*
Dr.techn.- Universität Innsbruck, Áustria
PPGEC / UFRGS
- *Prof. Ronald Elwanger*
Doutor pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Programa de Engenharia Civil - UFRJ
PPGEC / UFRGS

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais - Ary José Trein e Antônia Laura Trein -, amigos e familiares, pelo apoio, confiança e compreensão; acima de tudo pelo incentivo que sempre me deram.

Ao PPGEC/UFRGS, pela oportunidade e pela qualidade de ensino disponibilizadas; ao meu orientador e paraninfo de graduação prof. Acir Mércio Loredou-Souza, que com sua infinita vocação docente incentivou-me e apoiou-me incondicionalmente durante todos os períodos desta jornada.

Aos meus amigos do LAC/UFRGS - o Doutorando Gustavo Núñez, pela prestação com que sempre atendeu aos meus pedidos de auxílio, bem como pela ajuda e orientação na condução dos ensaios em túnel de vento; o técnico Paulo Francisco Bueno, pelo auxílio fundamental na confecção e nos ajustes do modelo para os ensaios finais; o Engenheiro Élvis Carpeggiani, pela prestação em auxiliar na confecção dos modelos e pela ajuda na obtenção de informações preciosas para o desenvolvimento da Dissertação; o bolsista Aloisio Maggi Finn, pelo auxílio nos ensaios finais.

À CAPES, pelo auxílio através de bolsa de estudos, dada durante o início do curso; ao Centro Tecnológico de Mecânica de Precisão Plínio Gilberto Kroeff – CETEMP, pelos serviços de laboratório na aferição das molas e pela usinagem de peças para confecção dos modelos aeroelásticos.

À Fundação Desembargador Paulo Feitoza, pelo apoio e pela compreensão; à Stabile Engenharia, que através da pessoa de seu Diretor – Engº Paulo Roberto Marcondes de Carvalho – teve presença marcante em minha vida acadêmica e profissional; ao Engenheiro e amigo Leandro Fleck Fadel Miguel, pelas valiosas dicas e orientações, pelo acompanhamento dos ensaios em túnel de vento e, principalmente, pela vontade de ajudar e colaborar que sempre manifestou.

Enfim, a todos aqueles que de uma maneira ou de outra viabilizaram e contribuíram positivamente para que eu pudesse completar mais esta etapa da minha vida acadêmica e pessoal.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xv
RESUMO.....	xix
ABSTRACT.....	xx
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 GENERALIDADES.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	11
2 CONCEITOS AERODINÂMICOS.....	13
2.1 VENTO.....	13
2.1.1 Velocidade média do vento.....	15
2.1.2 Abordagem matemática da turbulência do vento.....	19
2.2 AÇÕES DO VENTO.....	22
2.2.1 Escoamento ao redor de Edifícios.....	22
2.2.2 Respostas de Edifícios à ação dos ventos.....	23
2.2.2.1 Resposta Longitudinal.....	25
2.2.2.2 Resposta Transversal.....	26
2.2.2.2.1 Desprendimento de Vórtices.....	27
2.2.2.2.2 Galope.....	30
2.2.3 Acelerações.....	31
2.2.4 Ações Mitigadoras.....	32
2.3 AMORTECIMENTO.....	33
2.3.1 Amortecimento Estrutural.....	34
2.3.2 Amortecimento Aerodinâmico.....	37
3 MODELAGEM – FUNDAMENTOS E APLICAÇÃO.....	39
3.1 MODELAGEM AEROELÁSTICA.....	39
3.1.1 Técnicas de Modelagem aeroelástica.....	41
3.1.1.1 Modelos Aeroelásticos do tipo <i>Stick</i>	42
3.1.1.2 Modelos Aeroelásticos com múltiplos graus de liberdade.....	44
3.1.1.3 Outros tipos de Modelos Aeroelásticos.....	45
3.1.2 Balança de Força de alta frequência.....	47
3.1.3 Considerações sobre modelagem aeroelástica.....	48
3.2 LEIS DE SEMELHANÇA.....	50
3.2.1 Geometria.....	52
3.2.2 Massa.....	53
3.2.2.1 Translação.....	53
3.2.2.2 Rotação – Momento de Inércia de Massa.....	53
3.2.3 Tempo.....	54
3.2.4 Rigidez.....	54
3.2.5 Considerações.....	55
3.3 O PROTÓTIPO - CAARC Standard Tall Building.....	55
3.3.1 Características.....	56
3.4 O MODELO.....	57
3.4.1 Parte Mecânica.....	57
3.4.1.1 Rigidez do Modelo.....	60

3.4.1.2	Momento de Inércia de Massa	62
3.4.1.2.1	Fuste	62
3.4.1.2.2	Eixo	63
3.4.1.2.3	Rolamentos	63
3.4.1.2.4	Mola.....	63
3.4.1.3	Amortecimento.....	63
3.4.2	Casca Externa.....	64
4	ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO.....	67
4.1	TÚNEL DE VENTO	68
4.1.1	Determinação da velocidade do vento no túnel.....	69
4.1.2	Simulação do vento natural.....	70
4.1.3	Equipamento utilizado nos ensaios.....	73
4.2	PREPARAÇÃO DO MODELO.....	74
4.2.1	Leis de Semelhança.....	74
4.2.2	Montagem do Sistema Mecânico.....	75
4.2.3	Ajuste da Rigidez e Inércia de Massa.....	76
4.2.3.1	Configuração 1	79
4.2.3.2	Configuração 2	82
4.2.3.3	Configuração 3	83
4.2.3.4	Configuração 4	84
4.2.3.5	Configuração 5	84
4.2.3.6	Leis de Semelhança.....	85
4.2.4	Ajuste do Amortecimento.....	86
4.2.5	Alinhamento e regulagem do modelo no túnel.....	88
4.3	ENSAIOS	90
4.3.1	Tomada de dados.....	90
4.3.1.1	Corrida 0L23	91
4.3.1.2	Corrida 0T23	92
4.3.1.3	Corrida TT23.....	93
4.3.1.4	Corrida TL23.....	93
4.3.1.5	Corrida TL19.....	94
4.3.1.6	Corrida TT19.....	94
4.3.1.7	Corrida 0T19.....	95
4.3.1.8	Corrida 0L19.....	96
4.3.2	Obtenção dos deslocamentos.....	96
5	ANÁLISE.....	103
5.1	APRESENTAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS.....	105
5.1.1	Norma Brasileira – NBR-6123/88.....	105
5.1.1.1	Resposta Longitudinal.....	105
5.1.1.2	Resposta Transversal.....	109
5.1.2	Norma Canadense – NBCC/85.....	109
5.1.2.1	Resposta Longitudinal.....	109
5.1.2.2	Resposta Transversal.....	112
5.1.3	Thepmongkorn et al. (1999) - A two-degree-of freedom base hinged aeroelastic model for response predictions.....	113
5.1.3.1	Resposta Longitudinal.....	115
5.1.3.2	Resposta Transversal.....	116
5.1.4	Kwok (1988) – Effect of Building Shape on Wind-induced Response of Tall Buildings.....	117
5.1.4.1	Resposta Longitudinal.....	118

5.1.4.2	Resposta Transversal.....	120
5.1.5	Miguel (2003) – Estudo teórico e experimental de um edifício alto submetido à ação dinâmica do vento	121
5.1.5.1	Resposta Longitudinal.....	121
5.1.5.2	Resposta Transversal.....	122
5.1.6	Ensaaios em túnel de vento	122
5.1.6.1	Resposta Longitudinal.....	122
5.1.6.1.1	Vento com $p=0,19$	122
5.1.6.1.2	Vento com $p=0,23$	123
5.1.6.2	Resposta Transversal.....	124
5.1.6.2.1	Vento com $p=0,19$	124
5.1.6.2.2	Vento com $p=0,23$	125
5.2	ANÁLISE DOS DADOS DE ENSAIO	126
5.2.1	Vento com $p = 0,19$	126
5.2.1.1	Resposta Longitudinal para vento incidindo na face maior	126
5.2.1.2	Resposta Longitudinal para vento incidindo na face menor	128
5.2.1.3	Resposta Transversal para vento incidindo na face maior	129
5.2.1.4	Resposta Transversal para vento incidindo na face menor	131
5.2.2	Vento com $p = 0,23$	132
5.2.2.1	Resposta Longitudinal para vento incidindo na face maior	132
5.2.2.2	Resposta Longitudinal para vento incidindo na face menor	134
5.2.2.3	Resposta Transversal para vento incidindo na face maior	136
5.2.2.4	Resposta Transversal para vento incidindo na face menor	137
5.2.3	Análise desconsiderando os resultados da norma canadense	138
5.2.3.1	Vento com $p = 0,19$	139
5.2.3.2	Vento com $p = 0,23$	141
5.3	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	143
6	CONCLUSÕES	145
6.1	TRABALHOS FUTUROS.....	146
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147
	ANEXO I - Cálculo da Resposta Longitudinal pela NBR-6123	153
	ANEXO II - Cálculo da Resposta Longitudinal pelo NBC/85	154

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Turbilhões e perfil de velocidades na camada limite atmosférica (Sparling, 1997).....	14
FIGURA 2.2 – Estrutura turbulenta do vento (Sherlock & Stout, 1937).....	15
FIGURA 2.3 – Variação da velocidade do vento ao longo do tempo (Sparling, 1997).....	16
FIGURA 2.4 – Gradiente de velocidades do vento (Sparling, 1997).....	17
FIGURA 2.5 – Variação da altura da camada limite, conforme o terreno (Davenport,1987).....	19
FIGURA 2.6 – Perfis de intensidade de turbulência conforme distintos procedimentos normativos (Zhou et al., 2002)	21
FIGURA 2.7 – Ação do vento em seções prismáticas e em edificações alteadas (Sparling, 1997).....	22
FIGURA 2.8 – Ação do vento, onde F_y é a resposta transversal e F_x é a resposta longitudinal.....	23
FIGURA 2.9 – Trajetória do topo de um edifício cujas respostas longitudinais e transversais se equívalem (CTBUH, 1978?)	25
FIGURA 2.10 – Trajetória do topo de um edifício cuja resposta transversal é dominante (CTBUH, 1978?)	25
FIGURA 2.11 – Desprendimento de vórtices	28
FIGURA 2.12 – Número de Strouhal para diferentes formas de seções transversais (Blessmann, 1990).....	29
FIGURA 2.13 – Vibração por desprendimento de vórtices (Kawai, 1992).....	29
FIGURA 2.14 – Influência do amortecimento estrutural para regime sub-crítico (Blessmann, 1990).....	35
FIGURA 3.1 – Deformação na malha estrutural de um edifício alto, frente à ação de carregamentos laterais (Ellwanger, 1996).....	41
FIGURA 3.2 – <i>CAARC Standard Tall Building</i> modelado com <i>stick</i> (Kwok et al., 1999).....	43
FIGURA 3.3 – Modelo aeroelástico com diversos GDL's (Isyumov, 1982).....	44
FIGURA 3.4 – Representação esquemática do BHA: (a) BHA, com 2 GDL; (b) modelo de edifício (Thepmonkorn et al., 1999)	45
FIGURA 3.5 – <i>CAARC Standard Tall Building</i> modelado com <i>BHA</i> (Thepmonkorn et al., 1999)	46

FIGURA 3.6 – Modelo Rígido (Matsumoto, 1986)	46
FIGURA 3.7 – Modelos aeroelásticos utilizados por Boggs (1992)	47
FIGURA 3.8 – Modelagem do modo de vibração em modelos aeroelásticos (Zhou & Kareem, 2003)	49
FIGURA 3.9 – <i>CAARC Standard Tall Building</i>	57
FIGURA 3.10 – Parte mecânica do modelo	58
FIGURA 3.11 – Parte mecânica do modelo	59
FIGURA 3.12 – Mancal de Epoxi	59
FIGURA 3.13 – Representação esquemática do <i>Stick</i>	61
FIGURA 3.14 – Equilíbrio de momentos no <i>Stick</i>	61
FIGURA 3.15 – Esquema estrutural para verificação da rigidez do <i>Stick</i>	61
FIGURA 3.16 – Fuste	62
FIGURA 3.17 – Envoltória da casca externa do modelo	64
FIGURA 3.18 – Seção transversal do modelo geométrico	64
FIGURA 3.19 – Corte A-A da Fig. 3.18: longitudinal interno	66
FIGURA 3.20 – Reforço RH-1	66
FIGURA 4.1 – Túnel de Vento <i>Prof. Joaquim Blessmann</i>	67
FIGURA 4.2 – Circuito aerodinâmico do Túnel de Vento <i>Prof. Joaquim Blessmann</i>	68
FIGURA 4.3 – Micromanômetro à água tipo BETZ	69
FIGURA 4.4 – Características do vento deslizante e turbulento com expoente $p = 0,19$	71
FIGURA 4.5 – Características do vento deslizante e turbulento com expoente $p = 0,23$	72
FIGURA 4.6 – Equipamento utilizado nos ensaios	73
FIGURA 4.7 – Base de transição entre <i>stick</i> e base rígida	75
FIGURA 4.8 – Eixo do <i>stick</i> em relação ao chão do túnel	75
FIGURA 4.9 – Sistema mecânico fixado sobre a base rígida (tripé)	75
FIGURA 4.10 – Fixação entre <i>base de transição</i> , base rígida e base do modelo	76
FIGURA 4.11 – Fixação do acelerômetro na base	77
FIGURA 4.12 – Fixação do acelerômetro no modelo	77

FIGURA 4.13 – Configuração 1.....	80
FIGURA 4.14 – Acréscimo de massa para a Configuração 2.....	82
FIGURA 4.15 – Configuração 2.....	83
FIGURA 4.16 – Mastique aplicado sobre a mola.....	87
FIGURA 4.17 – Registro de vibração livre obtido pelo programa HP VEE 3.2, onde o modelo não se encontra em sua configuração final.....	87
FIGURA 4.18 – Classificação dos ensaios.....	89
FIGURA 4.19 – Modelo ajustado no túnel, pronto para ensaio, visto de fora.....	90
FIGURA 4.20 – Modelo ajustado no túnel, pronto para ensaio, visto de dentro.....	90
FIGURA 4.21 – Regulagem do amplificador.....	97
FIGURA 4.22 – Saturação nas leituras.....	98
FIGURA 5.1 – Deslocamentos no topo do protótipo (<i>CAARC Standard Tall Building</i>), em função da velocidade reduzida, para vento incidindo na face menor: (a) resposta longitudinal; (b) resposta transversal (Thepmonkorn, 1999).....	113
FIGURA 5.2 – Deslocamentos no topo do protótipo (<i>CAARC Standard Tall Building</i>), em função da velocidade reduzida, para vento incidindo na face maior: (a) resposta longitudinal; (b) resposta transversal (Thepmonkorn, 1999).....	114
FIGURA 5.3 – Resposta Longitudinal no topo do protótipo (<i>CAARC Standard Tall Building</i>) para vento incidindo na face maior: (a) vento com $p=0,15$; (b) vento com $p=0,27$ (Kwok, 1988).....	117
FIGURA 5.4 – Resposta Transversal no topo do protótipo (<i>CAARC Standard Tall Building</i>) para vento incidindo na face maior: (a) vento com $p=0,15$; (b) vento com $p=0,27$ (Kwok, 1988).....	118
FIGURA 5.5 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face maior.....	128
FIGURA 5.6 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face menor.....	129
FIGURA 5.7 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face maior.....	130
FIGURA 5.8 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face menor.....	132
FIGURA 5.9 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face maior.....	134

FIGURA 5.10 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face menor.....	135
FIGURA 5.11 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face maior	137
FIGURA 5.12 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face menor.....	138
FIGURA 5.13 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face maior	139
FIGURA 5.14 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face menor.....	139
FIGURA 5.15 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face maior	140
FIGURA 5.16 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face menor.....	140
FIGURA 5.17 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face maior	141
FIGURA 5.18 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face menor.....	141
FIGURA 5.19 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face maior	142
FIGURA 5.20 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face menor.....	142

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Parâmetros para perfis de velocidades média do vento.....	18
TABELA 2.2 – Coeficientes para cálculos da intensidade da turbulência por distintos procedimentos normativos (Zhou et al., 2002)	21
TABELA 3.1 – Ensaio de Tração na mola.....	60
TABELA 4.1 – Leis de semelhança antes da verificação da rigidez do modelo.....	74
TABELA 4.2 – Leis de semelhança após verificação da rigidez do modelo	85
TABELA 4.3 – Ensaio para determinação do amortecimento	88
TABELA 4.4 – Corrida para vento 0L23	91
TABELA 4.5 – Corrida para vento 0T23	92
TABELA 4.6 – Corrida para vento TT23	93
TABELA 4.7 – Corrida para vento TL23	93
TABELA 4.8 – Corrida para vento TL19.....	94
TABELA 4.9 – Corrida para vento TT19.....	95
TABELA 4.10 – Corrida para vento 0T19	95
TABELA 4.11 – Corrida para vento 0L19	96
TABELA 4.12 – Vento $p=0,23$ incidindo na face maior, resposta longitudinal (0L23)	99
TABELA 4.13 – Vento $p=0,23$ incidindo na face maior, resposta transversal (0T23)	99
TABELA 4.14 – Vento $p=0,23$ incidindo na face menor, resposta transversal (TT23).....	100
TABELA 4.15 – Vento $p=0,23$ incidindo na face menor, resposta longitudinal (TL23).....	100
TABELA 4.16 – Vento $p=0,19$ incidindo na face menor, resposta longitudinal (TL19).....	101
TABELA 4.17 – Vento $p=0,19$ incidindo na face menor, resposta transversal (TT19).....	101
TABELA 4.18 – Vento $p=0,19$ incidindo na face maior, resposta transversal (0T19)	102
TABELA 4.19 – Vento $p=0,19$ incidindo na face maior, resposta longitudinal (0L19)	102
TABELA 5.1 – Deslocamentos longitudinais no topo do protótipo, conforme NBR-6123. Vento com $p=0,19$ incidindo na face maior	108

TABELA 5.2 – Deslocamentos longitudinais no topo do protótipo, conforme NBR-6123. Vento com $p=0,23$ incidindo na face maior	108
TABELA 5.3 – Deslocamentos longitudinais no topo do protótipo, conforme NBR-6123. Vento com $p=0,19$ incidindo na face menor	108
TABELA 5.4 – Deslocamentos longitudinais no topo do protótipo, conforme NBR-6123. Vento com $p=0,23$ incidindo na face menor	109
TABELA 5.5 – Deslocamentos longitudinais no topo do protótipo, conforme NBCC. Vento com $p=0,19$ incidente na face maior	111
TABELA 5.6 – Deslocamentos longitudinais no topo do protótipo, conforme NBCC. Vento com $p=0,23$ incidente na face maior	111
TABELA 5.7 – Deslocamentos longitudinais no topo do protótipo, conforme NBCC. Vento com $p=0,19$ incidente na face menor.....	111
TABELA 5.8 – Deslocamentos longitudinais no topo do protótipo, conforme NBCC. Vento com $p=0,23$ incidente na face menor.....	112
TABELA 5.9 – Deslocamentos transversais no topo do protótipo, conforme NBCC/85	112
TABELA 5.10 – Deslocamentos longitudinais topo do protótipo; vento incidente face maior	115
TABELA 5.11 – Deslocamentos longitudinais topo do protótipo; vento incidente face menor.....	115
TABELA 5.12 – Deslocamentos transversais topo do protótipo; vento incidente face maior	116
TABELA 5.13 – Deslocamentos transversais topo do protótipo; vento incidente face menor.....	116
TABELA 5.14 – Deslocamentos long. topo protótipo vento incidente face maior.....	119
TABELA 5.15 – Deslocamentos long. topo protótipo vento incidente face menor.....	119
TABELA 5.16 – Deslocamentos transversais topo do protótipo vento incidente face maior	120
TABELA 5.17 – Deslocamentos transversais topo do protótipo vento incidente face menor.....	120
TABELA 5.18 – Deslocamentos longitudinais topo protótipo; vento incidente face maior	121
TABELA 5.19 – Deslocamentos longitudinais topo protótipo; vento incidente face menor.....	121
TABELA 5.20 – Deslocamentos transversais topo protótipo; vento incidente face maior	122

TABELA 5.21 – Deslocamentos transversais topo protótipo; vento incidente face menor.....	122
TABELA 5.22 – Resposta longitudinal vento $p=0,19$ incidindo na face maior (corrida 0L19).....	123
TABELA 5.23 – Resposta longitudinal vento $p=0,19$ incidindo na face menor (corrida TL19).....	123
TABELA 5.24 – Resposta longitudinal vento $p=0,23$ incidindo na face maior (corrida 0L23).....	123
TABELA 5.25 – Resposta longitudinal vento $p=0,23$ incidindo na face menor (corrida 7TL23).....	124
TABELA 5.26 – Resposta transversal vento $p=0,19$ incidindo na face maior (corrida 0T19).....	124
TABELA 5.27 – Resposta transversal para vento $p=0,19$ incidindo na face menor (corrida TT19).....	125
TABELA 5.28 – Resposta transversal para vento $p=0,23$ incidindo na face maior (corrida 0T23).....	125
TABELA 5.29 – Resposta transversal para vento $p=0,23$ incidindo na face menor (corrida TT23).....	125
TABELA 5.30 – Resumo dos resultados vento com $p=0,19$ incidindo na face maior do protótipo.....	127
TABELA 5.31 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face maior.....	127
TABELA 5.32 – Resumo dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face menor.....	128
TABELA 5.33 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face menor.....	129
TABELA 5.34 – Resumo dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face maior.....	130
TABELA 5.35 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face maior.....	130
TABELA 5.36 – Resumo dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face menor.....	131
TABELA 5.37 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face menor.....	131

TABELA 5.38 – Resumo dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face maior	132
TABELA 5.39 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face maior	133
TABELA 5.40 – Resumo dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face menor.....	134
TABELA 5.41 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face menor.....	135
TABELA 5.42 – Resumo dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face maior	136
TABELA 5.43 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face maior	136
TABELA 5.44 – Resumo dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face menor.....	137
TABELA 5.45 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face menor.....	138

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS:

B	largura de uma edificação (dimensão perpendicular à ação do vento)
C_e	<i>exposure factor</i> – fator de exposição, utilizado no NBCC/85
C_g	<i>gust factor</i> – fator de rajada, utilizado no NBCC/85
D	<i>profundidade</i> uma edificação (dimensão paralela à ação do vento)
E	módulo de elasticidade
F	força
F_{eq}	força horizontal equivalente no topo do protótipo devido ao momento na base
F_X	resposta de um edifício na direção da ação do vento
F_Y	resposta de um edifício na direção transversal à ação do vento
F_m	força na mola do modelo
H	altura do protótipo
$I(z)$	intensidade da turbulência para uma determinada cota z
I_M	momento de inércia de massa
$I_{M_{acel}}$	momento de inércia de massa do acelerômetro no modelo
I_{Mm}	momento de inércia de massa do modelo no momento do ensaio
I_{Ms}	momento de inércia de massa do modelo, considerando-se apenas casca e <i>stick</i>
K	rigidez da mola
K_{eq}	rigidez equivalente da mola , considerando-se fuste do <i>stick</i> informável
K_p	rigidez do protótipo
L	dimensão linear
L_m	dimensão linear no modelo
L_p	dimensão linear no protótipo
M	momento
M_b	momento na base do protótipo

P^*	carregamento generalizado
P_a	pressão atmosférica
S	sinal em <i>bytes</i>
S_t	número de Strouhal
T	intervalo de tempo sobre o qual é calculada a velocidade média
U_g	velocidade gradiente
\bar{U}	velocidade média
\bar{U}_D	velocidade média para situações de projeto
\bar{U}_H	componente horizontal da velocidade média
\hat{U}_D	velocidade de pico para projeto
$U(t)$	velocidade instantânea
$\bar{U}_{(z)}$	velocidade média a uma determinada cota do terreno
U_{10}	velocidade média a uma cota de 10 m
V	velocidade do vento
V_0	velocidade básica do vento
V_{CR}	velocidade crítica, conforme Strouhal
V_m	velocidade do vento no modelo
V_p	velocidade do vento de projeto
V_{RED}	velocidade reduzida
V_{ref}	velocidade média do vento no túnel na altura de referência
$V_{(z)}$	velocidade média do vento no túnel na altura z

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS:

a	aceleração
c^*	amortecimento generalizado
e	tensão
f	freqüência de oscilação

f_m	freqüência do modelo
f_n	freqüência de natural de uma estrutura
f_p	freqüência do protótipo
f_s	freqüência de deprendimento de um par de vórtices em um edifício
g	aceleração da gravidade, 9,81 m/s ²
h	altura do modelo
k'	rigidez da mola após montada no <i>stick</i>
k''	rigidez de cada uma das molas formadas após montagem no <i>stick</i>
k'''	rigidez equivalente da mola, considerando-se a deformação do fuste do <i>stick</i>
k^*	rigidez generalizada
k_0	coeficiente de correlação entre pressão dinâmica, q e Δp_a
k_p	rigidez do protótipo
k_m	rigidez do modelo
m	comprimento
m^*	massa generalizada
m	massa
p	expoente da <i>Lei Potencial</i>
\hat{p}	pressão máxima de projeto
q	pressão média do vento
q	raio
$u(t)$	parcela flutuante da velocidade do vento
u_{max}	pico da parcela flutuante da velocidade do vento
z	cota sobre a superfície terrestre
z_0	altura característica da rugosidade do terreno
z_{ref}	altura de referência no túnel

LETRAS GREGAS MAIÚSCULAS:

Δp_a	diferencial de pressão estática (pressão de referência)
ΔI_M	acréscimo de momento de inércia de massa
Δ_{topo}	deslocamento no topo do protótipo ou do modelo
ΣM_0	somatória de momentos no ponto 0

LETRAS GREGAS MINÚSCULAS:

δ	Flecha
ε	erro
λ_I	escala de momento de inércia de massa
λ_K	escala de rigidez
λ_L	escala geométrica
λ_M	escala de massas
λ_m	escala de massa distribuída linearmente
λ_{pb}	relação entre massas específicas de modelo e protótipo
λ_T	escala de tempo
λ_V	escala de velocidades
λ_ζ	escala de amortecimento
μ	viscosidade dinâmica do escoamento
ρ	massa específica do ar
ρ_s	massa específica da edificação
θ	ângulo
ζ	razão de amortecimento crítico estrutural
ζ_a	amortecimento aerodinâmico

RESUMO

A atual tendência que se apresenta no cenário construtivo mundial compreende a exploração cada vez mais intensa dos espaços urbanos, através de edificações que buscam maximizar a relação *área construída / espaço urbano disponível*. Desta forma, a dimensão vertical dos edifícios vem tornando-se cada vez mais pronunciada. Associados a isto, o desenvolvimento de materiais mais resistentes e de peso específico reduzido, bem como o uso de técnicas construtivas mais eficientes, conduzem mais e mais a estruturas leves e flexíveis, sujeitas aos efeitos dinâmicos do vento.

A eficiência, a segurança e os custos da construção estão diretamente atrelados à exatidão com que estes efeitos dinâmicos do vento são estimados e considerados no momento do projeto destas edificações. As técnicas analíticas para a sua avaliação, quando verificadas através de medições em escala real, têm se mostrado anti-econômicas, uma vez que superestimam o valor das respostas, a favor da segurança.

Por outro lado, o uso de técnicas experimentais, através da condução de ensaios em túnel de vento com modelos reduzidos, pode-se mostrar bastante eficiente, em termos de previsão de resultados. Essas técnicas precisam ser ainda melhoradas, de modo a incorporar o conhecimento que vem sendo gerado, acompanhando as mudanças pelas quais a Engenharia Civil vem passando.

Neste contexto este trabalho se insere. Utilizando como base de conhecimento o trabalho desenvolvido por outros pesquisadores, um dispositivo aeroelástico para ensaios de edifícios altos frente à ação dinâmica do vento é proposto, construído e testado.

Os resultados dos ensaios são aqui comparados com outros estudos realizados sobre o mesmo protótipo, bem como com os procedimentos indicados pela Norma Brasileira NBR-6123/88 e pelo *Supplement to the NBCC/85* do Canadá. Indicam a coerência e a viabilidade de utilização das técnicas de modelagem aqui propostas.

ABSTRACT

The current trend in the world of construction is the ever growing exploitation of the urban spaces by the usage of buildings that maximize the relation between *built area* and *available urban space*. That way, the vertical dimension of buildings is becoming more and more expressive. This, allied with the development of more resistant and lightweight materials as well as efficient construction techniques, has lead to lighter and more flexible structures. These structures are subject to the dynamic effects of wind.

The efficiency, safety and costs of this kind of buildings are directly connected to the precision that those wind dynamic effects are estimated and considered during the design. The analytic techniques for these estimations, when verified through real scale measures, have shown to be economically impracticable, because they overestimate the responses for safety.

On the other hand, the usage of experimental techniques, e.g. wind tunnel tests with reduced models, can show itself to be very efficient in terms of results prediction. These techniques still have room for improvement by incorporating the knowledge that is being created by the changes in modern Civil Engineering.

This work is inserted in this scenario. Using other researches as a knowledge base, an aeroelastic device for wind tunnel tests of tall buildings subject to wind dynamic loads is proposed, built and tested.

The tests results are compared with other researches conducted with similar prototype, as well as with the procedures stated in the Brazilian Code NBR-6123/88 and in the *Supplement to the NBCC/85*. The results certify the consistence and feasibility of using the modeling techniques proposed here.

1 INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

Cada vez mais, o assunto *Edifícios Altos* tem ganhado destaque no âmbito da Engenharia Civil, uma vez que otimizam espaços e são uma solução para a explosão demográfica nas grandes cidades. Ano após ano, edifícios cada vez maiores têm sido construídos, incorporando tecnologias avançadas e técnicas modernas de construção e de projeto.

Na esteira dessa evolução, muitos problemas foram surgindo e sendo solucionados, na medida em que se tornavam impeditivos ao avanço para o alto. Sistemas de água, contra incêndio e elevadores, entre outras coisas, precisam ser projetados e dimensionados de maneira adequada. Baseando-se nisto, a última definição dada pelo *Council on Tall Buildings and Urban Habitats* (CTBUH) diz que um edifício pode ser considerado alto quando todos os seus sistemas são especiais devido ao seu porte.

Além de necessários, em certos contextos, estas edificações acabam tornando-se ferramentas de ostentação para grandes empresas e motivo de orgulho para os profissionais envolvidos na sua construção, provocando inclusive disputas ao redor do mundo.

Como um marco histórico, pode-se citar o *Empire State Building*, que deteve por mais de 40 anos o título de edifício mais alto do mundo, sobrepondo-se em 60 metros à marca do recordista da época, o prédio da sede corporativa da Chrysler, em Nova Iorque, com 319 metros de altura.

Os primeiros edifícios do século XIX eram construídos em alvenaria, com paredes grossas, sendo extremamente rígidos. Na medida em que subiam, foram impondo a necessidade de paredes cada vez mais robustas, de maneira que os andares inferiores acabavam por ter suas áreas úteis prejudicadas. O aço, o concreto armado e o concreto de alto desempenho - materiais alternativos na época - foram, então, sendo incorporados ao contexto construtivo.

Com o passar dos anos, outros materiais surgiram, levando a uma redução cada vez mais acentuada das estruturas portantes. Materiais de alta performance, conexões soldadas e fachadas leves atuando apenas como tapamento sem contribuição para a resistência e rigidez do conjunto, levaram a edificações mais esbeltas, flexíveis e leves, com amortecimento reduzido. A maior confiança nos métodos de cálculo e nos materiais utilizados contribuiu, ainda, para a redução dos altos coeficientes de segurança utilizados, que camuflavam os efeitos dinâmicos.

Com estas mudanças nos conceitos estruturais, os efeitos dinâmicos do vento começaram a ser sentidos. Sendo assim, um número crescente de casos em que as respostas induzidas pelo vento tornavam-se importantes foi aparecendo.

Até meados dos anos 60, as considerações no projeto estrutural das forças devidas ao vento apenas levavam em conta os fatores meteorológicos, climatológicos e aerodinâmicos estáticos, desconsiderando totalmente as características mecânicas e estruturais das edificações, como sua rigidez, seu fator de amortecimento e sua distribuição de massas.

Atualmente, muitas normas de projeto já contemplam procedimentos para a previsão das respostas dinâmicas. Podem-se citar como exemplos a NBR-6123/88 no Brasil, o NBCC/85 no Canadá e o AS1170.2-1989 na Austrália, que estipulam, entre outras coisas, que estruturas com frequência natural de 1 Hz ou menos devem ser projetadas através de análise dinâmica.

Métodos analíticos alternativos aos procedimentos normalizados têm sido elaborados por diversos pesquisadores, bem como programas computacionais que incorporam alguns deles, a exemplo do *SkyDyFe*, desenvolvido por van Oosterhout (1996). Porém, a perfeita modelagem analítica das interações vento-estrutura é matematicamente impraticável e, desta forma, aproximações acabam sendo feitas.

Em geral, os métodos analíticos, normalizados ou não, superestimam o valor da resposta, favorecendo a segurança; em contrapartida prejudicam as incorporações, na medida em que imprimem custos maiores de construção.

Poucas comparações em escala natural com os valores sugeridos pelas normas existem; porém a magnitude dos erros encontrados nestas medições sugere que há espaço para melhorias consideráveis nestes processos analíticos. A existência destas discrepâncias não significa que os

códigos contenham erros, mas sim aponta para áreas onde o conhecimento está pouco desenvolvido e que, devido às complexidades matemáticas inerentes a alguns métodos, uma equivocada ilusão de precisão se faz presente. A verdade é que os efeitos aerodinâmicos em edifícios altos ainda não estão bem entendidos (Cooper et al., 1997).

Cada vez mais, as estimativas das respostas dinâmicas de edifícios altos frente à ação dos ventos têm sido obtidas com o auxílio de ensaios em túneis de vento, em detrimento dos processos analíticos. Desta forma é possível que se obtenha uma previsão mais apurada dos carregamentos, resultando numa racionalização da estrutura, com conseqüente redução nos custos de produção.

Um dos primeiros ensaios em túnel de vento aplicados à engenharia civil data de meados da década de 60, em decorrência do projeto do *World Trade Center*, em Nova Iorque (1972), sendo considerado um divisor de águas. Desde então, diversos edifícios altos vêm sendo projetados com o seu auxílio, tais como o *Sears Towers* em Chigaco (1974) e as duas torres gêmeas *Petronas* em Kuala Lumpur (1998). Porém, estudos teóricos e experimentais aerodinâmicos têm sido conduzidos desde o início do século XIX, ganhando força maior por volta de 1930, época na qual a construção dos arranha-céus deu um salto considerável.

É óbvio que as medições em escala natural não sofrem de nenhuma interferência devido a erros de modelagem de parâmetros como o número Reynolds, a turbulência, a intensidade e escala de simulação do vento, ou até mesmo de efeitos devido ao bloqueio exagerado da seção de escoamento do túnel de vento, coisas que podem ocorrer em escala reduzida. Entretanto, são custosos e demandam muito tempo para a sua execução, apresentando dificuldades no controle do escoamento, tais como pressões de referência dinâmica, estratificação térmica, etc, que inevitavelmente obscurecem os dados observados. Têm, também, maiores chances de apresentar erros, comparando-se com ensaios em túnel de vento bem controlados (Hölscher & Niemann, 1998).

Todavia, as observações em protótipos bem executadas e analisadas têm contribuído consideravelmente para o entendimento das características do vento natural, em particular dos efeitos de turbulência, levando a um aperfeiçoamento cada vez maior das técnicas de simulação em túneis de vento.

Estas técnicas têm evoluído de maneira veloz e consistente nos últimos anos, após os estudos pioneiros de alguns pesquisadores, citando-se Davenport como exemplo. Destaque à Modelagem Aeroelástica tem sido dado de maneira intensa e diversos dispositivos têm sido desenvolvidos e utilizados em estudos de edifícios altos. Entretanto, ainda há muito espaço para pesquisa e desenvolvimento, num campo de extrema importância para a manutenção da segurança e bem-estar dos usuários de um dos mais desafiadores frutos da Engenharia Civil, os edifícios altos.

1.2 OBJETIVOS

Devido à necessidade crescente da utilização de ensaios em túnel de vento para a determinação das respostas dinâmicas de edifícios altos frente à ação do vento, faz-se necessário o domínio de técnicas de modelagem aeroelástica eficientes, de baixo custo e de fácil utilização, que forneçam resultados apurados e com a agilidade necessária.

Neste contexto, busca-se o desenvolvimento de um dispositivo aeroelástico que simule as propriedades geométricas e dinâmicas de edifícios altos para ensaios em túnel de vento.

Um projeto é proposto e executado, resultando na construção de um modelo aeroelástico de um protótipo-padrão, já utilizado em outras pesquisas. Este modelo é ensaiado em túnel de vento, fornecendo respostas dinâmicas na direção longitudinal e transversal à ação do vento. Desta forma puderam-se comparar os resultados com a bibliografia existente e validar-se o modelo aeroelástico sugerido.

Com base no acima exposto, o objetivo deste trabalho encerra um estudo dinâmico de estruturas alteadas, levando ao domínio das tecnologias utilizadas em modelagem aeroelástica com modelos do tipo *stick*.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O assunto *Modelagem Aeroelástica de Edifícios Altos* já vem sendo estudado há alguns anos, por diversos pesquisadores, levando à existência de um acervo bibliográfico considerável.

Relacionam-se, a seguir, algumas pesquisas desenvolvidas na área abordada neste trabalho, de forma que se justifiquem os estudos aqui apresentados.

a) Melbourne (1980) – Com a utilização de um modelo em escala reduzida, os efeitos aerodinâmicos num modelo do *CAARC Standard Tall Building* foram avaliados e comparados com estudos feitos anteriormente. Os resultados apresentados situaram-se dentro das tolerâncias experimentais.

b) Abdel-Rohman (1983) – Este estudo retrata as dificuldades e as incertezas em se modelar a interação entre edifícios altos e vento. Apresenta uma técnica de controle de vibrações através da inserção de aletas no escoamento, durante condições críticas de vento. Os resultados mostram a eficiência da técnica exposta, onde reduções da ordem de 25% nas acelerações são atingidas, para um edifício de 305 m de altura.

c) Tanaka & Mak (1983) – A eficiência de um amortecedor de massa sintonizada em suprimir os efeitos de movimentação em edifícios altos foi estudada através de análise matemática e ensaios em túnel de vento. Um modelo aeroelástico do *CAARC Standard Tall Building*, na escala 1:1000, foi escolhido para os testes. Mesmo em uma escala tão reduzida, os resultados dos ensaios apontaram grande concordância com ensaios anteriormente executados por outros pesquisadores com o mesmo protótipo. O modelo aeroelástico consistiu em uma peça rígida feita de material leve, representando a envoltória do protótipo, encaixada sobre uma chapa fina (lingüeta), disposta verticalmente sobre uma mesa giratória.

d) Matsumoto (1986) – Com um modelo aeroelástico semelhante aos modelos do tipo *stick*, foram feitas investigações em túnel de vento sobre as respostas transversais de edifícios altos. Modelos com 3 tipos diferentes de forma de seção transversal foram investigados em 4 diferentes regulagens de vento. Os resultados foram comparados com os fornecidos por um método analítico apresentado no artigo, concluindo-se que, para edifícios altos com relação *profundidade / largura* igual ou maior do que 1,0, tal método pode fornecer resultados aceitáveis.

e) Kwok (1988) – Com o intuito de se investigar a influência causada pela inserção de chanfros, aberturas e arestas na geometria externa sobre as respostas induzidas pelo vento em edifícios altos prismáticos com seções retangulares, ensaiou-se em túnel de vento um modelo do *CAARC Standard Tall Building*. Para isto, foi desenvolvido um dispositivo aeroelástico pivotado na base, com rigidez determinada pela ação de molas helicoidais e amortecimento provido por banho de óleo. Concluiu-se que tais modificações, operadas de maneira adequada, podem causar reduções significativas, tanto nas respostas longitudinais quanto nas transversais.

f) Taniike & Inaoka (1988) – O incremento nas respostas à ação do vento e o comportamento aeroelástico de um arranha-céu de base retangular, sob os efeitos de edificações vizinhas de dimensões variadas, foram investigados para a redação deste trabalho. Num escoamento de baixa turbulência, sobre terreno aberto, a resposta transversal de um edifício situado a sotavento de uma estrutura mais esbelta e estreita mostrou-se tornar ressonante, sendo incrementada em até 20 vezes, para velocidades reduzidas na ordem de 5~6. A resposta longitudinal aeroelástica apresentou a tendência de elevação, de acordo com o aumento das dimensões das edificações a sotavento, em função do aumento da turbulência gerada devido à separação do escoamento.

g) Isyumov et al. (1990) – Em 1990 Isyumov et al. apresentam um estudo no *Journal of Wind and Industrial Aerodynamics* onde a importância da orientação dos eixos principais de rigidez é colocada, em termos de resposta dinâmica em edifícios esbeltos de seção quadrada. Resultados de estudos são reunidos e mostrados, através de dados, apontando que há vantagens em se organizar o sistema estrutural do edifício de modo a ter os eixos principais de rigidez alinhados com as diagonais da seção. Desta forma a resposta dinâmica devido ao desprendimento de vórtices é reduzida.

h) Blessmann (1992) – Os efeitos de vizinhança para uma zona urbana (vento com $p=0,34$) foram estudados em termos de carregamentos estáticos, utilizando-se ensaios em túnel de vento. Concluiu-se que os carregamentos apresentam um leve incremento, em relação aos mesmos modelos ensaiados isoladamente, entretanto os momentos torçores sofrem alterações que podem chegar a 125% dos valores sem efeito de vizinhança. Foram utilizados modelos reduzidos de 1/300 com incidência do vento variando 15° entre uma tomada e outra.

i) Boggs (1992) – Neste trabalho são abordados temas de interesse na modelagem aeroelástica, distinguindo-a da modelagem aerodinâmica, apresentando-se 2 modelos aeroelásticos e 1 modelo aerodinâmico. Comparações entre resultados de ensaios em túnel de vento são feitas, mostrando-se as conseqüências do desprezo dos efeitos aeroelásticos e indicando o número de Scruton como sendo um melhor indicativo de amplificações aeroelásticas, em detrimento ao valor RMS de deslocamento no topo, que é mais o usualmente utilizado.

j) Cheong et al. (1992) – Uma técnica experimental para a determinação da distribuição dos carregamentos do vento ao longo da altura de edifícios altos e esbeltos foi apresentada nesta publicação, onde foi utilizado um modelo aeroelástico com múltiplos GDL's. Concluiu-se que um modelo com apenas 1 GDL poderia fornecer resultados similares.

k) Ishizaki & Nishimura (1992) – A utilização de materiais alternativos na construção de modelos para ensaios em túnel de vento é exemplificada nos estudos relatados neste artigo. Dois modelos flexíveis executados em silicone, em uma escala de 1/500, de um edifício alto foram ensaiados, mostrando que este material se adequa à modelagem de edifícios com geometrias complexas. Os resultados apontaram o desprendimento de vórtices como sendo a principal causa das vibrações induzidas pelo vento e que os modos de vibração mais altos não causam impacto nas respostas finais, em edifícios altos.

l) Isyumov et al. (1992) – Previsões, através de ensaios em túnel de vento, das respostas induzidas pelo vento em um edifício de escritórios com 390 m de altura foram feitas, utilizando-se uma Balança de Alta Freqüência e um modelo aeroelástico do tipo *stick* com 2 GDL's ortogonais. Efeitos de vizinhança e da influência da geometria externa do prédio foram avaliados. Ambas as técnicas levaram a resultados coerentes entre si, no que diz respeito aos momentos fletores na base.

m) Kawai (1992) – Neste estudo foram investigados em túnel de vento os fenômenos de desprendimento de vórtices e galope em modelos de edifícios altos com relação *profundidade / largura* variando de $\frac{1}{2}$ a 3, em 2 regulagens distintas de vento – suave (terreno aberto) e turbulento (área urbana). Os modelos foram montados sobre um sistema de base pivotada, regulada para oscilar de maneira a aproximar o modo de vibração mais baixo. Os resultados mostraram que as vibrações devidas ao desprendimento de vórtices manifestam-se até mesmo em regimes turbulentos, para edifícios altos com seção rasa.

n) Kawai (1993) – Com o objetivo de se investigar a ocorrência de vibrações devido ao desprendimento de vórtices e ao galope, ensaios em túnel de vento foram conduzidos com 2 regulagens diferentes de vento sobre área urbana, suave e turbulento, em 4 modelos prismáticos de seção retangular com relação *profundidade / largura* variando de $\frac{1}{2}$ a 4. Os modelos foram construídos utilizando-se um sistema pivotado na base, onde a rigidez foi imposta por molas helicoidais e o amortecimento provido por placas imersas em um banho de óleo. Vibrações acentuadas devido ao desprendimento de vórtices foram observadas nos modelos com relação *profundidade / largura* menor do que 1, tanto para vento turbulento quanto para vento suave. Entretanto, vibrações por galope foram observadas em modelos com relação *profundidade / largura* equivalente a 2 e a 3, para vento suave, e em modelos com seção quadrada, para vento turbulento.

o) Paterson (1993) – Este trabalho apresenta comparações entre resultados experimentais e métodos de simulação computacional para a previsão de regimes de escoamento no entorno de 2 edifícios altos, com e sem efeitos de vizinhança. O método computacional utiliza um regime permanente de escoamento, com um modelo $k-\varepsilon$ de turbulência. Diferenças significativas foram encontradas em situações onde os 2 modelos estavam alinhados diagonalmente em relação à direção do vento, sendo que para uma configuração onde um modelo situa-se alinhado a sotavento do outro o método computacional apresentou-se de maneira conservadora. Entretanto o autor conclui que, para determinadas situações em regime permanente de escoamento, os ensaios experimentais podem ser substituídos pelos métodos analíticos.

p) Zhang et al. (1994) – Ensaio em túnel de vento foram conduzidos, a fim de se investigarem os efeitos de vizinhança na resposta torcional de um edifício alto, devido à presença de edificações de diferentes tamanhos e formas. O modelo aeroelástico foi executado sobre uma roldana projetada para permitir apenas movimentações de torção na sua base. Quatro tipos de modelos mudos foram utilizados para causar os efeitos de vizinhança, tanto a barlavento quanto a sotavento. Incrementos na ordem de 2,2 vezes foram observados na resposta torcional, quando o desprendimento de vórtices dos modelos de interferência a barlavento entrava em ressonância com a frequência natural do modelo aeroelástico instrumentado. As posições relativas críticas foram identificadas e os possíveis mecanismos de excitação torcional discutidos.

q) Kawai (1995) – As influências do ângulo de incidência e da turbulência do vento na ocorrência de vibrações por desprendimento de vórtices e por galope em edifícios altos foram investigados, através de ensaios em túnel de vento com modelos aeroelásticos, complementando Kawai (1992). Concluiu-se que as vibrações por desprendimento de vórtices são reforçadas quando o escoamento não tem a oportunidade de recolar nas paredes laterais do edifício, e que os seus efeitos, bem como os associados ao galope, são maiores e manifestam-se em velocidades menores quando o vento incide perpendicularmente às suas faces.

r) Zhang et al. (1995) – Com o uso de um modelo aeroelástico projetado com apenas o grau de liberdade torcional, ensaios em túnel de vento foram conduzidos com o intuito de se investigarem os efeitos de vizinhança sobre as respostas torcionais de edifícios altos com seção quadrada e com assimetria estrutural (entre centro de massas e rigidez). Dois tipos de modelos mudos foram utilizados, tanto a barlavento quanto a sotavento do modelo aeroelástico instrumentado. Concluiu-se que a resposta média e de pico do modelo principal pode ser significativamente amplificada devido à presença dos modelos vizinhos, e que as posições críticas destes modelos variam conforme as suas dimensões e a excentricidade do modelo principal em relação à incidência do vento.

s) Marukawa et al. (1996) – O efeito de amortecimento aerodinâmico em edifícios altos é investigado através de ensaios em túnel de vento, utilizando-se um modelo aeroelástico do tipo *stick*, em uma escala de 1/500 e com relações *profundidade / largura* compreendidas entre 0,33 e 3. Concluiu-se que o amortecimento aerodinâmico na direção longitudinal à incidência do vento, para as velocidades reduzidas ensaiadas (de 4 a 12), é positivo e aumenta na maioria dos casos, de acordo com a velocidade. Na direção transversal ao vento, o efeito de amortecimento aerodinâmico é influenciado pelas dimensões do edifício, podendo assumir valores positivos ou negativos.

t) Kawai (1998) – Os efeitos de chanfros, reentrâncias (dentes) e arredondamentos nos cantos de edifícios altos sobre as instabilidades aeroelásticas, tais como vibrações induzidas por desprendimento de vórtices e por galope, foram investigados através de ensaios em túnel de vento. Pequenas reentrâncias e pequenos chanfros apresentaram-se muito eficientes na prevenção de instabilidades aeroelásticas em prismas quadrados, devido ao aumento do amortecimento aerodinâmico. Entretanto, as mesmas soluções adotadas em dimensões maiores promoveram

instabilidades em velocidades consideradas baixas. Os arredondamentos mostraram-se ser os mais efetivos no aumento do amortecimento aerodinâmico e, conseqüentemente, na redução das instabilidades.

u) Chang et al. (1999) – Com a utilização de um modelo aeroelástico com 2 GDL's ortogonais, foram feitas investigações em túnel de vento sobre a utilização de amortecedores do tipo *Tuned Liquid Dampers (TLD)* para a redução das vibrações devidas ao desprendimento de vórtices em edifícios altos. Concluiu-se que, na sua melhor performance, esta técnica pode levar a um abrandamento de até 85% nos deslocamentos RMS no topo do edifício.

v) Thepmonkorn et al. (1999) – Uma técnica de modelagem aeroelástica alternativa, a ser utilizada na previsão das respostas induzidas pelo vento em edifícios altos, intitulada *two-degree-of-freedom base hinged aeroelastic (BHA)*, é proposta neste trabalho. Uma base é construída, de maneira que propicie a obtenção, além das respostas translacionais nos 2 GDL's ortogonais, das respostas torcionais. Com o intuito de validá-la, um modelo do *CAARC Standard Tall Building* foi ensaiado em túnel de vento, utilizando-a. Os resultados destes ensaios foram comparados com os obtidos por Melbourne (1980) através de modelagem aeroelástica com a utilização de modelos do tipo *stick*, obtendo-se boa concordância.

w) Thepmonkorn et al. (2002) – Com a utilização da BHA, ensaiaram-se em túnel de vento diversos modelos com diferentes excentricidades entre centro de massas e centro de rigidez do *CAARC Standard Tall Building*. As influências destas assimetrias foram investigadas, levando a resultados que mostraram que estas variações repercutem fortemente nas respostas induzidas pelo vento. Para modelos com o centro de rigidez localizado a sotavento do centro de massas, o aumento nos momentos torçores e nas acelerações nas bordas foi mais destacado.

x) Thepmonkorn et al. (2002) – Utilizando-se a BHA, efeitos de vizinhança sobre as respostas translacionais e torcionais foram investigados, através de uma série de ensaios em túnel de vento com um modelo aeroelástico do *CAARC Standard Tall Building*. Os resultados indicaram um significativo aumento nas respostas na velocidade crítica, quando a frequência de desprendimento de vórtices dos modelos de interferência concidiam com a frequência natural do modelo principal. As respostas torcionais, na direção do vento e transversal ao vento foram significativamente aumentadas quando o modelo mudo foi localizado diagonalmente a barlavento

do modelo principal; um aumento de maior monta nas respostas foi obtido quando o modelo mudou localizou-se diretamente a barlavento do modelo instrumentado.

y) Miguel (2003) – Dissertação de Mestrado, defendida na UFRGS, para a qual foi desenvolvida uma base aeroelástica com 2 GDL's ortogonais. A fim de validá-la, ensaiou-se um modelo do *CAARC Standard Tall Building*, obtendo-se suas repostas dinâmicas nas direções longitudinal e transversal à ação do vento, comparando-as com a bibliografia existente.

z) Oliveira (2003) - Dissertação de Mestrado, defendida na UFRGS, que retrata em detalhes o desenvolvimento de uma base aeroelástica com 2 GDL's ortogonais para medições das repostas dinâmicas induzidas pelo vento. Com o auxílio de uma balança de força, as repostas médias também puderam ser avaliadas nos ensaios de validação, que foram conduzidos utilizando-se um modelo do *CAARC Standard Tall Building*.

aa) Zhou & Kareem (2003) – As técnicas de modelagem aeroelástica utilizadas na atualidade são revisadas e analisadas de maneira crítica neste artigo. São apresentados estudos que mostram a influência da correta modelagem das características geométricas e dinâmicas nas repostas em edifícios altos. Destaque principal é dado às diferenças entre o modo de vibração real do protótipo e o modo linear adotado na maioria dos modelos aeroelásticos e considerações são feitas em relação à correta modelagem da distribuição de massas, sendo que algumas técnicas de ajustes são apresentadas.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos.

No primeiro deles, apresenta-se formalmente o assunto, introduzindo o leitor ao que encerra este estudo.

No segundo capítulo discorre-se sobre os conceitos básicos necessários para a compreensão dos efeitos aerodinâmicos e da interação vento-estrutura, apresentando-se conceitos de turbulência, repostas induzidas e estrutura aerodinâmica do vento, bem como definições e importância do amortecimento.

No terceiro capítulo é apresentado o modelo aeroelástico desenvolvido e ensaiado no decorrer dos estudos, fundamentando o seu projeto com conceitos de modelagem aeroelástica.

No quarto capítulo são descritos os ensaios realizados em túnel de vento, apresentando-se parâmetros de ordem prática.

No quinto capítulo, são analisados os resultados dos ensaios realizados, confrontando-os com 5 referências distintas, situando-os no contexto científico atual.

No último capítulo, considerações a respeito dos estudos realizados são feitas.

Por fim, nos anexos são apresentadas algumas tabelas referentes ao desenvolvimento dos cálculos inerentes à aplicação dos métodos normatizados pela NBR-6123/88 e NBCC/85, na obtenção das respostas induzidas pelo vento para o *CAARC Standard Tall Building*.

2 CONCEITOS AERODINÂMICOS

2.1 VENTO

O vento é o resultado do movimento de rotação da Terra (forças de Coriolis) e das massas de ar em relação a sua superfície, devido aos gradientes de pressão atmosférica oriundos de transformações termodinâmicas. Estas diferenças na pressão atmosférica podem ser geradas por efeitos de larga escala, tais como aquecimento e resfriamento diferencial ao redor do globo, ou por distúrbios altamente localizados, que levam às tempestades.

Em algum ponto acima da superfície terrestre, o escoamento do ar torna-se relativamente suave (laminar) e regular para pequenos espaços de tempo. A velocidade do vento nesta altura é proporcional ao gradiente de pressões atmosféricas local e pode ser chamada de *Velocidade Gradiente* (U_g).

Ao nível do solo, entretanto, o livre escoamento do ar é interrompido por forças de atrito que surgem da interação entre a massa de ar em movimento e a rugosidade do terreno. Esta interação leva ao surgimento de uma *camada limite atmosférica* (C.L.A.) turbulenta, na qual as características do escoamento são significativamente alteradas.

O gradiente de velocidades do vento que existe entre o topo e o nível mais baixo desta camada limite resulta, inicialmente, na formação de turbilhões de larga escala, com um tamanho equivalente à altura da camada limite. Estes turbilhões são instáveis por natureza, sendo progressivamente destruídos e transformados em turbilhões cada vez menores. Por fim, quando estão em um tamanho bem reduzido, que pode chegar à ordem do milímetro, acabam por ser completamente dissipados em calor pela viscosidade dinâmica do ar.

Desta forma, a camada limite atmosférica pode ser entendida como um bloco de ar em movimento, contendo turbilhões de diferentes tamanhos que podem estar se movimentando a diferentes velocidades e direções, em relação a este bloco principal. Para aplicações em Engenharia Civil são de interesse maior os ventos fortes, os quais têm características

equivalentes às condições da C.L.A. em estabilidade neutra, sendo influenciados pela rugosidade da superfície terrestre.

Como pode ser visto na Fig. 2.1, as duas principais conseqüências da existência da camada limite atmosférica, em termos de projeto estrutural, são:

- variação da velocidade média do vento em função da altitude
- geração de rajadas de vento, ao longo do escoamento

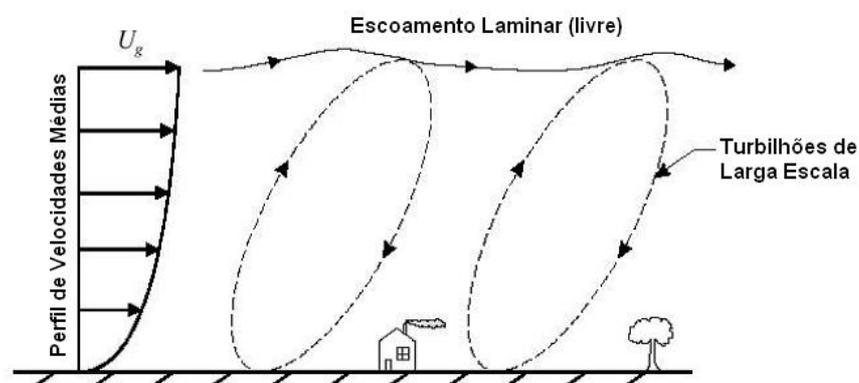


FIGURA 2.1 – Turbilhões e perfil de velocidades na camada limite atmosférica
(Sparling, 1997)

A presença das rajadas, que ocorrem em uma seqüência aleatória de frequências e intensidades, impõe uma variação aleatória da velocidade do ar, tanto em termos de espaço quanto em termos de tempo. As rajadas mais velozes são de menor duração (fração de segundo) e atuam sobre uma pequena região, correspondendo à chegada simultânea ao ponto em estudo de turbilhões de diversas dimensões, em condições tais que seus efeitos se superpõem.

Uma visualização da estrutura turbulenta do vento é ilustrada na Fig. 2.2, que mostra um instantâneo das isopletras ao longo de um período de 22 segundos, em uma porção do escoamento do ar. Na parte superior da figura está representado um corte horizontal tomado a 50 pés (15 m) acima do solo (indicado como corte B-B), enquanto que na sua parte inferior é representado um corte vertical (corte A-A). As figuras claramente mostram a existência de turbilhões de diferentes tamanhos e velocidades.

A espessura da camada limite atmosférica varia muito, dependendo de diversos fatores, tais como *velocidade gradiente*, rugosidade do terreno, variação da temperatura do ar com a altitude e da localização geográfica, situando-se na ordem de algumas centenas de metros a alguns quilômetros. As construções civis encontram-se imersas nesta camada, tendo que ser projetadas e construídas de acordo.

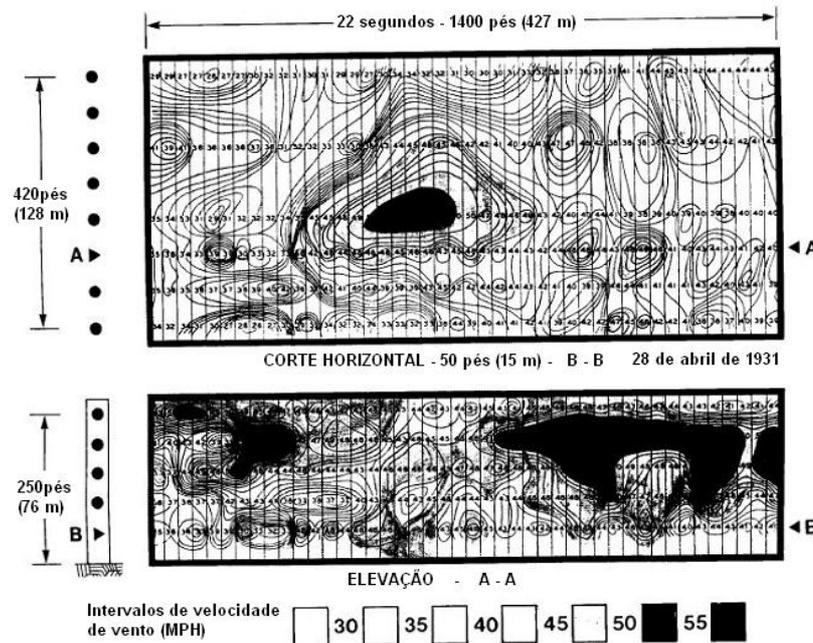


FIGURA 2.2 – Estrutura turbulenta do vento (Sherlock & Stout, 1937)

A natureza aleatória do vento dentro da camada limite atmosférica torna-o difícil de ser caracterizado, para critérios de projeto estrutural. Entretanto, simplificações são adotadas, na medida em que se consideram separadamente as suas componentes médias (devidas à velocidade média) e flutuantes (devidas às rajadas).

2.1.1 Velocidade média do vento

Devido à natureza turbulenta da camada limite atmosférica, a velocidade do vento em uma dada localidade está constantemente fluando. Porém, uma avaliação da intensidade do vento pode ser obtida pela sua velocidade média \bar{U} , que é definida pela Eq. 2.1,

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int U(t) dt \tag{2.1}$$

onde $U(t)$ é a velocidade instantânea do vento em uma dada localidade e T é o período de tempo sobre o qual a média é tomada.

A máxima velocidade de projeto é baseada no máximo valor com probabilidade de ocorrência de \bar{U} , sobre um intervalo de tempo de duração T , durante toda a vida da estrutura.

Entretanto, o máximo valor de \bar{U} obtido a partir de um registro de velocidades de vento $U(t)$ não é único, sendo dependente da duração do período de amostragem T . Como pode ser verificado no gráfico apresentado na Fig. 2.3, períodos longos de amostragem (T_1 , por exemplo) tendem a suprimir efeitos de rajadas de curta duração, resultando numa menor velocidade média (\bar{U}_1 , por exemplo). Por outro lado, períodos menores de amostragem (T_2 , por exemplo) podem ser dominados pelos efeitos de uma rajada de curta duração, conduzindo a valores maiores de velocidades médias (\bar{U}_2 , por exemplo).

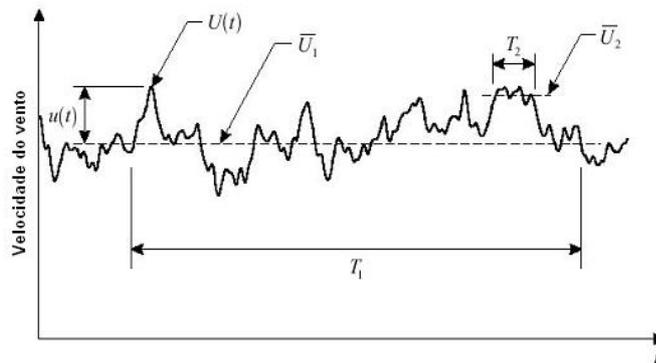


FIGURA 2.3 – Variação da velocidade do vento ao longo do tempo (Sparling, 1997)

No Canadá, a velocidade média usada no projeto de estruturas é definida como sendo a máxima velocidade média registrada sobre o período de 1 hora. No Brasil, este período reduz-se a 3 segundos. As velocidades de projeto nos Estados Unidos, por outro lado, eram calculadas a partir do mínimo período de tempo que leva uma massa de ar com uma milha de comprimento para passar por um ponto de registro, tendo sido conceituada como *fastest miles of wind*. Na Europa, as velocidades médias do vento são obtidas sobre 10 minutos.

Nota-se que o significado do termo *velocidade média do vento* varia de país para país, precisando ser cuidadosamente definido, a fim de se evitar confusão. Fatores de conversão simples são usados nas transformações de uma base de tempo de média para outra.

No projeto estrutural, as pressões do vento são utilizadas como base de cálculo, sendo obtidas a partir das velocidades de projeto, através da Eq. 2.2.

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \bar{U}^2 \quad (2.2)$$

onde q é a pressão média [Pa] e ρ_a é a massa específica do ar (aproximadamente $1,2 \text{ kg/m}^3$)

2.1.1.1 Perfil de Velocidades médias

O atrito do ar ao longo da superfície da Terra causa uma variação na sua velocidade ao longo da altitude, de praticamente zero ao nível do solo, até um valor máximo igual à *velocidade gradiente* U_g em alguma altitude variável (e desconhecida). Devido ao fato das pressões do vento utilizadas em projeto variarem com o quadrado da sua velocidade (Eq. 2.2), este gradiente (Fig. 2.4) causa um impacto significativo nos carregamentos devidos ao vento.

A intensidade com que esta variação da velocidade média ocorre está fortemente atrelada à rugosidade do terreno sobre o qual a massa de ar se desloca. Superfícies mais rugosas tendem a reduzi-la, aumentando a altura da camada limite atmosférica.

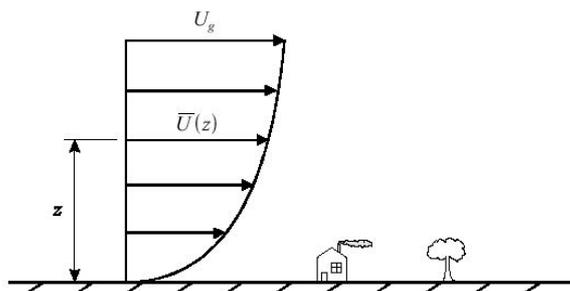


FIGURA 2.4 – Gradiente de velocidades do vento (Sparling, 1997)

Na norma brasileira, assim como na canadense, as velocidades básicas do vento são dadas para uma altura de referência de 10 metros acima da superfície do terreno. As pressões do vento para cotas diferentes desta devem ser ajustadas apropriadamente.

Diversas expressões matemáticas têm sido sugeridas com o intuito de se modelar o perfil de velocidades do vento na camada limite atmosférica, porém as duas mais comuns são o *Perfil Logarítmico* e a *Lei Potencial*, descritos a seguir.

a) Perfil Logarítmico de Velocidades:

$$\bar{U}(z) = \bar{U}_{10} \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)} \quad (2.3)$$

onde $\bar{U}(z)$ é a velocidade média do vento na cota z , \bar{U}_{10} é a velocidade média do vento na cota de referência (10 metros acima do solo), e z_0 é altura característica da rugosidade da superfície. Valores típicos para z_0 são dados na Tab. 2.1, sendo ilustrados na Fig. 2.5.

b) Perfil Potencial de Velocidades:

$$\bar{U}(z) = \bar{U}_{10} \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (2.4)$$

Na qual p é o expoente da lei potencial que corresponde à rugosidade da superfície num dado terreno; valores típicos de p para diferentes tipos de terreno são dados na Tab. 2.1, sendo ilustrados na Fig. 2.5. A lei potencial para o perfil de velocidades é a adotada nas normas brasileira e canadense.

TABELA 2.1 - Parâmetros para perfis de velocidades média do vento

Terreno	z_0 [mm]	p
Água	5-10	0,12
Vegetação baixa	10-100	0,16
Vegetação alta ou subúrbio	300-1000	0,28
Centro de cidades	1000-3000	0,40

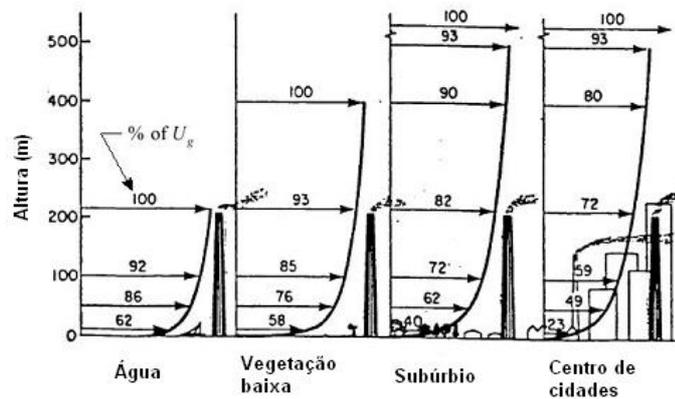


FIGURA 2.5 – Variação da altura da camada limite, conforme o terreno
(Davenport, 1987)

2.1.2 Abordagem matemática da turbulência do vento

Durante muito tempo o estudo da turbulência do vento foi inteiramente empírico, devido às dificuldades do tratamento matemático de um fenômeno que se apresenta de forma extremamente aleatória e complicada.

A estatística proporcionou ferramentas matemáticas ao pioneirismo de Theodore von Kármán nos estudos do assunto, levando-o a definir a turbulência do vento como sendo “flutuações irregulares da velocidade, governadas por equilíbrio estatístico”.

A irregularidade destas flutuações não permite um tratamento determinístico do assunto, conduzindo a uma abordagem através da teoria da probabilidade e de médias estatísticas. Por ser um fenômeno aleatório, as amostras ao longo do tempo diferem entre si, podendo, entretanto, apresentar alguma regularidade no sentido estatístico, quando o número de amostras é suficientemente grande.

Um processo aleatório é *estacionário* se os seus parâmetros estatísticos (média, variância, autocorrelação, etc), determinados sobre a totalidade dos registros possíveis, são invariantes para qualquer deslocamento da origem dos tempos.

Um processo aleatório estacionário é *ergódico* se qualquer um de seus parâmetros estatísticos, calculado sobre um conjunto de registros possíveis, é igual ao correspondente parâmetro calculado ao longo do tempo sobre qualquer registro representativo do processo. Um processo ergódico é necessariamente estacionário.

Simplificando-se a abordagem ao assunto, pode-se dizer que as flutuações da velocidade no decorrer do tempo, em torno de um valor médio, constituem um processo *aleatório estacionário ergódico*.

Assim, pode-se modelar matematicamente o problema da turbulência do vento considerando-se a sua velocidade instantânea $U(t)$ em uma dada localidade como sendo a expressa pela Eq. 2.5.

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \quad (2.5)$$

onde \bar{U} é a velocidade média e $u(t)$ é a parcela flutuante da velocidade do vento, devido às rajadas, efeitos da turbulência.

Para efeitos de projeto, busca-se a velocidade de pico \hat{U}_D , que pode ser definida pela Eq. 2.6.

$$\hat{U}_D = \bar{U}_D + u_{\max} = \bar{U}_D \left(1 + \frac{u_{\max}}{\bar{U}_D} \right) \quad (2.6)$$

onde \bar{U}_D é a velocidade média do vento para a situação de projeto, e u_{\max} é o pico de velocidade de rajada.

O termo entre parêntesis na Eq. 2.6 representa a influência das rajadas nos picos de velocidade e pode ser chamado de *fator de rajada*. Na prática, a proporção u_{\max}/\bar{U}_D pode ser estimada utilizando-se dados estatísticos conhecidos das velocidades de vento na região.

Similarmente, as pressões máximas de projeto podem ser definidas na forma da Eq. 2.7.

$$\hat{p} = q.C_g \quad (2.7)$$

onde q é a pressão média de projeto e C_g o fator de rajada.

A intensidade da turbulência varia, assim como as velocidades médias do vento, com a altura onde o ponto de estudo se localiza a partir solo, podendo ser definida e expressa pela lei potencial indicada na Eq. 2.8.

$$I(z) = c.(z/10)^{-d} \quad (2.8)$$

Nesta equação, c e d são constantes que dependem das condições do terreno. Estes coeficientes variam de código para código e na Tab. 2.2 podem ser encontrados estes valores para alguns destes códigos, sendo que na Fig. 2.6 pode-se visualizar uma comparação gráfica entre estes dados, para terrenos do tipo A (centro de grandes cidades) e C (terreno aberto).

TABELA 2.2 - Coeficientes para cálculos da intensidade da turbulência por distintos procedimentos normativos (Zhou et al., 2002)

Código	ASCE 7		AS1170.2(ajustado)		NBC(adaptado) ^a		RLB-AIJ		Eurocode (ajustado)	
	C	d	c	d	c	d	c	d	c	d
<i>A</i>	0,450	0,167	0,453	0,300	0,621	0,360	0,402	0,400	0,434	0,290
<i>B</i>	0,300	0,167	0,323	0,300	0,335	0,250	0,361	0,320	0,285	0,210
<i>C</i>	0,200	0,167	0,259	0,300	0,200	0,140	0,259	0,250	0,189	0,160
<i>D</i>	0,150	0,167	0,194	0,300			0,204	0,200	0,145	0,120
<i>E</i>							0,162	0,150		

^a O perfil de intensidade de turbulência não está explicitamente disponível no NBC.

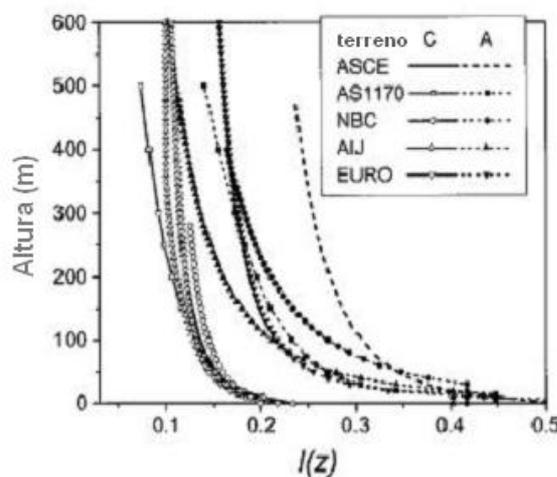


FIGURA 2.6 – Perfis de intensidade de turbulência conforme distintos procedimentos normativos (Zhou et al., 2002)

Estas diferenças aparecem, principalmente, quando se calculam as respostas dinâmicas por estes diferentes métodos, não causando maiores impactos nos cálculos das respostas médias.

2.2 AÇÕES DO VENTO

2.2.1 Escoamento ao redor de Edifícios

Na medida em que o ar flui ao redor de um corpo, as linhas de corrente do escoamento a barlavento separam-se deste em pontos chamados *pontos de separação*, num processo usualmente chamado de *descolamento*. Para objetos prismáticos retangulares, estes pontos de separação sempre ocorrem nos cantos vivos expostos à ação do vento, conforme a Fig. 2.7.

A barlavento deste descolamento, o vento exerce uma pressão positiva sobre a superfície do corpo, em uma magnitude que depende da sua velocidade de aproximação e aumenta de acordo com a altura sobre o solo, devido ao perfil vertical de velocidades da camada limite atmosférica.

Uma esteira turbulenta de intensa vorticidade forma-se a sotavento dos pontos de separação, resultando em pressões negativas (sucção) muito fortes nas faces desta região. Estas pressões mantêm-se constantes ao longo da altura.

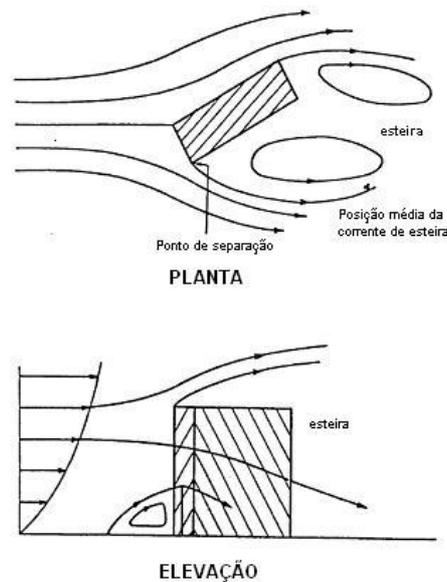


FIGURA 2.7 – Ação do vento em seções prismáticas e em edificações alteadas (Sparling, 1997)

A força resultante atuante no edifício, como um todo, é então a combinação dos efeitos das pressões positivas a barlavento e das pressões negativas que atuam a sotavento.

Em corpos arredondados o ponto de separação varia, dependendo de diversos fatores, tais como a velocidade do escoamento, o nível de turbulência do vento e a rugosidade da superfície do corpo, sendo que um importante papel é desempenhado pelo número de Reynolds neste contexto.

2.2.2 Respostas de Edifícios à ação dos ventos

As pressões do vento, e da mesma forma os carregamentos produzidos por estas, não são estáticos na natureza, mas flutuam constantemente. A natureza dinâmica destes carregamentos pode, de fato, fazer com que estes entrem em ressonância com estruturas esbeltas ou flexíveis, gerando respostas dinâmicas que podem ser muito maiores do que aquelas produzidas pelos seus efeitos estáticos equivalentes. Para edifícios baixos e rígidos, esta resposta dinâmica é menos significativa e o projeto pode ser seguramente baseado nas equivalentes estáticas do carregamento do vento. Entretanto, em edifícios altos estas respostas desempenham um papel fundamental.

Devido ao fato do vento atuar em forma de rajadas, os edifícios altos, frente à sua ação em uma determinada direção, respondem oscilando tanto transversalmente quanto longitudinalmente. A Fig. 2.8 ilustra esta situação.

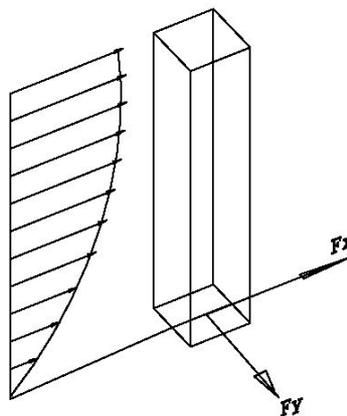


FIGURA 2.8 – Ação do vento, onde F_y é a resposta transversal e F_x é a resposta longitudinal

A previsão das respostas devidas à ação dos ventos pode ser subdividida em:

- previsão da ocorrência das várias velocidades médias possíveis e suas respectivas direções;
- dada a ocorrência de uma situação aerodinâmica específica, a previsão da máxima resposta dinâmica da estrutura.

A primeira situação constitui um problema de ordem climatológica; a segunda é um problema aerodinâmico ou aeroelástico, que envolve as componentes médias e flutuantes da resposta da estrutura às ações do vento.

A fim de justificar-se qualquer análise em separado das respostas transversais e longitudinais, é necessário que se afirme que estas respostas são efetivamente não-correlacionadas (CTBUH, 1978?). A falta de correlação entre estas duas respostas tem sido observada em muitos estudos. Riera (1981) complementa afirmando que se a estrutura apresenta 2 planos de simetria verticais, a resposta dinâmica nas duas direções será desacoplada.

Outra característica importante, em termos de respostas, é o fato de que, quando as respostas longitudinais apresentam-se similares em magnitude às respostas transversais, o topo do edifício descreve uma trajetória elíptica, com os seus eixos ortogonais de dimensões similares, como pode ser visto na Fig. 2.9.

De acordo com Kareem (1983), a resposta RMS de um sistema dinâmico, sujeito a excitação aleatória, é inversamente proporcional ao produto da massa pela raiz quadrada do valor do amortecimento e , segundo Ishizaki & Nishimura (1992), em termos de acelerações, geralmente a amplitude da resposta longitudinal é menor do que a amplitude da resposta na direção transversal. Este fato também se verifica quando o caso é o deslocamento.

O NBCC/85 também discorre sobre este assunto, estabelecendo que as respostas transversais, em termos de aceleração, têm grandes chances de serem maiores do que as longitudinais sempre que o edifício apresentar-se de maneira esbelta nos dois sentidos.

Na Fig. 2.10, é possível identificar a trajetória das respostas de uma estrutura onde as respostas transversais são dominantes.

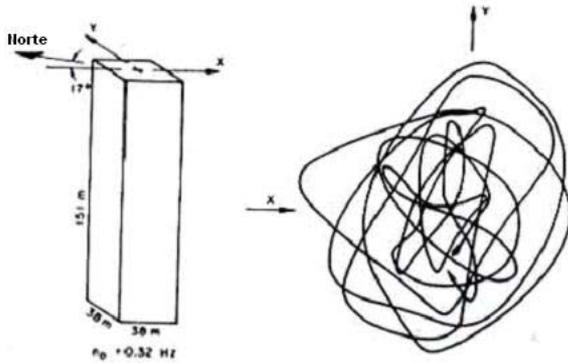


FIGURA 2.9 – Trajetória do topo de um edifício cujas respostas longitudinais e transversais se equivalem (CTBUH, 1978?)

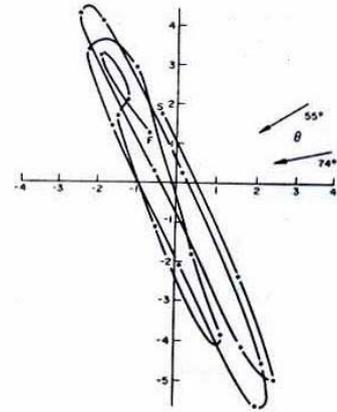


FIGURA 2.10 – Trajetória do topo de um edifício cuja resposta transversal é dominante (CTBUH, 1978?)

Desde a década de 60, com os estudos de Davenport (1967) e Vickery (1966), é sabido que a resposta aerodinâmica da maioria das estruturas origina-se, quase que inteiramente, da ação da componente longitudinal da turbulência do vento sobreposta à ação da sua velocidade média. A primeira está relacionada à componente flutuante da resposta, sendo a segunda relacionada à resposta média.

2.2.2.1 Resposta Longitudinal

A eficiência da turbulência em termos de produção de carregamento em uma estrutura dependerá fortemente da relação entre o tamanho dos turbilhões do vento e o tamanho da estrutura, que pode ser expressa pela relação λ/h , sendo λ e h dimensões característica dos turbilhões e da estrutura respectivamente.

Nas componentes de alta frequência esta relação tende a ser muito menor do que a unidade e os carregamentos produzidos são bem organizados ou correlacionados apenas em pequenas regiões. Desta forma, o seu efeito total sobre toda a estrutura é pequeno, porque enquanto em algumas regiões há incremento de pressões em outros há redução. Pode-se, por isto, afirmar que as pressões devido às componentes de alta frequência do vento são pobremente correlacionadas ao longo da estrutura como um todo.

Em contrapartida, os valores muito baixos de frequência de turbulência são atrelados a relações $\lambda/h \gg 1$. Nestes casos, os seus efeitos são sentidos em toda a estrutura ou em áreas muito grandes simultaneamente, o que significa a produção de carregamentos consideráveis.

Outro fator determinante na eficiência da ação do vento em termos de produção de carregamentos significativos é a frequência natural da edificação. Edificações com frequência natural igual ou inferior a 1 Hz, em particular aquelas fracamente amortecidas, podem apresentar uma importante resposta flutuante na direção do vento.

A maioria dos códigos internacionais utiliza o *fator de rajada*, para a previsão das respostas longitudinais de edifícios altos frente à ação dos ventos. Entretanto, diferem na maneira como caracterizam as condições do escoamento do ar e as suas influências nas respostas da estrutura. Desta forma, é muito comum encontrarem-se discrepâncias nos resultados obtidos por diferentes métodos para uma mesma edificação, sob as mesmas condições. Um estudo comparativo versando sobre este assunto foi conduzido por Zhou et al.(2002), onde, para uma mesma edificação, diferenças de até 47% foram obtidas nas respostas relativas aos momentos fletores na base devidas à ação dinâmica do vento e de até 69% nas acelerações no topo, tendo sido utilizadas recomendações de 5 normas diferentes.

2.2.2.2 Resposta Transversal

Comparando-se com a resposta longitudinal, as estruturas apresentam um comportamento bem mais complexo quando se abordam as respostas transversais. Ainda hoje não existem métodos analíticos generalizados para calcular-se a resposta transversal de edifícios. O estado da arte da informática e da engenharia aplicadas à Engenharia do Vento não estão suficientemente estabelecidos ao ponto de poderem ser utilizados de maneira prática (Liang et al., 2002).

Em muitos casos o critério mais importante no projeto de edifícios altos é justamente a resposta transversal à ação do vento. Desta forma, o recurso a recorrer tem sido a determinação desta resposta a partir de ensaios em modelos aeroelásticos em túneis de vento.

Provavelmente a principal razão para que os métodos teóricos de previsão da resposta transversal de estruturas alteadas tenham se mostrado tão deficientes é a existência de diversos mecanismos de excitação intrinsecamente superpostos.

Melbourne (1977) identificou estes mecanismos como sendo associados a:

- excitação de esteira devido ao desprendimento de vórtices;
- turbulência do vento;
- deslocamento lateral da estrutura.

Estudos feitos por Davenport (1967), Mori (1979), Kareem et al. (1980), Reinhold & Sparks (1980) e Kwok & Melbourne (1980) ajudam a definir qual destes mecanismos torna-se o dominante em uma dada situação, levando-se em consideração as características do escoamento, a velocidade do vento e as características geométricas e dinâmicas da estrutura em estudo.

Riera (1981) afirma que a resposta transversal está associada à componente lateral flutuante da velocidade do vento, ao desprendimento de vórtices e ao galope, sendo que estas causas podem ser tratadas independentemente.

Vickery (1973) e Melbourne (1975) ainda apresentaram formulações baseadas numa série de medidas em túnel de vento que permitem uma aproximação grosseira da resposta transversal. Estas aproximações são úteis na medida em que apontam quando as possibilidades de ocorrência de problemas são suficientemente grandes ao ponto de necessitarem de investigações através de modelagem aeroelástica.

Porém, segundo Ishizaki & Nishimura (1992), a principal causa de vibrações devido ao vento em edifícios altos é o desprendimento de vórtices.

2.2.2.2.1 Desprendimento de Vórtices

Quando o escoamento do vento, com um de número de Reynolds maior do que 30, é interceptado por um corpo esbelto ou por um cilindro prismático com uma forma rombuda (não

aerodinâmica), vórtices são desprendidos alternadamente de um lado e de outro, numa frequência bem definida (Fig. 2.11). São os chamados **vórtices de Kármán**, que fazem surgir forças alternadas que agem perpendicularmente à direção do vento, ao longo do comprimento deste corpo, na frequência do desprendimento de cada par de vórtices. Para uma estrutura ser considerada esbelta neste contexto, é necessário que a razão *altura/largura* seja maior do que 5.

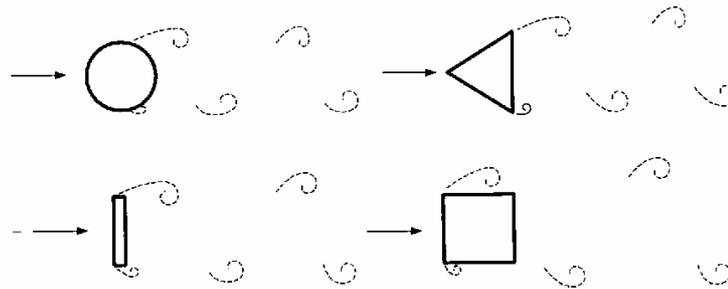


FIGURA 2.11 – Desprendimento de vórtices

Prismas de seção retangular (incluindo a quadrada), triangular ou com outras formas de cantos vivos estão sujeitas a excitações mais fortes por desprendimento de vórtices do que o cilindro circular, que é o mais citado e, sem dúvida, o mais estudado.

Um parâmetro de importância neste contexto é o **número de Strouhal** (S_t) que estabelece uma relação entre a frequência de desprendimento de um par de vórtices (f_s), as dimensões do cilindro (através de uma dimensão linear característica, L) e a velocidade do vento (V); podendo ser utilizado como referência na definição da escala geométrica do modelo.

O número de Strouhal, Eq. 2.9, refere-se à frequência predominante. Na realidade, há uma faixa de frequências na qual surgem contribuições aleatórias para as forças flutuantes. Em certos casos a frequência dominante enfraquece (vórtices de Kármán fracos) e fica mascarada pelas frequências aleatórias vizinhas, podendo até mesmo desaparecer.

$$S_t = \frac{f_s \cdot L}{V} \quad (2.9)$$

O número de Strouhal, para diversas formas de seções, pode ser obtido através da Fig. 2.12.

Direção do vento	Forma da seção	S_s
Qualquer	Circulo $Re = 70\,000 \bar{V} d$ (\bar{V} sobre 10 min)	$10^3 \leq Re \leq 2 \times 10^6$ 0,20
		$Re \geq 10^6$ 0,28 (interpolar linearmente)
→	Placa	0,16
		0,15
→	Retângulo $l_1 / l_2 = 0,5$	1,0 0,15
		1,5 0,12
		2,0 0,09
		2,5 0,07
		3,0 0,15
		4,0 0,13
		4,5 0,12
→	t = a / 25	0,12
		0,14
↓	2 a : t = a / 25 4 a : t = a / 8	0,14
		0,14
↓	t = a / 25	0,15
		0,15
↓	t = a / 12,5	0,17
		0,15
←	t = a / 50	0,15
		0,14
←	t = a / 25	0,15
		0,13
↙	t = a / 25	0,13
		0,14
→	t = a / 50	0,16
		0,11
→	t = a / 25	0,15
		0,12
→	t = a / 25	0,14
		0,14
→	t = a / 25	0,14
		0,14
↓	t = a / 12,5	0,15
		0,15

FIGURA 2.12 – Número de Strouhal para diferentes formas de seções transversais (Blessmann, 1990)

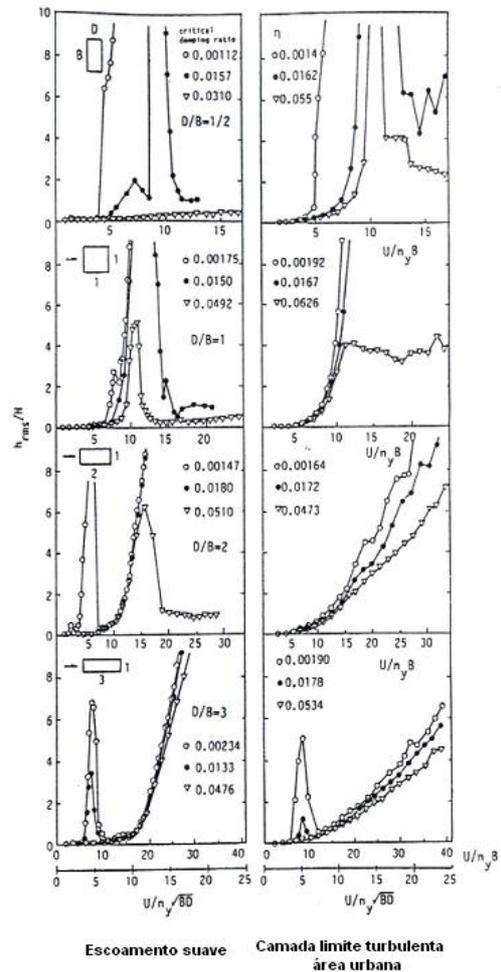


FIGURA 2.13 – Vibração por desprendimento de vórtices (Kawai, 1992)

A frequência de desprendimento de um par de vórtices varia conforme a velocidade do vento e, na curva que relaciona respostas e velocidades de vento, pode-se perceber um pico situado numa velocidade que é dita crítica, correspondente à velocidade para a qual a frequência do desprendimento de um par de vórtices iguala-se a frequência natural f_n da estrutura.

Esta velocidade crítica V_{cr} no topo da estrutura é dada pela Eq. 2.10.

$$V_{cr} = \frac{f_n \cdot B}{S_t} \quad (2.10)$$

onde B é a largura da edificação e S_t o número de Strouhal.

De acordo com Liang et. al. (2002), esta situação fica clara quando se tem $\frac{1}{4} \leq D/B < 3$, sendo D a outra dimensão em planta da edificação. Porém em situações onde $3 \leq D/B \leq 4$, dois picos podem aparecer, sendo que o primeiro corresponde ao S_t e o segundo a S_t multiplicado por um fator k .

A turbulência do vento altera profundamente o desprendimento de vórtices e, conseqüentemente, a resposta da estrutura; porém os seus efeitos, neste caso, ainda não estão muito bem esclarecidos.

Kawai (1992) conduziu estudos, concluindo que as vibrações por desprendimento de vórtices estão diretamente correlacionadas à turbulência do vento, ao amortecimento estrutural e às dimensões em planta da edificação. A Fig. 2.13 sumariza uma parcela de seus estudos.

2.2.2.2.2 Galope

O *galope* é um fenômeno violento de instabilidade aerodinâmica que estruturas ou elementos estruturais, leves e flexíveis, com pequeno amortecimento e de forma prismática, podem sofrer. É caracterizado por um movimento oscilatório em um modo simples, não acoplado, perpendicular à direção do vento, sendo que a turbulência deste exerce uma influência muito importante, tanto quantitativa quanto qualitativamente.

Aparece de maneira súbita, quando a velocidade do vento atinge um valor chamado de *velocidade de disparo* (“onset velocity”). Esta velocidade varia de modo aproximadamente linear com o amortecimento estrutural e, para edifícios altos, geralmente situa-se em patamares muito elevados. Entretanto, o amortecimento cada vez menor de certas estruturas está fazendo com que a velocidade de disparo se aproxime cada vez mais da velocidade de projeto.

A velocidade de disparo é diretamente proporcional à primeira frequência natural da estrutura, assim é possível que se evite o fenômeno do galope aumentando esta frequência natural, pela adoção de um sistema com maior rigidez.

No galope, a amplitude de oscilação na direção transversal à do vento aumenta com a velocidade deste, não existindo um limite superior para ela. Este padrão difere do que acontece nas vibrações por desprendimento de vórtices, que ocorrem somente em uma gama relativamente estreita de velocidades.

Ensaio em túnel de vento conduzidos por Novak (1971) mostraram diferenças marcantes na vibração por galope em prismas de seção retangular, conforme as proporções e orientação destes em relação ao escoamento. Para seções quadradas, variações tanto no alteamento (*altura/largura* do prisma) quanto na intensidade da turbulência causam alterações nos coeficientes de arrasto e de força lateral, sendo que a influência da turbulência varia conforme a sua intensidade e as dimensões da seção transversal, podendo levar à redução, ao aumento ou, até mesmo, à completa eliminação das oscilações por galope.

A instabilidade por galope pode afetar a resposta de uma estrutura submetida ao vento, mesmo em velocidades abaixo da velocidade de disparo, porque a simples diminuição do amortecimento aerodinâmico reduz o amortecimento total, aumentando a resposta da estrutura a excitações transversais.

2.2.3 Acelerações

Os deslocamentos em uma estrutura podem ser limitados por um incremento na sua rigidez, através da escolha eficiente dos mecanismos de travamento. Entretanto, estes enrijecimentos nem sempre reduzem os níveis de aceleração de maneira satisfatória. No caso de edifícios altos, as acelerações induzidas pelo vento são de importância fundamental, em termos de utilização da estrutura, e por isto devem ser tratados com atenção.

Estudos conduzidos por diversos pesquisadores, a exemplo de Chang (1973), Chen & Robertson (1972) e Yamada & Goto (1977), têm mostrado que a percepção humana do movimento é melhor descrita em termos de aceleração; desta forma, o problema do conforto do

usuário (*Estados Limites de Utilização*) pode ser associado à aceleração a que este está submetido.

As normas indicam níveis aceitáveis de aceleração. A *International Organization for Standardization* (ISO) propõe níveis máximos que variam conforme a frequência natural do edifício, sendo que o NBCC propõe níveis de aceleração que variam entre 10 mili-g e 30 mili-g. A duração e a recorrência de oscilações acima de um determinado limite são fenômenos mais significativos do que um pico ocasional.

Dados de medições em escala real para diversos edifícios altos têm sido obtidos e, em alguns casos, comparados com resultados de ensaios em túnel de vento. Trabalhos conduzidos por Dalgleish et al. (1983), Dobryn et al. (1987), Ioannides & Parker (1986), Isyumov & Halverson (1984), Jeary et al. (1988), Jeary & Ellis (1981), Lee (1983), Mills (1981) e Snaebjornsson (1989) contribuem para o aumento deste acervo.

O *Commentary of the National Building Code of Canada* (NBCC) provê um método para a estimativa dos picos de aceleração nas respostas transversal e longitudinal e Solari (1982) desenvolveu um procedimento simplificado, descrito em detalhes por Simiu & Scanlan (1986), que orienta na determinação dos valores de pico e RMS para acelerações na resposta longitudinal.

2.2.4 Ações Mitigadoras

Muitos pesquisadores e engenheiros, tais como Vickery, Isyumov & Davenport (1983), Isyumov, Dutton & Davenport (1989), Kareem (1983), Banavalkar (1990) e Tamura (1998), já investigaram métodos para mitigar as excitações e melhorar a performance de edifícios altos frente à ação dos ventos.

A maioria destes esforços concentrou-se em modificações nas características aerodinâmicas e estruturais do edifício, tais como rigidez, amortecimento e distribuição de massas, com o uso de dispositivos auxiliares, tais como amortecedores passivos, ativos e mistos.

De acordo com Davenport (1988), modificações na geometria do edifício, variando-se a sua seção transversal com a sua altura, alteram o padrão de escoamento em torno do prédio, podendo reduzir vibrações devidas ao vento. Distribui o desprendimento de vórtices por uma

gama de frequências mais ampla e, desta forma, reduz a resposta na direção transversal. Kim & You (2002) concluíram que esta estratégia apresenta maior redução na resposta transversal do que na longitudinal.

Outra abordagem é a introdução de modificações aerodinâmicas na envoltória do edifício, que podem atuar de maneira passiva ou ativa.

Sistemas ativos usam um dispositivo de controle que insere ou recolhe aletas ou *spoilers* no escoamento, conforme a necessidade, a fim de alterarem as suas características em torno da edificação, em situações críticas. Os métodos passivos propõem a existência de dispositivos que se incorporam de maneira definitiva à geometria do prédio. Entretanto, a utilização destes sistemas de controle de escoamento encontra dificuldades de aplicação prática.

Estudos realizados por Ogawa et al. (1987), Shiraishi et al. (1987), Kwok & Bailey (1987) e Kwok et al. (1987) concentraram-se no tratamento dos cantos do edifício, com a introdução de chanfros, canaletas e orifícios. Kwok (1988) concluiu que a introdução de chanfros e o recorte de cantos causam redução significativa tanto nas respostas transversais quanto nas longitudinais.

Neste aspecto, Dutton & Isyumov (1990) realizaram pesquisas introduzindo aberturas e frestas na metade superior da envoltória de edifícios altos, concluindo que esta alternativa causa impactos muito positivos na redução do desprendimento de vórtices e, desta forma, nas respostas transversais.

2.3 AMORTECIMENTO

A dissipação da energia associada ao movimento oscilatório de uma estrutura está diretamente ligada ao fator de amortecimento que esta possui, tendo relação estreita com os níveis de aceleração e deslocamento que a mesma pode sofrer. O projetista deve prover soluções que incorporem níveis suficientes de amortecimento à edificação, de forma a mantê-la dentro dos padrões aceitáveis dos *Estados Limites de Utilização*.

Infelizmente, um modelo geral que descreva este fenômeno de maneira exata não é possível, na medida em que ainda não estão perfeitamente claras quais são as variáveis realmente responsáveis pela sua existência, e em quais proporções. De acordo com Kijewski & Kareem

(2000), o fato de existirem numerosos mecanismos relacionados ao amortecimento, que são mais variados e menos compreendidos do que os mecanismos físicos que governam massa e inércia, faz com que a escolha apropriada de um modelo matemático seja muito difícil.

O que se tem feito, então, é estimar um valor no momento do projeto, baseando-se nas características gerais da edificação projetada e nos padrões geralmente adotados, tentando-se fazer com que o projeto final leve a uma edificação que se encaixe nos critérios mínimos exigíveis.

Uma alternativa mais científica é a utilização de expressões baseadas em informações oriundas de bancos de dados de medições em escala real, a exemplo do chamado *Japanese Damping Data Base (JDDB)*, que em 2003 já englobava informações das propriedades dinâmicas de 278 estruturas e de medições feitas em 185 edifícios na Ásia, Europa e América do Norte.

A partir deste e de outros repositórios, de informação uma variedade de expressões empíricas já foram desenvolvidas. Porém, ainda há ruídos significativos nos dados existentes, que podem levar a projetos equivocados, funcionais no papel, mas que na prática não atinjam os níveis de conforto desejados.

O amortecimento total de uma estrutura é composto por 2 parcelas, denominadas *amortecimento estrutural* e *amortecimento aerodinâmico*.

2.3.1 Amortecimento Estrutural

O amortecimento estrutural pode ser associado, basicamente, a 3 mecanismos fundamentais de formação, sendo estes relacionados às características de amortecimento do material do corpo da edificação, ao amortecimento gerado pela dissipação de energia nas junções entre elementos estruturais e ao amortecimento gerado pelo contato da edificação com o solo, através das fundações.

Quando uma edificação é nova, os elementos formados por materiais frágeis, tais como alvenaria, concreto e argamassa, ainda estão com baixos níveis de fissuração. Na medida em que movimentações devidas ao uso são impostas à esta edificação, esses materiais começam a trincar, num processo que deve se estabilizar quando um determinado limite é atingido. Durante

a fissuração, parte da energia associada ao movimento é consumida, traduzindo-se em um incremento no amortecimento estrutural.

Entretanto, ao se atingir o nível de fissuração *final*, não existe mais os mecanismos de dissipação de energia associados a esse processo. Neste momento, a energia que outrora era consumida na formação de fissuras agora permanece no sistema, tendo que ser dissipada de outra forma. O resultado é um amortecimento estrutural menor do que os níveis apresentados no início da vida útil da edificação (*Riera, 2003).

Em estruturas em aço, o amortecimento devido aos movimentos relativos nas interfaces de juntas e conexões apresenta-se de maneira não-linear, sendo muito difícil de ser quantificado, podendo significar perdas bastante consideráveis.

Amortecimento adicional ainda pode ser provido por elementos não estruturais e pelas paredes de fechamento, sendo que o aumento do amortecimento estrutural diminui a amplitude de oscilação, como pode ser visto na Fig. 2.14.

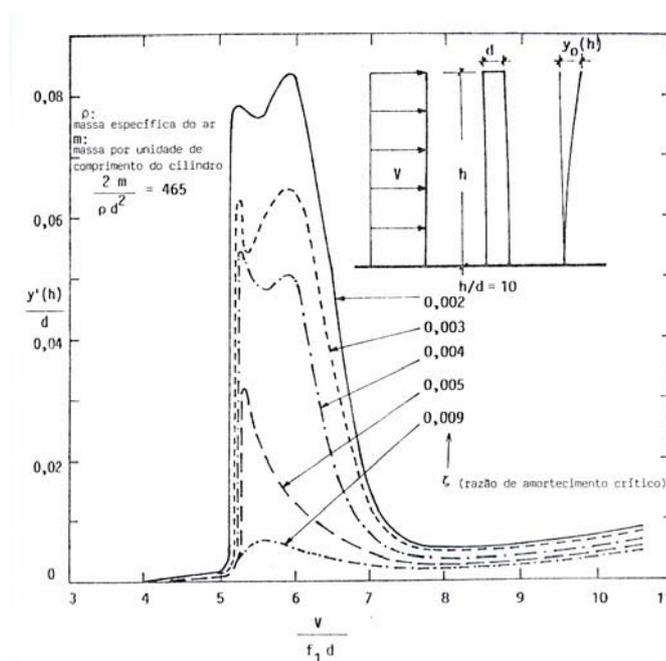


FIGURA 2.14 - Influência do amortecimento estrutural para regime sub-crítico (Blessmann, 1990)

Kawai (1992) também apresenta dados relativos a este assunto, que apontam que quanto maior o amortecimento menor é o pico de deslocamentos por desprendimento de vórtices, na resposta transversal. No mesmo estudo aponta que o amortecimento tem influência variável nas respostas; podendo causar impacto positivo ou negativo nestas, de acordo com a forma da seção.

Já foi determinado, através de experimentos, que o valor do amortecimento varia com a amplitude das oscilações (Jeary, 1981) e uma comparação direta entre diferentes ensaios em diferentes escalas nem sempre se torna apropriada. Jeary (1983) também afirma que o valor da resposta para ventos extremos é influenciado de maneira proporcional à raiz quadrada do valor do amortecimento, que as frequências de vibração podem também variar com a amplitude e que quanto maior a amplitude, maior o amortecimento.

De acordo com Kareem (1983) o aumento no amortecimento reduz a resposta RMS por um fator que é a raiz quadrada da relação entre o valor original e o novo do amortecimento. Mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, exceto o amortecimento, a relação entre as respostas RMS é dada pela Eq. 2.11.

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \sqrt{\frac{\zeta_1}{\zeta_2}} \quad (2.11)$$

A estimativa do valor do amortecimento estrutural do protótipo geralmente representa a maior incerteza. Valores nominais de 1% e 2% para estruturas de aço e de concreto armado respectivamente são geralmente utilizados. Em situações onde o amortecimento é de difícil estimativa, valores menores são preferidos, por serem conservadores.

Porém, é importante ressaltar que a modelagem do amortecimento deve ser feita com muita sabedoria, pois este pode controlar o nível dos efeitos aeroelásticos (Zhou & Kareem, 2003). O comportamento relativo ao amortecimento estrutural de uma edificação varia de caso a caso, fazendo com que a identificação de um *nível esperado de amortecimento* para um dado projeto torne-se uma tarefa “desanimadora”.

Atualmente, o melhor entendimento do amortecimento estrutural ainda vem de medições conduzidas em protótipos que, devido às dificuldades que impõem, criam a

necessidade de ferramentas acuradas para a sua obtenção e estimativa. Qualquer imprecisão no levantamento e na análise dos dados pode introduzir ruídos nos resultados.

As estimativas práticas do amortecimento estrutural são obtidas através de ensaios controlados de Vibração Forçada, que geram os espectros de resposta de frequência e os Testes de Impacto, que geram as respostas de vibração livre. Desta forma, a excitação é conhecida e estaticamente estacionária. Entretanto, estas abordagens tendem a ser impraticáveis e caras na grande maioria das edificações.

Uma alternativa é o uso das excitações ocasionadas por ocorrências naturais e devidas ao uso, tais como vento e terremotos. Embora mais fáceis e baratas, a análise dos dados obtidos desta forma ainda apresenta muitos desafios.

2.3.2 Amortecimento Aerodinâmico

Quando uma estrutura propensa a oscilações é exposta ao vento, sofre um carregamento aerodinâmico variável no tempo que a põe em movimento, propiciando o surgimento de uma força aerodinâmica originada pelos deslocamentos relativos entre a estrutura e a massa de ar circundante. Esta força é expressa pelo chamado *amortecimento aerodinâmico* (ζ_a), sendo decorrente da parcela do carregamento em fase com a velocidade dessas movimentações relativas. Desta forma, pode-se considerar o amortecimento aerodinâmico como sendo um fenômeno que surge da interação entre as movimentações da estrutura e a ação do vento.

Tal fenômeno, aliado ao amortecimento estrutural, determina a estabilidade das oscilações, reduzindo ou até mesmo amplificando as amplitudes de oscilação ao longo do tempo, tornando-se significativo para altas velocidades.

Porém, os seus efeitos tornam-se negligenciáveis para a maioria dos edifícios com amortecimento estrutural dentro dos padrões geralmente obtidos, nas velocidades atingidas na prática, de acordo com Evans & Lee (1983). Nas respostas transversais ele pode vir a tornar-se negativo para velocidades altas de vento ou para deslocamentos acentuados, causando uma amplificação dos efeitos, a exemplo do galope que está fundamentalmente associado a amortecimentos aerodinâmicos negativos.

Várias técnicas podem ser usadas a fim de se avaliar o amortecimento aerodinâmico, sendo que uma delas é a execução de ensaios aeroelásticos conhecendo-se de antemão os valores do amortecimento estrutural dos modelos. Assim pode-se estimar ζ_a a partir de mudanças na porção ressonante da resposta dinâmica, com medidas das acelerações nos GDL's dos modelos.

Uma segunda alternativa é a medição do espectro da resposta e, a partir daí, estimar-se ζ_a a partir da função de autocorrelação. Esta técnica é confiável apenas se a resolução da medição das frequências é suficientemente fina. Incorre na necessidade da existência de uma grande série de dados registrados, a fim de se obter uma base estatística confiável.

Os efeitos do amortecimento aerodinâmico em corpos prismáticos, relacionados às respostas transversais e longitudinais, têm sido estudados e discutidos por alguns pesquisadores, a exemplo de Davenport (1979), Kareem (1982), Marukawa (1992), Nishimura (1992) e Zhang et al. (1993), entretanto ainda há escassez de dados relevantes e objetivos, que possam esclarecer e ilustrar de maneira completa as suas características.

3 MODELAGEM – FUNDAMENTOS E APLICAÇÃO

3.1 MODELAGEM AEROELÁSTICA

A modelagem aeroelástica é uma técnica que engloba um conjunto de procedimentos que visam a reproduzir, através do uso de um modelo reduzido em túnel de vento, as características geométricas e dinâmicas das interações vento-estrutura que ocorrem em um protótipo.

É de grande valia em estudos de estruturas que são suscetíveis aos efeitos dinâmicos induzidos pelo vento, que dependem tanto da natureza da excitação quanto das próprias características da estrutura. Provê informações a respeito do carregamento global induzido, bem como das respostas da estrutura. Tais testes ganham importância na medida em que as estruturas têm avançado para configurações mais esbeltas e flexíveis, onde os seus deslocamentos modificam as forças aerodinâmicas.

No caso de edifícios altos, esbeltos e flexíveis, a excitação pode ser significativamente amplificada pela estrutura e a resposta dinâmica pode vir a tornar-se ressonante. Nestas situações, a componente dinâmica da resposta pode representar de 1/2 a 2/3 do total, desempenhando papel de destaque nas considerações de projeto.

Para que uma modelagem aeroelástica leve a resultados que representem a realidade em escala natural, é necessário que o processo como um todo seja reproduzido, o que inclui as características do escoamento assim como as características dinâmicas e geométricas da edificação a ser estudada. Uma variação de 10 % na magnitude da velocidade do vento, para um nível de probabilidade de ocorrência em particular, corresponde a aproximadamente 25% de variação no carregamento estático e 30% nas acelerações que são induzidas (Isyumov, 1982).

Busca-se, principalmente, atingir a equivalência modelo-protótipo nos seguintes aspectos:

- Semelhança entre as características médias e flutuantes do escoamento;

- Semelhança geométrica da estrutura em uma escala condizente com a escala de modelagem do vento, em termos de tamanho de turbilhão e perfil vertical de velocidades;
- Semelhança de forças aerodinâmicas, através da modelagem correta do número de Reynolds;
- Semelhança de forças de inércia e características de rigidez entre modelo e protótipo;
- Semelhança de amortecimento.

Os modelos aeroelásticos são projetados para simularem as propriedades dinâmicas dos protótipos para os modos de vibração que contribuem de maneira significativa nas respostas dinâmicas. Felizmente a ação do vento sobre edifícios altos está confinada basicamente aos modos mais baixos de vibração.

Escala geométrica da ordem de 1:300 a 1:500 são geralmente utilizadas em simulações aeroelásticas, adequando-se à escala de modelagem do vento; sendo que um dos parâmetros utilizados para a determinação desta escala geométrica é o número de *Strouhal*. Correções fazem-se necessárias quando o túnel tem mais do que 5% de sua seção de escoamento bloqueada.

As características do ar, em termos de simulação, acabam por não necessitar de maiores considerações. Entretanto, em situações onde a sua densidade e a sua temperatura variam muito entre modelo e protótipo, ajustes fazem-se necessários.

Os edifícios geralmente são compostos pelas paredes e pela malha estrutural, formada pelas vigas e pilares. Sob carregamento lateral as paredes deformam-se num modo de flexão enquanto a malha estrutural deforma-se num modo cortante. Quando paredes e estrutura trabalham em conjunto, unidas por lajes consideradas não deformáveis, o edifício como um todo deforma-se num modo de flexo-corte, aproximado por uma linha reta. A Fig. 3.1 ilustra este cenário.

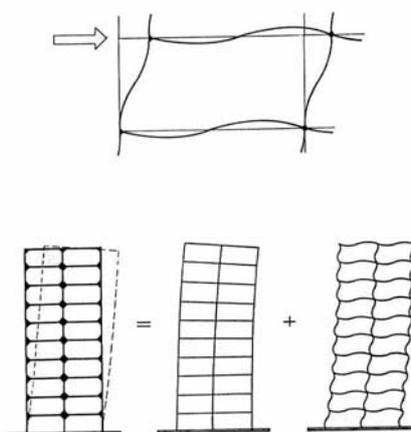


FIGURA 3.1 – Deformação na malha estrutural de um edifício alto, frente à ação de carregamentos laterais (Ellwanger, 1996)

No caso de edifícios altos é comum que se usem modelos aeroelásticos equivalentes compostos por uma casca não estrutural, que provê a semelhança geométrica, aliada a um sistema estrutural interno equivalente, que reproduz as características de rigidez, amortecimento e massa em escala. O movimento oscilatório de um edifício alto em resposta à ação do vento pode ser descrito pela Eq. 3.1.

$$m^* \ddot{\xi} + c^* \dot{\xi} + k^* \xi = P^* \quad (3.1)$$

onde m^* , c^* , k^* , P^* , $\ddot{\xi}$, $\dot{\xi}$, ξ são a massa, amortecimento, rigidez, carregamento, acelerações, velocidades e coordenadas generalizadas.

3.1.1 Técnicas de Modelagem aeroelástica

Diversas técnicas de modelagem aeroelástica têm sido pesquisadas e utilizadas ao longo da história da Engenharia do Vento, sendo escolhidas conforme a complexidade das características dinâmicas e aerodinâmicas do edifício em estudo. Muitos pesquisadores têm contribuído nesta área, a exemplo de Irwin (1982), Isyumov (1982) e Templin & Cooper (1980).

Na grande maioria das estruturas alteadas, apenas as respostas nos modos fundamentais de vibração têm-se feito significativas (Kareem, 1982), sendo que esta idéia é compartilhada por Jeary (1983), que diz que normalmente apenas o modo fundamental de vibração precisa ser modelado.

Este fato favorece a implementação de técnicas simplificadas de modelagem, onde apenas os 2 modos translacionais de vibração são simulados, provendo-se ao sistema um ponto de rotação que permita a manutenção da similaridade entre os deslocamentos no topo do modelo e no topo do protótipo, respeitando-se as demais leis de semelhança. Desta forma os modos de vibração do modelo se assemelham aos do protótipo, em escala. Um exemplo clássico a citar é o modelo do tipo *stick*.

Em situações onde o modo de vibração afasta-se significativamente da linha reta correções fazem-se necessárias, e estudos conduzidos por Vickery (1972) contemplam esta situação. Outra alternativa é o uso de modelos mais complexos.

O amortecimento pode ser provido de diversas formas, mas com certeza a mais utilizada é o banho de óleo.

Descrevem-se, na seqüência, algumas técnicas de modelagem aeroelástica.

3.1.1.1 Modelos Aeroelásticos do tipo *Stick*

No estudo das respostas induzidas pelo vento em edifícios altos, a modelagem aeroelástica com a utilização de modelos do tipo *stick* tem sido empregada com sucesso em ensaios em túnel de vento de camada limite, a fim de se estimarem as respostas dinâmicas nos sentidos transversal e longitudinal. Foi um dos primeiros tipos de modelagem a serem utilizados e as técnicas para o seu uso e instrumentação têm sido bem documentadas por muitos pesquisadores, a exemplo de Isyumov (1982), Whitebread & Scruton (1965), Kareem & Cermak (1979), Saunders & Melbourne (1975), Boggs (1991), Kwok et al. (1999) e outros.

Esta técnica é tradicionalmente utilizada em estudos de edifícios altos e esbeltos, nos quais a resposta induzida pelo vento está majoritariamente relacionada aos 2 modos fundamentais de vibração, sendo que os efeitos induzidos de torção são julgados de menor importância.

A Fig. 3.2 apresenta um modelo do *CAARC Standard Tall Building*, onde foi utilizada a técnica de modelagem por *stick*, na escala 1/400.

provê informações sobre a distribuição do carregamento médio do vento ao longo da altura do edifício, necessária para a determinação do carregamento estático.

3.1.1.2 Modelos Aeroelásticos com múltiplos graus de liberdade

Sistemas mecânicos discretos, compostos por diversas massas interconectadas elasticamente, onde cada uma apresenta 2 GDL's translacionais e 1 GDL rotacional (ao redor do eixo vertical), podem analogamente comportar-se como modelos dinâmicos de edifícios. Uma representação esquemática deste tipo de sistema é apresentada na Fig. 3.3.

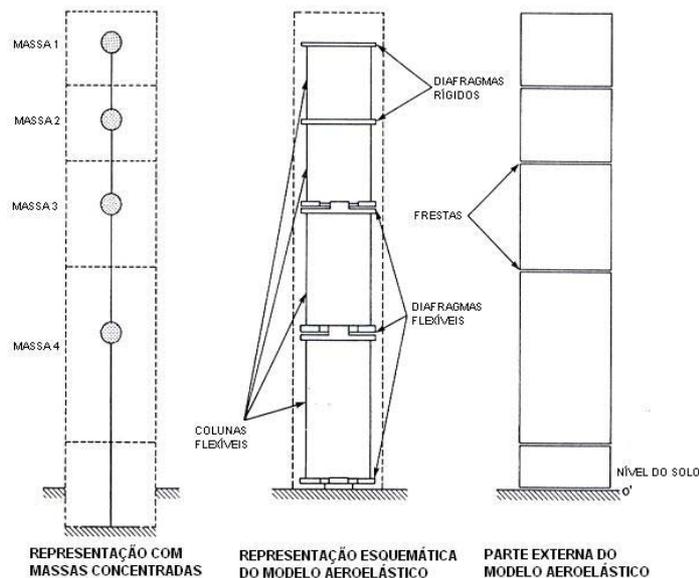


FIGURA 3.3 - Modelo aeroelástico com diversos GDL's (Isyumov, 1982)

Estes dispositivos podem ser utilizados para simulação de um número qualquer (dentro de certos limites) de modos de vibração translacionais e torcionais. São adequados para estudos aeroelásticos de edifícios com estruturas mais complexas, onde os efeitos de torção desempenham papel de importância e em situações onde os modos mais altos de vibração contribuem de maneira significativa para as respostas da estrutura.

A principal vantagem deste tipo de modelo é sua habilidade em simular comportamentos estruturais complexos, provendo os resultados mais confiáveis.

A maior desvantagem é a grande complexidade inerente ao seu projeto e a sua construção, bem como a sua instrumentação e calibragem, o que leva invariavelmente a custos elevados. Em relação aos modelos do tipo *stick*, apresenta maior dificuldade em se obter variações nas suas características dinâmicas, também não fornecendo informações sobre o carregamento estático induzido pelo vento.

3.1.1.3 Outros tipos de Modelos Aeroelásticos

Algumas soluções alternativas têm sido estudadas e desenvolvidas, baseando-se em modificações da estrutura que suporta o *stick*, de maneira a proporcionar um grau de liberdade torcional ao sistema. Durgin & Tong (1972) desenvolveram um dispositivo onde o modelo, como um todo, podia girar como um corpo rígido.

Como outro exemplo pode-se citar a chamada *Base Hinged Aeroelastic (BHA)*, apresentada por Thepmonkorn et al. (1999) e que incorpora as vantagens dos modelos do tipo *stick* com a modelagem das respostas de flexo-torção, sem a complexidade dos modelos de múltiplos graus de liberdade. A Fig. 3.4 ilustra esquematicamente este sistema e a Fig. 3.5 apresenta o mesmo sendo utilizado na modelagem do *CAARC Standard Tall Building*, numa escala de 1/400.

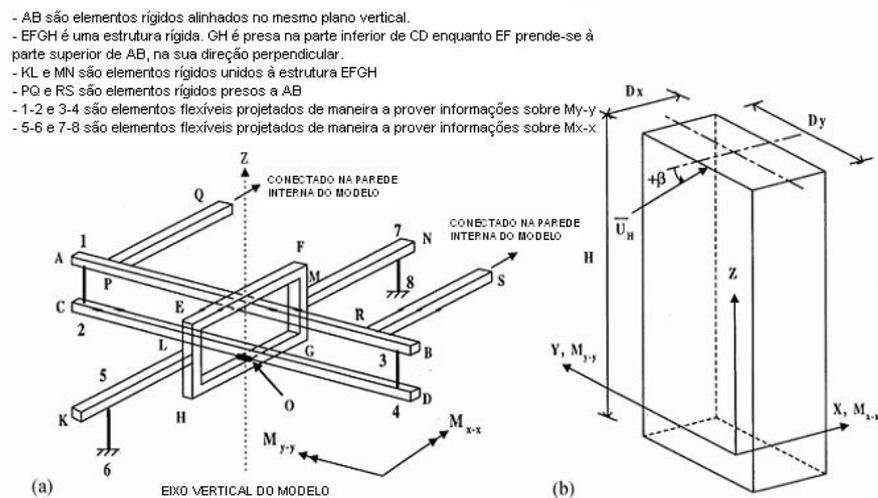


FIGURA 3.4 - Representação esquemática do BHA: (a) BHA, com 2 GDL; (b) modelo de edifício (Thepmonkorn et al., 1999)

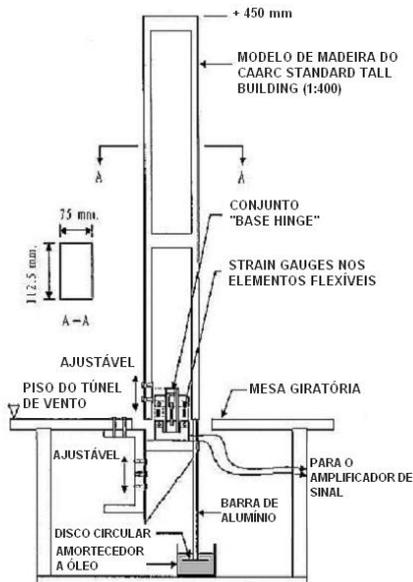


FIGURA 3.5 - CAARC Standard Tall Building modelado com BHA (Thepmonkorn et al., 1999)

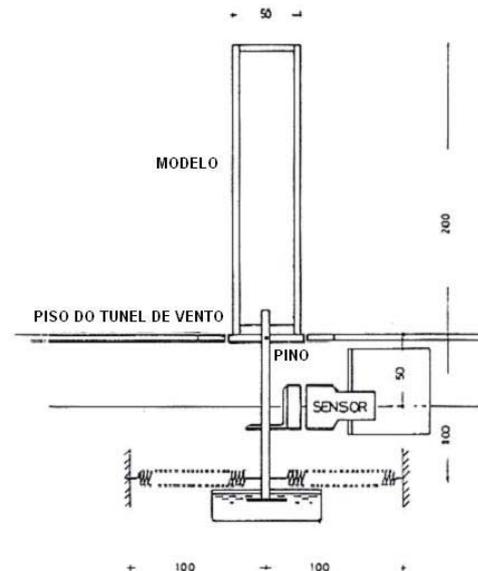


FIGURA 3.6 – Modelo Rígido (Matsumoto, 1986)

Uma outra técnica empregada é a utilização de modelos rígidos, montados sobre dispositivos similares aos mecanismos de rigidez e amortecimento utilizados nos modelos do tipo *stick*. Matsumoto (1986) utilizou-se desta técnica para executar estudos relacionados à resposta transversal de edifícios altos. A Fig. 3.6 ilustra o modelo.

A utilização de materiais com propriedades dinâmicas conhecidas e apropriadas, tais como borracha, epoxi, alumínio ou combinação destes, que simulam as propriedades dinâmicas do protótipo no próprio corpo do modelo, na execução de modelos fixos a bases rígidas, tem sido retratada na literatura. Friedman (1978) buscou conhecimentos nesta área e Núñez (2001) conduziu estudos com modelos executados em epoxi e alumínio, para retratar a resposta dinâmica de uma torre de 90 metros de altura estruturada em concreto armado.

Outras duas técnicas já aplicadas e retratadas na literatura (Boggs, 1992) são representadas na Fig. 3.7.

Em (a) o tubo de alumínio é fixo de maneira rígida à uma chapa fina, sustentada por molas planas. Os grampos destas molas são ajustáveis, sendo que estas podem ser trocadas por

outras de várias espessuras, a fim de se impor ao modelo uma variação em sua rigidez. O amortecimento é provido por placas imersas em banho de óleo.

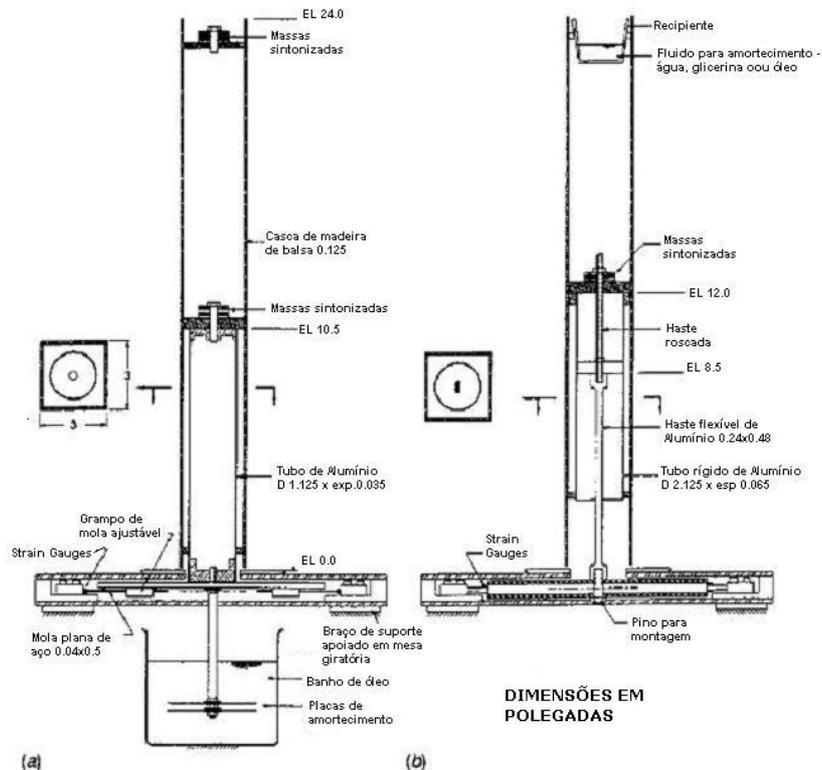


FIGURA 3.7 – Modelos aeroelásticos utilizados por Boggs (1992)

Este sistema apresentou o inconveniente de poder tornar-se não-linear em situações de respostas de grandes amplitudes, devido ao fato da sua rigidez estar atrelada a sua amplitude.

O modelo apresentado em (b) é baseado na *Balança Aerodinâmica* que, devido a sua rigidez elevada, tem capacidade de carga e de saída de sinal bem adequadas aos carregamentos produzidos por um modelo aeroelástico. A flexibilidade do modelo é proporcionada por uma barra de alumínio de 0,24x0,48x8 polegadas (6,1x12,2x203,2 mm). Neste sistema o centro de rotação do modelo não é facilmente determinado, dependendo da altura efetiva do carregamento e das características dinâmicas deste.

3.1.2 Balança de Força de alta frequência

É uma abordagem alternativa à modelagem aeroelástica, que tem sido utilizada na determinação das respostas dinâmicas induzidas pelo vento em situações onde esperam-se que os efeitos do amortecimento aerodinâmico sejam reduzidos e que as componentes principais da

resposta estejam atribuídas apenas aos modos fundamentais de vibração. Os efeitos aeroelásticos não são obtidos e precisam ser estimados por outros métodos.

Consiste, basicamente, num modelo rígido e leve da geometria externa do edifício, montado sobre uma base flexível com rigidez e amortecimento apropriados ao caso. Descrições mais detalhadas podem ser encontradas nos trabalhos publicados por Whitbread (1975) e Tschanz (1982).

A sua utilização incorre em custos menores, quando comparados a técnicas de modelagem aeroelástica, e tem sido conduzida cada vez mais. Porém apresenta alguns inconvenientes, uma vez que proporciona apenas de forma aproximada os momentos torsores e não fornece de maneira acurada os carregamentos laterais, quando o modo de vibração da estrutura afasta-se da linha reta.

Isyumov (1992), através de testes comparativos entre medições com Balança de Força e Modelos Aeroelásticos, pôde comparar as duas técnicas e concluir que ambas apontam para resultados bastante coerentes entre si.

Melhorias na análise matemática dos resultados obtidos por esta técnica têm sido pesquisadas e Yip & Flay (1995) propuseram um método para isto.

3.1.3 Considerações sobre modelagem aeroelástica

O modelo aeroelástico *stick* tem servido como ferramenta na investigação das respostas induzidas pelo vento em edifícios altos. Entretanto, algumas questões ainda permanecem sem respostas na literatura, relacionadas à eficácia desta técnica como ferramenta de projeto. Esta preocupação surge em função das diferenças entre a forma modal e a distribuição de massas do modelo em relação ao protótipo.

Quando a forma modal do protótipo é linear e a distribuição de massas no modelo é a mesma do protótipo, existem semelhanças diretas entre os dois, em termos de deslocamentos, acelerações e momentos na base. Entretanto, estas situações são dificilmente atingidas na prática e os ensaios com modelos aeroelásticos podem não fornecer uma estimativa confiável das respostas em termos de protótipo.

Muitos edifícios, principalmente os mais altos e flexíveis, apresentam modos de vibração que podem afastar-se da linha reta, bem como distribuição de massas complexa. Isto dificulta a reprodução destas características nos modelos reduzidos.

Em relação às diferenças nos modos de vibração, duas abordagens têm sido empregadas:

- aproximar o modo de vibração do protótipo utilizando-se uma linha reta que englobe a maior parte do modo de vibração real, através do ajuste do centro de giro do modelo (Isyumov, 1992), conforme Fig. 3.8;
- correções matemáticas, a fim de adaptarem-se as observações de ensaios no modelo à realidade do protótipo. Diversos pesquisadores têm buscado informações neste sentido, a exemplo de Vickery (1970), Kareem (1984), Vickery et al. (1985) Holmes (1987), Boggs (1991), Xu et al. (1993), Kijewski & Kareem (1998) e Zhou et al. (1999, 2002).

Variações significativas em relação ao problema da modelagem correta da distribuição de massas têm sido encontradas na literatura. Por exemplo, Cermak (1977), Isyumov (1982) e ASCE (1999) afirmam que a semelhança na distribuição de massas e no momento de inércia de massa é necessária para uma correta modelagem; enquanto Bienkiewicz et al. (1986) e Boggs (1991) afirmam que a modelagem exata da distribuição de massas não se faz necessária.

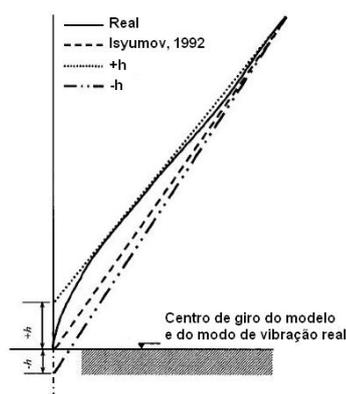


FIGURA 3.8 – Modelagem do modo de vibração em modelos aeroelásticos (Zhou & Kareem, 2003)

É evidente que ao modelar-se a massa total com uma distribuição diferente ao longo da estrutura resulta em uma não reprodução correta nem do Momento de Inércia de Massa nem da Massa Modal Generalizada. Foi comprovado por Zhou & Kareem (2003) que estes dois fatores influenciam de maneira direta nas respostas em termos de deslocamentos e acelerações no topo.

Nesta linha de raciocínio, Bienkiewicz et al. (1986) e Boggs (1991) afirmam que se o modelo é projetado de maneira a ter uma correta modelagem de massa, então as respostas, em termos de deslocamentos, obedecerão à escala de comprimentos, sendo *100% aeroelásticos*. Se o modelo é projetado de maneira a reproduzir a massa majorada por um fator 2, os deslocamentos serão minorados pelo mesmo fator, sendo considerados *50% aeroelásticos*, ou *sub-aeroelásticos*. O contrário também é válido, produzindo modelos *super-aeroelásticos*.

Embora os conceitos acima exponham uma grande vantagem, em termos de projeto de modelos aeroelásticos, devido ao afrouxamento nos requisitos de semelhança de massa, muito cuidado ainda deve ser tomado quando se modelam os efeitos aeroelásticos.

De acordo com os limitados dados de pesquisas disponíveis na literatura, a respeito dos efeitos aeroelásticos, tem sido percebido que a massa é um dos principais parâmetros na modelagem aeroelástica. Uma modelagem incorreta da massa pode resultar em uma imprecisa modelagem dos efeitos aeroelásticos (Zhou & Kareem, 2003). Entretanto, estudos ainda se fazem necessários em busca da definição da verdadeira influência da modelagem correta da massa e sua distribuição na modelagem aeroelástica de edifícios altos.

3.2 LEIS DE SEMELHANÇA

Para que se tenham dados passíveis de uma interpretação e uma correlação com a realidade física em escala natural, é necessário que se respeitem certos critérios de escala em relação ao comportamento dinâmico, à geometria, à massa e ao tempo no modelo, bem como em relação às características do escoamento, através das chamadas *Leis de Semelhança*.

Estas leis podem ser obtidas por uma análise dimensional ou pelas equações não-dimensionais do movimento (Langhaar, 1951), podendo ser didaticamente divididas em 3 grupos principais:

- *Semelhanças geométricas*: formas semelhantes, dispostas com a mesma orientação em relação aos dois escoamentos. A semelhança de formas inclui também a semelhança de detalhes e de rugosidade das superfícies dos dois sólidos.
- *Semelhanças dinâmicas*: pode ser encarada como uma semelhança geométrica das forças. As forças idênticas (forças de pressão, de viscosidade, de inércia, etc) em dois pontos correspondentes nos dois escoamentos são paralelas e guardam uma proporção constante. Remete a uma igualdade no número de Reynolds.
- *Semelhanças cinemáticas*: pode ser encarada como uma semelhança geométrica dos escoamentos. A distribuição das velocidades médias e as características de turbulência devem ser análogas nos dois escoamentos.

Se as condições acima forem cumpridas, as linhas de corrente em ambos os escoamentos terão o mesmo aspecto. Além disso, as forças que agem em um ponto de um dos escoamentos estarão na mesma relação que guardam no ponto correspondente do outro.

Matematicamente, isto pode ser expresso com o auxílio das Eq. 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5, que mostram as relações que devem apresentar os mesmos valores, tanto no modelo quanto no protótipo.

- escala de massas:
$$\frac{\rho_s}{\rho} = \frac{\text{forças de inércia do edifício}}{\text{forças de inércia do escoamento}} \quad (3.2)$$

- propriedades de rigidez:
$$\frac{E}{\rho.V^2} = \frac{\text{forças elásticas}}{\text{forças de inércia do escoamento}} \quad (3.3)$$

- amortecimento:
$$\zeta = \frac{\text{forças dissipativas}}{\text{forças de inércia do escoamento}} \quad (3.4)$$

- viscosidade:
$$\rho.V.L / \mu^2 \quad (3.5)$$

onde : ρ_s é a massa específica da edificação; ρ a massa específica do ar; E o módulo de elasticidade; V a velocidade do vento; L dimensão linear; μ viscosidade dinâmica do escoamento e ζ a razão de amortecimento crítico estrutural.

Para ensaios aeroelásticos em túnel de vento, a massa específica do ar na câmara de ensaios pode ser considerada igual à massa específica do ar relativa ao protótipo. Desta forma, a semelhança para as forças de inércia requer que a massa específica do corpo da edificação seja a mesma para o modelo e para o protótipo. Quando há variações, devido a diferenças de temperatura e altitude, correções devem ser feitas.

A modelagem do número de Froude é de consideração dispensável, quando se tratam de edifícios altos, assim como a modelagem exata das propriedades elásticas. Busca-se apenas semelhança no comportamento dinâmico nos modos de vibração para os quais a ação do vento é importante.

3.2.1 Geometria

A semelhança geométrica entre protótipo e modelo é baseada na busca por valores que sejam consistentes com a escala de comprimentos adotada na modelagem do vento, sendo que os parâmetros mais importantes neste contexto são a altura da camada limite e a escala de turbulência. O atendimento destes 2 critérios garante a manutenção da semelhança do perfil de velocidades do vento e proporciona uma relação conhecida entre as variações temporais e espaciais dos carregamentos aerodinâmicos.

Geralmente a escala geométrica é limitada pelo tamanho do túnel de vento e deve ser definida de maneira que a área de bloqueio da seção de escoamento não interfira nas características do vento modelado. Em relação ao número de Reynolds, deve-se atentar para que este não fique abaixo de 200, a fim de que não sejam impostas distorções nas forças aerodinâmicas.

A relação que define o parâmetro da escala geométrica é definida pela Eq. 3.6.

$$\lambda_L = \frac{L_m}{L_p} \quad (3.6)$$

onde L_m é a dimensão linear no modelo e L_p a dimensão linear no protótipo.

3.2.2 Massa

3.2.2.1 Translação

$$\lambda_M = \lambda_L^3 \cdot \lambda_{\rho b} \quad (3.7)$$

onde $\lambda_{\rho b}$ é relação entre as massas específicas do ar no modelo e no protótipo. Na maioria das situações em túneis de vento, $\lambda_{\rho b} = 1,0$, logo:

$$\lambda_M = \lambda_L^3 \quad (3.8)$$

Além da semelhança de massa total, existe uma relação para a sua distribuição linear ao longo da edificação, que é dada pela Eq. 3.9.

$$\lambda_m = \lambda_L^2 \cdot \lambda_{\rho b} \quad (3.9)$$

Como no caso anterior, para $\lambda_{\rho b} = 1,0$, levando à expressão descrita pela Eq. 3.10.

$$\lambda_m = \lambda_L^2 \quad (3.10)$$

3.2.2.2 Rotação – Momento de Inércia de Massa

$$\lambda_I = \lambda_L^5 \cdot \lambda_{\rho b} \quad (3.11)$$

Como no item anterior, $\lambda_{\rho b} = 1,0$, conduzindo à Eq. 3.12.

$$\lambda_I = \lambda_L^5 \quad (3.12)$$

3.2.3 Tempo

A escala de tempo é uma consequência dos demais parâmetros envolvidos na construção do modelo. Ela depende da escala geométrica (λ_L) e da escala de velocidades a adotar no túnel (λ_V). A escala de velocidades é definida como a relação entre a velocidade do vento no túnel (modelo) e a sua equivalente na natureza (protótipo) e pode ser expressa pela Eq. 3.13.

$$\lambda_V = \frac{V_m}{V_p} \quad (3.13)$$

onde os sub-índices m e p representam o modelo e o protótipo respectivamente.

Deve-se atentar para que a escala de velocidades propicie uma boa adequação às condições do túnel de vento, sendo possível simular todas as velocidades de vento de interesse.

A escala de tempo pode ser definida pela Eq. 3.14 e dela deriva a Eq. 3.15, que conduz às relações entre as frequências naturais entre o modelo e o protótipo, nos modos desejados.

$$\lambda_T = \frac{\lambda_L}{\lambda_V} \quad (3.14)$$

$$\lambda_T = \frac{f_m}{f_p} \quad (3.15)$$

onde f_m é a frequência do modelo e f_p a do protótipo.

3.2.4 Rigidez

A escala de rigidez (λ_K) em estruturas alteadas, num modo particular de vibração, pode ser determinada pela Eq. 3.16.

$$\lambda_K = \frac{\lambda_M \cdot \lambda_V}{\lambda_L \cdot \lambda_T} = \lambda_L \cdot \lambda_V^2 \cdot \lambda_{pb} \quad (3.16)$$

Como nos casos anteriores, pode ser considerado $\lambda_{pb} = 1,0$.

O parâmetro λ_K é uma relação entre a rigidez do modelo (k_m) e a rigidez do protótipo (k_p) podendo, também, ser expresso pela Eq. 3.17.

$$\lambda_K = \frac{k_m}{k_p} \quad (3.17)$$

3.2.5 Considerações

É praticamente impossível construir-se um modelo que atenda de maneira fiel a todos estes critérios de semelhança, sendo que devem ser buscadas as situações possíveis e exequíveis, podendo-se ignorar parâmetros que tenham pouca influência nas respostas de interesse.

Para edifícios altos com cantos vivos, o número de Reynolds exerce pouca influência no padrão de escoamento e nos campos de pressão no entorno da edificação, sendo usualmente ignorado.

3.3 O PROTÓTIPO - CAARC Standard Tall Building

O edifício padrão chamado *CAARC Standard Tall Building* é uma edificação hipotética, elaborada após um encontro do *Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council Coordinators in the Field of Aerodynamics*, em 1969, com o intuito de se estabelecer um meio para comparações entre as diferentes técnicas de ensaios que estavam sendo utilizadas em vários túneis de vento na época.

Era esperado que comparações diretas entre as respostas adquiridas com o uso de um modelo padronizado, obtidas por diferentes pesquisadores, ajudassem no desenvolvimento de melhores abordagens, dando maior credibilidade ao considerável volume de dados de testes que estavam sendo obtidos experimentalmente.

Em setembro de 1975, Melbourne apresentou na 5ª Conferência Internacional sobre Efeitos do Vento em Edifícios e Estruturas, realizada em Londres, uma compilação das medições que já haviam sido realizadas com o *CAARC Standard Tall Building* até então. Ficou acertado que, após alguns ajustes, estes dados serviriam de base de referência para que outros pesquisadores pudessem calibrar as suas metodologias. A finalização deste estudo foi publicada por Melbourne, em 1980, servindo como referência para este trabalho.

3.3.1 Características

O *CAARC Standard Tall Building* apresenta as seguintes características, sendo representado na Fig. 3.9:

- Seção : retangular de 30 x 45 m
- Altura : 180 m
- Massa específica : 160 kg/m³
- Massa total : 38.880 toneladas, linearmente distribuídas
- Modo de vibração : apenas o fundamental é considerado, sendo linear com ponto de rotação na base
- Frequência natural : 0,20 Hz, nas duas direções
- Amortecimento : 1% , nas duas direções
- Momentos de Inércia: : $I_{Mx} = 426.465.000 \text{ t.m}^2$

$$I_{My} = 422.820.000 \text{ t.m}^2$$

O topo do edifício é horizontal, plano e sem parapeitos. As paredes externas também são planas, sem quaisquer detalhes geométricos.

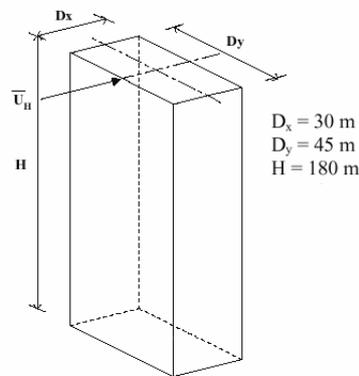


FIGURA 3.9 - CAARC Standard Tall Building

3.4 O MODELO

O projeto do modelo aeroelástico proposto neste trabalho baseia-se nos conceitos dos modelos do tipo *Stick* (item 3.1.1.1) e é neste item apresentado. Neste momento é importante saber que a escala geométrica adotada na sua construção foi de $\lambda_L=1/400$.

O modelo é dividido, essencialmente, em duas partes distintas, sendo que cada uma delas tem uma função diferente na reprodução das características da edificação a ser modelada:

- *Parte mecânica*: É o *stick* propriamente dito. Reproduz as características dinâmicas da edificação.
- *Casca externa*: Reproduz a envoltória da edificação. Deve ter os seus detalhes geométricos dimensionados de maneira satisfatória, a fim de impor ao vento um escoamento em escala reduzida semelhante ao ocorrido em escala natural.

3.4.1 Parte Mecânica

Pode-se, matematicamente, entender este conjunto como um oscilador de 1 GDL, com um comportamento dinâmico que tem a pretensão de reproduzir em escala o comportamento dinâmico de estruturas reais, neste caso o *CAARC Standard Tall Building*.

É composto por uma *parte móvel*, que deve ter total liberdade de rotação no GDL requerido (não sendo aceitos movimentos em outros GDL's) e por uma outra fixa, denominada *base*, que deve ter rigidez suficiente para não influenciar de maneira significativa nas características dinâmicas da parte móvel. O seu projeto básico é ilustrado na Fig. 3.10.

A *base* é composta por uma chapa de aço com espessura de #3/8" (9,5 mm) e dimensões laterais de 250x250 mm, que suporta 6 cantoneiras L 2"x3/16" (L 50,8x4,8 mm). Estas cantoneiras dividem-se em dois grupos:

- apoio para eixo
- fixação da mola

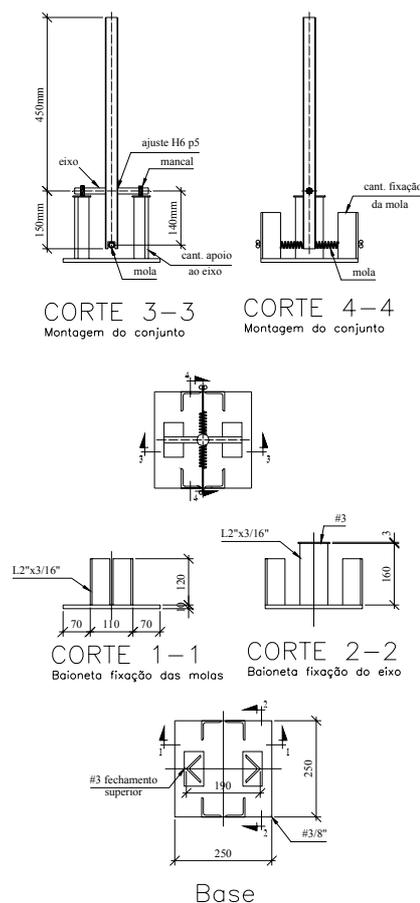


FIGURA 3.10 - Parte mecânica do modelo

Como apoio para o eixo, 2 cantoneiras com 160 mm de comprimento são colocadas de maneira centrada junto a 2 faces opostas da chapa-base, sendo encimadas por uma chapa fina de aço com 3 mm de espessura. A função desta chapa é receber um mancal de epoxi que suporta os rolamentos responsáveis pelo grau de liberdade do modelo.

Na fixação da mola, 4 cantoneiras de 120 mm de comprimento agrupam-se em 2 conjuntos de duas cantoneiras, alinhadas de maneira ortogonal ao alinhamento das cantoneiras de apoio ao eixo.

Este arranjo de peças é enrijecido por barras unindo as partes mais flexíveis do conjunto, conforme pode ser visto no detalhe da Fig. 3.11.



FIGURA 3.11 - Parte mecânica do modelo



FIGURA 3.12 - Mancal de Epoxi

A *parte móvel* do modelo é formada, basicamente, pelo fuste, que é composto por um tubo de alumínio com diâmetro externo de 31,75 mm, parede de espessura 1,59 mm e comprimento de 600 mm. Na parte inferior deste tubo prende-se a mola, perpendicularmente ao eixo de rotação, que é apoiado em dois rolamentos do tipo R-10Z fixos através de mancais rígidos moldados em epoxi nas cantoneiras de apoio para o eixo (Fig. 3.12). A mola é fixa através de parafusos às cantoneiras de fixação da mola.

O eixo é uma barra redonda de aço temperado, retificado e niquelado com diâmetro 5/8" (15,9 mm). Diâmetros menores foram testados em versões anteriores do modelo e resultaram em uma rigidez muito pequena, perturbando o movimento oscilatório do *stick*.

3.4.1.1 Rigidez do Modelo

A mola utilizada na confecção do modelo apresentou um total de 34 espiras com diâmetro externo de 17 mm, sendo constituída por um arame de aço de seção redonda com 2,8 mm de diâmetro. Ensaio de tração foram executados nesta mola e são transcritos na Tab. 3.1.

Dos ensaios conduzidos foram descartados os valores da primeira série, devido ao fato de esta ter sido a primeira solicitação na mola. Levaram a um valor de rigidez $K = 6250 \text{ N/m}$ para a região de interesse na mola (amplitude de utilização).

TABELA 3.1 - Ensaio de Tração na mola

Δx (mm)	Força em Newtons (N)		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
0,0	0	0	0
2,5	-	15	16
5,0	32	31	31
7,5	-	49	48
10,0	64	66	65
15,0	98	101	101
20,0	131	136	136

Na montagem do modelo, esta mola teve anulada a ação de 11 espiras, devido ao encaixe que foi feito no tubo de alumínio, onde a parte central dessa foi acoplada. Esta solução leva a uma configuração onde duas molas (formadas pelas espiras restantes da mola original) com rigidez de $k' = 18.750 \text{ N/m}$ cada uma atuam em paralelo (num total de $k' = 37.500 \text{ N/m}$) representada na Fig. 3.13.

A rigidez do modelo é representada pela força horizontal necessária a ser aplicada no topo deste para impor um deslocamento unitário neste ponto, na mesma direção da força. No modelo em questão, este valor é determinado através de um equilíbrio de momentos, conforme a Fig. 3.14.

Por limitações construtivas, o braço de alavanca da mola no modelo ficou limitado a **14 cm**, embora a parte inferior desse tenha 15 cm de comprimento.

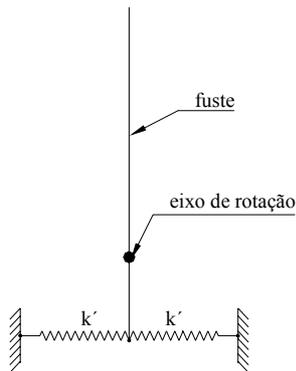


FIGURA 3.13 - Representação esquemática do *Stick*

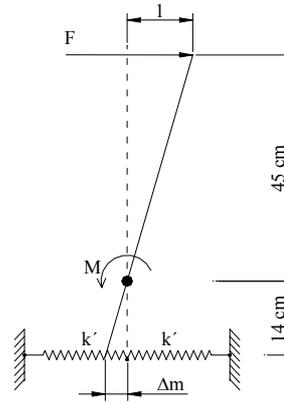


FIGURA 3.14 - Equilíbrio de momentos no *Stick*

É muito importante garantir que *toda* a rigidez à rotação do conjunto esteja atrelada à atuação da mola, ou seja, o fuste não pode deformar-se de maneira significativa. Com base nisto, foram feitas verificações matemáticas simples, considerando o esquema estrutural representado pela Fig. 3.15.

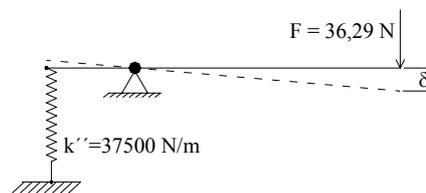


FIGURA 3.15 - Esquema estrutural para verificação da rigidez do *Stick*

O modelo pode ser representado por uma viga bi-apoiada com balanço em uma extremidade. O apoio esquerdo representa a mola e o direito o eixo de rotação. Aplicando-se uma carga concentrada na ponta dessa *viga*, equivalente à força F calculada para o deslocamento teórico de 1 cm ($F = 36,29 \text{ N}$), obtém-se uma flecha $\delta = 1,12 \text{ cm}$.

Este resultado indica que a deformação do fuste é responsável por 10,7% da rigidez do modelo e uma correção neste valor se faz necessária.

$$k_m = \frac{36,29 \text{ N}}{1,12 \text{ cm}} = 3240 \text{ N/m} \quad (27)$$

Assume-se, então, como rigidez do modelo $k_m = 3240 \text{ N/m}$.

Os valores obtidos aqui representam uma consideração matemática simples e inicial, necessitando de uma confirmação prática, que é descrita no Capítulo 4.

3.4.1.2 Momento de Inércia de Massa

A parte móvel do modelo é formada pelo fuste, pelo eixo, pelos rolamentos e pela mola, sendo que no cálculo do seu *Momento de Inércia de Massa* (I_M), devem-se computar as parcelas referentes a cada uma dessas partes.

3.4.1.2.1 Fuste

Uma representação esquemática do fuste é dada na Fig. 3.16.

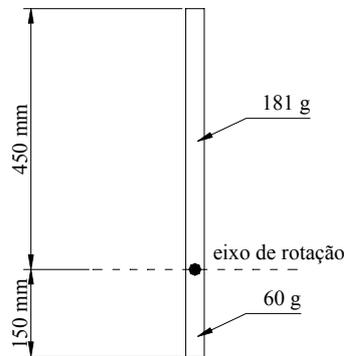


FIGURA 3.16 - Fuste

Os valores das massas foram definidos teoricamente, através da densidade linear do material utilizado, sendo que o cálculo do *Momento de Inércia de Massa* para cada trecho é feito através da Eq. 3.18.

$$I_M = \frac{m.l^2}{3} \quad (3.18)$$

onde m : massa total do trecho e l o seu comprimento.

O I_M total para o fuste é a soma das parciais relativas ao trecho abaixo do eixo de rotação (60 g) e ao trecho acima (181 g), atingindo um total de $I_M = 1,26 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$.

3.4.1.2.2 Eixo

Para barras prismáticas de seção redonda girando sobre o próprio eixo, utiliza-se a Eq. 3.19 para o cálculo do I_M .

$$I_M = \frac{m.r^2}{2} \quad (3.19)$$

onde m é a massa total da barra e r é o seu raio

O eixo é formado por uma barra maciça de aço de 5/8” de diâmetro, com um comprimento de 212 mm, o que leva a $I_M = 1,04 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2$. Este torna-se um valor desprezível, comparado ao valor obtido para o fuste.

3.4.1.2.3 Rolamentos

Desprezível.

3.4.1.2.4 Mola

Desprezível

Efetuando-se a soma das parcelas obtidas para cada constituinte da parte móvel do modelo chega-se a um valor total de momento de inércia de massa de $I_M = 1,26 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$.

3.4.1.3 Amortecimento

Para sistemas mecânicos, na prática, o amortecimento é normalmente pequeno. Para molas de aço a literatura indica um fator de amortecimento $\zeta = 0,5\%$. No Capítulo 4 o valor real

do amortecimento é obtido de maneira prática.

3.4.2 Casca Externa

Como a edificação a ser estudada apresenta, em escala natural, uma altura de 180 m e uma seção transversal de 30x45 m, a casca externa do modelo (respeitando-se a escala de 1/400) deve apresentar as seguintes dimensões:

- altura: 450 mm
- seção: 112,5x75 mm

Na Fig. 3.17 pode-se encontrar uma representação esquemática das dimensões externas do modelo.

Este modelo trabalha acoplado ao *stick* propriamente dito. Para isto, é necessária a existência de encaixes internos, que proporcionem um ajuste *com interferência leve* (executado através de pressão manual) entre o fuste do *stick* e a parte interna da casca.

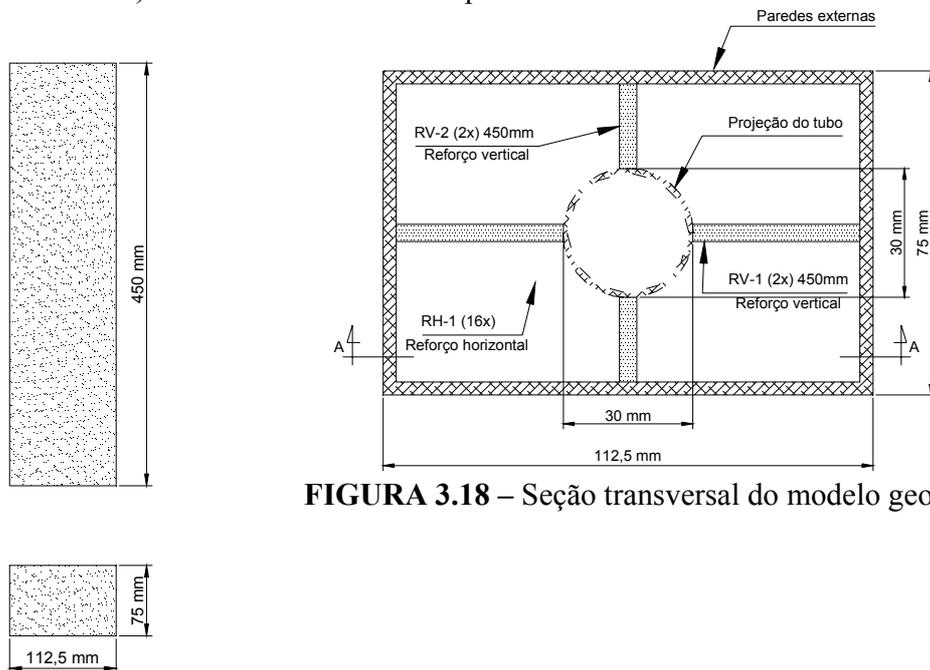


FIGURA 3.18 – Seção transversal do modelo geométrico

FIGURA 3.17 – Envoltória da casca externa do modelo

A Fig. 3.18 apresenta um corte da seção transversal do modelo, onde aparecem as peças que proporcionam este encaixe, ao mesmo tempo em que servem de reforço, enrijecendo a estrutura como um todo.

Os reforços verticais RV-1 e RV-2 garantem que os esforços devidos ao vento no modelo geométrico se transmitam de maneira linearmente distribuída ao *stick*. Asseguram, também, um incremento na sua rigidez, uma vez que integra a casca externa ao tubo de alumínio, impedindo deformações por flexão no fuste; transfere para a mola, desta forma, toda a responsabilidade pela rigidez do modelo.

Os reforços RH-1 têm como função enrijecer os reforços RV-1 e RV-2, evitando que estes apresentem deslocamento de seu eixo. Preenchem toda a seção horizontal onde se encontram, permitido apenas a passagem do tubo de alumínio, através da existência de um espaço circular com diâmetro de 30 mm.

Na Fig. 3.19 é possível que se veja o corte A-A, executado na Fig. 3.18. Neste corte aparecem dispostos verticalmente os reforços RV-1 e RV-2, bem como os reforços RH-1, em 4 níveis.

Em cada um dos 4 níveis, existem 4 peças iguais que apresentam a forma indicada na Fig. 3.20.

Com o projeto da casca externa definido, diversos materiais para a sua construção foram estudados. Dentre eles destacaram-se a *madeira de balsa*, o *papel bismarck*, a *chapa-pluma* e até mesmo o acrílico.

Na escolha do material, buscou-se o melhor equilíbrio entre os fatores *custo*, *rigidez*, *resistência* e *massa*, sendo que após alguns estudos, a *chapa-pluma* destacou-se entre as demais, tendo sido a escolhida para a confecção do modelo. Pôde ser obtida junto à *Casa do Desenho*, na cidade de Porto Alegre, e proporcionou uma casca externa finalizada com massa total de 157 g, o que atende de maneira satisfatória aos requisitos do projeto.

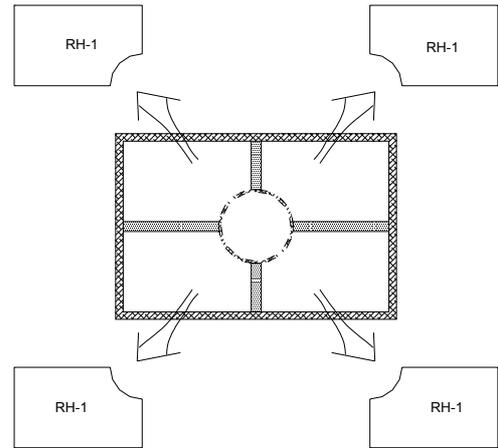
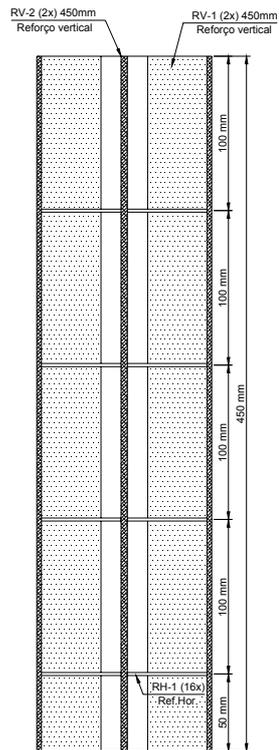


FIGURA 3.20 – Reforço RH-1

FIGURA 3.19 – Corte A-A da Fig. 3.18: longitudinal interno

4 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

Os ensaios foram conduzidos no túnel de vento *Prof. Joaquim Blessmann* (TV-2), no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), mostrado na Fig.4.1, durante os dias de 29, 30 e 31 de janeiro de 2004.

O procedimento baseia-se em, partindo-se da velocidade mínima do túnel, elevar-se a velocidade de escoamento do vento até esta atingir um valor máximo, passando-se por vários pontos de controle.

Em cada ponto de controle é verificada a pressão atmosférica [mmHg], o Δp_a na câmara [mmH₂O] e as temperaturas de início e final de cada tomada. Cada tomada é registrada em um arquivo gerado pelo software HP VEE 3.2, nomeado de acordo com o descrito no item 4.2.5.



FIGURA 4.1 – Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann*

4.1 TÚNEL DE VENTO

O túnel de vento *Prof. Joaquim Blessmann* está em operação desde 1977 e, através dele, muitos estudos de efeitos estáticos e dinâmicos sobre construções civis em geral, bem como relativos à norma NBR-6123, já foram conduzidos.

É um túnel de retorno fechado, possuindo uma relação *comprimento/altura* da câmara de ensaios igual a 10,3 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 (150 km/h). As hélices do ventilador são acionadas por um motor elétrico de 100 HP e a velocidade do escoamento é controlada manualmente através de alhetas radiais metálicas que obstruem a passagem do ar, conforme Fig.4.2.

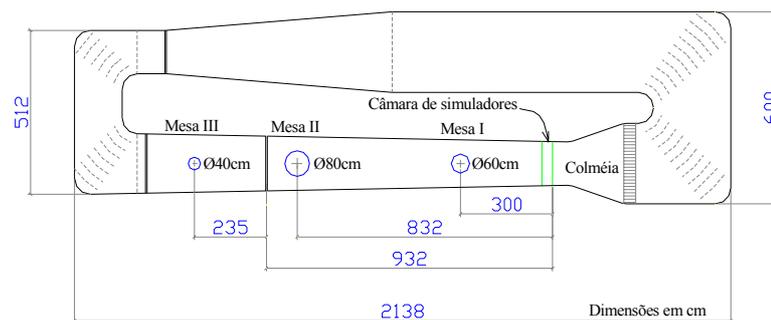


FIGURA 4.2 – Circuito aerodinâmico do Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann*

O túnel de vento do LAC/UFRGS dispõe atualmente de três mesas giratórias para fixação de modelos, tanto para ensaios estáticos como dinâmicos. Cada mesa tem suas aplicações específicas.

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

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

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

4.1.1 Determinação da velocidade do vento no túnel

Durante a realização dos ensaios a velocidade do túnel é monitorada através da medida do diferencial de pressão estática (pressão de referência), Δpa , lida em dois anéis piezométricos situados nos extremos do convergente situado na entrada da seção principal de trabalho. Estas leituras são sempre feitas por meio de um micromanômetro à água tipo Betz (Fig. 4.3).



FIGURA 4.3 – Micromanômetro à água tipo BETZ

Para os diversos perfis de velocidade dos ventos simulados no túnel foi determinado o coeficiente k_o , que vincula a pressão dinâmica, q , no eixo do túnel e a pressão de referência Δpa . Desta forma é possível calcular-se 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 Eq. 4.1.

$$q = k_o \Delta pa \quad (4.1)$$

onde: q é a pressão dinâmica ao longe $= (1/2) \rho V^2$ [mmH_2O]; V é a velocidade média do vento [m/s]; k_o é o coeficiente que vincula q e Δpa ; Δpa é a pressão de referência (diferença de pressão entre os anéis piezométricos) [mmH_2O].

4.1.2 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 & Isyumov, 1967), sem a qual os resultados obtidos podem se afastar consideravelmente da realidade.

Estudos experimentais desenvolvidos nos últimos anos mostraram a importância da simulação correta, e na escala do modelo, da camada limite atmosférica. Ensaio feitos em túneis aerodinâmicos, com escoamento de ar uniforme e turbulência muito baixa, podem levar a resultados que diferem sensivelmente dos correspondentes ao vento natural.

Além do perfil vertical de velocidades médias, são de importância as propriedades da turbulência, havendo certas formas e proporções de edificações que são particularmente sensíveis a intensidade e macro-escala dessa. Estes fatores influem na forma do escoamento em torno da edificação, na distribuição das pressões e na resposta dinâmica da estrutura. Erros na simulação da função de admitância aerodinâmica podem causar variações substanciais na resposta longitudinal.

A reprodução das características do vento é obtida através da combinação adequada de obstáculos colocados em uma gaveta no início da câmara de ensaios e blocos disseminados no piso da seção principal de ensaios. Uma outra possibilidade de 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 reprodução das características do vento natural no túnel em questão podem ser obtidas em Loredo-Souza et al. (2004).

Os modelos foram ensaiados na mesa M-II, tendo sido simulados os ventos deslizantes e turbulentos com perfis potenciais de velocidades médias de expoente $p=0,19$ e $p=0,23$. As principais características destes ventos podem ser vistas nas Fig. 4.4 e 4.5.

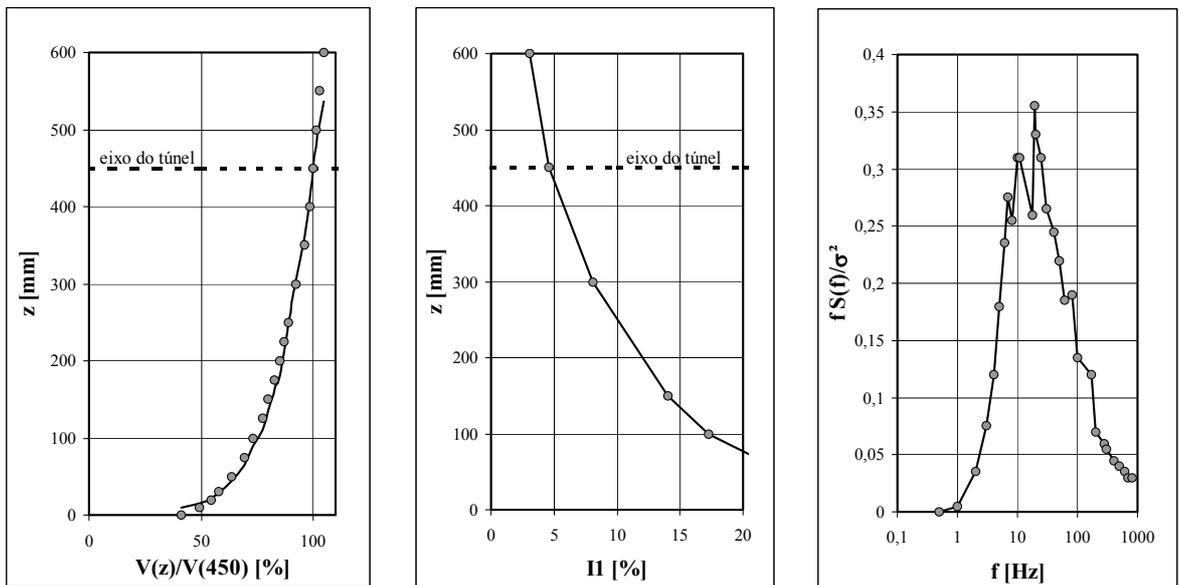
O perfil das velocidades médias é expresso, aproximadamente, pela lei potencial:

$$\frac{V(z)}{V_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^p \quad (33)$$

onde: $V(z)$ é a velocidade média na altura z ; V_{ref} a velocidade média em uma altura de referência (no túnel, 450 mm); $z_{ref} = 450$ mm – cota do eixo longitudinal do túnel; p é o expoente da curva de potência.

O vento simulado com perfil potencial de velocidades médias de expoente $p = 0,19$, corresponde a um terreno com rugosidade correspondente à **categoria III** da NBR-6123. Suas características são as seguintes:

Categoria III – terreno plano ou ondulado com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas.



Perfil de velocidades médias

Intensidade da componente longitudinal da turbulência

Espectro de potência da componente longitudinal da turbulência

FIGURA 4.4 – Características do vento deslizante e turbulento com expoente $p = 0,19$

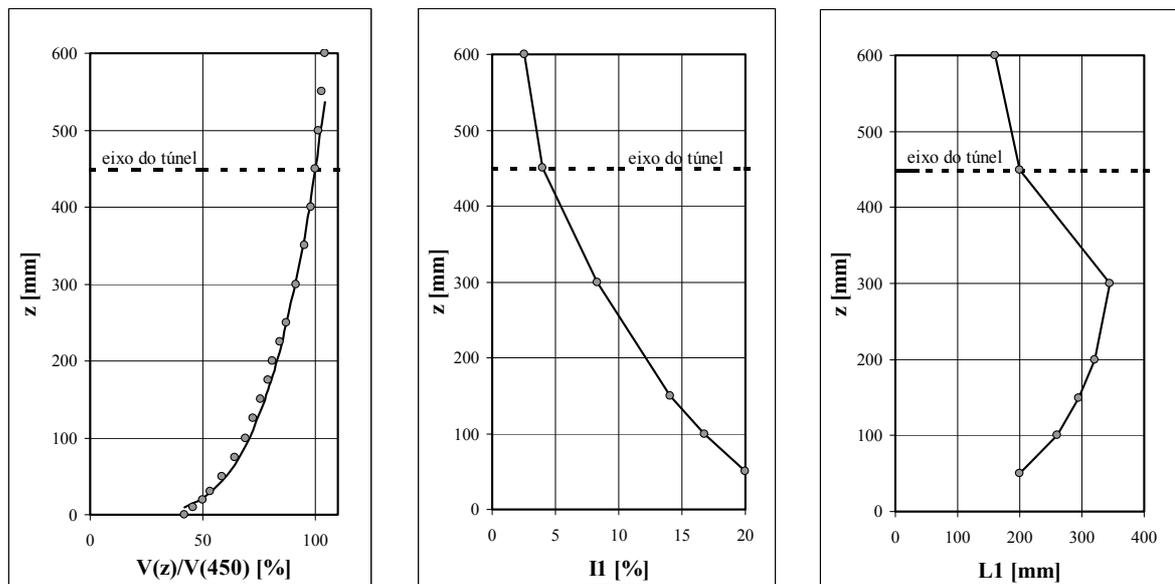
Exemplos:

- granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos;
- fazendas com sebes e/ou muros;
- subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas;

A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3,0 m.

O vento simulado com perfil potencial de velocidades médias de expoente $p = 0,23$ corresponde a um terreno com rugosidade entre as **categorias III e IV** da NBR 6123. As características da categoria IV são as seguintes:

Categoria IV – terreno coberto por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada.



Perfil de velocidades médias

Intensidade da componente longitudinal da turbulência

Macroescala da componente longitudinal da turbulência

FIGURA 4.5 – Características do vento deslizante e turbulento com expoente $p = 0,23$

Exemplos:

- zonas de parques e bosques com muitas árvores;

- cidades pequenas e seus arredores;
- subúrbios densamente construídos de grandes cidades;
- áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.

A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10,0 m. Esta categoria inclui também zonas com obstáculos maiores e que ainda não podem ser consideradas na Categoria V.

4.1.3 Equipamento utilizado nos ensaios

O equipamento utilizado no ensaio é o ilustrado na Fig. 4.6, sendo elencado logo após.



FIGURA 4.6 – Equipamento utilizado nos ensaios

- Modelo Aeroelástico;
- Osciloscópio Tektronix TDS210;
- Condicionador e Amplificador Brüel & Kjaer Type 2626;
- Acelerômetro Piezelétrico Brüel & Kjaer Type 4375 (2,6 gramas);
- Notebook Toshiba;
- Software HP VEE 3.2;

- Micromanômetro tipo Betz;
- Termômetro digital;
- Barômetro;
- Cronômetro.

4.2 PREPARAÇÃO DO MODELO

Para a execução dos ensaios em túnel de vento foi necessário que se adaptasse o modelo aeroelástico aos requisitos de semelhança. Entretanto, antes de qualquer ajuste, conduziram-se ensaios e regulagens preliminares nele, com o intuito de se averiguar as suas características dinâmicas, preparando-o para os trabalhos posteriores.

4.2.1 Leis de Semelhança

De acordo com as limitações de ordem prática existentes, resolveu-se adotar a escala geométrica de $\lambda_L = 1/400$.

Seguindo-se o exposto no item 3.2, com o auxílio das Eq.3.6 a 3.17, pôde-se gerar a Tab.4.1, que apresenta algumas relações de semelhança entre modelo e protótipo.

TABELA 4.1 - Leis de semelhança antes da verificação da rigidez do modelo

Parâmetro		Condição de Semelhança	valor	Protótipo	Modelo
Geometria	λ_L	$\lambda_L = L_m/L_p$	$2,50 \times 10^{-3}$	30x45x180m	75x112,5x450 mm
Momento de Inércia de Massa *	λ_I	$\lambda_I = \lambda_L^5$	$9,77 \times 10^{-14}$	424642500 t.m ²	$4,15 \times 10^{-2}$ kg.m ²
Amortecimento	λ_ζ	$\lambda_\zeta = \zeta_m/\zeta_p$	1,00	0,01	0,01
Frequência	λ_f	$\lambda_f = 1/\lambda_T = f_m/f_p$	**	0,2	**
Tempo	λ_T	$\lambda_T = \lambda_L/\lambda_V = f_p/f_m$	**	variável	variável
Velocidades	λ_V	$\lambda_V = V_m/V_p$	**	variável	variável
Rigidez	λ_K	$\lambda_K = \lambda_L \cdot \lambda_V^2$	**	**	**

* para o protótipo, foi calculado a média dos dois eixos.

** a ser definido no item 4.2.3

Para se definirem os parâmetros indicados com ** é necessário que se tenha em mãos as características dinâmicas do modelo, que são estimadas no decorrer do item 4.2.3. No final desse item é apresentado a Tab.4.2, com a atualização dos dados aqui não presentes.

4.2.2 Montagem do Sistema Mecânico

A fim de se proporcionar o encaixe entre a base rígida existente abaixo da mesa do túnel de vento (tripé) e o modelo aeroelástico, uma *base de transição* foi executada em aço, sendo ilustrada na Fig. 4.7.

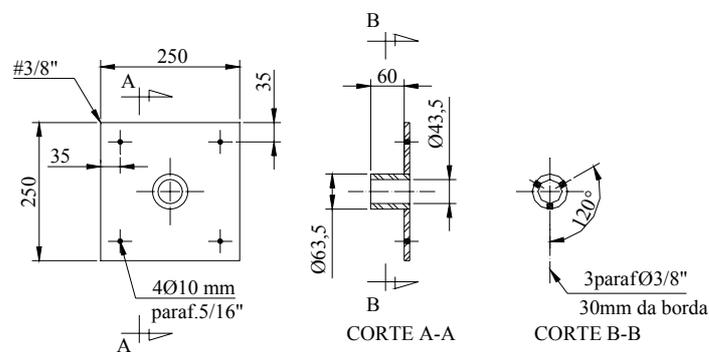


FIGURA 4.7 – Base de transição entre *stick* e base rígida

O sistema, após montado no túnel, ficou de maneira que o eixo de rotação do *stick* coincidiu com o plano no chão do túnel, conforme Fig. 4.8 e 4.9.



FIGURA 4.8 – Eixo do *stick* em relação ao chão do túnel



FIGURA 4.9 – Sistema mecânico fixo sobre a base rígida (tripé)

A *base de transição* se conectou ao tripé existente através de uma luva com diâmetro interno 43,5 mm, sendo presa no “macho” do tripé por 3 parafusos de diâmetro 3/8”, espaçados 120° entre si e situados no ponto médio desta luva (aproximadamente 30 mm de sua borda).

Os 4 furos de diâmetro 10 mm executados na base de transição tiveram que ser reproduzidos na base do modelo, para proporcionar a fixação (através de 4 conjuntos *parafuso 5/16” – porca – contra-porca*) entre as duas, conforme pode ser visto na Fig. 4.10.

Antes de cada ensaio, a base precisou ser alinhada e os seus parafusos apertados, eliminando-se folgas.



FIGURA 4.10 – Fixação entre *base de transição*, base rígida e base do modelo

4.2.3 Ajuste da Rigidez e Inércia de Massa

Para a correta simulação dos efeitos aerodinâmicos, faz-se necessário que, além da simulação das características do vento, mode-se a distribuição de massas e a rigidez do modelo.

Com o modelo já montado no túnel, a rigidez da base pôde ser medida. Para isto, fixou-se um acelerômetro na posição indicada na Fig. 4.11 para, logo em seguida, excitar-se o modelo através da aplicação de um impulso Delta de Dirac no seu topo. Desta forma, o mesmo foi posto a oscilar livremente, sendo que as vibrações causadas na base por estas oscilações foram lidas e interpretadas com o auxílio do *software* HP VEE 3.2.

Obteve-se como resultado uma frequência natural de $f_n=103\text{Hz}$, considerada suficientemente alta para não interferir nos resultados dos ensaios, já que a frequência esperada para o modelo situava-se no patamar de 20 Hz.

O próximo passo foi a verificação da rigidez do modelo propriamente dito. Durante esta verificação, o seu Momento de Inércia de Massa foi ajustado.

Duas possibilidades de ajuste surgem, neste momento. Uma delas é a simulação da distribuição de massas em escala ao longo do fuste do modelo, de maneira a simular a distribuição de massas ao longo do protótipo. Desta forma, o Momento de Inércia de Massa estaria automaticamente regulado. A outra abordagem é simplesmente o acréscimo de massas localizadas em determinados pontos do modelo, com o intuito de se imprimir a este o Momento de Inércia de Massa em escala esperado.



FIGURA 4.11 – Fixação do acelerômetro na base



FIGURA 4.12 – Fixação do acelerômetro no modelo

Foi escolhida a segunda abordagem, devido às maiores facilidades construtivas inerentes a este processo. Segundo Davenport (1972), a modelagem é suficientemente eficiente quando o momento de inércia de massa do modelo está corretamente modelado (ver item 3.1.3). Decidiu-se concentrar o acréscimo de massas no topo do modelo.

Fixou-se o acelerômetro no alto do *stick*, pela sua parte interna, por intermédio de cera de abelha e fita adesiva, com a intenção de, após a verificação da rigidez e o posterior ajuste do momento de inércia de massa, já deixar o modelo preparado para a execução dos ensaios em túnel de vento. Por isto, o acelerômetro foi montado em sua posição definitiva (Fig. 4.12), na máxima cota possível, considerando-se a necessidade da colocação de massas adicionais de chumbo no topo do fuste do modelo, com vistas ao ajuste do momento de inércia de massa.

É muito importante salientar-se que, para minimizarem-se erros na obtenção dos dados, o acelerômetro deve ser fixado no sentido perpendicular ao eixo de rotação do *stick*. Esta condição não pôde ser garantida em sua plenitude. O que se fez então, foi, de maneira visual e com auxílio de esquadro, tentar manter esta perpendicularidade da maneira mais fiel possível. Erros neste alinhamento repercutem de maneira direta nas leituras feita através do acelerômetro.

Da mesma forma que na verificação da frequência natural da base, executaram-se ensaios com o modelo aeroelástico aplicando-se impulsos de Delta de Dirac no seu topo, analisando-se as oscilações livres com o auxílio do HP VEE 3.2.

Deve-se considerar neste contexto a existência do acelerômetro, que pesa 2,6 g. O seu baricentro está localizado 20 mm da borda superior do stick, ou seja, a 430 mm do seu eixo de rotação. Desta forma, agrega ao conjunto um valor de Momento de Inércia de Massa que é dado pela Eq.4.2

$$I_{M_acel} = 2,6 \text{ g} \times (430 \text{ mm})^2 = 4,81 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2 \quad (4.2)$$

Na configuração inicial do *stick*, adicionou-se uma massa linearmente distribuída de 150 g na sua alavanca inferior. Com isto, o seu Momento de Inércia de Massa atingiu um valor de $I_M = 1,36 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$. Sabendo-se que a casca em *chapa-pluma* pesa 157 g ($I_M = 1,06 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$) e tendo-se em vista o valor de I_M a ser imposto ao modelo, conclui-se que o acréscimo no seu Momento de Inércia de Massa devia ser o dado pela Eq.4.3.

$$\Delta I_M = I_{Mm} - (I_{Ms} + I_{M_acel}) \quad (4.3)$$

onde: ΔI_M é o acréscimo de momento de inércia de massa; I_{Ms} o momento de inércia de massa existente no modelo (stick + casca) = $2,42 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$; I_{Mm} o momento de inércia de massa a ser imposta ao modelo = $4,15 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$ (Tab. 4.1).

logo:

$$\Delta I_M = 4,15 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2 - (2,42 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2 + 4,81 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2)$$

$$\Delta I_M = 1,68 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$$

Este é o valor perseguido através da adição de massas no modelo.

Como fora escolhido colocar apenas um peso isolado no topo do modelo, com baricentro localizado a aproximadamente 435 mm do seu centro de giro, para o Momento de Inércia de Massa desejado concluiu-se que a massa deste peso deveria ser de aproximadamente $m_1=89\text{g}$.

Foi executada uma série de ensaios, variando-se a distribuição de massas do modelo, até a obtenção do valor de Momento de Inércia de Massa perseguido. Durante este processo pôde-se, ainda, obter o valor real da rigidez da mola.

Diversas configurações (itens 4.2.3.1 a 4.2.3.5) do modelo foram definidas e ensaiadas, com o intuito de melhor se conhecer as suas propriedades, sendo que cada ensaio consistiu na verificação das características de massa do modelo, na aplicação de um impulso Delta de Dirac no seu topo e na coleta de dados via HP VEE 3.2, para posterior análise.

Com os dados oriundos dos ensaios foi possível verificar a frequência natural de vibração do modelo aeroelástico, bem como o seu amortecimento. Confrontando-se estes valores com as suas características de massa pôde-se inferir um valor para a rigidez elástica da sua mola.

4.2.3.1 Configuração 1

Nesta configuração foi utilizado o modelo na sua forma inicial, com apenas o acelerômetro localizado em seu topo e um lençol de chumbo colocado de maneira distribuída na sua alavanca inferior, conforme Fig. 4.13.

Nesta configuração, o modelo apresenta um valor de $I_M = 1,41 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$ para o seu momento de inércia de massa.

Matematicamente, o modelo aeroelástico aqui proposto pode ser encarado como 1 oscilador com 1 GDL, que pode ser representado esquematicamente pela Fig. 4.13-b.

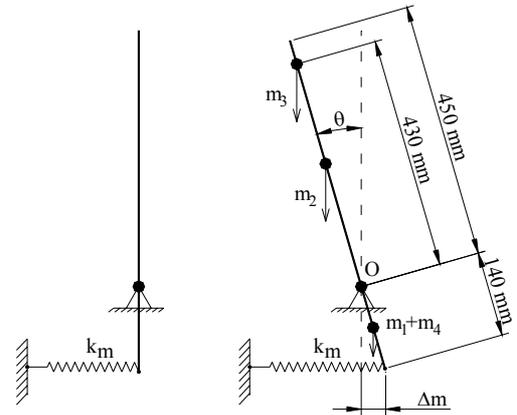
Equilibrando-se os momentos em torno do ponto O, temos:

$$\sum M_o = m_2 \cdot g \cdot \frac{0,450}{2} \cdot \text{sen} \theta + m_3 \cdot g \cdot 0,430 \cdot \text{sen} \theta - (m_1 + m_4) \cdot g \cdot \frac{0,150}{2} \cdot \text{sen} \theta - F_m \cdot 0,140 \cdot \cos \theta \quad (36)$$

onde: $F_m = K_{eq} \cdot \Delta m$ (força na mola); K_{eq} é a rigidez equivalente da mola considerando o fuste indeformável; $\Delta m = 0,140 \text{ m} \cdot \text{sen } \theta$ (em metros); $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ (aceleração da gravidade); $m_1 = 60 \text{ g}$; $m_2 = 181 \text{ g}$.



a) Modelo no túnel



b) representação esquemática da configuração 1, onde m_1 é a massa da alavanca inferior (60g), m_2 é massa da alavanca superior (181g), m_3 é a massa do acelerômetro e m_4 a massa do lençol de chumbo na alavanca inferior.

FIGURA 4.13 – Configuração 1

Executando-se algumas substituições, chega-se à seguinte equação:

$$\sum M_o = g \cdot \text{sen } \theta \cdot (0,225 \cdot m_2 + 0,430 \cdot m_3) - 0,075 \cdot g \cdot \text{sen } \theta \cdot (m_1 + m_4) - K_{eq} \cdot 0,140 \cdot \text{sen } \theta \cdot 0,140 \cdot \cos \theta \quad (37)$$

Como trabalha-se no campo dos pequenos deslocamentos angulares, pode-se fazer as seguintes considerações, sem prejuízo ao resultado final:

$$\cos \theta \cong 1$$

$$\text{sen } \theta \cong \theta$$

O que conduz à Eq.4.4.

$$\sum M_o = g \cdot \theta \cdot [(0,225 \cdot m_2 + 0,430 \cdot m_3) - 0,075 \cdot (m_1 + m_4)] - 0,14^2 \cdot K_{eq} \cdot \theta \quad (4.4)$$

Considerando-se a equação do torque (Eq.4.5):

$$\sum M_o = I_M \cdot \ddot{\theta} \quad (4.5)$$

onde: $I_M = 1,41 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$ (momento de inércia de massa)

Chega-se à expressão descrita pela Eq.4.6.

$$I_M \cdot \ddot{\theta} = g \cdot \theta \cdot [(0,225 \cdot m_2 + 0,430 \cdot m_3) - 0,075 \cdot (m_1 + m_4)] - 0,14^2 \cdot K_{eq} \cdot \theta \quad (4.6)$$

O valor de rigidez K_{eq} seria representado pela rigidez da *mola equivalente* ($k'' = 37.500 \text{ N/m}$, conforme item 3.4.1.1) caso o fuste não tivesse uma deformação considerável. Na presente situação, opta-se por adotar uma rigidez equivalente k''' que é uma tradução dos efeitos de deformação do fuste aliados aos efeitos elásticos da *mola equivalente* (processo inverso ao apresentado no item 3.4.1.1).

$$k_m = 3240 \text{ N/m}$$

$$0 = -32,40 \text{ N} \cdot 45 \text{ cm} + k''' \cdot 0,311 \text{ cm} \times 14 \text{ cm}$$

$$k''' = 33.474 \text{ N/m}$$

Substituindo-se K_{eq} por k''' e rearranjando-se a Eq.4.6, obtém-se a equação diferencial de segunda ordem que governa os movimentos do modelo:

$$\ddot{\theta} + 46513 \cdot \theta = 0 \quad (4.7)$$

A Eq.4.7 é resolvida com base na *Equação Diferencial do Oscilador Harmônico*, dada pela Eq.4.8.

$$\ddot{\theta} + \omega^2 \cdot \theta = 0 \quad (4.8)$$

onde :

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

f - frequência de oscilação

Finalmente, chega-se, por vias matemáticas à frequência de oscilação do modelo:

$$\omega^2 = 46513$$

$$f = 34,32 \text{ Hz}$$

O ensaio conduziu a uma frequência natural de $f_n = 35,11 \text{ Hz}$, com um amortecimento de $\zeta = 0,43\%$. Confrontado-se com o obtido matematicamente, conclui-se que houve uma boa aproximação. O erro entre o calculado e o verificado na prática ficou em $\varepsilon_1 = -2,25 \%$.

Aplicando-se o processo inverso, pode-se atualizar o valor da rigidez equivalente da mola utilizada no modelo para $k'' = 34996 \text{ N/m}$. Desta forma, pode-se chegar ao valor real da rigidez do modelo, $k_m = 3387 \text{ N/m}$.

4.2.3.2. Configuração 2

Esta configuração é uma adaptação da exposta no item 4.3.2.1, com a adição de uma massa $m_5 = 106,39\text{g}$ no topo do modelo, conforme Fig. 4.14.



FIGURA 4.14 – Acréscimo de massa para a Configuração 2

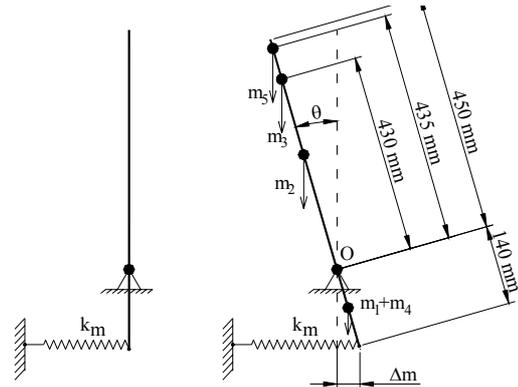
Esta massa é composta por uma fita de chumbo de espessura 0,5 mm enrolada concentricamente em torno de um pino de aço. Ela é feita de maneira que o seu diâmetro externo seja ligeiramente superior ao diâmetro interno do fuste do modelo, de modo que os dois se encaixem de maneira apertada.

O modelo atingiu neste estado um valor de momento de inércia de massa de $I_M = 3,42 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$. Dois ensaios foram conduzidos, ambos levando a uma frequência natural $f_n = 22,49 \text{ Hz}$ e um amortecimento $\zeta = 0,52\%$.

A Fig. 4.15 representa esquematicamente esta configuração.



a) Modelo no túnel



b) representação esquemática da configuração 2, onde m_1 é a massa da alavanca inferior (60g), m_2 é massa da alavanca superior (181g), m_3 é a massa do acelerômetro, m_4 a massa do lençol de chumbo na alavanca inferior e m_5 a massa concentrada.

FIGURA 4.15 – Configuração 2

Este valor de frequência natural leva a uma rigidez equivalente de $k_m = 3371 \text{ N/m}$ para o modelo.

4.2.3.3. Configuração 3

Nesta abordagem a massa no topo foi substituída por $m_5 = 116,30\text{g}$ e o modelo com a geometria do prédio (casca), que pesa 157 g , foi agregado ao conjunto. Desta forma o seu momento de inércia de massa foi alterado para $I_M = 4,67 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$.

Esperam-se, assim, 2 coisas simultaneamente:

- a adição da massa isolada tende a reduzir o valor de f_n , mantendo a rigidez do conjunto estável;

- a adição da casca enrijece a estrutura (provê um travamento ao fuste), alterando, desta forma, a sua rigidez.; pois é sabido que o fuste também se deforma durante as vibrações livres, (item 3.4.1.1) contribuindo desta forma para a rigidez do sistema.

Como resultado obteve-se:

$$f_n = 19,12 \text{ Hz}$$

$$\zeta = 0,60\%.$$

$$k_m = 3327 \text{ N/m}$$

4.2.3.4. Configuração 4

Nesta disposição a massa no topo foi alterada para $m_5 = 90,8\text{g}$, resultando em um momento de inércia de massa de $I_M = 4,18 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$. Conduziu aos seguintes resultados:

$$f_n = 20,12 \text{ Hz}$$

$$k_m = 3296 \text{ N/m}$$

4.2.3.5. Configuração 5

Finalmente, aqui houve uma leve alteração na massa do topo para o valor de $m_5 = 89,18 \text{ g}$. O impacto desta alteração foi imperceptível no resultado final, que é descrito logo abaixo:

$$f_n = 20,12 \text{ Hz}$$

$$\zeta = 0,58\%.$$

$$k_m = 3272 \text{ N/m}$$

Percebe-se que, embora se façam algumas alterações no modelo aeroelástico, alguns resultados obtidos não conseguem expressar tais variações, em termos de frequência. Isto se deve ao fato do equipamento estar ajustado de maneira a não apresentar sensibilidade suficiente para que isto ocorra, transparecendo tais alterações de maneira discreta, através de saltos. Isto leva a crer que os resultados devem ser trabalhados em faixas de probabilidade de ocorrência, não como valores determinísticos. Por motivos de simplificação dos cálculos, aqui neste trabalho os resultados serão encarados como determinísticos.

Por este motivo resolveu-se encerrar neste ponto a busca por valores de frequência natural e momento de inércia de massa do modelo, assumindo os valores obtidos na Configuração 5 como os buscados. Vale ressaltar que o valor inicialmente previsto foi de $k_m=3240$ N/m (item 3.4.1.1), resultando em um erro de menos de 1%.

4.2.3.6. Leis de Semelhança

Após a verificação e determinação das características dinâmicas do modelo, pode-se completar a Tab. 4.1. Apresenta-se, desta forma, na Tab. 4.2, as leis de semelhança a serem consideradas nos estudos com o modelo aeroelástico.

TABELA 4.2 - Leis de semelhança após verificação da rigidez do modelo

Parâmetro		Condição de Semelhança	valor	Protótipo	Modelo
Geometria	λ_L	$\lambda_L=L_m/L_p$	$2,50 \times 10^{-3}$	30x45x180m	75x112,5x450 mm
Momento de Inércia de Massa *	λ_I	$\lambda_I=\lambda_L^5$	$9,77 \times 10^{-14}$	424642500 t.m ²	$4,15 \times 10^{-2}$ kg.m ²
Amortecimento	λ_ζ	$\lambda_\zeta=\zeta_m/\zeta_p$	1,00	0,01	0,01
Frequência	λ_f	$\lambda_f=1/\lambda_T=f_m/f_p$	100,60	0,2	20,12
Tempo	λ_T	$\lambda_T=\lambda_I/\lambda_V=f_p/f_m$	$9,94 \times 10^{-3}$	variável	Variável
Velocidades	λ_V	$\lambda_V=V_m/V_p$	$2,52 \times 10^{-1}$	variável	Variável
Rigidez	λ_K	$\lambda_K=\lambda_L \cdot \lambda_V^2$	$1,58 \times 10^{-4}$	$2,07 \times 10^7$ N/m	3272 N/m

* para o protótipo, foi calculada a média dos dois eixos.

4.2.4 Ajuste do Amortecimento

A razão de amortecimento crítico é um fator muito importante que deve ser modelado de maneira correta, dentro de certas tolerâncias, para a correta reprodução dos efeitos dinâmicos.

Conforme já ilustrado, este parâmetro é modelado em escala de 1/1 com o que ocorre no protótipo. Sendo assim, deve-se impor ao modelo um amortecimento de $\zeta = 1,00\%$.

É muito complicado garantir que o resultado obtido pela análise matemática dos dados de ensaio realmente traduza os efeitos de amortecimento de maneira exata, pois o amortecimento apresentado em um ensaio é a somatória de diversas parcelas de amortecimento distribuídas ao longo do modelo e que se sobrepõem, misturando efeitos de amortecimento viscoso e de Newton.

Os dados de ensaio devem ser analisados tendo-se isto em mente.

Felizmente o modelo apresentou amortecimento inferior ao que se buscava. Desta forma, a tarefa de ajuste foi adicionar amortecimento ao sistema. Caso a situação fosse o contrário, o ajuste certamente se daria de maneira muito mais penosa.

Várias possibilidades foram estudadas, podendo ser divididas em duas grandes categorias:

- placas imersas em banho viscoso;
- amortecimento da mola.

Na primeira hipótese, o modelo deve ser adaptado para suportar hastes que se deslocam conforme os movimentos de oscilação, mergulhadas em um meio viscoso. Ajustando-se parâmetros como área das placas e viscosidade do meio, é possível imprimir ao sistema o amortecimento desejado.

Na segunda alternativa, buscam-se soluções de produtos que possam ser agregados às molas, amortecendo-as de maneira controlável. Os produtos devem ter suas propriedades viscosas estabilizadas após um certo tempo, não muito longo. Investigou-se a possibilidade de utilização de graxa, sabão, silicone, teflon e mastique.

Após análises iniciais decidiu-se optar pela segunda opção e, dentro desta, escolheu-se o mastique como material a utilizar. A escolha do mastique deveu-se ao fato de o mesmo já ter sido utilizado em ensaios em túnel de vento, com os mesmos propósitos. A primeira hipótese esbarrou em dificuldades construtivas.

O mastique utilizado foi comprado na loja *Ferramentas Gerais*, na cidade de Porto Alegre, em forma de bisnaga. Tem o nome comercial de “MASTICK 708 CINZA”, levando a marca DUNDUN.

A aplicação do mastique se deu por intermédio de adições sucessivas do material nos espaços entre as espiras das molas. A Fig. 4.16 mostra a mola com mastique aplicado.



FIGURA 4.16 – Mastique aplicado sobre a mola

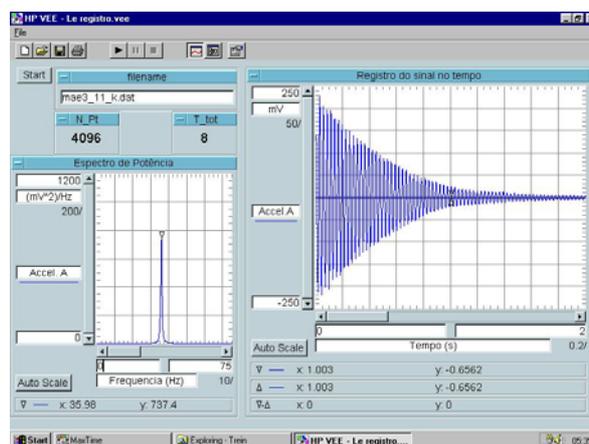


FIGURA 4.17 – Registro de vibração livre obtido pelo programa HP VEE 3.2, onde o modelo não se encontra em sua configuração final

Para a obtenção do seu valor de amortecimento, o modelo é excitado com um impulso Delta de Dirac no seu topo, sendo posto a oscilar livremente. A variação dos sinais produzidos pelo acelerômetro é obtida e lida com o auxílio do *software* HP VEE 3.2, ilustrado na Fig. 4.17.

O cálculo da razão de amortecimento é feito coletando-se dois pontos que tenham a mesma fase na curva de decaimento (p.ex.: 2 cristas) fornecida pelo HP VEE 3.2. Tomam-se os valores de suas ordenadas ($P1$ e $P2$) e o número de ciclos que os separam no gráfico (n), utilizando-se a Eq.4.9.

$$\zeta = \frac{\frac{1}{n} \ln\left(\frac{P1}{P2}\right)}{2\pi} \quad (4.9)$$

Uma série de ensaios e ajustes na quantidade de mastique presente foi executada e são descritos no Tab.4.3.

TABELA 4.3 - Ensaios para determinação do amortecimento

<i>Ensaio</i>	<i>Arquivo</i>	<i>fn(Hz)</i>	<i>ζ</i>	<i>Obs</i>
<i>1</i>	<i>MAE_4_9.dat</i>	<i>20,11</i>	<i>0,930%</i>	
<i>2</i>	<i>MAE_4_10.dat</i>	<i>20,37</i>	<i>0,946%</i>	
<i>3</i>	<i>MAE_4_11.dat</i>	<i>20,37</i>	<i>1,080%</i>	
<i>4</i>	<i>MAE_4_12.dat</i>	<i>20,12</i>	<i>1,090%</i>	
<i>5</i>	<i>MAE_4_13.dat</i>	<i>20,37</i>	<i>1,070%</i>	
<i>6</i>	<i>MAE_4_14.dat</i>	<i>20,37</i>	<i>1,004%</i>	
<i>7</i>	<i>MAE_4_15.dat</i>	<i>20,37</i>	<i>1,250%</i>	<i>45min.depois</i>

No ensaio 7 não foi alterada a quantidade de mastique. Foi apenas dado um intervalo de tempo de 45 minutos de espera após o ensaio 6. Analisando-se os dados, pôde-se concluir que o mastique estava em processo de cura e, portanto, os valores atingidos para o amortecimento não estavam estáveis, fazendo-se necessário um tempo maior entre as aplicações.

Devido ao espaço de tempo limitado para a conclusão dos estudos, decidiu-se adotar como solução o prosseguimento dos ensaios, verificando-se o amortecimento do modelo em intervalos regulares, no início, durante e no final de cada corrida no túnel. Os ajustes necessários ao amortecimento foram implementados sempre que necessários, através da adição ou remoção do mastique depositado na mola.

4.2.5 Alinhamento e regulagem do modelo no túnel

Foram executados, basicamente, 4 tipos diferentes de ensaios. Cada ensaio correspondeu a um arranjo diferente do modelo no túnel. Para cada arranjo foram ensaiadas duas regulagens diferentes de vento.

Cada arranjo do modelo no túnel é o resultado da combinação de 2 posições da base (0° e 90°) com 2 posições de incidência do vento na casca externa (Longitudinal e Transversal).

Classificaram-se os ensaios conforme a Fig. 4.18.

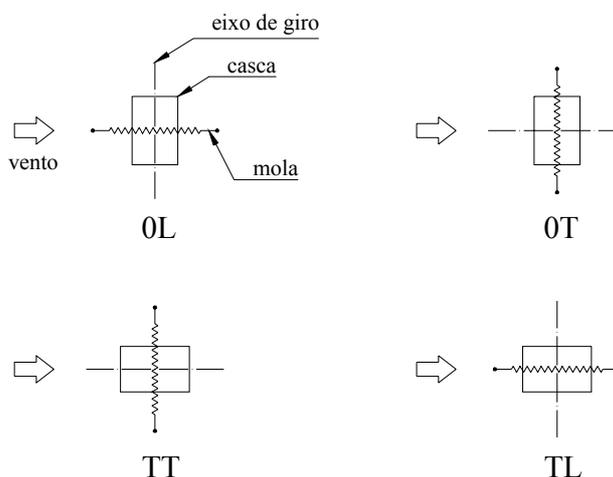


FIGURA 4.18 – Classificação dos ensaios

A primeira posição no código identifica a posição da casca em relação ao vento. Para incidência na face maior, utiliza-se **0** e para incidência na face menor a letra **T** é utilizada.

A segunda posição indica a orientação da mola do *stick* em relação ao eixo longitudinal do túnel. A letra **L** para longitudinal (eixo de rotação perpendicular ao eixo do túnel, permitindo movimento no sentido do vento) e a letra **T** para transversal (permitindo movimento na direção transversal à direção do vento).

Para os ajustes geométricos do modelo no túnel foram utilizados transferidor, paquímetro e linhas de nylon, bem como marcações em lápis, que orientaram nos procedimentos de ajuste. Os parafusos de fixação da luva da base de transição garantem a manutenção do seu alinhamento, sendo a orientação da casca externa mantida pelo atrito entre a sua parte interna e o fuste do *stick*.

Após o posicionamento e a fixação do modelo, faz-se necessária a vedação das aberturas no piso do túnel. Desta forma garante-se a manutenção das pressões na câmara de ensaios. As Fig. 4.19 e 4.20 mostram, de forma geral, o modelo montado e ajustado no túnel, pronto para ensaio.

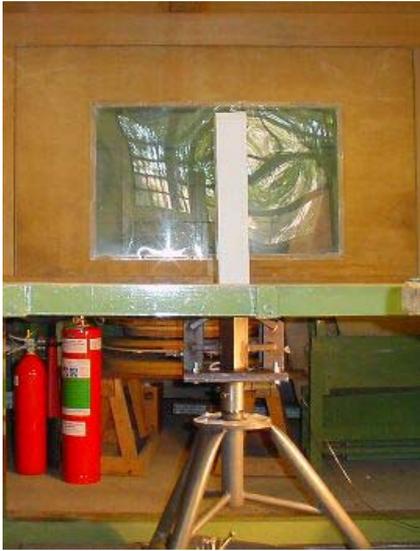


FIGURA 4.19 – Modelo ajustado no túnel, pronto para ensaio, visto de fora



FIGURA 4.20 – Modelo ajustado no túnel, pronto para ensaio, visto de dentro

4.3 ENSAIOS

4.3.1 Tomada de dados

Os ensaios foram divididos em 2 grupos distintos, conforme a regulagem do vento utilizada ($p=0,19$ e $p=0,23$).

Dentro de cada regulagem de vento, 4 arranjos diferentes do modelo foram ensaiados. Para cada um destes ensaios dá-se o nome de *corrida*. O conjunto total de ensaios engloba 8 *corridas*.

Em cada *corrida*, o modelo é testado para várias velocidades de vento, escolhidas *a priori*. Os dados gerados pelo acelerômetro para cada velocidade são lidos pelo HP VEE 3.2 e armazenados em arquivos eletrônicos para análise posterior (Capítulo 5), sendo aqui chamados de *tomadas*. Cada *tomada* tem a duração de 32 segundos, o que corresponde a aproximadamente 54 minutos em escala de protótipo. Foi utilizada uma taxa de aquisição de 1024 Hz, o que totaliza 32768 leituras do acelerômetro. A temperatura na câmara é registrada no início e no final de cada *tomada*, a fim de se determinar a velocidade real do ensaio, no momento das análises matemáticas.

As velocidades de interesse são escolhidas de maneira indireta, pois os pontos de controle são definidos em função de um Δpa , que se busca reproduzir dentro da câmara.

Cada *tomada* foi armazenada em um arquivo eletrônico, nomeado de acordo com um código de 8 posições, onde as 2 primeiras posições são as indicadas no item 4.2.5 (Fig. 4.18). A terceira e quarta posições neste código, de maneira conjugada, indicam a regulação do vento utilizada:

- 19: vento com $p = 0,19$
- 23: vento com $p = 0,23$

As 4 últimas posições indicam a *tomada* propriamente dita. Assumiu-se como padrão para definição deste código o valor obtido para o Δpa no túnel. Mas nem sempre este critério é obedecido, podendo assumir valores próximos.

O amortecimento é monitorado de forma ativa, o que significa que o mesmo sofre avaliações ao longo de cada *corrida*, sendo ajustado quando necessário, conforme item 4.2.4. Um valor de amortecimento médio é definido para cada *corrida*, com base nas medidas e ajustes efetuados.

Por fim, antes de cada *corrida* a pressão atmosférica é verificada e registrada.

Os dados referentes às 8 *corridas* são apresentados nos itens 4.3.1.1 a 4.3.1.8, nas Tab. 4.4 a 4.11, na mesma seqüência em que foram conduzidos.

4.3.1.1 Corrida 0L23

Dados: $P_a = 763 \text{ mm Hg}$; Amortecimento: 0,96 ~ 1,05 %

TABELA 4.4 – Corrida para vento 0L23

Δpa (mmH ₂ O)		temperatura (°C)		Velocidade	Arquivo
Alvo	real	início	final	(m/s)	
1,20	1,30	27,8	29,2	5,07	0L23_130.dat

2,00	1,80	31,8	32,0	6,00	0L23_200.dat
3,00	3,10	32,8	33,0	7,88	0L23_310.dat
4,00	4,00	33,9	34,1	8,97	0L23_400.dat
5,00	5,10	34,8	35,0	10,15	0L23_510.dat
6,00	6,15	35,6	35,9	11,16	0L23_615.dat
7,00	7,15	36,4	36,5	12,04	0L23_715.dat
8,00	8,00	36,9	37,1	12,75	0L23_800.dat
9,00	9,30	37,4	37,5	13,76	0L23_920.dat
10,00	10,20	38,0	38,5	14,43	0L231020.dat
11,00	11,00	38,9	39,0	15,00	0L231100.dat
12,00	12,00	37,5	37,8	15,63	0L231200.dat
13,00	13,00	38,4	38,9	16,30	0L231300.dat
14,00	13,80	39,2	39,5	16,81	0L231380.dat
15,00	15,20	39,7	40,2	17,66	0L231520.dat
16,00	15,90	40,5	40,7	18,08	0L231590.dat
17,00	17,00	41,3	41,7	18,72	0L231700.dat
18,00	18,00	42,1	42,2	19,29	0L231800.dat
19,00	19,20	42,5	42,8	19,93	0L231920.dat
20,00	20,30	43,1	43,1	20,51	0L232020.dat
21,00	21,10	43,8	43,9	20,94	0L232110.dat
25,00	25,40	26,3	27,0	22,34	0L232540.dat
30,00	29,90	29,8	30,2	24,37	0L232990.dat
40,00	40,20	31,3	32,1	28,34	0L234020.dat
45,00	45,10	32,8	33,1	30,08	0L234510.dat

4.3.1.2 Corrida 0T23

Dados: $P_a = 763 \text{ mm Hg}$; Amortecimento: 0,94 ~ 0,98 %

TABELA 4.5 – Corrida para vento 0T23

Δp_a (mmH ₂ O)		Temperatura (°C)		Velocidade	Arquivo
Alvo	real	início	final	(m/s)	
1,20	1,40	28,9	30,6	5,27	0T23_140.dat
3,00	3,10	32,4	32,9	7,88	0T23_310.dat
5,00	5,15	33,8	34,3	10,18	0T23_515.dat
7,00	7,05	35,2	35,6	11,94	0T23_705.dat
9,00	9,20	36,7	36,7	13,67	0T23_920.dat
12,00	12,20	37,5	38,0	15,77	0T231220.dat
15,00	15,00	38,5	38,6	17,50	0T231500.dat
18,00	18,00	39,3	39,6	19,20	0T231800.dat
21,00	21,00	40,2	40,4	20,77	0T232100.dat

23,00	23,20	36,9	37,4	21,72	OT232300.dat
25,00	25,30	38,9	39,3	22,75	OT232520.dat
30,00	29,80	39,9	40,1	24,73	OT232980.dat
35,00	35,20	40,9	41,3	26,92	OT233520.dat
40,00	40,00	42,0	42,5	28,75	OT234000.dat
45,00	45,00	42,8	43,0	30,53	OT234500.dat

4.3.1.3 Corrida TT23

Dados: $P_a = 763 \text{ mm Hg}$; Amortecimento: 0,95 %

TABELA 4.6 – Corrida para vento TT23

Δp_a (mmH ₂ O)		Temperatura (°C)		velocidade	Arquivo
Alvo	real	início	final	(m/s)	
1,20	1,40	34,3	36,9	5,32	TT23_140.dat
3,00	3,00	38,6	39,3	7,83	TT23_290.dat
5,00	5,10	39,8	40,2	10,23	TT23_510.dat
7,00	7,25	40,7	40,9	12,21	TT23_725.dat
9,00	9,15	41,5	41,7	13,74	TT23_915.dat
12,00	12,00	42,2	42,2	15,75	TT231200.dat
15,00	14,60	42,9	43,1	17,39	TT231460.dat
18,00	17,80	43,5	43,5	19,22	TT231790.dat
21,00	20,70	44,2	44,6	20,75	TT232070.dat
25,00	25,20	44,7	44,9	22,91	TT232520.dat
30,00	30,00	45,3	45,4	25,02	TT232990.dat
35,00	35,00	45,7	45,9	27,05	TT233500.dat
40,00	40,10	46,3	46,5	28,98	TT234020.dat
45,00	45,30	46,7	46,8	30,82	TT234530.dat

4.3.1.4 Corrida TL23

Dados: $P_a = 763 \text{ mm Hg}$; Amortecimento: 1,02 %

TABELA 4.7 – Corrida para vento TL23

Δp_a (mmH ₂ O)		temperatura (°C)		velocidade	Arquivo
Alvo	real	início	final	(m/s)	
1,00	1,50	41,0	41,2	5,56	TL23_150.dat

3,00	3,15	41,9	42,2	8,07	TL23_315.dat
5,00	5,20	42,9	43,1	10,38	TL23_520.dat
7,00	7,05	43,6	43,5	12,10	TL23_705.dat
9,00	9,65	43,9	43,9	14,16	TL23_965.dat
12,00	12,30	44,3	44,5	16,00	TL231200.dat
15,00	15,30	44,7	44,8	17,85	TL231520.dat
18,00	18,00	45,1	45,3	19,38	TL231800.dat
21,00	21,30	45,6	45,9	21,10	TL232130.dat
25,00	25,60	40,0	41,1	22,94	TL232570.dat
30,00	30,20	41,6	41,9	24,96	TL233020.dat
35,00	35,20	42,4	42,8	26,99	TL233520.dat
40,00	40,80	43,3	43,6	29,09	TL234080.dat
45,00	45,20	44,0	44,3	30,66	TL234520.dat

4.3.1.5 Corrida TL19

Dados: $P_a = 763 \text{ mm Hg}$; Amortecimento: 1,007 %

TABELA 4.8 – Corrida para vento TL19

$\Delta p_a \text{ (mmH}_2\text{O)}$		Temperatura (°C)		velocidade (m/s)	Arquivo
Alvo	real	início	final		
1,00	1,60	40,6	40,8	5,64	TL19_160.dat
5,00	5,00	41,5	41,8	9,98	TL19_500.dat
9,00	8,95	42,3	42,3	13,37	TL19_795.dat
13,00	12,90	42,6	42,9	16,06	TL191190.dat
17,00	16,90	43,2	43,4	18,40	TL191690.dat
21,00	20,70	43,8	44,0	20,39	TL192070.dat
25,00	24,70	44,5	44,6	22,29	TL192470.dat
30,00	29,70	44,9	45,4	24,47	TL192970.dat
35,00	35,10	45,4	45,6	26,61	TL193510.dat
40,00	40,20	45,8	46,0	28,50	TL194020.dat
45,00	45,10	46,3	46,3	30,20	TL194500.dat

4.3.1.6 Corrida TT19

Dados: $P_a = 763 \text{ mm Hg}$; Amortecimento: 0,90 %

Obs.: A mola pode ter-se soltado no meio da corrida. Este fato coloca os dados relativos a esta corrida sob suspeita.

TABELA 4.9 – Corrida para vento TT19

Δp_a (mmH ₂ O)		temperatura (°C)		velocidade	Arquivo
Alvo	real	início	final	(m/s)	
1,00	1,40	37,8	38,7	5,25	TT19_150.dat
5,00	4,90	39,9	40,4	9,86	TT19_490.dat
9,00	8,95	41,3	41,5	13,35	TT19_895.dat
13,00	12,20	41,8	42,0	15,60	TT19_1220.dat
17,00	17,00	42,8	43,0	18,44	TT19220.dat
21,00	20,50	43,6	43,9	20,28	TT192050.dat
25,00	25,20	44,1	44,4	22,50	TT192520.dat
30,00	30,80	44,7	44,9	24,90	TT193050.dat
35,00	34,90	45,3	45,4	26,53	TT193500.dat
40,00	41,20	45,7	46,0	28,85	TT194120.dat
45,00	45,30	46,2	46,4	30,27	TT194530.dat

4.3.1.7 Corrida 0T19

Dados: $P_a = 763$ mm Hg; Amortecimento: 1,02 ~0,7 %

Obs.: Após este ensaio, houve reaperto da mola, pois a mesma encontrava-se solta no final da corrida. Este fato coloca os dados relativos a esta corrida sob suspeita.

TABELA 4.10 – Corrida para vento 0T19

Δp_a (mmH ₂ O)		temperatura (°C)		Velocidade	Arquivo
Alvo	real	início	final	(m/s)	
1,00	1,70	28,8	29,2	5,70	0T19_170.dat
5,00	5,40	30,6	31,1	10,20	0T19_540.dat
9,00	8,70	31,6	31,9	12,96	0T19_870.dat
13,00	13,20	32,5	32,6	15,98	0T191320.dat
17,00	16,70	33,4	33,8	18,01	0T191680.dat
19,00	18,60	34,6	34,7	19,04	0T191860.dat
21,00	21,70	35,3	35,9	20,60	0T192170.dat
23,00	23,60	34,9	35,5	21,47	0T192290.dat
25,00	24,50	37,5	38,0	21,96	0T192450.dat
30,00	30,50	36,4	36,8	24,46	0T193050.dat
35,00	35,00	37,8	38,0	26,26	0T193500.dat
40,00	40,50	38,6	38,8	28,28	0T194050.dat
45,00	46,00	39,3	39,4	30,17	0T194600.dat

4.3.1.8 Corrida 0L19

Dados: $P_a = 763 \text{ mm Hg}$; Amortecimento: 0,8 %

TABELA 4.11 – Corrida para vento 0L19

Δp_a (mmH ₂ O)		temperatura (°C)		velocidade	Arquivo
Alvo	Real	início	Final	(m/s)	
1,00	1,80	35,8	36,3	5,94	0L19_180.dat
5,00	5,00	37,7	38,0	9,92	0L19_500.dat
9,00	8,70	38,5	38,8	13,11	0L19_870.dat
13,00	12,80	39,4	39,4	15,92	0L191260.dat
17,00	16,75	40,1	40,4	18,23	0L191675.dat
21,00	20,20	40,8	41,0	20,04	0L192010.dat
25,00	24,80	41,4	41,6	22,23	0L192480.dat
30,00	30,30	42,1	42,2	24,60	0L193020.dat
35,00	35,70	42,5	42,8	26,72	0L193570.dat
40,00	39,70	43,0	43,3	28,20	0L193970.dat
45,00	44,80	43,6	43,7	29,98	0L194470.dat

4.3.2 Obtenção dos deslocamentos

Os dados colhidos pelo HP VEE 3.2 durante os ensaios, e armazenados nos arquivos indicados nas Tab. 4.4 a 4.11, foram analisados e processados por rotinas feitas em *MatLab*. Desta forma foi possível converter os sinais elétricos obtidos do acelerômetro em deslocamentos no topo do modelo e, através das equações de semelhança, nos deslocamentos equivalentes ao do topo do protótipo.

Na aquisição dos dados, foi utilizada, entre outras coisas, uma placa que possui 4096 posições, com tensões de saída variando entre $-5V$ e $+5V$. Esta tensão é lida, convertida e armazenada pelo HP VEE 3.2 em forma de *bytes*, obedecendo a seguinte relação linear:

$$0 \text{ Byte} \rightarrow -5000 \text{ mV}$$

$$2048 \text{ Bytes} \rightarrow 0 \text{ mV}$$

$$4096 \text{ Bytes} \rightarrow +5000 \text{ mV}$$

Verificando-se as regulagens do amplificador (Fig. 4.21) é possível perceber-se que as acelerações foram adquiridas utilizando-se uma escala de $1V/g$, ou seja, cada *volt* medido e convertido em *bytes* corresponde a uma aceleração de $9,81 m/s^2$.



FIGURA 4.21 – Regulagem do amplificador

O procedimento seguido, então, foi a conversão dos dados de ensaio (*bytes*) de volta para tensão, utilizando-se para isto a Eq.4.10.

$$e(\text{Volts}) = \frac{S(\text{bytes})}{409,6\text{bytes} - 5\text{Volts}} \quad (4.10)$$

onde e é a tensão convertida em volts e S o sinal em bytes gerado no ensaio e armazenado no arquivo.

Após, aplicou-se a relação do amplificador ($1V/g$) para se obter o valor das acelerações instantâneas no ponto onde estava localizado o acelerômetro (Fig. 4.12), conforme a Eq.4.11.

$$a(m/s^2) = e(\text{volts}) \times 9,81m/s^2 / \text{volts} \quad (4.11)$$

Para cada tomada de dados, nas diferentes velocidades de vento, foi gerada uma série de valores de aceleração, tendo esta série um valor médio que se aproxima de zero. Como última providência, de cada valor gerado subtraiu-se este valor médio. Assim, garante-se que os valores obtidos representam a variação em torno de uma posição de equilíbrio.

O caminho matemático até a obtenção dos deslocamentos ainda compreende duas operações de integração dos valores das acelerações. A primeira convertendo-as para velocidades e a segunda para os deslocamentos na posição do acelerômetro.

Devido ao posicionamento do acelerômetro no modelo (Fig. 4.12 - baricentro 20mm abaixo do topo do *stick*), os deslocamentos encontrados devem ser corrigidos por um fator de 1,0465 (450mm/430mm).

Obtém-se, assim, uma coleção de deslocamentos para cada tomada de dados, representando os deslocamentos instantâneos do acelerômetro ao redor da posição de equilíbrio do *stick*.

As Tab. 4.12 a 4.19 sintetizam os ensaios, apresentando os valores RMS e máximo dos deslocamentos no topo do modelo para cada corrida, para cada velocidade de vento ensaiada (*tomada*). Nestas tabelas alguns valores estão assinalados com *. Estes valores foram considerados duvidosos em termos de representação da realidade de ensaio e devem ser analisados com cautela, no Capítulo 5.

Chegou-se a esta conclusão porque os gráficos gerados pelo *MatLab* para estes ensaios mostraram saturação nas leituras. Esta saturação deu-se devido a uma inadequação das regulagens dos equipamentos à realidade a ser retratada (escala do amplificador). A Fig. 4.22 ilustra uma destas situações.

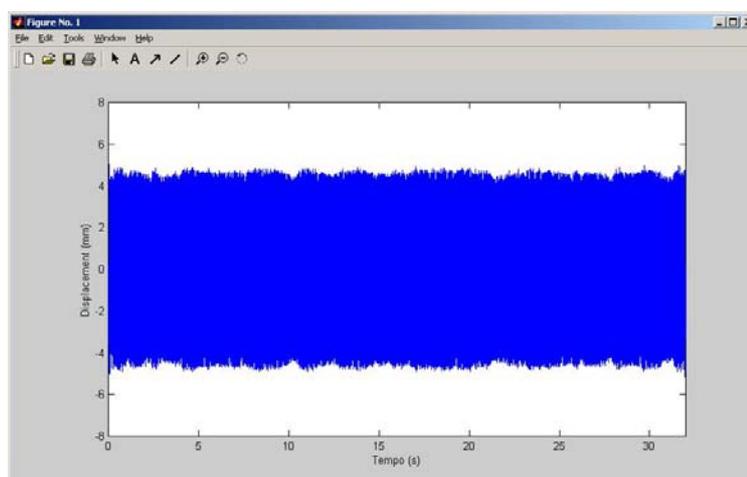


FIGURA 4.22 – Saturação nas leituras

TABELA 4.12 – Vento $p=0,23$ incidindo na face maior, resposta longitudinal (0L23)

Modelo h=450mm			Protótipo H=180m		
Veloc.(m/s)	Δ_x RMS(mm)	Δ_x máx(mm)	Veloc.(m/s)	Δ_x RMS(m)	Δ_x máx(m)
5,07	0,0298	0,1210	20,20	0,0119	0,0484
6,00	0,0383	0,1448	23,91	0,0153	0,0579
7,89	0,0723	0,2926	31,42	0,0289	0,1170
8,97	0,0897	0,2927	35,76	0,0359	0,1171
10,15	0,1552	0,6371	40,44	0,0621	0,2548
11,16	0,1886	0,8133	44,47	0,0754	0,3253
12,04	0,2471	0,9272	48,00	0,0988	0,3709
12,75	0,2474	1,0073	50,81	0,0990	0,4029
13,76	0,2782	1,1533	54,83	0,1113	0,4613
14,43	0,3180	1,3352	57,49	0,1272	0,5341
15,00	0,3437	1,4492	59,77	0,1375	0,5797
15,63	0,4424	1,7787	62,30	0,1770	0,7115
16,30	0,3879	1,5791	64,95	0,1552	0,6316
16,81	0,4274	1,4977	66,99	0,1709	0,5991
17,66	0,4673	1,4907	70,38	0,1869	0,5963
18,08	0,5284	1,9012	72,05	0,2114	0,7605
18,72	0,5622	2,1604	74,61	0,2249	0,8642
19,29	0,5766	1,9012	76,85	0,2306	0,7605
19,93	0,6806	2,2820	79,43	0,2722	0,9128
20,51	0,7405	2,9862	81,74	0,2962	1,1945
20,94	0,6542	2,4571	83,43	0,2617	0,9828
22,34	0,7567	3,0204	89,02	0,3027	1,2082
24,37	1,0002	3,8749	97,12	0,4001	1,5499
28,34	1,5881	4,9889	112,93	0,6352	1,9955
30,08	1,7109	4,8087	119,86	0,6843	1,9235

TABELA 4.13 – Vento $p=0,23$ incidindo na face maior, resposta transversal (0T23)

Modelo h=450mm			Protótipo H=180m		
Veloc.(m/s)	Δ_x RMS(mm)	Δ_x máx(mm)	Veloc.(m/s)	Δ_x RMS(m)	Δ_x máx(m)
5,27	0,0167	0,0614	21,01	0,0065	0,0240
7,88	0,0677	0,2516	31,41	0,0271	0,1006
10,18	0,1604	0,6300	40,58	0,0666	0,2615
11,94	0,2714	1,0098	47,58	0,1095	0,4075
13,67	0,5048	1,5845	54,47	0,2082	0,6536
15,77	1,1199	3,7196	62,83	0,4664	1,5490
17,50	1,6556	4,4938	69,75	0,7005	1,9014
19,20	2,2358	4,6992	76,52	0,9707	2,0402

20,77	3,2295 *	5,0000 *	82,77	1,4678 *	2,2725 *
21,72	3,5327 *	5,5706 *	86,56	1,7353 *	2,7363 *
22,75	2,4354 *	5,8772 *	90,67	1,3063 *	3,1524 *
24,73	2,1830 *	5,7426 *	98,55	1,1709 *	3,0802 *
26,92	2,2065 *	5,3580 *	107,29	1,1846 *	2,8764 *
28,75	1,9566 *	5,7756 *	114,58	1,0345 *	3,0538 *
30,53	2,1183 *	5,5186 *	121,66	1,1240 *	2,9283 *

TABELA 4.14 – Vento $p=0,23$ incidindo na face menor, resposta transversal (TT23)

Modelo h=450mm			Protótipo H=180m		
Veloc.(m/s)	Δ_x RMS(mm)	Δ_x máx(mm)	Veloc.(m/s)	Δ_x RMS(m)	Δ_x máx(m)
5,32	0,0395	0,1394	21,21	0,0158	0,0558
7,83	0,1167	0,3846	31,21	0,0467	0,1538
10,23	0,3054	1,1069	40,77	0,1222	0,4428
12,21	0,4888	1,7813	48,67	0,1955	0,7125
13,74	0,8080	2,4357	54,75	0,3232	0,9743
15,75	1,1611	4,1084	62,75	0,4644	1,6434
17,39	1,5490	4,8195	69,31	0,6196	1,9278
19,22	1,8843	5,3853	76,59	0,7537	2,1541
20,76	1,9925	5,6231	82,71	0,7970	2,2492
22,91	2,2200 *	5,8021 *	91,31	0,8880 *	2,3208 *
25,02	2,5438 *	6,2042 *	99,72	1,0175 *	2,4817 *
27,05	2,4955 *	6,3860 *	107,78	0,9982 *	2,5544 *
28,98	2,6153 *	6,6864 *	115,48	1,0461 *	2,6746 *
30,82	2,5520 *	6,4100 *	122,80	1,0208 *	2,5640 *

TABELA 4.15 – Vento $p=0,23$ incidindo na face menor, resposta longitudinal (TL23)

Modelo h=450mm			Protótipo H=180m		
Veloc.(m/s)	D_x RMS(mm)	D_x máx(mm)	Veloc.(m/s)	D_x RMS(m)	D_x máx(m)
5,56	0,0206	0,0760	22,15	0,0082	0,0304
8,07	0,0662	0,2429	32,14	0,0265	0,0971
10,38	0,1102	0,4263	41,36	0,0441	0,1705
12,10	0,1746	0,5384	48,20	0,0698	0,2153
14,16	0,2265	0,8399	56,43	0,0906	0,3360
16,00	0,2702	0,9343	63,76	0,1081	0,3737
17,85	0,3916	1,5497	71,15	0,1566	0,6199
19,38	0,4729	1,5261	77,22	0,1892	0,6105
21,10	0,4939	2,2598	84,08	0,1976	0,9039

22,94	0,6353	2,6410	91,42	0,2541	1,0564
24,96	0,8257	3,7254	99,48	0,3303	1,4902
26,99	0,9866	3,2973	107,55	0,3946	1,3189
29,09	1,1690	4,2836	115,94	0,4676	1,7134
30,66	1,3203	4,1717	122,17	0,5281	1,6687

TABELA 4.16 – Vento $p=0,19$ incidindo na face menor, resposta longitudinal (TL19)

Modelo h=450mm			Protótipo H=180m		
Veloc.(m/s)	D_x RMS(mm)	D_x máx(mm)	Veloc.(m/s)	D_x RMS(m)	D_x máx(m)
5,64	0,0282	0,0889	22,47	0,0113	0,0356
9,98	0,1115	0,4427	39,78	0,0446	0,1771
13,37	0,2008	0,6943	53,28	0,0803	0,2777
16,06	0,3187	1,3704	64,01	0,1275	0,5481
18,40	0,4084	1,9952	73,33	0,1634	0,7981
20,39	0,5324	2,1181	81,24	0,2129	0,8472
22,29	0,6802	2,2474	88,83	0,2721	0,8990
24,47	0,8068	2,8689	97,50	0,3227	1,1475
26,61	0,9548	3,4791	106,05	0,3819	1,3916
28,50	1,1165	3,8445	113,57	0,4466	1,5378
30,20	1,2586	4,9309	120,36	0,5034	1,9724

TABELA 4.17 – Vento $p=0,19$ incidindo na face menor, resposta transversal (TT19)

Modelo h=450mm			Protótipo H=180m		
Veloc.(m/s)	Δ_x RMS(mm)	Δ_x máx(mm)	Veloc.(m/s)	Δ_x RMS(mm)	Δ_x máx(mm)
5,25	0,0317	0,1051	20,94	0,0127	0,0420
9,86	0,2626	0,8791	39,29	0,1050	0,3516
13,35	0,7646	2,9055	53,20	0,3058	1,1622
15,60	1,5640	5,2178	62,17	0,6256	2,0871
18,45	2,0590	5,8734	73,50	0,8236	2,3494
20,28	2,3262	6,5749	80,82	0,9305	2,6300
22,51	2,1847 *	6,5065 *	89,68	0,8739 *	2,6026 *
24,90	2,3252 *	6,4816 *	99,23	0,9301 *	2,5926 *
26,53	2,4358 *	6,3381 *	105,72	0,9743 *	2,5352 *
28,85	2,5255 *	6,4402 *	114,96	1,0102 *	2,5761 *
30,27	2,3874 *	7,0326 *	120,63	0,9550 *	2,8130 *

TABELA 4.18 – Vento $p=0,19$ incidindo na face maior, resposta transversal (0T19)

Modelo h=450mm			Protótipo H=180m		
Veloc.(m/s)	Δ_x RMS(mm)	Δ_x máx(mm)	Veloc.(m/s)	Δ_x RMS(m)	Δ_x máx(m)
5,70	0,0210	0,0772	22,73	0,0078	0,0285
10,20	0,1756	0,5553	40,63	0,0687	0,2173
12,96	0,3870	1,4592	51,65	0,1547	0,5834
15,99	0,7726	2,6196	63,70	0,3259	1,1049
18,01	1,3650	4,4695	71,77	0,5631	1,8437
19,04	3,8323	6,1120	75,88	2,1206	3,3821
20,60	3,5114 *	7,6563 *	82,08	1,7488 *	3,8131 *
21,47	3,2614 *	5,0630 *	85,54	1,4823 *	2,3012 *
21,96	3,3245 *	5,4129 *	87,52	1,5466 *	2,5182 *
24,46	2,9070 *	5,1454 *	97,47	1,2499 *	2,2123 *
26,26	2,8080 *	4,9964 *	104,63	1,2151 *	2,1622 *
28,28	2,8110 *	5,2069 *	112,69	1,2164 *	2,2533 *
30,17	2,6929 *	5,7598 *	120,23	1,1653 *	2,4925 *

TABELA 4.19 – Vento $p=0,19$ incidindo na face maior, resposta longitudinal (0L19)

Modelo h=450mm			Protótipo H=180m		
Veloc.(m/s)	Δ_x RMS(mm)	Δ_x máx(mm)	Veloc.(m/s)	Δ_x RMS(m)	Δ_x máx(m)
5,94	0,0441	0,2019	23,67	0,0176	0,0808
9,92	0,1428	0,4532	39,53	0,0571	0,1813
13,11	0,2677	1,0409	52,24	0,1071	0,4163
15,92	0,4043	1,4575	63,44	0,1617	0,5830
18,23	0,5811	2,0048	72,65	0,2324	0,8019
20,04	0,6645	2,3569	79,86	0,2658	0,9428
22,23	0,8707	3,0395	88,59	0,3483	1,2158
24,60	1,0959	3,9220	98,03	0,4384	1,5688
26,72	1,1844	4,2333	106,48	0,4738	1,6933
28,20	1,4330	4,7948	112,38	0,5732	1,9179
29,98	1,9603	5,4328	119,47	0,7841	2,1731

5 ANÁLISE

Após a obtenção dos dados experimentais, é necessário que estes sejam confrontados com a bibliografia existente, a fim de que sejam situados no contexto científico.

Neste estudo foram utilizadas como base para comparação as seguintes referências:

a) NBR-6123/88 - Forças devidas ao Vento em Edificações

Norma brasileira que fixa as condições exigíveis na consideração das forças devidas à ação estática e dinâmica do vento, para efeitos de cálculo de edificações.

b) NBCC/85 - *National Building Code of Canada*

São utilizadas aqui as recomendações do suplemento ao *National Building Code of Canada*, intitulado *Commentary B*.

c) Thepmongkorn et al. (1999) - *A two-degree-of freedom base hinged aeroelastic model for response predictions*

Em 1999 foi publicado um artigo no *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, intitulado *A two-degree-of-freedom base hinged aeroelastic (BHA) model for response predictions*, de autoria de Thepmongkorn et al. Neste artigo são discutidos assuntos inerentes à modelagem aeroelástica e divulgados resultados de estudos aerodinâmicos feitos no mesmo protótipo aqui estudado, sendo comparados com estudos anteriormente publicados por Melbourne (1980). Os dados apresentados nesta publicação (ensaios conduzidos por Thepmongkorn et al. e ensaios conduzidos separadamente por Melbourne) são aqui transcritos, servindo de comparação para este estudo.

Vale ressaltar que as características dos ventos modelados para a redação desses artigos diferem das dos ventos utilizados para o presente estudo. A saber:

➔ Thepmongkorn et al. : $p = 0,15$ com turbulência no topo do modelo de $I=10\%$

→ Melbourne (1980) : $p = 0,28$ com turbulência no topo do modelo de $I=10\%$

d) Kwok (1988) - *Effect of Building Shape on Wind-induced Response of Tall Buildings*

Em 1988, no *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, foi publicado o artigo intitulado *Effect of Building Shape on wind-induced response of tall buildings* de autoria de Kwok, que versa sobre o impacto causado por alterações na geometria externa de edifícios altos quando na análise das suas respostas aerodinâmicas. Ali são apresentados resultados de ensaios em túnel de vento em que o objeto de análise foi o mesmo do presente estudo (*CAARC Standard Tall Building*). Dois tipos de ventos foram modelados e os resultados dos ensaios com e sem intervenções na geometria externa do modelo são apresentados, servindo de referência para este estudo.

Ressalta-se que as características dos ventos modelados neste artigo também diferem das dos ventos utilizados no presente estudo. A saber:

→ $p = 0,15$ com turbulência no topo do modelo de $I=10,5\%$

→ $p = 0,27$ com turbulência no topo do modelo de $I=14\%$

e) Miguel (2003) - *Estudo teórico e experimental de um edifício alto submetido à ação dinâmica do vento*

Dissertação de Mestrado defendida em 2003, na UFRGS. Nela são apresentados, entre outras coisas, os resultados de ensaios realizados em um modelo do mesmo protótipo analisado no presente estudo. Foi utilizada uma regulagem de vento similar a uma das utilizadas neste estudo, com $p=0,19$ e $I = 4,6\%$.

Outras referências também foram utilizadas, encontrando-se elencadas nas *Referências Bibliográficas*.

5.1 APRESENTAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS

É necessário que se introduzam aqui os conceitos de *Velocidade Reduzida* (V_{RED}) e *Deslocamento Normalizado* (d_{norm}) descritos pelas Eq.5.1 e 5.2.

$$V_{RED} = \frac{V}{f \cdot b} \quad (5.1)$$

onde: V_{RED} é a Velocidade reduzida; V é a Velocidade em m/s; f a frequência (0,2 Hz); b a maior dimensão na seção transversal (45 metros).

$$d_{norm} = \frac{\bar{Y} \text{ ou } \bar{X}}{D_Y \text{ ou } D_X} \quad (5.2)$$

onde: d_{norm} é o Deslocamento Normalizado; \bar{Y} ou \bar{X} são os deslocamentos na direção Y ou X ; D_Y ou D_X são as dimensões da seção do sentido da deflexão (30 ou 45 metros).

É importante frisar que o deslocamento normalizado e a velocidade reduzida são os mesmos, tanto para o protótipo quanto para o modelo. Neste trabalho, os deslocamentos normalizados apresentados são calculados tomando-se como referência o lado da edificação paralelo ao deslocamento. Entretanto, a bibliografia pode retratar outros tipos de referências.

A seguir serão apresentados os valores calculados pelas referências citadas na abertura deste capítulo, bem como os valores experimentais obtidos em túnel de vento, para as respostas dinâmicas longitudinais e transversais do protótipo em estudo.

5.1.1 Norma Brasileira – NBR-6123/88

5.1.1.1 Resposta Longitudinal

A resposta longitudinal pode ser estimada através da norma brasileira tendo-se em vista o exposto no seu Cap.9 e exemplificado no seu anexo I.2.

Para cada velocidade de vento ensaiada é estimada, via NBR-6123, a resposta relativa à parcela flutuante da velocidade do vento, em termos de deslocamento longitudinal no topo do protótipo.

A norma fornece como resultado um valor de Momento Fletor na base (M_b). Considerando-se o modo linear de vibração da estrutura assumido neste estudo, os deslocamentos no topo são calculados pela Eq.5.3.

$$\Delta_{topo} = \frac{F_{eq}}{K_p} \quad (5.3)$$

onde: F_{eq} é a Força horizontal equivalente no topo do protótipo, devido a M_b ; Δ_{topo} é o Deslocamento no topo; K_p é a Rigidez do protótipo, calculada a partir de suas propriedades físicas e dinâmicas.

Para a obtenção de F_{eq} utiliza-se a Eq.5.4.

$$F_{eq} = \frac{M_b}{H} \quad (5.4)$$

onde: M_b é o Momento na base, calculado pela norma; H é a Altura do protótipo, 180 m.

O primeiro passo é a determinação da velocidade de projeto V_p , que corresponde à velocidade média sobre 10 minutos a 10 metros de altura sobre o solo, em terreno de Categoria II.

O tempo de amostragem de cada *tomada* foi de 32 segundos, o que corresponde em termos de grandeza de protótipo a um intervalo de tempo de 54 minutos.

A NBR-6123 recomenda um fator redutor de 0,69 para transformar a velocidade básica V_0 , obtida através da sua Fig. 1, em V_p . Entretanto, este fator não se aplica às velocidades obtidas no túnel de vento, pois as mesmas são referentes à média sobre os 54 minutos, sendo que a velocidade básica V_0 é sobre 3 segundos apenas.

Consultando a Tab. 22 da NBR-6123, pode-se constatar que a transformação da velocidade média relativa a um intervalo de tempo de 54 minutos para a velocidade média relativa a 10 minutos pode ser operada através da Eq.5.5.

$$V_{10} = \frac{0,69}{0,65} \times V_{54} \quad (5.5)$$

onde : V_{10} é a velocidade média sobre 10 minutos; V_{54} a velocidade média sobre 54 minutos.

Através da Eq.5.5, conclui-se que as velocidades obtidas no túnel devem ser majoradas por um fator 1,06, para que representem uma média sobre 10 minutos.

Outra consideração a ser feita em relação às velocidades do vento é a respeito da sua cota de medição. Nos ensaios foram coletadas as velocidades no topo do modelo, tendo estas sido transferidas para o topo do protótipo.

De acordo com o que já foi colocado mais acima, as velocidades de entrada no método sugerido pela norma são referentes a uma altura de 10 metros acima solo. Portanto é necessário que se transportem estas velocidades, ainda, para esta cota.

Utilizando-se a lei potencial descrita pela Eq.5.6, pode-se operar esta transformação.

$$\frac{V(z)}{V_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^p \quad (5.6)$$

onde : z é a cota específica, neste caso o topo do protótipo - 180 metros; z_{ref} é a cota de referência - 10 metros; $V(z)$ a velocidade em uma cota específica; V_{ref} a velocidade na cota de referência; p é o coeficiente conforme perfil de velocidades do vento - 0,19 ou 0,23.

Após efetuarem-se as substituições necessárias, chega-se à conclusão de que as velocidades medidas no topo do modelo devem ser multiplicadas pelos seguintes fatores, com o intuito de transportá-las para a cota de 10 metros:

- vento $p = 0,19$: $V_{10\text{metros}} = 0,5774.V_{180\text{metros}}$
- vento $p = 0,23$: $V_{10\text{metros}} = 0,5144.V_{180\text{metros}}$

O restante das operações segue o descrito no item 9.3.2 da norma, valendo apenas citar que o coeficiente de arrasto é obtido da Fig. 4 desta mesma norma. É apresentado apenas a parcela flutuante da resposta, pois a resposta média não interessa no escopo deste estudo.

O restante dos procedimentos matemáticos não merece aqui maiores considerações.

Foram geradas tabelas que registram estes cálculos, onde uma delas é apresentada no Anexo I. As Tab.5.1 a 5.4 sintetizam estas operações, apresentando os valores de deslocamentos no topo do protótipo para as velocidades ensaiadas em túnel de vento.

TABELA 5.1 – Deslocamentos longitudinais no topo do protótipo, conforme NBR-6123. Vento com $p=0,19$ incidindo na face maior

V_{topo} (m/s)	V_{RED}	$V_{Z=10m}$ (m/s)	Δ_{topo} (m)	d_{norm}
23,67	2,63	13,67	0,047	0,001565
39,53	4,39	22,83	0,131	0,004365
52,24	5,80	30,16	0,229	0,007623
63,44	7,05	36,63	0,337	0,011243
72,65	8,07	41,95	0,442	0,014744
79,86	8,87	46,11	0,534	0,017816
88,59	9,84	51,15	0,658	0,021924
98,03	10,89	56,61	0,805	0,026845
106,48	11,83	61,48	0,950	0,031673
112,38	12,49	64,89	1,058	0,035280
119,47	13,27	68,99	1,196	0,039872

TABELA 5.3 – Deslocamentos longitudinais no topo do protótipo, conforme NBR-6123. Vento com $p=0,19$ incidindo na face menor

V_{topo} (m/s)	V_{RED}	$V_{Z=10m}$ (m/s)	Δ_{topo} (m)	d_{norm}
22,47	2,50	12,97	0,023	0,000519
39,78	4,42	22,97	0,073	0,001626
53,28	5,92	30,77	0,131	0,002917
64,01	7,11	36,96	0,189	0,004210
73,33	8,15	42,34	0,249	0,005525
81,24	9,03	46,91	0,305	0,006781
88,83	9,87	51,29	0,365	0,008108
97,5	10,83	56,30	0,440	0,009768
106,05	11,78	61,24	0,520	0,011556
113,56	12,62	65,57	0,596	0,013250
120,36	13,37	69,50	0,670	0,014885

TABELA 5.2 – Deslocamentos longitudinais no topo do protótipo, conforme NBR-6123. Vento com $p=0,23$ incidindo na face maior

V_{topo} (m/s)	V_{RED}	$V_{Z=10m}$ (m/s)	Δ_{topo} (m)	d_{norm}
20,20	2,24	10,39	0,020	0,000680
23,91	2,66	12,30	0,029	0,000953
31,42	3,49	16,16	0,049	0,001645
35,76	3,97	18,39	0,064	0,002131
40,44	4,49	20,80	0,082	0,002726
44,47	4,94	22,87	0,099	0,003296
48,00	5,33	24,69	0,115	0,003840
50,81	5,65	26,14	0,129	0,004303
54,83	6,09	28,20	0,150	0,005010
57,49	6,39	29,57	0,165	0,005508
59,77	6,64	30,74	0,179	0,005954
62,30	6,92	32,05	0,194	0,006469
64,95	7,22	33,41	0,211	0,007031
66,99	7,44	34,46	0,224	0,007479
70,38	7,82	36,20	0,248	0,008255
72,05	8,01	37,06	0,260	0,008652
74,61	8,29	38,38	0,278	0,009278
76,85	8,54	39,53	0,295	0,009843
79,43	8,83	40,86	0,315	0,010515
81,74	9,08	42,05	0,334	0,011135
83,43	9,27	42,92	0,348	0,011601
89,02	9,89	45,79	0,396	0,013207
97,12	10,79	49,96	0,472	0,015720
112,93	12,55	58,09	0,638	0,021255
119,86	13,32	61,65	0,718	0,023943

TABELA 5.4 – Deslocamentos longitudinais no topo do protótipo, conforme NBR-6123. Vento com $p=0,23$ incidindo na face menor

V_{topo} (m/s)	V_{RED}	$V_{Z=10\text{m}}$ (m/s)	$\Delta_{\text{topo}}(\text{m})$	d_{norm}
22,15	2,46	11,39	0,014	0,000301
32,14	3,57	16,53	0,028	0,000633
41,36	4,60	21,27	0,047	0,001049
48,20	5,36	24,79	0,064	0,001424
56,43	6,27	29,03	0,088	0,001952
63,76	7,08	32,80	0,112	0,002492
71,15	7,91	36,60	0,140	0,003103
77,22	8,58	39,72	0,164	0,003655
84,08	9,34	43,25	0,195	0,004334
91,42	10,16	47,02	0,231	0,005123
99,48	11,05	51,17	0,273	0,006067
107,55	11,95	55,32	0,319	0,007091
115,94	12,88	59,64	0,371	0,008240
122,17	13,57	62,84	0,412	0,009150

5.1.1.2 Resposta Transversal

O item 9.4 da norma brasileira sugere que a resposta da estrutura na direção transversal à do vento Y_i seja calculada a partir das forças relativas na direção do vento X_i , por meio da Eq.5.7.

$$Y_i = \frac{1}{3} X_i \quad (5.7)$$

Sugere ainda que, quando for o caso, a esta resposta seja adicionada a resposta devida ao desprendimento de vórtices.

Os resultados provenientes dos ensaios englobam todos efeitos em um única resposta, tornando impossível a sua comparação com as recomendações da NBR-6123/88.

5.1.2 Norma Canadense – NBCC/85

5.1.2.1 Resposta Longitudinal

Utilizou-se, como referência neste item, o exposto no *Commentary B* do *Supplement to the National Building Code of Canada*, adotando-se as abordagens intituladas *Detailed Procedure*.

Da mesma forma que a norma brasileira, a norma canadense trabalha com velocidades referenciadas a uma cota de 10 metros acima do nível do terreno. Portanto os procedimentos adotados no item 5.1.1, com a utilização da Eq.5.5, também se aplicam aqui.

O NBCC/85 adota um coeficiente chamado de *Exposure Factor* (C_e), que relaciona a rugosidade do terreno sobre o qual o vento incidente vem soprando antes de encontrar a edificação com a variação do seu perfil de velocidades. Este coeficiente relaciona-se de maneira direta com o que a norma brasileira chama, dentro do *Fator de Rugosidade do Terreno* (S_2), de *Categoria*. A equivalência adotada neste estudo entre estes dois fatores é a seguinte:

- vento $p = 0,19$:
 - ➔ NBR-6123/88: Categoria III
 - ➔ NBCC/85: *Exposure A*

- vento $p = 0,23$:
 - ➔ NBR-6123/88: Categoria IV
 - ➔ NBCC/85: *Exposure B*

A resposta total é obtida aplicando-se um coeficiente chamado *Gust Factor* (C_g) sobre uma resposta média, calculada *a priori*; por isto, pode-se inferir que o C_g carrega informações da parcela flutuante desta resposta total.

Como neste estudo estamos interessados apenas na parcela flutuante das respostas, será apresentada apenas a resposta relativa a ela, que é obtida multiplicando-se a resposta média por $[C_g - 1]$.

Nas Tab 5.5 a 5.8 estão sintetizados os resultados. No Anexo II é possível encontrar-se o detalhamento de uma solução.

TABELA 5.5 – Deslocamentos
longitudinais no topo do protótipo,
conforme NBCC. Vento com $p=0,19$
incidente na face maior

V_{topo} (m/s)	V_{RED}	$V_{Z=10\text{m}}$ (m/s)	Δ_{topo} (m)	d_{norm}
23,67	2,63	13,67	0,067	0,002238
39,53	4,39	22,83	0,275	0,009160
52,24	5,80	30,16	0,605	0,020177
63,44	7,05	36,63	1,048	0,034925
72,65	8,07	41,95	1,531	0,051024
79,86	8,87	46,11	1,989	0,066297
88,59	9,84	51,15	2,642	0,088053
98,03	10,89	56,61	3,471	0,115703
106,48	11,83	61,48	4,324	0,144137
112,38	12,49	64,89	4,982	0,166058
119,47	13,27	68,99	5,839	0,194640

TABELA 5.7 – Deslocamentos
longitudinais no topo do protótipo,
conforme NBCC. Vento com $p=0,19$
incidente na face menor

V_{topo} (m/s)	V_{RED}	$V_{Z=10\text{m}}$ (m/s)	Δ_{topo} (m)	d_{norm}
22,47	2,50	12,97	0,044	0,000976
39,78	4,42	22,97	0,211	0,004689
53,28	5,92	30,77	0,480	0,010661
64,01	7,11	36,96	0,800	0,017784
73,33	8,15	42,34	1,164	0,025861
81,24	9,03	46,91	1,538	0,034172
88,83	9,87	51,29	1,955	0,043444
97,50	10,83	56,30	2,503	0,055616
106,05	11,78	61,24	3,118	0,069280
113,56	12,62	65,57	3,719	0,082640
120,36	13,37	69,50	4,312	0,095822

TABELA 5.6 – Deslocamentos
longitudinais no topo do protótipo,
conforme NBCC. Vento com $p=0,23$
incidente na face maior

V_{topo} (m/s)	V_{RED}	$V_{Z=10\text{m}}$ (m/s)	Δ_{topo} (m)	d_{norm}
20,20	2,24	10,39	0,048	0,001584
23,91	2,66	12,30	0,072	0,002411
31,42	3,49	16,16	0,148	0,004922
35,76	3,97	18,39	0,210	0,006989
40,44	4,49	20,80	0,294	0,009813
44,47	4,94	22,87	0,384	0,012795
48,00	5,33	24,69	0,476	0,015861
50,81	5,65	26,14	0,559	0,018625
54,83	6,09	28,20	0,693	0,023106
57,49	6,39	29,57	0,793	0,026427
59,77	6,64	30,74	0,885	0,029509
62,30	6,92	32,05	0,996	0,033191
64,95	7,22	33,41	1,121	0,037350
66,99	7,44	34,46	1,223	0,040770
70,38	7,82	36,20	1,406	0,046879
72,05	8,01	37,06	1,503	0,050090
74,61	8,29	38,38	1,658	0,055274
76,85	8,54	39,53	1,802	0,060075
79,43	8,83	40,86	1,977	0,065917
81,74	9,08	42,05	2,143	0,071434
83,43	9,27	42,92	2,269	0,075646
89,02	9,89	45,79	2,719	0,090645
97,12	10,79	49,96	3,461	0,115364
112,93	12,55	58,09	5,224	0,174146
119,86	13,32	61,65	6,132	0,204410

TABELA 5.8 – Deslocamentos longitudinais no topo do protótipo, conforme NBCC. Vento com $p=0,23$ incidente na face menor

V_{topo} (m/s)	V_{RED}	$V_{Z=10m}$ (m/s)	Δ_{topo} (m)	d_{norm}
22,15	2,46	11,39	0,044	0,000987
32,14	3,57	16,53	0,118	0,002626
41,36	4,60	21,27	0,237	0,005259
48,20	5,36	24,79	0,363	0,008072
56,43	6,27	29,03	0,566	0,012575
63,76	7,08	32,80	0,798	0,017724
71,15	7,91	36,60	1,084	0,024091
77,22	8,58	39,72	1,362	0,030257
84,08	9,34	43,25	1,723	0,038286
91,42	10,16	47,02	2,168	0,048171
99,48	11,05	51,17	2,727	0,060610
107,55	11,95	55,32	3,364	0,074764
115,94	12,88	59,64	4,109	0,091312
122,17	13,57	62,84	4,717	0,104816

5.1.2.2 Resposta Transversal

A norma canadense, assim como a norma brasileira, trata de forma sucinta a resposta transversal. No seu item 28, são apresentadas as considerações necessárias para que esta seja estimada, apenas na situação mais crítica, ou seja, naquela em que ocorre a ressonância entre a frequência de despreendimento de vórtices e a frequência natural da estrutura. Resulta em uma força que, aplicada à estrutura, causa o momento fletor máximo na base. Considerando-se o modo de vibração desta estrutura, pode-se obter o seu deslocamento no topo.

Não há considerações a respeito das características do escoamento, tais como turbulência e perfil de velocidades.

A Tab.5.9 apresenta os resultados de deslocamentos para a situação crítica.

TABELA 5.9 – Deslocamentos transversais no topo do protótipo, conforme NBCC/85

	Face de incidência do Vento	
	Menor	Maior
V_H (m/s)	43	100
Δ_{topo} (m)	0,709	8,498
d_{norm}	0,024	0,189

5.1.3 Thepmongkorn et al. (1999) - A two-degree-of freedom base hinged aeroelastic model for response predictions

Os dados referentes aos ensaios realizados para a redação do artigo apresentado neste item são comparados com ensaios realizados por Melbourne (1980) e apresentados em forma de gráficos, nas Fig. 5.1 e 5.2.

Apenas os valores de deslocamentos R.M.S. são de interesse, para este estudo.

Os valores de deslocamento relativos ao vento incidindo na face menor, tanto para a resposta longitudinal quanto para a transversal, foram obtidos através das equações de interpolação das curvas, apresentadas nos gráficos. Os deslocamentos para vento incidente na face maior foram obtidos por interpolação gráfica.

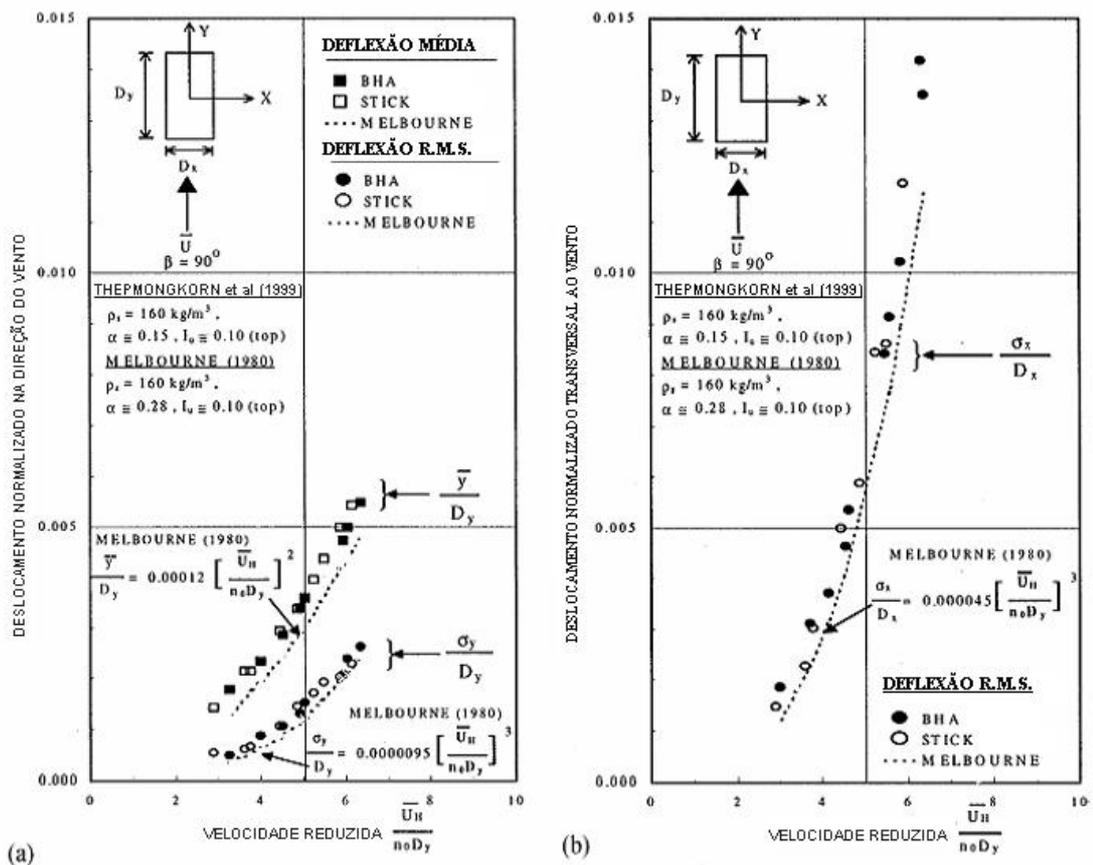


FIGURA 5.1 – Deslocamentos no topo do protótipo (*CAARC Standard Tall Building*), em função da velocidade reduzida, para vento incidindo na face menor: (a) resposta longitudinal; (b) resposta transversal (Thepmongkorn, 1999)

As Tab.5.10 a 5.13 (itens 5.1.3.1 e 5.1.3.2) apresentam os valores de deslocamentos em função das velocidades obtidas nos ensaios executados com o modelo aeroelástico apresentado neste estudo.

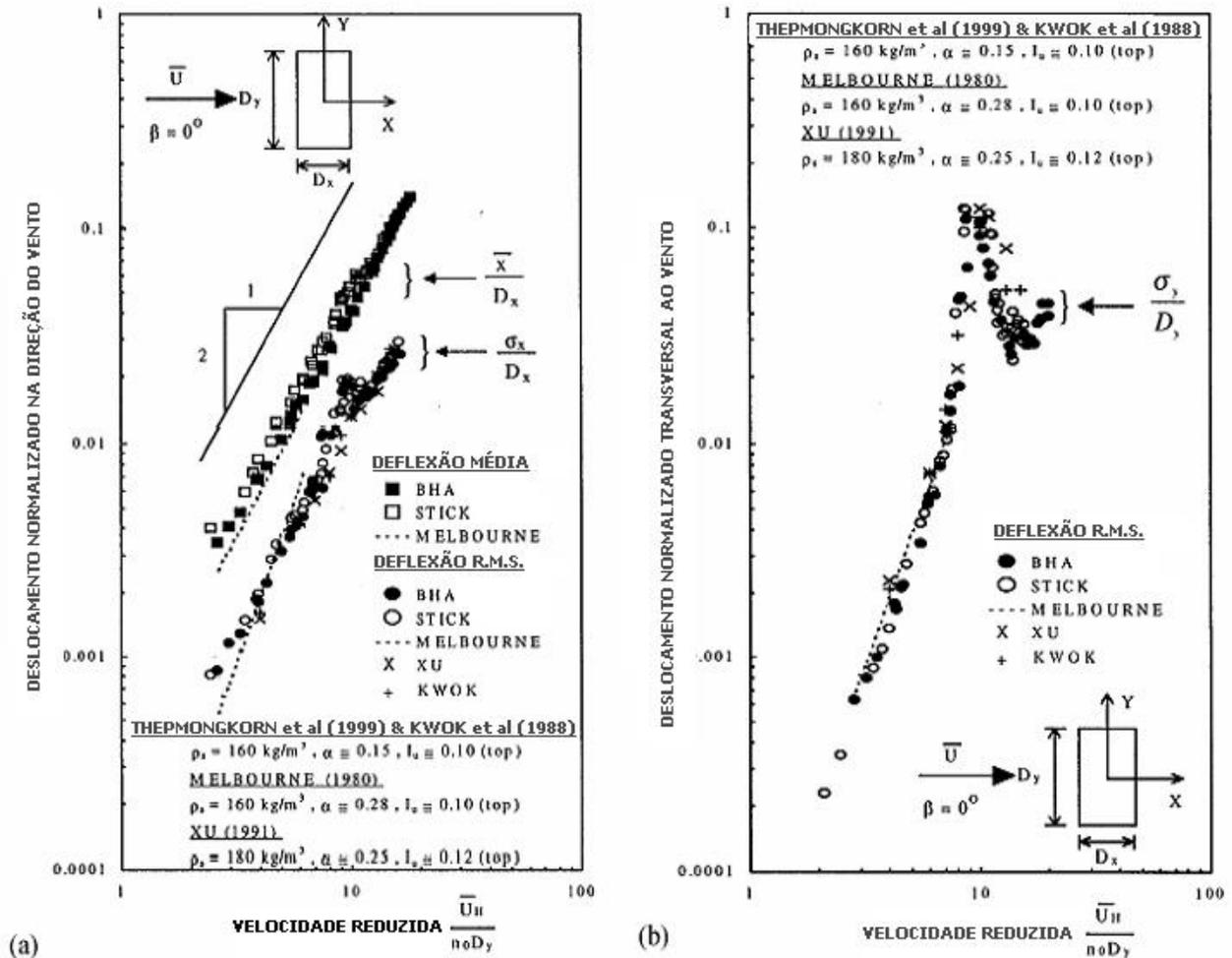


FIGURA 5.2 - Deslocamentos no topo do protótipo (CAARC Standard Tall Building), em função da velocidade reduzida, para vento incidindo na face maior: (a) resposta longitudinal; (b) resposta transversal (Thepmongkorn, 1999)

5.1.3.1 Resposta Longitudinal

TABELA 5.10 – Deslocamentos longitudinais topo do protótipo; vento incidente face maior

V_{topo} (m/s)	V_{RED}	Melbourne (1980)		Thepmongkorn (1999)	
		Δ_{topo} (m)	$d_{\text{norm.}}$	Δ_{topo} (m)	$d_{\text{norm.}}$
20,20	2,24	-	-	-	-
23,67	2,63	0,015	0,00050	0,025	0,00082
23,91	2,66	0,016	0,00052	0,025	0,00084
31,42	3,49	0,038	0,00126	0,047	0,00156
35,76	3,97	0,057	0,00190	0,063	0,00210
39,53	4,39	0,079	0,00263	0,079	0,00264
40,44	4,49	0,085	0,00283	0,084	0,00278
44,47	4,94	0,115	0,00384	0,104	0,00346
48,00	5,33	0,148	0,00492	0,110	0,00365
50,81	5,65	0,177	0,00591	0,116	0,00385
52,24	5,80	0,194	0,00646	0,120	0,00400
54,83	6,09	0,216	0,00720	0,180	0,00600
57,49	6,39	-	-	0,194	0,00645
59,77	6,64	-	-	0,206	0,00685
62,30	6,92	-	-	0,218	0,00725
63,44	7,05	-	-	0,225	0,00750
64,95	7,22	-	-	0,229	0,00763
66,99	7,44	-	-	0,256	0,00852
70,38	7,82	-	-	0,307	0,01023
72,05	8,01	-	-	0,336	0,01120
72,65	8,07	-	-	0,347	0,01156
74,61	8,29	-	-	0,386	0,01285
76,85	8,54	-	-	0,435	0,01451
79,43	8,83	-	-	0,500	0,01668
79,86	8,87	-	-	0,525	0,01750
81,74	9,08	-	-	0,600	0,02000
83,43	9,27	-	-	-	-
88,59	9,84	-	-	-	-
89,02	9,89	-	-	-	-
97,12	10,79	-	-	-	-
98,03	10,89	-	-	-	-
106,5	11,83	-	-	-	-
112,4	12,49	-	-	-	-
112,9	12,55	-	-	-	-
119,5	13,27	-	-	-	-
119,9	13,32	-	-	-	-

TABELA 5.11 – Deslocamentos longitudinais topo do protótipo; vento incidente face menor

V_{topo} (m/s)	V_{RED}	Melbourne (1980)		Thepmongkorn (1999)	
		Δ_{topo} (m)	$d_{\text{norm.}}$	Δ_{topo} (m)	$d_{\text{norm.}}$
22,15	2,46	0,006	0,00014	0,007	0,00015
22,47	2,50	0,007	0,00015	0,007	0,00016
32,14	3,57	0,019	0,00043	0,020	0,00045
39,78	4,42	0,037	0,00082	0,039	0,00086
41,36	4,60	0,041	0,00092	0,044	0,00097
48,20	5,36	0,066	0,00146	0,069	0,00153
53,28	5,92	0,089	0,00197	0,093	0,00207
56,43	6,27	0,105	0,00234	0,111	0,00246
63,76	7,08	0,152	0,00338	0,160	0,00355
64,01	7,11	0,154	0,00342	0,161	0,00359
71,15	7,91	0,211	0,00469	0,222	0,00493
73,33	8,15	0,231	0,00514	0,243	0,00540
77,22	8,58	0,270	0,00600	0,284	0,00630
81,24	9,03	0,314	0,00699	0,330	0,00734
84,08	9,34	0,349	0,00775	0,366	0,00813
88,83	9,87	0,411	0,00913	0,432	0,00959
91,42	10,16	0,448	0,00996	0,470	0,01045
97,50	10,83	0,544	0,01208	0,571	0,01268
99,48	11,05	0,577	0,01283	0,606	0,01347
106,5	11,83	0,708	0,01574	0,744	0,01653
107,6	11,95	0,730	0,01621	0,766	0,01702
113,6	12,62	0,859	0,01908	0,902	0,02004
115,9	12,88	0,914	0,02031	0,960	0,02132
120,4	13,37	1,022	0,02272	1,074	0,02386
122,2	13,57	1,069	0,02376	1,123	0,02495

5.1.3.2 Resposta Transversal

TABELA 5.12 – Deslocamentos transversais topo do protótipo; vento incidente face maior

V _{topo} (m/s)	V _{RED}	Melbourne (1980)		Thepmongkorn (1999)	
		Δ _{topo} (m)	d _{norm}	Δ _{topo} (m)	d _{norm}
21,01	2,33	-	-	0,014	0,00030
22,73	2,53	-	-	0,020	0,00045
31,41	3,49	0,063	0,0014	0,050	0,00110
40,58	4,51	0,090	0,0020	0,113	0,00250
40,63	4,51	0,090	0,0020	0,113	0,00250
47,58	5,29	0,207	0,0046	0,180	0,00400
51,65	5,74	0,302	0,0067	0,203	0,00450
54,47	6,05	0,315	0,0070	0,252	0,00560
62,83	6,98	0,495	0,0110	0,405	0,00900
63,70	7,08	0,585	0,0130	0,675	0,01500
69,75	7,75	-	-	0,900	0,02000
71,77	7,97	-	-	2,025	0,04500
75,88	8,43	-	-	5,850	0,13000
76,52	8,50	-	-	5,400	0,12000
82,08	9,12	-	-	4,950	0,11000
82,77	9,20	-	-	4,725	0,10500
85,54	9,50	-	-	4,050	0,09000
86,56	9,62	-	-	3,960	0,08800
87,52	9,72	-	-	3,870	0,08600
90,67	10,07	-	-	3,600	0,08000
97,47	10,83	-	-	2,295	0,05100
98,55	10,95	-	-	2,250	0,05000
104,63	11,63	-	-	2,025	0,04500
107,29	11,92	-	-	1,800	0,04000
112,69	12,52	-	-	1,575	0,03500
114,58	12,73	-	-	1,485	0,03300
120,23	13,36	-	-	1,260	0,02800
121,66	13,52	-	-	1,035	0,02300

TABELA 5.13 – Deslocamentos transversais topo do protótipo; vento incidente face menor

V _{topo} (m/s)	V _{RED}	Melbourne (1980)		Thepmongkorn (1999)	
		Δ _{topo} (m)	d _{norm}	Δ _{topo} (m)	d _{norm}
20,94	2,33	0,017	0,00057	0,018	0,00060
21,21	2,36	0,018	0,00059	0,019	0,00062
31,21	3,47	0,056	0,00188	0,059	0,00197
39,29	4,37	0,112	0,00374	0,118	0,00393
40,77	4,53	0,125	0,00418	0,132	0,00439
48,67	5,41	0,213	0,00712	0,224	0,00747
53,20	5,91	0,279	0,00929	0,293	0,00976
54,75	6,08	0,304	0,01013	0,319	0,01064
62,17	6,91	0,445	0,01483	0,467	0,01557
62,75	6,97	0,458	0,01525	0,480	0,01601
69,31	7,70	0,617	0,02055	0,647	0,02158
73,50	8,17	0,735	0,02451	0,772	0,02574
76,59	8,51	0,832	0,02773	0,874	0,02912
80,82	8,98	0,978	0,03259	1,026	0,03422
82,71	9,19	1,048	0,03493	1,100	0,03667
89,68	9,96	1,336	0,04452	1,402	0,04675
91,31	10,15	1,410	0,04699	1,480	0,04934
99,23	11,03	1,809	0,06031	1,900	0,06333
99,72	11,08	1,836	0,06121	1,928	0,06427
105,7	11,75	2,188	0,07294	2,298	0,07659
107,8	11,98	2,319	0,07729	2,435	0,08115
115,0	12,77	2,813	0,09378	2,954	0,09847
115,5	12,83	2,852	0,09506	2,994	0,09981
120,6	13,40	3,251	0,10836	3,413	0,11377
122,8	13,64	3,429	0,11431	3,601	0,12002

5.1.4 Kwok (1988) – Effect of Building Shape on Wind-induced Response of Tall Buildings

Assim como os valores apresentados no item 5.1.3, os valores apresentados neste item foram obtidos por interpolação gráfica, dos gráficos apresentados nas Fig. 5.3 e 5.4.

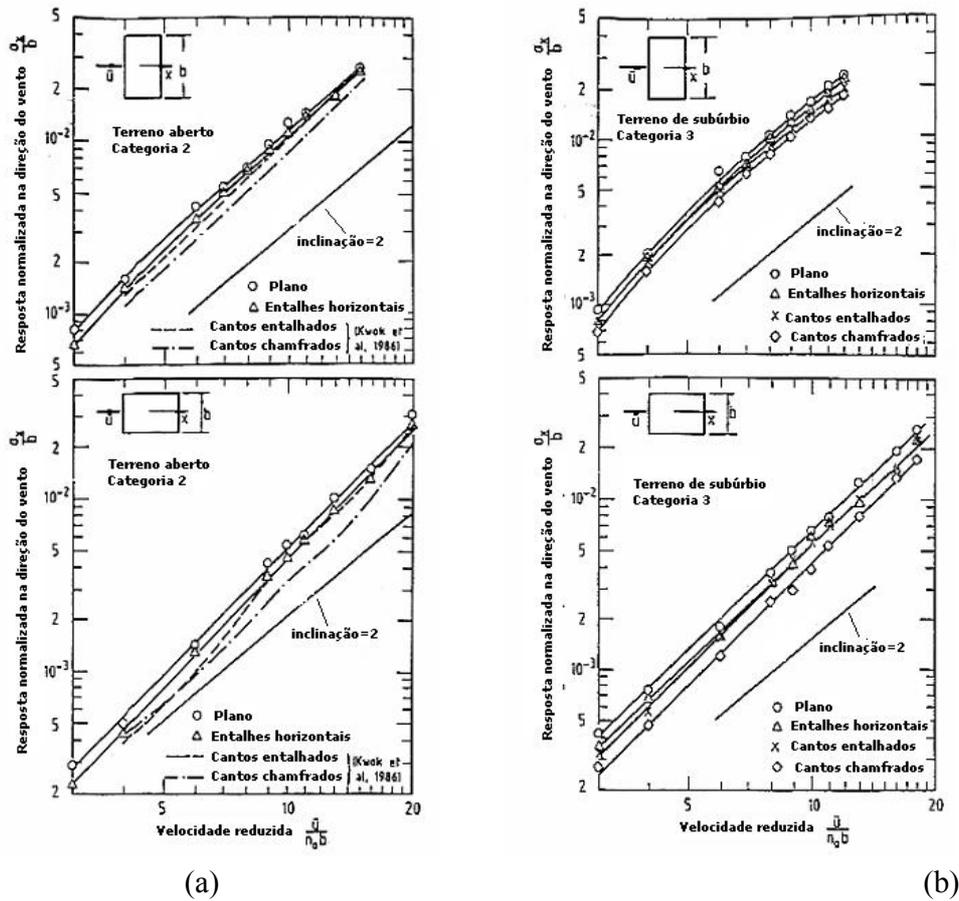


FIGURA 5.3 – Resposta Longitudinal no topo do protótipo (*CAARC Standard Tall Building*) para vento incidindo na face maior: (a) vento com $p=0,15$; (b) vento com $p=0,27$ (Kwok, 1988)

Vale destacar que o estudo apresentado por Kwok visa a obter uma relação entre as repostas obtidas através de ensaios com o protótipo sem e com alterações na sua geometria externa, sendo que os valores de interesses para este estudo são aqueles relativos ao protótipo sem alterações, identificados nas figuras com a legenda *Plano*.

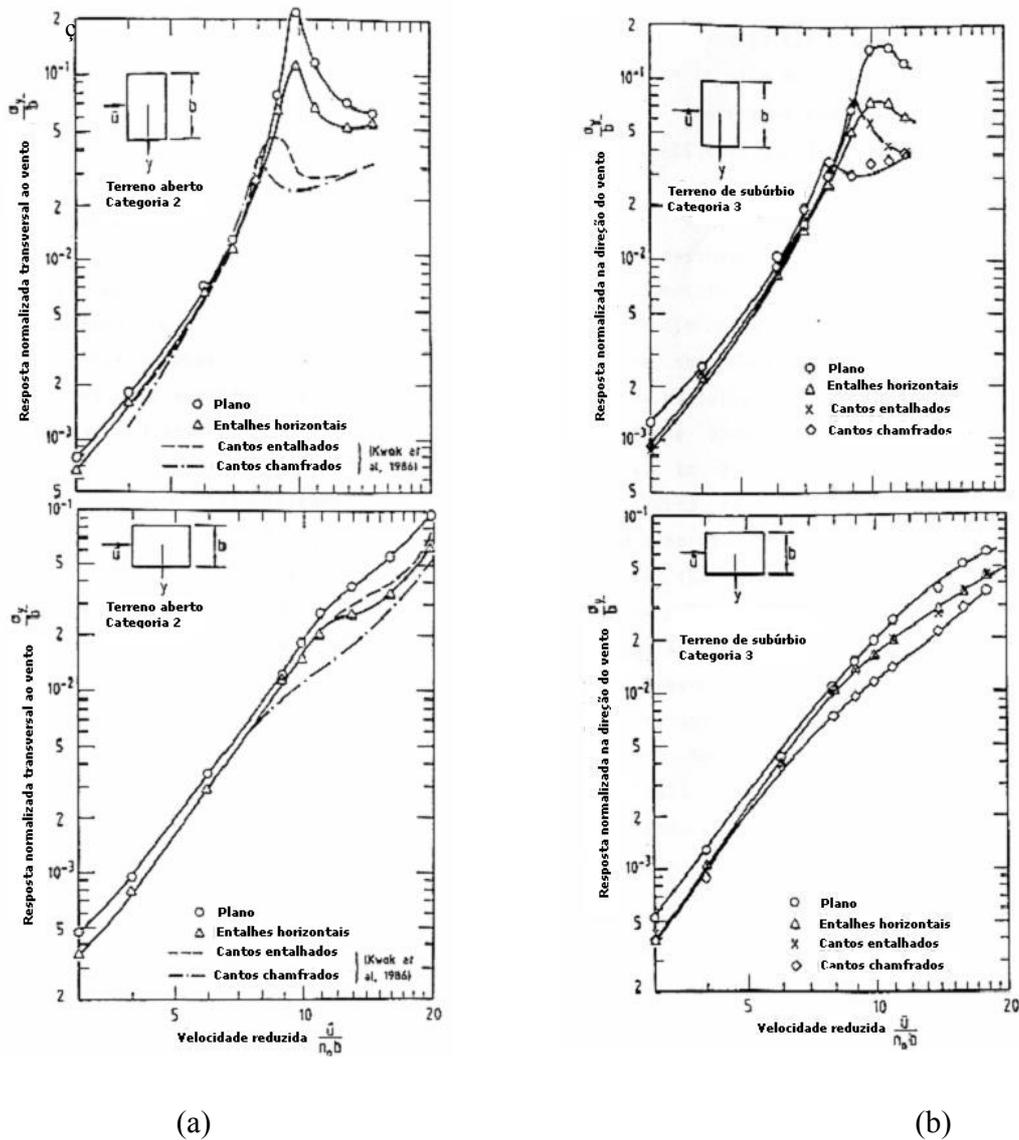


FIGURA 5.4 – Resposta Transversal no topo do protótipo (*CAARC Standard Tall Building*) para vento incidindo na face maior: (a) vento com $p=0,15$; (b) vento com $p=0,27$ (Kwok, 1988)

Nas Tab.5.14 a 5.17 (itens 5.1.4.1 e 5.1.4.2) estão transcritos os valores de deslocamentos no topo do protótipo, obtidos por interpolação gráfica, para as 2 regulagens de vento utilizadas, em função das velocidades de interesse neste estudo.

5.1.4.1 Resposta Longitudinal

TABELA 5.14 – Deslocamentos long. topo
protótipo vento incidente face maior

Velocidades		$\Delta_{\text{topo}}(\text{m})$		d_{norm}	
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	$p=0,15$	$p=0,27$	$p=0,15$	$p=0,27$
20,20	2,24	0,071	0,083	0,002379	0,002764
23,67	2,63	0,080	0,094	0,002660	0,003118
23,91	2,66	0,080	0,094	0,002682	0,003145
31,42	3,49	0,098	0,117	0,003280	0,003898
35,76	3,97	0,109	0,130	0,003625	0,004333
39,53	4,39	0,118	0,141	0,003927	0,004714
40,44	4,49	0,120	0,144	0,003999	0,004804
44,47	4,94	0,130	0,156	0,004323	0,005212
48,00	5,33	0,149	0,195	0,004983	0,006499
50,81	5,65	0,167	0,231	0,005580	0,007693
52,24	5,80	0,176	0,248	0,005860	0,008253
54,83	6,09	0,193	0,278	0,006428	0,009270
57,49	6,39	0,212	0,305	0,007078	0,010170
59,77	6,64	0,229	0,328	0,007620	0,010920
62,30	6,92	0,247	0,353	0,008227	0,011760
63,44	7,05	0,256	0,366	0,008543	0,012188
64,95	7,22	0,271	0,385	0,009031	0,012829
66,99	7,44	0,290	0,410	0,009661	0,013657
70,38	7,82	0,323	0,453	0,010751	0,015089
72,05	8,01	0,339	0,475	0,011304	0,015834
72,65	8,07	0,346	0,487	0,011528	0,016238
74,61	8,29	0,370	0,532	0,012349	0,017719
76,85	8,54	0,398	0,582	0,013283	0,019403
79,43	8,83	0,431	0,641	0,014365	0,021355
79,86	8,87	0,435	0,649	0,014515	0,021625
81,74	9,08	0,461	0,682	0,015368	0,022732
83,43	9,27	0,487	0,698	0,016242	0,023283
88,59	9,84	0,566	0,748	0,018864	0,024936
89,02	9,89	0,573	0,752	0,019094	0,025081
97,12	10,79	0,698	0,889	0,023260	0,029640
98,03	10,89	0,712	0,905	0,023724	0,030176
106,5	11,83	0,796	1,091	0,026530	0,036355
112,4	12,49	0,876	-	0,029205	-
112,9	12,55	0,884	-	0,029475	-
119,5	13,27	0,975	-	0,032513	-
119,9	13,32	0,981	-	0,032700	-

TABELA 5.15 – Deslocamentos long. topo
protótipo vento incidente face menor

Velocidades		$\Delta_{\text{topo}}(\text{m})$		d_{norm}	
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	$p=0,15$	$p=0,27$	$p=0,15$	$p=0,27$
22,15	2,46	0,016	0,024	0,000352	0,000526
22,47	2,50	0,016	0,024	0,000347	0,000533
32,14	3,57	0,021	0,033	0,000460	0,000724
39,78	4,42	0,024	0,039	0,000543	0,000875
41,36	4,60	0,025	0,041	0,000561	0,000907
48,20	5,36	0,035	0,051	0,000768	0,001130
53,28	5,92	0,046	0,061	0,001029	0,001366
56,43	6,27	0,052	0,070	0,001157	0,001562
63,76	7,08	0,065	0,092	0,001448	0,002053
64,01	7,11	0,066	0,093	0,001466	0,002073
71,15	7,91	0,088	0,117	0,001946	0,002607
73,33	8,15	0,095	0,125	0,002110	0,002777
77,22	8,58	0,109	0,139	0,002425	0,003092
81,24	9,03	0,124	0,155	0,002761	0,003438
84,08	9,34	0,137	0,172	0,003051	0,003831
88,83	9,87	0,160	0,203	0,003545	0,004502
91,42	10,16	0,172	0,217	0,003816	0,004827
97,50	10,83	0,200	0,247	0,004441	0,005497
99,48	11,05	0,209	0,257	0,004640	0,005717
106,1	11,78	0,237	0,292	0,005264	0,006497
107,6	11,95	0,241	0,298	0,005360	0,006617
113,6	12,62	0,297	0,356	0,006599	0,007907
115,9	12,88	0,320	0,379	0,007101	0,008427
120,4	13,37	0,360	0,417	0,007994	0,009272
122,2	13,57	0,376	0,432	0,008350	0,009599

5.1.4.2 Resposta Transversal

TABELA 5.16 – Deslocamentos transversais
topo do protótipo vento incidente face maior

Velocidades		$\Delta_{\text{topo}}(\text{m})$		d_{norm}	
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	$p=0,15$	$p=0,27$	$p=0,15$	$p=0,27$
21,01	2,33	0,075	0,063	0,001670	0,001393
22,73	2,53	0,082	0,075	0,001823	0,001663
31,41	3,49	0,115	0,133	0,002557	0,002960
40,58	4,51	0,150	0,195	0,003337	0,004338
40,63	4,51	0,150	0,195	0,003337	0,004338
47,58	5,29	0,214	0,310	0,004755	0,006895
51,65	5,74	0,287	0,443	0,006375	0,009835
54,47	6,05	0,344	0,531	0,007638	0,011803
62,83	6,98	0,617	0,757	0,013714	0,016825
63,70	7,08	0,670	0,813	0,014897	0,018059
69,75	7,75	1,067	1,237	0,023711	0,027483
71,77	7,97	1,197	1,376	0,026605	0,030578
75,88	8,43	2,434	1,821	0,054090	0,040460
76,52	8,50	2,633	1,890	0,058500	0,042000
82,08	9,12	4,950	2,996	0,110000	0,066581
82,77	9,20	5,550	3,404	0,123333	0,075636
85,54	9,50	7,800	4,932	0,173333	0,109589
86,56	9,62	8,700	5,543	0,193333	0,123170
87,52	9,72	9,450	6,052	0,210000	0,134488
90,67	10,07	8,775	7,565	0,195000	0,168113
97,47	10,83	6,332	8,034	0,140720	0,178533
98,55	10,95	5,947	8,010	0,132149	0,178000
104,6	11,63	4,409	7,213	0,097974	0,160278
107,3	11,92	3,775	6,850	0,083886	0,152222
112,7	12,52	3,366	-	0,074800	-
114,6	12,73	3,272	-	0,072700	-
120,2	13,36	3,069	-	0,068200	-
121,7	13,52	3,033	-	0,067400	-

TABELA 5.17 – Deslocamentos transversais
topo do protótipo vento incidente face menor

Velocidades		$\Delta_{\text{topo}}(\text{m})$		d_{norm}	
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	$p=0,15$	$p=0,27$	$p=0,15$	$p=0,27$
20,94	2,33	0,028	0,039	0,000932	0,001305
21,21	2,36	0,028	0,040	0,000944	0,001322
31,21	3,47	0,042	0,058	0,001388	0,001943
39,29	4,37	0,052	0,073	0,001748	0,002447
40,77	4,53	0,054	0,076	0,001812	0,002537
48,67	5,41	0,085	0,110	0,002820	0,003661
53,20	5,91	0,115	0,141	0,003820	0,004711
54,75	6,08	0,125	0,154	0,004160	0,005148
62,17	6,91	0,175	0,232	0,005820	0,007721
62,75	6,97	0,178	0,237	0,005940	0,007907
69,31	7,70	0,243	0,345	0,008100	0,011500
73,50	8,17	0,299	0,406	0,009957	0,013538
76,59	8,51	0,356	0,438	0,011873	0,014615
80,82	8,98	0,436	0,483	0,014521	0,016103
82,71	9,19	0,470	0,513	0,015653	0,017085
89,68	9,96	0,594	0,624	0,019785	0,020807
91,31	10,15	0,645	0,662	0,021500	0,022050
99,23	11,03	0,905	0,842	0,030150	0,028060
99,72	11,08	0,912	0,845	0,030400	0,028160
105,7	11,75	1,013	0,885	0,033750	0,029500
107,8	11,98	1,047	0,899	0,034900	0,029960
115,0	12,77	1,166	1,085	0,038850	0,036160
115,5	12,83	1,175	1,099	0,039150	0,036640
120,6	13,40	1,320	1,164	0,044000	0,038800
122,8	13,64	1,392	1,178	0,046400	0,039280

5.1.5 Miguel (2003) – Estudo teórico e experimental de um edifício alto submetido à ação dinâmica do vento

Os resultados apresentados por Miguel (2003) foram ajustados através de interpolação linear, de maneira a ficar emparelhados com as velocidades ensaiadas neste estudo, sendo aqui transcritos e usados com fins de comparação.

5.1.5.1 Resposta Longitudinal

TABELA 5.18 – Deslocamentos longitudinais topo protótipo; vento incidente face maior

V_{topo} (m/s)	V_{RED}	Δ_{topo} (m)	d_{norm}
21,81	2,42	0,034	0,001147
28,32	3,15	0,037	0,001223
32,18	3,58	0,042	0,001391
41,63	4,63	0,058	0,001919
45,20	5,02	0,074	0,002457
50,12	5,57	0,115	0,003827
54,57	6,06	0,148	0,004929
59,00	6,56	0,149	0,004953
61,85	6,87	0,158	0,005263
65,58	7,29	0,196	0,006545
73,11	8,12	0,244	0,008143
79,25	8,81	0,277	0,009225

TABELA 5.19 – Deslocamentos longitudinais topo protótipo; vento incidente face menor

V_{topo} (m/s)	V_{RED}	Δ_{topo} (m)	d_{norm}
21,83	2,43	0,032	0,000721
28,36	3,15	0,038	0,000852
32,22	3,58	0,047	0,001044
39,96	4,44	0,043	0,000959
45,02	5,00	0,058	0,001300
49,91	5,55	0,076	0,001693
54,41	6,05	0,085	0,001884
58,88	6,54	0,098	0,002186
61,86	6,87	0,112	0,002490
65,66	7,30	0,134	0,002974
73,15	8,13	0,180	0,003990
79,14	8,79	0,217	0,004825
82,06	9,12	0,219	0,004868
88,16	9,80	0,255	0,005673
95,30	10,59	0,310	0,006885
114,68	12,74	0,491	0,010904

5.1.5.2 Resposta Transversal

TABELA 5.20 – Deslocamentos transversais topo protótipo; vento incidente face maior

V_{topo} (m/s)	V_{RED}	$\Delta_{\text{topo}}(\text{m})$	d_{norm}
21,81	2,42	0,032	0,000702
28,32	3,15	0,038	0,000841
32,18	3,58	0,045	0,001009
40,00	4,44	0,070	0,001548
45,20	5,02	0,086	0,001900
50,12	5,57	0,141	0,003142
54,57	6,06	0,218	0,004844
59,00	6,56	0,236	0,005252
61,85	6,87	0,277	0,006148
65,58	7,29	0,369	0,008191
73,11	8,12	0,573	0,012724
79,25	8,81	1,269	0,028196
82,49	9,17	4,006	0,089032
88,34	9,82	10,793	0,239836
95,49	10,61	11,512	0,255820
115,01	12,78	3,250	0,072220
129,46	14,38	3,021	0,067123
147,18	16,35	2,833	0,062951

TABELA 5.21 – Deslocamentos transversais topo protótipo; vento incidente face menor

V_{topo} (m/s)	V_{RED}	$\Delta_{\text{topo}}(\text{m})$	d_{norm}
21,83	2,43	0,036	0,001212
28,36	3,15	0,040	0,001319
32,22	3,58	0,051	0,001695
39,96	4,44	0,077	0,002576
45,02	5,00	0,098	0,003277
49,91	5,55	0,144	0,004795
54,41	6,05	0,167	0,005567
58,88	6,54	0,265	0,008827
61,86	6,87	0,381	0,012716
65,66	7,30	0,399	0,013287
73,15	8,13	0,638	0,021275
79,14	8,79	0,848	0,028267
82,06	9,12	0,978	0,032596
88,16	9,80	1,371	0,045704
95,30	10,59	1,517	0,050552
114,68	12,74	2,492	0,083075
129,11	14,35	3,090	0,102984

5.1.6 Ensaios em túnel de vento

São apresentados aqui os resultados dos ensaios realizados em túnel de vento, com o modelo aeroelástico construído no decorrer dos estudos.

5.1.6.1 Resposta Longitudinal

5.1.6.1.1 Vento com $p=0,19$

TABELA 5.22 – Resposta longitudinal vento $p=0,19$ incidindo na face maior (corrida 0L19)

Modelo			Protótipo			Ambos	
V_{topo} (m/s)	$\Delta_{\text{topo}}\text{RMS}$ (mm)	$\Delta_{\text{topo}}\text{máx}$ (mm)	V_{topo} (m/s)	$\Delta_{\text{topo}}\text{RMS}$ (m)	$\Delta_{\text{topo}}\text{máx}$ (m)	V_{RED}	d_{norm} RMS
5,94	0,044	0,202	23,67	0,017	0,081	2,63	0,000588
9,92	0,143	0,453	39,53	0,057	0,181	4,39	0,001904
13,11	0,268	1,041	52,24	0,107	0,416	5,80	0,003570
15,92	0,404	1,457	63,44	0,162	0,583	7,05	0,005390
18,23	0,581	2,005	72,65	0,232	0,802	8,07	0,007748
20,04	0,664	2,357	79,86	0,266	0,943	8,87	0,008860
22,23	0,871	3,040	88,59	0,348	1,216	9,84	0,011609
24,60	1,096	3,922	98,03	0,438	1,569	10,89	0,014612
26,72	1,184	4,233	106,48	0,474	1,693	11,83	0,015792
28,20	1,433	4,795	112,38	0,573	1,918	12,49	0,019106
29,98	1,960	5,433	119,47	0,784	2,173	13,27	0,026138

TABELA 5.23 – Resposta longitudinal vento $p=0,19$ incidindo na face menor (corrida TL19)

Modelo			Protótipo			Ambos	
V_{topo} (m/s)	Δ_{topo} RMS(mm)	Δ_{topo} máx(mm)	V_{topo} (m/s)	Δ_{topo} RMS(m)	Δ_{topo} máx(m)	V_{RED}	d_{norm} RMS
5,64	0,028	0,089	22,47	0,011	0,036	2,50	0,000251
9,98	0,111	0,443	39,78	0,045	0,177	4,42	0,000991
13,37	0,201	0,694	53,28	0,080	0,278	5,92	0,001785
16,06	0,319	1,370	64,01	0,127	0,548	7,11	0,002833
18,40	0,408	1,995	73,33	0,163	0,798	8,15	0,003630
20,39	0,532	2,118	81,24	0,213	0,847	9,03	0,004732
22,29	0,680	2,247	88,83	0,272	0,899	9,87	0,006046
24,47	0,807	2,869	97,50	0,323	1,148	10,83	0,007171
26,61	0,955	3,479	106,05	0,382	1,392	11,78	0,008487
28,50	1,116	3,844	113,57	0,447	1,538	12,62	0,009924
30,20	1,259	4,931	120,36	0,503	1,972	13,37	0,011188

5.1.6.1.2 Vento com $p=0,23$ TABELA 5.24 – Resposta longitudinal vento $p=0,23$ incidindo na face maior (corrida 0L23)

Modelo			Protótipo			Ambos	
V_{topo} (m/s)	$\Delta_{\text{topo}}\text{RMS}$ (mm)	$\Delta_{\text{topo}}\text{máx}$ (mm)	V_{topo} (m/s)	$\Delta_{\text{topo}}\text{RMS}$ (m)	$\Delta_{\text{topo}}\text{máx}$ (m)	V_{RED}	d_{norm} RMS
5,07	0,030	0,121	20,20	0,012	0,048	2,24	0,000397
6,00	0,038	0,145	23,91	0,015	0,058	2,66	0,000511
7,89	0,072	0,293	31,42	0,029	0,117	3,49	0,000964
8,97	0,090	0,293	35,76	0,036	0,117	3,97	0,001196
10,15	0,155	0,637	40,44	0,062	0,255	4,49	0,002070
11,16	0,189	0,813	44,47	0,075	0,325	4,94	0,002515

12,04	0,247	0,927	48,00	0,099	0,371	5,33	0,003294
12,75	0,247	1,007	50,81	0,099	0,403	5,65	0,003298
13,76	0,278	1,153	54,83	0,111	0,461	6,09	0,003709
14,43	0,318	1,335	57,49	0,127	0,534	6,39	0,004240
15,00	0,344	1,449	59,77	0,137	0,580	6,64	0,004582
15,63	0,442	1,779	62,30	0,177	0,711	6,92	0,005899
16,30	0,388	1,579	64,95	0,155	0,632	7,22	0,005172
16,81	0,427	1,498	66,99	0,171	0,599	7,44	0,005698
17,66	0,467	1,491	70,38	0,187	0,596	7,82	0,006231
18,08	0,528	1,901	72,05	0,211	0,760	8,01	0,007045
18,72	0,562	2,160	74,61	0,225	0,864	8,29	0,007496
19,29	0,577	1,901	76,85	0,231	0,760	8,54	0,007688
19,93	0,681	2,282	79,43	0,272	0,913	8,83	0,009075
20,51	0,741	2,986	81,74	0,296	1,194	9,08	0,009873
20,94	0,654	2,457	83,43	0,262	0,983	9,27	0,008723
22,34	0,757	3,020	89,02	0,303	1,208	9,89	0,010090
24,37	1,000	3,875	97,12	0,400	1,550	10,79	0,013336
28,34	1,588	4,989	112,93	0,635	1,996	12,55	0,021174
30,08	1,711	4,809	119,86	0,684	1,923	13,32	0,022812

TABELA 5.25 – Resposta longitudinal vento $p=0,23$ incidindo na face menor (corrida TL23)

Modelo			Protótipo			Ambos	
V_{topo} (m/s)	Δ_{topoRMS} (mm)	$\Delta_{\text{topo máx}}$ (mm)	V_{topo} (m/s)	Δ_{topoRMS} (m)	$\Delta_{\text{topo máx}}$ (m)	V_{RED}	d_{norm} RMS
5,56	0,021	0,076	22,15	0,008	0,030	2,46	0,000183
8,07	0,066	0,243	32,14	0,026	0,097	3,57	0,000588
10,38	0,110	0,426	41,36	0,044	0,171	4,60	0,000980
12,10	0,175	0,538	48,20	0,070	0,215	5,36	0,001552
14,16	0,227	0,840	56,43	0,091	0,336	6,27	0,002014
16,00	0,270	0,934	63,76	0,108	0,374	7,08	0,002402
17,85	0,392	1,550	71,15	0,157	0,620	7,91	0,003481
19,38	0,473	1,526	77,22	0,189	0,610	8,58	0,004204
21,10	0,494	2,260	84,08	0,198	0,904	9,34	0,004390
22,94	0,635	2,641	91,42	0,254	1,056	10,16	0,005647
24,96	0,826	3,725	99,48	0,330	1,490	11,05	0,007340
26,99	0,987	3,297	107,55	0,395	1,319	11,95	0,008770
29,09	1,169	4,284	115,94	0,468	1,713	12,88	0,010391
30,66	1,320	4,172	122,17	0,528	1,669	13,57	0,011736

5.1.6.2 Resposta Transversal

5.1.6.2.1 Vento com $p=0,19$ TABELA 5.26 – Resposta transversal vento $p=0,19$ incidindo na face maior (corrida 0T19)

Modelo			Protótipo			Ambos	
V_{topo}	Δ_{topoRMS}	$\Delta_{\text{topo máx}}$	V_{topo}	Δ_{topoRMS}	$\Delta_{\text{topo máx}}$	V_{RED}	d_{norm}

(m/s)	(mm)	(mm)	(m/s)	(m)	(m)		RMS
5,70	0,021	0,077	22,73	0,008	0,029	2,53	0,000172
10,20	0,176	0,555	40,63	0,069	0,217	4,51	0,001527
12,96	0,387	1,459	51,65	0,155	0,583	5,74	0,003438
15,99	0,773	2,620	63,70	0,326	1,105	7,08	0,007241
18,01	1,365	4,470	71,77	0,563	1,844	7,97	0,012513
19,04	3,832	6,112	75,88	2,121	3,382	8,43	0,047125

TABELA 5.27 – Resposta transversal para vento $p=0,19$ incidindo na face menor (corrida TT19)

Modelo			Protótipo			Ambos	
V_{topo} (m/s)	Δ_{topoRMS} (mm)	$\Delta_{\text{topo máx}}$ (mm)	V_{topo} (m/s)	Δ_{topoRMS} (m)	$\Delta_{\text{topo máx}}$ (m)	V_{RED}	d_{norm} RMS
5,25	0,032	0,105	20,94	0,013	0,042	2,33	0,000423
9,86	0,263	0,879	39,29	0,105	0,352	4,37	0,003501
13,35	0,765	2,906	53,20	0,306	1,162	5,91	0,010195
15,60	1,564	5,218	62,17	0,626	2,087	6,91	0,020853
18,45	2,059	5,873	73,50	0,824	2,349	8,17	0,027453
20,28	2,326	6,575	80,82	0,930	2,630	8,98	0,031016

5.1.6.2.2 Vento com $p=0,23$ TABELA 5.28 – Resposta transversal para vento $p=0,23$ incidindo na face maior (corrida 0T23)

Modelo			Protótipo			Ambos	
V_{topo} (m/s)	Δ_{topoRMS} (mm)	$\Delta_{\text{topo máx}}$ (mm)	V_{topo} (m/s)	Δ_{topoRMS} (m)	$\Delta_{\text{topo máx}}$ (m)	V_{RED}	d_{norm} RMS
5,27	0,017	0,061	21,01	0,007	0,024	2,33	0,000145
7,88	0,068	0,252	31,41	0,027	0,101	3,49	0,000601
10,18	0,160	0,630	40,58	0,067	0,262	4,51	0,001480
11,94	0,271	1,010	47,58	0,110	0,408	5,29	0,002434
13,67	0,505	1,585	54,47	0,208	0,654	6,05	0,004627
15,77	1,120	3,720	62,83	0,466	1,549	6,98	0,010364
17,50	1,656	4,494	69,75	0,701	1,901	7,75	0,015567
19,20	2,236	4,699	76,52	0,971	2,040	8,50	0,021570

TABELA 5.29 – Resposta transversal para vento $p=0,23$ incidindo na face menor (corrida TT23)

Modelo			Protótipo			Ambos	
V_{topo} (m/s)	Δ_{topoRMS} (mm)	$\Delta_{\text{topo máx}}$ (mm)	V_{topo} (m/s)	Δ_{topoRMS} (m)	$\Delta_{\text{topo máx}}$ (m)	V_{RED}	d_{norm} RMS
5,32	0,040	0,139	21,21	0,016	0,056	2,36	0,000527
7,83	0,117	0,385	31,21	0,047	0,154	3,47	0,001556
10,23	0,305	1,107	40,77	0,122	0,443	4,53	0,004072
12,21	0,489	1,781	48,67	0,196	0,713	5,41	0,006517
13,74	0,808	2,436	54,75	0,323	0,974	6,08	0,010773

15,75	1,161	4,108	62,75	0,464	1,643	6,97	0,015481
17,39	1,549	4,820	69,31	0,620	1,928	7,70	0,020653
19,22	1,884	5,385	76,59	0,754	2,154	8,51	0,025124
20,76	1,993	5,623	82,71	0,797	2,249	9,19	0,026567

5.2 ANÁLISE DOS DADOS DE ENSAIO

Os valores obtidos através dos ensaios, apresentados no item 5.1.6, são comparados com os valores apresentados nos itens 5.1.1 a 5.1.5. Desta forma, é possível que se obtenha uma contextualização daqueles no âmbito científico existente.

Esta seção é dividida em 3 itens principais. Nos 2 primeiros (5.2.1 e 5.2.2), os resultados da análise são apresentados conforme os perfis de velocidade de vento utilizados nos ensaios. No terceiro item (5.2.3), são apresentados gráficos sem a participação dos valores relativos à norma canadense.

Dentro de cada um dos 2 primeiros itens, as informações são organizadas da seguinte maneira:

- a) **Resumo dos resultados:** é apresentado um resumo dos valores de deslocamento no topo do protótipo, obtidos através de todas as referências utilizadas e dos ensaios.
- b) **Comparação dos resultados:** é apresentada uma tabela contendo as razões entre os valores de deslocamento no topo do protótipo obtidos nos ensaios e os valores de deslocamento obtidos através das referências utilizadas, comparando-os entre si.
- c) **Gráfico:** é apresentado um gráfico, resumindo as informações relacionadas ao item *a*.

5.2.1 Vento com $p = 0,19$

5.2.1.1 Resposta Longitudinal para vento incidindo na face maior

a) **Resumo dos resultados**

TABELA 5.30 – Resumo dos resultados vento com $p=0,19$ incidindo na face maior do protótipo

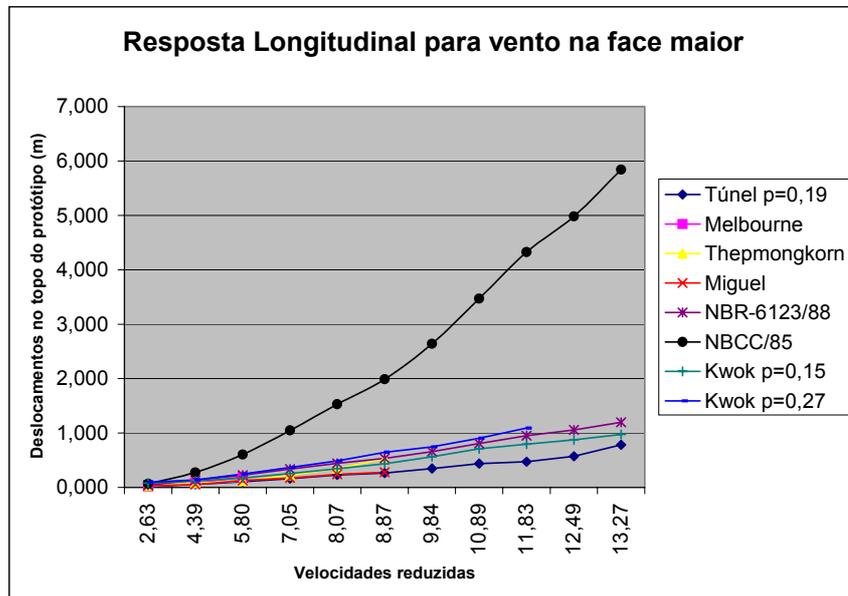
Velocidades		$\Delta_{\text{topo}}(\text{m})$							
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	NBR- 6123	NBCC- 85	Túnel $p=0,19$	Melbourne $p=0,28$	Thepmongkorn $p=0,15$	Miguel $p=0,19$	Kwok $p=0,15$	Kwok $p=0,27$
23,67	2,63	0,047	0,067	0,018	0,015	0,025	0,035	0,080	0,094
39,53	4,39	0,131	0,275	0,057	0,079	0,079	0,054	0,118	0,141
52,24	5,80	0,229	0,605	0,107	0,194	0,120	0,131	0,176	0,248
63,44	7,05	0,337	1,048	0,162	-	0,225	0,174	0,256	0,366
72,65	8,07	0,442	1,531	0,232	-	0,347	0,241	0,346	0,487
79,86	8,87	0,534	1,989	0,266	-	0,525	0,280	0,435	0,649
88,59	9,84	0,658	2,642	0,348	-	-	-	0,566	0,748
98,03	10,89	0,805	3,471	0,438	-	-	-	0,712	0,905
106,48	11,83	0,950	4,324	0,474	-	-	-	0,796	1,091
112,38	12,49	1,058	4,982	0,573	-	-	-	0,876	-
119,47	13,27	1,196	5,839	0,784	-	-	-	0,975	-

b) Comparação dos resultados

TABELA 5.31 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face maior

Velocidades		Razão entre valores dos ensaios de Túnel e						
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	NBR- 6123	NBCC- 85	Melbourn e $p=0,28$	Thepmongkorn $p=0,15$	Miguel $p=0,19$	Kwok $p=0,15$	Kwok $p=0,27$
23,67	2,63	0,38	0,26	1,18	0,71	0,51	0,22	0,19
39,53	4,39	0,44	0,21	0,72	0,72	1,06	0,48	0,41
52,24	5,80	0,47	0,18	0,55	0,89	0,82	0,61	0,43
63,44	7,05	0,48	0,15	-	0,72	0,93	0,63	0,44
72,65	8,07	0,53	0,15	-	0,67	0,96	0,67	0,48
79,86	8,87	0,50	0,13	-	0,51	0,95	0,61	0,41
88,59	9,84	0,53	0,13	-	-	-	0,62	0,47
98,03	10,89	0,54	0,13	-	-	-	0,62	0,48
106,48	11,83	0,50	0,11	-	-	-	0,60	0,43
112,38	12,49	0,54	0,12	-	-	-	0,65	-
119,47	13,27	0,66	0,13	-	-	-	0,80	-
Média		0,50	0,15	0,82	0,70	0,87	0,59	0,42

c) Gráfico

FIGURA 5.5 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face maior

5.2.1.2 Resposta Longitudinal para vento incidindo na face menor

a) Resumo dos resultados

TABELA 5.32 – Resumo dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face menor

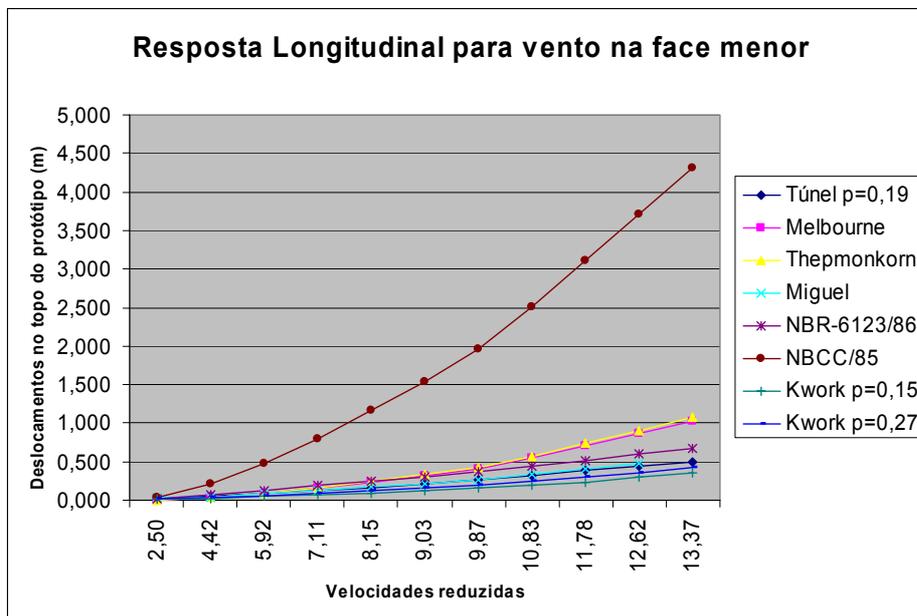
Velocidades		$\Delta_{\text{topo}}(\text{m})$							
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	NBR- 6123	NBCC- 85	Túnel $p=0,19$	Melbourne $p=0,28$	Thepmongkorn $p=0,15$	Miguel $p=0,19$	Kwok $p=0,15$	Kwok $p=0,27$
22,47	2,50	0,023	0,044	0,011	0,007	0,007	0,033	0,016	0,024
39,78	4,42	0,073	0,211	0,045	0,037	0,039	0,043	0,024	0,039
53,28	5,92	0,131	0,480	0,080	0,089	0,093	0,083	0,046	0,061
64,01	7,11	0,189	0,800	0,127	0,154	0,161	0,124	0,066	0,093
73,33	8,15	0,249	1,164	0,163	0,231	0,243	0,181	0,095	0,125
81,24	9,03	0,305	1,538	0,213	0,314	0,33	0,219	0,124	0,155
88,83	9,87	0,365	1,955	0,272	0,411	0,432	0,260	0,160	0,203
97,50	10,83	0,440	2,503	0,323	0,544	0,571	0,330	0,200	0,247
106,05	11,78	0,520	3,118	0,382	0,708	0,744	0,410	0,237	0,292
113,56	12,62	0,596	3,719	0,447	0,859	0,902	0,480	0,297	0,356
120,36	13,37	0,670	4,312	0,503	1,022	1,074	-	0,360	0,417

b) Comparação dos resultados

TABELA 5.33 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face menor

Velocidades		Razão entre valores dos ensaios de Túnel e						
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	NBR- 6123	NBCC- 85	Melbourne $p=0,28$	Thepmonkorn $p=0,15$	Miguel $p=0,19$	Kwok $p=0,15$	Kwok $p=0,27$
22,47	2,50	0,48	0,26	1,61	1,61	0,34	0,70	0,47
39,78	4,42	0,61	0,21	1,21	1,14	1,03	1,86	1,14
53,28	5,92	0,61	0,17	0,90	0,86	0,97	1,75	1,32
64,01	7,11	0,67	0,16	0,83	0,79	1,02	1,93	1,37
73,33	8,15	0,66	0,14	0,71	0,67	0,90	1,72	1,31
81,24	9,03	0,70	0,14	0,68	0,65	0,97	1,72	1,37
88,83	9,87	0,75	0,14	0,66	0,63	1,04	1,70	1,34
97,50	10,83	0,73	0,13	0,59	0,57	0,98	1,61	1,31
106,05	11,78	0,73	0,12	0,54	0,51	0,93	1,61	1,31
113,56	12,62	0,75	0,12	0,52	0,50	0,93	1,50	1,25
120,36	13,37	0,75	0,12	0,49	0,47	-	1,40	1,21
Média		0,68	0,15	0,79	0,76	0,91	1,59	1,22

c) Gráfico

FIGURA 5.6 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face menor

5.2.1.3 Resposta Transversal para vento incidindo na face maior

a) Resumo dos resultados

TABELA 5.34 – Resumo dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face maior

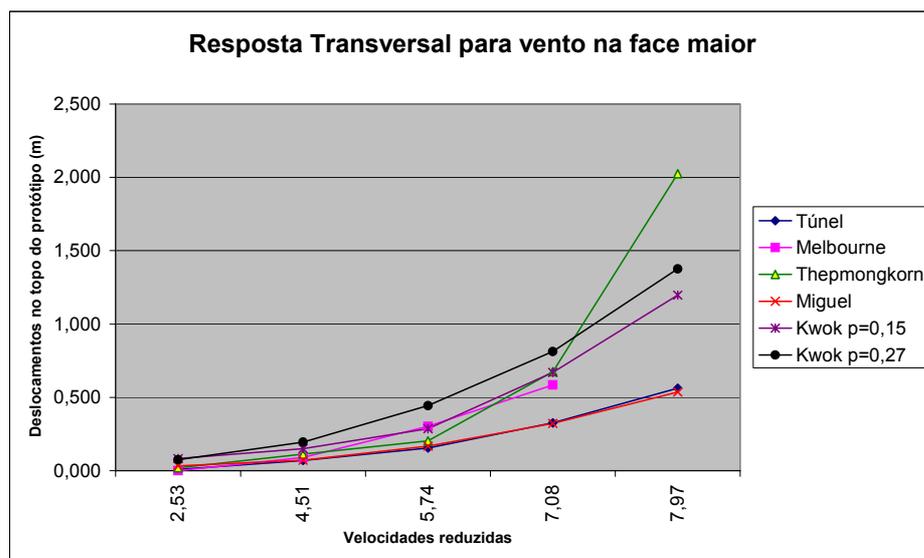
Velocidades		$\Delta_{\text{topo}}(\text{m})$					
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	Túnel $p=0,19$	Melbourne $p=0,28$	Thepmongkorn $p=0,15$	Miguel $p=0,19$	Kwok $p=0,15$	Kwok $p=0,27$
22,73	2,53	0,008	-	0,020	0,032	0,082	0,075
40,63	4,51	0,069	0,090	0,113	0,072	0,150	0,195
51,65	5,74	0,155	0,302	0,203	0,168	0,287	0,443
63,70	7,08	0,326	0,585	0,675	0,322	0,670	0,813
71,77	7,97	0,563	-	2,025	0,536	1,197	1,376

b) Comparação dos resultados

TABELA 5.35 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face maior

Velocidades		Razão entre valores dos ensaios de Túnel e				
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	Melbourne $p=0,28$	Thepmongkorn $p=0,15$	Miguel $p=0,19$	Kwok $p=0,15$	Kwok $p=0,27$
22,73	2,53	-	0,39	-	0,09	0,10
40,63	4,51	0,76	0,61	0,96	0,46	0,35
51,65	5,74	0,51	0,76	0,92	0,54	0,35
63,70	7,08	0,56	0,48	1,01	0,49	0,40
71,77	7,97	-	0,28	1,05	0,47	0,41
Média		0,61	0,50	0,99	0,49	0,38

c) Gráfico

FIGURA 5.7 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face maior

5.2.1.4 Resposta Transversal para vento incidindo na face menor

a) Resumo dos resultados

TABELA 5.36 – Resumo dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face menor

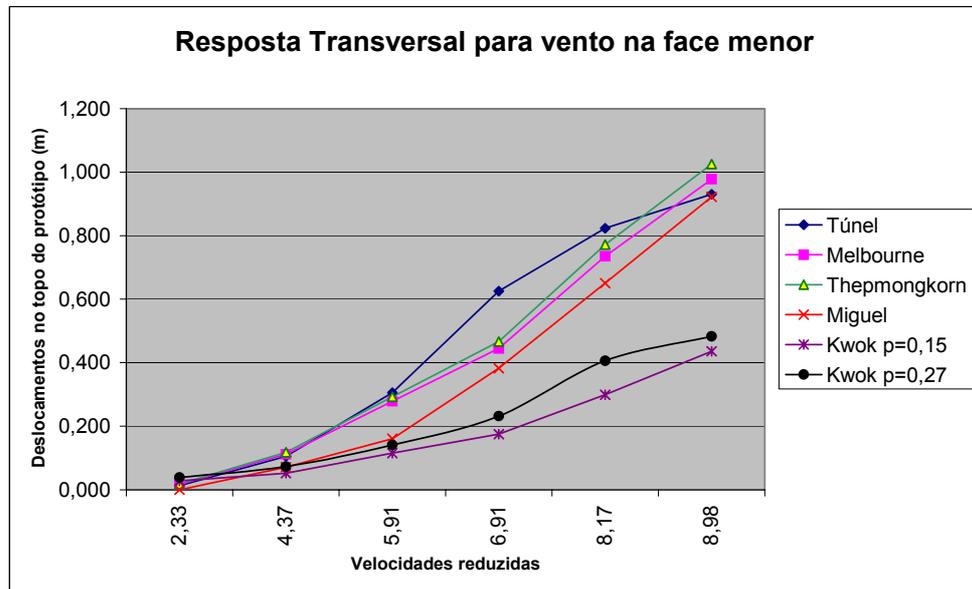
Velocidades		$\Delta_{\text{topo}}(\text{m})$					
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	Túnel $p=0,19$	Melbourne $p=0,28$	Thepmongkorn $p=0,15$	Miguel $p=0,19$	Kwok $p=0,15$	Kwok $p=0,27$
20,94	2,33	0,013	0,017	0,018	-	0,028	0,039
39,29	4,37	0,105	0,112	0,118	0,071	0,052	0,073
53,20	5,91	0,306	0,279	0,293	0,161	0,115	0,141
62,17	6,91	0,626	0,445	0,467	0,383	0,175	0,232
73,50	8,17	0,824	0,735	0,772	0,650	0,299	0,406
80,82	8,98	0,930	0,978	1,026	0,923	0,436	0,483

b) Comparação dos resultados

TABELA 5.37 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face menor

Velocidades		Razão entre valores dos ensaios de Túnel e				
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	Melbourne $p=0,28$	Thepmongkorn $p=0,15$	Miguel $p=0,19$	Kwok $p=0,15$	Kwok $p=0,27$
20,94	2,33	-	0,70	-	0,45	0,33
39,29	4,37	0,94	0,89	1,48	2,02	1,44
53,20	5,91	1,10	1,04	1,90	2,66	2,17
62,17	6,91	1,41	1,34	1,63	3,57	2,70
73,50	8,17	1,12	1,07	1,27	2,75	2,03
80,82	8,98	0,95	0,91	1,01	2,13	1,93
Média		1,10	0,99	1,46	2,27	1,76

c) Gráfico

FIGURA 5.8 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face menor5.2.2 Vento com $p = 0,23$

5.2.2.1 Resposta Longitudinal para vento incidindo na face maior

a) Resumo dos resultados

TABELA 5.38 – Resumo dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face maior

Velocidades		$\Delta_{\text{topo}}(\text{m})$							
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	NBR- 6123	NBCC- 85	Túnel $p=0,23$	Melbourne $p=0,28$	Thepmongkorn $p=0,15$	Miguel $p=0,19$	Kwok $p=0,15$	Kwok $p=0,27$
20,20	2,24	0,020	0,048	0,012	-	-	-	0,071	0,083
23,91	2,66	0,029	0,072	0,015	0,016	0,025	0,035	0,080	0,094
31,42	3,49	0,049	0,148	0,029	0,038	0,047	0,041	0,098	0,117
35,76	3,97	0,064	0,210	0,036	0,057	0,063	0,048	0,109	0,130
40,44	4,49	0,082	0,294	0,062	0,085	0,084	0,056	0,120	0,144
44,47	4,94	0,099	0,384	0,075	0,115	0,104	0,070	0,130	0,156
48,00	5,33	0,115	0,476	0,099	0,148	0,110	0,097	0,149	0,195
50,81	5,65	0,129	0,559	0,099	0,177	0,116	0,120	0,167	0,231
54,83	6,09	0,150	0,693	0,111	0,216	0,180	0,148	0,193	0,278
57,49	6,39	0,165	0,793	0,127	-	-	0,148	0,212	0,305
59,77	6,64	0,179	0,885	0,137	-	-	0,151	0,229	0,328
62,30	6,92	0,194	0,996	0,177	-	-	0,163	0,247	0,353
64,95	7,22	0,211	1,121	0,155	-	-	0,190	0,271	0,385

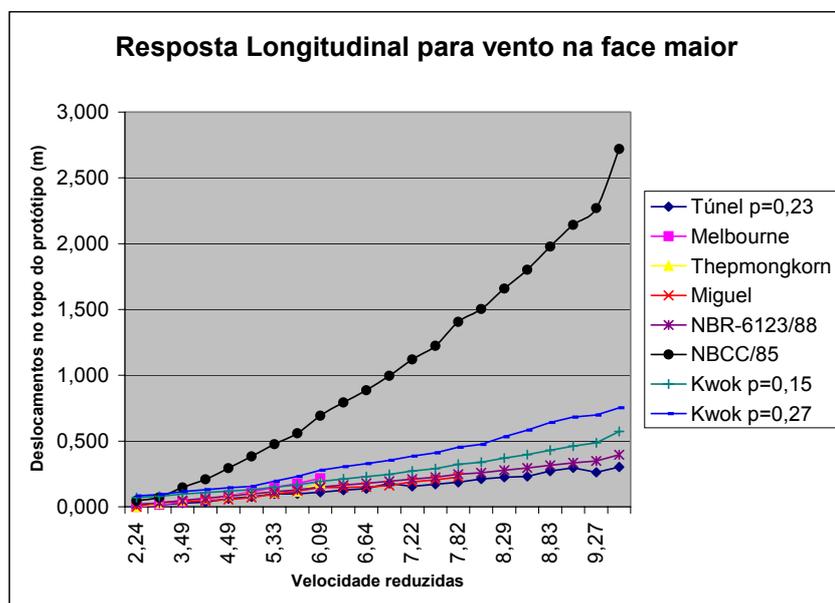
66,99	7,44	0,224	1,223	0,171	-		0,205	0,290	0,410
70,38	7,82	0,248	1,406	0,187	-		0,227	0,323	0,453
72,05	8,01	0,260	1,503	0,211	-			0,339	0,475
74,61	8,29	0,278	1,658	0,225	-			0,370	0,532
76,85	8,54	0,295	1,802	0,231	-			0,398	0,582
79,43	8,83	0,315	1,977	0,272	-			0,431	0,641
81,74	9,08	0,334	2,143	0,296	-			0,461	0,682
83,43	9,27	0,348	2,269	0,262	-			0,487	0,698
89,02	9,89	0,396	2,719	0,303	-			0,573	0,752
97,12	10,79	0,472	3,461	0,400	-			0,698	0,889
112,93	12,55	0,638	5,224	0,635	-			0,884	-
119,86	13,32	0,718	6,132	0,684	-			0,981	-

b) Comparação dos resultados

TABELA 5.39 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face maior

Velocidades		Razão entre valores dos ensaios de Túnel e						
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	NBR- 6123	NBCC- 85	Melbourne $p=0,28$	Thepmongkorn $p=0,15$	Miguel $p=0,19$	Kwok $p=0,15$	Kwok $p=0,27$
20,20	2,24	0,58	0,25	-	-	-	0,17	0,14
23,91	2,66	0,54	0,21	0,96	0,61	0,44	0,19	0,16
31,42	3,49	0,59	0,20	0,76	0,62	0,71	0,30	0,25
35,76	3,97	0,56	0,17	0,63	0,57	0,75	0,33	0,28
40,44	4,49	0,76	0,21	0,73	0,74	1,12	0,52	0,43
44,47	4,94	0,76	0,20	0,66	0,73	1,07	0,58	0,48
48,00	5,33	0,86	0,21	0,67	0,90	1,02	0,66	0,51
50,81	5,65	0,77	0,18	0,56	0,85	0,83	0,59	0,43
54,83	6,09	0,74	0,16	0,52	0,62	0,75	0,58	0,40
57,49	6,39	0,77	0,16	-	-	0,86	0,60	0,42
59,77	6,64	0,77	0,16	-	-	0,91	0,60	0,42
62,30	6,92	0,91	0,18	-	-	1,09	0,72	0,50
64,95	7,22	0,74	0,14	-	-	0,82	0,57	0,40
66,99	7,44	0,76	0,14	-	-	0,83	0,59	0,42
70,38	7,82	0,75	0,13	-	-	0,82	0,58	0,41
72,05	8,01	0,81	0,14	-	-	-	0,62	0,44
74,61	8,29	0,81	0,14	-	-	-	0,61	0,42
76,85	8,54	0,78	0,13	-	-	-	0,58	0,40
79,43	8,83	0,86	0,14	-	-	-	0,63	0,42
81,74	9,08	0,89	0,14	-	-	-	0,64	0,43
83,43	9,27	0,75	0,12	-	-	-	0,54	0,37
89,02	9,89	0,76	0,11	-	-	-	0,53	0,40
97,12	10,79	0,85	0,12	-	-	-	0,57	0,45
112,93	12,55	1,00	0,12	-	-	-	0,72	-
119,86	13,32	0,95	0,11	-	-	-	0,70	-
Média		0,77	0,16	0,68	0,70	0,86	0,55	0,39

c) Gráfico

FIGURA 5.9 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face maior

5.2.2.2 Resposta Longitudinal para vento incidindo na face menor

a) Resumo dos resultados

TABELA 5.40 – Resumo dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face menor

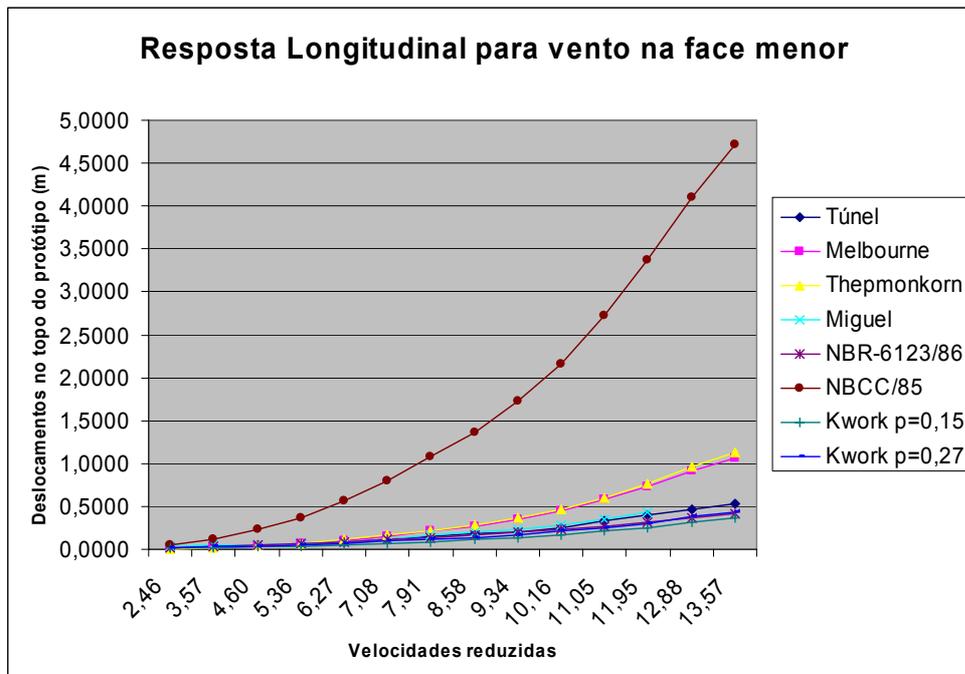
Velocidades		$\Delta_{\text{topo}}(\text{m})$							
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	NBR- 6123	NBCC- 85	Túnel $p=0,23$	Melbourne $p=0,28$	Thepmongkorn $p=0,15$	Miguel $p=0,19$	Kwok $p=0,15$	Kwok $p=0,27$
22,15	2,46	0,014	0,044	0,008	0,006	0,007	0,033	0,016	0,024
32,14	3,57	0,028	0,118	0,026	0,019	0,020	0,047	0,021	0,033
41,36	4,60	0,047	0,237	0,044	0,041	0,044	0,047	0,025	0,041
48,20	5,36	0,064	0,363	0,070	0,066	0,069	0,070	0,035	0,051
56,43	6,27	0,088	0,566	0,091	0,105	0,111	0,091	0,052	0,070
63,76	7,08	0,112	0,798	0,108	0,152	0,160	0,123	0,065	0,092
71,15	7,91	0,140	1,084	0,157	0,211	0,222	0,167	0,088	0,117
77,22	8,58	0,164	1,362	0,189	0,270	0,284	0,205	0,109	0,139
84,08	9,34	0,195	1,723	0,198	0,349	0,366	0,231	0,137	0,172
91,42	10,16	0,231	2,168	0,254	0,448	0,470	0,280	0,172	0,217
99,48	11,05	0,273	2,727	0,330	0,577	0,606	0,349	0,209	0,257
107,55	11,95	0,319	3,364	0,395	0,730	0,766	0,424	0,241	0,298
115,94	12,88	0,371	4,109	0,468	0,914	0,960	-	0,320	0,379
122,17	13,57	0,412	4,717	0,528	1,069	1,123	-	0,360	0,432

b) Comparação dos resultados

TABELA 5.41 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face menor

Velocidades		Razão entre valores dos ensaios de Túnel e						
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	NBR-6123	NBCC-85	Melbourne $p=0,28$	Thepmonkorn $p=0,15$	Miguel $p=0,19$	Kwok $p=0,15$	Kwok $p=0,27$
22,15	2,46	0,61	0,19	1,37	1,18	0,25	0,52	0,34
32,14	3,57	0,93	0,22	1,39	1,32	0,57	1,26	0,80
41,36	4,60	0,93	0,19	1,08	1,00	0,93	1,76	1,08
48,20	5,36	1,09	0,19	1,06	1,01	1,00	1,99	1,37
56,43	6,27	1,03	0,16	0,86	0,82	1,00	1,74	1,29
63,76	7,08	0,96	0,14	0,71	0,68	0,88	1,66	1,17
71,15	7,91	1,12	0,14	0,74	0,71	0,94	1,78	1,34
77,22	8,58	1,15	0,14	0,70	0,67	0,92	1,74	1,36
84,08	9,34	1,01	0,11	0,57	0,54	0,86	1,44	1,15
91,42	10,16	1,10	0,12	0,57	0,54	0,91	1,48	1,17
99,48	11,05	1,21	0,12	0,57	0,55	0,95	1,58	1,29
107,55	11,95	1,24	0,12	0,54	0,52	0,93	1,64	1,32
115,94	12,88	1,26	0,11	0,51	0,49	-	1,46	1,23
122,17	13,57	1,28	0,11	0,49	0,47	-	1,47	1,22
Média		1,07	0,15	0,80	0,75	0,84	1,54	1,15

c) Gráfico

FIGURA 5.10 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face menor

5.2.2.3 Resposta Transversal para vento incidindo na face maior

a) Resumo dos resultados

TABELA 5.42 – Resumo dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face maior

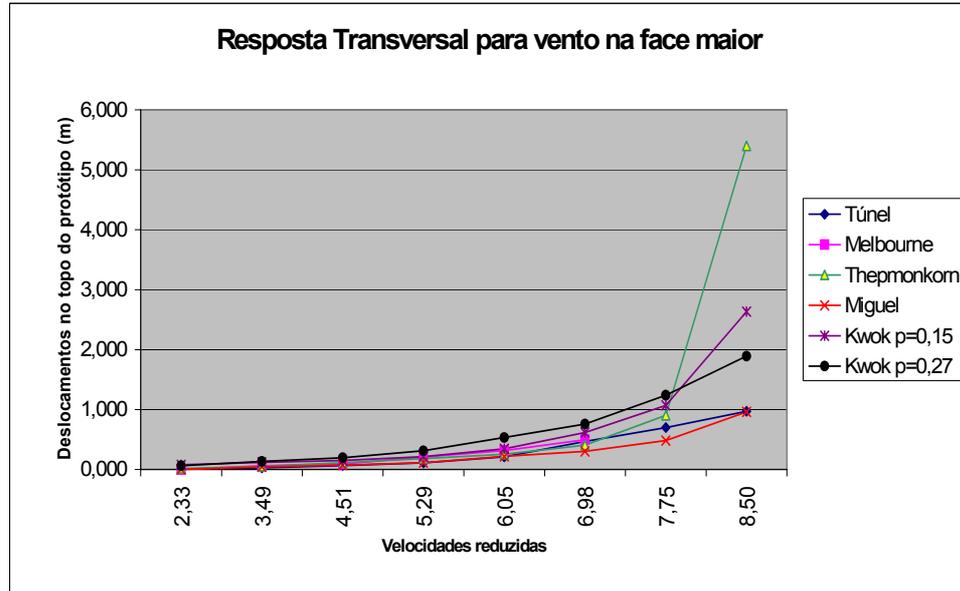
Velocidades		$\Delta_{\text{topo}}(\text{m})$					
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	Túnel $p=0,23$	Melbourne $p=0,28$	Thepmongkorn $p=0,15$	Miguel $p=0,19$	Kwok $p=0,15$	Kwok $p=0,27$
21,01	2,33	0,007	-	0,014	-	0,075	0,063
31,41	3,49	0,027	0,063	0,050	0,044	0,115	0,133
40,58	4,51	0,067	0,090	0,113	0,071	0,150	0,195
47,58	5,29	0,110	0,207	0,180	0,113	0,214	0,310
54,47	6,05	0,208	0,315	0,252	0,216	0,344	0,531
62,83	6,98	0,466	0,495	0,405	0,301	0,617	0,757
69,75	7,75	0,701	-	0,900	0,482	1,067	1,237
76,52	8,50	0,971	-	5,400	0,959	2,633	1,890

b) Comparação dos resultados

TABELA 5.43 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face maior

Velocidades		Razão entre valores dos ensaios de Túnel e				
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	Melbourne $p=0,28$	Thepmongkorn $p=0,15$	Miguel $p=0,19$	Kwok $p=0,15$	Kwok $p=0,27$
21,01	2,33	-	0,47	-	0,09	0,10
31,41	3,49	0,43	0,54	0,62	0,24	0,20
40,58	4,51	0,74	0,59	0,93	0,44	0,34
47,58	5,29	0,53	0,61	0,97	0,51	0,35
54,47	6,05	0,66	0,83	0,96	0,61	0,39
62,83	6,98	0,94	1,15	1,55	0,76	0,62
69,75	7,75	-	0,78	1,45	0,66	0,57
76,52	8,50	-	0,18	1,01	0,37	0,51
Média		0,66	0,64	1,07	0,51	0,43

c) Gráfico

FIGURA 5.11 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face maior

5.2.2.4 Resposta Transversal para vento incidindo na face menor

a) Resumo dos resultados

TABELA 5.44 – Resumo dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face menor

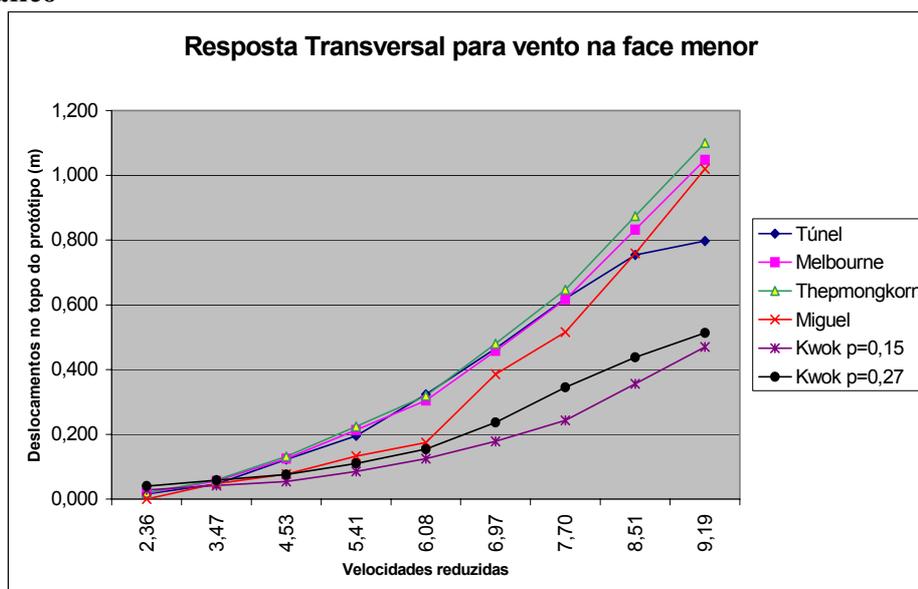
Velocidades		$\Delta_{\text{topo}}(\text{m})$					
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	Túnel $p=0,23$	Melbourne $p=0,28$	Thepmongkorn $p=0,15$	Miguel $p=0,19$	Kwok $p=0,15$	Kwok $p=0,27$
21,21	2,36	0,016	0,018	0,019	-	0,028	0,040
31,21	3,47	0,047	0,056	0,059	0,048	0,042	0,058
40,77	4,53	0,122	0,125	0,132	0,077	0,054	0,076
48,67	5,41	0,196	0,213	0,224	0,132	0,085	0,110
54,75	6,08	0,323	0,304	0,319	0,174	0,125	0,154
62,75	6,97	0,464	0,458	0,480	0,385	0,178	0,237
69,31	7,70	0,620	0,617	0,647	0,515	0,243	0,345
76,59	8,51	0,754	0,832	0,874	0,759	0,356	0,438
82,71	9,19	0,797	1,048	1,100	1,020	0,470	0,513

b) Comparação dos resultados

TABELA 5.45 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face menor

Velocidades		Razão entre valores dos ensaios de Túnel e				
V_{topo} (m/s)	V_{RED}	Melbourne $p=0,28$	Thepmongkorn $p=0,15$	Miguel $p=0,19$	Kwok $p=0,15$	Kwok $p=0,27$
21,21	2,36	-	0,83	-	0,56	0,40
31,21	3,47	0,83	0,79	0,97	1,11	0,80
40,77	4,53	0,98	0,93	1,59	2,26	1,61
48,67	5,41	0,92	0,87	1,48	2,30	1,78
54,75	6,08	1,06	1,01	1,85	2,59	2,10
62,75	6,97	1,01	0,97	1,20	2,61	1,96
69,31	7,70	1,00	0,96	1,20	2,55	1,80
76,59	8,51	0,91	0,86	0,99	2,12	1,72
82,71	9,19	0,76	0,72	0,78	1,70	1,55
Média		0,93	0,88	1,26	1,98	1,52

c) Gráfico

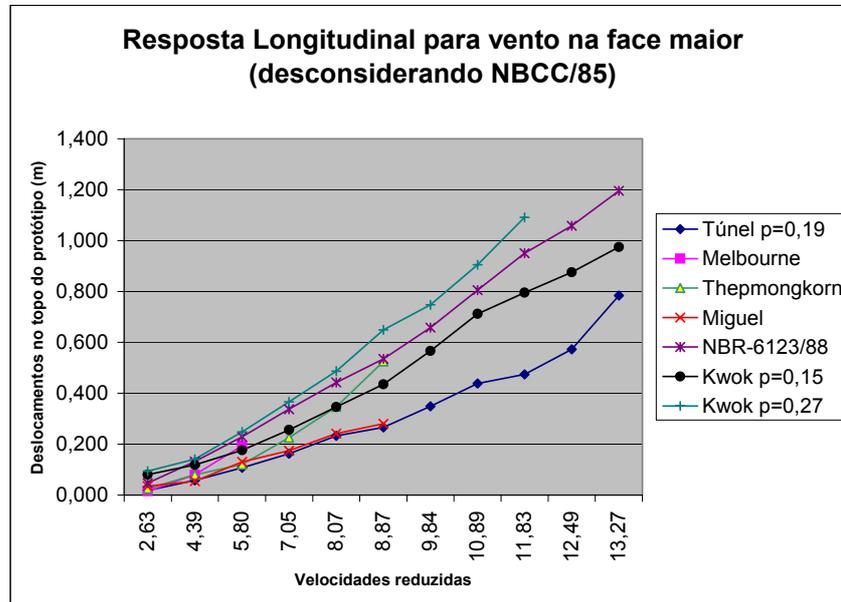
FIGURA 5.12 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face menor

5.2.3 Análise desconsiderando os resultados da norma canadense

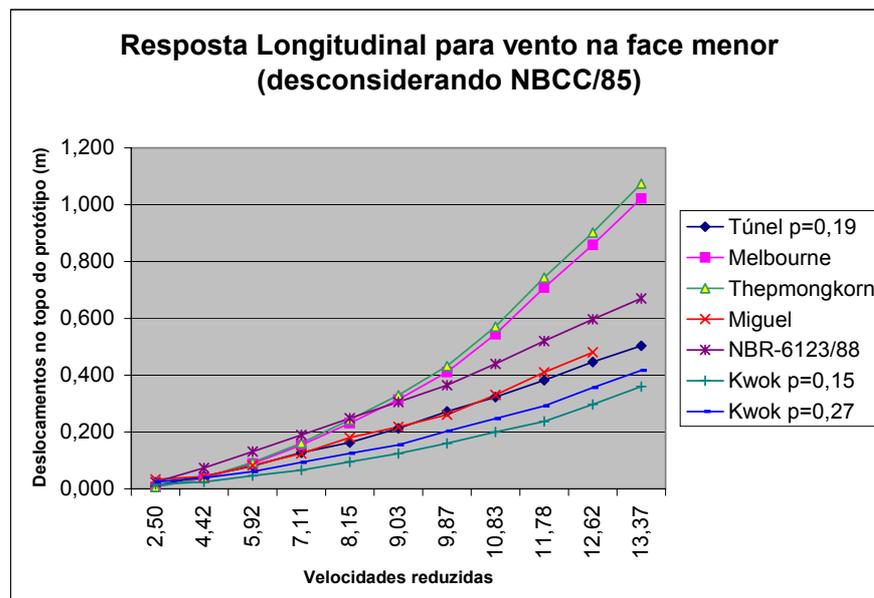
Através das tabelas e gráficos gerados nos itens 5.2.1 e 5.2.2, pode-se perceber que a norma canadense fornece resultados que afastam-se consideravelmente das outras referências utilizadas. Apresentam-se, então, os dados graficamente, sem a participação dos valores desta referência.

5.2.3.1 Vento com $p = 0,19$

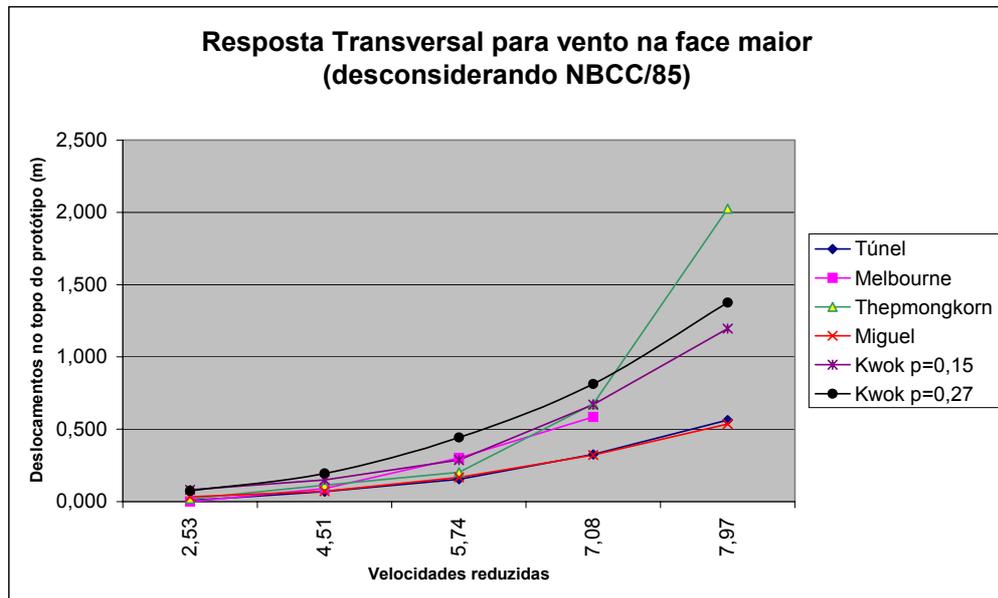
5.2.3.1.1 Resposta Longitudinal para vento incidindo na face maior

FIGURA 5.13 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face maior

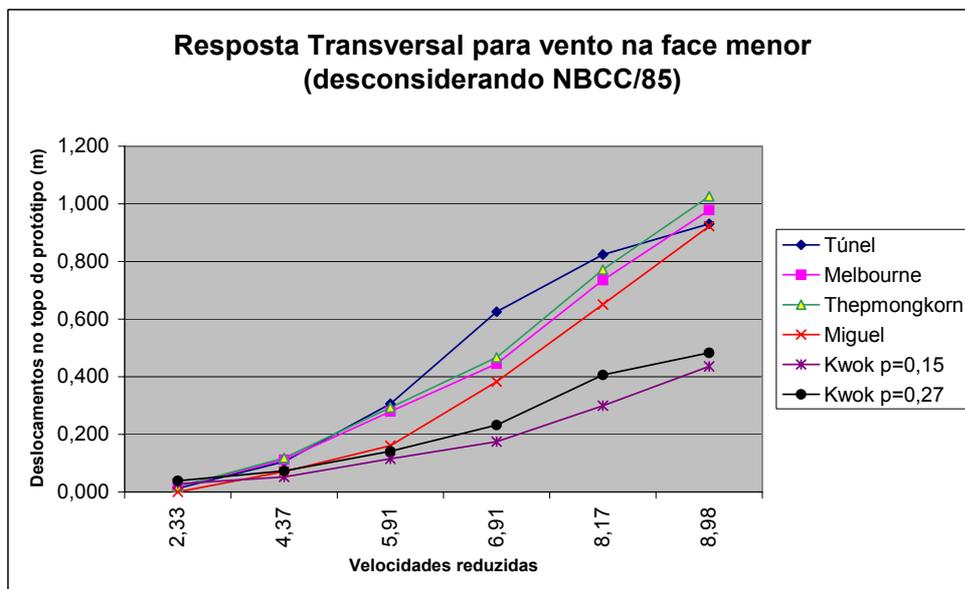
5.2.3.1.2 Resposta Longitudinal para vento incidindo na face menor

FIGURA 5.14 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face menor

5.2.3.1.3 Resposta Transversal para vento incidindo na face maior

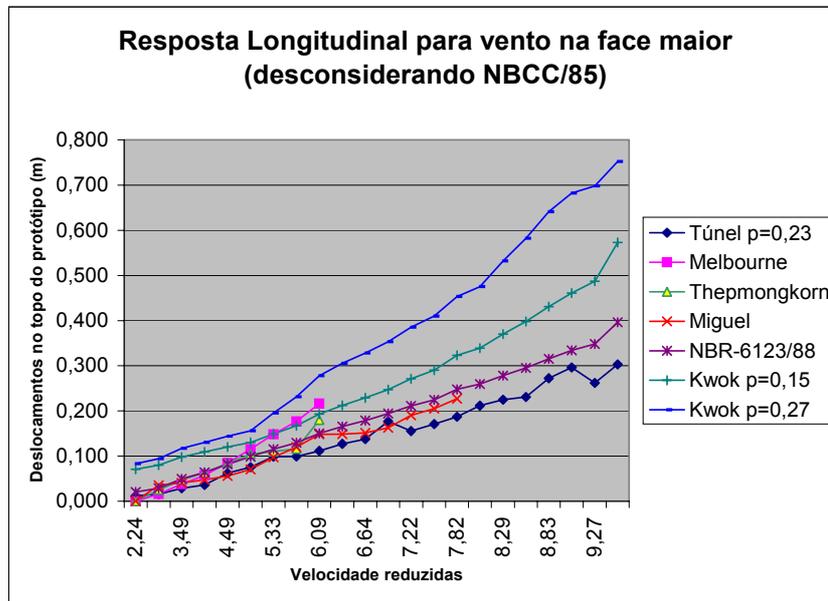
FIGURA 5.15 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face maior

5.2.3.1.4 Resposta Transversal para vento incidindo na face menor

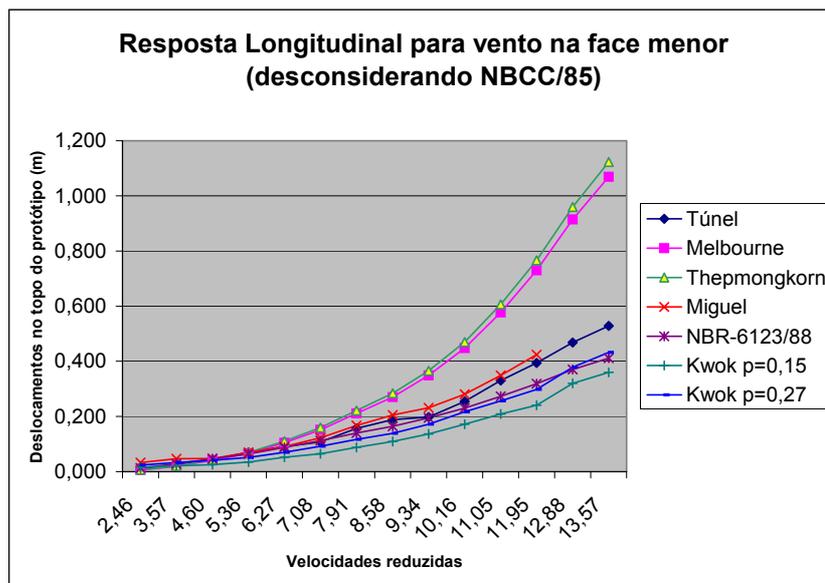
FIGURA 5.16 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,19$ incidindo na face menor

5.2.3.2 Vento com $p = 0,23$

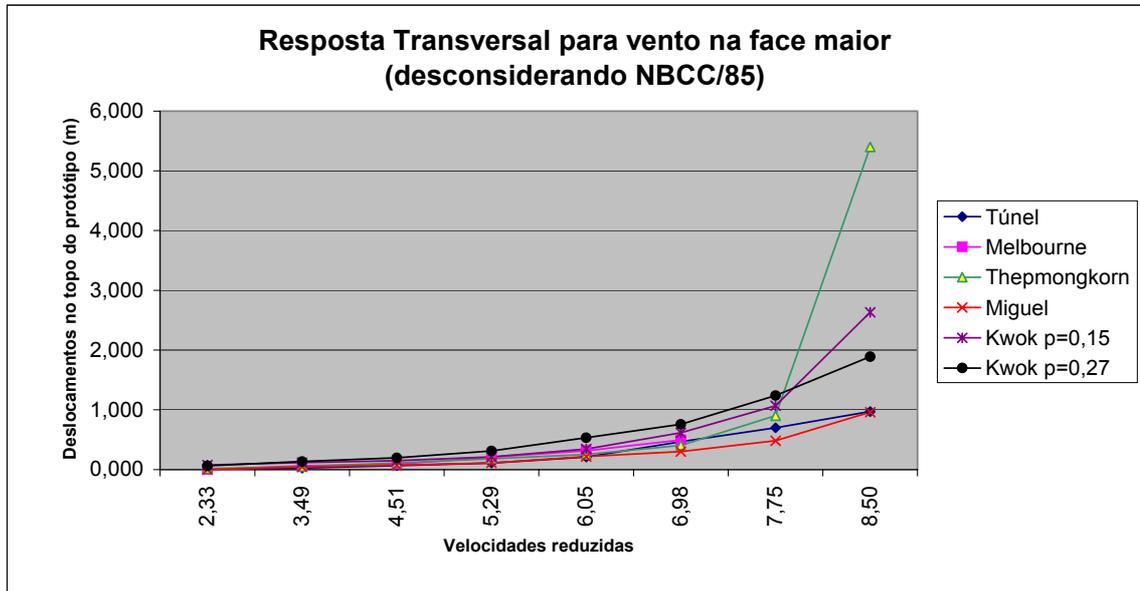
5.2.3.2.1 Resposta Longitudinal para vento incidindo na face maior

FIGURA 5.17 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face maior

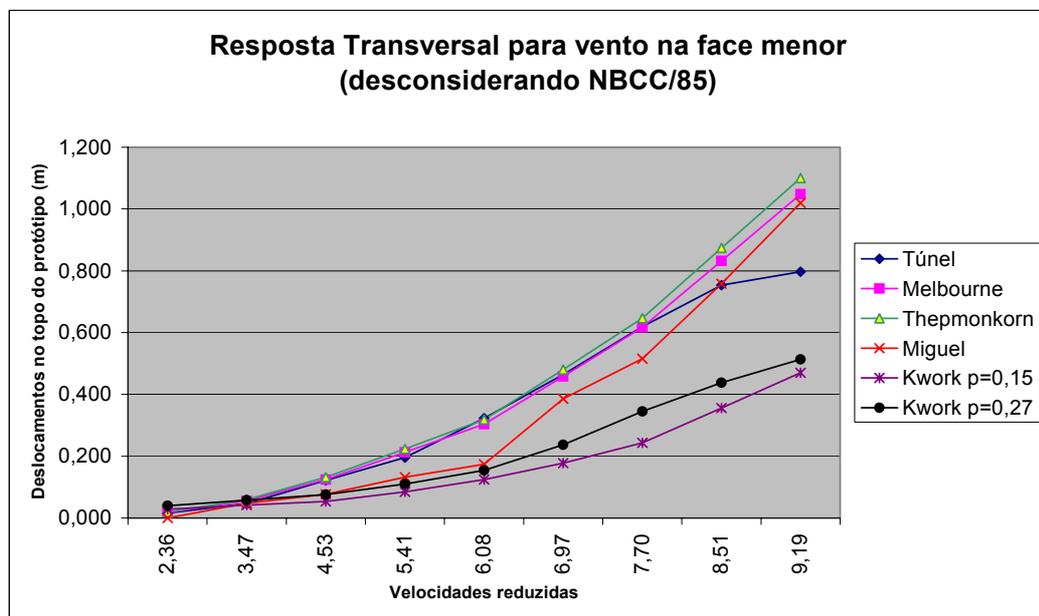
5.2.3.2.2 Resposta Longitudinal para vento incidindo na face menor

FIGURA 5.18 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face menor

5.2.3.2.3 Resposta Transversal para vento incidindo na face maior

FIGURA 5.19 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face maior

5.2.3.2.4 Resposta Transversal para vento incidindo na face menor

FIGURA 5.20 – Comparação dos resultados para vento com $p=0,23$ incidindo na face menor

5.3 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Analisando-se os valores obtidos pelas referências adotadas para comparação e desconsiderando-se os dados de ensaio, pode-se perceber que existe uma relação apenas parcial de dependência entre eles.

Os dados relativos às respostas longitudinais e transversais para o vento incidindo na face maior apresentam-se de maneira que os valores obtidos por Kwok (1988) situam-se nos patamares mais superiores, enquanto que os valores obtidos por Miguel (2003) preenchem as lacunas inferiores.

Para o vento incidindo na face menor, tanto nas respostas longitudinais quanto nas transversais, esta situação se altera, de forma que os valores obtidos por Thepmongkorn et al. (1999) e Melbourne (1980) ocupam os patamares superiores e os valores obtidos por Kwok (1988) figuram nas posições inferiores. Ressalta-se que o vento modelado por Thepmongkorn et al. apresenta características semelhantes ($p=0,15$ e $I=10\%$) a um dos ventos modelados por Kwok (com $p=0,15$ e $I=10,5\%$). Entretanto, estas características, por si só, não descrevem o vento em sua plenitude.

Para as respostas longitudinais, os valores da norma brasileira ocupam sempre as posições intermediárias.

Quando se consideram os valores obtidos nos ensaios percebe-se que estes acompanham, em todas as situações, a tendência dos valores apresentados por Miguel (2003). Ressalta-se que estes ensaios foram conduzidos no mesmo túnel de vento, com regulagens semelhantes de vento.

Percebe-se que a norma canadense fornece valores bem acima das outras referências utilizadas. Considerando-se que é opinião de numerosos autores (e.g. Simiu, Velozzi & Cohen, Sfintesco) que esta norma superestima a resposta dinâmica, a diferença apresentada constitui mais um elemento favorável de avaliação (Galindez, Riera & Blessmann, 1980).

De acordo com as referências adotadas, esperava-se retratar a existência de um valor de pico na resposta transversal, para os ensaios com vento incidente na face menor. Em função de problemas ocorridos durante a coleta de dados - que somente foram detectados no momento da

análise - tal situação não se pôde documentar, embora tenha sido observada durante a condução dos respectivos ensaios. Os valores de ensaio apresentaram-se distorcidos, devido às grandes oscilações observadas na prática.

Entretanto, nota-se que a invalidação dos valores de ensaios ocorre para velocidades reduzidas V_{RED} em torno de 8~9 que, de acordo com a literatura, é um patamar razoável para picos de desprendimento de vórtices.

Desta forma, mesmo não tendo sido registrados, pode-se inferir que, para $V_{RED} > 8\sim 9$, os deslocamentos amplificam-se de maneira não-linear, podendo levar a ocorrência de picos devido ao desprendimento de vórtices.

6 CONCLUSÕES

Devido à magnitude da base de dados para comparação utilizada, algumas divergências são esperadas, sem que invalidem o trabalho. As diferenças nas características dos ventos modelados (turbulência, perfil de velocidades médias) contribuem de maneira decisiva para isto. Desta forma, algumas conclusões importantes podem ser tiradas deste estudo, que seguem abaixo:

- A norma canadense, de uma forma geral, superestima os valores das respostas;
- Ensaio prático apresenta resultados mais confiáveis, quando comparados aos procedimentos analíticos;
- Os resultados experimentais apresentaram-se de maneira coerente com as referências adotadas, quando se levam em consideração as características dos ventos modelados em cada situação. Isto reforça a certeza de que as técnicas experimentais são mais apropriadas na estimativa dos esforços devidos ao vento em estruturas;
- Para a obtenção das respostas transversais não existem técnicas analíticas genéricas eficientes;
- A boa correlação obtida com os resultados apresentados por Miguel (2003) demonstra a importância da correta modelagem do vento, já que foram usados os mesmos critérios de modelagem em ambos os estudos. Para as outras referências, parâmetros como Intensidade de Turbulência e Perfil Vertical de Velocidades variaram entre si, refletindo nas correlações que podem ser feitas entre os resultados obtidos;
- As respostas dinâmicas na direção transversal à incidência do vento apresentaram-se em magnitude maior do que as respostas dinâmicas na direção longitudinal;
- Para o vento incidindo na face menor, com uma velocidade próxima à velocidade crítica, calculada através do número de Strouhal, é clara a tendência para a existência de um pico de desprendimento de vórtices, onde os deslocamentos amplificam-se de

maneira considerável. Esta tendência é relatada pela literatura e não é verificada para as situações com vento incidente na face maior deste modelo;

6.1 TRABALHOS FUTUROS

- Adaptar o modelo para alteração da sua rigidez sem a necessidade de troca de molas, apenas com a variação do seu braço de alavanca;
- Estudos com efeito de vizinhança;
- Estudos com variação de amortecimento do sistema, a fim de se quantificar a sua influência nas respostas dinâmicas;
- Estudar a viabilidade de associação da técnica apresentada neste trabalho a sistemas onde seja possível a obtenção, em conjunto, das respostas médias.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, Rio de Janeiro. Norma Brasileira NBR-6123 (NB-599): Forças devidas ao vento em edificações. Edição 1988.
2. ABDEL-ROHMAN, M. *Control of tall buildings response by aerodynamic appendages*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1983. v.13, p.253-260.
3. BLESSMANN, Joaquim. **Aerodinâmica das Construções**. 2.ed. Porto Alegre: Sagra, 1990. 263 p.
4. BLESSMANN, Joaquim. **Forças devidas ao vento em edificações altas**. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 1988. 27 p. Caderno de Engenharia CE-27.
5. BLESSMANN, Joaquim. **Esforços devidos ao vento em edifícios altos**. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 1986. 19 p. Caderno Técnico CT-82.
6. BLESSMANN, Joaquim. **Instabilidade Aerodinâmica por Galope**. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 1990. 42 p. Caderno de Engenharia CE-34.
7. BLESSMANN, J. *Neighbouring wind effects on two tall buildings*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992. v.41-44, p.1041-1052.
8. BLESSMANN, Joaquim. **Vibração por Desprendimento de Vórtices**. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 1990. 52 p. Caderno de Engenharia CE-39.
9. BOGGS, D.W. *Validation of the Aerodynamic Model Method*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992. v.41-44, p.1011-1022.
10. CHANG, C.C.; GU, M. *Suppression of vortex-excited vibration of tall buildings using tuned liquid dampers*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1999. v.83, p.225-237.
11. CHEONG, H.F. et al. *An experimental technique for distribution of dynamic wind loads on tall buildings*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992. v.40, p.249-261.
12. CIGADA, A.; FALCO, M.; ZASSO, A. *Development of new systems to measure the aerodynamic forces on section models in wind tunnel testing*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 2001. v.89, p.725-746.

13. COOPER, K.R. et al. *Unsteady aerodynamic force measurements on a super-tall building with a tapered cross section*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1997. v.72, p.199-212.
14. CTBUH – Council on Tall Building and Urban Habitat. **Monograph on Planning and Design of Tall Buildings**. USA: ASCE, 1978?. Chapter CL-3: Wind Loading and Wind Effects, p.144-248.
15. DUTTON, R.; ISYUMOV, N. *Reduction of tall building motion by aerodynamic treatments*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1990. v.36, p.739-747.
16. ELLWANGER, Ronald José. **Estruturas de Edifícios Altos**. 2.ed. Porto Alegre: DECIV/UFRGS, 2000. 80 p.
17. EVANS, R.A.; LEE, B.E. *The determination of the modal forces acting on three buildings using wind tunnel methods*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1983. v.13, p.161-172.
18. FEDIW, A.A. et al. *Wind tunnel study of an oscillating tall building*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1995. v.57, p.249-260.
19. FERRARO, Vincent et al. *Wind Induced Building Accelerations*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1990. v.36, p.757-767.
20. GALINDEZ, E.E.; RIERA, J.D.; BLESSMANN, J. **Procedimento para a determinação da resposta dinâmica, na direção da velocidade média, de estruturas submetidas à ação do vento**. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 1980. 42 p. Caderno Técnico CT-11/80.
21. GARG, R.K., LOU, J.X., KASPERSKI, M. *Some features of modeling spectral characteristics of flow in boundary layer tunnels*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1997. v.72, p.1-12.
22. HÖLSCHER, Norbert; NIEMANN, Hans-Jürgen. *Towards quality assurance for wind tunnel tests: A comparative testing program of the Windtechnologische Gesellschaft*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1998. v.74-76, p.599-608.
23. ISHIZAKI, H.; NISHIMURA, H. *Wind Tunnel Experiments on the Vibration of Flexible Models of a Tall Building*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992. v.41-44, p.1065-1072.
24. ISYUMOV, N. et al. *Effects of the Orientation of the Principal Axis of Stiffness on the Dynamic Response of a Slender Square Building*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1990. v.36, p.769-778.

25. ISYUMOV, N. et al. *Performance of a Tall Building Under Wind Action*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992. v.41-44, p.1053-1064.
26. ISYUMOV, N. *The aeroelastic modelling of tall buildings*. In: **Proceedings of the International Workshop on Wind Tunnel Modeling Criteria and Techniques in Civil Engineering Applications**. Gaithersburg, Maryland, USA. April, 1982. pp. 373-407.
27. JEARY, A.P.; ELLIS, B.R. *On predicting the response of tall buildings to wind excitation*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1983. v.13, p.173-182.
28. KAREEM, Ahsan. *Dynamic Response of High-Rise Buildings to Stochastic Wind Loads*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992. v.41-44, p.1101-1112.
29. KAREEM, Ahsan. *Mitigation of wind induced motion of tall buildings*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1983. v.11, p.273-284.
30. KAWAI, H. *Bending and torsional vibration of tall buildings in strong wind*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1993. v.50, p.281-288.
31. KAWAI, H. *Effect of corner modifications on aeroelastic instabilities of tall buildings*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1998. v.74-76, p.719-729.
32. KAWAI, H. *Effects of angle of attack on vortex induced vibration and galloping of tall buildings in smooth and turbulent boundary layer flows*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1995. v.54/55, p.125-132.
33. KAWAI, H. *Vortex induced vibration of tall buildings*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992. v.41-44, p.117-128.
34. KIJEWski, Tracy. **Uncovering the Enigma Called Structural Damping: Redefining Perspectives in Civil Engineering**. (www.nd.edu/~tkijewsk/professional/si.html em 18/06/2004). 15 p. PhD Proposal
35. KIM, Young-Moon; YOU, Ki-Pyo. *Dynamic responses of a tapered tall building to wind loads*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 2002. v.90, p.1771-1782.
36. KOBORI, T.; TSUJIMOTO, T.; KONDO, K. *Wind Resistant Design of a High-rise Building with Stepped Height*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992. v.41-44, p.1039-1040.

37. KWOK, K.C.S. *Effect of Building Shape on Wind-Induced Response of Tall Buildings*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1988. v.28, p.381-390.
38. LI, Q.S. et al. *Full scale measurements of wind effects on tall buildings*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1998. v.74-76, p.741-750.
39. LIANG, Shuguo et al. *Mathematical model of acrosswind dynamic loads on rectangular tall buildings*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 2002. v.90, p.1757-1770.
40. LOREDO-SOUZA, A.M.; SCHETTINI, E.B.C.; PALUCH, M.J. **Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento**. 2004. Coleção Cadernos de Turbulência. Turbulência, v.4, p.137-163.
41. MARUKAWA, H. et al. *Experimental evaluation of aerodynamic damping of tall buildings*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1996. v.59, p.177-190.
42. MATSUMOTO, T. *On the across-wind oscillation of tall buildings*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1986. v.24, p.69-85.
43. 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: Elsevier Science Publishers, 1980 v.6, p.73-88.
44. MIGUEL, Leandro Fleck Fadel. **Estudo Teórico e Experimental de um Edifício Alto Submetido à Ação Dinâmica do Vento**. Porto Alegre, 2003. 139p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
45. NÚÑEZ, Gustavo Javier Zani. **Determinação Experimental e Teórica da Resposta Transversal à Ação do Vento de uma Torre de Telecomunicações de Concreto Armado**. Porto Alegre, 2001. 119p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
46. OLIVEIRA, Mario Gustavo Klaus. **Desenvolvimentos de um Suporte Flexível para Ensaios de Modelos Aeroelásticos em Túnel de Vento**. Porto Alegre, 2003. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
47. OOSTERHOUT, Geert P.C. van. *The wind-induced dynamic response of tall buildings, a comparative study*. **Journal of Fluids and Structures**. Cambridge: Academic Press, 1996. v.64, p.135-144.

48. OUDHEUSDEN, B.W. van. *Aerodynamic stiffnes and damping effects in the rotational galloping of a rectangular cross-section*. **Journal of Fluids and Structures**. Cambridge: Academic Press, 2000. v.14, p.1119-1144.
49. PATERSON, D.A.; PAPENFUSS, A.T. *Computation of Wind Flows Around Two Tall Buildings*. **Journal of Fluids and Structures**. Cambridge: Academic Press, 1993. v.50, p.69-74.
50. RIERA, Jorge Daniel. **Introdução à Análise de Vibrações em Estruturas**. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 1996. 123 p. Notas de aula.
51. RIERA, Jorge Daniel. **On the lateral dynamic response of structures subjected to turbulent wind action**. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 1981. 30 p. Caderno Técnico CT-29/81.
52. * RIERA, Jorge Daniel. (informação passada pessoalmente), 2003.
53. SCHLICHTING, Herman. **Boudary-Layer Theory**. 7.ed. USA: McGraw-Hill, Inc, 1979. 817 p.
54. SNAEBJORNSSON, Jonas Thor; REED, D.A. *Full-scale Results of Wind-Induced Motion in Multi-Story Buildings..* **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992. v.41-44, p.1113-1123.
55. SPARKS, P.R.; MIRTAHERI, M. *The influence of structural performance on the distribution of wind loads on buildings..* **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1983. v.13, p.229-240.
56. SPARLING, B.F. **Structural Engineering Systems Design**. [S.l.:s.n.], 1997. CE 461 - Wind Loads, p.38-46.
57. SUPPLEMENT TO THE NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA – NBC. National Research Council of Canada, Associate Committee on the National Building Code, Ottawa, 1985, NRCC No.23178.
58. TENNEKES, H; LUMLEY, J.L. **A First Course in Turbulence**. 6.ed. USA: Halliday Lithograph Corporation, 1980. 300 p.
59. 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: Elsevier Science Publishers, 1983. v.14, p.357-368.
60. TANIIKE, Yoshihito.; INAOKA, Hideki. *Aeroelastic behavior of tall buildings in wakes*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1988. v.28, p.317-327.
61. THEPMONGKORN, S.; KWOK, K.C.S. *Wind-induced responses of tall buildings experiencing complex motion*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 2002. v.90, p.515-526.

62. 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: Elsevier Science Publishers, 1999. v.83, p.171-181.
63. THEPMONGKORN, S.; WOOD, G.S.; KWOK, K.C.S. *Interference effects on wind-induced coupled motion of a tall building*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 2002. v.90, p.1807-1815.
64. THORODDSEN, S.T.; PETERKA, J.A.; CERMAK, J.E.. *Correlation of Components of Wind loading on Tall Buildings*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1988. v.28, p.351-360.
65. TSUKAGOSHI, H. et al. *Response analyses on along-wind and across-wind vibrations of tall buildings in time domain*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1993. v.46 & 47, p.497-506.
66. XU, Y.L. et al. *Pseudo-excitation method for vibration analysis of wind-excited structures*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1999. v.83, p.443-454.
67. YIP, D.Y.N.; FLAY, R.G.J. *A new force balance data analysis method for wind response predictions of tall buildings*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1995. v.54-55, p.457-471.
68. ZHANG, W.J.; XU, Y.L.; KWOK, K.C.S. *Torsional vibration and stability of wind-excited tall buildings with eccentricity*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1993. v.50, p.299-308.
69. ZHANG, W.J.; XU, Y.L.; KWOK, K.C.S. *Aeroelastic torsional behaviour of tall buildings in wake*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1994. v.51, p.229-248.
70. ZHANG, W.J. ; XU, Y.L; KWOK, K.C.S.. *Interference effects on eroelastic torsional response of structurally assymmetric tall buildings*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1995. v.57, p.41-61.
71. ZHOU, Yin; KAREEM, Ahsan. *Aeroelastic Balance*. **Journal of Engineering Mechanics**. USA: ASCE, 2003. v.129, p.283-292.
72. ZHOU, Yin; KIJEWski, Tracy; KAREEM, Ahsan. *Along-Wind Load Effects on Tall Buildings: Comparative Sudy of Major International Codes and Standards*. **Journal of Structural Engineering**. USA: ASCE, 2002. v.128, p.788-796.

ANEXO I -Cálculo da Resposta Longitudinal pela NBR-6123

- velocidade do vento = 23,67 m/s
- $b = 0,86$
- $F_H = 2884513,5$
- $q_0 = 128,67 \text{ N/m}^2$
- $p = 0,19$
- $\Delta_{topo}(m) = 0,0470 \text{ m}$

i	Z _i (m)	A _i (m ²)	A _i / A ₀	x _i	C _a	β _i	β _i · x _i	m _i (kg)	ψ _i	ψ _i · x _i ²	X* _i (N)	M _{base} (N.m)
1	5	225	0,028	0,03	1,45	0,035	0,000981	1080000	0,0278	2,143E-05	2225,6	5564,1
2	10	225	0,028	0,06	1,45	0,040	0,002238	1080000	0,0278	8,573E-05	4451,3	33384,6
3	15	225	0,028	0,08	1,45	0,044	0,003625	1080000	0,0278	1,929E-04	6676,9	83461,6
4	20	225	0,028	0,11	1,45	0,046	0,005105	1080000	0,0278	3,429E-04	8902,6	155795,0
5	25	225	0,028	0,14	1,45	0,048	0,006658	1080000	0,0278	5,358E-04	11128,2	250384,8
6	30	225	0,028	0,17	1,45	0,050	0,008271	1080000	0,0278	7,716E-04	13353,9	367231,0
7	35	225	0,028	0,19	1,45	0,051	0,009936	1080000	0,0278	1,050E-03	15579,5	506333,7
8	40	225	0,028	0,22	1,45	0,052	0,011647	1080000	0,0278	1,372E-03	17805,1	667692,8
9	45	225	0,028	0,25	1,45	0,054	0,013400	1080000	0,0278	1,736E-03	20030,8	851308,3
10	50	225	0,028	0,28	1,45	0,055	0,015190	1080000	0,0278	2,143E-03	22256,4	1057180,2
11	55	225	0,028	0,31	1,45	0,056	0,017014	1080000	0,0278	2,593E-03	24482,1	1285308,6
12	60	225	0,028	0,33	1,45	0,057	0,018870	1080000	0,0278	3,086E-03	26707,7	1535693,3
13	65	225	0,028	0,36	1,45	0,057	0,020756	1080000	0,0278	3,622E-03	28933,4	1808334,5
14	70	225	0,028	0,39	1,45	0,058	0,022670	1080000	0,0278	4,201E-03	31159,0	2103232,2
15	75	225	0,028	0,42	1,45	0,059	0,024610	1080000	0,0278	4,822E-03	33384,6	2420386,2
16	80	225	0,028	0,44	1,45	0,060	0,026574	1080000	0,0278	5,487E-03	35610,3	2759796,7
17	85	225	0,028	0,47	1,45	0,060	0,028562	1080000	0,0278	6,194E-03	37835,9	3121463,6
18	90	225	0,028	0,50	1,45	0,061	0,030572	1080000	0,0278	6,944E-03	40061,6	3505387,0
19	95	225	0,028	0,53	1,45	0,062	0,032604	1080000	0,0278	7,737E-03	42287,2	3911566,7
20	100	225	0,028	0,56	1,45	0,062	0,034656	1080000	0,0278	8,573E-03	44512,9	4340002,9
21	105	225	0,028	0,58	1,45	0,063	0,036728	1080000	0,0278	9,452E-03	46738,5	4790695,5
22	110	225	0,028	0,61	1,45	0,064	0,038818	1080000	0,0278	1,037E-02	48964,1	5263644,6
23	115	225	0,028	0,64	1,45	0,064	0,040927	1080000	0,0278	1,134E-02	51189,8	5758850,0
24	120	225	0,028	0,67	1,45	0,065	0,043053	1080000	0,0278	1,234E-02	53415,4	6276311,9
25	125	225	0,028	0,69	1,45	0,065	0,045196	1080000	0,0278	1,340E-02	55641,1	6816030,2
26	130	225	0,028	0,72	1,45	0,066	0,047356	1080000	0,0278	1,449E-02	57866,7	7378004,9
27	135	225	0,028	0,75	1,45	0,066	0,049531	1080000	0,0278	1,562E-02	60092,3	7962236,1
28	140	225	0,028	0,78	1,45	0,067	0,051722	1080000	0,0278	1,680E-02	62318,0	8568723,7
29	145	225	0,028	0,81	1,45	0,067	0,053927	1080000	0,0278	1,802E-02	64543,6	9197467,7
30	150	225	0,028	0,83	1,45	0,067	0,056147	1080000	0,0278	1,929E-02	66769,3	9848468,1
31	155	225	0,028	0,86	1,45	0,068	0,058382	1080000	0,0278	2,060E-02	68994,9	10521725,0
32	160	225	0,028	0,89	1,45	0,068	0,060629	1080000	0,0278	2,195E-02	71220,6	11217238,3
33	165	225	0,028	0,92	1,45	0,069	0,062891	1080000	0,0278	2,334E-02	73446,2	11935008,0
34	170	225	0,028	0,94	1,45	0,069	0,065165	1080000	0,0278	2,478E-02	75671,8	12675034,1
35	175	225	0,028	0,97	1,45	0,069	0,067452	1080000	0,0278	2,625E-02	77897,5	13437316,7
36	180	225	0,028	1,00	1,45	0,070	0,069752	1080000	0,0278	2,778E-02	80123,1	14221855,7
Σ		8100					1,18162	38880000		0,34733	1482278	176638118

ANEXO II -Cálculo da Resposta Longitudinal pelo NBCC/85

- velocidade do vento = 23,67 m/s
- $p = 0,19$
- $\Delta_{\text{topo}}(m) = 0,0671 m$

i	Z _i (m)	V (m/s)	A _i (m ²)	C _a	q ₀ (N/m ²)	F _{média} (N)	C _g	F _{total} (N)	F _{dinâmica} (N)	M _{base din} (N.m)
1	5	11,98	225	1,45	93,307	30441,5	1,774	54003,3	23561,9	58904,7
2	10	13,67	225	1,45	121,424	39614,7	1,774	70276,8	30662,1	229965,4
3	15	14,76	225	1,45	141,651	46213,8	1,774	81983,5	35769,8	447122,0
4	20	15,59	225	1,45	158,015	51552,3	1,774	91454,1	39901,8	698281,9
5	25	16,27	225	1,45	171,998	56114,4	1,774	99547,2	43432,9	977239,6
6	30	16,84	225	1,45	184,337	60139,9	1,774	106688,6	46548,7	1280088,8
7	35	17,34	225	1,45	195,457	63768,0	1,774	113124,8	49356,8	1604096,7
8	40	17,79	225	1,45	205,631	67087,2	1,774	119013,1	51925,9	1947221,7
9	45	18,19	225	1,45	215,044	70158,1	1,774	124460,8	54302,8	2307868,2
10	50	18,56	225	1,45	223,828	73024,0	1,774	129545,0	56521,0	2684748,1
11	55	18,90	225	1,45	232,083	75717,2	1,774	134322,8	58605,6	3076794,2
12	60	19,21	225	1,45	239,885	78262,6	1,774	138838,4	60575,8	3483105,6
13	65	19,51	225	1,45	247,294	80679,6	1,774	143126,2	62446,5	3902909,0
14	70	19,78	225	1,45	254,357	82983,9	1,774	147214,0	64230,1	4335531,6
15	75	20,04	225	1,45	261,114	85188,3	1,774	151124,6	65936,3	4780382,1
16	80	20,29	225	1,45	267,597	87303,4	1,774	154876,7	67573,4	5236935,5
17	85	20,53	225	1,45	273,833	89338,0	1,774	158486,1	69148,1	5704721,8
18	90	20,75	225	1,45	279,846	91299,6	1,774	161966,1	70666,5	6183317,3
19	95	20,96	225	1,45	285,655	93194,8	1,774	165328,2	72133,4	6672337,9
20	100	21,17	225	1,45	291,277	95029,1	1,774	168582,3	73553,2	7171433,0
21	105	21,37	225	1,45	296,728	96807,4	1,774	171737,0	74929,6	7680281,3
22	110	21,56	225	1,45	302,020	98534,0	1,774	174799,9	76265,9	8198587,0
23	115	21,74	225	1,45	307,165	100212,5	1,774	177777,7	77565,1	8726076,8
24	120	21,91	225	1,45	312,173	101846,4	1,774	180676,2	78829,8	9262496,7
25	125	22,09	225	1,45	317,053	103438,6	1,774	183500,7	80062,1	9807610,7
26	130	22,25	225	1,45	321,814	104991,8	1,774	186256,1	81264,3	10361198,3
27	135	22,41	225	1,45	326,462	106508,4	1,774	188946,5	82438,1	10923052,9
28	140	22,57	225	1,45	331,005	107990,5	1,774	191575,8	83585,3	11492980,7
29	145	22,72	225	1,45	335,449	109440,2	1,774	194147,5	84707,4	12070799,4
30	150	22,86	225	1,45	339,798	110859,1	1,774	196664,8	85805,7	12656336,9
31	155	23,01	225	1,45	344,059	112249,1	1,774	199130,6	86881,5	13249430,6
32	160	23,15	225	1,45	348,235	113611,5	1,774	201547,6	87936,0	13849926,8
33	165	23,28	225	1,45	352,330	114947,8	1,774	203918,2	88970,3	14457679,4
34	170	23,41	225	1,45	356,350	116259,2	1,774	206244,6	89985,4	15072549,8
35	175	23,54	225	1,45	360,297	117546,9	1,774	208529,0	90982,1	15694406,1
36	180	23,67	225	1,45	364,175	118812,0	1,774	210773,3	91961,3	16323122,4
Σ			8100			3151166		5590188	2439022	252609541