

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

**INFLUÊNCIA DE DETALHES ARQUITETÔNICOS E
EFEITOS DE VIZINHANÇA SOBRE A CARACTERIZAÇÃO
AERODINÂMICA DE UM EDIFÍCIO ALTO**

Livio Pires de Carvalho Melo

Porto Alegre
2020

LIVIO PIRES DE CARVALHO MELO

**INFLUÊNCIA DE DETALHES ARQUITETÔNICOS E
EFEITOS DE VIZINHANÇA SOBRE A CARACTERIZAÇÃO
AERODINÂMICA DE UM EDIFÍCIO ALTO**

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

Porto Alegre

2020

CIP - Catalogação na Publicação

Melo, Livio Pires de Carvalho
Influência de Detalhes Arquitetônicos e Efeitos de
Vizinhança sobre a Caracterização Aerodinâmica de um
Edifício Alto / Livio Pires de Carvalho Melo. -- 2020.
157 f.
Orientador: Acir Mércio Loredo-Souza.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,
BR-RS, 2020.

1. Vento. 2. Edifícios altos. 3. Dinâmica
estrutural. 4. Efeitos de vizinhança. 5. Admitância
aerodinâmica. I. Loredo-Souza, Acir Mércio, orient.
II. Título.

LIVIO PIRES DE CARVALHO MELO

**INFLUÊNCIA DE DETALHES ARQUITETÔNICOS E
EFEITOS DE VIZINHANÇA SOBRE A CARACTERIZAÇÃO
AERODINÂMICA DE UM EDIFÍCIO ALTO**

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

Porto Alegre, 29 de abril de 2020

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

Prof. Nilo Cesar Consoli
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMIDADORA

Prof. Adrián Roberto Wittwer (UNNE/Argentina)
D. Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Gustavo Javier Zani Núñez (UFRGS)
D. Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Letícia Fleck Fadel Miguel (UFRGS)
D. Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Eng. Mário Gustavo Klaus Oliveira (Vento-S Consultoria)
D. Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha família por me ensinar a importância que o estudo tem na formação de um indivíduo. Aos meus avós, Maria Consuelo, Maria Catarina e Gerardo Melo (*in memoriam*). Aos meus pais, José Pires e Maria Noraélina, que sempre me deram todo o apoio necessário para que eu buscasse meus objetivos.

Agradeço encarecidamente ao Prof. Acir Mércio Loredou-Souza, a quem eu considero mais do que um orientador: um amigo. Sua atenção, paciência e, principalmente, vontade de contribuir com a ciência são apenas algumas das virtudes que o fazem alguém tido como referência internacional.

Agradeço aos meus amigos que, juntos de mim, percorreram esta jornada até aqui. Em especial, aos meus conterrâneos: Laís Veríssimo, Daniel Matos e Maria Mariana. Também agradeço à Eduardo Titello, com quem tive a sorte de conhecer antes mesmo de chegar à Porto Alegre. Muitos outros amigos contribuíram de diferentes formas, mas nomeá-los individualmente tornaria esta página demasiadamente extensa (sorte a minha). Sem vocês, tudo isto teria sido mais difícil.

Agradeço imensamente à Roges Leopoldo por todo o auxílio na realização dos ensaios e o companheirismo de LAC. Também agradeço à Marcelo Zanfelize por me ajudar em questões técnicas durante o desenvolvimento do trabalho.

Finalmente, agradeço ao apoio financeiro dado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Reconheço a enorme importância que esse suporte tem no desenvolvimento da ciência do País e serei eternamente grato a ele.

A ciência é aquilo que aprendemos sobre como não deixar enganar nós mesmos.
Richard Feynman.

RESUMO

MELO, L. P. C. **Influência de detalhes arquitetônicos e efeitos de vizinhança sobre a caracterização aerodinâmica de um edifício alto.** 2020. 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A escassez cada vez maior de terrenos desocupados no interior de cidades dificulta a demanda da construção civil, que possui a necessidade de aproveitar terrenos da maneira mais eficiente possível para que a construção de empreendimentos seja financeiramente viável. Conseqüentemente, tem-se alterado a concepção estrutural das edificações, havendo uma tendência à verticalização para maior aproveitamento do espaço. Com a construção de edifícios cada vez mais altos, esbeltos e flexíveis, a consideração das ações do vento passa a ser de fundamental importância durante a concepção estrutural. Entretanto, a enorme quantidade de variáveis envolvidas no fenômeno torna sua previsão bastante complexa, fazendo-se necessária a realização de ensaios experimentais em modelos reduzidos. Como exemplo de variável que interfere no problema, cita-se a presença de vizinhança. Nesse sentido, esta pesquisa tem como foco realizar a caracterização aerodinâmica um edifício alto quando um edifício de interferência é inserido em diferentes posições na vizinhança, além de avaliar o efeito que simplificações geométricas causam. Para isso, foram utilizados dois modelos rígidos de edifícios altos: o primeiro representa um edifício real construído no Brasil, com riqueza de detalhes geométricos na fachada, enquanto o segundo se trata de uma simplificação do primeiro, possuindo altura idêntica e fachadas lisas. Além disso, diferentes perfis de vento foram utilizados durante os ensaios. Portanto, é possível visualizar a influência que os efeitos de vizinhança, detalhes arquitetônicos e a turbulência possuem sobre a caracterização aerodinâmica dos modelos. Essa caracterização é feita em termos de espectros de esforços globais e locais, além da obtenção de funções de admitância aerodinâmica. Em ambos os modelos, verificou-se que a inserção de um modelo de vizinhança à barlavento e em uma posição oblíqua ao modelo principal tende a criar picos de energias que podem ser mais danosos que em outras posições. Além disso, a influência da simplificação geométrica provocou diferenças significativas entre os dois modelos, sobretudo com relação aos esforços de torção e de força na direção transversal ao escoamento, o que ocorre pelo desprendimento cadenciado de vórtices.

Palavras-chave: *Vento; edifícios altos; dinâmica estrutural; efeitos de vizinhança; admitância aerodinâmica.*

ABSTRACT

MELO, L. P. C. **Influence of architectural appurtenances and interference effects on the aerodynamic characterization of a tall building.** 2020. 157p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The increasing scarcity of unoccupied terrains inside cities creates difficulties for civil construction market, which has the need to use land in the most efficient way possible so that their projects are financially viable. Consequently, the structural design of buildings has been altered, with a tendency towards verticalization for greater use of space. With the construction of increasingly tall, slender and flexible buildings, the consideration of wind actions becomes more important during structural design. However, the huge amount of variables involved in the phenomenon makes its prediction quite complex, making it necessary to carry out experimental tests on reduced models. As an example of a variable that interferes with the problem, one could mention the presence of neighboring buildings, which can either increase or decrease loads due to wind. The present research focuses on the aerodynamic characterization of a tall building when an interference building is placed in different positions in the neighborhood. In addition to that, this study evaluates the effect that geometric simplifications can cause on the aerodynamic characterization. In order to do this, two rigid models of tall buildings were used: the first represents a real building built in Brazil, with a wealth of geometric details on the facade, while the second is a simplification of the first, with identical height and smooth facades. Different wind profiles were used during the tests. Therefore, it is possible to visualize the effect that interference effects, architectural appurtenances and turbulence of wind have on the aerodynamic characterization of the models. This characterization is made by means of power spectral density of the loads on the models, in addition to obtaining aerodynamic admittance functions. In both models, it was found that the insertion of a windward neighborhood model and in an oblique position tends to create more damaging resonant dynamic effects than in other positions. In addition, the influence of geometric simplification caused significant differences between the two models, especially when considering torsion and forces in the across-wind direction, which are related to vortex shedding.

Key-words: *Wind; tall buildings; structural dynamics; interference effect; aerodynamic admittance.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Mesa de ensaio utilizada por Ruscheweyh (1980). Fonte: adaptado de Ruscheweyh (1980).	25
Figura 1.2: Empreendimento estudado por Loredó et al., 2007. Fonte: Adaptado de Loredó et al., 2007.	29
Figura 1.3: Modelos utilizados por Kim, Tamura e Yoshida (2011) - a) Modelo principal b) Modelos de interferência. Fonte: adaptado de Kim, Tamura e Yoshida (2011).	30
Figura 1.4: Configurações de ensaio de Kim, Tamura e Yoshida (2011). Fonte: adaptado de Kim, Tamura e Yoshida (2011).	31
Figura 1.5: Comparação entre o estudo de Kim, Tamura e Yoshida (2011) e Hui et al. (2012). a) FI de Kim, Tamura e Yoshida (2011) b) FI do conjunto I de experimentos de Hui et al. (2012). c) FI do conjunto II de experimentos de Hui et al. (2012).	32
Figura 1.6 - Modelos ensaiados por Tanaka et al. (2012). Fonte: adaptado de Tanaka et al (2012).	33
Figura 1.7 - Parâmetros relacionados ao fator de vizinhança. Fonte: Alberti (2015).	34
Figura 1.8: Configurações de ensaios de Bênia (2013). Fonte: adaptado de Bênia (2013).	36
Figura 2.1: Representação dos perfis de velocidades médias e tensões de Reynolds no interior da CLA. Fonte: Loredó-Souza; Schettini; Paluch, 2004.	41
Figura 2.2: Perfil de vento deslizante e turbulento. Fonte: Irwin, Denoon e Scott (2013).	42
Figura 2.3: Referência de forças provocadas pelo vento. Fonte: autor.	46
Figura 2.4: Edificação de referência para o cálculo dos coeficientes aerodinâmicos. Fonte: autor.	47
Figura 2.5: Escoamento do ar ao redor de corpos a) aerodinâmicos e b) rombudos. Fonte: Holmes (2015).	50
Figura 2.6: Influência do desprendimento de vórtices na resposta transversal. Fonte: Adaptado de Irwin, Denoon e Scott (2013).	51
Figura 2.7: Influência da turbulência no espectro da força lateral. Fonte: Blessmann (2005) apud Vogado (2018).	52
Figura 2.8: Exemplo de configuração propícia ao efeito Venturi. Fonte: adaptado de Blocken et al. (2008).	56
Figura 2.9: Deflexão do vento na direção vertical. Fonte: Carpeggiani (2004).	57
Figura 2.10: Densidade espectral da variância. Fonte: adaptado de Blessmann (2005).	59

Figura 2.11: Metodologia das vibrações aleatórias de Davenport (1963). Fonte: adaptado de Holmes (2015).	60
Figura 2.12: Dados experimentais e curva aproximada da admitância aerodinâmica. Fonte: adaptado de Vickery (1965) apud Holmes (2015).	61
Figura 3.1: Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann. Fonte: Núñez, Loredo-Souza, Rocha (2012).	63
Figura 3.2: Circuito do túnel de vento prof. Joaquim Blessmann. Fonte: Loredo-Souza; Schettini; Paluch (2004).	64
Figura 3.3: Perfis de velocidades médias, intensidade de turbulência e macroescala longitudinal da turbulência para três tipos de ventos. Fonte: Núñez, Loredo-Souza e Rocha (2012).	67
Figura 3.4: Configurações de ensaio. Fonte: autor.	68
Figura 3.5: Elevações frontal e lateral do Modelo I. Fonte: adaptado de LAC (2019).	69
Figura 3.6: Planta baixa do pavimento tipo do Modelo I. Fonte: adaptado de LAC (2019).	70
Figura 3.7 - Subdivisão do Modelo I em zonas. Fonte: autor.	71
Figura 3.8: Posição das tomadas no pavimento tipo - corte representativo da Zona 4. Fonte: LAC (2019).	72
Figura 3.9: Perspectiva do Modelo II. Fonte: autor.	74
Figura 3.10: Posição em planta das tomadas do Modelo II. Fonte: autor.	74
Figura 3.11: Ensaio do Modelo II na condição isolada. Fonte: autor.	75
Figura 4.1: Sistema de aquisição de dados do LAC. Fonte: Sartori (2010).	77
Figura 4.2: Transdutor de pressões ZOC33. Fonte: Scanivalve (2016).	78
Figura 4.3: Exemplo de integração de pressões da tomada i. Fonte: autor.	78
Figura 4.4: Exemplo de aplicação do filtro de média móvel simples centrada. Fonte: autor.	82
Figura 5.1: Perfil vertical de velocidades médias e intensidade de turbulência. Fonte: autor.	83
Figura 5.2 - Espectros da componente longitudinal da turbulência em $Z = 266$ mm e $p = 0,11$. Fonte: autor.	84
Figura 5.3 - Espectros da componente longitudinal da turbulência em $Z = 266$ mm e $p = 0,23$. Fonte: autor.	85
Figura 5.4 - Espectros da componente longitudinal da turbulência em $Z = 266$ mm e $p = 0,26$. Fonte: autor.	85
Figura 5.5: Espectros de potência de forças globais em x do Modelo I. Fonte: autor.	87
Figura 5.6: Espectros de potência de forças globais em y do Modelo I. Fonte: autor.	87
Figura 5.7: Espectros de potência de momento torçor do Modelo I. Fonte: autor.	88

Figura 5.8: Espectro de força global em x do Modelo I para configuração tipo tandem e $p = 0,11$. Fonte: autor.....	88
Figura 5.9: Espectro de força global em x do Modelo I para configuração tipo tandem e $p = 0,23$. Fonte: autor.....	89
Figura 5.10: Espectro de força global em x do Modelo I para configuração tipo tandem e $p = 0,26$. Fonte: autor.....	89
Figura 5.11 - Espectro de força global em y do Modelo I para configuração tipo tandem e $p = 0,11$. Fonte: autor.....	91
Figura 5.12: Espectro de força global em y do Modelo I para configuração tipo tandem e $p = 0,23$. Fonte: autor.....	91
Figura 5.13: Espectro de força global em y do Modelo I para configuração tipo tandem e $p = 0,26$. Fonte: autor.....	92
Figura 5.14: Espectro de torção do Modelo I para configuração tipo tandem e $p = 0,11$. Fonte: autor.....	93
Figura 5.15: Espectro de torção do Modelo I para configuração tipo tandem e $p = 0,23$. Fonte: autor.....	93
Figura 5.16: Espectro de torção do Modelo I para configuração tipo tandem e $p = 0,26$. Fonte: autor.....	94
Figura 5.17: Espectro de força global em x do Modelo I para configuração oblíqua e $p = 0,11$. Fonte: autor.....	95
Figura 5.18: Espectro de força global em x do Modelo I para configuração oblíqua e $p = 0,23$. Fonte: autor.....	95
Figura 5.19: Espectro de força global em x do Modelo I para configuração oblíqua e $p = 0,26$. Fonte: autor.....	96
Figura 5.20: Espectro de força global em y do Modelo I para configuração oblíqua e $p = 0,11$. Fonte: autor.....	97
Figura 5.21: Espectro de força global em y do Modelo I para configuração oblíqua e $p = 0,23$. Fonte: autor.....	97
Figura 5.22: Espectro de força global em y do Modelo I para configuração oblíqua e $p = 0,26$. Fonte: autor.....	98
Figura 5.23: Espectro de torção do Modelo I para configuração oblíqua e $p = 0,11$. Fonte: autor.	99
Figura 5.24: Espectro de torção do Modelo I para configuração oblíqua e $p = 0,23$. Fonte: autor.	99

Figura 5.25: Espectro de torção do Modelo I para configuração oblíqua e $p = 0,26$. Fonte: autor.	100
Figura 5.26: Espectro de força global em x do Modelo I para configuração de esteira e $p = 0,11$. Fonte: autor.....	101
Figura 5.27: Espectro de força global em x do Modelo I para configuração de esteira e $p = 0,23$. Fonte: autor.....	101
Figura 5.28: Espectro de força global em x do Modelo I para configuração de esteira e $p = 0,26$. Fonte: autor.....	102
Figura 5.29: Espectro de força global em y do Modelo I para configuração de esteira e $p = 0,11$. Fonte: autor.....	102
Figura 5.30: Espectro de força global em y do Modelo I para configuração de esteira e $p = 0,23$. Fonte: autor.....	103
Figura 5.31: Espectro de força global em y do Modelo I para configuração de esteira e $p = 0,26$. Fonte: autor.....	103
Figura 5.32: Espectro de torção do Modelo I para configuração de esteira e $p = 0,11$. Fonte: autor.....	104
Figura 5.33: Espectro de torção do Modelo I para configuração de esteira e $p = 0,23$. Fonte: autor.....	104
Figura 5.34: Espectro de torção do Modelo I para configuração de esteira e $p = 0,26$. Fonte: autor.....	105
Figura 5.35: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo I na condição isolada. Fonte: autor.	106
Figura 5.36: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo I com vizinhança na posição A. Fonte: autor.....	107
Figura 5.37: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo I com vizinhança na posição C. Fonte: autor.....	107
Figura 5.38: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo I com vizinhança na posição F. Fonte: autor.	108
Figura 5.39: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo I com vizinhança na posição H. Fonte: autor.....	108
Figura 5.40: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo I com vizinhança na posição K. Fonte: autor.....	109
Figura 5.41: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo I com vizinhança na posição M. Fonte: autor.....	109

Figura 5.42: Espectro de força global em x do Modelo II na configuração isolada. Fonte: autor.	111
Figura 5.43: Espectro de força global em y do Modelo II na configuração isolada. Fonte: autor.	111
Figura 5.44: Espectro de torção do Modelo II na configuração isolada. Fonte: autor.	112
Figura 5.45: Espectro de forças globais em x do Modelo II para configuração tipo tandem e $p = 0,11$. Fonte: autor.	113
Figura 5.46: Espectro de forças globais em x do Modelo II para configuração tipo tandem e $p = 0,23$. Fonte: autor.	113
Figura 5.47: Espectro de forças globais em x do Modelo II para configuração tipo tandem e $p = 0,26$. Fonte: autor.	114
Figura 5.48: Espectro de forças globais em y do Modelo II para configuração tipo tandem e $p = 0,11$. Fonte: autor.	115
Figura 5.49: Espectro de forças globais em y do Modelo II para configuração tipo tandem e $p = 0,23$. Fonte: autor.	115
Figura 5.50: Espectro de forças globais em y do Modelo II para configuração tipo tandem e $p = 0,26$. Fonte: autor.	116
Figura 5.51: Espectro de torção do Modelo II para configuração tipo tandem e $p = 0,11$. Fonte: autor.	117
Figura 5.52: Espectro de torção do Modelo II para configuração tipo tandem e $p = 0,23$. Fonte: autor.	117
Figura 5.53: Espectro de torção do Modelo II para configuração tipo tandem e $p = 0,26$. Fonte: autor.	118
Figura 5.54: Espectro de forças globais em x do Modelo II para configuração oblíqua e $p = 0,11$. Fonte: autor.	119
Figura 5.55: Espectro de forças globais em x do Modelo II para configuração tipo oblíqua e $p = 0,23$. Fonte: autor.	119
Figura 5.56: Espectro de forças globais em x do Modelo II para configuração tipo oblíqua e $p = 0,26$. Fonte: autor.	120
Figura 5.57: Espectro de forças globais em y do Modelo II para configuração tipo oblíqua e $p = 0,11$. Fonte: autor.	121
Figura 5.58: Espectro de forças globais em y do Modelo II para configuração tipo oblíqua e $p = 0,23$. Fonte: autor.	121

Figura 5.59: Espectro de forças globais em y do Modelo II para configuração tipo oblíqua e $p = 0,26$. Fonte: autor.	122
Figura 5.60: Espectro de torção do Modelo II para configuração tipo oblíqua e $p = 0,11$. Fonte: autor.	123
Figura 5.61: Espectro de torção do Modelo II para configuração tipo oblíqua e $p = 0,23$. Fonte: autor.	123
Figura 5.62: Espectro de torção do Modelo II para configuração tipo oblíqua e $p = 0,26$. Fonte: autor.	124
Figura 5.63: Espectro de forças globais em x do Modelo II para configuração de esteira e $p = 0,11$. Fonte: autor.	124
Figura 5.64: Espectro de forças globais em x do Modelo II para configuração de esteira e $p = 0,23$. Fonte: autor.	125
Figura 5.65: Espectro de forças globais em x do Modelo II para configuração de esteira e $p = 0,26$. Fonte: autor.	125
Figura 5.66: Espectro de forças globais em y do Modelo II para configuração de esteira e $p = 0,11$. Fonte: autor.	126
Figura 5.67: Espectro de forças globais em y do Modelo II para configuração de esteira e $p = 0,23$. Fonte: autor.	126
Figura 5.68: Espectro de forças globais em y do Modelo II para configuração de esteira e $p = 0,26$. Fonte: autor.	127
Figura 5.69: Espectro de torção do Modelo II para configuração de esteira e $p = 0,11$. Fonte: autor.	127
Figura 5.70: Espectro de torção do Modelo II para configuração de esteira e $p = 0,23$. Fonte: autor.	128
Figura 5.71: Espectro de torção do Modelo II para configuração de esteira e $p = 0,26$. Fonte: autor.	128
Figura 5.72: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo II na condição isolada. Fonte: autor.	129
Figura 5.73: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo II com vizinhança na posição A. Fonte: autor.	130
Figura 5.74: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo II com vizinhança na posição C. Fonte: autor.	130
Figura 5.75: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo II com vizinhança na posição F. Fonte: autor.	131

Figura 5.76: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo II com vizinhança na posição H. Fonte: autor.....	131
Figura 5.77: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo II com vizinhança na posição K. Fonte: autor.....	132
Figura 5.78: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo II com vizinhança na posição M. Fonte: autor.....	132
Figura 5.79: Espectros de forças globais em x e respectivas funções de admitância aerodinâmica dos Modelos I e II. Fonte: autor.	134
Figura 5.80: Espectros de forças em globais em y e respectivas funções de admitância aerodinâmica dos Modelos I e II. Fonte: autor.....	135
Figura 5.81: Espectros de torção e respectivas funções de admitância aerodinâmica dos Modelos I e II. Fonte: autor.....	136
Figura 5.82: Espectros de forças em x divididos por zona para $p = 0,11$	137
Figura 5.83: Espectros de forças em y divididos por zona para $p = 0,11$	138
Figura 5.84: Espectros de torção divididos por zona para $p = 0,11$	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Altura gradiente para diferentes categorias de terreno segundo a NBR 6123/1988.	40
Tabela 3.1: Expoente p e categorias de terreno segundo a NBR 6123/1988.	66
Tabela 3.2: Características do Modelo I.....	70
Tabela 3.3: Característica do Modelo II.....	73

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas maiúsculas

A – Área de referência.

A_i – Área de influência da i -ésima tomada.

A_x – Projeção da área no eixo x .

A_y – Projeção da área no eixo y .

B_x – Dimensão do edifício na direção x .

B_y – Dimensão do edifício na direção y .

C_a – Coeficiente da força de arrasto.

C_f – Coeficiente de força aerodinâmica.

C_l – Coeficiente da força lateral.

C_x – Coeficiente de força na direção x .

C_y – Coeficiente de força na direção y .

C_t – Coeficiente de torção.

$\vec{F}(t)$ – Força resultante no instante t .

\bar{F} – Força média atuante em um edifício.

F_a – Força de arrasto, na direção do vento.

F_x – Força total na direção x .

$F_x(t)$ – Força total na direção x e no instante t .

F_y – Força total na direção y .

$F_y(t)$ – Força total na direção y e no instante t .

$F(w)$ – Transformada de Fourier da função contínua $f(t)$.

H – Altura da edificação.

$I_i(\underline{x})$ – Intensidade de turbulência na posição \underline{x} e direção i .

$I_1(z)$ – Intensidade da componente longitudinal de turbulência na direção longitudinal.

L – Comprimento característico da edificação.

L_1 – Escala integral de turbulência longitudinal.

L_i – Distância entre a projeção da linha de atuação da i -ésima tomada de pressão e o centro de torção do edifício.

M_t – Momento torçor na base da edificação.

$M_t(t)$ – Momento torçor instantâneo.
 N – Número total de tomadas de pressão de um modelo.
 P – Profundidade, dimensão do edifício paralela à direção do vento.
 P_{atm} – Pressão atmosférica.
 $P(t)$ – Pressão instantânea, medida em relação à pressão estática.
 $P_i(t)$ – Pressão instantânea na i -ésima tomada.
 R – Constante universal dos gases.
 S – Superfície da estrutura para a qual se deseja obter a resultante $\vec{F}(t)$.
 St – Número de Strouhal.
 $S_F(f)$ – Densidade espectral de potência da força desenvolvida em um edifício.
 $S_u(f)$ – Densidade espectral de potência da variável $u(t)$ na frequência f .
 $S_v(f)$ – Densidade espectral de potência do vento.
 T – Tempo total de amostragem.
 \vec{U} – Cossenos diretores da normal à superfície que se deseja obter a resultante $\vec{F}(t)$.
 V – Velocidade do vento.
 V_{cr} – Velocidade crítica para a qual a frequência de desprendimento de um par de vórtices coincide com a frequência natural da estrutura.
 $\overline{V_H}$ – Velocidade média do vento no topo do edifício.
 X_n – Conjunto de dados discretos.
 Y_n – Conjunto suavizado de dados discretos.

Letras romanas minúsculas

f_n – Frequência natural do n -ésimo modo de vibração da estrutura.
 f_s – Frequência de desprendimento de um par de vórtices.
 k – Quantidade de pontos utilizados para o cálculo da média (largura de janela).
 k_0 – Coeficiente que vincula a pressão dinâmica à pressão estática diferencial.
 k_b – Fator de bloqueio.
 p – Expoente da lei potencial do perfil de velocidade média do vento.
 $p(t)$ – Pressão instantânea medida em uma tomada na superfície do modelo.
 q – Pressão dinâmica (ao longe).
 $\overline{q_H}$ – Pressão dinâmica média no topo do modelo.
 t – Tempo.

z_g – Altura gradiente.

z_d – Deslocamento do plano-zero.

z_0 – Comprimento de rugosidade, ou rugosidade aerodinâmica.

Letras gregas

ΔPa – Diferença de pressão estática.

Θ – Temperatura durante o ensaio.

θ_i – Ângulo diretor da normal à superfície da i -ésima tomada de pressão.

ρ_{ar} – Massa específica do ar.

σ_u^2 – Variância de $u(t)$.

ω – Frequência angular.

φ – Ângulo de inclinação relativa do edifício.

χ_a – Função de admitância aerodinâmica.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	21
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE.....	24
1.3 RELEVÂNCIA DA PESQUISA	37
1.4 OBJETIVOS.....	37
2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	39
2.1 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA (CLA)	39
2.2 PERFIS DE VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO.....	42
2.3 TURBULÊNCIA.....	44
2.4 CARREGAMENTOS DEVIDOS AO VENTO EM EDIFÍCIOS.....	46
2.5 EFEITOS DINÂMICOS	48
2.5.1 Energia cinética das rajadas	48
2.5.2 Desprendimento cadenciado de vórtices.....	49
2.5.3 Martelamento	52
2.5.4 Galope	53
2.5.5 Drapejamento	55
2.6 EFEITOS DE VIZINHANÇA CONSIDERADOS NA NORMA BRASILEIRA	55
2.6.1 Efeito Venturi.....	55
2.6.2 Deflexão do vento na direção vertical.....	56
2.6.3 Turbulência na esteira	57
2.7 ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.....	57
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	62
3.1 TÚNEL DE VENTO <i>PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN</i>	62
3.2 SIMULAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES MÉDIAS DO VENTO	66
3.3 EDIFÍCIOS MODELOS E CONFIGURAÇÕES DE ENSAIO.....	67
3.3.1 Modelo I.....	68
3.3.2 Modelo II.....	72

4 PROCESSAMENTO DE DADOS	76
4.1 INTEGRAÇÃO DE PRESSÕES	76
4.2 TRANSFORMADA DE FOURIER	80
4.3 SUAVIZAÇÃO DOS ESPECTROS	81
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
5.1 ESCOAMENTO DO AR	83
5.2 MODELO I	86
5.2.1 Configuração isolada.....	86
5.2.2 Configuração de vizinhança tipo <i>tandem</i>	88
5.2.3 Configuração de vizinhança tipo oblíqua.....	94
5.2.4 Configuração de vizinhança com obstáculos na esteira.....	100
5.2.5 Funções de admitância aerodinâmica	105
5.3 MODELO II	110
5.3.1 Configuração isolada.....	110
5.3.2 Configuração tipo <i>tandem</i>	112
5.3.3 Configuração de vizinhança tipo oblíqua.....	118
5.3.4 Configuração de vizinhança com obstáculo na esteira	124
5.3.5 Funções de admitância aerodinâmica	129
5.4 COMPARAÇÕES ENTRE OS MODELOS	133
6 CONCLUSÕES.....	139
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	140
REFERÊNCIAS.....	141
APÊNDICE I - FUNÇÕES DE ADMITÂNCIA AERODINÂMICA DO MODELO I.....	145
APÊNDICE II - FUNÇÕES DE ADMITÂNCIA AERODINÂMICA DO MODELO II.....	151

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma breve introdução à problemática da ação do vento em edificações, além de ilustrar como seu carregamento é levado em consideração. Em seguida, a relevância da pesquisa é descrita, com posterior exposição dos objetivos a serem alcançados.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O crescimento urbano é um dos principais responsáveis pela aglomeração contínua de pessoas em um pequeno espaço físico. A escassez cada vez maior de terrenos desocupados no interior de cidades dificulta a demanda da construção civil, que possui a necessidade de aproveitar terrenos da maneira mais eficiente possível para que a construção de empreendimentos seja financeiramente viável. Consequentemente, tem-se alterado a concepção estrutural das edificações, havendo uma tendência à verticalização para maior aproveitamento do espaço.

Com o aprimoramento das técnicas de construção e o desenvolvimento de materiais mais resistentes, as edificações passaram a ser dimensionadas com menor consumo de material, tornando-se mais econômicas. Contudo, esta prática levou ao surgimento de um problema: as estruturas passaram a ser concebidas com maior flexibilidade e, frequentemente, com menor amortecimento estrutural. Dessa forma, carregamentos horizontais atuantes em edifícios ganharam notória importância ao longo das últimas décadas, uma vez que as edificações, antes robustas e baixas, passaram a se tornar mais altas e esbeltas.

Especificamente, os carregamentos horizontais provocados pelo vento ou por atividades sísmicas são de grande relevância em projetos de edifícios altos, embora possuam características de atuação diferentes. Podem afetar a utilização da edificação, provocando mal-estar em seus ocupantes e danificando esquadrias e revestimentos. Além disso, em casos extremos, a segurança da estrutura pode ser comprometida, caso essas ações não sejam consideradas de maneira apropriada durante a fase de concepção estrutural.

Ao longo da história, carregamentos provocados por atividades sísmicas e pelo vento provocaram danos de uma ordem de grandeza similar, ambos trazendo enormes prejuízos à

civilização. Entretanto, é bem mais rara a ocorrência de eventos de sismos severos do que de grandes tempestades de vento, que ocorrem quase diariamente em algum lugar da Terra (HOLMES, 2015). Ademais, à medida que os edifícios aumentam em altura, os carregamentos causados pelo vento se tornam mais preocupantes que os carregamentos devidos aos fenômenos de sismo para o dimensionamento, tanto para o estado limite último quanto o estado limite de serviço (KIM *et al.*, 2014).

Nesse contexto, a atual metodologia de dimensionamento de diversos projetistas, no cenário brasileiro, baseia-se nas orientações dadas pela NBR 6123 (ABNT, 1988) para determinação da ação devida ao vento em estruturas. Sendo assim, deve-se compreender as simplificações inerentes à sua utilização, reconhecendo seus limites de aplicações. Grande parte dos códigos normativos se baseiam em ensaios de modelos isolados com geometria simples, sem detalhes geométricos de fachadas, para fornecer recomendações durante a fase de projeto.

Tais recomendações de códigos normativos são satisfatórias em algumas circunstâncias, principalmente ao se considerar as ações longitudinais do vento quando este incide perpendicularmente às fachadas de edificações geometricamente simples. Entretanto, nem sempre o carregamento mais desfavorável provocado pelo vento ocorre nas direções especificadas pela norma, de tal forma que, em alguns casos, a direção oblíqua pode representar o caso mais severo. Além do que, não raramente, o carregamento transversal à direção de incidência do vento possui uma magnitude similar ou superior ao carregamento longitudinal do vento, principalmente flutuante, embora sua consideração por alguns códigos normativos ainda seja imprecisa (IRWIN; DENOON; SCOTT, 2013).

Outra situação na qual não há grande precisão é ao se tratar da componente dinâmica da ação devida ao vento em estruturas, pois códigos normativos, de maneira geral, fornecem processos simplificados para sua determinação. Como a concepção estrutural de estruturas flexíveis, com frequências de vibração abaixo de 1,0 Hz, vem se tornando cada vez mais frequente, torna-se necessária a adoção de métodos mais precisos que considerem esse efeito.

Geometrias complexas, nas quais o escoamento do ar pode ser sensivelmente modificado, compreendem outro ponto de imprecisão da NBR 6123/1988. Edifícios altos eram tradicionalmente concebidos com seções transversais simétricas, tais como seções quadradas, retangulares, circulares e triangulares para evitar que vibrações causadas por atividades sísmicas pudessem gerar efeitos de torção excessivos causados por excentricidade do centro de

massa. Entretanto, a prática atual tem se desvinculado desta escolha por seções simétricas, dando origem à concepção estrutural com diversas formas geométricas complexas, dentre as quais muitas reduzem as forças causadas pelo vento devido ao seu formato aerodinâmico (TANAKA *et al.*, 2012). Nesses casos, detalhes geométricos não considerados pela Norma podem exercer papel importante nas ações sobre o edifício, principalmente para o revestimento.

Efeitos de vizinhança também são estimados de maneira apenas aproximada em códigos normativos. Em alguns casos, a depender da distância entre a edificação e os obstáculos, pode haver um efeito de proteção. Entretanto, também pode haver uma amplificação das ações do vento, principalmente dinâmicas, sobre as edificações. Avaliar com precisão o efeito de vizinhança é uma tarefa difícil, pois há diversas variáveis envolvidas no problema, tais como o espaçamento entre os edifícios, seus formatos, o tipo de terreno, a velocidade e a direção do vento.

Considerando a complexidade do fenômeno, a própria NBR 6123/1988 ressalta que suas recomendações não devem ser aplicadas para edificações de formas, dimensões ou localização fora do comum. Sendo assim, meios mais precisos de se estimar a ação do vento devem ser utilizados. Como alternativas, podem-se mencionar a simulação numérica em programas computacionais e a realização de ensaios experimentais em modelos reduzidos. Análises numéricas que simulam o escoamento do ar ainda não são capazes de prever a ação do vento de maneira adequada para as mais variadas situações de projeto. Dessa forma, os ensaios experimentais em túneis de vento consistem, atualmente, na maneira mais confiável de se avaliar os efeitos do vento em edificações.

Túneis de vento para estudos de construções começaram a ser utilizados no final do século XIX. Para Holmes (2015), acredita-se que o primeiro trabalho nesse dispositivo foi feito por Kernot (1893), na Austrália, enquanto o *American Society of Civil Engineers* (1980) *apud* Oliveira (2003) atribuem este feito a Eiffel, Prandtl e Irminger. Atualmente, o uso do túnel de vento está amplamente difundido entre os projetistas estruturais, tendo sua importância amplamente reconhecida e, até mesmo, recomendada por códigos normativos em algumas situações. Além de ser utilizado para fins de dimensionamento de edificações, os túneis de vento são largamente utilizados em diversos tipos de estudos, tais como de dispersão de poluentes, de influência de topografia sobre os ventos, de torres de linha de transmissão, etc (BLESSMANN, 2011).

Os ensaios em túneis de vento são recomendáveis sempre que a estrutura assumir formas geométricas diferentes das convencionais, ou quando elas forem dimensionadas com propriedades estruturais que proporcionem a ocorrência de fenômenos dinâmicos devido à incidência do vento. Além disso, quando houver grande concentração de obstáculos em sua vizinhança, também é importante a realização de ensaios experimentais, já que o escoamento pode estar sendo sensivelmente modificado pelo seu entorno.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE

O primeiro estudo sobre efeitos de vizinhança parece ter sido realizado por Harris (1934), que avaliou os efeitos que o *Empire State Building* sofreria com a construção de dois edifícios menores em suas adjacências. Seus resultados indicaram que, ainda que algumas fachadas sofressem um aumento local de pressão, a vizinhança proporcionava um efeito de proteção com relação às forças de arrasto. Entretanto, com relação ao momento de torção, verificou-se que ele seria praticamente dobrado ao longo da altura dos edifícios vizinhos.

Blessmann e Riera (1980) verificaram o efeito de vizinhança em um edifício alto quadrado (relação altura sobre lado igual a seis) quando outro modelo idêntico era colocado ao seu redor. Neste estudo, foram avaliados as forças de flexão e momentos de torção. Foram testadas 15 posições diferentes dos edifícios em dois perfis de vento: o primeiro, uniforme e suave, enquanto o segundo foi deslizante e turbulento. Os resultados revelaram que a vizinhança pode exercer uma interferência significativa, chegando a triplicar o momento de torção máximo sobre o edifício em relação ao caso isolado. Além disso, verificou-se um aumento de 40% nas forças horizontais devidas ao vento.

Ruscheweyh (1980) foi um dos pioneiros a estudar efeitos de vizinhança em modelos com seção transversal diferente da quadrada. O modelo principal utilizado por ele era retangular, tendo sido colocado próximo a um modelo mudo idêntico em diferentes posições, levando em consideração ainda a inclinação relativa do modelo secundário. Dessa forma, além de verificar a influência da posição relativa entre os edifícios, foi possível analisar a influência da inclinação relativa (φ) do modelo secundário. A Figura 1.1 apresenta a mesa de ensaio com as diferentes variáveis utilizadas por ele. Todos os ensaios foram realizados com $\beta = 90^\circ$, e foram medidos o momento de tombamento na direção do vento e a torção do edifício.

Seus resultados indicaram que o ângulo relativo φ do edifício vizinho pouco influenciava o momento de tombamento, tanto estático quanto dinâmico. Além disso, foi verificado também que o afastamento adimensional, dado pela relação a/H , influenciava pouco o momento de tombamento dinâmico, que foi aproximadamente 120% maior em relação ao caso isolado. A pior situação do comportamento dinâmico foi obtida com α aproximadamente igual a 10° , ou seja, modelo mudo posicionado de maneira levemente oblíqua.

Com relação à torção do edifício, verificou-se que ela é bastante sensível ao afastamento adimensional a/H , tendo valor máximo quando essa relação é igual a 1,0, sofrendo redução contínua com o aumento do afastamento do edifício da vizinhança. Ao verificar a influência do afastamento lateral y/B na torção do edifício, os resultados indicaram que o pior cenário ocorre quando esse afastamento está entre 0 e 1, decrescendo com valores maiores.

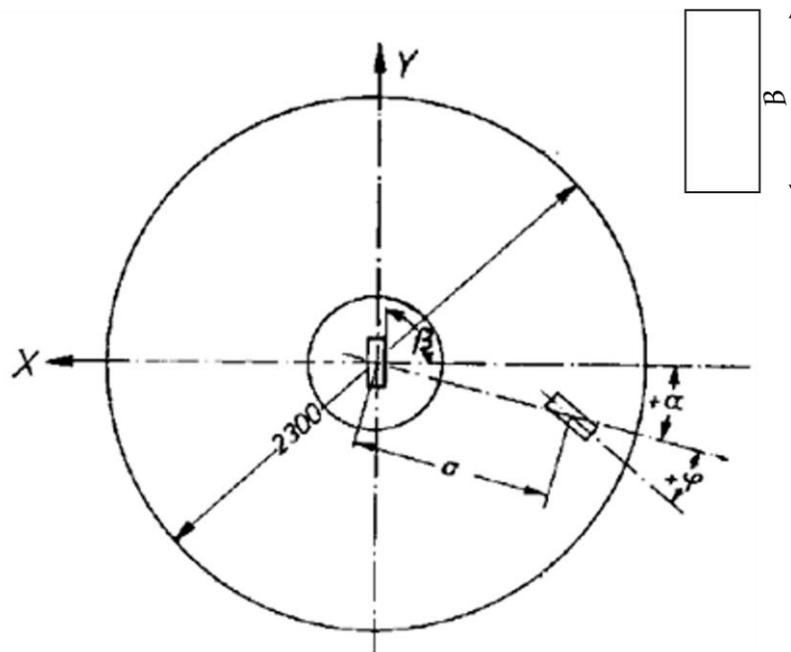


Figura 1.1: Mesa de ensaio utilizada por Ruscheweyh (1980). Fonte: adaptado de Ruscheweyh (1980).

Em uma pesquisa com edifícios altos de seções retangulares, Sykes (1983) analisou a resposta dinâmica de um modelo aeroelástico quando um vizinho com mesma seção transversal era inserido em suas redondezas para diferentes velocidades reduzidas do vento. O modelo de vizinhança teve duas alturas: a própria altura do modelo principal e metade desta. Em todos os testes, o vento incidiu perpendicularmente à maior face do modelo principal, enquanto o modelo secundário foi inserido tanto com a maior face quanto com a menor face perpendiculares ao vento. Para comparar os resultados, utilizou-se o fator de interferência, definido como a razão

entre o deslocamento no topo do modelo no caso com vizinhança e o mesmo deslocamento no caso do modelo isolado. Com relação ao efeito estático longitudinal, percebeu-se que o obstáculo com altura igual ao modelo principal causou um efeito de proteção, enquanto o modelo mais baixo causou um leve aumento no fator de interferência. Já com relação ao efeito flutuante longitudinal, o fator de vizinhança foi igual a dois, mostrando a importância do problema.

Posteriormente, Blessmann (1985) verificou o efeito dinâmico que surgia em um modelo aeroelástico quadrado (relação altura sobre lado igual a 4,3) quando um edifício idêntico era inserido em suas proximidades. Dois perfis de vento, um uniforme e suave e outro deslizante e turbulento, foram utilizados. O fator de martelamento, definido como a razão entre a aceleração rms com vizinhança e a aceleração rms do modelo isolado, foi estudado para 15 configurações de vizinhança. Seus resultados indicaram que a aceleração na direção do vento sofreu aumento de até 78% em relação ao caso sem vizinhança, enquanto a aceleração transversal teve aumento de até 73%. O efeito da turbulência, na maior parte das configurações testadas, agiu de modo a reduzir o fator de martelamento.

Kareem (1987) pesquisou a resposta dinâmica que um edifício de seção quadrada sofria quando um vizinho idêntico era inserido em suas proximidades. Neste estudo, utilizou-se o fator de interferência como sendo a razão entre o valor rms do deslocamento no topo do modelo na configuração com vizinhança e o valor rms do deslocamento no topo do modelo isolado. Verificou-se a influência da velocidade reduzida do vento e da turbulência do escoamento incidente. Sua principal conclusão é de que os efeitos de vizinhança não podem ser negligenciados, tendo sido obtidos fatores de interferência superiores a quatro, tanto na direção longitudinal quanto na direção transversal. Outra conclusão é que a turbulência age no sentido de amenizar o efeito de vizinhança. Em um escoamento de baixa turbulência, notou-se que a esteira do obstáculo apresentava um espectro de frequência com picos concentrados ao redor de uma estreita gama de frequências, favorecendo a ocorrência de fenômenos dinâmicos. Ao se inserir turbulência no escoamento, o espectro de frequência à esteira do obstáculo passou a não exibir o pico observado no caso sem turbulência, reduzindo o fator de interferência.

Yahyai *et al.* (1992) estudou efeitos de vizinhança em um modelo aeroelástico de um edifício alto quando um obstáculo idêntico ao edifício principal foi inserido em diversas posições. Os resultados mostraram que, quando o obstáculo estava alinhado ao edifício principal, pouco foi a influência na resposta dinâmica do modelo principal. Condições mais

severas no modelo principal ocorreram quando havia algum afastamento lateral do obstáculo, sendo máximas próximas à região de descolamento da esteira do obstáculo, onde a intensidade de turbulência é bastante elevada. Além disso, este estudo verificou a influência do obstáculo quando inserido na esteira do modelo principal, concluindo que sua presença causa pouco impacto ao edifício à barlavento.

Khanduri, Stathopoulos e Bédard (1998) apresentaram um extenso estudo reunindo mais de seis décadas de trabalhos sobre efeitos de vizinhança, com o intuito de analisar os dados e verificar a possibilidade de fazer generalizações sobre esse fenômeno. Dentre algumas diretrizes recomendadas pelos autores, estão:

- a) Efeitos de interferência são mais intensos em regiões de campo aberto, decrescendo à medida que se passa para regiões urbanas. Isso é explicado pelo fato de que, em regiões de campo aberto, a baixa turbulência cria regiões de esteiras bem organizadas, com alto conteúdo de energia. Por outro lado, regiões de elevada densidade urbana acrescenta turbulência, que afeta a organização dos vórtices desprendidos, redistribuindo energia em larguras de bandas mais amplas;
- b) Carregamentos médios sofrem efeito de proteção com o aumento da seção transversal do edifício à barlavento, mas carregamentos dinâmicos podem aumentar cerca de 200% em um edifício alto de seção quadrada quando outro edifício de seção quadrada de mesma altura, mas com lado 2,5 vezes maior, é colocado à barlavento;
- c) Edifícios altos podem provocar efeitos de proteção no carregamento médio em edifícios menores localizados na esteira, mas carregamentos dinâmicos podem aumentar em mais de 70% devido à deflexão vertical do vento;
- d) De maneira geral, os efeitos que edifícios à sotavento produzem em edifícios à barlavento não são significativos. Entretanto, para algumas localizações próximas entre os modelos, a esteira do edifício à barlavento pode ser sensivelmente modificada, ocasionando ações dinâmicas consideráveis no próprio edifício à barlavento;
- e) A direção crítica de incidência do vento depende do formato e da localização dos edifícios, mas, geralmente, a incidência do vento perpendicular à face de um edifício pode produzir efeitos de interferência mais significativos.

Eles reconhecem ainda a necessidade de mais ensaios e recomendam, com o objetivo de restringir a grande quantidade de variáveis envolvidas no fenômeno, a adoção de condições limitantes, tais como de terrenos de campo aberto e ângulos de incidência perpendiculares às fachadas durante os ensaios como ponto de partida. Isso simplificaria as configurações de ensaios e permitiria, após a identificação dos piores cenários, a generalização e a transformação em códigos os resultados obtidos.

Fontes (2003), em uma dissertação de mestrado, realizou comparações entre os efeitos de vizinhança obtidos experimentalmente com os estimados pela NBR 6123/1988 e pelo antigo código canadense NBC 1985. Foi utilizado um edifício alto retangular, e um modelo mudo idêntico foi inserido em quatro configurações de vizinhança, nas quais o vento foi simulado com incidências variando de 0 a 90 graus. A vizinhança real no entorno do edifício também foi replicada. Comparando-se a NBR 6123/1988 com resultados obtidos experimentalmente, no caso da presença de apenas um modelo mudo, verificou-se que a Norma estava fornecendo valores bastante similares, atuando inclusive a favor da segurança. Entretanto, ao testar o caso da vizinhança real, os coeficientes fornecidos pela Norma se mostraram muito inferiores aos observados em túnel de vento.

Carpeggiani *et al.* (2005) realizaram um estudo para a verificar a adequação da NBR 6123/1988 a estruturas de diversos formatos arquitetônicos distintos daqueles previstos pela própria Norma. Os resultados obtidos neste estudo indicaram que efeitos de torção são mais significativos em edifícios de geometria diferente da retangular. Além disso, as forças de arrasto obtidas experimentalmente eram superiores às recomendações da Norma. Com relação à torção, os resultados variaram bastante: em alguns casos, as estimativas da Norma eram condizentes, em outros eram superestimadas ou subestimadas. Ainda assim, os autores propõem a adoção de um valor único para a excentricidade de 15% da maior dimensão em planta, em contraste com os dois valores apresentados atualmente na norma (com ou sem vizinhança).

Um estudo sobre efeitos de vizinhança em um empreendimento de duas torres em Natal, Rio Grande do Norte, revelou que as cargas globais sobre as duas torres podem sofrer alterações significativas a depender da vizinhança (Loredo-Souza *et al.*, 2007). Apesar das torres terem a mesma geometria (Figura 1.2), porém espelhadas, os carregamentos diferiram bastante em alguns casos. Por exemplo, o carregamento de arrasto máximo obtido em uma torre foi 31% menor do que o recomendado por Norma, enquanto este mesmo carregamento máximo obtido

para a outra torre foi 12% superior ao recomendado por Norma. Esses resultados revelam a importância que estudos experimentais em túneis de vento têm.

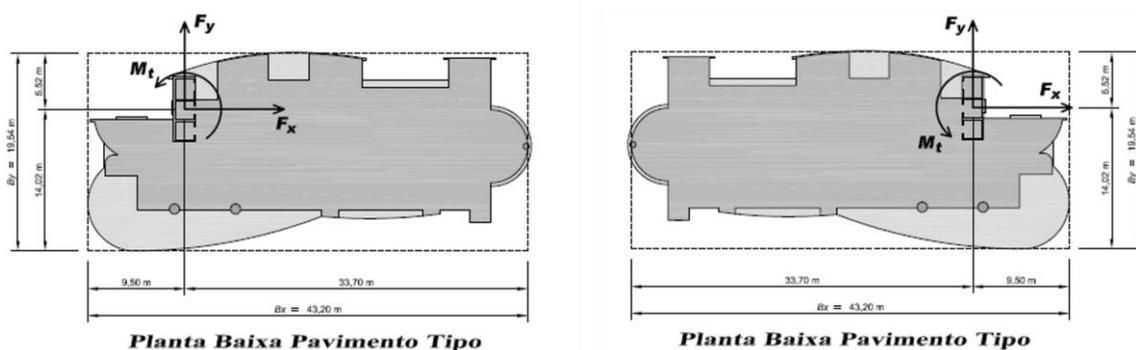


Figura 1.2: Empreendimento estudado por Loredo *et al.*, 2007. Fonte: Adaptado de Loredo *et al.*, 2007.

Em outro estudo sobre efeitos de vizinhança, Loredo *et al.* (2009) analisaram experimentalmente diversos edifícios altos construídos no Brasil e compararam os resultados obtidos com os coeficientes fornecidos pela NBR 6123/1988. Com relação à força de arrasto na base, os resultados indicaram que a Norma fornece valores subestimados de coeficientes, já que ela não considera a incidência de oblíqua do vento. Considerando os momentos torçores, os resultados indicaram grande variabilidade, sendo maiores em alguns casos, menores em outros e por vezes se equivalem. Ainda assim, recomendam a adoção de um valor único para a excentricidade da força de arrasto de 15,0% da maior dimensão em planta.

Kim, Tamura e Yoshida (2011) realizaram estudos sobre efeitos de vizinhança em pares de edifícios de seções quadradas com foco na obtenção de coeficientes de pressão locais para revestimentos. Verificou-se a influência da direção do vento, da altura e da localização do edifício de vizinhança sobre os coeficientes locais máximos de sucção e sobrepressão, em módulo. O modelo principal consistiu em um edifício de seção quadrada e altura fixa, enquanto o modelo de vizinhança teve a mesma seção transversal, mas diferentes alturas foram testadas, variando de 0,5 até 2,0 vezes a altura do modelo principal (Figura 1.3). A Figura 1.4 ilustra as principais posições do modelo de interferência durante as execuções dos ensaios.

Com relação ao valor máximo do coeficiente de sobrepressão, seus resultados indicaram que tanto a altura quanto a localização do edifício de vizinhança pouco alteram os valores desse coeficiente em comparação com o modelo isolado, tendo sido obtidos efeitos de proteção em boa parte das configurações ensaiadas, principalmente quando o espaçamento entre os edifícios

era pequeno. Em contrapartida, distâncias menores entre os edifícios aumentaram consideravelmente os coeficientes máximos de sucção, em comparação ao caso isolado.

Além disso, verificou-se que o coeficiente máximo de sucção aumentou com o aumento da altura do modelo de vizinhança. Ressalta-se também que a localização crítica dos modelos de vizinhança foi afetada por sua altura, verificando-se que, para alguns modelos, a configuração oblíqua era mais severa, enquanto para outros a configuração tipo *tandem*, alinhada na direção do vento, foi a mais desfavorável em termos de coeficientes de sucção.

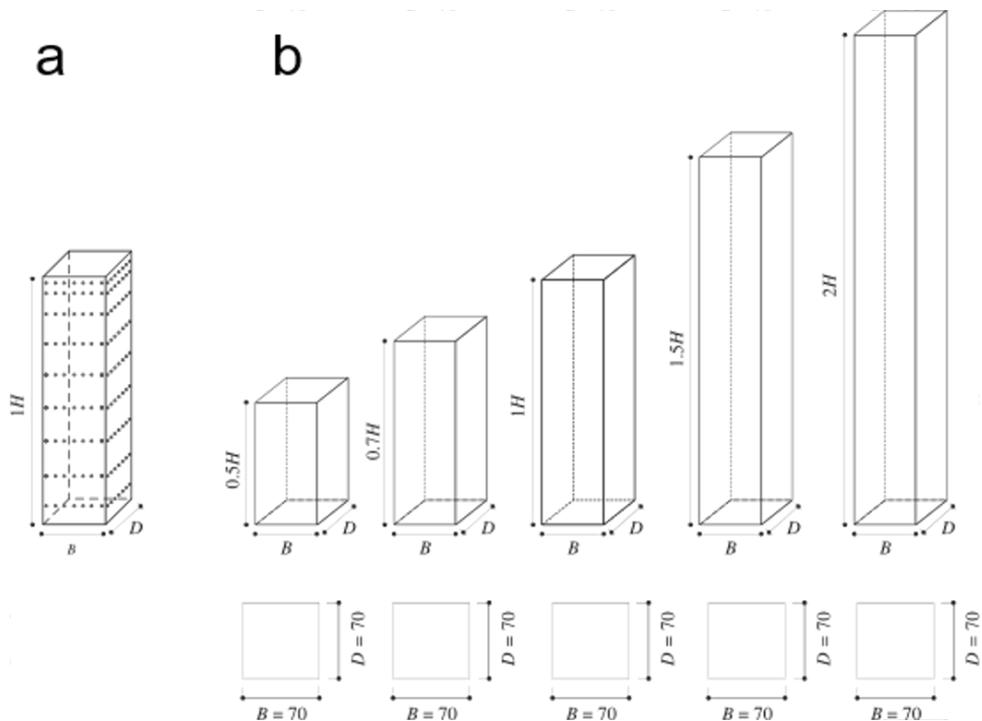


Figura 1.3: Modelos utilizados por Kim, Tamura e Yoshida (2011) - a) Modelo principal b) Modelos de interferência. Fonte: adaptado de Kim, Tamura e Yoshida (2011).

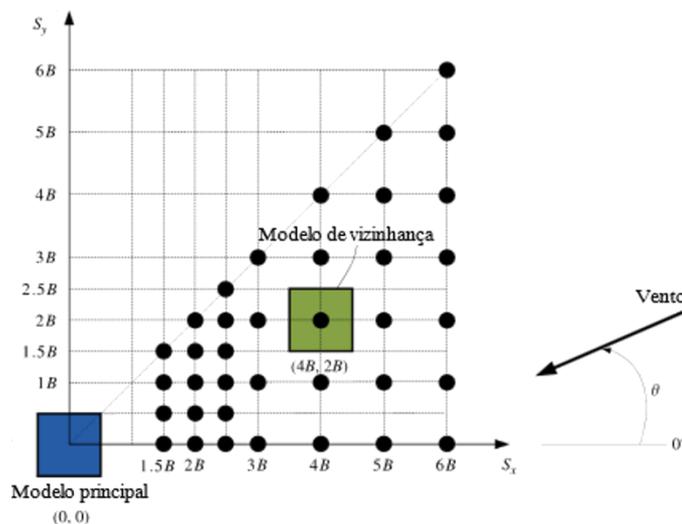


Figura 1.4: Configurações de ensaio de Kim, Tamura e Yoshida (2011). Fonte: adaptado de Kim, Tamura e Yoshida (2011).

Mara, Ho e Isyumov (2012) apresentaram uma série de recomendações de efeitos de vizinhança para auxiliar durante a fase de dimensionamento de estruturas. Relatam que a proximidade de um edifício na vizinhança pode gerar efeitos tanto positivos, protegendo as estruturas, quanto negativos, intensificando as ações. Além disso, reconhecem que os fatores mais importantes para avaliar a influência do efeito de vizinhança são a frequência natural do edifício, uma dimensão característica da face, a velocidade do vento no topo do edifício, o formato do edifício na vizinhança e a sua distância até o edifício do projeto. Concluem afirmando que, devido aos diversos mecanismos de interferência do vento (martelamento, desprendimento de vórtices, efeito Venturi e etc), acrescidas a variáveis geométricas da vizinhança, é imprescindível a realização de ensaios em túneis de vento em estruturas sensíveis que se encontrem na vizinhança de outros obstáculos.

Hui, Tamura e Yoshida (2012) realizaram um estudo experimental para investigar efeitos de vizinhança entre dois edifícios altos de mesma altura, mas de seção transversal diferente: um edifício de seção quadrada e outro de seção retangular. O foco desta pesquisa foi avaliar a interferência apenas nos picos dos coeficientes locais de pressão. Dois conjuntos de experimentos foram utilizados: o conjunto I consiste em utilizar o modelo quadrado como principal e o modelo retangular como o edifício de interferência, enquanto o conjunto II utiliza o retangular como principal e o quadrado como interferência.

Seus resultados indicaram que a presença de um edifício na vizinhança pouco mudava os coeficientes máximos de sobrepressão, os quais estavam entre 0,9 e 1,1 vezes os mesmos

coeficientes na configuração isolada. Contudo, os coeficientes locais de sucção sofreram grande interferência da vizinhança, independente do formato do edifício inserido nas proximidades, chegando a alcançar valores absolutos 40% maiores do que na configuração isolada.

Além disso, foi feita uma comparação com o estudo realizado por Kim, Tamura e Yoshida (2011), que realizou experimentos similares aos dos autores, mas utilizou apenas dois modelos quadrados idênticos como edifício principal e edifício de interferência. A Figura 1.5 mostra a comparação entre o estudos, nas quais se observa as curvas de níveis dos fatores de interferência (FI), definidos como a razão entre o coeficiente de sucção máximo, em módulo, na configuração com vizinhança, dividido pelo mesmo coeficiente na configuração isolada. Observa-se que não só a geometria do edifício de interferência é importante, mas também a geometria do modelo principal pode afetar o comportamento do efeito de vizinhança.

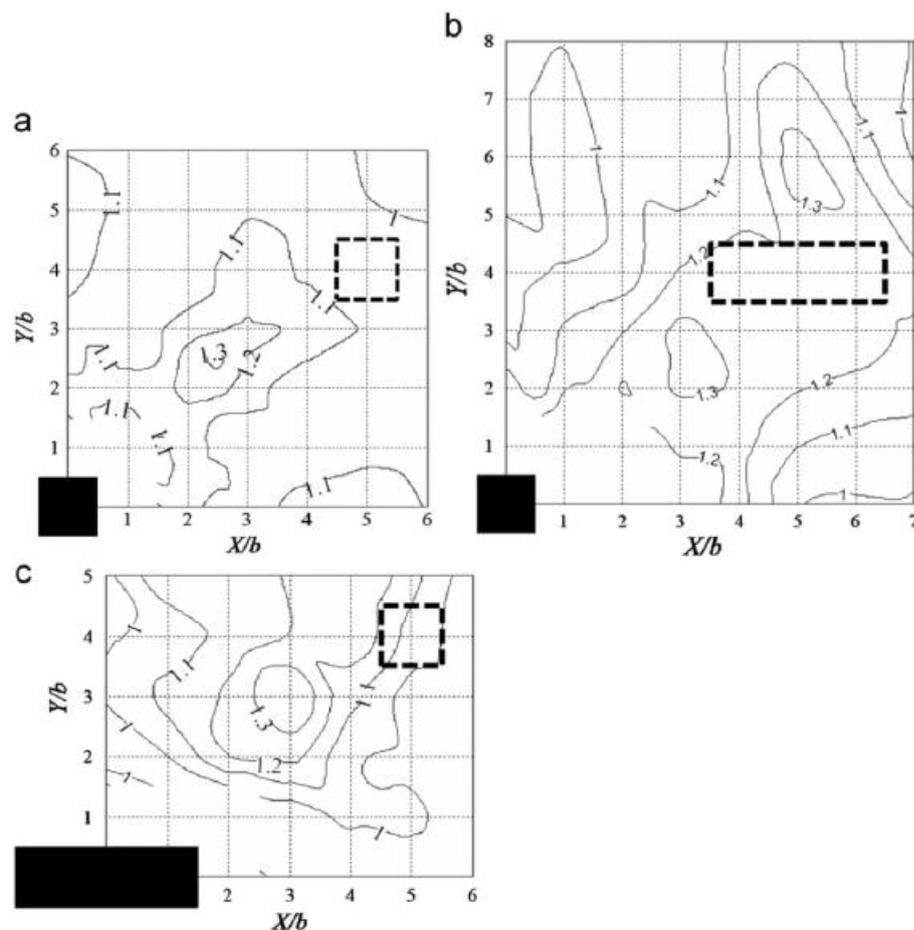


Figura 1.5: Comparação entre o estudo de Kim, Tamura e Yoshida (2011) e Hui *et al.* (2012). a) FI de Kim, Tamura e Yoshida (2011) b) FI do conjunto I de experimentos de Hui *et al.* (2012). c) FI do conjunto II de experimentos de Hui *et al.* (2012).

Aparte de estudos sobre efeitos de vizinhança, Tanaka *et al.* (2012) realizaram um estudo extensivo para analisar o efeito do formato do edifício sobre sua caracterização aerodinâmica. Foram testadas diferentes formas geométricas para edifícios esbeltos de altura igual a 400 m. As seções transversais incluem desde formatos mais básicos, tais como o quadrado, retangular, circular e elíptico, até mais complexos, como os helicoidais e as estruturas do tipo *Setback* (em patamar). Os modelos estudados estão ilustrados na Figura 1.6. Seus resultados mostraram que as diversas modificações geométricas testadas, na maioria dos casos verificados, resultaram em melhor desempenho aerodinâmico do que a seção quadrada básica. De particular interesse é o comportamento da seção tipo *Setback*, uma vez que um dos modelos utilizados nesta pesquisa se encaixa neste tipo. Nesses tipos de estruturas, observou-se que o desprendimento de vórtices ocorria em diferentes frequências ao longo da altura do modelo, enfraquecendo o fenômeno.

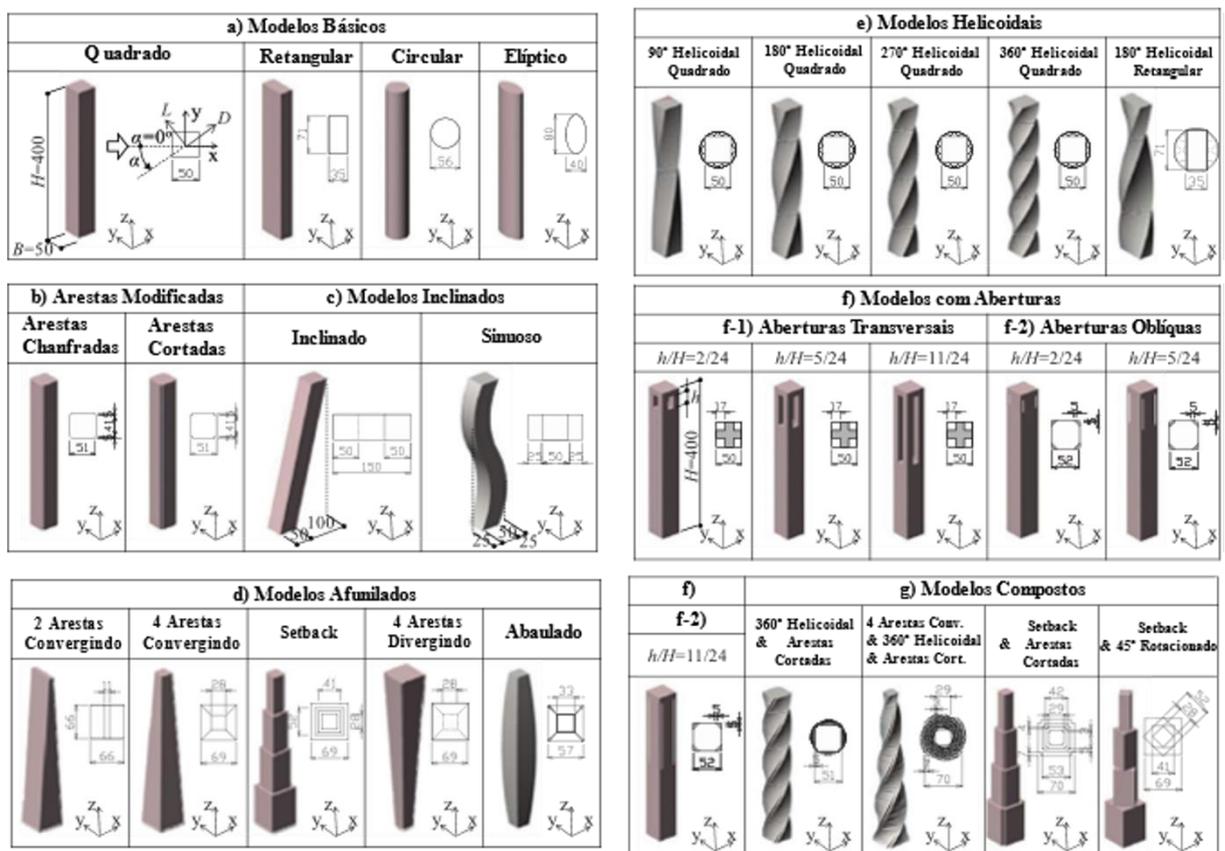


Figura 1.6 - Modelos ensaiados por Tanaka *et al.* (2012). Fonte: adaptado de Tanaka *et al.* (2012).

Alberti (2015) também realizou um estudo sobre efeito de vizinhança em quatro edifícios altos no túnel de vento *Professor Joaquim Blessmann*. Em seu estudo, ele verificou o efeito que a vizinhança urbana exercia sobre cada modelo, medindo coeficientes médios de

forças aerodinâmicas, comparando-os posteriormente com os valores fornecidos pela NBR 6123/1988. Em seus resultados, verificou-se que, com frequência, a vizinhança exercia efeitos de proteção. Além disso, mesmo nos casos em que a vizinhança atuou de maneira desfavorável, o fator de vizinhança fornecido pela Norma era superior ao obtido nos ensaios.

Em seguida, foi estudada a influência de dois parâmetros sobre o efeito de vizinhança: o afastamento S/b , dado pela distância entre fachadas vizinhas dividida pela menor largura do edifício em planta, e o índice de área exposta, dado pela área efetiva exposta ao vento dividido pela área frontal da edificação. Esses parâmetros estão ilustrados na Figura 1.7. Ao final, foi sugerido que fosse feita uma revisão do limite inferior fator de vizinhança da Norma, passando de 1,0 para 0,8 para índices de área exposta inferiores a 30% e afastamentos menores que 2,5. Ressalta-se que os resultados ensaiados por ele dizem respeito apenas à parcela estática.

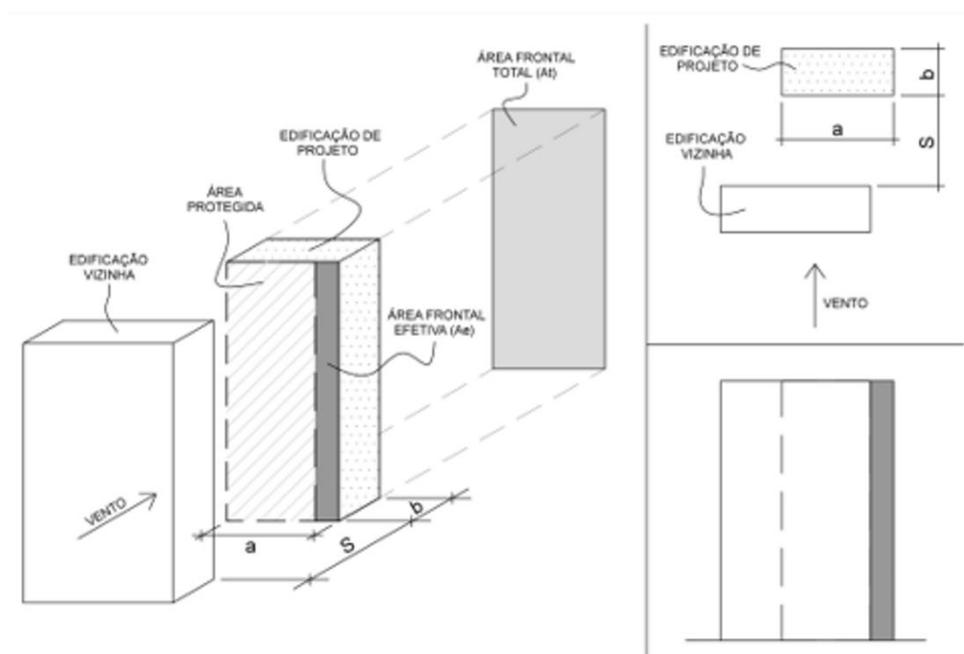


Figura 1.7 - Parâmetros relacionados ao fator de vizinhança. Fonte: Alberti (2015).

Lo, Kim e Li (2016) realizaram um extenso estudo sobre efeito de vizinhança em um edifício de seção transversal quadrada quando um modelo idêntico era inserido em suas proximidades. Foram testadas 15 posições do modelo muito diferentes com relação ao modelo principal, testando, em cada uma dessas posições, 6 velocidades reduzidas de vento com um único perfil potencial. Para avaliar os efeitos de interferência, usou-se o fator de martelamento, definido como a relação entre os valores rms do deslocamento no topo do modelo principal na configuração com vizinhança dividido pelo mesmo parâmetro na configuração isolada. Além

disso, foram obtidos os espectros das forças nos casos identificados como críticos. Os resultados indicaram principalmente que, para a resposta longitudinal, o modelo mudo em uma posição oblíqua em relação ao modelo principal indica uma posição crítica, com fator de martelamento chegando a um valor de até 1,6. Para a resposta na direção transversal ao vento, novamente uma posição oblíqua à sotavento do modelo principal se mostrou a mais desfavorável.

Bênia (2013) também estudou efeitos de vizinhança em um edifício alto com seção transversal diferente da quadrada. Em seu trabalho, foram feitos estudos utilizando uma balança dinâmica de três graus de liberdade (BD3GDL) no modelo reduzido do edifício padrão da *Commonwealth Aeronautical Research Council* (CAARC). As configurações de ensaio adotadas eram representadas por um modelo mudo idêntico ao principal (configuração I), dois modelos mudos idênticos ao principal (configuração II) e, na configuração III, utilizaram-se um modelo mudo idêntico ao principal e outro modelo mudo com metade da altura. As diferentes configurações de ensaios estão ilustradas na Figura 1.8, e seis afastamentos foram testados para cada configuração. O vento utilizado teve expoente $p = 0,11$ e um único ângulo de incidência, perpendicular à maior face do modelo principal, em todas as configurações. Dentre suas conclusões, destaca-se o fato de que apenas um edifício posicionado a barlavento causa efeitos de proteção sobre a resposta longitudinal média, sendo menos intenso à medida que o afastamento aumenta. Além disso, verificou-se que a presença da vizinhança pode alterar significativamente a resposta do modelo em estudo, sobretudo a parcela flutuante da torção, mesmo quando os obstáculos são colocados em distâncias maiores.

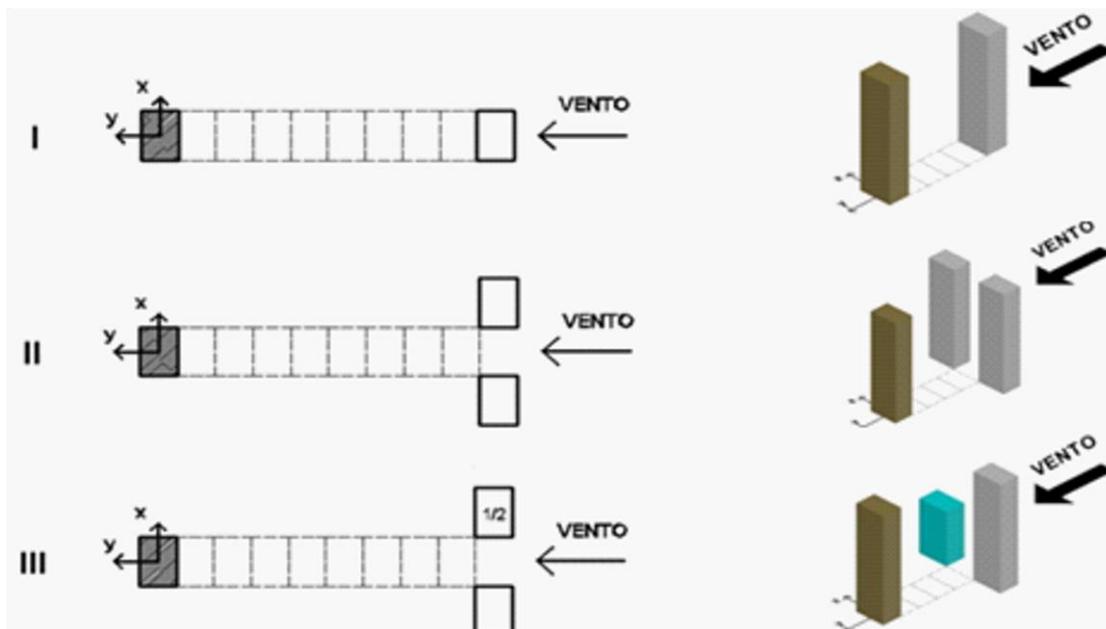


Figura 1.8: Configurações de ensaios de Bênia (2013). Fonte: adaptado de Bênia (2013).

Loredou-Souza, Oliveira e Carpegiani (2012) realizaram um estudo do efeito de vizinhança sobre o carregamento torsional de edifícios e compararam os resultados obtidos com as recomendações fornecidas pela NBR 6123/1988. Seus resultados revelaram que as recomendações da Norma subestimavam as cargas relativas à torção quando considerando casos isolados de edifícios, mas que suas recomendações eram adequadas para a grande maioria dos casos nos quais vizinhança estava presente.

Outro estudo de efeito de vizinhança utilizando o CAARC foi realizado por Vieira, Brito e Loredou-Souza (2018). Nesta pesquisa, um modelo mudo idêntico ao CAARC foi inserido em diversas posições, oblíquas e alinhadas com o modelo principal, e os valores médios de coeficientes de carregamentos globais foram calculados e comparados com o caso isolado. Neste estudo, também o ângulo de incidência do vento também foi alterado. Seus resultados sugerem que seja adotado um fator de vizinhança (definido como a relação entre o coeficiente de carga na condição de vizinhança dividido pelo mesmo valor na condição isolada) que aumente a carga em relação ao caso isolado em 60%. Esse valor foi obtido a partir de um critério de que 95% dos resultados obtidos pelo estudo se adequassem a ele.

Estudos recentes sobre a caracterização de aerodinâmica de edifícios altos foram desenvolvidos na UFRGS por Vogado (2018) e Scharnberg (2018). Vogado (2018) realizou uma série de estudos em dois edifícios reais com formatos em “v” para obter os espectros de

cargas globais e funções de admitância aerodinâmica. Seus resultados, além de permitirem compreender como se dá o desprendimento de vórtices em edifícios com esta geometria pouco usual, aumentaram a base de dados de funções de admitância aerodinâmica existentes. O mesmo comentário pode ser feito para o estudo realizado por Scharnbeg (2018), que realizou caracterizações aerodinâmicas de dois edifícios construídos no Brasil.

1.3 RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Estimar as ações devidas ao vento em uma edificação é uma tarefa complexa. Além da geometria do edifício, devem-se levar em consideração as características do terreno sobre o qual o escoamento flui e as características da vizinhança ao redor do edifício. Devido às diversas variáveis envolvidas no problema, a Engenharia do Vento vem se caracterizando por ser uma área que concentra grande quantidade de pesquisas realizadas anualmente em túneis de vento com o intuito de contribuir com o entendimento do efeito do vento sobre as estruturas.

O presente trabalho propõe então realizar uma caracterização aerodinâmica de um edifício alto com diferentes configurações de vizinhança. Posteriormente, serão traçadas comparações entre os dois modelos. Enquanto um edifício provém da base de dados do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) e consiste em um empreendimento real, com riqueza de detalhes geométricos, o outro se trata de uma versão simplificada do primeiro, com paredes lisas. Dessa forma, é possível avaliar não só o efeito de vizinhança, mas a influência da geometria dos edifícios em sua aerodinâmica, o que difere de outros estudos sobre efeitos de vizinhança por avaliar o conteúdo de energia nos espectros dos carregamentos. Dois tipos de ventos com características diferentes serão utilizados, permitindo avaliar o efeito da turbulência. Para isso, dois modelos rígidos serão ensaiados no túnel de vento *Professor Joaquim Blessmann*, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

1.4 OBJETIVOS

Tendo em vista a complexidade do escoamento do vento considerando efeitos de vizinhança ao redor das edificações, traçou-se como objetivo principal realizar uma caracterização aerodinâmica de dois modelos que representam o mesmo edifício alto. Como mencionado anteriormente, um desses modelos representa um edifício já construído no Brasil

e ensaiado pelo LAC, enquanto o outro modelo é uma simplificação do primeiro, de superfícies lisas e sem detalhes geométricos de fachadas. Foram adotadas 14 posições para o edifício de vizinhança. Dentre essas posições, dez estão posicionadas à barlavento do modelo principal, enquanto as outras quatro estão colocadas à sotavento.

Busca-se obter as densidades espectrais de potência das ações globais e locais, ao longo da altura, atuantes nos dois modelos, primeiramente em uma situação isolada, com a posterior inserção de um modelo mudo ao redor do modelo principal em diferentes configurações de vizinhança e ventos de diferentes características. Com isso, além de avaliar o efeito de vizinhança e da turbulência sobre os carregamentos dinâmicos do vento, é possível verificar a influência dos detalhes geométricos de um modelo sobre esses carregamentos. São obtidas também as funções de transferência aerodinâmica dos dois modelos.

Com isso, busca-se visualizar a ocorrência de fenômenos dinâmicos no entorno dos edifícios e traçar comparativos entre os modelos ensaiados. Portanto, esta pesquisa pode ampliar a base de dados sobre estudos de efeitos de vizinhança e aumentar a compreensão sobre o efeito dos detalhes geométricos de um edifício sobre as ações globais e locais.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Este capítulo apresenta os principais conceitos e definições necessárias ao entendimento da circulação do ar no interior da camada atmosférica e dos seus efeitos estáticos e dinâmicos em edificações.

O vento pode ser definido como ar em movimento relativo à superfície terrestre, sendo conduzido por diferentes forças, tais como a força devida à diferença de pressões na atmosfera e a força de Coriolis. A primeira está relacionada ao aquecimento diferencial da superfície terrestre pelo sol, enquanto a segunda está ligada à circulação da Terra. Essas forças são responsáveis por estabelecer sistemas de circulação atmosférica em larga escala (HOLMES, 2015).

2.1 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA (CLA)

À medida que a circulação do vento se aproxima da superfície terrestre, as forças de fricção começam a desempenhar um papel significativo: elas atuam no sentido contrário ao escoamento do ar e se transmitem por esforços tangenciais entre diferentes camadas de ar presentes na camada limite atmosférica, que é a região atmosférica que abriga as estruturas de interesse civil.

A camada limite atmosférica (CLA) pode então ser definida como a região atmosférica na qual o escoamento do ar sofre influência da superfície terrestre. Em outras palavras, significa que a circulação do vento depende da rugosidade do terreno, responsável por afetar perfis de velocidades médias e introduzir turbulência no escoamento. Fora da CLA, considera-se que a velocidade do vento independe da superfície terrestre, assumindo um valor uniforme quanto à altura;

A altura que delimita a espessura da CLA é chamada de altura gradiente (z_g), dependente da rugosidade do terreno e do *fetch*, que se trata da distância que o vento tem para percorrer sobre o terreno a barlavento (LOREDO-SOUZA; SCHETTINI; PALUCH, 2004). Valores típicos da altura gradiente fornecidos pela NBR 6123/1988 para diferentes categorias de terrenos estão listados na Tabela 2.1. Nessa tabela, a Categoria I corresponde ao caso com a menor quantidade de obstáculos, enquanto a Categoria V representa o outro extremo. Percebe-

se que a altura gradiente é tão maior quanto maior for a rugosidade do terreno. Desta forma, para pequenas rugosidades (obstáculos baixos e esparsos), a velocidade do vento se estabiliza muito mais rápido, isto é, com valor de altura gradiente menor.

Tabela 2.1: Altura gradiente para diferentes categorias de terreno segundo a NBR 6123/1988.

Categoria	Exemplos	z_g (m)
I	Mar calmo, lagos e rios	250
II	Zonas costeiras planas, fazendas sem sebes e/ou muros	300
III	Fazendas com sebes e/ou muros, subúrbios com casas baixas	350
IV	Cidades pequenas, subúrbios densamente construídos	420
V	Centros de grandes cidades, complexos industriais	500

(Fonte: adaptado de NBR 6123/1988.)

A CLA, que é compreendida entre a superfície terrestre e a altura gradiente, pode ser dividida em outras duas camadas: a camada superficial e a camada de Ekman. Essa divisão é feita com base nas tensões de Reynolds. A Figura 2.1 ilustra a distribuição dos perfis de velocidades médias do vento e as tensões de Reynolds no interior da CLA.

A camada superficial é uma fina camada ocupada por obstáculos próximos à superfície, tais como árvores, sebes e algumas edificações. Em seu interior, as tensões de Reynolds variam de um valor máximo no topo da altura média dos obstáculos até um valor nulo na superfície terrestre. Sua espessura é chamada de deslocamento de plano zero (z_d), correspondendo à altura média dos obstáculos. Nesta camada, há um efeito geral de bloqueio do escoamento do ar, prevalecendo uma circulação que é dependente de circunstâncias locais, sem que comportamentos gerais do vento possam ser estimados. Caso a altura média dos obstáculos seja pequena, como em terrenos abertos de grandes dimensões, o deslocamento de plano zero é desprezível (COOK, 1985).

Já camada de Ekman possui tensões de Reynolds decrescentes com a altitude, possuindo valor nulo em seu topo, na altura gradiente, e valor máximo no deslocamento de plano-zero. Outras forças que atuam nesta camada são as forças de pressão e a força de Coriolis, proveniente da rotação da Terra.

Praticamente para qualquer velocidade do vento, o número de Reynolds no interior da CLA assume valores tão elevados que se espera que o escoamento de ar seja turbulento (COOK, 1985). Isso significa que as forças de inércia são preponderantes em relação às forças de viscosidade do ar. Fora desta camada, o escoamento pode ser tratado como o de um fluido ideal,

sem viscosidade, sem que isso prejudique a obtenção de resultados precisos (BLESSMANN, 2011).

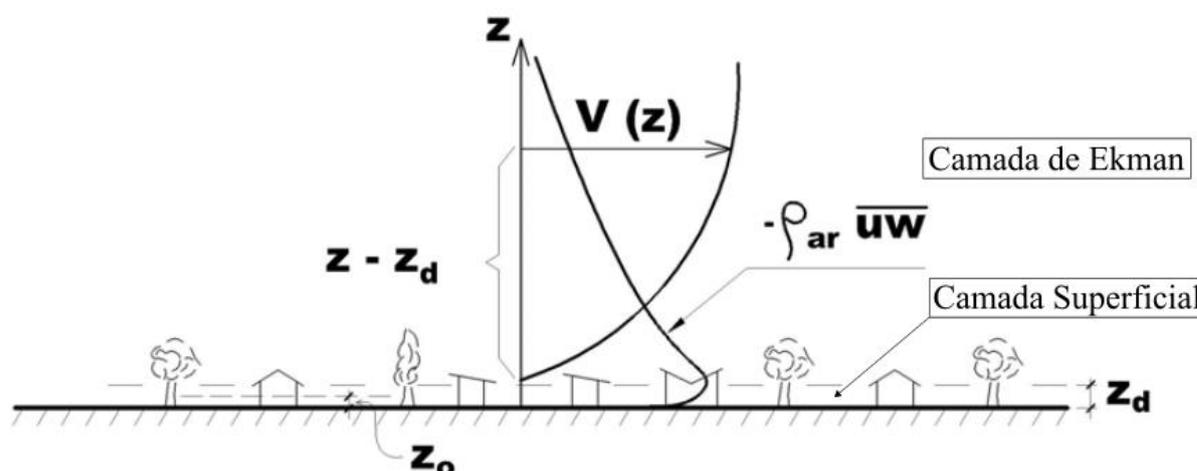


Figura 2.1: Representação dos perfis de velocidades médias e tensões de Reynolds no interior da CLA. Fonte: Loredo-Souza; Schettini; Paluch, 2004.

É na CLA que se concentram as edificações de interesse civil, de modo que é desejo da Engenharia do Vento compreender suas características para que a influência do vento sobre as estruturas possa ser levada em consideração de maneira apropriada. Nesse sentido, perfis de vento com diferentes particularidades podem ser utilizados a depender do tipo de aplicação. Para interesses aeronáuticos, o perfil de vento mais adequado é o suave e uniforme, enquanto que, para a construção civil, recomenda-se o perfil deslizante e turbulento (Figura 2.2), que terá suas principais propriedades explicadas nos itens seguintes.

Em perfis deslizantes e turbulentos, a velocidade instantânea do vento ao longo da altitude é dividida em duas parcelas, ambas de grande importância: uma média e uma flutuante, causada pela turbulência. Modelos matemáticos para representar perfis de velocidades médias do vento são amplamente utilizados, sendo apresentados no item 2.2, enquanto a turbulência é explicada no item 2.3.

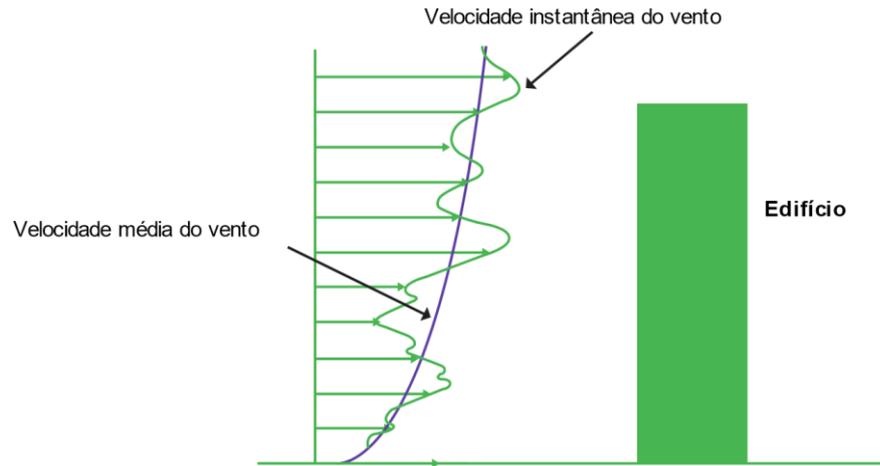


Figura 2.2: Perfil de vento deslizando e turbulento. Fonte: Irwin, Denoon e Scott (2013).

2.2 PERFIS DE VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO

Existem, basicamente, dois perfis de velocidades médias do vento bastante empregados na Engenharia do Vento: o perfil que segue uma lei logarítmica e outro de lei potencial. A lei logarítmica se caracteriza por possuir um forte embasamento matemático, sendo dada, em geral, pela seguinte expressão:

$$\bar{V}(z) = \frac{u_*}{k} \log_e \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2.1)$$

na qual:

$\bar{V}(z)$ - Velocidade média do vento em uma altitude z ;

u_* - Velocidade de fricção, ou velocidade de corte;

k - Constante de von Kármán;

z_0 - Comprimento médio de rugosidade do terreno, ou rugosidade aerodinâmica.

A velocidade de fricção é controlada pela rugosidade do terreno, sendo tanto maior quanto mais rugoso for o mesmo. Com relação à constante de von Kármán, medidas experimentais constataram que ela assume um valor próximo a 0,4 (HOLMES, 2015). De acordo com Simiu e Lozier (1975) *apud* Blessmann (1995), deve-se adotar z_0 igual a 20 metros ou três quartos da altura média dos obstáculos na região circundante, sendo escolhido o menor dos dois valores.

Em regiões de áreas urbanas e florestais, nas quais há uma elevada densidade de obstáculos próximos à superfície terrestre, substitui-se a altura z , da Equação (2.1), por uma altura efetiva $z - z_d$, na qual z_d representa o deslocamento de plano-zero. Neste caso, tem-se o seguinte:

$$\bar{V}(z) = \frac{u_*}{k} \log_e \left(\frac{z - z_d}{z_0} \right) \quad (2.2)$$

Embora a lei logarítmica tenha um desenvolvimento matemático sólido, existem alguns problemas em sua aplicação. Logaritmos de números negativos não existem, tornando-a inválida para alturas abaixo do deslocamento de plano-zero. Além disso, se $z - z_d$ é menor que o comprimento de rugosidade, z_0 , velocidades médias negativas são obtidas. Para evitar alguns desses problemas, engenheiros de vento geralmente utilizam a lei potencial.

Ainda que a lei potencial não possua um embasamento teórico por trás da sua formulação, seu uso foi popularizado por conta de sua simplicidade e pela boa proximidade que seus resultados fornecem com o que se observa na prática (LOREDO-SOUZA; SCHETTINI; PALUCH, 2004). Frequentemente, utiliza-se a lei potencial na sua versão adimensional, dada por:

$$\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^p \quad (2.3)$$

na qual:

p – Expoente característico da lei potencial;

z_{ref} – Altura de referência (m);

\bar{V}_{ref} – Velocidade média do vento na altura de referência.

O expoente a ser utilizado na lei potencial depende da rugosidade do terreno, variando de 0,11, para superfícies lisas como mar e lagos, a 0,34, para áreas urbanas com grande densidade de edifícios elevados.

Existe um inconveniente em sua aplicação: por permitir qualquer valor de altitude em sua fórmula, a velocidade média do vento cresce indefinidamente, sem reconhecer o fim da CLA. Entretanto, sua simplicidade, aliada à sua boa representação na região atmosférica onde

estão as principais estruturas (edifícios, linhas de transmissão e pontes), faz com que ela seja utilizada pela maioria dos profissionais de Engenharia do Vento.

2.3 TURBULÊNCIA

Outra propriedade de extrema importância para caracterização do vento no interior da CLA é a turbulência, que pode ser entendida como flutuações de velocidade do vento ao redor da média. Segundo Blessmann (1995), em condições de estabilidade neutra, as flutuações da velocidade do vento são causadas principalmente pela agitação mecânica do ar, formando turbilhões ou redemoinhos. Para o vento natural, a origem da turbulência está ligada a dois fatores principais: a rugosidade do terreno e os movimentos circulatorios da atmosfera (BLESSMANN, 2011). A turbulência pode ser gerada ainda pela interação do ar com edificações.

Ainda de acordo com Blessmann (2011), as dimensões dos turbilhões variam de acordo com a sua origem, medindo desde a ordem de grandeza de milímetro até a ordem de grandeza da espessura da CLA, quando causados pela rugosidade terrestre. Quando provocados pela rotação da terra, os turbilhões podem atingir centenas de quilômetros. Turbilhões geram as rajadas, que são as flutuações da velocidade do vento em torno da média, ocorrendo em uma sequência aleatória de frequências e intensidades.

Geralmente, considera-se a velocidade do vento como uma variável aleatória composta pela soma de duas parcelas: uma média e uma flutuante. Ou seja:

$$\underline{V}(\underline{x}, t) = \bar{\underline{V}}(\underline{x}) + \underline{v}(\underline{x}, t) \quad (2.4)$$

sendo:

$\underline{V}(\underline{x}, t)$ – Vetor velocidade instantânea em uma posição no espaço \underline{x} e instante t ;

$\bar{\underline{V}}(\underline{x})$ – Vetor velocidade média;

$\underline{v}(\underline{x}, t)$ – Vetor flutuação de velocidade (vetor rajada).

O vetor flutuação de velocidade pode ser decomposto ainda em três componentes:

$$\underline{v}(\underline{x}, t) = \underline{v}_1(\underline{x}, t) + \underline{v}_2(\underline{x}, t) + \underline{v}_3(\underline{x}, t) \quad (2.5)$$

na qual $\underline{v}_1(\underline{x},t)$ representa a sua componente longitudinal, $\underline{v}_2(\underline{x},t)$ a componente lateral e $\underline{v}_3(\underline{x},t)$ a componente vertical.

Um parâmetro bastante utilizado para caracterizar a turbulência no interior da CLA é a intensidade de turbulência, definido pelo quociente entre o desvio padrão da flutuação e a velocidade média:

$$I_i(\underline{x}) = \frac{\sigma_i(\underline{x})}{\bar{V}(\underline{x})}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.6)$$

sendo:

$I_i(\underline{x})$ – Intensidade de turbulência na posição \underline{x} e direção i ;

$\sigma_i(\underline{x})$ – Desvio padrão da flutuação da velocidade na posição \underline{x} e direção i .

Por sua vez, os desvios padrões das flutuações de velocidade podem ser calculados pela seguinte equação, fazendo o uso do fato de que se trata de uma variável de média nula:

$$\sigma_i = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [v_i(\underline{x}, t)]^2 dt \right\}^{1/2}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.7)$$

na qual T é o período de medição.

Valores típicos da intensidade de turbulência longitudinal variam de 10 a 30% próximo à superfície terrestre até 5 a 10% em altitudes de 500 a 1000 metros, embora intensidades muito maiores possam ser obtidas ao redor de edifícios altos ou em regiões de topografia complexa (IRWIN; DENOON; SCOTT, 2013).

Outra maneira de descrever as flutuações de velocidade é fazendo o uso de densidades espectrais de potência, que reproduzem o conteúdo de energia do vento em termos das frequências que a compõem. Isto é detalhado no item 2.4 deste trabalho.

2.4 CARREGAMENTOS DEVIDOS AO VENTO EM EDIFÍCIOS

Ao incidir sobre edifícios, o vento causa forças e momentos. As forças provocadas pelo escoamento do ar podem atuar com componentes horizontais, produzindo forças flexionais, e componentes verticais, que são insignificantes sob o aspecto estrutural de edifícios, mas que podem ser importantes em se tratando de análises locais de revestimento.

Com relação às forças, elas costumam ser classificadas de acordo com sua direção de atuação: longitudinal ou transversal ao ângulo de incidência do vento, ou podem ainda ser divididas conforme sejam adotados eixos de referência em projeto, passando a ser decompostas em direções x e y . Dá-se o nome de força de arrasto (F_a) à força provocada pelo vento na direção do vento médio, e força lateral (F_l) à força que surge na direção transversal, e esta é positiva sempre que, observada na direção e sentido do vento, produzir uma força lateral para direita. A Figura 2.3 ilustra essas forças aerodinâmicas atuantes em uma seção transversal.

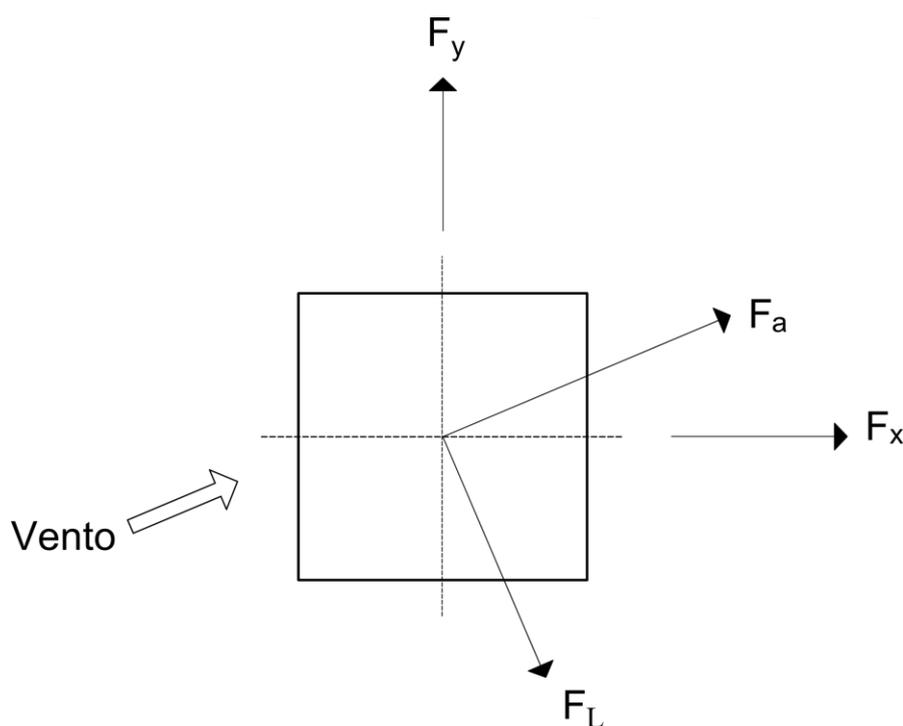


Figura 2.3: Referência de forças provocadas pelo vento. Fonte: autor.

A distribuição de pressões ao redor de edifícios varia continuamente de maneira assimétrica, provocando não só forças flexionais, mas também momentos de torção. Segundo Carpeggiani (2004), identificam-se três causas principais para efeitos de torção: forma externa da edificação, efeitos de interferência da vizinhança e efeitos dinâmicos provocados pela

turbulência atmosférica. Embora o formato da edificação possa ajudar a reduzir a torção em edifícios, esses esforços podem ser significantes até mesmo em estruturas de seção simétrica, sem excentricidade entre o centro de torção e o centro geométrico, devido à incidência oblíqua do vento.

Coefficientes aerodinâmicos são grandezas adimensionais bastante utilizadas em códigos normativos para estimar forças e momentos sobre estruturas, servindo como forma de relacionar a pressão dinâmica de referência, uma área de referência e a ação desenvolvida sobre a estrutura. O cálculo de tais coeficientes são objetos de estudos em túneis de vento, e eles podem ser calculados do seguinte modo para um edifício de referência (Figura 2.4):

$$C_f = \frac{\text{Força}}{(q A)} \quad (2.8)$$

sendo:

C_f – Coeficiente de força em uma dada direção (arrasto, lateral, x ou y);

q – Pressão dinâmica (ao longe);

A – Área da seção de referência.

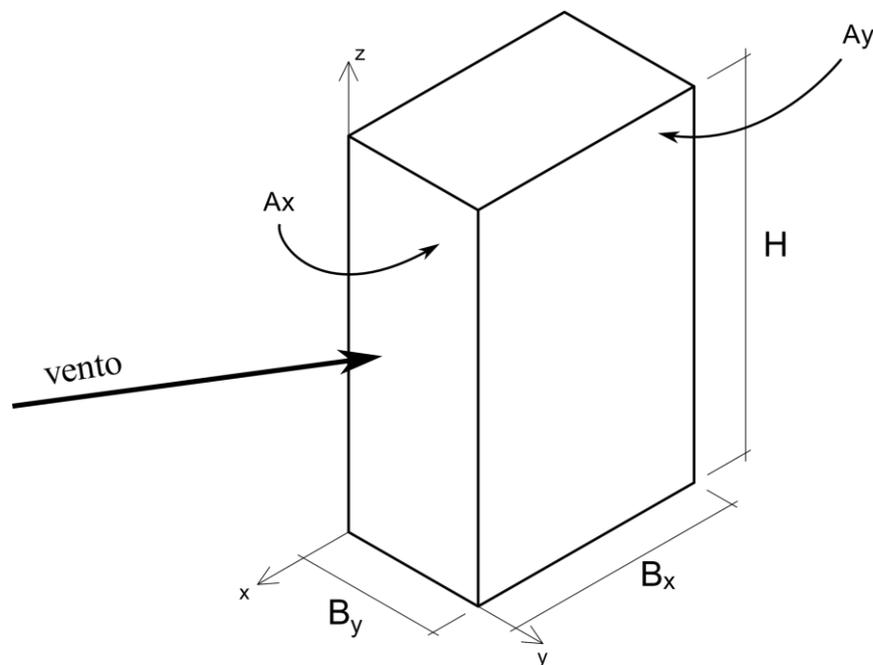


Figura 2.4: Edificação de referência para o cálculo dos coeficientes aerodinâmicos. Fonte: autor.

Segundo Blessmann (2011), para edificações paralelepípedicas como a indicada na Figura 2.4, geralmente se considera $A = A_x$ para o cálculo de C_x e $A = A_y$ para o cálculo de C_y . Além disso, adota-se $A = A_x$ para C_a e C_l com vento a 0° , e $A = A_y$ para C_a e C_l com vento a 90° .

O coeficiente de torção, C_t , é definido por:

$$C_t = \frac{M_t}{(q A L)} \quad (2.9)$$

na qual M_t é o momento de torção atuante sobre a estrutura e L é uma dimensão linear de referência utilizada para tornar o coeficiente adimensional.

Com relação aos sinais dos coeficientes, estes obedecerão aos sinais adotados para forças e momentos. Ressalta-se que os coeficientes expostos neste item podem ser representados ainda em seus valores médios, máximos, mínimos ou RMS. Em particular, os valores médios são os responsáveis por produzir ações estáticas, enquanto os valores RMS são bons indicadores da ocorrência de ações dinâmicas. Valores máximos e mínimos são úteis para análises locais de revestimentos.

2.5 EFEITOS DINÂMICOS

Este tópico explica a ocorrência das principais ações dinâmicas às quais os edifícios estão submetidos, além de trazer algumas recomendações da NBR 6123/1988 para lidar com esses efeitos.

2.5.1 Energia cinética das rajadas

Uma fonte de oscilação importante em estruturas flexíveis e esbeltas ocorre devida à turbulência contida no vento natural, que está associada à energia cinética das rajadas. Como mencionado anteriormente, a velocidade do vento que incide em um ponto de um edifício é uma variável aleatória que varia no espaço e no tempo, sendo composta por uma parcela média e outra flutuante. Conseqüentemente, assim como a velocidade, a pressão dinâmica sobre a estrutura terá uma componente média e outra dinâmica. Em projetos de dimensionamento, a pressão dinâmica média é responsável por produzir uma força média que, por sua vez, produz um deslocamento estático; a parcela flutuante, que pode ser chamada de rajada de vento, é a responsável por produzir efeitos dinâmicos.

Sendo assim, a energia cinética presente nas diferentes rajadas de vento são responsáveis por criar forças dinâmicas que podem ou não causar impactos significativos em edificações. A intensidade dessas ações depende da frequência com que as rajadas incidem sobre as estruturas e de como os turbilhões se relacionam espacialmente com a estrutura.

Para levar em consideração o efeito da energia cinética das rajadas, a NBR 6123/1988 se baseia no método desenvolvido por Davenport, com diferenças na determinação dos parâmetros envolvidos no fenômeno (BLESSMANN, 2005). Ainda de acordo com esse autor, adotaram-se como premissas que as componentes flutuantes do vento são processos aleatórios de média nula, e que apenas a componente longitudinal da turbulência ($v_1(t)$) é importante para determinação da resposta estrutural na direção da velocidade média do vento (direção longitudinal).

2.5.2 Desprendimento cadenciado de vórtices

O desprendimento cadenciado de vórtices é um fenômeno responsável por criar, principalmente, forças na direção transversal à incidência do vento em estruturas. Antes de entender a sua ocorrência, é importante compreender o conceito de corpo rombudo. Um corpo rombudo é um corpo cujo formato fornece resistência ao escoamento do ar, promovendo uma separação do escoamento ao seu redor. Por outro lado, corpos aerodinâmicos fornecem menor resistência à passagem do ar, e as linhas do escoamento seguem as curvas de seus corpos, havendo uma separação em apenas uma fina camada próximo à superfície.

A Figura 2.5, retirada de Holmes (2015), ilustra um escoamento uniforme e sem turbulência ao redor de um corpo aerodinâmico e de um corpo rombudo, sendo possível visualizar a separação das linhas de corrente. A fina camada que divide o escoamento externo ao redor de um corpo rombudo é caracterizada por cisalhamento e vorticidade elevados, produzindo vórtices na esteira. Em muitos desses corpos rombudos, que podem ser representados por estruturas cilíndricas em balanço, por exemplo, ocorre o desprendimento alternado de vórtices de um lado e de outro da estrutura com uma frequência bem definida, caracterizando os vórtices de Kármán (BLESSMANN, 2005). Esses vórtices criam forças periódicas e oblíquas à direção do vento, sendo que a componente longitudinal, na direção do vento, é insignificante quando comparada à força transversal ao vento. Portanto, o desprendimento cadenciado de vórtices é responsável por produzir, principalmente, vibrações laterais na estrutura.

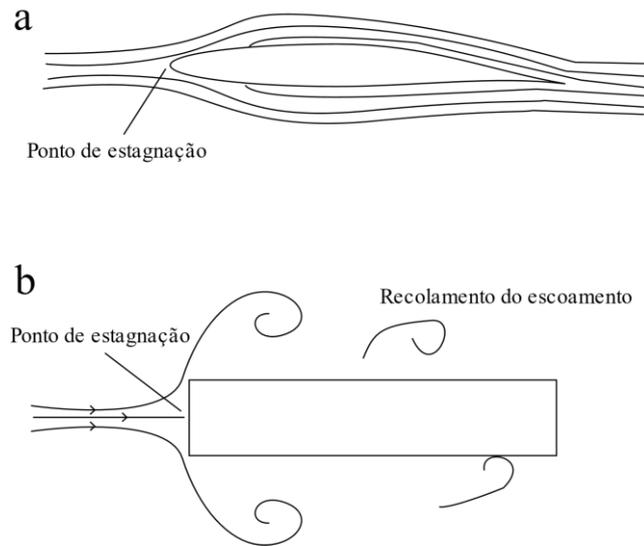


Figura 2.5: Escoamento do ar ao redor de corpos a) aerodinâmicos e b) rombudos. Fonte: Holmes (2015).

Um importante parâmetro que está relacionado ao fenômeno do desprendimento cadenciado de vórtices é o número adimensional de Strouhal, que relaciona a frequência de desprendimento de um par de vórtices a um comprimento característico e à velocidade do vento na qual esse par de vórtices se desprende. A seguinte equação estabelece a relação do número de Strouhal com as outras grandezas citadas:

$$St = \frac{f_s L}{V} \quad (2.10)$$

na qual:

f_s é a frequência de desprendimento de um par de vórtices, em Hertz;

L é o comprimento característico do corpo rombudo (diâmetro, no caso de círculos, ou largura de incidência do vento, em prismas retangulares e placas), em metros;

V é a velocidade do vento, em metros/segundo.

O número de Strouhal, segundo Blessmann (2005), refere-se à frequência predominante, embora existam outros vórtices de diferentes frequências. Além disso, St depende de características da seção (formato, rugosidade e oscilação), além de características do escoamento do ar (número de Reynolds).

Define-se a velocidade crítica como a velocidade do vento na qual a frequência de desprendimento de um par de vórtices (f_s) coincide com uma das frequências naturais da estrutura (f_n). Dessa forma, conhecendo os modos e frequências de vibração da estrutura, pode-se calcular a velocidade crítica:

$$V_{cr} = \frac{f_n L}{St} \quad (2.11)$$

No caso em que a velocidade do vento a ser considerada em projeto supera a velocidade crítica, devem-se tomar cuidados especiais com o desprendimento cadenciado de vórtices, pois ele é responsável por maior parte da oscilação lateral da estrutura, podendo atingir valores consideráveis (OLIVEIRA, 2003). A Figura 2.6 ilustra a influência do fenômeno na resposta transversal de uma estrutura.

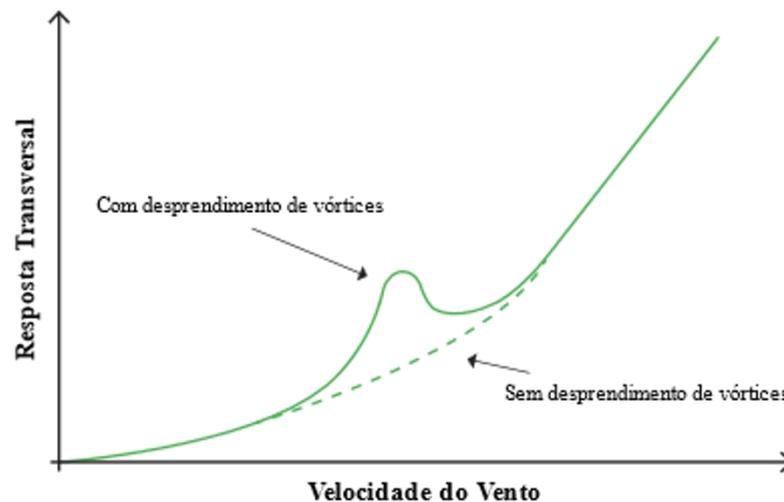


Figura 2.6: Influência do desprendimento de vórtices na resposta transversal. Fonte: Adaptado de Irwin, Denoon e Scott (2013).

Conforme ressalta Cook (1985) *apud* Blessmann (2005), o desprendimento cadenciado de vórtices sofre grande influência da turbulência do vento. Quando a turbulência é elevada, há uma desorganização geral dos vórtices de Kármán, que começam a surgir em uma gama mais ampla de frequências do que no caso de baixa turbulência. Conseqüentemente, não há sincronização dos vórtices, reduzindo sua ação sobre a estrutura. Por outro lado, em escoamentos de baixa turbulência, a frequência dominante do fenômeno tem um pico acentuado no espectro de potência da força lateral, evidenciando que em tais situações os vórtices ocorrem de maneira bem organizada, o que pode causar forças expressivas se a velocidade do vento

atingir a velocidade crítica. A Figura 2.7 ilustra a influência da turbulência no espectro da força lateral.

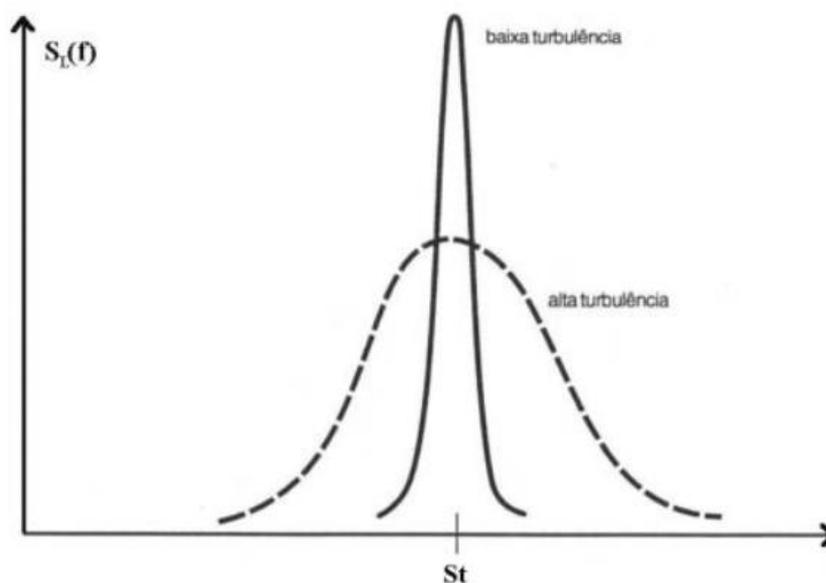


Figura 2.7: Influência da turbulência no espectro da força lateral. Fonte: Blessmann (2005) *apud* Vogado (2018).

2.5.3 Martelamento

Quando uma estrutura se encontra à sotavento de obstáculos (naturais ou edificações), diz-se que essa estrutura está situada na esteira desses elementos. Um edifício situado na esteira de outro poderá sofrer efeitos de proteção com relação às parcelas médias das respostas, pois, em muitas situações, a velocidade média do vento na esteira é menor do que o vento incidente à barlavento. Por outro lado, a turbulência gerada na esteira possui turbilhões com frequências diferentes da turbulência atmosférica, o que pode vir a se tornar um problema sob o ponto de vista dinâmico, caso as frequências modais da estrutura estejam próximas às frequências dos turbilhões incidentes (COOK, 1985).

Quando existem muitos obstáculos, a turbulência do vento gerada na esteira é a mesma turbulência do vento natural que incide nos obstáculos, ou seja, é caracterizada por um espectro abrangendo uma grande gama de frequências. Se, por outro lado, há apenas um ou poucos obstáculos situados à barlavento da edificação, esta começa a ser “martelada” por turbilhões gerados à barlavento com uma frequência predominante (BLESSMANN, 2005). Dá-se o nome de martelamento a esse efeito. Nesse sentido, a densidade espectral de potência do vento passa a exibir um pico com frequência igual à frequência dos turbilhões. Caso essa frequência dos

turbilhões incidentes seja igual a uma das frequências naturais da edificação, a resposta da estrutura pode ser considerável.

Ainda segundo Blessmann (2005), além das frequências dos turbilhões na esteira, a intensidade de turbulência é muito importante para determinar a profundidade desse efeito sobre edificações. Caso ela seja pequena, a esteira contará com vórtices organizados, que se desprendem regularmente, gerando uma força periódica em uma estreita gama de frequências. Por outro lado, caso a intensidade de turbulência seja elevada, os turbilhões presentes na esteira sofrem uma desorganização e as forças provocadas pelos vórtices se redistribuem em gama mais alargada de frequências, reduzindo a amplitude das vibrações.

Vale ressaltar que os efeitos dinâmicos devidos ao martelamento podem ser significantes até mesmo para distâncias entre edificações vizinhas de 10 vezes a dimensão característica da base do edifício em estudo (BLESSMANN, 2005).

Frequentemente, os efeitos provocados por esse fenômeno são avaliados experimentalmente por um fator de martelamento (FM), definido da seguinte maneira:

$$FM = \frac{\text{valor do efeito com a presença de obstáculo (s) na vizinhança}}{\text{valor do efeito sem a presença de obstáculo (s) na vizinhança}} \quad (2.12)$$

O efeito escolhido da Equação (2.12) pode ser o momento de tombamento, momento de torção ou deslocamento, em seus valores RMS, médios ou de pico.

A NBR 6123:1988, em seu anexo H, cita os efeitos de golpe como fonte de ações consideráveis em edificações de grande altura e esbeltez, sendo causados pela turbulência atmosférica existente na esteira de outra edificação.

2.5.4 Galope

Em princípio, as forças causadas pelo vento em um edifício dependem não só do seu formato e das características do escoamento da vizinhança, mas também da aceleração, velocidade e oscilação da própria estrutura. Para maior parte dos edifícios altos, a distribuição de massa da estrutura torna insignificante a influência da aceleração e da oscilação nas forças do vento, sendo desconsideradas em estudos em túneis de vento. Entretanto, em algumas circunstâncias, a velocidade pode intervir consideravelmente nas forças sobre os edifícios,

provocando um efeito similar a uma alteração no amortecimento da estrutura (IRWIN; DENOON; SCOTT, 2013).

Existem dois tipos de amortecimento: o estrutural e o aerodinâmico. O estrutural, sempre positivo, é intrínseco ao tipo de material, atuando no sentido de dissipar a energia do sistema e reduzir oscilações. Por outro lado, o amortecimento aerodinâmico pode, para certas velocidades do vento, atingir valores negativos. Quando o amortecimento aerodinâmico negativo, em módulo, supera o amortecimento estrutural, a estrutura passa a exibir comportamento instável, caracterizando o galope.

Nesta situação instável, que ocorre após a velocidade média do vento atingir uma velocidade crítica, qualquer pequena perturbação pode provocar oscilações crescentes na direção transversal ao vento, com o potencial de alcançar grandes amplitudes de deslocamento (IRWIN; DENOON; SCOTT, 2013). Usualmente, a velocidade de disparo do galope é bastante elevada, tendo o edifício atingido a falha antes que tal velocidade seja alcançada pelo vento. Entretanto, a construção de edifícios cada vez mais esbeltos, flexíveis e com baixo amortecimento estrutural pode reduzir de maneira considerável a velocidade de disparo da estrutura, aproximando-a à velocidade de projeto (OLIVEIRA, 2003).

Neste fenômeno, as vibrações têm intensidades violentas e são tão piores quanto maior a velocidade do vento, sem um limite superior. Além disso, as oscilações características do galope atingem modos de vibrações desacoplados, excitando apenas um modo de vibração de translação. Na construção civil, as seções transversais mais propensas ao galope são as retangulares e as triangulares.

Como formas de se mitigar esse efeito indesejável, Blessmann (2005) cita algumas medidas que podem ser adotadas, tais como: aumento do amortecimento ou rigidez estrutural, aumento de sua massa e ainda alteração da forma ou orientação da estrutura, de modo que os coeficientes aerodinâmicos se tornem estabilizantes.

A NBR 6123:1988, também em seu anexo H, explica o fenômeno. Citam-se que as formas de seção retangular e triangular são bastante sensíveis ao galope. Além disso, explica-se que as estruturas esbeltas, leves e flexíveis, tais como pilares de viadutos de grande altura, podem ser especialmente afetadas. Para avaliar o potencial de ocorrência dessa ação dinâmica,

são necessários ensaios em túneis de vento com modelos aeroelásticos que representem corretamente as propriedades da edificação (massa, rigidez, amortecimento).

2.5.5 Drapejamento

Assim como o galope, o drapejamento (*fluttering*, do inglês) ocorre quando o amortecimento aerodinâmico é negativo e supera, em módulo, o amortecimento estrutural. Além disso, ele também ocorre após a velocidade do vento atingir uma velocidade crítica. A partir desta velocidade, ocorre a instabilidade da estrutura, causando vibrações cada vez maiores até provocar o colapso da mesma. Porém, diferentemente do galope, o drapejamento envolve a vibração de modos de vibração acoplados, sendo comumente um modo de flexão e outro de torção em edifícios.

Este fenômeno dinâmico ocorre especialmente em estruturas esbeltas e flexíveis, sendo considerado principalmente no projeto de pontes. Na construção civil, o fenômeno de drapejamento é bastante raro. A NBR 6123:1988 traz uma breve explicação desse fenômeno, sem fornecer meios de proteger estruturas de sua ocorrência.

2.6 EFEITOS DE VIZINHANÇA CONSIDERADOS NA NORMA BRASILEIRA

A existência de vizinhança ao redor de uma edificação pode alterar significativamente o escoamento do ar ao redor da mesma. Em algumas situações, pode haver um efeito de proteção. Já em outros casos extremos, a vizinhança pode intensificar as ações, tanto estáticas quanto dinâmicas, em um edifício alto. Neste item, serão ilustrados os principais efeitos de vizinhança considerados na NBR 6123/1988.

2.6.1 Efeito Venturi

O efeito Venturi é um fenômeno caracterizado pelo aumento da velocidade de um fluido quando há uma redução na área pela qual ele escoar. Esse aumento de velocidade é, geralmente, acompanhado por uma redução em sua pressão (BERNOULLI, 1738 *apud* BLOCKEN *et al.*, 2008).

Em construções civis, o típico efeito Venturi ocorre quando edifícios estão situados de tal forma que provoquem uma convergência do escoamento do ar (Figura 2.8). Segundo a NBR 6123:1988, edificações próximas podem apresentar coeficientes de pressão negativos superando, em módulo, o valor de 2,0.

Segundo Mara, Ho e Isyumov (2012), o afunilamento do ar causado pelo efeito Venturi pode organizar o escoamento do ar, reduzindo a intensidade de turbulência. Como consequência, a resposta transversal do edifício pode ser majorada por mecanismos de desprendimento cadenciado de vórtices. Além disso, o efeito Venturi causa mudanças no escoamento de ar nas proximidades do solo, afetando o conforto dos pedestres (FU, 2018).

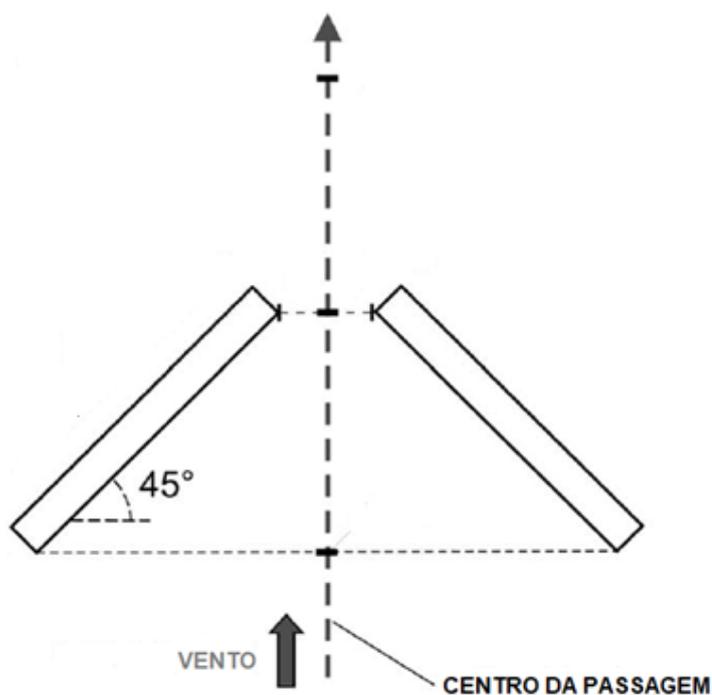


Figura 2.8: Exemplo de configuração propícia ao efeito Venturi. Fonte: adaptado de Blocken *et al.* (2008).

2.6.2 Deflexão do vento na direção vertical

Após incidir em obstáculos de altura elevada, como edifícios, parte do vento contorna o obstáculo pelas laterais e outra parte por cima (Figura 2.9). Ao passar por cima de um edifício, o vento é defletido parcialmente para baixo, devido ao gradiente de pressões, trazendo malefícios para as edificações mais baixas situadas a sotavento. Em situações bastante desfavoráveis, coeficientes de pressões variando de -1,5 a -2,0 podem ser obtidos nas edificações de menor altura (NBR 6123:1988).

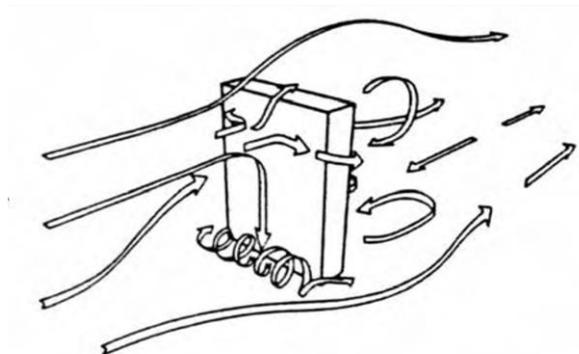


Figura 2.9: Deflexão do vento na direção vertical. Fonte: Carpeggiani (2004).

Além disso, a deflexão vertical do vento pode provocar fortes rajadas de vento próximo ao solo, comprometendo assim o conforto dos pedestres. Em um estudo realizado por Wise (1971), que analisou agrupamentos de edifícios e a sua interferência no conforto dos pedestres, seus resultados indicaram que a velocidade próxima ao solo pode assumir valores superiores até mesmo à velocidade no topo do edifício. Para eliminar esses efeitos nocivos ao conforto humano, o autor sugere a inserção de telas ao redor da vizinhança ou, até mesmo, a construção de uma cobertura nas regiões mais desfavoráveis.

2.6.3 Turbulência na esteira

A turbulência presente na esteira de alguns edifícios pode causar diferentes tipos de ações em outras edificações. Por exemplo, como fenômeno dinâmico, menciona-se o já abordado martelamento (item 2.5.3). Além disso, fortes variações de pressões dos edifícios localizados na esteira podem ocorrer, sendo especialmente preocupantes no caso de se tratar de edificações com coberturas e painéis de vedação feitos de materiais leves (NBR 6123:1988).

2.7 ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Diferentemente das variáveis determinísticas, que podem ser calculadas com grande precisão, as variáveis aleatórias fornecem resultados dependentes de fatores aleatórios, não podendo assim serem determinadas com exatidão (BARBETTA; REIS; BORNIA, 2010). Nesse contexto, medidas estatísticas como desvios padrões e correlações, além de densidades espectrais, devem ser utilizadas para representar de maneira adequada essas variáveis aleatórias.

Como exemplo de variável aleatória, cita-se o valor da velocidade do vento em um instante de tempo qualquer.

Processos aleatórios são classificados como estacionários se os seus parâmetros estatísticos pouco diferem entre si ao se aplicar um deslocamento de tempo nas amostras, e são classificados como ergódicos se qualquer parâmetro estatístico obtido sobre um conjunto de registros é igual ao mesmo parâmetro calculado sobre qualquer registro representativo do processo (BLESSMANN, 2005).

Na década de 60, R desenvolveu uma abordagem para estimar as vibrações devidas ao vento em edificações considerando as variações na velocidade do vento como um processo aleatório estacionário (HOLMES, 2015). Nesse sentido, Davenport introduziu as densidades espectrais de potência, já utilizadas em outras áreas do conhecimento, para avaliar os efeitos do vento sobre as estruturas.

Os espectros são capazes de revelar graficamente quão rápido ocorrem as variações de magnitude de uma variável aleatória, como a velocidade do vento ou a resposta de uma estrutura, por exemplo. Segundo Holmes (2015), é definida de modo que a contribuição para a variância de uma variável dada no domínio do tempo, $u(t)$, numa gama de frequências variando de f até $f + df$, é dada por $S_u(f) df$, a qual $S_u(f)$ é o valor de densidade espectral, na frequência f . Portanto, integrando para todas as frequências, obtém-se a variância de $u(t)$:

$$\sigma_u^2 = \int_0^{\infty} S_u(f) df \quad (2.13)$$

Os espectros de potência revelam a contribuição da energia contida nas diversas faixas de frequência para a variância total da variável aleatória. Além disso, sua ordenada $S_u(f)$ não significa a energia, mas sim densidade de energia (BLESSMANN, 2005). A Figura 2.10 ilustra estes conceitos.

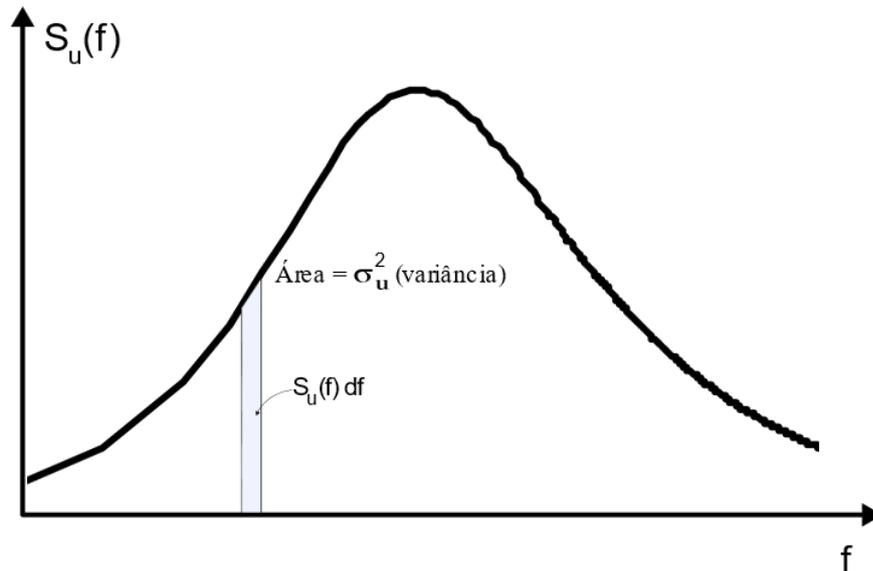


Figura 2.10: Densidade espectral da variância. Fonte: adaptado de Blessmann (2005).

Como a velocidade do vento é dividida em uma parcela média e uma parcela flutuante de média nula, as densidades espectrais se tornam então ferramentas valiosas para a análise da turbulência atmosférica do vento. Nesse contexto, diversas formulações matemáticas foram desenvolvidas para tentar representar o conteúdo de frequências da turbulência atmosférica. Dentre um dos mais utilizados na Engenharia do Vento para a turbulência longitudinal, cita-se o espectro de von Karman, dado por:

$$\frac{f S_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4 \left(\frac{f L_1}{\bar{V}(z)} \right)}{\left[1 + 70,78 \left(\frac{f L_1}{\bar{V}(z)} \right)^2 \right]^{5/6}} \quad (2.14)$$

na qual L_1 é a escala integral de turbulência longitudinal, que varia com a altitude e a rugosidade do terreno.

O processo de vibrações aleatórias desenvolvido por Davenport permite então relacionar o espectro de velocidades do vento com o espectro de forças desenvolvido na estrutura por meio da função de admitância aerodinâmica, que leva em consideração as dimensões da edificação e o tamanho dos turbilhões envolventes. Em outras palavras, as variações de velocidade não ocorrem simultaneamente nas faces à barlavento e nas faces localizadas na esteira, e suas correlações são levadas em conta no espectro das forças por meio da admitância aerodinâmica (HOLMES, 2015):

$$S_F(f) = \frac{4\bar{F}^2}{\bar{V}^2} \chi_a^2 S_v(f) \quad (2.15)$$

sendo:

$S_F(f)$ – Densidade espectral da força desenvolvida na edificação;

$S_v(f)$ – Densidade espectral da componente longitudinal do vento;

\bar{F} – Força média desenvolvida na edificação;

\bar{V} – Velocidade média do vento;

χ_a – Função de admitância aerodinâmica.

Tendo sido obtido o espectro de força causado pelo vento sobre a edificação, o espectro da resposta é obtido por meio da utilização da função de admitância mecânica, que leva em conta as propriedades dinâmicas da estrutura, tais como massa, rigidez e amortecimento. O processo estabelecido por Davenport (1963) está esquematizado na Figura 2.11.

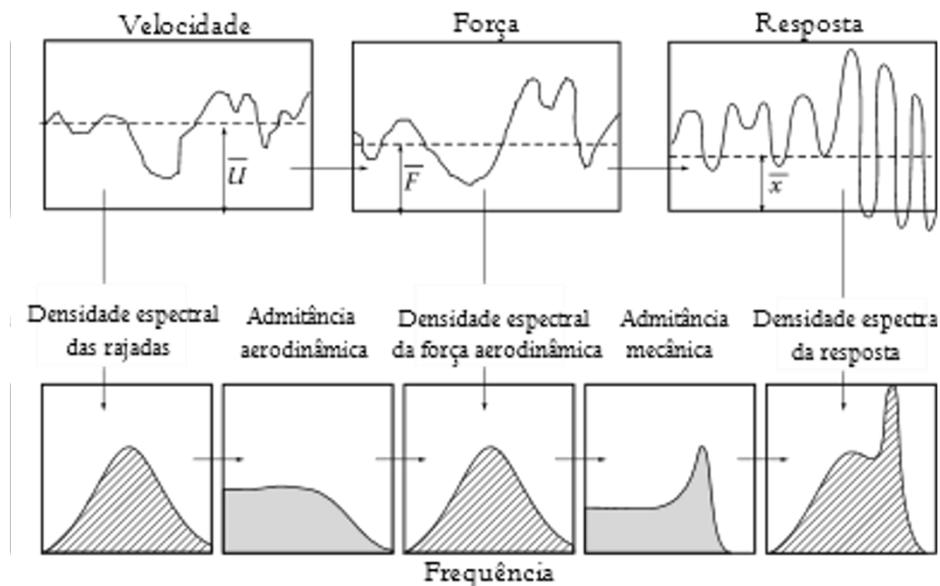


Figura 2.11: Metodologia das vibrações aleatórias de Davenport (1963). Fonte: adaptado de Holmes (2015).

Vickery (1968) *apud* Holmes (2015), a partir de dados de ensaios experimentais, obteve uma expressão analítica para a admitância aerodinâmica, ilustrada na Figura 2.12, dada pela seguinte equação:

$$\chi_a(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{2f\sqrt{A}}{V}\right)^{4/3}} \quad (2.16)$$

na qual A representa a área da edificação submetida às variações de velocidade do vento.

A partir de observações da Figura 2.12 e da Equação (2.16), verifica-se que as flutuações nas forças do vento ocorrem quase simultaneamente às flutuações de velocidade para corpos pequenos e de baixas frequências. Em contrapartida, a correlação diminui sensivelmente para altas frequências ou para grandes dimensões, o que é um sinal de que as rajadas de vento são ineficientes em produzir forças que envolvam toda a estrutura (HOLMES, 2015).

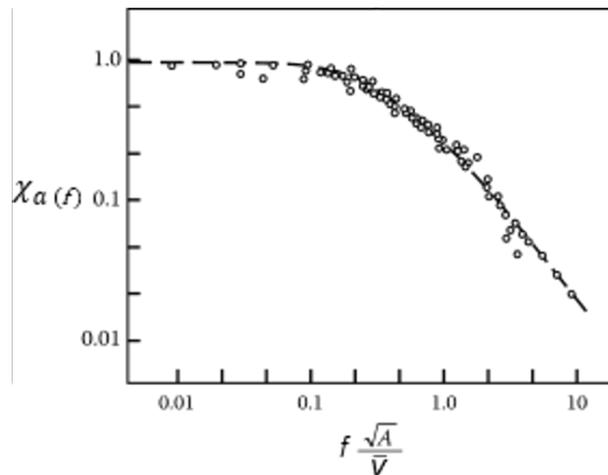


Figura 2.12: Dados experimentais e curva aproximada da admitância aerodinâmica. Fonte: adaptado de Vickery (1965) *apud* Holmes (2015).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Uma das principais aplicações do uso do túnel de vento, tratando-se de edificações, tem como objetivo determinar coeficientes de pressão e de força em modelos reduzidos, de modo que esses resultados possam ser aplicados para estruturas em escala real. Esses resultados podem ser confiáveis caso haja uma representação adequada das condições de escoamento em torno do modelo e da geometria do modelo reduzido (HOLMES, 2015).

Neste capítulo, apresenta-se o túnel de vento utilizado para realização dos ensaios experimentais deste trabalho. Também será esclarecido como é realizado o levantamento dos perfis de ventos utilizados nas simulações. Ao final do capítulo, os modelos ensaiados são apresentados.

3.1 TÚNEL DE VENTO *PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN*

Há duas categorias de classificação distintas que podem ser utilizadas para definir túneis de vento. A circulação do ar é a primeira, e os túneis de vento podem ser do tipo circulação aberta ou fechada. Outra forma de classificação diz respeito ao tipo de vento simulado em seu interior, de modo que existem túneis de simulação de camada limite, que produzem ventos deslizantes e turbulentos; e túneis aeronáuticos, que focam em produzir ventos uniformes de baixa turbulência.

Os ensaios deste trabalho foram realizados no túnel de vento *Professor Joaquim Blessmann* (Figura 3.1), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. Este túnel está em operação desde 1977, sendo um equipamento pioneiro na América do Sul. Trata-se de um túnel de simulação de camada limite e de circulação fechada, com relação comprimento / altura da câmara principal de ensaio aproximadamente igual a 10,4 e dimensões de 1,30 x 0,90 x 9,32 m (largura, altura e comprimento, respectivamente). Sem modelos e com vento uniforme e suave, a velocidade do vento nesta câmara ultrapassa 46 m/s (NÚÑEZ; LOREDO-SOUZA; ROCHA, 2012).

Este túnel de vento é de extrema importância para a Engenharia do Vento no contexto brasileiro, uma vez que as principais recomendações e atualizações são feitas com base em ensaios realizados neste equipamento. Como exemplo de sua importância, citam-se as

recomendações recentes de atualização da NBR 6123/1988 feita por meio do estudo de Loredo-Souza *et al.* (2009), no qual realizam sugestões de atualizações para carregamentos de torção em edifícios, além de recomendações para lidar com linhas de transmissão e uma proposta de novo capítulo referente ao desprendimento cadenciado de vórtices.

Este túnel de vento é um dispositivo que visa simular a camada limite atmosférica e as principais características do vento natural, a saber: perfis de velocidades médias, intensidade de turbulência e macroescala da turbulência. Para isso, podem ser utilizados elementos de rugosidade combinados com agulhas ou placas perfuradas no interior do túnel. Além disso, injeções de jatos de ar ao longo da seção do túnel podem ser utilizadas para a simulação correta do vento natural (LOREDO-SOUZA; SCHETTINI; PALUCH, 2004).



Figura 3.1: Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann. Fonte: Núñez, Loredo-Souza, Rocha (2012).

A Figura 3.2 ilustra o circuito do túnel de vento *Professor Joaquim Blessmann*. Ele conta com quatro mesas diferentes para simulação de experimentos, cada uma possuindo um tipo de aplicação específica. Segundo Blessmann (2011), alguns dos usos de cada mesa são os seguintes:

- a) Mesa M-I: ensaios para fins aeronáuticos no piso do túnel, com ventos de baixa turbulência e com baixa espessura de camada limite; ensaios para pesquisa em formas geométricas simples (bi ou tridimensionais); ensaios em estruturas civis com geradores de turbulência na câmara de simuladores;
- b) Mesa M-II: ensaios para fins aeronáuticos no eixo do túnel, ensaios em edificações com blocos colocados no piso e/ou geradores de turbulência para construção civil, ensaios para estudos de fenômenos de instabilidade aerodinâmica com modelos bidimensionais colocados horizontalmente;
- c) Mesa M-III: ensaios para estudos dinâmicos em estruturas de grande alteamento, tais como chaminés, pilares de viadutos, torres de telecomunicações e etc;
- d) Mesa M-IV: ensaios de dissipação de fumaça e de gases industriais, influência de topografia sobre os ventos, efeitos de interação e modelos de pontes.

A mesa M-II é a utilizada neste trabalho, pois é a indicada para o ensaio estático de modelos rígidos de edifícios, nos quais a interação fluido-estrutura não é levada em consideração.

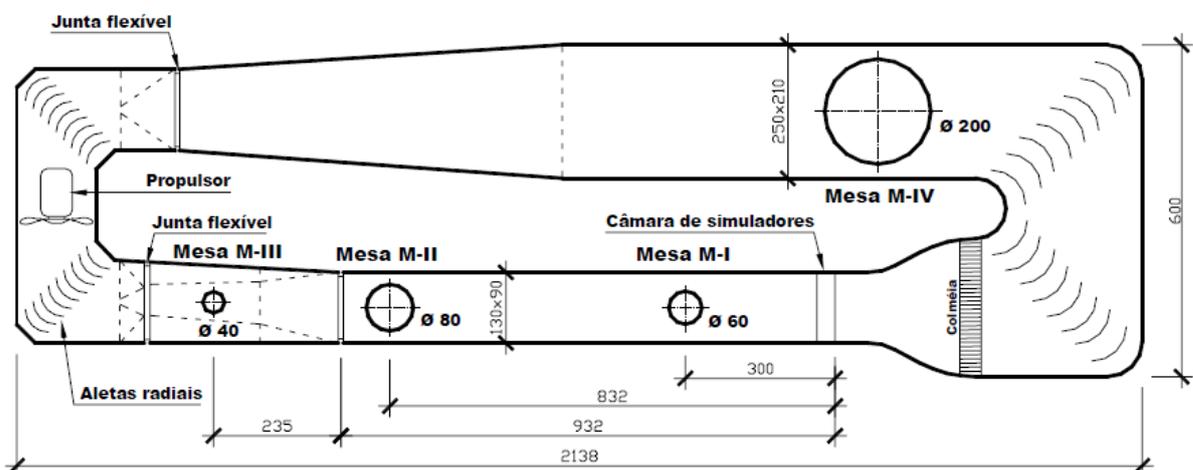


Figura 3.2: Circuito do túnel de vento prof. Joaquim Blessmann. Fonte: Loredou-Souza; Schettini; Paluch (2004).

Em cada ensaio, três variáveis são medidas com a finalidade de se calcular a velocidade média do vento. São elas a diferença de pressão estática (ΔP_a), a temperatura (θ) e a pressão atmosférica (P_{atm}) do ambiente. A medição da pressão estática é feita com dois anéis piezométricos localizados nos extremos do convergente da câmara principal, sendo utilizada em seguida para estimar a pressão dinâmica ao longe pela seguinte equação:

$$q = k_0 \Delta Pa \quad (3.1)$$

na qual:

q – Pressão dinâmica ao longe, em mmH₂O;

k_0 – Coeficiente adimensional que relaciona ambas as pressões;

ΔPa – Diferença de pressão estática entre os anéis piezométricos, em mmH₂O.

O coeficiente adimensional k_0 varia com a altura no interior do túnel de vento e com o tipo de perfil de velocidade média do vento. O laboratório possui curvas de calibração pré-determinadas com o valor desse coeficiente para diversas alturas e perfis de vento. Elas foram obtidas por meio do levantamento de diferentes perfis de vento e estudo entre a relação de pressões do anel piezométrico e a pressão dinâmica em uma certa altura do piso do túnel. Dessa forma, será selecionado k_0 referente à altura do topo do modelo para cada caso. Ou seja, a pressão dinâmica obtida se refere ao topo dos modelos.

Tendo sido calculada a pressão dinâmica ao longe, a velocidade média no topo do modelo pode ser relacionada a ela pela seguinte equação:

$$\overline{V}_H = k_b \sqrt{\frac{2 \overline{q}_H}{\rho_{ar}}} \quad (3.2)$$

sendo:

\overline{V}_H – Velocidade média do vento no topo do modelo (m/s);

\overline{q}_H – Pressão dinâmica média no topo do modelo;

k_b – Fator de bloqueio;

ρ_{ar} – Massa específica do ar (kg/m³).

O fator de bloqueio é influenciado pelo bloqueio parcial da seção transversal do túnel pelos próprios modelos. Considerando as dimensões da câmara de ensaios e dos modelos, que serão dados no item 3.3, k_b será adotado igual a 1,0. Holmes (2015) sugere que correções devem ser feitas à medida que a área do modelo ocupe maior espaço em relação à área disponível para o escoamento no interior do túnel, mas este autor reconhece a limitação de se utilizar o valor preciso para realizar esta correção.

A massa específica do ar no momento do ensaio é calculada usando os valores medidos de temperatura e pressão atmosférica:

$$\rho_{\text{ar}} = \frac{P_{\text{atm}}}{R (\Theta + 273,15)} \quad (3.3)$$

na qual:

P_{atm} – Pressão atmosférica no momento do ensaio, em Pascal;

R – Constante universal dos gases (para o ar seco, igual a 287,05 J/kgK);

Θ – Temperatura durante o ensaio, em graus Celsius.

3.2 SIMULAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES MÉDIAS DO VENTO

Como mencionado anteriormente, a correta simulação do vento é imprescindível para que os resultados obtidos em modelos reduzidos sejam confiáveis. As principais características do vento encontrado no interior da CLA serão obtidas com a inserção de blocos de rugosidade no piso do túnel (tacos de madeira) e elementos verticais posicionados no início da câmara de ensaios, que geram turbulência.

Com o intuito de avaliar o efeito da turbulência na caracterização aerodinâmica dos modelos, três perfis de ventos deslizantes serão utilizados. O primeiro, de baixa turbulência, possui expoente da lei potencial p igual a 0,11, correspondendo a um terreno de rugosidade entre as categorias I e II da NBR 6123/1988. O segundo perfil utilizado possui p igual a 0,23, situando-se entre as categorias III e IV de rugosidade. O terceiro perfil possui p igual a 0,26, sendo o mais turbulento de todos. As relações entre os tipos de terrenos e expoentes da lei potencial dadas pela Norma estão ilustradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Expoente p e categorias de terreno segundo a NBR 6123/1988.

Expoente p	Rugosidade do terreno – NBR 6123/1988
0,095	I
0,15	II
0,185	III
0,23	IV
0,31	V

(fonte: adaptado de NBR 6123/1988)

Antes de iniciar a execução dos ensaios, um anemômetro de fio quente da marca *Dantec Dynamics* foi utilizado para registrar as séries temporais da componente longitudinal da velocidade ao longo da altura do túnel. O *software* utilizado para a aquisição de dados é o *Streamware*, permitindo realizar medidas temporais de 64 segundos a uma taxa de aquisição de 1024 Hz, totalizando amostras de 65536 dados para diferentes alturas. Com essas séries temporais, foram traçados os perfis de velocidades médias e perfis de intensidades de turbulência. Além disso, os espectros de potência da componente longitudinal de turbulência foram obtidos a partir dessas séries temporais. Esses gráficos serão comparados com os dados apresentados por Núñez, Loredou-Souza e Rocha (2012), que descreveram as principais características do escoamento para ventos com três diferentes expoentes p utilizando este mesmo túnel de vento (Figura 3.3).

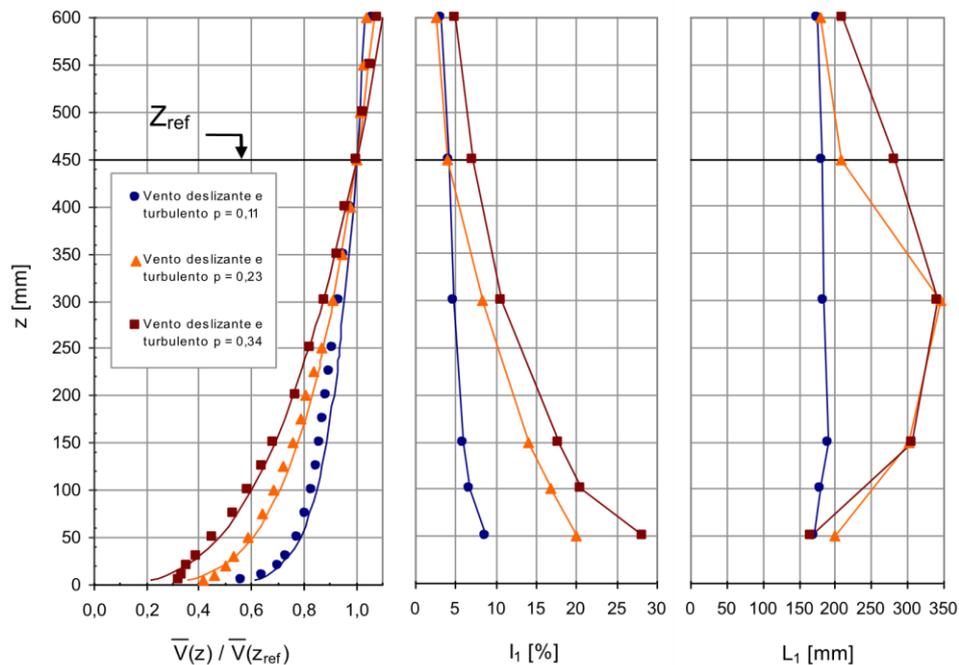


Figura 3.3: Perfis de velocidades médias, intensidade de turbulência e macroescala longitudinal da turbulência para três tipos de ventos. Fonte: Núñez, Loredou-Souza e Rocha (2012).

3.3 EDIFÍCIOS MODELOS E CONFIGURAÇÕES DE ENSAIO

Dois modelos de edifícios serão ensaiados em configurações isoladas e em diferentes configurações de vizinhança. Enquanto o primeiro modelo, denominado Modelo I, consiste em um edifício real, com detalhes geométricos nas fachadas, o Modelo II é uma simplificação do primeiro, possuindo altura idêntica e paredes lisas, sem detalhes geométricos.

Após a realização dos ensaios na configuração isolada, será introduzido o modelo mudo com centro nas posições indicadas na Figura 3.4, que ilustra as configurações de vizinhança a serem adotadas nos ensaios. Por motivos de simplificação, construiu-se um modelo mudo idêntico ao Modelo II, pois se considera que os detalhes geométricos do modelo mudo não perturbam de maneira significativa o escoamento na sua esteira. Ao todo, 14 configurações de vizinhança serão testadas para cada edifício, sendo que quatro configurações estão localizadas à sotavento do modelo principal, ou seja, em sua esteira. A identificação de cada posição segue uma ordem alfabética iniciando com o modelo mudo em uma configuração tipo *tandem*, ou seja, alinhado com o modelo principal e na frente deste, prosseguindo nas configurações oblíquas e, por último, as posições localizadas na esteira. Vale ressaltar que tanto o modelo instrumentado como o modelo mudo foram posicionados de tal forma que a direção do vento fosse sempre perpendicular às suas maiores faces.

Além de verificar o efeito provocado pela vizinhança, será possível analisar a influência que os detalhes geométricos em fachadas provocam sobre as características aerodinâmicas dos modelos para diferentes condições de turbulência do vento (vide item 3.2).

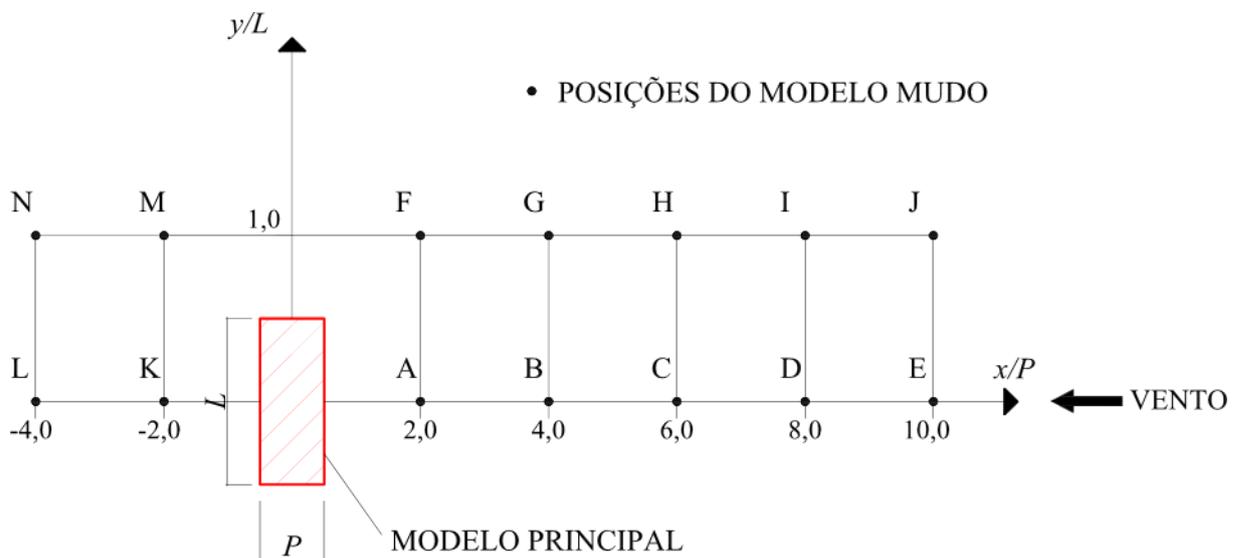


Figura 3.4: Configurações de ensaio. Fonte: autor.

3.3.1 Modelo I

Este modelo, que provém da base de dados do LAC, trata-se de um edifício real de concreto armado construído no Brasil. Ele possui 42 pavimentos e seção variável ao longo de seus 152,14 metros de altura, tornando, juntamente com sua arquitetura complexa, muito importante a sua análise experimental em túnel de vento. A Figura 3.5 apresenta duas fachadas

do edifício em questão, ressaltando que alguns detalhes arquitetônicos das fachadas foram omitidos com o intuito de preservar a identidade do edifício.

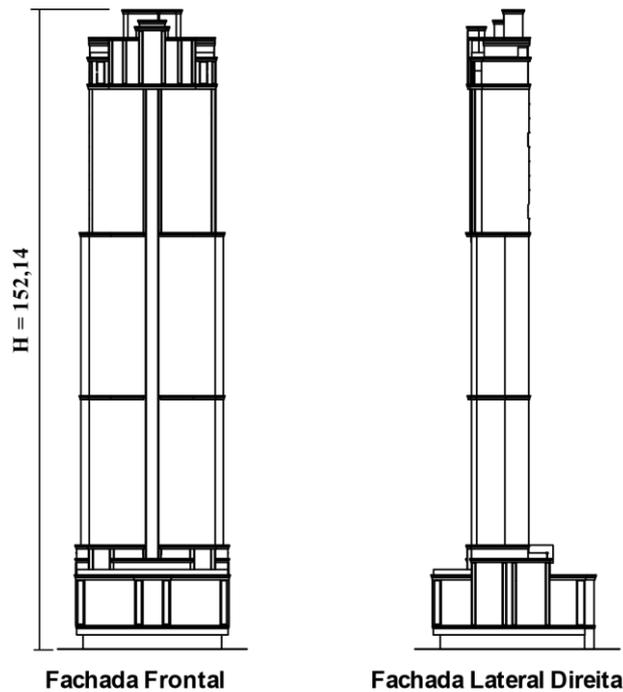


Figura 3.5: Elevações frontal e lateral do Modelo I. Fonte: adaptado de LAC (2019).

A planta baixa do pavimento tipo está ilustrada na Figura 3.6, com a indicação do centro de rigidez do edifício para referência das forças e momentos. Em todas as configurações de ensaios, ele será posicionado de modo que o vento incida perpendicularmente à fachada frontal (F1), tendo em vista algumas considerações de Ruscheweyh (1980), Khanduri, Stathopoulos e Bédard (1998) e Sykes (1983) (vide item 2.6), que observaram que a incidência do vento perpendicular à maior fachada provoca efeitos de vizinhança mais intensos.

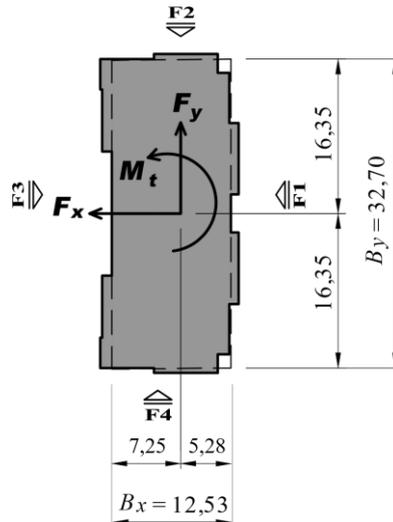


Figura 3.6: Planta baixa do pavimento tipo do Modelo I. Fonte: adaptado de LAC (2019).

Este modelo reduzido rígido foi construído com resina em escala de 1/400, tendo sido instrumentado com 355 tomadas de pressão, das quais aproximadamente 290 têm como objetivo obter esforços sobre a estrutura, sendo o restante para revestimento. Além disso, o modelo foi dividido em 6 zonas diferentes ao longo de sua altura, permitindo análises locais nestas zonas (Figura 3.7). A Figura 3.8 ilustra o posicionamento das tomadas em um corte da Zona 4, representativa do pavimento tipo.

A Tabela 3.2 resume as principais características do Modelo I. Os valores usados para a largura e profundidade da seção correspondem, de maneira aproximada, ao retângulo envolvente do pavimento tipo (Figura 3.6).

Tabela 3.2: Características do Modelo I

Altura – H (m)	152,14
Largura – L (m)	32,70
Profundidade – P (m)	12,53
Número de tomadas	355
Número de zonas	6
Escala do modelo reduzido	1/400

(fonte: autor)

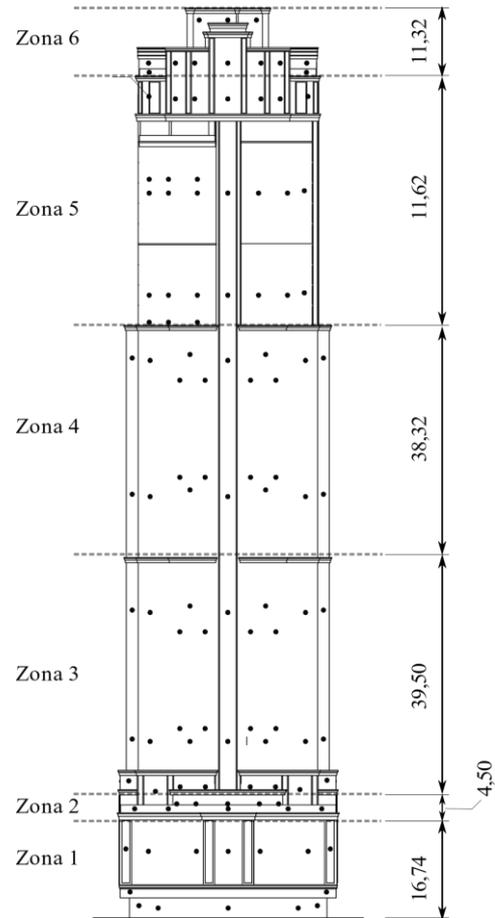


Figura 3.7 - Subdivisão do Modelo I em zonas. Fonte: autor.

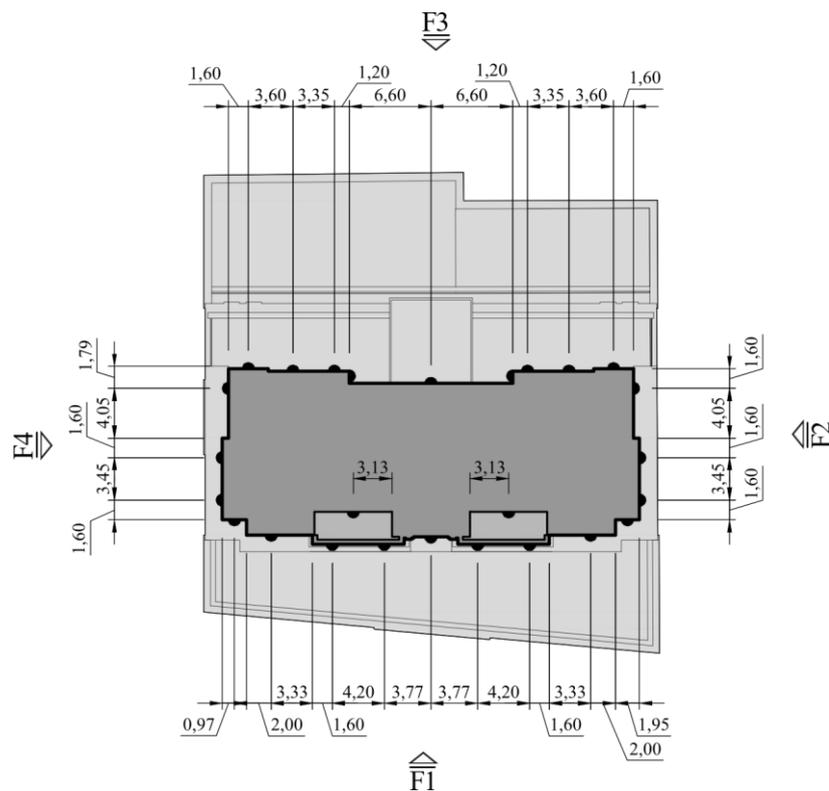


Figura 3.8: Posição das tomadas no pavimento tipo - corte representativo da Zona 4. Fonte: LAC (2019).

3.3.2 Modelo II

Ressaltando o que foi mencionado anteriormente, o Modelo II consiste em uma simplificação do Modelo I. Isto é: trata-se de um modelo com seção igual ao retângulo envolvente do pavimento tipo do outro edifício, de mesma altura, porém com paredes lisas, conforme está representado na Figura 3.9. Essa simplificação permite avaliar os efeitos que os detalhes geométricos exercem sobre a caracterização aerodinâmica do prédio.

Este modelo foi construído com peças em acrílico em escala de 1/400, sendo instrumentado com 220 tomadas de pressão, divididas em 11 linhas com 20 tomadas. A quantidade de tomadas adotada neste modelo foi menor que a do modelo do Modelo I por se tratar de uma geometria mais simples. A distribuição dos pontos de pressão em cada linha está ilustrada na Figura 3.10, enquanto a Tabela 3.3 resume as principais características deste edifício. Assim como no outro modelo, o Modelo II será subdividido em 6 zonas ao longo de sua altura para realizar análises locais.

Além disso, ilustra-se o Modelo II, em sua condição isolada, durante ensaio no túnel de vento (Figura 3.11).

Tabela 3.3: Característica do Modelo II

Altura – H (m)	152,14
Largura – L (m)	32,70
Profundidade – P (m)	12,53
Número de tomadas utilizadas	220
Número de zonas	6
Escala do modelo reduzido	1/400

(fonte: autor)

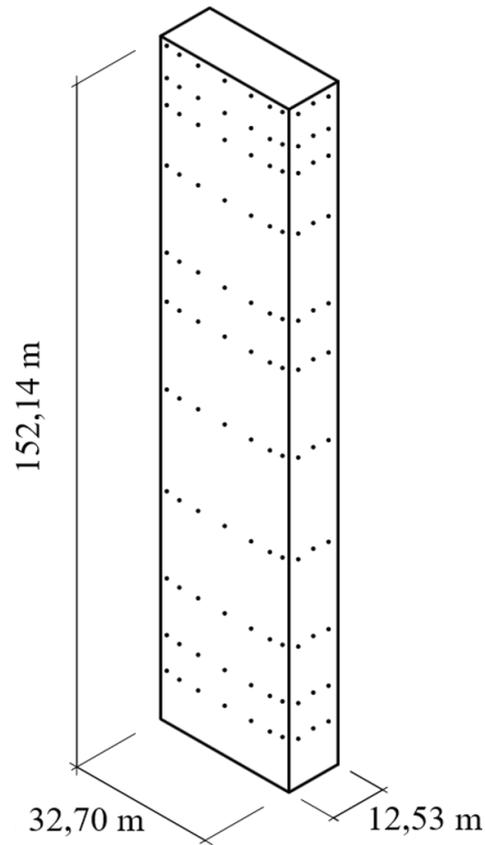


Figura 3.9: Perspectiva do Modelo II. Fonte: autor.

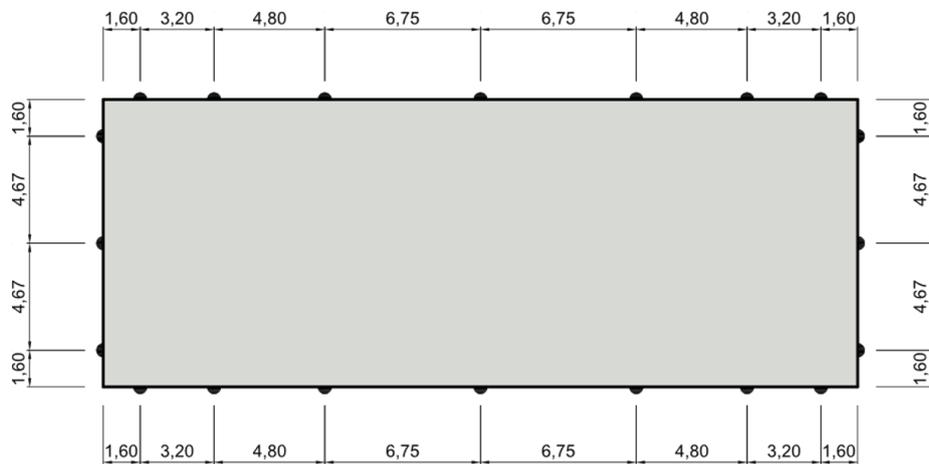


Figura 3.10: Posição em planta das tomadas do Modelo II. Fonte: autor.

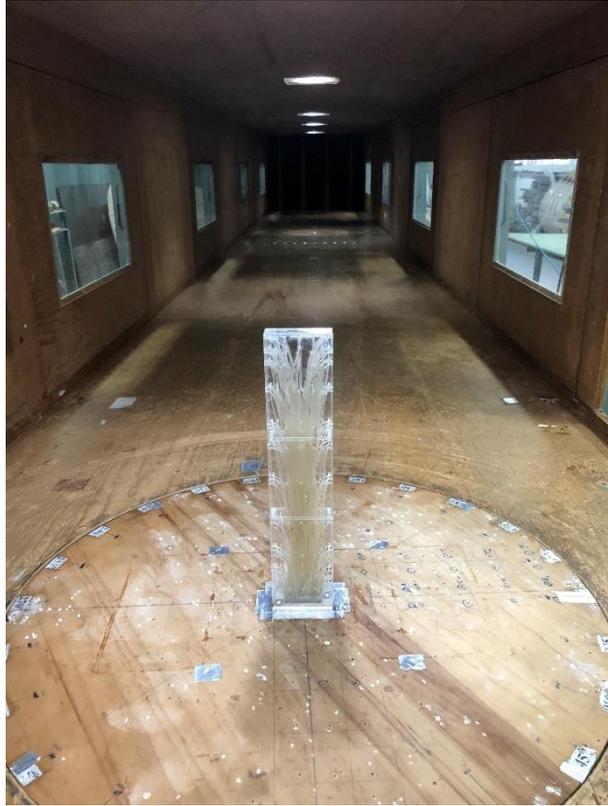


Figura 3.11: Ensaio do Modelo II na condição isolada. Fonte: autor.

4 PROCESSAMENTO DE DADOS

Após a realização dos ensaios, dá-se início ao processamento de dados, etapa na qual se realiza a integração das pressões de cada tomada para obter forças e momentos. Além disso, as séries temporais de pressões obtidas nos ensaios são utilizadas para gerar espectros, ajudando a identificar a ocorrência de fenômenos dinâmicos na estrutura. Nesse contexto, o presente capítulo detalha o procedimento que será utilizado para realizar o processamento de dados, sendo utilizado, para esse fim, um *script* elaborado pelo autor no *software* Matlab. Esse *script* foi elaborado tendo como base uma sub-rotina de autoria do Prof. Dr. Marcelo Maia Rocha (ROCHA, 2000), disponibilizada na disciplina de Introdução à Teoria de Vibrações, em 2018, para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Algumas convenções que serão adotadas durante o processamento também serão apresentadas.

4.1 INTEGRAÇÃO DE PRESSÕES

O método que será utilizado nesta pesquisa para obter as ações sobre os modelos é a base do *High Frequency Pressure Integration* (HFPI), que consiste em utilizar modelos rígidos instrumentados com centenas de pontos de tomadas de pressão e juntá-los com modelos numéricos da estrutura (ROCHA; LOREDO-SOUZA (2008) *apud* CARINI (2017)). As principais vantagens da utilização do HFPI são a simplicidade em poder utilizar modelos rígidos e a possibilidade de estimar o comportamento dinâmico da estrutura em modos de vibração superiores ao fundamental (IRWIN; DENOON; SCOTT, 2013), algo que não é possível de se realizar em ensaios com balanças de forças, que geralmente simulam apenas os primeiros modos de vibrações.

As tomadas de pressão serão lidas simultaneamente com o sistema de aquisição de dados do LAC (Figura 4.1), que é composto por cinco módulos do aparelho ZOC33 (Figura 4.2), da marca *Scanivalve*, conectados a um computador. Cada um desses módulos conta com 64 sensores de pressão, que são conectados às tomadas de pressão dos modelos por tubos pneumáticos. O *software* usado pelo LAC para aquisição de dados é o RAD4000, fornecido pela própria *Scanivalve* e, em cada ensaio, são coletadas amostras de 16 segundos a uma taxa de aquisição de 512 Hz, totalizando 8192 dados por tomada de pressão.

À cada tomada de pressão é associada uma área de referência A_i , a qual é considerada com pressão numericamente igual à pressão lida pela sua respectiva tomada. Para calcular então a força que uma tomada específica exerce sobre o modelo, deve-se levar em consideração ainda o cosseno diretor da área de referência da tomada. Como exemplo, será ilustrado como calcular forças nas direções x e y de um modelo de seção transversal hexagonal (Figura 4.3), na qual o eixo Z é perpendicular ao plano da folha.



Figura 4.1: Sistema de aquisição de dados do LAC. Fonte: Sartori (2010).

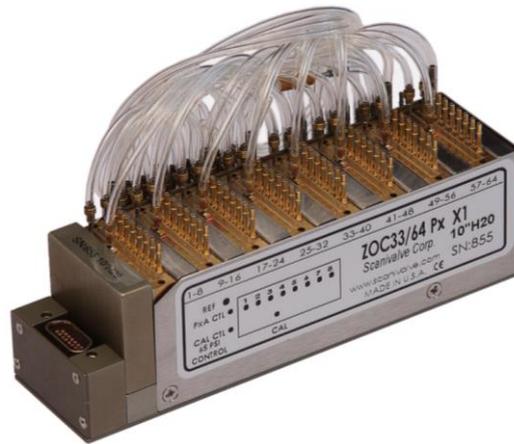


Figura 4.2: Transdutor de pressões ZOC33. Fonte: Scanivalve (2016).

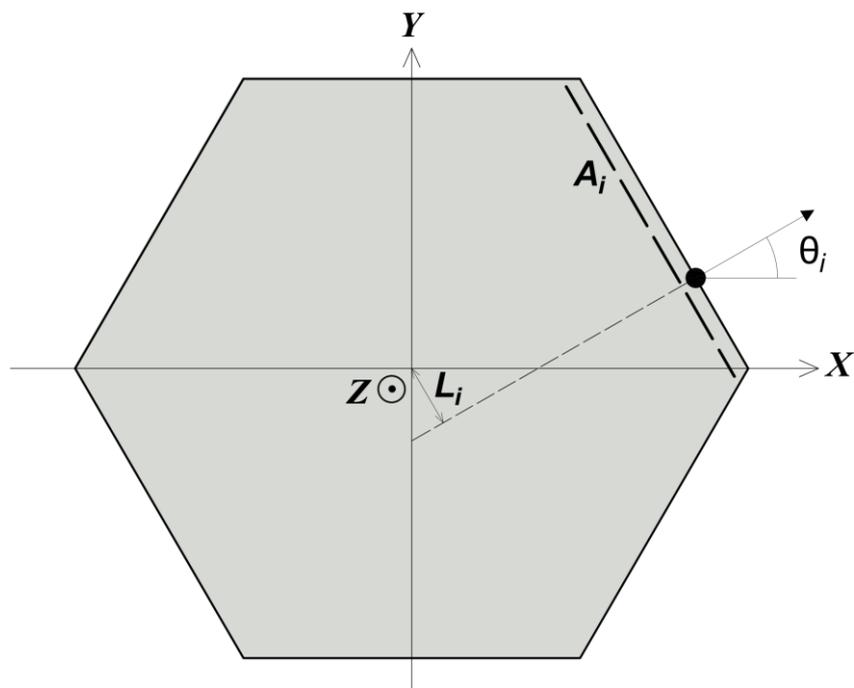


Figura 4.3: Exemplo de integração de pressões da tomada i . Fonte: autor.

Caso existissem infinitas tomadas distribuídas em áreas infinitesimais ao longo da superfície ilustrada na Figura 4.3, a força resultante nesta superfície poderia ser calculada pela seguinte equação:

$$\vec{F}(t) = \int_S P(t) \vec{U} dA \quad (4.1)$$

na qual:

$\vec{F}(t)$ – Força resultante no instante t ;

$P(t)$ – Pressão instantânea, medida em relação à pressão estática;

\vec{U} – Cossenos diretores da normal à superfície que se deseja obter a resultante;

S – Superfície da estrutura para a qual se deseja obter a resultante $\vec{F}(t)$.

Há, entretanto, um número finito de tomadas espalhadas ao longo da superfície S cujas áreas de atuações estão limitadas às suas áreas de referência A_i . Dessa forma, a Equação (4.1) pode ser simplificada, considerando as componentes da força nos eixos x e y :

$$F_x(t) \cong - \sum_{i=1}^N P_i(t) \cos \theta_i A_i \quad (4.2)$$

$$F_y(t) \cong - \sum_{i=1}^N P_i(t) \sen \theta_i A_i \quad (4.3)$$

na qual $P_i(t)$ representa a pressão instantânea na i -ésima tomada, e N é o número total de tomadas do modelo. O sinal negativo nas Equações (4.2) e (4.3) ocorrem para compatibilizar com o sentido dos eixos na Figura 4.3. Valores positivos de pressão significam sobrepressão, enquanto valores negativos, sucção.

Similarmente, pode-se escrever o momento torçor atuando em torno do centro geométrico do modelo da seguinte maneira:

$$M_t(t) \cong \sum_i^N P_i(t) A_i L_i \quad (4.4)$$

sendo:

$M_t(t)$ – Momento torçor atuando no instante de tempo t ;

L_i – Distância entre a projeção da linha de atuação da tomada e o centro de torção do edifício, ilustrado na Figura 4.3.

Com a obtenção de forças e momentos no domínio do tempo, prossegue-se com a obtenção dessas variáveis no domínio da frequência, com o cálculo de densidades espectrais, o que possibilita analisar a ocorrência de fenômenos dinâmicos com maior facilidade. Dessa forma, para obter os espectros, deve-se utilizar a Transformada Rápida de Fourier (FFT).

4.2 TRANSFORMADA DE FOURIER

A transformada de Fourier consiste em uma generalização das séries de Fourier, tornando possível ver as componentes em termos de frequência de um sinal. Por definição, a transformada de Fourier, aplicada a uma função contínua no domínio do tempo, $u(t)$, é dada por:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (4.5)$$

sendo:

$f(t)$ – Função no domínio do tempo;

$F(\omega)$ – Função no domínio da frequência;

ω – Frequência angular (rad/s).

Para que a Equação (4.5) seja aplicável e a integral exista, ela somente pode ser aplicada a funções contínuas. Entretanto, conjuntos de dados digitais medidos experimentalmente são como funções discretas, sendo lidos em intervalos de tempo constantes, não podendo a eles ser aplicado essa equação. Sendo assim, deve-se utilizar a versão discreta da transformada de Fourier (DFT, do inglês *Discrete Fourier Transform*), dada por:

$$F_k = \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-i \omega_k n / N} \quad (4.6)$$

na qual f_n representa o n -ésimo valor da função discretizada no domínio do tempo e N é o número total de pontos da função. A Equação (4.6) é válida para $k = 0, 1, \dots, N-1$. Observa-se que, para cada n , são necessárias N multiplicações entre números complexos e $N-1$ adições de números complexos. Dessa forma, uma quantidade da ordem de N^2 operações são necessárias, resultando em um algoritmo muito extenso.

Com o objetivo de criar uma maneira mais eficiente e rápida para realizar a transformada discreta de Fourier, Cooley e Tukey (1965) desenvolveram um algoritmo bastante utilizado atualmente, chamado *Fast Fourier Transform*, no qual a ordem de operações é reduzida para $N \log_2 N$. Esse algoritmo se encontra implementado em bibliotecas de praticamente todas as linguagens computacionais, sendo facilmente utilizado. Em Python, está localizado na biblioteca *NumPy*.

O resultado da aplicação do FFT fornece números complexos simétricos em torno de uma frequência central. Isto é, apenas metade do sinal é suficiente, considerando os valores absolutos. Para se obter então a densidade espectral de potência, utiliza-se a seguinte equação:

$$\text{PSD}(f) = 2 \frac{\Delta t}{N} \left| \text{FFT}_k \Big|_{k=2}^{N/2} \right|^2 \quad (4.7)$$

sendo:

PSD(f) – Densidade espectral de potência;

FFT – Transformada discreta de Fourier por meio do algoritmo do *FFT* em um dado discreto.

4.3 SUAVIZAÇÃO DOS ESPECTROS

Um sinal captado no domínio do tempo, ao ser analisado no domínio da frequência, pode apresentar ruído que dificulte a identificação de padrões de comportamentos. Dessa forma, após a obtenção dos espectros de potência, o próximo passo será suavizá-los por meio da aplicação de filtros, possibilitando a visualização de frequências dominantes com mais facilidade.

Será utilizado um filtro do tipo média móvel simples centrada, o qual mescla dados obtidos em um dado instante com momentos anteriores e posteriores. Por necessitar de dados em instantes futuros, este tipo de filtro é caracterizado por ser aplicável somente à sistemas de funcionamento *offline*, com conjuntos de dados já armazenados previamente, como é o caso dos dados que serão obtidos nesta pesquisa.

Imagine-se um conjunto X de dados com n pontos obtidos por experimentalmente. Após definir a quantidade de pontos k a ser utilizada no cálculo da média móvel, também chamada de largura da janela, aplica-se o filtro por meio das equações a seguir:

$$Y_n = \frac{X_{n-j} + \dots + X_{n-1} + X_n + X_{n+1} + \dots + X_{n+j}}{k} \quad (4.8)$$

$$j = \frac{k-1}{2} \quad (4.9)$$

na qual:

Y_n – Conjunto suavizado de dados;

X_n – Conjunto original de dados;

k – Quantidade de pontos utilizados para o cálculo da média.

Caso o número de pontos k seja par, deve-se introduzir $k-1$ na Equação 4.9. Para aplicar esse procedimento em pontos de extremidade, a média é obtida com a quantidade de pontos disponível. Neste trabalho, a largura de janela será definida de maneira iterativa após a obtenção dos dados, de modo que seja obtida a melhor visualização da resposta. A Figura 4.4 mostra um exemplo de aplicação do filtro de média móvel com o objetivo de suavizar um conjunto de dados discretos.

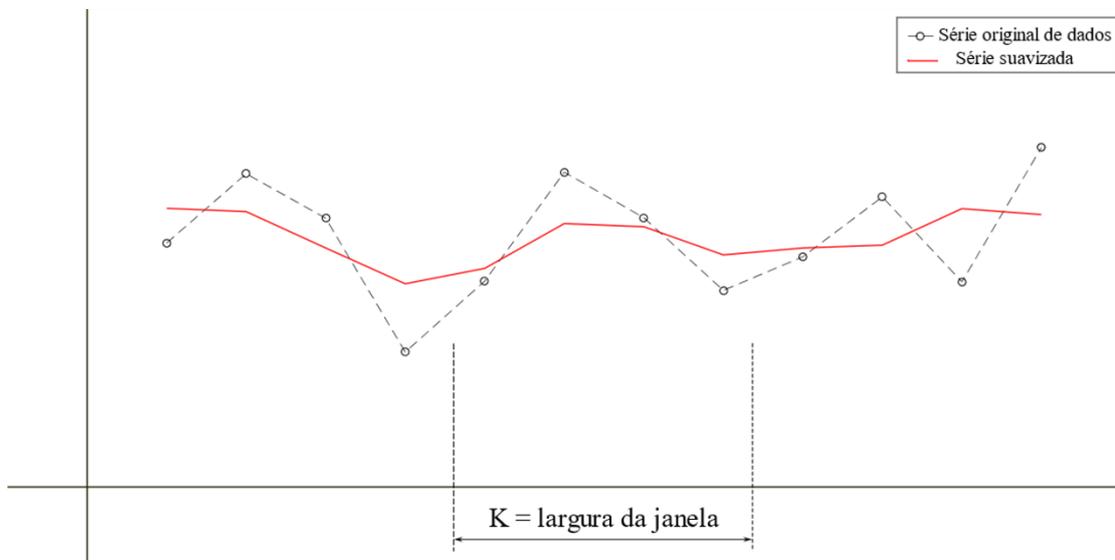


Figura 4.4: Exemplo de aplicação do filtro de média móvel simples centrada. Fonte: autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os principais resultados obtidos nos experimentos realizados neste trabalho. As características dos ventos utilizados serão apresentadas primeiramente, com a ilustração do perfil de velocidades médias, intensidade de turbulência longitudinal e os espectros dessa turbulência. Em seguida, serão apresentados os espectros das forças globais nos modelos.

5.1 ESCOAMENTO DO AR

Com o anemômetro de fio quente inserido no eixo do túnel, os perfis de ventos com expoentes $p = 0,11$, $p = 0,23$ e $p = 0,26$ foram levantados. A Figura 5.1 representa os dados do perfil de velocidades médias adimensionalizadas pela velocidade média na altura de 450 mm, juntamente com as curvas teóricas. Além disso, o perfil de turbulência longitudinal, dado por meio da Equação (2.6), é apresentado.

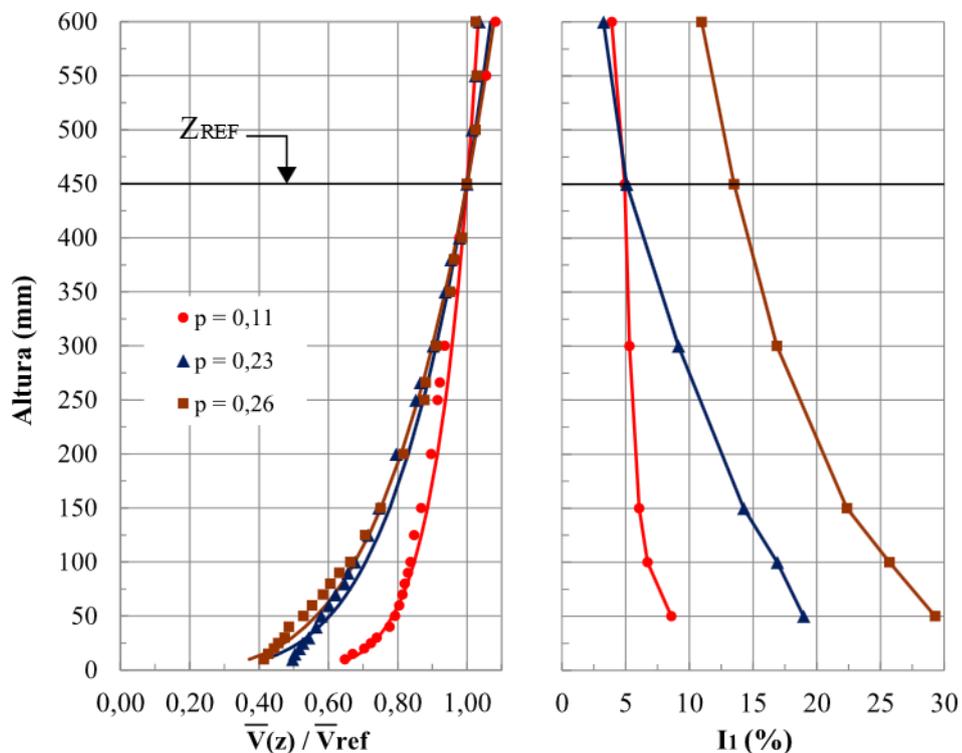


Figura 5.1: Perfil vertical de velocidades médias e intensidade de turbulência. Fonte: autor.

Com as séries temporais obtidas, os espectros da componente longitudinal de turbulência foram calculados para a altura de 266 mm. Essa altura corresponde a 70% da altura

dos modelos, e ela foi escolhida porque é aproximadamente nesta região que ocorrem os pontos de estagnação do escoamento. Além dos espectros obtidos com dados experimentais, os espectros teóricos de von Kármán foram desenhados para todos os perfis. As Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam dados para perfis de expoente 0,11, 0,23 e 0,26, respectivamente. Segundo Holmes (2015), este modelo é o mais comum na Engenharia do Vento por melhor representar a componente longitudinal da velocidade do vento. Sua formulação é dada por:

$$\frac{f S_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4 St_u}{(1+70.8 St_u^2)^{5/6}} \quad (3.4)$$

na qual St_u representa a frequência reduzida, sendo definida por:

$$St_u = \frac{f L_{11}}{\bar{V}(z)} \quad (3.5)$$

L_{11} é a macroescala de turbulência e, de acordo com Loredou-Souza, Schettini e Paluch (2005), ela pode ser calculada por $L_{11} = \bar{V}(z)/2\pi f_{\text{pico}}$, na qual f_{pico} corresponde à frequência de pico do espectro de potência da turbulência medida experimentalmente.

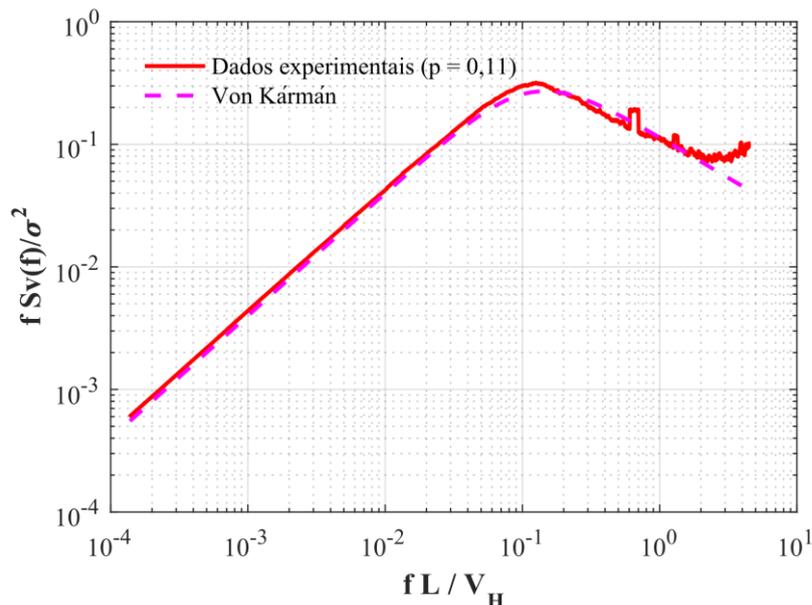


Figura 5.2 - Espectros da componente longitudinal da turbulência em $Z = 266$ mm e $p = 0,11$. Fonte: autor.

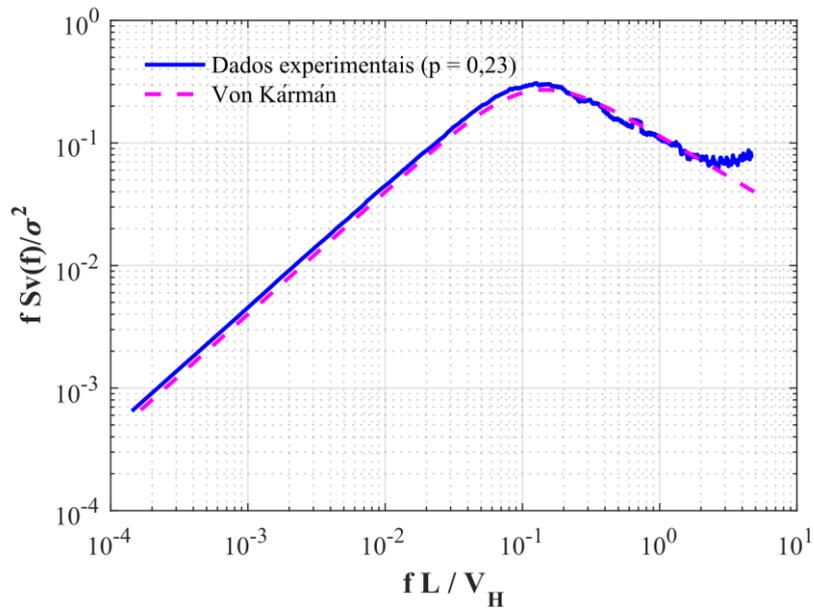


Figura 5.3 - Espectros da componente longitudinal da turbulência em $Z = 266$ mm e $p = 0,23$. Fonte: autor.

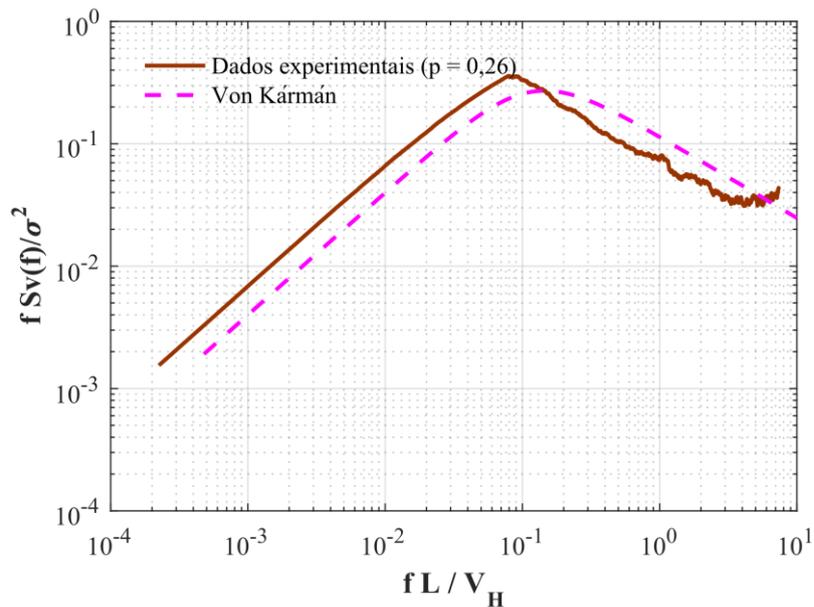


Figura 5.4 - Espectros da componente longitudinal da turbulência em $Z = 266$ mm e $p = 0,26$. Fonte: autor.

Observando os espectros ilustrados nas Figuras 5.2, 5.3 e 5.4, verifica-se uma boa concordância entre os espectros obtidos com dados experimentais e os teóricos de von Kármán, principalmente para expoentes de 0,11 e 0,23. A maior diferença encontrada para o perfil com p igual a 0,26 pode ser explicada pelo excesso de turbulência que está presente neste escoamento. Consideram-se, portanto, validados os perfis utilizados nesta pesquisa.

5.2 MODELO I

Neste tópico, serão apresentados os resultados, em termos de espectros de potência, das cargas globais sobre os edifícios. Primeiramente, serão apresentados os cenários considerando a edificação isolada, prosseguindo para as análises com vizinhanças tipo *tandem*, oblíqua e de esteira para o Modelo I, representativo de uma edificação real.

5.2.1 Configuração isolada

Para o Modelo I, os espectros considerando as forças globais em x , y e de momento torçor em z estão apresentados nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7, respectivamente. Com relação à força na direção x , dado na Figura 5.5, pode-se observar que não há ocorrência de fenômeno com pico acentuado de energia para ventos de expoente igual a 0,11 e 0,23, com pouca variação do espectro à medida que se acrescenta turbulência ao escoamento. Por outro lado, um pequeno pico de energia é observado no perfil de vento com expoente igual a 0,26 em região de alta frequência, o que poderia ser um ruído de interferência no sinal.

Considerando as forças na direção transversal ao escoamento (Figura 5.6), verifica-se a existência de fenômenos com picos concentrados de energia. Neste específico caso, os desprendimentos de vórtices provavelmente são os responsáveis pela aparência do espectro. Ao acrescentar turbulência no escoamento, passando do perfil de vento com $p = 0,11$ para $p = 0,23$, há um pequeno aumento no pico de energia em uma frequência específica e diminuição em outras faixas de frequência. Por outro lado, quando um escoamento ainda mais turbulento é inserido, ocorre o efeito contrário: há redução do pico do espectro com aumento em outras frequências, comportamento já observado por alguns estudos (KHANDURI; STATHOPOULOS; BÉDARD, 1998; BLESSMANN, 2005). Esses resultados sugerem que a turbulência do escoamento introduzida pelo perfil com expoente igual a 0,23 não é o suficiente para desorganizar os vórtices desprendidos sobre o modelo.

Considerando o momento torçor (M_z), dado na Figura 5.7, não há a visualização clara da ocorrência de fenômenos de energia concentrada. Observa-se ainda que a introdução de turbulência não altera significativamente os espectros de potência.

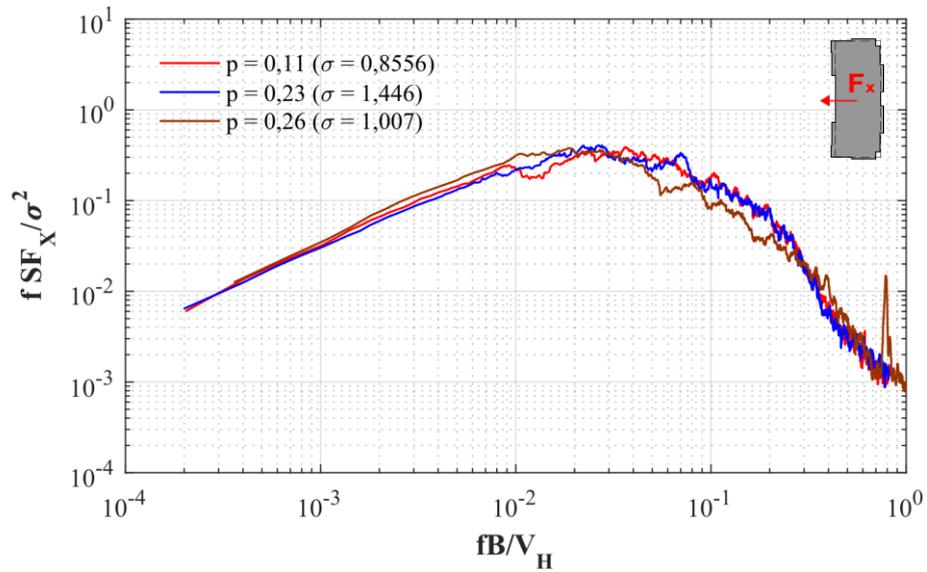


Figura 5.5: Espectros de potência de forças globais em x do Modelo I. Fonte: autor.

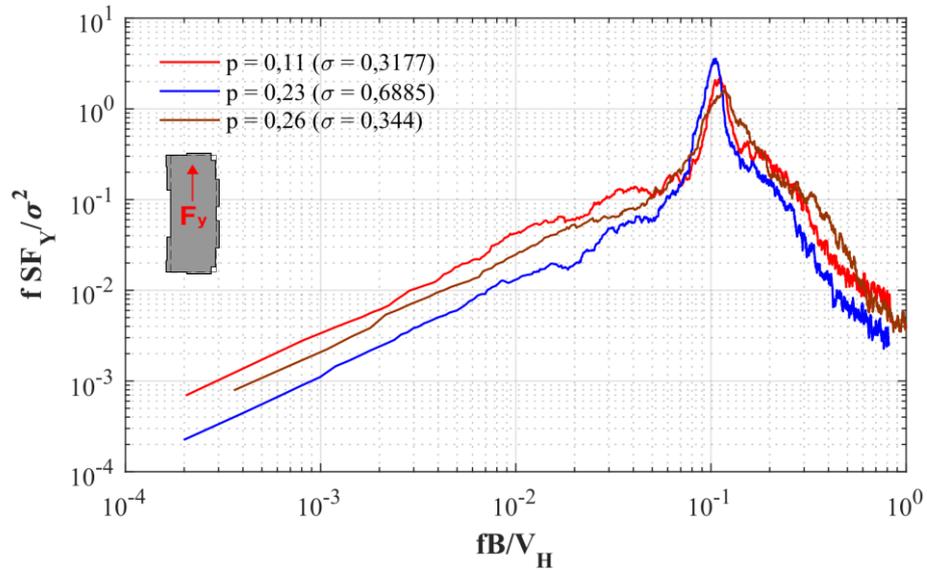


Figura 5.6: Espectros de potência de forças globais em y do Modelo I. Fonte: autor.

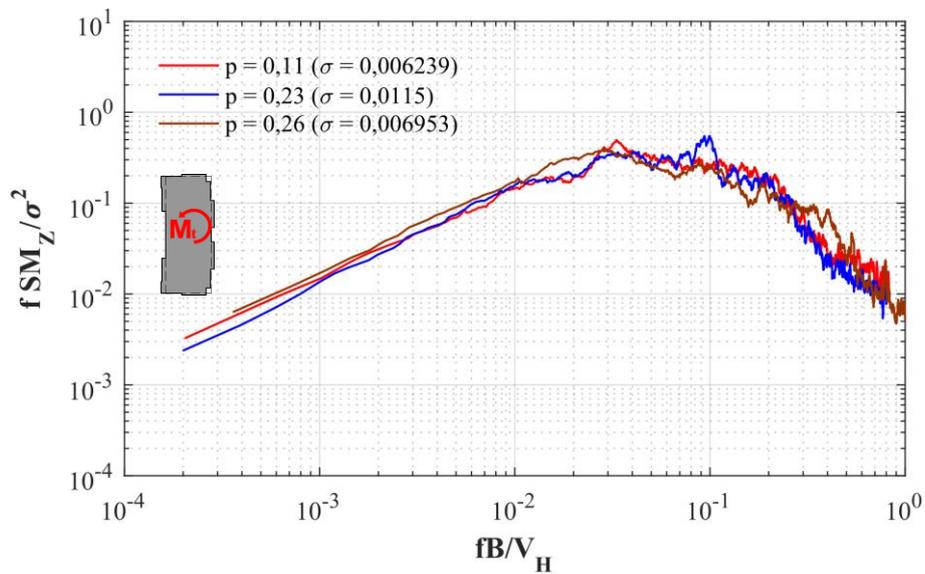


Figura 5.7: Espectros de potência de momento torçor do Modelo I. Fonte: autor.

5.2.2 Configuração de vizinhança tipo *tandem*

Como mencionado anteriormente, os resultados com vizinhança foram divididos em três categorias: configuração tipo *tandem*, configuração oblíqua e configuração com obstáculos na esteira. Considerando a força global na direção do vento, as Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 estão ilustrando os resultados para a configuração tipo *tandem* de perfis de vento com expoentes p iguais a 0,11, 0,23 e 0,26, respectivamente.

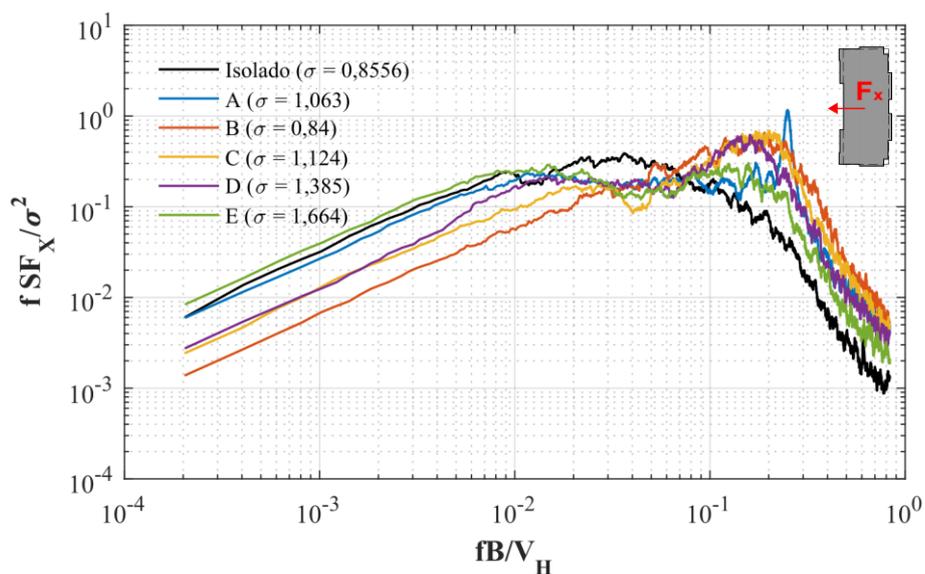


Figura 5.8: Espectro de força global em x do Modelo I para configuração tipo *tandem* e $p = 0,11$. Fonte: autor.

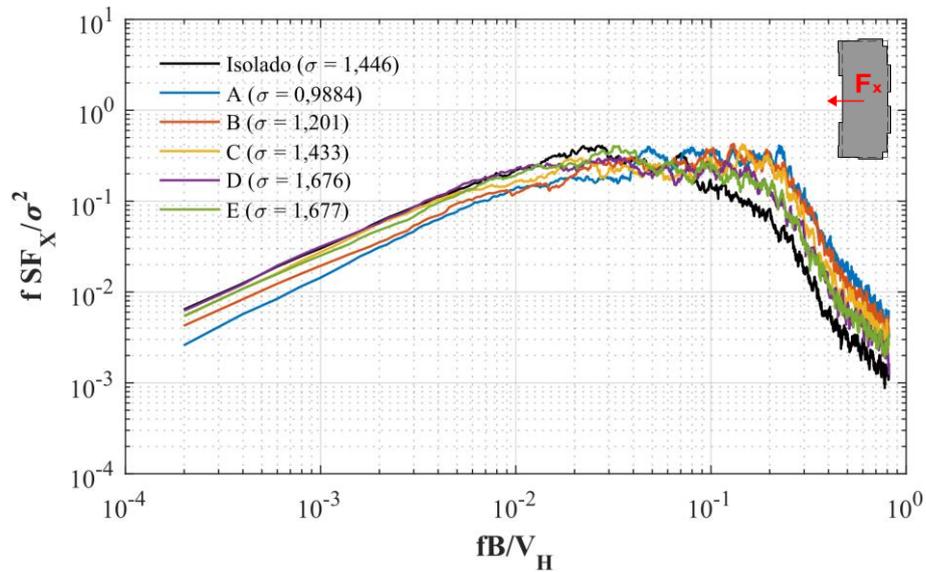


Figura 5.9: Espectro de força global em x do Modelo I para configuração tipo *tandem* e $p = 0,23$. Fonte: autor.

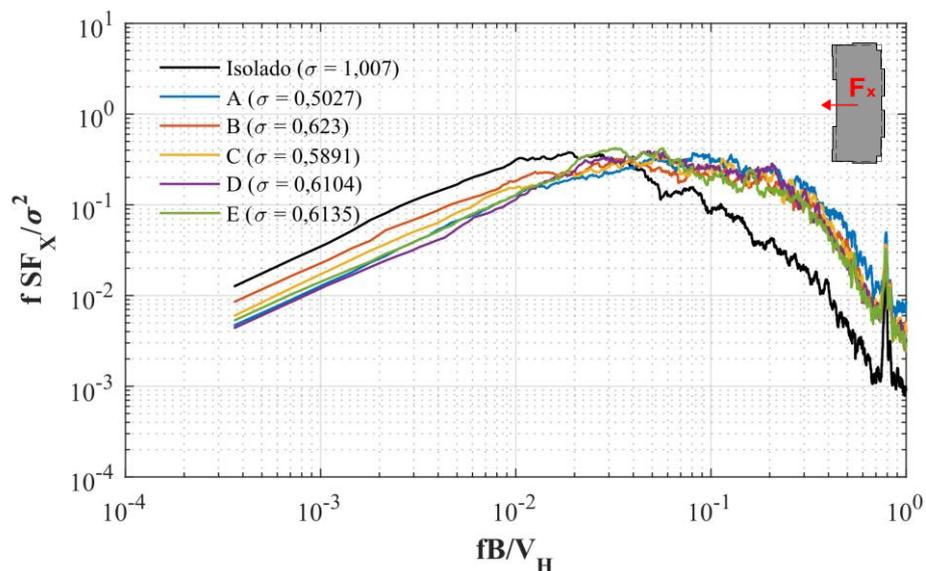


Figura 5.10: Espectro de força global em x do Modelo I para configuração tipo *tandem* e $p = 0,26$. Fonte: autor.

Pode-se verificar que a posição A em escoamento suave (Figura 5.8) apresenta um pico de energia, indicando um potencial de ocorrência de fenômeno dinâmico ressonante, a depender das características estruturais da edificação. Nota-se ainda que as outras configurações de vizinhança, em escoamento suave, possuem espectros significativamente diferentes do caso isolado. Verifica-se ainda que, mesmo para posições de 10 vezes a dimensão em planta da edificação na direção do obstáculo, há perturbações sensíveis no espectro de carregamento. Tais resultados corroboram o que já foi mencionado por Blessmann (2005), sendo a ocorrência de

martelamento possivelmente a responsável pela obtenção desses resultados. Pode-se observar ainda que, conforme a turbulência presente no escoamento aumenta, o espectro passa a exibir aparência mais similar ao espectro isolado.

As Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 mostram os espectros de força em y para a configuração tipo *tandem* do modelo I. Analisando essas figuras, verificam-se não só os picos concentrados de energias tipicamente causados de desprendimento de vórtices, mas que a vizinhança acentua estes efeitos quando o escoamento é suave, principalmente quando a distância do obstáculo até o modelo é de até quatro vezes a dimensão do modelo na direção do obstáculo (configurações A e B da Figura 5.11). Quando a turbulência é inserida, há uma atenuação dos espectros, de tal forma que o efeito de vizinhança passa a exercer um papel benéfico para vento com alta turbulência (Figura 5.13).

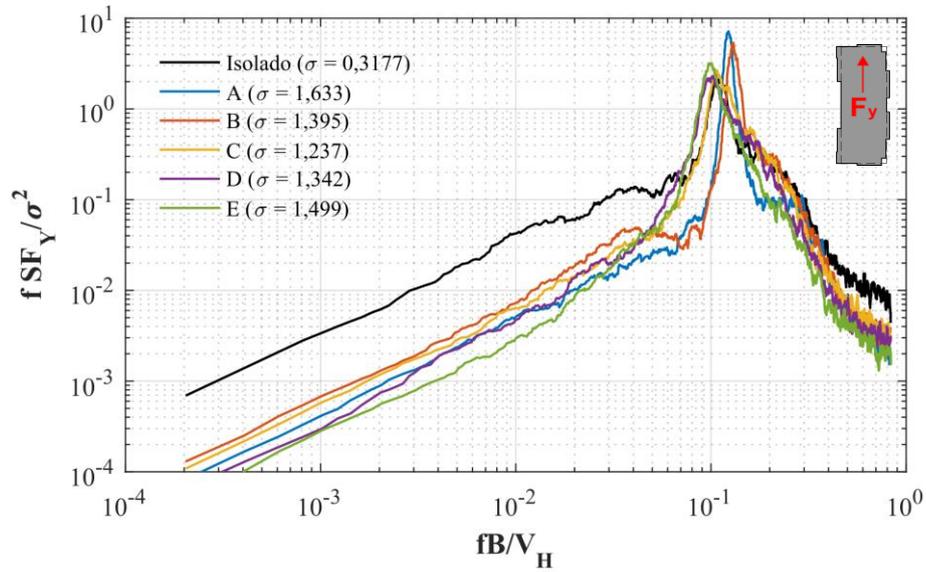


Figura 5.11 - Espectro de força global em y do Modelo I para configuração tipo *tandem* e $p = 0,11$. Fonte: autor.

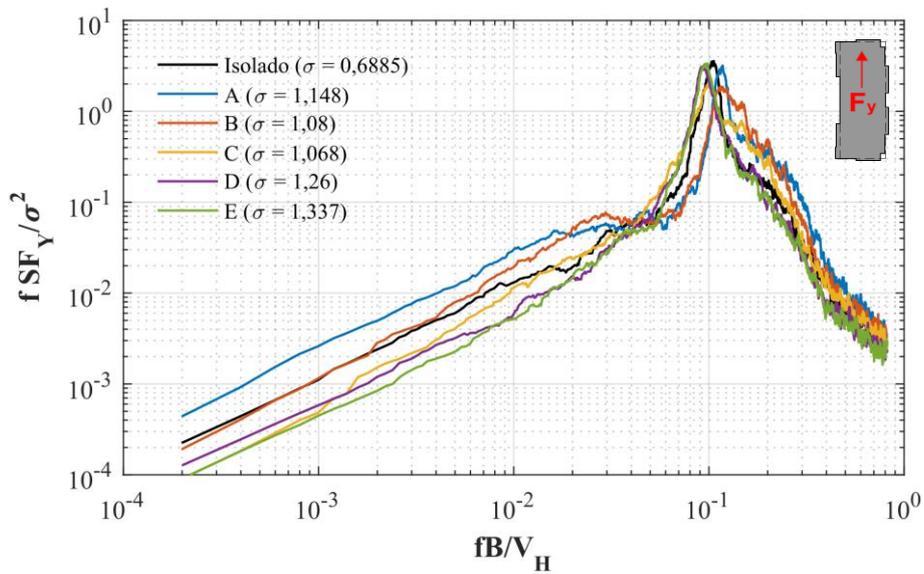


Figura 5.12: Espectro de força global em y do Modelo I para configuração tipo *tandem* e $p = 0,23$. Fonte: autor.

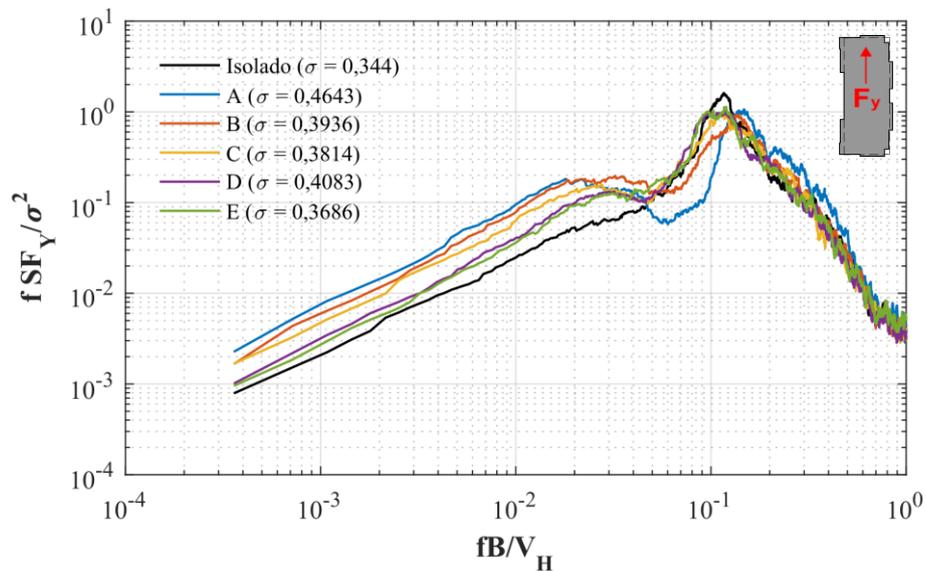


Figura 5.13: Espectro de força global em y do Modelo I para configuração tipo *tandem* e $p = 0,26$. Fonte: autor.

A torção global referente à configuração tipo *tandem* do Modelo I está ilustrado nas Figuras 5.14, 5.15 e 5.16 para ventos com $p = 0,11$, $0,23$ e $0,26$, respectivamente. Para a torção, verifica-se que o efeito de vizinhança provoca a ocorrência de picos de energias concentrados antes inexistentes nos casos isolados, mesmo para distâncias de até 10 vezes o comprimento do modelo na direção do obstáculo (configuração E da Figura 5.14). Comparando as figuras, também pode ser observado que a turbulência ajuda a mitigar os efeitos concentrados de energia causados pela vizinhança, que é um comportamento conhecido pela literatura (IRWIN; DENOON; SCOTT, 2013).

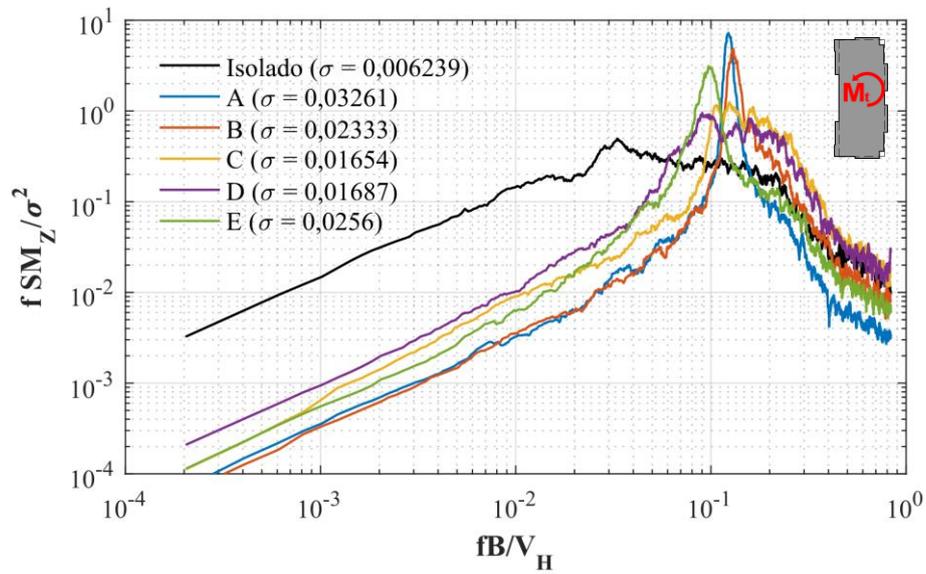


Figura 5.14: Espectro de torção do Modelo I para configuração tipo *tandem* e $p = 0,11$. Fonte: autor.

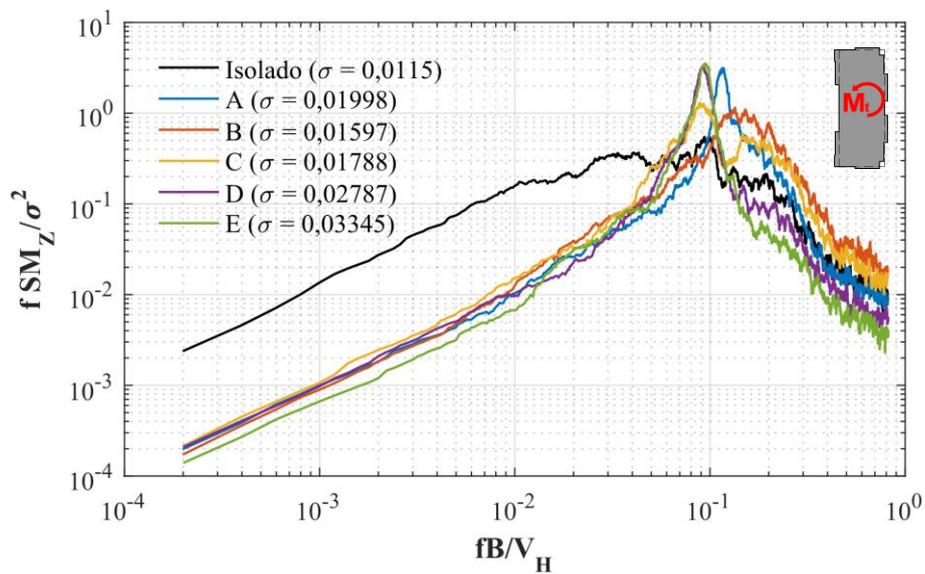


Figura 5.15: Espectro de torção do Modelo I para configuração tipo *tandem* e $p = 0,23$. Fonte: autor.

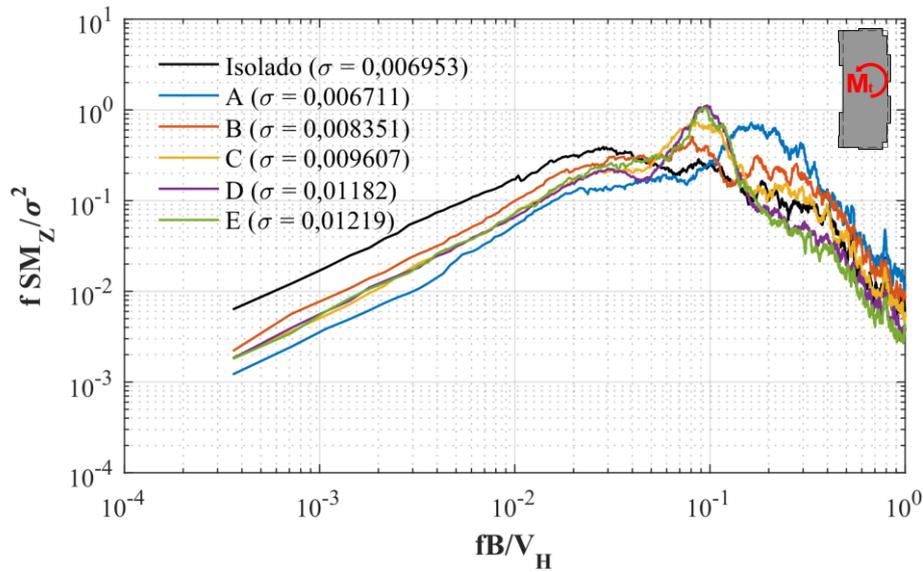


Figura 5.16: Espectro de torção do Modelo I para configuração tipo *tandem* e $p = 0,26$. Fonte: autor.

5.2.3 Configuração de vizinhança tipo oblíqua

Os espectros de forças em x para configurações oblíquas de vizinhança podem ser observadas nas Figuras 5.17, 5.18 e 5.19 para ventos com $p = 0,11$, $0,23$ e $0,26$, respectivamente. Novamente, verifica-se uma clara redução dos efeitos de vizinhança conforme o escoamento passa a ser mais turbulento. Porém, diferentemente da configuração de vizinhança tipo *tandem*, em escoamentos suaves existem fenômenos dinâmicos para quase todas as posições de vizinhança e para grandes distâncias. Especificamente, apenas a configuração de vizinhança tipo F (Figura 5.17) não apresentou pico de energia, que pode ser possivelmente explicado pela proximidade entre o obstáculo e o modelo principal.

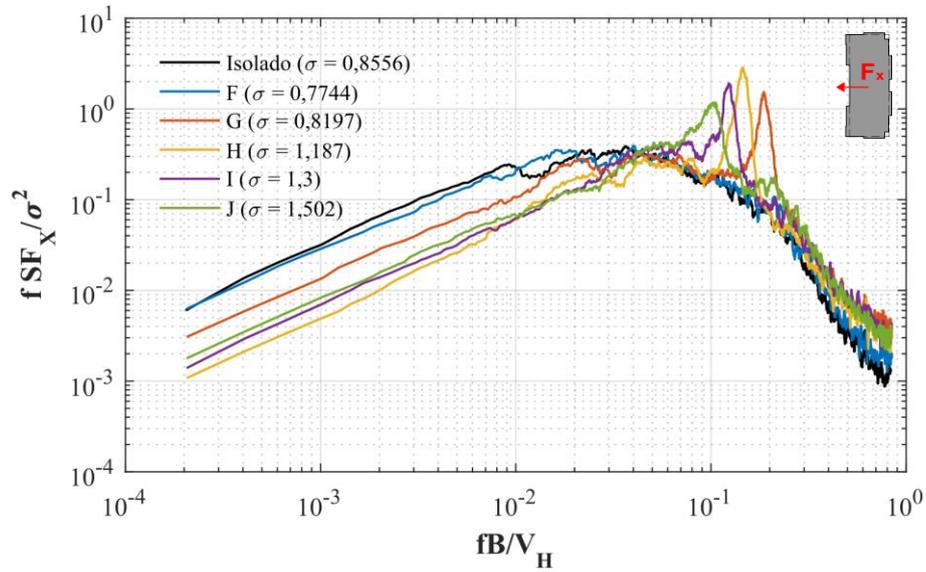


Figura 5.17: Espectro de força global em x do Modelo I para configuração oblíqua e $p = 0,11$. Fonte: autor.

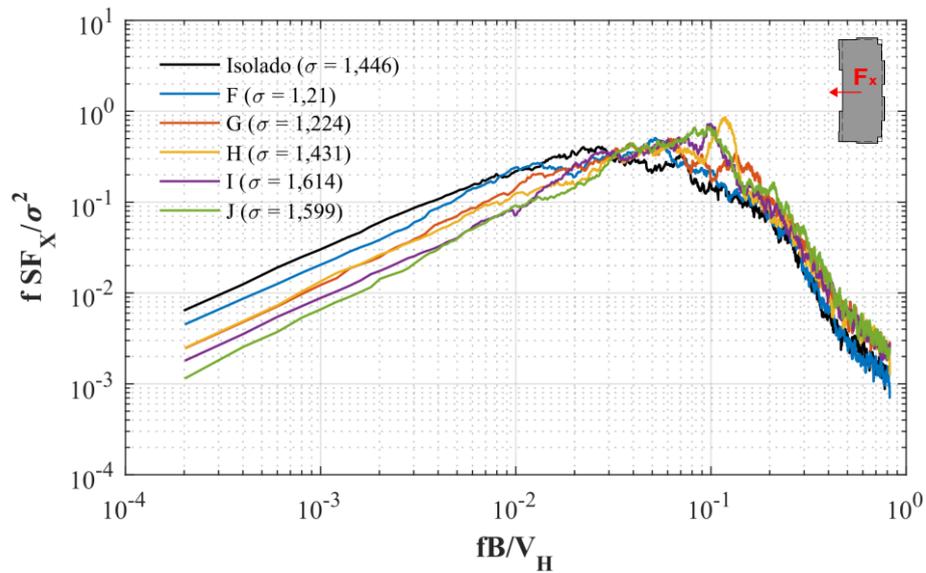


Figura 5.18: Espectro de força global em x do Modelo I para configuração oblíqua e $p = 0,23$. Fonte: autor.

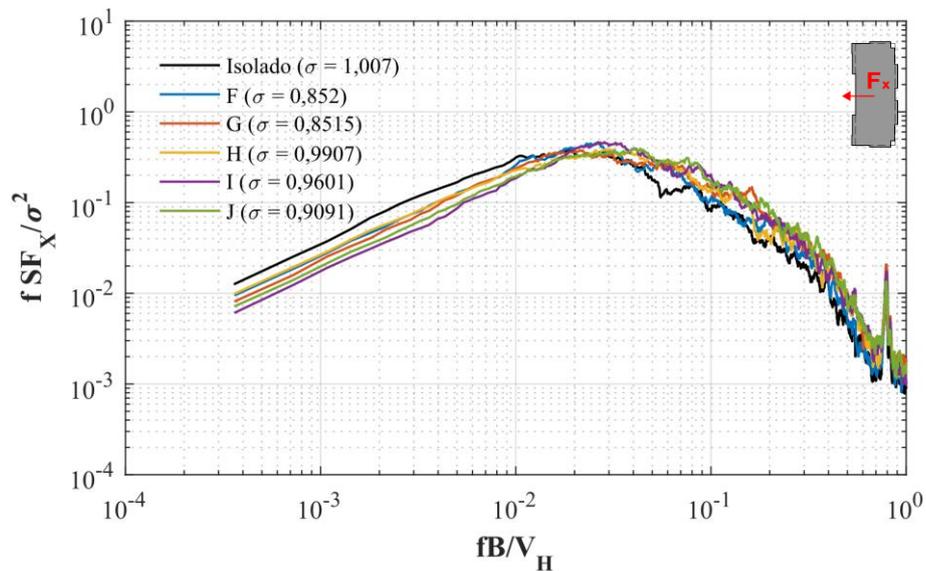


Figura 5.19: Espectro de força global em x do Modelo I para configuração oblíqua e $p = 0,26$. Fonte: autor.

Os espectros de forças globais na direção y , transversal ao escoamento, estão ilustrados nas Figuras 5.20, 5.21 e 5.22 para perfis com expoentes iguais a 0,11, 0,23 e 0,26, respectivamente. Com relação ao vento suave (Figura 5.20), verificam-se que diversas configurações de vizinhança agravaram o efeito dinâmico que já era presente no caso isolado, tal como na configuração de vizinhança tipo *tandem*, embora as frequências de pico de cada configuração tenham se deslocado. Comparando as três figuras, é válido ressaltar também o efeito benéfico que a turbulência provoca, aproximando os espectros dos casos de vizinhança aos espectros isolados, desorganizando os vórtices e, conseqüentemente, reduzindo os picos de energia.

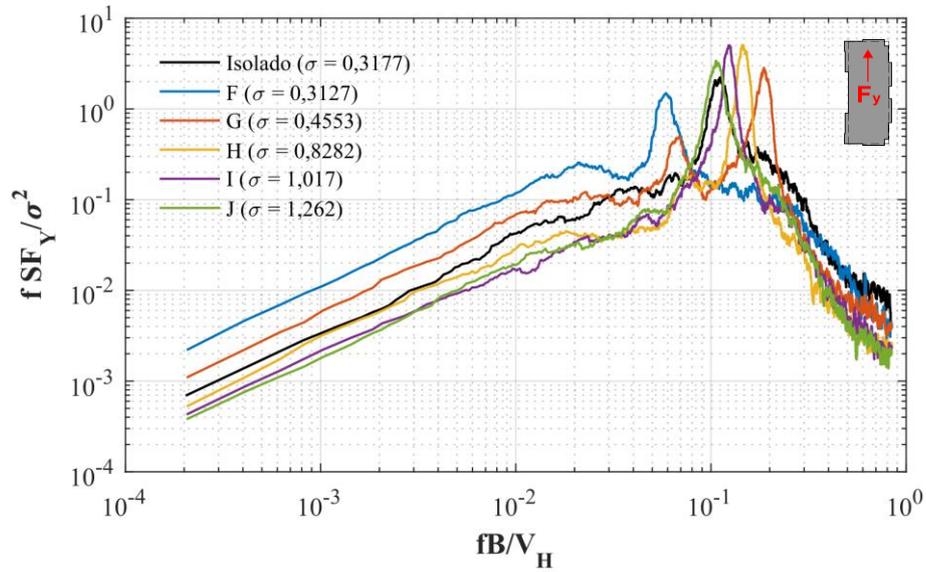


Figura 5.20: Espectro de força global em y do Modelo I para configuração oblíqua e $p = 0,11$. Fonte: autor.

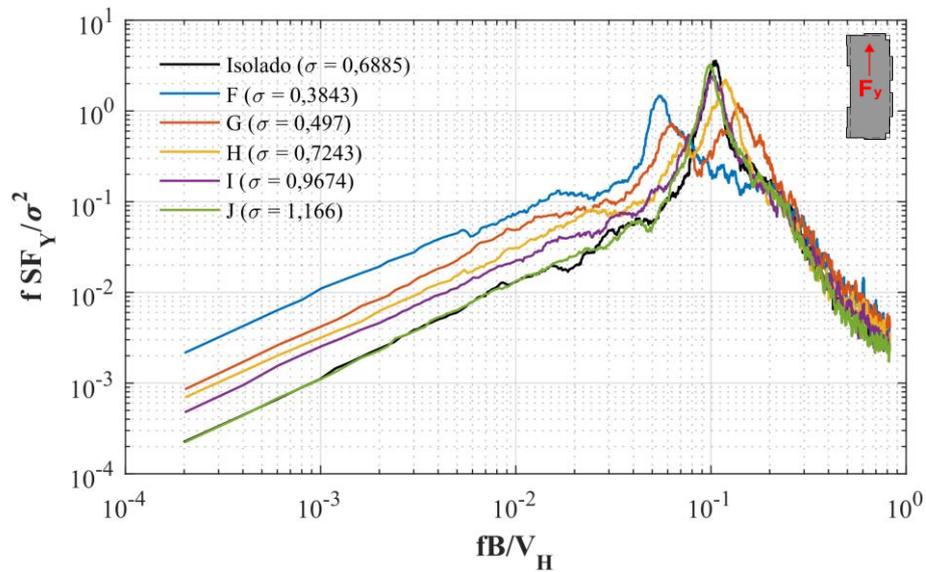


Figura 5.21: Espectro de força global em y do Modelo I para configuração oblíqua e $p = 0,23$. Fonte: autor.

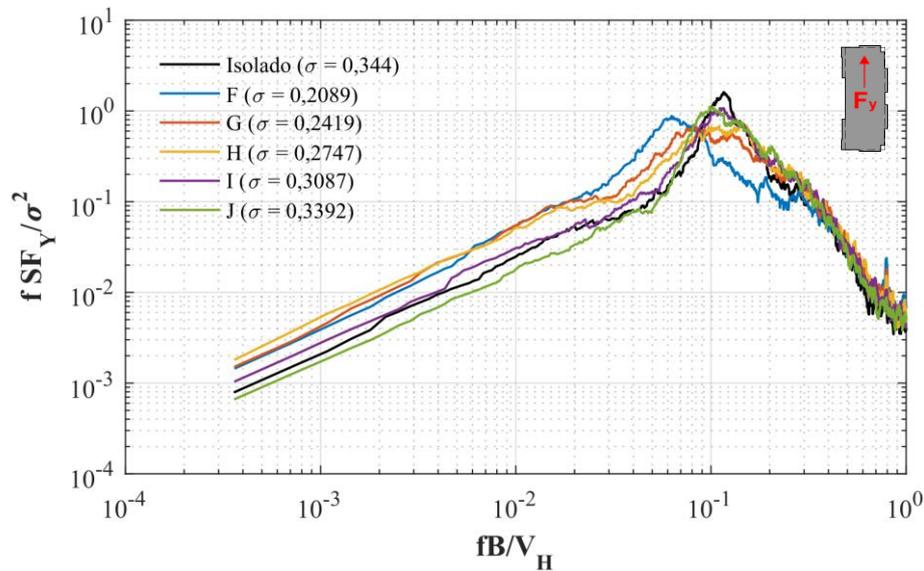


Figura 5.22: Espectro de força global em y do Modelo I para configuração oblíqua e $p = 0,26$. Fonte: autor.

Com relação à torção do Modelo I na configuração de vizinhança oblíqua, as Figuras 5.23, 5.24 e 5.25 ilustram os resultados para ventos com expoentes $p = 0,11$, $0,23$ e $0,26$, respectivamente. O mesmo padrão de comportamento de forças nas direções x e y para configuração de vizinhança oblíqua é observado para a torção: em escoamentos suaves, o efeito de vizinhança tem potencial de ocasionar efeitos dinâmicos que sequer existiam nos casos isolados. Chama-se a atenção para a configuração tipo F do escoamento suave (Figura 5.23), que é a única que não apresentou um pico de energia. Isto pode ser explicado pela distância relativamente pequena entre o modelo principal e o modelo mudo. Além disso, efeitos dinâmicos estão ocorrendo para distâncias consideráveis (até 10 vezes o comprimento do modelo na direção do obstáculo) em escoamento suave, como pode ser observado na configuração J da mesma figura.

O efeito benéfico da turbulência é novamente observado para a torção, reduzindo os efeitos de vizinhança conforme o vento utilizado passa a ser mais turbulento.

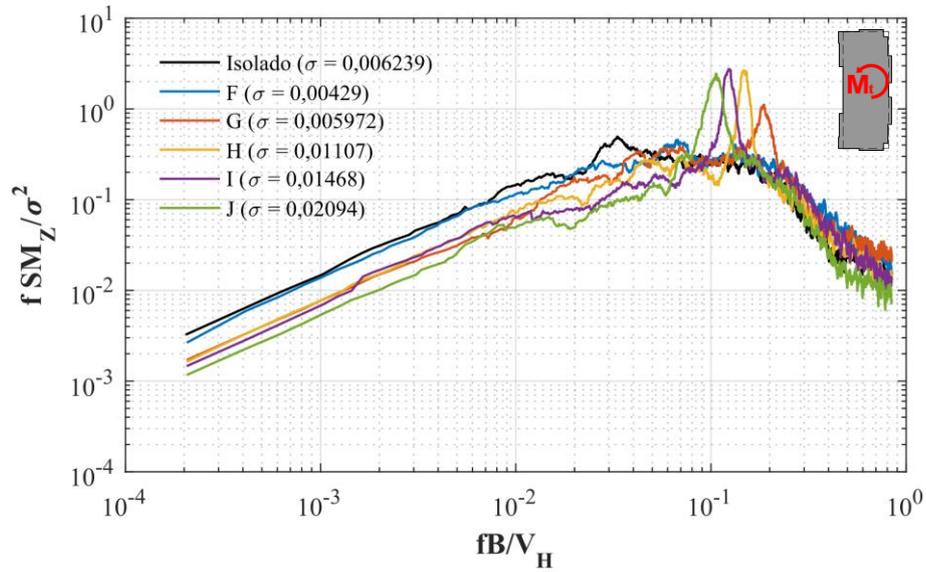


Figura 5.23: Espectro de torção do Modelo I para configuração oblíqua e $p = 0,11$. Fonte: autor.

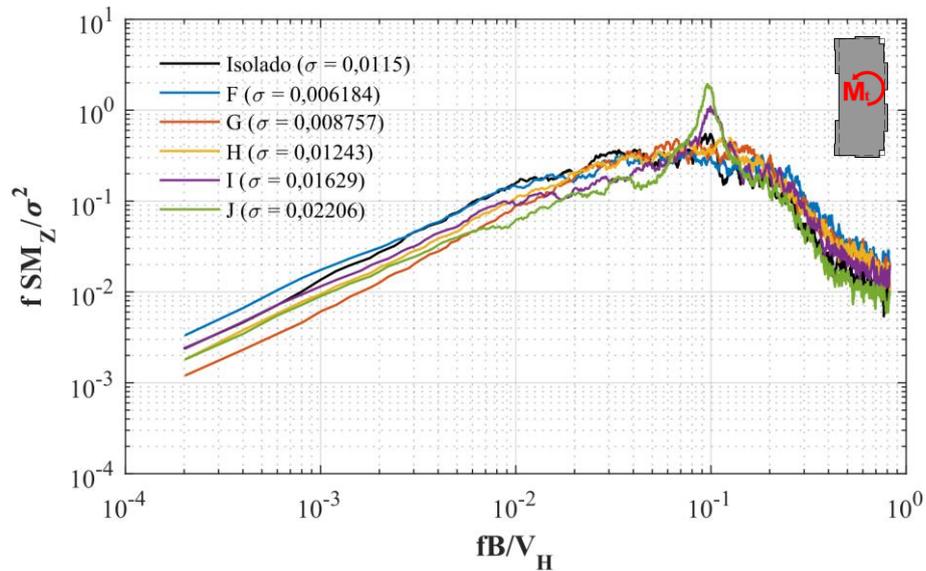


Figura 5.24: Espectro de torção do Modelo I para configuração oblíqua e $p = 0,23$. Fonte: autor.

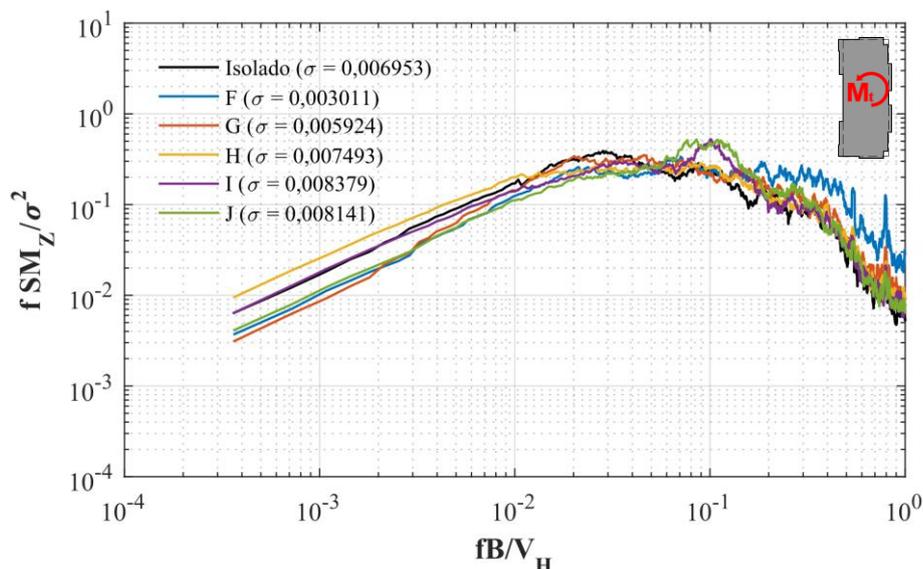


Figura 5.25: Espectro de torção do Modelo I para configuração oblíqua e $p = 0,26$. Fonte: autor.

5.2.4 Configuração de vizinhança com obstáculos na esteira

Neste tópico, os resultados obtidos com o modelo mudo posicionado à sotavento do Modelo I serão ilustrados em termos de espectros de forças nas direções x e y e espectro de torção global.

As configurações de esteira tratando da força global em x estão ilustradas nas Figuras 5.26, 5.27 e 5.28 para perfis de vento com expoente p igual a 0,11, 0,23 e 0,26, respectivamente. De maneira geral, percebem-se que as posições de esteira pouco alteraram o espectro do caso isolado. Exceção deve ser feita à configuração tipo M com escoamento suave (Figura 5.26), que apresentou acréscimo de energia em frequências mais elevadas. A proximidade da posição oblíqua do modelo mudo, associada à baixa turbulência presente no escoamento suave, pode ter organizado a região de esteira de modo a criar situações suscetíveis a acréscimo de energia nas forças atuantes sobre o edifício principal.

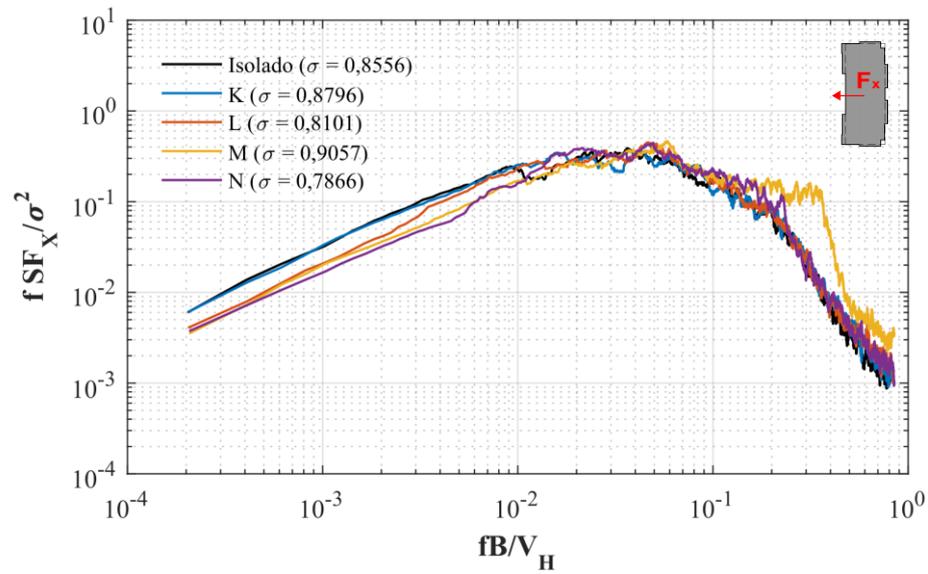


Figura 5.26: Espectro de força global em x do Modelo I para configuração de esteira e $p = 0,11$. Fonte: autor.

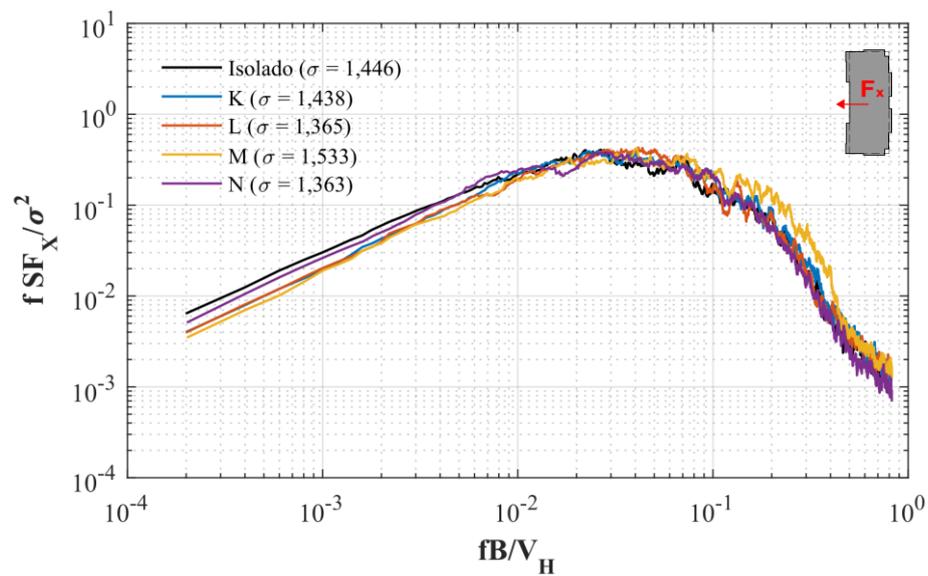


Figura 5.27: Espectro de força global em x do Modelo I para configuração de esteira e $p = 0,23$. Fonte: autor.

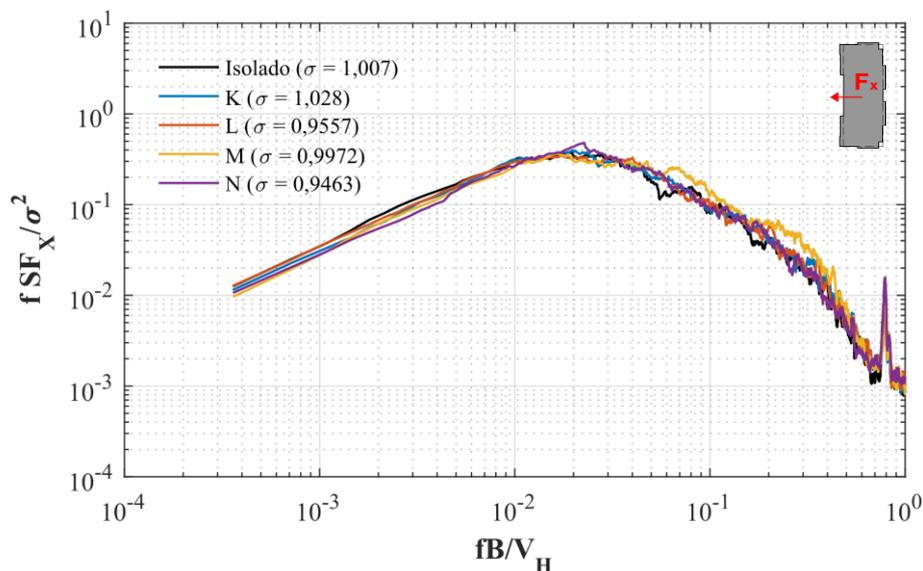


Figura 5.28: Espectro de força global em x do Modelo I para configuração de esteira e $p = 0,26$. Fonte: autor.

Com relação aos espectros de forças globais na direção y que surgem na configuração de esteira, as Figuras 5.29, 5.30 e 5.31 revelam resultados para ventos com expoentes p iguais a 0,11, 0,23 e 0,26, respectivamente. Comportamentos mais distantes dos respectivos casos isolados são dados nas posições oblíquas à sotavento (configuração M e N), principalmente para escoamento suave (Figura 5.29). As configurações K e L apresentam, de maneira geral, espectro de força transversal similar ao caso isolado. Além disso, a turbulência atua de modo a reduzir os picos de energia dos espectros de potência.

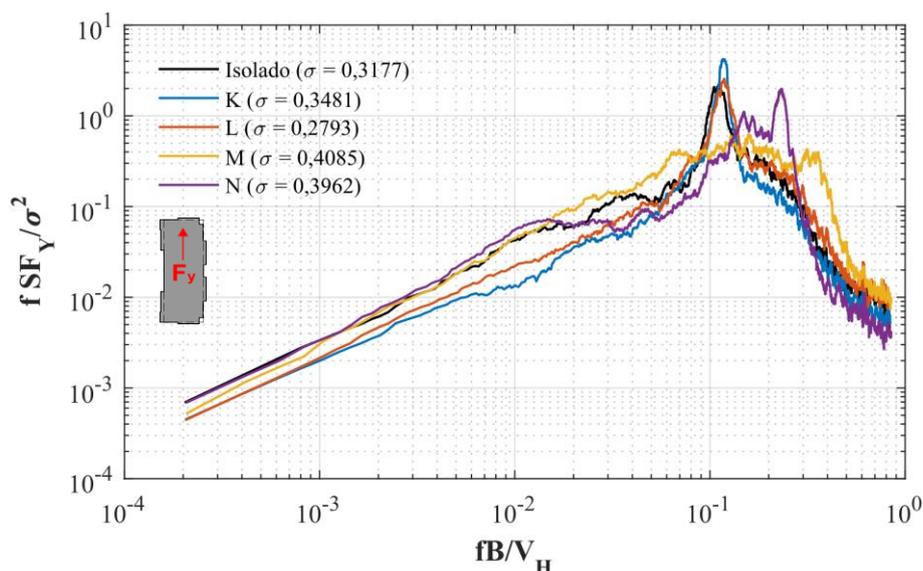


Figura 5.29: Espectro de força global em y do Modelo I para configuração de esteira e $p = 0,11$. Fonte: autor.

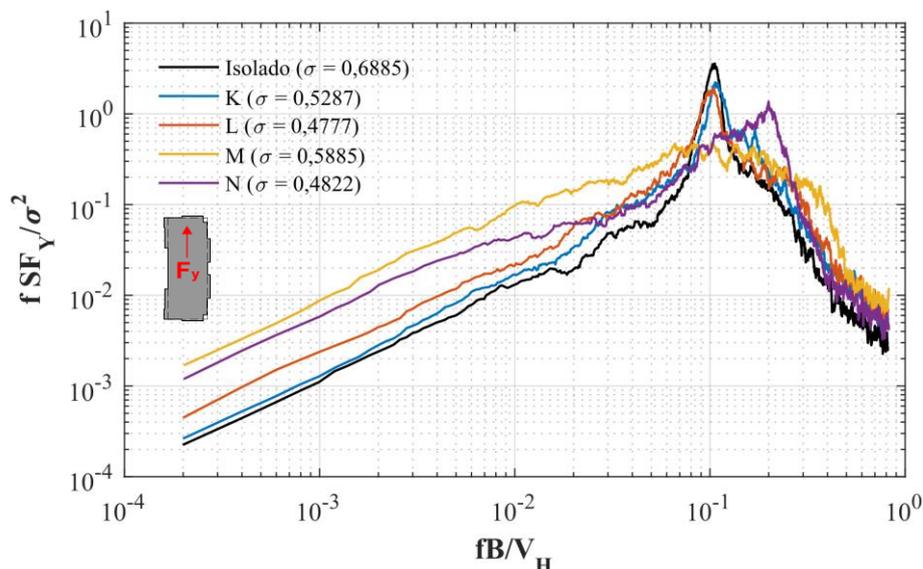


Figura 5.30: Espectro de força global em y do Modelo I para configuração de esteira e $p = 0,23$. Fonte: autor.

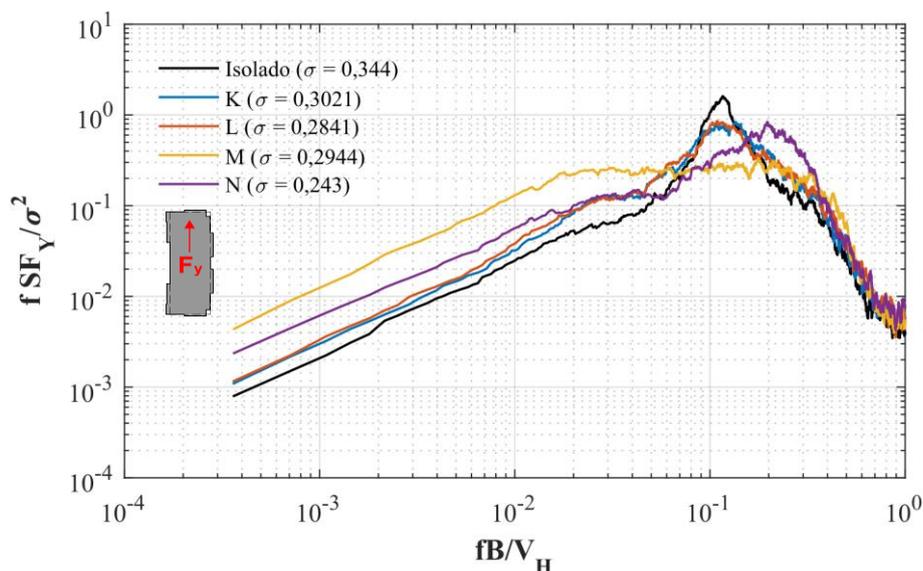


Figura 5.31: Espectro de força global em y do Modelo I para configuração de esteira e $p = 0,26$. Fonte: autor.

Finalmente, os espectros de torção para vizinhança localizada na esteira estão ilustrados nas Figuras 5.32, 5.33 e 5.34 para perfis com expoente p igual a 0,11, 0,23 e 0,26, respectivamente. Novamente, a vizinhança posicionada à sotavento não interfere de maneira severa nos espectros de potência de torção do modelo principal. A maior diferença foi observada na configuração tipo M com escoamento suave (Figura 5.32), assim como ocorreu com o espectro de força na direção x (Figura 5.26). Além disso, a turbulência também agiu de

modo a minimizar os efeitos de vizinhança, tornando os espectros com vizinhança cada vez mais próximos ao espectro de torção do caso isolado, conforme pode ser visualizado na Figura 5.34.

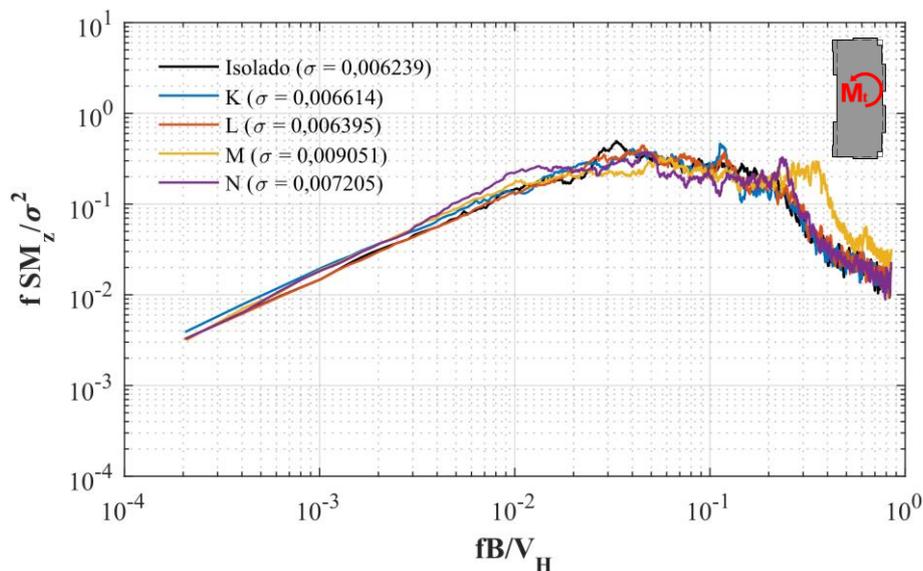


Figura 5.32: Espectro de torção do Modelo I para configuração de esteira e $p = 0,11$. Fonte: autor.

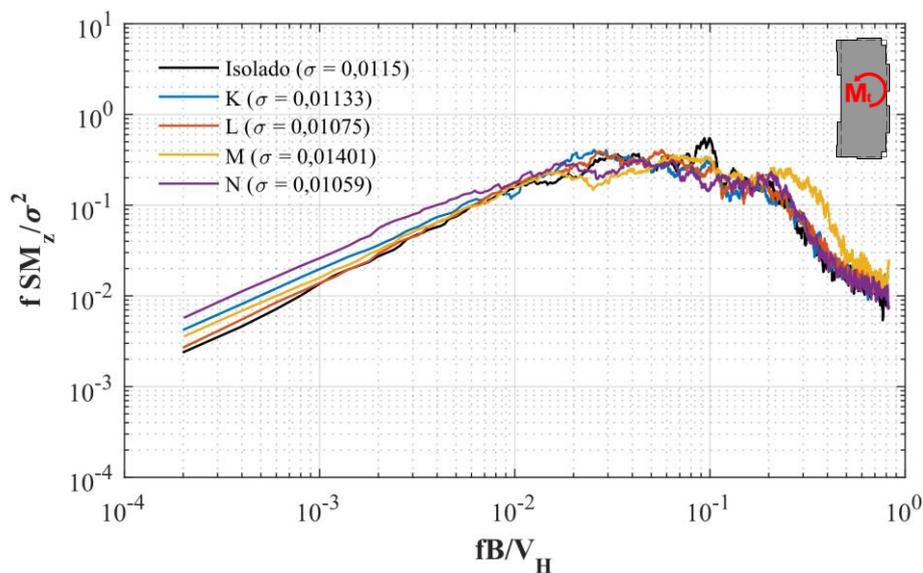


Figura 5.33: Espectro de torção do Modelo I para configuração de esteira e $p = 0,23$. Fonte: autor.

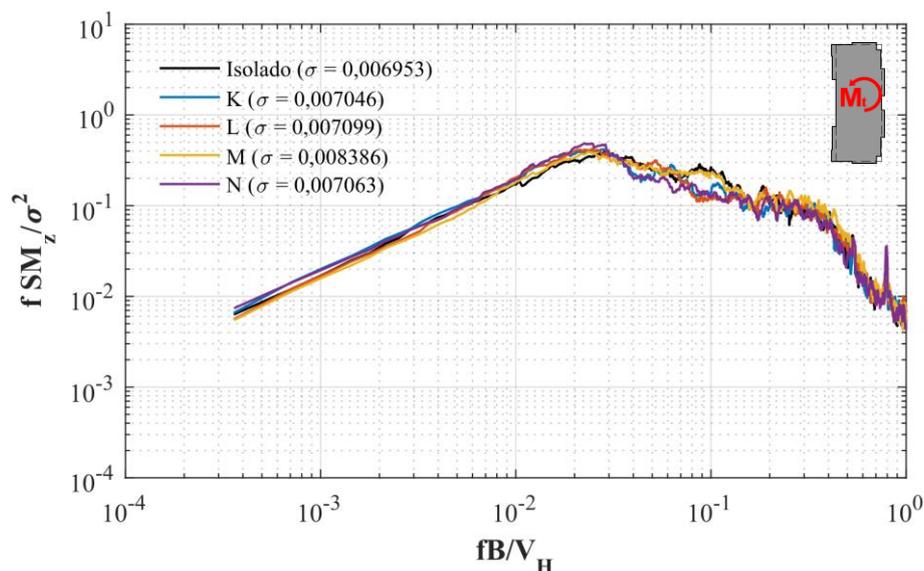


Figura 5.34: Espectro de torção do Modelo I para configuração de esteira e $p = 0,26$. Fonte: autor.

5.2.5 Funções de admitância aerodinâmica

Neste tópico, serão apresentadas as funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo I na condição isolada e em algumas configurações de vizinhança selecionadas. As funções de admitância aerodinâmica deste modelo para todas as posições de vizinhança estão ilustradas no Apêndice I deste trabalho.

Conforme explicado no item 2.7, essas funções são calculadas por meio da Equação (2.15), reescrita da seguinte maneira:

$$\chi_a^2(f) = \frac{S_F(f) \bar{V}^2}{4 S_v(f) \bar{F}^2} \quad (5.1)$$

Como mencionado anteriormente, o espectro da velocidade do vento utilizado foi obtido para uma altura correspondendo a 70% da altura dos modelos, pois esta é a altura em que costumam ocorrer pontos de estagnação do escoamento.

Essas funções convertem flutuações de velocidade do vento em flutuações de carga sobre a estrutura. Vale ressaltar que geometrias simétricas, que apresentam carregamentos médios de força lateral e momento tursor próximos de zero, podem apresentar funções de admitância aerodinâmica com formatos inconsistentes.

A Figura 5.35 mostra então as funções de admitância aerodinâmica na condição isolada do Modelo I. Com relação à força de arrasto (F_x), verifica-se que a função de admitância apresenta formato consistente com o teórico. Com relação à força na direção y , percebe-se valores próximos de 1,0 para baixas frequências, o que representa flutuações de velocidade lentas e escoamento bem correlacionado na vizinhança do modelo. Com relação ao momento torsor, o valor médio próximo de zero produziu valores bastante elevados, justificando a ordem de grandeza de suas funções de admitância.

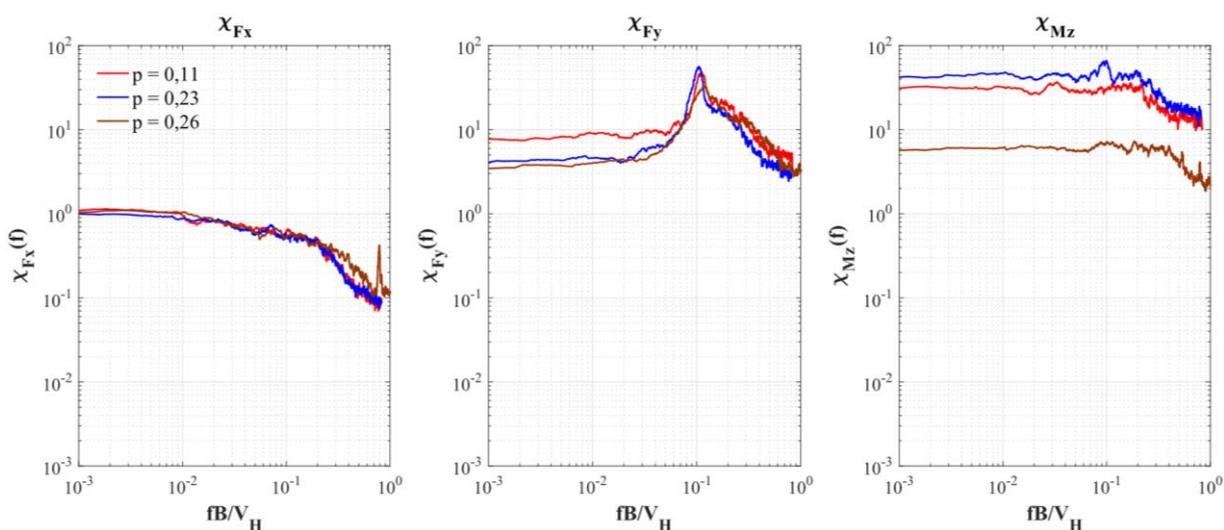


Figura 5.35: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo I na condição isolada. Fonte: autor.

A seguir estão apresentadas as funções de admitância aerodinâmica nas posições A e C para a configuração tipo *tandem* (Figuras 5.36 e 5.37, respectivamente). Comparando-as com a Figura 5.35, verifica-se que a posição A apresenta funções de admitância aerodinâmica para cargas de torção e de força na direção y que guardam certa similaridade, enquanto a função aerodinâmica de x apresenta um formato consistente, porém desorganizado. Além disso, a posição C, mais afastada do modelo, passa a apresentar funções de admitância aerodinâmica semelhantes ao caso isolado.

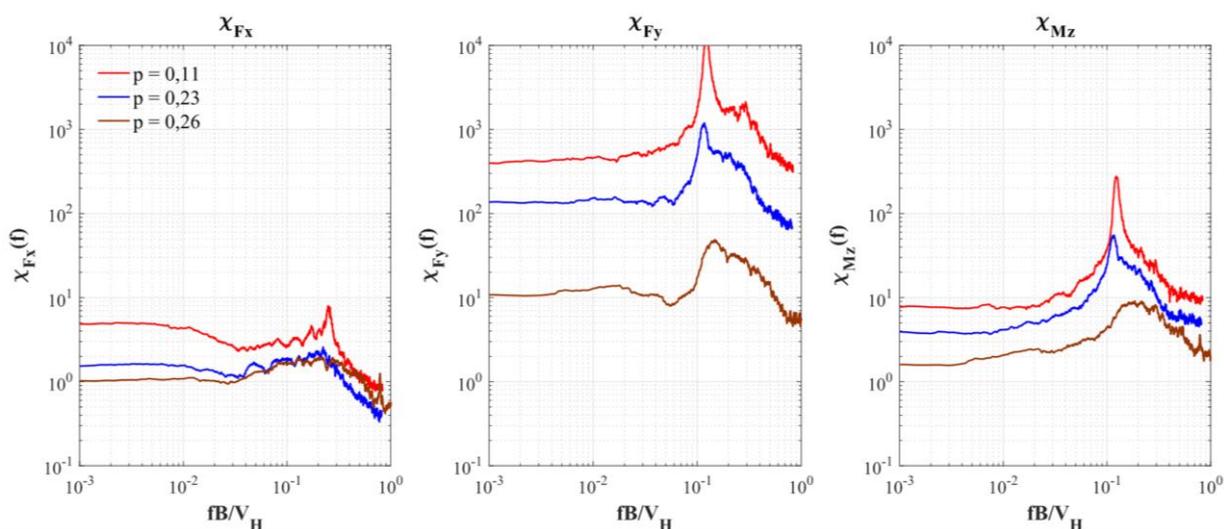


Figura 5.36: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo I com vizinhança na posição A. Fonte: autor.

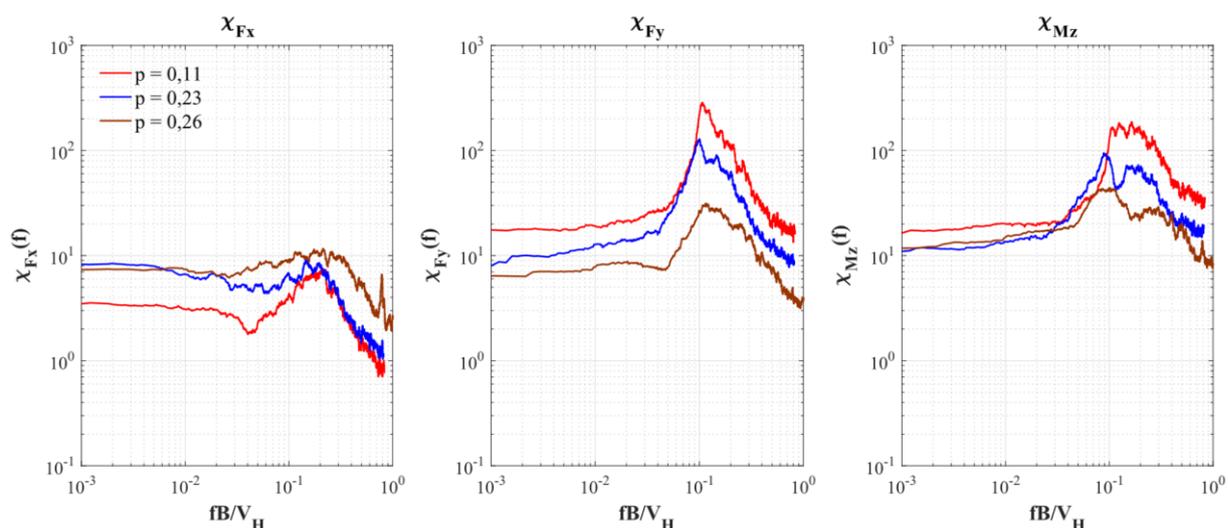


Figura 5.37: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo I com vizinhança na posição C. Fonte: autor.

As funções de admitância aerodinâmica com vizinhança na posição F e H (configuração oblíqua) estão ilustradas nas Figuras 5.38 e 5.39, respectivamente. Novamente, verificam-se que estas posições apresentam funções de admitância aerodinâmica da força na direção x mais consistentes com curvas teóricas, com exceção da configuração H com vento de expoente $p =$

0,11, que apresentou um pico concentrado. Possíveis efeitos de martelamento podem estar causando este comportamento.

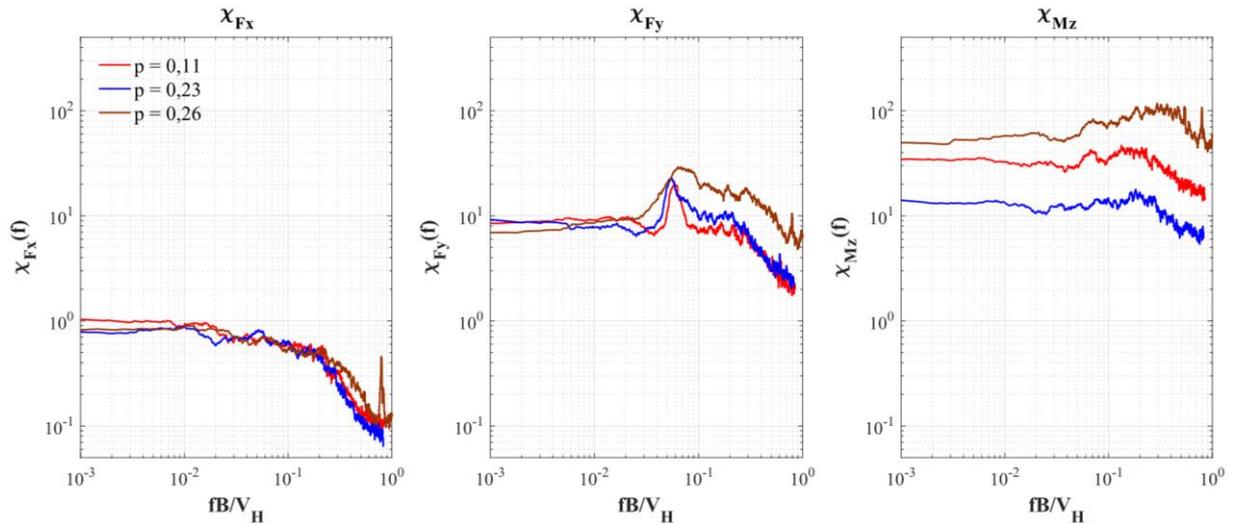


Figura 5.38: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo I com vizinhança na posição F.
Fonte: autor.

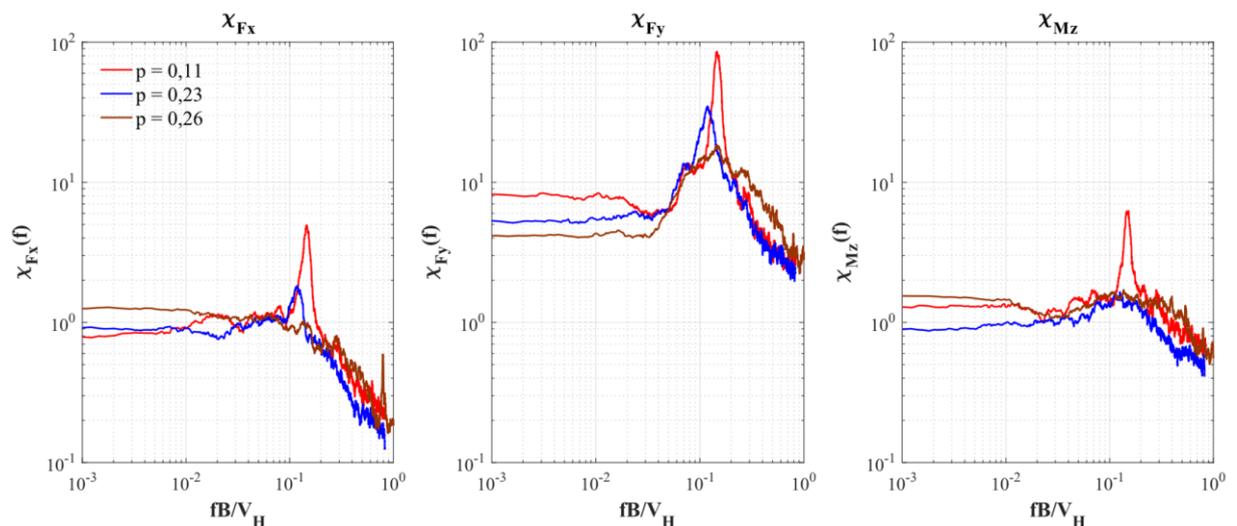


Figura 5.39: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo I com vizinhança na posição H.
Fonte: autor.

Finalmente, as funções de admitância aerodinâmica do Modelo I com vizinhança nas posições K e M são apresentadas nas Figuras 5.40 e 5.41, respectivamente. Ressalta-se que essas posições representam a configuração de obstáculo posicionado na esteira do modelo

principal. Novamente, as curvas de admitância aerodinâmica das forças na direção x estão mais consistentes com curvas teóricas.

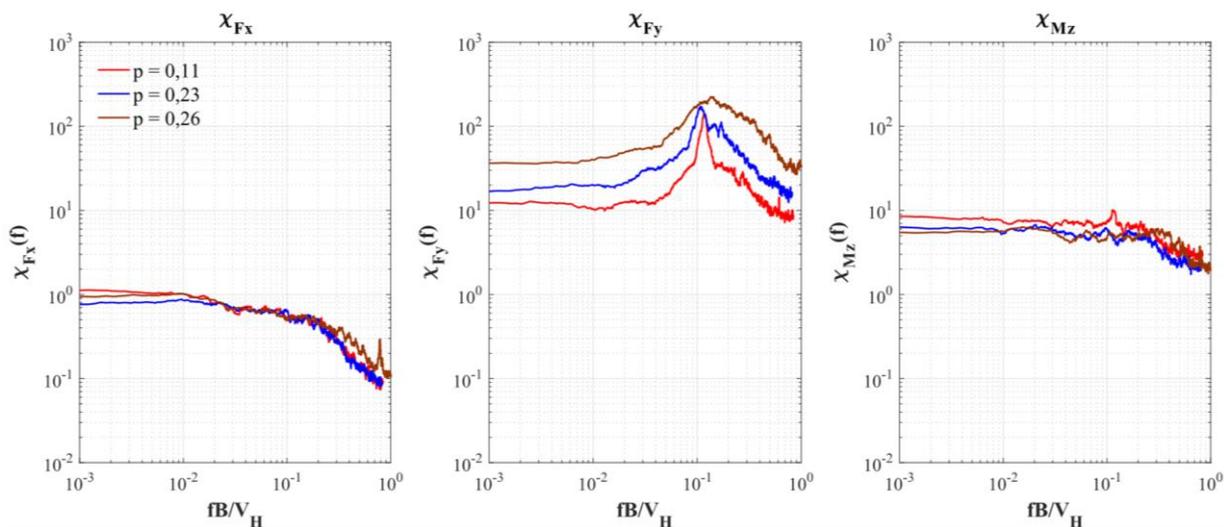


Figura 5.40: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo I com vizinhança na posição K.

Fonte: autor.

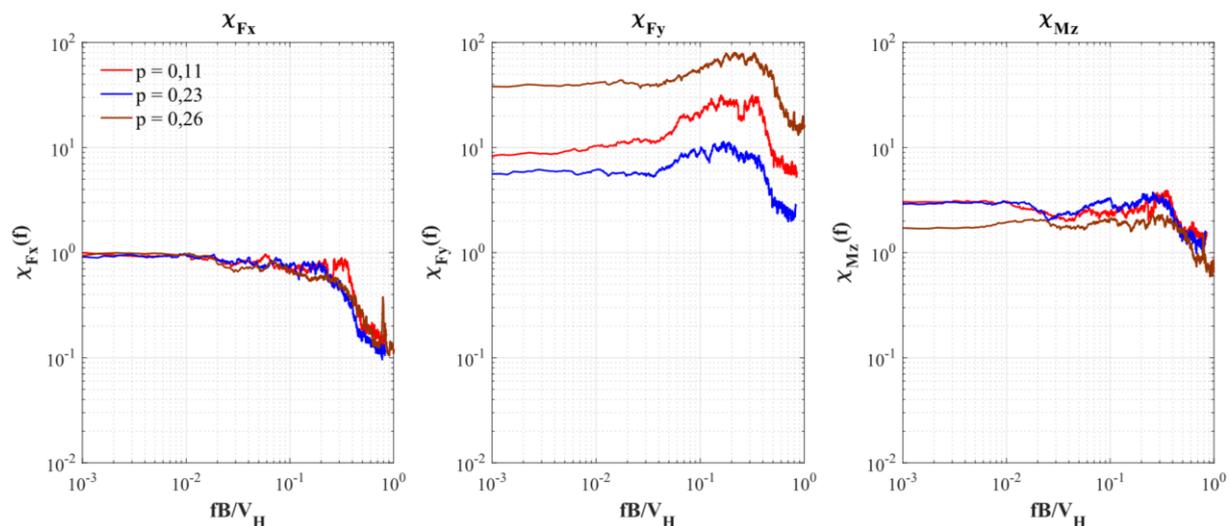


Figura 5.41: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo I com vizinhança na posição M.

Fonte: autor.

De maneira geral, verifica-se que as funções de admitância aerodinâmica, com relação às forças globais na direção x , seguem comportamentos relatados pela literatura, com valor unitário próximo a 1,0 em regiões de baixa frequência e decréscimo conforme a frequência alcança valores mais altos. (DAVENPORT, 1963 *apud* HOLMES, 2015). As funções de admitância aerodinâmica para carregamentos em y e de torção em z revelam picos de energias

em diversos casos característicos de fenômenos como desprendimento cadenciado de vórtices, fornecendo banco de dados para outros casos e estudos.

5.3 MODELO II

Neste tópico, serão apresentados os resultados relativos ao Modelo II, que não apresenta detalhes arquitetônicos em suas fachadas. Primeiramente, as cargas globais para situação isolada serão apresentadas, passando em seguida para as configurações de vizinhança na seguinte ordem: configuração tipo *tandem*, configuração oblíqua e configuração de esteira.

5.3.1 Configuração isolada

Os resultados em termos de forças globais em x e y e de torção estão ilustrados nas Figuras 5.42, 5.43 e 5.44, respectivamente. Com relação à força em x , na direção do escoamento, verifica-se a ausência de fenômenos com concentração de energia para o Modelo II, assim como ocorreu no Modelo I, com detalhes arquitetônicos. Além disso, novamente o espectro de potência não sofreu alterações significativas conforme o escoamento passou a ser mais turbulento.

Com relação às forças na direção y (Figura 5.43), conforme esperado, os espectros apresentaram picos de energia característicos do fenômeno de desprendimento cadenciado de vórtices, que pode excitar a estrutura com uma frequência característica na direção transversal ao escoamento. Também é visualizado o efeito que a turbulência provoca, achatando os picos de energia e alargando o espectro em outras frequências.

Tratando dos espectros de torção em z do Modelo II, dados na Figura 5.44, verifica-se grandes diferenças entre o comportamento dos Modelos I e II. No Modelo I (Figura 5.7), a ausência de picos concentrados de energia sugere a ausência de fenômenos dinâmicos em torção. Entretanto, ao serem realizadas simplificações geométricas no corpo do modelo, verificam-se a ocorrência de picos concentrados de energia. Isto pode ter acontecido pelo fato de que o Modelo II tem uma seção transversal constante ao longo da altura, impedindo a desorganização de vórtices que incidem sobre o modelo. Também é visualizada a atenuação dos efeitos dinâmicos conforme a turbulência do escoamento aumenta.

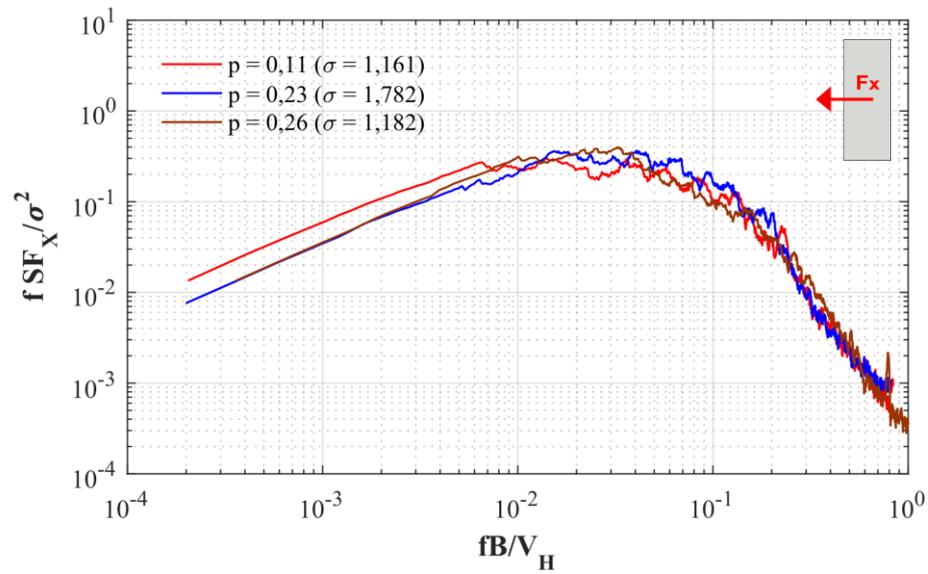


Figura 5.42: Espectro de força global em x do Modelo II na configuração isolada. Fonte: autor.

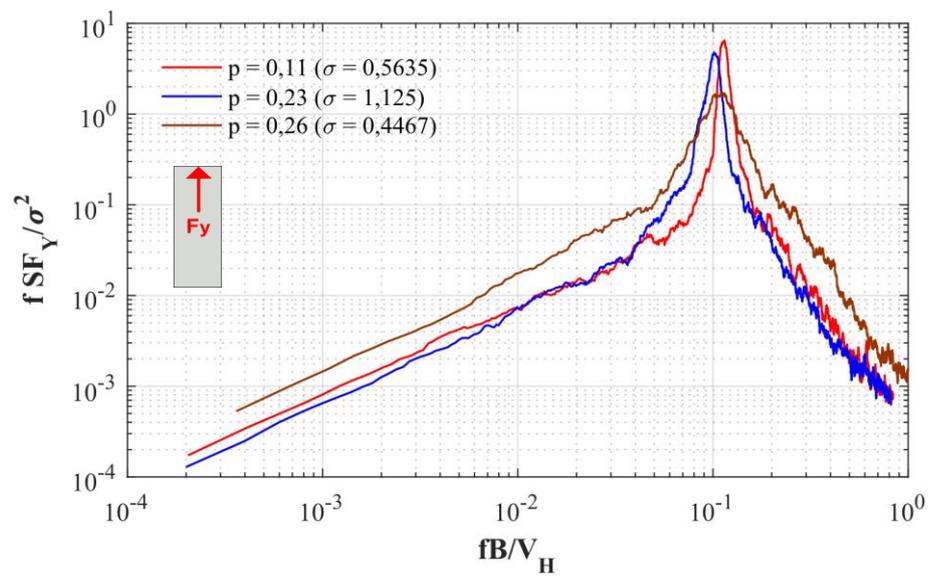


Figura 5.43: Espectro de força global em y do Modelo II na configuração isolada. Fonte: autor.

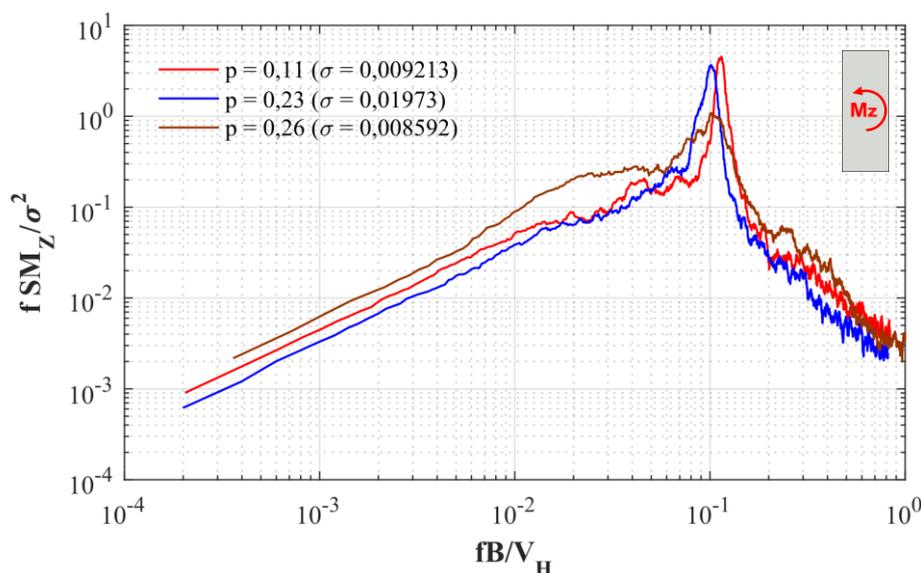


Figura 5.44: Espectro de torção do Modelo II na configuração isolada. Fonte: autor.

5.3.2 Configuração tipo *tandem*

Os espectros de forças na direção x do Modelo II para configuração de vizinhança tipo *tandem* estão ilustrados nas Figuras 5.45, 5.46 e 5.47 para ventos com expoente p igual a 0,11, 0,23 e 0,26, respectivamente. De maneira geral, verifica-se que a presença do obstáculo alinhado na frente do modelo principal não provocou surgimento de fenômeno dinâmico. Para o escoamento suave (Figura 5.45), pode-se observar que as configuração A e E são apresentadas espectros mais similares ao espectro do caso isolado. No caso da configuração A, devido à proximidade entre os objetos, pode haver certo efeito de proteção. Com relação à configuração E, era de se esperar que o espectro tenha a tendência de se aproximar ao do caso isolado conforme a distância cresce, uma vez que o escoamento de esteira pode se reorganizar antes de incidir sobre o modelo principal.

Quando as três figuras são comparadas entre si com o intuito de verificar o efeito da turbulência, observa-se que os efeitos de vizinhança passam a se parecer cada vez mais entre si conforme o escoamento passa a ser mais turbulento. Ainda assim, é válido ressaltar que, mesmo para grandes turbulências, os espectros dos casos de vizinhança apresentam diferenças do caso isolado (Figura 5.47). Estes resultados também foram observados para o Modelo I.

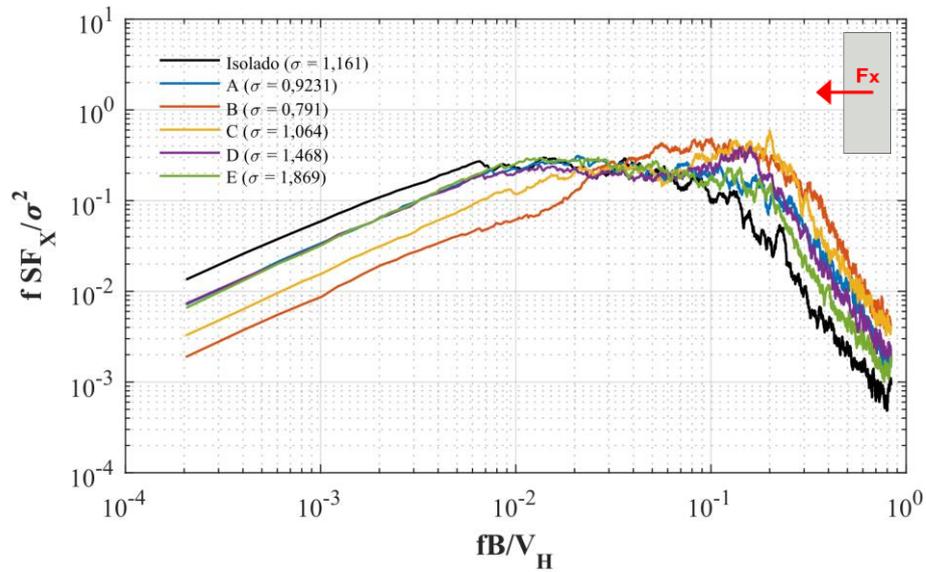


Figura 5.45: Espectro de forças globais em x do Modelo II para configuração tipo *tandem* e $p = 0,11$. Fonte: autor.

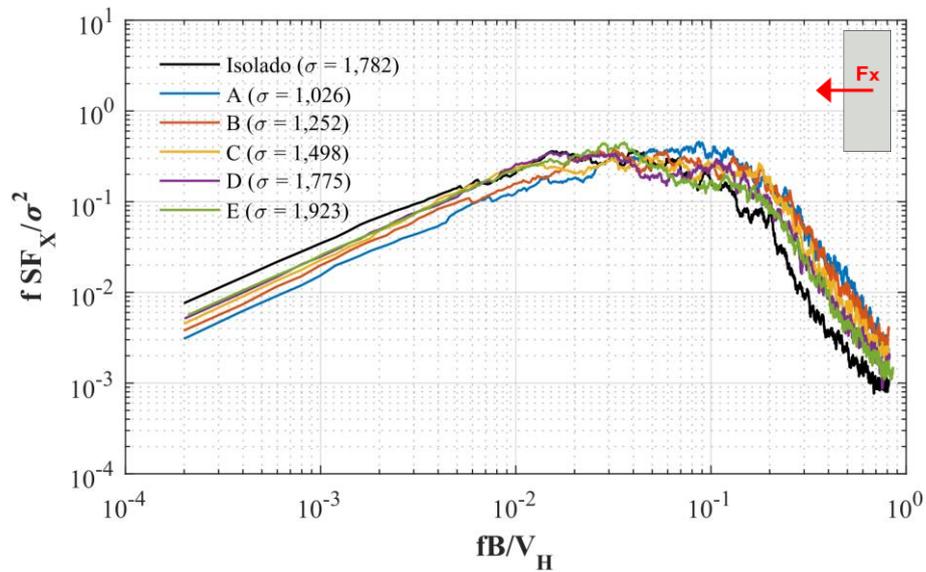


Figura 5.46: Espectro de forças globais em x do Modelo II para configuração tipo *tandem* e $p = 0,23$. Fonte: autor.

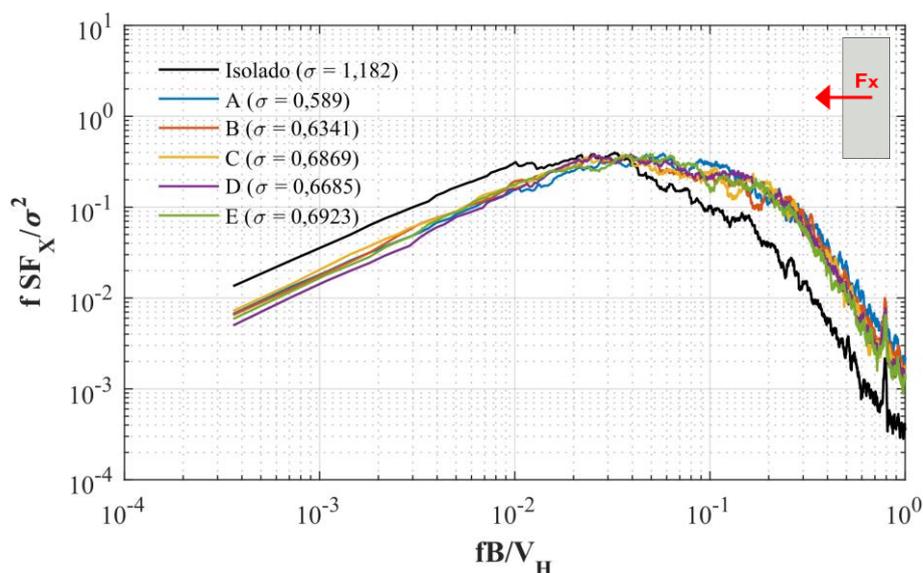


Figura 5.47: Espectro de forças globais em x do Modelo II para configuração tipo *tandem* e $p = 0,26$. Fonte: autor.

Com relação à força global em y , as Figuras 5.48, 5.49 e 5.50 mostram os resultados em termos de espectro para ventos com expoente p igual a 0,11, 0,23 e 0,26, respectivamente. Os picos de energia presentes nas configurações de vizinhança sugerem que o efeito dinâmico que ocorre no caso isolado se deve ao desprendimento cadenciado de vórtices no próprio modelo principal. Neste caso, os efeitos de vizinhança são responsáveis por atenuar os picos de energia e aumentar a energia contida em outras gamas de frequências.

Com relação à turbulência, verifica-se novamente o efeito benéfico de reduzir os picos de energia e a intensidade dos efeitos de vizinhança sobre o modelo principal.

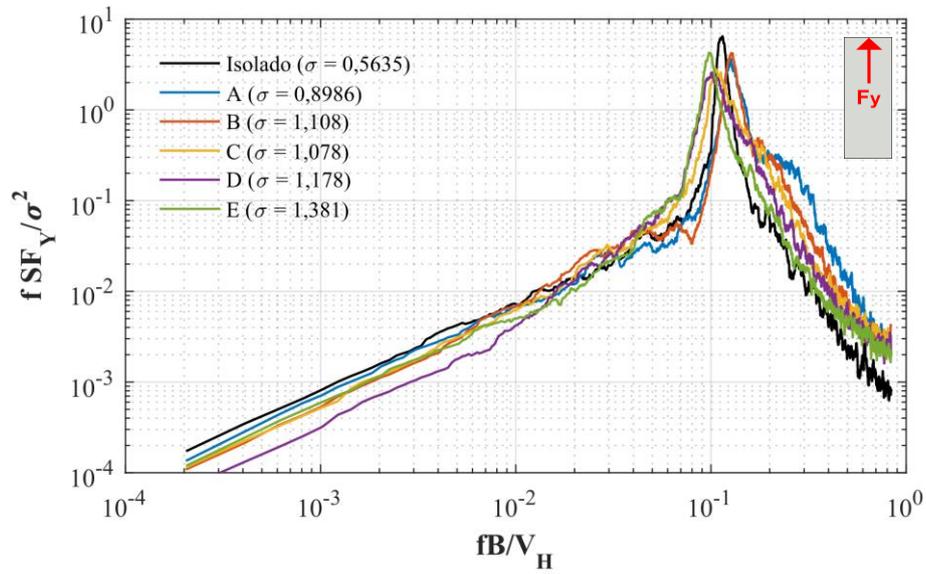


Figura 5.48: Espectro de forças globais em y do Modelo II para configuração tipo *tandem* e $p = 0,11$. Fonte: autor.

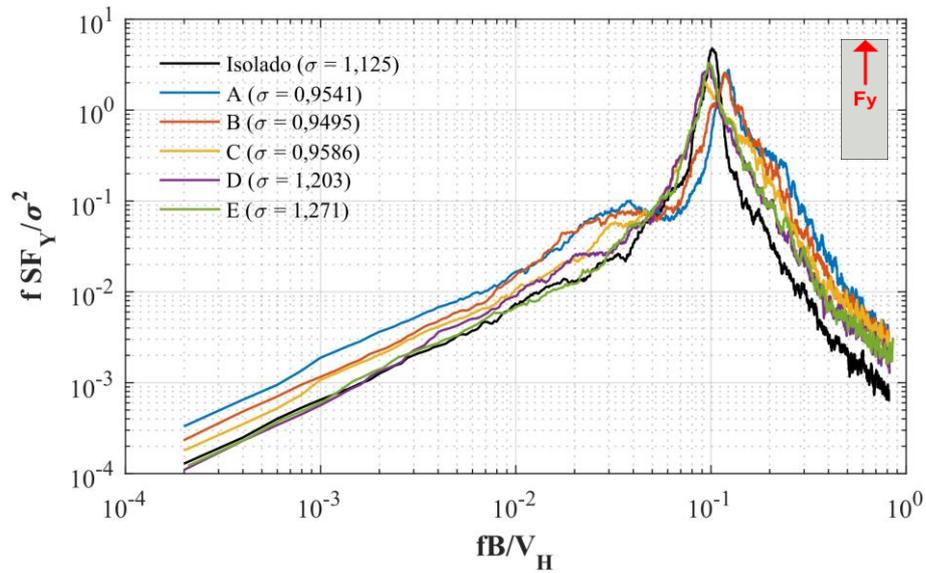


Figura 5.49: Espectro de forças globais em y do Modelo II para configuração tipo *tandem* e $p = 0,23$. Fonte: autor.

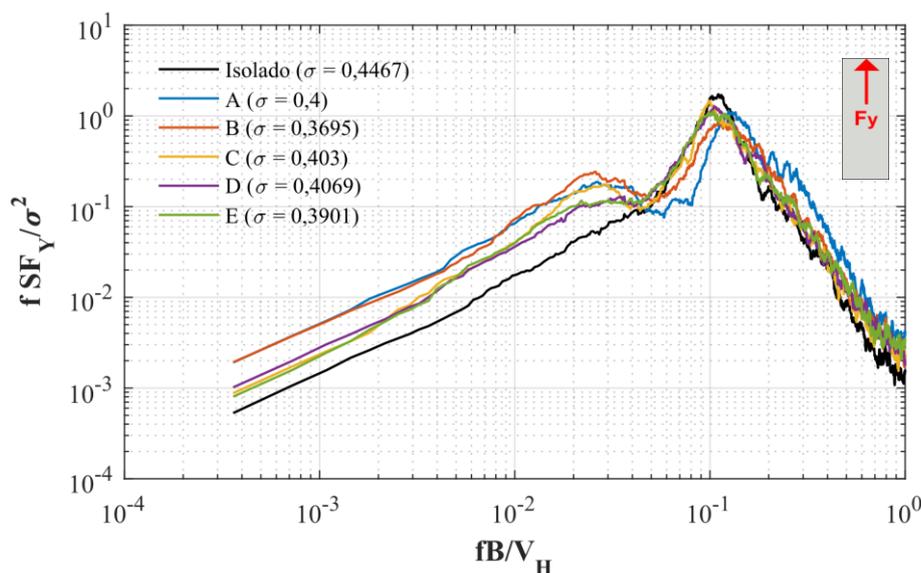


Figura 5.50: Espectro de forças globais em y do Modelo II para configuração tipo *tandem* e $p = 0,26$. Fonte: autor.

Os espectros contendo torção em z estão ilustrados nas Figuras 5.51, 5.52 e 5.53 para ventos com expoente p igual a 0,11, 0,23 e 0,26, respectivamente. Observa-se que a ocorrência de fenômenos dinâmicos com picos concentrados de energias continuaram ocorrendo na maioria das configurações de vizinhança, exceto para ventos de alta turbulência (Figura 5.53), situação na qual os picos de energia sofreram drástica redução.

Além disso, é possível visualizar que as configurações tipo C e tipo D (distância intermediária) atuam de maneira a amenizar os fenômenos dinâmicos observados em outras configurações. Ao inserir obstáculos em distâncias menores (configurações A e B), o fenômeno dinâmico que ocorre no caso isolado parece sofrer pouca alteração com a esteira desses obstáculos. Já para distâncias maiores (caso E), a grande distância entre a esteira do obstáculo e o modelo principal favorece a reorganização do escoamento, fazendo com que o espectro volte a se aproximar do espectro do caso isolado.

Mais uma vez, os efeitos de vizinhança parecem ser consideravelmente menos intensos à medida que turbulência é inserida no escoamento. Entretanto, comparando os resultados obtidos para vento com p igual a 0,11 e 0,23 (Figuras 5.51 e 5.52), observa-se grande semelhança entre os espectros de potência, sugerindo que a turbulência inserida pelo vento com p igual a 0,23 é insuficiente para causar mudanças significativas.

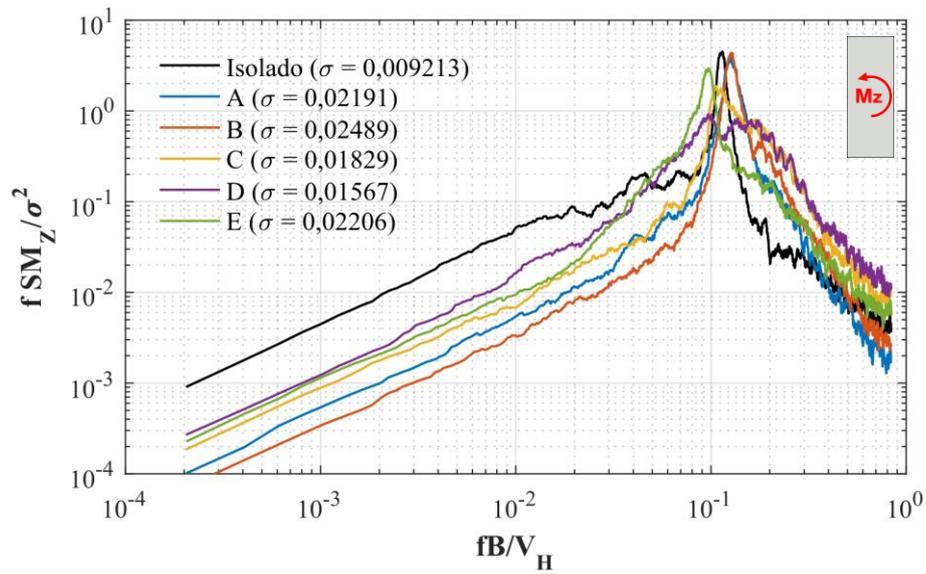


Figura 5.51: Espectro de torção do Modelo II para configuração tipo *tandem* e $p = 0,11$. Fonte: autor.

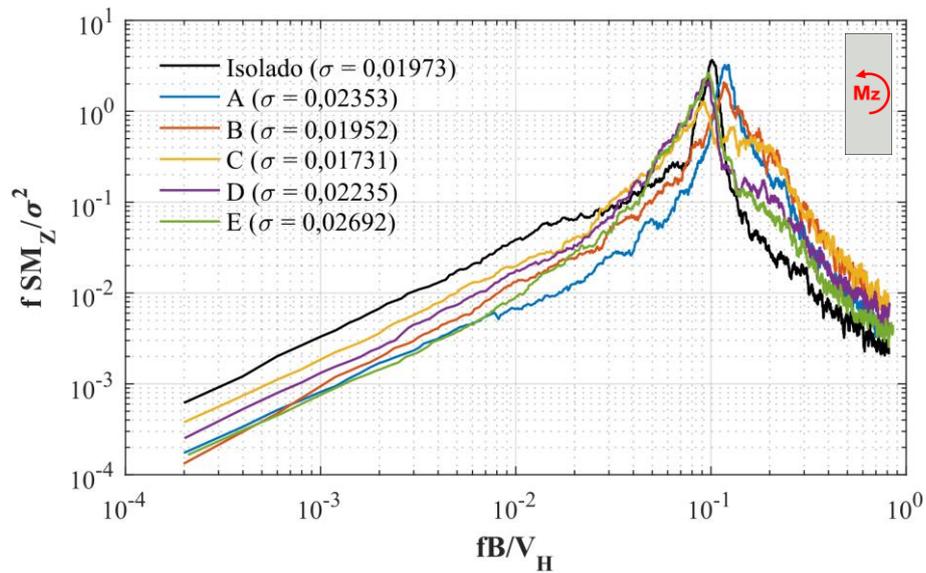


Figura 5.52: Espectro de torção do Modelo II para configuração tipo *tandem* e $p = 0,23$. Fonte: autor.

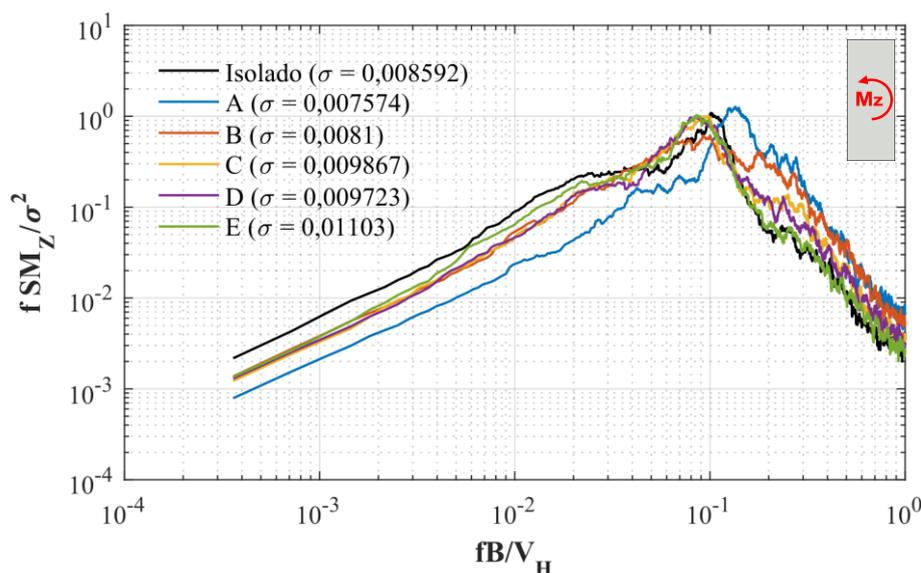


Figura 5.53: Espectro de torção do Modelo II para configuração tipo *tandem* e $p = 0,26$. Fonte: autor.

5.3.3 Configuração de vizinhança tipo oblíqua

Os resultados obtidos para a configuração na qual o modelo mudo é posicionado à barlavento e obliquamente ao modelo principal (configurações F, G, H, I e J) serão exibidos neste tópico. As Figuras 5.54, 5.55 e 5.546 mostram os espectros de força em x obtidos no Modelo II para ventos com expoente p igual a 0,11, 0,23 e 0,26, respectivamente.

Conforme pode ser visualizado na Figura 5.54, observa-se que, em escoamento suave, quase todas as configurações de vizinhança causaram efeitos de picos de energia sobre o modelo principal. Exceção deve ser feita à configuração F, que não apresentou pico de energia no espectro. Esse comportamento também foi observado na configuração oblíqua para o Modelo I. Os picos de energia provavelmente estão sendo causados por martelamento dos turbilhões sobre o modelo principal. Para confirmar essa hipótese, ensaios com anemômetro de fio quente podem ser utilizados na esteira do modelo mudo para medir séries temporais de velocidade do vento. Com essas séries, a transformação para o domínio da frequência poderia revelar a presença de picos concentrados de energia.

Nota-se também uma drástica redução dos efeitos de vizinhança quando o expoente p da lei potencial do vento passa de 0,11 a 0,23, e ainda maior redução quando o perfil turbulento com p igual a 0,26 é utilizado.

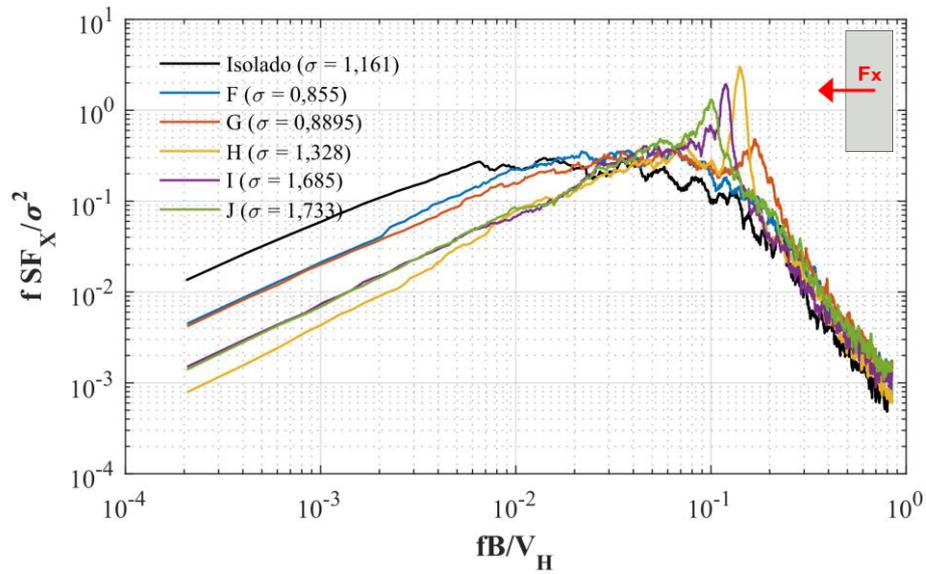


Figura 5.54: Espectro de forças globais em x do Modelo II para configuração oblíqua e $p = 0,11$. Fonte: autor.

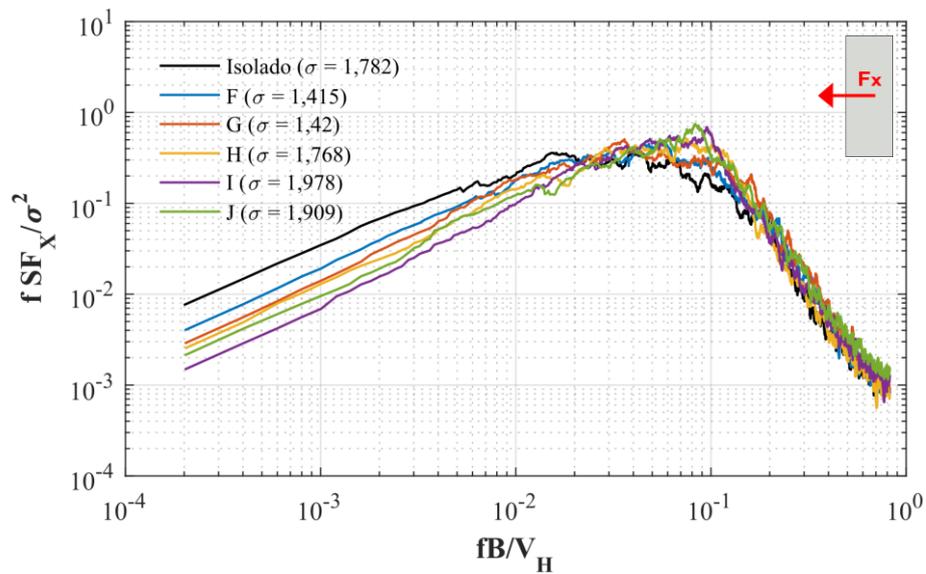


Figura 5.55: Espectro de forças globais em x do Modelo II para configuração tipo oblíqua e $p = 0,23$. Fonte: autor.

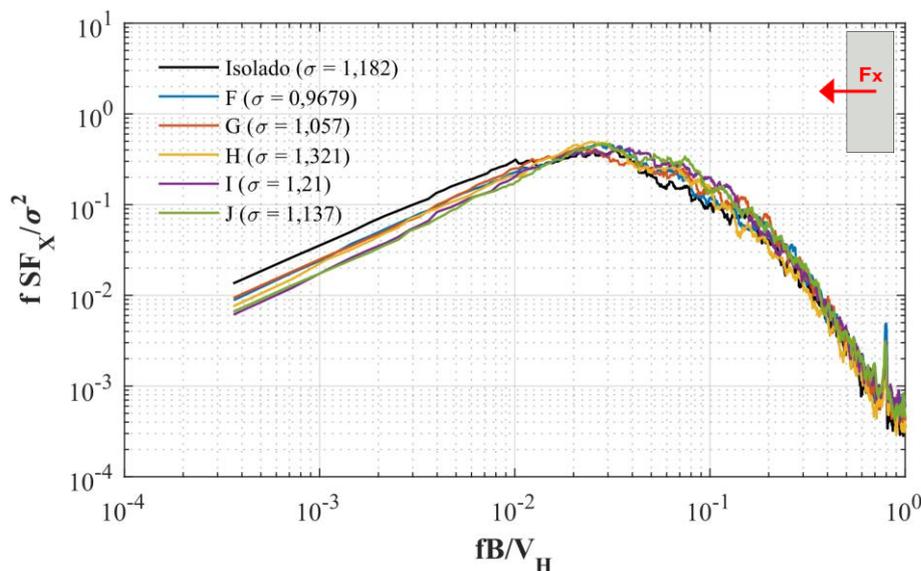


Figura 5.56: Espectro de forças globais em x do Modelo II para configuração tipo oblíqua e $p = 0,26$. Fonte: autor.

Com relação à força na direção y , transversal ao escoamento, os espectros de vizinhança estão apresentados nas Figuras 5.57, 5.58 e 5.59 para perfis de vento com expoente p igual a 0,11, 0,23 e 0,26, respectivamente. Em todos os perfis de vento, verificam-se que as configurações F e G, diferentes das demais, exibem espectros de potência sobre o modelo principal com considerável diferença em relação aos respectivos casos isolados. Além disso, esse mesmo aspecto é observado no Modelo I, e se deve possivelmente à proximidade com que esses modelos mudos são posicionados em relação ao modelo principal.

A semelhança existente entre os espectros em outras configurações de vizinhança (H, I e J) e os casos isolados sugere que o pico de energia que ocorre no modelo principal se deve aos vórtices desprendidos sobre o próprio, e não sobre os obstáculos da vizinhança. A distância maior entre o modelo principal e o mudo possivelmente permite que o escoamento se reorganize e incida sobre o modelo principal de maneira muito semelhante com o que ocorre no escoamento incidindo sobre o modelo isolado.

Ao se comparar as três figuras, observa-se que a turbulência age de modo a reduzir os efeitos de vizinhança, desorganizando os vórtices que se desprendem sobre o modelo e reduzindo a ação dinâmica sobre a estrutura.

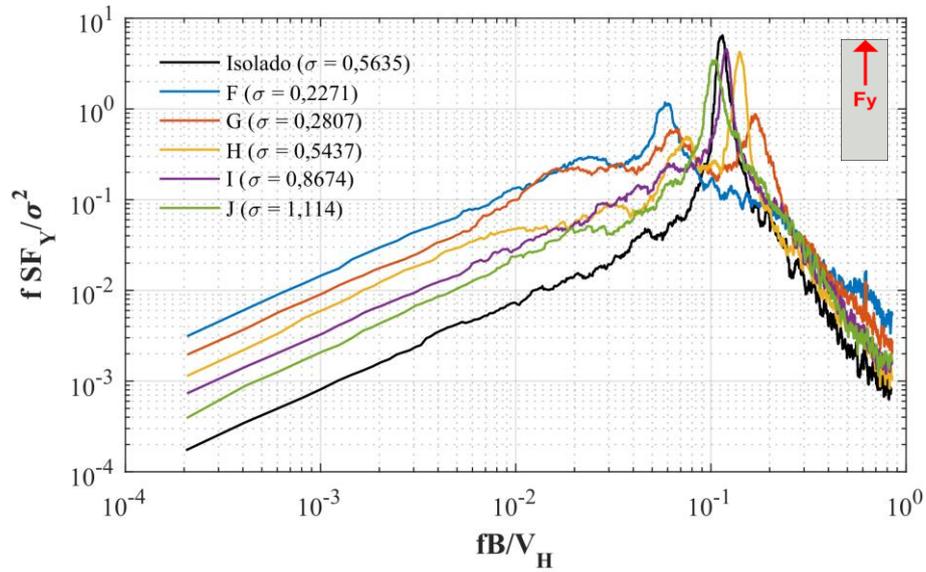


Figura 5.57: Espectro de forças globais em y do Modelo II para configuração tipo oblíqua e $p = 0,11$. Fonte: autor.

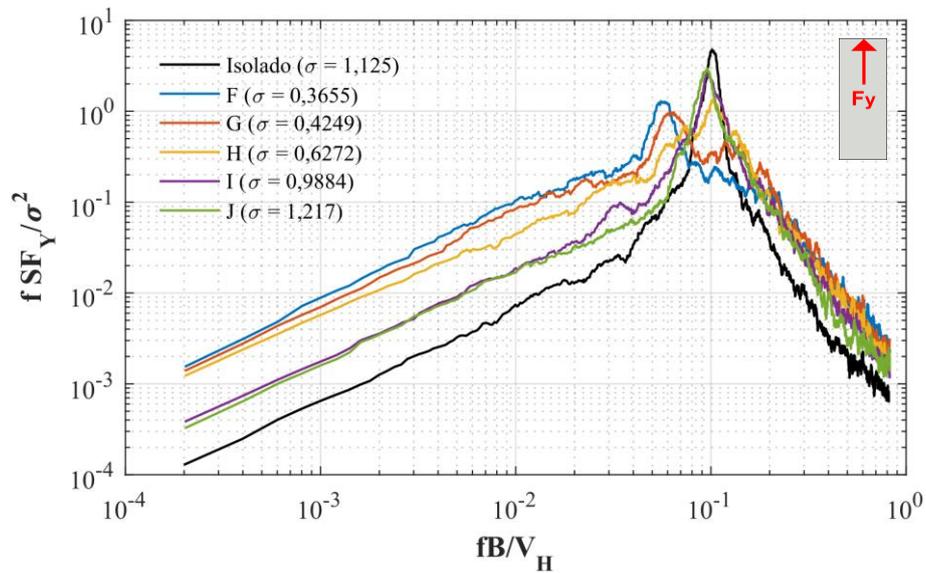


Figura 5.58: Espectro de forças globais em y do Modelo II para configuração tipo oblíqua e $p = 0,23$. Fonte: autor.

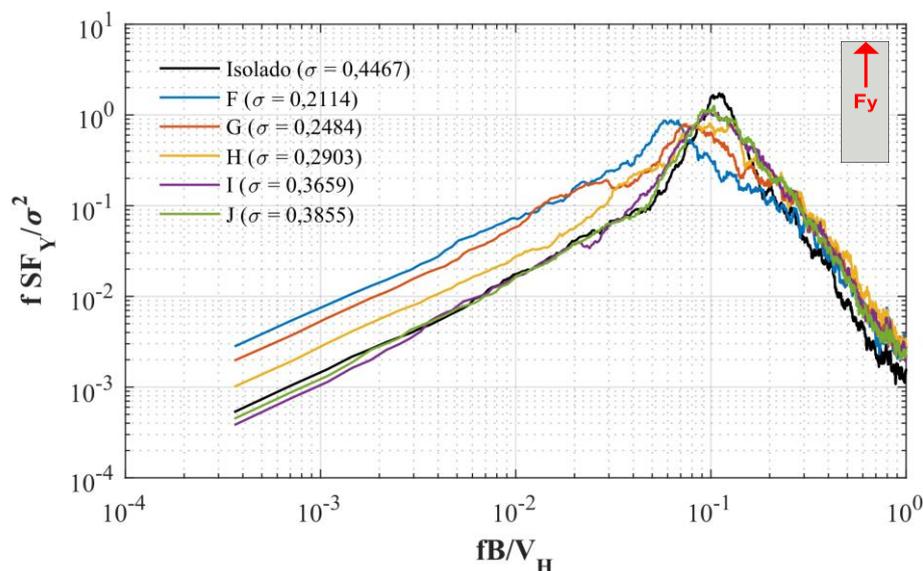


Figura 5.59: Espectro de forças globais em y do Modelo II para configuração tipo oblíqua e $p = 0,26$. Fonte: autor.

Com relação ao estudo da torção, os espectros sobre o modelo principal estão exibidos nas Figuras 5.60, 5.61 e 5.62 para ventos com expoente p igual a 0,11, 0,23 e 0,26, respectivamente. Diferente do comportamento que foi observado no Modelo I com relação à torção, o efeito de vizinhança no Modelo II foi, para grande parte das configurações, benéfico. Isto pode ser explicado pelo fato de que, em sua configuração isolada, o pico de energia causado pelo desprendimento de vórtices sobre o Modelo II representa o cenário mais prejudicial ao modelo, que tem seus vórtices enfraquecidos após a perturbação do escoamento pela vizinhança. O efeito dinâmico observado no caso isolado, principalmente em escoamentos suaves, foi atenuado pela presença do modelo mudo na configuração de vizinhança. Comparando as três figuras, verifica-se novamente que, conforme a turbulência presente no escoamento aumenta, o efeito de vizinhança passa a ser menos significativo.

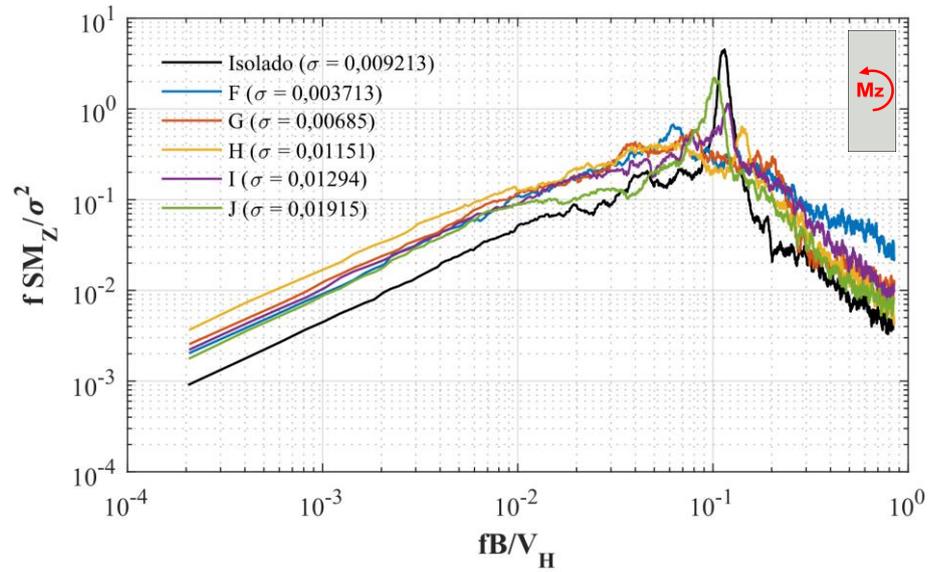


Figura 5.60: Espectro de torção do Modelo II para configuração tipo oblíqua e $p = 0,11$. Fonte: autor.

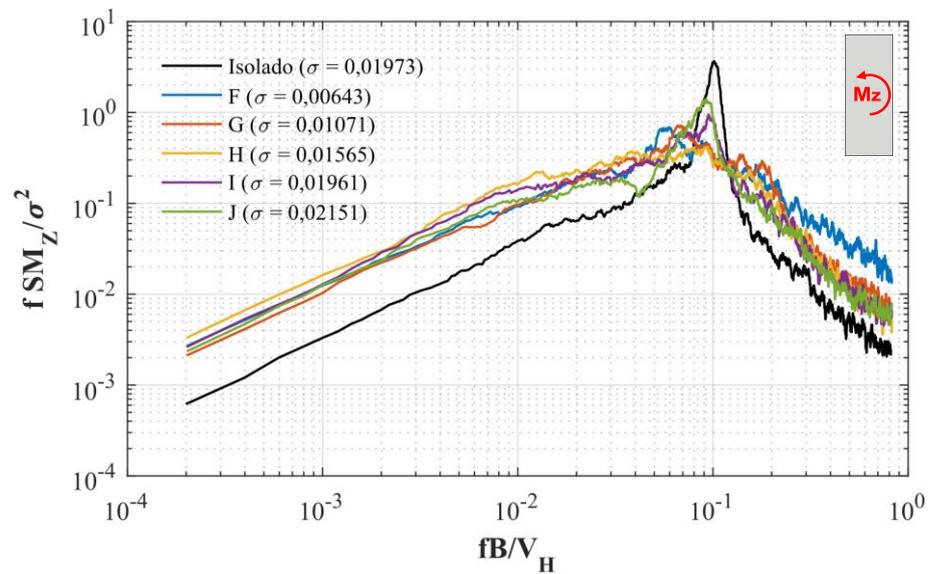


Figura 5.61: Espectro de torção do Modelo II para configuração tipo oblíqua e $p = 0,23$. Fonte: autor.

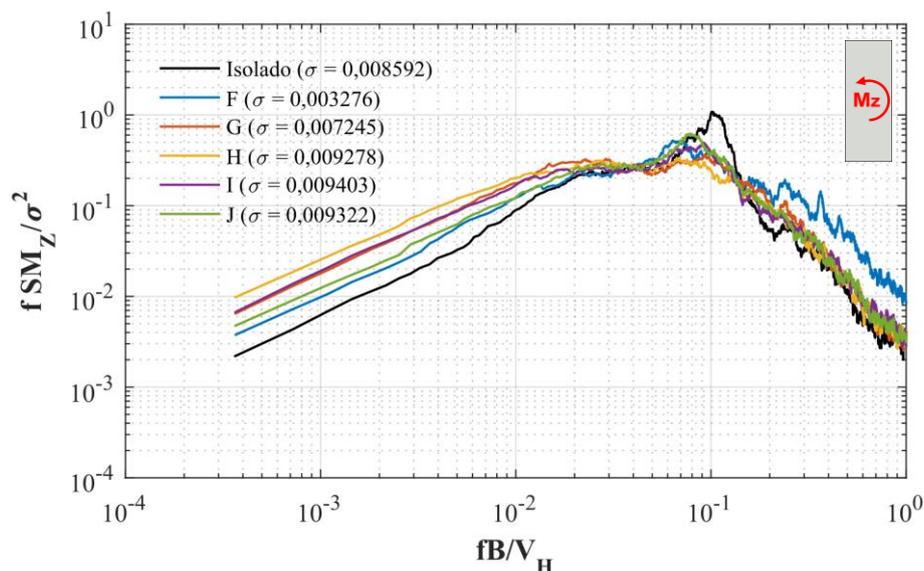


Figura 5.62: Espectro de torção do Modelo II para configuração tipo oblíqua e $p = 0,26$. Fonte: autor.

5.3.4 Configuração de vizinhança com obstáculo na esteira

Os espectros gerados com o modelo mudo tendo sido posicionado à sotavento do Modelo II serão exibidos neste tópico. As Figuras 5.63, 5.64 e 5.65 mostram os resultados em termos de força longitudinal (em x), para perfis de vento com expoente p igual a 0,11, 0,23 e 0,26, respectivamente.

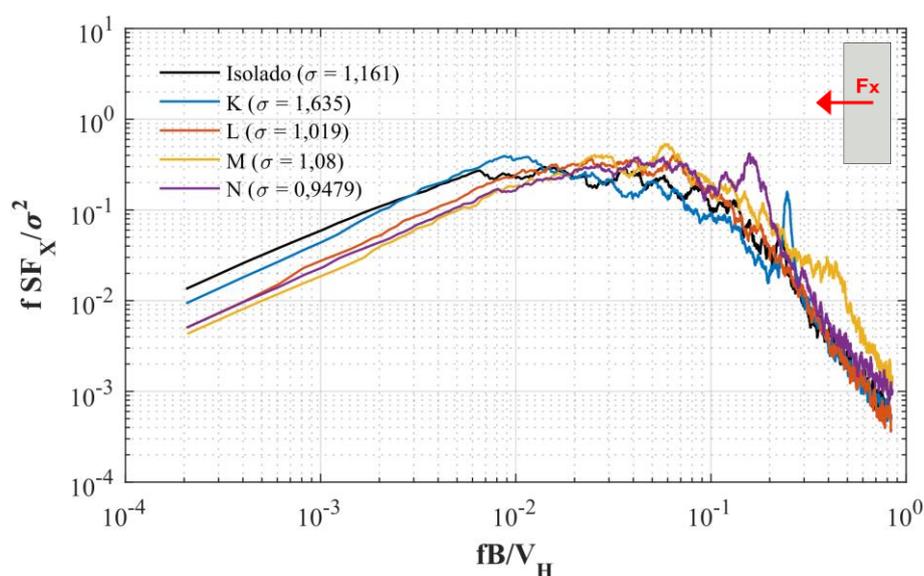


Figura 5.63: Espectro de forças globais em x do Modelo II para configuração de esteira e $p = 0,11$. Fonte: autor.

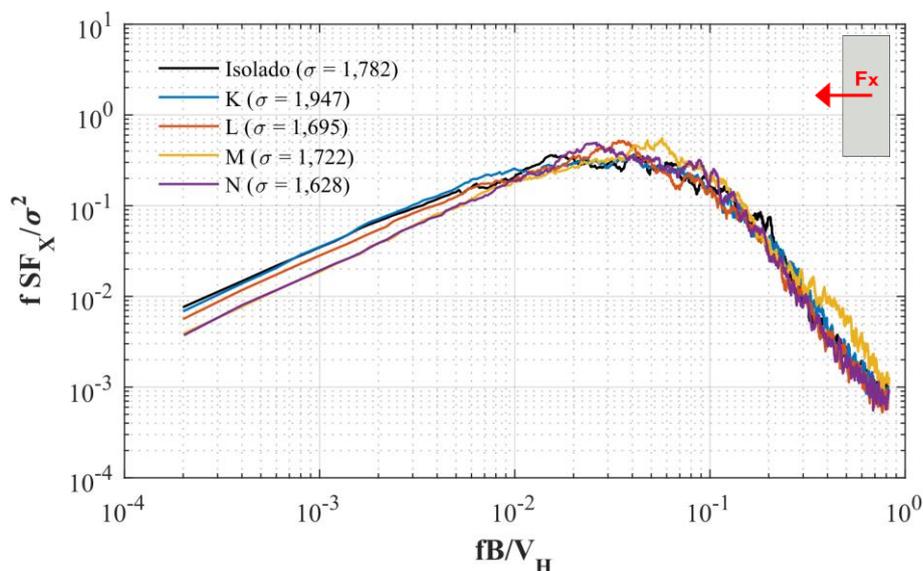


Figura 5.64: Espectro de forças globais em x do Modelo II para configuração de esteira e $p = 0,23$. Fonte: autor.

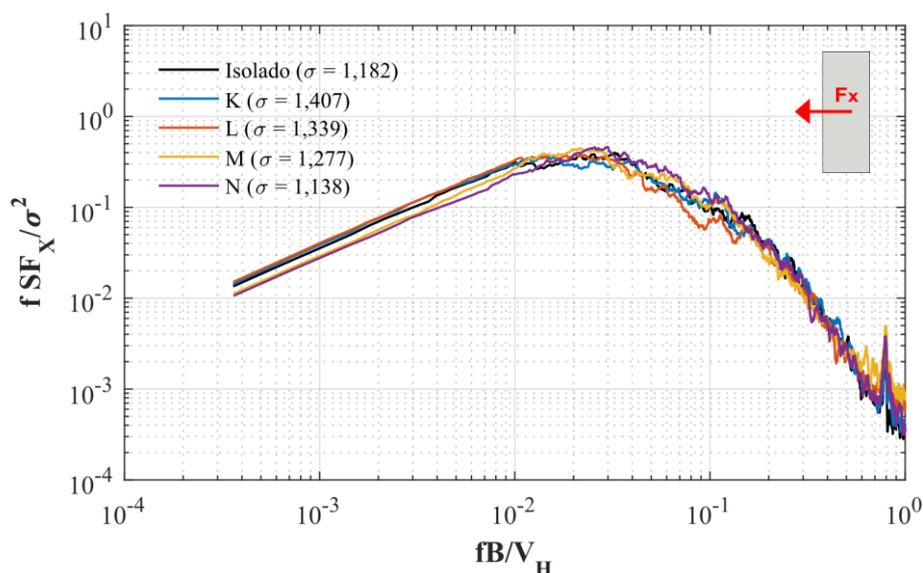


Figura 5.65: Espectro de forças globais em x do Modelo II para configuração de esteira e $p = 0,26$. Fonte: autor.

Percebe-se que, em escoamento suave (Figura 5.63), a configuração K exibe um pico concentrado de energia que não ocorre em outras configurações de vizinhança, possivelmente pela baixa distância entre o modelo principal e o mudo. Além disso, sensíveis diferenças são observadas entre os espectros de vizinhança e o isolado em escoamento suave. Aumentando a turbulência (Figuras 5.64 e 5.65), verifica-se que as posições de esteira pouco influenciam o modelo principal.

Com relação à força em y , transversal ao escoamento, os resultados estão ilustrados nas Figuras 5.66, 5.67 e 5.68 para ventos com perfil p igual a 0,11, 0,23 e 0,26, respectivamente.

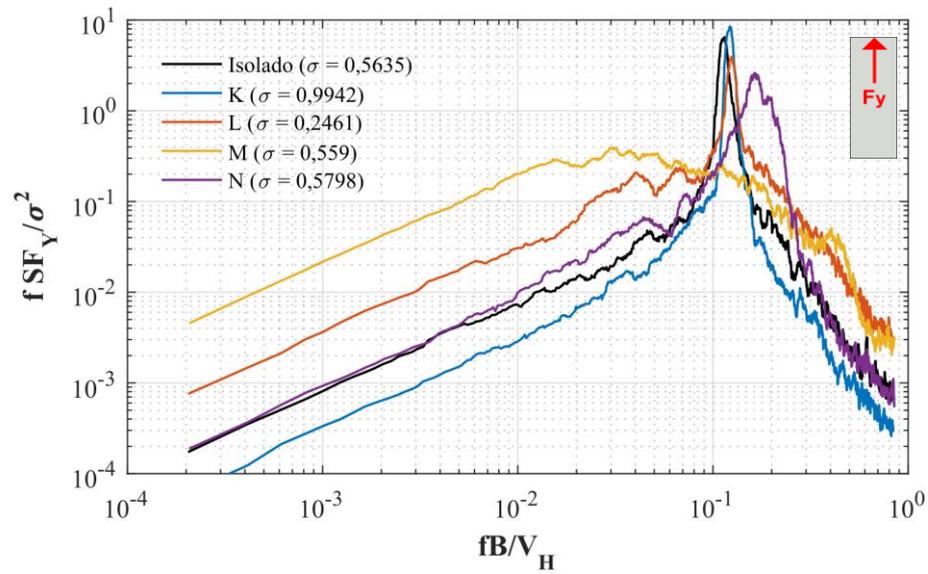


Figura 5.66: Espectro de forças globais em y do Modelo II para configuração de esteira e $p = 0,11$. Fonte: autor.

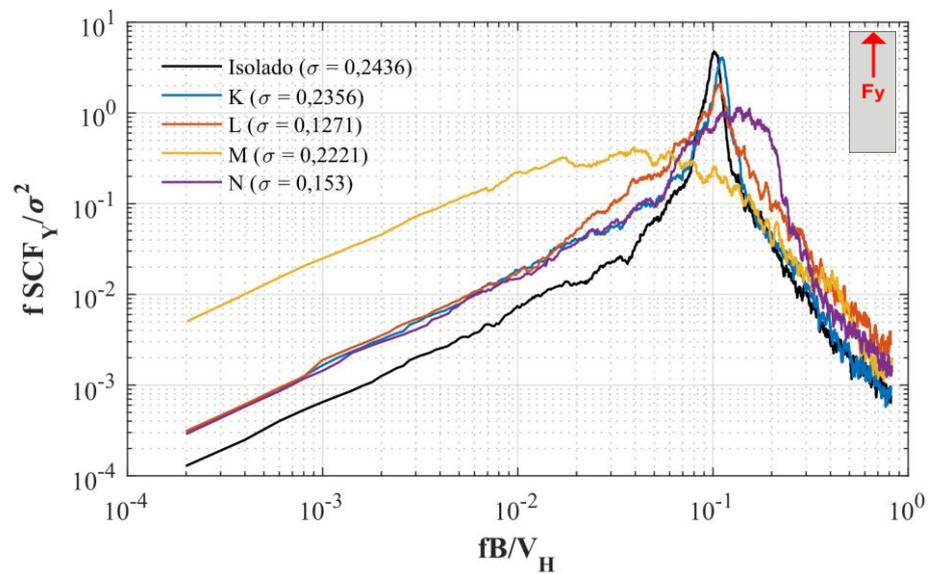


Figura 5.67: Espectro de forças globais em y do Modelo II para configuração de esteira e $p = 0,23$. Fonte: autor.

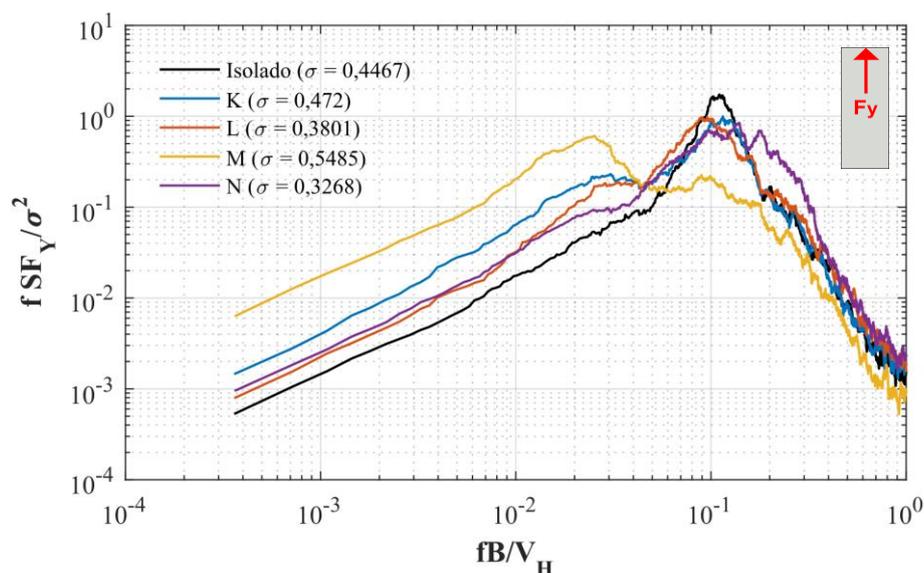


Figura 5.68: Espectro de forças globais em y do Modelo II para configuração de esteira e $p = 0,26$. Fonte: autor.

De maneira geral, observa-se que as configurações M e N de vizinhança, posicionados obliquamente em relação ao modelo principal, representam as maiores diferenças em relação aos respectivos casos isolados, o que também foi observado para o Modelo I. Isso sugere que a presença de um obstáculo oblíquo, mesmo que na esteira, perturbe o escoamento o suficiente para desorganizar os vórtices que são desprendidos sobre o modelo principal. Novamente, percebe-se que a turbulência age atenuando os efeitos de vizinhança.

Considerando a torção em z sobre o Modelo II, as Figuras 5.69, 5.70 e 5.71 apresentam os resultados para perfis com expoente p igual a 0,11, 0,23 e 0,26, respectivamente.

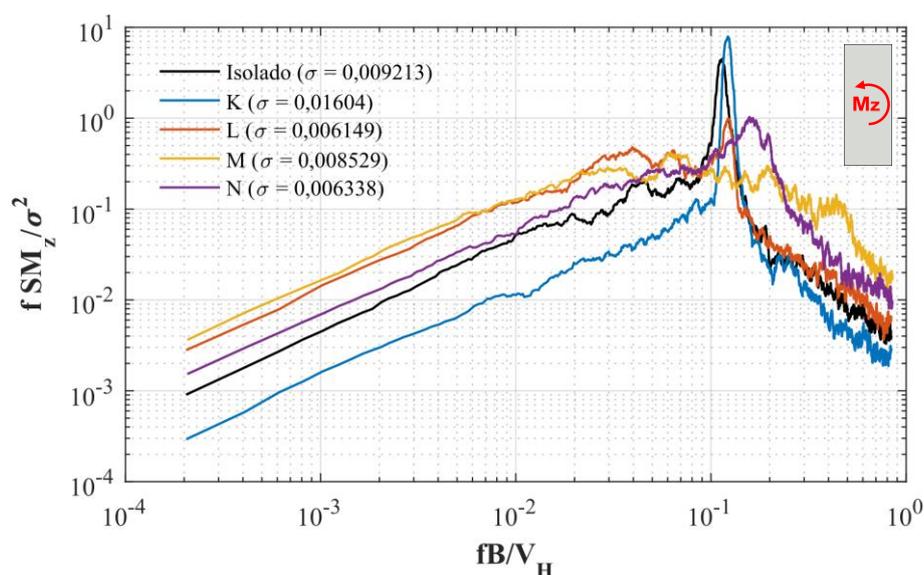


Figura 5.69: Espectro de torção do Modelo II para configuração de esteira e $p = 0,11$. Fonte: autor.

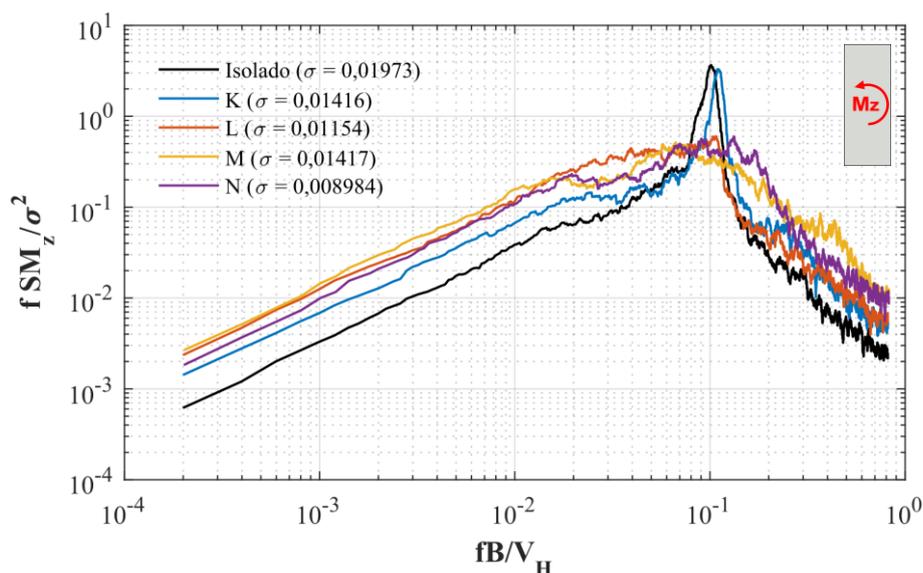


Figura 5.70: Espectro de torção do Modelo II para configuração de esteira e $p = 0,23$. Fonte: autor.

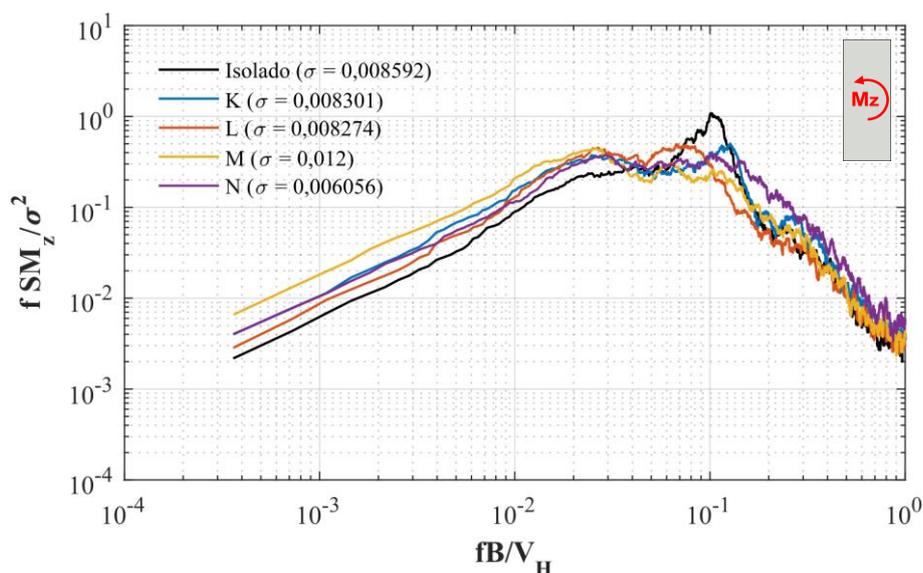


Figura 5.71: Espectro de torção do Modelo II para configuração de esteira e $p = 0,26$. Fonte: autor.

Neste caso, nota-se um comportamento interessante: observaram-se diferenças significativas quando o obstáculo foi posicionado na esteira para grande parte das configurações de vizinhança. De maneira geral, a configuração K (modelo mudo mais próximo do modelo principal) apresentou o pico de energia característico que ocorre no respectivo caso isolado, enquanto as outras configurações de vizinhança alteraram significativamente o espectro em relação ao caso isolado. Portanto, observa-se que a perturbação causada pela inserção de obstáculos ao redor de uma edificação pode ser grande até mesmo para posições localizadas na esteira, decrescendo à medida que a turbulência do escoamento aumenta.

5.3.5 Funções de admitância aerodinâmica

Neste tópico, serão apresentadas as funções de admitância aerodinâmica do Modelo II para a condição isolada e em algumas posições de vizinhança. As funções de admitância aerodinâmica para as demais configurações de vizinhança estão ilustradas no Apêndice II deste trabalho.

Ressalta-se que este modelo é simétrico. Desta forma, carregamentos médios de força na direção y e de torção poderão ter valores próximos de zero, tornando as respectivas funções de admitância aerodinâmica inconsistentes.

Com relação ao caso isolado, a Figura 5.72 ilustra as funções de admitância aerodinâmica para os carregamentos globais. Nota-se que formatos mais consistentes com curvas teóricas são encontrados para o carregamento global da força na direção x . O desprendimento de vórtices fica claro para a função de admitância aerodinâmica da força na direção y . Além disso, as funções de admitância aerodinâmica de torção não foram representadas nos limites do gráfico, uma vez que a carga média de torção para o modelo possui valor próximo de zero.

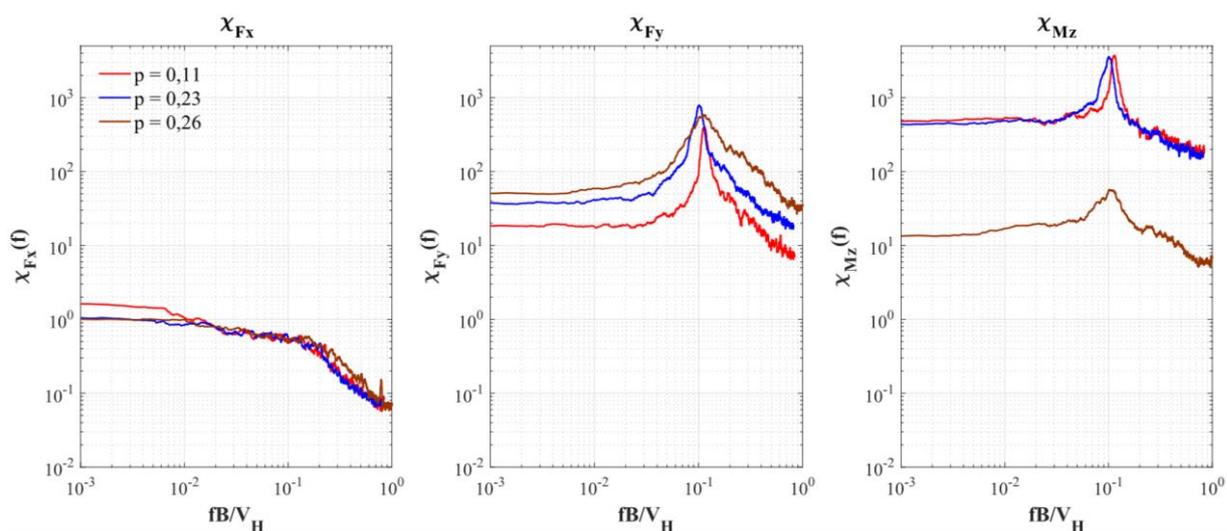


Figura 5.72: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo II na condição isolada. Fonte: autor.

As funções de admitância aerodinâmica do Modelo II para as posições A e C de vizinhança estão ilustradas nas Figuras 5.73 e 5.74, respectivamente. Com relação ao caso

isolado, as funções de admitância aerodinâmica possuem comportamentos similares. A função de admitância aerodinâmica para força de arrasto, na direção x , está consistente com curvas teóricas (DAVENPORT, 1963 *apud* HOLMES, 2015). Picos de energias associados ao desprendimento de vórtices são novamente observados na força global na direção y . Além disso, picos de energia podem ser observados também no momento de torção.

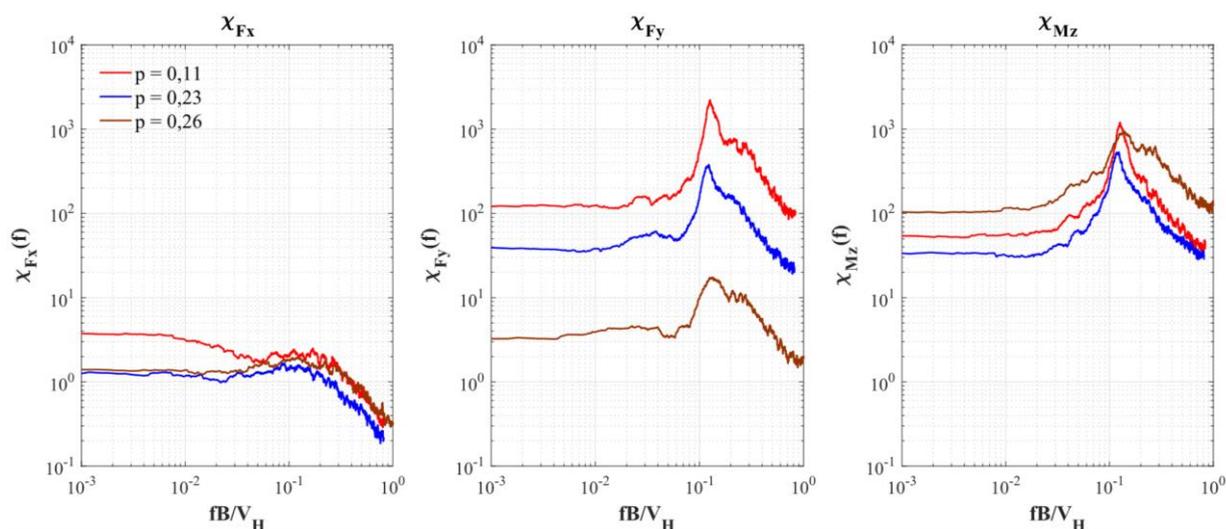


Figura 5.73: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo II com vizinhança na posição A.

Fonte: autor.

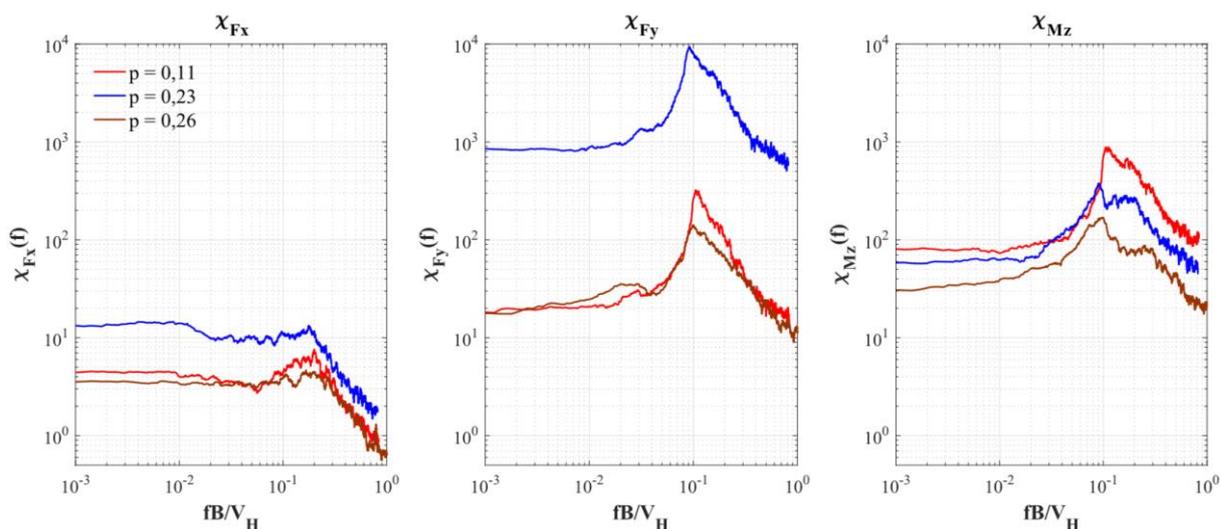


Figura 5.74: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo II com vizinhança na posição C.

Fonte: autor.

As funções de admitância aerodinâmica para o Modelo II com modelo mudo inserido nas posições F e H (configuração oblíqua) são ilustradas nas Figuras 5.75 e 5.76, respectivamente. Com exceção do escoamento suave ($p = 0,11$), as funções de admitância

aerodinâmica de forças globais em x continuaram apresentando formatos consistentes com curvas teóricas. As funções de admitância aerodinâmica de cargas globais em y continuaram exibindo o mesmo formato observado em outras configurações. Além disso, para configurações oblíquas, nas quais o momento tursor médio aumenta sobre o modelo principal, as curvas de admitância já surgem nos limites do espectro.

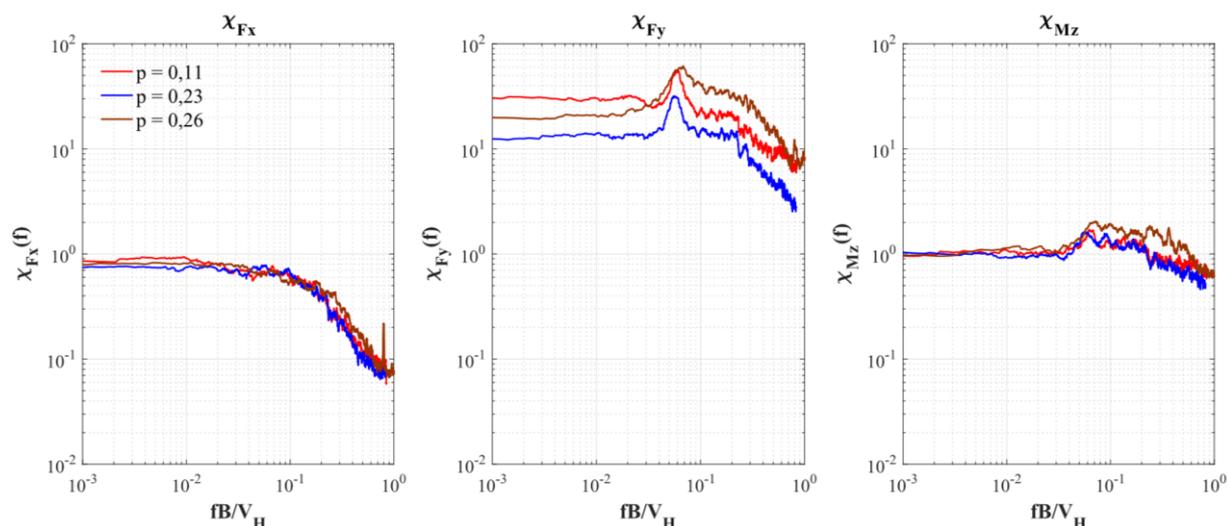


Figura 5.75: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo II com vizinhança na posição F.

Fonte: autor.

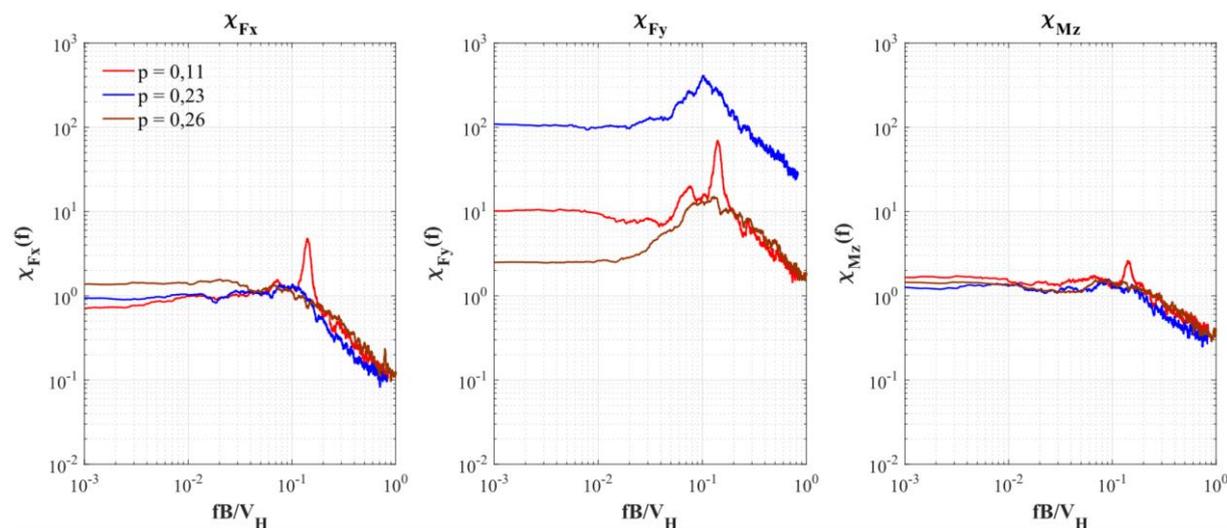


Figura 5.76: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo II com vizinhança na posição H.

Fonte: autor.

A seguir, são apresentadas as funções de admitância aerodinâmica para as posições K e M (Figuras 5.77 e 5.78, respectivamente), que representam configurações de vizinhança com modelo mudo inserido à sotavento do modelo principal.

Com relação à posição K, as curvas de admitância obtidas mostram comportamento similar ao que foi obtido para a configuração isolada. Por outro lado, a configuração M apresenta resultados distintos. As funções de admitância aerodinâmica de cargas globais na direção y e de momento tursor exibiram formatos que lembram curvas teóricas.

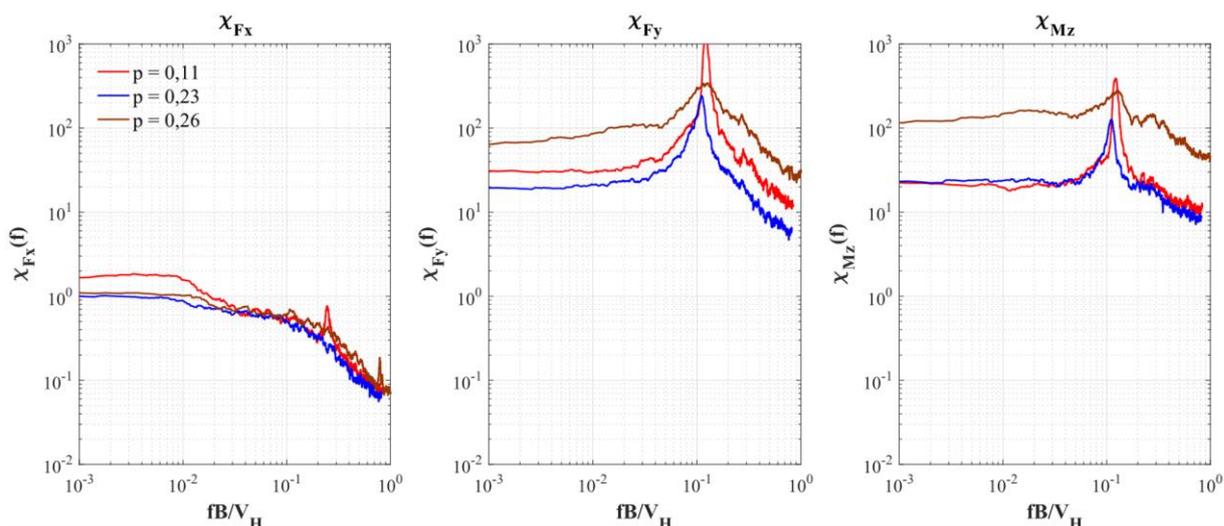


Figura 5.77: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo II com vizinhança na posição K.

Fonte: autor.

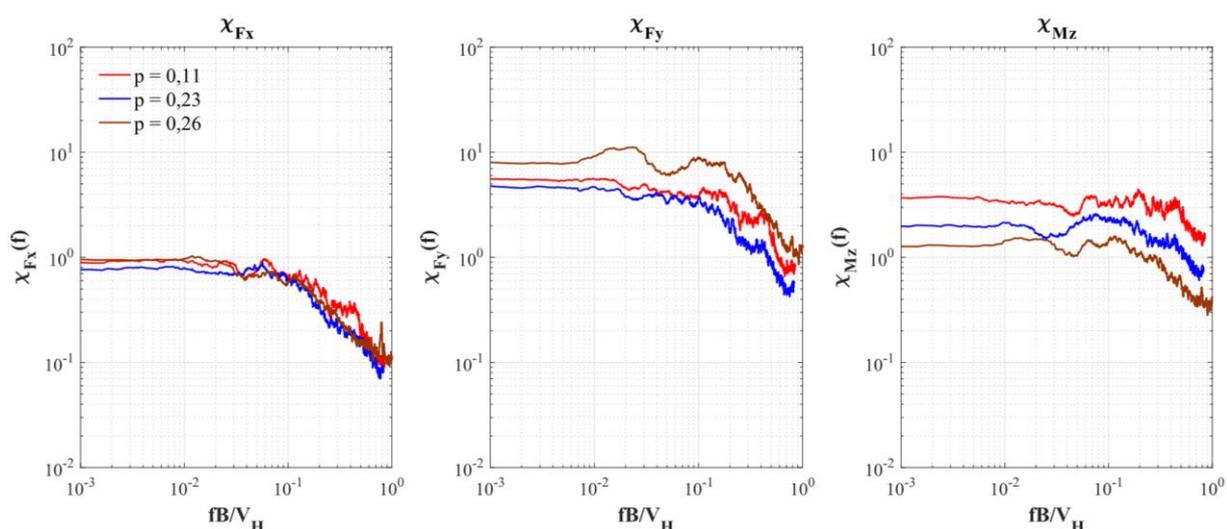


Figura 5.78: Funções de admitância aerodinâmica de cargas globais do Modelo II com vizinhança na posição M.

Fonte: autor.

5.4 COMPARAÇÕES ENTRE OS MODELOS

Neste tópico, serão apresentadas comparações diretas entre os resultados obtidos para os dois modelos em configurações isoladas, de modo a permitir a visualização mais clara do efeito de detalhes arquitetônicos sobre os carregamentos globais. As Figuras 5.79, 5.80 e 5.81

apresentam espectros de forças e funções de admitância aerodinâmica para as forças nas direções x e y e torção, respectivamente.

Com relação à força global na direção x , são observados comportamentos muito similares para os dois modelos, conforme pode ser observado na Figura 5.79, sobretudo quando a turbulência presente no escoamento aumenta.

Por outro lado, o mesmo não ocorre em se tratando de forças na direção transversal ao escoamento e de torção sobre os modelos (Figuras 5.80 e 5.81, respectivamente). Na verdade, existem diferenças consideráveis: O Modelo I, por apresentar seção transversal variável ao longo da altura, apresenta espectros mais alargados e com picos de energia menores que os espectros do Modelo II para a carga global em y . Esse resultado pode ser explicado pela diferença geométrica entre os dois modelos: o Modelo I possui seção transversal variável ao longo da altura, o que provavelmente age beneficemente ao desprender vórtices com frequências diferentes nas arestas do modelo, amenizando o pico de energia.

Além disso, analisando os espectros de cargas globais de torção (Figura 5.81), nota-se que o Modelo I, representativo de um edifício real, não exibiu pico concentrado de energia. Entretanto, a simplificação geométrica do modelo foi suficiente para que um pico concentrado de energia surgisse sobre o modelo, indicando a ocorrência de pico concentrado de energia. De maneira geral, também é observada que a turbulência provoca a atenuação dos picos de energia e o alargamento dos espectros de carregamentos.

Ainda que diferentes, as funções de admitância aerodinâmica para cargas globais na direção y possuem formatos que guardam certa similaridade (Figura 5.80). Valores maiores de admitância do Modelo II, simplificado, indica que ele é mais propenso a sofrer flutuações de carga a partir de flutuações na velocidade do vento, sendo esse comportamento também observado para a torção.

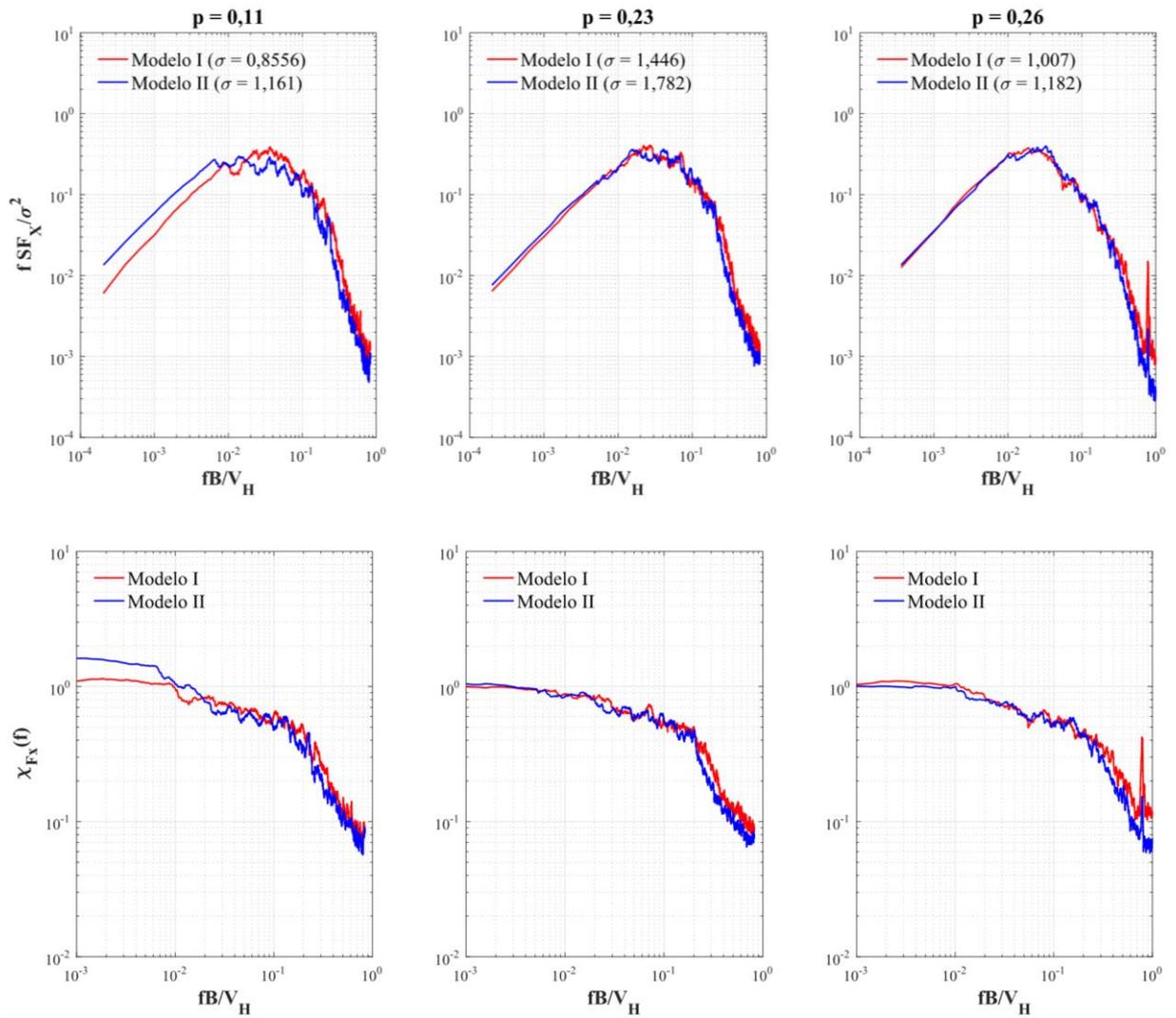


Figura 5.79: Espectros de forças globais em x e respectivas funções de admitância aerodinâmica dos Modelos I e II. Fonte: autor.

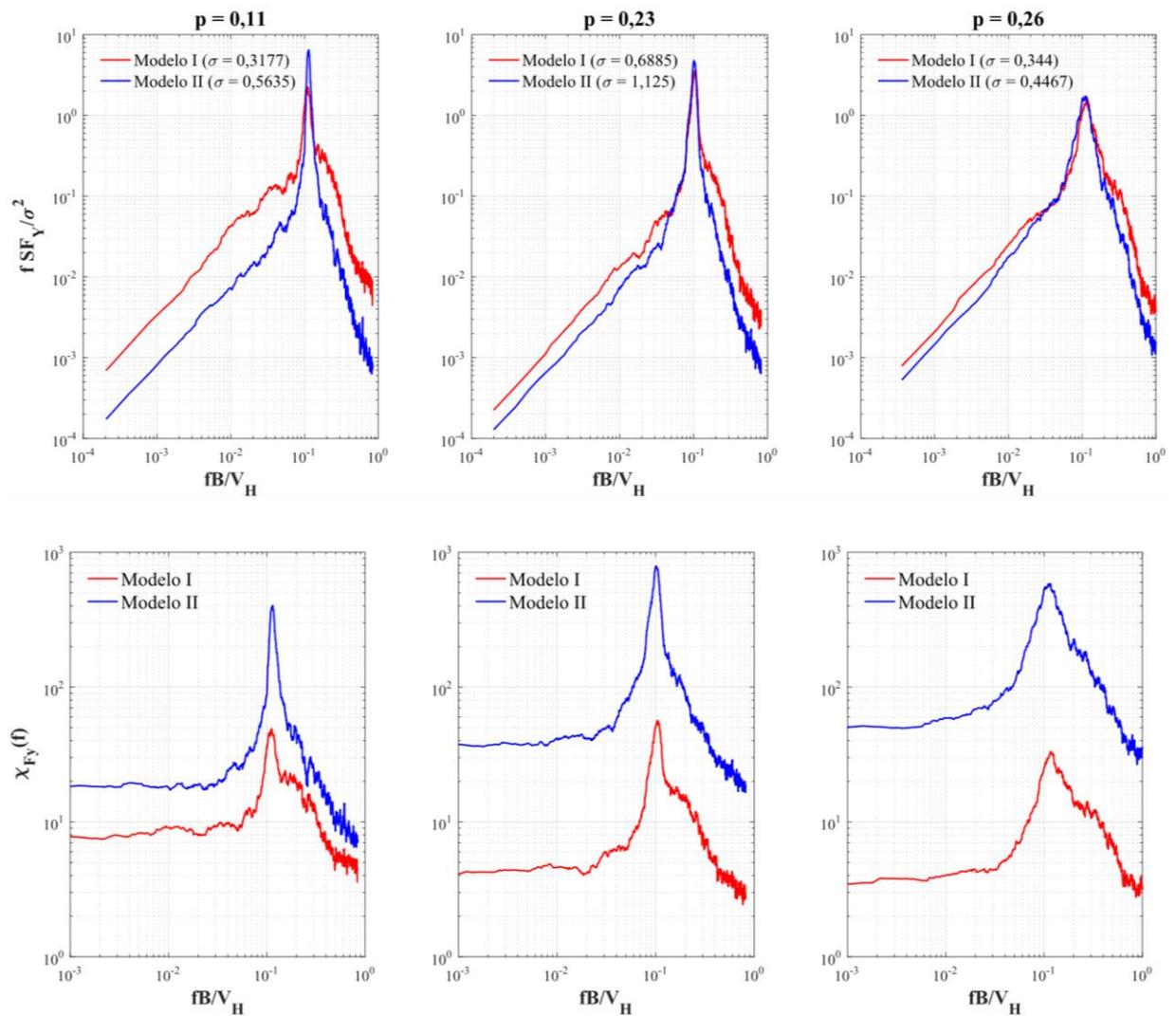


Figura 5.80: Espectros de forças em globais em y e respectivas funções de admitância aerodinâmica dos Modelos I e II. Fonte: autor.

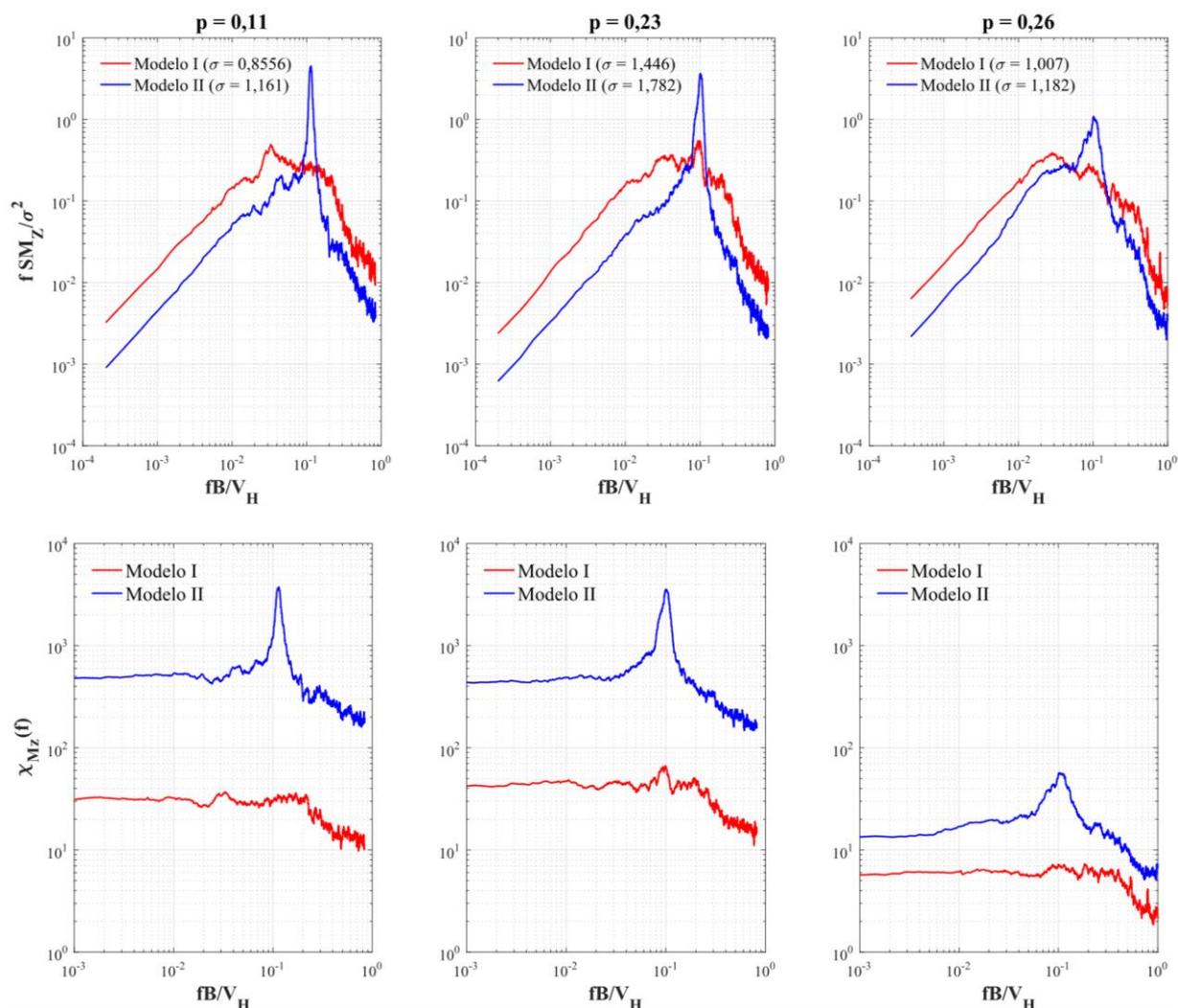


Figura 5.81: Espectros de torção e respectivas funções de admitância aerodinâmica dos Modelos I e II. Fonte: autor.

Com o intuito de se analisar o efeito da variação da seção transversal do Modelo I ao longo de sua altura, os espectros de cargas dos dois modelos foram divididos em zonas e foram comparados. Essa comparação foi feita para vento suave ($p = 0,11$), uma vez que a turbulência age de modo a reduzir a diferença entre os dois modelos. As Figuras 5.82, 5.83 e 5.84 exibem os espectros de cargas locais nas direções x e y e de torção, respectivamente.

Com relação à força global na direção x , observam-se que os espectros possuem comportamentos semelhantes ao longo da altura dos dois modelos, aproximando-se, portanto, do comportamento global (Figura 5.79).

Analisando-se a força em y e a torção ao longo da altura dos dois modelos, drásticas diferenças são observadas. Como esperado, o Modelo I apresenta espectros com comportamento mais desorganizado ao longo de sua altura, o que favorece a falta de correlação dos vórtices e diminui o potencial de ocorrência de fenômenos dinâmicos indesejáveis. O Modelo II, tanto para a força em y quanto para a torção em z , apresenta espectros com frequências de pico muito próximas ao longo da altura, o que significa que os vórtices estão bem correlacionados. Esses resultados ajudam a explicar os espectros obtidos nas Figuras 5.80 e 5.81.

Esses resultados corroboram os resultados obtidos por Tanaka *et al.* 2012, que estudou a influência da variação geométrica dos modelos sobre espectros de carregamentos globais e locais, verificando que a variação volumétrica de um modelo ajuda a reduzir a intensidade de picos de energia concentrados.

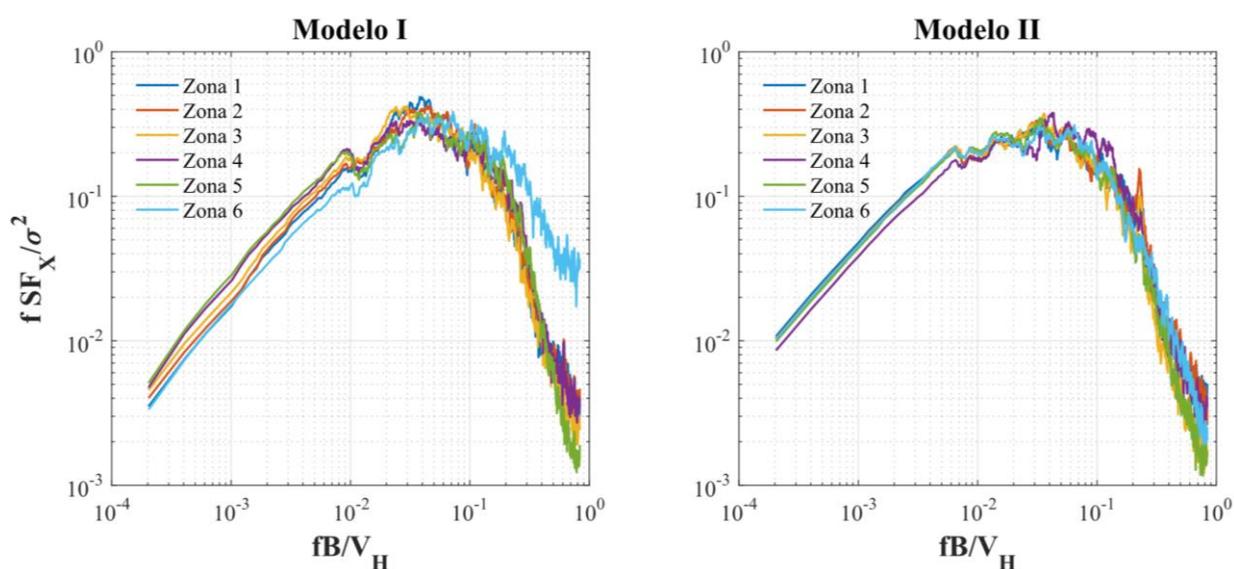


Figura 5.82: Espectros de forças em x divididos por zona para $p = 0,11$.

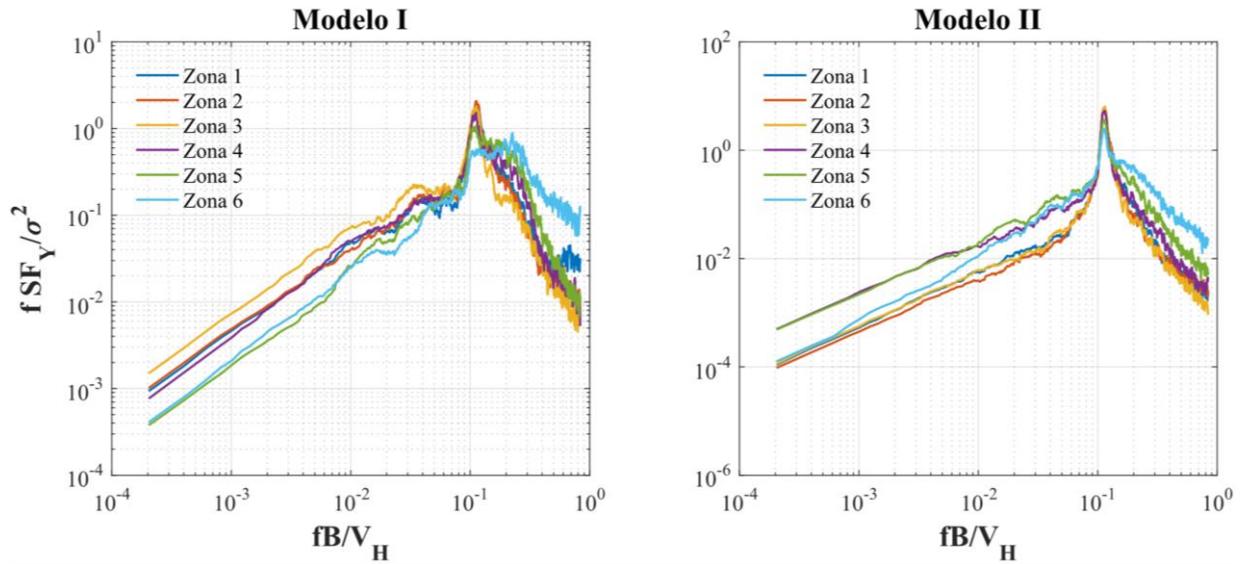


Figura 5.83: Espectros de forças em y divididos por zona para $p = 0,11$.

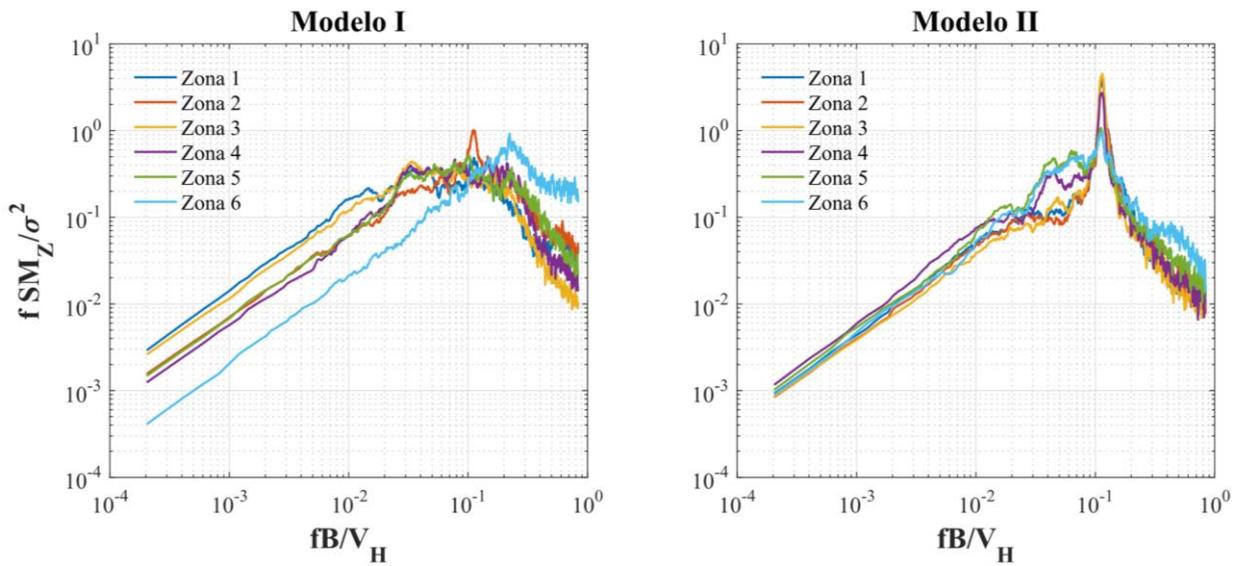


Figura 5.84: Espectros de torção divididos por zona para $p = 0,11$.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram realizadas caracterizações aerodinâmicas de um edifício alto em termos de espectros de cargas e funções de admitância aerodinâmica. Além disso, foram estudadas a influência que a vizinhança, os detalhes arquitetônicos e a turbulência do vento exercem sobre essas caracterizações. Para isso, dois modelos foram ensaiados experimentalmente: um modelo de edifício real, construído no Brasil, enquanto o outro representa uma simplificação geométrica do primeiro. Um modelo mudo foi inserido em diferentes posições de vizinhança ao redor do modelo principal, e três perfis de vento com diferentes características foram utilizados para poder avaliar o efeito da turbulência do vento, sempre com o mesmo ângulo de incidência. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

A análise em termos de espectros de cargas globais permitiu verificar que o efeito de vizinhança possui potencial de alterar significativamente o carregamento flutuante sobre a estrutura. A vizinhança pode favorecer o surgimento de fenômenos ressonantes que não são observados em análises do modelo isolado, como o que foi observado em torção para o Modelo I (edifício real). Além disso, mesmo que um edifício de vizinhança seja inserido em distâncias consideráveis (até 10 vezes a dimensão característica da base do modelo), efeitos ressonantes podem surgir sobre o modelo principal possivelmente causados por martelamento. Além disso, notou-se que vizinhança posicionada de maneira oblíqua à barlavento, de maneira geral, pareceu ser a que mais age no sentido de provocar o surgimento de efeitos potencialmente ressonantes. Por outro lado, o modelo de vizinhança posicionado à sotavento do modelo principal tem menor potencial de impacto sobre os espectros de cargas globais, mas ainda assim pode oferecer diferenças significativas em relação ao caso isolado.

Com relação ao efeito dos detalhes geométricos, os resultados obtidos demonstraram que ambos os modelos se comportaram de maneira bastante similar com relação às forças globais na direção x . Vale ressaltar que, neste trabalho, a força global na direção x coincide com a força de arrasto.

Por outro lado, diferenças notáveis foram observadas com relação ao comportamento dos dois modelos frente à força global na direção y e à torção. O Modelo II, simplificado, exibiu

espectros mais concentrados e picos de energia maiores ao se analisar a carga global na direção y , o que provavelmente se deve a um desprendimento de vórtices mais organizado. Além disso, a simplificação geométrica causou picos de energia de torção que são inexistentes no Modelo I.

As funções de admitância aerodinâmica do Modelo II obtidas foram maiores que as funções correspondentes do Modelo I, indicando que o carregamento sobre o Modelo II é mais sensível às flutuações de velocidade do vento. Exceção deve ser feita às funções de admitância do carregamento global na direção x , as quais foram similares para os dois modelos.

Finalmente, comprova-se que a turbulência promove uma ação atenuadora ao reduzir os picos de energia que são encontrados nos espectros de carregamentos globais. Além disso, verifica-se que a turbulência age no sentido de minimizar os efeitos de vizinhança.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve a limitação de utilizar apenas um ângulo de incidência do vento e um modelo mudo. Nesse sentido, sugere-se alterar o ângulo de incidência do vento e avaliar o efeito que a inserção de outro modelo mudo pode causar sobre o modelo principal.

Além disso, sugere-se a utilização de um anemômetro de fio quente para medir o escoamento na esteira do mudo, o que poderá confirmar a ocorrência de martelamento. Sugere-se utilizar diferentes velocidades médias para o escoamento do vento e verificar qual seria o impacto sobre o modelo principal.

Também é relevante o estudo do impacto causado pelo formato geométrico do modelo mudo. Dessa forma, cabe analisar a influência que a altura, largura e comprimento de um modelo mudo pode exercer sobre o modelo principal.

REFERÊNCIAS

ALBERTI, F. A. **Determinação experimental em túnel de vento dos efeitos estáticos de proteção causados por edificações vizinhas: contribuição para a revisão dos fatores de vizinhança da NBR-6123**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. **Estatística para cursos de engenharia e informática**. 3 ed. São Paulo: Editora Atlas, 2010. 410 p. ISBN 978-85-224-5994-0.

BLOCKEN, B.; MOONEN, P.; STATHOPOULOS, T; CARMELIET, J. A numerical study on the existence of the Venturi-effect in passages between perpendicular buildings. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 134, p. 1021-1028, December 2008.

BÊNIA, M. C. D. **Determinação dos efeitos de vizinhança na resposta dinâmica de edifícios altos sob a ação do vento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre. 2013.

BLESSMANN, J.; RIERA, J. D. Interaction effects in neighbouring tall buildings. **Proceedings of the Fifth International Conference**, Fort Collins, Colorado, USA, v.2, p. 367-381, December 1980.

BLESSMANN, J. Buffeting effects on neighbouring tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 18, p. 105-110, 1985.

_____. **O vento na engenharia estrutural**. 1 ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1995. 166 p. ISBN 85-7025-362-1.

_____. **Aerodinâmica das construções**. 3 ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2011. 264 p. ISBN 978-85-386-0127-2.

_____. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. 2 ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2005. 282 p. ISBN 85-7025-802-X.

CARINI, M. R. **Resposta dinâmica em torção de edifícios sob ação do vento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre, 2017.

CARPEGGIANI, E. A. **Determinação dos efeitos estáticos de torção em edifícios altos devidos à ação do vento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre. 2004.

CARPEGGIANI, E. A.; LOREDO-SOUZA, A. M.; NÚÑEZ, G. J. Z.; PALUCH, M. **Determinação dos efeitos estáticos de torção em edifícios altos de concreto armado devidos à ação do vento.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47o., 2005, Maceió. IBRACON, 2005.

COOLEY, J. W.; TUKEY, J. W. An Algorithm for Machine Calculation of Complex Fourier Series. **Mathematics of Computation**, v. 19, pp. 297-301, 1965.

COOK, N. J. **The designer's guide to wind loading of building structures.** 1st ed. Garston, 1985.

FONTES, A. C. D. **Importância dos efeitos de vizinhança na resposta dinâmica de um edifício à ação do vento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre. 2003.

FU, F. **Design and analysis of tall and complex structures.** Butterworth-Heinemann, 2018. 318 p. ISBN 978-0-08-101018-1.

HARRIS, C. L. Influence of neighboring structures on the wind pressure on tall buildings. **Part of Bureau of Standards Journal of Research**, New York, USA, v. 2, p 103-118, January 1934.

HUI, Y.; TAMURA, Y.; YOSHIDA, A. Mutual interference effects between two high-rise building models with different shapes on local peak pressure coefficients. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 104-105, p. 98-108, 2012.

HOLMES, J. D. **Wind Loading of Structures**, 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. 428 p.

IRWIN, P.; DENOON, R.; SCOTT, D. **Wind Tunnel Testing of High-Rise Buildings: An output of the CTBUH Wind Engineering Working Group.** Council on Tall Buildings and Urban Habitat: Chicago, 48 p., Routledge, 2013.

KAREEM, A. The effect of aerodynamic interference on the dynamic response of prismatic structures. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 25, p. 365-372, 1987.

KIM, W.; TAMURA, Y.; YOSHIDA, A. Interference effects on local peak pressures between two buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 99, p. 584-600, 2011.

KIM, Y. C.; TAMURA, T.; TANAKA, H.; OHTAKE, K.; BANDI, E. K.; YOSHIDA, A. Wind-induced responses of super-tall buildings with various atypical building shapes. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 133, p. 191-199, 2014.

KHANDURI, A. C.; STATHOPOULOS, T.; BÉDARD, C. Wind-induced interference effects on buildings – a review of the state-of-the-art. **Engineering Structures**, v. 20, n. 7, p. 617-630, 1998.

LAC. **Base de dados – Edifícios analisadas**. Porto Alegre: dados e desenhos, 2019.

LO, Y. L.; KIM, Y. C.; LI, Y. C. Downstream interference effect of high-rise buildings under turbulent boundary layer flow. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 159, p. 19-35, December 2016.

LOREDO-SOUZA, A. M. **Acervo do LAC – dados de ensaio do Prédio I**. Porto Alegre, 2019.

LOREDO-SOUZA, A. M.; MARANHÃO, G.; CARPEGGIANI, E. A.; NÚÑEZ, G. J. Z.; PALUCH, M. **Estudo em Túnel de Vento dos Efeitos de Vizinhança Sobre o Empreendimento Blue Marlin Towers**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49o., 2007, Bento Gonçalves, **Anais**. IBRACON, 2007.

LOREDO-SOUZA, A. M.; NÚÑEZ, G. J. Z.; OLIVEIRA, M. G. K.; SIQUEIRA, G. M.; BÊNIA, M. C. D. **Majorações e Reduções nas Cargas de Vento em Edifícios Altos de Concreto Armado: Influência de Prédios Vizinhos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51o., 2009, Curitiba, **Anais**. IBRACON, 2009.

LOREDO-SOUZA, A. M.; OLIVEIRA, M. G. K.; CARPEGGIANI, E. A. Torsional Loads due to Vicinity Effects and its Consideration in the New Brazilian Wind Code. **Americas Conference on Wind Engineering, Seattle, USA**, June 2013.

LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M.; NÚÑEZ, G. J. Z.; OLIVEIRA, M. G. K. Wind Tunnel Tests for The Validation of the New Brazilian Wind Code. **Proceedings of the Americas Conference on Wind Engineering, San Juan, PR**, 2009.

LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. **Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento**. In: MOLLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. Turbulência. Porto Alegre: ABCM, 2004. v. 4, p. 137-160.

MARA, T. G.; HO, T. C. E.; ISYUMOV, N. Interference and Influence of Nearby Buildings: A Discussion of the Design Approach. **American Society of Civil Engineering Congress**, 2012.

NÚÑEZ, G. J. Z.; LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M. Uso do túnel de vento como ferramenta de projeto no design aerodinâmico. **Design e Tecnologia**, [Porto Alegre], v. 2, n. 4, p. 10-23, dez 2012.

OLIVEIRA, M. G. K. **Desenvolvimento de um suporte flexível para ensaios de modelos aeroelásticos em túnel de vento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre. 2003.

ROCHA, M. M. **SpectralDensity.m**. Script Matlab. Introdução à Teoria de Vibrações, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre. 2000.

RUSCHEWEYH, H. Dynamic response of high rise buildings under wind action with interference effects from surrounding buildings of similar size. **Proceedings of the Fifth International Conference, Fort Collins, Colorado, USA**, v. 2, p. 725-734, Dec 1980.

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

SCHARNBERG, F. A. **Caracterização aerodinâmica de edifícios altos através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre. 2018.

SYKES, D. M. Interference effects on the response of a tall building model. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 11, p. 385-380, 1983.

TANAKA, H.; TAMURA, Y.; OHTAKE, K.; NAKAI, M.; KIM, Y. C. Experimental investigation of aerodynamic forces and wind pressures acting on tall buildings with various unconventional configurations. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 107-108, p. 179-197, May 2012.

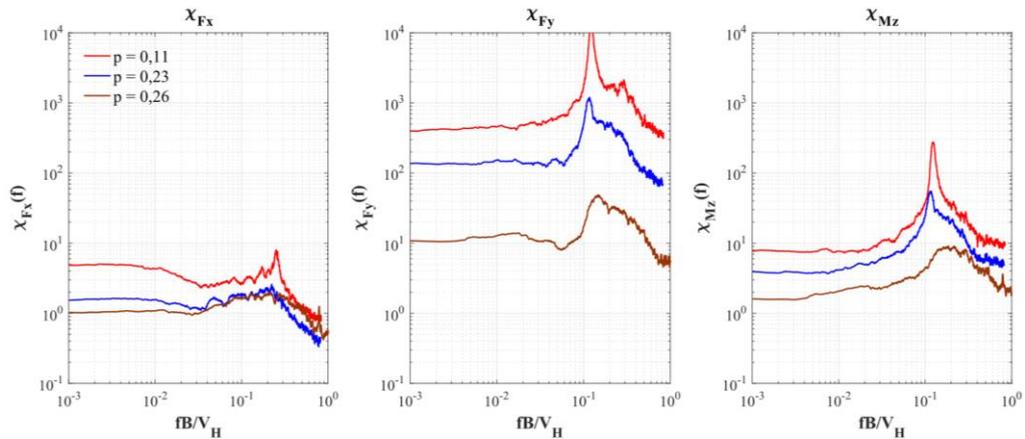
VIEIRA, G. S.; BRITO, J. L. V.; LOREDO-SOUZA, A. M. Experimental study of the neighborhood effects on the mean wind loading over two equivalent high-rise buildings. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v.15, Feb 2018.

VOGADO, M. W. **Caracterização aerodinâmica de edifícios altos com planta em formato de “v” através de análise espectral**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre. 2018.

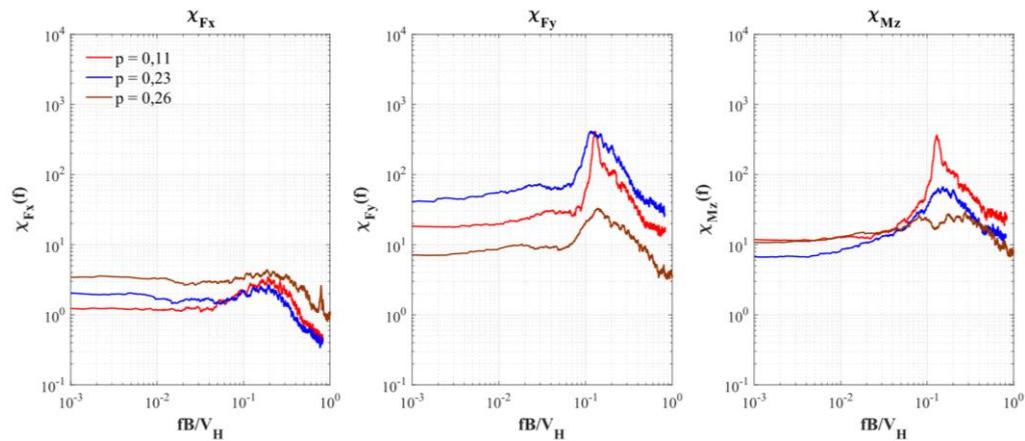
WISE, A. F. E. Effects due to groups of buildings. **Philosophical Transactions of The Royal Society A**, Great Britain, v. 269, p. 469-485, 1971.

YAHYAI, M.; KUMAR, K.; KRISHNA, P.; PANDE, P. K. Aerodynamic interference in tall rectangular buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 41-44, p. 859-866, July 1992.

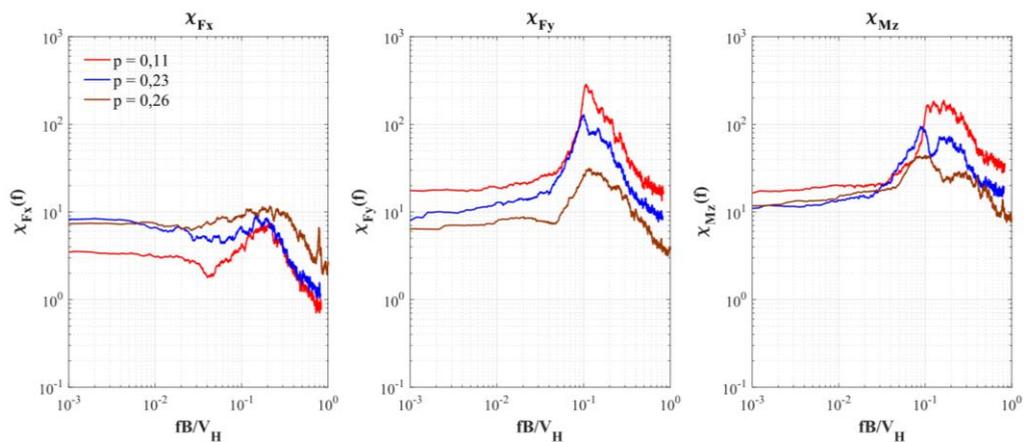
APÊNDICE I – FUNÇÕES DE ADMITÂNCIA AERODINÂMICA DO MODELO I



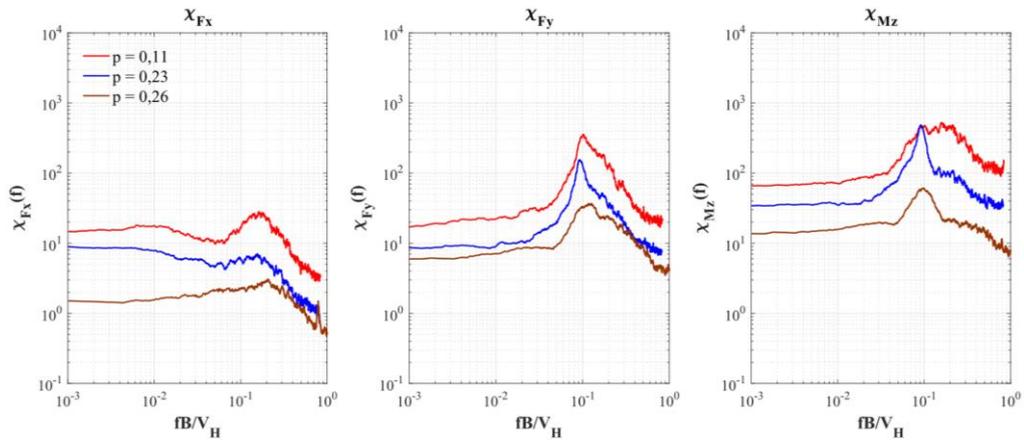
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo I para modelo mudo inserido na posição A.



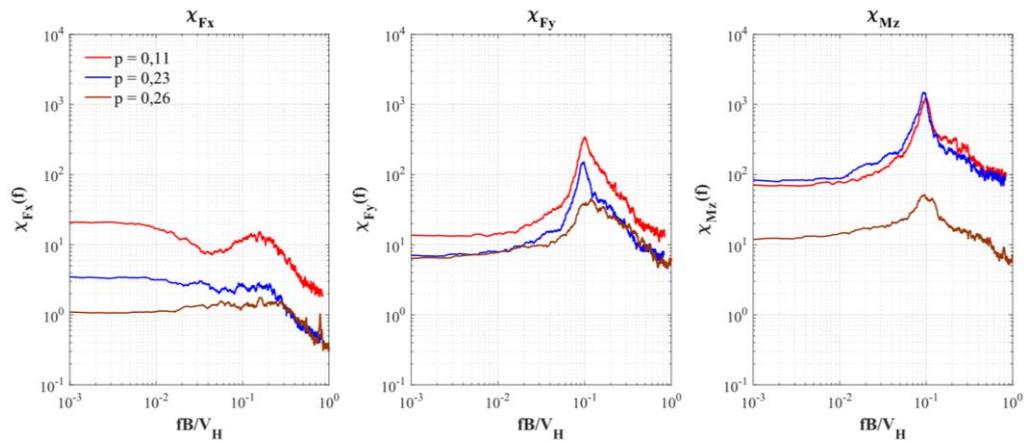
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo I para modelo mudo inserido na posição B.



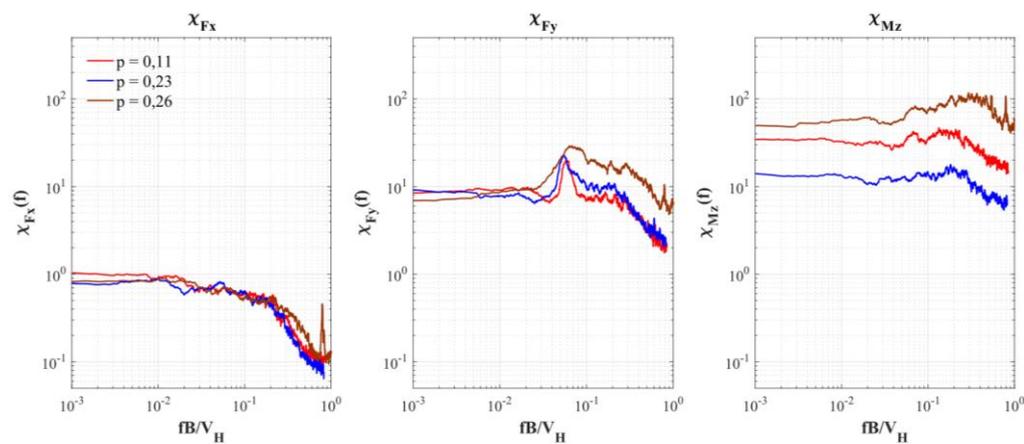
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo I para modelo mudo inserido na posição C.



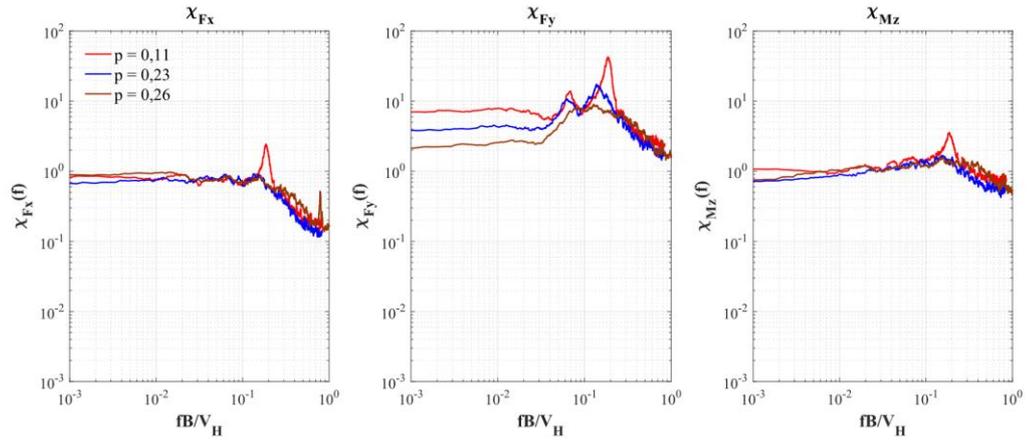
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo I para modelo mudo inserido na posição D.



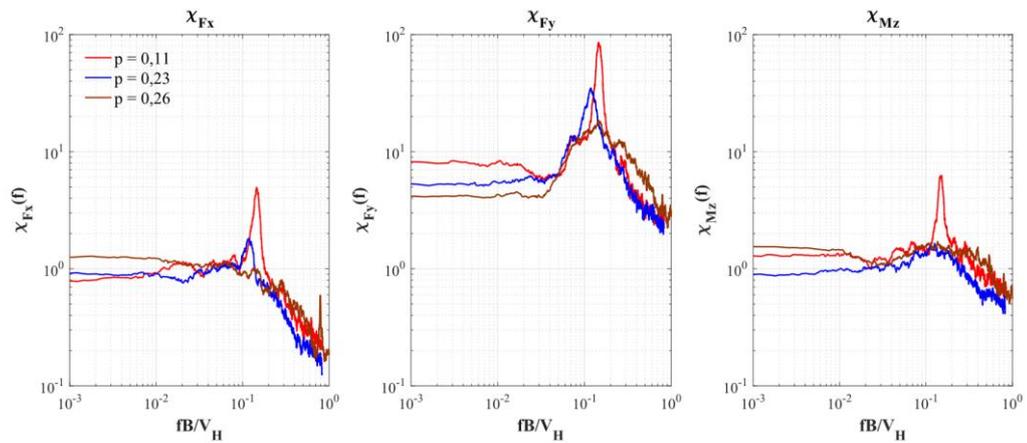
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo I para modelo mudo inserido na posição E.



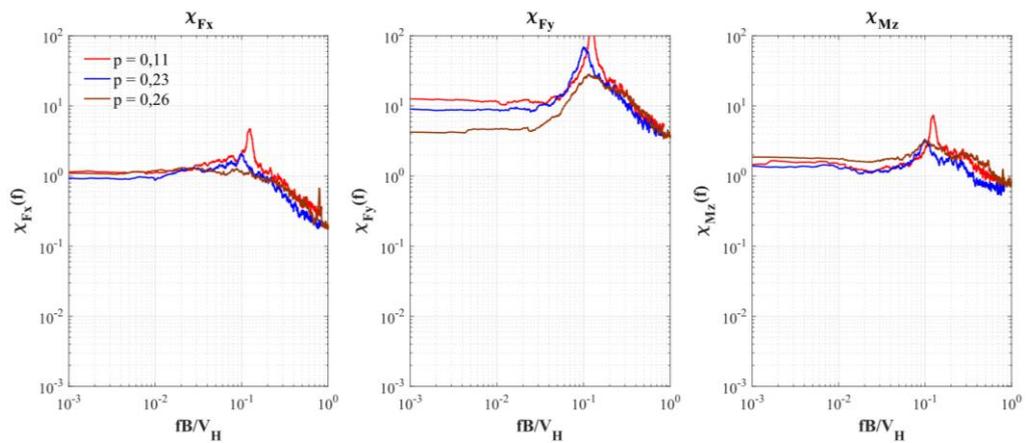
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo I para modelo mudo inserido na posição F.



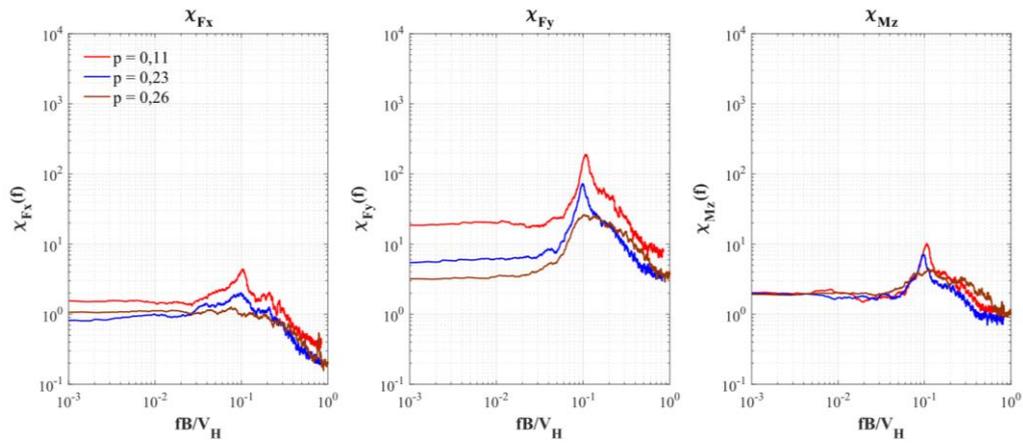
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo I para modelo mudo inserido na posição G.



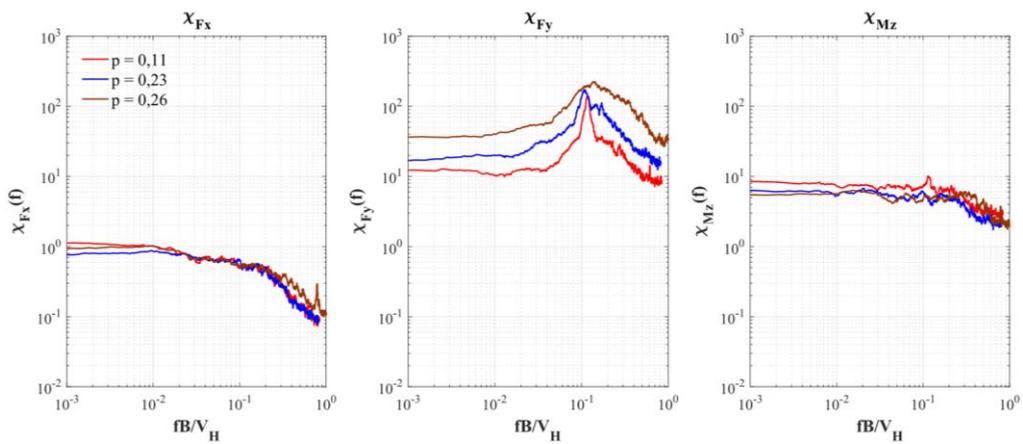
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo I para modelo mudo inserido na posição H.



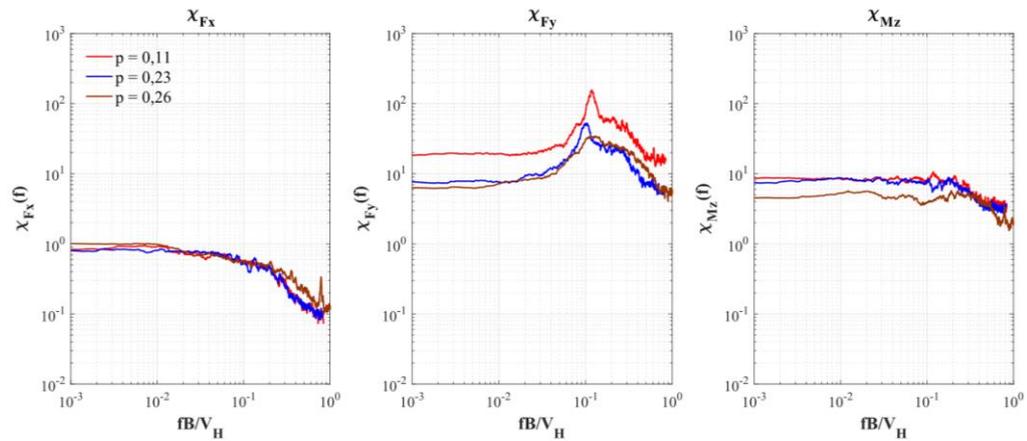
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo I para modelo mudo inserido na posição I.



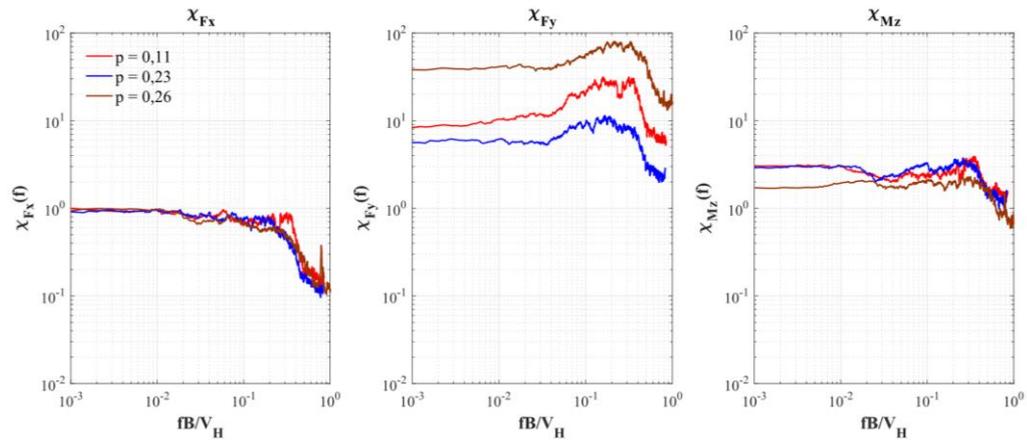
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo I para modelo mudo inserido na posição J.



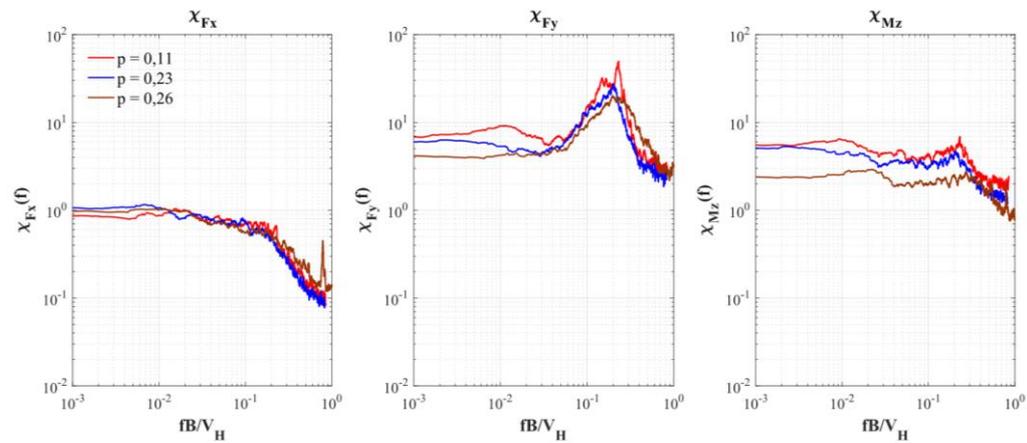
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo I para modelo mudo inserido na posição K.



Funções de admitância aerodinâmica do Modelo I para modelo mudo inserido na posição L.

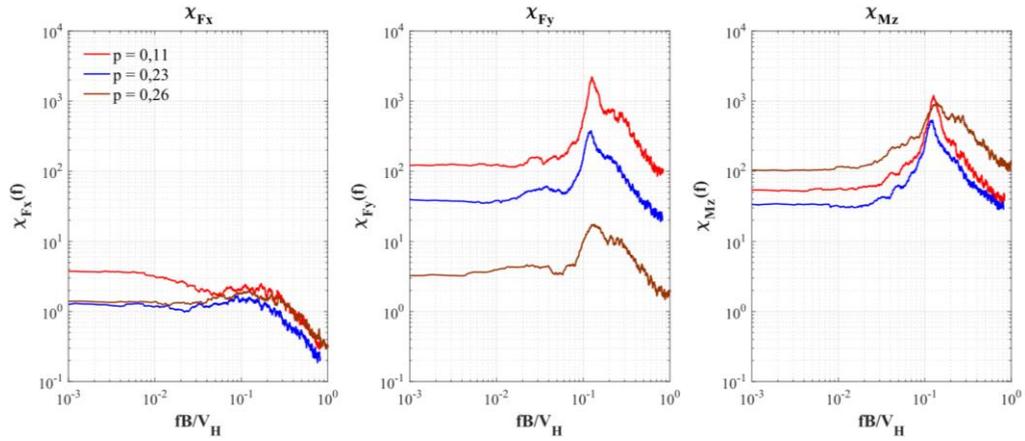


Funções de admitância aerodinâmica do Modelo I para modelo mudo inserido na posição M.

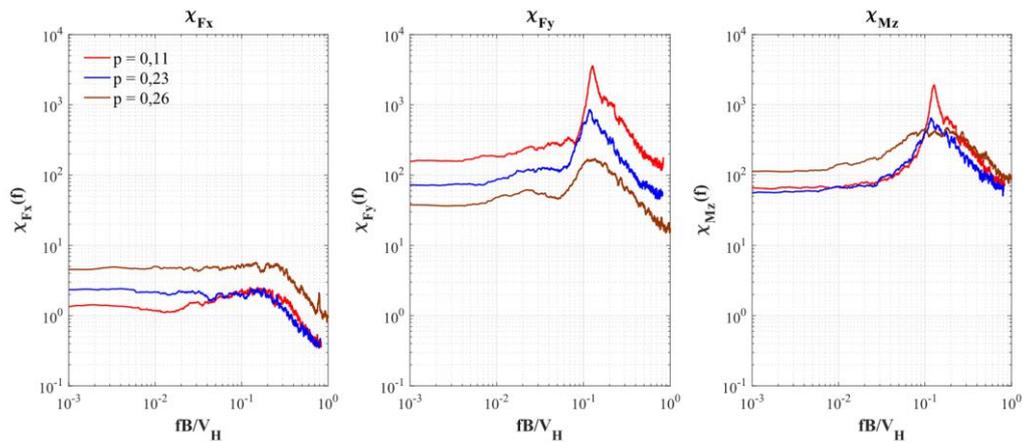


Funções de admitância aerodinâmica do Modelo I para modelo mudo inserido na posição N.

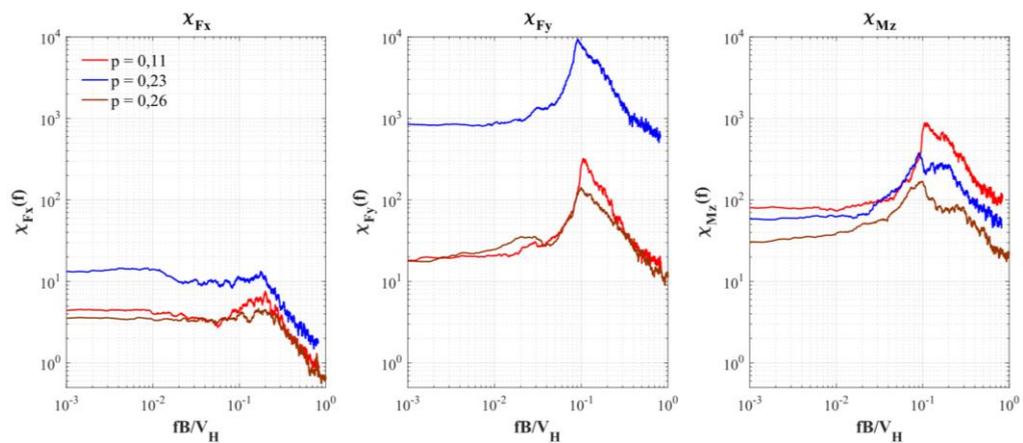
APÊNDICE II – FUNÇÕES DE ADMITÂNCIA AERODINÂMICA DO MODELO II



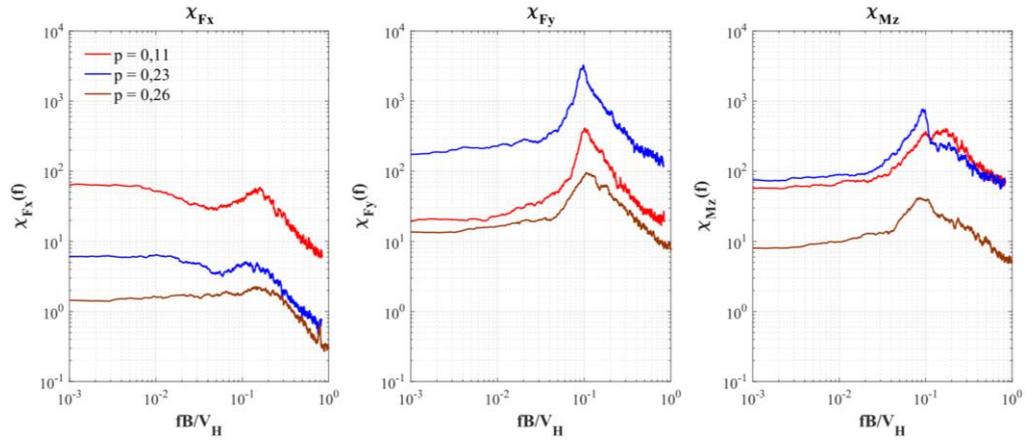
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo II para modelo mudo inserido na posição A.



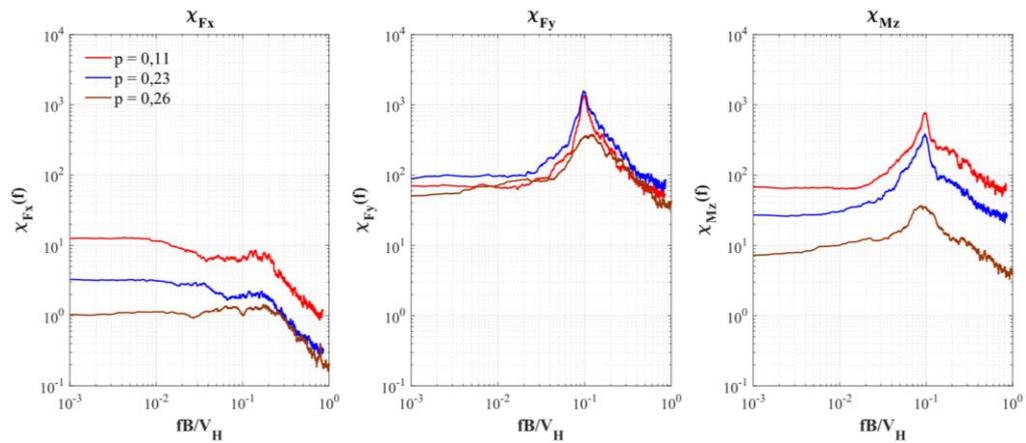
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo II para modelo mudo inserido na posição B.



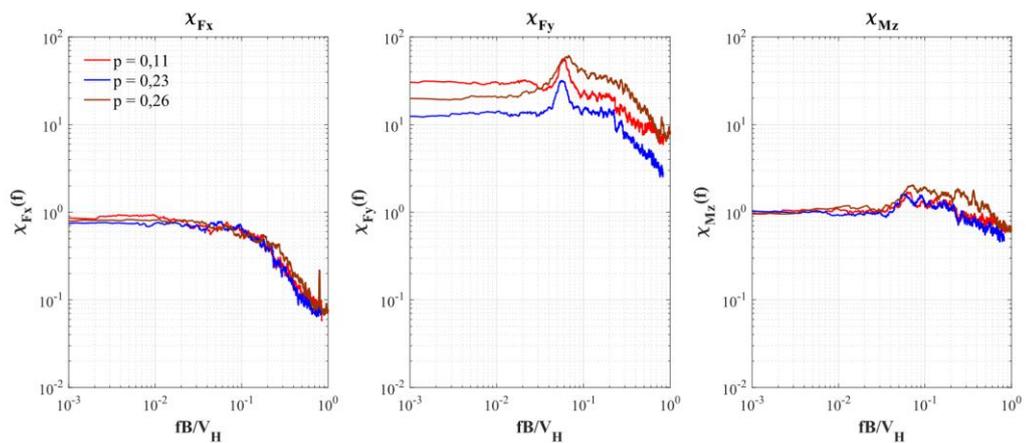
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo II para modelo mudo inserido na posição C.



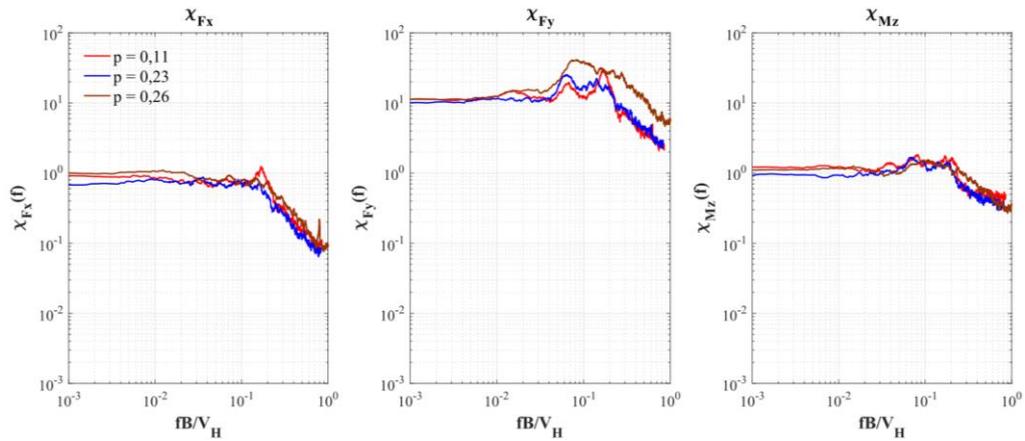
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo II para modelo mudo inserido na posição D.



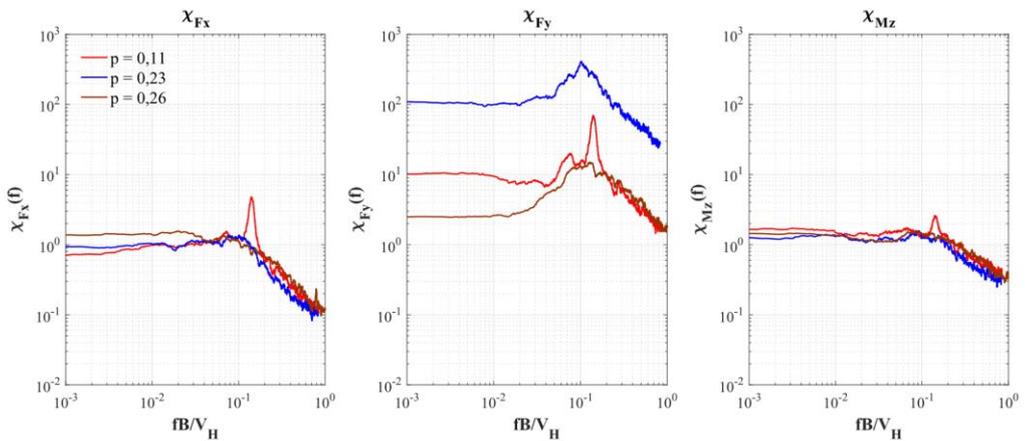
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo II para modelo mudo inserido na posição E.



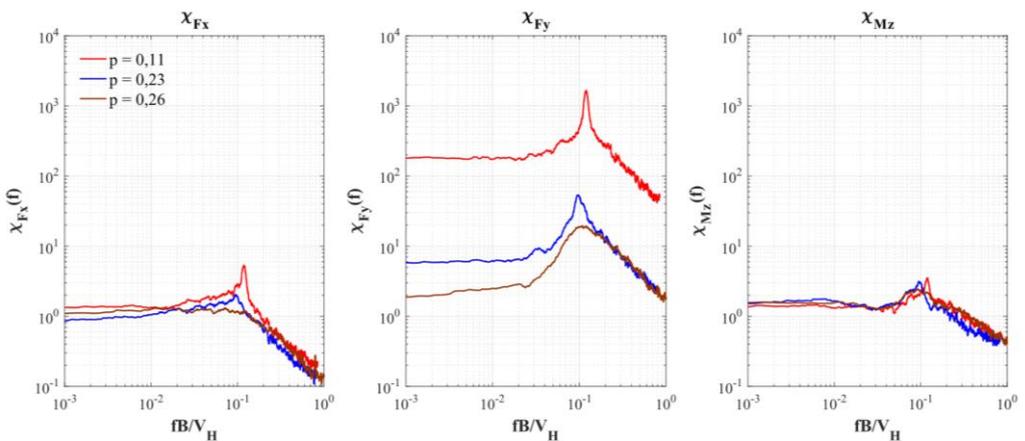
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo II para modelo mudo inserido na posição F.



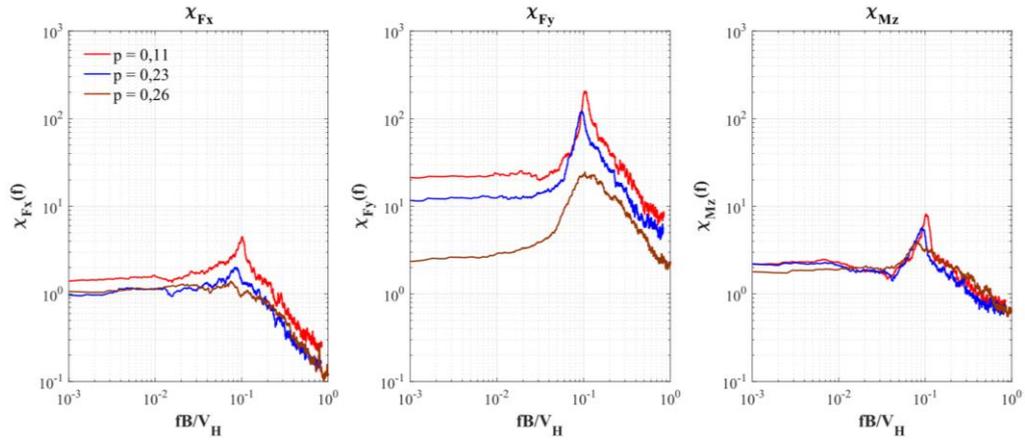
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo II para modelo mudo inserido na posição G.



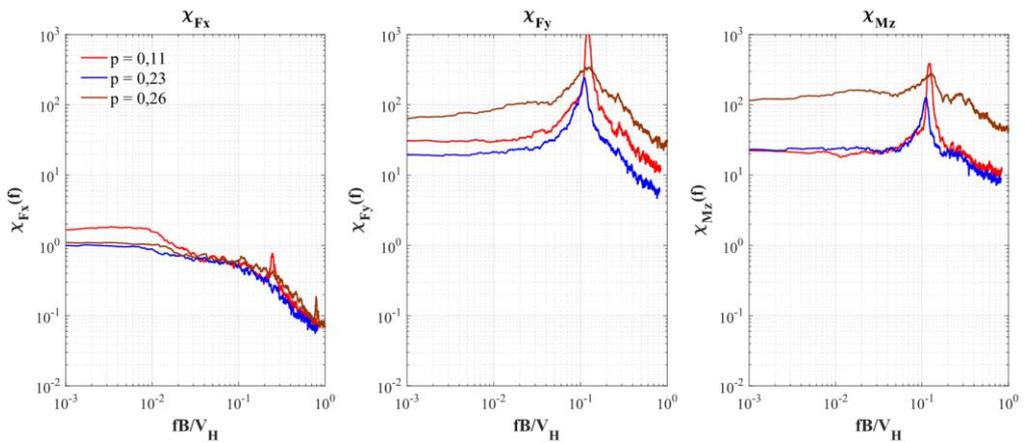
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo II para modelo mudo inserido na posição H.



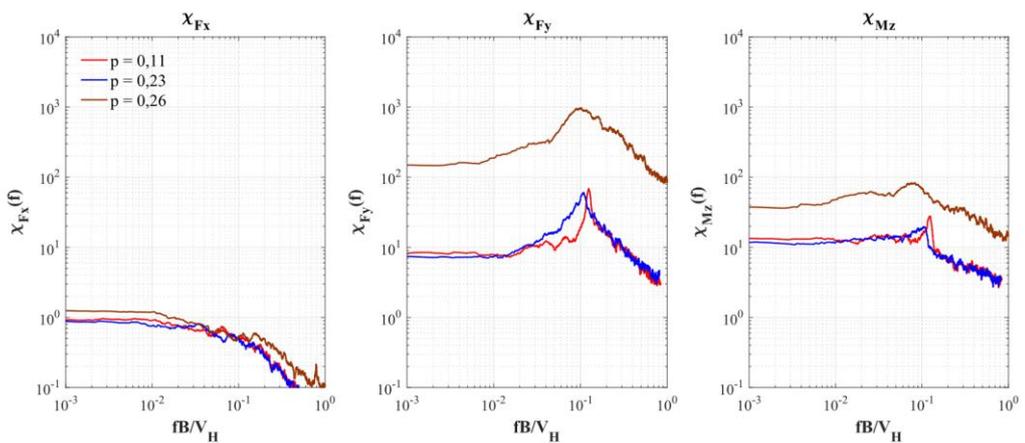
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo II para modelo mudo inserido na posição I.



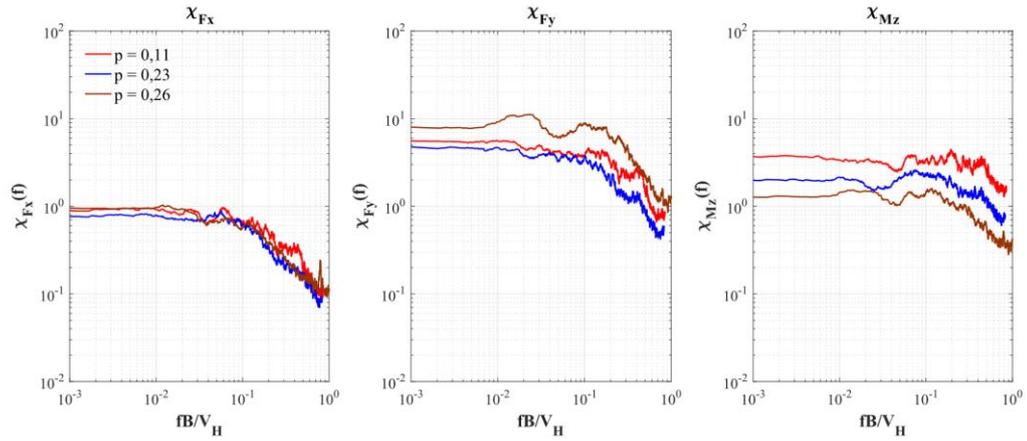
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo II para modelo mudo inserido na posição J.



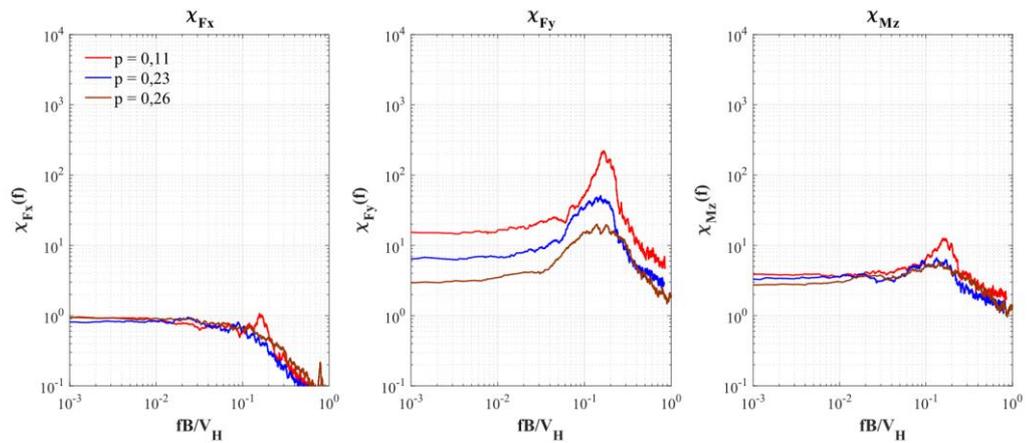
Funções de admitância aerodinâmica do Modelo II para modelo mudo inserido na posição K.



Funções de admitância aerodinâmica do Modelo II para modelo mudo inserido na posição L.



Funções de admitância aerodinâmica do Modelo II para modelo mudo inserido na posição M.



Funções de admitância aerodinâmica do Modelo II para modelo mudo inserido na posição N.