

**ESTUDO EM TÚNEL DE VENTO DOS EFEITOS DE
ATENUADORES DINÂMICOS SINTONIZADOS EM
MODELOS DE EDIFÍCIOS ALTOS**

ANDRÉ DA SILVA CZARNOBAY

Porto Alegre
Dezembro de 2.006

ANDRÉ DA SILVA CZARNOBAY

**ESTUDO EM TÚNEL DE VENTO DOS EFEITOS DE
ATENUADORES DINÂMICOS SINTONIZADOS EM
MODELOS DE EDIFÍCIOS ALTOS**

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

Porto Alegre
Dezembro de 2.006

CZARNOBAY, André

Estudo em túnel de vento dos efeitos de atenuadores dinâmicos sintonizados em modelos de edifícios altos / André Czarnobay. – Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2006.

142 p.

Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Mestre. Orientadores: Acir Mércio Loredo-Souza e Marcelo Maia Rocha.

1. Engenharia Civil – Estruturas. I. Título

CCAA2

ANDRÉ DA SILVA CZARNOBAY

**ESTUDO EM TÚNEL DE VENTO DOS EFEITOS DE
ATENUADORES DINÂMICOS SINTONIZADOS EM
MODELOS DE EDIFÍCIOS ALTOS**

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

Porto Alegre, 08 de dezembro de 2006.

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

Prof. Marcelo Maia Rocha
Dr.Techn. pela Universität Innsbruck,
Áustria
Orientador

Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Ronald José Ellwanger (UFRGS)
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

Dedico este trabalho aos meus pais, Antônio e Magda, às minhas irmãs Carolina e Fernanda, e a minha namorada Patrícia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Prof. Acir Mércio Loredou-Souza e Prof. Marcelo Maia Rocha por toda a paciência, dedicação, e estímulo prestados durante a realização deste trabalho.

À CAPES pela bolsa de estudos concedida, possibilitando minha total dedicação aos estudos no período em estive apto a recebê-la.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelos conhecimentos transmitidos e por sua dedicação.

Ao doutorando, colega e amigo Mário Gustavo Klaus Oliveira, pelo inestimável auxílio em todas as etapas deste trabalho, e pela paciência e amizade que tornaram possível e agradável a confecção do mesmo.

Aos amigos do Laboratório de Aerodinâmica das Construções, Elvis Antônio Carpeggiani, Fabrício De Paoli, Gustavo Javier Zani Nuñez, Karin Malcum, e Paulo Francisco Bueno pela atenção dispensada e esclarecimento de dúvidas.

Aos bolsistas Guilherme, Josué, Maria Cristina e Miguel pelo auxílio prestado na realização dos experimentos em túnel de vento.

Aos colegas do mestrado, pela camaradagem criada e pelo apoio mútuo e convivência sempre muito agradável ao longo das aulas no primeiro ano do curso, e pela amizade criada para toda a vida.

A todos os meus amigos que me incentivaram ao longo destes três anos de curso, especialmente a amiga Ana Carina Rizzon, pelo apoio incondicional, a turma da praia, pela descontração, e a toda a turma de Bento, sem os quais nada valeria a pena.

À família de minha namorada, Elul Hilário Moreira da Silva, Maria Tereza Panizzi e Gilberto Antônio Panizzi Filho, pela paciência em conceder-me acomodações e por todo incentivo e colaboração prestados, especialmente na fase final deste trabalho, quando não residia mais em Porto Alegre e sua casa tornou-se meu segundo lar.

RESUMO

CZARNOBAY, A.S. – **Estudo em túnel de vento dos efeitos de atenuadores dinâmicos sintonizados em modelos de edifícios altos**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2006.

Com a crescente necessidade de projetos cada vez mais econômicos, bem como a valorização dos terrenos nos grandes centros urbanos, que leva a conseqüente necessidade de aumentar o aproveitamento destes, e com o desenvolvimento das técnicas construtivas e dos processos de análise estrutural, as edificações tornaram-se mais altas, leves, flexíveis, menos amortecidas, e, portanto, mais susceptíveis a problemas de vibrações, inclusive as induzidas pela ação do vento.

Nessa situação, o amortecimento natural da edificação pode tornar-se insuficiente para reduzir os movimentos causados pela ação do vento, o que pode gerar desconforto aos usuários, quebra de vidros e até mesmo danos à estrutura. Para se atingir a redução destes deslocamentos, em alguns casos, requer-se um suplemento adicional de amortecimento, para evitar tais movimentações excessivas. Tal suplemento de amortecimento é alcançado pela instalação de um sistema de dissipação de energia na edificação. Os atenuadores dinâmicos sintonizados constituem-se em um destes sistemas de dissipação de energia, sendo utilizados para aumentar o amortecimento geral do sistema estrutural.

Foram realizados testes com um modelo do edifício alto padrão “CAARC Standard Tall Building”, primeiramente sem nenhum atenuador e após com dois tipos de atenuadores com características diferentes instalados no modelo. No trabalho são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios, realizados no Túnel de Vento *Professor Joaquim Blessmann*, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Os atenuadores dinâmicos sintonizados (amortecedores de massa) mostraram-se eficazes na redução das vibrações transversais por desprendimento de vórtices, validando o túnel de vento como ferramenta de projeto para a prevenção e controle de fenômenos associados às vibrações induzidas pelo vento.

Palavras-chave: atenuadores dinâmicos sintonizados, vento, edifícios altos, túnel de vento, amortecedores de massa, desprendimento de vórtices.

ABSTRACT

CZARNOBAY, A.S. – **Estudo em túnel de vento dos efeitos de atenuadores dinâmicos sintonizados em modelos de edifícios altos**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2006.

With the increasing need of more economic buildings, as well as the great valorization of the terrains in the center of big cities, which leads to a consequent need to improve the utilization of this terrains, and with the development of the construction techniques and of the structural analysis process, the buildings have become higher, lighter, more flexible and less damped, and, therefore, more susceptible to problems of vibrations, such as those induced by wind action.

On this new situation, the natural damping of the building could become insufficient to reduce the motion caused by wind action, which can lead to discomfort to the users, break of glasses and even damage to the structure. In order to obtain a reduction on this displacements, in some cases, an additional supply of damping is needed, to avoid this excessive movements. This supply of damping is obtained by the installation of an energy dissipation system on the building. The tuned mass dampers constitute on one of this systems of energy dissipation, being used to improve the overall damping of the structural system.

Tests with a model of the “CAARC Standard Tall Building” were conducted, first with no damper attached to it, and then with two different types of tuned mass dampers installed on the model in each time. The results obtained with these tests, conducted on the Túnel de Vento *Professor Joaquim Blessmann*, at the Universidade Federal do Rio Grande do Sul are presented and discussed. In the tests, the tuned mass dampers have shown good efficiency in the reduction of the transversal vibration caused by vortex shedding, which validates the wind tunnel as a design tool for the control and prevention of the phenomena of wind-induced vibrations.

Key words: tuned mass dampers, wind, tall buildings, wind tunnel, vortex shedding.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	21
1.1	Generalidades	21
1.2	Objetivos.....	23
2	Revisão bibliográfica.....	24
2.1	Ação do vento em edifícios altos.....	24
2.1.1	Vibrações causadas pelo vento.....	24
2.1.1.1	Vibrações causadas pela energia cinética das rajadas	24
2.1.1.2	Vibrações causadas por martelamento	24
2.1.1.3	Vibrações causadas por desprendimento de vórtices	25
2.1.1.4	Vibrações causadas por galope.....	28
2.1.2	Resposta de edifícios altos à ação do vento.....	29
2.1.2.1	Resposta longitudinal de edifícios altos à ação do vento	29
2.1.2.2	Resposta transversal de edifícios altos à ação do vento	29
2.2	Atenuadores dinâmicos sintonizados.....	30
2.2.1	Introdução.....	30
2.2.2	Parâmetros de projeto	32
2.2.3	Estudos sobre atenuadores dinâmicos sintonizadosos já realizados.....	38
2.3	Modelagem aeroelástica	40
3	Modelo Proposto	43
3.1	CAARC Standard Tall Building.....	43
3.1.1	Propriedades dinâmicas	45
3.2	Suporte flexível para simulação das propriedades dinâmicas	47
3.2.1	Cálculo da frequência	48
3.3	Correspondência de escala.....	50
3.3.1	Escala de comprimento.....	50
3.3.2	Escala de massa	50
3.3.3	Escala de momentos de inércia de massa	51
3.3.4	Escala de frequência	52
3.3.5	Escala de tempo	53
3.3.6	Escala de velocidade.....	54
3.3.7	Escala de aceleração	55

3.3.8	Escala de amortecimento	55
3.4	Modelo do atenuador dinâmico sintonizado.....	56
4	Ensaio Realizados em Túnel de Vento	61
4.1	Túnel de vento <i>Prof. Joaquim Blessmann</i>	61
4.2	Instrumentação do modelo e aquisição de dados.....	63
4.3	Calibração da frequência e do amortecimento	67
4.3.1	Fatores de escala corrigidos	69
4.4	Simulação de ventos	69
4.5	Modelos de atenuadores dinâmicos sintonizados utilizados	74
4.6	Desenvolvimento dos ensaios.....	76
5	Análise dos resultados obtidos	81
5.1	Modelo sem atenuador dinâmico sintonizado instalado.....	81
5.2	Comparações entre modelos com e sem atenuadores instalados.....	87
6	Conclusões.....	103
	Referências	104
	Anexo I – Tabelas de resultados dos ensaios	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Vórtices de Kármán.....	27
Figura 2.2 – Torre Taipei 101.....	31
Figura 2.3 – Atenuador dinâmico sintonizado da Torre Taipei 101.....	32
Figura 2.4 – Sistema com dois graus-de-liberdade.....	33
Figura 2.5 – Sistema com um grau-de-liberdade.....	33
Figura 2.6 – Amortecimento equivalente em função da razão de sintonia de frequências e do amortecimento do atenuador, para $\mu = 4 \%$ e $B \rightarrow \infty$.	35
Figura 2.7 – Variação da razão das respostas longitudinal e transversal da edificação (eficiência do atenuador) com a variação da sintonia de frequências.	36
Figura 2.8 – Razão ótima de sintonia de frequências em função da razão de massas....	37
Figura 2.9 – Razão ótima de resposta da estrutura em função da razão de massas.....	37
Figura 2.10 – Resposta da estrutura nas direções “x” e “y” para diferentes ângulos de incidência do vento.	38
Figura 2.11 – Ensaios de vibração livre – oscilação do topo do modelo para diferentes configurações.....	39
Figura 2.12 – Modelo equivalente.....	42
Figura 3.1 – Planta baixa e vista lateral do “CAARC Standard Tall Building”.....	43
Figura 3.2 – Modelo do “CAARC Standard Tall Building”.	45
Figura 3.3 – Prisma retangular utilizado na determinação de momentos de inércia de massa .	46
Figura 3.4 – Suporte flexível para ensaios de modelos aeroelásticos equivalentes.	47
Figura 3.5 – Dedução da rigidez rotacional	49
Figura 3.6 – Esquema do modelo do atenuador dinâmico sintonizado como um pêndulo de flexão. .	56
Figura 3.7 – Modelos de atenuadores (pêndulos de flexão) instalados nas chapas de topo do modelo do edifício a ser ensaiado.	60
Figura 3.8 – Modelo de atenuador dinâmico sintonizado fixado na chapa de topo do modelo sendo colocado no modelo do edifício a ser ensaiado.....	60
Figura 4.1 – Túnel de vento <i>Prof. Joaquim Blessmann</i>	61
Figura 4.2 - Circuito aerodinâmico do Túnel de Vento <i>Prof. Joaquim Blessmann</i>	63

Figura 4.3– Equipamentos utilizados na aquisição de dados dos ensaios realizados.....	64
Figura 4.4 – Acelerômetros piezoelétricos fixados nas extremidades dos eixos da base flexível.....	64
Figura 4.5 – Sonda do anemômetro de fio quente instalada dentro da seção do túnel de vento .	65
Figura 4.6 – Equipamentos utilizados na aquisição dos dados do anemômetro.....	66
Figura 4.7 – Elementos de rugosidade para $p = 0,23$	70
Figura 4.8 – Perfil vertical de velocidades médias para $p = 0,23$	71
Figura 4.9 – Elementos de rugosidade para $p = 0,34$	72
Figura 4.10 - Perfil vertical de velocidades médias para $p = 0,34$	73
Figura 4.11 – Configuração da seção do túnel de vento sem elementos de rugosidade para vento suave.	74
Figura 4.12 - Acelerômetros instalados no modelo de atenuador dinâmico sintonizado.	75
Figura 4.13 - Amplificador utilizado nos ensaios de vibração livre dos modelos de atenuadores dinâmicos sintonizados.....	76
Figura 4.14 - Posições do modelo durante os ensaios.	77
Figura 4.15 – Relação entre as trajetórias do topo e dos acelerômetros.....	79
Figura 4.16 - Determinação da parcela horizontal do deslocamento no topo do modelo.	80
Figura 5.1 – Resposta longitudinal rms para vento a 0°	83
Figura 5.2 – Resposta transversal rms para vento a 0°	84
Figura 5.3 – Resposta longitudinal rms para vento a 90°	85
Figura 5.4 – Resposta transversal rms para vento a 90°	86
Figura 5.5 – Resposta longitudinal rms para vento 0,23 a 0°	88
Figura 5.6 - Resposta transversal rms para vento 0,23 a 0°	89
Figura 5.7 - Resposta longitudinal rms para vento 0,23 a 90°	90
Figura 5.8 – Resposta transversal rms para vento 0,23 a 90°	91
Figura 5.9 – Resposta longitudinal rms para vento 0,34 a 0°	94
Figura 5.10 – Resposta transversal rms para vento 0,34 a 0°	95
Figura 5.11 – Resposta longitudinal rms para vento 0,34 a 90°	96
Figura 5.12 – Resposta transversal rms para vento 0,34 a 90°	97
Figura 5.13 – Resposta longitudinal rms para vento suave a 0°	99
Figura 5.14 – Resposta transversal rms para vento suave a 0°	100

Figura 5.15 – Resposta longitudinal rms para vento suave a 90°	101
Figura 5.16 – Resposta transversal rms para vento suave a 90°	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1– Variação de comprimentos da pêndulo em função da frequência requerida e do raio da haste para uma razão de massa de 5 %.....	59
Tabela 4.1– Determinação da razão de amortecimento crítico.	68
Tabela 4.2– Fatores de escala corrigidos.....	68
Tabela A.1 – Modelo Sem Atenuador – Vento com $p = 0,23$ - Resposta longitudinal para vento a 0°	107
Tabela A.2 – Modelo com Atenuador A1 instalado – Vento com $p = 0,23$ - Resposta longitudinal para vento a 0°	108
Tabela A.3 – Modelo com Atenuador A2 instalado – Vento com $p = 0,23$ - Resposta longitudinal para vento a 0°	109
Tabela A.4 – Modelo Sem Atenuador – Vento com $p = 0,23$ - Resposta transversal para vento a 0°	110
Tabela A.5 – Modelo com Atenuador A1 instalado – Vento com $p = 0,23$ - Resposta transversal para vento a 0°	111
Tabela A.6 – Modelo com Atenuador A2 instalado – Vento com $p = 0,23$ - Resposta transversal para vento a 0°	112
Tabela A.7 – Modelo Sem Atenuador – Vento com $p = 0,23$ - Resposta longitudinal para vento a 90°	113
Tabela A.8 – Modelo com Atenuador A1 instalado – Vento com $p = 0,23$ - Resposta longitudinal para vento a 90°	114
Tabela A.9 – Modelo com Atenuador A2 instalado – Vento com $p = 0,23$ - Resposta longitudinal para vento a 90°	115
Tabela A.10 – Modelo Sem Atenuador – Vento com $p = 0,23$ - Resposta transversal para vento a 90°	116
Tabela A.11 – Modelo com Atenuador A1 instalado – Vento com $p = 0,23$ - Resposta transversal para vento a 90°	117
Tabela A.12 – Modelo com Atenuador A2 instalado – Vento com $p = 0,23$ - Resposta transversal para vento a 90°	118
Tabela A.13 – Modelo Sem Atenuador – Vento com $p = 0,34$ - Resposta longitudinal para vento a 0°	119

Tabela A.14 – Modelo com Atenuador A1 instalado – Vento com $p = 0,34$ - Resposta longitudinal para vento a 0°	120
Tabela A.15 – Modelo com Atenuador A2 instalado – Vento com $p = 0,34$ - Resposta longitudinal para vento a 0°	121
Tabela A.16 – Modelo Sem Atenuador – Vento com $p = 0,34$ - Resposta transversal para vento a 0°	122
Tabela A.17 – Modelo com Atenuador A1 instalado – Vento com $p = 0,34$ - Resposta transversal para vento a 0°	123
Tabela A.18 – Modelo com Atenuador A2 instalado – Vento com $p = 0,34$ - Resposta transversal para vento a 0°	124
Tabela A.19 – Modelo Sem Atenuador – Vento com $p = 0,34$ - Resposta longitudinal para vento a 90°	125
Tabela A.20 – Modelo com Atenuador A1 instalado – Vento com $p = 0,34$ - Resposta longitudinal para vento a 90°	126
Tabela A.21 – Modelo com Atenuador A2 instalado – Vento com $p = 0,34$ - Resposta longitudinal para vento a 90°	127
Tabela A.22 – Modelo Sem Atenuador – Vento com $p = 0,34$ - Resposta transversal para vento a 90°	128
Tabela A.23 – Modelo com Atenuador A1 instalado – Vento com $p = 0,34$ - Resposta transversal para vento a 90°	129
Tabela A.24 – Modelo com Atenuador A2 instalado – Vento com $p = 0,34$ - Resposta transversal para vento a 90°	130
Tabela A.25 – Modelo Sem Atenuador – Vento Suave - Resposta longitudinal para vento a 0°	131
Tabela A.26 – Modelo com Atenuador A1 instalado – Vento Suave - Resposta longitudinal para vento a 0°	132
Tabela A.27 – Modelo com Atenuador A2 instalado – Vento Suave - Resposta longitudinal para vento a 0°	133
Tabela A.28 – Modelo Sem Atenuador – Vento Suave - Resposta transversal para vento a 0°	134
Tabela A.29 – Modelo com Atenuador A1 instalado – Vento Suave - Resposta transversal para vento a 0°	135
Tabela A.30 – Modelo com Atenuador A2 instalado – Vento Suave - Resposta transversal para vento a 0°	136

Tabela A.31 – Modelo sem Atenuador – Vento Suave - Resposta longitudinal para vento a 90°.....	137
Tabela A.32 – Modelo com Atenuador A1 instalado – Vento Suave - Resposta longitudinal para vento a 90°.....	138
Tabela A.33 – Modelo com Atenuador A2 instalado – Vento Suave - Resposta longitudinal para vento a 90°.....	139
Tabela A.34 – Modelo sem Atenuador – Vento Suave - Resposta transversal para vento a 90°.....	140
Tabela A.35 – Modelo com Atenuador A1 instalado – Vento Suave - Resposta transversal para vento a 90°.....	141
Tabela A.36 – Modelo com Atenuador A2 instalado – Vento Suave - Resposta transversal para vento a 90°.....	142

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas Maiúsculas:

B	banda de frequências da excitação
D	deslocamento radial
D_h	componente horizontal do deslocamento
E_h	módulo de elasticidade do material da haste do modelo do atenuador
F	força
H	altura da edificação
I_h	momento de inércia da seção transversal da haste do pêndulo de flexão do modelo do atenuador
Im_m	momento de inércia de massa do modelo acoplado ao suporte flexível
Im_x	momento de inércia de massa em relação ao eixo x
Im_y	momento de inércia de massa em relação ao eixo y
K	constante elástica das molas
K_a	rigidez do atenuador r
K_e	rigidez da edificação
K_{eq}	rigidez do sistema equivalente
K_θ	rigidez rotacional em torno do eixo considerado
K_{pen}	rigidez do pêndulo de flexão do modelo do atenuador
L	dimensão linear característica
L_m	comprimento do modelo
L_p	comprimento do protótipo

L_{pen}	comprimento do pêndulo do modelo do atenuador
R_t	distância do topo do modelo ao centro do eixo de rotação
R_a	distância do centro sísmico do acelerômetro ao centro do eixo de rotação
R_h	raio da haste cilíndrica do pêndulo do modelo do atenuador
St	número de Strouhal = $(f_s d) / V$
V	velocidade média do vento
V_m	velocidade média do vento no modelo
V_p	velocidade média do vento no protótipo
$V(z)$	velocidade média do vento na altura z
V_{cr}	velocidade crítica do vento para desprendimento de vórtices = $(f_n d) / St$
V_{ref}	velocidade média na altura de referência z_{ref}

Letras Romanas Minúsculas:

a_a	aceleração do centro sísmico do acelerômetro
a_t	aceleração do topo do modelo
c_a	constante de amortecimento do atenuador
c_e	constante de amortecimento da edificação
f	frequência
f_a	frequência natural do amortecedor
f_e	frequência natural de vibração da edificação
f_i	frequência natural correspondente ao modo de vibração i
f_m	frequência de vibração do modelo
f_{ma}	frequência de vibração do modelo do atenuador
f_n	frequência natural ou fundamental de vibração da estrutura

f_p	freqüência de vibração do protótipo
f_s	freqüência de desprendimento de um par de vórtices (freqüência de Strouhal)
$f(t)$	excitação sobre a edificação ao longo do tempo
f_x	freqüência de vibração do modelo em torno do eixo x
f_y	freqüência de vibração do modelo em torno do eixo y
m	massa
m_a	massa do atenuador
m_e	massa total da edificação
m_{eq}	massa do sistema equivalente
m_m	massa do modelo
m_{ma}	massa do modelo do atenuador
m_p	massa do protótipo
p	expoente da curva de potência teórica ajustada ao perfil de velocidades médias
t_m	tempo no modelo
t_p	tempo no protótipo
x_a	deslocamento do atenuador
x_e	deslocamento do topo da edificação
z	cota acima de um nível de referência (piso do túnel de vento)
$z(t)$	deslocamento relativo entre o topo da edificação e o atenuador
z_{ref}	cota do eixo longitudinal do túnel = 450mm

Letras Gregas Minúsculas:

λ_a	escala de aceleração
λ_f	escala de freqüência

λ_L	escala de comprimento
λ_{Im}	escala de momento de inércia de massa
λ_m	escala de massa
λ_T	escala de tempo
λ_v	escala de velocidade
λ_ρ	escala de massa específica
μ	razão de massas (massa do atenuador / massa da edificação)
θ	deslocamento angular
ρ_{ar}	massa específica do ar
ρ_m	massa específica do modelo
ρ_p	massa específica do protótipo
ζ	razão de amortecimento crítico
ζ_a	razão de amortecimento crítico do atenuador
ζ_e	razão de amortecimento crítico da edificação
ζ_{eq}	razão de amortecimento crítico do sistema equivalente
ζ_m	razão de amortecimento crítico do modelo
ζ_p	razão de amortecimento crítico do protótipo

Letras Gregas Maiúsculas:

Ω	Razão de sintonia de frequências
----------	----------------------------------

1 Introdução

1.1 Generalidades

Nos primeiros estudos em aerodinâmica de estruturas civis, visava-se obter a resposta estática da estrutura induzida pela ação do vento. Até a década de 1960, esse era o método utilizado na determinação do carregamento devido ao vento em estruturas de edifícios altos. Os efeitos dinâmicos produzidos pela ação do vento nas edificações construídas neste período eram minimizados devido à elevada rigidez destas edificações.

A crescente necessidade de projetos cada vez mais econômicos, bem como a valorização dos terrenos nos grandes centros urbanos, que leva a conseqüente necessidade de aumentar o aproveitamento destes, e com o desenvolvimento das técnicas construtivas e dos processos de análise estrutural, as edificações tornaram-se mais altas, leves, flexíveis, menos amortecidas, e, portanto, mais susceptíveis a problemas de vibrações, inclusive as induzidas pela ação do vento. Essas vibrações podem ter amplitudes elevadas causando desconforto aos usuários, ou, até mesmo, danos à estrutura.

O bom comportamento dos edifícios altos à ação do vento, inclusive a furacões, deve-se à melhora da confiabilidade dos sistemas estruturais e principalmente a um estudo mais aprofundado, através de ensaios em túneis de vento, dos efeitos do vento sobre eles. O túnel de vento é, no momento, a principal ferramenta que os engenheiros dispõem para resolver os problemas aerodinâmicos de estruturas civis.

De acordo com American Society of Civil Engineers (1980, p. 201), os primeiros experimentos em túnel de vento com corpos rombudos, ou seja, de formato não aerodinâmico, são datados do final do século XIX, e creditados principalmente a Eiffel, Prandtl e Irmiger. Porém, com o início da Primeira Guerra Mundial os estudos em engenharia aeronáutica se intensificaram, e pouca atenção foi dada à aerodinâmica de estruturas civis, que não teve grandes avanços por um longo período. Em 1940, o colapso da primeira ponte suspensa de Tacoma Narrows fez despertar novamente o

interesse entre os engenheiros civis pelo estudo dos efeitos do vento em estruturas. A partir de então, os engenheiros estruturais passaram a trilhar os passos teóricos e experimentais do já bem estabelecido campo da aerodinâmica aeronáutica.

Ainda segundo American Society of Civil Engineers (1980, p. 201), túneis de vento aeronáuticos com seções de trabalho relativamente reduzidas, projetados para produzir escoamentos de baixa turbulência, eram utilizados para investigar a resposta induzida pelo vento em estruturas. Mesmo se utilizando a teoria da similaridade aerodinâmica e aeroelástica para modelar as propriedades das estruturas, não era dada a importância devida à modelagem das condições do vento natural, o que fazia com que os resultados obtidos em túnel de vento fossem diferentes daqueles medidos em campo. Só a partir de 1958, quando Jensen apresentou seu trabalho “Model Law for Phenomena in Natural Wind” a necessidade de modelar o perfil turbulento do vento natural se tornou amplamente reconhecida. Então, desde a década de 1960, com o surgimento de um grande número de túneis de vento projetados especificamente para produzir modelos de camada limite turbulenta do vento natural, as técnicas de modelagem do efeito do vento têm melhorado sensivelmente.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo a investigação, através de ensaios em modelos reduzidos em túnel de vento, da eficiência da utilização de sistemas de atenuadores dinâmicos sintonizados (do tipo amortecedores de massa) na redução dos efeitos dinâmicos provocados pela ação do vento em estruturas de edifícios altos. Através destes ensaios, quer-se comprovar a validade da utilização do túnel de vento como ferramenta para projeto de sistemas de prevenção e controle de vibrações induzidas pelo vento.

Para tanto, verificou-se, em ensaios realizados no Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann*, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, os efeitos dinâmicos do vento em um modelo aeroelástico equivalente do edifício alto “CAARC Standard Tall Building”, primeiramente sem nenhum sistema de amortecimento (contando portanto apenas com seu próprio amortecimento estrutural natural) e, após, com o acréscimo de dois diferentes modelos de atenuadores dinâmicos sintonizados ao mesmo modelo de edifício alto, submetendo-os a mesma excitação, para comparar os resultados obtidos com e sem o atenuador, obtendo a resposta flutuante induzida nas direções longitudinal e transversal ao vento, nos dois modos fundamentais de vibração livre (flexão em duas direções ortogonais).

Finalmente, procedeu-se a análise dos resultados encontrados nos ensaios, com a comparação dos resultados obtidos pelo modelo com e sem os atenuadores instalados, para verificar a eficiência de tais atenuadores.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Ação do vento em edifícios altos

2.1.1 Vibrações causadas pelo vento

2.1.1.1 Vibrações causadas pela energia cinética das rajadas

O vento é o movimento do ar livre causado, em larga escala, por correntes térmicas nos primeiros 16km acima da superfície terrestre. Dependendo da rugosidade, natural ou artificial, do terreno, esse movimento pode se tornar mais ou menos agitado, com formação de grande número de turbilhões ou redemoinhos. Esses turbilhões podem variar em tamanho, desde a ordem de grandeza do milímetro até a da altura da camada limite atmosférica, e em energia. Essa agitação mecânica do ar é chamada turbulência atmosférica, e é a principal causa de variações, tanto no módulo como na orientação, da velocidade média do vento. Essas variações são chamadas de rajadas.

De acordo com Rausch (1973 apud Blessmann, 1998, p. 63), quando surge uma rajada de vento a pressão dinâmica média cresce subitamente, permanece constante por um pequeno intervalo de tempo e volta a cair para o valor médio anterior. Ao longo do tempo, novas rajadas podem surgir, aumentando ou diminuindo o valor da pressão dinâmica, mas sempre voltando ao valor médio. Estas rajadas são responsáveis pela parcela flutuante da resposta de estruturas à ação do vento na direção do escoamento. Dependendo da existência de alguma periodicidade no fenômeno e da frequência das rajadas, podem ocorrer vibrações causadas por estas.

2.1.1.2 Vibrações causadas por martelamento

Segundo Blessmann (1998, p. 129), se uma edificação está situada a sotavento de diversos obstáculos, ela estará imersa na esteira por eles gerada. A turbulência nesta

região é do mesmo tipo da turbulência do vento natural incidente nestes obstáculos, ou seja, o espectro de energia é bastante alargado, sem a presença de um pico pronunciado.

Entretanto, se esta edificação estiver situada na esteira de apenas uma ou algumas poucas edificações de dimensões semelhantes, convenientemente situadas, ela estará sendo “martelada”, compassadamente, por turbilhões gerados nas edificações a barlavento com uma frequência predominante. Esse fenômeno dinâmico recebe o nome de martelamento. O martelamento pode se tornar ressonante se a frequência dominante dos turbilhões gerados nos obstáculos a barlavento coincidir com uma das frequências naturais da estrutura.

Blessmann (1998, p. 129) considera, ainda, que além da frequência, a intensidade de turbulência do vento incidente também influi na vibração. Se esta intensidade for pequena, a turbulência do vento incidente terá pouca influência na esteira das edificações a barlavento, que é bem organizada, com vórtices que se desprendem cadenciadamente (vórtices de Kármán) e vão incidir sobre a edificação em estudo, gerando uma força excitadora aproximadamente periódica, ou seja, com espectro de energia estreito. Se o vento for muito turbulento, haverá uma desorganização dos turbilhões, e a energia passa a se distribuir por uma gama maior de frequências, ou seja, o espectro de energia é largo e as vibrações de menor amplitude.

Pode-se então concluir que o fenômeno do martelamento é tão mais importante quanto menor for a rugosidade do terreno. Por exemplo, seus efeitos serão mais pronunciados à beira-mar do que no centro de uma grande cidade.

2.1.1.3 Vibrações causadas por desprendimento de vórtices

O principal efeito dinâmico de um edifício esbelto, em geral, deve-se a esforços laterais decorrentes do desprendimento cadenciado de vórtices, podendo levar a movimentos perpendiculares ao escoamento exagerados, constituindo-se então no principal problema do projeto.

Em corpos com formato não aerodinâmico sujeitos a escoamentos com determinado número de Reynolds, ocorre o fenômeno de desprendimento alternado de vórtices, cuja frequência característica é bem definida. São os chamados vórtices de

Kármán, que originam forças periódicas, oblíquas em relação à direção do vento médio. Considerando suas componentes, as forças alternadas na direção do vento ocorrem na frequência do desprendimento individual dos vórtices, enquanto que as forças alternadas na direção transversal ao vento ocorrem na frequência de desprendimento de cada par de vórtices (BLESSMANN, 1998, p. 161).

Essas componentes das forças tendem a produzir oscilações nas direções em que agem. Entretanto, as forças geradas pelo desprendimento de vórtices na direção do vento são pequenas em comparação com as forças na direção transversal do vento. Na prática, oscilações importantes na direção do vento, por desprendimento de vórtices alternados, raramente acontecem. Por outro lado, oscilações causadas pelas forças periódicas transversais ocorrem em muitas edificações cilíndricas ou quase cilíndricas (seção transversal variando suavemente), e podem chegar a grandes amplitudes, quando a frequência de desprendimento de um par de vórtices entra em ressonância com uma das frequências naturais da edificação em estudo. Prismas de seção retangular (incluindo a quadrada), triangular ou com outras formas de cantos vivos estão sujeitos às excitações mais fortes.

Para que o fenômeno do desprendimento cadenciado de vórtices em um corpo imerso no escoamento ocorra de forma efetiva, é necessário que a forma do corpo seja rombuda, de contorno curvo ou poligonal, que o corpo seja consideravelmente alteado (relação entre o comprimento do eixo e a largura) e que exista uma boa correlação do desprendimento ao longo de todo o prisma. O escoamento deve ser de baixa turbulência (suave) e aproximadamente uniforme (em termos de velocidade média). Não deve haver recolamento após a primeira separação (mais propenso em corpos muito alongados). A figura 2.1, retirada de Blessmann (1998), mostra o sincronismo do desprendimento de vórtices, respectivamente.

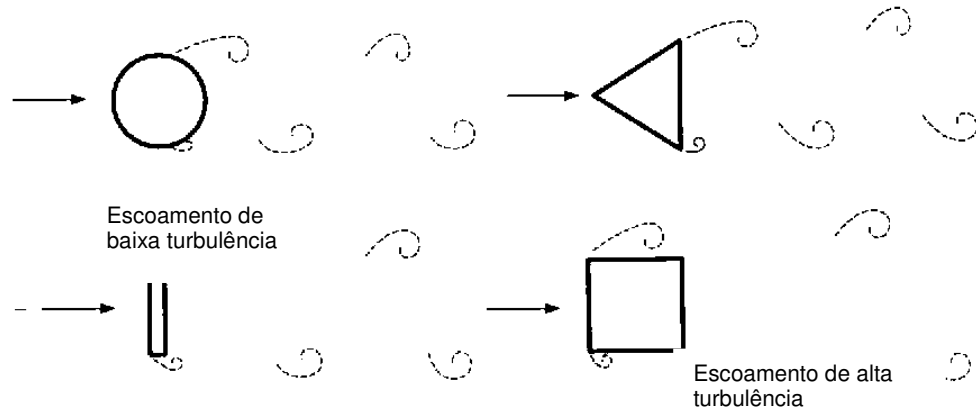


Figura 2.1 – Vórtices de Kármán.

A chamada velocidade crítica para desprendimento de vórtices é aquela na qual a frequência do desprendimento de um par de vórtices coincide com uma das frequências naturais da estrutura. O número de Strouhal, que estabelece uma relação entre a frequência de desprendimento de um par de vórtices, as dimensões do prisma e a velocidade do vento, é um parâmetro de grande importância na estimativa da velocidade crítica para desprendimento de vórtices. A equação seguinte é a definição do número de Strouhal:

$$S_t = \frac{f_s \cdot L}{V} \quad (2.1)$$

Onde:

- S_t número de Strouhal;
- f_s frequência de desprendimento de um par de vórtices;
- L dimensão linear característica;
- V velocidade do vento.

A velocidade crítica para desprendimento de vórtices é obtida a partir da equação (2.1), adaptada para situações de ressonância, chegando-se a:

$$S_t = \frac{f_n \cdot L}{V_{cr}} \Rightarrow V_{cr} = \frac{f_n \cdot L}{S_t} \quad (2.2)$$

Onde:

- f_n frequência natural, ou fundamental, da estrutura;
- V_{cr} velocidade crítica do vento para desprendimento de vórtices.

2.1.1.4 Vibrações causadas por galope

Estruturas ou elementos estruturais leves e flexíveis, com pequeno amortecimento, podem sofrer oscilações causadas pelo fenômeno de instabilidade aerodinâmica denominado galope. Neste fenômeno, a amplitude de oscilação na direção transversal a do vento aumenta com a velocidade deste. Durante esta oscilação o ângulo de incidência do vento em relação ao corpo oscilante está continuamente mudando. Se, em resposta a esta incidência variável, for desenvolvida uma força na direção e sentido do movimento do corpo, energia será retirada do vento e a oscilação será mantida (BLESSMANN, 1998 p. 213).

Segundo Blessmann (1998, p. 213), as principais características do galope são:

- intensidade violenta;
- seu súbito aparecimento, que ocorre quando o vento atinge a chamada velocidade de disparo, que varia de um modo aproximadamente linear com o amortecimento estrutural. Essa velocidade limite é usualmente muito alta para edifícios, entretanto, o amortecimento cada vez menor de certas estruturas está fazendo com que a velocidade de disparo se aproxime cada vez mais da de projeto;
- o aumento da amplitude de vibração com o aumento da velocidade do vento, sem um limite superior;

- movimento oscilatório em um modo simples, não acoplado, perpendicular à direção do vento médio.

Há um grande número de seções usuais na construção civil que são suscetíveis, potencialmente, a este fenômeno: prismas de seção quadrada, retangular, triangular, poligonal, semicircular e cantoneiras, por exemplo.

2.1.2 Resposta de edifícios altos a ação do vento

Além da divisão da resposta nas parcelas média e flutuante, já comentadas, segundo American Society of Civil Engineers (1980, p. 179), é provado ser conveniente dividir a resposta de edifícios altos à ação do vento em dois movimentos, nas direções longitudinal e transversal ao vento. Essa divisão é justificada pela ausência de uma correlação entre esses dois movimentos, ou baixo grau de acoplamento, observada em vários estudos.

2.1.2.1 Resposta longitudinal de edifícios altos à ação do vento

De acordo com American Society of Civil Engineers (1980, p. 180), a partir dos trabalhos de Vickery, “On the Assessment of Wind Effects on Elastic Structure”, publicado em 1966, e de Davenport, “Gust Loading Factors”, publicado em 1967, pôde ser concluído que 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 a resposta média, devida ao arrasto médio.

2.1.2.2 Resposta transversal de edifícios altos à ação do vento

Os mecanismos que geram esforços na direção transversal ao vento são tão complexos, quando comparados ao que geram esforços na direção longitudinal, que ainda não existe um método analítico generalizado disponível para calcular a resposta de edifícios altos na direção transversal ao vento incidente. Em muitos casos o critério mais importante para o projeto de edifícios altos é a resposta transversal. Isso significa

que o único recurso disponível e confiável para determinar esta resposta é a modelagem aeroelástica para ensaios com simulação do vento natural em túnel de vento.

2.2 Atenuadores Dinâmicos Sintonizados

2.2.1 Introdução

Como já fora anteriormente comentado, as necessidades atuais de elevação das edificações em sua altura, bem como o desenvolvimento de materiais cada vez mais leves e estruturas cada vez mais esbeltas, além do desenvolvimento das técnicas de análise estrutural acarretou a redução da rigidez das edificações.

A resposta de um edifício a ação do vento depende da intensidade do vento, das condições do entorno, tamanho e forma da edificação, massa, rigidez e capacidade de dissipação de energia do sistema estrutural. A mencionada redução de massa e rigidez das edificações acarretou ainda a redução da capacidade de dissipação de energia das estruturas destes, ou seja, a redução de seu amortecimento intrínseco.

Nessa situação, o amortecimento natural da edificação pode tornar-se insuficiente para reduzir os movimentos causados pela ação do vento, o que pode gerar desconforto aos usuários, quebra de vidros e até mesmo danos à estrutura.

Para atingir a redução destes deslocamentos, pode-se alterar alguns dos parâmetros envolvidos na resposta da estrutura à ação do vento, anteriormente citados. Entretanto, normalmente, a localização, orientação e geometria da obra estão pré-definidos por necessidade de locação, espaço e projeto arquitetônico, sendo que acréscimos na rigidez ou massa geralmente tornam-se inviáveis por razões tanto econômicas quanto práticas. Por esta razão, em alguns casos, requer-se um suplemento adicional de amortecimento, para evitar tais movimentações excessivas. Tal acréscimo de amortecimento é alcançado pela instalação de um sistema de dissipação de energia na edificação.

Os atenuadores dinâmicos sintonizados (amortecedores de massa) constituem-se em um destes sistemas de dissipação de energia, sendo utilizados para aumentar o amortecimento geral do sistema estrutural.

O atenuador dinâmico sintonizado é um dispositivo que consiste numa massa ligada à estrutura da edificação, nas proximidades ou no ponto de máximo deslocamento, por um sistema do tipo “mola-amortecedor”, sendo que a dissipação de energia ocorre quando há deslocamentos relativos entre a massa e a edificação. A eficiência de sua utilização em sistemas de engenharia mecânica, tais quais máquinas, automóveis e aeronaves, já está estabelecida, sendo que também são utilizados em estruturas civis, tais quais a CN Tower, em Toronto, no Canadá, a John Hancock Tower, em Boston, e o Citicorp Center, em Nova York, ambos nos Estados Unidos, além da Sydney Tower, em Sydney, na Austrália. Um exemplo atual da utilização de atenuadores dinâmicos sintonizados é a torre Taipei 101 (apresentada na figura 2.2), em Taipei, Taiwan, inaugurada em 2004, que atualmente é um dos mais altos edifícios do mundo, com uma altura total de 509 metros. A figura 2.3 apresenta o amortecedor de massa utilizado na estrutura, constituído por uma grande esfera de aço ligada à estrutura por cabos de aço, funcionando como um pêndulo.



Figura 2.2 – Torre Taipei 101. Fonte: Wikipédia

(http://en.wikipedia.org/wiki/Taipei_101).



Figura 2.3 – Atenuador dinâmico sintonizado da Torre Taipei 101. Fonte: Wikipédia (http://en.wikipedia.org/wiki/Taipei_101).

2.2.2 Parâmetros de projeto

O atenuador dinâmico sintonizado é um sistema constituído por uma massa ligada à estrutura de uma edificação de maneira a permitir um deslocamento relativo entre a massa e a estrutura, sendo que esta ligação confere-lhe uma rigidez e um amortecimento próprios. Sendo assim, ao se dimensionar um amortecedor de massa sintonizado deve-se estabelecer os parâmetros intrínsecos a este atenuador que otimizem o seu funcionamento, ou seja, que provoquem a maior redução possível nos deslocamentos da estrutura exposta à excitação.

Os parâmetros usualmente utilizados para o dimensionamento de um atenuador dinâmico sintonizado são:

- frequência natural do atenuador (f_a);
- razão de amortecimento do atenuador (ζ_a);
- massa do atenuador (m_a).

Como o funcionamento de um atenuador está ligado ao funcionamento da estrutura na qual ele estiver operando, deve-se considerar ainda os parâmetros próprios da estrutura sem o atenuador, tais quais:

- frequência natural de vibração da edificação (f_e);
- razão de amortecimento da edificação (ζ_e);
- massa total da edificação (m_e).

Em estudos teóricos, pode-se considerar a estrutura com o atenuador instalado como um sistema com dois graus-de-liberdade, como mostra a figura 2.4. A eficiência do atenuador dinâmico sintonizado pode ser avaliada por meio da razão de amortecimento crítico equivalente (ζ_{eq}), que consiste no amortecimento viscoso necessário para que a estrutura, tomada como um sistema equivalente com um grau-de-liberdade (como apresentado na figura 2.5), apresente uma resposta de mesma magnitude que a da estrutura com o atenuador (sistema com dois graus-de-liberdade apresentado na figura 2.4), quando submetidas a uma mesma excitação.

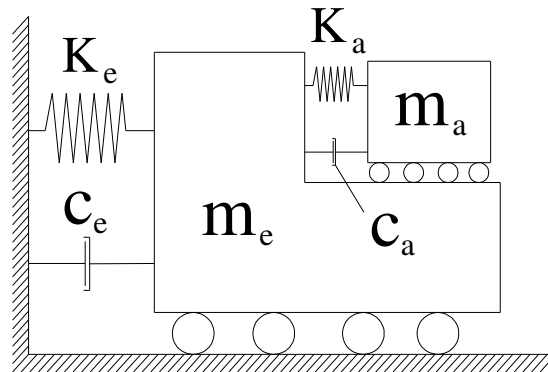


Figura 2.4 – Sistema com dois graus-de-liberdade.

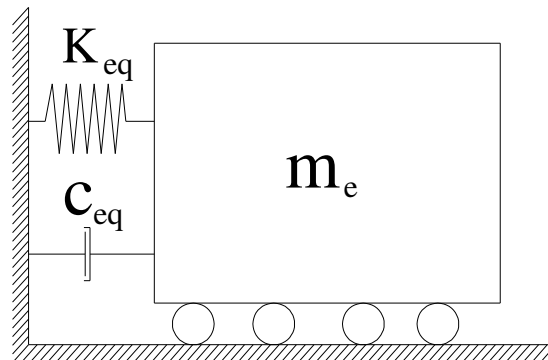


Figura 2.5 – Sistema com um grau-de-liberdade.

Para generalizar o estudo do atenuador dinâmico sintonizado, relacionam-se algumas de suas propriedades inerentes com as propriedades naturais da estrutura na qual ele será instalado. A razão de massa (μ - equação 2.3) corresponde à fração de massa que o atenuador representa em relação à massa total da edificação a qual esta conectado, sendo usualmente fornecida em porcentagem (%). A razão de sintonia de frequências (Ω – equação 2.4) é a relação entre a frequência natural de oscilação do atenuador e a frequência natural da edificação sem o atenuador instalado, sendo apresentada como um adimensional.

$$\mu = \frac{m_a}{m_e} \quad (2.3)$$

$$\Omega = \frac{f_a}{f_e} \quad (2.4)$$

Para o projeto de um atenuador dinâmico sintonizado, portanto, devem ser definidas as razões de massa e de sintonia de frequências e a razão de amortecimento crítico do atenuador, de forma a otimizar-se a razão de amortecimento crítico equivalente em função da solicitação a qual a estrutura será submetida.

Tanaka e Mak, em 1983, desenvolveram um estudo matemático baseado nos modelos apresentados nas figuras 2.2 e 2.3, determinando a razão de amortecimento crítico equivalente para excitações com várias bandas de frequência (B), considerando puro ruído branco ($B \rightarrow \infty$) e excitação harmônica simples ($B \rightarrow 0$) como extremos de banda larga e estreita, respectivamente, e ainda assumindo que as funções de densidade de probabilidade tenham uma distribuição Gaussiana, típica de excitações de estruturas. A figura 2.6 é resultado deste estudo, mostrando os efeitos da variação da razão de sintonia de frequências (Ω – no eixo das abscissas) e da razão de amortecimento do atenuador (ζ_a – no eixo das ordenadas) sobre a razão de amortecimento crítico equivalente (ζ_{eq} – plotado nas curvas do gráfico), para uma razão de massa $\mu = 4\%$ e largura de banda de frequências da excitação $B \rightarrow \infty$. O gráfico indica a existência de um pico para a razão de amortecimento equivalente para dados Ω e ζ_a , além de sugerir que a razão de amortecimento do atenuador não precisa ser necessariamente alta para atingir-se uma máxima eficiência. Demonstra-se ainda neste gráfico que quando a

freqüência natural do atenuador é próxima à freqüência natural da estrutura, obtém-se a máxima razão de amortecimento crítico equivalente.

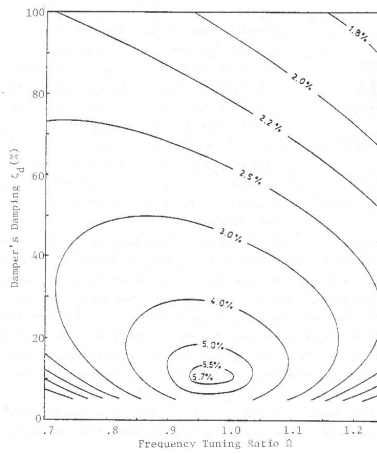


Figura 2.6 – Amortecimento equivalente em função da razão de sintonia de freqüências e do amortecimento do atenuador, para $\mu = 4\%$ e $B \rightarrow \infty$. Fonte: Tanaka e Mak (1983).

Xu, Kwok e Samali, em 1992, desenvolveram uma análise teórica baseada no sistema apresentado na figura 2.2, utilizando como excitação medições feitas diretamente em modelos submetidos a testes em túnel de vento. Para tanto, utilizaram as seguintes equações de movimento:

$$\begin{aligned} m_e \ddot{x}_e + c_e \dot{x}_e + k_e x_e &= c_a \dot{z} + k_a z + f(t) \\ m_a \ddot{z} + c_a \dot{z} + k_a z &= -m_a \ddot{x}_e \end{aligned} \quad (2.5)$$

Onde:

- c_e e k_e constantes de amortecimento e de rigidez da edificação;
- c_a e k_a constantes de amortecimento e de rigidez do atenuador;
- x_e deslocamento do topo da edificação;
- x_a deslocamento do atenuador;
- \ddot{x} e \dot{x} representam, respectivamente, as primeira e segunda derivadas em relação ao tempo dos deslocamentos analisados;

- $z(t)$ deslocamento relativo entre o amortecedor e o topo da edificação, sendo que sua expressão é apresentada na equação 2.6, a seguir:

$$z(t) = x_a(t) - x_e(t) \quad (2.6)$$

A figura 2.7, resultante deste estudo, mostra, novamente, que com a frequência do amortecedor próxima a frequência natural de vibração da estrutura sem o atenuador, tem-se máxima eficiência em redução de deslocamento pelo atenuador dinâmico sintonizado. Essa figura compara a razão de sintonia (Ω – no eixo das abscissas) com a razão de resposta do sistema (eixo das ordenadas), sendo esta a razão dada pela divisão do deslocamento da estrutura sob excitação com o amortecedor pelo deslocamento da estrutura sob a mesma excitação sem o atenuador, ou seja, a razão de redução do deslocamento da estrutura pela adição do atenuador dinâmico sintonizado.

Já na figura 2.8, tem-se a variação da razão ótima de sintonia de frequências (no eixo das ordenadas) comparada à variação da razão de massa (μ - no eixo das abscissas), mostrando que a razão ótima de sintonia é reduzida com o aumento da razão de massa.

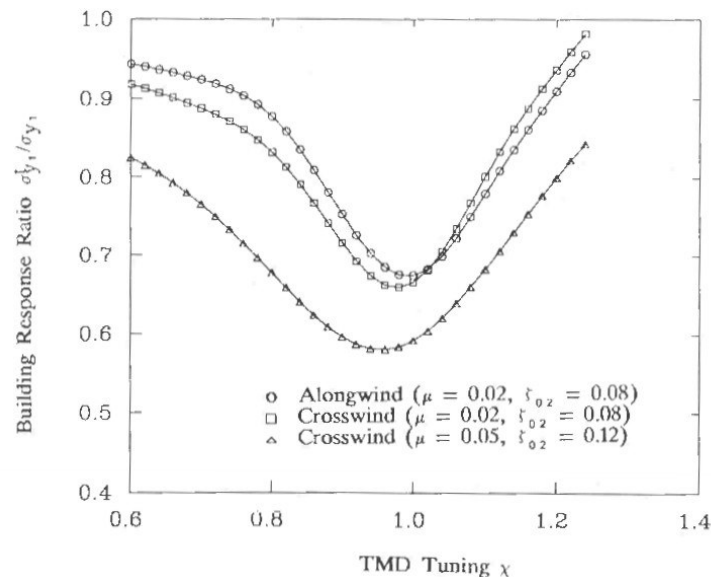


Figura 2.7 – Variação da razão das respostas longitudinal e transversal da edificação (eficiência do atenuador) com a variação da sintonia de frequências. Fonte: Xu, Kwok e Samali (1992).

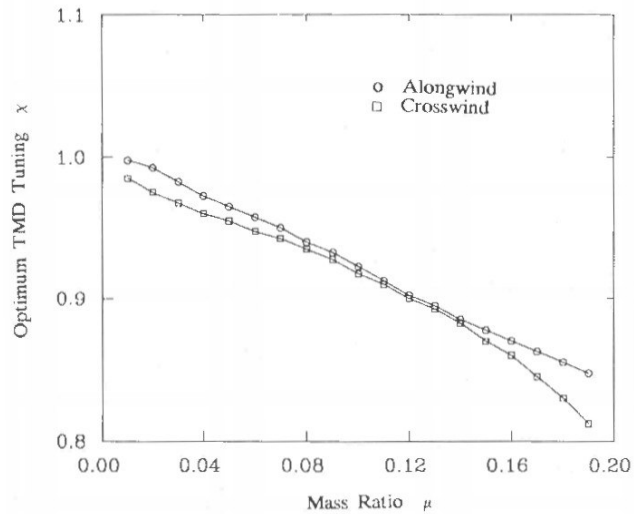


Figura 2.8 – Razão ótima de sintonia de frequências em função da razão de massas. Fonte: Xu, Kwok e Samali (1992).

A figura 2.9 (ainda resultado do trabalho de Xu, Kwok e Samali, de 1992) avalia a variação da resposta ótima da edificação (maior redução possível no deslocamento provocada pela presença de um atenuador) em função da variação da razão de massa do atenuador em relação à massa total da edificação. Pode-se deduzir deste gráfico que, a partir de razões de massa superiores a 8 %, não há grande ganho na eficiência do atenuador, sendo que a maior variação de eficiência encontra-se na faixa de 1 % a 4 % de razão de massa.

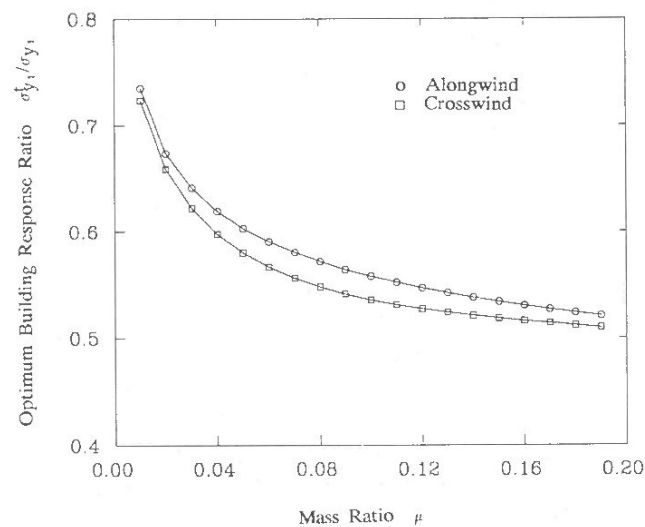


Figura 2.9 – Razão ótima de resposta da estrutura em função da razão de massas. Fonte: Xu, Kwok e Samali (1992).

2.2.3 Estudos sobre atenuadores dinâmicos sintonizados já publicados

Em 1983, Tanaka e Mak desenvolveram uma análise matemática teórica e testes em túnel de vento para avaliar a eficiência de sistemas de atenuador dinâmicos sintonizados em suprimir vibrações induzida pelo vento em edifícios altos e esbeltos. Foi testado, em um túnel de vento de camada limite, um modelo aeroelástico na escala 1:1000 do “CAARC Standard Tall Building”, sendo que o modelo consistia de uma caixa rígida de material leve tendo suas propriedades dinâmicas simuladas por uma base flexível, ajustada para medir a resposta em duas direções ortogonais. O atenuador dinâmico sintonizado foi simulado por um simples pêndulo composto por um bloco de alumínio suspenso por um fino fio que ficava preso ao topo do modelo. Uma fita adesiva colada ao fio conferia ao modelo do atenuador o amortecimento e rigidez requeridos. A frequência do atenuador era ajustada pelo tamanho do fio. A intensidade de turbulência utilizada durante o ensaio foi de aproximadamente 9 % no topo do modelo. A figura 2.10 mostra resultados desse trabalho, trazendo as respostas nas direções “x” e “y” (sendo o eixo “x” perpendicular à face mais larga do modelo), para duas velocidades do vento diferentes, comparando as respostas da estrutura com e sem o atenuador, para diferentes ângulos de incidência do vento (sendo esse ângulo medido entre a incidência do vento e o eixo “x”). A eficiência do atenuador em reduzir os deslocamentos do topo do edifício é demonstrada nesses gráficos, sendo que a redução em magnitude foi significativa, situando-se geralmente entre 30 % e 60 %.

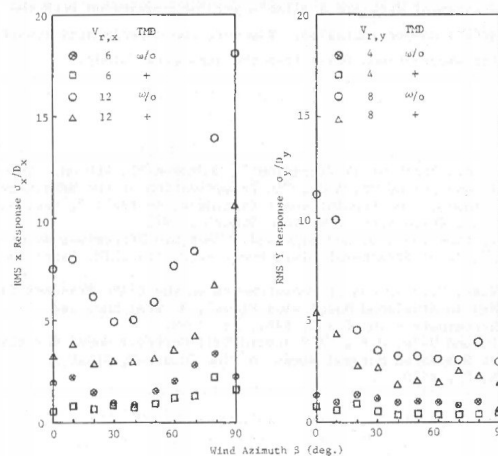


Fig. 13 Comparison of RMS Responses With and Without TMD

Figura 2.10 – Resposta da estrutura nas direções “x” e “y” para diferentes ângulos de incidência do vento. Fonte: Tanaka e Mak (1983).

Em 1992, Xu, Kwok e Samali realizaram um estudo em túnel de vento também utilizando um modelo aeroelástico do “CAARC Standard Tall Building”, na escala 1:400, modelando o atenuador como um pêndulo, suspendendo um pequeno bloco de alumínio por uma corda de piano presa ao topo do modelo, obtendo-se a frequência desejada variando o comprimento da corda e o amortecimento pela aderência de uma fita plástica adesiva à corda de piano. Um estudo paramétrico também foi realizado, com objetivo de comparar-se os resultados teóricos com os resultados dos ensaios em modelo reduzido. Foram ensaiados três modelos de atenuadores, além do prédio sem atenuadores. As características dos atenuadores utilizados são:

- TMD 1 - $\Omega = 1,03$, $\mu = 2,5 \%$ e $\zeta_a = 3,2 \%$;
- TMD 2 - $\Omega = 1,05$, $\mu = 3,5 \%$ e $\zeta_a = 4,0 \%$;
- TMD 3 - $\Omega = 1,01$, $\mu = 4,6 \%$ e $\zeta_a = 4,2 \%$.

A figura 2.11 apresenta a oscilação do topo do edifício no tempo, em ensaios de vibração livre, para as quatro situações (sem atenuador e com os atenuadores 1, 2 e 3), apresentando ainda os amortecimentos equivalentes para cada atenuador instalado.

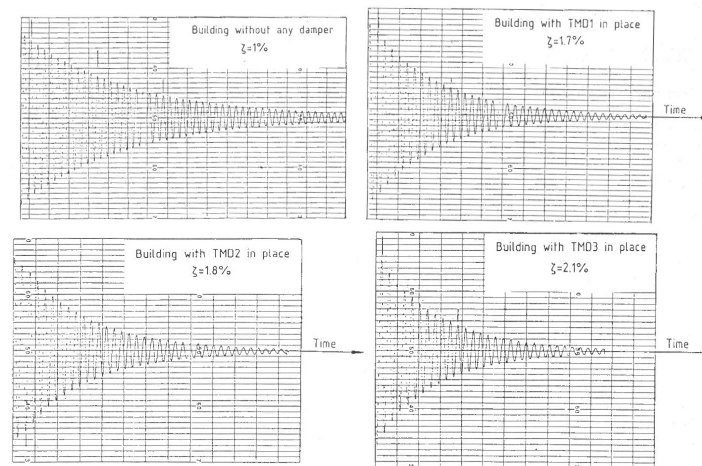


Figura 2.11 – Ensaios de vibração livre – oscilação do topo do modelo para diferentes configurações. Fonte: Xu, Kwok e Samali (1992).

Ainda em 1992, Xu Kwok e Samali realizaram estudos paramétricos para a aplicação de atenuadores de coluna de líquido e de coluna e massa de líquido na

redução de efeitos transversais ao escoamento do vento em estruturas altas e esbeltas, modelando a estrutura como um sistema com vários graus-de-liberdade, levando em consideração a flexão e o corte. Comparou-se o desempenho de atenuadores de coluna de líquido (que, segundo os autores, apresenta significativas vantagens práticas), com atenuadores dinâmicos sintonizados, concluindo-se que o atenuador de coluna de líquido apresenta desempenho similar ao dos atenuadores dinâmicos sintonizados.

Também em 1992, Kawagushi, Teramura e Omote realizaram um estudo teórico simulando o carregamento do vento por uma série temporal, usando um método computacional para prever os deslocamentos de uma estrutura com um atenuador dinâmico sintonizado instalado.

Andersen, Birch, Hansen e Skibelund, em 2001, realizaram um estudo teórico com objetivo de otimizar o projeto de atenuadores dinâmicos sintonizados para suprimir carregamentos devidos à ação de vórtices pelo modelo sugerido por Simiu e Scanlan.

Em 2004, Kwon e Park aplicaram atenuadores dinâmicos sintonizados em modelos teóricos de pontes estaiadas e de pontes suspensas com o objetivo de reduzir os efeitos provocados pelo fenômeno conhecido por “flutter”.

2.3 Modelagem aeroelástica

Para se determinar o comportamento dinâmico de estruturas submetidas à ação do vento através de ensaios de modelos reduzidos em túnel de vento, devem ser consideradas as características dinâmicas dessas estruturas. Essa técnica é chamada de modelagem aeroelástica.

Na modelagem aeroelástica, simula-se a ambientação específica e as características da estrutura, ou seja, as propriedades dinâmicas dos modos de vibração que contribuem significativamente para a resposta induzida pelo vento. Além de simular o escoamento natural do vento e a geometria externa da edificação, é necessário reproduzir rigidez, inércia e o amortecimento da estrutura. Como a ação do vento em edifícios altos fica restrita aos modos de vibração mais baixos, podem-se usar modelos dinamicamente mais simples no seu estudo.

Segundo American Society of Civil Engineers (1987), os modelos aeroelásticos são classificados em três categorias:

- Réplicas;
- Modelos seccionais;
- Modelos equivalentes.

Réplicas são modelos que reproduzem em escala todas as dimensões e formas geométricas, bem como as propriedades dos materiais resultando na completa reprodução em escala das características dinâmicas do protótipo.

Modelos seccionais são partes ou seções rígidas de estruturas montadas dinamicamente para avaliar forças do vento atuando sobre estruturas esbeltas como cabos, torres, pontes, chaminés, e outras estruturas para as quais pode-se considerar o vento como um escoamento bidimensional.

Os modelos equivalentes se valem de alguma analogia mecânica para representar as características dinâmicas do protótipo. Geralmente, os modelos aeroelásticos equivalentes são compostos de uma “casca” que representa a geometria do protótipo em escala, o que garante, juntamente com a correta representação do vento natural, a correta representação das forças aerodinâmicas, e de um sistema mecânico que simula as características de rigidez e amortecimento.

A figura 2.12 mostra um modelo equivalente de edifício alto utilizado no trabalho *“Desenvolvimento de um suporte flexível para ensaios de modelos aeroelásticos em túnel de vento”*, desenvolvido por Oliveira (2003), sendo que este suporte flexível será utilizado no presente trabalho para a realização dos ensaios em túnel de vento de um modelo do “CAARC Standard Tall Building” acrescido de diferentes modelos de amortecedores de massa sintonizados.

O suporte flexível desenvolvido por Oliveira (2003), e que será utilizado neste trabalho, é composto por uma estrutura construída em alumínio, composta por dois eixos perpendiculares entre si, que giram independentemente em torno de um mesmo ponto, tendo-se a possibilidade de regular inércia, rigidez rotacional e amortecimento, para cada eixo.

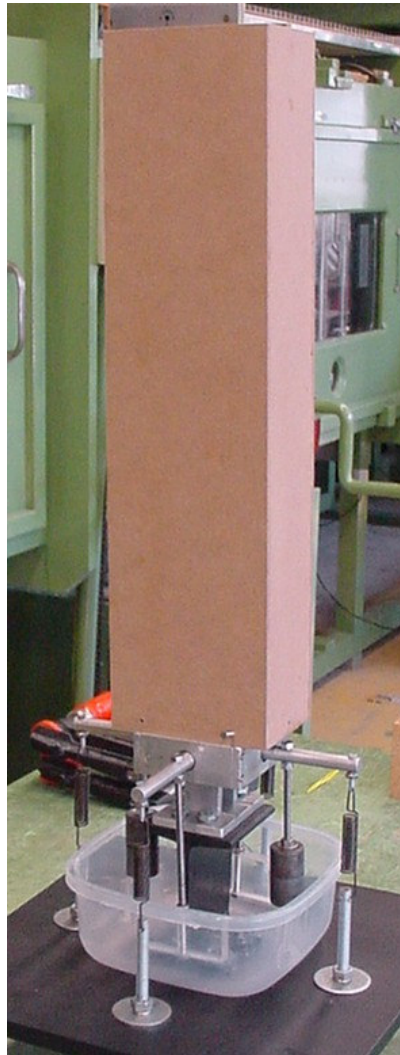


Figura 2.12 – Modelo equivalente. Fonte: Oliveira (2003).

A rigidez rotacional do mecanismo é dada por molas de tração instaladas nos eixos de rotação. Portanto, a frequência de vibração do modelo é determinada pela rigidez destas molas, sendo que o ajuste da frequência natural de vibração do modelo pode ser feito pela troca da rigidez das molas, podendo-se ajustar a frequência em cada direção independentemente.

O amortecimento do sistema também pode ser regulado, com o uso de pás de acrílico imersas em um líquido viscoso. A regulação do amortecimento se dá através da mudança do número de pás (uma ou duas por direção), da área dessas pás, do nível ou da viscosidade do líquido.

3 Modelo Proposto

3.1 CAARC Standard Tall Building

Para a realização dos ensaios em túnel de vento, escolheu-se como modelo de prédio alto o edifício alto padrão “CAARC Standard Tall Building”, para nele serem instalados os modelos de atenuadores dinâmicos sintonizados a serem ensaiados e compararem-se os resultados obtidos com os ensaios no mesmo modelo de edifício alto sem nenhum sistema de amortecimento instalado, contando apenas com o amortecimento intrínseco a ele determinado.

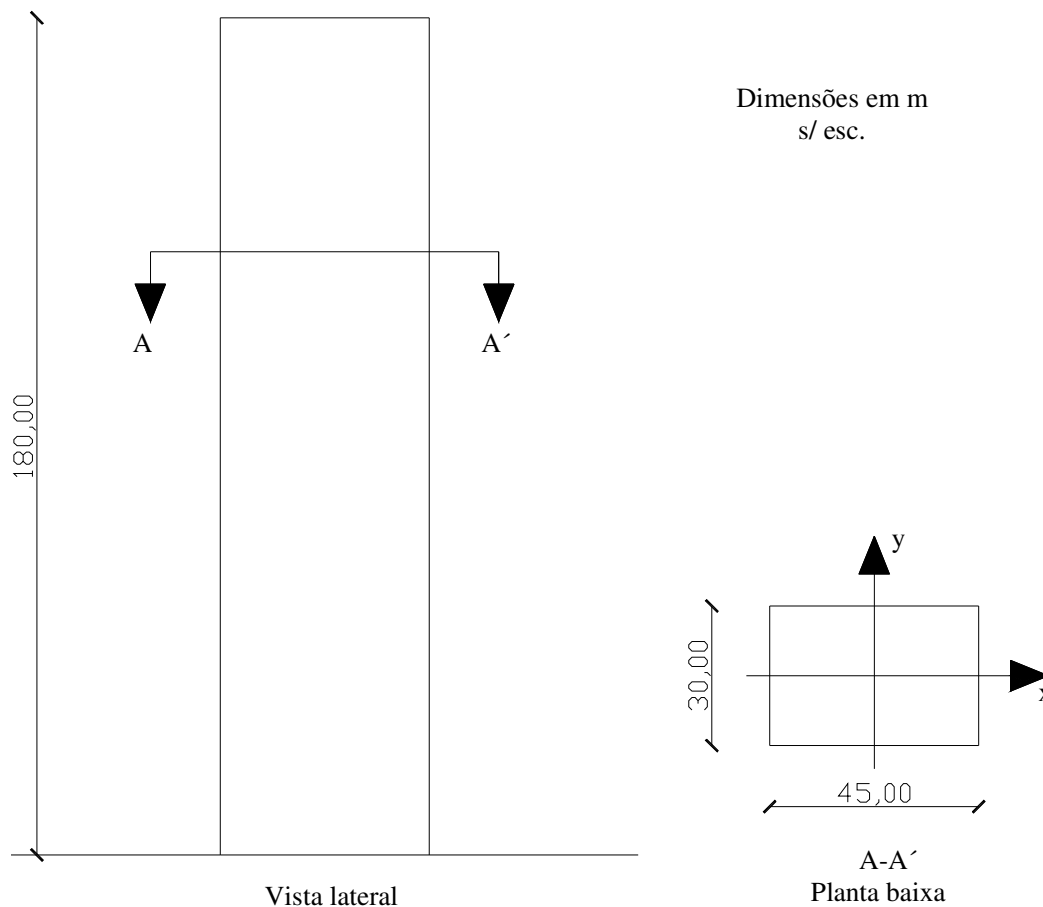


Figura 3.1 – Planta baixa e vista lateral do “CAARC Standard Tall Building”.

Segundo Melbourne (1980), em 1969, após um encontro do Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council Coordinators in the Field of Aerodynamics, conselho criado na Austrália, após a Segunda Guerra Mundial, para coordenar o desenvolvimento da tecnologia de defesa na área da engenharia aeronáutica, Wardlaw e Moss prepararam uma especificação de um modelo padrão de edifício alto para comparação de ensaios de simulação do vento natural em túneis de vento. Foi proposto um experimento simples com o modelo para comparar as diferentes técnicas que estavam sendo usadas em vários túneis de vento, o “CAARC Standard Tall Building”, que será utilizado nos ensaios no presente trabalho.

O “CAARC Standard Tall Building” tem formato especificado como sendo um prisma retangular com as seguintes dimensões: base com 30,00m por 45,00m e altura de 180,00m. O topo do edifício é horizontal, plano e sem parapeitos. As paredes externas também são planas, sem quaisquer detalhes geométricos. A figura 3.1 mostra a planta baixa e uma vista lateral do prédio.

Como foi utilizada uma base flexível que simula as propriedades dinâmicas do prédio, o modelo do próprio prédio foi tomado apenas como uma “casca” rígida que simula, em escala, as propriedades geométricas da edificação. Escolheu-se a escala geométrica de 1:400 para a modelagem do edifício, ficando este, portanto, com as seguintes dimensões: base de 7,50 cm por 11,25 cm e altura de 45,00 cm. O modelo foi então construído com chapas rígidas de MDF com 3 mm de espessura nas laterais e na face superior. O modelo utilizado nos ensaios foi construído na oficina do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo Técnico Paulo Francisco Bueno.

Para fixação das chapas entre si, foi utilizada a cola comercial Super Bonder, do fabricante Loctite. O fundo do modelo, que é responsável pela fixação ao suporte flexível, é feito de chapa de compensado, com 15mm de espessura. Para fixação da casca ao fundo foram utilizados doze parafusos, sendo três em cada face. A figura 3.2 mostra uma fotografia do modelo utilizado nos ensaios sem nenhum amortecedor instalado e já colocado sobre o suporte flexível dentro da seção de ensaios do túnel de vento.

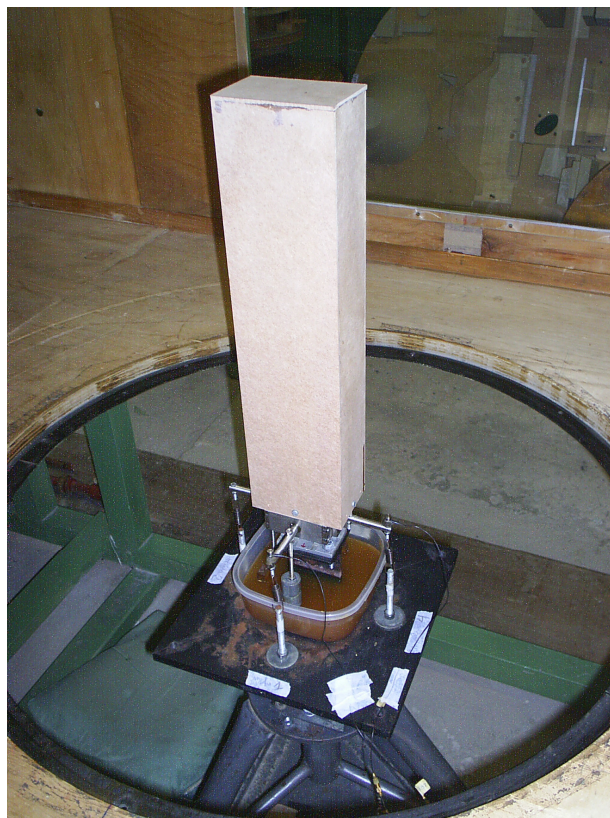


Figura 3.2 – Modelo do “CAARC Standard Tall Building”.

3.1.1 Propriedades Dinâmicas

No modelo do “CAARC Standard Tall Building”, apenas o modo fundamental de vibração é considerado, sendo que a forma deste deve ser tomada como linear, girando em torno de um ponto no nível do terreno. A frequência natural deve ser tomada por 0,2Hz em torno dos dois eixos, x e y, mostrados na figura 3.1, ambos ao nível do terreno. A distribuição de massa é uniforme, a uma taxa de 160kg/m³. O amortecimento estrutural, medido pela razão de amortecimento crítico, deve ser considerado 1%, para propósitos de comparação de resultados.

Como o prédio proposto tem uma massa uniformemente distribuída, torna-se muito fácil a determinação dos momentos de inércia de massa do prédio, podendo o mesmo ser considerado como um prisma retangular, como o da figura 3.3, para o qual, segundo Beer e Johnston (1994), os momentos de inércia de massa em torno dos eixos x e y são dados pelas equações (3.1) e (3.2), respectivamente.

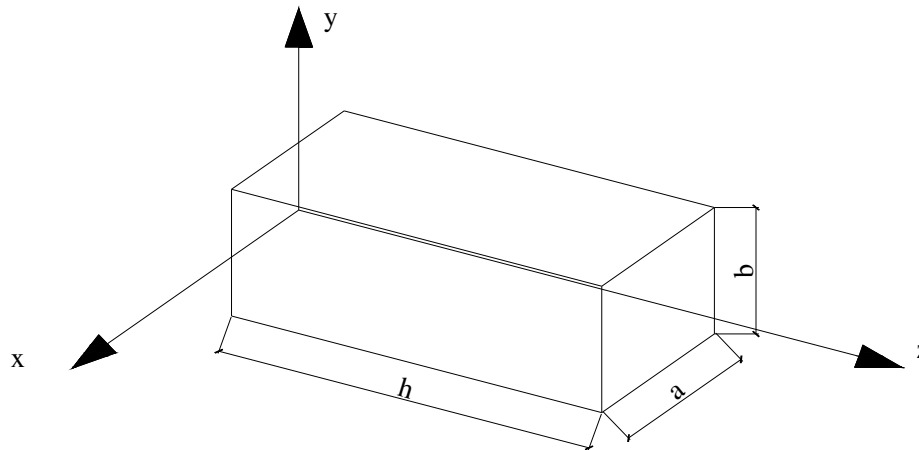


Figura 3.3 – Prisma retangular utilizado na determinação de momentos de inércia de massa.

$$I_{m_x} = \frac{1}{12} m \cdot (b^2 + h^2) + m \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^2 \quad (3.1)$$

$$I_{m_y} = \frac{1}{12} m \cdot (a^2 + h^2) + m \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^2 \quad (3.2)$$

Onde:

- I_{m_x} momento de inércia de massa em relação ao eixo x [kg m²];
- I_{m_y} momento de inércia de massa em relação ao eixo y [kg m²];
- m massa do prisma [kg].

Tendo-se que as dimensões a, b e h para o “CAARC Standard Tall Building” são 45,00m, 30,00m e 180,00m, respectivamente, e a distribuição de massa segue a taxa de 160kg/m³, pode-se então determinar a massa total:

$$m = a \cdot b \cdot h \cdot TaxadeMassa = 45 \text{ m} \cdot 30 \text{ m} \cdot 180 \text{ m} \cdot 160 \text{ kg/m}^3 = 38880000 \text{ kg} = 38880 \text{ t}$$

Substituindo-se esses valores nas equações (3.1) e (3.2) chega-se aos momentos de inércia de massa em torno de x e y:

$$I_{m_x} = \frac{1}{12} 38880000 \text{ kg} \cdot [(30 \text{ m})^2 + (180 \text{ m})^2] + 38880000 \text{ kg} \cdot \left(\frac{180 \text{ m}}{2}\right)^2$$

$$\Rightarrow I_{m_x} = 4228200000 \text{ kgm}^2 = 422.820.000 \text{ tm}^2$$

$$I_{m_y} = \frac{1}{12} 38880000 \text{ kg} \cdot [(45 \text{ m})^2 + (180 \text{ m})^2] + 38880000 \text{ kg} \cdot \left(\frac{180 \text{ m}}{2}\right)^2$$

$$\Rightarrow I_{m_y} = 4264650000 \text{ kgm}^2 = 426.465.000 \text{ tm}^2$$

3.2 Suporte flexível para simulação das propriedades dinâmicas

O suporte flexível utilizado nos ensaios realizados no modelo aeroelástico equivalente proposto neste trabalho, foi desenvolvido por Oliveira (2.003), e tem sua estrutura construída em alumínio, sendo composto dois eixos perpendiculares entre si, que giram independentemente em torno de um mesmo ponto, com possibilidade de regular inércia, rigidez rotacional e amortecimento, para cada eixo. A fig. 3.4 mostra uma perspectiva do mecanismo.

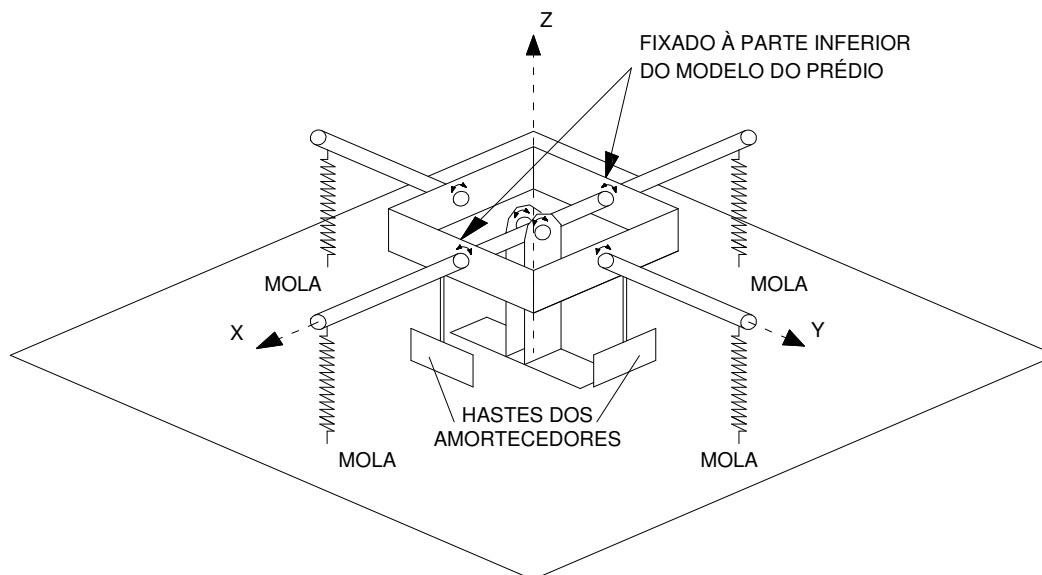


Figura 3.4 – Suporte flexível para ensaios de modelos aeroelásticos equivalentes.
Fonte: Oliveira (2003).

3.2.1 Cálculo da Frequência

Para a determinação da frequência natural de vibração do modelo utilizado, devem-se fazer algumas deduções, baseadas na geometria do suporte flexível utilizado, além do momento de inércia de massa que o modelo deve ter, em escala, para a correta representação do prédio protótipo. A equação a seguir, retirada de Thomson (1978), 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 frequência de vibração, em cada direção, dos modelos a serem ensaiados:

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_\theta}{Im_m}} \quad (3.3)$$

Onde:

- f_m frequência de vibração do modelo em torno do eixo considerado [Hz];
- K_θ rigidez rotacional em torno do eixo considerado [Nm];
- Im_m momento de inércia de massa do modelo acoplado ao suporte flexível, em relação ao eixo considerado [kg m²].

K_θ pode ser determinada através da geometria do suporte flexível, mostrada na figura 3.5, na página seguinte, e da constante elástica K das molas utilizadas:

$$F = 0,1 \cdot \theta \cdot K \quad (3.4)$$

$$M_{\text{em torno de } O} = 2 \cdot F \cdot 0,1 = 0,02 \cdot \theta \cdot K \quad (3.5)$$

$$K_\theta = \frac{M_{\text{em torno de } O}}{\theta} = 0,02 \cdot K \quad (3.6)$$

Onde:

- F força [N];

- θ deslocamento angular [rad];
- K constante elástica das molas [N/m];
- $M_{em\ torno\ de\ O}$ momento em torno do eixo considerado [Nm].

E substituindo-se 3.6 em 3.3 tem-se:

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{0,02 \cdot K}{Im_m}} \quad (3.7)$$

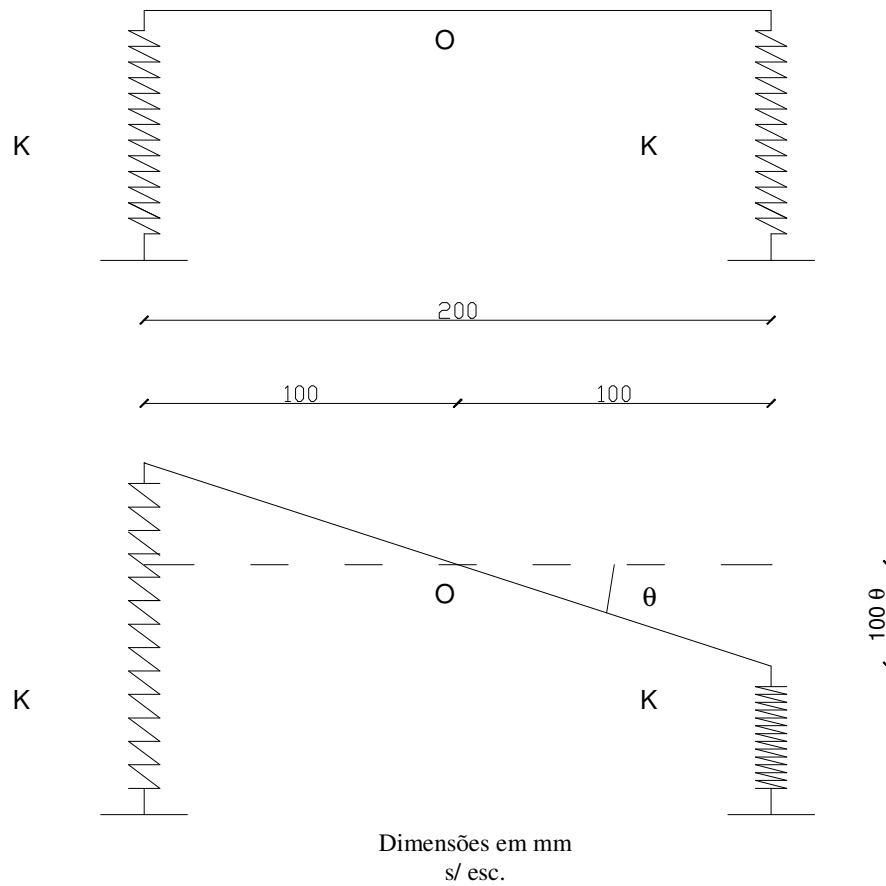


Figura 3.5 – Dedução da rigidez rotacional. Fonte: Oliveira (2003).

3.3 Correspondência de escala

Para garantir a validade dos resultados obtidos nos ensaios com o modelo aeroelástico equivalente proposto, este modelo deve respeitar a uma série de relações com as características dinâmicas e geométricas do protótipo. Estas relações são os fatores de escala, sendo que alguns deles são a seguir discutidos.

3.3.1 Escala de comprimento

O fator de escala de comprimento, dado pela equação (3.8), é a razão entre um comprimento do modelo e o seu correspondente no protótipo. No modelo construído foi utilizado um fator de escala de comprimento de 1:400.

$$\lambda_L = \frac{L_m}{L_p} \quad (3.8)$$

Onde:

- λ_L fator de escala de comprimento;
- L_m comprimento do modelo;
- L_p comprimento do protótipo.

3.3.2 Escala de massa

A escala de massa é determinada pela razão entre a massa do modelo e a do protótipo, como mostra a equação 3.9:

$$\lambda_m = \frac{m_m}{m_p} = \left(\frac{\rho_m L_m^3}{\rho_p L_p^3} \right) = \lambda_\rho \lambda_L^3 \quad (3.9)$$

Onde:

- λ_m fator de escala de massa;

- m_m massa do modelo;
- m_p massa do protótipo;
- ρ_m massa específica do modelo;
- ρ_p massa específica do protótipo;
- λ_ρ fator de escala de massa específica.

De acordo com American Society of Civil Engineers (1980), a distribuição de massa de um modelo pode ser aproximada de muitas formas. Se a massa específica do ar no modelo é igual a do ar no protótipo, então, para manter uma relação constante das forças de inércia, a massa específica da estrutura do modelo deve ser igual a do protótipo, ou seja, λ_ρ deve ser igual a 1. Geralmente não é necessário manter a exata massa específica em todos os pontos do modelo. Para estruturas alteadas, como edifícios altos, é suficiente manter em escala a massa por unidade de comprimento, e a correta distribuição de massa pode ser substituída pela correta representação em escala do momento de inércia de massa sobre qualquer eixo que puder acontecer rotação.

Com base nestas informações, optou-se por não se reproduzir a massa do modelo construído na escala correta, representando-se apenas o momento de inércia de massa em escala.

3.3.3 Escala de momentos de inércia de massa

O fator de correspondência de escala para o momento de inércia de massa é obtido pela equação (3.10):

$$\lambda_{I_m} = \left(\frac{\rho_m L_m^5}{\rho_p L_p^5} \right) = \lambda_\rho \lambda_L^5 \quad (3.10)$$

Onde:

- λ_{I_m} fator de escala de momento de inércia de massa.

Admitindo-se que o fator de escala de massa específica seja igual a 1 ($\lambda_\rho = 1$ – mesma massa específica tanto no modelo quanto no protótipo), tem-se que o fator de escala do momento de inércia de massa fica igual ao fator de escala de comprimento elevado à quinta potência, ou seja, igual à 1:10240000000000.

3.3.4 Escala de frequência

O fator de escala de frequência é dado pela razão entre a frequência do modelo e a frequência do protótipo, como mostra a equação (3.11).

$$\lambda_f = \frac{f_m}{f_p} \quad (3.11)$$

Onde:

- λ_f fator de escala de frequência;
- f_m frequência do modelo;
- f_p frequência do protótipo.

É fácil notar que a independência da escala de comprimentos torna livre a escolha da escala de frequências. Como a equação (3.7) mostra, a frequência do modelo depende do momento de inércia de massa do modelo, que deve ser representado em escala, e da constante elástica das molas utilizadas, de livre escolha. Molas mais rígidas determinam frequências mais altas.

Como será visto a seguir, a escala de frequências é determinante na definição das escalas de tempo e, por consequência, de velocidades. Frequências mais altas no modelo levam a velocidades de ensaio mais altas. Devido à faixa de velocidades possível de ser ensaiada foi determinado que a frequência do modelo nas duas direções deveria ser em torno de 7Hz.

Para tanto foram solicitadas molas à empresa TECNOMOLA, que, devido a dificuldades de precisão no processo de fabricação, podem ter uma variação de até 10%

no valor da constante elástica encomendada. As molas instaladas têm constante elástica média de 4.648 N/m (em torno do eixo X) e de 4.341 N/m (em torno do eixo Y).

Aplicando-se na equação (3.7) o valor da constante elástica média e os valores de momento de inércia de massa do protótipo calculados, devidamente multiplicados pelo fator de escala de momento de inércia de massa, tem-se os valores das frequências em torno dos eixos X e Y.

$$f_x = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{0,02 \cdot 4648}{0,041291}} = 7,5516 \text{ Hz}$$

$$f_y = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{0,02 \cdot 4341}{0,041647}} = 7,2668 \text{ Hz}$$

Assim sendo, aplicando-se a frequência do protótipo, f_p , igual a 0,2Hz, e as frequências em torno dos eixos X e Y, obtidas acima, respectivamente, na equação (3.11) encontra-se os fatores de escala de frequência em torno de cada eixo:

$$\lambda_{f_x} = \frac{7,5516}{0,2} = 37,76$$

$$\lambda_{f_y} = \frac{7,2668}{0,2} = 36,34$$

3.3.5 Escala de tempo

O fator de escala de tempo é dado simplesmente pelo inverso da escala de frequência:

$$\lambda_T = \frac{1}{\lambda_f} \quad (3.12)$$

Onde:

- λ_T fator de escala de tempo.

Portanto, aplicando-se à equação (3.12) os valores para o fator de escala de frequência calculados, tem-se os valores das escalas de tempo em torno dos eixos X e Y, respectivamente:

$$\lambda_{T_x} = \frac{1}{37,76} = 0,0265$$

$$\lambda_{T_y} = \frac{1}{36,34} = 0,0275$$

3.3.6 Escala de velocidade

A razão entre a velocidade no modelo e a velocidade no protótipo define o fator de escala de velocidade:

$$\lambda_v = \frac{V_m}{V_p} = \frac{\frac{L_m}{t_m}}{\frac{L_p}{t_p}} = \frac{\lambda_L}{\lambda_T} = \lambda_L \cdot \lambda_f \quad (3.13)$$

Onde:

- λ_v fator de escala de velocidade;
- V_m velocidade no modelo;
- V_p velocidade no protótipo;
- t_m tempo no modelo;
- t_p tempo no protótipo.

Aplicando-se o valor da escala de comprimento e os valores da escala de frequência em torno dos eixos X e Y na equação (3.13), acha-se os valores da escala de velocidade em torno dos dois eixos:

$$\lambda_{v_x} = 0,0025 \times 37,76 = 0,0944$$

$$\lambda_{v_y} = 0,0025 \times 36,64 = 0,0916$$

3.3.7 Escala de aceleração

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

$$\lambda_a = \frac{\lambda_v}{\lambda_T} = \frac{\lambda_L \cdot \lambda_f}{\lambda_T} = \lambda_L \cdot \lambda_f^2 \quad (3.14)$$

Onde:

- λ_a fator de escala de aceleração.

Nota-se que o fator de escala de aceleração é igual ao fator de escala de velocidade multiplicado pelo fator de escala de frequência, então:

$$\lambda_{a_x} = 0,0025 \times 37,76^2 = 3,57$$

$$\lambda_{a_y} = 0,0025 \times 36,34^2 = 3,30$$

3.3.8 Escala de amortecimento

Em modelagem aeroelástica, a razão de amortecimento crítico do modelo deve, por se tratar de um adimensional, ser igual a do protótipo, ou seja, $\zeta_m = \zeta_p$. Portanto, o fator de escala de amortecimento é igual a 1.

3.4 Modelo do atenuador dinâmico sintonizado

O atenuador foi modelado por um pêndulo de flexão suspenso no topo do modelo do edifício alto. O pêndulo é composto por uma haste metálica cilíndrica (utilizando-se uma corda de piano), que suspenderá uma massa de chumbo. A frequência natural do atenuador é avaliada através da rigidez da haste do pêndulo, que funciona como um sistema de um grau-de-liberdade, semelhante a uma viga engastada-livre, com uma massa colocada no extremo livre, assim como o esquema apresentado na figura 3.6, sendo que o ajuste da frequência pode ser feito pela variação do comprimento da haste.

O dimensionamento do pêndulo de flexão foi feito com base na frequência requerida (que deve ser próxima de 7,5 Hz, uma vez que a frequência do atenuador e do modelo devem ser próximas, como demonstrado na revisão bibliográfica) e da massa do atenuador, escolhida com base na razão de massa do atenuador em relação ao edifício. Conforme a bibliografia pesquisada, foi definida uma faixa de razões de massa variando de 3 % a 5 % para os ensaios.

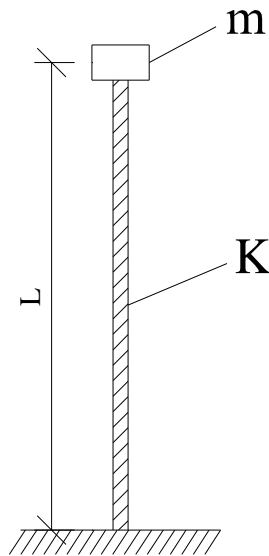


Figura 3.6 – Esquema do modelo do atenuador dinâmico sintonizado como um pêndulo de flexão.

Para determinar-se a massa do modelo, deve-se estabelecer uma escala de massas que relacione as massas do modelo e do protótipo. A equação 3.15 apresenta a

formulação para a escala de massas. A massa do modelo é dada multiplicando-se a taxa de distribuição de massa pelo volume do edifício, conforme segue:

$$m = 45 \text{ m} \cdot 30 \text{ m} \cdot 180 \text{ m} \cdot 160 \text{ kg/m}^3 = 38880000 \text{ kg} = 38880 \text{ t}$$

$$\lambda_m = \frac{m_m}{m_p} = \left(\frac{\rho_m L_m^3}{\rho_p L_p^3} \right) = \lambda_\rho \lambda_L^3 \quad (3.15)$$

Onde:

- λ_m fator de escala de massa;
- m_m massa do modelo;
- m_p massa do protótipo;
- ρ_m massa específica do modelo;
- ρ_p massa específica do protótipo;
- L_m comprimento do modelo;
- L_p comprimento do protótipo;
- λ_L fator de escala de comprimento;
- λ_ρ fator de escala de massa específica.

De acordo com American Society of Civil Engineers (1980), a distribuição de massa de um modelo pode ser aproximada de várias maneiras, sendo que, se a massa específica do ar no modelo é igual a do ar no protótipo, então, para manter uma relação constante das forças de inércia, a massa específica da estrutura do modelo deve ser igual a do protótipo, ou seja, λ_ρ deve ser igual a 1. Como a massa do protótipo é de 38880 t, e a escala de comprimentos é de 1:400, pela relação de escalas de massas chega-se a uma massa do modelo de 607,5 g. Portanto, para uma razão de massas de 5 %, tem-se uma massa do modelo do amortecedor de 30,4 g.

O dimensionamento do modelo do amortecedor é feito através da rigidez do pêndulo, que define a frequência de vibração do pêndulo, conforme a equação 3.16.

$$f_{ma} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{pen}}{m_{ma}}} \quad (3.16)$$

Onde:

- f_{ma} frequência natural do modelo do atenuador;
- K_{pen} rigidez do pêndulo;
- M_{ma} massa do modelo do atenuador.

Como o pêndulo funciona como um sistema do tipo viga engastada-livre, sua rigidez é dada pela equação 3.17, sendo que o pêndulo tem uma haste cilíndrica, daí saindo a dedução do momento de inércia da haste com base no raio da haste.

$$K_{pen} = \frac{3E_h I_h}{L_{pen}^3} = \frac{3\pi E_h R_h^4}{4L_{pen}^3} \quad (3.17)$$

Onde:

- E_h módulo de elasticidade do material da haste;
- I_h momento de inércia da seção transversal da haste;
- L_{pen} comprimento do pêndulo;
- R_h raio da haste cilíndrica do pêndulo.

Combinando-se as equações 3.16 e 3.17, pode-se determinar uma expressão que avalie o comprimento da haste do pêndulo que representa o modelo do atenuador de massa em função do material da haste, da frequência requerida, da massa requerida e da espessura (raio) da haste. Esta expressão está colocada na equação 3.18, a seguir:

$$L_{pen} = \sqrt[3]{\frac{3E_h R_h^4}{16\pi m_{ma} f_{ma}^2}} \quad (3.18)$$

Escolhendo-se o aço como material para a haste (sendo que o módulo de elasticidade do aço, segundo Beer e Johnston (1994) é de 210 GPa), pode-se determinar o comprimento do pêndulo conforme a tabela 3.1, com a variação da frequência natural requerida e do raio da haste, dada para uma razão de massa de 5 %, o que representa uma massa do modelo do atenuador de massa sintonizado de 30g.

f_n (Hz)	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50	9,00	9,50
R (mm)	L (cm)	L (cm)	L (cm)	L (cm)	L (cm)	L (cm)	L (cm)
0,10	1,00	0,95	0,91	0,87	0,83	0,80	0,77
0,20	2,51	2,39	2,28	2,19	2,10	2,02	1,95
0,25	3,38	3,22	3,07	2,94	2,83	2,72	2,62
0,30	4,31	4,10	3,92	3,75	3,60	3,47	3,35
0,40	6,33	6,02	5,75	5,51	5,29	5,09	4,91
0,50	8,52	8,11	7,74	7,42	7,12	6,86	6,61

Tabela 3.1 – Variação de comprimentos da pêndulo em função da frequência requerida e do raio da haste para uma razão de massa de 5 %.

Com base nesses resultados optou-se pela utilização de corda de piano como haste do pêndulo, pois os raios requeridos são muito pequenos. O diâmetro da corda de piano utilizado foi de 1,0 mm, pois diâmetros menores teriam uma resistência muito pequena, podendo se partir durante os ensaios.

Foram então produzidos dois modelos de atenuadores, a partir destes resultados, instalando-se os mesmos nas chapas de MDF que são colocadas no topo do modelo, através de uma furação no centro da mesma chapa, fixando-se o mesmo por com cola comercial Super-Bonder ao topo do modelo. O amortecimento do modelo que representa o atenuador dinâmico sintonizado é dado pela aderência de uma fita colante (fita crepe) ao longo da haste do pêndulo (aderida na corda de piano), uma vez que o amortecimento do pêndulo simples é muito baixo, e, segundo os estudos já realizados anteriormente comentados, com o amortecimento do atenuador numa faixa de 3% a 10% obtém-se os melhores resultados de redução do sistema. A figura 3.7 apresenta uma fotografia dos dois modelos de atenuadores dinâmicos sintonizados utilizados neste presente trabalho.

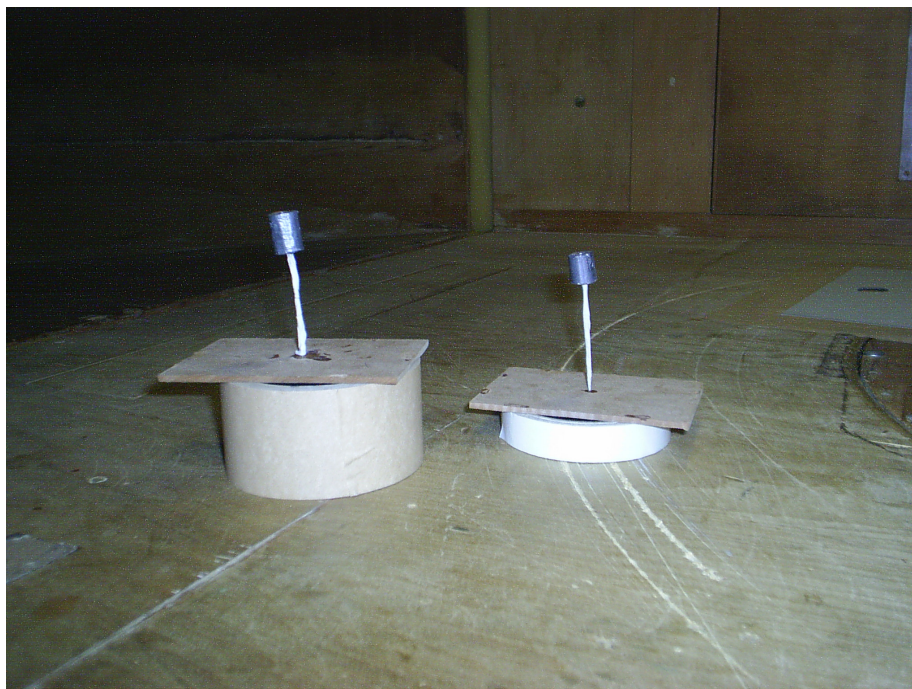


Figura 3.7 – Modelos de atenuadores (pêndulos de flexão) instalados nas chapas de topo do modelo do edifício a ser ensaiado.

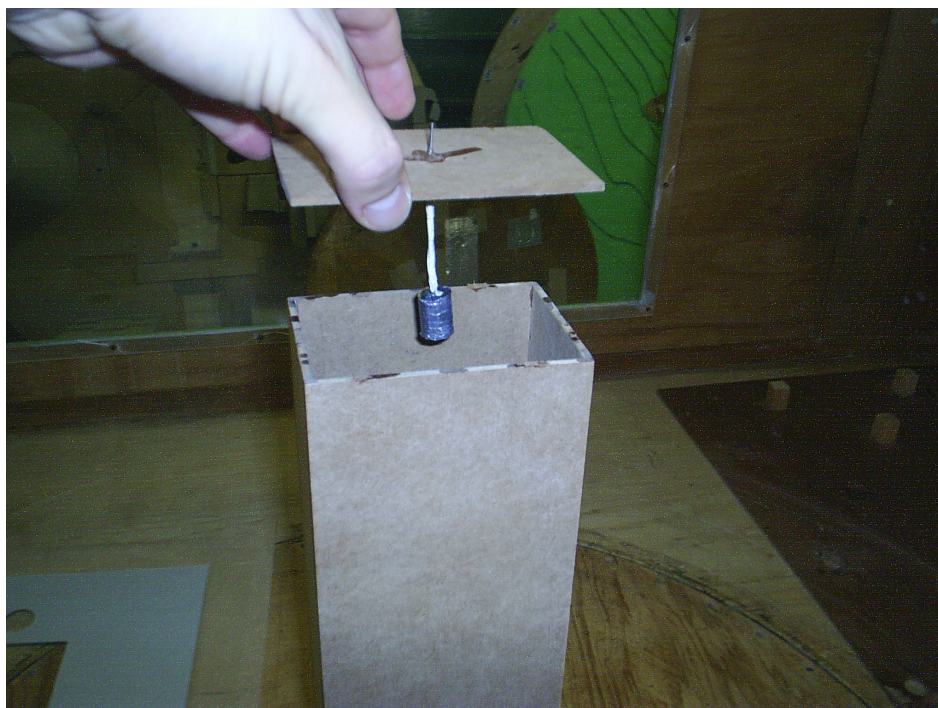


Figura 3.8 – Modelo de atenuador dinâmico sintonizado fixado na chapa de topo do modelo sendo colocado no modelo do edifício a ser ensaiado.

4 Ensaios realizados em túnel de vento

4.1 Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann*

Os ensaios foram realizados no Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann* da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, mostrado na figura 5.1. Trata-se de um túnel de vento de camada limite tipo Prandtl, ou seja, de circuito fechado, projetado especificamente para desenvolver estudos de efeitos estáticos e dinâmicos sobre modelos de construções civis em geral. Este túnel permite a simulação das principais características de ventos naturais. Sua câmara principal de ensaios tem relação *comprimento / altura* igual a 10,3, e dimensões 1,30m x 0,90m x 9,32m (largura x altura x comprimento). A velocidade máxima do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme e suave, sem modelos, é de 42 m/s. As hélices do ventilador são acionadas por um motor elétrico de 100 HP e a velocidade do escoamento é controlada manualmente através de aletas radiais metálicas que obstruem a passagem do ar.



Figura 4.1 – Túnel de vento *Prof. Joaquim Blessmann*

O Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann* dispõe atualmente de quatro mesas giratórias para fixação de modelos, tanto para ensaios estáticos como dinâmicos. Cada mesa tem suas aplicações específicas:

- Mesa M-I: ensaios de tipo aeronáutico no piso do túnel; pesquisa básica em formas geométricas simples, em modelos bi ou tridimensionais; ensaios para construção civil com geradores de turbulência colocados na câmara de simuladores.
- Mesa M-II: ensaios de tipo aeronáutico no eixo do túnel; ensaios para 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 na horizontal (na Mesa M-I o modelo pode ser colocado vertical ou horizontalmente).
- Mesa M-III: construída especialmente para estudos dinâmicos em estruturas de grande alteamento, tais como pilares de viadutos, mastros, torres de televisão e chaminés.
- Mesa M-IV: localizada no retorno do túnel, onde a seção transversal mede 2,40m x 2,10m. Serve para ensaios de dissipação de fumaça e de gases industriais, influência da topografia dos terrenos sobre os ventos, efeitos de interação, modelos de pontes, entre outros.

A mesa escolhida para realizar os ensaios deste trabalho foi a M-II, pois nela é possível trabalhar com o perfil de velocidades desejado, obtido a partir da colocação de blocos de madeira no piso do túnel, que simulam a rugosidade do terreno.

A figura 5.2 mostra a localização das mesas de ensaios, bem como outras características físicas do túnel de vento. Maiores detalhes e outras informações sobre o túnel de vento podem ser encontrados em Blessmann (1982, 1990).

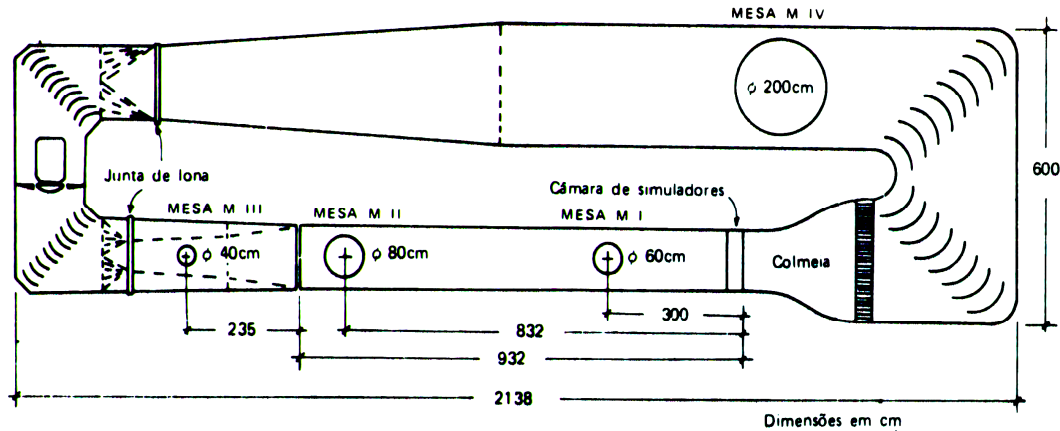


Figura 4.2 – Circuito aerodinâmico do Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann*.

4.2 Instrumentação do modelo e aquisição de dados

O modelo foi instrumentado com dois acelerômetros piezoelétricos, marca Brüel & Kjaer, fixados nas extremidades dos eixos da base flexível para ensaios em modelos aeroelásticos desenvolvida por Oliveira (2.003), sendo que, portanto, cada acelerômetro obterá a resposta para as acelerações do modelo na direção na qual estiver instalado. Cada acelerômetro foi conectado a um amplificador de sinal, específico para este tipo de instrumento, também marca Brüel & Kjaer. Cada amplificador foi regulado para a sensibilidade de carga característica do acelerômetro ao qual estava ligado, 3,39pC/g e 3,22pC/g, e com uma escala de saída de sinal de 0,1V/g. Dos acelerômetros, o sinal elétrico passava por uma caixa de conexão para placa A/D, e desta, finalmente, a um microcomputador, equipado com placa de aquisição A/D.

Para a efetiva aquisição do sinal, foi utilizado um programa desenvolvido pelo Professor Marcelo Maia Rocha, no sistema de aquisição de dados HPVEE 3.2. Este programa permite a aquisição do sinal em dois canais (foram utilizados dois acelerômetros), com tempo de duração e taxa de aquisição (número de pontos por segundo) escolhidos pelo usuário. O programa também faz os gráficos do espectro de potência de frequência e da variação do sinal elétrico no tempo, além da gravação de um arquivo de dados.



Figura 4.3 – Equipamentos utilizados na aquisição de dados dos ensaios realizados.



Figura 4.4 – Acelerômetros piezoelétricos fixados nas extremidades dos eixos da base flexível.

A figura 4.3, acima, mostra os equipamentos utilizados na instrumentação do modelo e aquisição de dados. Já a figura 4.4 mostra os acelerômetros piezoelétricos fixados nas extremidades dos eixos da base flexível para ensaios com modelos aeroelásticos.

Para a medição das velocidades e da turbulência durante os ensaios no túnel de vento, foi utilizado um anemômetro de fio quente, da marca Dantec Dynamics, também denominado de anemômetro de temperatura constante. O funcionamento deste anemômetro está baseado no efeito de resfriamento provocado pelo escoamento de um gás ou líquido sobre um corpo aquecido. O anemômetro mede a velocidade de escoamento em um determinado ponto, e ainda fornece séries temporais contínuas de velocidade, que são utilizadas para a determinação da velocidade média e da turbulência do escoamento.



Figura 4.5 – Sonda do anemômetro de fio quente instalada dentro da seção do túnel de vento.

O sistema StreamLine de aquisição de dados para o anemômetro (que é instalado em uma sonda dentro do túnel de vento, como mostra a figura 4.5 acima, medindo as velocidades médias e turbulência do escoamento na altura do topo do modelo) constituiu-se por um aparelho de até seis canais que recebe os dados do anemômetro, um sensor de temperatura, que mede a temperatura do escoamento para calibrar o anemômetro, e um computador com uma placa de conversão A/D que recebe e trata os dados adquiridos. O computador é conectado ao aparelho receptor por uma porta serial, com a qual se comunica com o sistema, enquanto que os sinais de saída do anemômetro, que são análogos, são recebidos pelo computador pela placa de aquisição A/D. Para o tratamento dos dados adquiridos, utiliza-se um pacote de programas computacionais denominado de StreamWare, que provê o ajuste, a calibração, a aquisição e o tratamento de dados obtidos com o anemômetro de fio quente. A figura 4.6 mostra o sistema StreamLine de aquisição de dados do anemômetro utilizado neste trabalho.



Figura 4.6 – Equipamentos utilizados na aquisição dos dados do anemômetro.

4.3 Calibração da frequência e do amortecimento

O processo de ajuste da frequência de vibração do modelo sem atenuador é feito através da regulagem do momento de inércia de massa do modelo, em torno de cada eixo, que pode ser ajustado através da adição ou retirada de massa ao lastro de massas fixado a cada eixo da base flexível utilizada nos ensaios. Cabe ressaltar que o ajuste de frequência é feito tão somente para o modelo sem atenuador, uma vez que, com a adição do modelo do atenuador dinâmico sintonizado ao topo do modelo do “CAARC Standard Tall Building”, alteram-se as características dinâmicas do modelo, bem como acontece ao se adicionar um atenuador dinâmico sintonizado a uma estrutura em escala real, uma vez que o atenuador representa uma massa extra, adicionada ao corpo da edificação, alterando seu momento de inércia de massa e, conseqüentemente, sua frequência natural de oscilação. Como se quer estudar os efeitos da adição de um sistema de atenuador dinâmico sintonizado a um edifício alto, estando corretamente calibrada a frequência e o amortecimento do modelo sem atenuador, mantém-se estas suas características e apenas adiciona-se ao modelo o sistema de amortecimento que se quer verificar, sendo que a nova frequência e amortecimento deste sistema acrescido do atenuador estarão alteradas devido as própria características do atenuador.

Estando o modelo sem atenuador devidamente fixado ao suporte flexível, e devidamente instrumentado, dá-se início o processo de ajuste da frequência de vibração. Para medir-se da frequência de vibração, foram aplicadas cargas do tipo Delta de Dirac (impulsos) na direção em que a frequência estava sendo medida. A frequência foi calculada pelo programa de aquisição de dados, já mencionado no item 4.2, através do espectro de potência. Foram realizadas cinco medições por direção, cada uma com tempo total de aquisição pelo programa de 10s, chegando-se ao valor de 7,5 Hz em todas medições, para a direção X, e ao valor de 7,3 Hz, em todas as medições, para a direção Y.

Isso implica em um erro de 0,65% na frequência em torno do eixo X, e de 0,50% na frequência em torno do eixo Y. No que diz respeito ao momento de inércia de massa, o erro medido foi de 1,30% em torno de X, e 1,01% em torno de Y. Essas aproximações são consideradas razoáveis para um método experimental.

Com o ajuste da frequência e do momento de inércia de massa realizado, partiu-se para a calibração do amortecimento do modelo. Neste processo, para se ajustar o amortecimento, variou-se as dimensões das pás de acrílico, em cada direção, bem como o nível do líquido viscoso, sendo que, neste experimento, foi utilizado detergente líquido neutro da marca Fontana como líquido viscoso.

A razão de amortecimento crítico foi calculada da seguinte maneira: aos arquivos de dados, gerados pelo programa de aquisição, foram aplicadas rotinas, desenvolvidas pelo Professor Marcelo Maia Rocha no programa comercial MatLab, que converteram o sinal gravado na variação da aceleração no tempo. Da curva de variação da aceleração no tempo selecionou-se os picos positivos, no programa Microsoft Excel, aos quais foi aproximada uma curva regida pela equação (4.1). Para aproximar a função foi utilizado o programa CurveExpert 1.3.

$$y(t) = a \cdot e^{-bt} \quad (4.1)$$

O coeficiente b , na equação (4.1), representa o produto da razão de amortecimento crítico (ζ) pela frequência angular (ω_n), esta última igual a π vezes o dobro da frequência natural de vibração, determinada anteriormente como 7,503Hz na direção X e 7,303Hz na direção Y.

Assim como foi realizado para o ajuste da frequência e momento de inércia de massa, para a calibração do amortecimento foram realizadas cinco medições por direção, também com a aplicação de uma carga do tipo Delta de Dirac e tempo de aquisição pelo programa de 10s. A tabela 4.1 mostra as razões de amortecimento crítico medidas.

Tabela 4.1– Determinação da razão de amortecimento crítico

Em torno de X		Em torno de Y	
b	ζ (%)	b	ζ (%)
0,48547595	1,03	0,48238135	1,05
0,47686771	1,01	0,46940795	1,02
0,48078725	1,02	0,47701298	1,04
0,48969521	1,04	0,427214872	1,03
0,46649631	0,99	0,47379515	1,03
Média	1,018	Média	1,035

4.3.1 Fatores de escala corrigidos

Como a frequência determinada experimentalmente não foi exatamente igual à teórica, os fatores de escala precisam sofrer pequenas correções. A tabela 4.2 mostra, resumidamente, os fatores de escala com os valores experimentais.

Tabela 4.2 – Fatores de escala corrigidos.

Parâmetro	Escala	Valor
Comprimento	$\lambda_L = \frac{L_m}{L_p}$	0,0025
Momento de inércia de massa	$\lambda_{I_m} = \lambda_\rho \cdot \lambda_L^5$	9,893E-14 – na direção X 9,669E-14 – na direção Y
Frequência	$\lambda_f = \frac{f_m}{f_p}$	37,515 – na direção X 36,515 – na direção Y
Tempo	$\lambda_T = \frac{1}{\lambda_f}$	0,0267 – na direção X 0,0274 – na direção Y
Velocidade	$\lambda_v = \lambda_L \cdot \lambda_f$	0,0938 – na direção X 0,0913 – na direção Y
Aceleração	$\lambda_a = \lambda_L \cdot \lambda_f^2$	3,5184 – na direção X 3,3334 – na direção Y

4.4 Simulação de ventos

Para o presente estudo, foram definidas três configurações de vento a serem ensaiadas. Na primeira configuração selecionada, 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, era tal que pôde ser descrito por uma lei potencial do tipo da equação (4.2), retirada de Blessmann (1995). Este perfil foi obtido com a colocação dos elementos de rugosidade, mostrados na figura 4.5, no piso da seção de trabalho. O valor obtido para o expoente p da equação (4.2) foi 0,23, que corresponde à categoria III da Norma Brasileira NBR-6123, ou seja, a um terreno plano ou ondulado com poucos obstáculos.

$$\frac{V(z)}{V_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^p \quad (4.2)$$

Onde:

- $V(z)$ velocidade média na altura z ;
- V_{ref} velocidade média de referência na altura z_{ref} ;
- z_{ref} cota de referência, tomada como 450mm a partir do piso do túnel (cota do topo do modelo utilizado);
- z cota vertical, medida a partir do piso do túnel;
- p expoente da curva de potência.



Figura 4.7 – Elementos de rugosidade para $p = 0,23$.

Ao fundo da figura 4.7, acima, podem ser percebidos os elementos geradores de turbulência, colocados na câmara de simuladores do túnel de vento para simulação da turbulência atmosférica. A intensidade da componente longitudinal da turbulência, no nível do topo do modelo, a 450mm do nível do piso do túnel de vento, é de aproximadamente 5,0%, para esta configuração de vento.

A figura 4.8 mostra o perfil vertical das velocidades médias para a configuração com expoente p igual a 0,23, apresentando em percentagem da velocidade média em relação à velocidade média na cota de referência (450mm), no eixo longitudinal do túnel, de acordo com a equação (4.2).

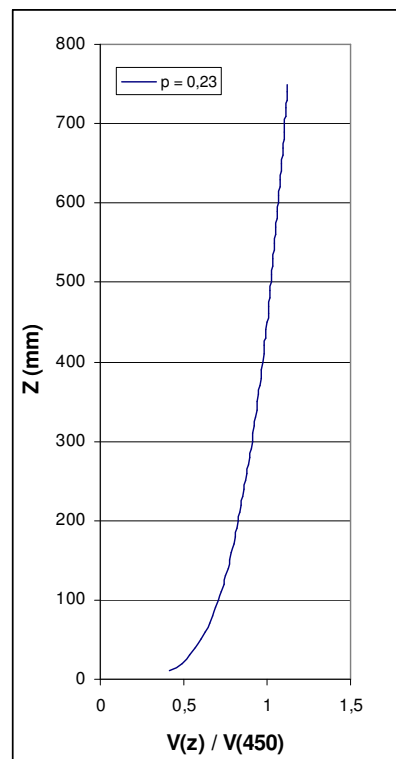


Figura 4.8 – Perfil vertical de velocidades médias para $p = 0,23$.

Como geralmente os edifícios altos são construídos em regiões com grande densidade de ocupação de terrenos e, portanto, grande rugosidade, foi ensaiada também uma segunda configuração de vento com a qual obtém-se um expoente p para a equação (4.2) de 0,34, que corresponde à categoria IV da Norma Brasileira NBR-6123. Na figura 4.9, estão apresentados os elementos de rugosidade colocados no piso da seção de

trabalho que levaram a obtenção desta configuração de perfil de velocidade do vento. Ainda ao fundo da mesma figura, é possível se notar os elementos geradores de turbulência utilizados para simulação da turbulência atmosférica nesta configuração de ensaios, sendo que a intensidade da componente longitudinal da turbulência, no nível do topo do modelo, é de aproximadamente 6,5%, para esta configuração de vento.

A figura 4.10 mostra o perfil vertical das velocidades médias para a configuração com expoente p igual a 0,34, apresentando em porcentagem da velocidade média em relação à velocidade média na cota de referência (450mm), no eixo longitudinal do túnel, de acordo com a equação (4.2).



Figura 4.9 – Elementos de rugosidade para $p = 0,34$.

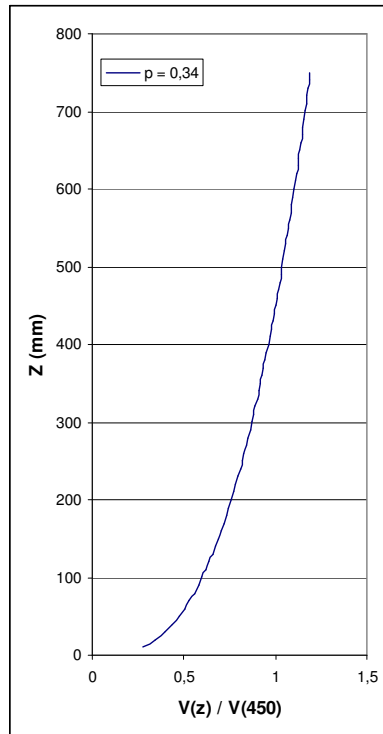


Figura 4.10 – Perfil vertical de velocidades médias para $p = 0,34$.

A terceira configuração de vento ensaiada foi a de vento suave, ou seja, sem o acréscimo de nenhuma rugosidade e nenhum elemento gerador de turbulência na seção de ensaio. Esta configuração de vento apresenta menores variações no perfil de velocidades ao longo da altura da seção do túnel de vento, bem como menor turbulência. Portanto, com esta configuração, devem-se obter maiores deslocamentos transversais ao escoamento devido ao efeito do desprendimento de vórtices. Esta configuração de vento foi ensaiada pois, segundo o que foi apurado na revisão bibliográfica realizada, os atenuadores dinâmicos sintonizados tendem a produzir sua maior eficiência na redução de deslocamentos quando a excitação atuante possui uma banda de frequências estreita, ou seja, com uma frequência de excitação bem definida, que é o caso da excitação por desprendimento de vórtices, como demonstrado anteriormente, em 2.1.1.3. A intensidade da componente longitudinal da turbulência no topo do modelo, para esta configuração, foi de aproximadamente 2,5%. A figura 4.11 apresenta a seção do túnel de vento sem nenhum elemento de rugosidade e nenhum elemento gerador de turbulência, para a configuração de vento suave.



Figura 4.11 – Configuração da seção do túnel de vento sem elementos de rugosidade para vento suave.

4.5 Modelos de atenuadores dinâmicos sintonizados utilizados

Os modelos dos atenuadores dinâmicos sintonizados utilizados nestes ensaios, fixados na chapa de topo do modelo do edifício alto “CAARC Standard Tall Building” estão apresentados anteriormente nas figuras 3.7 e 3.8, e suas características intrínsecas são:

- Atenuador A1:

- Massa de 23,75 g – portanto - $\mu = 3,91 \%$ – razão de massa;
- Frequência natural de 7,9 Hz – portanto - $\Omega = 1,05$ – razão de sintonia de frequências;
- Razão de amortecimento crítico - $\zeta_a = 3,51 \%$.

- Atenuador A2:

- Massa de 28,95 g – portanto - $\mu = 4,77 \%$ – razão de massa;
- Frequência natural de 8,2 Hz – portanto - $\Omega = 1,09$ – razão de sintonia de frequências;
- Razão de amortecimento crítico - $\zeta_a = 5,23 \%$.

Para a obtenção da massa dos modelos dos atenuadores, foi utilizada uma balança de precisão. A determinação da frequência natural de oscilação e do amortecimento intrínseco dos atenuadores foi realizada através de sua instrumentação com acelerômetros biaxiais modelo ADXL202E da Analog Devices, instalados na extremidade dos modelos dos amortecedores, sendo que estes estavam fixados as chapas de topo do modelo do edifício “CAARC Standard Tall Building”, conforme ilustra a figura 4.12. Para não acrescentar rigidez ao modelo foram utilizados fios de cobre esmaltados de 0,2 mm para realizar as conexões entre os acelerômetros e os cabos.

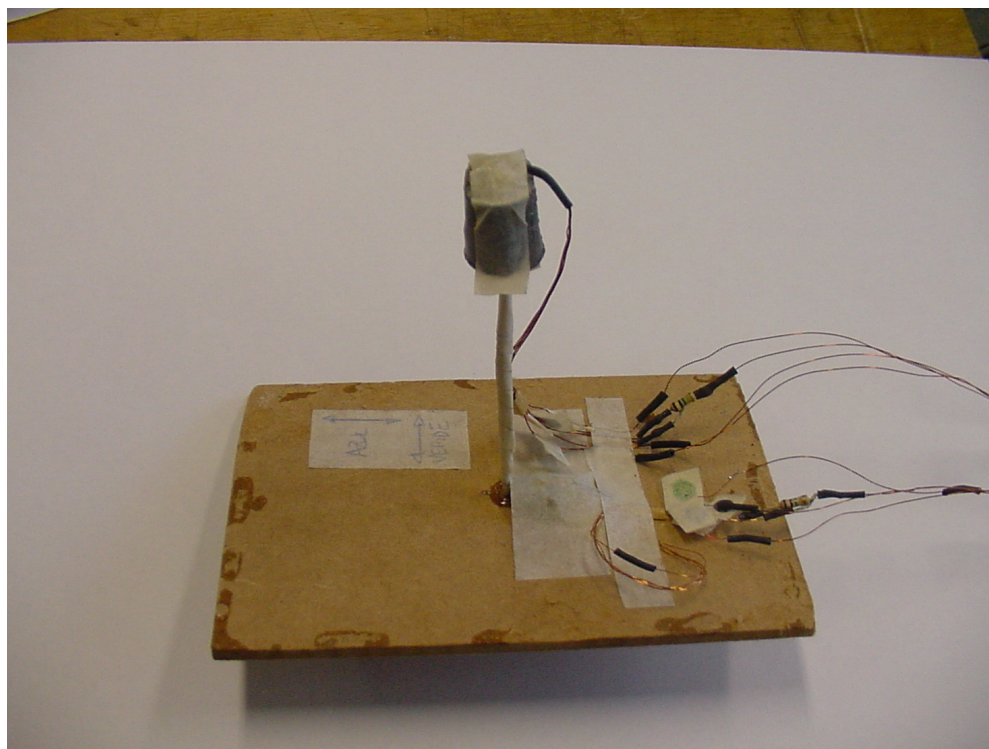


Figura 4.12 – Acelerômetros instalados no modelo de atenuador dinâmico sintonizado.

O condicionamento de sinal foi implementado para adequar os sinais dos acelerômetros, que variam entre 0 e 5 volts para acelerações de $\pm 2g$, à faixa de

medição da placa de aquisição que é de $\pm 5V$. Para isto, foi utilizado um amplificador projetado e construído no próprio Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sendo este amplificador apresentado na figura 4.13 a seguir.

Para a aquisição de dados foi utilizado um computador com duas placas de aquisição de 16 canais cada, comandadas pelo *software* HPVVEE. Os dados adquiridos em ensaios de vibração livre foram então tratados em programas computacionais desenvolvidos pelo Professor Marcelo Maia Rocha, no programa comercial MatLab, que tinham por finalidade transformar o registro obtido para determinar-se o amortecimento crítico dos modelos, conforme processo descrito anteriormente no item 4.3, e ainda obter o espectro de potência do registro de sinal obtido nos ensaios, para obter-se então a frequência natural de vibração dos modelos de amortecedores.

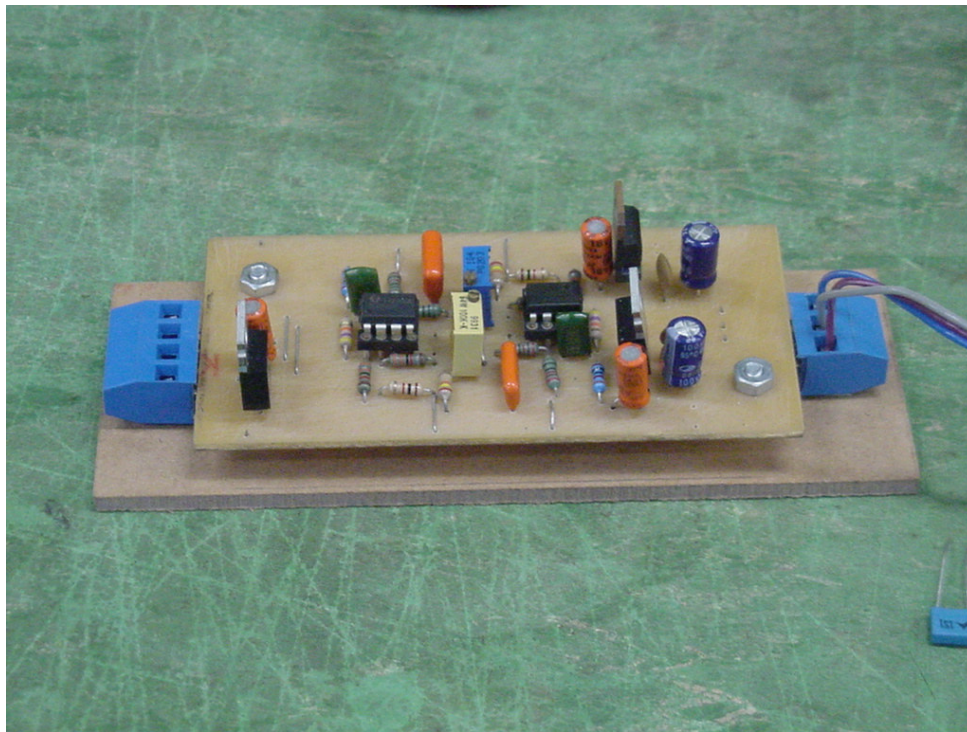


Figura 4.13 – Amplificador utilizado nos ensaios de vibração livre dos modelos de atenuadores dinâmicos sintonizados.

4.6 Desenvolvimento dos ensaios

Foram, então, realizados ensaios com três modelos diferentes entre si (um sem nenhum sistema de atenuador dinâmico sintonizado instalado e dois outros com um

modelo de atenuador diferente instalado em cada um destes). Para cada modelo, foram ensaiados os três tipos de vento descritos em 4.4, sendo que, para cada uma destas situações, fora ensaiadas duas posições diferentes do modelo em relação à direção do vento. Na primeira, neste trabalho referenciada como vento a 0° , a face de maior área foi posicionada de modo a formar um ângulo reto com a direção do escoamento, ou seja, com o eixo Y paralelo ao vento. Nesta posição, as dimensões do modelo e da seção de trabalho implicaram numa razão de bloqueio de 4,33%. Na segunda posição, referenciada como vento a 90° , a face de menor área foi posicionada perpendicularmente a direção do escoamento, ou seja, com o eixo X paralelo ao vento. Isso levou a uma razão de bloqueio de 2,88%. Segundo Isyumov (1982) são necessárias correções nos resultados obtidos se a razão de bloqueio da seção do túnel ultrapassar 5%, o que não aconteceu. A figura 4.14 mostra, esquematicamente, as posições dos ensaios.

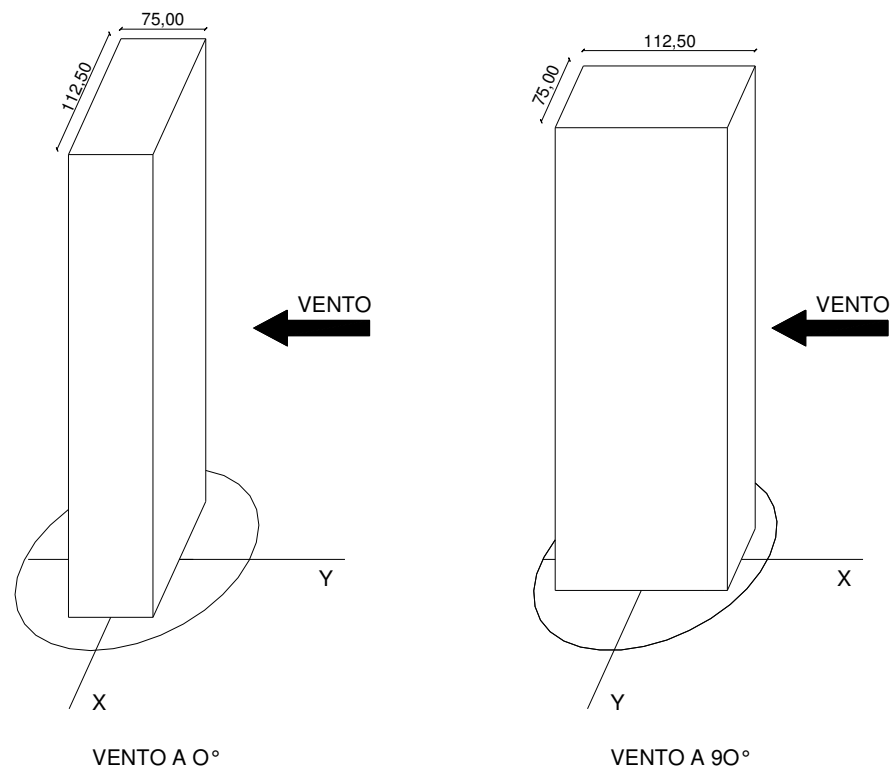


Figura 4.14 – Posições do modelo durante os ensaios.

Com o modelo devidamente instrumentado e posicionado sobre a mesa M-II, deu-se início aos ensaios. Foram testadas, para cada uma das situações de modelagem (que perfizeram um total de 18 – três modelos com três tipos de vento e duas direções de ensaio), uma gama de velocidades de vento variando, em média entre 1,8 a 12,5 m/s dentro do túnel.

Na aquisição dos dados, feita como descrito anteriormente, no item 4.2, foi utilizada uma taxa de 1024 pontos por segundo, e intervalos de leitura de 64s. Os arquivos de dados, gravados pelo programa de aquisição, foram submetidos a rotinas desenvolvidas pelo Professor Marcelo Maia Rocha, no programa MatLab, com os seguintes objetivos:

- transformar o registro do sinal elétrico no tempo gravado na variação da aceleração do centro sísmico de cada acelerômetro no tempo, como mencionado anteriormente no item 4.3;
- com base no registro temporal da aceleração do centro sísmico de cada acelerômetro, determinar a variação da aceleração do topo do modelo em função do tempo;
- integrar, uma vez a curva da aceleração no topo do modelo em função do tempo para chegar a variação da velocidade, em torno da média, no topo do modelo no tempo, e duas vezes para definir o registro temporal flutuante do deslocamento no topo do prédio.

A relação entre a aceleração do centro sísmico de cada acelerômetro e a aceleração do topo do modelo foi definida com base no fato de que os movimentos que o conjunto realiza em torno dos eixos são circulares, portanto as trajetórias descritas pelos acelerômetros e pelo topo do modelo são concêntricas. Então, é válido utilizar a equação (4.3), que relaciona essas acelerações em função da razão entre os raios de suas trajetórias. A figura 4.15 mostra esquematicamente o que foi explicado.

$$a_t = \frac{(R_t - 14,25)}{R_a \cdot \cos \alpha} \times a_a \quad (4.3)$$

Onde:

- a_t aceleração do topo do modelo;
- a_a aceleração do centro sísmico do acelerômetro;
- R_t distância do topo do modelo ao centro do eixo em mm;
- R_a distância do centro sísmico do acelerômetro ao centro do eixo em mm.

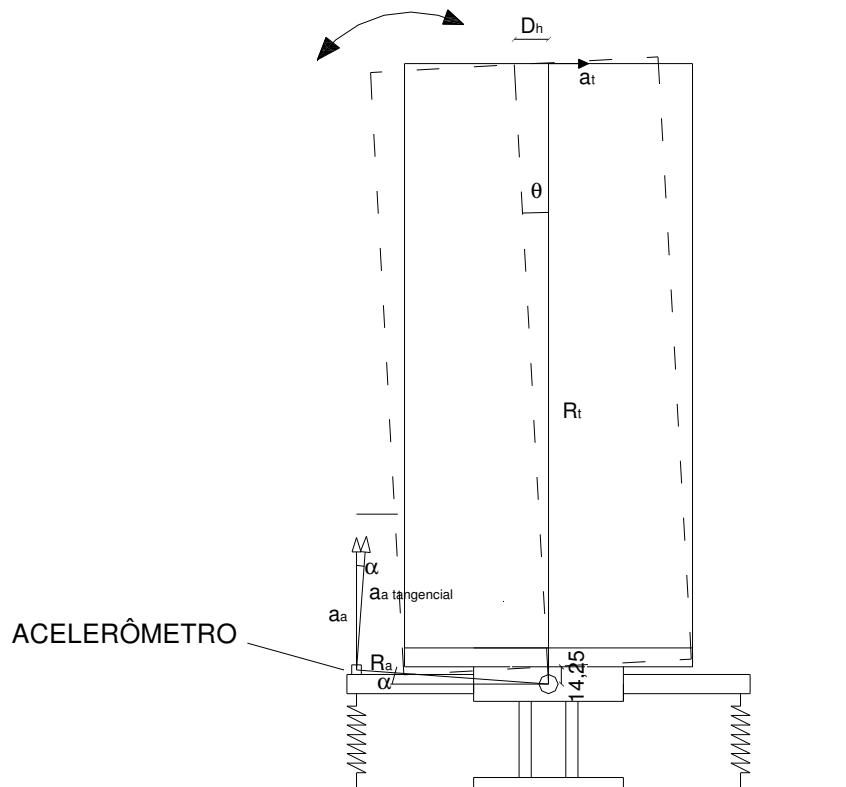


Figura 4.15 – Relação entre as trajetórias do topo e dos acelerômetros. Fonte: Oliveira (2003).

Na base para ensaios aeroelásticos utilizada neste presente trabalho, com o procedimento para fixação de modelos, a parte inferior do modelo fica presa ao topo do prisma quadrado do suporte flexível, ficando 14,25mm acima dos eixos de rotação. Na equação (4.3) esse valor foi subtraído da distância do topo do modelo ao eixo de rotação, ficando, desta forma, a aceleração na parte superior do modelo, e demais grandezas dela dependentes, determinadas como se os eixos estivessem alinhados com a base do modelo.

O deslocamento obtido na segunda integração da aceleração do topo é um arco de circunferência. A parcela horizontal do deslocamento na parte superior do modelo é determinada por simples relações trigonométricas, como mostrado na figura 4.16.

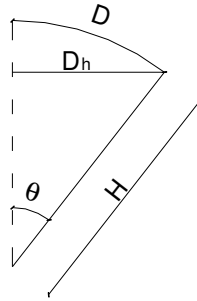


Figura 4.16 – Determinação da parcela horizontal do deslocamento no topo do modelo.
Fonte: Oliveira (2003).

$$\theta = \frac{D}{H} \quad (4.4)$$

$$D_h = H \times \text{sen} \theta \quad (4.5)$$

5 Análise dos resultados obtidos

5.1 Modelo sem atenuador dinâmico sintonizado instalado

Os dados adquiridos nos ensaios foram processados e tratados para poderem ser apresentados na forma de gráficos. Com os resultados obtidos para o modelo sem nenhum atenuador dinâmico instalado, foi feita uma comparação dos resultados com os atingidos por Melbourne (1980), Thepmongkorn, Kwok e Lakshmanan (1999) e Oliveira (2003), para o mesmo prédio, para verificar-se a validade destes dados obtidos.

Foram comparados os resultados obtidos nos ensaios com os ventos que tiveram perfil vertical de velocidades com expoentes p da lei potencial iguais a 0,23 e a 0,34. Comparou-se os deslocamentos horizontais rms, nas direções longitudinal e transversal ao vento incidente, nas duas posições de ensaio, ou seja, com vento incidindo a 0° e a 90° , conforme definido no item 4.6. O termo rms, do inglês “root mean square”, refere-se à média quadrática, que é a raiz quadrada positiva do valor quadrático médio. Neste estudo, como são estudadas apenas as flutuações em torno da média das grandezas analisadas, a média quadrática coincide com o desvio padrão.

Nos trabalhos que estão sendo utilizado como base de comparação, o vento simulado tinha perfil vertical de velocidades com expoente p da lei potencial diferentes dos utilizados neste trabalho. Melbourne (1980) utilizou um vento simulado com p igual a 0,28, ao passo que Thepmongkorn, Kwok e Lakshmanan (1999) usaram 0,15, e Oliveira (2003) usou 0,19. Quanto à intensidade de turbulência longitudinal no topo do modelo, Melbourne (1980) e Thepmongkorn, Kwok e Lakshmanan (1999) utilizaram 10%, enquanto Oliveira (2003) utilizou 4,6%. Neste trabalho, foi utilizado 5,0% para o perfil de velocidades com expoente p igual a 0,23 e 6,5% para o de 0,34.

No Anexo I deste presente trabalho, são apresentadas as planilhas contendo os resultados para cada ensaio realizado, incluindo os ensaios nos modelos com os atenuadores dinâmicos sintonizados instalados. Nestas planilhas, é apresentado, para cada ensaio, a velocidade média, velocidade reduzida, que é igual à velocidade média do ensaio dividida pelo produto da frequência do modelo pela maior dimensão horizontal deste, acelerações tangenciais máxima e rms no topo do modelo,

deslocamentos horizontais máximo e rms no topo do modelo, e o deslocamento horizontal rms no topo do modelo normalizado pela dimensão do modelo na direção em que ocorre o deslocamento.

A seguir são mostrados os gráficos com a comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os de Melbourne (1980), e Thepmongkorn, Kwok e Lakshmanan (1999), este último com a utilização da base BHA e de outra do tipo “stick”, e o trabalho de Oliveira (2003). Os gráficos apresentam o deslocamento horizontal rms no eixo das ordenadas e a velocidade reduzida no eixo das abscissas.

As figuras 5.1 e 5.2 mostram as respostas rms longitudinal e transversal do modelo, respectivamente, para vento incidindo perpendicularmente à face mais larga do modelo, ou seja, vento a 0° . Pode-se notar, na figura 5.2, um pico na resposta rms próximo à velocidade reduzida 11, e ele pode ser atribuído à ressonância no desprendimento de vórtices. Este pico é coerente com o obtido por Thepmongkorn, Kwok e Lakshmanan (1999), na velocidade reduzida 9,5, e por Oliveira (2003), na velocidade reduzida 10. Como para intensidades de turbulência longitudinal mais altas, os deslocamentos provocados por desprendimento de vórtices tendem a ser menores. Pode-se explicar os deslocamentos mais acentuados nestes picos da curva rms encontrados neste presente trabalho e no de Oliveira (2003), quando comparados com os resultados encontrados por Thepmongkorn, Kwok e Lakshmanan (1999), observando-se que o pico da resposta rms obtido neste trabalho para perfil com expoente p 0,23 foi mais acentuado que o encontrado para o perfil com expoente 0,34, como era esperado. Aplicando-se no modelo ensaiado o critério de Strouhal para cálculo da velocidade crítica de desprendimento de vórtices, equação (2.2), chega-se ao valor de velocidade reduzida 11. Nestes gráficos, as curvas observadas encontram-se com boa coerência com as dos demais trabalhos, apresentando inclinações similares.

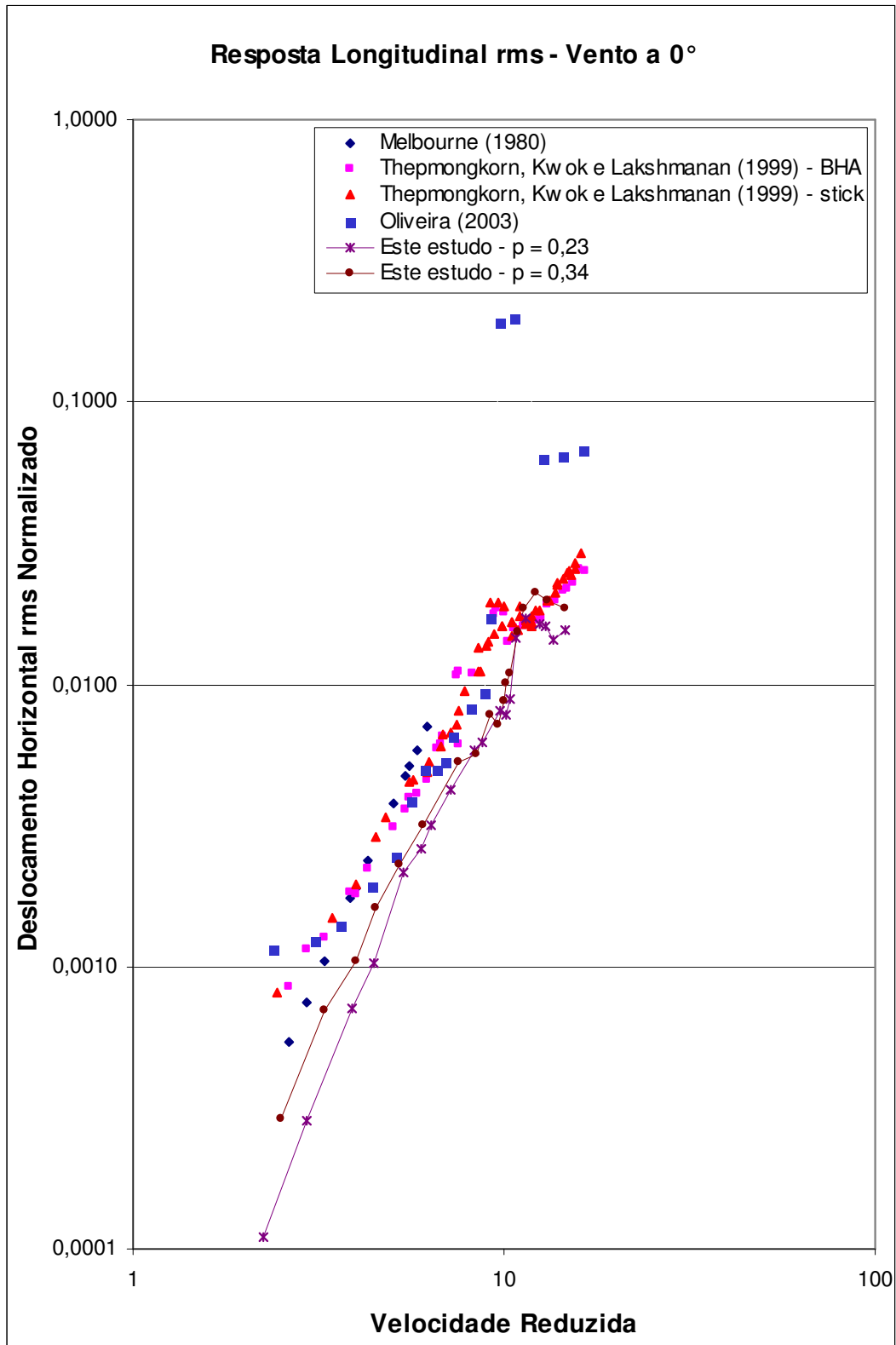


Figura 5.1 – Resposta longitudinal rms para vento a 0°.

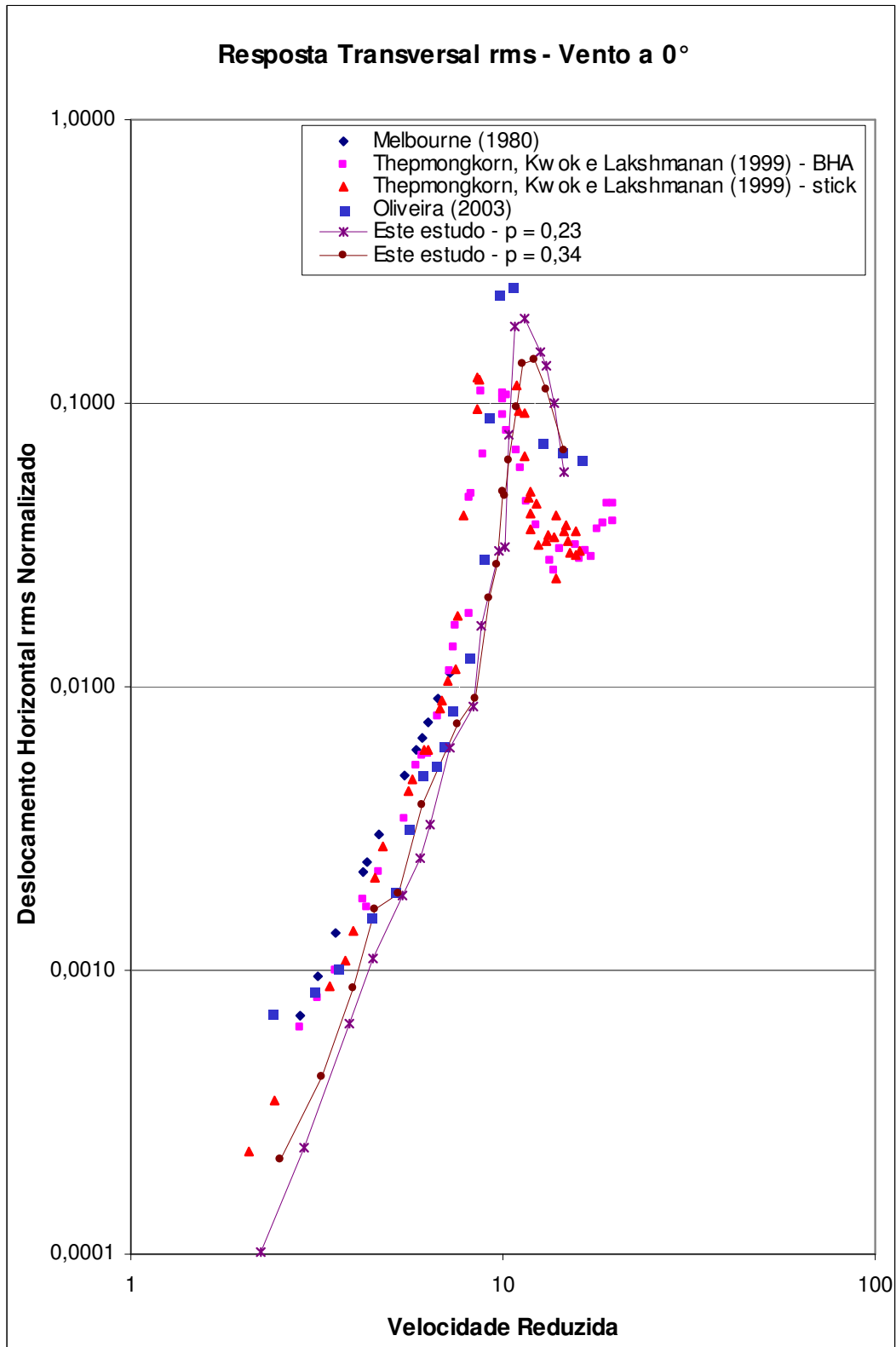


Figura 5.2 – Resposta transversal rms para vento a 0°.

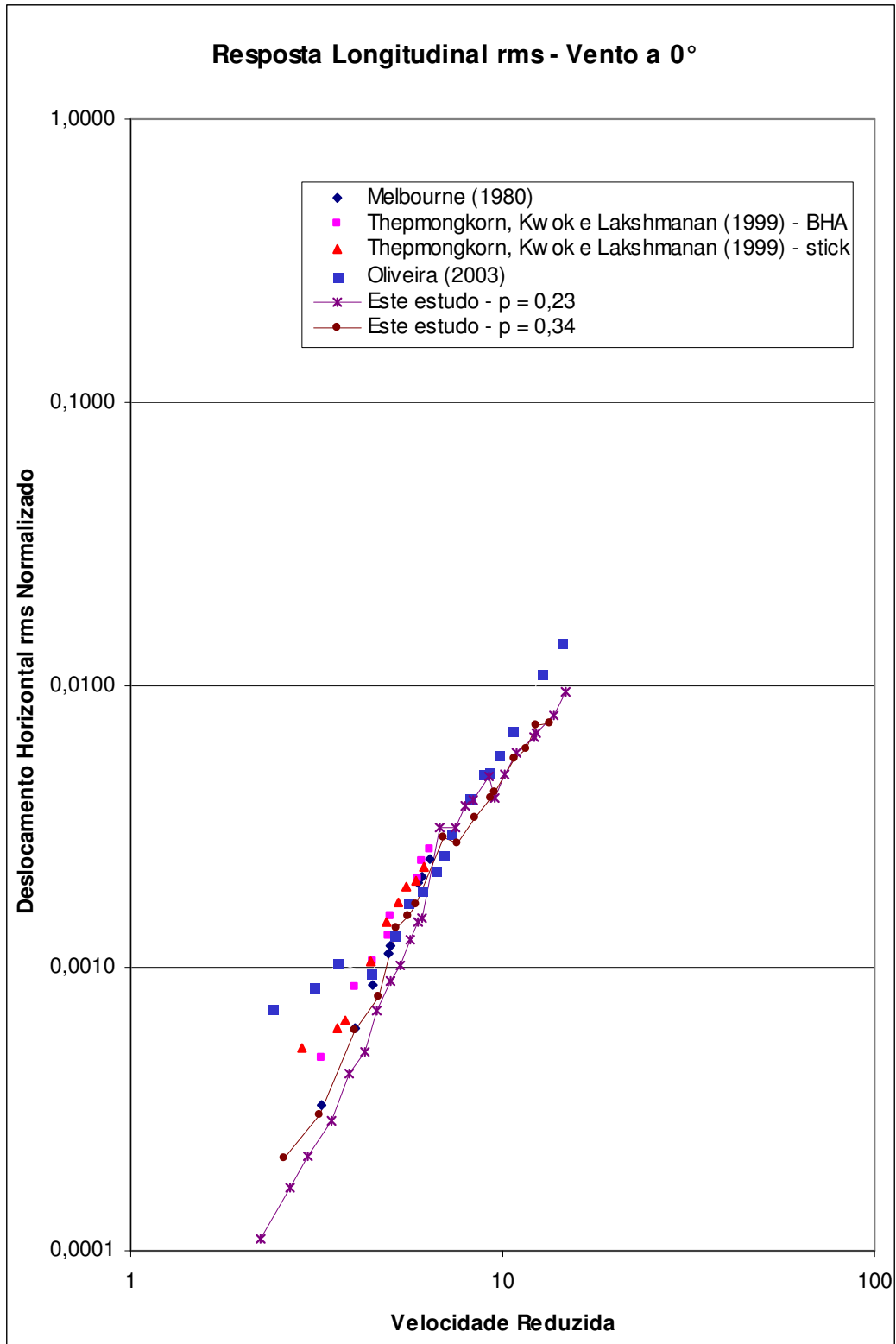


Figura 5.3 – Resposta longitudinal rms para vento a 90°.

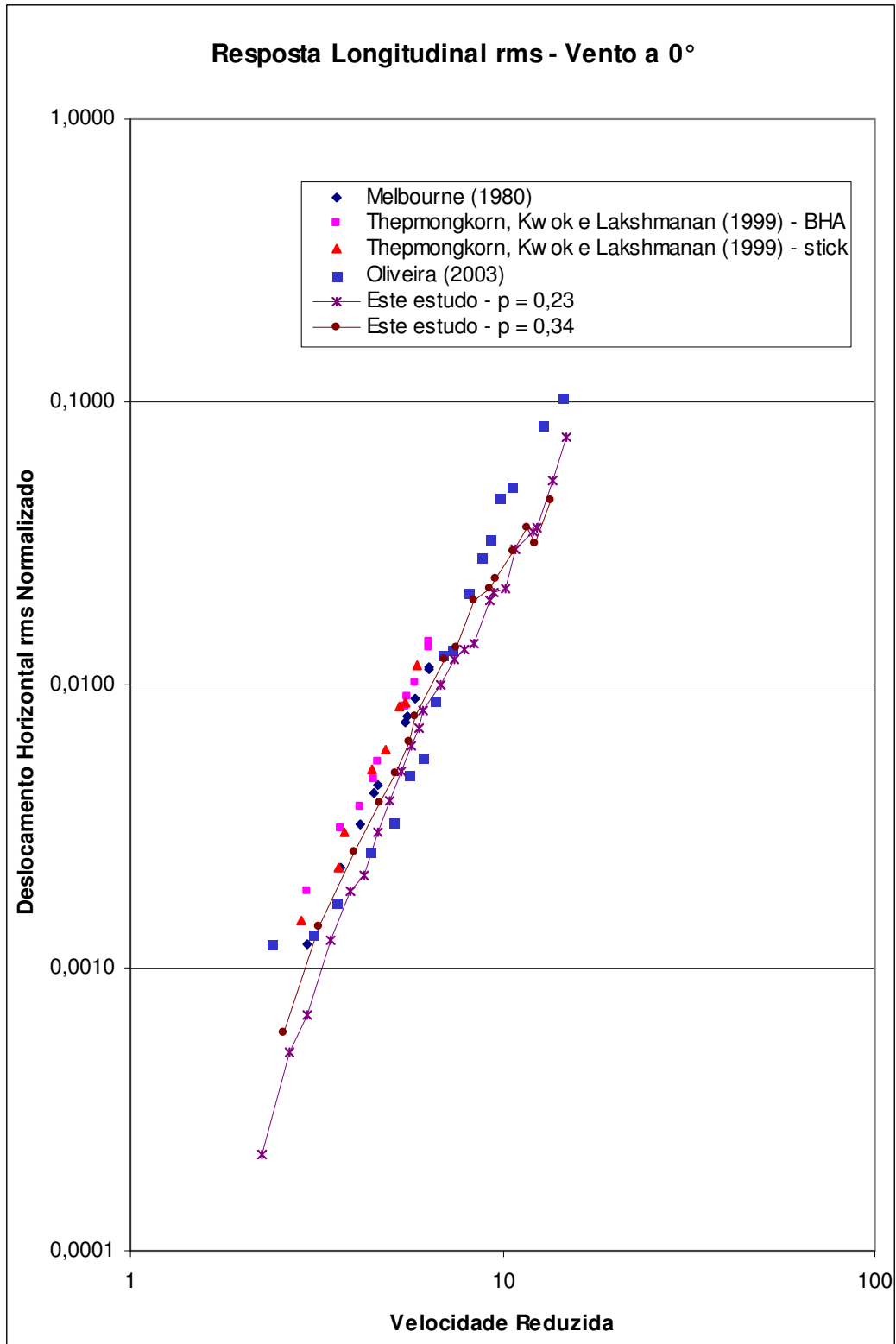


Figura 5.4 – Resposta transversal rms para vento a 90°.

Para o vento incidindo na direção normal à face mais estreita do modelo, ou seja, vento a 90° , as respostas rms longitudinal e transversal são mostradas pelas figuras 5.3 e 5.4, respectivamente. Os resultados obtidos neste trabalho para estas direções também são coerentes com os obtidos nos outros estudos apresentados.

5.2 Comparações entre modelos com e sem atenuadores instalados

Para verificarem-se os efeitos da instalação de um sistema de atenuador dinâmico sintonizado no modelo de edifício alto proposto, foram construídos gráficos apresentando os deslocamentos horizontais rms no eixo das abscissas e as respectivas velocidades reduzidas no eixo das ordenadas, assim como nas comparações estabelecidas no item 5.1. Porém, agora são compilados, separadamente, os resultados obtidos para os três tipos de vento ensaiados, estabelecendo, para cada uma das respostas para um mesmo vento, uma comparação entre os resultados obtidos nos modelos com os atenuadores A1 e A2 instalados e os resultados obtidos no modelo sem nenhum atenuador instalado. As figuras 5.5 até a 5.16 mostram estes gráficos.

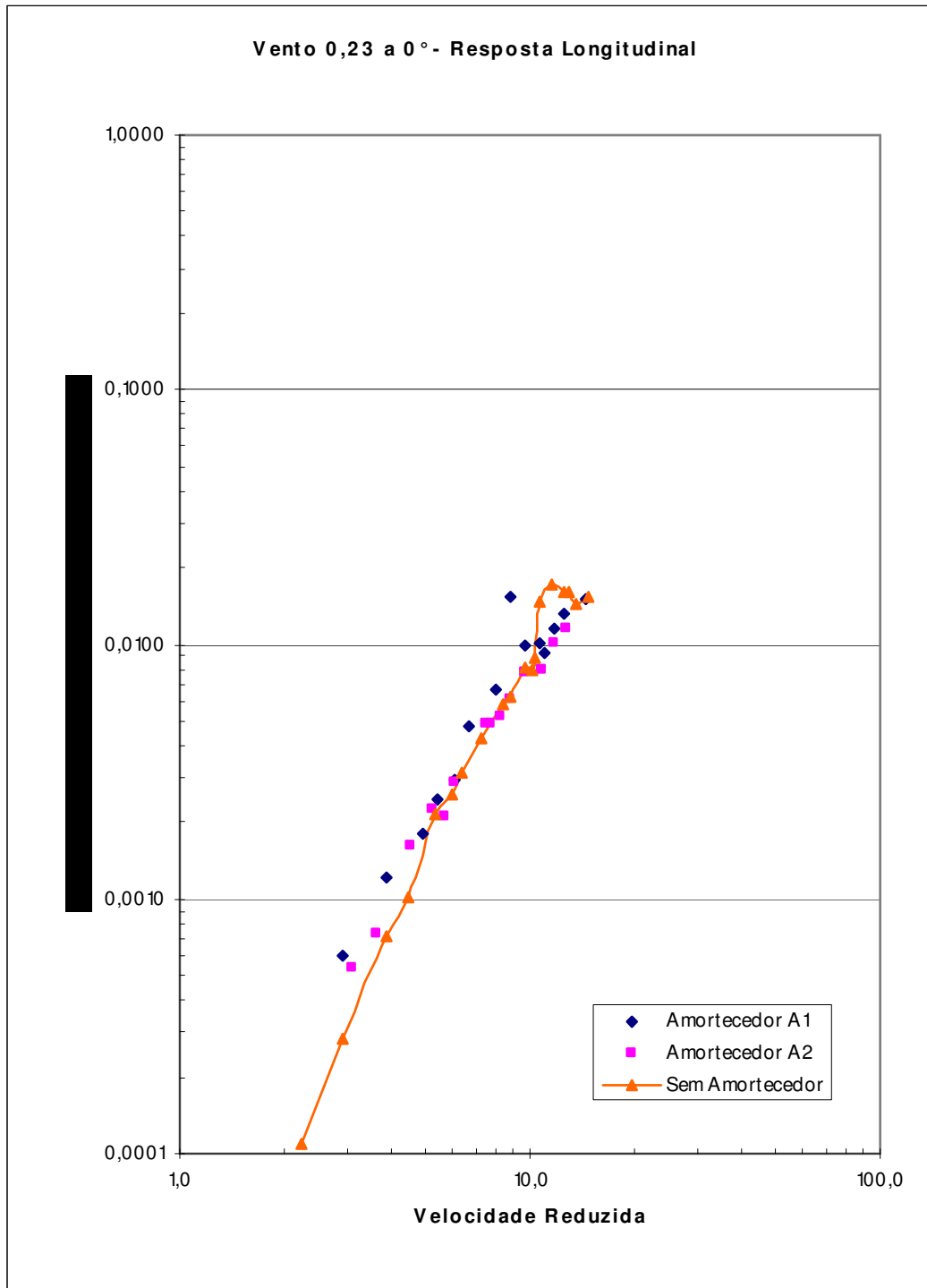


Figura 5.5 – Resposta longitudinal rms para vento 0,23 a 0°.

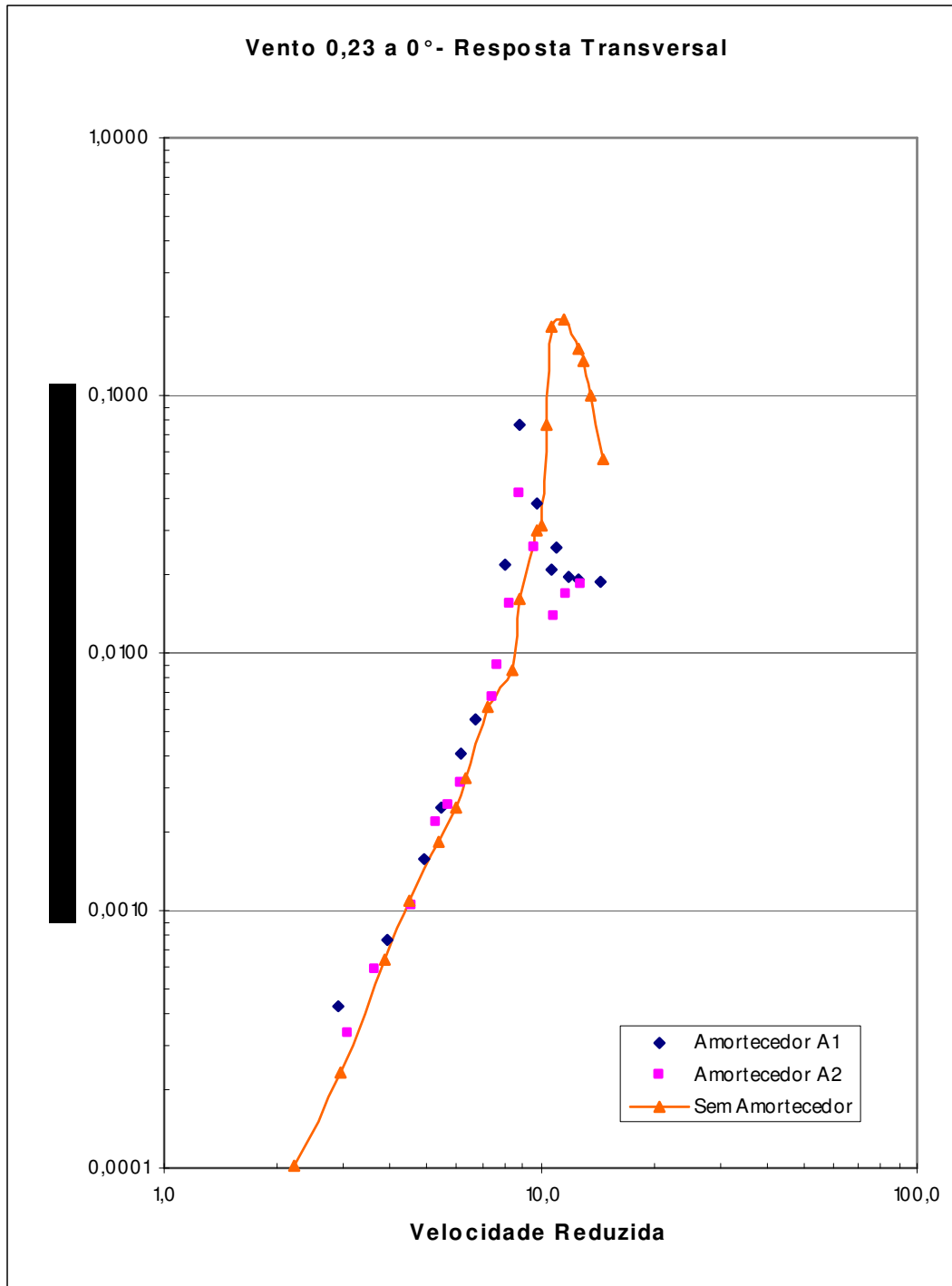


Figura 5.6 – Resposta transversal rms para vento 0,23 a 0°.

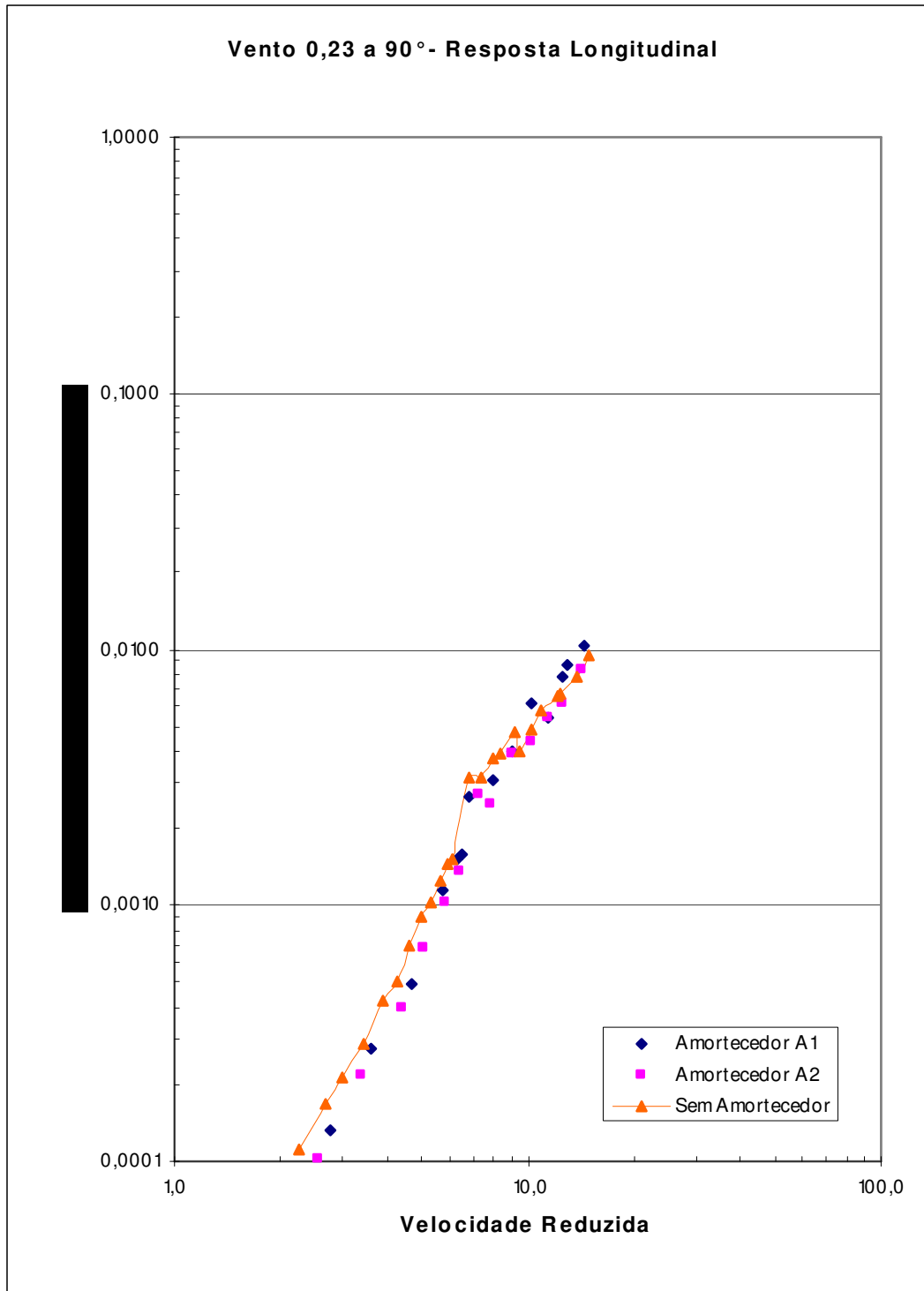


Figura 5.7 – Resposta longitudinal rms para vento 0,23 a 90°.

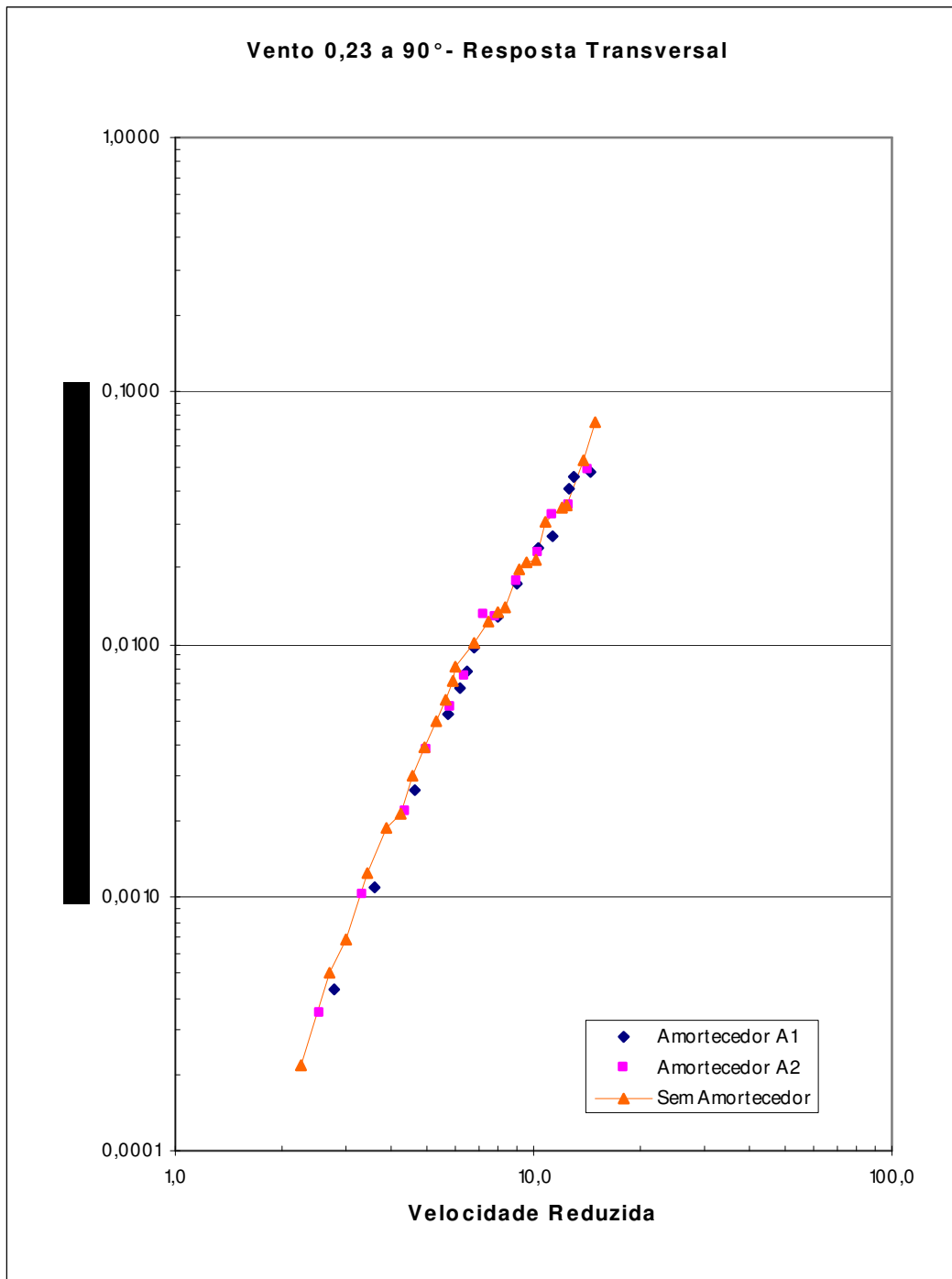


Figura 5.8 – Resposta transversal rms para vento 0,23 a 90°.

Nas figuras 5.5 a 5.8, são apresentadas as respostas dos modelos ensaiados para o vento com perfil vertical de velocidades com expoente da lei potencial p igual a 0,23. Nesta situação, são notadas pequenas reduções de deslocamentos máximos e rms nas respostas longitudinais com incidência de vento a 0° ou 90°, tendo-se um fator de

redução de deslocamentos (divisão do deslocamento observado na estrutura com atenuador pelo observado na estrutura sem atenuador) máximo de 0,87 para o atenuador A1, e de 0,74 para o atenuador A2. Na figura 5.6, que mostra os resultados obtidos para deslocamentos transversais rms para vento incidindo a 0° , pode-se perceber o pico de deslocamento provocado pela ação do desprendimento de vórtices em todos os modelos ensaiados. Porém nota-se que, nos modelos equipados com atenuadores dinâmicos sintonizados, este pico de deslocamento é bem inferior ao obtido no modelo sem atenuadores instalados.

Pode-se perceber ainda que os picos de deslocamentos observados nos atenuadores estão deslocados em relação ao pico do modelo sem atenuador, ocorrendo, portanto, em uma velocidade reduzida menor. O provável motivo deste deslocamento do ponto de ressonância por desprendimento de vórtices é que, ao adicionar-se o atenuador ao sistema do edifício ensaiado, as suas características intrínsecas foram alteradas, pois o atenuador dinâmico sintonizado constituiu-se em uma “massa extra” colocada no topo da edificação, o que acaba por baixar a frequência natural de oscilação da edificação.

É possível perceber, por estes gráficos, que o atenuador dinâmico sintonizado tem sua maior eficácia quando a excitação atuante tem uma frequência bem definida, ou seja, para excitações de banda estreita, como ocorre quando há ressonância por desprendimento de vórtices, sendo que, neste caso, o fator de redução de deslocamentos obtido foi de 0,39 para o atenuador A1 e de 0,23 para o atenuador A2.

No Anexo I, as tabelas A.1 até A.12 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios para o vento com expoente da lei potencial igual a 0,23. Nestas tabelas, estão também expostas as acelerações no topo do modelo, além dos deslocamentos no topo do modelo. Enquanto os deslocamentos de uma estrutura são de fundamental importância para a integridade dos elementos frágeis de uma edificação, tais quais aberturas, vidros e revestimentos, além da própria segurança estrutural, as acelerações são importantes, pois o conforto dos usuários da edificação depende da manutenção de baixas acelerações associadas às vibrações que este venha a sofrer, uma vez que a sensibilidade humana a vibrações está diretamente ligada com a intensidade de acelerações que essas vibrações produzem sobre o corpo humano.

Quanto às acelerações, as maiores acelerações máximas e rms também são verificadas quando ocorre ressonância por desprendimento de vórtices. Neste caso, o fator de redução da aceleração verificado para aceleração rms foi de 0,31 para o atenuador A1 e de 0,17 para o atenuador A2. Por estes resultados, pode-se notar que o atenuador dinâmico sintonizado possui grande capacidade de controle de acelerações para situações de ressonância, sendo, inclusive, superior a eficiência no controle dos deslocamentos. Estes resultados obtidos confirmam a eficiência do sistema de atenuadores dinâmicos sintonizados no controle de vibrações provocadas por desprendimento de vórtices.

As figuras 5.9 até a 5.12 reproduzem os resultados obtidos nos ensaios com o vento com expoente da lei potencial igual a 0,34. Nestes resultados obtidos, fica mais destacada ainda a eficiência dos atenuadores dinâmicos sintonizados, podendo-se perceber claramente, pelos gráficos, as reduções de deslocamentos obtidas. Fica clara, também, a maior eficiência do atenuador A2, quando comparado ao atenuador A1, na redução dos efeitos da vibração provocada pela ação do vento sobre a edificação, uma vez que os deslocamentos rms obtidos para o modelo com o atenuador A2 instalado são nitidamente inferiores aos deslocamentos rms obtidos para o modelo com o atenuador A1 instalado, para as mesmas condições de excitação. Esta maior eficiência do atenuador A2 está de acordo com o que foi levantado na revisão bibliográfica, uma vez que, devido as suas características, era esperada uma maior eficiência deste amortecedor sobre o atenuador A1, especialmente pela sua razão de massa e razão de amortecimento crítico serem um pouco superiores, quando em comparação com o atenuador A1.

Para a resposta transversal ao deslocamento do vento, com o ângulo de incidência do vento de 0° , situação esta na qual ocorre o fenômeno de ressonância na vibração provocada por desprendimento de vórtices, nestes ensaios chegou-se a um fator de redução de deslocamentos de 0,24 para o atenuador A1 e de 0,18 para o atenuador A2. Estas reduções foram obtidas para os picos de ressonância em cada situação quando comparada com o pico obtido para o modelo sem nenhum atenuador instalado. Na mesma situação, os fatores de redução de aceleração foram de 0,135 para o atenuador A1 e de 0,093 para o atenuador A2, novamente comprovando a grande eficiência dos atenuadores para o conforto de usuários em situações de ressonância.

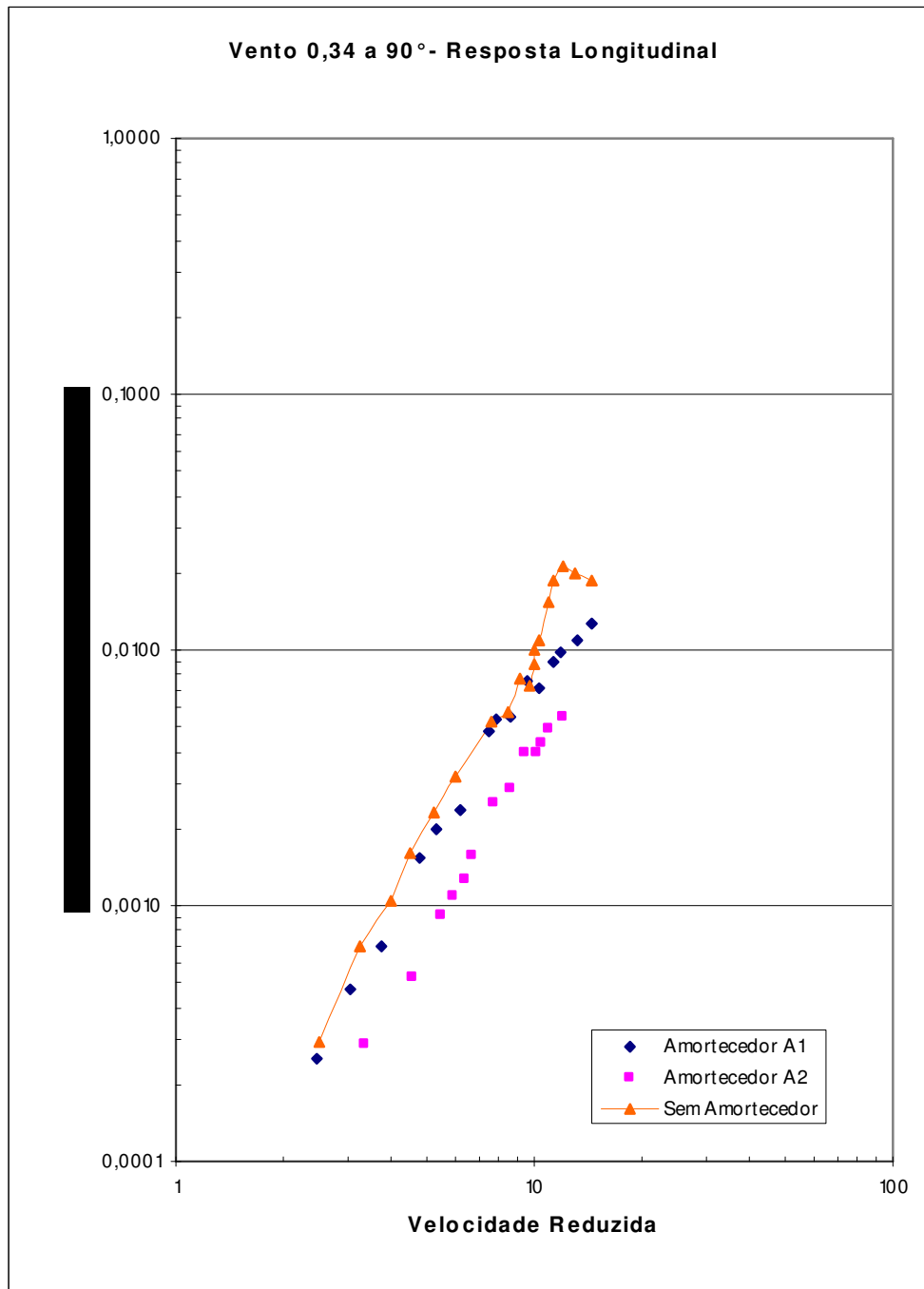


Figura 5.9 – Resposta longitudinal rms para vento 0,34 a 0°.

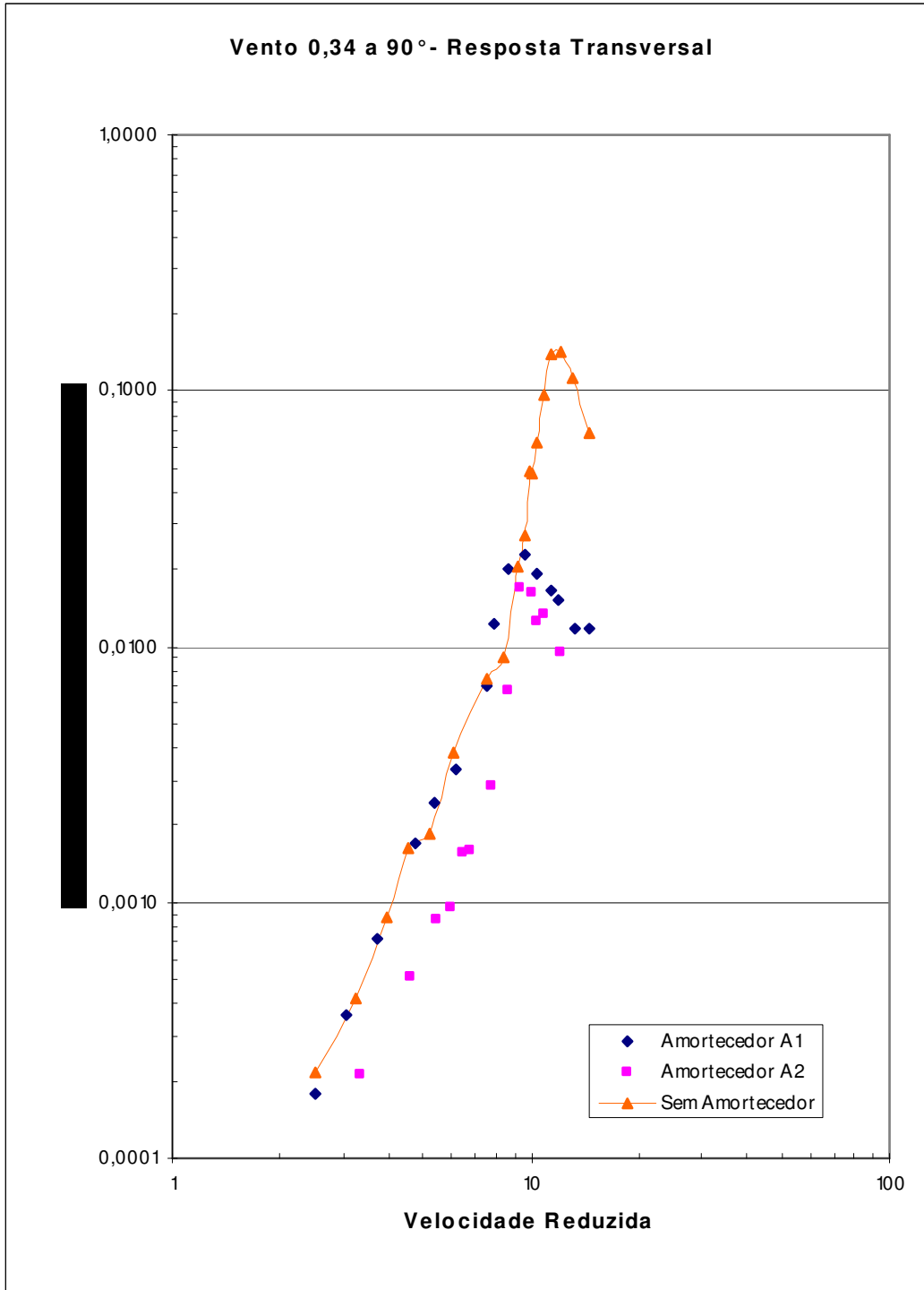


Figura 5.10 – Resposta transversal rms para vento 0,34 a 0°.

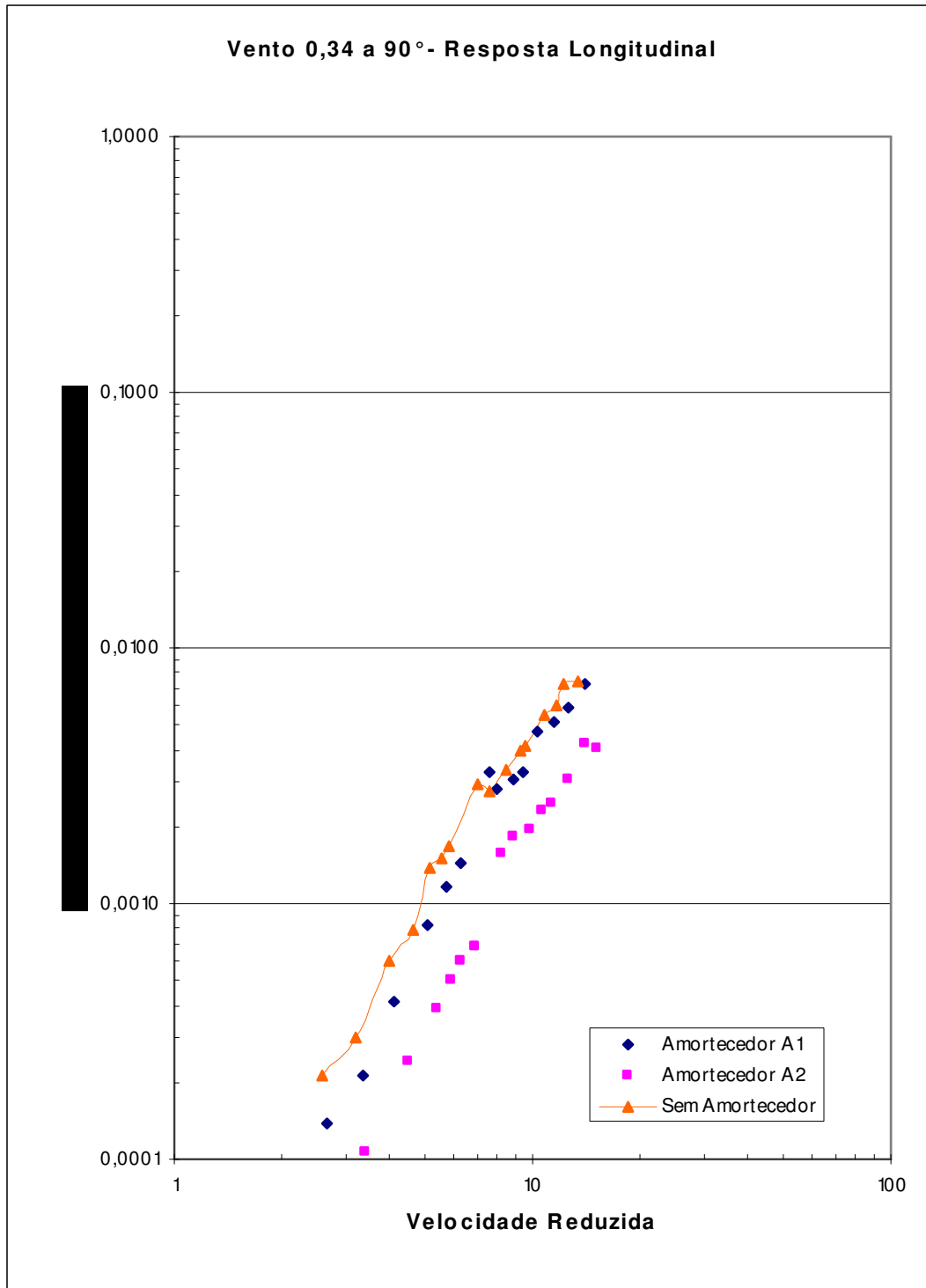


Figura 5.11 – Resposta longitudinal rms para vento 0,34 a 90°.

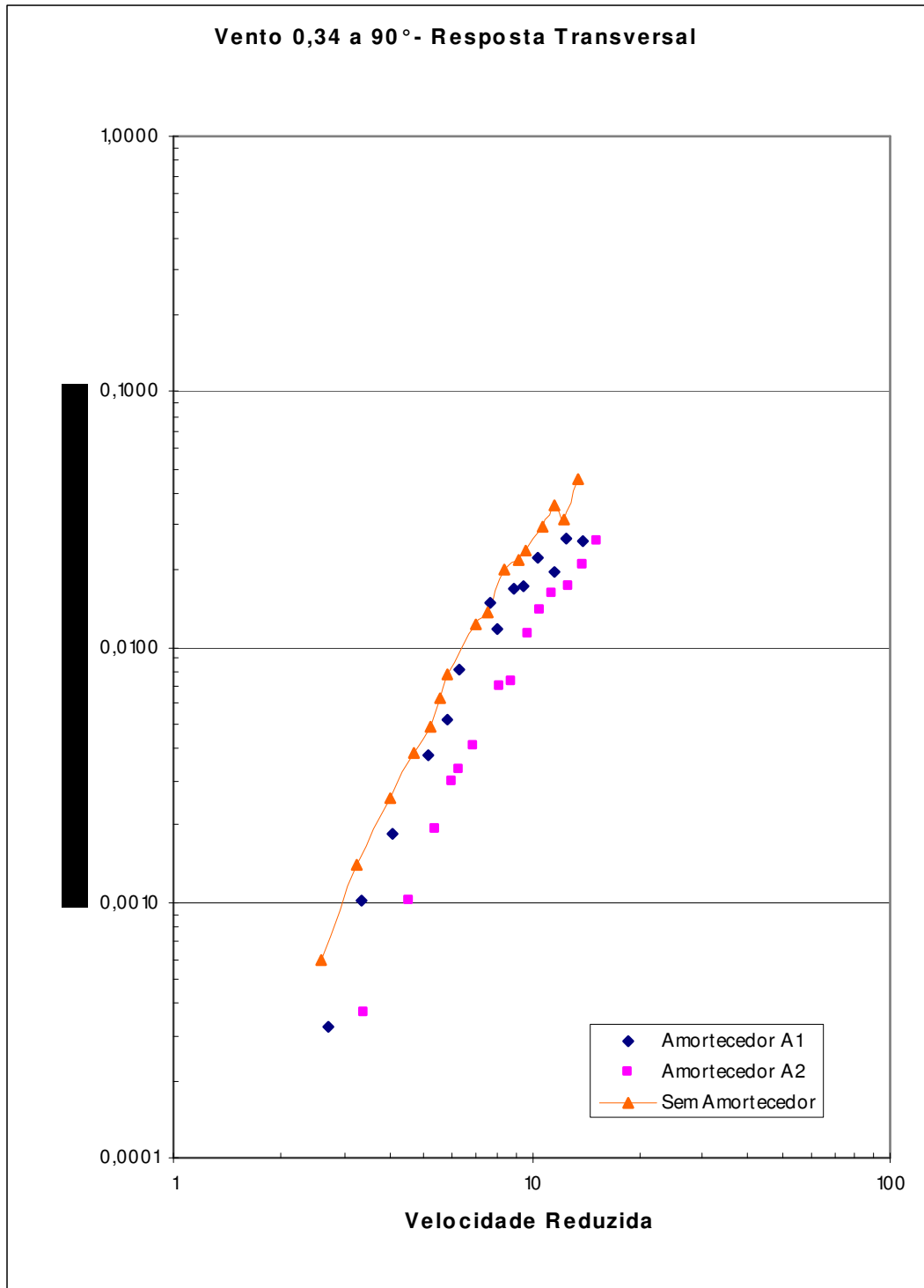


Figura 5.12 – Resposta transversal rms para vento 0,34 a 90°.

Finalmente, as figuras 5.13 até a 5.16 apresentam as comparações entre os modelos para o vento tipo suave anteriormente descrito. Para esta configuração de

vento, foram percebidas as maiores amplitudes de oscilações transversais à direção do vento no modelo sem atenuadores instalados, para um ângulo de incidência do vento igual a 0° , ou seja, na situação favorável ao surgimento de ressonância por desprendimento de vórtices, como pode ser notado na tabela A.28 do Anexo I. Estas grandes amplitudes eram esperadas, devido a menor turbulência associada ao escoamento tipo suave, o que leva a uma menor variação no perfil de velocidades (menor variação da velocidade do escoamento com a variação da altura em relação ao nível do piso do túnel), o que torna a correlação do desprendimento de vórtices ao longo da altura do modelo mais uniforme, aumentando, portanto, a magnitude da excitação quando em ressonância.

Também nestas figuras é possível notar a redução dos deslocamentos rms para os modelos com atenuadores instalados, especialmente para a situação de incidência de vento a 0° , sendo que a redução para os deslocamentos transversais ao escoamento na situação de ressonância fica muito bem definida, com o pico de deslocamentos para os modelos com atenuadores, devido ao efeito da velocidade crítica de desprendimento de vórtices, bastante atenuado. Nesta situação, foram verificados os maiores fatores de redução nos deslocamentos rms, sendo de 0,056 para o atenuador A1 e de 0,027 para o atenuador A2. Nas acelerações, o fator de redução máximo obtido na situação de ressonância por desprendimento de vórtices foi de 0,048 para o modelo com atenuador A1 e de 0,026 para o modelo com atenuador A2 instalado.

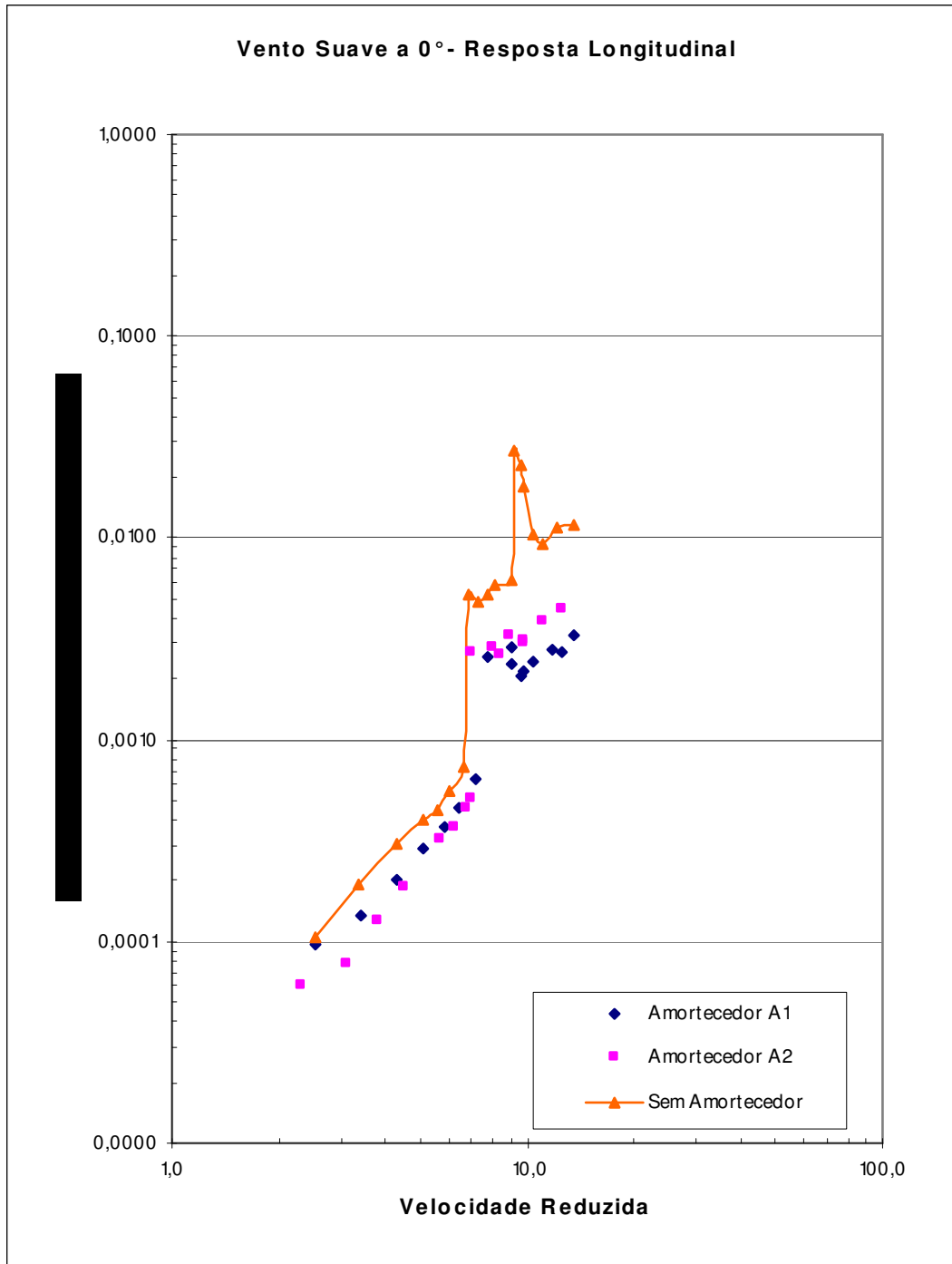


Figura 5.13 – Resposta longitudinal rms para vento suave a 0°.

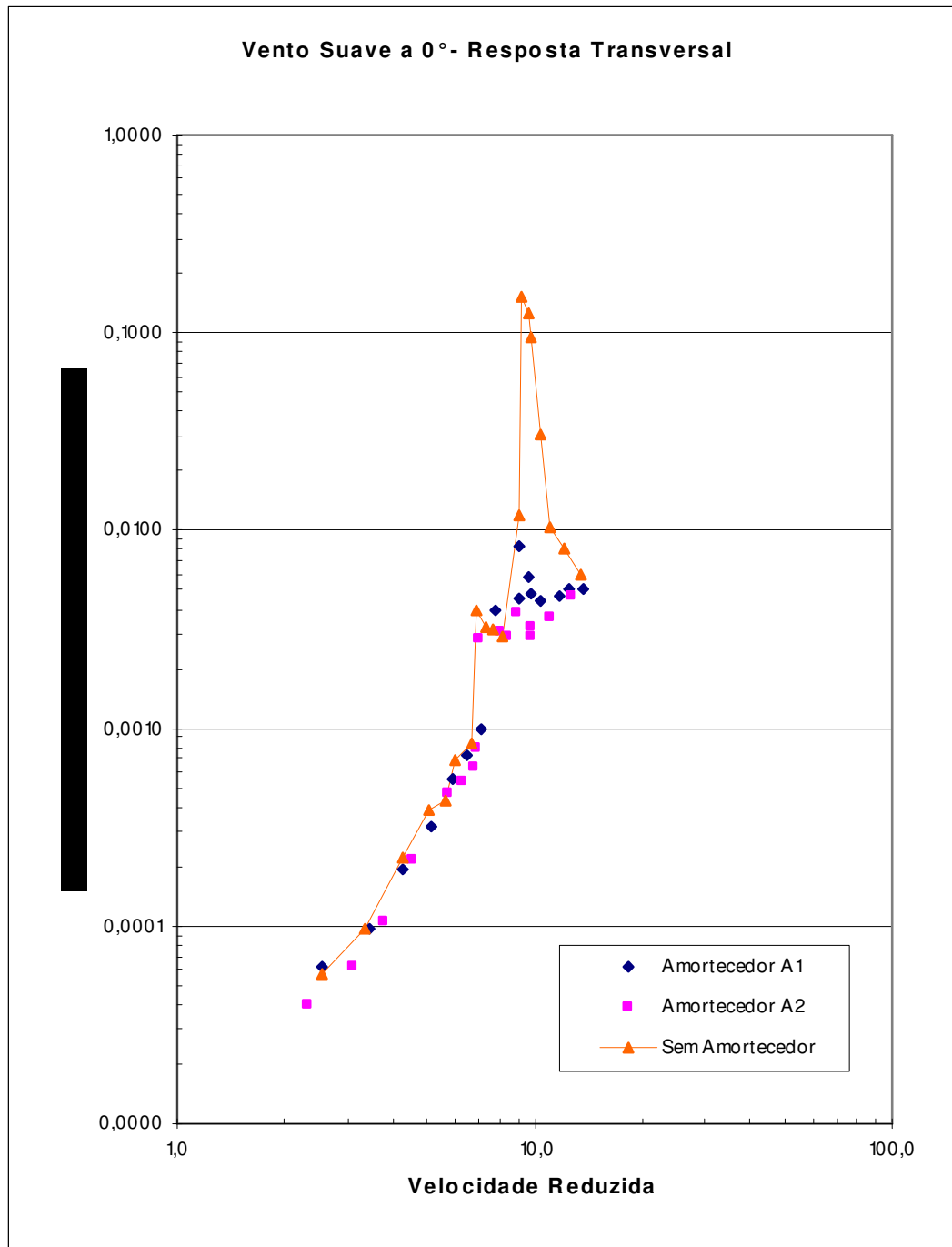


Figura 5.14 – Resposta transversal rms para vento suave a 0°.

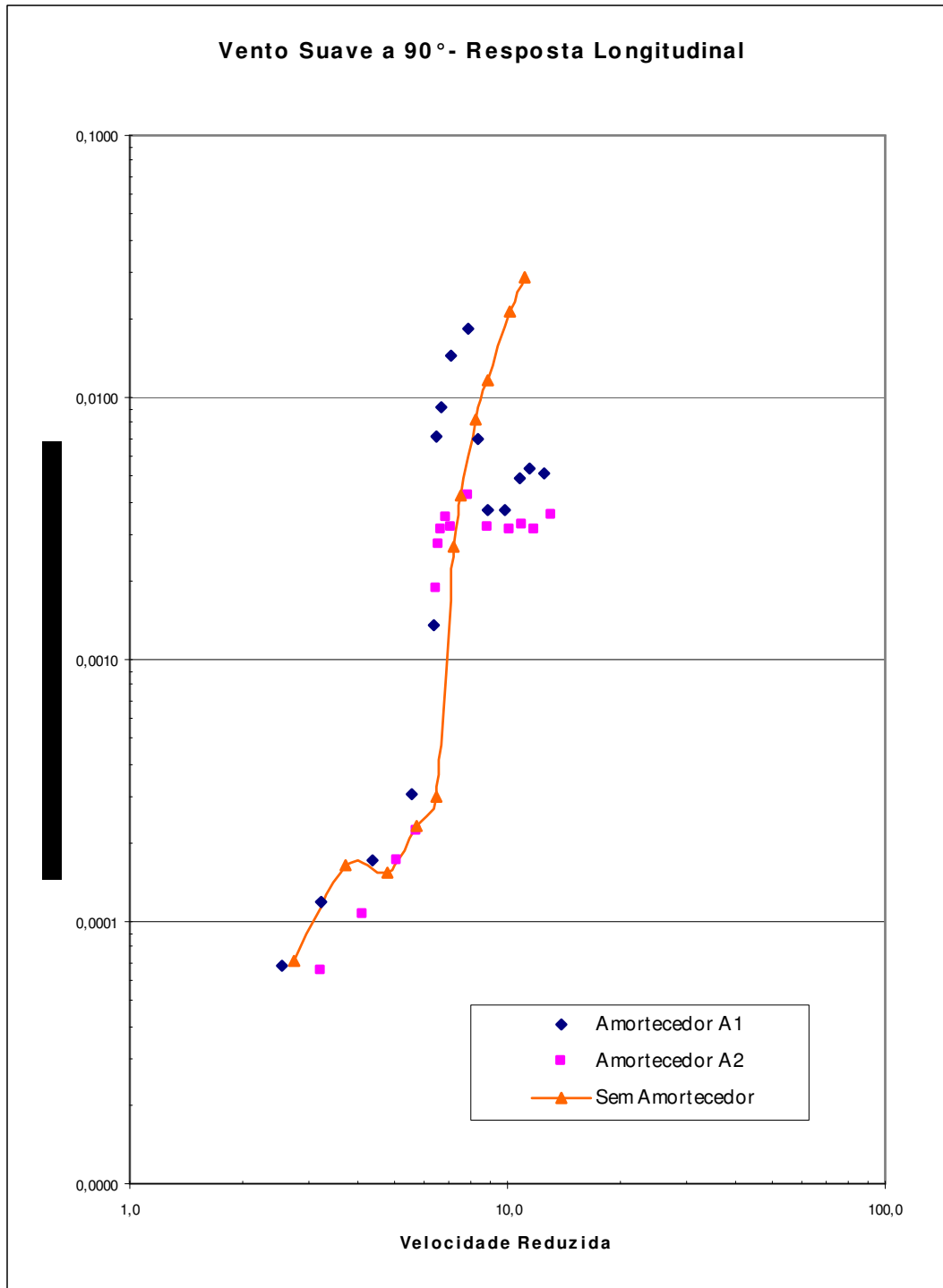


Figura 5.15 – Resposta longitudinal rms para vento suave a 90°.

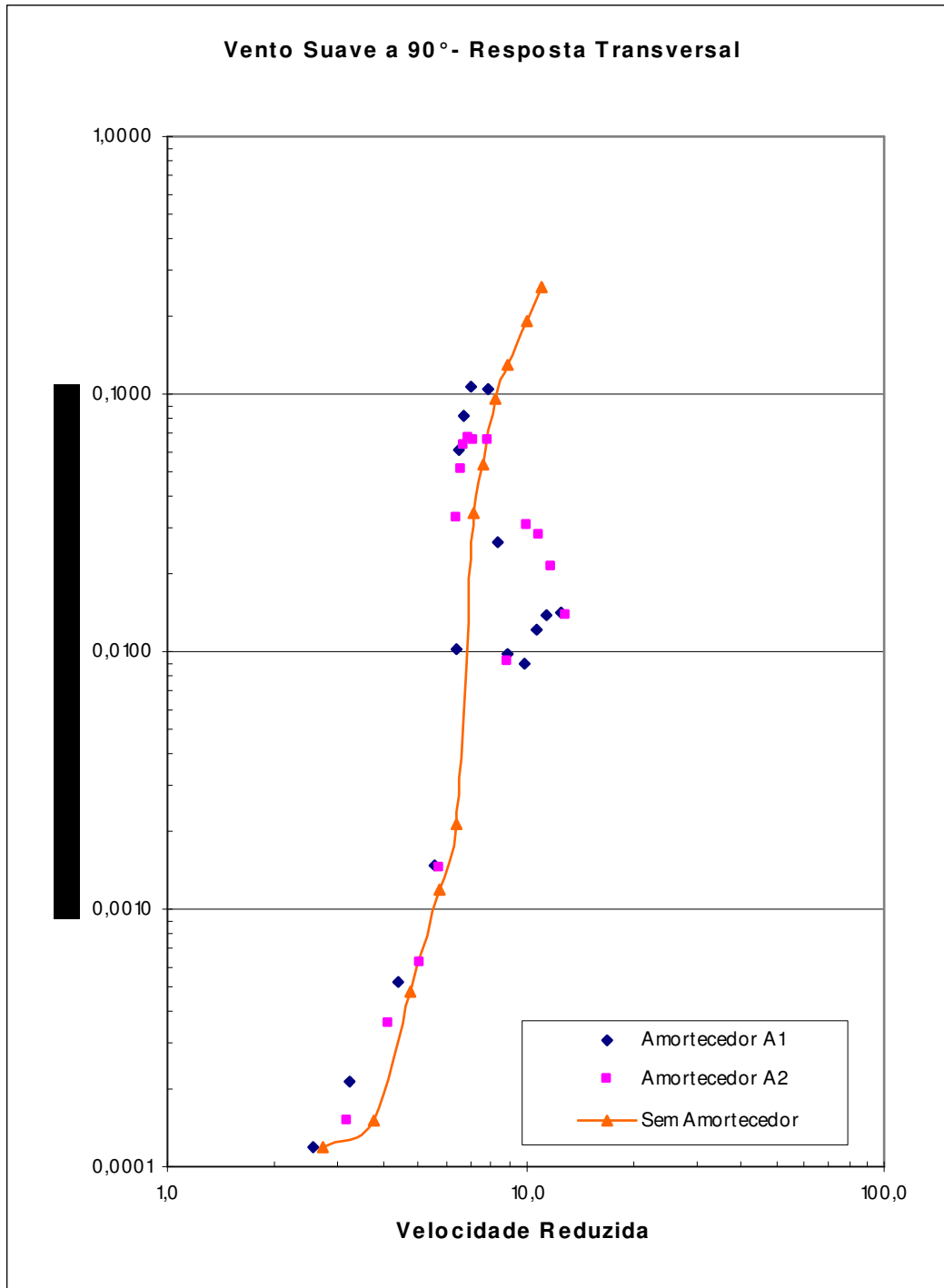


Figura 5.16 – Resposta transversal rms para vento suave a 90°.

6 Conclusões

A altura das edificações influencia diretamente em seu comportamento estrutural, especialmente no que diz respeito à resposta dinâmica da estrutura quando submetida a ações dinâmicas. Nestas situações, começa a ser necessário o estudo dos efeitos dinâmicos atuantes sobre a estrutura, inclusive dos efeitos dinâmicos provocados pela ação do vento. Quando constatadas situações de desconforto ao usuário, devido a acelerações elevadas, ou de risco de dano a elementos não-estruturais ou até mesmo danos à própria estrutura, devido a deslocamentos excessivos da edificação submetida a uma excitação, devem-se tomar medidas preventivas contra estes riscos.

Conforme o que foi estudado neste trabalho, pode-se concluir que os atenuadores dinâmicos sintonizados (amortecedores de massa) constituem-se em um sistema eficiente para prevenção e controle de vibrações induzidas pelo vento, especialmente no controle de vibrações em ressonância. Isto ficou claro com o grande aumento da eficiência deste sistema para excitações com banda de frequência bem definida (como nos casos de ressonância), especialmente na ressonância provocada pelo acoplamento das frequências de desprendimento de vórtices com a frequência natural da estrutura.

Esta maior eficiência para bandas de frequência bem definidas foi prevista por outros estudos, e a concordância dos ensaios realizados neste trabalho com estes estudos auxilia a validar o túnel de vento como uma ferramenta importante na prevenção e controle de vibrações induzidas pela ação do vento em edifícios altos.

Referências

- ANDERSEN, L.; BIRCH, N. W.; HANSEN, A.; SKIBELUND, J.-O. Response analysis of tuned mass dampers to structures exposed to vortex loading of Simiu-Scanlan type. **Journal of Sound and Vibration**, v. 239 (2), p. 217-231, 2001.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS Wind Loading and Wind Effects. In:_____. **Tall Building Criteria and Loading**. New York: 1980. cap.CL-3, p.144-248.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS Wind Tunnel Model Studies of Buildings and Structures. **ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 67**. New York: 1987. 36p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Norma Brasileira NBR-6123 (NB-599)**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: 1988. 88p.
- BEER, F.P.; JOHNSTON, E.R.Jr. **Mecânica vetorial para engenheiros** : Estática. 5. ed. São Paulo: Makron Books, 1994. v. 1. 793p.
- BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das construções**. 2. ed. Porto Alegre: Sagra, 1990. 263p.
- BLESSMANN, J. **O vento na engenharia estrutural**. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 166p.
- BLESSMANN, J. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998. 288p.
- ISYUMOV, N.; HOLMES, J.D.; SURRY, D.; DAVENPORT, A.G. A study of wind effects for The First National City Corporation Project. **Research Report BLWT-SS1-75**. The University of Western Ontario. London – Ontario - Canada. 1975. 110p.
- KAWAGUCHI, A.; TERAMURA, A.; OMOTE, Y. Time History Response of a Tall Building with a Tuned Mass Damper under Wind Force. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 41, p. 1949-1960, 1992.
- KWON, S. D.; PARK, K. S. Suppression of bridge flutter using tuned mass dampers based on robust performance design. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 92, p. 919-934, 2004.
- 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, v. 6, p. 73-88, 1980.
- OLIVEIRA, M.G.K. – **Desenvolvimento de um suporte flexível para ensaios de modelos aeroelásticos em túnel de vento**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2003. 101p.
- TANAKA, H.; MAK, Y. Effect of tuned mass dampers on wind induced response of tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 14, p. 357-368, 1983.

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, v. 83, p. 171-181, 1999.

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

WANG, A.-P.; FUNG, R.-F.; HUANG, S.-C. Dynamic analysis of a tall building with a tuned mass damper device subjected to earthquake excitations. **Journal of Sound and Vibration**, v. 244 (1), p. 123-136, 2001.

XU, Y.L.; KWOK, K.C.S.; SAMALI, B. Control of wind-induced tall building vibrations by tuned mass dampers. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 40, p. 1-32, 1992.

XU, Y.L.; KWOK, K.C.S.; SAMALI, B. The effect of tuned mass dampers and liquid dampers on cross-wind response of tall/slender structures. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 40, p. 33-54, 1992.

ANEXO I – TABELAS DE RESULTADOS DOS ENSAIOS

Tabela A.1 – Modelo Sem Amortecedor – Vento com $p = 0,23$ -
Resposta longitudinal para vento a 0° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
1,88	2,2	0,0229	0,0930	0,0082	0,0348	0,0001	4,24
2,48	2,9	0,0537	0,1908	0,0214	0,0785	0,0003	3,67
3,27	3,9	0,1308	0,4426	0,0535	0,1839	0,0007	3,44
3,77	4,5	0,1858	0,7649	0,0769	0,3263	0,0010	4,24
4,51	5,3	0,3861	1,2806	0,1615	0,4828	0,0022	2,99
5,05	6,0	0,4668	1,8353	0,1949	0,8052	0,0026	4,13
5,38	6,4	0,5624	2,2637	0,2367	0,9479	0,0032	4,00
6,09	7,2	0,8797	4,3045	0,3183	1,4090	0,0042	4,43
7,06	8,4	1,1355	4,8237	0,4361	1,5806	0,0058	3,62
7,42	8,8	1,1701	4,7993	0,4645	1,4422	0,0062	3,10
8,24	9,8	1,4634	4,9045	0,6083	2,1320	0,0081	3,50
8,51	10,1	1,4400	5,1727	0,5893	2,1760	0,0079	3,69
8,77	10,4	1,5965	6,8260	0,6679	2,6634	0,0089	3,99
9,06	10,7	2,4562	7,1338	1,1014	3,1335	0,0147	2,85
9,69	11,5	2,8413	9,1408	1,2859	4,1360	0,0171	3,22
10,58	12,5	2,7687	7,9420	1,2171	3,4351	0,0162	2,82
10,98	13,0	2,7661	10,5340	1,2096	4,3747	0,0161	3,62
11,52	13,7	2,5422	8,9925	1,0747	3,8762	0,0143	3,61
12,38	14,7	2,7432	11,1113	1,1597	4,1234	0,0155	3,56

Tabela A.2 – Modelo com Amortecedor A1 instalado – Vento
com $p = 0,23$ - Resposta longitudinal para vento a 0° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,47	2,9	0,0886	0,3319	0,0453	0,1541	0,0006	3,40
3,29	3,9	0,1768	0,6150	0,0906	0,3264	0,0012	3,60
4,17	4,9	0,2709	1,0487	0,1344	0,4635	0,0018	3,45
4,59	5,4	0,3725	1,4395	0,1857	0,6368	0,0025	3,43
5,18	6,1	0,4486	1,4199	0,2223	0,6737	0,0030	3,03
5,65	6,7	0,9339	2,8355	0,3618	1,1696	0,0048	3,23
6,77	8,0	1,1513	4,0674	0,4953	1,5099	0,0066	3,05
7,46	8,8	2,0252	6,2945	1,1515	3,1973	0,0154	2,78
8,22	9,7	1,4832	5,3867	0,7481	2,8173	0,0100	3,77
8,97	10,6	1,6049	5,7323	0,7565	2,5643	0,0101	3,39
9,29	11,0	1,5067	5,9263	0,6998	2,8013	0,0093	4,00
9,98	11,8	1,8355	6,1764	0,8753	3,5654	0,0117	4,07
10,58	12,5	2,1194	7,3032	0,9853	2,9529	0,0131	3,00
12,25	14,5	2,6341	10,3154	1,1174	3,6190	0,0149	3,24

Tabela A.3 – Modelo com Amortecedor A2 instalado – Vento
com $p = 0,23$ - Resposta longitudinal para vento a 0° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,61	3,1	0,0843	0,3320	0,0398	0,1426	0,0005	3,58
3,08	3,7	0,1203	0,4312	0,0550	0,1937	0,0007	3,52
3,86	4,6	0,2523	0,8988	0,1222	0,4756	0,0016	3,89
4,45	5,3	0,3546	1,3836	0,1704	0,6408	0,0023	3,76
4,83	5,7	0,3705	1,2961	0,1589	0,5842	0,0021	3,68
5,17	6,1	0,4829	1,4701	0,2151	0,6845	0,0029	3,18
6,34	7,5	0,9290	3,3972	0,3661	1,2751	0,0049	3,48
6,53	7,7	0,9984	3,3427	0,3651	1,4321	0,0049	3,92
7,00	8,3	0,9903	3,7638	0,3867	1,2606	0,0052	3,26
7,46	8,8	1,0615	3,8151	0,4595	1,7121	0,0061	3,73
8,13	9,6	1,3144	5,3317	0,5827	1,8025	0,0078	3,09
9,10	10,8	1,4451	5,1159	0,5959	1,9583	0,0079	3,29
9,92	11,8	1,7954	6,5734	0,7575	2,8460	0,0101	3,76

Tabela A.4 – Modelo Sem Amortecedor – Vento com $p = 0,23$ -
Resposta transversal para vento a 0° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
1,88	2,2	0,0303	0,1197	0,0115	0,0393	0,0001	3,42
2,48	2,9	0,0650	0,2208	0,0265	0,1004	0,0002	3,79
3,27	3,9	0,1689	0,6419	0,0731	0,2720	0,0006	3,72
3,77	4,5	0,2804	1,2577	0,1233	0,5473	0,0011	4,44
4,51	5,3	0,4628	1,5082	0,2078	0,5935	0,0018	2,86
5,05	6,0	0,6220	2,5050	0,2803	1,0391	0,0025	3,71
5,38	6,4	0,8207	2,4967	0,3697	1,1490	0,0033	3,11
6,09	7,2	1,6506	5,1911	0,6875	2,0006	0,0061	2,91
7,06	8,4	2,1244	7,8350	0,9546	3,6803	0,0085	3,86
7,42	8,8	3,9190	10,4445	1,8352	4,6114	0,0163	2,51
8,24	9,8	7,1611	19,6345	3,3734	9,7982	0,0300	2,90
8,51	10,1	7,4537	22,9554	3,5176	10,5159	0,0313	2,99
8,77	10,4	18,1724	52,6340	8,6833	25,4105	0,0772	2,93
9,06	10,7	43,1544	74,2951	20,8759	36,2690	0,1856	1,74
9,69	11,5	46,8377	81,1889	22,4151	39,4219	0,1992	1,76
10,58	12,5	36,0736	68,4655	17,0422	33,8427	0,1515	1,99
10,98	13,0	32,4700	64,0839	15,3024	30,3251	0,1360	1,98
11,52	13,7	24,1847	54,1358	11,2423	25,0738	0,0999	2,23
12,38	14,7	13,9966	38,7009	6,3883	16,1749	0,0568	2,53

Tabela A.5 – Modelo com Amortecedor A1 instalado – Vento com $p = 0,23$ - Resposta transversal para vento a 0° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,47	2,9	0,0928	0,3484	0,0477	0,1837	0,0004	3,85
3,29	3,9	0,1675	0,6790	0,0869	0,3239	0,0008	3,73
4,17	4,9	0,3370	1,3354	0,1792	0,6646	0,0016	3,71
4,59	5,4	0,5121	1,7707	0,2827	0,8380	0,0025	2,96
5,18	6,1	0,8071	3,1932	0,4571	1,8050	0,0041	3,95
5,65	6,7	1,3665	4,5132	0,6213	2,0725	0,0055	3,34
6,77	8,0	4,1500	12,6435	2,4682	6,6373	0,0219	2,69
7,46	8,8	14,2242	26,0432	8,7398	15,4272	0,0777	1,77
8,22	9,7	7,0975	23,6862	4,2834	14,6165	0,0381	3,41
8,97	10,6	4,1021	12,6076	2,3728	6,5629	0,0211	2,77
9,29	11,0	4,9280	17,5250	2,9030	8,7297	0,0258	3,01
9,98	11,8	3,9115	11,9476	2,2153	6,6556	0,0197	3,00
10,58	12,5	4,0509	14,4455	2,1644	6,7748	0,0192	3,13
12,25	14,5	5,3347	19,9785	2,1030	8,1427	0,0187	3,87

Tabela A.6 – Modelo com Amortecedor A2 instalado – Vento com $p = 0,23$ - Resposta transversal para vento a 0° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,61	3,1	0,0836	0,2989	0,0378	0,1156	0,0003	3,58
3,08	3,7	0,1354	0,4893	0,0661	0,2186	0,0006	3,52
3,86	4,6	0,2468	0,8140	0,1182	0,4067	0,0011	3,89
4,45	5,3	0,4656	1,5022	0,2473	0,8286	0,0022	3,76
4,83	5,7	0,5476	2,1402	0,2914	1,0733	0,0026	3,68
5,17	6,1	0,6550	2,2635	0,3498	1,1236	0,0031	3,18
6,34	7,5	1,4736	5,3028	0,7660	2,5504	0,0068	3,48
6,53	7,7	1,8640	6,3890	1,0102	2,9063	0,0090	3,92
7,00	8,3	2,9458	9,6333	1,7343	5,6437	0,0154	3,26
7,46	8,8	7,5777	17,4354	4,6535	10,5943	0,0414	3,73
8,13	9,6	4,8969	15,5237	2,9042	8,8705	0,0258	3,09
9,10	10,8	3,0177	11,4393	1,5782	4,8031	0,0140	3,29
9,92	11,8	3,8920	11,8141	1,8981	6,2105	0,0169	3,76

Tabela A.7 – Modelo Sem Amortecedor – Vento com $p = 0,23$ -
Resposta longitudinal para vento a 90° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
1,90	2,2	0,0344	0,1139	0,0124	0,0389	0,0001	3,14
2,27	2,7	0,0491	0,1662	0,0188	0,0694	0,0002	3,69
2,51	3,0	0,0611	0,2013	0,0241	0,0773	0,0002	3,21
2,92	3,5	0,0807	0,3223	0,0324	0,1115	0,0003	3,44
3,28	3,9	0,1155	0,4917	0,0475	0,2047	0,0004	4,31
3,60	4,3	0,1326	0,4583	0,0565	0,1907	0,0005	3,38
3,89	4,6	0,1860	0,6245	0,0790	0,2610	0,0007	3,30
4,20	5,0	0,2365	0,8562	0,1017	0,3331	0,0009	3,28
4,50	5,3	0,2632	0,8996	0,1148	0,4119	0,0010	3,59
4,79	5,7	0,3232	1,0513	0,1416	0,4626	0,0013	3,27
5,02	5,9	0,3708	1,2513	0,1626	0,5600	0,0014	3,44
5,14	6,1	0,3850	1,4561	0,1698	0,5974	0,0015	3,52
5,74	6,8	1,0671	3,6984	0,3520	1,3237	0,0031	3,76
6,27	7,4	1,1225	4,0031	0,3538	1,1664	0,0031	3,30
6,68	7,9	1,2704	4,9403	0,4197	1,4998	0,0037	3,57
7,06	8,4	1,2876	4,8376	0,4440	1,7250	0,0039	3,89
7,76	9,2	1,4736	5,4011	0,5378	2,3171	0,0048	4,31
8,03	9,5	1,2723	4,1849	0,4454	1,5375	0,0040	3,45
8,59	10,2	1,5576	5,9738	0,5417	1,7989	0,0048	3,32
9,15	10,8	1,8344	6,1691	0,6516	2,5308	0,0058	3,88
10,21	12,1	2,1659	7,9423	0,7367	2,8848	0,0065	3,92
10,41	12,3	2,1769	8,1273	0,7606	2,5039	0,0068	3,29
11,54	13,7	2,4923	8,1893	0,8785	3,1565	0,0078	3,59
12,52	14,8	2,8736	13,1049	1,0622	4,0878	0,0094	3,85

Tabela A.8 – Modelo com Amortecedor A1 instalado – Vento com $p = 0,23$ - Resposta longitudinal para vento a 90° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,34	2,8	0,0350	0,1481	0,0150	0,0524	0,0001	3,49
3,03	3,6	0,0671	0,2777	0,0312	0,1014	0,0003	3,25
3,95	4,7	0,1321	0,5064	0,0551	0,2437	0,0005	4,42
4,89	5,8	0,2708	1,0703	0,1300	0,5390	0,0012	4,15
5,30	6,3	0,3390	1,0773	0,1716	0,5090	0,0015	2,97
5,51	6,5	0,3634	1,3137	0,1789	0,6714	0,0016	3,75
5,80	6,9	0,9030	3,0228	0,2985	1,1217	0,0027	3,76
6,73	8,0	1,0236	3,8818	0,3509	1,0847	0,0031	3,09
7,64	9,1	1,1346	4,5034	0,4498	1,7270	0,0040	3,84
8,70	10,3	1,5430	5,2680	0,6859	2,4315	0,0061	3,54
9,58	11,3	1,5589	5,2486	0,6072	2,4009	0,0054	3,95
10,61	12,6	2,1103	8,5682	0,8848	3,2335	0,0079	3,65
10,97	13,0	2,2416	8,1352	0,9759	2,9243	0,0087	3,00
12,15	14,4	2,6190	10,9410	1,1513	4,1428	0,0102	3,60

Tabela A.9 – Modelo com Amortecedor A2 instalado – Vento com $p = 0,23$ - Resposta longitudinal para vento a 90° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,14	2,5	0,0326	0,1237	0,0116	0,0425	0,0001	3,66
2,84	3,4	0,0597	0,2470	0,0244	0,0894	0,0002	3,66
3,71	4,4	0,1062	0,3510	0,0450	0,1762	0,0004	3,92
4,27	5,1	0,1657	0,7251	0,0772	0,3422	0,0007	4,43
4,95	5,9	0,2489	0,8613	0,1151	0,3915	0,0010	3,40
5,45	6,5	0,3185	1,3134	0,1537	0,6519	0,0014	4,24
6,11	7,2	0,7357	3,1540	0,3024	0,9846	0,0027	3,26
6,61	7,8	0,7192	2,9180	0,2799	0,8587	0,0025	3,07
7,57	9,0	0,9637	3,9821	0,4425	1,4694	0,0039	3,32
8,70	10,3	1,0810	3,7834	0,4852	1,5867	0,0043	3,27
9,57	11,3	1,3364	4,6507	0,6082	2,1464	0,0054	3,53
10,63	12,6	1,5969	5,5387	0,6899	2,2713	0,0061	3,29
11,91	14,1	2,0381	12,4134	0,9351	3,9534	0,0083	4,23

Tabela A.10 – Modelo Sem Amortecedor – Vento com $p = 0,23$
- Resposta transversal para vento a 90° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
1,90	2,2	0,0409	0,1739	0,0163	0,0615	0,0002	3,77
2,27	2,7	0,0903	0,3231	0,0378	0,1305	0,0005	3,45
2,51	3,0	0,1234	0,5085	0,0515	0,2148	0,0007	4,17
2,92	3,5	0,2224	0,7214	0,0939	0,3064	0,0013	3,26
3,28	3,9	0,3266	1,1958	0,1405	0,4876	0,0019	3,47
3,60	4,3	0,3739	1,3911	0,1594	0,6022	0,0021	3,78
3,89	4,6	0,5286	2,0944	0,2273	0,9473	0,0030	4,17
4,20	5,0	0,6773	2,6547	0,2933	1,0186	0,0039	3,47
4,50	5,3	0,8514	2,8062	0,3726	1,4107	0,0050	3,79
4,79	5,7	1,0297	3,3536	0,4540	1,4475	0,0061	3,19
5,02	5,9	1,2039	4,3408	0,5313	1,9090	0,0071	3,59
5,14	6,1	1,3680	4,8435	0,6100	2,1398	0,0081	3,51
5,74	6,8	1,8060	5,8965	0,7537	2,5330	0,0100	3,36
6,27	7,4	2,1547	8,2264	0,9301	3,9596	0,0124	4,26
6,68	7,9	2,3114	9,3673	0,9967	3,8975	0,0133	3,91
7,06	8,4	2,4127	7,8849	1,0544	3,7762	0,0141	3,58
7,76	9,2	3,3660	11,6719	1,4839	5,3729	0,0198	3,62
8,03	9,5	3,6066	13,0683	1,5881	5,3218	0,0212	3,35
8,59	10,2	3,7284	12,5197	1,6300	5,8751	0,0217	3,60
9,15	10,8	5,1392	16,7390	2,2682	6,8899	0,0302	3,04
10,21	12,1	5,9259	17,4870	2,6081	7,5029	0,0348	2,88
10,41	12,3	6,1215	19,6717	2,6749	7,8971	0,0357	2,95
11,54	13,7	8,9813	29,3119	3,9854	11,7195	0,0531	2,94
12,52	14,8	12,5387	39,8551	5,6180	17,5793	0,0749	3,13

Tabela A.11 – Modelo com Amortecedor A1 instalado – Vento com $p = 0,23$ - Resposta transversal para vento a 90° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,34	2,8	0,0644	0,2164	0,0326	0,0932	0,0004	2,86
3,03	3,6	0,1571	0,5225	0,0814	0,2777	0,0011	3,41
3,95	4,7	0,3915	1,3921	0,1990	0,7223	0,0027	3,63
4,89	5,8	0,7686	2,6633	0,3987	1,2577	0,0053	3,15
5,30	6,3	0,9567	3,1219	0,4995	1,4576	0,0067	2,92
5,51	6,5	1,1389	3,9640	0,5902	1,8185	0,0079	3,08
5,80	6,9	1,4833	6,0607	0,7296	2,7079	0,0097	3,71
6,73	8,0	1,9039	6,2770	0,9596	3,3387	0,0128	3,48
7,64	9,1	2,5414	9,4792	1,2967	4,3636	0,0173	3,37
8,70	10,3	3,4355	11,8114	1,7945	5,9901	0,0239	3,34
9,58	11,3	3,9146	13,8794	1,9984	7,1924	0,0266	3,60
10,61	12,6	5,8261	22,0436	3,0667	11,7890	0,0409	3,84
10,97	13,0	6,3869	20,3455	3,4393	10,7062	0,0459	3,11
12,15	14,4	6,8452	21,6259	3,5475	10,4481	0,0473	2,95

Tabela A.12 – Modelo com Amortecedor A2 instalado – Vento com $p = 0,23$ - Resposta transversal para vento a 90° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,14	2,5	0,0545	0,2006	0,0262	0,1025	0,0003	3,91
2,84	3,4	0,1539	0,6171	0,0772	0,3089	0,0010	4,00
3,71	4,4	0,3447	1,2700	0,1653	0,5879	0,0022	3,56
4,27	5,1	0,5737	2,3375	0,2902	1,2628	0,0039	4,35
4,95	5,9	0,8569	2,9804	0,4209	1,4110	0,0056	3,35
5,45	6,5	1,1259	3,9268	0,5551	1,6557	0,0074	2,98
6,11	7,2	1,9402	8,2974	0,9919	4,0972	0,0132	4,13
6,61	7,8	1,9316	7,2029	0,9657	3,3113	0,0129	3,43
7,57	9,0	2,6575	8,8608	1,3405	4,2722	0,0179	3,19
8,70	10,3	3,4593	13,6789	1,7196	5,6919	0,0229	3,31
9,57	11,3	4,8010	18,1249	2,4463	8,7127	0,0326	3,56
10,63	12,6	5,5109	17,6733	2,6234	8,3875	0,0350	3,20
11,91	14,1	7,3796	30,0492	3,6399	11,7932	0,0485	3,24

Tabela A.13 – Modelo Sem Amortecedor – Vento com $p = 0,34$
 - Resposta longitudinal para vento a 0° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,12	2,5	0,0507	0,1642	0,0218	0,0672	0,0003	3,08
2,76	3,3	0,1200	0,3715	0,0524	0,1623	0,0007	3,10
3,36	4,0	0,1807	0,5691	0,0787	0,2654	0,0010	3,37
3,83	4,5	0,2747	0,9541	0,1215	0,4167	0,0016	3,43
4,42	5,2	0,3941	1,4253	0,1731	0,6275	0,0023	3,63
5,12	6,1	0,536	2,0779	0,2390	1,0473	0,0032	4,38
6,38	7,6	0,9616	3,8963	0,3972	1,6129	0,0053	4,06
7,08	8,4	1,0282	3,9089	0,4256	1,5959	0,0057	3,75
7,75	9,2	1,3549	5,3768	0,5814	2,1145	0,0078	3,64
8,15	9,7	1,2798	5,3571	0,5430	2,1658	0,0072	3,99
8,40	10,0	1,5151	6,0849	0,6564	2,2712	0,0088	3,46
8,50	10,1	1,6970	6,2013	0,7574	2,6992	0,0101	3,56
8,77	10,4	1,8301	7,2800	0,8237	3,2762	0,0110	3,98
9,22	10,9	2,5038	7,3815	1,1527	3,3673	0,0154	2,92
9,56	11,3	2,9640	8,5693	1,3850	3,7335	0,0185	2,70
10,21	12,1	3,4181	10,3043	1,5868	4,3576	0,0212	2,75
11,02	13,1	3,2630	11,8861	1,4911	5,5033	0,0199	3,69
12,27	14,5	3,1365	12,1328	1,3860	5,1819	0,0185	3,74

Tabela A.14 – Modelo com Amortecedor A1 instalado – Vento com $p = 0,34$ - Resposta longitudinal para vento a 0° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,10	2,5	0,0382	0,1370	0,0190	0,0643	0,0003	3,38
2,59	3,1	0,0702	0,2333	0,0351	0,1206	0,0005	3,44
3,15	3,7	0,1054	0,3580	0,0525	0,1751	0,0007	3,34
4,03	4,8	0,2333	0,8150	0,1157	0,3708	0,0015	3,20
4,52	5,4	0,3040	1,2217	0,1505	0,6529	0,0020	4,34
5,23	6,2	0,3675	1,5751	0,1767	0,7179	0,0024	4,06
6,33	7,5	0,8635	3,2745	0,3647	1,2975	0,0049	3,56
6,64	7,9	0,9373	3,8565	0,4016	1,3085	0,0054	3,26
7,25	8,6	0,9797	3,5402	0,4075	1,4908	0,0054	3,66
8,12	9,6	1,2438	4,3731	0,5724	1,7502	0,0076	3,06
8,75	10,4	1,2620	5,1644	0,5276	2,1449	0,0070	4,07
9,54	11,3	1,5560	4,9024	0,6751	2,2977	0,0090	3,40
10,02	11,9	1,6974	6,0984	0,7293	2,3796	0,0097	3,26
11,16	13,2	1,9207	7,3686	0,8172	2,8281	0,0109	3,46
12,21	14,5	2,2555	8,8519	0,9514	2,9827	0,0127	3,14

Tabela A.15 – Modelo com Amortecedor A2 instalado – Vento com $p = 0,34$ - Resposta longitudinal para vento a 0° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,83	3,4	0,0425	0,1285	0,0214	0,0738	0,0003	3,45
3,88	4,6	0,0830	0,2959	0,0395	0,1270	0,0005	3,22
4,61	5,5	0,1387	0,4337	0,0688	0,1937	0,0009	2,82
5,03	6,0	0,1677	0,6046	0,0823	0,2644	0,0011	3,21
5,44	6,4	0,2037	0,6231	0,0945	0,3057	0,0013	3,23
5,68	6,7	0,2437	0,9131	0,1191	0,4478	0,0016	3,76
6,55	7,8	0,4733	1,6284	0,1889	0,6448	0,0025	3,41
7,30	8,6	0,5096	1,9843	0,2141	0,7094	0,0029	3,31
7,92	9,4	0,6147	2,0987	0,2942	0,8400	0,0039	2,86
8,52	10,1	0,6665	2,4111	0,3002	1,0445	0,0040	3,48
8,77	10,4	0,7136	2,6275	0,3208	0,9992	0,0043	3,11
9,21	10,9	0,7933	2,7724	0,3652	1,3448	0,0049	3,68
10,21	12,1	0,9391	3,3980	0,4124	1,5845	0,0055	3,84

Tabela A.16 – Modelo Sem Amortecedor – Vento com $p = 0,34$
- Resposta transversal para vento a 0° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,12	2,5	0,0544	0,1997	0,0243	0,0912	0,0002	3,75
2,76	3,3	0,1051	0,4021	0,0473	0,1793	0,0004	3,79
3,36	4,0	0,2120	0,6943	0,0982	0,3212	0,0009	3,27
3,83	4,5	0,3939	1,2018	0,1848	0,5589	0,0016	3,02
4,42	5,2	0,4507	1,4340	0,2108	0,7117	0,0019	3,38
5,12	6,1	0,9086	2,9120	0,4305	1,3350	0,0038	3,10
6,38	7,6	1,7638	5,2422	0,8336	2,3058	0,0074	2,77
7,08	8,4	2,1354	7,2096	1,0163	3,2973	0,0090	3,24
7,75	9,2	4,6891	16,3924	2,3089	8,2889	0,0205	3,59
8,15	9,7	6,1699	20,0518	3,0331	10,0315	0,0270	3,31
8,40	10,0	11,0969	30,2689	5,4493	14,4306	0,0484	2,65
8,50	10,1	10,8579	29,8951	5,3227	14,8849	0,0473	2,80
8,77	10,4	14,3689	34,1221	7,0306	16,8793	0,0625	2,40
9,22	10,9	22,1078	51,8824	10,8184	25,3322	0,0962	2,34
9,56	11,3	31,8267	57,3746	15,4894	27,2553	0,1377	1,76
10,21	12,1	33,3297	61,9181	16,0059	28,3991	0,1423	1,77
11,02	13,1	26,1163	53,4017	12,5072	25,3967	0,1112	2,03
12,27	14,5	16,2205	44,7308	7,7048	21,2304	0,0685	2,76

Tabela A.17 – Modelo com Amortecedor A1 instalado – Vento com $p = 0,34$ - Resposta transversal para vento a 0° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,10	2,5	0,0396	0,1339	0,0202	0,0597	0,0002	2,96
2,59	3,1	0,0783	0,2676	0,0410	0,1269	0,0004	3,10
3,15	3,7	0,1521	0,5669	0,0815	0,2650	0,0007	3,25
4,03	4,8	0,3409	1,4333	0,1905	0,6904	0,0017	3,62
4,52	5,4	0,4913	1,6492	0,2746	0,8757	0,0024	3,19
5,23	6,2	0,6773	3,0214	0,3731	1,6429	0,0033	4,40
6,33	7,5	1,4465	4,7363	0,7915	2,7147	0,0070	3,43
6,64	7,9	2,3110	6,7655	1,3753	3,8371	0,0122	2,79
7,25	8,6	3,7092	9,7609	2,2631	5,3505	0,0201	2,36
8,12	9,6	4,2728	11,1071	2,5965	6,0038	0,0231	2,31
8,75	10,4	3,6154	10,4758	2,1433	5,5079	0,0191	2,57
9,54	11,3	3,2068	9,6379	1,8493	5,3722	0,0164	2,90
10,02	11,9	3,0919	8,9734	1,7222	4,5910	0,0153	2,67
11,16	13,2	2,8147	9,4357	1,3218	4,3379	0,0117	3,28
12,21	14,5	3,4665	12,2922	1,3358	4,4323	0,0119	3,32

Tabela A.18 – Modelo com Amortecedor A2 instalado – Vento com $p = 0,34$ - Resposta transversal para vento a 0° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,83	3,4	0,0446	0,1533	0,0236	0,0829	0,0002	3,51
3,88	4,6	0,1065	0,4399	0,0571	0,2422	0,0005	4,24
4,61	5,5	0,1786	0,6945	0,0964	0,2883	0,0009	2,99
5,03	6,0	0,2031	0,6899	0,1064	0,3548	0,0009	3,33
5,44	6,4	0,3201	1,2731	0,1740	0,6486	0,0015	3,73
5,68	6,7	0,3309	1,3499	0,1787	0,6763	0,0016	3,78
6,55	7,8	0,6525	2,3779	0,3238	0,9595	0,0029	2,96
7,30	8,6	1,2892	4,0083	0,7571	2,1814	0,0067	2,88
7,92	9,4	3,1056	8,9496	1,8862	5,1395	0,0168	2,72
8,52	10,1	3,0195	8,5432	1,8217	4,9024	0,0162	2,69
8,77	10,4	2,3960	7,6549	1,4233	4,1719	0,0127	2,93
9,21	10,9	2,5706	7,6089	1,5058	4,0225	0,0134	2,67
10,21	12,1	2,1875	7,2269	1,0734	3,2598	0,0095	3,04

Tabela A.19 – Modelo Sem Amortecedor – Vento com $p = 0,34$
 - Resposta longitudinal para vento a 90° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,19	2,6	0,0547	0,1794	0,0238	0,0810	0,0002	3,40
2,73	3,2	0,0785	0,2877	0,0340	0,1215	0,0003	3,57
3,37	4,0	0,1481	0,4799	0,0674	0,2085	0,0006	3,09
3,94	4,7	0,1944	0,6155	0,0888	0,2700	0,0008	3,04
4,38	5,2	0,3369	1,1198	0,1559	0,4542	0,0014	2,91
4,72	5,6	0,3724	1,4017	0,1709	0,6081	0,0015	3,56
4,93	5,8	0,4092	1,3511	0,1900	0,5616	0,0017	2,96
5,89	7,0	0,9497	3,5208	0,3276	1,0781	0,0029	3,29
6,37	7,5	0,8344	3,1696	0,3098	1,1108	0,0028	3,59
7,08	8,4	0,9705	3,8840	0,3791	1,5224	0,0034	4,02
7,81	9,3	1,1305	3,7460	0,4476	1,6514	0,0040	3,69
8,08	9,6	1,1753	3,9805	0,4671	1,6912	0,0042	3,62
9,08	10,8	1,5029	5,4605	0,6127	2,1278	0,0054	3,47
9,81	11,6	1,6991	6,1549	0,6658	2,1515	0,0059	3,23
10,34	12,3	2,0259	6,5976	0,8145	2,8837	0,0072	3,54
11,37	13,5	2,0880	7,7820	0,8292	3,0009	0,0074	3,62

Tabela A.20 – Modelo com Amortecedor A1 instalado – Vento com $p = 0,34$ - Resposta longitudinal para vento a 90° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,27	2,7	0,0411	0,1355	0,0154	0,0509	0,0001	3,31
2,83	3,4	0,0547	0,2027	0,0239	0,0933	0,0002	3,90
3,45	4,1	0,0996	0,4568	0,0464	0,1752	0,0004	3,78
4,32	5,1	0,1772	0,5703	0,0919	0,3004	0,0008	3,27
4,88	5,8	0,2501	0,8465	0,1320	0,4625	0,0012	3,50
5,31	6,3	0,3149	1,3090	0,1610	0,6124	0,0014	3,80
6,45	7,6	0,9717	3,5037	0,3641	1,2394	0,0032	3,40
6,71	8,0	0,8907	3,4214	0,3182	1,0370	0,0028	3,26
7,47	8,8	0,8784	3,5139	0,3459	1,1199	0,0031	3,24
7,96	9,4	0,9201	3,2263	0,3682	1,1841	0,0033	3,22
8,73	10,3	1,1855	3,8799	0,5263	1,9004	0,0047	3,61
9,71	11,5	1,4262	5,0300	0,5755	1,9219	0,0051	3,34
10,56	12,5	1,5547	5,5376	0,6520	2,1959	0,0058	3,37
11,74	13,9	1,8786	6,2139	0,8127	2,8773	0,0072	3,54

Tabela A.21 – Modelo com Amortecedor A2 instalado – Vento com $p = 0,34$ - Resposta longitudinal para vento a 90° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,88	3,4	0,0261	0,0991	0,0121	0,0376	0,0001	3,11
3,81	4,5	0,0528	0,1941	0,0269	0,0919	0,0002	3,42
4,54	5,4	0,0856	0,2807	0,0439	0,1466	0,0004	3,34
5,05	6,0	0,1099	0,4032	0,0568	0,2206	0,0005	3,88
5,32	6,3	0,1267	0,4442	0,0665	0,1928	0,0006	2,90
5,82	6,9	0,1509	0,5317	0,0760	0,2706	0,0007	3,56
6,87	8,1	0,4900	1,8034	0,1781	0,6455	0,0016	3,62
7,43	8,8	0,5112	1,9123	0,2051	0,6309	0,0018	3,08
8,26	9,8	0,5692	1,9564	0,2189	0,7530	0,0019	3,44
8,92	10,6	0,6506	2,5190	0,2632	0,9573	0,0023	3,64
9,60	11,4	0,7033	2,5852	0,2790	0,9872	0,0025	3,54
10,63	12,6	0,8803	3,0523	0,3426	1,0651	0,0030	3,11
11,82	14,0	1,0756	3,9504	0,4759	1,6112	0,0042	3,39
12,86	15,2	1,1242	6,7861	0,4599	1,7033	0,0041	3,70

Tabela A.22 – Modelo Sem Amortecedor – Vento com $p = 0,34$
- Resposta transversal para vento a 90° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,19	2,6	0,0995	0,3836	0,0441	0,1646	0,0006	3,73
2,73	3,2	0,2348	0,7376	0,1045	0,3107	0,0014	2,97
3,37	4,0	0,4279	1,7530	0,1926	0,7429	0,0026	3,86
3,94	4,7	0,6321	2,0484	0,2862	0,9181	0,0038	3,21
4,38	5,2	0,7976	3,0486	0,3651	1,4246	0,0049	3,90
4,72	5,6	1,0176	4,3316	0,4705	1,9459	0,0063	4,14
4,93	5,8	1,2557	3,4848	0,5841	1,5904	0,0078	2,72
5,89	7,0	2,0259	8,2885	0,9221	3,0666	0,0123	3,33
6,37	7,5	2,2345	7,2293	1,0240	3,2689	0,0137	3,19
7,08	8,4	3,2375	12,7696	1,4929	5,9585	0,0199	3,99
7,81	9,3	3,5525	12,4305	1,6464	5,3542	0,0220	3,25
8,08	9,6	3,8440	12,7796	1,7805	5,5598	0,0237	3,12
9,08	10,8	4,8060	17,3498	2,2390	7,8457	0,0299	3,50
9,81	11,6	5,8011	20,7898	2,6851	9,6247	0,0358	3,58
10,34	12,3	5,1911	18,0613	2,3792	8,0833	0,0317	3,40
11,37	13,5	7,2734	23,4174	3,3844	10,3738	0,0451	3,07

Tabela A.23 – Modelo com Amortecedor A1 instalado – Vento com $p = 0,34$ - Resposta transversal para vento a 90° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,27	2,7	0,0540	0,2016	0,0245	0,0801	0,0003	3,27
2,83	3,4	0,1446	0,5039	0,0770	0,2775	0,0010	3,60
3,45	4,1	0,2662	1,0834	0,1378	0,4740	0,0018	3,44
4,32	5,1	0,5431	2,1066	0,2804	1,0741	0,0037	3,83
4,88	5,8	0,7460	2,7368	0,3927	1,2185	0,0052	3,10
5,31	6,3	1,1539	4,7262	0,6084	2,2470	0,0081	3,69
6,45	7,6	2,1000	7,5723	1,1267	4,0376	0,0150	3,58
6,71	8,0	1,7585	7,6763	0,8776	3,5491	0,0117	4,04
7,47	8,8	2,3722	8,1168	1,2586	4,2044	0,0168	3,34
7,96	9,4	2,5261	8,3625	1,3035	4,7636	0,0174	3,65
8,73	10,3	3,1285	9,7572	1,6809	5,4208	0,0224	3,22
9,71	11,5	3,1301	11,6250	1,4903	4,8519	0,0199	3,26
10,56	12,5	3,9295	13,0068	2,0031	5,9584	0,0267	2,97
11,74	13,9	4,1383	14,1068	1,9480	5,4992	0,0260	2,82

Tabela A.24 – Modelo com Amortecedor A2 instalado – Vento com $p = 0,34$ - Resposta transversal para vento a 90° .

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s^2)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,88	3,4	0,0545	0,2484	0,0279	0,1293	0,0004	4,63
3,81	4,5	0,1517	0,5224	0,0765	0,2580	0,0010	3,37
4,54	5,4	0,2753	1,0740	0,1443	0,5154	0,0019	3,57
5,05	6,0	0,4143	1,3877	0,2237	0,7834	0,0030	3,50
5,32	6,3	0,4569	1,7076	0,2458	0,7836	0,0033	3,19
5,82	6,9	0,5835	2,1132	0,3072	0,8932	0,0041	2,91
6,87	8,1	1,0334	3,6944	0,5306	1,6302	0,0071	3,07
7,43	8,8	1,1239	4,0129	0,5502	1,9298	0,0073	3,51
8,26	9,8	1,6384	5,5540	0,8408	2,5508	0,0112	3,03
8,92	10,6	1,9828	6,7878	1,0425	2,9171	0,0139	2,80
9,60	11,4	2,4417	8,5213	1,2144	4,6866	0,0162	3,86
10,63	12,6	2,6215	8,8876	1,2993	3,9814	0,0173	3,06
11,82	14,0	3,2664	11,3317	1,5718	4,6717	0,0210	2,97
12,86	15,2	3,7051	18,4898	1,9425	6,5595	0,0259	3,38

Tabela A.25 – Modelo Sem Amortecedor – Vento Suave -
Resposta longitudinal para vento a 0°.

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s ²)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,14	2,5	0,0231	0,0926	0,0078	0,0280	0,0001	3,59
2,85	3,4	0,0385	0,1246	0,0143	0,0456	0,0002	3,19
3,62	4,3	0,0601	0,2052	0,0230	0,0714	0,0003	3,10
4,30	5,1	0,0774	0,2767	0,0301	0,1089	0,0004	3,62
4,73	5,6	0,0881	0,2781	0,0333	0,1048	0,0004	3,15
5,08	6,0	0,1094	0,4194	0,0419	0,1551	0,0006	3,70
5,60	6,6	0,1410	0,5050	0,0545	0,1868	0,0007	3,43
5,77	6,8	1,2941	4,6024	0,3962	1,5239	0,0053	3,85
6,18	7,3	1,3061	4,1820	0,3647	1,1334	0,0049	3,11
6,50	7,7	1,3989	5,4116	0,3973	1,3459	0,0053	3,39
6,85	8,1	1,4878	5,0139	0,4381	1,7188	0,0058	3,92
7,62	9,0	1,6839	5,7105	0,4613	1,4651	0,0062	3,18
7,78	9,2	4,5201	12,4625	2,0356	4,8292	0,0271	2,37
8,08	9,6	3,9305	11,2433	1,7167	4,2802	0,0229	2,49
8,30	9,8	3,2517	9,8834	1,3396	3,5962	0,0179	2,68
8,81	10,4	2,4383	9,1953	0,7888	2,7830	0,0105	3,53
9,28	11,0	2,5337	8,2479	0,6893	2,3298	0,0092	3,38
10,19	12,1	2,9530	10,0376	0,8392	2,9842	0,0112	3,56
11,43	13,5	3,3668	12,8063	0,8753	2,8178	0,0117	3,22

Tabela A.26 – Modelo com Amortecedor A1 instalado – Vento Suave - Resposta longitudinal para vento a 0°.

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s ²)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,16	2,6	0,0229	0,0808	0,0073	0,0348	0,0001	4,77
2,89	3,4	0,0257	0,1032	0,0100	0,0377	0,0001	3,77
3,63	4,3	0,0390	0,1544	0,0152	0,0606	0,0002	3,99
4,32	5,1	0,0479	0,1659	0,0216	0,0851	0,0003	3,94
4,98	5,9	0,0630	0,2245	0,0274	0,0900	0,0004	3,28
5,45	6,5	0,0772	0,2632	0,0341	0,1176	0,0005	3,45
6,02	7,1	0,1051	0,3883	0,0480	0,1565	0,0006	3,26
6,53	7,7	0,6268	2,4168	0,1931	0,7772	0,0026	4,02
7,60	9,0	0,6171	2,3116	0,2154	0,7757	0,0029	3,60
7,69	9,1	0,5686	1,9002	0,1757	0,6620	0,0023	3,77
8,12	9,6	0,5247	1,8812	0,1573	0,6233	0,0021	3,96
8,27	9,8	0,5443	2,0410	0,1656	0,5930	0,0022	3,58
8,80	10,4	0,6076	2,0720	0,1825	0,7305	0,0024	4,00
9,91	11,7	0,7027	2,4772	0,2073	0,6944	0,0028	3,35
10,54	12,5	0,7051	2,7076	0,2057	0,6804	0,0027	3,31
11,51	13,6	0,7919	2,9361	0,2472	0,9647	0,0033	3,90

Tabela A.27 – Modelo com Amortecedor A2 instalado – Vento Suave - Resposta longitudinal para vento a 0°.

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s ²)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
1,95	2,3	0,0143	0,1134	0,0045	0,0206	0,0001	4,58
2,62	3,1	0,0171	0,0735	0,0059	0,0221	0,0001	3,75
3,20	3,8	0,0314	0,1027	0,0095	0,0344	0,0001	3,62
3,82	4,5	0,0386	0,1296	0,0141	0,0445	0,0002	3,16
4,80	5,7	0,0730	0,2761	0,0243	0,0957	0,0003	3,94
5,28	6,3	0,0652	0,2533	0,0276	0,1101	0,0004	3,99
5,68	6,7	0,0868	0,3197	0,0344	0,1260	0,0005	3,66
5,83	6,9	0,0978	0,4755	0,0383	0,1465	0,0005	3,83
5,88	7,0	0,7368	2,6616	0,2061	0,6753	0,0027	3,28
6,77	8,0	0,7339	3,2525	0,2144	1,0017	0,0029	4,67
7,04	8,3	0,6697	2,4486	0,1999	0,7009	0,0027	3,51
7,56	9,0	0,8247	3,2916	0,2493	1,0031	0,0033	4,02
8,20	9,7	0,8181	3,0632	0,2333	0,8831	0,0031	3,79
8,24	9,8	0,8127	2,9831	0,2268	0,8691	0,0030	3,83
9,30	11,0	0,9969	3,4294	0,2941	1,0387	0,0039	3,53
10,65	12,6	1,1827	3,8873	0,3294	1,0916	0,0044	3,31

Tabela A.28 – Modelo Sem Amortecedor – Vento Suave -
Resposta transversal para vento a 0°.

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s ²)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,14	2,5	0,0206	0,0816	0,0064	0,0229	0,0001	3,58
2,85	3,4	0,0322	0,1056	0,0109	0,0377	0,0001	3,46
3,62	4,3	0,0635	0,2461	0,0251	0,0977	0,0002	3,89
4,30	5,1	0,1024	0,4999	0,0433	0,2128	0,0004	4,91
4,73	5,6	0,1156	0,4516	0,0481	0,1616	0,0004	3,36
5,08	6,0	0,1775	0,6670	0,0776	0,2717	0,0007	3,50
5,60	6,6	0,2180	0,7466	0,0942	0,2951	0,0008	3,13
5,77	6,8	1,3309	4,6702	0,4460	1,4016	0,0040	3,14
6,18	7,3	1,1416	4,3303	0,3637	1,3332	0,0032	3,67
6,50	7,7	1,0816	3,8843	0,3592	1,3299	0,0032	3,70
6,85	8,1	0,9436	3,7110	0,3253	1,0938	0,0029	3,36
7,62	9,0	2,8791	11,9983	1,3507	5,4862	0,0120	4,06
7,78	9,2	35,2633	60,4358	16,9368	28,9118	0,1505	1,71
8,08	9,6	29,1629	53,1236	13,9399	25,6438	0,1239	1,84
8,30	9,8	22,2602	39,3026	10,5663	18,3596	0,0939	1,74
8,81	10,4	7,3069	15,6882	3,4370	7,2229	0,0306	2,10
9,28	11,0	2,5990	7,9229	1,1681	3,2534	0,0104	2,79
10,19	12,1	2,0835	7,4815	0,9008	2,9292	0,0080	3,25
11,43	13,5	1,6907	6,1254	0,6746	2,4472	0,0060	3,63

Tabela A.29 – Modelo com Amortecedor A1 instalado – Vento Suave - Resposta transversal para vento a 0°.

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s ²)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,16	2,6	0,0227	0,0759	0,0070	0,0278	0,0001	3,97
2,89	3,4	0,0272	0,0814	0,0108	0,0393	0,0001	3,64
3,63	4,3	0,0491	0,1677	0,0219	0,0738	0,0002	3,37
4,32	5,1	0,0705	0,2530	0,0356	0,1352	0,0003	3,80
4,98	5,9	0,1199	0,4115	0,0626	0,2027	0,0006	3,24
5,45	6,5	0,1628	0,5062	0,0828	0,2636	0,0007	3,18
6,02	7,1	0,2135	0,7358	0,1111	0,4308	0,0010	3,88
6,53	7,7	0,9985	3,7720	0,4431	1,5558	0,0039	3,51
7,60	9,0	1,6976	5,7840	0,9381	2,6572	0,0083	2,83
7,69	9,1	1,0917	4,6294	0,5146	1,6428	0,0046	3,19
8,12	9,6	1,2550	4,1714	0,6456	1,9315	0,0057	2,99
8,27	9,8	1,1170	4,1913	0,5433	1,7924	0,0048	3,30
8,80	10,4	1,1110	3,6846	0,4976	1,6457	0,0044	3,31
9,91	11,7	1,2794	6,0504	0,5273	2,0420	0,0047	3,87
10,54	12,5	1,3559	4,6335	0,5737	1,9192	0,0051	3,35
11,51	13,6	1,4975	5,5227	0,5713	1,5909	0,0051	2,78

Tabela A.30 – Modelo com Amortecedor A2 instalado – Vento Suave - Resposta transversal para vento a 0°.

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s ²)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
1,95	2,3	0,0151	0,0684	0,0045	0,0190	0,0000	4,22
2,62	3,1	0,0192	0,0791	0,0070	0,0259	0,0001	3,70
3,20	3,8	0,0361	0,1247	0,0119	0,0483	0,0001	4,06
3,82	4,5	0,0547	0,2091	0,0241	0,0953	0,0002	3,95
4,80	5,7	0,1342	0,4509	0,0528	0,1907	0,0005	3,61
5,28	6,3	0,1130	0,3908	0,0605	0,2168	0,0005	3,58
5,68	6,7	0,1585	0,6153	0,0719	0,2641	0,0006	3,67
5,83	6,9	0,1859	0,6965	0,0899	0,2844	0,0008	3,16
5,88	7,0	1,0194	3,8909	0,3209	1,4284	0,0029	4,45
6,77	8,0	0,9957	3,8551	0,3424	1,1909	0,0030	3,48
7,04	8,3	0,8114	2,7275	0,3237	1,2004	0,0029	3,71
7,56	9,0	1,1298	4,8956	0,4322	1,7370	0,0038	4,02
8,20	9,7	0,9890	3,3176	0,3314	1,1973	0,0029	3,61
8,24	9,8	1,0112	3,9663	0,3699	1,2793	0,0033	3,46
9,30	11,0	1,2381	4,4007	0,4057	1,4815	0,0036	3,65
10,65	12,6	1,5686	5,6797	0,5283	1,9972	0,0047	3,78

Tabela A.31 – Modelo sem Amortecedor – Vento Suave -
Resposta longitudinal para vento a 90°.

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s ²)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,31	2,7	0,0268	0,0947	0,0080	0,0347	0,0001	4,34
3,17	3,8	0,0347	0,1439	0,0184	0,0594	0,0002	3,23
4,05	4,8	0,0494	0,1947	0,0172	0,0571	0,0002	3,32
4,85	5,7	0,0740	0,2510	0,0263	0,0911	0,0002	3,46
5,45	6,5	0,0950	0,3972	0,0336	0,1279	0,0003	3,81
6,03	7,1	0,6581	1,5686	0,3049	0,6821	0,0027	2,24
6,39	7,6	1,3183	4,4245	0,4725	1,3468	0,0042	2,85
6,93	8,2	2,1685	6,1998	0,9347	2,0886	0,0083	2,23
7,54	8,9	2,9303	8,2404	1,3134	2,9252	0,0117	2,23
8,54	10,1	5,2105	10,6366	2,3958	4,3754	0,0213	1,83
9,40	11,1	6,9726	12,9943	3,2328	5,5309	0,0287	1,71

Tabela A.32 – Modelo com Amortecedor A1 instalado – Vento Suave - Resposta longitudinal para vento a 90°.

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s ²)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,14	3,48	0,0253	0,0902	0,0077	0,0413	0,0001	5,36
2,73	3,29	0,0356	0,1292	0,0133	0,0484	0,0001	3,64
3,72	3,08	0,0504	0,1884	0,0194	0,0860	0,0002	4,43
4,68	2,81	0,0791	0,2750	0,0342	0,1153	0,0003	3,37
5,39	2,67	0,2675	0,8598	0,1511	0,4591	0,0013	3,04
5,47	2,65	1,3324	2,2769	0,7892	1,3122	0,0070	1,66
5,63	2,65	1,7558	2,8782	1,0386	1,7189	0,0092	1,66
5,98	2,60	2,7728	4,3135	1,6384	2,5847	0,0146	1,58
6,66	2,56	3,5676	7,5608	2,0684	3,6864	0,0184	1,78
7,08	2,54	1,5014	4,9130	0,7730	2,4561	0,0069	3,18
7,54	2,51	1,2099	4,0260	0,4164	1,3649	0,0037	3,28
8,38	2,40	1,2583	4,3987	0,4220	1,2882	0,0038	3,05
9,11	2,29	1,8106	7,1683	0,5552	2,1586	0,0049	3,89
9,67	2,24	1,9521	6,8948	0,6004	2,2666	0,0053	3,78
10,56	2,21	1,7777	6,1912	0,5834	1,9969	0,0052	3,42

Tabela A.33 – Modelo com Amortecedor A2 instalado – Vento Suave - Resposta longitudinal para vento a 90°.

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s ²)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,70	3,2	0,0244	0,0921	0,0073	0,0258	0,0001	3,53
3,51	4,2	0,0352	0,1214	0,0121	0,0403	0,0001	3,33
4,28	5,1	0,0593	0,2160	0,0194	0,0625	0,0002	3,22
4,88	5,8	0,0739	0,2728	0,0249	0,0842	0,0002	3,38
5,44	6,4	0,0362	0,8509	0,2080	0,4853	0,0018	2,33
5,57	6,6	0,5321	1,0528	0,3103	0,6153	0,0028	1,98
5,64	6,7	0,6079	1,2074	0,3531	0,6747	0,0031	1,91
5,83	6,9	0,6706	1,1727	0,3901	0,6957	0,0035	1,78
6,02	7,1	0,6239	1,1707	0,3605	0,6708	0,0032	1,86
6,64	7,9	1,2281	4,1080	0,4768	1,5276	0,0042	3,20
7,48	8,9	1,2896	4,6419	0,3631	1,2755	0,0032	3,51
8,56	10,1	1,2729	4,8511	0,3526	1,3285	0,0031	3,77
9,22	10,9	1,2500	4,5039	0,3692	1,6100	0,0033	4,36
9,94	11,8	1,2452	5,0422	0,3514	1,4220	0,0031	4,05
10,97	13,0	1,4211	4,9648	0,3992	1,3467	0,0035	3,37

Tabela A.34 – Modelo sem Amortecedor – Vento Suave -
Resposta transversal para vento a 90°.

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s ²)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,31	2,7	0,0281	0,0972	0,0090	0,0310	0,0001	3,44
3,17	3,8	0,0490	0,1521	0,0114	0,0465	0,0002	4,08
4,05	4,8	0,0901	0,3095	0,0362	0,1350	0,0005	3,73
4,85	5,7	0,2052	0,6598	0,0884	0,3038	0,0012	3,44
5,45	6,5	0,3481	1,3140	0,1616	0,5627	0,0022	3,48
6,03	7,1	5,5065	14,0873	2,5676	6,8939	0,0342	2,68
6,39	7,6	8,5726	17,4911	3,9933	7,6386	0,0532	1,91
6,93	8,2	15,6467	28,4571	7,2563	12,4681	0,0968	1,72
7,54	8,9	21,0027	35,7511	9,7347	15,8129	0,1298	1,62
8,54	10,1	30,7292	51,8252	14,2646	22,2235	0,1902	1,56
9,40	11,1	42,1122	69,7047	19,6553	30,3395	0,2621	1,54

Tabela A.35 – Modelo com Amortecedor A1 instalado – Vento Suave - Resposta transversal para vento a 90°.

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s ²)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,14	3,48	0,0277	0,1025	0,0090	0,0346	0,0001	3,84
2,73	3,29	0,0386	0,1151	0,0161	0,0534	0,0002	3,32
3,72	3,08	0,0820	0,3517	0,0393	0,1640	0,0005	4,17
4,68	2,81	0,2108	0,7395	0,1098	0,3353	0,0015	3,05
5,39	2,67	1,3108	4,0050	0,7674	2,3191	0,0102	3,02
5,47	2,65	7,6219	12,8285	4,5212	7,2968	0,0603	1,61
5,63	2,65	10,3792	16,3947	6,1486	9,8396	0,0820	1,60
5,98	2,60	13,4060	21,0828	7,9245	12,4164	0,1057	1,57
6,66	2,56	13,2644	22,1063	7,8508	13,1382	0,1047	1,67
7,08	2,54	3,4147	10,6617	1,9961	5,8507	0,0266	2,93
7,54	2,51	1,4266	4,9244	0,7331	2,5269	0,0098	3,45
8,38	2,40	1,4780	5,2782	0,6722	2,0595	0,0090	3,06
9,11	2,29	2,4128	9,5490	0,9026	3,4764	0,0120	3,85
9,67	2,24	2,6515	9,6836	1,0375	3,4647	0,0138	3,34
10,56	2,21	2,2829	7,7548	1,0647	3,6549	0,0142	3,43

Tabela A.36 – Modelo com Amortecedor A2 instalado – Vento Suave - Resposta transversal para vento a 90°.

Velocidade média no túnel V_m (m/s)	Velocidade reduzida $\frac{V_m}{f_0 \times 0,1125}$	Aceleração (m/s ²)		Deslocamento horizontal (mm)		Deslocamento horizontal rms normalizado $\frac{D_{h,rms}}{H}$	Fator de pico (2)/(1)
		rms	máxima	rms (1)	máximo (2)		
2,70	3,2	0,0304	0,1241	0,0113	0,0452	0,0002	4,00
3,51	4,2	0,0606	0,2077	0,0269	0,0840	0,0004	3,12
4,28	5,1	0,1047	0,3614	0,0466	0,1476	0,0006	3,17
4,88	5,8	0,2124	0,9182	0,1079	0,4066	0,0014	3,77
5,44	6,4	4,2043	8,8804	2,4795	5,2617	0,0331	2,12
5,57	6,6	6,5321	11,8626	3,8538	6,7780	0,0514	1,76
5,64	6,7	8,0653	13,3125	4,7474	7,7878	0,0633	1,64
5,83	6,9	8,5985	13,7586	5,0505	8,1881	0,0673	1,62
6,02	7,1	8,4379	14,1016	4,9357	8,1937	0,0658	1,66
6,64	7,9	8,5000	16,1839	4,9629	8,6251	0,0662	1,74
7,48	8,9	1,6303	5,4397	0,6936	2,3490	0,0092	3,39
8,56	10,1	7,1019	18,3096	2,3452	6,4599	0,0313	2,75
9,22	10,9	6,4319	15,8283	2,1056	5,4554	0,0281	2,59
9,94	11,8	4,8303	14,6456	1,5882	5,1334	0,0212	3,23
10,97	13,0	2,7799	9,3004	1,0361	3,5743	0,0138	3,45