

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC

Uma comparação de métodos para avaliar a resposta dinâmica de
edifícios altos em túnel de vento

Fernando Cesar Sartori

Porto Alegre
2010

Fernando Cesar Sartori

**UMA COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA AVALIAR A
RESPOSTA DINÂMICA DE EDIFÍCIOS ALTOS EM TÚNEL
DE VENTO**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ENGENHARIA

Porto Alegre

2010

S251u Sartori, Fernando Cesar
Uma comparação de métodos para avaliar a resposta dinâmica de edifícios altos em túnel de vento / Fernando Cesar Sartori. – 2010.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2010.

Orientação: Prof. Dr. Marcelo Maia Rocha
Prof. Dr. Acir Mércio Loredo-Souza

1. Túnel de vento. 2. Edifícios altos. 3. Vento – Estruturas. I. Rocha, Marcelo Maia, orient. II. Loredo-Souza, Acir Mércio, orient. III. Título.

CDU-624.042.4(043)

FERNANDO CESAR SARTORI

**UMA COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA AVALIAR A
RESPOSTA DINÂMICA DE EDIFÍCIOS ALTOS EM TÚNEL
DE VENTO**

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

Porto Alegre, 22 de outubro de 2010.

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

Prof. Acir Mércio Loredou-Souza
Ph.D., University of Western Ontario, Canada
Orientador

Prof. Luis Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a. Ângela Borges Masuero (UFRGS)
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Herbert Martins Gomes (UFRGS)
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. José Luis Vital de Brito (UNB)
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a elaboração deste trabalho.

Aos meus pais pelo incentivo constante.

Aos professores orientadores Prof. Marcelo Maia Rocha e Prof. Acir Mércio Loredo-Souza pela paciência, dedicação e estímulo prestados durante a realização deste trabalho. Um agradecimento especial ao Prof. Marcelo pelos valiosos esclarecimentos e pelo direcionamento indispensável ao desenvolvimento do trabalho.

À equipe técnica do Laboratório de Aerodinâmica das Construções, Paulo Francisco Bueno, Mário Gustavo Klaus Oliveira, Gustavo Javier Zani Núñez, Guilherme Martins Siqueira e Maria Cristina Dolz Bênia, pela atenção oferecida e esclarecimento de dúvidas.

Aos amigos e colegas da empresa Carpeggiani Projetos Estruturais, em especial ao Eng. Elvis Antônio Carpeggiani, pelas valiosas dicas e orientações.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelos ensinamentos e aos funcionários da secretaria do PPGEC pela boa vontade e atenção.

À CAPES, pela bolsa de estudos concedida durante cinco meses.

RESUMO

SARTORI, F.C. **Uma comparação de métodos para avaliar a resposta dinâmica de edifícios altos em túnel de vento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2010.

Atualmente, o cenário econômico mundial compreende a exploração cada vez mais intensa dos espaços urbanos, através de edificações que buscam maximizar a relação entre área construída e área disponível. Estas edificações, mais flexíveis e mais altas, dependem de avanços no uso de sistemas estruturais inovadores e materiais de elevada resistência com massa reduzida. Como consequência, a sensibilidade à ação dinâmica do vento aumentou. Estruturas esbeltas e flexíveis possuem frequências naturais de vibração livre mais baixas, o que as faz mais suscetíveis a vibrações induzidas pela turbulência atmosférica e pelo desprendimento de vórtices alternados. Essas vibrações têm o potencial de reduzir a segurança estrutural e causar desconforto aos usuários da edificação. A previsão da resposta induzida pela ação dinâmica do vento por métodos analíticos é complexa e de difícil resolução, principalmente para os efeitos transversais no sentido da velocidade média do vento. Em contrapartida, o uso de técnicas experimentais, através de ensaios em túnel de vento com modelos reduzidos, tem se mostrado bastante eficiente em termos de previsão de resultados. Neste contexto, este trabalho apresenta uma investigação numérica e experimental das parcelas estática e flutuante, da resposta nas direções longitudinal e transversal, dos efeitos da ação do vento sobre edifícios altos. O estudo experimental apresenta uma comparação de duas técnicas utilizadas no Túnel de Vento *Professor Joaquim Blessmann*, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com um modelo em escala reduzida do *CAARC Standard Tall Building*. O método experimental de Integração de Pressões em Alta Frequência (*HFPI – High Frequency Pressure Integration*), está baseado na medição simultânea de pressões dinâmicas no edifício, através de transdutores eletrônicos, e posteriormente na integração dessas pressões para chegar-se a forças dinâmicas que são utilizadas em conjunto com um modelo numérico. A outra técnica consiste no uso de uma base flexível para modelagem aeroelástica de edifícios, através da qual se medem deslocamentos no topo ou momentos fletores na base. Os resultados experimentais são comparados com os resultados teóricos provenientes de formulações analíticas. Utiliza-se a NBR-6123 (1988), Capítulo 9, para a estimativa da resposta dinâmica na direção longitudinal ao vento. Já para a estimativa da resposta na direção transversal ao vento, utilizam-se a metodologia desenvolvida por Liang et al. (2002, pp. 1757-1770), que apresenta um completo modelo analítico para cargas dinâmicas transversais ao vento, e o processo da norma brasileira NBR-6123 Capítulo 10, que considera no cálculo da amplitude à máxima resposta. Demonstra-se que as duas técnicas conduzem a resultados compatíveis para o modelo testado, ao mesmo tempo em que se discutem as respectivas vantagens ou limitações em outras aplicações.

Palavras-chave: *vento; edifícios altos; resposta dinâmica; túnel de vento; modelagem aeroelástica.*

ABSTRACT

SARTORI, F.C. **A comparison of methods for assessing the dynamic response of tall building in wind tunnel.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2010.

The world economic scenario is presently motivating intense urban land exploration, by means of building technologies that pursue maximizing the relation of built to available area. The buildings are far taller and more flexible than ever, relying on innovative structural systems and materials of improved resistance and reduced weight. As a predictable consequence, the sensitivity of such constructions to the dynamic wind loading has been increased. Such slender and more flexible structures present lower natural vibration frequencies, which makes them more prone to oscillate under atmospheric turbulence and alternate vortex shedding. These vibrations may have the capacity of reducing structural safety or causing discomfort to building users. The estimation of structural response induced by dynamic wind loading through analytical methods is quite complex and unreliable, mainly in respect to across-wind effects. On the other hand, the use of experimental techniques with reduced models tested in wind tunnels has proved to be very accurate and efficient. Within this context, this work presents numerical and experimental investigations of both static (mean) and dynamic (fluctuating) responses for wind loading on tall buildings for both along- and across-wind directions. It is an experimental study consisting of a comparison of two techniques presently used at the Boundary Layer Wind Tunnel "*Professor Joaquim Blessmann*" at the Federal University of Rio Grande do Sul with the benchmark model *CAARC Standard Tall Building*. The *HFPI (High Frequency Pressure Integration)* technique consists in simultaneously measuring the wind induced dynamic pressures at a stiff model surface, with electronic transducers, and integrating these pressures to yield the dynamic wind forces to be used along with a numerical model. The another technique makes use of a flexible base that along with a stiff model compose an aeroelastic model for the building allowing displacements and accelerations of the top and moments of the base to be measured. Experimental results are also compared with theoretical results of analytical procedure. Along-wind response is estimated according to the Brazilian Code NBR-6123 (1988), Chapter 9. The cross-wind response is estimated with the Liang et al. (2002, pp. 1757-1770) model, that it presents a complete analytical model for cross-wind dynamic loads, and the procedure of the Brazilian Code NBR-6123, Chapter 10, which considers to the calculation of the amplitude of the maximum response. It is finally shown that the two experimental techniques conduce to compatible results for the model tested, while advantages and limitations in other applications are also discussed.

Keywords: *wind; tall buildings; dynamic response; wind tunnel; aeroelastic modeling.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE SÍMBOLOS	16
1 INTRODUÇÃO	26
1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	26
1.2 OBJETIVOS	29
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	30
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 RESPOSTA DINÂMICA DO VENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS	31
2.1.1 Resposta na direção longitudinal ao vento	33
2.1.2 Resposta na direção transversal ao vento	33
2.1.3 Resposta torcional	34
2.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO	35
2.2.1 Generalidades	36
2.3 ANÁLISE DIMENSIONAL	37
2.3.1 Introdução	38
2.3.2 Matriz dimensional	40
2.3.3 Mudança de base	42
2.3.4 Mudança de base utilizando planilha em computador	43
2.3.5 Mudança de escala e projeto de modelos reduzidos	44
2.4 MODELO CAARC DE EDIFÍCIO ALTO	44
2.4.1 Geometria do edifício	45
2.4.2 Propriedades dinâmicas	46
2.5 MÉTODO TEÓRICO-NUMÉRICO DA NBR-6123 (1988) PARA RESPOSTA LONGITUDINAL	47
2.5.1 Considerações gerais	48
2.5.2 Velocidade de projeto	49
2.5.3 Características dinâmicas da estrutura	50

2.5.4	Formulação matemática para o cálculo da resposta dinâmica na direção do vento.....	52
2.5.5	Aplicação ao <i>CAARC</i>	55
2.6	MÉTODOS TEÓRICO-NUMÉRICO PARA RESPOSTA TRANSVERSAL.....	60
2.6.1	Processo da norma brasileira NBR-6123 capítulo 10.....	60
2.6.2	Modelo matemático de Liang et al. (2002) para cargas dinâmicas transversais ao vento em edifícios altos retangulares.....	64
2.6.3	Aplicação ao <i>CAARC</i>	67
2.7	EXEMPLO DA DISPERSÃO DE RESULTADOS PARA SEÇÃO CIRCULAR ATRAVÉS DE DIFERENTES MÉTODOS.....	74
2.7.1	Processo da norma brasileira NBR-6123 capítulo 10.....	74
2.7.2	Norma canadense NBC-1985.....	75
2.7.3	Modelo simplificado de Vickery e Basu (1983).....	76
2.8	TRABALHOS ANTERIORES.....	79
3	TÉCNICAS EXPERIMENTAIS EM TÚNEL DE VENTO.....	81
3.1	TÚNEL DE VENTO <i>PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN</i>	81
3.2	VENTO SIMULADO.....	84
3.3	A TÉCNICA DE INTEGRAÇÃO DE PRESSÕES EM ALTA FREQUÊNCIA.....	86
3.3.1	Modelo construído.....	91
3.4	A TÉCNICA DE MODELAGEM AEROELÁSTICA COM BASE FLEXÍVEL.....	92
3.4.1	Escolha do material.....	92
3.4.2	Escala adotada.....	93
3.4.3	Dimensionamento do suporte.....	95
3.4.4	Verificação das propriedades do suporte.....	99
3.4.5	Construção da base flexível.....	108
3.4.6	Modelo construído.....	109
3.4.7	Adequação dos fatores de escala adotados.....	109
3.5	A TÉCNICA DE BALANÇA DE FORÇAS EM ALTA FREQUÊNCIA.....	112

4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	113
4.1	MEDIÇÃO DE PRESSÕES DINÂMICAS EM MODELO RÍGIDO .	113
4.1.1	Resposta na direção longitudinal ao vento	114
4.1.2	Resposta na direção transversal ao vento	115
4.2	MEDIÇÃO EM MODELO COM BASE FLEXÍVEL	117
4.2.1	Resposta na direção longitudinal ao vento	122
4.2.2	Resposta na direção transversal ao vento	122
5	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS	124
5.1	RESPOSTA NA DIREÇÃO LONGITUDINAL AO VENTO	124
5.2	RESPOSTA NA DIREÇÃO TRANSVERSAL AO VENTO.....	127
6	COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES	131
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	134
	REFERÊNCIAS	135
	APÊNDICES	139
	APÊNDICE A – Planilhas de cálculo da resposta dinâmica na direção longitudinal ao vento obtidas através do cálculo pelo método simplificado de acordo com a NBR-6123 (1988, p. 35).....	140
	APÊNDICE B – Planilhas de cálculo da resposta dinâmica na direção longitudinal ao vento obtidas através do cálculo método discreto de acordo com a NBR-6123 (1988, p. 36).....	143
	APÊNDICE C – Planilhas de cálculo da resposta dinâmica na direção longitudinal ao vento obtidas através dos métodos de cálculo de acordo com a NBR-6123 (1988, pp. 35-41), considerando valores dos coeficientes de arrasto coletados nos ensaios em túnel de vento.....	148
	APÊNDICE D – Comparativo das respostas na direção longitudinal ao vento obtidas através do cálculo por métodos teóricos e através dos ensaios em túnel de vento	151
	APÊNDICE E – Planilhas de cálculo da resposta dinâmica na direção transversal ao vento obtidas através do processo da norma brasileira NBR-6123 capítulo 10.....	154
	APÊNDICE F – Planilhas de cálculo da resposta dinâmica na direção transversal ao vento, apresentando a dispersão de resultados para seção circular através de diferentes métodos de cálculo.....	159

ANEXOS.....	163
ANEXO A – Figuras representativas da formulação matemática para o cálculo da resposta dinâmica na direção longitudinal ao vento de acordo com a NBR-6123 (1988).....	164

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Sistema massa-mola com 1 grau de liberdade em vibração livre, (Rocha, 2008, p. 2).....	38
Figura 2.2: <i>CAARC Standard Tall Building</i>	45
Figura 2.3: Prisma retangular utilizado na determinação de momentos de inércia de massa ..	46
Figura 2.4: Mapa com as velocidades de referência do vento em [m/s], sobre rajada de 3s, a 10m sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano, NBR-6123 (1988, p. 6)...	48
Figura 2.5: Esquema para modelo dinâmico discreto, NBR-6123 (1988, p. 35)	51
Figura 2.6: Vista lateral e planta baixa do <i>CAARC</i> e as duas direções de incidência do vento no modelo durante os ensaios	55
Figura 2.7: Comparação do espectro da força transversal ao vento entre equação proposta e resultados experimentais, Liang et al. (2002, p. 1763).....	65
Figura 2.8: Comparação do espectro da força transversal ao vento para o <i>CAARC</i> entre resultados via programa em MATLAB (curvas na cor azul) e através dos resultados experimentais de Liang et al. (2002, pp. 1757-1770) (curvas na cor preta).....	72
Figura 2.9: Exemplificação para o <i>CAARC</i> dos espectros das forças e deslocamentos modais (gráfico superior e inferior, respectivamente) e função de admitância mecânica (gráfico intermediário).....	73
Figura 3.1: Túnel de Vento <i>Prof. Joaquim Blessmann</i>	81
Figura 3.2: Circuito aerodinâmico do Túnel de Vento <i>Prof. Joaquim Blessmann</i>	83
Figura 3.3: Blocos disseminados no piso e gaveta colocada no início da câmara de ensaios do túnel de vento para representação do vento natural.....	85
Figura 3.4: Características do vento simulado, sendo respectivamente: perfil vertical de velocidades, intensidade da componente longitudinal da turbulência e macroescala da componente longitudinal da turbulência	86
Figura 3.5: Sistema eletrônico de medição dinâmica de pressões do LAC/UFRGS.....	87
Figura 3.6: Referências para conversão de um registro de pressão dinâmica em um registro de parcelas de componentes horizontais de força F_x e F_y e de momento torçor M_z para uma seção transversal de edificação	88
Figura 3.7: Exemplo de registros de deslocamentos das direções horizontais ortogonais x e y e da rotação em torno do eixo vertical z obtidos a partir da integração de pressões e do cálculo da resposta dinâmica no topo do modelo <i>CAARC</i>	90
Figura 3.8: Distribuição das tomadas de pressão no <i>CAARC</i>	92
Figura 3.9: Geometria do suporte com identificação das variáveis.....	95
Figura 3.10: Divisão da placa em trechos para cálculo do momento de inércia	96
Figura 3.11: Distribuição dos momentos devido aos efeitos dos carregamentos.....	97
Figura 3.12: Representação da distribuição de momentos e de momentos de inércia ao longo do eixo x da placa.....	98

Figura 3.13: Análise do deslocamento, rotação e esforço, ao longo do eixo x da placa	99
Figura 3.14: Calibração das amplitudes de deslocamento a partir dos sinais gerados pelas pontes extensométricas através do uso de um feixe laser	100
Figura 3.15: Esquema de calibração através do uso de um feixe laser e a indicação das variáveis envolvidas na equação 3.12 para obter o ângulo de giro do modelo .	101
Figura 3.16: Detalhe da fixação no mecanismo de apoio com lâminas de teflon para minimizar o atrito, resultando na diminuição da rigidez rotacional	101
Figura 3.17: Verificação da rigidez rotacional para as possíveis combinações de vinculação	102
Figura 3.18: Esquema adotado para a determinação da rigidez rotacional via programa de análise estrutural <i>FTOOL</i>	102
Figura 3.19: Acréscimo de massa através de hastes de chumbo conforme lei de similaridade	103
Figura 3.20: Instalação e posicionamento dos acelerômetros no modelo <i>CAARC</i>	104
Figura 3.21: Instrumentação na base da célula de carga com extensômetros (lado superior)	105
Figura 3.22: Relação entre tempo do momento aplicado na direção do eixo x e ângulo de giro do modelo	106
Figura 3.23: Relação entre tempo do momento aplicado na direção do eixo y e ângulo de giro do modelo	106
Figura 3.24: Relação entre momento aplicado e ângulo de giro do modelo para os eixos x e y	107
Figura 3.25: Gráficos de densidade espectral para determinação das frequências.....	108
Figura 3.26: Nova técnica de base flexível: simples e eficiente.....	108
Figura 3.27: Esquema de confecção do modelo <i>CAARC</i> construído em MDF e fotografia do modelo <i>CAARC</i> já instalado sobre a base flexível	109
Figura 4.1: Modelo <i>CAARC</i> instrumentado com tomadas de pressão para fins de aplicação da técnica <i>HFPI</i>	113
Figura 4.2: Vista inferior do modelo, mostrando as mangueiras correspondentes às 280 tomadas de pressão	114
Figura 4.3: Dispositivos utilizados nos ensaios para simulação das características naturais do vento, juntamente com o modelo <i>CAARC</i> instalado sobre a base flexível.....	117
Figura 4.4: Materiais utilizados para aquisição de dados durante os ensaios da base flexível	118
Figura 4.5: Comparação do momento na base do protótipo entre os sinais oriundos dos acelerômetros e das pontes extensométricas para direção y (face maior)	119
Figura 4.6: Comparação do deslocamento no topo do protótipo entre os sinais oriundos dos acelerômetros e das pontes extensométricas para direção y (face maior)	120
Figura 4.7: Comparação do momento na base do protótipo entre os sinais oriundos dos acelerômetros e das pontes extensométricas para direção x (face menor)	121

Figura 4.8: Comparação do deslocamento no topo do protótipo entre os sinais oriundos dos acelerômetros e das pontes extensométricas para direção x (face menor)	121
Figura 5.1: Deslocamentos horizontais normalizados máximos no topo do protótipo na direção longitudinal ao vento para vento incidindo na direção y (face maior) ...	126
Figura 5.2: Deslocamentos horizontais normalizados máximos no topo do protótipo na direção longitudinal ao vento para vento incidindo na direção x (face menor)...	126
Figura 5.3: Deslocamentos horizontais normalizados máximos no topo do protótipo na direção transversal ao vento para vento incidindo na direção y (face maior)	129
Figura 5.4: Deslocamentos horizontais normalizados máximos no topo do protótipo na direção transversal ao vento para vento incidindo na direção x (face menor).....	130
Figura A.1: Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ , para terreno de categoria III, NBR-6123 (1988, p. 40).....	165
Figura A.2: Coeficiente de arrasto, C_a , para edificações paralelepípedicas em vento de baixa (figura superior) e alta (figura inferior) turbulência, NBR-6123 (1988, p. 20 e p. 24), respectivamente	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Matriz dimensional com grandezas usuais em análise dinâmica, (Rocha, 2008, p. 4).....	41
Tabela 2.2: Parâmetros para a determinação de efeitos dinâmicos, NBR-6123 (1988, p. 35).	51
Tabela 2.3: Expoente p e parâmetro b , NBR-6123 (1988, p. 36)	53
Tabela 2.4: Resposta na direção longitudinal ao vento obtida através do cálculo pelo método simplificado NBR-6123 (1988) com vento incidindo na direção y (face maior) ..	57
Tabela 2.5: Resposta na direção longitudinal ao vento obtida através do cálculo pelo método simplificado NBR-6123 (1988) com vento incidindo na direção x (face menor) .	58
Tabela 2.6: Resposta na direção longitudinal ao vento obtida através do cálculo pelo método discreto NBR-6123 (1988) com vento incidindo na direção y (face maior)	59
Tabela 2.7: Resposta na direção longitudinal ao vento obtida através do cálculo pelo método discreto NBR-6123 (1988) com vento incidindo na direção x (face menor).....	59
Tabela 2.8: Valores do parâmetro α , Liang et al. (2002, p. 1766)	67
Tabela 2.9: Resposta na direção transversal ao vento obtida através do cálculo pela metodologia de Liang et al. (2002) com vento incidindo na direção y (face maior)	73
Tabela 2.10: Resposta na direção transversal ao vento obtida através do cálculo pela metodologia de Liang et al. (2002) com vento incidindo na direção x (face menor)	74
Tabela 3.1: Planilha utilizada para determinação das escalas do modelo <i>CAARC</i>	94
Tabela 3.2: Valor para as rigidezes rotacionais obtidas via programa <i>FTOOL</i>	102
Tabela 3.3: Planilha adequada para determinação das escalas do modelo <i>CAARC</i>	111
Tabela 4.1: Resposta na direção longitudinal ao vento obtida através da técnica de integração de pressões em alta frequência com vento incidindo na direção y (face maior) .	115
Tabela 4.2: Resposta na direção longitudinal ao vento obtida através da técnica de integração de pressões em alta frequência com vento incidindo na direção x (face menor).	115
Tabela 4.3: Resposta na direção transversal ao vento obtida através da técnica de integração de pressões em alta frequência com vento incidindo na direção y (face maior) .	116
Tabela 4.4: Resposta na direção transversal ao vento obtida através da técnica de integração de pressões em alta frequência com vento incidindo na direção x (face menor).	116
Tabela 4.5: Resposta na direção longitudinal ao vento obtida através da técnica com base flexível com vento incidindo na direção y (face maior).....	122
Tabela 4.6: Resposta na direção longitudinal ao vento obtida através da técnica com base flexível com vento incidindo na direção x (face menor)	122
Tabela 4.7: Resposta na direção transversal ao vento obtida através da técnica com base flexível com vento incidindo na direção y (face maior).....	123
Tabela 4.8: Resposta na direção transversal ao vento obtida através da técnica com base flexível com vento incidindo na direção x (face menor)	123

Tabela 5.1: Comparativo das respostas finais na direção longitudinal ao vento obtidas através do cálculo por métodos teóricos e através dos ensaios em túnel de vento com vento incidindo na direção y (face maior)	124
Tabela 5.2: Comparativo das respostas finais na direção longitudinal ao vento obtidas através do cálculo por métodos teóricos e através dos ensaios em túnel de vento com vento incidindo na direção x (face menor)	125
Tabela 5.3: Comparativo das respostas finais na direção transversal ao vento obtidas através do cálculo por métodos teóricos e através dos ensaios em túnel de vento com vento incidindo na direção y (face maior)	127
Tabela 5.4: Comparativo das respostas finais na direção transversal ao vento obtidas através do cálculo por métodos teóricos e através dos ensaios em túnel de vento com vento incidindo na direção x (face menor)	128
Tabela D1: Comparativo das respostas na direção longitudinal ao vento obtidas através do cálculo por métodos teóricos e através dos ensaios em túnel de vento com vento incidindo na direção y (face maior)	152
Tabela D2: Comparativo das respostas na direção longitudinal ao vento obtidas através do cálculo por métodos teóricos e através dos ensaios em túnel de vento com vento incidindo na direção x (face menor)	153

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS:

A	Área
A	Coefficiente de partilha de potência (parâmetro na equação 2.44)
A	Comprimento do trecho de seção variável da base “estrela” referente ao eixo x
A_i	Área de influência correspondente à coordenada i
A_i	Área de influência da i -ésima tomada de pressão
A_0	Área arbitrária de referência
B	Parâmetro de largura do espectro, $B = 0,10 + 2I$
B	Largura da base “estrela”
B	Largura do tramo central da base “estrela” referente ao eixo y
B_x	Largura da base “estrela” para o braço referente ao eixo x
B_y	Largura da base “estrela” para o braço referente ao eixo y
C	Matriz de coeficientes de amortecimento
C	Comprimento do trecho de seção variável da base “estrela” referente ao eixo x
C_a	Coefficiente de arrasto, $C_a = F_a/qA$
C_{ai}	Coefficiente de arrasto para a coordenada i
C_k	Amortecimento modal
C_l	Coefficiente de força lateral
$\tilde{C}_l(d_0)$	Valor rms do coeficiente de força lateral, correspondente a cota d_0
C_R	Coefficiente de correlação longitudinal

C_1	Parâmetro correlacionado a largura de banda (equação 2.44)
C_1	Parâmetro correlacionado a esbeltez da estrutura (equação 2.62)
C_2	Parâmetro na equação 2.44, $C_2 = 2$
C_2	Parâmetro na equação 2.62, $C_2 = 0,6$
D	Diâmetro ou largura da estrutura
D	Largura do tramo central da base “estrela” referente ao eixo x
E	Módulo de elasticidade do material
F_a	Força de arrasto
F_{din}	Força dinâmica
F_{est}	Força estática
F_{flut}	Força flutuante
F_H	Força referente a força flutuante
F_H	Força lateral devido ao desprendimento de vórtices considerando a altura H
F_{ij}	Força total na direção da coordenada i , para o modo de vibração j
\bar{F}_i	Força média na direção da coordenada i
\hat{F}_{ij}	Força flutuante na direção da coordenada i , para o modo de vibração j
$(F_y^{(i)})_{rms}$	Força rms transversal ao vento no nível i
F_L	Força lateral devido ao desprendimento de vórtices que atua no terço superior da estrutura
$F(t)$	Força resultante no tempo t
F_r	Fator de rajada, sempre correspondendo a categoria II, conforme a NBR-6123
H	Altura da edificação

$H_k(f)$	Função de admitância mecânica
I	Momento de inércia
I_m	Momento de inércia de massa
I_{mx}	Momento de inércia de massa em relação ao eixo x
I_{my}	Momento de inércia de massa em relação ao eixo y
I_1	Intensidade da componente longitudinal da turbulência, $I_1 = \sigma_1/V$
K	Constante elástica da mola
K	Fator relacionado com o coeficiente da rugosidade superficial do terreno
K	Matriz de rigidez
K_K	Rigidez modal
K	Largura da edificação
L_i	Distância ortogonal do eixo de atuação da pressão na i -ésima tomada à origem do sistema de referência (centro de rigidez)
L_R	Comprimento de correlação da força lateral
L_x	Comprimento de haste da base “estrela” referente ao eixo x
L_y	Comprimento de haste da base “estrela” referente ao eixo y
M	Matriz de massa
M	Massa média por unidade de comprimento no terço superior da estrutura
M_0	Massa média por unidade de comprimento
M_k	Massa modal
M_{total}	Momento total na base da edificação
$M(x)$	Expressão para a distribuição de momentos na viga

$M_z(t)$	Momento torcional em torno do eixo vertical, produzido pelas pressões
N	Número de coordenadas discretizadas
P_{atm}	Pressão atmosférica no momento do ensaio
$\vec{P}(t)$	Vetor de forças externas
$P_k(t)$	Força externa modal
Re	Número de Reynolds
S	Área da seção transversal da estrutura
S	Superfície (zona) para a qual se deseja obter a resultante $F(t)$
S_F	Espectro da força
$S_{F_k}(f)$	Espectro da força modal
$S_{P_i P_j}(f)$	Espectro cruzado entre as parcelas flutuantes das forças nas zonas de integração i e j
$S_{P_k}(f)$	Espectro da resposta modal em força
St	Número de Strouhal
$S_{U_k}(f)$	Espectro da resposta modal em deslocamento
$S_V(f)$	Espectro da velocidade do vento
S_1	Fator topográfico
S_2	Fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação, e de sua altura sobre o terreno
S_3	Fator baseado em conceitos probabilísticos
T	Temperatura
T	Temperatura dentro do túnel de vento no momento do ensaio

T_1	Período fundamental, $T_1 = 1/f$
V	Velocidade média do vento
V	Velocidade média horária de referência
V	Velocidade média do vento no terço superior da estrutura
V_{cr}	Velocidade crítica do vento, $V_{cr} = f_n l_1 / St$
V_H	Velocidade média horária no topo da edificação
V_k	Velocidade característica do vento
V_0	Velocidade básica do vento
V_p	Velocidade de projeto
V_r	Velocidade reduzida ou adimensional, $V_r = V / (f_n l_1)$
V_{ref}	Velocidade média de referência do vento na altura z_{ref}
$V(z_i)$	Velocidade média do vento na altura do nível i
$V(z)$	Velocidade média do vento na altura z
Y_0	Amplitude da vibração na direção perpendicular à direção do vento

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS:

a	Dimensão linear
$a_i(t)$	Coeficiente modal para o modo i
b	Dimensão linear
b	Parâmetro de correção definido pela NBR-6123 para passagem de categoria
c	Dimensão linear

d	Comprimento medido (equação 3.12)
d_0	Diâmetro médio sobre o terço superior da estrutura
f	Frequência
f_1, f_2, \dots, f_n	Frequências correspondentes ao 1º, 2º, ... n , modos de vibração
f_i	Frequência natural correspondente ao modo de vibração i
f_k	Frequência modal
f_n	Frequência natural ou fundamental livre de vibração da estrutura
f_s	Frequência de desprendimento de um par de vórtices (frequência de Strouhal)
\bar{f}	Relação de frequências, $\bar{f} = f/f_s$
g	Fator de pico
g_u	Fator de pico do deslocamento modal
h	Altura da edificação, modelo ou protótipo
h_i	Altura reduzida do nível i da estrutura
i	Coordenada
j	Modo de vibração da estrutura
k	Rigidez
k_0	Coefficiente do túnel de vento que vincula q e Δp_a
k_θ	Rigidez rotacional em torno do eixo considerado
k_{θ_x}	Rigidez rotacional em relação ao eixo x
k_{θ_y}	Rigidez rotacional em relação ao eixo y
l	Comprimento de correlação em número de diâmetros

l_1	Largura ou diâmetro da edificação
l_1	Comprimento da face transversal à direção do vento
l_2	Comprimento da face paralela à direção do vento
m	Massa
m_i	Massa discreta referente a coordenada i
m_0	Massa arbitrária de referência
m_0	Massa equivalente por unidade de altura
n	Número de graus de liberdade
n	Zonas de integração de pressões
n	Número de tomadas presentes na zona de integração
p	Expoente da curva de potência teórica ajustada ao perfil de velocidades médias
p_d	Pressão dinâmica (equação 2.56)
$\vec{p}(t)$	Pressão local no tempo t
$\vec{p}_i(t)$	Pressão medida na i -ésima tomada no tempo t
q	Pressão dinâmica ao longe, $q = (1/2)\rho V^2$
q	Pressão dinâmica de projeto
q_H	Pressão dinâmica correspondente a V_H
q_{cr}	Pressão dinâmica de cálculo, $q_{cr} = 0,613(V_{cr})^2$
$\vec{q}_k(t)$	Vetores de forma modal (autovetores)
\bar{q}_p	Pressão dinâmica de projeto

\bar{q}_0	Pressão dinâmica de projeto
$q_y(z)$	Força equivalente lateral por unidade de comprimento perpendicular a direção do vento, devido ao desprendimento de vórtices
r_{ij}	Função de coerência
rms	Termo em inglês <i>root mean square</i> (valor quadrático médio)
u	Deslocamento
\vec{u}_F	Cossenos diretores da direção em que se deseja obter a resultante $F(t)$
$u_k(t)$	Função escalar do tempo denominada “resposta modal”
u_{pico}	Deslocamento de pico
$u_{k,\text{pico}}$	Deslocamento modal de pico
$\vec{u}(t)$	Vetor de deslocamento generalizado
$\dot{\vec{u}}(t)$	Vetor de velocidade generalizada
$\ddot{\vec{u}}(t)$	Vetor de aceleração generalizada
$u_{\text{topo},\text{max}}$	Deslocamento máximo no topo da estrutura
v	Velocidade
x	Forma modal
x_i	Deslocamento correspondente a coordenada i
y_1	Forma modal (equação 2.35)
$y(z, t)$	Deslocamento transversal na cota z , no instante de tempo t
z	Cota no ponto de interesse acima do terreno
z_i	Altura do elemento i sobre o nível do terreno
z_j	Altura o elemento j sobre o nível do terreno

z_r Altura de referência, $z_r = 10m$

z_{ref} Cota de referência

LETRAS GREGAS MAIÚSCULAS:

Δp_a Pressão de referência (diferença de pressão entre os anéis piezométricos)

Δz Diferença de altura entre dois níveis considerados da estrutura

LETRAS GREGAS MINÚSCULAS:

α Parâmetro na equação 2.47

α_1 Parâmetro na equação 2.46

α_2 Parâmetro na equação 2.46

φ Ângulo de rotação

$\varphi(z)$ Forma modal

$\varphi_i(z)$ Forma modal correspondente ao modo de vibração i

β_k Razão de frequência ressonante

λ Esbeltez da estrutura

γ Expoente da forma modal que depende do tipo de estrutura

σ Desvio padrão do deslocamento modal

σ Força transversal ao vento para a altura z , $\sigma = \frac{1}{2}\rho V^2(z)\bar{C}_1 l_1$

σ_{U_k} Variância da resposta estrutural

$\sigma_y^2(z)$ Variância da resposta ao longo da cota z

σ_{yi}^2 Variância da resposta modal para o modo i

σ_1	Desvio padrão da componente longitudinal da velocidade
ρ	Massa específica do ar
ξ	Coefficiente de amplificação dinâmica
ζ	Razão de amortecimento estrutural crítico
ζ_{aer}	Amortecimento aerodinâmico
ζ_{ef}	Razão de amortecimento efetivo, $\zeta_{\text{ef}} = \zeta + \zeta_{\text{aer}}$
ζ_k	Razão de amortecimento estrutural crítico (equação 2.53)
$\psi(B, V/V_{\text{cr}})$	Parâmetro considera que o gradiente de velocidades e de frequências de desprendimento de vórtices no terço superior da estrutura, seja nulo
ψ_i	Razão entre as massas m_i e m_0

1 INTRODUÇÃO

Será abordada neste capítulo introdutório uma síntese histórica da grande relevância dos efeitos dinâmicos da ação do vento em estruturas. Os principais objetivos e a estrutura organizacional deste trabalho de dissertação também estão relacionados neste capítulo inicial.

1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

De acordo com Loredou-Souza (2007, p. 64), existem diversas razões para uma abordagem mais racional e refinada da interação do vento com o ser humano e seu ambiente, e isto inclui sua ação e efeitos sobre as edificações. Sob a ótica da engenharia civil, o desenvolvimento de novas formas arquitetônicas e sistemas estruturais, bem como a introdução de uma ampla gama de novos materiais na construção civil e a formulação de recentes metodologias de análise, criaram a demanda para uma descrição mais exata do carregamento devido ao vento. Este fato tem oportunizado o projeto e a construção de edificações não somente mais seguras, como também muito mais otimizadas do ponto de vista econômico.

Considerando em particular o desenvolvimento da engenharia do vento em termos dos contextos intelectuais e sócio econômicos no tempo, pode-se considerar a história desta disciplina em cinco períodos bastante arbitrários. O período tradicional (até 1750), o período empírico (1750-1900), o período de estabelecimento (1900-1960), o período de crescimento (1960-1980), e o período moderno (1980 em diante), Baker (2007, p. 843). Esta síntese histórica do desenvolvimento da engenharia do vento nos conduz para uma descrição do estado atual da disciplina e um olhar à frente para possíveis desenvolvimentos, novamente levando em consideração as prováveis mudanças sócio econômicas e intelectuais nas próximas décadas.

A consideração da ação do vento em estruturas de concreto, notadamente em edifícios altos e esbeltos, é um item de grande relevância no projeto estrutural. Na prática, o que se faz atualmente para simular o vento é aplicar forças no modelo espacial, de acordo com as especificações de normas ou a partir de dados coletados em ensaio de túnel de vento.

A bibliografia mostra que na virada do século XIX aconteceram os primeiros estudos da ação do vento em edifícios altos. Porém, foi por volta de 1930, que ocorreram estudos mais significativos, coincidindo com as maiores ondas das construções dos chamados “arranha-céus”. Estas estruturas, além de necessárias em certos contextos, acabam tornando-se ferramentas de ostentação para grandes empresas e motivo de orgulho para profissionais envolvidos na sua construção.

De acordo com Baskaran (1993, p. 1), edifícios altos foram construídos em resposta as necessidades sociais e econômicas de um particular lugar e tempo. Sua singularidade atrai turistas e melhora a imagem da cidade.

No Brasil, também foi nas décadas de 20 e 30, que ocorreu um crescimento expressivo na área da construção civil, com a implantação das primeiras fábricas de cimento no País, a criação da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1936) e a criação da Associação Brasileira de Concreto (ABC, em 1930), reunindo profissionais do meio técnico nacional, que por influência da imigração europeia dominavam técnicas de construção em concreto armado consideradas avançadas para a época.

Até meados de 1960, 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 estruturais das edificações como sua rigidez, seu fator de amortecimento e distribuição de massas. Assim, a rigidez elevada, característica das edificações construídas neste período, minimizava os efeitos dinâmicos produzidos pela ação do vento.

O vento não era um problema em construções baixas e pesadas de grossas paredes, mas passou a ser, e em medida crescente, quando as construções foram-se tornando mais esbeltas, e as estruturas usando cada vez menos quantidade de material, Blessmann (2001, p. 11).

Com os avanços no uso de sistemas estruturais inovadores e materiais de elevada resistência com massa reduzida, tornou-se possível a construção de edifícios mais flexíveis e mais altos, como consequência, a sensibilidade de edifícios altos frente à excitação dinâmica induzida pelo vento aumentou, Fu et al. (2008, p. 1333). Estruturas esbeltas e flexíveis possuem valores de fator de amortecimento menores, o que as faz mais suscetíveis a excitações induzidas pelo vento, que por sua vez têm o potencial de reduzir a segurança estrutural e causar desconforto aos ocupantes do edifício.

Tornou-se, então, indispensável a determinação das características dinâmicas das estruturas, tais como a frequência natural, modos de vibração e amortecimento, com o objetivo de evitar o desconforto dos usuários e problemas de ressonância. Segundo Isyumov (1982, p. 373), no caso de edifícios altos, esbeltos e flexíveis, a excitação devida ao vento na estrutura pode ser amplificada e a resposta dinâmica pode se tornar ressonante. Isso acontece quando a frequência da excitação coincide com uma das frequências naturais da estrutura. Em situações desse tipo a componente da resposta dinâmica representa tipicamente de 1/2 a 2/3 da resposta total e representa um importante papel em consideração a integridade da estrutura.

Conforme Wu e Cheng (2005, p. 413), cargas de vento em edifícios altos são complicadas em natureza, especialmente quando o desprendimento de vórtices causado pelo movimento transversal à direção do vento é considerado. Para tanto, testes em túnel de vento servem como uma alternativa confiável para pesquisas em vibrações induzidas pelo vento.

Um comportamento satisfatório dos edifícios altos à ação do vento se deve à melhora da confiabilidade dos sistemas estruturais e principalmente a um estudo mais aprofundado, através de ensaios em túnel de vento, dos efeitos do vento sobre eles. Segundo Loredou-Souza (2007, p. 64), a ferramenta de trabalho mais eficiente para propiciar a prevenção e resolução dos problemas devidos ao vento é o túnel de vento.

Nos experimentos em túneis de vento é possível representar a estrutura, e suas diversas características, como vizinhança, sendo este fato, não considerado na aplicação dos métodos analíticos. Para que isso ocorra é necessário à correta simulação das propriedades geométricas e dinâmicas da estrutura, além da representação das características do vento natural.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo principal apresentar uma comparação numérica e experimental, das parcelas estática e flutuante, da resposta nas direções longitudinal e transversal dos efeitos da ação do vento sobre edifícios altos.

O estudo experimental apresenta uma comparação de duas técnicas utilizadas no Túnel de Vento *Professor Joaquim Blessmann*, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com um modelo em escala reduzida do *CAARC Standard Tall Building*. O método experimental de Integração de Pressões em Alta Frequência (*HFPI – High Frequency Pressure Integration*) está baseado na medição simultânea de pressões dinâmicas no edifício através de transdutores eletrônicos de pressão e posteriormente na integração dessas pressões para chegar-se às forças dinâmicas que são utilizadas em conjunto com um modelo numérico. Já a técnica de modelagem aeroelástica com base flexível, consiste no uso de uma base flexível para modelagem aeroelástica de edifícios através da qual se medem deslocamentos no topo ou momentos fletores na base.

Os resultados experimentais são comparados com os resultados teóricos provenientes de formulações analíticas. Utiliza-se a NBR-6123 (1988) capítulo 9 para a estimativa da resposta longitudinal. Já para a estimativa da resposta transversal, utilizam-se o método desenvolvido por Liang et al. (2002, pp. 1757-1770) que apresenta um completo modelo analítico para cargas dinâmicas transversais ao vento e o processo da norma brasileira NBR-6123 capítulo 10 que é obtido aplicando-se o método de análise modal para excitações determinísticas, especificamente, considerando unicamente a contribuição do primeiro modo e em condição de resposta máxima.

A exploração de programas específicos para leitura dos dados obtidos em experimento no túnel de vento, assim como a definição do comportamento dinâmico da estrutura baseada em metodologias teóricas através do estudo e aplicação, constitui os objetivos secundários desta pesquisa.

Portanto, busca-se demonstrar que as duas técnicas experimentais possam conduzir a resultados compatíveis para o modelo testado, ao mesmo tempo em que, se discutirá as respectivas vantagens ou limitações em outras aplicações.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está dividido em seis capítulos de acordo com as etapas de pesquisa realizadas.

No capítulo introdutório, capítulo 1, aborda-se o assunto de maneira mais global, procurando justificar a proposta de pesquisa.

O capítulo 2 contém a revisão bibliográfica, onde são apresentados os principais conceitos e métodos necessários para a compreensão dos efeitos aerodinâmicos e da interação vento-estrutura. A descrição de todo procedimento de cálculo através de métodos teórico-numérico para as respostas longitudinais e transversais ao vento também aparecem neste capítulo.

No Capítulo 3 é tratado o programa experimental desta pesquisa, onde são apresentadas as técnicas experimentais utilizadas neste estudo, assim como as características e principais aplicações do Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann*.

O capítulo 4 apresenta os resultados experimentais provenientes da medição através do método *HFPI* e através do método com base flexível.

No capítulo 5 são feitas as comparações entre os resultados dos diferentes métodos analíticos e experimentais. Tabelas e gráficos são apresentados para melhor apreciação e compreensão das respostas.

Comentários e conclusões que representam a síntese do conhecimento adquirido durante a realização deste trabalho são apresentados no Capítulo 6, com as sugestões para futuros trabalhos.

No antepenúltimo tópico, porém já não mais numerado, encontram-se as referências bibliográficas que mostram os inúmeros trabalhos consultados na busca das informações para o desenvolvimento deste estudo.

Nos apêndices, encontram-se algumas planilhas de cálculo dos diferentes métodos analíticos para diferentes velocidades de vento ensaiadas.

Por fim, são apresentados os anexos, onde se encontram figuras e gráficos representativos para a formulação matemática no cálculo da resposta dinâmica frente à ação do vento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É apresentada neste capítulo uma significativa abordagem sobre os principais conceitos e métodos que serão adotados neste estudo.

2.1 RESPOSTA DINÂMICA DO VENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS

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

As rajadas ocorrem pela turbulência atmosférica, sendo capaz de gerar resposta dinâmica em um limitado campo de estruturas que apresentam baixo amortecimento e frequência fundamental de vibração livre próxima ou inferior a 1Hz. As rajadas mais velozes são de menor duração, da ordem de fração de segundo, e atuam sobre uma pequena região. Correspondem à chegada simultânea, ao ponto em estudo, de turbilhões de diversas dimensões e em condições tais que seus efeitos se superpõem.

Pode-se descrever à ação do vento sobre uma estrutura através de um carregamento estático equivalente, dividindo-se este carregamento em duas parcelas, sendo uma estática (média) e outra flutuante (dinâmica). A velocidade média do vento é a parcela de carga que gera na estrutura efeitos puramente estáticos, e assim a resposta a esta ação é designada como resposta média. Admite-se que esta velocidade média mantém-se constante por um intervalo de tempo igual ou superior a 10min, apesar das pequenas variações instantâneas. Entretanto, para as flutuações (rajadas), poderão ocorrer em estruturas muito flexíveis, principalmente nas altas e esbeltas, oscilações importantes nas direções longitudinal e transversal a velocidade média, designada como resposta flutuante. Portanto a resposta total da estrutura é a superposição das respostas estática e flutuante.

A ação do vento sobre edifícios altos se traduz como uma carga dinâmica típica levada em conta no projeto. O interesse na resposta dinâmica de edifícios altos à excitação de vento tem aumentado e muitas pesquisas são realizadas sobre este tópico. De acordo com Banavalkar (1990 *apud* Kim et al. 2008, p. 1308), a excitação induzida pelo vento deve ser usada como um importante critério de projeto para a determinação do sistema estrutural de edifícios altos.

Muitas investigações estão sendo conduzidas para reduzir as excitações dinâmicas a um nível admissível e melhorar o desempenho de edifícios altos. Conforme Zhang et al. (2008, p. 26), a aleatoriedade e as incertezas, que são inerentes tanto no carregamento de vento quanto nas características estruturais, introduzirão variação na resposta dinâmica de estruturas sensíveis ao vento.

Além da divisão da resposta nas parcelas estática e flutuante, é oportuno dividi-la também quanto à direção em que ela ocorre. Essa divisão é feita de acordo com os modos de vibração da estrutura: modos flexionais e de torção. Para a American Society of Civil Engineers (1980, p. 179), está provado ser apropriado dividir a resposta flexional de edifícios altos à ação do vento em dois movimentos: um na direção longitudinal e outro na direção transversal ao vento incidente. Esta distinção se deve mais aos mecanismos causadores do que a resposta propriamente dita, visto que em muitos casos as respostas longitudinal e transversal das estruturas submetidas à ação do vento têm magnitudes semelhantes, resultando numa resposta em formato elíptico com eixos de comprimento parecidos.

Segundo Zhou et al. (2003, p. 394), sob a ação do vento em uma dada direção, edifícios altos oscilam tanto longitudinalmente como transversalmente, além de uma oscilação torcional. É reconhecido que para muitos edifícios altos a resposta transversal ao vento e a resposta torcional podem exceder a resposta longitudinal, tanto em termos de estados limites quanto em termos de utilização e carregamento.

No entanto, a maioria das normas e códigos existentes fornece apenas procedimentos para a resposta longitudinal ao vento, devido à complexidade das respostas transversal e torcional. Conforme Lin et al. (2005, p. 218), expressões empíricas para cargas dinâmicas transversais ao vento e torcional seriam adições valiosas para normas e códigos, permitindo a previsão da resposta dinâmica de edifícios altos para cálculos preliminares.

2.1.1 Resposta na direção longitudinal ao vento

Desde os estudos pioneiros desenvolvidos por Davenport em 1962, as ações equivalentes estáticas do vento em estruturas são questões-chaves de pesquisa na engenharia de vento. De acordo com Repetto e Solari (2004, p. 337), Davenport expressou o deslocamento máximo para o vento longitudinal como o produto do deslocamento médio estático por um coeficiente adimensional constante, o fator de rajada, que leva em consideração somente o primeiro modo de vibração. Como uma resposta direta, o autor definiu a força estática equivalente como a distribuição de força, que aplicada estaticamente na estrutura produz o deslocamento máximo.

Usando a linearidade estrutural, a força estática equivalente foi designada como o produto da força estática média pelo fator de rajada. Estas flutuações, designadas de rajadas, ocorrem pela turbulência atmosférica em uma sequência aleatória de frequências e de intensidades.

O movimento na direção longitudinal ao vento resulta principalmente das flutuações de pressões nas faces a barlavento e a sotavento da estrutura. Segundo Lin et al. (2005, p. 218), a maioria dos códigos e normas internacionais utilizam a aproximação do “fator de rajada”, baseados na teoria “quase estática” para prever a resposta na direção longitudinal do vento.

De acordo com American Society of Civil Engineers (1980, p. 180), a resposta de edifícios altos à ação do vento, na direção deste, é originada, quase totalmente, pela ação da componente longitudinal da turbulência atmosférica da velocidade do vento incidente (parcela flutuante), somada à resposta média devida ao arrasto médio. Seus métodos analíticos, usando considerações de correlação espectral e espacial para determinar a resposta longitudinal devido ao vento, tornaram-se altamente desenvolvidos, a ponto da utilização de fatores de rajada estar incluída em um grande número de normas de dimensionamento de estruturas.

2.1.2 Resposta na direção transversal ao vento

As forças transversais à direção do vento são reconhecidas como uma significativa fonte ou mecanismo de excitação de edificações alteadas. Fazendo uma comparação, pode-se dizer que as estruturas apresentam um comportamento bem mais complexo quando tratam das respostas transversais em comparação as respostas longitudinais à direção do vento.

Em determinadas situações, as solicitações oriundas da vibração transversal à direção do vento, podem definir ou governar as especificações de projeto. Desta forma, o meio a recorrer tem sido a determinação desta resposta a partir de ensaios com modelos reduzidos em túneis de vento.

Como consequência da complexidade do problema, que inclui mecanismos de excitação tais como as forças geradas pelo desprendimento de vórtices, interação fluido-estrutura, e o martelamento devido à componente transversal da turbulência atmosférica, a mecânica de fluidos computacional não dispõe, ainda, de modelos capazes de simular as condições dos protótipos.

Os modelos matemáticos disponíveis para a determinação da resposta transversal à direção do vento por desprendimento de vórtices, ainda hoje são de caráter empírico. Estes modelos não simulam o escoamento, adotando algoritmos ou funções empíricas que tentam reproduzir as forças do escoamento no sólido, Williamson et al. (2008, p. 714).

Estes modelos empíricos, conforme Paluch (1999, p. 113), geralmente se encontram dentro das seguintes categorias:

- modelos de esteira osciladora, baseados no acoplamento do movimento do sólido com um oscilador não linear associado com a esteira;
- modelos de um grau de liberdade, baseados na ideia do amortecimento negativo. Ainda dentro da categoria de um grau de liberdade, podem ser incluídos os modelos do comprimento de correlação, modelos de Ruscheweyh (1994, pp. 51-84), o processo da norma brasileira NBR-6123 capítulo 10 (Blessmann, 2005, pp. 203-207), e o modelo matemático de Liang et al. (2002, pp. 1757-1770).

2.1.3 Resposta torcional

O movimento torcional é devido ao desequilíbrio na distribuição instantânea de pressões em cada face do edifício, ou de assimetrias arquitetônicas (geométricas) e/ou estruturais.

Segundo Thepmongkorn e Kwok (2002, p. 515), edifícios altos com formas geométricas complexas, tais como cortes ou múltiplos níveis de queda, ou edifícios com distribuição assimétrica de rigidez em plano, estão passíveis a terem um significativo movimento torcional em adição aos dois movimentos translacionais.

A oscilação torcional induzida pelo vento em edifícios altos pode aumentar o deslocamento e a aceleração perto das periferias de suas seções transversais; especialmente quando as faces laterais de um edifício alto retangular são mais largas, e/ou assimétrica, e/ou quando sua frequência natural torcional é mais baixa do que a sua frequência natural translacional, logo a resposta torcional induzida pelo vento pode se tornar a principal parte da resposta total para os pontos periféricos daquele edifício, Liang et al. (2004, p. 129).

Poucas são as normas que apresentam indicações para a determinação de esforços de torção em edifícios. Em geral as normas fornecem coeficientes de força apenas para o vento incidindo perpendicularmente a cada uma das fachadas de edifícios de base retangular, onde a força devida ao vento terá a mesma direção e sentido do vento médio. Mesmo neste caso aparecerão esforços de torção se o sistema estrutural não for simétrico ou se houver assimetria geométrica, Blessmann (1989, p. 15).

Ensaio realizados em túneis de vento têm mostrado que mesmo em um edifício prismático de base retangular, ou até quadrada, com eixo de simetria torcional coincidindo com os eixos de simetria estrutural e geométrico, podem ocorrer esforços de torção significativos. Isto acontece para certas incidências oblíquas do vento médio. Porém, mesmo com o vento médio incidindo perpendicularmente a uma das faces, aparecem esforços de torção, devidos à turbulência do vento, que faz com que em um dado instante a distribuição de pressões seja assimétrica.

No estudo de Oliveira (2009, pp. 1-204), foi desenvolvido um equipamento denominado balança dinâmica de três graus de liberdade (BD3GDL). Este equipamento consiste em um sistema mecânico com três graus de liberdade – rotação de três eixos ortogonais entre si em torno de um mesmo ponto –, possibilitando a regulação do momento de inércia de massa, da rigidez rotacional e do amortecimento estrutural de cada um dos três movimentos. Nesta pesquisa o autor tem o propósito de simplificar o processo de modelagem aeroelástica de edificações para as quais o conhecimento da resposta nos dois primeiros modos de vibração livre em flexão e do primeiro modo de torção seja suficiente.

2.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO

Conforme Fu et al. (2008, p. 1353), é muito vantajoso comparar resultados de testes com modelos em túnel de vento com o desempenho de estruturas reais, tendo o propósito de melhorar as técnicas de modelamento dos testes em túnel de vento.

Para Loredou-Souza (2007, p.64), o equipamento (túnel de vento) permite a simulação das principais características de ventos naturais na camada limite atmosférica e, aliado ao projeto e execução de modelos reduzidos obedecendo a determinadas condições de semelhança, propicia a correta determinação das pressões atuantes sobre as fachadas e estrutura das edificações.

Os ensaios em modelos reduzidos podem ser realizados para a otimização específica de um projeto, para a correção de problemas existentes ou em atendimento a determinadas normas, como por exemplo, ao item 1.2 da NBR-6123 (1988, p.1):

Esta norma não se aplica a edificações de formas, dimensões ou localização fora do comum, casos esses em que estudos especiais devem ser feitos para determinar as forças atuantes do vento e seus efeitos. Resultados experimentais, obtidos em túnel de vento, com simulação das principais características do vento natural, podem ser usados em substituição do recurso aos coeficientes constantes desta Norma.

O uso elevado de medições simultâneas de pressões em túneis de vento para ajudar no projeto de edifícios, tornou-se mais difundido nos últimos anos. Devido à complexidade da estrutura turbulenta do vento e diferenças na simulação em túnel de vento e nas técnicas de medição, espera-se algum certo nível de variabilidade nos resultados aerodinâmicos usados para o desenvolvimento de normas ou projeto estrutural. Porém, tal variabilidade é raramente considerada explicitamente, Fritz et al. (2008, p. 1887).

De acordo com Zhou et al. (2003, p. 394), os ensaios em túnel de vento têm servido como uma alternativa eficiente para a determinação das cargas aerodinâmicas em edifícios altos. Por exemplo, os testes com modelos aeroelásticos são no momento, usados como uma ferramenta de rotina em práticas de projetos em geral.

2.2.1 Generalidades

O túnel de vento é um equipamento largamente utilizado na engenharia para auxiliar na concepção de veículos, navios, aeronaves e projetos arquitetônicos. Ele serve para testar a aerodinâmica dos projetos em escalas reduzidas, simulando sua resistência às diversas condições de vento. Geralmente os túneis de vento são formados por ventiladores, tubos para circulação do ar e uma área reservada para os ensaios podendo ser equipada com sondas aspirantes, transdutores de pressão, balança de força, modelos com acelerômetros, cujos sensores estão conectados a computadores. Podem ser de duas categorias:

- circuito aberto – o túnel tem a forma de um corredor: em uma das extremidades está o gerador de corrente de ar e o outro extremo é o local para a saída do vento;
- circuito fechado – o vento circula em tubos em forma de anel.

Até meados de 1990, a maioria dos ensaios realizados com modelos de edificações civis eram bidimensionais e não levava em conta a influência da terceira dimensão do modelo e da obliquidade do vento incidente. O problema é que a grande maioria das edificações deve ser tratada como modelo tridimensional e os valores dos coeficientes de pressão e de força mudam quando se passa do caso bi para o tridimensional.

Engenheiros de vento, engajados em experimentos de simulação em túnel de vento para avaliação de cargas de vento em estruturas, precisam lidar com o problema de como reproduzir os parâmetros do escoamento relativo à caracterização da camada da superfície atmosférica. Os campos de observação raramente estão disponíveis, e para a maioria dos casos, a simulação não está diretamente baseada nas quantidades do escoamento observado para o local da estrutura.

Conforme Tieleman (2003, p. 1163), o engenheiro de vento na maioria dos casos avalia visualmente a rugosidade do terreno para o local do edifício, e adapta isto a uma categoria particular de classificação de terreno existente. Depois, ele fornece uma medida da rugosidade na forma de comprimento que pode ser usado para determinar uma estimativa dos parâmetros da turbulência do escoamento para ser reproduzido em laboratório usando princípios básicos.

Para Davenport e Isyumov (1967, p. 202), a simulação correta das principais características do vento natural em túneis de vento é requisito básico para aplicações em engenharia civil, sem a qual os resultados obtidos podem se afastar consideravelmente da realidade.

2.3 ANÁLISE DIMENSIONAL

O princípio da análise dimensional decorre da condição de que toda equação, ou, de um modo mais geral, toda relação funcional que exprima matematicamente uma lei natural ou um processo físico, deve ser invariante relativamente a qualquer mudança do sistema de unidades empregado, Carneiro (1993, p. 1).

2.3.1 Introdução

O renomado professor Barenblatt (1996, p. 1), escreveu em seu livro *Scaling, self-similarity, and intermediate asymptotics*:

... De fato, a ideia sobre a qual a análise dimensional se baseia é muito simples, e pode ser compreendida por todos: leis físicas não dependem de arbitrariedades na escolha das unidades básicas de medida. Uma conclusão importante pode ser derivada desta ideia simples, usando argumentos simples: as funções que expressam leis físicas devem possuir certa propriedade fundamental, a qual em matemática é chamada de homogeneidade generalizada ou simetria. Esta propriedade permite que o número de argumentos nestas funções possa ser reduzido, tornando-os assim mais fáceis de serem obtidos [calculando-os ou determinando-os experimentalmente]. Isso é, de fato, todo o conteúdo da análise dimensional.

Embora simples, esta ideia permitiu a cientistas como Newton, Rayleigh, Reynolds, Kolmogorov, Cauchy, e muitos outros, a proposição de princípios físicos fundamentais. Para ilustrar a maneira como a lei de Homogeneidade Dimensional pode ser aplicada, imagina-se o problema da frequência de oscilação natural, f_n , de um sistema massa-mola, figura 2.1:

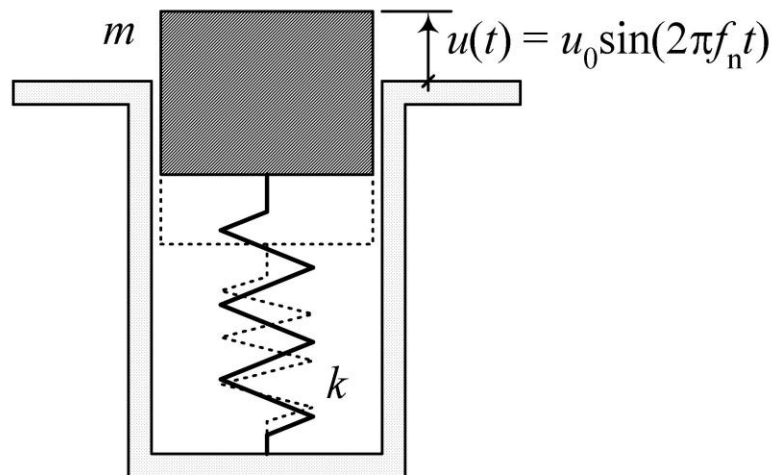


Figura 2.1: Sistema massa-mola com 1 grau de liberdade em vibração livre, (Rocha, 2008, p. 2).

Um sistema massa-mola, não amortecido, tem como parâmetros básicos a rigidez da mola, k , e a massa oscilante, m . Deve haver, portanto, uma relação entre as três grandezas, f_n , k , e m .

A partir das equações 2.1, 2.2 e 2.3, procuram-se encontrar a relação de uma análise das unidades de medida destas três grandezas.

$$[f_n] = L^0 M^0 T^{-1} \quad (\text{equação 2.1})$$

$$[k] = L^0 M^1 T^{-2} \quad (\text{equação 2.2})$$

$$[m] = L^0 M^1 T^0 \quad (\text{equação 2.3})$$

Os colchetes nas equações 2.1, 2.2 e 2.3, representam as unidades de medida do parâmetro envolvido. Pode-se observar que essas unidades foram escritas em termos de apenas três *unidades fundamentais*: comprimento, L , massa, M , e tempo, T . A maior parte dos princípios utilizados na dinâmica estrutural podem ser expressos apenas com essas três unidades. Eventualmente pode ser necessário utilizar também a temperatura, Φ .

As grandezas subordinadas às unidades fundamentais são denominadas *grandezas fundamentais*, que no caso são o comprimento, a massa e o tempo. As demais unidades e grandezas são denominadas *unidades e grandezas derivadas*, como por exemplo, a rigidez e a frequência. A subordinação das unidades derivadas às unidades fundamentais é expressa através de equações dimensionais, como as apresentadas anteriormente, nas equações 2.1, 2.2 e 2.3. O expoente de cada unidade fundamental é denominado *dimensão ou expoente de dimensão*.

No caso do *Sistema Internacional, SI*, utiliza-se o metro [m], o quilograma [kg] e o segundo [s], como unidades das grandezas L , M e T , respectivamente. Assim, conforme as equações 2.4, 2.5 e 2.6, têm-se:

$$[f_n] = m^0 \text{ kg}^0 \text{ s}^{-1} = \text{Hz} \quad (\text{equação 2.4})$$

$$[k] = m^0 \text{ kg}^1 \text{ s}^{-2} = \text{N/m} \quad (\text{equação 2.5})$$

$$[m] = \text{kg} \quad (\text{equação 2.6})$$

As fórmulas dimensionais permitem recalculer as unidades derivadas a partir de mudanças nas unidades fundamentais, ou eventualmente o contrário.

Observa-se agora que os expoentes nas fórmulas dimensionais (as dimensões) das três grandezas envolvidas no fenômeno de vibração livre do sistema massa-mola são linearmente dependentes, ou seja, a unidade de uma das grandezas pode ser expressa através de uma relação entre as demais, conforme equação 2.7:

$$[f_n] = [k]^{1/2} [m]^{-1/2} \quad (\text{equação 2.7})$$

Essas relações podem a princípio não parecer muito evidentes, mas o importante é que a existência de uma relação implica na possibilidade de se definir uma nova grandeza adimensional.

O número Π , por ser adimensional, não será afetado por uma mudança no sistema de unidades. Ou seja, Π pode ser investigado experimentalmente, com boas chances de ser uma constante, ou ao menos uma função interessante. Essa é a abordagem básica da análise dimensional, que permitiu que grandes cientistas apresentassem ao mundo números adimensionais que regem fenômenos importantes, tais como o número de Reynolds (força do arrasto em corpos imersos em fluidos), de Froude (efeito da gravidade sobre o movimento), ou de Strouhal (frequência de desprendimento de vórtices alternados). Na equação 2.8, pode-se observar que não foram utilizados quaisquer outros princípios físicos, ou seja, a conclusão é baseada completamente nas dimensões das grandezas envolvidas.

$$\Pi = \frac{\sqrt{k/m}}{f_n} \quad (\text{equação 2.8})$$

De fato, a partir da equação diferencial de equilíbrio dinâmico de um sistema massa-mola, pode-se demonstrar que $\Pi = 2\pi$, ou seja, uma constante. O mesmo poderia ter sido descoberto experimentalmente, permitindo que finalmente se chegasse à equação 2.9:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{equação 2.9})$$

2.3.2 Matriz dimensional

O conjunto dos parâmetros do problema físico pode ser vantajosamente apresentado em uma tabela, em forma de matriz, chamado matriz dimensional. As linhas dessa matriz correspondem às diversas grandezas fundamentais relacionadas com o problema, e cada coluna corresponde a um dos parâmetros. Os elementos da matriz são as dimensões (ou expoentes de dimensão) dos parâmetros, relativamente a cada grandeza fundamental. A tabela 2.1 apresenta a matriz dimensional (últimas três colunas) das principais grandezas utilizadas na dinâmica estrutural.

Tabela 2.1: Matriz dimensional com grandezas usuais em análise dinâmica, (Rocha, 2008, p. 4).

Grandezas derivadas	Símbolo	Unidade	L	M	T
Comprimento	l	m	1	0	0
Massa	m	kg	0	1	0
Tempo	t	s	0	0	1
Aceleração	a	m/s ²	1	0	-2
Aceleração angular	α	rad/s ²	0	0	-2
Velocidade	v	m/s	1	0	-1
Velocidade angular	ω	rad/s	0	0	-1
Força	F	N	1	1	-2
Momento	M	Nm	2	1	-2
Frequência	f	Hz	0	0	-1
Frequência angular	ω	rad/s	0	0	-1
Amortecimento viscoso	c	kg/s	0	1	-1
Razão de amortecimento	ζ	–	0	0	0
Módulo de elasticidade	E	Pa	-1	1	-2
Módulo de corte	G	Pa	-1	1	-2
Coefficiente de Poisson	ν	–	0	0	0
Deformação	ε	–	0	0	0
Tensão	σ	Pa	-1	1	-2
Massa específica	ρ	kg/m ³	-3	1	0
Massa por comprimento	μ	kg/m	-1	1	0
Inércia de massa	I	kg m ²	2	1	0
Inércia por comprimento	i	kg m	1	1	0
Rigidez	k	N/m	0	1	-2
Rigidez axial	EA/L	N/m	0	1	-2
Rigidez a flexão	EI/L^3	N/m	0	1	-2
Rigidez a torção	GK/L	Nm/rad	2	1	-2
Área	A	m ²	2	0	0
Volume	V	m ³	3	0	0
Módulo resistente	W	m ³	3	0	0
Inércia de área	I	m ⁴	4	0	0
Constante de torção	K	m ⁴	4	0	0
Viscosidade dinâmica	μ	kg/m/s	-1	1	-1
Viscosidade cinemática	ν	m ² /s	2	0	-1

2.3.3 Mudança de base

A escolha das grandezas L , M e T como grandezas de base é de certa forma arbitrária, embora conveniente. Assim, é possível substituir essas três grandezas e logo obter uma nova matriz dimensional para as grandezas derivadas. Na prática, será visto na seção seguinte, que a substituição da base é muito útil em projetos de modelos reduzidos, conforme as propriedades passivas de controle nestes projetos.

Supondo o estudo de um fenômeno qualquer na base LMT , no qual se deseja utilizar uma nova base composta pelas grandezas A , B e C . As equações 2.10, 2.11 e 2.12 mostram a matriz dimensional da nova base.

$$A = L^{a_L} M^{a_M} T^{a_T} \quad (\text{equação 2.10})$$

$$B = L^{b_L} M^{b_M} T^{b_T} \quad (\text{equação 2.11})$$

$$C = L^{c_L} M^{c_M} T^{c_T} \quad (\text{equação 2.12})$$

Tomando-se o logaritmo de todos os termos, têm-se as equações 2.13, 2.14 e 2.15:

$$\log(A) = \log(L^{a_L} M^{a_M} T^{a_T}) = a_L \log L + a_M \log M + a_T \log T \quad (\text{equação 2.13})$$

$$\log(B) = \log(L^{b_L} M^{b_M} T^{b_T}) = b_L \log L + b_M \log M + b_T \log T \quad (\text{equação 2.14})$$

$$\log(C) = \log(L^{c_L} M^{c_M} T^{c_T}) = c_L \log L + c_M \log M + c_T \log T \quad (\text{equação 2.15})$$

Na forma matricial, apresenta-se a equação 2.16:

$$\begin{bmatrix} a_L & a_M & a_T \\ b_L & b_M & b_T \\ c_L & c_M & c_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \log L \\ \log M \\ \log T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \log A \\ \log B \\ \log C \end{bmatrix} \quad (\text{equação 2.16})$$

Onde se observa que a matriz do lado esquerdo da equação é a matriz dimensional da nova base. Isolando o vetor com as grandezas de base, chega-se a equação 2.17:

$$\begin{bmatrix} \log L \\ \log M \\ \log T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_A & a_B & a_C \\ b_A & b_B & b_C \\ c_A & c_B & c_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \log A \\ \log B \\ \log C \end{bmatrix} \quad (\text{equação 2.17})$$

A equação 2.18 resulta da substituição de termos entre as equações 2.16 e 2.17.

$$\begin{bmatrix} a_A & a_B & a_C \\ b_A & b_B & b_C \\ c_A & c_B & c_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_L & a_M & a_T \\ b_L & b_M & b_T \\ c_L & c_M & c_T \end{bmatrix}^{-1} \quad (\text{equação 2.18})$$

Voltando-se agora à forma polinomial, tem-se a equação 2.19:

$$\begin{aligned} L &= A^{a_A} B^{a_B} C^{a_C} \\ M &= A^{b_A} B^{b_B} C^{b_C} \\ T &= A^{c_A} B^{c_B} C^{c_C} \end{aligned} \quad (\text{equação 2.19})$$

A partir da equação 2.19 observa-se que, para se obter a matriz dimensional das grandezas fundamentais, basta inverter a matriz dimensional da nova base. Isso só é possível se essas matrizes têm determinante positivo, ou seja, as grandezas que constituem a nova base devem ter expoentes de dimensão linearmente independentes entre si. Por exemplo, não se poderia escolher como novas grandezas de base a velocidade [m/s], o comprimento [m], e o tempo [s], pois a unidade de uma das três pode ser representada por uma relação entre as outras duas. Logo, a matriz dimensional não poderia ser invertida.

2.3.4 Mudança de base utilizando planilha em computador

As operações descritas na seção anterior podem ser automatizadas para a lista de grandezas derivadas apresentadas para cada experimento neste trabalho. A planilha, em programa Excel, inclui a inversão e as multiplicações matriciais necessárias à transformação. Para se adotar outro conjunto de grandezas fundamentais basta alterar as seis primeiras colunas das três primeiras linhas da planilha. No capítulo 3, seção 3.4.2 deste trabalho, apresenta-se a tabela 3.1, que mostra a planilha utilizada para determinação das escalas do modelo *CAARC* através da modelagem aeroelástica com base flexível.

2.3.5 Mudança de escala e projeto de modelos reduzidos

Um aspecto útil da mudança de base é a possibilidade de se alterar as unidades das grandezas fundamentais e descobrir como isso repercute nas grandezas derivadas. Por exemplo, vamos admitir que desejem utilizar o quilômetro ao invés do metro como unidade de comprimento, e g (aceleração da gravidade) ao invés do $[m/s^2]$ como unidade de aceleração. A equação 2.20 mostra como isso repercute na velocidade.

$$\begin{aligned}
 [v] &= \frac{m}{s} = [L]^{0,5} [E]^0 [a]^{0,5} \\
 \frac{m}{s} &\approx \left(\frac{1}{1000} \text{ km}\right)^{0,5} \left(\frac{1}{9,81} g\right)^{0,5} && \text{(equação 2.20)} \\
 \frac{m}{s} &\approx \frac{1}{99} \sqrt{\text{km}g}
 \end{aligned}$$

Portanto, a nova unidade da velocidade é $\sqrt{\text{km}g}$, que é 99 vezes menor que a unidade $[m/s]$ do sistema LMT . As frações que aparecem nesse cálculo são as escalas atribuídas a cada grandeza, sendo que o resultado 1:99 (escala de velocidade) foi obtido através das novas dimensões calculadas para a mudança de base.

Mas o aspecto mais interessante desse cálculo é que exatamente o mesmo procedimento pode ser utilizado para se modificar a escala de alguns parâmetros que descrevem um fenômeno físico, e conhecer a repercussão desta mudança em outros parâmetros relevantes. Essa é a ferramenta básica utilizada no projeto de modelos reduzidos.

2.4 MODELO CAARC DE EDIFÍCIO ALTO

Para uma comparação entre os métodos teóricos e experimentais, foi selecionado um modelo padrão denominado *CAARC Standard Tall Building*. A vantagem é a disponibilidade na literatura técnica de resultados de experimentos em túnel de vento com este modelo.

O *CAARC* é o modelo de edifício alto usado para a comparação de ensaios de simulação do vento natural em túneis de vento. De acordo com Melbourne (1980, p. 73), este modelo é uma edificação hipotética, elaborada em 1969, após a Segunda Guerra Mundial, em um encontro do Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council Coordinators in the Field of Aerodynamics, com o objetivo de se estabelecer um meio para comparações entre as

diferentes técnicas de ensaios que estavam sendo utilizadas em vários túneis de vento na época.

Através do uso de um modelo padronizado, esperava-se que comparações diretas da resposta dinâmica do modelo e das medidas de pressão ajudassem no desenvolvimento de melhores técnicas, e fornecessem mais credibilidade ao grande volume de dados de testes que estavam sendo obtidos em ensaios em túnel de vento.

Na cidade de Londres, em setembro de 1975, Melbourne apresentou na 5ª Conferência Internacional sobre Efeitos do Vento em Edifícios e Estruturas, um estudo de medições que já haviam sido realizadas com o CAARC até então. Naquele momento, ficou acertado que, após alguns ajustes, estes dados serviriam de referência para que outros pesquisadores pudessem calibrar as suas metodologias.

2.4.1 Geometria do edifício

Sua geometria é definida como um prisma retangular com base de dimensões 30,48m por 45,72m e altura de 182,88m (100ft x 150ft x 600ft). Sendo o topo do edifício horizontal, plano e sem parapeitos. As paredes externas lisas sem janelas, parapeitos ou qualquer outro detalhe geométrico. A figura 2.2 apresenta uma perspectiva do edifício com suas dimensões.

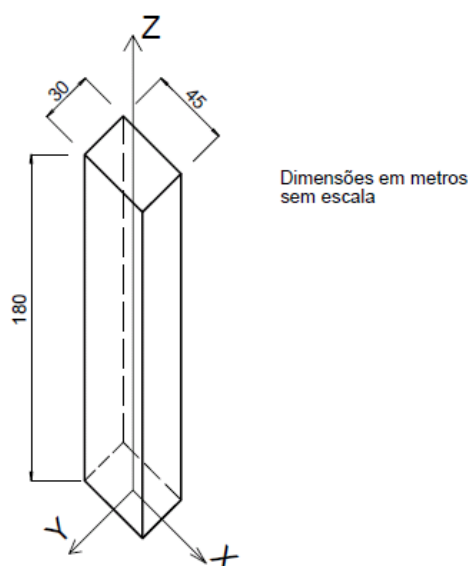


Figura 2.2: CAARC Standard Tall Building.

2.4.2 Propriedades dinâmicas

Para definição de suas propriedades dinâmicas, apenas o modo fundamental de vibração é considerado, e a forma modal deste tomada como linear, girando em torno de um ponto no nível do terreno. A frequência natural deve ser considerada como 0,2Hz em torno dos eixos, x e y, mostrados na figura 2.2, ambos ao nível do terreno. O amortecimento estrutural, referido pela razão de amortecimento crítico, deve ser considerado 1%, para propósitos de comparação de resultados. A distribuição de massa é uniforme, com uma massa específica de 160kg/m³.

Com a uniformidade da massa específica, podem-se determinar os momentos de inércia de massa do edifício. Segundo Beer e Johnston (1994, p. 663), os momentos de inércia de massa em torno dos eixos x e y de um prisma retangular como o mostrado na figura 2.3 são dados pelas equações 2.21 e 2.22, respectivamente:

$$I_{mx} = \frac{1}{12} m (b^2 + c^2) + m \left(\frac{c}{2}\right)^2 \quad (\text{equação 2.21})$$

$$I_{my} = \frac{1}{12} m (a^2 + c^2) + m \left(\frac{c}{2}\right)^2 \quad (\text{equação 2.22})$$

Sendo, m , a massa do prisma, [kg]; a , lado maior da base, 45,72m; b , lado menor da base, 30,48m; e c , altura, 182,88m.

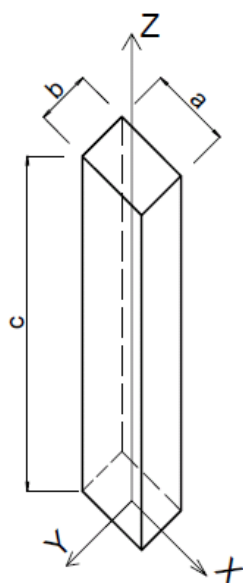


Figura 2.3: Prisma retangular utilizado na determinação de momentos de inércia de massa.

Considerando as dimensões do CAARC e a distribuição de massa específica, pode-se então determinar a massa total:

$$m = a b c 160\text{kg/m}^3 = 40776259\text{kg} = 40776,259\text{t}$$

Substituindo-se a massa e as dimensões do CAARC nas equações 2.21 e 2.22, obtêm-se o momento de inércia de massa em relação ao eixo x, $I_{mx} = 457745476\text{tm}^2$, e o momento de inércia de massa em relação ao eixo y, $I_{my} = 461691558\text{tm}^2$, respectivamente.

A determinação das rigidezes rotacionais é obtida para os eixos x e y pela equação 2.23, retirada de Thomson (1978, p. 130), que é utilizada na determinação da frequência de vibração de osciladores mecânicos, como vigas rotuladas em uma extremidade e livres na outra, e, portanto, pode ser usada para o cálculo da rigidez rotacional do modelo ensaiado.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\theta}}{I_m}} \quad (\text{equação 2.23})$$

Onde:

f	frequência de vibração em torno do eixo considerado, [Hz];
k_{θ}	rigidez rotacional em torno do eixo considerado, [Nm/rad];
I_m	momento de inércia de massa do modelo acoplado à base, em relação ao eixo considerado, [kg m^2].

A partir da frequência, $f = 0,2\text{Hz}$, para os eixos x e y, da forma modal, e da massa do edifício, é possível calcular a rigidez modal para o primeiro modo. Os valores da rigidez rotacional em relação ao eixo x, $k_{\theta_x} = 723\text{GNm/rad}$, e da rigidez rotacional em relação ao eixo y, $k_{\theta_y} = 729\text{GNm/rad}$, foram obtidos através da equação 2.23.

2.5 MÉTODO TEÓRICO-NUMÉRICO DA NBR-6123 (1988) PARA RESPOSTA LONGITUDINAL

O capítulo nove da norma brasileira NBR-6123 (1988, pp. 33-41), dedica-se inteiramente aos estudos dos efeitos dinâmicos devidos à turbulência atmosférica, podendo-se trabalhar com um modelo contínuo simplificado ou com um modelo discreto. Esta norma toma como referência a velocidade de projeto \bar{V}_p , que é determinada a partir da velocidade básica do vento para cada região em função do mapa das isopletras, figura 2.4:

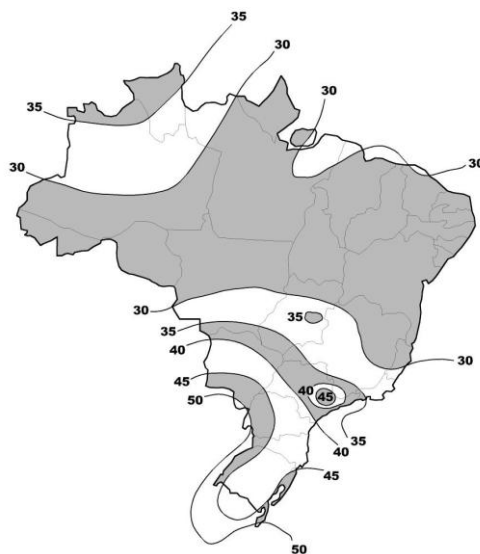


Figura 2.4: Mapa com as velocidades de referência do vento em [m/s], sobre rajadas de 3s, a 10m sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano, Loredo-Souza et al. (2009, p. 2).

2.5.1 Considerações gerais

O processo que a norma brasileira NBR-6123 (1988, pp. 33-41), apresenta para a determinação da ação estática equivalente do vento, baseia-se no método de vibração aleatória proposto por Davenport et al. (1967, pp. 201-230), divergindo dele na determinação dos parâmetros que definem a ação. Além disso, a norma destaca que a vibração da estrutura ocorre em torno da posição deformada, definida pela componente estática do vento, ou seja, pela velocidade média, Blessmann (2005, p. 93).

O item 9.1 da NBR-6123 (1988, p. 33), define que:

No vento natural, o módulo e a orientação da velocidade instantânea do ar apresentam flutuações em torno da velocidade média, \bar{V} , designadas por rajadas. Admite-se que a velocidade média mantém-se constante durante um intervalo de tempo de dez minutos ou mais, produzindo nas edificações efeitos puramente estáticos, designados como resposta média. Já as flutuações da velocidade podem induzir em estruturas muito flexíveis, especialmente em edificações altas e esbeltas, oscilações importantes na direção da velocidade média, designadas como resposta flutuante.

A NBR-6123 (1988, p. 33) aponta ainda, que a influência da resposta flutuante é pequena para edificações com período fundamental igual ou inferior a um segundo. Entretanto, a influência da resposta flutuante na direção do vento médio pode ser de extrema importância se a edificação apresentar período fundamental superior a um segundo e fraco amortecimento. Portanto, por esta norma, a resposta dinâmica total é igual à superposição das respostas média e flutuante.

A seguir serão indicados os dados de entrada a serem considerados para o cálculo da resposta dinâmica na direção do vento. A velocidade de projeto é função das características do local, enquanto que as características dinâmicas da estrutura dependem unicamente da geometria da mesma.

2.5.2 Velocidade de projeto

O item 9.2.1 da NBR-6123 (1988, p. 34), define que: a velocidade de projeto, correspondente à velocidade média sobre 10min a 10m de altura sobre o solo, em terreno de categoria II, é obtida pelo produto (ver equação 2.24):

$$\bar{V}_p = 0,69 V_0 S_1 S_3 \quad (\text{equação 2.24})$$

Onde:	\bar{V}_p	velocidade de projeto, [m/s];
	0,69	fator de rajada;
	V_0	velocidade básica (ou de referência), [m/s];
	S_1	fator topográfico;
	S_3	fator estatístico.

A velocidade básica do vento, V_0 , segundo a NBR-6123 (1988, p. 2), é a velocidade de uma rajada de três segundos, excedida na média uma vez em 50 anos, a 10m acima do terreno, em campo aberto e plano.

O fator topográfico S_1 , de acordo com a NBR-6123 (1988, p. 5), leva em consideração as variações do relevo do terreno. De uma forma geral, este fator topográfico irá majorar a velocidade quando a edificação estiver no topo de morros ou taludes e irá minorar a velocidade quando as edificações estiverem em vales.

No item 5.4 da NBR-6123 (1988, p. 10), lê-se que o fator estatístico S_3 , é baseado em conceitos estatísticos, e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação.

O coeficiente 0,69 corresponde a um fator de rajada que corrige a velocidade média em [m/s], V_0 , sobre 3s para a velocidade média sobre 10min, \bar{V}_p .

2.5.3 Características dinâmicas da estrutura

Para definição das características dinâmicas a NBR-6123 (1988, pp. 34-35), aborda as estruturas em dois grupos: modelo simplificado e modelo discreto. Cada qual com um modelo apropriado.

Pode ser adotado um modelo simplificado quando a edificação tiver seção constante e distribuição ao menos aproximadamente uniforme de massa. Este modelo é aplicável para estruturas apoiadas exclusivamente na base, seção constante e distribuição de massa aproximadamente uniforme, sendo considerada a resposta dinâmica destas unicamente a contribuição do modo fundamental. Segundo a NBR-6123 (1988, p. 34), em geral, a retenção só do primeiro modo na solução conduz a erros inferiores a 10%.

Admite-se que o primeiro modo de vibração pode ser representado com precisão, pela equação 2.25:

$$x = \left(\frac{z}{h}\right)^\gamma \quad (\text{equação 2.25})$$

Onde:	h	altura total da estrutura, [m];
	z	cota no ponto de interesse, [m];
	γ	expoente da forma modal que depende do tipo de estrutura.

A tabela 2.2 apresenta valores aproximados de γ , e equações também aproximadas, que permitem o cálculo direto da frequência fundamental de vibração livre em Hertz para vários tipos de edificações usuais. A razão de amortecimento crítico, ζ , também está indicada na tabela 2.2, em função do tipo de estrutura.

Tabela 2.2: Parâmetros para a determinação de efeitos dinâmicos, NBR-6123 (1988, p. 35).

Tipo de edificação	γ	ζ	$T_1 = 1 / f_1$
Edifícios com estrutura aporcionada de concreto, sem cortinas	1,2	0,020	$0,05 + 0,015h$ (h em metros)
Edifícios com estrutura de concreto, com cortinas para a absorção de forças horizontais	1,6	0,015	$0,05 + 0,012h$
Torres e chaminés de concreto, seção variável	2,7	0,015	$0,02h$
Torres, mastros e chaminés de concreto, seção uniforme	1,7	0,010	$0,015h$
Edifícios com estrutura de aço soldada	1,2	0,010	$0,29\sqrt{h} - 0,4$
Torres e chaminés de aço, seção uniforme	1,7	0,008	—
Estruturas de madeira	—	0,030	—

No caso geral de uma edificação com propriedades variáveis com a altura, ela deve ser representada por meio de um modelo discreto, de acordo com o esquema da figura 2.5.

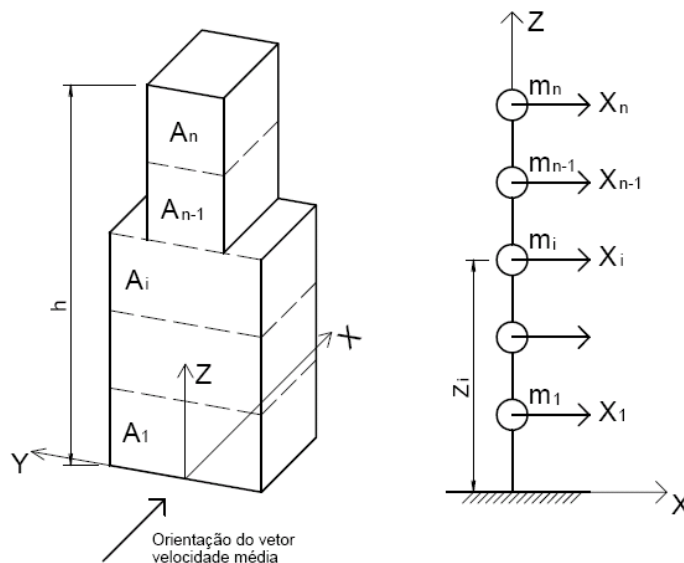


Figura 2.5: Esquema para modelo dinâmico discreto, NBR-6123 (1988, p. 35).

No item 9.2.2.2 da NBR-6123 (1988, p. 34), consta que:

Em geral, um modelo com $n = 10$ é suficiente para ser obtida uma precisão adequada nos resultados. Um número maior de elementos poderá ser necessário se a edificação apresentar ao longo dela variações importantes em suas características. Uma vez estabelecido o modelo da estrutura, devem ser determinadas, empregando métodos da teoria de vibrações de estruturas, a frequência natural f_j [Hz] e a forma modal x_j correspondentes ao modo j , para $j = 1, 2, \dots, r$, sendo $r < n$, o número de modos que serão retidos na solução. A retenção de um único modo ($r = 1$) é usualmente suficiente, exceto no caso de edificações muito esbeltas e/ou com rigidez fortemente variável. Nestes casos, devem ser computadas sucessivamente as contribuições dos modos 1, 2, etc., até que as forças equivalentes associadas ao último modo calculado ($j = r$) sejam desprezíveis.

De acordo com a figura 2.5, tem-se: x_i , deslocamento correspondente à coordenada i ; A_i , área de influência correspondente à coordenada i ; m_i , massa discreta correspondente à coordenada i ; C_{ai} , coeficiente de arrasto correspondente à coordenada i ; z_i , altura do elemento i sobre o nível do terreno; z_r , altura de referência, $z_r = 10\text{m}$; e n , número de graus de liberdade ($i = 1, 2, \dots, n$).

2.5.4 Formulação matemática para o cálculo da resposta dinâmica na direção do vento

A NBR-6123 (1988, pp. 35-41), propõe dois métodos para o cálculo da resposta dinâmica na direção do vento: método simplificado e método discreto.

Conforme o método simplificado, disposto na NBR-6123 (1988, p. 35), a variação da pressão dinâmica com a altura é expressa pela equação 2.26:

$$q(z) = \bar{q}_0 b^2 \left[\left(\frac{z}{z_r} \right)^{2p} + \left(\frac{h}{z_r} \right)^p \left(\frac{z}{h} \right)^\gamma \frac{1 + 2\gamma}{1 + \gamma + p} \xi \right] \quad (\text{equação 2.26})$$

O primeiro termo dentro dos colchetes corresponde à resposta média e o segundo representa a amplitude máxima da resposta flutuante. O coeficiente de amplificação dinâmica, ξ , função das dimensões da edificação, da razão de amortecimento crítico, ζ , e da frequência, f , através da relação adimensional V_p/fL , é apresentado em gráficos pela NBR-6123 (1988, pp. 37-41), para cinco categorias de rugosidade de terreno. No anexo A, figura A1, apresenta-se a figura que faz referência ao coeficiente de amplificação dinâmica para um terreno de categoria III. Esta categoria caracteriza o vento estudado neste trabalho. O expoente p ,

expoente da curva de potência teórica ajustada ao perfil de velocidades médias, e o coeficiente b , parâmetro de correção definido pela NBR-6123 (1988), para passar da categoria II para as demais categorias, dependem da categoria de rugosidade do terreno, de acordo com a tabela 2.3:

Tabela 2.3: Expoente p e parâmetro b , NBR-6123 (1988, p. 36).

Categoria de rugosidade	I	II	III	IV	V
p	0,095	0,15	0,185	0,23	0,31
b	1,23	1,00	0,86	0,71	0,50

A equação 2.27 apresenta a pressão dinâmica de projeto, \bar{q}_0 , que é definida para a categoria II, a 10m de altura sobre o solo, e posteriormente corrigida.

$$\bar{q}_0 = 0,613 \bar{V}_p^2 \quad (\text{equação 2.27})$$

Onde: 0,613 fator de correção em função da massa específica do ar, válido para as condições normais de temperatura e pressão.

Para as demais categorias a pressão dinâmica de projeto é obtida através do parâmetro de correção b , de acordo com a equação 2.28:

$$\bar{q}_p = 0,613 b \bar{V}_p^2 \quad (\text{equação 2.28})$$

Onde: \bar{q}_p pressão dinâmica de projeto, [N/m²].

A pressão $q(z)$ é uma função contínua da altura z sobre o terreno. A força estática equivalente, que engloba as ações estáticas e dinâmicas do vento, por unidade de altura, resulta igual a $q(z) l_1 C_a$, sendo l_1 a largura ou o diâmetro da edificação, NBR-6123 (1988, p. 35).

Já para o método discreto, apresentado na NBR-6123 (1988, p. 36), para cada modo de vibração j , com componentes $x_i = (x_i)_j$, ou seja, os deslocamentos correspondentes à coordenada i devido a cada um dos modos de vibração j , existe uma força total F_{ij} , devida ao vento na direção desta coordenada i , conforme a equação 2.29:

$$F_{ij} = \bar{F}_i + \hat{F}_{ij} \quad (\text{equação 2.29})$$

Onde: F_{ij} força total devida ao vento na direção da coordenada i , para o modo de vibração j , [N];

\bar{F}_i força média na direção da coordenada i , [N];

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

A parcela da força total referente à velocidade média do vento, anteriormente designada como força média, \bar{F}_i , é calculada de acordo com a equação 2.30:

$$\bar{F}_i = \bar{q}_p b^2 C_{ai} A_i \left(\frac{z_i}{z_r} \right)^{2p} \quad (\text{equação 2.30})$$

A parcela referente à componente dinâmica, \hat{F}_{ij} , nomeada como componente flutuante da força total para um determinado modo de vibração, é obtida através da equação 2.31:

$$\hat{F}_{ij} = F_H \psi_i x_i \quad (\text{equação 2.31})$$

Onde: F_H força referente à parcela flutuante, [N];

x_i deslocamento correspondente à coordenada i , [m].

Obtêm-se ψ_i através da equação 2.32:

$$\psi_i = \frac{m_i}{m_0} \quad (\text{equação 2.32})$$

Onde: ψ_i razão entre as massas m_i e m_0 ;

m_i massa discreta referente à coordenada i ;

m_0 massa arbitrária de referência.

A força F_H , referente à parcela flutuante, é obtida pela equação 2.33:

$$F_H = \bar{q}_p b^2 A_0 \left(\frac{\sum_{i=1}^N \beta_i x_i}{\sum_{i=1}^N \psi_i x_i^2} \right) \xi \quad (\text{equação 2.33})$$

Onde: A_0 área arbitrária de referência, [m²];
 N número de coordenadas discretizadas;
 ξ coeficiente de amplificação dinâmica.

O valor para β_i é dado através da equação 2.34:

$$\beta_i = C_{ai} \left(\frac{A_i}{A_0} \right) \left(\frac{z_i}{z_r} \right)^p \quad (\text{equação 2.34})$$

2.5.5 Aplicação ao CAARC

Neste estudo foram utilizados os dois métodos propostos pela NBR-6123 (1988) capítulo 9, para o cálculo da resposta dinâmica na direção longitudinal ao vento: método simplificado e método discreto. Os cálculos foram realizados através de planilhas em programa Excel para as duas direções de incidência do vento no modelo: direção y ou 0° (face maior) e direção x ou 90° (face menor), conforme ilustra a figura 2.6:

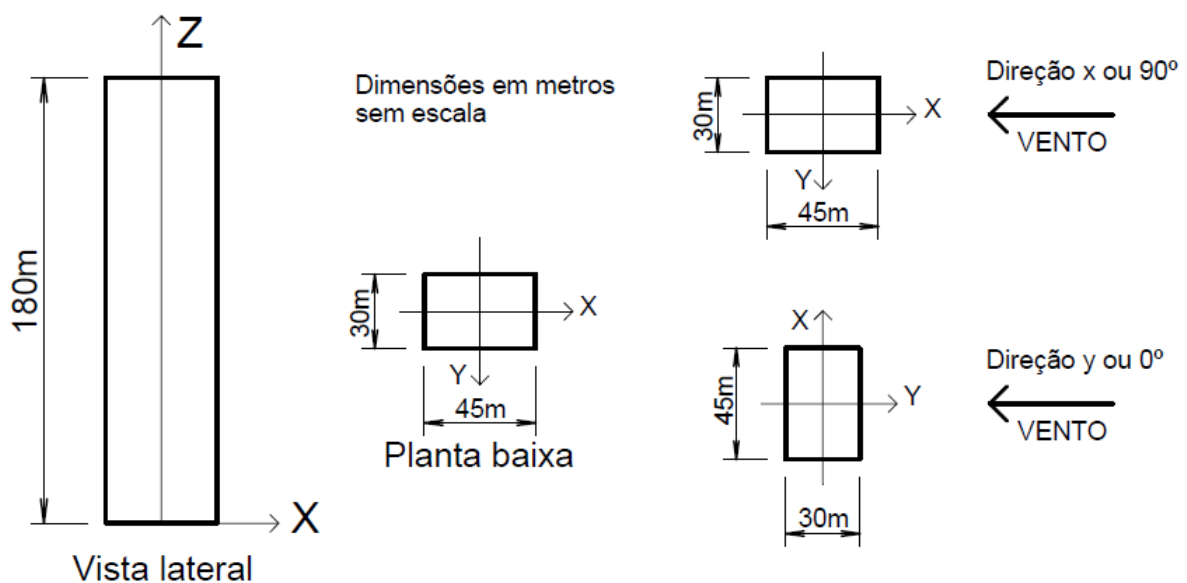


Figura 2.6: Vista lateral e planta baixa do CAARC e as duas direções de incidência do vento no modelo durante os ensaios.

Foram utilizadas cinco velocidades básicas do vento para cada direção de incidência do vento no modelo, adquiridas a partir da determinação da velocidade no topo do modelo.

Tanto para o fator topográfico S_1 quanto para o fator estatístico S_3 , que estão considerados no cálculo da velocidade de projeto, adotou-se o valor igual a 1,0. O fator topográfico S_1 , refere-se a um terreno plano ou fracamente acidentado, e o fator estatístico S_3 , refere-se a edificações para hotéis, residências, comércio e indústria com alto fator de ocupação.

Para a determinação do coeficiente de amplificação dinâmica, ξ , admitiu-se um terreno com rugosidade equivalente a categoria III, valor este extraído do gráfico na figura A1 (Anexo A). Ressalta-se, no entanto, que para valores de \bar{V}_p/fL maiores que 0,1, que é o limite nos gráficos, fez-se uma extrapolação das curvas.

Considerou-se o amortecimento estrutural, ζ , como sendo 1% (razão do crítico). Para as duas direções de incidência do vento utilizou-se a frequência do CAARC como sendo de 0,2Hz. Conforme a tabela 2.3, anteriormente apresentada na seção 2.5.4, tem-se para um terreno de categoria III, um expoente p com valor igual a 0,185 e para o coeficiente b um valor igual a 0,86. A forma modal x foi tomada como linear, assumindo o valor da unidade.

Seguindo a proposta da NBR-6123 (1988, p. 20 e p. 24), os valores dos coeficientes de arrasto, C_a , para ventos de baixa e alta turbulência são dados de acordo com a figura A2 (Anexo A). Onde h é a altura do CAARC, 180m, l_1 é o comprimento da face transversal à direção do vento, e l_2 é o comprimento da face paralela à direção do vento. Os coeficientes de arrasto para o vento em alta e baixa turbulência são, respectivamente, 1,1 e 1,45 para direção y, e 1,0 e 1,25 para direção x. Destaca-se, no entanto, que nestes exemplos a estrutura foi discretizada em trinta e seis seções, e para cada seção foi atribuída à mesma área de abrangência. Exemplos das planilhas utilizadas nos métodos de cálculo, considerando os valores do C_a segundo a NBR-6123 (1988), podem ser verificados nos Apêndices A e B.

Ressalta-se, porém, que são apresentados também, valores dos coeficientes de arrasto coletados nos ensaios em túnel de vento para este estudo de dissertação, sendo: para vento incidindo na direção y, C_a entre 0,97 e 1,40, e para vento incidindo na direção x, C_a entre 0,61 e 1,15. No Apêndice C, onde são apresentadas as planilhas de cálculo para cada método utilizado, pode-se verificar o valor do coeficiente de arrasto para cada respectiva altura no protótipo. Destaca-se, no entanto, que nestes exemplos a estrutura foi discretizada em dez seções, e para cada seção foram consideradas diferentes áreas de abrangência.

Para a resolução de cálculo através do método simplificado, elaborou-se uma planilha indicando as forças e momentos estáticos equivalentes, que englobam as ações estáticas e dinâmicas do vento por unidade de altura. Exemplos das planilhas utilizadas podem ser verificados no Apêndice A.

As tabelas 2.4 e 2.5 apresentam as respostas finais obtidas para o vento incidindo na direção y (face maior) e direção x (face menor), respectivamente.

Tabela 2.4: Resposta na direção longitudinal ao vento obtida através do cálculo pelo método simplificado NBR-6123 (1988) com vento incidindo na direção y (face maior).

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do modelo [m/s]	Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]	Coeficiente de arrasto	NBR-6123 – Escala Protótipo		
			Momento estático [MNm]	Momento flutuante [MNm]	Momento total [MNm]
1,05	20	1,1	171	147	318
		1,45	225	195	420
		túnel	178	157	335
2,10	40	1,1	686	616	1302
		1,45	904	812	1716
		túnel	716	655	1371
3,15	60	1,1	1541	1432	2973
		1,45	2031	1888	3919
		túnel	1607	1524	3131
4,20	80	1,1	2744	2638	5382
		1,45	3617	3478	7095
		túnel	2862	2808	5670
5,25	100	1,1	4284	4255	8539
		1,45	5646	5610	11256
		túnel	4467	4529	8996

Tabela 2.5: Resposta na direção longitudinal ao vento obtida através do cálculo pelo método simplificado NBR-6123 (1988) com vento incidindo na direção x (face menor).

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do modelo [m/s]	Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]	Coeficiente de arrasto	NBR-6123 – Escala Protótipo		
			Momento estático [MNm]	Momento flutuante [MNm]	Momento total [MNm]
1,05	20	1,0	103	90	193
		1,25	129	112	241
		túnel	96	85	181
2,10	40	1,0	416	373	789
		1,25	520	466	986
		túnel	384	355	739
3,15	60	1,0	934	868	1802
		1,25	1167	1085	2252
		túnel	864	823	1687
4,20	80	1,0	1663	1599	3262
		1,25	2079	1999	4078
		túnel	1538	1518	3056
5,25	100	1,0	2596	2579	5175
		1,25	3245	3224	6469
		túnel	2401	2448	4849

Para o método discreto, a solução de cálculos também foi realizada utilizando-se planilhas em programa Excel, porém agora, em duas etapas: cálculos intermediários e cálculos finais. Os cálculos intermediários envolveram a determinação das parcelas que compõem a força estática, F_{est} , e a flutuante, F_{flut} . A planilha de cálculos finais indica as forças e momentos estático, flutuante e total para cada seção da estrutura. Exemplos das planilhas utilizadas podem ser verificados no Apêndice B.

As tabelas 2.6 e 2.7 apresentam as respostas finais obtidas para o vento incidindo na direção y (face maior) e direção x (face menor), respectivamente.

Tabela 2.6: Resposta na direção longitudinal ao vento obtida através do cálculo pelo método discreto NBR-6123 (1988) com vento incidindo na direção y (face maior).

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do modelo [m/s]	Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]	Coeficiente de arrasto	NBR-6123 – Escala Protótipo		
			Momento estático [MNm]	Momento flutuante [MNm]	Momento total [MNm]
1,05	20	1,1	171	146	317
		1,45	225	192	417
		túnel	178	163	341
2,10	40	1,1	686	609	1295
		1,45	904	803	1707
		túnel	716	679	1395
3,15	60	1,1	1541	1416	2957
		1,45	2031	1867	3898
		túnel	1607	1581	3188
4,20	80	1,1	2744	2609	5353
		1,45	3617	3439	7056
		túnel	2862	2912	5774
5,25	100	1,1	4284	4207	8491
		1,45	5646	5547	11193
		túnel	4467	4697	9164

Tabela 2.7: Resposta na direção longitudinal ao vento obtida através do cálculo pelo método discreto NBR-6123 (1988) com vento incidindo na direção x (face menor).

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do modelo [m/s]	Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]	Coeficiente de arrasto	NBR-6123 – Escala Protótipo		
			Momento estático [MNm]	Momento flutuante [MNm]	Momento total [MNm]
1,05	20	1,0	103	89	192
		1,25	129	111	240
		túnel	96	87	183
2,10	40	1,0	416	369	785
		1,25	520	461	981
		túnel	384	364	748
3,37	60	1,0	934	858	1792
		1,25	1167	1073	2240
		túnel	864	844	1708
4,20	80	1,0	1663	1581	3244
		1,25	2079	1976	4055
		túnel	1538	1556	3094
5,25	100	1,0	2596	2550	5146
		1,25	3245	3188	6433
		túnel	2401	2509	4910

2.6 MÉTODOS TEÓRICO-NUMÉRICO PARA RESPOSTA TRANSVERSAL

Os modelos teóricos disponíveis para determinar a resposta transversal por desprendimento de vórtices têm caráter fundamentalmente simplificado, baseados em experimentos, que provém de tentativas, erros e acertos. Estes procedimentos empregam diversas técnicas para reproduzir as forças do escoamento na estrutura e aquelas oriundas da interação fluido-estrutura. Logo, com o confronto entre as respostas obtidas a partir de diferentes métodos de cálculo esperam-se diferenças na magnitude das respostas.

Nesta seção apresentam-se dois modelos teóricos para previsão da resposta transversal ao vento em edifícios altos.

2.6.1 Processo da norma brasileira NBR-6123 capítulo 10

De acordo com Blessmann (2005, pp. 203-207), esta proposta de metodologia de cálculo foi primeiramente apresentada por uma comissão de estudo em 1990, onde o modelo do procedimento de cálculo em estudo torna-se aplicável a edificações apoiadas apenas na base, e com pouca ou nenhuma variação da seção transversal ao longo da altura.

O procedimento para avaliar a sensibilidade da estrutura ao desprendimento de vórtices está limitado à determinação da velocidade crítica do vento, \bar{V}_{cr} , para a qual a frequência f_s , frequência de desprendimento de um par de vórtices, coincide com a frequência f_1 da estrutura, associada ao primeiro modo na direção perpendicular à direção do vento (primeira velocidade crítica). O modo correspondente de vibração é aproximado pela lei potencial, conforme equação 2.35:

$$y_1(z) = Y_0 (z/h)^\gamma \quad (\text{equação 2.35})$$

Onde: y_1 forma modal;

Y_0 amplitude da vibração na direção perpendicular à direção do vento, no topo da estrutura, isto é, para z igual à altura h .

Para a determinação da frequência e do expoente γ da forma modal são aplicáveis as especificações do capítulo 9 da NBR-6123 (1988, pp. 33-41).

A velocidade crítica correspondente ao primeiro modo é determinada pela equação 2.36:

$$\bar{V}_{cr} = \frac{f_1 l_1}{St} \quad (\text{equação 2.36})$$

Onde: f_1 frequência correspondente ao 1º modo de vibração;
 l_1 comprimento da face transversal à direção do vento, [m];
 St número de Strouhal.

O número de Strouhal é um coeficiente adimensional característico da seção transversal. Os valores de St considerados para o CAARC, são oriundos de uma equação empírica (equação 2.45), retirada da bibliografia de Liang et al. (2002). Ressalta-se, que esta bibliografia é apresentada adiante na seção 2.6.2, como sendo o segundo modelo analítico para previsão da resposta transversal ao vento.

A pressão dinâmica de cálculo, q_{cr} , é dada pela equação 2.37. Sendo \bar{V}_{cr} em m/s, e q_{cr} em N/m².

$$q_{cr} = 0,613 (\bar{V}_{cr})^2 \quad (\text{equação 2.37})$$

A amplitude da vibração induzida pelo desprendimento de vórtices, perpendicular à direção do vento, é dada conforme a equação 2.38:

$$Y_0 = \frac{q_{cr} l_1}{8\pi^2 f_1^2 \zeta_{ef}} \frac{1 + 2\gamma}{1 + \gamma} \frac{C_l C_R}{M_0} \quad (\text{equação 2.38})$$

Onde: ζ_{ef} razão de amortecimento efetivo, $\zeta_{ef} = \zeta + \zeta_{aer}$;
 ζ razão de amortecimento estrutural crítico;
 ζ_{aer} amortecimento aerodinâmico.

A massa média por unidade de comprimento, M_0 , em um modelo contínuo com massa por unidade de altura igual a $m(z)$, é dada pela equação 2.39:

$$M_0 = \frac{\int_0^h m(z)(z/h)^{2\gamma} dz}{\int_0^h (z/h)^{2\gamma} dz} \quad (\text{equação 2.39})$$

O coeficiente de correlação longitudinal, C_R , é dado pela equação 2.40:

$$C_R = 1 - \left(1 - \frac{L_R/l_1}{\lambda}\right)^{1+\gamma} \quad (\text{equação 2.40})$$

Onde: λ esbeltez da edificação, $\lambda = h/l_1$.

O comprimento de correlação da força lateral, L_R , está relacionado com a amplitude das vibrações transversais através da equação empírica, equação 2.41:

$$L_R/l_1 = 12 - 10e^{-4Y_0/l_1} \quad (\text{equação 2.41})$$

O coeficiente de força lateral, C_l , depende do número de Reynolds, da forma da seção transversal, da rugosidade superficial e da intensidade da turbulência do vento. Assim como acontece para o parâmetro St , o parâmetro C_l também é obtido a partir de uma equação empírica (equação 2.43), retirada da bibliografia de Liang et al. (2002).

O problema linear resultante da introdução das equações 2.40 e 2.41 na equação 2.38 pode ser resolvido por iteração, seguindo o seguinte roteiro: adotar $L_R/l_1 = 2$, correspondente à hipótese $Y_0/l_1 = 0$; calcular C_R e Y_0/l_1 ; recalculer L_R/l_1 e retornar a calcular C_R e Y_0/l_1 até atingir a convergência da razão Y_0/l_1 .

De acordo com a metodologia apresentada, partiu-se para o cálculo da resposta transversal. Porém, através dos valores recomendados para o modelo CAARC a convergência foi alcançada apenas para o vento incidente na direção y (face maior).

Tendo conhecimento de que o processo da NBR-6123 capítulo 10 considera no cálculo da amplitude à máxima resposta, ou seja, a velocidade crítica do vento, \bar{V}_{cr} , foram realizados os cálculos considerando apenas a velocidade crítica em cada direção de incidência do vento no protótipo. Para vento incidindo na direção y (face maior), \bar{V}_{cr} assume o valor de 96m/s, já para vento incidindo na direção x (face menor), \bar{V}_{cr} tem o valor de 90m/s. Estes valores apresentados para a velocidade crítica são oriundos dos resultados experimentais utilizando a técnica de integração de pressões em alta frequência através de ensaios no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann. Esta técnica experimental está relatada no capítulo 3, seção 3.3 deste estudo.

Considerando a escala real (escala do protótipo) para apresentação dos resultados, tem-se para vento incidindo na direção y , um momento total na base da estrutura igual à 99783MNm.

Exemplos das planilhas utilizadas nos cálculos através deste processo da norma, mostrando a não convergência (direção x) e a convergência (direção y) da razão Y_0/l_1 para o modelo *CAARC* podem ser verificados no Apêndice E.

As causas para a não convergência da razão Y_0/l_1 na direção x justificam-se pelos estimadores (parâmetros) que envolvem este processo da norma, assim como, a correspondência entre as propriedades dinâmicas da estrutura com caracterização do vento estudado.

Paluch (1999, 215p.), avaliou a aplicabilidade do procedimento da norma brasileira NBR-6123 capítulo 10 para a determinação da resposta transversal de torres e chaminés de concreto armado de seção transversal circular. Em seu trabalho o autor diz que da comparação dos parâmetros da resposta transversal obtidos através do processo da NBR-6123 capítulo 10, com as medições realizadas em seu estudo e em outros disponíveis na literatura técnica, se deduz que este procedimento da norma brasileira conduz a estimadores que em média subestimam a resposta. A partir desta constatação o autor apresenta uma proposta alternativa para este processo da norma, que é fundamentada a partir de outro modelo teórico. Por fim, através de comparações das respostas entre os procedimentos e os modelos teóricos, o autor sugere a adoção desta proposta alternativa para obtenção dos parâmetros da resposta transversal para a estrutura em estudo.

Núñez (2001, 141 p.), realizou um estudo experimental e teórico para determinar a resposta transversal da ação e efeitos do vento sobre uma torre de telecomunicação de concreto armado de seção circular. Em seu estudo o autor relata que ocorrem alterações na magnitude da resposta flutuante quando obtida em escoamento deslizando e turbulento com p igual a 0,23, que são ocasionadas principalmente pela componente lateral da turbulência atmosférica. O autor ressalta, no entanto, que tal situação não se repete no caso de escoamento uniforme e suave com p igual a 0,11.

2.6.2 Modelo matemático de Liang et al. (2002) para cargas dinâmicas transversais ao vento em edifícios altos retangulares

Nesta seção são apresentadas equações empíricas do espectro da força transversal ao vento, $f_n S_F(f_n)/\sigma^2$; coeficiente de força lateral, C_l ; número de Strouhal, St ; e função de coerência, r_{ij} , da força transversal ao vento para edifícios altos retangulares.

Liang et al. (2002, pp. 1757-1770) apresentam este completo modelo analítico para cargas dinâmicas transversais ao vento. Este modelo está em boa conformidade com os resultados experimentais obtidos em testes em túnel de vento pelo próprio autor, podendo assim, considerá-lo aplicável e confiável.

Geralmente é dito, que a magnitude da força transversal ao vento, que age em edifícios altos retangulares, muda junto com as relações laterais da seção transversal; em outras palavras, o coeficiente de força lateral é função da proporção lateral em uma seção transversal. A média do coeficiente de força lateral, de um modelo de edifício retangular para todos os níveis, pode ser calculada conforme equação 2.42:

$$\bar{C}_l = \sum_{i=1}^5 \frac{h_i}{h} \frac{(F_y^{(i)})_{rms}}{\rho V^2(z_i) (l_1 h_i)/2} = \sum_{i=1}^5 \frac{(F_y^{(i)})_{rms}}{\rho V^2(z_i) (l_1 h)/2} \quad (\text{equação 2.42})$$

Onde:

- h altura da estrutura, [m];
- h_i altura reduzida do nível i da estrutura;
- ρ massa específica do ar, [kg/m³];
- l_1 comprimento da face transversal à direção do vento, [m];
- $V(z_i)$ velocidade média do vento na altura do nível i , [m/s];
- $(F_y^{(i)})_{rms}$ força rms transversal ao vento no nível i , [N].

De acordo com os resultados experimentais de Liang et al. (2002, pp. 1757-1770), o parâmetro coeficiente de força lateral, C_l , aumenta conforme aumenta a magnitude da relação lateral. O C_l de cada nível do mesmo modelo, diminui conforme aumenta a altura; ou seja, diminui junto com a intensidade da turbulência. Através da equação 2.43, tem-se uma equação empírica para obtenção do \bar{C}_l .

$$\bar{C}_1 = 0,045 (l_2/l_1)^3 - 0,335 (l_2/l_1)^2 + 0,868 (l_2/l_1) - 0,174 \quad (\text{equação 2.43})$$

Onde: l_2 comprimento da face paralela à direção do vento, [m].

A força transversal ao vento que atua em edifícios altos retangulares é principalmente causada por desprendimento alternado de vórtices, que pode ser observado na curva do espectro da força transversal ao vento (figura 2.7), retirada da bibliografia de Liang et al. (2002, p. 1763). Existe um pico evidente nesta curva, e a frequência reduzida correspondente ao pico é igual à frequência reduzida dominante de desprendimento de vórtices, ou seja, o número de Strouhal. Conforme Liang et al. (2002, p. 1761), quando a relação lateral resultar em $l_2/l_1 < 3$, existe um pico estreito e distinto na curva do espectro da força transversal ao vento; assim a largura de banda é pequena.

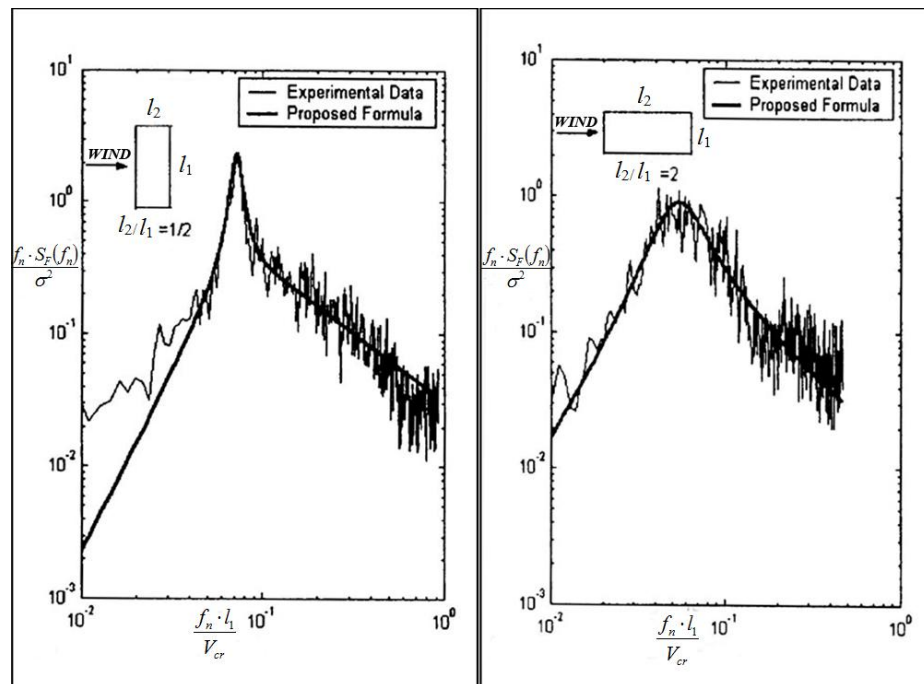


Figura 2.7: Comparação do espectro da força transversal ao vento entre equação proposta e resultados experimentais, Liang et al. (2002, p. 1763).

Para ajustar a função analítica aos resultados experimentais, a equação 2.44 apresenta uma proposta de equação normalizada em uma forma de combinação de dois termos.

$$\frac{f_n S_F(f_n)}{\sigma^2} = A \frac{h(C_1) \bar{f}^2}{(1 - \bar{f}^2)^2 + C_1 \bar{f}^2} + (1 - A) \frac{C_2^{0,50} \bar{f}^3}{1,56 [(1 - \bar{f}^2)^2 + C_2 \bar{f}^2]} \quad (\text{equação 2.44})$$

Onde: f_n frequência fundamental de vibração livre;
 f_s frequência de desprendimento de um par de vórtices;
 \bar{f} relação de frequências, $\bar{f} = f_n/f_s$;
 σ força rms transversal ao vento para a altura z , $\sigma = \frac{1}{2} \rho V^2(z) \bar{C}_1 l_1$;
 S área da seção transversal, $S = l_1 l_2$;

Sendo: $h(C_1) = 0,179 C_1 + 0,65 \sqrt{C_1}$;

Onde: $C_1 = [0,47 (l_2/l_1)^{2,8} - 0,52 (l_2/l_1)^{1,4} + 0,24]/(h/\sqrt{S})$;

$C_2 = 2$;

$A = (h/\sqrt{S})[-0,118(l_2/l_1)^2 + 0,358(l_2/l_1) - 0,214] + [0,066(l_2/l_1)^2 - 0,26l_2/l_1 + 0,894]$.

Na equação 2.45, Liang et al. (2002, p. 1764) mostram uma equação para várias seções que busca ajustar o parâmetro número de Strouhal, St . Esta equação é aplicável quando a razão, $1/2 < l_2/l_1 \leq 4$, for satisfeita.

$$St = 0,002 (l_2/l_1)^2 - 0,023 (l_2/l_1) + 0,105 \quad (\text{equação 2.45})$$

A função de coerência, r_{ij} , (equação 2.46) é usada por muitas literaturas como a correlação de meia-amplitude de excitação na esteira, ou função de coerência vertical das forças transversais ao vento. O co-espectro das forças transversais ao vento entre dois diferentes níveis decaem, enquanto que a distância entre os dois níveis aumentam. Vickery (1972 *apud* Liang et al. 2002, p. 1764) propõem uma expressão empírica, equação 2.46:

$$r_{ij} = \cos(\alpha_1 \Delta) \exp \left\{ - \left[\frac{\Delta}{\alpha_2} \right]^2 \right\} \quad (\text{equação 2.46})$$

Onde: $\Delta = \frac{|z_i/z_j|}{l_1}$.

No estudo de Liang et al. (2002, pp. 1757-1770), nenhum co-espectro negativo das forças transversais ao vento entre os níveis foi monitorado; conseqüentemente, baseado nos dados experimentais do co-espectro das forças transversais ao vento entre dois diferentes níveis, foi proposta a equação 2.47. Os valores do parâmetro α para esta equação estão apresentados na tabela 2.8.

$$r_{ij} = \exp \left[- \left(\frac{\Delta}{\alpha} \right)^2 \right] \quad (\text{equação 2.47})$$

Tabela 2.8: Valores do parâmetro α , Liang et al. (2002, p. 1766).

l_2/l_1	1/4 a 1	2 a 4
α	5,56	7,7

2.6.3 Aplicação ao CAARC

A seguir apresentam-se os resultados aplicados ao CAARC onde foram utilizadas as equações propostas por Liang et al. (2002, pp. 1757-1770). Adiante, no capítulo 5, seção 5.2, estas respostas são comparadas com as respostas experimentais coletadas em túnel de vento obtidas a partir dos métodos experimentais empregados neste estudo.

Os dados do CAARC foram processados por um *script* de MATLAB. Neste programa consideraram-se as propriedades físicas e dinâmicas da estrutura, além das características do vento incidente. A seguir foram calculados os parâmetros relacionados nas equações empíricas anteriormente apresentadas (equações 2.43, 2.44, 2.45 e 2.47), sendo respectivamente: \bar{C}_l (coeficiente de força lateral médio); $f_n S_F(f_n)/\sigma^2$ (espectro da força transversal ao vento); St (número de Strouhal); e r_{ij} (função de coerência).

Os testes realizados em túnel de vento na pesquisa de Liang et al. (2002) utilizam a técnica de integração de pressões em alta frequência (HFPI), onde ocorre a medição simultânea de pressões dinâmicas no edifício. Lembra-se, no entanto, que esta técnica experimental utilizada por Liang et al. (2002) também é empregada em um dos estudos experimentais deste trabalho de dissertação, apresentada no capítulo 3, seção 3.3.

Através do método HFPI, obtêm-se as resultantes de forças e momentos aplicadas na superfície externa da edificação, sendo que, a partir de então, procede-se ao cálculo da resposta dinâmica por superposição das respostas modais. Assim, apresenta-se a equação 2.48, equação matricial de equilíbrio dinâmico da estrutura.

$$\mathbf{M}\ddot{\vec{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\vec{u}}(t) + \mathbf{K}\vec{u}(t) = \vec{P}(t) \quad (\text{equação 2.48})$$

Onde:

- $\ddot{\vec{u}}(t)$ vetor de aceleração generalizada;
- $\dot{\vec{u}}(t)$ vetor de velocidade generalizada;
- $\vec{u}(t)$ vetor de deslocamento generalizado;
- \mathbf{M} matriz de massa;
- \mathbf{C} matriz de coeficientes de amortecimento;
- \mathbf{K} matriz de rigidez;
- $\vec{P}(t)$ vetor de forças externas.

Para tanto, as forças e momentos são convertidos em forças modais, através de uma projeção algébrica que utiliza as formas modais fornecidas. Esta projeção pode ser desacoplada através dos vetores de forma modal (autovetores), \vec{q}_k , do sistema dinâmico. Para isso a resposta total é substituída pela resposta em apenas um modo k , equação 2.49:

$$\vec{u}_k(t) = \vec{q}_k u_k(t) \quad (\text{equação 2.49})$$

Onde:

- $u_k(t)$ função escalar do tempo denominada resposta modal;
- $\vec{q}_k(t)$ vetores de forma modal (autovetores).

Substituindo $\vec{u}(t)$ na equação 2.48, e pré-multiplicando todos os termos por \vec{q}_k^T (transposta de \vec{q}_k), chega-se à equação 2.50. Devido às propriedades dos autovalores \vec{q}_k , os termos entre colchetes são todos escalares.

$$[\vec{q}_k^T \mathbf{M} \vec{q}_k] \ddot{u}_k(t) + [\vec{q}_k^T \mathbf{C} \vec{q}_k] \dot{u}_k(t) + [\vec{q}_k^T \mathbf{K} \vec{q}_k] u_k(t) = [\vec{q}_k^T \vec{P}(t)] \quad (\text{equação 2.50})$$

Onde:

- $[\vec{q}_k^T \mathbf{M} \vec{q}_k] = M_k$ (massa modal);
- $[\vec{q}_k^T \mathbf{C} \vec{q}_k] = C_k$ (amortecimento modal);
- $[\vec{q}_k^T \mathbf{K} \vec{q}_k] = K_k$ (rigidez modal);
- $[\vec{q}_k^T \vec{P}(t)] = P_k(t)$ (força externa modal).

É importante observar que, por uma questão de simplicidade na formulação, se compatibilizam os graus de liberdade implícitos na equação 2.48 com as zonas de integração das pressões aerodinâmicas. Na prática isso não precisa necessariamente ser feito, desde que as forças aerodinâmicas se apliquem em correspondência com os respectivos graus de liberdade no vetor de forças externas, $\vec{P}(t)$. Considera-se a seguir que há $3n$ graus de liberdade (duas translações horizontais e uma rotação em torno do eixo vertical) correspondentes a n zonas de integração de pressões, cada uma associada a duas forças horizontais ortogonais e um momento torçor, oriundos da integração de pressões.

Com o desacoplamento da equação 2.48, e considerando-se que a força modal é um processo aleatório ergódico e estacionário, pode-se obter o espectro da resposta em deslocamento através da solução no domínio da frequência para um sistema com um único grau de liberdade, equação 2.51:

$$S_{U_k}(f) = |H_k(f)|^2 S_{P_k}(f) \quad (\text{equação 2.51})$$

Onde: $S_{U_k}(f)$ espectro da resposta modal em deslocamento;

$S_{P_k}(f)$ espectro da resposta modal em força;

$H_k(f)$ função de admitância mecânica.

A função de admitância mecânica é dada pela equação 2.52:

$$|H_k(f)| = \left[K_k \sqrt{(1 - \beta_k^2)^2 + (2\zeta_k \beta_k)^2} \right]^{-1} \quad (\text{equação 2.52})$$

Onde: β_k razão de frequência ressonante, $\beta_k = f/f_k$;

ζ_k razão de amortecimento crítico, $\zeta_k = C_k/(4\pi M_k f_k)$.

Observa-se que, na equação 2.51 falta ainda definir o espectro da força modal, que depende dos espectros das forças em todas as n zonas de integração. Assim, considera-se que a força modal anteriormente dada na equação 2.50, assume a seguinte forma, equação 2.53:

$$P_k(t) = \sum_{i=1}^n q_{k,i} P_i(t) \quad (\text{equação 2.53})$$

Considerando que a densidade espectral é de fato densidade de variância, e considerando-se que a variância de uma soma é igual à soma cruzada das covariâncias, tem-se para o espectro da força modal, equação 2.54:

$$S_{P_k}(f) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n q_{k,i} q_{k,j} S_{P_i P_j}(f) \quad (\text{equação 2.54})$$

Onde: $S_{P_i P_j}(f)$ espectro cruzado (análogo a covariância) entre as parcelas flutuantes das forças nas zonas de integração i e j .

Este espectro cruzado é modelado através dos espectros individuais e uma função de coerência $r_{ij}(f)$, logo, este espectro cruzado é assim apresentado, equação 2.55:

$$S_{P_i P_j}(f) = r_{ij}(f) \sqrt{S_{P_i}(f) S_{P_j}(f)} \quad (\text{equação 2.55})$$

A força rms transversal ao vento, σ , considerada anteriormente na equação 2.44 (equação normalizada do espectro de potência), tem a seguinte forma (equação 2.56):

$$\sigma = p_d C_1 (l_1 \Delta z) \quad (\text{equação 2.56})$$

Onde: p_d pressão dinâmica;

Δz diferença de altura entre dois níveis considerados da estrutura.

Assim, a equação 2.57 apresenta o espectro da força modal.

$$S_{F_k}(f) = (C_1 l_1 \Delta z)^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (p_{di} q_i) (p_{dj} q_j) r_{ij} \sqrt{S_{F_i} S_{F_j}} \quad (\text{equação 2.57})$$

Após algumas substituições, chega-se a uma expressão para a densidade espectral da resposta modal, equação 2.58:

$$S_{U_k}(f) = 4 |H_k(f)|^2 S_V(f) \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{\bar{p}_{di} q_{ki}}{\bar{v}_i} \right) \left(\frac{\bar{p}_{dj} q_{kj}}{\bar{v}_j} \right) r_{ij}(f, z_i, z_j) \right] \quad (\text{equação 2.58})$$

Onde se considerou que a densidade espectral da velocidade do vento, $S_V(f)$, independe da zona de integração, e também que a função de admitância mecânica é igual à unidade.

Uma vez calculada a densidade espectral, $S_{U_k}(f)$, pela equação 2.58, a variância da resposta estrutural pode ser obtida pela integral, equação 2.59:

$$\sigma_{U_k}^2 = \int_0^{\infty} S_{U_k}(f) df \quad (\text{equação 2.59})$$

A partir da integração do espectro de deslocamento modal, torna-se possível calcular os picos. O deslocamento modal de pico, $u_{k,\text{pico}}$, é obtido através da multiplicação do fator de pico do deslocamento modal pelo desvio padrão do deslocamento modal, conforme equação 2.60:

$$u_{k,\text{pico}} = g_{u_k} \sigma_{U_k} \quad (\text{equação 2.60})$$

Onde: g_{u_k} fator de pico do deslocamento modal, obtido da teoria de processos aleatórios;

σ_{U_k} desvio padrão do deslocamento modal.

A definição do vetor de deslocamentos de pico, $\vec{u}_{k,\text{pico}}$, é através da multiplicação entre o deslocamento modal de pico e a forma modal (normalizada pela unidade no topo), conforme equação 2.61:

$$\vec{u}_{k,\text{pico}} = u_{k,\text{pico}} q_k \quad (\text{equação 2.61})$$

Onde: q_k forma modal.

Finalmente, o deslocamento máximo no topo da estrutura, $u_{\text{topo},\text{max}}$, será o próprio deslocamento modal, uma vez que a forma modal está normalizada pela unidade, $q_{k,\text{topo}} = 1$.

A figura 2.8 compara os espectros da força transversal ao vento para o CAARC gerada a partir do programa em MATLAB (curvas na cor azul), com os resultados experimentais da metodologia de Liang et al. (2002, pp. 1757-1770) (curvas na cor preta). No gráfico à

esquerda, com vento incidindo na face maior do modelo (direção y), pode-se perceber um bom ajuste entre as respostas, principalmente para as respostas no entorno da velocidade crítica, inclusive coincidindo no pico (resposta máxima). Já para vento incidindo na face menor do modelo (direção x), gráfico à direita, as curvas assemelham-se moderadamente.

Na figura 2.9, três gráficos são apresentados. Estes gráficos foram gerados pelo programa em MATLAB para o CAARC, onde a partir de suas análises verifica-se que o espectro da força (gráfico superior), espectro do deslocamento (gráfico inferior), e o espectro da função de admitância mecânica (gráfico intermediário), apresentam sua resposta máxima para a mesma frequência de desprendimento de vórtices.

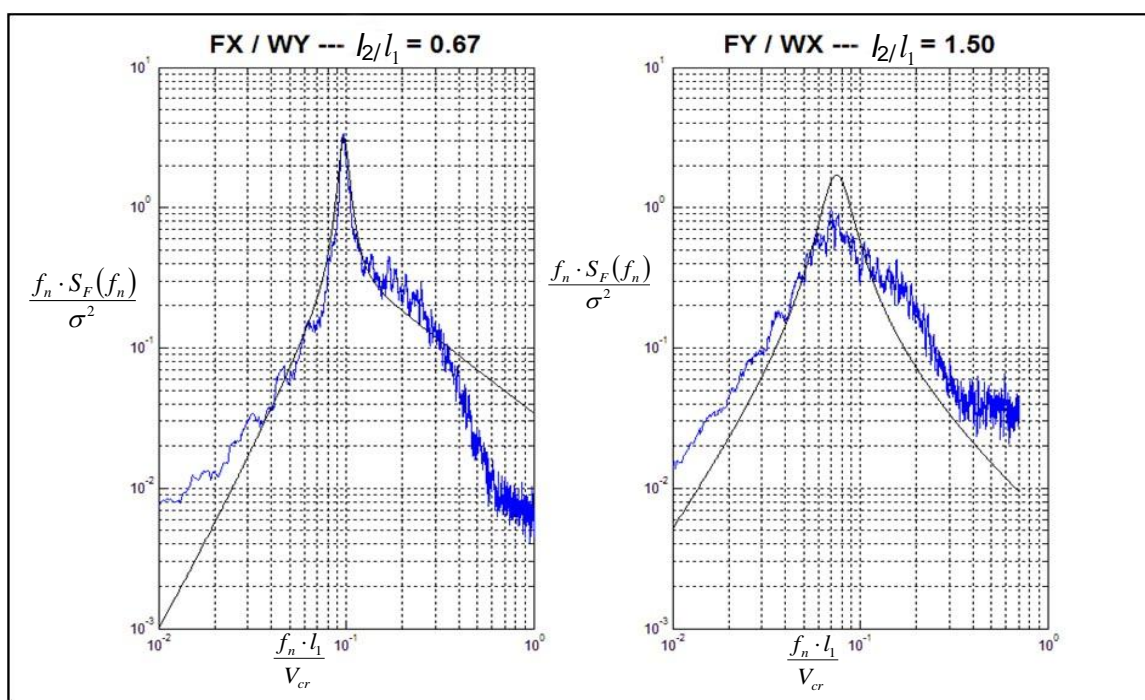


Figura 2.8: Comparação do espectro da força transversal ao vento para o CAARC entre resultados via programa em MATLAB (curvas na cor azul) e através dos resultados experimentais de Liang et al. (2002, pp. 1757-1770) (curvas na cor preta).

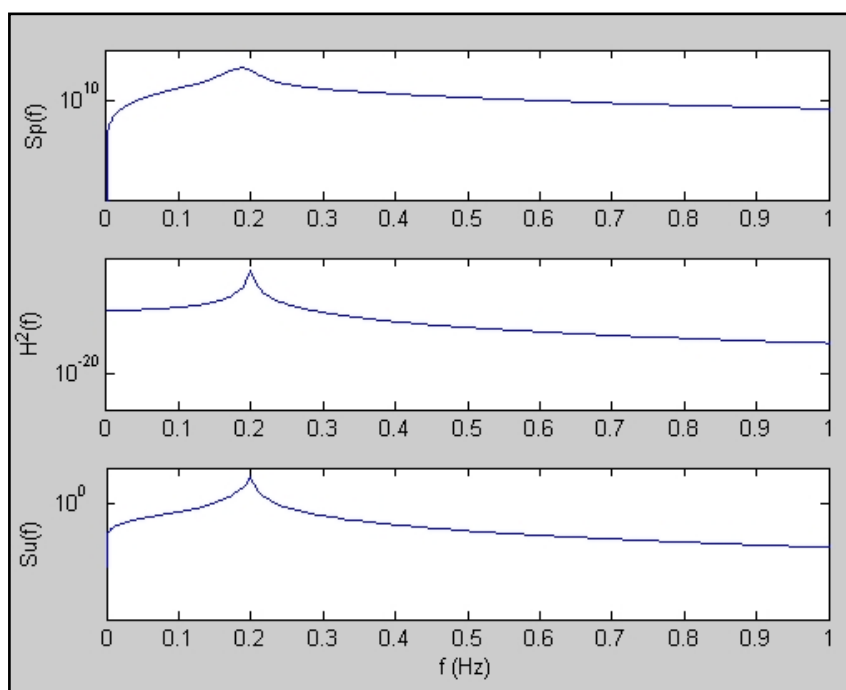


Figura 2.9: Exemplificação para o CAARC dos espectros das forças e deslocamentos modais (gráfico superior e inferior, respectivamente) e função de admitância mecânica (gráfico intermediário).

As tabelas 2.9 e 2.10 apresentam as respostas finais obtidas para o vento incidindo na direção y (face maior) e direção x (face menor), respectivamente.

Tabela 2.9: Resposta na direção transversal ao vento obtida através do cálculo pela metodologia de Liang et al. (2002) com vento incidindo na direção y (face maior).

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do modelo [m/s]	Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]	Escala protótipo
		Método de Liang et al. (2002)
		Momento total [MNm]
2,94	56	5651
3,36	64	8207
3,78	72	12157
4,20	80	19794
4,62	88	35985
5,04	96	46170
5,46	104	42809
5,88	112	38001
6,30	120	34737

Tabela 2.10: Resposta na direção transversal ao vento obtida através do cálculo pela metodologia de Liang et al. (2002) com vento incidindo na direção x (face menor).

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do modelo [m/s]	Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]	Escala protótipo
		Método de Liang et al. (2002)
		Momento total [MNm]
2,10	40	3130
2,62	50	6872
3,15	60	14317
3,67	70	26327
4,20	80	35447
4,72	90	37495
5,25	100	36932
5,77	110	36289
6,30	120	36118

2.7 EXEMPLO DA DISPERSÃO DE RESULTADOS PARA SEÇÃO CIRCULAR ATRAVÉS DE DIFERENTES MÉTODOS DE CÁLCULO

Nesta seção são apresentados três diferentes métodos para o cálculo da resposta transversal ao vento. Tem-se aqui como objetivo principal, mostrar a dispersão de resultados através dos diferentes métodos para a mesma estrutura. A estrutura utilizada nesta comparação de métodos é um cilindro com raio igual a 20,73m e massa específica igual 160kg/m³. As demais propriedades geométricas e dinâmicas deste cilindro são mostradas na apresentação de cada método. No Apêndice F são apresentadas as planilhas de cálculo correspondentes aos métodos utilizados.

2.7.1 Processo da norma brasileira NBR-6123 capítulo 10

Não se faz necessário apresentar novamente o procedimento de cálculo do processo da NBR-6123 capítulo 10, pois o mesmo foi relatado anteriormente na seção 2.6.1. Assim, através dos valores recomendados neste processo da norma para o cilindro, tem-se como resposta um momento total na base da estrutura, $M_{total} = 36622\text{MNm}$.

2.7.2 Norma canadense NBC-1985

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

Os efeitos dinâmicos causados pelo desprendimento de vórtices em uma estrutura cilíndrica podem ser substituídos por uma força estática agindo no terço superior. Essa força é dada por unidade de altura conforme equação 2.62:

$$F_L = \frac{C_1}{\sqrt{\lambda} \sqrt{\zeta - C_2 \frac{\rho D^2}{M}}} q_H D \quad (\text{equação 2.62})$$

Onde:	ζ	razão de amortecimento estrutural crítico;
	λ	esbeltez da estrutura, $\lambda = H/D$;
	H	altura da estrutura, [m];
	D	diâmetro ou largura da estrutura, [m];
	q_H	pressão dinâmica correspondente a V_H , onde V_H é a velocidade média no topo da estrutura em [m/s];
	M	massa média por unidade de comprimento no terço superior da estrutura, [kg/m];
	ρ	massa específica do ar, [kg/m ³];
	$C_1 = \frac{3\sqrt{\lambda}}{4}$	para $\lambda < 16$;
	$C_2 = 0,6$.	

De acordo com o Supplement to the National Building Code of Canada Vortex Shedding (NBC-1985, p. 160), a aplicação desta equação fornecerá uma estimativa grosseira dos efeitos do desprendimento de vórtices se a carga for aplicada sobre um comprimento de até 1/3 do comprimento total, e em uma posição centrada sobre a localização do deslocamento máximo para o modo de vibração em estudo.

Então, substituindo os dados da estrutura em estudo na equação 2.62, tem-se o valor da força lateral devido ao desprendimento de vórtices no terço superior, $F_L = 2766692\text{N/m}$. Através da multiplicação desta força lateral pelo comprimento do terço superior, 60m, tem-se a força lateral devido ao desprendimento de vórtices considerada para a altura H da estrutura, $F_H = 166\text{MN}$. Aplicando esta força no topo da estrutura, obtêm-se o momento total na base, $M_{\text{total}} = 29880\text{MNm}$.

2.7.3 Modelo simplificado de Vickery e Basu (1983)

O modelo simplificado de Vickery e Basu (1983), caracteriza-se como sendo um modelo matemático de um grau de liberdade, estando baseado na ideia do amortecimento negativo. Conforme Menon et al. (1997, p. 457), este modelo desfruta de grande aceitação, constituindo a base dos procedimentos de normas como, por exemplo, a norma canadense NBC (1985), ACI 307 (1988) e IS 4998 (1992).

Outra característica distinta para este método, é sua aplicação simplificada do método de análise modal de estruturas submetidas a excitações aleatórias estacionárias. Dado que não considera a interação fluido-estrutura, este modelo somente é aplicável na zona de vibração forçada, quando a amplitude da resposta não excede 1% do diâmetro da estrutura, aproximadamente.

O fato de que a maioria das estruturas esbeltas e altas tem suas frequências naturais de vibração suficientemente definidas e separadas, além de baixos valores de amortecimento estrutural, implica que o acoplamento entre os modos de vibração é pequeno ou inexistente. Estes fatores indicam que o uso da técnica de análise modal é adequado.

A partir do método de análise modal, a resposta total da estrutura pode ser calculada superpondo à obtida em cada modo de vibração, conforme indicado na equação 2.63:

$$y(z, t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \varphi_i(z) \quad (\text{equação 2.63})$$

Onde: $y(z, t)$ deslocamento transversal na cota z , no instante de tempo t ;

$a_i(t)$ coeficiente modal para o modo i ;

$\varphi_i(z)$ forma modal para o modo i .

Considerando que o vento seja representado em termos estatísticos, assim como as forças e a resposta, a teoria de vibração pode ser aplicada. Logo, a equação 2.63 pode ser reescrita em termos estatísticos, chegando-se assim a equação 2.64:

$$\sigma_y^2(z) = \sum_{i=1}^n \sigma_{yi}^2 \varphi_i^2(z) \quad (\text{equação 2.64})$$

Onde: $\sigma_y^2(z)$ variância da resposta ao longo da cota z ;

σ_{yi}^2 variância da resposta modal para o modo i .

De acordo com Vickery e Basu (1983, p. 159), é razoável desprezar a variação da velocidade do vento com a altura (gradiente de velocidade nulo), e considerar uma velocidade constante igual à velocidade média do terço superior. Normalmente, a resposta calculada assumindo a atuação das forças apenas no terço superior conduz a valores próximos (diferença menor que 10%) em relação aos valores calculados considerando as forças sobre a altura total da estrutura. A equação 2.65 determina a resposta simplificada para estruturas alteadas de diâmetro aproximadamente constante, $d(h)/d(0) > 0,5$.

$$\frac{\hat{y}(h)}{d_0} = \frac{g_y \tilde{C}_1(d_0) \varphi(h) \rho d_0^2 \left\{ \frac{\sqrt{\pi} l}{2(\lambda+2)} \right\}^{1/2} \psi(B, V/V_{cr})}{\left\{ \frac{1}{h} \int_0^h \varphi^2(z) dz \right\}^{1/2} \{\zeta + \zeta_{aer}(V/V_{cr})\}^{1/2}} \quad (\text{equação 2.65})$$

Onde: $\hat{y}(h)$ amplitude máxima esperada no topo da estrutura, [m];

g_y fator de pico;

$\tilde{C}_1(d_0)$ valor rms do coeficiente de força lateral, correspondente a cota d_0 ;

d_0 diâmetro médio sobre o terço superior da estrutura, [m];

$\varphi(h)$ forma modal;

h altura da estrutura, [m];

ρ massa específica do ar, [kg/m³];

l comprimento de correlação em número de diâmetros;

St número de Strouhal;

$$\frac{\hat{y}(h)}{d_0} = \frac{\frac{g_y \bar{C}_1(d_0) \varphi(h) \rho d_0^2}{8\pi^2 St^2 M} \left\{ \frac{\sqrt{\pi} l}{2(\lambda+2)} \right\}^{1/2} \psi(B, V/V_{cr})}{\left\{ \frac{1}{h} \int_0^h \varphi^2(z) dz \right\}^{1/2} \{\zeta + \zeta_{aer} (V/V_{cr})\}^{1/2}} \quad (\text{equação 2.65})$$

Onde: M massa média por unidade de comprimento no terço superior da estrutura, [kg/m];
 λ esbelteza da estrutura;
 ζ razão de amortecimento estrutural crítico;
 ζ_{aer} amortecimento aerodinâmico.

A equação 2.66 foi deduzida considerando que o gradiente de velocidades e de frequências de desprendimento de vórtices, no terço superior da estrutura, seja nulo.

$$\psi(B, V/V_{cr}) = \frac{1}{\sqrt{B}} (V/V_{cr})^{3/2} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1 - (V/V_{cr})^{-1}}{B} \right)^2 \right] \quad (\text{equação 2.66})$$

Onde: B parâmetro de largura do espectro, $B = 0,10 + 2I_1$;
 I_1 intensidade da componente longitudinal da turbulência, $I_1 = \sigma_1/V$;
 V velocidade média do vento no terço superior da estrutura, [m/s];
 V_{cr} velocidade crítica, [m/s];
 f_n frequência fundamental de vibração livre da estrutura, [Hz].

Portanto, através da aplicação deste modelo de cálculo à estrutura em estudo, determina-se a resposta transversal máxima no topo da estrutura, na situação de desprendimento de vórtices com frequência igual à frequência fundamental de vibração livre da estrutura.

A utilização dos parâmetros aerodinâmicos foi feita a partir das características dos escoamentos deslizantes e turbulentos com expoente da curva de potência p igual a 0,185, anteriormente indicado na seção 2.5.4. Os demais parâmetros foram obtidos no trabalho de Vickery (1988, pp. 273-296), que considera efeitos de tridimensionalidade. Portanto, através deste procedimento de cálculo, chega-se ao momento total na base da estrutura, $M_{total} = 12681\text{MNm}$.

2.8 TRABALHOS ANTERIORES

- a) Nos últimos anos diversas técnicas de modelamento e sistemas associados de instrumentação sobre vibrações em edifícios altos induzidos pelo vento estão sendo muito bem documentados por muitos pesquisadores. A seguir apresentam-se os principais estudos com abordagem para esta dissertação:
- b) Xie, J. e Irwin, P.A. (1998, pp. 579-590), apresentam um método de balança de força em altíssima frequência para determinar a resposta induzida pelo vento em um edifício complexo para testes em túnel de vento. Os pesquisadores observam que através da utilização deste método em comparação ao método tradicional de balança de força, a previsão da resposta torcional pode ser significativamente melhorada;
- c) Thepmongkorn, et al. (1999, pp. 171-181), apresentam uma técnica alternativa de modelamento aeroelástico que reproduz respostas de flexo-torção, sem a complexidade dos modelos de múltiplos graus de liberdade, chegando assim, a excelentes resultados;
- d) Liang et al. (2002, pp. 1757-1770), sugerem formulações empíricas e analíticas para a determinação da resposta transversal ao vento em edifícios altos de seção transversal retangular. Os resultados são comparados aos obtidos em ensaios em túnel de vento apresentando boa conformidade;
- e) Oliveira (2003, 101p.), apresenta um sistema mecânico que possibilita ensaios em túnel de vento de modelos aeroelásticos do tipo equivalente, visando à obtenção da resposta flutuante induzida nas direções longitudinal e transversal ao vento. O autor relata que a técnica proposta é válida, uma vez que os resultados obtidos nos ensaios são coerentes com os obtidos por outros pesquisadores;
- f) Miguel (2003, 138p.), determina as respostas longitudinal e transversal frente à ação do vento, através de um estudo teórico e experimental, em modelo reduzido do CAARC. Na metodologia teórica foram utilizadas as normas brasileira e canadense. O estudo experimental contemplou-se em duas etapas: ensaios dinâmicos, com modelo aeroelástico equivalente de dois graus de liberdade; e ensaios estáticos, utilizando-se uma balança de momentos;

- g) Trein (2005, 154p.), desenvolve um modelo aeroelástico do tipo *stick*, que simula as propriedades geométricas e dinâmicas de edifícios altos para ensaios em túnel de vento, obtendo resultados que reforça a certeza de que técnicas experimentais são mais apropriadas na estimativa dos esforços devidos ao vento em estruturas;
- h) Lin et al. (2005, pp. 217-242), realizam extensos testes em nove modelos de edifícios com diferentes seções transversais para estudar as características da força do vento em edifícios altos. Adotou-se nos experimentos a comparação dos métodos *HFPI* (Integração de Pressões em Alta Frequência) e *HFFB* (Balança de Força em Alta Frequência), onde através de uma suposição com forma modal linear, as duas técnicas de medição concordam para forças na base e espectros de momentos. Porém, para estruturas com formas modais não-lineares o método *HFFB* pode estar incorreto, pois fornece apenas os coeficientes e espectros de momento na base e não a variação destes com a altura;
- i) Dragoiescu, et al. (2006, pp. 1-10), descreveu uma investigação detalhada onde apontou e quantificou as vantagens e limitações dos métodos *HFPI* e *HFFB*. O trabalho focalizou em comparações os resultados de carga e resposta para o edifício padrão *CAARC*;
- j) Zhang, A. e Gu, M. (2008, pp. 2067-2079), através de testes experimentais e análises teóricas investigam os efeitos de interferência da ação do vento nas distribuições de pressões em um edifício adjacente a outro em disposição escalonada. Os resultados mostram um acordo qualitativo nas previsões numéricas em comparação com os testes experimentais;
- k) Oliveira (2009, pp. 1-204), desenvolveu um equipamento denominado balança dinâmica de três graus de liberdade (*BD3GDL*). Este equipamento consiste em um sistema mecânico com três graus de liberdade – rotação de três eixos ortogonais entre si em torno de um mesmo ponto –, possibilitando a regulagem do momento de inércia de massa, da rigidez rotacional e do amortecimento estrutural de cada um dos três movimentos. Nesta pesquisa o autor tem o propósito de simplificar o processo de modelagem aeroelástica de edificações para as quais o conhecimento da resposta nos dois primeiros modos de vibração livre em flexão e do primeiro modo de torção seja suficiente.

3 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS EM TÚNEL DE VENTO

O projeto experimental para cada técnica de ensaio deste estudo apresenta-se neste capítulo.

3.1 TÚNEL DE VENTO *PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN*

Pioneiro na América Latina, o Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann*, figura 3.1, está localizado no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Este túnel de vento, que leva o nome do engenheiro civil Joaquim Blessmann foi fundado em 1972, e projetado para realizar ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis. Conforme Reisdörfer (2007, p. 14), as principais áreas de estudo foram ampliadas, sendo, hoje, classificadas em ambiental, meteorológica, estrutural e construtiva.



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

Trata-se de um túnel de vento de retorno fechado, possuindo uma relação comprimento/altura da câmara principal de ensaios igual a 10,4 e dimensões 1,30m × 0,90m × 9,32m (largura × altura × comprimento). A velocidade máxima do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme e suave, sem modelos, é de 45m/s (162km/h). As hélices do ventilador são acionadas por um motor elétrico de 100HP e a velocidade do escoamento é controlada através de um inversor de frequências.

O Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann* dispõe atualmente de quatro mesas giratórias para fixação de modelos, tanto para ensaios estáticos como dinâmicos. As aplicações de cada mesa estão citadas a seguir conforme Blessmann (1990, p. 114):

- mesa M-I: ensaios de tipo aeronáutico no piso do túnel; pesquisa básica em formas geométricas simples, em modelo bi ou tridimensionais; ensaios para a construção civil com geradores e turbulência colocados na câmara de simuladores;
- mesa M-II: ensaios do tipo aeronáutico no eixo do túnel; ensaios para a construção civil, com blocos colocados no piso e/ou geradores de turbulência na câmara de simuladores e/ou em outras seções; estudos de fenômenos de instabilidade aerodinâmica com modelos bidimensionais colocados horizontalmente;
- mesa M-III: construída especificamente para estudos dinâmicos em estruturas de grande alteamento, tais como chaminés, pilares de viadutos, torres de televisão, de microondas e mastros;
- mesa M-IV: localizada no retorno do túnel, onde a seção transversal mede 2,40m × 2,10m. Serve para ensaios de dissipação de fumaça e de gases industriais, influência da topografia sobre os ventos, efeitos de interação, modelos de pontes, entre outros.

A mesa M-II foi selecionada para realizar os ensaios deste trabalho, onde nela é possível trabalhar com o perfil de velocidades desejado, obtido a partir da cobertura do piso do túnel com blocos disseminados de madeira, que simulam a rugosidade do terreno.

A figura 3.2 ilustra a localização das mesas de ensaio, assim como outras características físicas do túnel de vento.

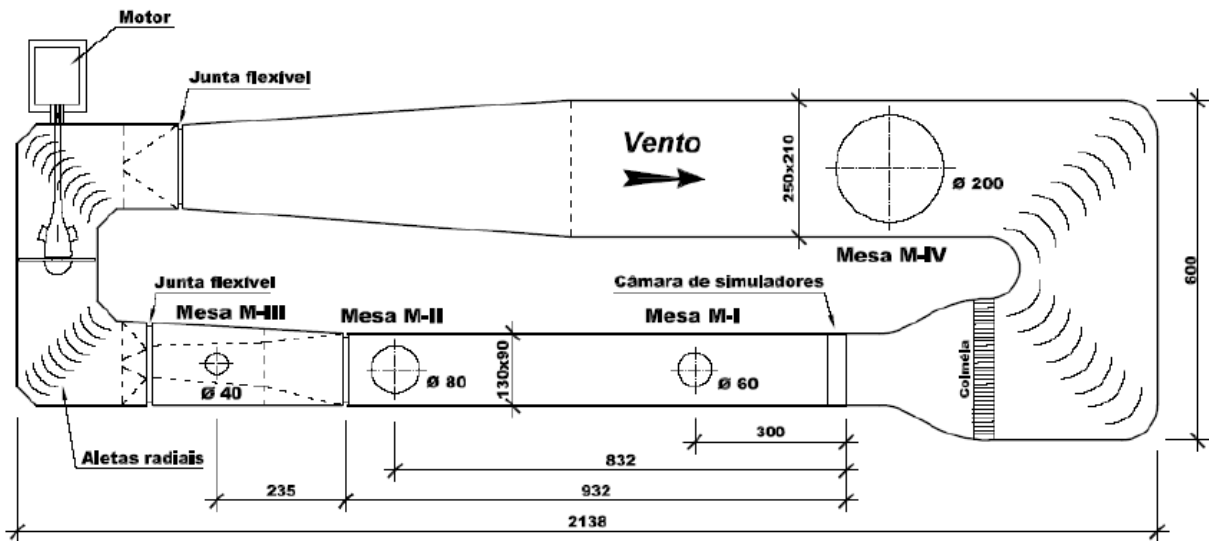


Figura 3.2: Circuito aerodinâmico do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann, dimensões em [cm].

Na realização dos ensaios a velocidade do vento é monitorada através da medida diferencial de pressão estática, Δp_a , lida em dois anéis piezométricos situados nos extremos do convergente localizado na entrada da seção principal de trabalho. Estas leituras são feitas por meio de um micromanômetro à água. Para cada perfil de velocidades do vento simulados no túnel foram determinados os coeficientes k_0 , que vinculam a pressão dinâmica q , no eixo do túnel e a pressão de referência Δp_a . Assim, torna-se possível calcular a pressão dinâmica e a velocidade do escoamento em qualquer ponto da seção transversal, devidamente controlada, pela simples leitura da pressão de referência. Esta relação pode ser mais bem entendida através da equação 3.1:

$$q = k_0 \Delta p_a \quad (\text{equação 3.1})$$

Onde:	q	pressão dinâmica ao longe, $q = (1/2)\rho V^2$, [mmH ₂ O];
	V	velocidade média do vento, [m/s];
	ρ	massa específica do ar, [kg/m ³];
	k_0	coeficiente que vincula q e Δp_a ;
	Δp_a	pressão de referência (diferença de pressão entre os anéis piezométricos), [mmH ₂ O].

Portanto, a velocidade para uma dada temperatura e pressão, é obtida a partir da equação 3.2:

$$V = \sqrt{\frac{2 \Delta p a k_0 (273 + T)}{(0,0474 P_{\text{atm}})}} \quad (\text{equação 3.2})$$

Onde: V velocidade média do vento, [m/s];
 T temperatura dentro do túnel no momento do ensaio, [°C];
 P_{atm} pressão atmosférica no momento do ensaio, [mmH₂O].

3.2 VENTO SIMULADO

O vento simulado para realização dos ensaios foi do tipo deslizante e turbulento. Seu perfil vertical de velocidades médias, ou seja, a variação da velocidade média do vento em uma seção do túnel em função da cota vertical, medida a partir do piso do túnel, foi tal que pôde ser descrito por uma lei potencial do tipo da equação 3.3, apresentada na bibliografia de Blessmann (1995, p. 43). Este perfil foi obtido através do cobrimento no piso da seção de trabalho com elementos de rugosidade. Já a turbulência atmosférica foi simulada com a utilização de elementos geradores de turbulência instalados na câmara de simuladores. A figura 3.3 mostra a reprodução adequada da estrutura do vento natural para uma turbulência de baixa altitude.

$$\frac{V(z)}{V_{\text{ref}}} = \left(\frac{z}{z_{\text{ref}}} \right)^p \quad (\text{equação 3.3})$$

Onde: $V(z)$ velocidade média do vento na altura z ;
 V_{ref} velocidade média de referência do vento na altura z_{ref} ;
 z_{ref} 450mm – altura de referência a partir do piso do túnel;
 z cota vertical, medida a partir do piso do túnel;
 p expoente da curva de potência.



Figura 3.3: Blocos disseminados no piso e gaveta colocada no início da câmara de ensaios do túnel de vento para representação do vento natural.

O valor obtido para o expoente p da equação 3.3 foi 0,185, que corresponde a um terreno com rugosidade característica da categoria III conforme a NBR-6123 (1988).

Segundo a NBR-6123 (1988, p. 8), classificam-se na categoria III, terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3,0m. Exemplos de locais que se enquadram nesta categoria são citados abaixo:

- 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 figura 3.4 apresenta as principais características do vento simulado para expoente p igual a 0,185, sendo respectivamente: perfil vertical das velocidades médias, em percentagem da velocidade média em relação à velocidade média na cota de referência (450mm), no eixo longitudinal do túnel (pontos experimentais e curva potencial teórica); intensidade (II) da componente longitudinal da turbulência; e o espectro de potência da componente longitudinal da turbulência.

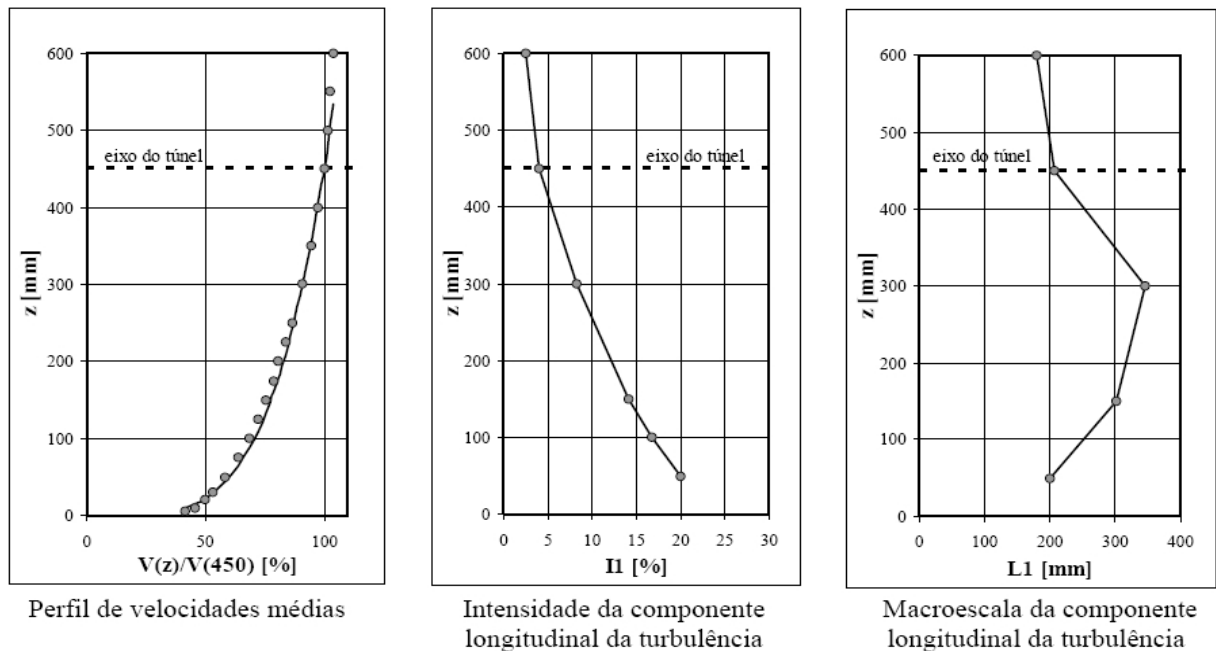


Figura 3.4: Características do vento simulado, sendo respectivamente: perfil vertical de velocidades, intensidade da componente longitudinal da turbulência e macroescala da componente longitudinal da turbulência.

3.3 A TÉCNICA DE INTEGRAÇÃO DE PRESSÕES EM ALTA FREQUÊNCIA

Através do método *HFPI* (*High Frequency Pressure Integration*), pressões dinâmicas são medidas simultaneamente para vários locais em uma estrutura. Este método também permite que modos de vibrações mais altos possam ser investigados.

Diferentemente de uma análise de pressões médias, no *HFPI* as pressões são medidas através de sensores eletrônicos e registradas através de um sistema de aquisição de dados, para posterior processamento numérico (ver figura 3.5). Os registros de pressões consistem, portanto, em um grande número de séries temporais correlacionadas, que incorporam as densidades espectrais e funções de coerência corretas para o vento natural simulado.



Figura 3.5: Sistema eletrônico de medição dinâmica de pressões do LAC/UFRGS.

Resulta, portanto, que a admitância aerodinâmica, uma função dependente da frequência que transforma a flutuação da velocidade do vento em uma flutuação de força aerodinâmica, está automaticamente considerada na integração. Esta função de admitância reflete, entre outros aspectos, as correlações da flutuação de pressões para a região da edificação onde estas pressões estão sendo integradas.

Por exemplo, para uma região de integração correspondente a um pavimento de edifício alto, a admitância aerodinâmica incorpora as correlações entre as flutuações de pressão a barlavento e sotavento, que não seriam consideradas se fossem utilizados coeficientes de pressão média aplicados a velocidades de rajada.

A integração de pressões, embora matematicamente simples, requer maciço trabalho de processamento numérico. A título de exemplo, a figura 3.6 ilustra uma seção transversal horizontal de um edifício alto, com forma arbitrária.

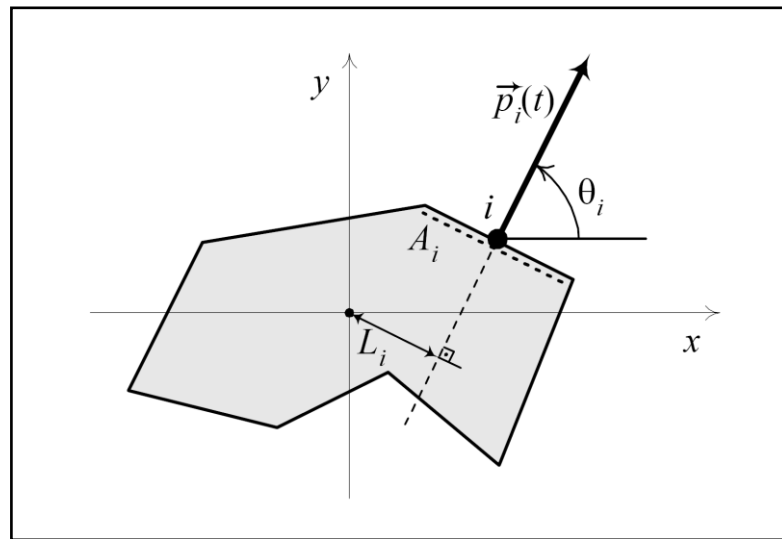


Figura 3.6: Referências para conversão de um registro de pressão dinâmica em um registro de parcelas de componentes horizontais de força F_x e F_y e de momento torçor M_z para uma seção transversal de edificação.

As tomadas de pressão instaladas no modelo reduzido estão associadas a áreas de influência, A_i , e com isso a integração sobre uma dada região, ou “zona”, é feita a partir da equação 3.4:

$$F(t) = \int_S [\vec{p}(t) \vec{u}_F] dA \cong \sum_{i=1}^n [\vec{p}_i(t) \vec{u}_F] A_i \quad (\text{equação 3.4})$$

Onde: $F(t)$ força resultante no tempo t ;

$\vec{p}(t)$ pressão local no tempo t ;

\vec{u}_F cossenos diretores da direção em que se deseja obter a resultante $F(t)$;

S superfície (zona) para a qual se deseja obter a resultante $F(t)$;

n número de tomadas presentes na zona de integração;

$\vec{p}_i(t)$ pressão medida na i -ésima tomada no tempo t ;

A_i área de influência da i -ésima tomada.

Da mesma forma, a componente z do momento (torção em torno do eixo vertical) produzido pelas pressões é dada pela equação 3.5:

$$M_z(t) \cong \sum_{i=1}^n \vec{p}_i(t) L_i A_i \quad (\text{equação 3.5})$$

Onde: L_i distância ortogonal do eixo de atuação da pressão na i -ésima tomada à origem do sistema de referência (centro de rigidez), conforme ilustrado anteriormente na figura 3.6.

Uma vez que as resultantes de forças e momentos tenham sido integradas para todas as zonas nas quais se subdividiu a superfície externa da edificação, procede-se ao cálculo da resposta dinâmica por superposição modal. Assim, parte-se da equação matricial de equilíbrio dinâmico da estrutura, equação 3.6:

$$\mathbf{M}\ddot{\vec{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\vec{u}}(t) + \mathbf{K}\vec{u}(t) = \vec{P}(t) \quad (\text{equação 3.6})$$

Ao passo em que a equação 3.6 já foi apresentada no capítulo 2, seção 2.6.4, e que como lá, mencionou-se da utilização da técnica experimental *HFPI*, também para aquela aplicação, procede-se aqui, a partir da resposta $u_k(t)$, que é calculada integrando-se a equação desacoplada (equação 3.7) por alguma técnica numérica, sendo que aqui foi utilizada a técnica da integral de *Duhamel*. Alerta-se que para ser possível o desacoplamento da matriz de amortecimento, é necessário construí-la a partir de uma combinação linear das matrizes de massa e rigidez, constituindo o denominado amortecimento proporcional, ou de *Rayleigh*.

A equação de equilíbrio dinâmico desacoplada, correspondente à resposta no k -ésimo modo de vibração resulta, portanto, de acordo com a equação 3.7:

$$M_k \ddot{u}_k(t) + C_k \dot{u}_k(t) + K_k u_k(t) = P_k(t) \quad (\text{equação 3.7})$$

A título de exemplo apresentam-se na figura 3.7 os deslocamentos em duas direções horizontais ortogonais e da rotação em torno de um eixo vertical, obtidos a partir da integração de pressões e do cálculo da resposta dinâmica no topo do modelo *CAARC*. Estas respostas também podem ser apresentadas em termos de velocidades e acelerações, convenientes para a avaliação de níveis de conforto humano. Para fins de dimensionamento e análise de estados limites últimos, utilizam-se períodos de recorrência de 50 ou 100 anos, enquanto para análise de conforto humano são indicados períodos menores, tais como 1, 5 ou 10 anos.

As propriedades dinâmicas da estrutura são usualmente fornecidas pelo projetista, que dispõe de um modelo numérico utilizado para projeto e dimensionamento. Além de todas as informações necessárias para um estudo de pressões aerodinâmicas médias convencionais, que compreendem a geometria externa da edificação e as características topográficas e de rugosidade superficial de seu entorno, são também necessárias as formas e frequências naturais de vibração livre para todos os modos de vibração relevantes.

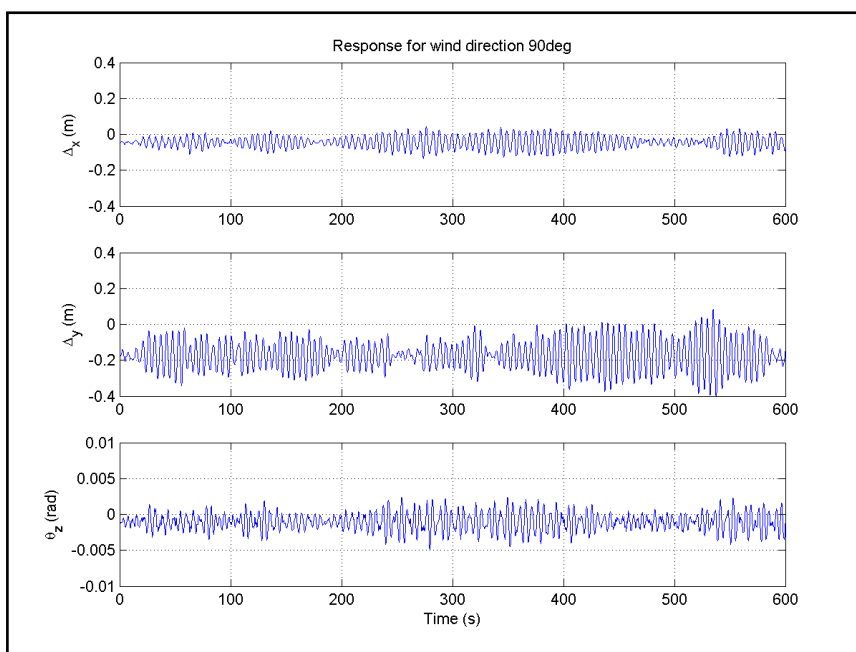


Figura 3.7: Exemplo de registros de deslocamentos das direções horizontais ortogonais x e y e da rotação em torno do eixo vertical z obtidos a partir da integração de pressões e do cálculo da resposta dinâmica no topo do modelo *CAARC*.

Consideram-se relevantes os modos que podem ser excitados pela flutuação das forças e momentos resultantes da integração de pressões. A NBR-6123 (1988, p. 33), recomenda que sejam analisadas dinamicamente todas as estruturas com frequência fundamental de vibração livre inferior a 1Hz. Isto se justifica pelo baixo conteúdo de energia apresentado pela turbulência atmosférica acima desta frequência. A partir deste critério, pode-se sugerir que são relevantes todos os modos de vibração associados à frequências próximas ou inferiores a 1Hz.

Para o cálculo da resposta estrutural, os modos são apresentados de forma simplificada, permitindo a correspondência em termos de graus de liberdade, com as forças e momentos resultantes obtidos da integração de pressões. No caso de edifícios altos, as formas modais são usualmente descritas com três coordenadas por pavimento (duas de translação e uma de rotação), obtidas sobre uma linha vertical coincidente com o eixo de rigidez da estrutura.

Finalmente, além dos modos e frequências naturais de vibração livre da estrutura, também são fornecidas as massas e inércias rotacionais, associadas preferivelmente aos mesmos graus de liberdade usados na descrição das formas modais. Observa-se que *softwares* modernos de análise e projeto estrutural, incorporam módulos de análise dinâmica e todas as informações mencionadas nesta seção podem ser geralmente obtidas de forma prática.

3.3.1 Modelo construído

O modelo *CAARC* utilizado foi construído na oficina do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela equipe do técnico Paulo Francisco Bueno. Este modelo foi construído em chapas de acrílico de 3mm de espessura coladas entre si com o adesivo comercial Super Bonder, do fabricante Loctite. A fixação do modelo à mesa giratória nº II do Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann* foi feita através da colocação de 4 parafusos unindo a mesa giratória na base do modelo.

Aplicando-se o fator de escala de comprimento, 1:400, nas dimensões do protótipo, chega-se às dimensões de 112,50mm por 75,00mm para a base do modelo, e 450mm para sua altura. O modelo foi instrumentado com 280 tomadas de pressão, distribuídas em 10 linhas horizontais de 28 tomadas. A distribuição das tomadas no plano horizontal inclui as 20 posições padronizadas do *CAARC*, conforme bibliografia de Melbourne (1980, p. 74), com a adição de 4 tomadas por fachada, posicionadas próximo aos cantos do modelo, tal como foi adotado por Dragoiescu et al. (2006, p. 5). A figura 3.8 mostra a distribuição das tomadas de pressão do *CAARC Standard Tall Building*.

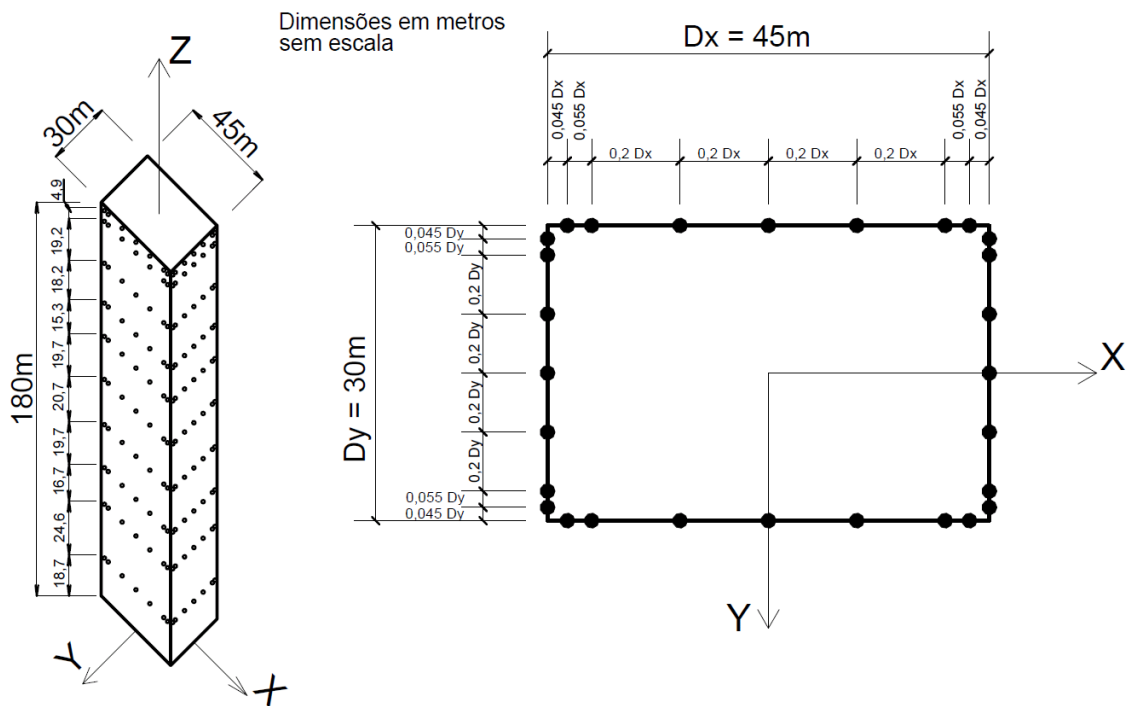


Figura 3.8: Distribuição das tomadas de pressão no CAARC.

3.4 A TÉCNICA DE MODELAGEM AEROELÁSTICA COM BASE FLEXÍVEL

Bases flexíveis têm sido utilizadas em túnel de vento para a modelagem aeroelástica de edifícios altos, considerando-se os dois primeiros modos de vibração (flexão segundo dois eixos ortogonais). O princípio básico é a linearidade da forma modal, devido à predominância da deformação por corte sobre a deformação por flexão, nos primeiros modos de vibração. Esta linearidade pode ser representada, com mínimo erro, pela simples rotação do modelo em torno de sua base, ou por algum ponto de melhor ajuste. O uso de bases flexíveis facilita consideravelmente a modelagem, pois do contrário seria necessário construir-se um modelo flexível, ao invés de uma estrutura rígida.

3.4.1 Escolha do material

Primeiramente realizou-se uma pesquisa de mercado para a verificação dos possíveis materiais a serem usados na confecção do suporte flexível. Dentre as possibilidades, os materiais que melhor se adequaram ao projeto, de acordo com suas propriedades mecânicas foram: a liga de aço 1010 e a liga de alumínio 5052.

Em uma análise mais detalhista verificou-se que, para uma chapa em formato “estrela”, de espessura 1,0mm e rigidez rotacional média de 26,20Nm/rad, as dimensões requeridas utilizando-se o aço 1010 eram bastante superiores às dimensões demandadas quando o material utilizado era o alumínio 5052. Assim, visando um suporte de dimensões adequadas à estrutura do Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann*, escolheu-se o alumínio 5052 como o material a ser adotado para a construção do suporte. Para o alumínio 5052 tem-se como módulo de elasticidade, E , o valor de 68,33GPa, e como tensão máxima admissível, a tensão de fadiga equivalente a 100MPa.

3.4.2 Escala adotada

A determinação das escalas foi feita utilizando-se uma planilha em programa Excel. O método utilizado para construção da mesma relaciona as grandezas fundamentais (comprimento, massa e tempo) com as grandezas de base, definidas através das matrizes correspondentes, determinando o fator de escala das demais grandezas físicas. A metodologia aplicada para formatação da planilha é de autoria do Prof. Marcelo M. Rocha.

A escala adotada para o comprimento é de 1:400. Para manter uma relação constante das forças de inércia durante os ensaios, utiliza-se uma escala de massa específica 1:1, uma vez que a massa específica do fluido (ar) no modelo é igual a do protótipo. Para o fator de escala de aceleração, utilizou-se, também, o valor 1, já que a mesma aceleração da gravidade estará atuando tanto sobre o modelo como sobre a estrutura real. A utilização de uma escala de aceleração 1:1 é chamada Escala de Froude.

Com essas três grandezas definidas para controle (comprimento, massa específica e aceleração), têm-se o necessário para a determinação dos fatores de escala das grandezas derivadas através da planilha apresentada na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Planilha utilizada para determinação das escalas do modelo CAARC.

Grandezas Fundamentais	Símbolo	Unidade	L	M	T	Froude			
Comprimento	l	m	1	0	0				
Massa	m	kg	0	1	0				
Tempo	t	s	0	0	1				
Grandezas de base	Símbolo	Unidade	L	M	T	Inversão			Escala
Comprimento	l	m	1	0	0	1	0	0	2,500E-03
Aceleração	a	m/s ²	1	0	-2	3	0	1	1,000E+00
Massa específica	ρ	kg/m ³	-3	1	0	0,5	-0,5	0	1,000E+00
Grandezas derivadas	Símbolo	Unidade	L	M	T	l	a	ρ	Escala
Comprimento	l	m	1	0	0	1	0	0	2,500E-03
Massa	m	kg	0	1	0	3	0	1	1,563E-08
Tempo	t	s	0	0	1	0,5	-0,5	0	5,000E-02
Aceleração	a	m/s ²	1	0	-2	0	1	0	1,000E+00
Aceleração angular	α	rad/s ²	0	0	-2	-1	1	0	4,000E+02
Velocidade	v	m/s	1	0	-1	0,5	0,5	0	5,000E-02
Velocidade angular	ω	rad/s	0	0	-1	-0,5	0,5	0	2,000E+01
Força	F	N	1	1	-2	3	1	1	1,563E-08
Momento	M	Nm	2	1	-2	4	1	1	3,906E-11
Frequência	f	Hz	0	0	-1	-0,5	0,5	0	2,000E+01
Frequência angular	ω	rad/s	0	0	-1	-0,5	0,5	0	2,000E+01
Amortecimento viscoso	c	kg/s	0	1	-1	2,5	0,5	1	3,125E-07
Razão de amortecimento	ζ	–	0	0	0	0	0	0	1,000E+00
Módulo de elasticidade	E	Pa	-1	1	-2	1	1	1	2,500E-03
Módulo de corte	G	Pa	-1	1	-2	1	1	1	2,500E-03
Coefficiente de Poisson	ν	–	0	0	0	0	0	0	1,000E+00
Deformação	ε	–	0	0	0	0	0	0	1,000E+00
Tensão	σ	Pa	-1	1	-2	1	1	1	2,500E-03
Massa específica	ρ	kg/m ³	-3	1	0	0	0	1	1,000E+00
Massa por comprimento	μ	kg/m	-1	1	0	2	0	1	6,250E-06
Inércia de massa	I	Kg m ²	2	1	0	5	0	1	9,766E-14
Inércia por comprimento	i	kg m	1	1	0	4	0	1	3,906E-11
Rigidez	k	N/m	0	1	-2	2	1	1	6,250E-06
Rigidez axial	EA/L	N/m	0	1	-2	2	1	1	6,250E-06
Rigidez angular	K_θ	Nm/rad	2	1	-2	4	1	1	3,906E-11
Rigidez a flexão	EI/L^3	N/m	0	1	-2	2	1	1	6,250E-06
Rigidez a torção	Gk/L	Nm/rad	2	1	-2	4	1	1	3,906E-11
Área	A	m ²	2	0	0	2	0	0	6,250E-06
Volume	V	m ³	3	0	0	3	0	0	1,563E-08
Módulo resistente	W	m ³	3	0	0	3	0	0	1,563E-08
Inércia de área	I	m ⁴	4	0	0	4	0	0	3,906E-11
Constante de torção	k	m ⁴	4	0	0	4	0	0	3,906E-11
Viscosidade dinâmica	μ	kg/m/s	-1	1	-1	1,5	0,5	1	1,250E-04
Viscosidade cinemática	ν	m ² /s	2	0	-1	1,5	0,5	0	1,250E-04

3.4.3 Dimensionamento do suporte

O suporte deve ser dimensionado de forma que resista aos carregamentos a ele impostos. Os esforços atuantes são: o peso próprio do modelo *CAARC* e o momento referente a um giro de 6° , que pode ser desenvolvido pelo modelo, conforme observação no estudo de Oliveira (2003, p. 88).

Primeiramente imaginou-se um suporte em formato “estrela”, com abas de seção retangular constante. Porém os esforços causados pelos carregamentos exigiam dimensões muito amplas do suporte, impossibilitando sua utilização no túnel de vento.

Assim, decidiu-se por uma placa em formato “estrela” cuja base aumente linearmente dos extremos ao centro da placa, de forma que no centro apresente uma largura B_x e B_y , capaz de dar à placa a resistência necessária aos esforços do peso do modelo e do giro na região central da placa. A figura 3.9 representa o formato de placa imaginado com as variáveis a serem encontradas.

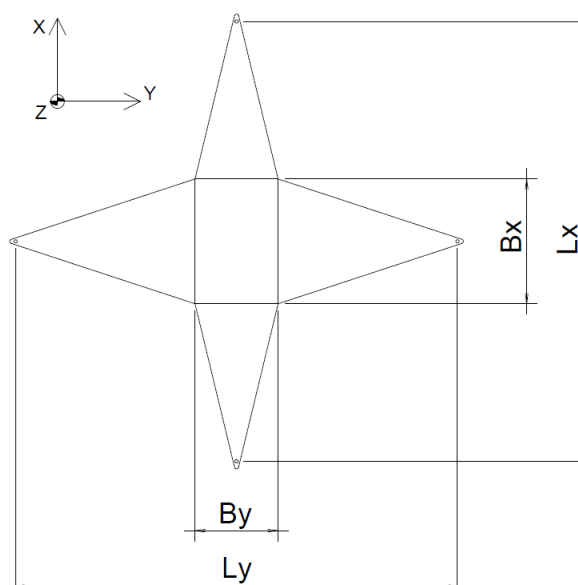


Figura 3.9: Geometria do suporte com identificação das variáveis.

Para o dimensionamento do suporte considerou-se duas vigas bi-apoiadas sobrepostas, bem como a Escala de Froude, apresentada anteriormente na seção 3.4.2. Como a largura da base B é linearmente crescente a partir dos extremos, o momento de inércia da seção, que depende da espessura da placa e da largura de base, também será. Parte-se de uma largura de base mínima igual a 10mm e chega-se a uma largura máxima B , B_x para o braço referente ao

eixo x e B_y para o braço referente ao eixo y , com seus respectivos comprimentos de haste: L_x e L_y .

As determinações de B_x , B_y , L_x e L_y , foram feitas a partir da equação diferencial da elástica dada pela equação 3.8:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = -\frac{M(x)}{EI} \quad (\text{equação 3.8})$$

Onde: $M(x)$ expressão para a distribuição de momentos na viga;
 E módulo de elasticidade do material;
 I momento de inércia da seção transversal.

Para o cálculo do momento de inércia consideraram-se diferentes expressões referentes aos diferentes trechos do suporte, de acordo com a figura 3.10:

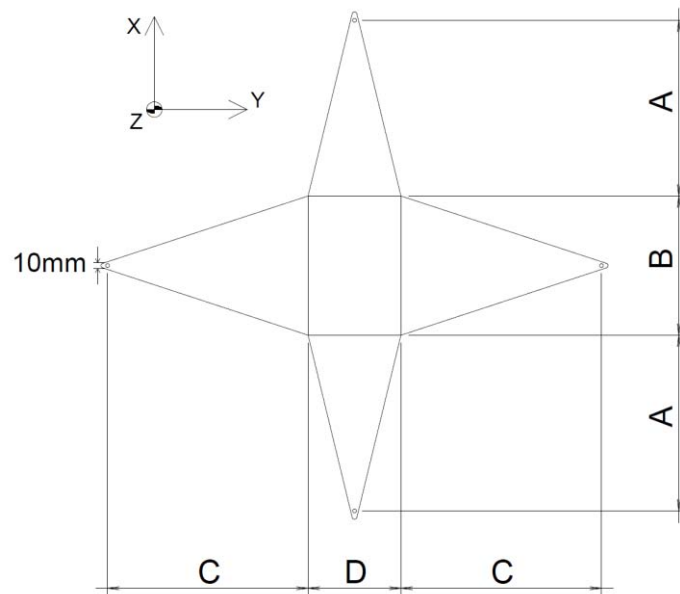


Figura 3.10: Divisão da placa em trechos para cálculo do momento de inércia.

Assim, as expressões para o momento de inércia são dadas pela equação 3.9:

$$I(x) = \begin{cases} \left(10 + \frac{Bx}{C}\right) \frac{h^3}{12} \rightarrow 0 \leq x \leq C \\ \frac{Bh^3}{12} \rightarrow C < x \leq (C + D/2) \end{cases} \quad (\text{equação 3.9})$$

Para o momento considerou-se a sobreposição dos efeitos dos dois carregamentos: giro e peso próprio do modelo, de acordo com a figura 3.11:

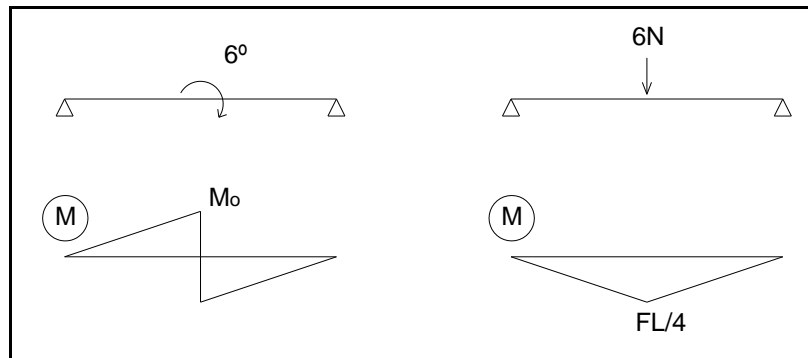


Figura 3.11: Distribuição dos momentos devido aos efeitos dos carregamentos.

Logo, a expressão para o momento resultou da sobreposição dos momentos provocados pelos carregamentos, conforme a equação 3.10:

$$M(x) = \frac{M_0 x}{C} + 1,5x \rightarrow 0 \leq x \leq (C + D/2) \quad (\text{equação 3.10})$$

No entanto, observou-se que a solicitação referente ao peso próprio do modelo exigia dimensões mais robustas do suporte, tornando-o inviável. Assim, resolveu-se anular o efeito do peso próprio, apoiando o centro do suporte sobre um prego delgado. Desta forma, o suporte foi projetado para resistir exclusivamente ao esforço de giro.

Com a correta substituição para o momento de inércia e a distribuição de momentos, a equação diferencial da elástica dada pela equação 3.8, apresenta-se, agora, através da equação 3.11:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = \frac{\left(k_{\theta} \varphi / C\right) x}{10 E h^3 / 12 + E B x h^3 / 12 C} \quad (\text{equação 3.11})$$

Onde: k_{θ} rigidez rotacional, k_{θ} média = 26,20Nm/rad;

φ ângulo de rotação, $\varphi = 6^{\circ} = 0,105\text{rad}$, com $M_o = k_{\theta} \varphi$.

A resolução da equação 3.11 foi feita através de um programa em MATLAB, utilizando o método das diferenças finitas.

A determinação de B_x e B_y baseou-se nas dimensões de base do modelo CAARC, que será apoiado na região central. A determinação dos comprimentos C e A , conforme figura 3.10, foi feita através de tentativas e respectivas análises das tensões provocadas na placa, a partir dos gráficos produzidos pelo programa. Os gráficos produzidos para as dimensões do projeto final encontram-se nas figuras 3.12 e 3.13.

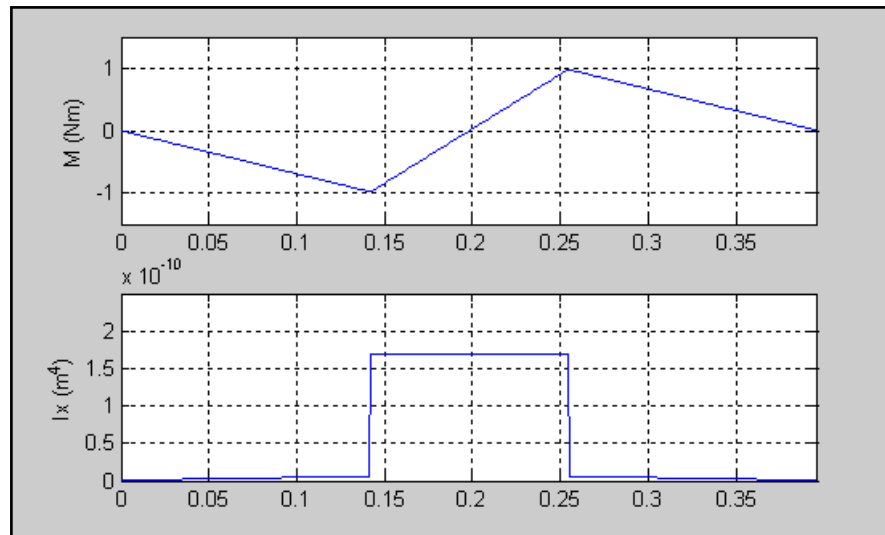


Figura 3.12: Representação da distribuição de momentos e de momentos de inércia ao longo do eixo x da placa.

As dimensões finais do projeto, de acordo com a figura 3.10, foram: largura da base do tramo central $x(D) = 0,075\text{m}$; largura da base do tramo central $y(B) = 0,1125\text{m}$; comprimento do trecho de seção variável $x(A) = 0,142\text{m}$; comprimento do trecho de seção variável $y(C) = 0,162\text{m}$; e espessura da placa = 0,001m.

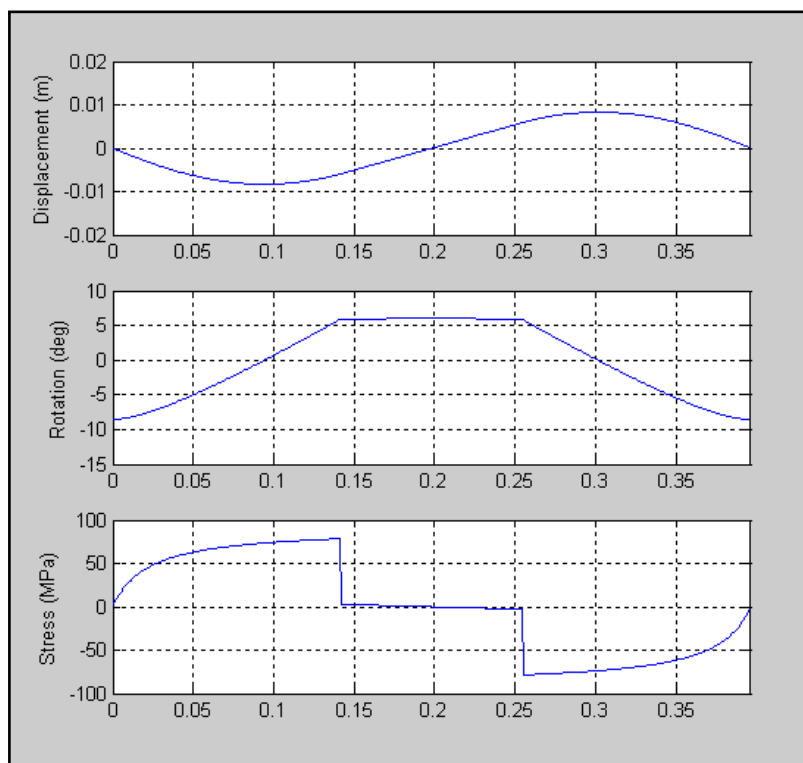


Figura 3.13: Análise do deslocamento, rotação e esforço, ao longo do eixo x da placa.

3.4.4 Verificação das propriedades do suporte

Antes de submeter o suporte flexível ao ensaio, realizou-se uma série de procedimentos de modo a verificar suas propriedades e a correta correspondência com as escalas adotadas. Primeiramente aplicaram-se métodos simples e, posteriormente, métodos mais refinados.

Desta maneira realizou-se uma calibração preliminar, onde foram verificadas a rigidez rotacional, frequência e massa do sistema com a utilização de métodos simples. Para calibração dos sinais das pontes extensométricas foi utilizada uma técnica com laser, conforme fotografias mostradas na figura 3.14.

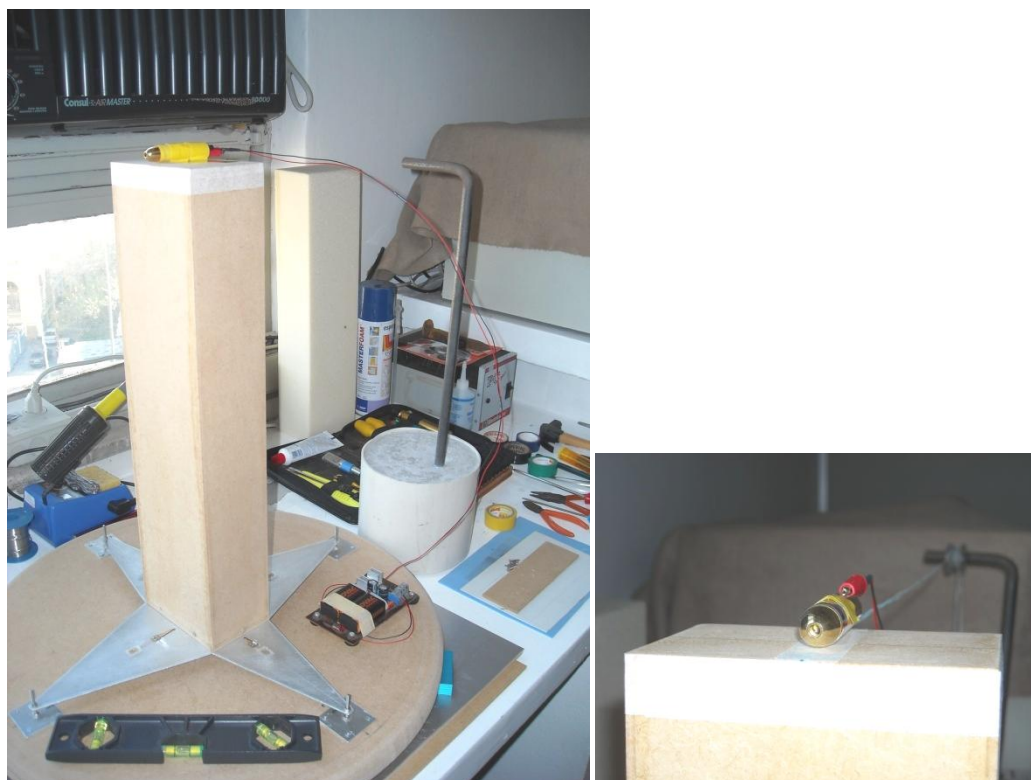


Figura 3.14: Calibração das amplitudes de deslocamento a partir dos sinais gerados pelas pontes extensométricas através do uso de um feixe laser.

O ângulo de giro, para cada momento aplicado, foi obtido através da equação 3.12, cujas variáveis encontram-se representadas na figura 3.15. O segundo termo na equação 3.12 representa pouca influência no resultado, podendo assim, ser desprezado.

$$d = L \tan\varphi + H(\sin\varphi \tan\varphi + \cos\varphi - 1) \approx L \tan\varphi \quad (\text{equação 3.12})$$

Onde:

- d comprimento medido, [m];
- L distância entre modelo *CAARC* e parede, [m];
- φ ângulo de giro, [rad];
- H altura do modelo, [m].

Para verificação da rigidez rotacional do suporte nas duas direções ortogonais, aplicou-se um momento ao modelo *CAARC* acoplado. Com um laser posicionado sobre o modelo e direcionado a uma régua fixa na parede, pode-se medir o ângulo de deslocamento, conforme esquema apresentado a seguir na figura 3.15:

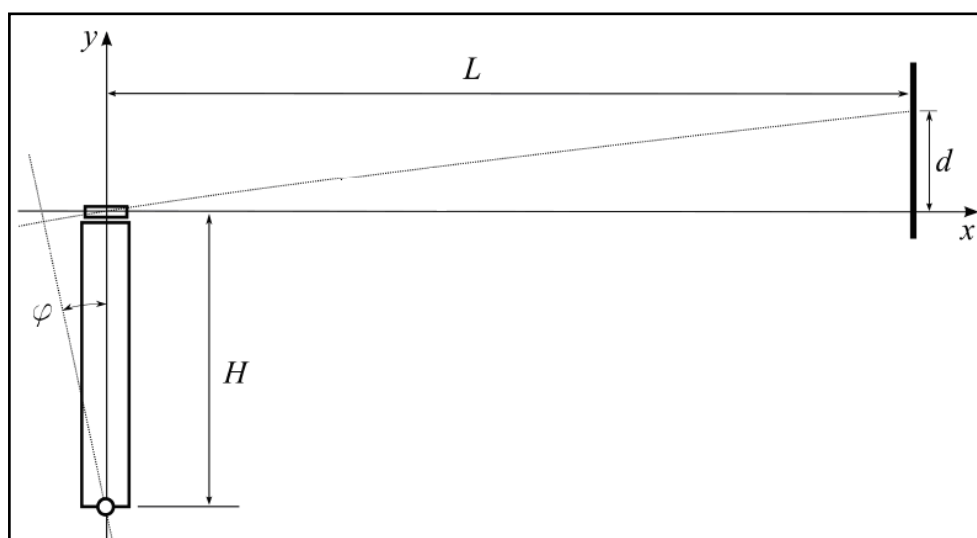


Figura 3.15: Esquema de calibração através do uso de um feixe laser e a indicação das variáveis envolvidas na equação 3.12 para obter o ângulo de giro do modelo.

O procedimento foi realizado para cada uma das direções de incidência do vento no modelo. Primeiramente, notou-se uma rigidez muito elevada, entorno de 45Nm/rad, devido a um esforço de tração no apoio. Esta rigidez foi diminuída com a fixação de lâminas de teflon no mecanismo de apoio, conforme mostra a figura 3.16. A rigidez rotacional média encontrada, então, foi de 31Nm/rad.



Figura 3.16: Detalhe da fixação no mecanismo de apoio com lâminas de teflon para minimizar o atrito, resultando na diminuição da rigidez rotacional.

Para conferência do valor encontrado experimentalmente, modelou-se o suporte no software de análise estrutural *FTOOL*. Visto que o apoio previsto no dimensionamento não se comportava como tal vínculo na realidade do suporte, calculou-se via software a rigidez para as condições engaste-apoio-engaste e apoio-apoio-apoio para os dois braços do suporte, conforme apresenta a figura 3.17:

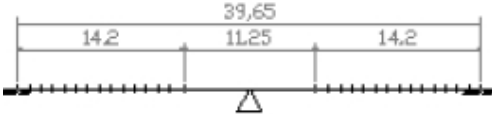
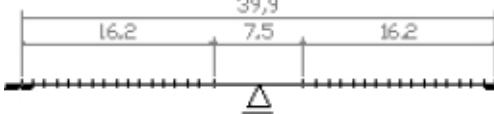
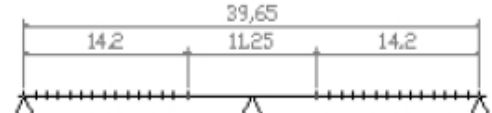

	Braço menor (direção x ou 90°)	Braço maior (direção y ou 0°)
engaste-apoio-engaste		
apoio-apoio-apoio		

Figura 3.17: Verificação da rigidez rotacional para as possíveis combinações de vinculação, dimensões em [mm].

A rigidez foi calculada aplicando-se um binário de forças correspondente a atuação de um momento unitário no centro do suporte provocado pelo modelo. Para o momento aplicado obteve-se o respectivo giro. A rigidez rotacional foi alcançada através do quociente entre o momento aplicado e o respectivo giro. A figura 3.18 apresenta o esquema adotado para determinação da rigidez rotacional. As rigidezes rotacionais encontradas estão dispostas na tabela 3.2.

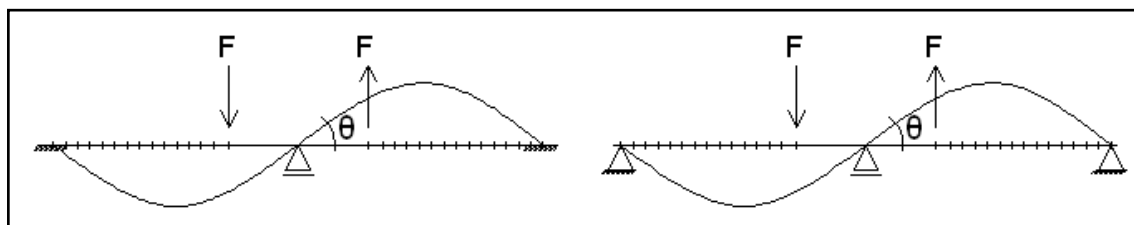


Figura 3.18: Esquema adotado para a determinação da rigidez rotacional via programa de análise estrutural *FTOOL*.

Tabela 3.2: Valor para as rigidezes rotacionais obtidas via programa *FTOOL*.

Vinculação	Braço menor (direção x ou 90°)		Braço maior (direção y ou 0°)	
	$k_{\theta x}$ média [Nm/rad]	$k_{\theta x}$ máxima [Nm/rad]	$k_{\theta y}$ média [Nm/rad]	$k_{\theta y}$ máxima [Nm/rad]
engaste - apoio - engaste	29,73	31,20	30,50	32,09
apoio - apoio - apoio	20,47	21,20	22,56	23,42

O ajuste da frequência foi realizado com o acréscimo de massa ao modelo *CAARC*. De acordo com a escala em uso, o modelo deve apresentar uma massa de aproximadamente 610g. O alcance da massa final foi possível através da fixação de barrinhas de chumbo com 21,5g cada, fixadas na região central do modelo. O posicionamento das barrinhas foi determinado através da medição da frequência do modelo com um osciloscópio. A figura 3.19 mostra as massas complementares para aferição das frequências naturais de vibração livre do modelo. Pode-se observar que não apenas o valor dessas massas, mas também a sua posição no modelo, é importante para a representação em escala das inércias rotacionais. As frequências naturais de 0,2Hz do protótipo se apresentam no modelo com valores de 4,5Hz. Já o amortecimento, resultou ser naturalmente próximo a 1% (razão do crítico).

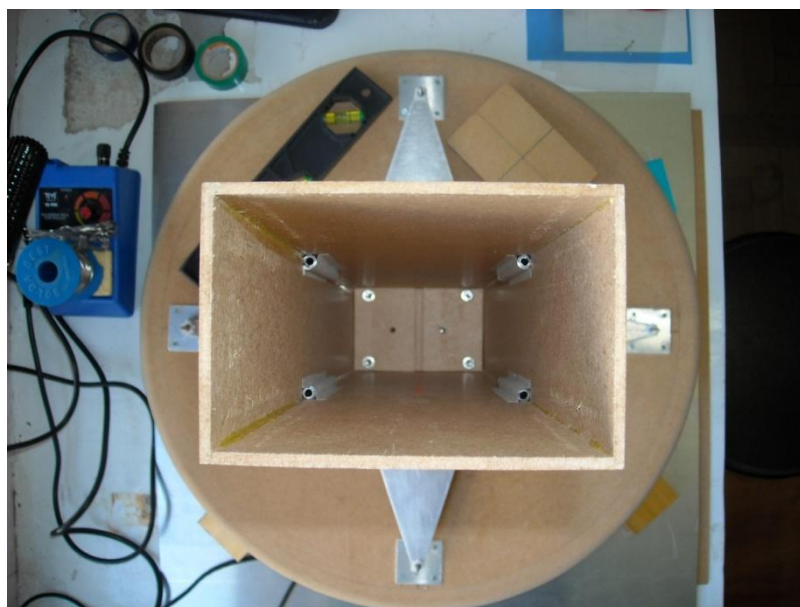


Figura 3.19: Acréscimo de massa através de hastes de chumbo conforme lei de similaridade.

Para uma calibração mais refinada, na busca da aquisição de dados, foram utilizados dois acelerômetros e dois extensômetros resistivos. A figura 3.20 mostra a instalação de um acelerômetro piezométrico *Bruel&Kjaer* biaxial sob a tampa, no topo do modelo e conectados a um amplificador de carga de mesma marca, modelo *Nexus*. A saída, monitorada num osciloscópio digital *Tektronics* TDS210 de dois canais, foi enviada a um micro-computador portátil provido de placas de conversão analógico-digital da *National Instruments*, modelo 6036E, para registro simultâneo dos dois canais e posterior processamento dos dados.

A conversão A/D é feita em 16 bits sobre uma amplitude de $\pm 5000\text{mV}$. Na última fase do processo foi utilizado o programa de aquisição e gerenciamento de dados LabView, versão 8, da *National Instruments*. Os registros de aceleração adquiridos tem duração total de 32 segundos e foram realizados com uma taxa de aquisição de 512Hz. Posteriormente, na etapa de processamento, os registros foram integrados numericamente para obtenção de sinais em velocidade e deslocamento.

Os acelerômetros têm seus eixos alinhados com os eixos do modelo, de modo a que suas saídas correspondam às respostas nos dois modos de vibração considerados. De acordo com Madalozzo (2008, p. 43), os instrumentos medidores de vibração são constituídos, na sua grande maioria, de acelerômetros. Terremotos são registrados por esses aparelhos e, por integração dos dados originais, podem-se obter velocidades e deslocamentos associados. A preferência pela utilização de acelerômetros está baseada no seu tamanho reduzido e alta sensibilidade.

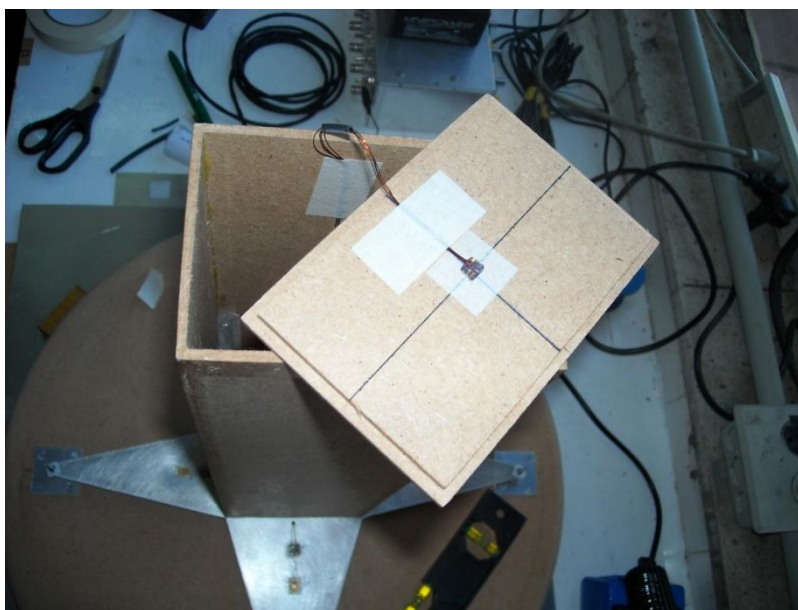


Figura 3.20: Instalação e posicionamento dos acelerômetros no modelo CAARC.

Uma vantagem adicional da base “estrela” é a possibilidade de instalação de extensômetros elétricos, que permitem a medição da resposta média à ação do vento, não captada pelos acelerômetros. A figura 3.21 mostra a instrumentação da base testada com extensômetros, que possibilita uma medição redundante para teste dos acelerômetros.

O extensômetro resistivo do tipo *Strain Gauge* é um sensor de deformação que pode ser usado na avaliação de deformações superficiais, compondo transdutores para grandezas tais como pressão, força e aceleração. Seu funcionamento baseia-se na variação de resistência. Assim, ao se deformar longitudinalmente, o valor da resistência varia de forma conhecida, indicando a deformação na superfície.



Figura 3.21: Instrumentação na base da célula de carga com extensômetros (lado superior).

Para a calibração da rigidez rotacional do suporte com acelerômetros foram aplicados momentos variáveis no centro do modelo para os dois eixos, conforme esquema apresentado anteriormente na da figura 3.15. Os momentos, provenientes da colocação de barrinhas de chumbo de 150g sobre a haste acoplada ao modelo, foram aumentando em intervalos de 10 segundos, através do acréscimo de barrinha, chegando a 4 barrinhas, e após, decresceram.

O sinal oriundo do acelerômetro foi adaptado e lido por um *script* de programa em MATLAB. Através da determinação de constantes foi possível a verificação do ângulo deslocado ao longo do tempo para cada momento aplicado e a calibração dos extensômetros. Os gráficos gerados pelo programa que relacionam o tempo de aplicação do momento no eixo e o ângulo de giro do modelo estão apresentados nas figuras 3.22 e 3.23, para os eixos x e y, respectivamente. Através destas figuras, foi possível notar a independência do sinal em relação às duas direções e colher dados para a composição das matrizes de deslocamentos angulares.

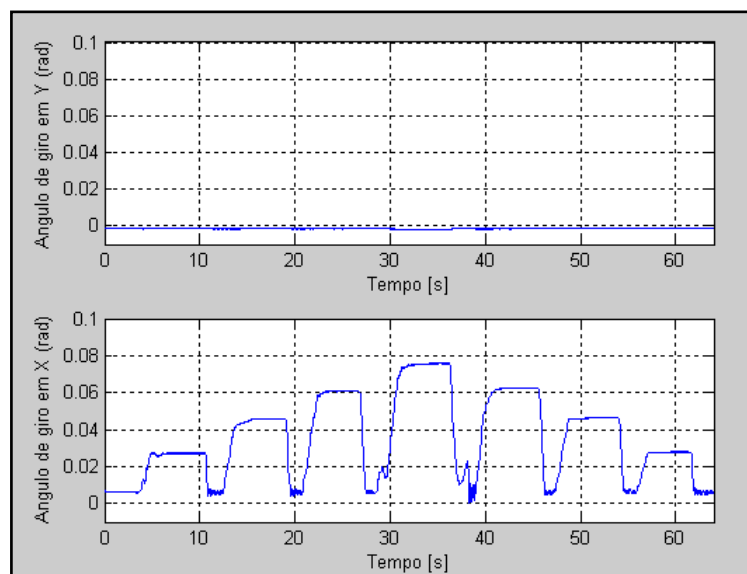


Figura 3.22: Relação entre tempo do momento aplicado na direção do eixo x e ângulo de giro do modelo.

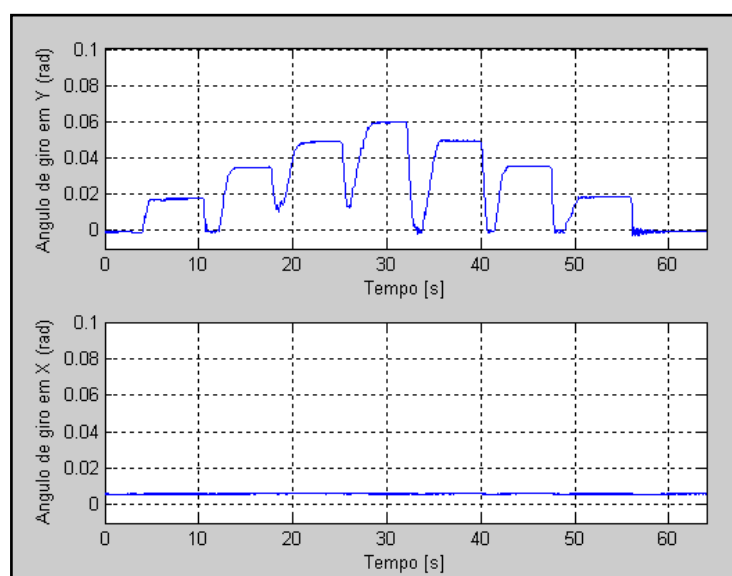


Figura 3.23: Relação entre tempo do momento aplicado na direção do eixo y e ângulo de giro do modelo.

A figura 3.24 apresenta o gráfico que relaciona o momento aplicado e o respectivo ângulo deslocado pelo modelo. Analisando o gráfico da figura 3.24 observa-se uma não-linearidade na constante de rigidez da base, à medida que o valor do carregamento aumenta, o que pode ser explicado pelas grandes deformações impostas. Percebe-se ainda, que as rigidezes para os eixos x e y são diferentes.

Estas deformações implicam em esforços de tração nos braços da estrela (não-linearidade geométrica) e sugerem que em implementações futuras os braços sejam projetados mais longos, minimizando esse efeito. Contudo, para fins de análise, ajustou-se uma função não-linear (parabólica) à curva de calibração, o que possibilita uma correta interpretação dos sinais gerados pelas pontes extensométricas. Assim, resolveu-se a função para um ângulo de 4 radianos obtendo-se os seguintes valores: 31Nm/rad para o eixo x (k_{θ_x}), e 35Nm/rad para o eixo y (k_{θ_y}). Desta forma, pode-se afirmar que a rigidez rotacional média ($k_{\theta \text{ média}}$) do suporte equivale a 33Nm/rad.

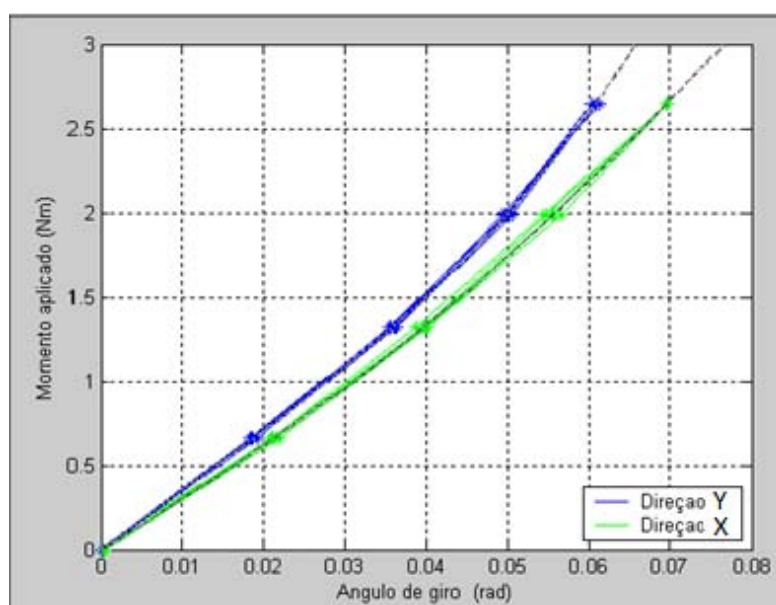


Figura 3.24: Relação entre momento aplicado e ângulo de giro do modelo para os eixos y e x.

Para determinação da frequência foram gerados gráficos de análise da densidade espectral, para um impulso de pequena amplitude aplicado sobre o modelo na direção do eixo y. Estes gráficos estão apresentados na figura 3.25, onde o gráfico superior representa o eixo x, e o de baixo, o eixo y. A partir destes gráficos, verifica-se uma frequência média de 4,2Hz.

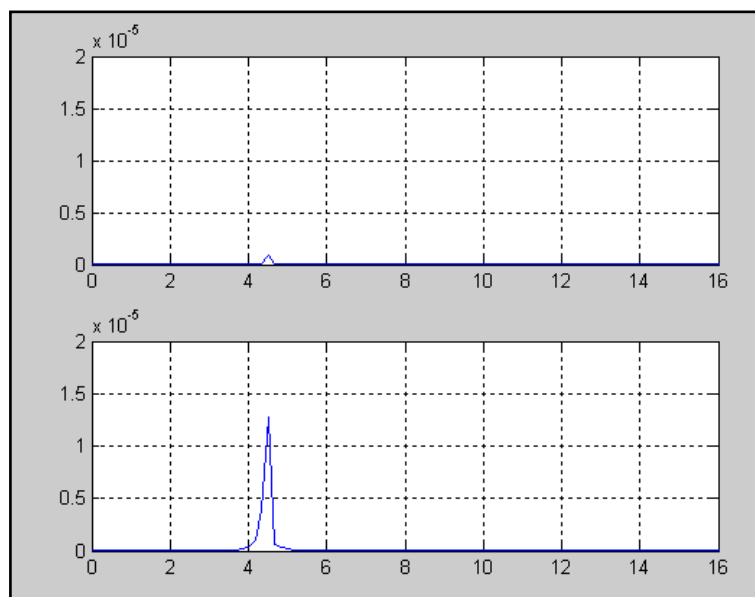


Figura 3.25: Gráficos de densidade espectral para determinação das frequências.

3.4.5 Construção da base flexível

Neste trabalho foi desenvolvida e testada uma nova técnica de base flexível, constituída de uma estrela de alumínio liga, com quatro pontas apoiadas em parafusos finos, conforme figura 3.26. O centro da estrela também é apoiado sobre um pivô, de modo a se impedir o deslocamento vertical do modelo. Esta base é de baixo custo de confecção, e pode ser dimensionada e produzida rapidamente para qualquer modelo de edifício.

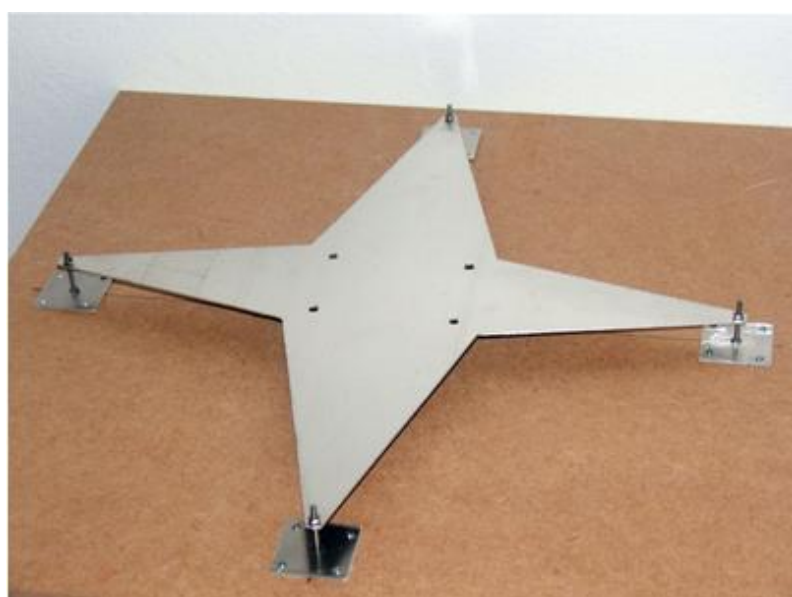


Figura 3.26: Nova técnica de base flexível: simples e eficiente.

3.4.6 Modelo construído

O projeto do modelo é baseado na calibração de um modelo numérico, comparando-se as propriedades dinâmicas previstas para a estrutura real com aquelas esperadas para o modelo reduzido. O esquema de confecção do modelo *CAARC* é mostrado na figura 3.27.

O modelo *CAARC* foi construído em chapas de MDF de espessura 3mm, com massa específica de 825kg/m^3 . A tampa é facilmente removível para inserir-se a instrumentação e o complemento de massa ao modelo. As laterais foram unidas por pequenos parafusos. À tampa foi acoplada uma chapa de menor dimensão, em MDF de espessura 20mm, para um melhor ajuste da tampa sobre o corpo e acréscimo de massa ao modelo. As dimensões do modelo correspondem à escala adotada para o comprimento, 1:400. A figura 3.27 também apresenta uma fotografia do modelo *CAARC* já instalado sobre a base flexível.

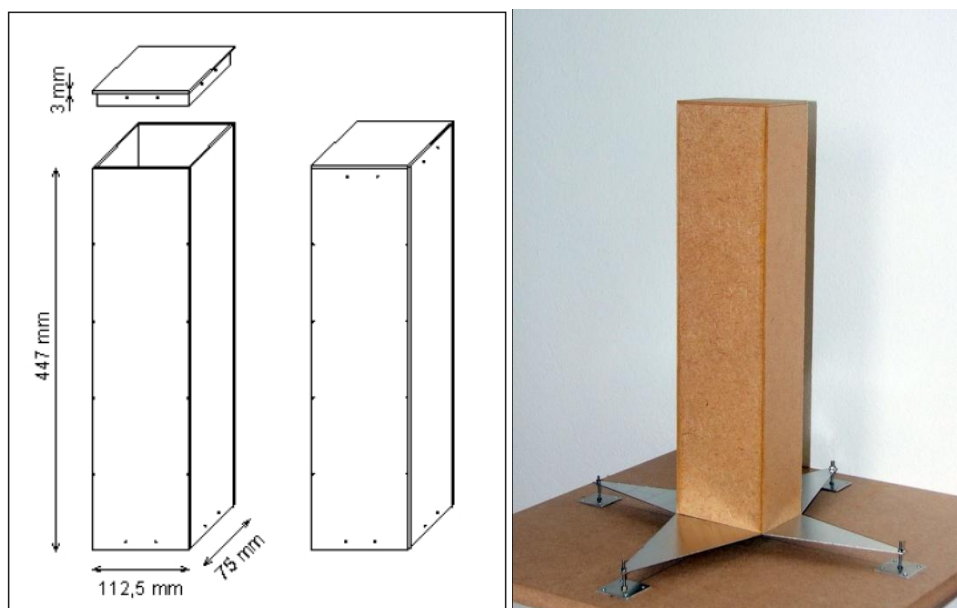


Figura 3.27: Esquema de confecção do modelo *CAARC* construído em MDF e fotografia do modelo *CAARC* já instalado sobre a base flexível.

3.4.7 Adequação dos fatores de escala adotados

Visto que as propriedades do suporte manifestaram-se moderadamente diferentes daquelas adotadas para o seu dimensionamento, a adequação dos fatores de escala tornou-se necessária.

Das três grandezas de base anteriormente definidas (comprimento, massa específica e aceleração), manteve-se a de comprimento, uma vez que o modelo já se encontra confeccionado, e a de massa específica, por apresentar fundamental importância para experimentos aeroelásticos onde a massa específica do ar no modelo é a mesma da estrutura. Assim, a nova grandeza de base adotada foi a de frequência.


Também se procura utilizar uma escala de frequência que não implique em valores muito altos a serem medidos, pois estes se confundiriam com frequências de vibração de partes componentes do modelo. Procura-se utilizar uma relação de semelhança próxima àquela relacionada ao número de Froude, que é utilizado para garantir que forças gravitacionais estejam em escala (escala de aceleração 1:1). Embora neste modelo não seja necessário esta escala de aceleração, seu uso resulta em um modelo mais flexível, e, portanto, com frequências naturais mais baixas e mais fáceis de medir.

Com as três grandezas selecionadas para controle (comprimento, massa específica e frequência), todas as demais grandezas têm suas escalas derivadas, conforme apresentado na nova planilha, tabela 3.3.

A planilha mostrada nesta tabela foi desenvolvida durante este trabalho de dissertação, e permite o cálculo rápido das escalas de todas as grandezas derivadas relevantes para a modelagem aeroelástica. Observa-se na planilha que a escala de aceleração resultou 1,103:1, ou seja, muito próxima à escala 1:1 referente à semelhança de número de Froude.

A escala de frequência é determinada após a montagem do modelo sobre a base flexível, conforme descrito anteriormente na seção 3.4.4. A massa total do modelo, posteriormente complementada, resultou ser 610g. Como o modelo não apresenta superfícies curvas, seu comportamento aerodinâmico não é sensivelmente dependente do número de Reynolds, e, portanto não é necessário qualquer artifício para garantir semelhança quanto a este parâmetro.

Tabela 3.3: Planilha adequada para determinação das escalas do modelo CAARC.

Grandezas Fundamentais	Símbolo	Unidade	L	M	T				
Comprimento	l	m	1	0	0				
Massa	m	kg	0	1	0				
Tempo	t	s	0	0	1				
Grandezas de base	Símbolo	Unidade	L	M	T	Inversão			Escala
Comprimento	l	m	1	0	0	1	0	0	2,500E-03
Massa específica	ρ	kg/m ³	-3	1	0	3	1	0	1,000E+00
Frequência	f	Hz	0	0	-1	0	0	-1	2,100E+01
Grandezas derivadas	Símbolo	Unidade	L	M	T	l	ρ	f	Escala
Comprimento	l	m	1	0	0	1	0	0	2,500E-03
Massa	m	kg	0	1	0	3	1	0	1,563E-08
Tempo	t	s	0	0	1	0	0	-1	4,762E-02
Aceleração	a	m/s ²	1	0	-2	1	0	2	1,103E+00
Aceleração angular	α	rad/s ²	0	0	-2	0	0	2	4,410E+02
Velocidade	v	m/s	1	0	-1	1	0	1	5,250E-02
Velocidade angular	ω	rad/s	0	0	-1	0	0	1	2,100E+01
Força	F	N	1	1	-2	4	1	2	1,723E-08
Momento	M	Nm	2	1	-2	5	1	2	4,307E-11
Frequência	f	Hz	0	0	-1	0	0	1	2,100E+01
Frequência angular	ω	rad/s	0	0	-1	0	0	1	2,100E+01
Amortecimento viscoso	c	kg/s	0	1	-1	3	1	1	3,281E-07
Razão de amortecimento	ζ	–	0	0	0	0	0	0	1,000E+00
Módulo de elasticidade	E	Pa	-1	1	-2	2	1	2	2,756E-03
Módulo de corte	G	Pa	-1	1	-2	2	1	2	2,756E-03
Coefficiente de Poisson	ν	–	0	0	0	0	0	0	1,000E+00
Deformação	ε	–	0	0	0	0	0	0	1,000E+00
Tensão	σ	Pa	-1	1	-2	2	1	2	2,756E-03
Massa específica	ρ	kg/m ³	-3	1	0	0	1	0	1,000E+00
Massa por comprimento	μ	kg/m	-1	1	0	2	1	0	6,250E-06
Inércia de massa	I	kg m ²	2	1	0	5	1	0	9,766E-14
Inércia por comprimento	i	kg m	1	1	0	4	1	0	3,906E-11
Rigidez	k	N/m	0	1	-2	3	1	2	6,891E-06
Rigidez axial	EA/L	N/m	0	1	-2	3	1	2	6,891E-06
Rigidez angular	K_{θ}	Nm/rad	2	1	-2	5	1	2	4,307E-11
Rigidez a flexão	EI/L^3	N/m	0	1	-2	3	1	2	6,891E-06
Rigidez a torção	GK/L	Nm/rad	2	1	-2	5	1	2	4,307E-11
Área	A	m ²	2	0	0	2	0	0	6,250E-06
Volume	V	m ³	3	0	0	3	0	0	1,563E-08
Módulo resistente	W	m ³	3	0	0	3	0	0	1,563E-08
Inércia de área	I	m ⁴	4	0	0	4	0	0	3,906E-11
Constante de torção	K	m ⁴	4	0	0	4	0	0	3,906E-11
Viscosidade dinâmica	μ	kg/m/s	-1	1	-1	2	1	1	1,313E-04
Viscosidade cinemática	ν	m ² /s	2	0	-1	2	0	1	1,313E-04

3.5 A TÉCNICA DE BALANÇA DE FORÇAS EM ALTA FREQUÊNCIA

O método experimental de Balança de Forças de Alta Frequência (*HFFB – High Frequency Force Balance*) consiste em se medir as forças globais induzidas pelo vento que agem na base de um modelo rígido usando uma balança de forças com resposta rápida.

Para calcular previsões das respostas dinâmicas nas estruturas, o modelo deve ser leve e rígido, isto é, aparentemente rígido, pois assim as medições refletem somente as flutuações do carregamento aplicado pelo vento, e não as vibrações do próprio modelo. A necessidade de um modelo leve e rígido está em contraste com um modelo aeroelástico, que seria cuidadosamente projetado para vibrar como a estrutura real vibraria.

Conforme informam Dragoiescu et al. (2006, p. 2), o método *HFFB* quando primeiro foi introduzido, permitiu um modelo simples ser construído e testado, gerando dados para que diversos conjuntos de informações dinâmicas estruturais, como por exemplo, massa, rigidez e amortecimento, pudessem ser analisados sem alterar o modelo e sem repetir o teste em túnel de vento. Por isto, o método de Balança de Forças de Alta Frequência provou ser uma ferramenta custo efetiva.

Inerente ao método *HFFB*, está o fato de que somente o carregamento total na base é conhecido. A previsão da resposta dinâmica à ação do vento requer conhecimento das forças generalizadas induzidas pelo vento, que são relacionadas à distribuição de pressões sobre a altura da estrutura. Para um edifício com forma modal linear, é possível usar diretamente momentos na base para representar as forças generalizadas. Para o caso geral de formas modais não-generalizadas, vários refinamentos são possíveis, tanto na montagem dos testes físicos como também na análise.

Neste estudo de dissertação não são realizadas comparações com resultados através do método *HFFB*. Apenas cria-se esta seção, para mostrar as principais vantagens e limitações deste método, ao mesmo tempo em que se menciona sua existência e importância.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios foram realizados no Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann* da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Os modelos foram posicionados sobre a mesa II do túnel de vento. As características naturais do vento foram simuladas por obstáculos a barlavento do modelo e cobertura do piso do túnel com blocos disseminados, conforme indicado anteriormente no capítulo 3, figura 3.3. Os dispositivos utilizados representam um expoente p igual a 0,185 e um coeficiente b igual a 0,86, o que simula um terreno característico para a categoria III da norma brasileira NBR-6123 (1988), conforme tabela 2.3, anteriormente apresentada.

4.1 MEDIÇÃO DE PRESSÕES DINÂMICAS EM MODELO RÍGIDO

Para testes no *HFPI (High Frequency Pressure Integration)*, um modelo em acrílico foi construído e instrumentado com 280 tomadas de pressão. A figura 4.1 mostra o modelo *CAARC* instalado e instrumentado com tomadas de pressão.



Figura 4.1: Modelo *CAARC* instrumentado com tomadas de pressão para fins de aplicação da técnica *HFPI*.

A vista inferior do modelo, onde se observam as mangueiras correspondentes às 280 tomadas de pressão ligadas a um sistema de medição eletrônico da Scanivalve Corp, pode ser visto na figura 4.2:

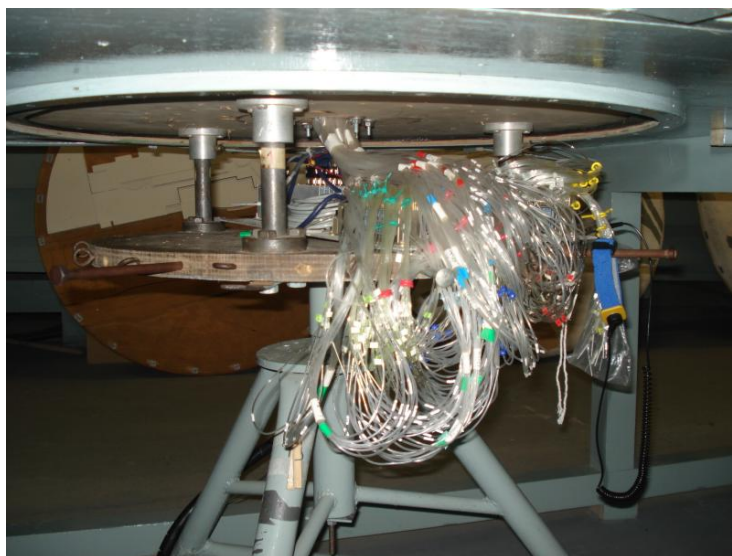


Figura 4.2: Vista inferior do modelo, mostrando as mangueiras correspondentes às 280 tomadas de pressão.

Os ensaios foram realizados com uma velocidade por configuração em torno de 26m/s, tendo adquiridas em cada configuração 8192 medidas de pressão por tomada, a uma taxa de aquisição de aproximadamente 500Hz.

As pressões nas tomadas foram medidas com a utilização de 5 módulos de transdutores eletrônicos de pressão da marca Scanivalve Corp., modelo ZOC33, cada um com 64 sensores, capazes de medir pressões de até 20mm de água, com imprecisão somente de 0,12%.

Os ensaios no *HFPI* foram realizados de acordo com os procedimentos apresentados anteriormente no capítulo 3, seção 3.3. Foi utilizado um programa em MATLAB para integração das pressões, a fim de se chegar às forças dinâmicas.

4.1.1 Resposta na direção longitudinal ao vento

As tabelas 4.1 e 4.2 apresentam as respostas finais obtidas para o vento incidindo na direção y (face maior) e direção x (face menor), respectivamente.

Tabela 4.1: Resposta na direção longitudinal ao vento obtida através da técnica de integração de pressões em alta frequência com vento incidindo na direção y (face maior).

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do modelo [m/s]	Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]	Experimental – Escala protótipo			
		Momento estático [MNm]	Momento flutuante [MNm]	Momento máximo [MNm]	Fator de pico
1,05	20	226	140	366	3,72
2,10	40	906	559	1465	3,72
3,15	60	2012	1151	3163	3,47
4,20	80	3881	1389	5270	3,26
5,25	100	5648	2366	8014	3,10

Tabela 4.2: Resposta na direção longitudinal ao vento obtida através da técnica de integração de pressões em alta frequência com vento incidindo na direção x (face menor).

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do modelo [m/s]	Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]	Experimental – Escala protótipo			
		Momento estático [MNm]	Momento flutuante [MNm]	Momento máximo [MNm]	Fator de pico
1,05	20	119	67	186	3,70
2,10	40	474	267	741	3,69
3,15	60	1067	601	1668	3,69
4,20	80	2059	1265	3323	3,47
5,25	100	2997	2586	5583	3,12

4.1.2 Resposta na direção transversal ao vento

As tabelas 4.3 e 4.4 apresentam as respostas finais obtidas para o vento incidindo na direção y (face maior) e direção x (face menor), respectivamente. Ressalta-se, no entanto, que para a resposta na direção transversal ao vento, tem-se interesse apenas na parte flutuante, pois nos estudos experimentais realizados onde está se focando as duas direções ortogonais principais com simetria geométrica, a força estática, de fato, tem valor zero.

Destaca-se, também, que para a resposta na direção transversal ao vento, foram consideradas nove diferentes velocidades de incidência do vento na estrutura. Isto é mencionado, pois, na resposta longitudinal ao vento, foram consideradas cinco velocidades. O

motivo desta diferença no número de velocidades estudadas, está em se conseguir para a resposta na direção transversal ao vento, apresentar mais claramente possível as curvas da máxima resposta normalizada transversal ao vento incidente.

Tabela 4.3: Resposta na direção transversal ao vento obtida através da técnica de integração de pressões em alta frequência com vento incidindo na direção y (face maior).

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do modelo [m/s]	Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]	Experimental – Escala protótipo	
		Momento rms [MNm]	Momento de pico [MNm]
2,94	56	1230	3781
3,36	64	1606	4938
3,78	72	3042	9975
4,20	80	3756	12314
4,62	88	13209	38788
5,04	96	22849	62818
5,46	104	10607	37042
5,88	112	8967	30112
6,30	120	7803	27202

Tabela 4.4: Resposta na direção transversal ao vento obtida através da técnica de integração de pressões em alta frequência com vento incidindo na direção x (face menor).

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do modelo [m/s]	Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]	Experimental – Escala protótipo	
		Momento rms [MNm]	Momento de pico [MNm]
2,10	40	682	2097
2,62	50	1341	4123
3,15	60	3142	10304
3,67	70	6063	19876
4,20	80	13037	38283
4,72	90	18197	50993
5,25	100	10047	35131
5,77	110	8841	29668
6,30	120	8176	28501

4.2 MEDIÇÃO EM MODELO COM BASE FLEXÍVEL

O procedimento experimental para verificação do comportamento dinâmico em modelo com base flexível foi realizado com o modelo *CAARC* construído em chapas de MDF, posicionado sobre uma base flexível em formato estrela, conforme mostra a figura 4.3:



Figura 4.3: Dispositivos utilizados nos ensaios para simulação das características naturais do vento, juntamente com o modelo *CAARC* instalado sobre a base flexível.

Os ensaios foram realizados para duas direções diferentes de incidência do vento no modelo: direção y ou 0° (face maior) e direção x ou 90° (face menor). A figura 2.6, anteriormente apresentada na seção 2.5.5, apresenta esquematicamente as posições dos ensaios.

O modelo foi instrumentado com dois acelerômetros biaxiais *MEMS* no topo e dois extensômetros resistivos do tipo *Strain Gauge* no suporte do modelo *CAARC*, conforme apresentado anteriormente no capítulo 3, figuras 3.20 e 3.21, respectivamente. A exibição dos materiais utilizados para a aquisição de dados durante o ensaio pode ser vista na figura 4.4. Os materiais utilizados foram: notebook com placa de aquisição de 16 bits, manômetro digital, amplificadores e condicionadores de sinal.



Figura 4.4: Materiais utilizados para aquisição de dados durante os ensaios da base flexível.

Os procedimentos adotados durante a realização dos ensaios seguem o roteiro apresentado anteriormente no capítulo 3, seção 3.4. Foi utilizado um programa em MATLAB para a passagem do deslocamento da base para o topo e conversão do sinal de aceleração para deslocamento. A taxa de aquisição utilizada foi de 1024 pontos por segundo, porém o intervalo de medição foi de 32 segundos, o que corresponde na escala do protótipo a intervalos na ordem de 10 minutos, sendo um intervalo representativo de tempo para uma boa interpretação dos dados.

O sinal oriundo dos acelerômetros e extensômetros para cada uma das direções e velocidades do vento, foram adaptados e processados por um programa em MATLAB. O programa gerou dois tipos de gráficos: os que relacionam a velocidade do vento e o momento gerado na base do protótipo no entorno de cada eixo e os que relacionam a velocidade do vento e o deslocamento no topo do protótipo. Para cada figura, apresentadas a seguir, os gráficos superiores representam as leituras dos acelerômetros localizados no topo do modelo, enquanto que os gráficos inferiores representam as leituras dos extensômetros localizados na célula de carga (base flexível) para os eixos x e y. Para tais gráficos, as curvas na cor azul referem-se às respostas médias; as curvas na cor vermelho, às parcelas flutuantes; e as curvas na cor magenta, às respostas totais, dadas pela equação 4.1. Ressalta-se, no entanto, que somente as pontes extensométricas podem medir a resposta média.

$$X_{\text{total}} = \bar{X} + g\tilde{X} \quad (\text{equação 4.1})$$

Onde: X_{total} resposta total;
 \bar{X} resposta média;
 g fator de pico;
 \tilde{X} resposta flutuante (rms).

As figuras 4.5 e 4.6 apresentam os gráficos gerados pelo programa em MATLAB para o vento incidindo na direção y (face maior). Estas figuras comparam o momento na base e o deslocamento no topo do protótipo, respectivamente, entre os sinais oriundos dos acelerômetros e das pontes extensométricas.

As respostas na direção longitudinal ao vento nesta face do protótipo, podem ser apreciadas nos gráficos referentes aos momentos no entorno do eixo x e nos gráficos relativos aos deslocamentos na direção do eixo y. Já as respostas na direção transversal ao vento, podem ser analisadas nos gráficos referentes aos momentos no entorno do eixo y e nos gráficos relativos aos deslocamentos na direção do eixo x.

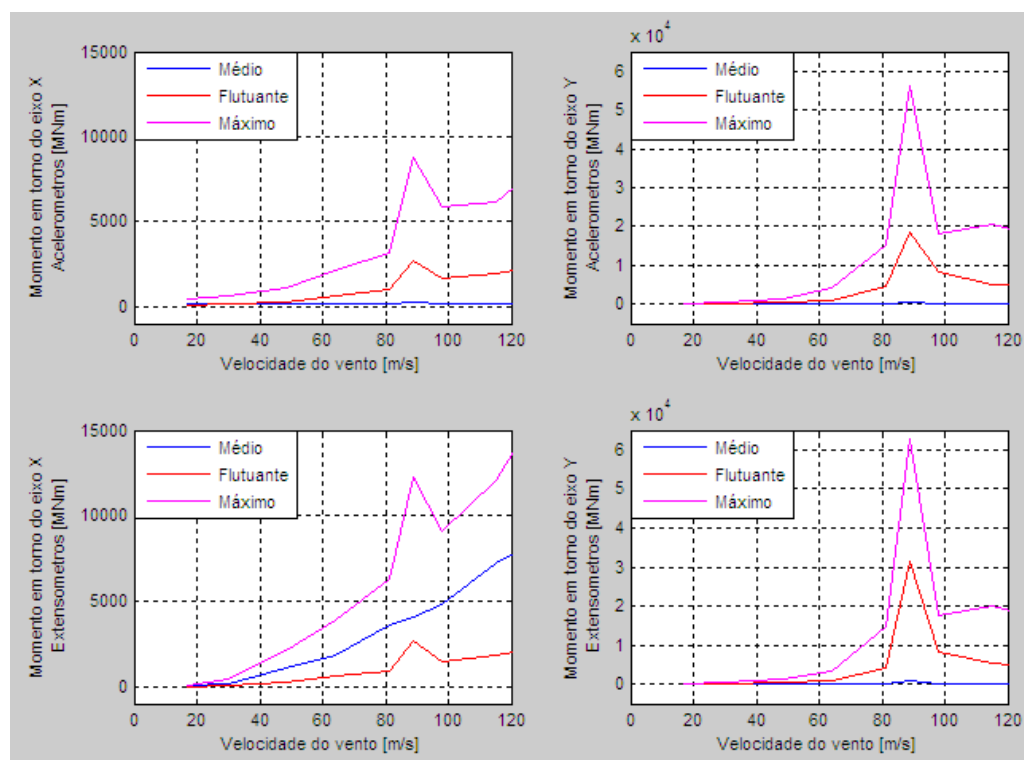


Figura 4.5: Comparação do momento na base do protótipo entre os sinais oriundos dos acelerômetros e das pontes extensométricas para direção y (face maior).

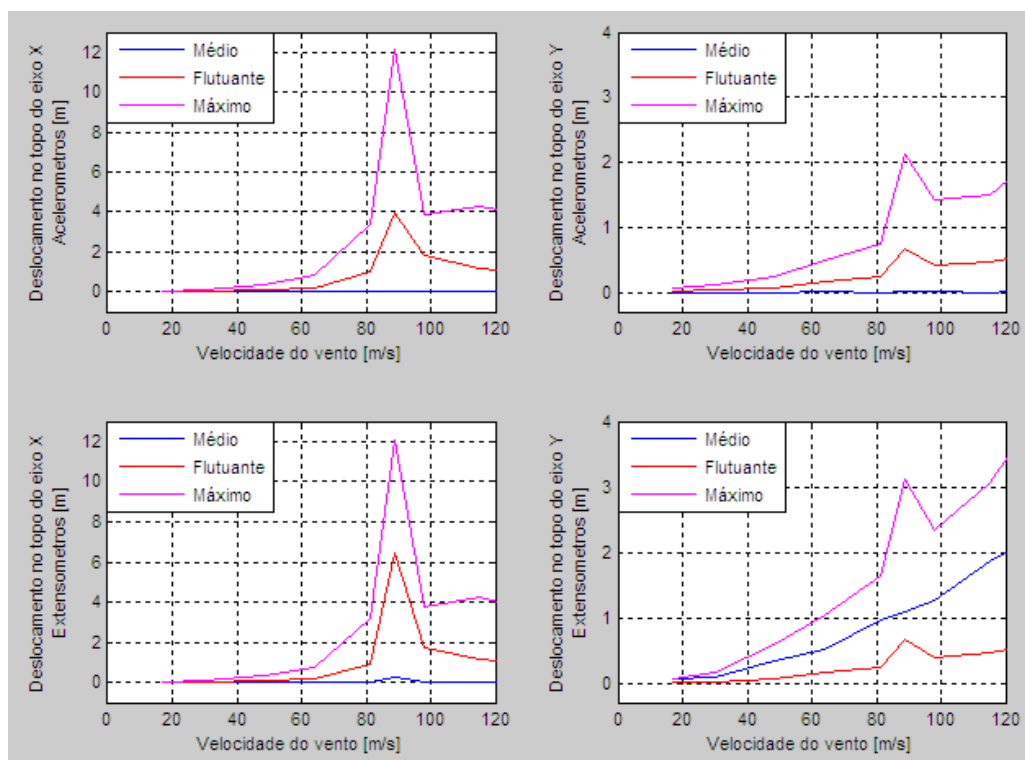


Figura 4.6: Comparação do deslocamento no topo do protótipo entre os sinais oriundos dos acelerômetros e das pontes extensométricas para direção y (face maior).

As figuras 4.7 e 4.8 apresentam os gráficos gerados pelo programa em MATLAB para o vento incidindo na direção x (face menor). Estas figuras comparam o momento na base e o deslocamento no topo do protótipo, respectivamente, entre os sinais oriundos dos acelerômetros e das pontes extensométricas.

As respostas na direção longitudinal ao vento nesta face do protótipo, podem ser apreciadas nos gráficos referentes aos momentos no entorno do eixo y e nos gráficos relativos aos deslocamentos na direção do eixo x. Já as respostas na direção transversal ao vento, podem ser analisadas nos gráficos referentes aos momentos e no entorno do eixo x e nos gráficos relativos aos deslocamentos na direção do eixo y.

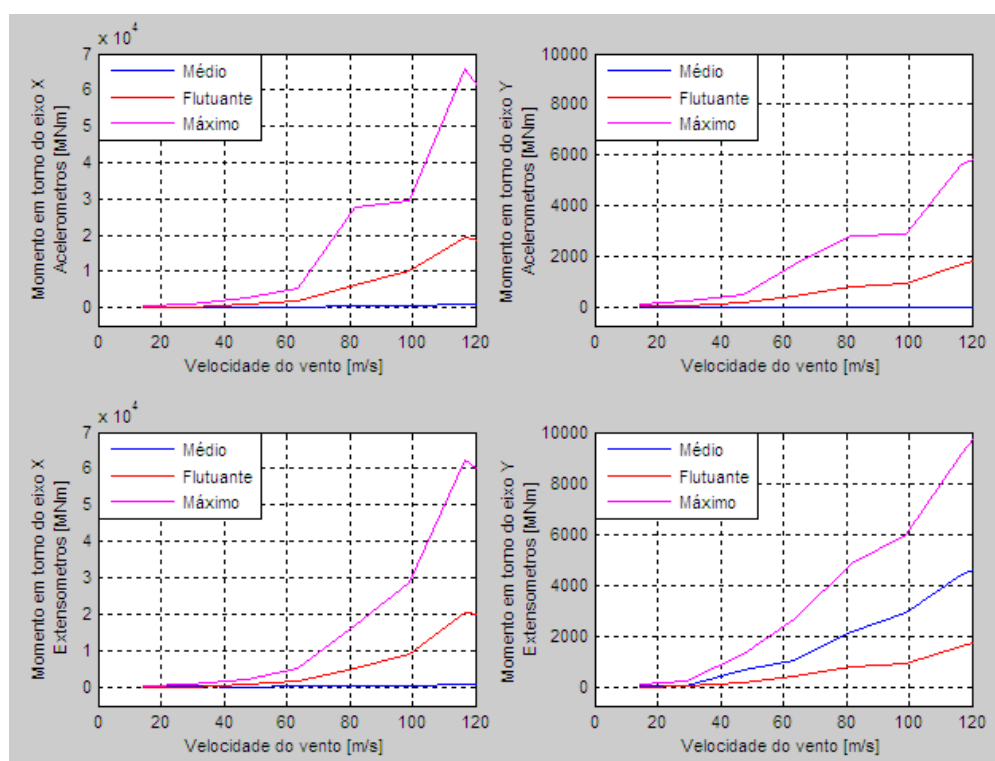


Figura 4.7: Comparação do momento na base do protótipo entre os sinais oriundos dos acelerômetros e das pontes extensométricas para direção x (face menor).

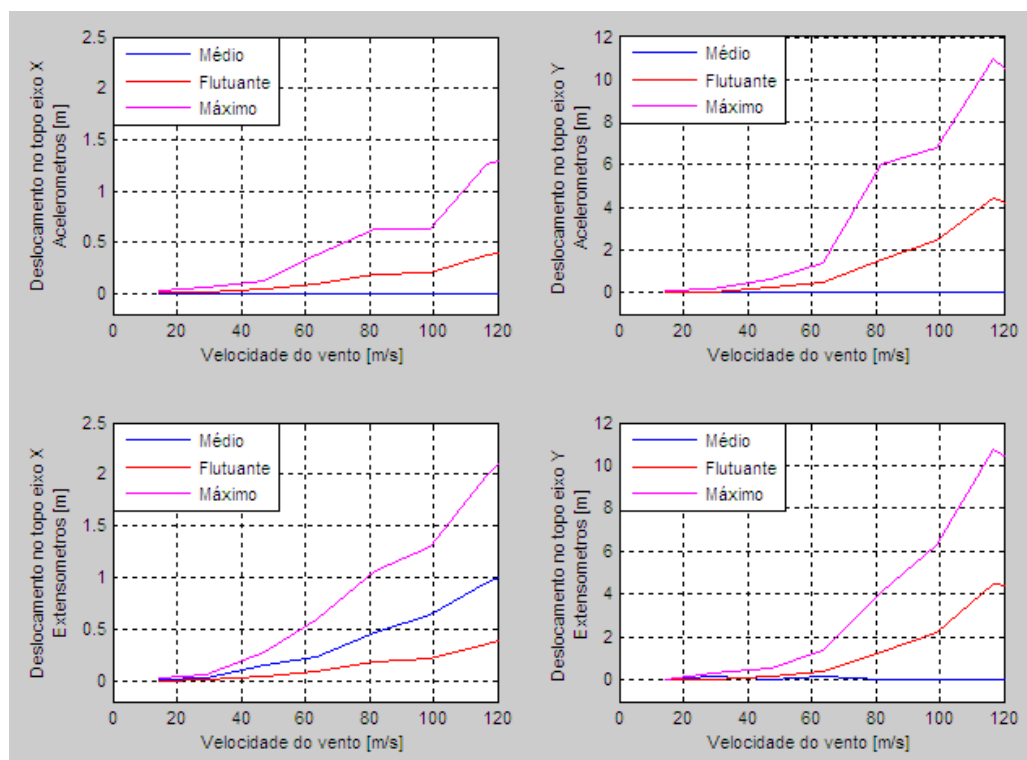


Figura 4.8: Comparação do deslocamento no topo do protótipo entre os sinais oriundos dos acelerômetros e das pontes extensométricas para direção x (face menor).

4.2.1 Resposta na direção longitudinal ao vento

As tabelas 4.5 e 4.6 apresentam as respostas finais obtidas para o vento incidindo na direção y (face maior) e direção x (face menor), respectivamente.

Tabela 4.5: Resposta na direção longitudinal ao vento obtida através da técnica com base flexível com vento incidindo na direção y (face maior).

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do modelo [m/s]	Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]	Experimental – Escala protótipo						
		Extensômetros				Acelerômetros		
		Momento estático [MNm]	Momento flutuante [MNm]	Momento máximo [MNm]	Fator de pico	Momento flutuante [MNm]	Momento máximo [MNm]	Fator de pico
1,05	20	67	93	160	2,66	520	587	4,86
2,10	40	694	627	1321	3,17	898	1592	4,03
3,15	60	1675	1734	3409	3,15	1878	3553	3,36
4,20	80	3479	2648	6127	2,84	3080	6559	3,17
5,25	100	5080	4318	9398	2,79	5900	10980	3,46

Tabela 4.6: Resposta na direção longitudinal ao vento obtida através da técnica com base flexível com vento incidindo na direção x (face menor).

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do modelo [m/s]	Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]	Experimental – Escala protótipo						
		Extensômetros				Acelerômetros		
		Momento estático [MNm]	Momento flutuante [MNm]	Momento máximo [MNm]	Fator de pico	Momento flutuante [MNm]	Momento máximo [MNm]	Fator de pico
1,05	20	84	93	177	2,66	200	284	3,03
2,10	40	461	423	884	3,07	428	889	3,04
3,15	60	991	1387	2378	3,70	1438	2429	3,86
4,20	80	2074	2600	4674	3,26	2745	4819	3,36
5,25	100	3025	3098	6123	3,12	3006	6031	3,07

4.2.2 Resposta na direção transversal ao vento

As tabelas 4.7 e 4.8 apresentam as respostas finais obtidas para o vento incidindo na direção y (face maior) e direção x (face menor), respectivamente. Conforme dito anteriormente na seção 4.1.2, aqui novamente lembra-se que, a força estática (média) para a resposta na direção transversal ao vento, assume valor nulo. Os extensômetros instalados na base da célula de carga leram pequenos resultados para a resposta na direção transversal ao vento, estas leituras consistem em erros de precisão ou erros estatísticos no cálculo do valor médio.

Mais um vez destaca-se que para a resposta na direção transversal ao vento, foram consideradas nove diferentes velocidades de incidência do vento na estrutura, a fim de, evidenciar os picos nas curvas da máxima resposta normalizada transversal ao vento incidente.

Tabela 4.7: Resposta na direção transversal ao vento obtida através da técnica com base flexível com vento incidindo na direção y (face maior).

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do modelo [m/s]	Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]	Experimental – Escala protótipo			
		Extensômetros		Acelerômetros	
		Momento rms [MNm]	Momento de pico [MNm]	Momento rms [MNm]	Momento de pico [MNm]
2,94	56	702	2353	1020	2724
3,36	64	974	3299	1030	4040
3,78	72	2542	8647	2660	9273
4,20	80	4118	14016	4296	14526
4,62	88	31383	62894	18341	56392
5,04	96	13361	28040	10659	26987
5,46	104	7064	18512	7287	19034
5,88	112	5736	19517	5795	19997
6,30	120	5091	18974	5102	19468

Tabela 4.8: Resposta na direção transversal ao vento obtida através da técnica com base flexível com vento incidindo na direção x (face menor).

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do modelo [m/s]	Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]	Experimental – Escala protótipo			
		Extensômetros		Acelerômetros	
		Momento rms [MNm]	Momento de pico [MNm]	Momento rms [MNm]	Momento de pico [MNm]
2,10	40	538	1838	598	1955
2,62	50	926	2787	1024	3102
3,15	60	1472	4561	1586	4819
3,67	70	2926	9499	3444	13365
4,20	80	4893	16138	5997	25581
4,72	90	7138	22847	8249	28491
5,25	100	9793	30626	10702	31357
5,77	110	16303	49827	15951	52282
6,30	120	19668	60069	18580	61602

5 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS

Os resultados finais teóricos e experimentais são apresentados em tabelas e figuras nas seções 5.1 e 5.2, onde são comparadas as respostas frente à ação longitudinal e transversal ao vento.

5.1 RESPOSTA NA DIREÇÃO LONGITUDINAL AO VENTO

Nas tabelas 5.1 (direção y) e 5.2 (direção x) comparam-se as respostas finais teóricas na direção longitudinal ao vento obtidas através do cálculo proposto pela NBR-6123 (1988) método simplificado e método discreto, com as respostas finais experimentais obtidas através dos ensaios realizados em túnel de vento a partir da técnica de modelagem aeroelástica com base flexível e através do método de integração de pressões em alta frequência, *HFPI*.

Tabela 5.1: Comparativo das respostas finais na direção longitudinal ao vento obtidas através do cálculo por métodos teóricos e através dos ensaios em túnel de vento com vento incidindo na direção y (face maior).

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]	Escala protótipo				
	Método teórico		Método experimental		
	Método simplificado	Método discreto	Base flexível		Integração de pressões
			Extensômetros	Acelerômetros	
	Momento total [MNm]	Momento total [MNm]	Momento total [MNm]	Momento total [MNm]	Momento total [MNm]
20	335	341	160	587	366
40	1371	1395	1321	1592	1465
60	3131	3188	3409	3553	3163
80	5670	5774	6127	6559	5270
100	8996	9164	9398	10980	8014

Tabela 5.2: Comparativo das respostas finais na direção longitudinal ao vento obtidas através do cálculo por métodos teóricos e através dos ensaios em túnel de vento com vento incidindo na direção x (face menor).

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]	Escala protótipo				
	Método teórico		Método experimental		
	Método simplificado	Método discreto	Base flexível		Integração de pressões
	Momento total [MNm]	Momento total [MNm]	Extensômetros	Acelerômetros	
			Momento total [MNm]	Momento total [MNm]	Momento total [MNm]
20	181	183	177	284	186
40	739	748	884	889	741
60	1687	1708	2378	2429	1668
80	3056	3094	4674	4819	3323
100	4849	4910	6123	6031	5583

Nas figuras 5.1 (direção y) e 5.2 (direção x) as curvas da máxima resposta normalizada longitudinal ao vento incidente são comparadas entre as obtidas através dos métodos teóricos e experimentais. Nota-se que os valores originários dos métodos teóricos têm um ajuste muito bom com os valores medidos nos ensaios em toda gama de velocidades apresentada, exceto para as respostas através da base flexível com vento incidente na direção x, na qual entre as velocidades reduzidas 10 e 16,7 as respostas apresentaram-se aproximadamente 31% maiores em relação ao modelo de pressões. Estas respostas maiores medidas na base flexível justificam-se pelo acoplamento dos movimentos, causado por energia sendo transferida do movimento transversal ao vento para o longitudinal, devido à coincidência nas frequências naturais de vibração livre do modelo nas duas direções.

Observam-se ainda nas figuras que o comportamento das curvas da resposta segundo a NBR-6123 (1988), métodos simplificado e discreto, assemelham-se bastante aos gráficos estabelecidos a partir do método de integração de pressões em alta frequência, uma vez que, o mesmo valor do coeficiente de arrasto para determinada velocidade de incidência do vento na estrutura, é utilizado nos três métodos. No apêndice D apresentam-se duas tabelas (tabelas D1 e D2) que fazem um comparativo das respostas na direção longitudinal ao vento para as direções y e x, respectivamente, obtidas a partir dos métodos teóricos e experimentais.

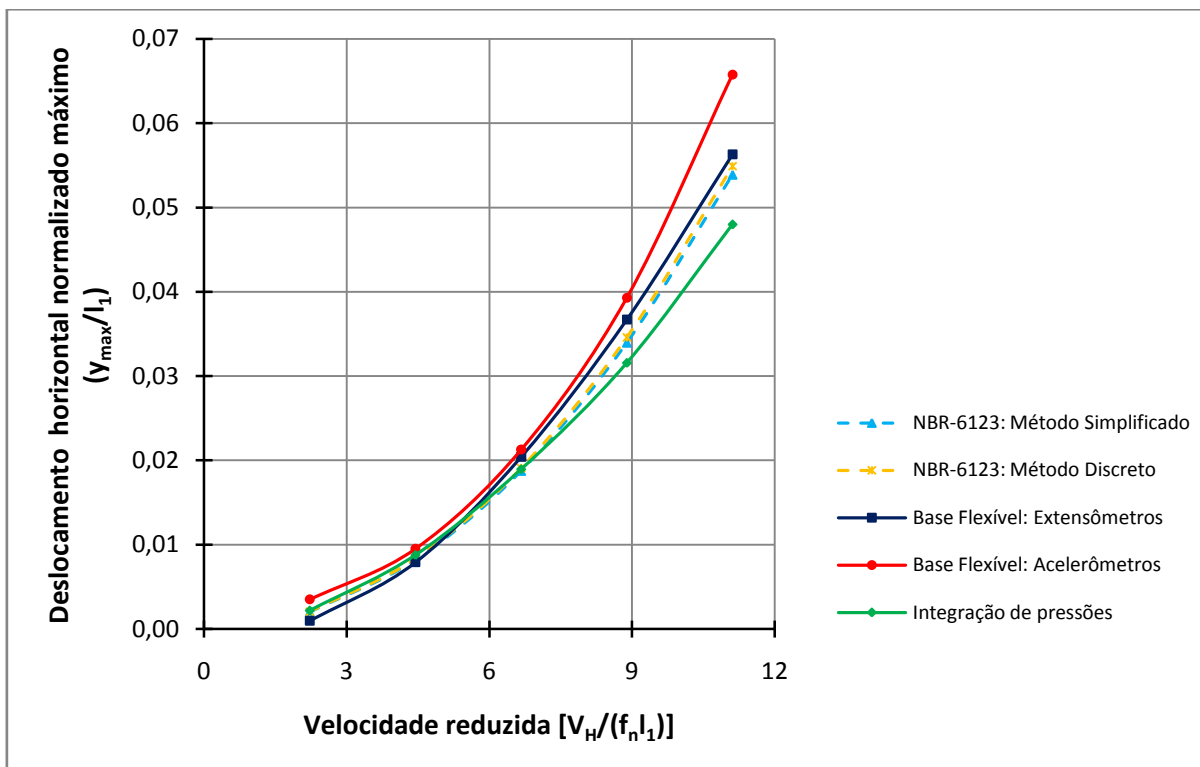


Figura 5.1: Deslocamentos horizontais normalizados máximos no topo do protótipo na direção longitudinal ao vento para vento incidindo na direção y (face maior).

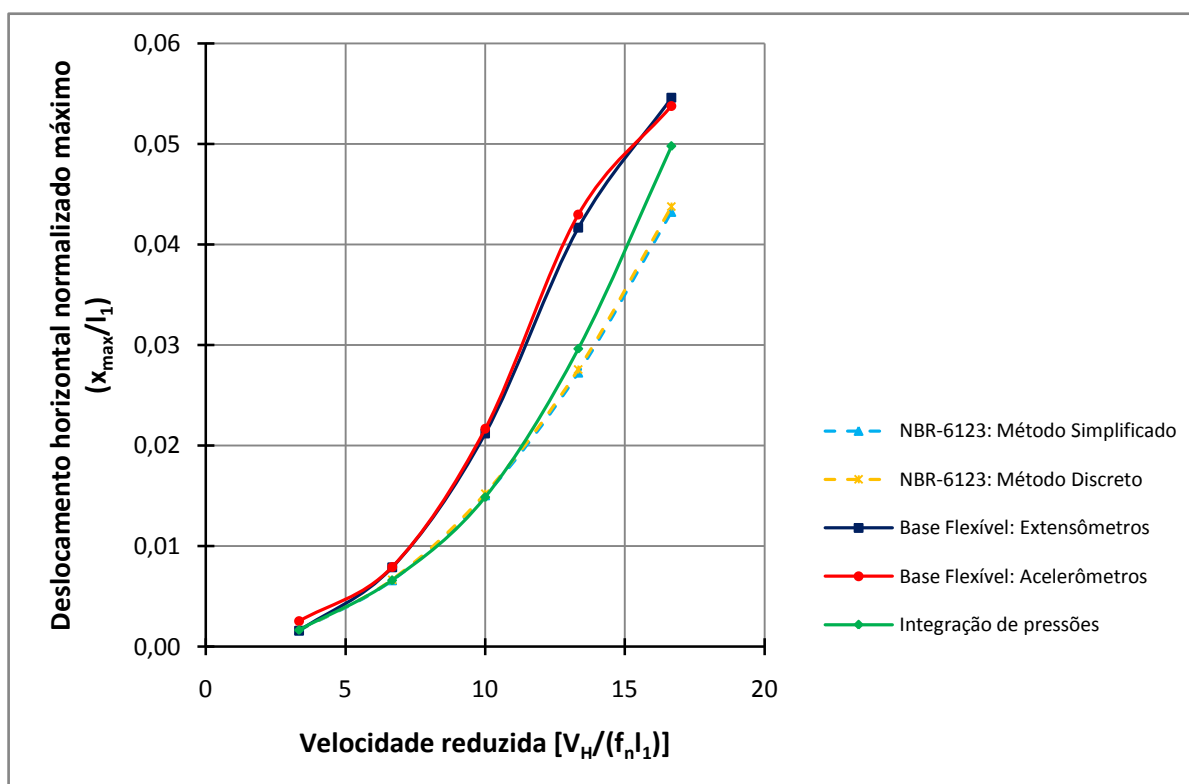


Figura 5.2: Deslocamentos horizontais normalizados máximos no topo do protótipo na direção longitudinal ao vento para vento incidindo na direção x (face menor).

5.2 RESPOSTA NA DIREÇÃO TRANSVERSAL AO VENTO

Nas tabelas 5.3 (direção y) e 5.4 (direção x) comparam-se as respostas finais teóricas na direção transversal ao vento obtidas através do cálculo proposto pelo método de Liang et al. (2002) e através do processo da NBR-6123 capítulo 10, com as respostas finais experimentais obtidas a partir dos ensaios realizados em túnel de vento através da técnica de modelagem aeroelástica com base flexível e a partir do método de integração de pressões em alta frequência, *HFPI*.

Tabela 5.3: Comparativo das respostas finais na direção transversal ao vento obtidas através do cálculo por métodos teóricos e através dos ensaios em túnel de vento com vento incidindo na direção y (face maior).

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]	Escala protótipo				
	Método teórico		Método experimental		
	Liang et al. (2002)	Processo da NBR-6123 capítulo 10	Base flexível		Integração de pressões
	Momento total [MNm]	Momento total [MNm] para $V_{cr} = 96\text{m/s}$	Extensômetros	Acelerômetros	
			Momento total [MNm]	Momento total [MNm]	Momento total [MNm]
56	5651	99783	2353	2724	3781
64	8207		3299	4040	4938
72	12157		8647	9273	9975
80	19794		14016	14526	12314
88	35985		62894	56392	38788
96	46170		28040	26987	62818
104	42809		18512	19034	37042
112	38001		19517	19997	30112
120	34737		18974	19468	27202

Nas figuras 5.3 (direção y) e 5.4 (direção x) as curvas da máxima resposta normalizada transversal ao vento incidente são comparadas entre as obtidas a partir dos métodos teóricos e experimentais.

Tabela 5.4: Comparativo das respostas finais na direção transversal ao vento obtidas através do cálculo por métodos teóricos e através dos ensaios em túnel de vento com vento incidindo na direção x (face menor).

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]	Escala protótipo				
	Método teórico		Método experimental		
	Liang et al. (2002)	Processo da NBR-6123 capítulo 10	Base flexível		Integração de pressões
	Momento total [MNm]	Momento total [MNm]	Extensômetros	Acelerômetros	
Momento total [MNm]			Momento total [MNm]	Momento total [MNm]	
40	3130	Não ocorre a convergência da razão Y_0/l_1	1838	1955	2097
50	6872		2787	3102	4123
60	14317		4561	4819	10304
70	26327		9499	13365	19876
80	35447		16138	25581	38283
90	37495		22847	28491	50993
100	36932		30626	31357	35131
110	36289		49827	52282	29668
120	36118		60069	61602	28501

Na figura 5.3, na qual se apresentam as curvas do deslocamento horizontal normalizado transversal máximo no topo do protótipo para direção y (face maior), pode-se perceber a boa concordância principalmente entre as respostas através dos métodos experimentais. Notam-se, também, os picos bem pronunciados nas curvas correspondentes a cada método apresentado, sendo que para a base flexível, tanto nas respostas lidas a partir dos extensômetros quanto dos acelerômetros, o pico na curva corresponde a velocidade reduzida 9,8, diferente do pico observado nas curvas a partir do método de integração de pressões e do trabalho de Liang et al. (2002), que são verificados para a velocidade reduzida 10,7. Atribui-se esta diferença entre as velocidades para onde se encontra o pico da resposta, à rigidez rotacional determinada para cada método ensaiado, uma vez que, tem-se um modelo flexível e outro rígido. Empregando-se no CAARC o critério de Strouhal para o cálculo da velocidade crítica de desprendimento de vórtices, equação 2.36, com vento incidindo a 0° na estrutura,

chega-se ao valor de velocidade reduzida 11, muito próximo ao obtido principalmente pelos modelos de pressões. Percebe-se, ainda, a semelhança da amplitude do pico nas curvas correspondentes aos métodos experimentais, visto que, o mesmo perfil vertical de velocidades do vento simulado, expoente p da lei potencial igual a 0,185, foi utilizado em ambos os ensaios. Diferentemente ocorre no trabalho de Liang et al. (2002), onde a amplitude do pico na curva do deslocamento é em média 36% menor em comparação aos picos nas curvas correspondentes aos ensaios deste estudo. Esta inconformidade é atribuída justamente ao vento simulado pelos autores chineses, utilizando um expoente p maior do que 0,185, já que, quanto maior a intensidade da componente longitudinal da turbulência, menores tendem a ser os deslocamentos provocados por desprendimento de vórtices. O procedimento de cálculo através do processo da NBR-6123 capítulo 10 determinou um deslocamento normalizado transversal máximo no topo do modelo em torno de 58% maior do que nos estudos experimentais. Este valor superestimado a partir do processo da norma é justificado pelos próprios estimadores (parâmetros) que envolvem o processo de cálculo em estudo.

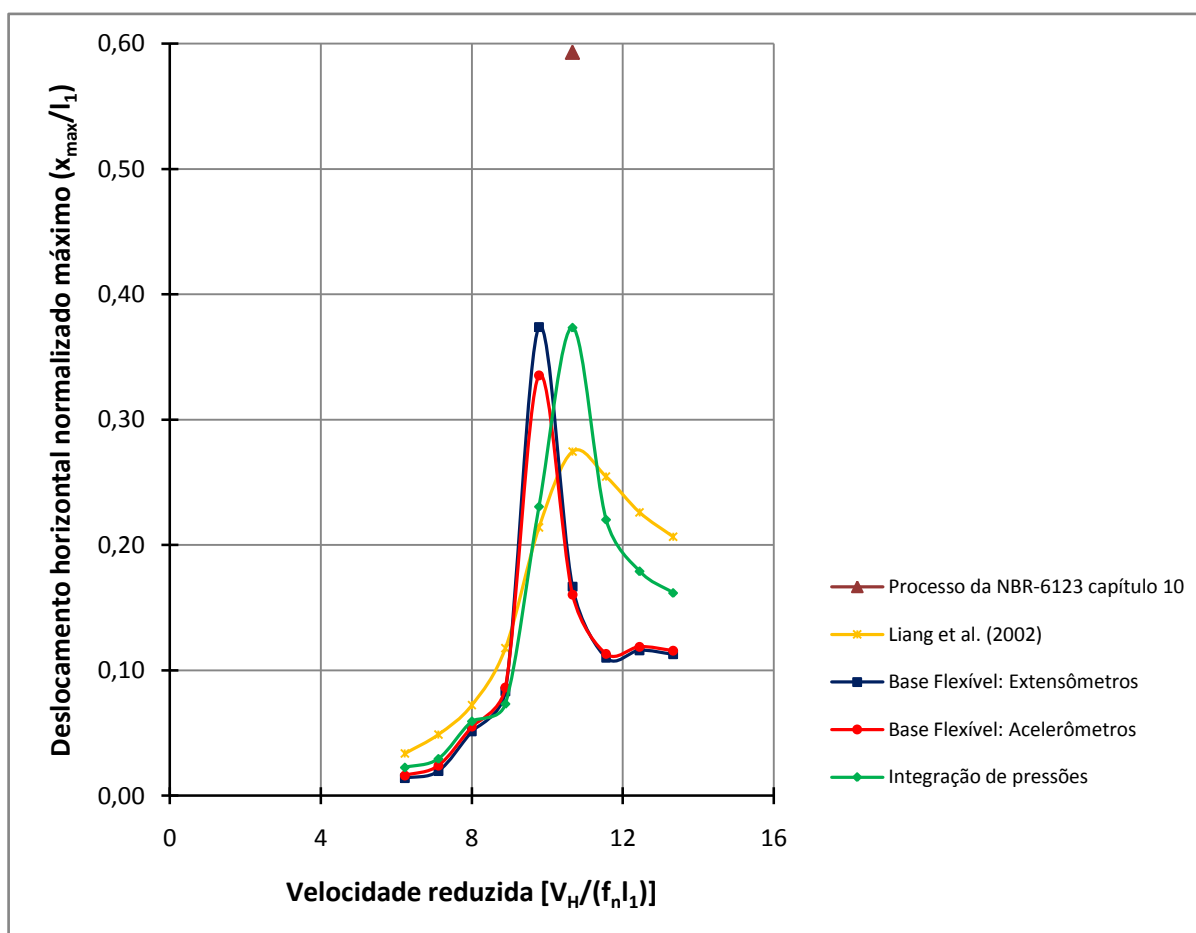


Figura 5.3: Deslocamentos horizontais normalizados máximos no topo do protótipo na direção transversal ao vento para vento incidindo na direção y (face maior).

A figura 5.4 mostra as curvas do deslocamento horizontal normalizado transversal máximo no topo do protótipo para direção x (face menor). Observa-se um bom ajuste entre as respostas experimentais a partir da base flexível, exceto para as velocidades reduzidas entre 10 e 16,7 onde o sinal lido pelos acelerômetros resultou em média 41% maior do que nos extensômetros. Assim como se fez para direção y, aqui na direção x (vento incidindo a 90°) também se aplicou no CAARC o critério de Strouhal para o cálculo da velocidade crítica de desprendimento de vórtices, atingindo o valor de velocidade reduzida 13,4, valor próximo ao obtido pelos modelos de pressões, que são verificados para a velocidade reduzida 15. Mais uma vez nota-se a divergência da amplitude do pico nas curvas correspondentes ao método experimental de integração de pressões em comparação ao método de Liang et al. (2002), no qual a amplitude do pico na curva do deslocamento é de também aproximadamente 36% menor.

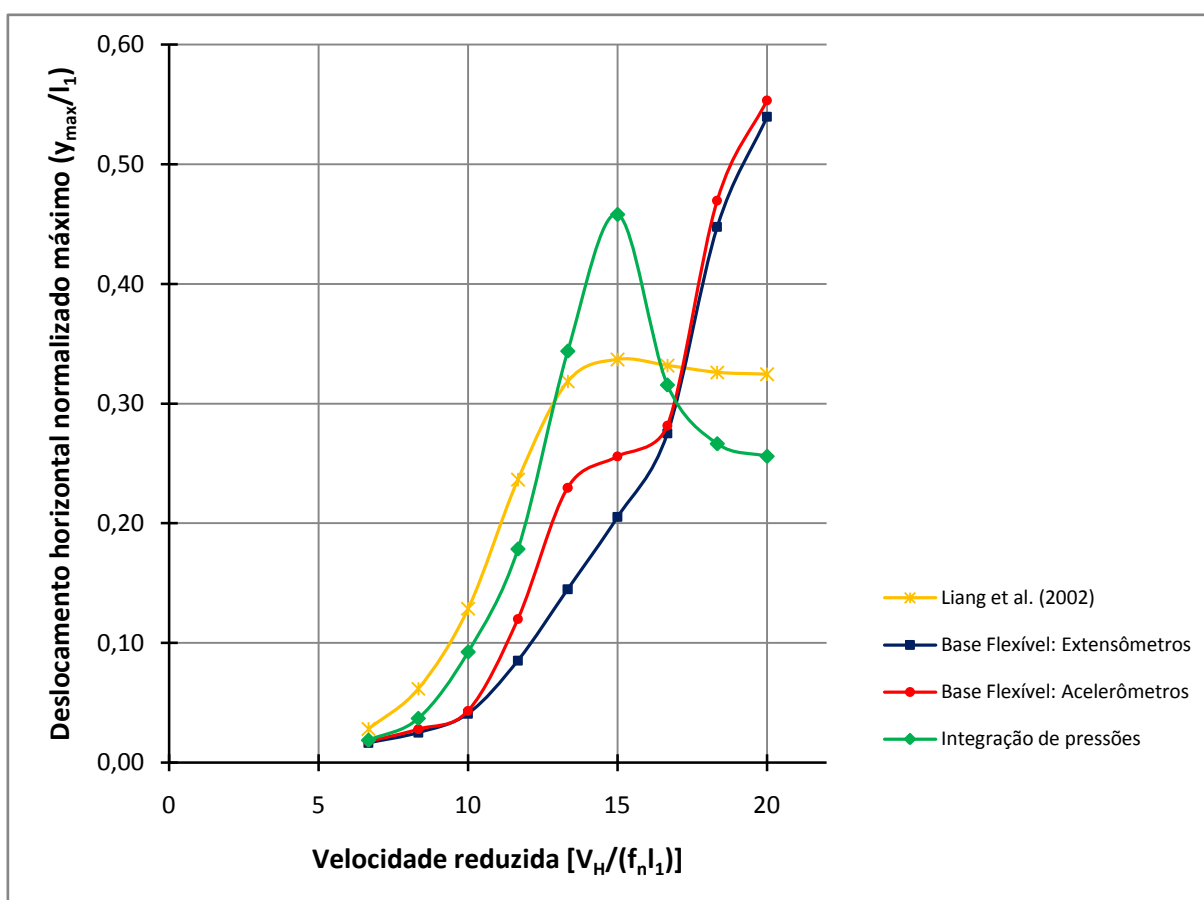


Figura 5.4: Deslocamentos horizontais normalizados máximos no topo do protótipo na direção transversal ao vento para vento incidindo na direção x (face menor).

6 COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

Edifícios altos são solicitados por forças predominantemente horizontais devidas à ação do vento. Estas forças variam no tempo e causam oscilações na estrutura através de um complexo mecanismo de interação vento-estrutura. Em muitos edifícios altos, as solicitações oriundas da vibração transversal à ação do vento podem definir ou governar as especificações de projeto, superando a resposta induzida na direção longitudinal ao vento. Ressalta-se, no entanto, que os modelos matemáticos disponíveis para a determinação da resposta na direção transversal ao vento por desprendimento de vórtices têm caráter fundamentalmente simplificado, baseados em experimentos, que provém de tentativas, erros e acertos.

Considerando que os recentes avanços na análise computacional da dinâmica dos fluidos são promissores, estes atualmente não estão aptos a simular as condições dos protótipos. Desta forma, os ensaios em túnel de vento tem sido a ferramenta mais confiável a recorrer para a determinação dos carregamentos devido ao vento nas estruturas.

Através dos confrontos entre as respostas teóricas e experimentais frente à ação longitudinal e transversal ao vento, demonstrou-se que as duas técnicas de ensaio levaram a resultados compatíveis para o modelo *CAARC* testado. Lembrando que, através do uso deste modelo *CAARC* padrão, associado ao adequado uso dos fatores de escala das grandezas físicas relacionadas nos experimentos, tornou-se possível comparações e discussões no que diz respeito às devidas vantagens ou limitações das técnicas de ensaio.

Neste trabalho de pesquisa foi possível avaliar a aplicabilidade de procedimentos e modelos matemáticos apresentados na literatura técnica, além da modelagem dos ensaios experimentais em túnel de vento. Em razão do grande número de parâmetros (estimadores) envolvidos na metodologia de cálculo através dos métodos teóricos e experimentais, esperam-se diferenças na magnitude dos resultados, no entanto, não invalidando o estudo. Desta maneira, importantes conclusões são extraídas desta pesquisa, conforme seguem adiante:

- a) as respostas frente à ação longitudinal e transversal ao vento obtidas a partir dos ensaios aeroelástico e de pressões em túnel de vento devem ser consideradas como a resposta total. As medições realizadas no modelo aeroelástico incluem as parcelas devidas aos efeitos dinâmicos provenientes da turbulência atmosférica, do desprendimento de vórtices e das forças oriundas da interação vento-estrutura, diferente do que ocorre nas medições realizadas com o modelo rígido (*HFPI*), onde a parcela está apenas associada à turbulência atmosférica. Ao passo em que, as respostas obtidas a partir dos métodos teóricos consideram apenas a parcela devido ao efeito dinâmico proveniente da turbulência atmosférica para a resposta na direção longitudinal ao vento, e as parcelas ocasionadas pelo desprendimento de vórtices e a interação vento-estrutura para a resposta na direção transversal ao vento;
- b) o suporte flexível e o modelo de pressões apresentaram resultados satisfatórios para a resposta dinâmica na direção longitudinal ao vento, quando comparados aos resultados obtidos através da NBR-6123 (1988). O fator de pico obtido pela leitura dos sinais nos experimentos apresentou valor médio igual a 3,5, valor igual ao valor subentendido pela norma, na qual a mesma deixa concludente que o pico do sinal, em um espectro de velocidades, corresponde ao valor médio mais 3,5 vezes a parcela flutuante;
- c) outra observação para a base flexível foi que a Escala de Froude gerou uma base exageradamente flexível, o que provocou velocidades muito altas a serem ensaiadas e a dificuldade de aquisição de alguns parâmetros através da NBR-6123 (1988). Esta norma, como anteriormente mencionado na seção 2.5.5, não apresenta clareza para estruturas com relação \bar{V}_p/fL maiores que 0,1. Assim, com a falta de precisão envolvida na determinação de alguns dados de entrada requeridos pela norma, as respostas flutuantes apresentaram caráter duvidoso. Um suporte mais rígido provocaria velocidades mais baixas no protótipo, melhorando a concordância com os gráficos fornecidos pela norma, bem como, obtendo velocidades reais com o nosso território nacional. Pode-se ainda atribuir a diferença entre os resultados experimentais e teóricos à erros estatísticos envolvidos, uma vez que, para a formulação da resposta

experimental, analisou-se apenas uma amostra do sinal oriundo dos instrumentos de medição;

- d) ainda sobre o suporte flexível, pode-se dizer que, ao contrário de suportes muito sofisticados, a técnica com base flexível permite a confecção de uma base própria para cada edificação com o ajuste de escala mais adequado. A possibilidade de medir a parcela média da resposta é opcional e no caso de se utilizar apenas acelerômetros no topo do modelo, o custo de instrumentação é mínimo;
- e) nos ensaios a partir do método de integração de pressões em alta frequência, *HFPI*, foi possível a coleta de valores para o coeficiente de arrasto. Estes valores apresentaram-se de modo geral entre os valores estipulados pela NBR-6123 (1988) para escoamento de baixa e alta turbulência;
- f) a resposta na direção transversal ao vento apresentou um bom ajuste entre os resultados determinados a partir do modelo aeroelástico e através do modelo de pressões, principalmente para o vento incidente na direção *y* (face maior). Para o vento incidindo na direção *x* (face menor), a resposta na direção transversal ao vento obtida a partir dos ensaios em túnel de vento apresentou um comportamento divergente para algumas velocidades. Diferenças na magnitude da resposta na direção transversal ao vento entre os métodos experimentais são justificadas pela amplificação dinâmica dos deslocamentos, originária dos fenômenos aeroelásticos procedentes da base flexível, ocasionadas principalmente pela componente lateral da turbulência atmosférica e das forças procedentes da interação fluido-estrutura;
- g) o modelo matemático para cargas dinâmicas transversais ao vento desenvolvido por Liang et al. (2002) mostrou ser uma boa ferramenta para avaliação do comportamento dinâmico de estruturas. Sua aplicação possibilitou certificar o uso da técnica experimental de integração de pressões adotada nesta pesquisa através da condução a resultados compatíveis para o modelo *CAARC* testado, visto que, os testes realizados em túnel de vento na pesquisa de Liang et al. (2002) também utilizam a técnica do modelo de pressões;

-
- h) verificou-se nesta pesquisa, a aplicabilidade do procedimento de cálculo recomendado através do processo da NBR-6123 capítulo 10 para previsão da resposta na direção transversal ao vento em estruturas. Este procedimento permitiu somente a resposta para o vento incidindo na direção y (face maior) da estrutura;
- i) em virtude da divergência entre as respostas na direção transversal ao vento para algumas velocidades de incidência do vento na estrutura, criou-se neste estudo uma seção mostrando a dispersão de resultados através de diferentes métodos de cálculo para uma estrutura cilíndrica. Assim, demonstrou-se que a resposta final obtida a partir do processo da norma brasileira NBR-6123 capítulo 10, revelou-se aproximadamente 22% maior em comparação a norma canadense e em torno de 2,9 vezes maior do que a resposta final estabelecida a partir do modelo simplificado de Vickery e Basu (1983). Esta variação entre as respostas é admitida ao considerarmos o caráter simplificado apresentado pelos modelos teóricos;
- j) de modo geral, conseguiu-se apresentar os métodos teóricos e experimentais utilizados neste estudo em uma forma bastante didática, não os deixando implícitos ou fundamentados somente ao modelo *CAARC*.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Seria de grande valor para comparações com as técnicas experimentais realizadas neste estudo, a construção de uma balança de forças em alta frequência (*HFFB – High Frequency Force Balance*), que possibilitaria a medição da resposta determinada somente pelas flutuações do carregamento aplicado pelo vento e não das vibrações do próprio modelo, ou seja, a parcela da resposta devido ao efeito dinâmico proveniente da interação vento-estrutura não estaria considerada.

Estudar a viabilidade para implantação de um sistema de medição do amortecimento aerodinâmico a partir das técnicas experimentais utilizadas neste trabalho ou a partir de uma nova técnica.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Council on Tall Buildings and Urban Habitat. **Tall building criteria and loading**. New York, 1980, 888p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma Brasileira NBR-6123 (NB-599): Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro: 1998. 88p.

BAKER, C.J. **Wind engineering – Past, present and future**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Amsterdam, vol. 95, pp. 843-870, 2007.

BARENBLATT, G.I. **Scaling, self-similarity, and intermediate asymptotics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 386p.

BASKARAN, A. **Wind Engineering Studies on Tall Buildings – Transitions in Research**. Building and Environment, vol. 28, pp. 1-19, 1993.

BEER, F.P.; JOHNSTON, E.R.J. **Mecânica vetorial para engenheiros**. 5ª ed. São Paulo: Makron Books, 1994. vol. 1. 793p.

BLESSMANN, J. **Ação do vento em edifícios**. 2ª ed. rev. Porto Alegre: Editora da Universidade / UFRGS, 1989. 81p.

_____. **Aerodinâmica das Construções**. 2ª Ed. Porto Alegre: Sagra, 1990. 263p.

_____. **O vento na engenharia estrutural**. 1ª ed. Porto Alegre: Editora da Universidade / UFRGS, 1995. 166p.

_____. **Acidentes causados pelo vento**. 4ª ed. Porto Alegre: Editora da Universidade / UFRGS, 2001. 141p.

_____. **Introdução ao Estudo das Ações Dinâmicas do Vento**. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da Universidade / UFRGS, 2005. 282p.

CARNEIRO, F.L. **Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1993, 256p.

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

DRAGOIESCU, C.; GARBER, J.; KUMAR, K.S. **A Comparison of Force Balance and Pressure Integration Techniques for Predicting Wind-Induced Responses of Tall Buildings**. Structures Congress 2006, pp. 1-10.

FRITZ, W.P.; BIENKIEWICZ, B.; CUI, B.; FLAMAND, O.; HO, T.C.E.; KIKITSU, H.; LETCHFORD, C.W.; SIMIU, E. **International Comparison of Wind Tunnel Estimates of Wind Effects on Low-Rise Buildings: Test-Related Uncertainties.** Journal of Structural Engineering, USA: ASCE, 2008. vol. 134, pp. 1887-1890.

FU, J.Y.; LI, Q.S.; WU, J. R.; XIAO, Y. Q.; SONG, L. L. **Field measurements of boundary layer wind characteristics and wind-induced responses of super-tall buildings.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Amsterdam, vol. 96, pp. 1332-1358, 2008.

ISYUMOV, N. **Wind tunnel modeling for civil engineering applications.** In: International workshop on wind tunnel modeling criteria and techniques in civil engineering applications, 1982, Gaithersburg – Maryland. Proceedings... New York: Cambridge University Press, pp. 373-407, 1982.

KIM, Y.; YOU, K.; KO, N. **Across-wind responses of an aeroelastic tapered tall building.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Amsterdam, vol. 96, pp. 1307-1319, 2008.

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

LIANG, S.; LI, Q.S.; LIU, S.; ZHANG, L.; GU, M. **Torsional dynamic wind loads on rectangular tall buildings.** Engineering Structures, vol. 26, pp. 129-137, 2004.

LIN, N.; LETCHFORD, C.; TAMURA, Y.; LIANG, B.; NAKAMURA, O. **Characteristics of wind forces acting on tall buildings.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Amsterdam, vol. 93, pp. 217-242, 2005.

LOREDO-SOUZA, A.M. O túnel de vento como ferramenta de projeto. Revista Concreto & Construções, São Paulo, pp. 64-72, 2007.

LOREDO-SOUZA, A.M.; ROCHA, M.M.; NÚÑEZ, G.J.Z.; OLIVEIRA, M.G.K. Wind Tunnel Tests for the Validation of the New Brazilian Wind Code. In: 11th Americas conference on Wind Engineering, 2009, San Juan, Porto Rico. Proceedings of the 11th Americas conference on Wind Engineering, pp. 1-11, 2009.

MADALOZZO, D.M.S.; **Verificação do desempenho do suporte flexível desenvolvido para análise do comportamento dinâmico de estruturas alteadas submetidas à ação do vento.** Porto Alegre, 2008, 83p. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da UFRGS.

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

MENON, D.; RAO, P.S. **Uncertainties in codal recommendations for across-wind load analysis of R/C chimneys.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Amsterdam, vol. 72, pp. 455-468, 1997.

MIGUEL, L.F.F. **Estudo Teórico e Experimental de um Edifício Alto Submetido à Ação Dinâmica do Vento.** Porto Alegre, 2003, 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

NÚÑEZ, G.J.Z. **Determinação Experimental e Teórica da Resposta Transversal à Ação do Vento de uma Torre de Telecomunicações de Concreto Armado.** Porto Alegre, 2001, 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

OLIVEIRA, M.G.K. **Desenvolvimento de um Suporte Flexível para Ensaios de Modelos Aeroelásticos em Túnel de Vento.** Porto Alegre, 2003, 101p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

OLIVEIRA, M.G.K. **Desenvolvimento de um Suporte Flexível para Estudo dos Efeitos Dinâmicos de Flexo-Torção em Edifícios Altos Submetidos à Ação do vento.** Porto Alegre, 2009, 202p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

PALUCH, M.J. **Vibrações Transversais por Desprendimento de Vórtices de Torres e Chaminés de Concreto Armado de Seção Transversal Circular.** Porto Alegre, 1999, 215p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

REISDÖRFER, A.F. **Engenharia do vento: mais segurança e otimização nas edificações.** Conselho em revista – Revista Mensal do Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, N° 34, 35p, 2007.

REPETTO, M.P.; SOLARI, G. **Equivalent static wind actions on vertical structures.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Amsterdam, vol. 92, pp. 335-357, 2004.

ROCHA, M.M.; **Vibrações em Estruturas – ENG 01022.** Porto Alegre, 2008, 8p. Notas de aula (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da UFRGS.

RUSCHEWEYH, H. Vortex Excited Vibrations. **Wind-excited Vibrations of Structures,** Edited by Technical University, Vienna, pp. 51-84, 1994.

SUPPLEMENT TO THE NATIONAL BUILDING OF CANADA - NBC. National Research Council of Canada, Associate Committee on the National Building Code, Ottawa, NRCC N° 23178, 1985.

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

THOMSON, W.T. **Teoria da vibração com aplicações.** Rio de Janeiro: Interciência, 1978. 462 p.

TIELEMAN, H.W. **Roughness estimation for Wind-load simulation experiments.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Amsterdam, vol.91, pp. 1163-1173, 2003.

TREIN, C.A.; **Modelagem Dinâmica Equivalente de Edifícios Altos Submetidos à Ação do Vento.** Porto Alegre, 2005, 154p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

VICKERY, B.J. **Wind loads and design criteria for chimneys.** Jubileum Conference on Wind Effects on Buildings and Structures. Proceedings of the Jubileum conference on wind effects on buildings and structures, Porto Alegre, 1998. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield. pp.273-296. ISBN 90-5410959-9.

VICKERY, B.J.; BASU, R.I. **Simplified approaches to the evaluation of the across-wind response of chimneys.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Amsterdam, vol. 14, pp. 153-166, 1983.

WILLIAMSON, C.H.K.; GOVARDHAN, R. **A brief review of recent results in vortex-induced vibrations.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Amsterdam, vol. 96, pp. 713-735, 2008.

WU, J.; CHENG, L. **Effects of attack angle on performance of actively controlled high-rise building motion.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Amsterdam, vol. 93, pp. 413-434, 2005.

XIE, J.; IRWIN, P.A. **Application of the force balance technique to a building complex.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Amsterdam, vol. 77-78, pp. 579-590, 1998.

ZHANG, A.; GU, MING. **Wind tunnel tests and numerical simulations of wind pressures on buildings in staggered arrangement.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Amsterdam, vol. 96, pp. 2067-2079, 2008.

ZHANG, L.; LI, J.; PENG, Y. **Dynamic response and reability analysis of tall buildings subject to Wind loading.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Amsterdam, vol. 96, pp. 25-40, 2008.

ZHOU, Y.; KIJEWski, T.; KAREEM, A. **Aerodynamic Loads on Tall Buildings: Interactive Database.** Journal of Structural Engineering, USA: ASCE, 2003. vol. 129, pp. 394-404.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Planilhas de cálculo da resposta dinâmica na direção longitudinal ao vento obtidas através do cálculo pelo método simplificado de acordo com a NBR-6123 (1988, p. 35)

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo = 40m/s
(vento incidindo na face de menor área do protótipo – direção x ou 90°)

Dados de entrada

V_0 [m/s]	39,5	h [m]	180	z_r [m]	10	ξ	1,40
S_1	1	l_1 [m]	30	p	0,185	γ	1,00
S_3	1	l_2 [m]	45	b	0,86	f_n [Hz]	0,20
V_p [m/s]	27,3	q_0 [N/m ²]	455,4	C_a	1,00		

Planilha de cálculos

i	z_i [m]	A_i [m ²]	F_{est} [N]	F_{flut} [N]	F_{total} [N]	M_{est} [Nm]	M_{flut} [Nm]	M_{total} [Nm]
1	5	150	39089	4604	43694	195447	23021	218469
2	10	150	50517	9209	59726	505174	92086	597260
3	15	150	58694	13813	72507	880412	207193	1087605
4	20	150	65286	18417	83703	1305726	368342	1674069
5	25	150	70905	23021	93927	1772633	575535	2348168
6	30	150	75854	27626	103479	2275606	828770	3104377
7	35	150	80306	32230	112536	2810698	1128049	3938747
8	40	150	84373	36834	121207	3374918	1473370	4848288
9	45	150	88131	41439	129570	3965904	1864734	5830637
10	50	150	91635	46043	137677	4581734	2302140	6883875
11	55	150	94924	50647	145571	5220810	2785590	8006400
12	60	150	98030	55251	153281	5881772	3315082	9196854
13	65	150	100976	59856	160832	6563452	3890617	10454069
14	70	150	103783	64460	168243	7264828	4512195	11777023
15	75	150	106467	69064	175531	7985000	5179816	13164816
16	80	150	109040	73668	182708	8723169	5893479	14616648
17	85	150	111513	78273	189786	9478616	6653185	16131801
18	90	150	113897	82877	196774	10250693	7458934	17709628
19	95	150	116198	87481	203679	11038812	8310726	19349539
20	100	150	118424	92086	210510	11842435	9208561	21050996
21	105	150	120582	96690	217271	12661068	10152438	22813507
22	110	150	122675	101294	223969	13494257	11142359	24636616
23	115	150	124709	105898	230608	14341582	12178322	26519903
24	120	150	126689	110503	237191	15202651	13260328	28462978
25	125	150	128617	115107	243724	16077101	14388376	30465477
26	130	150	130497	119711	250208	16964591	15562468	32527059
27	135	150	132332	124316	256647	17864805	16782602	34647407
28	140	150	134125	128920	263044	18777442	18048779	36826221
29	145	150	135877	133524	269402	19702220	19360999	39063220
30	150	150	137593	138128	275721	20638876	20719262	41358138
31	155	150	139272	142733	282005	21587156	22123568	43710724
32	160	150	140918	147337	288255	22546825	23573916	46120741
33	165	150	142531	151941	294472	23517655	25070307	48587962
34	170	150	144114	156546	300660	24499433	26612741	51112174
35	175	150	145668	161150	306818	25491955	28201218	53693172
36	180	150	147195	165754	312949	26495025	29835737	56330763
Totais			3931435	3066451	6997886	415780482	373084846	788865328
			3,93MN	3,07MN	7,00MN	416MNm	373MNm	789MNm

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo = 60m/s
(vento incidindo na face de maior área do protótipo – direção y ou 0°)

Dados de entrada

V_0 [m/s]	59,2	h [m]	180	z_r [m]	10	ξ	1,45
S_1	1,00	l_1 [m]	45	p	0,185	γ	1,00
S_3	1,00	l_2 [m]	30	b	0,86	f_n [Hz]	0,20
V_p [m/s]	40,9	q_0 [N/m ²]	1022,8	C_a	1,10		

Planilha de cálculos

i	z_i [m]	A_i [m ²]	F_{est} [N]	F_{flut} [N]	F_{total} [N]	M_{est} [Nm]	M_{flut} [Nm]	M_{total} [Nm]
1	5	225	144875	17674	162549	724374	88370	812744
2	10	225	187229	35348	222577	1872295	353480	2225775
3	15	225	217534	53022	270556	3263016	795330	4058346
4	20	225	241967	70696	312663	4839330	1413920	6253251
5	25	225	262792	88370	351162	6569798	2209250	8779048
6	30	225	281131	106044	387175	8433936	3181320	11615256
7	35	225	297632	123718	421350	10417113	4330131	14747244
8	40	225	312706	141392	454098	12508245	5655681	18163925
9	45	225	326635	159066	485701	14698578	7157971	21856549
10	50	225	339620	176740	516360	16980993	8837001	25817994
11	55	225	351810	194414	546224	19349558	10692771	30042330
12	60	225	363321	212088	575409	21799242	12725282	34524523
13	65	225	374242	229762	604004	24325707	14934532	39260239
14	70	225	384645	247436	632081	26925172	17320522	44245694
15	75	225	394591	265110	659701	29594302	19883252	49477555
16	80	225	404127	282784	686911	32330130	22622723	54952853
17	85	225	413294	300458	713752	35129996	25538933	60668929
18	90	225	422128	318132	740260	37991498	28631883	66623381
19	95	225	430657	335806	766463	40912453	31901574	72814026
20	100	225	438909	353480	792389	43890869	35348004	79238873
21	105	225	446904	371154	818058	46924917	38971175	85896092
22	110	225	454663	388828	843491	50012913	42771085	92783999
23	115	225	462203	406502	868705	53153298	46747736	99901034
24	120	225	469539	424176	893715	56344624	50901126	107245750
25	125	225	476684	441850	918534	59585542	55231257	114816799
26	130	225	483652	459524	943176	62874793	59738127	122612920
27	135	225	490453	477198	967651	66211197	64421738	130632935
28	140	225	497097	494872	991970	69593645	69282088	138875734
29	145	225	503594	512546	1016140	73021095	74319179	147340274
30	150	225	509950	530220	1040170	76492561	79533010	156025570
31	155	225	516175	547894	1064069	80007113	84923580	164930694
32	160	225	522274	565568	1087842	83563871	90490891	174054762
33	165	225	528255	583242	1111497	87161998	96234942	183396940
34	170	225	534122	600916	1135038	90800700	102155732	192956433
35	175	225	539881	618590	1158471	94479221	108253263	202732484
36	180	225	545538	636264	1181802	98196839	114527534	212724373
Totais			14570828	11770885	26341714	1540980932	1432124394	2973105326
			14,57MN	11,77MN	26,34MN	1541MNm	1432MNm	2973MNM

APÊNDICE B – Planilhas de cálculo da resposta dinâmica na direção longitudinal
ao vento obtidas através do cálculo pelo método discreto de acordo com a
NBR-6123 (1988, p. 36)

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo = 80m/s
(vento incidindo na face de menor área do protótipo – direção x ou 90°)

Dados de entrada

V_0 [m/s]	79,0	z_r [m]	10	A_0 [m ²]	5400	ξ	1,50
S_1	1,00	h [m]	180	A_i [m ²]	150	p	0,185
S_3	1,00	l_1 [m]	30	M_0 [kg]	38880000	b	0,86
V_p [m/s]	54,5	l_2 [m]	45	M_i [kg]	1080000	f_n [Hz]	0,20
q_0 [N/m ²]	1821,4	C_a	1,25	M_{prot} [kg/m ³]	160	F_H [N]	31611379

Planilha de cálculos intermediários

i	z_i [m]	V_i [m/s]	x_i	$(z_i/z_r)^p$	A_i/A_0	$\psi = M_i/M_0$	β_i	$\beta_i x_i$	ψx_i^2
1	5	38,0	0,0278	0,880	0,028	0,028	0,031	0,001	0,000
2	10	43,9	0,0556	1,000	0,028	0,028	0,035	0,002	0,000
3	15	47,8	0,0833	1,078	0,028	0,028	0,037	0,003	0,000
4	20	50,7	0,1111	1,137	0,028	0,028	0,039	0,004	0,000
5	25	53,1	0,1389	1,185	0,028	0,028	0,041	0,006	0,001
6	30	55,2	0,1667	1,225	0,028	0,028	0,043	0,007	0,001
7	35	57,0	0,1944	1,261	0,028	0,028	0,044	0,009	0,001
8	40	58,6	0,2222	1,292	0,028	0,028	0,045	0,010	0,001
9	45	60,0	0,2500	1,321	0,028	0,028	0,046	0,011	0,002
10	50	61,3	0,2778	1,347	0,028	0,028	0,047	0,013	0,002
11	55	62,6	0,3056	1,371	0,028	0,028	0,048	0,015	0,003
12	60	63,7	0,3333	1,393	0,028	0,028	0,048	0,016	0,003
13	65	64,8	0,3611	1,414	0,028	0,028	0,049	0,018	0,004
14	70	65,8	0,3889	1,433	0,028	0,028	0,050	0,019	0,004
15	75	66,7	0,4167	1,452	0,028	0,028	0,050	0,021	0,005
16	80	67,6	0,4444	1,469	0,028	0,028	0,051	0,023	0,005
17	85	68,5	0,4722	1,486	0,028	0,028	0,052	0,024	0,006
18	90	69,3	0,5000	1,502	0,028	0,028	0,052	0,026	0,007
19	95	70,1	0,5278	1,517	0,028	0,028	0,053	0,028	0,008
20	100	70,8	0,5556	1,531	0,028	0,028	0,053	0,030	0,009
21	105	71,6	0,5833	1,545	0,028	0,028	0,054	0,031	0,009
22	110	72,2	0,6111	1,558	0,028	0,028	0,054	0,033	0,010
23	115	72,9	0,6389	1,571	0,028	0,028	0,055	0,035	0,011
24	120	73,6	0,6667	1,584	0,028	0,028	0,055	0,037	0,012
25	125	74,2	0,6944	1,596	0,028	0,028	0,055	0,038	0,013
26	130	74,8	0,7222	1,607	0,028	0,028	0,056	0,040	0,014
27	135	75,4	0,7500	1,618	0,028	0,028	0,056	0,042	0,016
28	140	76,0	0,7778	1,629	0,028	0,028	0,057	0,044	0,017
29	145	76,5	0,8056	1,640	0,028	0,028	0,057	0,046	0,018
30	150	77,1	0,8333	1,650	0,028	0,028	0,057	0,048	0,019
31	155	77,6	0,8611	1,660	0,028	0,028	0,058	0,050	0,021
32	160	78,1	0,8889	1,670	0,028	0,028	0,058	0,052	0,022
33	165	78,6	0,9167	1,680	0,028	0,028	0,058	0,053	0,023
34	170	79,1	0,9444	1,689	0,028	0,028	0,059	0,055	0,025
35	175	79,6	0,9722	1,698	0,028	0,028	0,059	0,057	0,026
36	180	80,0	1,0000	1,707	0,028	0,028	0,059	0,059	0,028
Totais			3,54					1,006	0,347

Planilha de cálculos finais

i	z_i [m]	V_i [m/s]	F_{est} [N]	F_{flut} [N]	F_{total} [N]	M_{est} [Nm]	M_{flut} [Nm]	M_{total} [Nm]
1	5	38,0	195447	24391	219839	977237	121957	1099195
2	10	43,9	252587	48783	301370	2525870	487830	3013700
3	15	47,8	293471	73174	366645	4402061	1097617	5499678
4	20	50,7	326432	97566	423998	6528631	1951320	8479950
5	25	53,1	354527	121957	476484	8863165	3048937	11912102
6	30	55,2	379268	146349	525617	11378032	4390469	15768501
7	35	57,0	401528	170740	572269	14053491	5975917	20029408
8	40	58,6	421865	195132	616997	16874589	7805279	24679868
9	45	60,0	440656	219523	660179	19829518	9878556	29708074
10	50	61,3	458173	243915	702088	22908672	12195748	35104420
11	55	62,6	474619	268306	742926	26104050	14756855	40860906
12	60	63,7	490148	292698	782846	29408862	17561877	46970740
13	65	64,8	504881	317089	821970	32817260	20610815	53428074
14	70	65,8	518916	341481	860397	36324139	23903667	60227805
15	75	66,7	532333	365872	898206	39925002	27440434	67365435
16	80	67,6	545198	390264	935462	43615845	31221115	74836961
17	85	68,5	557566	414655	972221	47393081	35245712	82638793
18	90	69,3	569483	439047	1008530	51253467	39514224	90767692
19	95	70,1	580990	463438	1044429	55194061	44026651	99220712
20	100	70,8	592122	487830	1079952	59212175	48782993	107995168
21	105	71,6	602908	512221	1115129	63305341	53783250	117088591
22	110	72,2	613375	536613	1149988	67471287	59027421	126498708
23	115	72,9	623547	561004	1184551	71707908	64515508	136223416
24	120	73,6	633444	585396	1218840	76013253	70247510	146260763
25	125	74,2	643084	609787	1252871	80385503	76223426	156608929
26	130	74,8	652484	634179	1286663	84822957	82443258	167266215
27	135	75,4	661659	658570	1320230	89324023	88907005	178231028
28	140	76,0	670623	682962	1353585	93887208	95614666	189501874
29	145	76,5	679387	707353	1386740	98511102	102566243	201077344
30	150	77,1	687963	731745	1419707	103194378	109761734	212956112
31	155	77,6	696360	756136	1452496	107935781	117201140	225136922
32	160	78,1	704588	780528	1485116	112734123	124884462	237618584
33	165	78,6	712656	804919	1517576	117588274	132811698	250399972
34	170	79,1	720572	829311	1549882	122497164	140982849	263480014
35	175	79,6	728342	853702	1582044	127459773	149397916	276857689
36	180	80,0	735973	878094	1614067	132475127	158056897	290532024
Totais			19657174	16244737	35901911	2078902410	1976442957	4055345367
			19,66MN	16,24MN	35,90MN	2079MNm	1976MNm	4055MNm

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo = 100m/s
(vento incidindo na face de maior área do protótipo – direção y ou 0°)

Dados de entrada

V_0 [m/s]	98,7	z_r [m]	10	A_0 [m ²]	5400	ξ	1,55
S_1	1,00	h [m]	180	A_i [m ²]	150	p	0,185
S_3	1,00	l_1 [m]	45	M_0 [kg]	38880000	b	0,86
V_p [m/s]	68,1	l_2 [m]	30	M_i [kg]	1080000	f_n [Hz]	0,20
q_0 [N/m ²]	2843,1	C_a	1,45	M_{prot} [kg/m ³]	160	F_H [N]	88718309

Planilha de cálculos intermediários

i	z_i [m]	V_i [m/s]	x_i	$(z_i/z_r)^p$	A_i/A_0	$\psi = M_i/M_0$	β_i	$\beta_i x_i$	ψx_i^2
1	5	47,5	0,0278	0,880	0,028	0,028	0,035	0,001	0,000
2	10	54,9	0,0556	1,000	0,028	0,028	0,040	0,002	0,000
3	15	59,7	0,0833	1,078	0,028	0,028	0,043	0,004	0,000
4	20	63,4	0,1111	1,137	0,028	0,028	0,046	0,005	0,000
5	25	66,4	0,1389	1,185	0,028	0,028	0,048	0,007	0,001
6	30	68,9	0,1667	1,225	0,028	0,028	0,049	0,008	0,001
7	35	71,2	0,1944	1,261	0,028	0,028	0,051	0,010	0,001
8	40	73,2	0,2222	1,292	0,028	0,028	0,052	0,012	0,001
9	45	75,0	0,2500	1,321	0,028	0,028	0,053	0,013	0,002
10	50	76,6	0,2778	1,347	0,028	0,028	0,054	0,015	0,002
11	55	78,2	0,3056	1,371	0,028	0,028	0,055	0,017	0,003
12	60	79,6	0,3333	1,393	0,028	0,028	0,056	0,019	0,003
13	65	80,9	0,3611	1,414	0,028	0,028	0,057	0,021	0,004
14	70	82,2	0,3889	1,433	0,028	0,028	0,058	0,022	0,004
15	75	83,3	0,4167	1,452	0,028	0,028	0,058	0,024	0,005
16	80	84,5	0,4444	1,469	0,028	0,028	0,059	0,026	0,005
17	85	85,5	0,4722	1,486	0,028	0,028	0,060	0,028	0,006
18	90	86,6	0,5000	1,502	0,028	0,028	0,060	0,030	0,007
19	95	87,5	0,5278	1,517	0,028	0,028	0,061	0,032	0,008
20	100	88,5	0,5556	1,531	0,028	0,028	0,062	0,034	0,009
21	105	89,4	0,5833	1,545	0,028	0,028	0,062	0,036	0,009
22	110	90,2	0,6111	1,558	0,028	0,028	0,063	0,038	0,010
23	115	91,1	0,6389	1,571	0,028	0,028	0,063	0,040	0,011
24	120	91,9	0,6667	1,584	0,028	0,028	0,064	0,043	0,012
25	125	92,7	0,6944	1,596	0,028	0,028	0,064	0,045	0,013
26	130	93,4	0,7222	1,607	0,028	0,028	0,065	0,047	0,014
27	135	94,2	0,7500	1,618	0,028	0,028	0,065	0,049	0,016
28	140	94,9	0,7778	1,629	0,028	0,028	0,066	0,051	0,017
29	145	95,6	0,8056	1,640	0,028	0,028	0,066	0,053	0,018
30	150	96,2	0,8333	1,650	0,028	0,028	0,066	0,055	0,019
31	155	96,9	0,8611	1,660	0,028	0,028	0,067	0,058	0,021
32	160	97,5	0,8889	1,670	0,028	0,028	0,067	0,060	0,022
33	165	98,2	0,9167	1,680	0,028	0,028	0,068	0,062	0,023
34	170	98,8	0,9444	1,689	0,028	0,028	0,068	0,064	0,025
35	175	99,4	0,9722	1,698	0,028	0,028	0,068	0,066	0,026
36	180	100,0	1,0000	1,707	0,028	0,028	0,069	0,069	0,028
Totais			3,54					1,167	0,347

Planilha de cálculos finais

i	z_i [m]	V_i [m/s]	F_{est} [N]	F_{flut} [N]	F_{total} [N]	M_{est} [Nm]	M_{flut} [Nm]	M_{total} [Nm]
1	5	47,5	530835	68455	599290	2654173	342277	2996451
2	10	54,9	686026	136911	822937	6860257	1369110	8229367
3	15	59,7	797066	205366	1002432	11955986	3080497	15036483
4	20	63,4	886587	273822	1160409	17731745	5476439	23208184
5	25	66,4	962893	342277	1305171	24072334	8556936	32629269
6	30	68,9	1030090	410733	1440823	30902706	12321987	43224693
7	35	71,2	1090550	479188	1569738	38169248	16771594	54940842
8	40	73,2	1145784	547644	1693427	45831342	21905755	67737097
9	45	75,0	1196820	616099	1812920	53856922	27724472	81581394
10	50	76,6	1244398	684555	1928953	62219897	34227743	96447640
11	55	78,2	1289064	753010	2042075	70898536	41415569	112314105
12	60	79,6	1331240	821466	2152706	79874398	49287950	129162348
13	65	80,9	1371255	889921	2261177	89131596	57844885	146976481
14	70	82,2	1409375	958377	2367752	98656272	67086376	165742648
15	75	83,3	1445816	1026832	2472648	108436206	77012421	185448628
16	80	84,5	1480757	1095288	2576044	118460529	87623022	206083550
17	85	85,5	1514347	1163743	2678090	128719491	98918177	227637667
18	90	86,6	1546714	1232199	2778913	139204291	110897887	250102178
19	95	87,5	1577968	1300654	2878622	149906935	123562152	273469086
20	100	88,5	1608201	1369110	2977311	160820121	136910971	297731092
21	105	89,4	1637497	1437565	3075062	171937150	150944346	322881496
22	110	90,2	1665926	1506021	3171947	183251848	165662275	348914123
23	115	91,1	1693552	1574476	3268028	194758502	181064760	375823262
24	120	91,9	1720432	1642932	3363363	206451808	197151799	403603607
25	125	92,7	1746615	1711387	3458002	218326826	213923393	432250219
26	130	93,4	1772146	1779843	3551988	230378941	231379541	461758482
27	135	94,2	1797065	1848298	3645363	242603827	249520245	492124072
28	140	94,9	1821410	1916754	3738164	254997424	268345504	523342928
29	145	95,6	1845213	1985209	3830422	267555909	287855317	555411226
30	150	96,2	1868505	2053665	3922169	280275676	308049685	588325362
31	155	96,9	1891312	2122120	4013432	293153316	328928609	622081924
32	160	97,5	1913660	2190576	4104236	306185599	350492086	656677685
33	165	98,2	1935573	2259031	4194604	319369463	372740119	692109582
34	170	98,8	1957071	2327487	4284557	332701996	395672707	728374703
35	175	99,4	1978174	2395942	4374116	346180428	419289850	765470278
36	180	100,0	1998901	2464397	4463298	359802119	443591547	803393666
Totais			53388836	45591353	98980189	5646293815	5546948002	11193241817
			53,39MN	45,59MN	98,98MN	5646MNm	5547MNm	11193MNm

APÊNDICE C – Planilhas de cálculo da resposta dinâmica na direção longitudinal ao vento obtidas através dos métodos de cálculo de acordo com a NBR-6123 (1988, pp. 35-41), considerando valores dos coeficientes de arrasto coletados nos ensaios em túnel de vento

Método simplificado NBR-6123 (1988)

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo = 40m/s

(vento incidindo na face de menor área do protótipo – direção x ou 90°)

Dados de entrada

V_0 [m/s]	39,5	z_r [m]	10	ξ	1,40
S_1	1,00	h [m]	180	p	0,185
S_3	1,00	l_1 [m]	30	b	0,86
V_p [m/s]	27,3	l_2 [m]	45	γ	1,00
q_0 [N/m ²]	455,4	$S_{2 \text{ TOPO}}$	1,47	f_n [Hz]	0,20

Planilha de cálculos

i	z_i [m]	Δz [m]	A_i [m ²]	C_a	S_2	$(C_a S_2)/S_{2 \text{ TOPO}}$
1	18,7	31,0	930	0,61	0,97	0,40
2	43,3	20,7	621	0,74	1,13	0,57
3	60,0	18,2	546	0,82	1,20	0,67
4	79,7	20,2	606	0,89	1,26	0,77
5	100,4	20,2	606	0,96	1,32	0,86
6	120,1	17,5	525	1,02	1,36	0,95
7	135,3	16,7	501	1,08	1,39	1,02
8	153,5	18,7	561	1,15	1,43	1,12
9	172,7	12,1	363	1,11	1,46	1,10
10	177,6	4,9	147	0,89	1,46	0,89

Planilha de cálculos

i	z_i [m]	F_{est} [N]	F_{flut} [N]	F_{total} [N]	M_{est} [Nm]	M_{flut} [Nm]	M_{total} [Nm]
1	18,7	158420	42837	201257	2962449	801054	3763503
2	43,3	204502	93850	298353	8854955	4063726	12918681
3	60,0	238784	134583	373367	14327025	8074991	22402017
4	79,7	336741	226969	563710	26838279	18089400	44927678
5	100,4	412886	321865	734751	41453778	32315220	73768998
6	120,1	419788	366347	786135	50416557	43998315	94414872
7	135,3	453165	426309	879474	61313187	57679603	118992790
8	153,5	579529	590302	1169831	88957705	90611351	179569056
9	172,7	386413	423932	810344	66733442	73213043	139946484
10	177,6	127430	142289	269720	22631612	25270586	47902197
Totais		3317658	2769284	6086942	384488988	354117288	738606275
		3,32MN	2,77MN	6,09MN	384MNm	355MNm	739MNm

Método discreto NBR-6123 (1988)

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo = 60m/s

(vento incidindo na face de maior área do protótipo – direção y ou 0°)

Dados de entrada

V_0 [m/s]	59,2	z_r [m]	10	A_0 [m ²]	8100	ξ	1,45
S_1	1,00	h [m]	180	M_0 [kg]	38880000	p	0,185
S_3	1,00	l_1 [m]	45	M_{prot} [kg/m ³]	160	b	0,86
V_p [m/s]	40,8	l_2 [m]	30	S_2 TOPO	1,47	f_n [Hz]	0,20
q_0 [N/m ²]	1022,8			γ	1,00	F_H [N]	26143141

Planilha de cálculos intermediários

i	z_i [m]	V_i [m/s]	Δz [m]	A_i [m ²]	M_i [kg]	C_a	S_2	$(C_a S_2)/S_2$ TOPO
1	18,7	37,5	31,0	1395,00	6696000	0,97	0,97	0,64
2	43,3	44,6	20,7	931,50	4471200	1,06	1,13	0,81
3	60,0	47,8	18,2	819,00	3931200	1,10	1,20	0,90
4	79,7	50,7	20,2	909,00	4363200	1,14	1,26	0,98
5	100,4	53,1	20,2	909,00	4363200	1,19	1,32	1,07
6	120,1	55,2	17,5	787,50	3780000	1,25	1,36	1,16
7	135,3	56,5	16,7	751,50	3607200	1,31	1,39	1,24
8	153,5	58,0	18,7	841,50	4039200	1,40	1,43	1,36
9	172,7	59,5	12,1	544,50	2613600	1,35	1,46	1,34
10	177,6	59,8	4,9	220,50	1058400	1,14	1,46	1,14

Planilha de cálculos finais

i	z_i [m]	F_{est} [N]	F_{flut} [N]	F_{total} [N]	M_{est} [Nm]	M_{flut} [Nm]	M_{total} [Nm]
1	18,7	848773	467233	1316006	15872056	8737263	24609319
2	43,3	986991	722418	1709409	42736698	31280711	74017409
3	60,0	1079255	880143	1959398	64755303	52808565	117563868
4	79,7	1453288	1297598	2750886	115827047	103418561	219245608
5	100,4	1724434	1634615	3359049	173133188	164115377	337248565
6	120,1	1733327	1693993	3427320	208172573	203448524	411621097
7	135,3	1852013	1821146	3673159	250577408	246401044	496978452
8	153,5	2377091	2313558	4690650	364883517	355131214	720014730
9	172,7	1583443	1684256	3267699	273460621	290871068	564331689
10	177,6	549956	701406	1251362	97672164	124569718	222241882
Totais		14188572	13216367	27404939	1607090575	1580782044	3187872619
		14,19MN	13,22MN	27,41MN	1607MNm	1581MNm	3188MNm

APÊNDICE D – Comparativo das respostas na direção longitudinal ao vento
obtidas através do cálculo por métodos teóricos e através dos ensaios em túnel de
vento

Tabela D1: Comparativo das respostas na direção longitudinal ao vento obtidas através do cálculo por métodos teóricos e através dos ensaios em túnel de vento com vento incidindo na direção y (face maior).

Escala protótipo														
Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]	Método teórico				Método experimental									
	NBR-6123 (1988)				Base flexível				Integração de pressões					
	Método simplificado		Método discreto		Extensômetros		Acelerômetros		Momento estático [MNm]	Momento flutuante [MNm]	Momento total [MNm]	Momento estático [MNm]	Momento flutuante [MNm]	Momento total [MNm]
	Momento estático [MNm]	Momento flutuante [MNm]	Momento total [MNm]	Momento estático [MNm]	Momento flutuante [MNm]	Momento total [MNm]	Momento estático [MNm]	Momento flutuante [MNm]	Momento total [MNm]	Momento estático [MNm]	Momento flutuante [MNm]	Momento total [MNm]	Momento estático [MNm]	Momento flutuante [MNm]
20	178	157	335	178	163	341	67	93	160	520	587	226	140	366
40	716	655	1371	716	679	1395	694	627	1321	898	1592	906	559	1465
60	1607	1524	3131	1607	1581	3188	1675	1734	3409	1878	3553	2012	1151	3163
80	2862	2808	5670	2862	2912	5774	3479	2648	6127	3080	6559	3881	1389	5270
100	4467	4529	8996	4467	4697	9164	5080	4318	9398	5900	10980	5648	2366	8014

Tabela D2: Comparativo das respostas na direção longitudinal ao vento obtidas através do cálculo por métodos teóricos e através dos ensaios em túnel de vento com vento incidindo na direção x (face menor).

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo [m/s]		Escala protótipo												
		Método teórico				Método experimental								
		NBR-6123 (1988)				Base flexível				Integração de pressões				
Método simplificado		Método discreto		Extensômetros				Acelerômetros						
Momento estático [MNm]	Momento fluante [MNm]	Momento total [MNm]	Momento estático [MNm]	Momento fluante [MNm]	Momento total [MNm]	Momento estático [MNm]	Momento fluante [MNm]	Momento total [MNm]	Momento estático [MNm]	Momento fluante [MNm]	Momento total [MNm]	Momento estático [MNm]	Momento fluante [MNm]	Momento total [MNm]
20	96	85	181	96	87	183	84	93	177	200	284	119	67	186
40	384	355	739	384	364	748	461	423	884	428	889	474	267	741
60	864	823	1687	864	844	1708	991	1387	2378	1438	2429	1067	601	1668
80	1538	1518	3056	1538	1556	3094	2074	2600	4674	2745	4819	2059	1265	3323
100	2401	2448	4849	2401	2509	4910	3025	3098	6123	3006	6031	2997	2586	5583

APÊNDICE E – Planilhas de cálculo da resposta dinâmica na direção transversal ao vento obtidas através do processo da norma brasileira NBR-6123 capítulo 10

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo = 90m/s
(vento incidindo na face de menor área do protótipo – direção x ou 90°)

Dados de entrada e resultados

Amplitude da vibração na direção perpendicular ao vento, [m]	Y_0	12,5
Expressão	Y_0/l_1	0,417
Comprimento da face transversal à direção do vento, [m]	l_1	30
Comprimento da face paralela à direção do vento, [m]	l_2	45
Altura da estrutura, [m]	h	180
Número de Strouhal	St	0,075
Frequência fundamental de vibração livre da estrutura, [Hz]	f_n	0,20
Razão de amortecimento efetivo	ζ_{ef}	-0,026
Razão de amortecimento estrutural crítico	ζ	0,01
Razão de amortecimento aerodinâmico	ζ_{aer}	-0,036
Massa específica do ar, [kg/m ³]	ρ	1,25
Coefficiente de arrasto (experimental)	C_a	0,89
Expoente da forma modal	γ	1,00
Coefficiente de força lateral	C_l	0,53
Coefficiente de correlação longitudinal	C_R	-1,872
Massa média por unidade de comprimento, [kg/m]	M_0	216000
Velocidade crítica do vento (experimental), [m/s]	V_{cr}	90
Velocidade básica do vento, [m/s]	V_0	89
Pressão dinâmica de cálculo, [N/m ²]	q_{cr}	4965
Comprimento de correlação da força lateral	L_R	-125
Expressão empírica	L_R/l_1	-4,168
Esbeltez da estrutura	λ	6
Rigidez rotacional em relação ao eixo x, [Nm/rad]	k_{θ_x}	7,23E+11
Momento na base do protótipo, [MNm]	M_{base}	46384

Iterações apresentando a não convergência da razão Y_0/l_1

	L_R/l_1	C_R	Y_0/l_1		L_R/l_1	C_R	Y_0/l_1
Iteração 1	2,000	0,556	-0,124	Iteração 26	-6,355	-3,240	0,721
Iteração 2	-4,398	-2,003	0,446	Iteração 27	11,441	0,178	-0,040
Iteração 3	10,319	0,482	-0,107	Iteração 28	0,287	0,094	-0,021
Iteração 4	-3,356	-1,431	0,319	Iteração 29	1,132	0,342	-0,076
Iteração 5	9,204	0,715	-0,159	Iteração 30	-1,556	-0,586	0,130
Iteração 6	-6,897	-3,620	0,806	Iteração 31	6,064	1,000	-0,223
Iteração 7	11,602	0,128	-0,029	Iteração 32	-12,354	-8,358	1,860
Iteração 8	0,789	0,246	-0,055	Iteração 33	11,994	0,002	0,000
Iteração 9	-0,445	-0,154	0,034	Iteração 34	1,983	0,552	-0,123
Iteração 10	3,281	0,795	-0,177	Iteração 35	-4,341	-1,971	0,439
Iteração 11	-8,286	-4,669	1,039	Iteração 36	10,270	0,494	-0,110
Iteração 12	11,843	0,052	-0,011	Iteração 37	-3,518	-1,516	0,338
Iteração 13	1,531	0,445	-0,099	Iteração 38	9,408	0,677	-0,151
Iteração 14	-2,863	-1,182	0,263	Iteração 39	-6,277	-3,187	0,709
Iteração 15	8,508	0,825	-0,184	Iteração 40	11,414	0,186	-0,041
Iteração 16	-8,848	-5,124	1,140	Iteração 41	0,202	0,066	-0,015
Iteração 17	11,896	0,035	-0,008	Iteração 42	1,394	0,411	-0,091
Iteração 18	1,688	0,484	-0,108	Iteração 43	-2,414	-0,967	0,215
Iteração 19	-3,379	-1,444	0,321	Iteração 44	7,771	0,913	-0,203
Iteração 20	9,234	0,710	-0,158	Iteração 45	-10,539	-6,599	1,469
Iteração 21	-6,807	-3,556	0,791	Iteração 46	11,972	0,009	-0,002
Iteração 22	11,578	0,136	-0,030	Iteração 47	1,916	0,537	-0,119
Iteração 23	0,716	0,224	-0,050	Iteração 48	-4,126	-1,848	0,411
Iteração 24	-0,211	-0,072	0,016	Iteração 49	10,071	0,540	-0,120
Iteração 25	2,618	0,682	-0,152	Iteração 50	-4,168	-1,872	0,417

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo = 96m/s
(vento incidindo na face de maior área do protótipo – direção y ou 0°)

Dados de entrada e resultados

Amplitude da vibração na direção perpendicular ao vento, [m]	Y_0	26,7
Expressão	Y_0/l_1	0,593
Comprimento da face transversal à direção do vento, [m]	l_1	45
Comprimento da face paralela à direção do vento, [m]	l_2	30
Altura da estrutura, [m]	h	180
Número de Strouhal	St	0,09
Frequência fundamental de vibração livre da estrutura, [Hz]	f_n	0,20
Razão de amortecimento efetivo	ζ_{ef}	-0,012
Razão de amortecimento estrutural crítico	ζ	0,01
Razão de amortecimento aerodinâmico	ζ_{aer}	-0,022
Massa específica do ar, [kg/m ³]	ρ	1,25
Coefficiente de arrasto (experimental)	C_a	1,14
Expoente da forma modal	γ	1,00
Coefficiente de força lateral	C_l	0,27
Coefficiente de correlação longitudinal	C_R	-2,122
Massa média por unidade de comprimento, [kg/m]	M_0	216000
Velocidade crítica do vento (experimental), [m/s]	V_{cr}	96
Velocidade básica do vento, [m/s]	V_0	94,8
Pressão dinâmica de cálculo, [N/m ²]	q_{cr}	5649
Comprimento de correlação da força lateral	L_R	498
Expressão empírica	L_R/l_1	11,068
Esbeltez da estrutura	λ	4
Rigidez rotacional em relação ao eixo y, [Nm/rad]	$k_{\theta y}$	7,29E+11
Momento na base do protótipo, [MNm]	M_{base}	99783

Iterações apresentando a convergência da razão Y_0/l_1

	L_R/l_1	C_R	Y_0/l_1		L_R/l_1	C_R	Y_0/l_1
Iteração 1	2,000	0,7500	-0,2096	Iteração 26	11,091	-2,143	0,599
Iteração 2	-11,129	-13,305	3,719	Iteração 27	11,089	-2,141	0,598
Iteração 3	12,000	-3,000	0,838	Iteração 28	11,087	-2,139	0,598
Iteração 4	11,651	-2,658	0,743	Iteração 29	11,085	-2,137	0,597
Iteração 5	11,488	-2,504	0,700	Iteração 30	11,083	-2,136	0,597
Iteração 6	11,392	-2,415	0,675	Iteração 31	11,081	-2,134	0,596
Iteração 7	11,328	-2,356	0,658	Iteração 32	11,080	-2,133	0,596
Iteração 8	11,282	-2,314	0,647	Iteração 33	11,079	-2,132	0,596
Iteração 9	11,248	-2,283	0,638	Iteração 34	11,077	-2,131	0,595
Iteração 10	11,221	-2,259	0,631	Iteração 35	11,076	-2,130	0,595
Iteração 11	11,200	-2,240	0,626	Iteração 36	11,075	-2,129	0,595
Iteração 12	11,183	-2,224	0,622	Iteração 37	11,074	-2,128	0,595
Iteração 13	11,168	-2,211	0,618	Iteração 38	11,074	-2,127	0,595
Iteração 14	11,156	-2,201	0,615	Iteração 39	11,073	-2,127	0,594
Iteração 15	11,146	-2,191	0,613	Iteração 40	11,072	-2,126	0,594
Iteração 16	11,137	-2,184	0,610	Iteração 41	11,071	-2,125	0,594
Iteração 17	11,129	-2,177	0,608	Iteração 42	11,071	-2,125	0,594
Iteração 18	11,123	-2,171	0,607	Iteração 43	11,070	-2,124	0,594
Iteração 19	11,117	-2,166	0,605	Iteração 44	11,070	-2,124	0,594
Iteração 20	11,112	-2,161	0,604	Iteração 45	11,069	-2,124	0,594
Iteração 21	11,107	-2,157	0,603	Iteração 46	11,069	-2,123	0,593
Iteração 22	11,103	-2,154	0,602	Iteração 47	11,069	-2,123	0,593
Iteração 23	11,100	-2,150	0,601	Iteração 48	11,068	-2,122	0,593
Iteração 24	11,097	-2,148	0,600	Iteração 49	11,068	-2,122	0,593
Iteração 25	11,094	-2,145	0,600	Iteração 50	11,068	-2,122	0,593

APÊNDICE F – Planilhas de cálculo da resposta dinâmica na direção transversal ao vento, apresentando a dispersão de resultados para seção circular através de diferentes métodos de cálculo

Processo da norma brasileira NBR-6123 capítulo 10

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo = 96m/s

Dados de entrada e resultados

Amplitude da vibração na direção perpendicular ao vento, [m]	Y_0	38,3
Expressão	Y_0/l_1	0,924
Diâmetro ou largura da estrutura, [m]	l_1	41,46
Altura da estrutura, [m]	h	180
Número de Strouhal	St	0,20
Frequência fundamental de vibração livre da estrutura, [Hz]	f_n	0,20
Razão de amortecimento efetivo	ζ_{ef}	-0,01
Razão de amortecimento estrutural crítico	ζ	0,01
Razão de amortecimento aerodinâmico	ζ_{aer}	-0,02
Massa específica do ar, [kg/m ³]	ρ	1,25
Coefficiente de arrasto (experimental)	C_a	1,14
Expoente da forma modal	γ	1,00
Coefficiente de força lateral	C_l	0,35
Coefficiente de correlação longitudinal	C_R	-1,914
Massa média por unidade de comprimento, [kg/m]	M_0	216000
Velocidade crítica do vento (experimental), [m/s]	V_{cr}	96
Velocidade básica do vento, [m/s]	V_0	94,8
Pressão dinâmica de cálculo, [N/m ²]	q_{cr}	5649
Comprimento de correlação da força lateral	L_R	487,2
Expressão empírica	L_R/l_1	11,752
Esbeltez da estrutura	λ	4,34
Rigidez rotacional, [Nm/rad]	k_θ	1,72E+11
Momento na base da estrutura, [MNm]	M_{base}	36622

Iterações apresentando a convergência da razão Y_0/l_1

	L_R/l_1	C_R	Y_0/l_1
Iteração 1	2,000	0,7091	-0,3426
Iteração 2	-27,363	-52,328	25,278
Iteração 3	12,000	-2,112	1,020
Iteração 4	11,831	-1,976	0,955
Iteração 5	11,780	-1,936	0,935
Iteração 6	11,763	-1,922	0,928
Iteração 7	11,756	-1,917	0,926
Iteração 8	11,754	-1,915	0,925
Iteração 9	11,753	-1,914	0,925
Iteração 10	11,752	-1,914	0,924
Iteração 11	11,752	-1,914	0,924
Iteração 12	11,752	-1,914	0,924
Iteração 13	11,752	-1,914	0,924
Iteração 14	11,752	-1,914	0,924
Iteração 15	11,752	-1,914	0,924
Iteração 16	11,752	-1,914	0,924

Norma Canadense NBC-1985

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo = 96m/s

Dados de entrada e resultados

Altura da estrutura, [m]	H	180
Diâmetro ou largura da estrutura, [m]	D	41,46
Esbeltez da estrutura	λ	4,34
Razão de amortecimento estrutural crítico	ζ	0,01
Massa média por unidade de comprimento no terço superior da estrutura, [kg/m]	M	216000
Massa específica do ar, [kg/m ³]	ρ	1,25
Expressão: $C_1 = 3\sqrt{\lambda}/4$, para $\lambda < 16$	C_1	1,56
Coefficiente de amortecimento aerodinâmico	C_2	0,6
Velocidade média do vento sobre 10min no topo da estrutura = V_{cr} , [m/s]	V_H	96
Pressão dinâmica correspondente a V_H , [N/m ²]	q_H	5649
Força lateral devido ao desprendimento de vórtices no terço superior, [N/m]	F_L	2766692
Força lateral devido ao desprendimento de vórtices considerando a altura H , [MN]	F_H	166
Momento na base da estrutura, [MNm]	M_{base}	29880

Modelo simplificado de Vickery e Basu (1983)

Velocidade média do vento sobre 10min no topo do protótipo = 96m/s

Dados de entrada e resultados

Altura da estrutura, [m]	h	180
Diâmetro a 5/6 da altura total da estrutura, [m]	d_0	41,46
Esbeltez da estrutura	λ	4,34
5/6 da altura total da estrutura, [m]	$h(5/6)$	164
Forma modal	$\varphi(h)$	1,00
Frequência fundamental de vibração livre da estrutura, [Hz]	f_n	0,20
Massa específica do ar, [kg/m ³]	ρ	1,25
Massa média por unidade de comprimento no terço superior da estrutura, [kg/m]	M	216000
Número de Strouhal	St	0,20
Razão de amortecimento estrutural crítico	ζ	0,01
Razão de amortecimento aerodinâmico	ζ_{aer}	-0,0085
Comprimento de correlação em número de diâmetros	l	1,33
Fator de pico	g_y	3,86
Valor rms do coeficiente de sustentação	$C_{l\ rms}$	0,08
Parâmetro de largura do espectro	B	0,2
Velocidade média do vento sobre 10min no topo da estrutura = V_{cr} , [m/s]	V_{cr}	96
Velocidade média a 5/6 da altura total da estrutura, [m/s]	$V_{5/6}$	94
Função ψ	$\psi(B, V/V_{cr})$	2,24
Rigidez rotacional, [Nm/rad]	k_θ	1,72E+11
Amplitude da vibração na direção perpendicular ao vento, [m]	$\hat{y}(h)$	13,3
Momento na base da estrutura, [MNm]	M_{base}	12681

ANEXOS

ANEXO A – Figuras representativas da formulação matemática para o cálculo da resposta dinâmica na direção longitudinal ao vento de acordo com a NBR-6123 (1988)

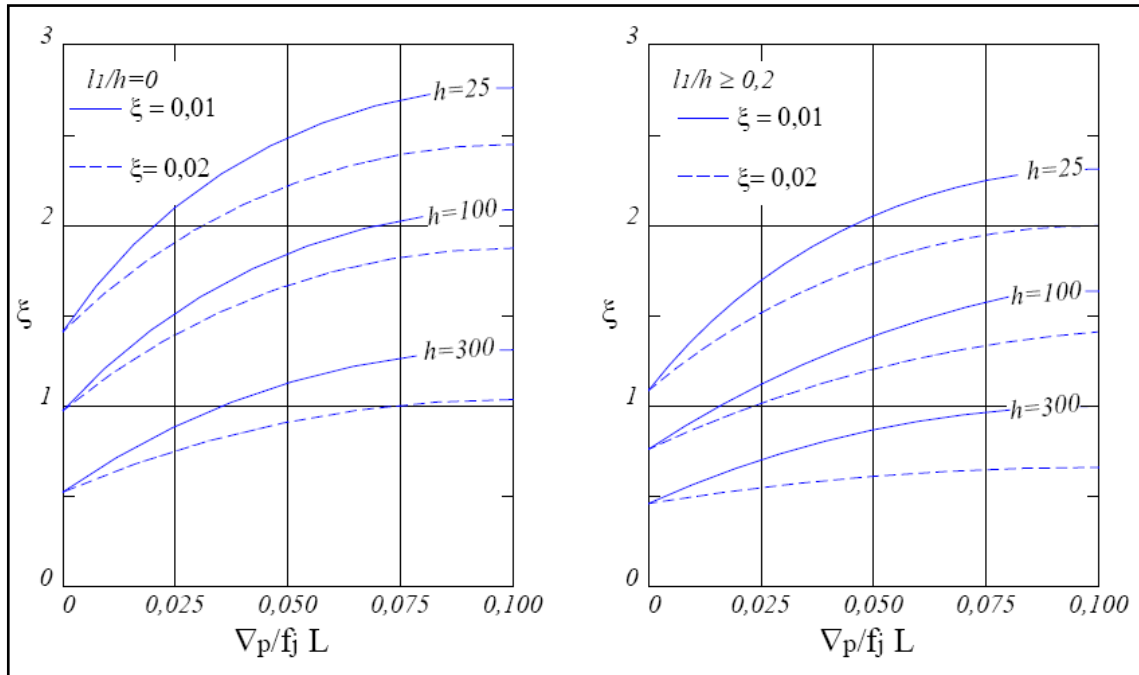


Figura A1: Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ , para terreno de categoria III ($L = 1800\text{m}$; h em metros), NBR-6123 (1988, p. 40).

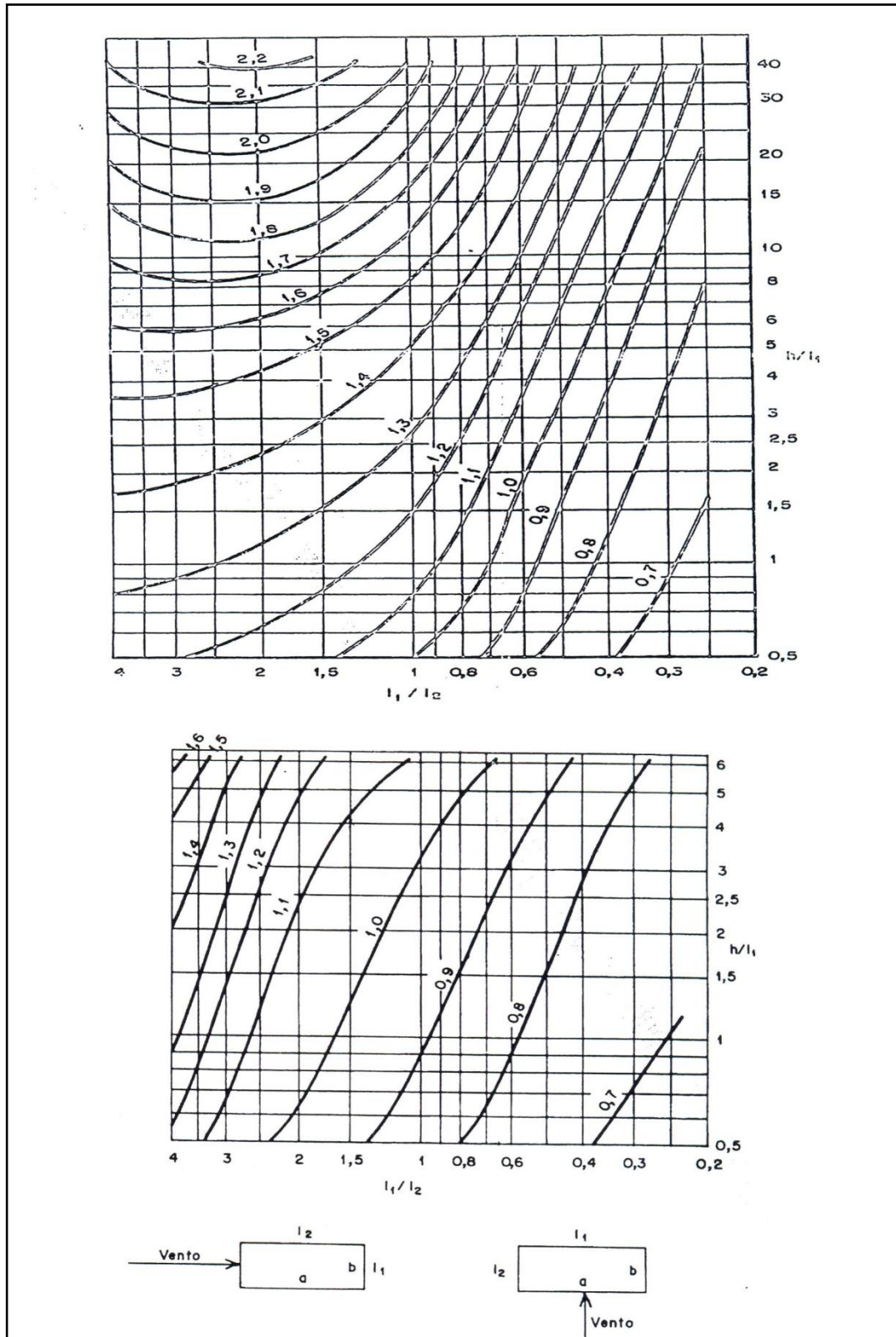


Figura A2: Coeficiente de arrasto, C_a , para edificações paralelepípedicas em vento de baixa (figura superior) e alta (figura inferior) turbulência, NBR-6123 (1988, p. 20 e p. 24), respectivamente.