

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

**CARACTERIZAÇÃO AERODINÂMICA DE EDIFÍCIOS
ALTOS COM PLANTA EM FORMATO DE “V” ATRAVÉS DE
ANÁLISE ESPECTRAL**

Monique Wesz Vogado

Porto Alegre
2018

MONIQUE WESZ VOGADO

**CARACTERIZAÇÃO AERODINÂMICA DE EDIFÍCIOS
ALTOS COM PLANTA EM FORMATO DE “V” ATRAVÉS DE
ANÁLISE ESPECTRAL**

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
2018

MONIQUE WESZ VOGADO

**CARACTERIZAÇÃO AERODINÂMICA DE EDIFÍCIOS ALTOS COM
PLANTA EM FORMATO DE “V” ATRAVÉS DE ANÁLISE
ESPECTRAL**

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, 24 de maio de 2018

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

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

Prof. Nilo Cesar Consoli
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Adrian 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, Brasil

Prof. José Luís Vital de Brito (UnB)
D. Sc. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

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

AGRADECIMENTOS

Quem me dera poder descrever em uma página o tamanho da gratidão por aqueles que tanto torcem por mim. Eu poderia incluir aqui só os que influenciaram diretamente na execução deste trabalho, mas seria no mínimo injusto com todos os outros que acompanharam a evolução e crescimento envolvidos durante esse período de mestrado. Foram dois anos de muitas dúvidas e angústias, mas acompanhados de muito aprendizado e boas lembranças, graças às peças que foram muito bem posicionadas no meio desse caminho.

Para iniciar os agradecimentos, não poderia citar outra pessoa se não meu orientador, Acir Mércio Loredo-Souza, já que sua contribuição neste estudo foi muito além da orientação técnica necessária. Após alguns anos pesados que passei na graduação, me sentindo por vezes até desrespeitada por muitos dos professores, tive a honra de encontrar aqui esse humilde Mestre no auge da sua carreira. Ao contrário do que eu esperava encontrar, em um profissional tão reconhecido e respeitado em sua área, vi alguém disposto a transmitir seu conhecimento de forma genuína, me colocando sempre num patamar de igualdade. É como se agora eu tivesse o direito de me sentir inteligente novamente, e não houvesse problema algum nisso. Suas histórias inspiradoras frequentemente me fizeram lembrar dos motivos que me levaram um dia a sonhar com um mestrado acadêmico, e me permitiram voltar a acreditar no potencial da pesquisa e da busca pelo conhecimento.

Também seria inviável concluir esse estudo se eu não tivesse à minha disposição todas as ferramentas necessárias. Por sorte, tive a co-orientação do professor Marcelo Maia Rocha, com explicações e comentários muito construtivos, o apoio do colega de trabalho Fábio, sempre disposto a encontrar meus erros e me ajudar com minhas dificuldades, além da colaboração da equipe do LAC com os ensaios (em especial Marcelo, Roges e Arthur). Para completar, recebi ainda o apoio financeiro da CAPES e do CNPQ, mais uma vez financiando meus estudos.

Outra peça chave foi sem dúvida minha família. Meus pais, que por muitas vezes colocaram meus sonhos na frente dos deles, nunca mediram esforços para me ver sorrindo e trilhando minhas próprias escolhas. Além do apoio financeiro, foram sempre minha calma nos momentos de dúvida ou desespero. Minha irmã, que veio na frente abrindo vários caminhos, me deixou um mundo de possibilidades e me inspirou a sonhar sempre um pouquinho mais.

E é claro que eu não poderia deixar passar aqueles amigos verdadeiros, que sempre se mantiveram me motivando nessa caminhada. Tito Balabuch, um jovem azarado na iminência de se tornar mestre pela USP, dividiu comigo desde sempre todas as dores até aqui. Sonhamos, sofremos e comemoramos juntos cada acontecimento, e continuará assim daqui para frente. Saiba que torço por ti até mais do que por mim mesma!

A ONG Engenheiros sem Fronteiras, que apesar de ter me tirado um certo tempo de dedicação à pesquisa, me deu um novo propósito e um gostinho prazeroso de continuar o mestrado de maneira mais leve e com muito mais qualidade – apenas comecei a descobrir para QUEM vai servir todo esse conhecimento. Isa e Giordano, vocês foram uma bela parceria e me senti privilegiada de encontrar pessoas tão competentes e bem-intencionadas como vocês.

Também tive a sorte de dividir minha rotina com os queridinhos do mestrado. Wallace, Sandro, Guilherme, Miguel e Quevedo, foi um prazer compartilhar tantas histórias, peixe ensopado do RU, discussões sobre elétrons e outras coisas abstratas que, para ser sincera, eu nunca nem entendi. Os colegas, calouros e veteranos do curso que se aproximaram para me dar uma família aí tão longe de casa e deixar tudo mais fluido. Lúcia, que é praticamente uma versão minha de Pato Branco! E Bianca, que chegou tarde, mas com um astral tão elevado que foi difícil não manter por perto. Saibam que foi motivador estar cercada de pessoas tão brilhantes, dedicadas e de bem com a vida como vocês.

Não poderia esquecer também das origens, desde a amada Escola Sabina, onde tive professores incríveis, que despertaram alguma coisa aqui dentro desde tão cedo, até à tão sonhada UFMT que, apesar dos percalços, também guardava algumas joias preciosas: alguns anos cercada de amigos e colegas maravilhosos e competentes, e alguns professores que de fato exerciam seu ofício, tratando todos com respeito, acreditando no nosso potencial e nos inspirando a nos tornar profissionais de excelência.

Para todos aqueles que dividiram comigo um sorriso, me ofereceram uma palavra de incentivo ou apenas me mandaram boas energias de longe, sintam-se coautores dessa pesquisa e sócios desse título de Mestre. Se cheguei até aqui, foi só porque “me apoiei nos ombros de gigantes”.

- *What if I fail?*
- *Oh, but, my darling, what if you fly?*

(Erin Hanson)

RESUMO

VOGADO, M. W. **Caracterização aerodinâmica de edifícios altos com planta em formato de “V”**. 2018. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Nas últimas décadas, tem-se observado uma forte tendência de edificações cada vez mais altas, esbeltas e flexíveis, o que exigiu novas considerações no cálculo estrutural de edifícios, tornando a ação do vento um elemento de grande relevância nos projetos. Além disso, o denso agrupamento de edificações nos centros de grandes cidades adicionou uma variável para um fenômeno que já era complexo: devido à proximidade, um edifício passa a influenciar o campo aerodinâmico de outros, podendo provocar grandes alterações nas pressões, além de fenômenos dinâmicos difíceis de determinar por métodos analíticos. Instruções normativas, em geral, limitam-se a prédios altos com padrões arquitetônicos regulares, afastando-se da realidade dos projetos construídos na prática, que vêm exibindo geometrias cada vez mais complexas e não convencionais. Este cenário justifica a realização de extensos estudos dentro do tema em questão, a fim de que se obtenha uma melhor compreensão dos fenômenos dinâmicos envolvidos e uma orientação mais abrangente na etapa de pré-dimensionamento da estrutura. Neste contexto, a proposta desta pesquisa consiste em dois estudos de caso, de edifícios construídos no Brasil e ensaiados em túnel de vento, que possuem uma geometria similar (em formato de “V”), mas com dimensões e detalhes arquitetônicos distintos. O objetivo é o de promover uma caracterização aerodinâmica, avaliando os carregamentos atuando global e localmente, tanto para o modelo considerado isolado quanto incluindo as condições de vizinhança. Além das ações, estudou-se o espectro do vento que se aproxima, e determinou-se as funções de admitância aerodinâmica correspondentes. Em ambos os edifícios, verificou-se que a incidência do vento aproximadamente perpendicular a uma das abas corresponde a uma direção crítica em termos de efeitos dinâmicos: os espectros dos carregamentos globais se mostraram muito similares, apresentando picos pronunciados que indicam a possibilidade de desprendimento cadenciado de vórtices; as funções de admitância aerodinâmica também evidenciaram um formato muito semelhante. O estudo em questão oferece um meio de validação para estudos futuros que utilizem modelos de ensaio simplificados, além de servir de referência para uma possível revisão da norma brasileira NBR 6123/1988 – *Forças devidas ao vento em edificações*, contribuindo com os avanços do conhecimento relativo a efeitos dinâmicos do vento em edifícios altos e irregulares.

Palavras-chave: ação do vento em estruturas, efeitos dinâmicos do vento, efeitos de interferência de vizinhança, admitância aerodinâmica, edifícios altos em formato de “V”.

ABSTRACT

VOGADO, M. W. **Aerodynamic characterization of V-shaped tall buildings**. 2018. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

In the last decades we observed a strong trend in constructing buildings increasingly tall, slender and flexible, which has asked for new consideration in the structural calculus of buildings, making the wind a relevant element in the design procedures. The grouping of buildings downtown in big cities has added another variable to an already complex phenomenon: due to the proximity, a building influences in the aerodynamic field of others, leading to pressure modifications and dynamic effects hard to determine by analytical methods. Instruction codes, in general, are limited to regular tall buildings, in contrast to the reality of projects built in practice, which have been exhibiting architectonic patterns increasingly complex and unconventional. This scenario justifies extensive studies among aerodynamic of irregular tall buildings, with the purpose of acquiring a better comprehension regarding the dynamic phenomena involved and a more accurate direction on the pre-design phase. In this context, the proposal of this research consists of two case studies about buildings constructed in Brazil and tested in wind tunnel, which have a similar geometry (V-shaped) but different dimensions and architectonic details. The objective is to promote a complete aerodynamic characterization, assessing the loads acting as a whole and also locally, with both isolated and interference conditions. Besides the action, the velocity spectrum of the approaching wind and the corresponding aerodynamic admittance were studied. Either case, it was verified that the wind incidence nearly perpendicular to one of the frontal facades is a critical direction from the perspective of dynamic effects: the spectra of global loads were very similar, with a peak emerging on the graphs, which indicate the possibility of vortex shedding; the admittance function also showed a very close format. This study offers an instrument of validation for future researches that use simplified test models, besides to fit as a reference to a possible revision of the Brazilian code NBR 6123/1988 – *Wind load on building structures*, contributing to the knowledge advances regarding dynamic effects on irregular tall buildings.

Key-words: wind actions on structures, tall and flexible buildings, wind dynamic effects, neighboring interference effects, V-shaped tall buildings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 – Representação da camada limite atmosférica Fonte: Adaptada de Irwin et al. (2013).....	9
Figura 2. 2 – Perfis de velocidade média sobre terrenos de rugosidades distintas Fonte: LOREDO-SOUZA (2006)	10
Figura 2. 3 – Turbulência gerada pela própria estrutura Fonte: Adaptado de Irwin et al. (2013)	10
Figura 2. 4 – Características das estruturas Fonte: O autor (2017)	11
Figura 2. 5 – Divisão da velocidade do vento em parcelas média e flutuante Fonte: Macdonald (1975).....	12
Figura 2. 6 – escoamento em torno de corpos aerodinâmicos e rombudos Fonte: Adaptado de Holmes (2014)	16
Figura 2. 7 – Início do desprendimento de vórtices. Fonte: COOK (1985)	16
Figura 2. 8 – Sequência de desprendimento de vórtices Fonte: COOK (1985)	17
Figura 2. 9 – Vórtices de Kármán Fonte: Blessmann (1998)	17
Figura 2. 10 – Vórtices aleatórios Fonte: Blessmann (1998)	17
Figura 2. 11 – Influência do desprendimento de vórtices na resposta transversal Fonte: Adaptado de Irwin <i>et. al.</i> (2013).....	18
Figura 2. 12 – Influência da turbulência no espectro da força transversal Fonte: Blessmann (1998).....	19
Figura 2. 13 – Efeito Venturi Fonte: CAPEGGIANI(2004)	21
Figura 2. 14 – Deflexão do vento na direção vertical. Fonte: CARPEGGIANI (2004).....	22
Figura 2. 15 –Turbulência gerada na esteira. Fonte: CAPEGGIANI(2004)	22
Figura 2. 16 – Regimes de escoamento. Fonte: COOK (1985).....	23
Figura 2. 17 – Aproximação de uma função periódica em termos de suas componentes harmônicas. Fonte: Adaptado de Rao (2004)	24
Figura 2. 18 – Transformada de uma função harmônica Fonte: Blessmann (1998)	25
Figura 2. 19 – Transformada de uma função periódica Fonte: Blessmann (1998)	25
Figura 2. 20 – Ilustração do método probabilístico de Davenport. Fonte: BLESSMANN (1988).....	27
Figura 2. 21 – Admitância aerodinâmica x frequência Fonte: Blessmann (1998)	29

Figura 2. 22 – Espectros de Davenport, Harris, Kármán e Kaimal. Fonte: Davenport (1995)	30
Figura 2. 23 – Espectros a 100 m de altura – Diversos autores Fonte: Blessmann (1995)	31
Figura 2. 24 – Espectro da força transversal de edifícios em formato de “L” com dimensões geométricas variadas. Fonte: Adaptado de Li e Li (2016).....	33
Figura 2. 25 – Espectro de torção de edifícios em formato de “L” com dimensões geométricas variadas. Fonte: Adaptado de Li et al. (2017).....	34
Figura 2. 26 – Modelos utilizados nos ensaios Fonte: Carini (2017) adaptado de Tanaka et al. (2012).....	34
Figura 2. 27 – Espectros de potência dos coeficientes de força transversais locais. (a) Quadrada, (b) com aberturas, (c) cantos chanfrados, (d) cantos cortados, (e) tronco de pirâmide, (f) em patamares, (g) helicoidal 90°, (h) helicoidal 180°. Fonte: Tanaka et al. (2012).....	35
Figura 2. 28 – Espectro da força transversal de edifícios altos com seção transversal retangular. Fonte: Liang S. et al. (2002)	37
Figura 2. 29 – Espectro do momento torçor de edifícios altos com seção transversal retangular. Fonte: Liang et al. (2004)	37
Figura 3. 1 – Representação em planta e vista 3D dos edifícios em estudo. Fonte: Adaptado de Loredo-Souza e Rocha (2011a e 2017).....	39
Figura 3. 2 – Representação da vizinhança dos edifícios em estudo. Fonte: Adaptado de Loredo-Souza e Rocha (2011a e 2017).....	40
Figura 3. 3 – Ensaio em túnel de vento considerando as condições de vizinhança – vista da fachada frontal do Prédio A. Fonte: Loredo-Souza e Rocha (2011a).....	41
Figura 3. 4 – Ensaio em túnel de vento considerando as condições de vizinhança – vista da fachada frontal do Prédio B. Fonte: Loredo-Souza e Rocha (2017).....	41
Figura 3. 5 – Representação das fachadas e convenção para o ângulo de incidência do vento Fonte: Adaptado de Loredo-Souza e Rocha (2011a e 2017)	42
Figura 3. 6 – Ilustração dos casos de estudo – Prédio A Fonte: O Autor (2018)	43
Figura 3. 7 – Ilustração dos casos de estudo – Prédio B Fonte: O Autor (2018)	43
Figura 3. 8 – Exemplo de modelo instrumentado com centenas de tomadas de pressões. Fonte: Irwin <i>et al.</i> (2013)	44
Figura 3. 9 – Modelo do trandutor de pressões utilizado. Fonte: <i>Scanivalve</i> ® (2016).....	45
Figura 3. 10 – Representação em planta da distribuição das tomadas de pressão – corte representativo da Zona I do Prédio A Fonte: Adaptado de Loredo-Souza e Rocha (2011a)	45

Figura 3. 11 – Representação da distribuição das tomadas de pressão ao longo da altura - Fachada 2, Prédio A. Fonte: Adaptado de Loredou-Souza e Rocha (2011a)	46
Figura 3. 12 – Representação em planta da distribuição das tomadas de pressão – corte representativo da Zona II, Prédio B. Fonte: Adaptado de Loredou-Souza e Rocha (2017) ..	47
Figura 3. 13 – Representação da distribuição das tomadas de pressão ao longo da altura - Fachada 2, Prédio B. Fonte: Adaptado de Loredou-Souza e Rocha (2017)	47
Figura 3. 14 – Referências para conversão de registros de pressão em registros de componentes horizontais de força, F_x e F_y , e de momento torçor, M_t . Fonte: Loredou-Souza e Rocha (2011b).....	49
Figura 3. 15 – Túnel de vento <i>Prof Joaquim Blessmann</i> Fonte: Loredou-Souza e Rocha (2011a).....	49
Figura 3. 16 – Anemômetro de fio quente para medição da velocidade do vento Fonte: O autor (2018).....	53
Figura 4. 1 – Perfil das velocidades média e rms para $p = 0,23$. Fonte: O autor (2018).....	56
Figura 4. 2 – Espectro da componente longitudinal da velocidade na altura de referência equivalente a 70% da altura do prédio A ($p = 0,23$). Fonte: O autor (2018)	57
Figura 4. 3 – Resultados globais do Prédio A, em termos de F_x , F_y e M_t , considerando modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA) Fonte: O autor (2018)	59
Figura 4. 4 – Comparação do espectro de F_y com o espectro de velocidade do vento Fonte: O autor (2018).....	60
Figura 4. 5 – Formas modais do Prédio A. Fonte: Adaptado de Loredou-Souza e Rocha (2011a).....	60
Figura 4. 6 – Análise local dos resultados de 90° (CASO 1-A) em termos de F_x , por zonas e fachadas (Prédio A, Isolado). Fonte: O autor (2018).....	62
Figura 4. 7 – Formulação empírica proposta por LIANG et. al. (2002) para o espectro da força transversal em prédios retangulares, a razão D/B variando entre $\frac{1}{4}$ e 3.	63
Figura 4. 8– Formulação empírica proposta por Li e Li (2016) para o espectro da força transversal em prédios retangulares, a razão D/B igual a 1.	64
Figura 4. 9 – Hipótese para os pontos de desprendimento dos vórtices para a incidência de 90° . Fonte: O autor (2018)	64
Figura 4. 10 – Resultados em termos de c_p no âmbito das tomadas de pressão – Ângulo incidente: 90° (Caso 1-A). Prédio A, Isolado. Fonte: O autor (2018)	65
Figura 4. 11 – Análise local dos resultados de 90° (CASO 1-A) em termos de M_t , por zonas e fachadas (Prédio A, Isolado). Fonte: O autor (2018).....	66

Figura 4. 12 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de F_y para o CASO 1-A - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)	68
Figura 4. 13 – Resultados global e por zonas (apenas barlavento) em termos de F_y para o CASO 1-A - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)	69
Figura 4. 14 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de F_x para o CASO 1-A, modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)	70
Figura 4. 15 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de M_t para o CASO 1-A, modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)	71
Figura 4. 16 – Análise local dos resultados de 330° em termos de F_y , por zonas e fachadas (Caso 3-A). Prédio A, Isolado. Fonte: O autor (2018)	73
Figura 4. 17 – Resultados em termos de c_p no âmbito das tomadas de pressão – Ângulo incidente: 330° (Caso 3-A). Fonte: O autor (2018).....	74
Figura 4. 18 – Hipótese para os pontos de desprendimento dos vórtices para incidência 330° . Fonte: O autor (2018)	75
Figura 4. 19 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de F_y para o CASO 3-A - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)	76
Figura 4. 20 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de F_x para o CASO 3-A - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)	77
Figura 4. 21 – Resultados de admitância aerodinâmica do Prédio A, em termos de F_x , F_y e M_t , considerando modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)	79
Figura 4. 22 – Resultados globais do Prédio B, em termos de F_x , F_y e M_t , considerando modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA) Fonte: O autor (2018)	81
Figura 4. 23 – Análise local dos resultados de 307° em termos de F_x , por zonas e fachadas (Caso 2-B). Fonte: O autor (2018).....	84
Figura 4. 24 – Resultados em termos de c_p no âmbito das tomadas de pressão – Ângulo incidente: 307° (Caso 2-B). Fonte: O autor (2018).....	85
Figura 4. 25 – Detalhamento da fachada frontal do PRÉDIO B Fonte: O autor (2018)	86
Figura 4. 26 – Resultados global e por zonas (apenas barlavento) em termos de F_x para o CASO 2-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018).....	88
Figura 4. 27 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de F_x para o CASO 2-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018).....	89
Figura 4. 28 – Resultados global e por zonas (apenas barlavento) em termos de F_y para o CASO 2-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018).....	90
Figura 4. 29 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de F_y para o CASO 2-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018).....	91

Figura 4. 30 – Resultados global e por zonas (apenas barlavento) em termos de Mt para o CASO 2-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018).....	92
Figura 4. 31 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de Mt para o CASO 2-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018).....	93
Figura 4. 32 – Análise local dos resultados de 240° em termos de Fy , por zonas e fachadas (Caso 4-B). Fonte: O autor (2018).....	94
Figura 4. 33 – Resultados global e por zonas (apenas barlavento) em termos de Fx para o CASO 4-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018).....	95
Figura 4. 34 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de Fx para o CASO 4-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018).....	96
Figura 4. 35 – Resultados global e por zonas (apenas barlavento) em termos de Fy para o CASO 4-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018).....	97
Figura 4. 36 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de Fy para o CASO 4-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018).....	98
Figura 4. 37 – Resultados global e por zonas (apenas barlavento) em termos de Mt para o CASO 4-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018).....	99
Figura 4. 38 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de Mt para o CASO 4-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018).....	100
Figura 4. 39 – Resultados de admitância aerodinâmica do Prédio B, em termos de Fx , Fy e Mt , considerando modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)	102
Figura 4. 40 – Comparação dos resultados globais dos dois edifícios, em termos de espectros das ações atuantes e funções de admitância aerodinâmica, para uma incidência crítica. Fonte: O autor (2018)	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. 1 – Frequências naturais de edifícios construídos no Brasil. Em cinza, modos naturais em torção. Fonte: Adaptado de Rocha e Loredo-Souza (2011)	5
Quadro 1. 2 – Determinação da velocidade crítica para os primeiros modos de vibração da estrutura (330°). Fonte: O autor (2018).....	72
Quadro 2. 1 – Valores do número de Strouhal para diversas seções. Fonte: Blessmann (1998)	20
Quadro 2. 2 – Parâmetros geométricos dos modelos de ensaio Fonte: Li. Y. et al. (2017)	32
Quadro 4. 1 – Variação da frequência reduzida de pico (f_{r_pico}) de cada zona em relação ao valor global. Fonte: O autor (2018)	61
Quadro 4. 2 – Determinação da velocidade crítica para os primeiros modos de vibração da estrutura (90°). Fonte: O autor (2018).....	63

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	3
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	3
1.2 CONTEXTO NACIONAL.....	4
1.3 OBJETIVOS	6
2 NATUREZA DOS EFEITOS DE VENTO EM ESTRUTURAS.....	8
2.1 FUNDAMENTOS.....	8
2.2 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA (CLA).....	9
2.3 INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA.....	10
2.4 CARREGAMENTOS DEVIDOS AO VENTO EM EDIFÍCIOS.....	11
2.4.1 Carregamento médio e carregamento flutuante	12
2.4.2 Carregamento longitudinal, transversal e torcional.....	13
2.5 EFEITOS DINÂMICOS DO VENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS.....	14
2.5.1 Martelamento (Buffeting)	14
2.5.2 Galope	14
2.5.3 Drapejamento.....	15
2.5.4 Desprendimento de vórtices	15
2.6 EFEITOS DE INTERFERÊNCIA DA VIZINHANÇA.....	21
2.6.1 Efeito Venturi	21
2.6.2 Deflexão do vento na direção vertical	22
2.6.3 Turbulência na esteira	22
2.7 ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	23
2.7.1 Admitância aerodinâmica.....	28
2.7.2 Espectro da turbulência do vento	30
2.8 ESTUDOS ANTERIORES	31
2.8.1 Li <i>et al.</i>	31
2.8.2 Tanaka <i>et al.</i>	34
2.8.3 Liang <i>et al.</i>	36
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	38
3.1 DESCRIÇÃO DOS MODELOS	38

3.1.1	Configurações de ensaio	41
3.1.2	Método de medição de pressões simultâneas.....	44
3.2	TÚNEL DE VENTO <i>PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN</i>	49
3.3	SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL.....	51
3.4	TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS.....	53
3.4.1	Vento incidente	53
3.4.2	Ações atuantes	54
3.4.3	Admitância aerodinâmica.....	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
4.1	CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO DO VENTO.....	56
4.2	RESULTADOS PRÉDIO A.....	58
4.2.1	Caso de estudo 1-A – Análise local para o modelo isolado (ISO).....	61
4.2.2	Caso de estudo 1-A – Análise local para o modelo com vizinhança (CMA).....	67
4.2.3	Caso de estudo 3-A – Análise local para o modelo isolado (ISO).....	72
4.2.4	Caso de estudo 3-A – Análise local para o modelo com vizinhança (CMA).....	75
4.2.5	Admitância aerodinâmica.....	78
4.3	RESULTADOS PRÉDIO B	80
4.3.1	Caso de estudo 2-B – Análise local para o modelo isolado (ISO).....	80
4.3.2	Caso de estudo 2-B – Análise local para o modelo com vizinhança (CMA).....	87
4.3.3	Caso de estudo 4-B – Análise local para o modelo isolado (ISO).....	87
4.3.4	Caso de estudo 4-B – Análise local para o modelo com vizinhança (CMA).....	87
4.3.5	Admitância aerodinâmica.....	101
4.4	RESUMO DAS COMPARAÇÕES.....	103
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	105
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	106
	REFERÊNCIAS.....	108

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Dentro de um contexto global de forte crescimento da população urbana, com a valorização de imóveis e a elevação do custo do metro quadrado nos centros de grandes cidades, observa-se uma tendência de verticalização e agrupamento das edificações nestes centros. Neste cenário, o estudo de materiais cada vez mais resistentes e o aprimoramento de técnicas construtivas têm tornado possível o desenvolvimento de edificações cada vez mais altas, esbeltas e flexíveis.

“O aumento da altura dos edifícios exigiu uma revisão nas considerações do cálculo estrutural” (BÊNIA, 2013). O vento não era um problema em construções baixas e pesadas de grossas paredes, mas passou a ser, e em medida crescente, quando as construções foram-se tornando mais esbeltas, e as estruturas usando cada vez menos quantidade de material (BLESSMANN, 2001, p. 11). Em edifícios muito esbeltos, a frequência natural da estrutura pode se aproximar da frequência das vibrações causadas pelo vento, o que pode provocar efeitos ressonantes que majorem potencialmente os deslocamentos da estrutura.

Não bastasse o problema de um edifício alto isolado já ser de difícil resolução, em um ambiente típico de grandes cidades, onde várias edificações encontram-se agrupadas em grande proximidade, cada edifício pode influenciar o campo aerodinâmico de outros, e com isso os carregamentos atuantes devidos ao vento. Segundo Khanduri et al. (1998), as modificações nas ações do vento causadas pela presença de edificações adjacentes é um fenômeno de natureza complexa, mesmo que para apenas uma edificação de interferência na vizinhança. Isto se deve à grande quantidade de variáveis que envolvem o processo, as quais podem ser desde o tamanho e formato das estruturas, suas posições de interferência, direções de incidência do vento ou também fatores topográficos.

Em certos casos, com a interferência pode ocorrer um efeito de proteção, diminuindo as respostas provocadas pela ação do vento. Por outro lado, a turbulência gerada na esteira pode provocar aumentos de pressões no edifício adjacente, além de outros efeitos dinâmicos.

Códigos normativos, em geral, fornecem apenas instruções para o cálculo de estruturas com formatos regulares e simétrico. Na prática dos projetos usuais, no entanto, tem se observado arquiteturas cada vez mais diferenciadas e não convencionais, seja pela otimização do espaço

ou pela demanda de padrões estéticos mais atrativos. Segundo Li et al. (2017), já é amplamente conhecido que o formato externo da estrutura desempenha um papel importante na geração dos carregamentos devidos ao vento em edifícios altos, podendo torná-los mais sensíveis às excitações dinâmicas.

Irwin (2013) explica que, tendo em vista a importância das cargas de vento para o custo e segurança de edifícios altos, os carregamentos são geralmente determinados por ensaios experimentais em túnel de vento, utilizando modelos em escala reduzida do edifício em estudo e suas redondezas. Não existem atualmente expressões analíticas capazes de determinar satisfatoriamente os efeitos do vento em edifícios altos e com seções transversais que fogem do padrão retangular.

Percebe-se, portanto, que é justificável e necessário o desenvolvimento de extensos trabalhos de pesquisa dentro do tema em questão. Liang *et al.* (2002 e 2004) propuseram expressões para determinar a ação dinâmica transversal e torcional ao vento em edifícios altos de seção retangular. Tanaka *et al.* (2012) conduziram uma série de experimentos para avaliar o desempenho de edifícios altos com as mais variadas modificações aerodinâmicas: cantos chanfrados ou cortados, seções helicoidais, em tronco de pirâmide, em patamares ou com aberturas. Li *et al.* (2016 e 2017) sugeriram fórmulas empíricas para determinar as cargas de vento transversais e torcionais em edifícios altos com formato em “L”.

O amplo leque de edificações com formas geométricas variadas abre espaço para uma infinidade de projetos de pesquisa nesse assunto. A título de exemplo, não foi encontrado pelo autor nenhum estudo na literatura referente a estruturas com geometria em “V”. Além do mais, muitos estudos se limitam a modelos simplificados, sem atingir o nível de detalhamento dos projetos que são construídos na prática. Desta forma, a pesquisa aqui exposta propõe uma investigação acerca de edifícios concretos com formato em “V”, com o intuito de contribuir com a construção do conhecimento quanto à formação dos carregamentos devidos ao vento atuando em edifícios altos e com planta não retangular.

1.2 CONTEXTO NACIONAL

A norma brasileira NBR 6123/1988 – *Forças devidas ao vento em edificações* (ABNT, 1988) apresenta uma abordagem para a estimativa da resposta dinâmica na direção do vento. O método proposto é válido para estruturas cujo primeiro modo de vibração é aproximadamente linear, e

nas quais a contribuição dos modos de vibração superiores na resposta pode ser considerada desprezível. Na época da publicação da norma, tais hipóteses eram válidas para a maioria das edificações construídas no Brasil, as quais raramente apresentavam um segundo modo de vibração abaixo de 1 Hertz.

No entanto, atualmente o que parece ser uma tendência observada na prática de projetos estruturais construídos no país já não se enquadra mais nessas hipóteses. O laboratório de aerodinâmica das construções (LAC), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), é referência internacional no que tange à determinação dos carregamentos devidos ao vento em estruturas por meio de ensaios experimentais em túnel de vento. “Com décadas de experiência, o LAC possui uma diversificada base de dados, que representa padrões arquitetônicos empregados correntemente no Brasil e na América Latina” (CARINI, 2017). Rocha e Loredou-Souza (2011) apresentaram uma série de edifícios, ensaiados no LAC e construídos no país, com muitos modos de vibração abaixo de 1 Hz, alguns inclusive com os modos de torção predominantes (Quadro 1. 1).

Além do mais, a metodologia utilizada pela norma se aplica apenas a edifícios retangulares de superfície plana. Para qualquer geometria que fuja desses padrões a norma não oferece uma orientação, mesmo que para fins de pré-dimensionamento.

Neste contexto, percebe-se a necessidade de uma atualização normativa de modo a atender mais adequadamente a realidade atual dos projetos. Contudo, para atingir esse objetivo ainda são necessários muitos avanços nos estudos referentes às ações dinâmicas do vento nas estruturas aqui construídas. Apesar de muitas pesquisas nessa linha já terem sido promovidas no LAC, ainda existe muito a ser explorado desse banco de dados tão diversificado.

	Altura (m)	Frequências Naturais (Hz)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Edifício 1	91	0.20	0.25	0.30	0.67	1.07	-	-	-	-	-
Edifício 2	91	0.18	0.24	0.28	0.62	1.01	-	-	-	-	-
Edifício 3	96	0.24	0.30	0.31	1.13	-	-	-	-	-	-
Edifício 4	129	0.14	0.18	0.23	0.43	0.49	0.53	0.67	0.78	0.86	0.90
Edifício 5	133	0.21	0.22	0.24	0.53	0.57	0.70	1.00	-	-	-
Edifício 6	85	0.34	0.41	0.48	1.43	-	-	-	-	-	-
Edifício 7	86	0.18	0.32	0.33	0.79	1.10	-	-	-	-	-
Edifício 8	95	0.22	0.23	0.25	0.70	0.78	0.82	1.37	-	-	-

Quadro 1. 1 – Frequências naturais de edifícios construídos no Brasil. Em cinza, modos naturais em torção. Fonte: Adaptado de Rocha e Loredou-Souza (2011)

Vanin (2011) analisou a resposta dinâmica de edifícios altos, promovendo uma comparação entre duas técnicas experimentais em túnel de vento: o método de integração de pressões em alta frequência (HFPI) e o uso de uma balança dinâmica de três graus de liberdade (BD3GLD). Para o estudo foram utilizados um modelo padrão CAARC (*Commonwealth Advisory Aeronautical Council*) e outro de um edifício real em concreto armado, construído no Brasil.

Bênia (2013) estudou os efeitos dinâmicos causados por interferência de vizinhança, nas direções longitudinal, transversal e torcional. Foram ensaiadas 18 configurações de interferência utilizando o padrão da *Commonwealth Aeronautical Research Council* (CAARC).

Carini (2017) promoveu um estudo relacionado à resposta dinâmica em torção de edifícios, propondo uma metodologia para estimativa do momento torçor global, na qual utilizou para sua calibração 19 edifícios do acervo do LAC. A proposta do trabalho era uma estimativa que abrangesse qualquer forma geométrica, o que por vezes pode ser superestimado, mas satisfatório do ponto de vista de um pré-dimensionamento.

Os estudos até então realizados têm focado principalmente em carregamentos globais e respostas induzidas pelo vento. Em oposição, propõe-se neste trabalho uma abordagem local dos carregamentos atuantes, avaliando-se as distribuições de pressão por regiões da estrutura, com o objetivo de estudar com maior detalhe o fenômeno aerodinâmico e a influência dessas alterações locais no comportamento global da edificação. Além disso, a pesquisa é voltada para um padrão arquitetônico específico – em forma de “V” – cuja geometria, apesar de complexa, é correntemente empregada no país.

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho objetiva a caracterização aerodinâmica de dois edifícios reais, ensaiados no LAC e construídos no Brasil, no que tange aos carregamentos dinâmicos devidos ao vento atuando local e globalmente, além da determinação das funções de admitância aerodinâmica correspondentes. A caracterização será feita por meio de análise espectral, e não serão avaliadas as respostas da estrutura. Ambos os edifícios possuem geometria similar, em formato de “V”, mas diferentes dimensões. O principal objetivo é o de identificar padrões de comportamento comuns a ambos e que possam ser extrapolados a outras estruturas com características arquitetônicas semelhantes.

O estudo terá dois enfoques: o primeiro refere-se à análise de cada edifício isolado, e o segundo inclui interferências das edificações mais relevantes da vizinhança. A partir da obtenção dos espectros de carregamento obtidos dessas abordagens, espera-se adquirir uma compreensão mais aprofundada dos fenômenos aerodinâmicos envolvidos em edifícios com essa geometria, de modo a contribuir com o avanço do conhecimento já existente sobre o assunto, além de servir de referência para uma futura revisão da NBR 6123 (ABNT,1988).

2 NATUREZA DOS EFEITOS DE VENTO EM ESTRUTURAS

A resposta de uma estrutura à ação do vento depende de uma complexidade de fatores, incluindo sua forma, propriedades dos materiais constituintes, obstáculos e edifícios localizados nas redondezas, assim como efeitos dinâmicos que podem ser provocados pela turbulência do vento.

Em edifícios altos e esbeltos, como nos casos que estão sendo discutidos no presente trabalho, efeitos dinâmicos são de grande relevância, e a compreensão de fenômenos relacionados a esse assunto é fundamental para o projeto de estruturas que garantam segurança e conforto dos usuários. Nos tópicos a seguir serão apresentados conceitos básicos sobre a ação do vento, efeitos dinâmicos que podem ocorrer em prédios altos, além de efeitos de vizinhança, que podem provocar efeitos estáticos ou dinâmicos.

2.1 FUNDAMENTOS

Cook (1985) definiu os três aspectos fundamentais da determinação dos carregamentos devidos ao vento em estruturas, os quais se mostram intimamente relacionados e interdependentes entre si. São eles:

- a) **Fatores meteorológicos (clima):** diz respeito às características do vento na região em que a construção está localizada (ex.: velocidade e direção).
- b) **Camada limite atmosférica (CLA):** refere-se à região na qual a velocidade do vento é influenciada pelas características do terreno (rugosidade e topografia), além de outros obstáculos situados em torno da edificação (prédios vizinhos, árvores, etc.).
- c) **Estrutura:** relaciona-se com características da estrutura, como sua geometria e dimensões, além das propriedades dos materiais constituintes, distribuição de massa, amortecimento, modos de vibração e outras características aeroelásticas.

Para solucionar o problema, Cook (1985) sugere analisar essas três partes de acordo com a escala de cada um. Comparando-se os fatores meteorológicos com a camada limite, por exemplo, percebe-se que a primeira é maior que a segunda em muitas ordens de grandeza. Dessa

forma, é possível abordar o problema considerando-se o clima separadamente. Por outro lado, analisando-se as escalas da camada limite e de uma estrutura, é notável que ambas, apesar de diferirem em altura, possuem uma mesma ordem de grandeza. Com isto, torna-se complexo analisar esses dois aspectos isoladamente, visto que um exerce forte influência sobre o outro, e por isso faz-se necessária uma abordagem envolvendo ambos conjuntamente.

Nos próximos tópicos serão mostrados com mais detalhes a camada limite atmosférica e a influência das características da estrutura nos efeitos causados pelo vento.

2.2 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA (CLA)

As rugosidades naturais e artificiais do terreno diminuem a velocidade de escoamento do vento natural nas regiões próximas à superfície. Com isso, origina-se uma “camada de ar” onde a velocidade média do vento aumenta com a altura, até atingir um ponto no qual a rugosidade já não interfere no escoamento – denominado altura gradiente. Nesta camada também ocorre muita agitação mecânica do ar (turbulência), formando um grande número de turbilhões, e que é responsável, em grande parte, pelas flutuações do escoamento em torno da velocidade média. A região descrita é o que se conhece na engenharia de vento por camada limite atmosférica (CLA), representada na Figura 2. 1.

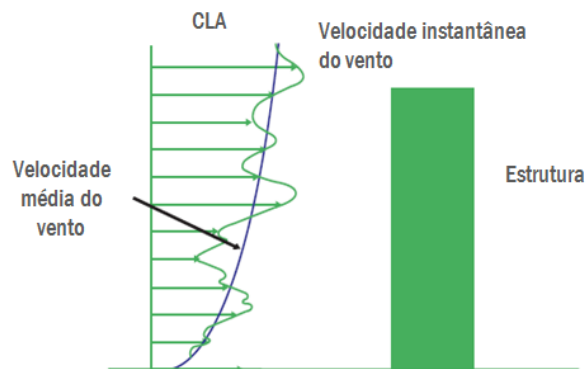


Figura 2. 1 – Representação da camada limite atmosférica
Fonte: Adaptada de Irwin et al. (2013)

Blessmann (1995) explica que, quanto maior a rugosidade do solo e mais importantes em número e dimensões os grandes obstáculos, maiores serão a agitação do ar e a altura de interesse. Com isso, tanto a altura gradiente quanto a turbulência serão maiores em uma cidade do que em um campo aberto, por exemplo. Essa situação é bem ilustrada na Figura 2. 2.

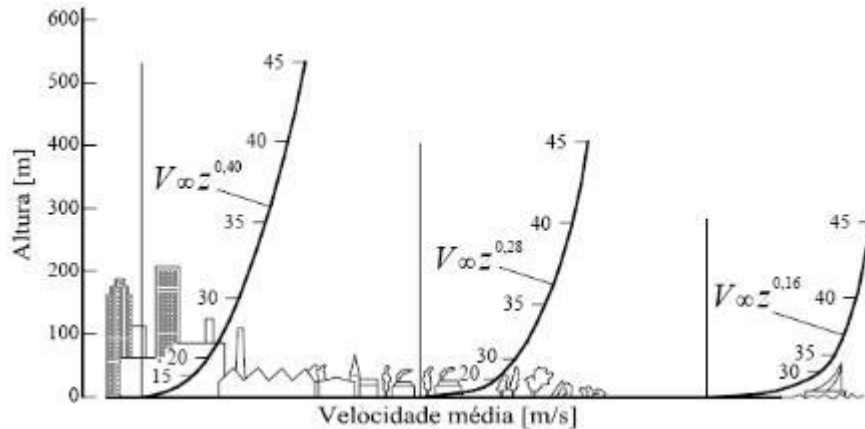


Figura 2. 2 – Perfis de velocidade média sobre terrenos de rugosidades distintas
Fonte: LOREDO-SOUZA (2006)

2.3 INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA

Os carregamentos devidos ao vento atuantes em um edifício dependem não apenas das características do vento natural que se aproxima, como também das propriedades da estrutura, além da turbulência que ela própria cria ao seu redor ao entrar em contato com o vento (Figura 2. 3).



Figura 2. 3 – Turbulência gerada pela própria estrutura
Fonte: Adaptado de Irwin et al. (2013)

Um aspecto de grande relevância no problema diz respeito às dimensões da edificação em relação às dos turbilhões que compõem a turbulência atmosférica. Conforme Blessmann (1995), as flutuações em torno da velocidade média são denominadas rajadas, e são originadas da chegada simultânea ao ponto de estudo de diversos turbilhões de diferentes dimensões. As rajadas mais violentas são ocasionadas por pequenos turbilhões que agem local e desordenadamente, não exercendo muita influência na excitação da estrutura como um todo, e devendo ser consideradas apenas no projeto de esquadrias e revestimentos. Por outro lado, turbilhões de dimensões maiores, que envolvam toda a estrutura, ocasionarão forças de baixa frequência, que poderão estar aproximadamente em fase ao longo de toda a edificação e,

portanto, devem ser considerados para a estimativa das forças globais a serem consideradas no dimensionamento dos elementos da estrutura.

Outro ponto importante refere-se à rigidez. Estruturas rígidas possuem valores altos para as frequências naturais nos primeiros modos de vibração e tendem a seguir as flutuações do carregamento sem amplificar ou atenuá-las. As deflexões da estrutura devidas ao vento não são consideradas relevantes, e esta é denominada estática. Em contrapartida, estruturas flexíveis possuem valores baixos de frequência natural nos primeiros modos, e respondem normalmente às cargas de vento apenas nos componentes de carregamento que atuam abaixo da frequência natural. Em frequências acima desta a resposta é atenuada, mas nas frequências próximas à natural é amplificada – é o que se conhece por ressonância. Neste caso a estrutura é denominada dinâmica, e sua deflexão torna-se um parâmetro de projeto de grande relevância. Existem, ainda, as estruturas chamadas aeroelásticas, as quais são muito flexíveis, e as deflexões não só são significantes como também interagem com os carregamentos do vento, provocando vários tipos de instabilidade (COOK, 1985). As características mencionadas estão esquematizadas na Figura 2. 4.

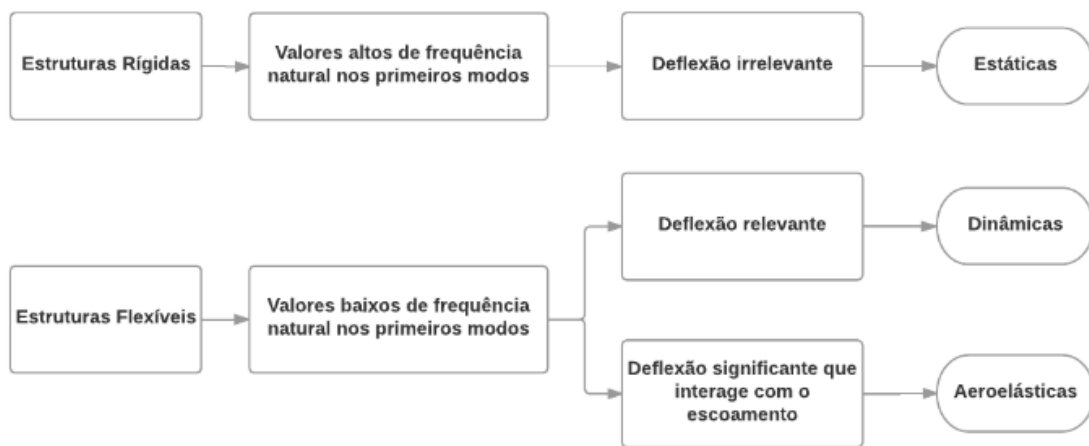


Figura 2. 4 – Características das estruturas
Fonte: O autor (2017)

2.4 CARREGAMENTOS DEVIDOS AO VENTO EM EDIFÍCIOS

Para fins de análise do carregamento, é oportuno dividir o problema segundo alguns aspectos. O primeiro refere-se à sua natureza, dividindo-o em uma parcela estática e outra dinâmica (item 2.4.1). Já o segundo diz respeito à direção, separando-o em componentes de acordo com os

modos de vibração da estrutura: flexionais e torcionais, sendo as flexionais classificadas em transversal e longitudinal ao vento (item 2.4.2). Para fins de projeto, ainda, torna-se conveniente fixar eixos x e y de referência, e dividir a ação flexional em suas componentes nessas duas direções, de modo a facilitar a aplicação do carregamento nos programas de análise e dimensionamento.

2.4.1 Carregamento médio e carregamento flutuante

A consideração do vento pode ser dividida em duas parcelas, sendo a primeira a velocidade média, que é a carga estática, e a outra representada pelas flutuações em torno da velocidade média (rajadas), que corresponde à carga dinâmica. A separação destas parcelas é ilustrada na Figura 2. 5, e a resposta total da estrutura será uma superposição dos efeitos causados por cada uma dessas componentes.

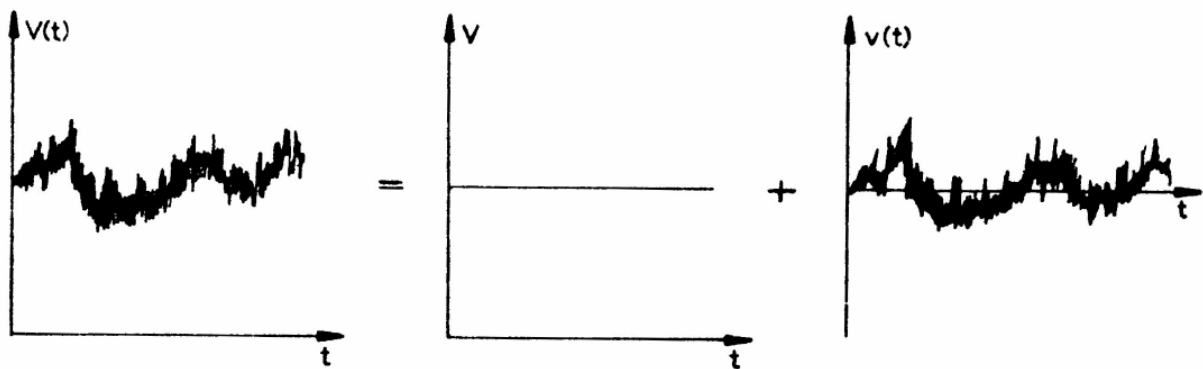


Figura 2. 5 – Divisão da velocidade do vento em parcelas média e flutuante
Fonte: Macdonald (1975)

A ação do vento é capaz de excitar dinamicamente estruturas que apresentam frequência natural abaixo de 1 Hertz, especialmente as que possuem baixo amortecimento. Para edifícios com uma frequência natural acima deste valor, a parcela flutuante é pouco significativa, podendo ser desprezada na estimativa da resposta. As solicitações dinâmicas, conforme Blessmann (1995), dependem da energia cinética contida nas flutuações, e de como esta energia se distribui pelas diversas frequências. A resposta da estrutura depende muito mais da energia contida em uma sequência de rajadas do que na intensidade de uma única rajada. E nesta sequência, serão mais importantes as componentes em ressonância com a estrutura. Mais detalhes sobre os efeitos dinâmicos são apresentados no item 2.5.

2.4.2 Carregamento longitudinal, transversal e torcional

A resposta na direção longitudinal à incidência do vento é a que mais se conhece, e é a que geralmente é abordada pelas normas de carregamentos. Em prédios baixos e rígidos, esta de fato costuma ser a parcela dominante do carregamento. No entanto, em prédios altos e esbeltos as parcelas transversal e torcional podem, muitas vezes, exceder a longitudinal. Devido à complexidade dos fenômenos, essas duas últimas ainda são determinadas apenas por processos empíricos, e normalmente não estão inclusas nas normas e códigos. Lin *et al.* (2005, p. 218) afirmam que seriam duas adições valiosas nas instruções normativas, permitindo a previsão da resposta dinâmica de edifícios altos para cálculos preliminares.

No que se refere às cargas transversais, A NBR-6123 (ABNT, 1988) estima que elas correspondam a um terço das forças efetivas na direção longitudinal. No entanto, um fenômeno de grande relevância em prédios altos na determinação do carregamento transversal é o de desprendimento de vórtices. A própria norma enfatiza que, quando necessário, o valor estimado deve ser somado à resposta devido ao desprendimento de vórtices, mas não apresenta nenhum método para o cálculo. O fenômeno será explicado mais detalhadamente no tópico 2.5.4.

Quanto ao carregamento torcional, Carpegianni (2004) explica que os efeitos de torção em estruturas podem ser atribuídos a três causas: “forma externa da edificação, efeitos de interferência da vizinhança e efeitos dinâmicos na estrutura devidos à turbulência atmosférica” (p. 1). A primeira delas é relacionada a edifícios assimétricos, em que o eixo de torção e o eixo geométrico não coincidem, acentuando as cargas torcionais. Os efeitos de vizinhança podem interferir no escoamento do vento nas redondezas, tornando-o assimétrico. Finalmente, a última causa diz respeito à turbulência do vento, que faz com que a distribuição de pressões seja assimétrica para um dado instante, mesmo que o vento médio incida perpendicularmente à fachada de um edifício de seção simétrica, gerando com isso esforços de torção.

A norma brasileira NBR-6123/1988 prescreve alguns valores de excentricidade a serem considerados para a força de arrasto, de modo a considerar os referidos efeitos de torção. No entanto, as recomendações aplicam-se apenas para edificações paralelepípedicas e, devido à grande complexidade das modificações do campo aerodinâmico causadas por interferências de vizinhança, o método fornece apenas uma estimativa grosseira dos efeitos. Para resultados mais precisos, ou configurações arquitetônicas distintas, faz-se necessário um estudo em túnel de vento para avaliar o comportamento da estrutura por meio de um modelo em escala reduzida.

2.5 EFEITOS DINÂMICOS DO VENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS

2.5.1 Martelamento (Buffeting)

Quando uma edificação está localizada na esteira de outras construções, dependendo das dimensões e configurações de posicionamento, turbilhões gerados nas edificações a barlavento podem provocar impactos periódicos, com uma frequência dominante, na edificação que se encontra nesta esteira. Os impactos agem como “marteladas”, e se a frequência dominante dos turbilhões se aproximar da frequência natural da estrutura em questão, ocorrerão efeitos dinâmicos de maior intensidade.

Os efeitos dinâmicos mais significativos do martelamento ocorrem com um distanciamento maior das edificações (BÊNIA, 2013, p. 48). Além disso, Saunders e Melbourne (1979), em um estudo experimental para avaliar os efeitos de martelamento em um prisma quadrado, concluíram que edifícios médios e grandes podem produzir efeitos significativos de martelamento em edifícios de tamanho similar ou menores localizados na esteira.

2.5.2 Galope

O fenômeno galope está diretamente ligado à propriedade de amortecimento. Para explicar este conceito, cabe ressaltar que existem dois tipos de amortecimento: o primeiro é inerente à estrutura, e sempre tem valor positivo, contribuindo para a diminuição da resposta; o segundo, por outro lado, é o aerodinâmico, e em algumas circunstâncias pode apresentar valores negativos para a direção transversal à incidência do vento, contribuindo para o aumento de amplitude da resposta. Quando o valor negativo do amortecimento aerodinâmico supera em módulo o amortecimento da estrutura, o valor resultante desta propriedade se torna negativo, o que provoca uma instabilidade na estrutura.

Conforme Irwin et al. (2013, p. 18, tradução nossa), “nesta configuração instável, que ocorre uma vez que é alcançada uma velocidade crítica do vento, qualquer perturbação pode ser suficiente para desencadear oscilações crescentes que podem resultar em amplitudes danosas à estrutura”. Estas oscilações são dadas apenas em um grau de liberdade, na direção perpendicular à incidência do vento, e não possuem limites de amplitude.

É um fenômeno que pode ocorrer em corpos longos (HOLMES, 2014), de seções transversais como as quadradas, retangulares, triangulares, poligonais, semicirculares e cantoneiras

(BLESSMANN, 1998). Especialmente em estruturas muito esbeltas ou prédios muito altos, o potencial de ocorrência deste fenômeno deve ser avaliado.

2.5.3 Drapejamento

Assim como no fenômeno de galope, o drapejamento ocorre quando o amortecimento aerodinâmico possui valor negativo, aumentando a amplitude da resposta a valores ilimitados. Neste último, no entanto, o efeito está associado a dois graus de liberdade, referentes à torção e flexão vertical, em que ambos os movimentos ocorrem simultaneamente com uma diferença de fase. A velocidade crítica neste caso pode ter valores menores que as necessárias para iniciar o galope.

2.5.4 Desprendimento de vórtices

De modo geral, corpos imersos em um escoamento podem ser classificados como corpos rombudos ou aerodinâmicos. Para explicar a diferença entre ambos, Holmes (2014) utiliza a Figura 2. 6, que apresenta um aerofólio e um corpo retangular bidimensional. No primeiro, observa-se que as linhas de corrente seguem o contorno do corpo, sendo que o escoamento é separado da superfície do aerofólio apenas por uma fina camada. É isso que ocorre em corpos aerodinâmicos, sendo exemplos clássicos asas de aviões ou velas de embarcações.

A seção retangular, por outro lado, representa um típico exemplo de corpo rombudo, ocorrendo separação do escoamento nos vértices das arestas frontais. A região de desprendimento é caracterizada por uma fina camada de alto cisalhamento e vorticidade. Estas camadas são instáveis, e seguirão em direção à esteira para formar vórtices concentrados, que serão subsequentemente desprendidos a sotavento. No caso de corpos muito alongados, a camada de cisalhamento que se separou volta a recolar à superfície.

Esses vórtices, quando se desprendem alternadamente de ambos os lados da estrutura com uma frequência bem definida, são denominados vórtices de Kármán. Eles são capazes de originar forças periódicas e alternadas transversalmente à direção do vento, as quais se mostram bem correlacionadas ao longo da altura. As forças, por conseguinte, provocam oscilações nesta direção, e se a frequência destas coincidir com a frequência natural da estrutura, irão ocorrer efeitos ressonantes podendo provocar grandes amplitudes de deslocamento.

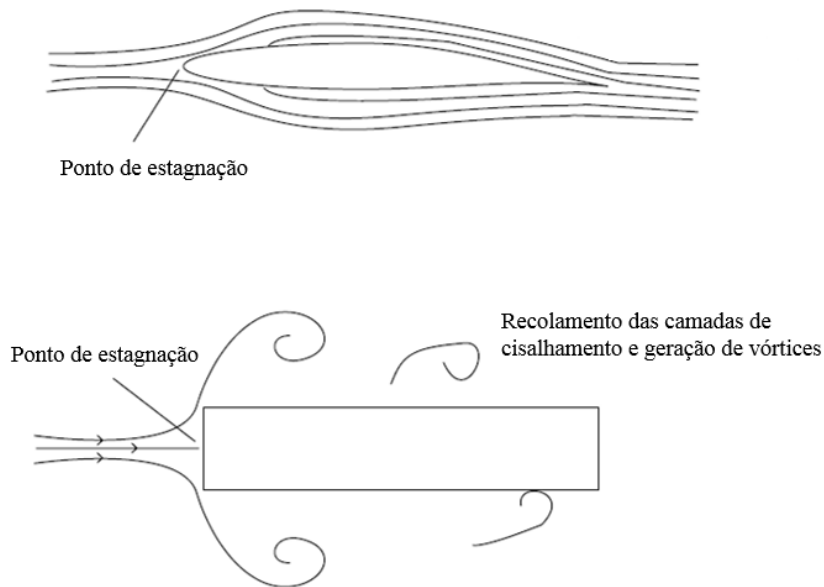


Figura 2. 6 – Escoamento em torno de corpos aerodinâmicos e rombudos
Fonte: Adaptado de Holmes (2014)

Para detalhar o mecanismo de formação dos vórtices de Kármán, Cook (1985) refere-se inicialmente à Figura 2. 7. Considerando um cilindro circular imerso num escoamento, sujeito a um aumento de velocidade, o acréscimo do número de Reynolds torna o par de Vórtices A e B cada vez mais susceptível a perturbações externas. Supondo que A se torne mais forte que B, o desequilíbrio induz B a se mover para a posição entre A e o cilindro. B continua a se mover até que alcança a camada de cisalhamento de A de vorticidade oposta – Figura 2. 8 (a). Com isso, parte de B anula a camada de cisalhamento de A, que é então levado a sotavento por já não ter mais alimentada sua vorticidade. B cresce ainda mais, devido à vorticidade de sua camada de cisalhamento, ao passo que um novo vórtice C surge em substituição ao A – Figura 2. 8 (b). Mas agora B torna-se mais forte que C – Figura 2. 8 (c) –, e o processo se repete ciclicamente, deixando duas esteiras de vórtices a sotavento do cilindro (Figura 2. 9).

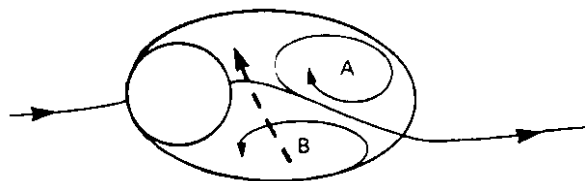


Figura 2. 7 – Início do desprendimento de vórtices.
Fonte: COOK (1985)

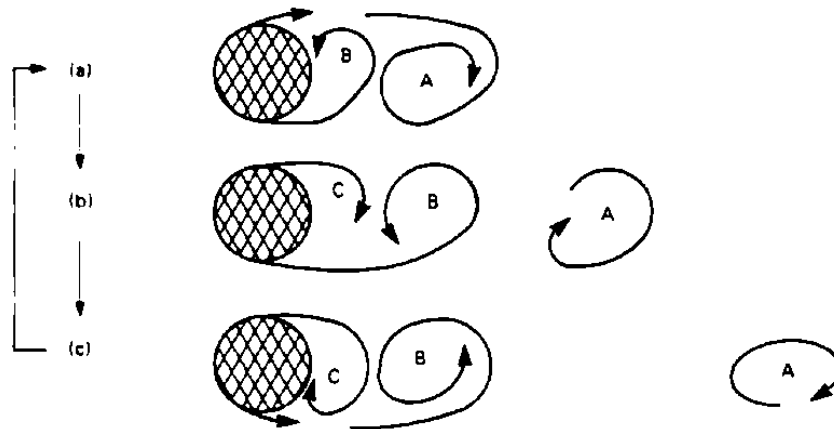


Figura 2. 8 – Sequência de desprendimento de vórtices
Fonte: COOK (1985)

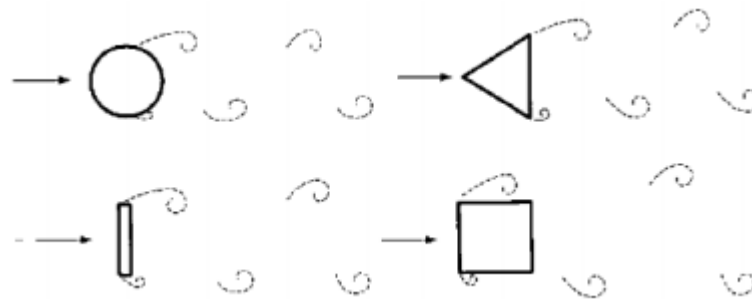


Figura 2. 9 – Vórtices de Kármán
Fonte: Blessmann (1998)

Os pontos de separação dependem essencialmente do formato do corpo. Em corpos com seção transversal poligonal, os vórtices tendem a se desprender nos vértices, enquanto que em corpos curvilíneos a região de descolamento depende do número de Reynolds.

Conforme Blessmann (1998), quando os pulsos de pressão são interceptados na esteira, por corpos presentes a sotavento ou pelas próprias faces laterais do corpo em estudo, o que ocorre é a formação de vórtices aleatoriamente desprendidos, e não vórtices de Kármán – Figura 2. 10. Isso ocorrerá, por exemplo, caso o escoamento recole ao corpo após uma primeira separação.

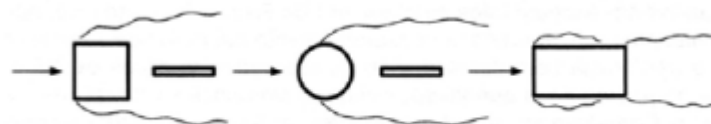


Figura 2. 10 – Vórtices aleatórios
Fonte: Blessmann (1998)

A Figura 2.11 ilustra o efeito do desprendimento alternado de vórtices na resposta transversal. Na ausência do fenômeno, a resposta aumenta proporcionalmente à velocidade. No entanto, quando ocorre a excitação de vórtices, o resultado é uma amplificação da resposta em uma velocidade crítica, que é mais baixa que a velocidade de projeto. Uma vez que os movimentos do edifício alcançam uma amplitude suficiente, a frequência do desprendimento de vórtices tende a ficar atrelada à frequência de excitação da estrutura. Deste modo, mesmo que a velocidade do vento venha a se alterar posteriormente, o prédio continuará a oscilar na mesma frequência, aumentando ainda mais as amplitudes de deslocamento.

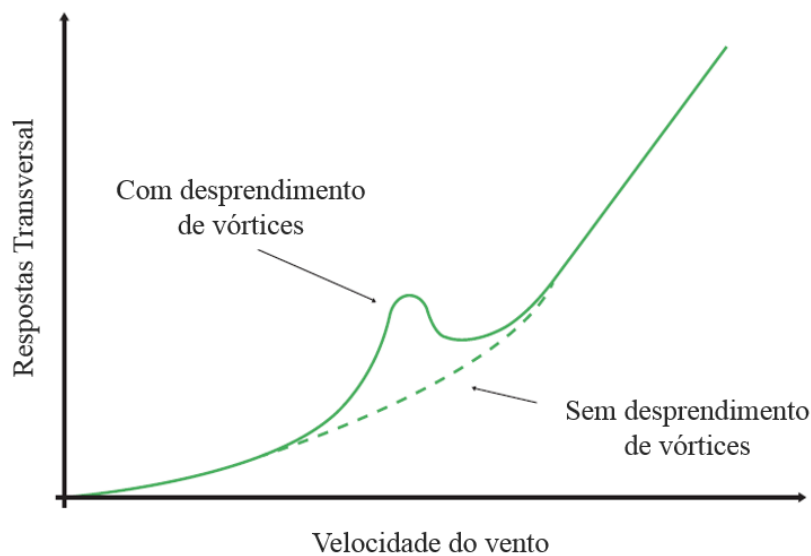


Figura 2. 11 – Influência do desprendimento de vórtices na resposta transversal
Fonte: Adaptado de Irwin *et. al.* (2013)

Um parâmetro de importância associado ao desprendimento de vórtices é o número de Strouhal, que estabelece uma relação entre a frequência de desprendimento de um par de vórtices, as dimensões do edifício, e a velocidade do vento:

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

Sendo:

St – Número de Strouhal;

L – Dimensão característica da estrutura;

V – Velocidade do vento.

A partir da expressão é possível determinar a frequência em que os vórtices se desprendem do edifício, e assim verificar se esta pode coincidir com as frequências naturais da estrutura para velocidades de vento abaixo da considerada no projeto. Segundo Irwin *et al.* (2013), a constante geralmente apresenta valores entre 0,1 e 0,3, situando-se entre 0,1 e 0,14 para seções quadradas, e em torno de 0,3 para cilindros circulares. Blessmann (1998) fornece um quadro com valores do número de Strouhal para diversas seções (Quadro 2. 1).

Quanto à influência da turbulência, Blessmann (1998, p. 165) afirma que “esta altera profundamente o desprendimento de vórtices e, conseqüentemente, a resposta da estrutura”. Segundo ele, e como pode ser observado na Figura 2. 12, o espectro de potência da força lateral flutuante tem um pico muito pronunciado em escoamento de baixa turbulência, e a largura da banda deste pico vai aumentando proporcionalmente à turbulência, ao mesmo tempo em que sua altura vai diminuindo.

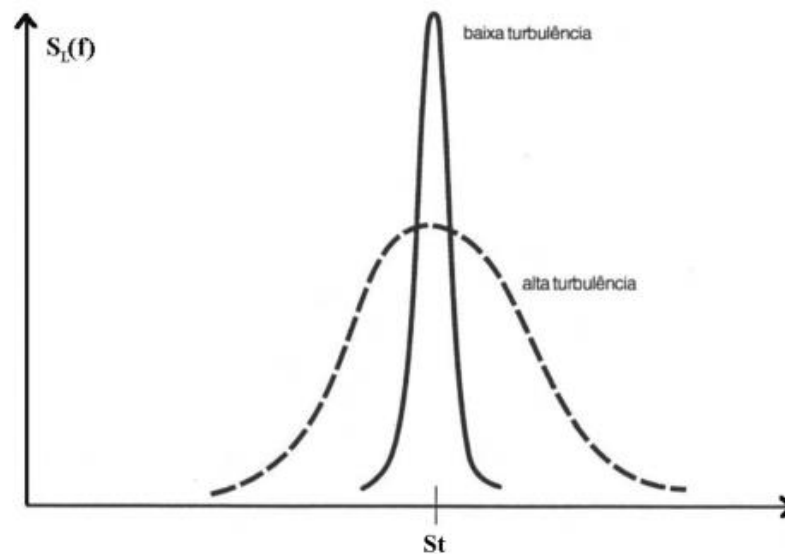





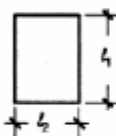

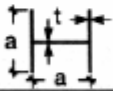


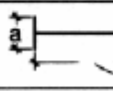

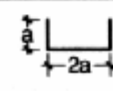

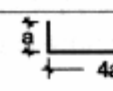

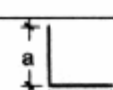



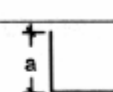



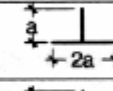

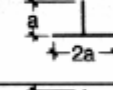


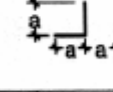


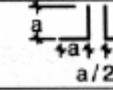

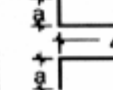
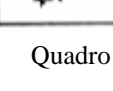


Figura 2. 12 – Influência da turbulência no espectro da força transversal
Fonte: Blessmann (1998)

Em suma, os métodos existentes atualmente para determinação da resposta transversal por desprendimento de vórtices são em geral baseados em resultados experimentais. “Eles não simulam o escoamento, mas adotam algoritmos ou funções empíricas que tentam reproduzir as forças do escoamento no sólido, assim como também a interação fluido-estrutura” (PALUCH, 1999 apud GRALA, 2016). Exemplos de métodos são duas propostas para inserção na norma NBR-6123 (ABNT, 1988), desenvolvidas por Paluch e Rieira, em 1995 e 1999, além dos métodos utilizados pela norma Canadense (NBC 1985) e pelo Eurocódigo de 2010.

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

Quadro 2. 1 – Valores do número de Strouhal para diversas secções.
 Fonte: Blessmann (1998)

Apesar do grande esforço nas últimas décadas visando o aprimoramento dos modelos analíticos usados para prever vibrações induzidas por desprendimento de vórtices, os modelos existentes ainda são um tanto imprecisos. Os mecanismos do fenômeno são tão complexos que até hoje não existe nenhum método analítico geral capaz de calcular a resposta transversal ao escoamento das estruturas. Os principais parâmetros envolvidos no mecanismo já foram entendidos, mas as abordagens utilizadas para a predição do fenômeno ainda não atingiram concordância entre os pesquisadores (DYRBYE; HANSEN, 1997 apud GRALA, 2016, p.58).

Devido à grande complexidade do fenômeno em questão, a maneira mais confiável para determinação da resposta transversal ainda é por meio de modelos reduzidos da estrutura testados em túneis de vento.

2.6 EFEITOS DE INTERFERÊNCIA DA VIZINHANÇA

A presença de outras edificações ou obstáculos localizados nas proximidades de uma estrutura pode modificar significativamente seu comportamento em relação à situação desta estrutura isolada. Estas alterações são verificadas nas intensidades de forças, pressões e momentos torçores. A norma brasileira NBR-6123/1988 apresenta em seu ANEXO G três modos de interferência por efeitos de vizinhança, os quais serão detalhados nos itens que se seguem.

2.6.1 Efeito Venturi

Conforme a NBR-6123 (1988, p. 58) “Edificações vizinhas podem, por suas dimensões, forma e orientação, causar um ‘afunilamento’ do vento, acelerando o fluxo de ar, com conseqüente alteração nas pressões”, conforme é ilustrado na Figura 2. 13. A norma explica, ainda, que este efeito se verifica nas duas faces confrontantes de duas edificações muito próximas, gerando coeficientes de pressão muito elevados na região próxima à aresta de barlavento.

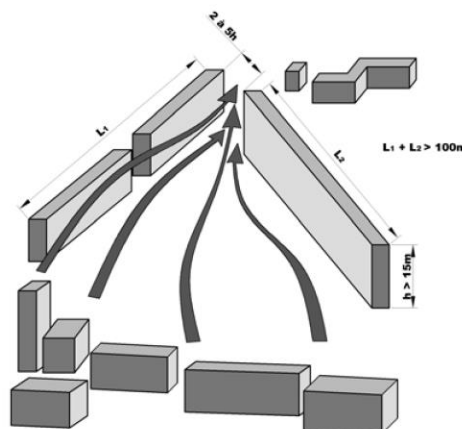


Figura 2. 13 – Efeito Venturi
Fonte: CAPEGGIANI(2004)

2.6.2 Deflexão do vento na direção vertical

Este efeito acontece em estruturas mais baixas localizadas próximas de prédios altos, pois estes defletem para baixo uma parte do vento incidente na fachada, aumentando a velocidade do vento próxima ao solo nessas zonas (NBR 6123, 1988). O fenômeno é ilustrado na Figura 2. 14.

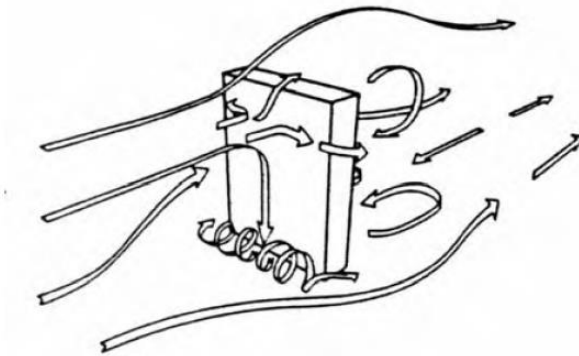


Figura 2. 14 – Deflexão do vento na direção vertical.
Fonte: CARPEGGIANI (2004)

2.6.3 Turbulência na esteira

Quando uma edificação se encontra na esteira de outra, dependendo da distância entre estas estruturas, pode ocorrer um efeito de proteção entre ambas, diminuindo as respostas provocadas pela ação do vento, mas também pode ocorrer uma interferência provocada pela turbulência gerada na esteira (Figura 2. 15), que pode provocar efeitos dinâmicos, como o martelamento apresentado no item 2.5.1, além de alteração das pressões.

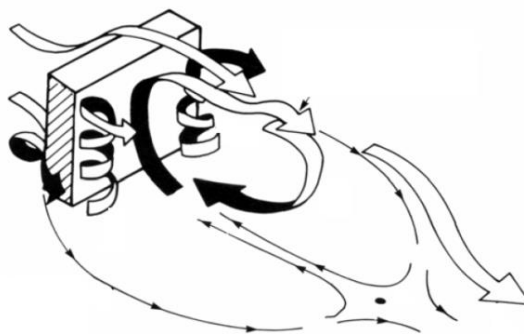


Figura 2. 15 –Turbulência gerada na esteira.
Fonte: CAPEGGIANI(2004)

Cook (1985) explica que, em edificações alinhadas na direção do vento, podem ocorrer três regimes diferentes de escoamento, sendo eles regime de escoamento de corpo isolado (Figura

2. 16 a), regime de escoamento na esteira (Figura 2. 16 b), e regime de escoamento deslizante (Figura 2. 16 c).

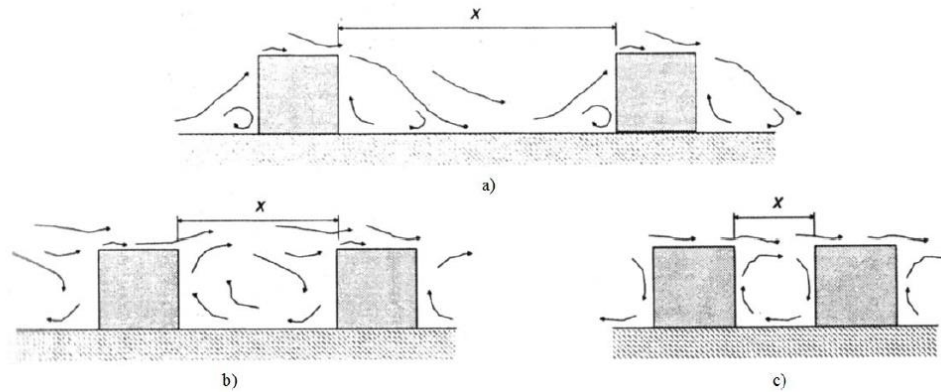


Figura 2. 16 – Regimes de escoamento.
Fonte: COOK (1985)

No caso de regime de escoamento isolado (Figura 2. 16 a), a distância entre os dois edifícios é suficientemente grande para que o escoamento recole ao solo antes de atingir o edifício a sotavento, de modo que o escoamento se comporte como em um corpo isolado, e o efeito de proteção entre ambos seja pequeno.

No regime de escoamento deslizante (Figura 2. 16 c), “os edifícios estão suficientemente próximos para que o escoamento pareça deslizar sobre os telhados” (BÊNIA, 2013). Nesta situação também pode ocorrer a formação de um vórtice estável entre os dois edifícios, fazendo com que ocorra um grande efeito de proteção, diminuindo as forças atuantes em ambos.

Já no regime de interferência na esteira (Figura 2. 16 b), os edifícios não se encontram suficientemente afastados para que o escoamento recole ao solo, nem suficientemente próximos para que ocorra a formação de um vórtice estável. Nesta situação, portanto, a turbulência gerada na esteira do edifício a barlavento poderá provocar efeitos dinâmicos e alterações nos coeficientes de força e de pressão do edifício a sotavento.

2.7 ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

A solução do problema das ações do vento atuantes em uma estrutura pode se dar por dois enfoques distintos: análise no domínio do tempo ou análise no domínio da frequência. Esta última pode ser mais conveniente por dois motivos: primeiro, pela maior facilidade em visualizar a ocorrência dos fenômenos – é possível identificar pelos próprios gráficos situações

susceptíveis de ações ressonantes; segundo, por ser mais adequado para a elaboração de um método normativo – a exemplo do procedimento da norma canadense. A referida análise baseia-se no conceito de espectro, que representa graficamente a quantidade de energia contida em cada frequência do fenômeno em análise.

“Uma analogia muito elucidativa – do qual provém o nome de ‘espectro’ – é o da luz branca atravessando um prisma. O espectro luminoso que se obtém indica a distribuição de energia luminosa pelos diversos comprimentos de onda (ou frequências). De modo análogo, o espectro de potência de um fenômeno aleatório indica a distribuição, nas diversas frequências, da energia contida nesse fenômeno” (BLESSMANN, 2011).

Sabe-se que o vento é um fenômeno irregular e aleatório, mas que considerando um número de amostras suficientemente grande ele poderá apresentar uma certa regularidade estatística. Por meio da série de Fourier é possível descrever a ação do vento, assim como qualquer outra função, como o somatório de infinitas funções harmônicas (seno ou cosseno). Para uma função aproximada, geralmente poucos termos são suficientes para uma representação satisfatória. Exemplificando, Rao (2004) afirma que uma onda triangular pode ser representada com uma aproximação razoável utilizando apenas três componentes harmônicas (Figura 2. 17). Cada uma das componentes terá sua frequência representativa, e o espectro de potências evidencia a energia contida em cada uma delas.

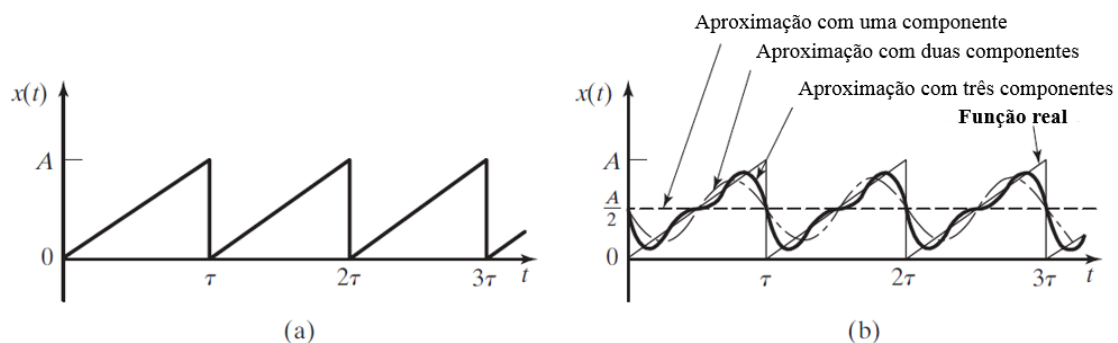


Figura 2. 17 – Aproximação de uma função periódica em termos de suas componentes harmônicas. Fonte: Adaptado de Rao (2004)

A partir desse conceito é possível representar determinada função de acordo com a energia contida nas diversas frequências, ao invés de mostrá-la em função da variável “tempo”. Como dito anteriormente, esse modo de representação facilita a visualização de fenômenos envolvidos no processo: se forem evidenciados picos no gráfico do espectro, por exemplo, esse fato demonstra que existe uma grande quantidade de energia concentrada em um frequência

específica; a depender das outras condições do problema, essa situação pode indicar a ocorrência de ações ressonantes, as quais têm grande relevância no cálculo estrutural.

Blessmann (1998) ilustra graficamente a transformação do domínio do tempo para o domínio da frequência de um processo harmônico (Figura 2. 18) e de um processo periódico (Figura 2. 19).

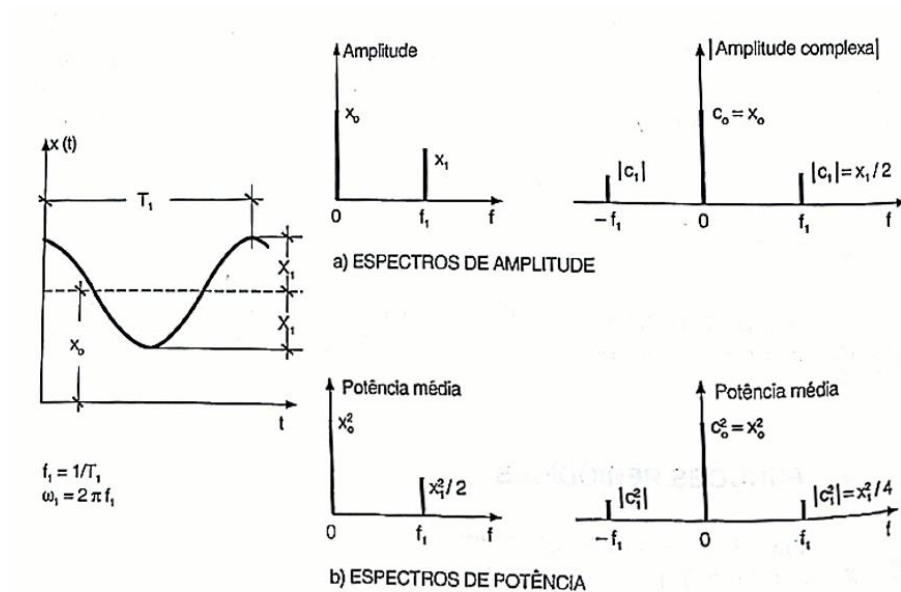


Figura 2. 18 – Transformada de uma função harmônica
Fonte: Blessmann (1998)

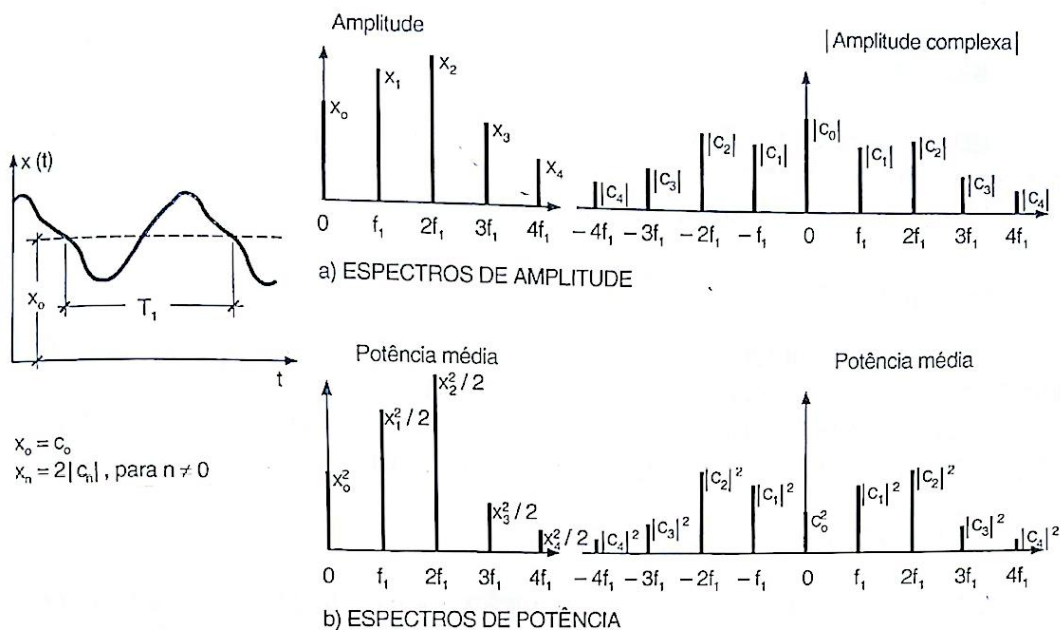


Figura 2. 19 – Transformada de uma função periódica
Fonte: Blessmann (1998)

Em ambos os casos, temos ao lado esquerdo a função representada no domínio do tempo, e ao lado direito essa mesma função representada no domínio da frequência, em termos de amplitude (Figura 2. 18a e Figura 2. 19a) e em termos de potência média (Figura 2. 18b e Figura 2. 19b). A fim de trabalhar apenas com as variáveis reais do problema, considera-se apenas os termos positivos da transformada e, para tanto, percebe-se que os termos de amplitude e potência média são multiplicados por dois (em relação à componente complexa).

Finalmente, ilustrando o processo em termos numéricos, a transformação de determinada função representada no domínio do tempo para o domínio da frequência é dada pela Transformada de Fourier:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i\omega t} \quad (2.3)$$

Sendo:

$x(t)$ – função no domínio do tempo

$X(\omega)$ – função no domínio da frequência

ω – frequência angular

Na forma discreta:

$$FFT_n = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi f_n} \quad (2.4)$$

Sendo:

FFT_n – Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*)

f – frequência

n – número de pontos da função descrita

A transformada descrita acima fornece o espectro de amplitudes. Para obter o espectro de densidades espectrais, têm-se:

$$PSD(f) = \frac{\Delta t}{N} \left| FFT_n \Big|_{n=0}^{N-1} \right|^2, \quad -\frac{1}{2} \Delta t < f \leq \frac{1}{2} \Delta t \quad (2.5)$$

Sendo:

$PSD(f)$ – Densidade espectral de potência (*Power Spectral Density*)

Desconsiderando a parte complexa, e resolvendo apenas para os termos positivos:

$$PSD(f) = 2 \frac{\Delta t}{N} \left| FFT_n \Big|_{n=2}^{\frac{N}{2}} \right|^2 \quad (2.6)$$

Considerando ambos os domínios de solução do problema, a Figura 2. 20 ilustra o processo por meio do qual é determinada a resposta de uma estrutura em relação à ação do vento. A primeira linha refere-se à solução no domínio do tempo, e a segunda no domínio da frequência. Em termos gerais, as flutuações da velocidade do vento, em torno do valor médio, são descritas pelo espectro de velocidades. Quando o vento entra em contato com a estrutura, são reconhecidas as propriedades relacionadas com a forma da edificação e a maneira como a turbulência organiza-se em torno desta – o que é descrito pela função de admitância aerodinâmica. A combinação entre o espectro de velocidade do vento e a admitância aerodinâmica dá origem ao espectro de potência da excitação (em termos de força ou momento).

Conhecido o espectro de potência da excitação e a admitância mecânica de um sistema – que considera propriedades mecânicas da estrutura, como amortecimento, rigidez e distribuição de massa –, pode-se determinar o valor quadrado médio da resposta (BLESSMANN, 1998).

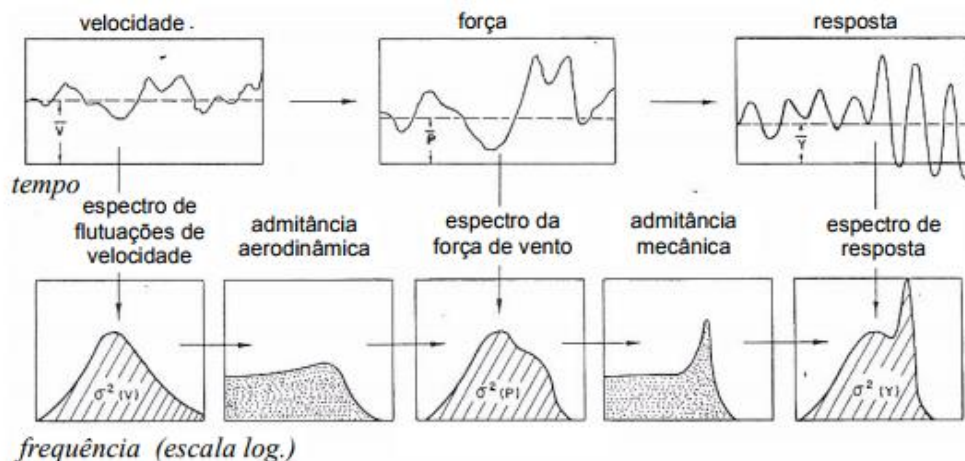


Figura 2. 20 – Ilustração do método probabilístico de Davenport.

Fonte: BLESSMANN (1988)

2.7.1 Admitância aerodinâmica

A admitância aerodinâmica reflete o modo como as ações variam espacialmente sobre a estrutura, levando em consideração a forma da construção, a intensidade de turbulência e a influência das dimensões dos turbilhões de vento em relação ao tamanho da estrutura.

A função inclui ainda as correlações da flutuação de pressões para a região em estudo de uma estrutura. “Por exemplo, para uma região [...] correspondente a um pavimento de edifício alto, a admitância aerodinâmica incorpora as correlações entre as flutuações de pressão a barlavento e a sotavento, que não seriam consideradas se fossem utilizados coeficientes de pressão média aplicados a uma velocidade de rajada” (LOREDO-SOUZA E ROCHA, 2011b, p. 3).

Ao considerar a relação entre o espectro de velocidade e o espectro de força para toda a estrutura, é possível demonstrar que:

$$\frac{S_F(f)}{\bar{F}^2} = 4|\chi_a(f)|^2 \frac{S_1(f)}{\bar{V}^2} \quad (2.7)$$

Sendo:

S_F – Densidade espectral da força;

\bar{F} – Força média;

S_1 – Densidade espectral da componente longitudinal da velocidade;

\bar{V} – Velocidade média horária;

χ_a – Admitância aerodinâmica.

No entanto, a equação apresenta algumas limitações:

- a) a expressão não é válida quando força média (\bar{F}) é próxima de zero, o que levaria a divisão da equação a um número infinito. Isso ocorre, por exemplo, em edifícios de geometria simétrica, em condições normais de escoamento, quando analisada a força transversal.
- b) as flutuações na velocidade e na força devem estar ligadas por um processo linear, hipótese que não seria válida quando ocorre desprendimento alternado de vórtices, por exemplo;

c) as flutuações não podem ser muito grandes quando comparadas ao escoamento médio.

Obedecidas tais hipóteses, o gráfico da admitância apresenta um padrão bem estabelecido, mostrando um valor unitário em frequências muito baixas, e um aspecto em geral decrescente em frequências maiores. Explicando fisicamente, isso ocorre pois nessa gama de frequências muito baixas, os turbilhões correspondentes envolvem toda a estrutura e, portanto, as flutuações das ações atuantes tendem a acompanhar as flutuações da velocidade do vento, tornando a relação unitária. Aumentando o valor da frequência, os comprimentos de onda vão diminuindo, de modo que estes já não sejam capazes de excitar a estrutura como um todo: pequenos turbilhões passam a atuar localmente em diferentes pontos da estrutura, de modo que as flutuações de força deixem de acompanhar as flutuações de velocidade, e essa relação deixe de ser unitária.

Com base em estudos experimentais utilizando placas, chegou-se a proposição da fórmula empírica (2.8) e do gráfico de admitância aerodinâmica x frequência (Figura 2. 21). Em placas com uma relação de dimensões altura/largura menor que 4, a admitância aerodinâmica é praticamente independente da forma da superfície frontal da placa. Em se tratando de edifícios altos, no entanto, pode-se esperar um comportamento divergente desse deduzido para placas, em função principalmente das diferentes relações entre as dimensões da estrutura.

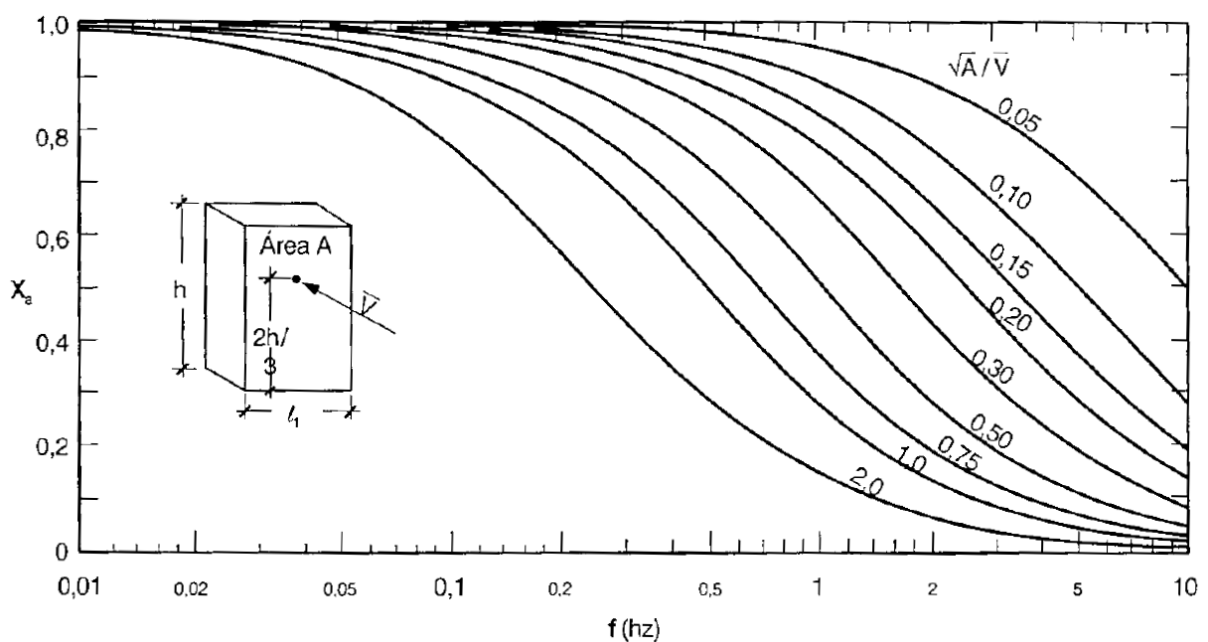


Figura 2. 21 – Admitância aerodinâmica x frequência
Fonte: Blessmann (1998)

$$\chi_a = 1 / \left[1 + \left(2f \sqrt{A / \bar{V}} \right)^{4/3} \right] \quad (2.8)$$

Sendo:

A – Área frontal.

2.7.2 Espectro da turbulência do vento

O espectro da turbulência da velocidade do vento já foi amplamente estudado por diversos autores, que apresentaram modelos teóricos bem consolidados. Blessmann (1995) resume as contribuições dos autores mais conhecidos quanto ao espectro da componente longitudinal do vento. A representação gráfica dos espectros é dada na Figura 2. 22.

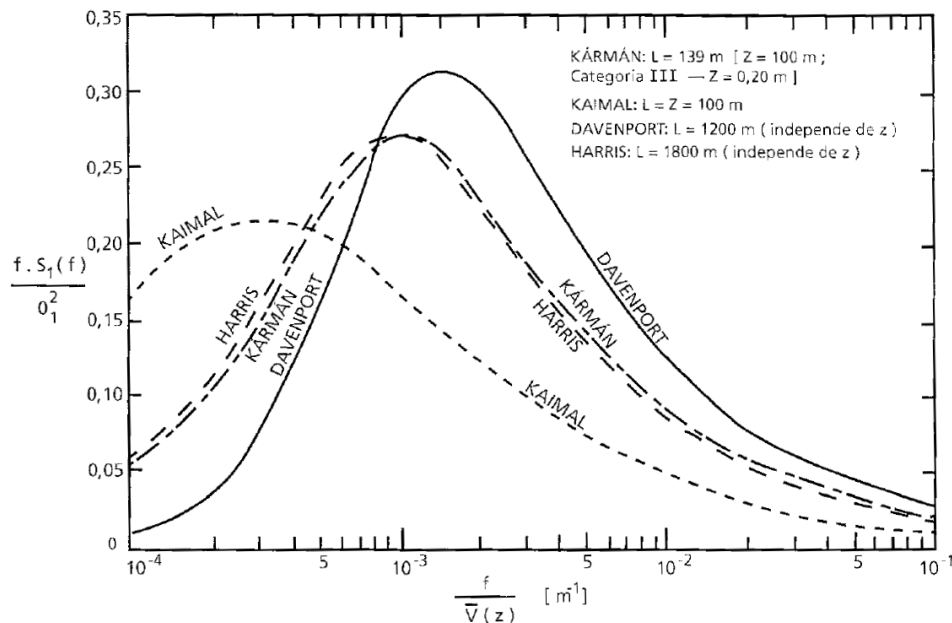


Figura 2. 22 – Espectros de Davenport, Harris, Kármán e Kaimal.

Fonte: Davenport (1995)

A formulação proposta pelos diversos autores pode ser resumida em uma única equação, variando-se apenas os parâmetros de entrada:

$$\frac{fS_1(f)}{\sigma_1^2} = \frac{AX_1^m}{(B + CX_1^k)^n} \quad (2.9)$$

Sendo:

S_1 – Espectro do componente longitudinal da velocidade do vento;

σ_1 – variância da componente longitudinal da velocidade do vento;

$$X_1 = \frac{fL}{V(z)}$$

A, B, C, m, n e k – parâmetros dados na Figura 2. 23.

Autor	Parâmetros numéricos						L para z=100 m	Notas
	A	B	C	m	n	k	(m)	
Davenport	2/3	1	1	2	4/3	2	1200	(1)
Harris	0,6	2	1	1	5/6	2	1800	(1)
Kármán	4	1	70,78	1	5/6	2	139	(2)
Kaimal	100/3	1	50	1	5/3	1	100	(3)

(1): independe de z
(2): $L = L_{11}(z) = 25 z^{0,35} z_o^{-0,063}$; $z_o = 0,20$ m (Categoria III)
(3): $L = z$

Figura 2. 23 – Espectros a 100 m de altura – Diversos autores
Fonte: Blessmann (1995)

2.8 ESTUDOS ANTERIORES

2.8.1 Li *et al.*

Li *et al.* (2017) estudaram a ação torcional induzida pelo vento em oito modelos com formato em “L”, de diferentes dimensões geométricas (ver dimensões e convenções no Quadro 2. 2). A partir dos resultados de ensaios em túnel de vento utilizando um método de medição de pressões simultâneas, foram determinados coeficientes de força RMS, densidade espectral e funções de correlação vertical, além de ter sido proposta uma formulação simplificada com base nos dados empíricos para estimar o torque em edifícios com este formato. Por fim, os autores avaliaram a aplicabilidade da expressão proposta por meio de um caso concreto.

Convenções	Modelos	H (mm)	B (mm)	D(mm)	d (mm)	D/B	H/B	Tomadas
	M1	500	100	50	40	0.5	5	250
	M2	500	100	80	40	0.8	5	310
	M3	500	100	100	40	1.0	5	320
	M4	400	100	120	40	1.2	4	228
	M5	500	100	120	40	1.2	5	360
	M6	600	100	120	40	1.2	6	432
	M7	500	100	150	40	1.5	5	400
	M8	500	100	200	40	2.0	5	440

(Escala 1:500)

Quadro 2. 2 – Parâmetros geométricos dos modelos de ensaio

Fonte: Li. Y. et al. (2017)

Dentre as conclusões resultantes do estudo, verificou-se que as variações no espectro do momento torçor da base são muito parecidas com as dos espectros de cada zona (Figura 2. 25). Avaliando-se a incidência desfavorável de 90° , notou-se que para $D/B < 1$, os espectros apresentaram dois picos emergentes, que os autores atribuíram ao desprendimento de vórtices e ao recolamento da camada limite, respectivamente. Quando $D/B = 1$, foi observado apenas um pico de banda estreita, para o qual a frequência reduzida correspondente é próxima do número de Strouhal de seções retangulares (0,1). Conforme a razão D/B continua a aumentar, o formato do gráfico vai se aproximando ao do espectro da velocidade longitudinal do vento.

Li e Li (2016) fizeram, ainda, um outro estudo utilizando os mesmos modelos, mas avaliando o espectro da força transversal. Concluiu-se com a pesquisa, conforme observado na Figura 2. 24, que os espectros apresentaram diferentes picos para razões D/B distintas: com o aumento da razão, a magnitude do pico diminuiu gradativamente, assim como a frequência reduzida correspondente.

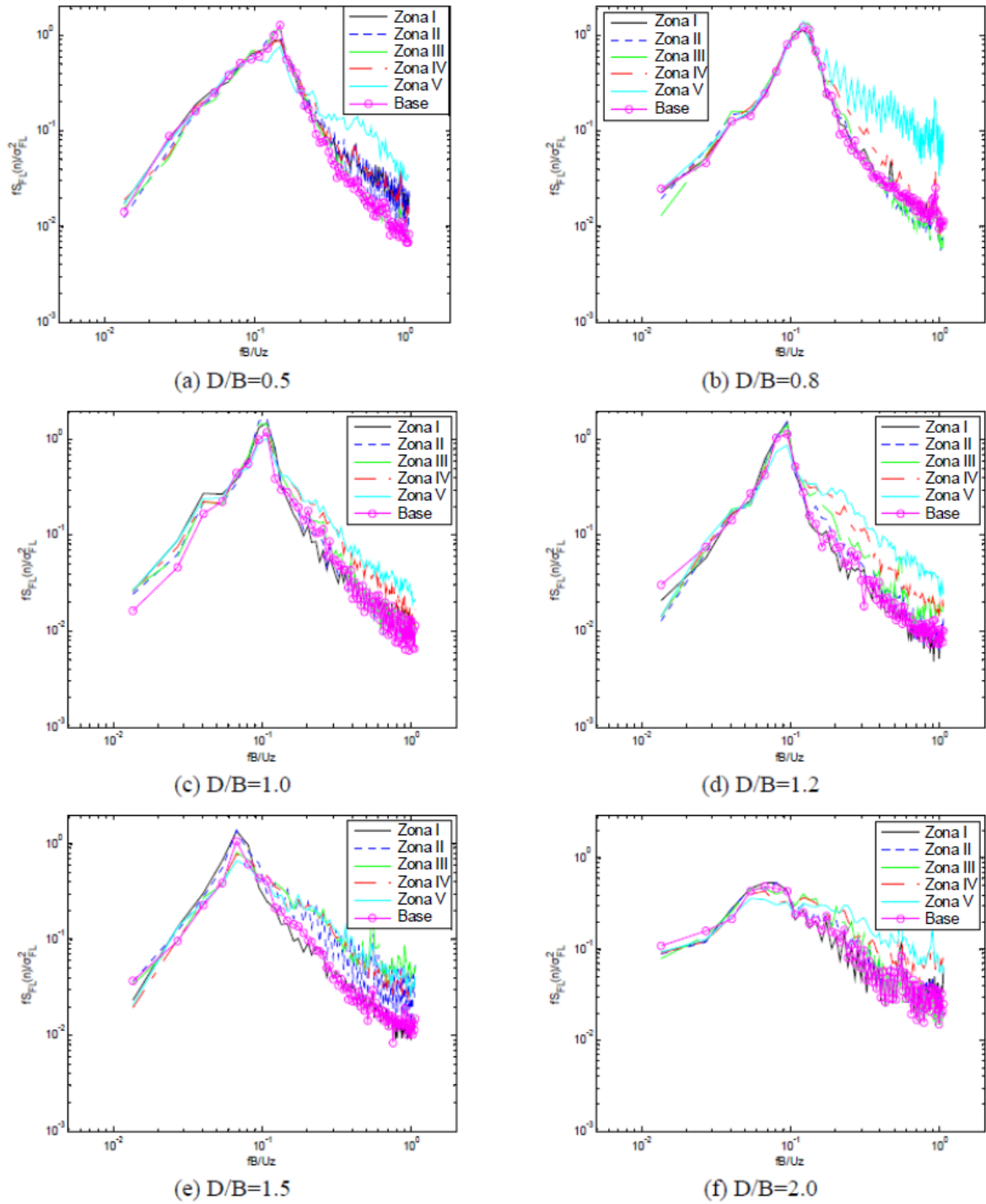


Figura 2. 24 – Espectro da força transversal de edifícios em formato de “L” com dimensões geométricas variadas. Fonte: Adaptado de Li e Li (2016)

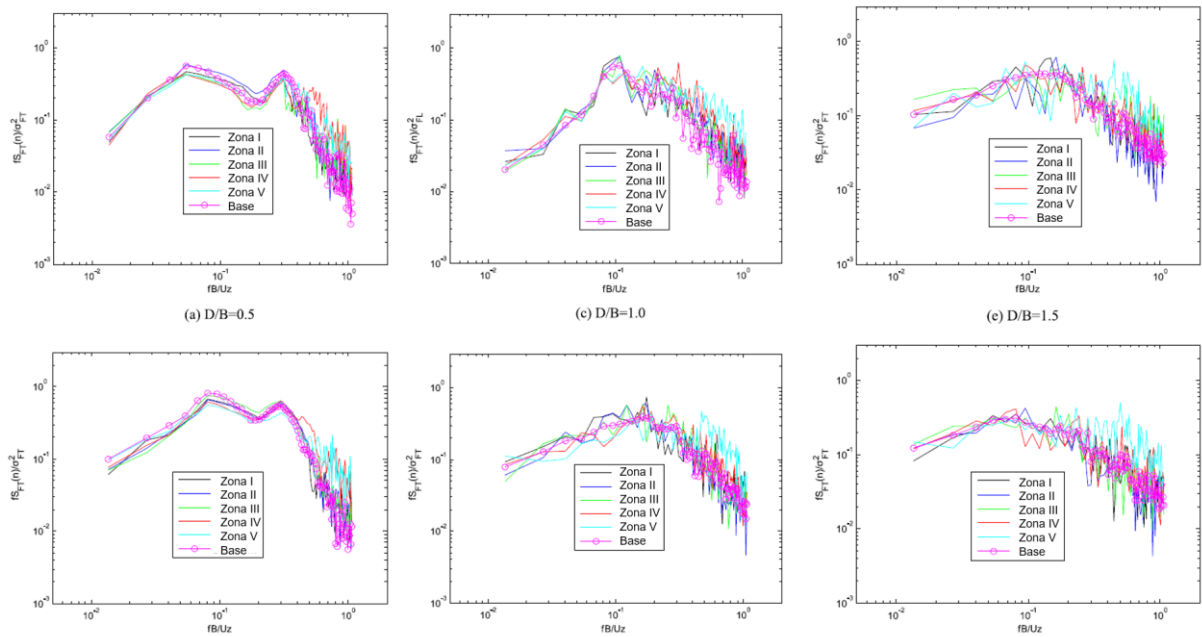


Figura 2. 25 – Espectro de torção de edifícios em formato de “L” com dimensões geométricas variadas. Fonte: Adaptado de Li et al. (2017)

2.8.2 Tanaka *et al.*

Tanaka *et al.* (2012) conduziram uma série de experimentos com o intuito de investigar qual seria a forma geométrica mais efetiva em projetos resistentes ao vento. Dentre os modelos selecionados para o ensaio (Figura 2. 26) existem modelos básicos (com seções quadradas ou circulares), modelos com modificações nos cantos, inclinações e aberturas, além de outros compostos que incluem mais de uma modificação ao mesmo tempo. Para cada tipo de modelo, existem ainda variações nos tamanhos dos chanfros, aberturas ou inclinações. Os testes consistiram em aferir as medidas de pressão do vento, com o objetivo de examinar as características das forças locais e o fenômeno aerodinâmico em detalhe.

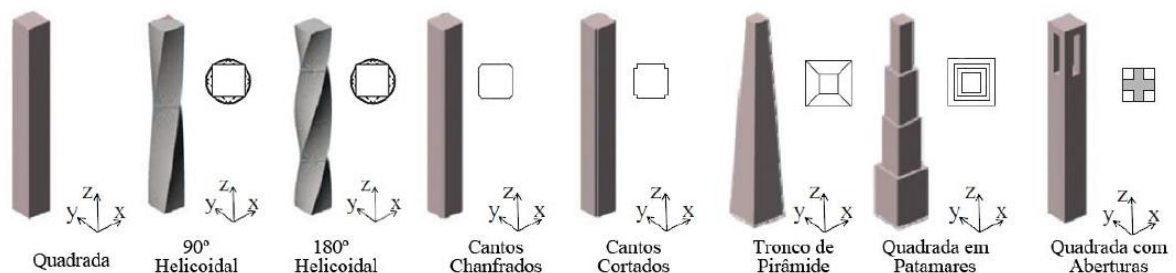


Figura 2. 26 – Modelos utilizados nos ensaios
Fonte: Carini (2017) adaptado de Tanaka et al. (2012)

Na análise da densidade espectral dos coeficientes de força, os autores avaliaram e compararam os valores máximos de pico e a largura de banda do espectro de potências. Concluiu-se que, de modo geral, a largura de banda apresenta um comportamento inverso ao pico: quando a banda é larga, o pico tende a ser mais plano, e assume-se que o desprendimento de vórtices se torna aleatório e irregular. Tal irregularidade contribui para ações devidas ao vento de menor intensidade. Por outro lado, quando a banda é estreita e o pico agudo, há uma indicação de que fortes vórtices estão se desprendendo regularmente.

A Figura 2. 27 apresenta os resultados da análise espectral realizada. A figura aponta, para cada uma das seções transversais dos modelos ensaiados, os espectros do coeficiente de força transversal para diferentes zonas, que variam desde a metade da altura até o topo do modelo. Em resposta à análise, observou-se que, no caso da seção quadrada, o número de Strouhal (frequência reduzida correspondente ao pico do espectro) varia pouco ao longo da altura, o que significa que todos os componentes de vórtices estão sendo desprendidos praticamente ao mesmo tempo ao longo das zonas, excitando fortemente os modelos na direção transversal. Em contraste, para os modelos tronco de pirâmide, quatro patamares e helicoidal 180°, este número varia muito ao longo da altura e, portanto, a força transversal resultante decresce correspondentemente.

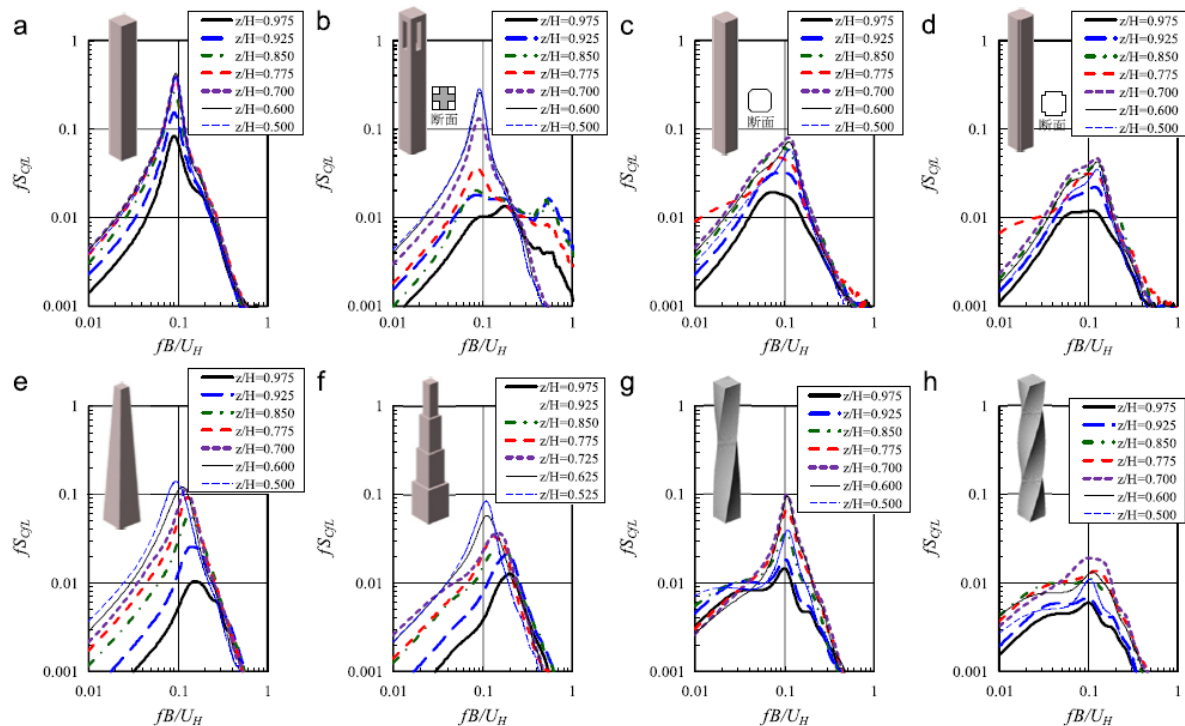


Figura 2. 27 – Espectros de potência dos coeficientes de força transversais locais. (a) Quadrada, (b) com aberturas, (c) cantos chanfrados, (d) cantos cortados, (e) tronco de pirâmide, (f) em patamares, (g) helicoidal 90°, (h) helicoidal 180°.

Fonte: Tanaka et al. (2012)

Em regra, os modelos compósitos apresentaram um melhor desempenho aerodinâmico quando comparado aos modelos com apenas uma modificação. No modelo helicoidal 180°, fracos vórtices com largas bandas de frequência são desprendidos irregularmente ao longo da altura, resultando no melhor desempenho aerodinâmico dentre as formas em estudo quanto às ações transversais.

2.8.3 Liang *et al.*

Liang *et al.* (2002) estudaram a ação dinâmica na direção transversal de edifícios altos em formato retangular e propuseram um modelo matemático para sua formulação. A expressão resultante é baseada em resultados empíricos de oito modelos ensaiados em túnel de vento, os quais apresentam quatro tipos de razão profundidade/largura ($D/B = 1, 2, 3$ e 4) e dois tipos de altura ($H=0,4$ e $0,8$ m). Além de uma fórmula para o espectro da força transversal, os autores também propuseram uma equação para determinação do número de Strouhal (equação 2.4).

Segundo os autores, a força transversal agindo num edifício retangular é essencialmente causada por desprendimento alternado de vórtices, o que pode ser observado na curva do espectro da ação transversal. “Existe um pico notório na curva [...] e a frequência reduzida correspondente ao pico equivale à frequência reduzida dominante de desprendimento de vórtices, nomeadamente o número de Strouhal” (LIANG S. *et al.*, 2002, p. 1761).

As conclusões do estudo mostram que o número de Strouhal é praticamente constante para $1/4 \leq D/B \leq 1/2$, e quando $1/2 < D/B \leq 4$ ele decresce à medida que a razão D/B aumenta. Quanto ao espectro da ação transversal, para $1/4 \leq D/B \leq 3$ existe apenas um pico que se torna mais estreito e agudo conforme se aumentam as razões B/H e D/B . Por fim, quando os valores de D/B se tornam maiores que três, a curva passa a apresentar dois picos, sendo que o segundo é atribuído ao recolamento da camada limite.

Os mesmos autores fizeram um estudo similar relativo ao momento torçor (LIANG *et al.*, 2004), concluindo que existem diferenças evidentes no espectro para $D/B \geq 1$ e $D/B < 1$. No primeiro caso, as curvas apresentam dois picos, em que o primeiro é causado principalmente pelas pressões assimétricas devido a desprendimento de vórtices nas duas fachadas laterais, e o segundo é atribuído ao recolamento da camada limite. Os espectros possuem bandas largas e os dois picos são suaves.

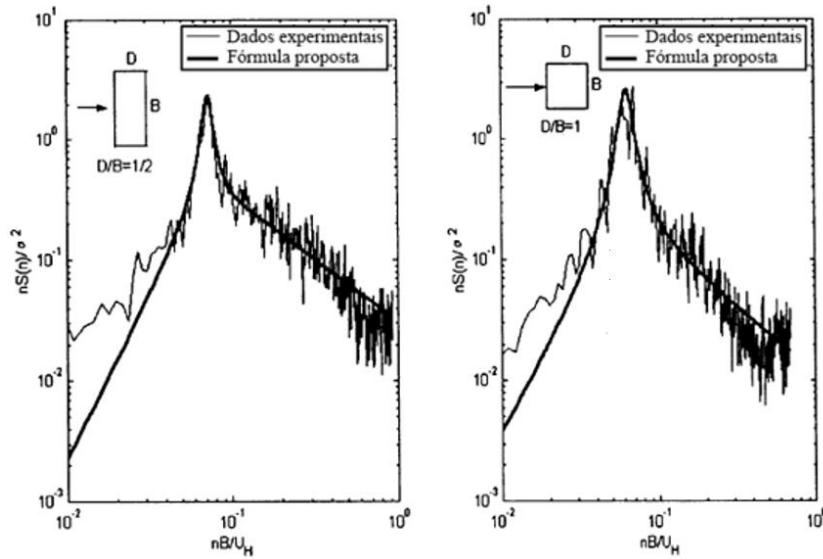


Figura 2. 28 – Espectro da força transversal de edifícios altos com seção transversal retangular. Fonte: Liang S. et al. (2002)

$$St = \begin{cases} 0,094 & 1/4 \leq D/B \leq 1/2, \\ 0,002(D/B)^2 - 0,023(D/B) + 0,105 & 1/2 < D/B \leq 4. \end{cases} \quad (2.4)$$

Por outro lado, quando $D/B < 1$, a formação da componente dinâmica do momento torçor é dada principalmente pela alternância de pressões provocada pelo desprendimento de vórtices na fachada a sotavento (quando a fachada a barlavento possui a maior dimensão), além de existir ainda uma contribuição das pressões assimétricas na fachada a barlavento originada pela turbulência atmosférica.

Com relação ao número de Strouhal, os autores concluíram que a razão entre a frequência dominante do espectro da força transversal em relação ao espectro do momento torçor é em média de 0,85.

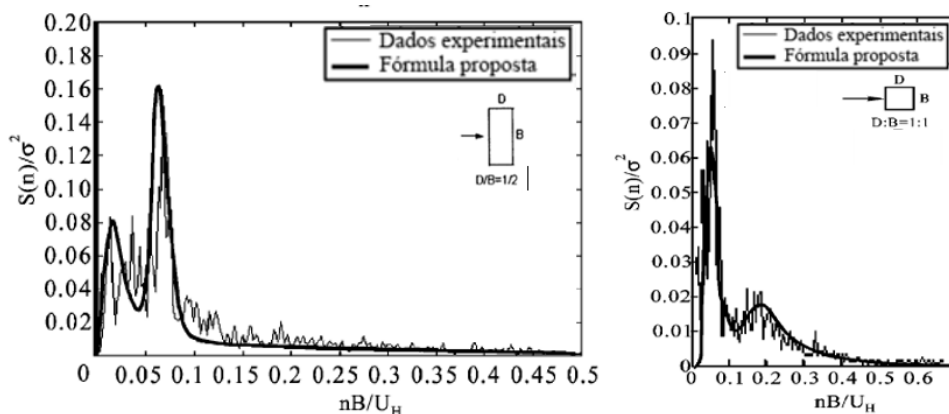


Figura 2. 29 – Espectro do momento torçor de edifícios altos com seção transversal retangular. Fonte: Liang et al. (2004)

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente estudo considerou os dados experimentais de dois edifícios reais, construídos no Brasil e ensaiados no túnel de vento *Prof Joaquim Blessmann*, do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Ambos os edifícios, aqui denominados Prédio A e Prédio B, possuem uma geometria similar, em formato de “V”, mas diferentes dimensões. A partir dos dados de ensaio, foi feita uma análise detalhada das ações do vento agindo nos edifícios, local e globalmente, utilizando especialmente a análise espectral para avaliar as ações dinâmicas atuantes. Adicionalmente, foi feita uma investigação acerca da admitância aerodinâmica correspondente a tais carregamentos.

O principal objetivo foi o de identificar padrões de comportamento comuns a ambos os prédios, de modo a verificar tendências que possam ser extrapoladas a outros edifícios com características arquitetônicas semelhantes. O tratamento dos dados experimentais e a geração dos espectros de potência foram feitos com auxílio do *Software Matlab*.

Neste capítulo serão apresentadas as características dos edifícios em estudo, as configurações em análise, assim como descrições do túnel de vento, método de ensaio e análise de dados, além de outras informações relevantes quanto aos ensaios realizados.

3.1 DESCRIÇÃO DOS MODELOS

A Figura 3. 1 ilustra a geometria em planta e a vista tridimensional dos edifícios em estudo, ao passo que o Quadro 3. 1 apresenta um resumo das principais características. Para a realização dos ensaios, foram utilizados modelos reduzidos rígidos, e testou-se tanto o modelo isolado, quanto considerando as condições de vizinhança. Na Figura 3. 2 estão representados os edifícios mais significativos compreendidos no raio de estudo, de modo a simular da forma mais fiel possível as possibilidades de interferência, sendo que apenas no Prédio A foi utilizado mesa auxiliar¹. Finalmente, a Figura 3. 3 (Prédio A) e a Figura 3. 4 (Prédio B) mostram esta representação, já dos modelos em túnel de vento, prontos para o ensaio.

¹ A mesa auxiliar aumenta o raio da mesa de simulação, permitindo assim a inclusão de mais edifícios no entorno

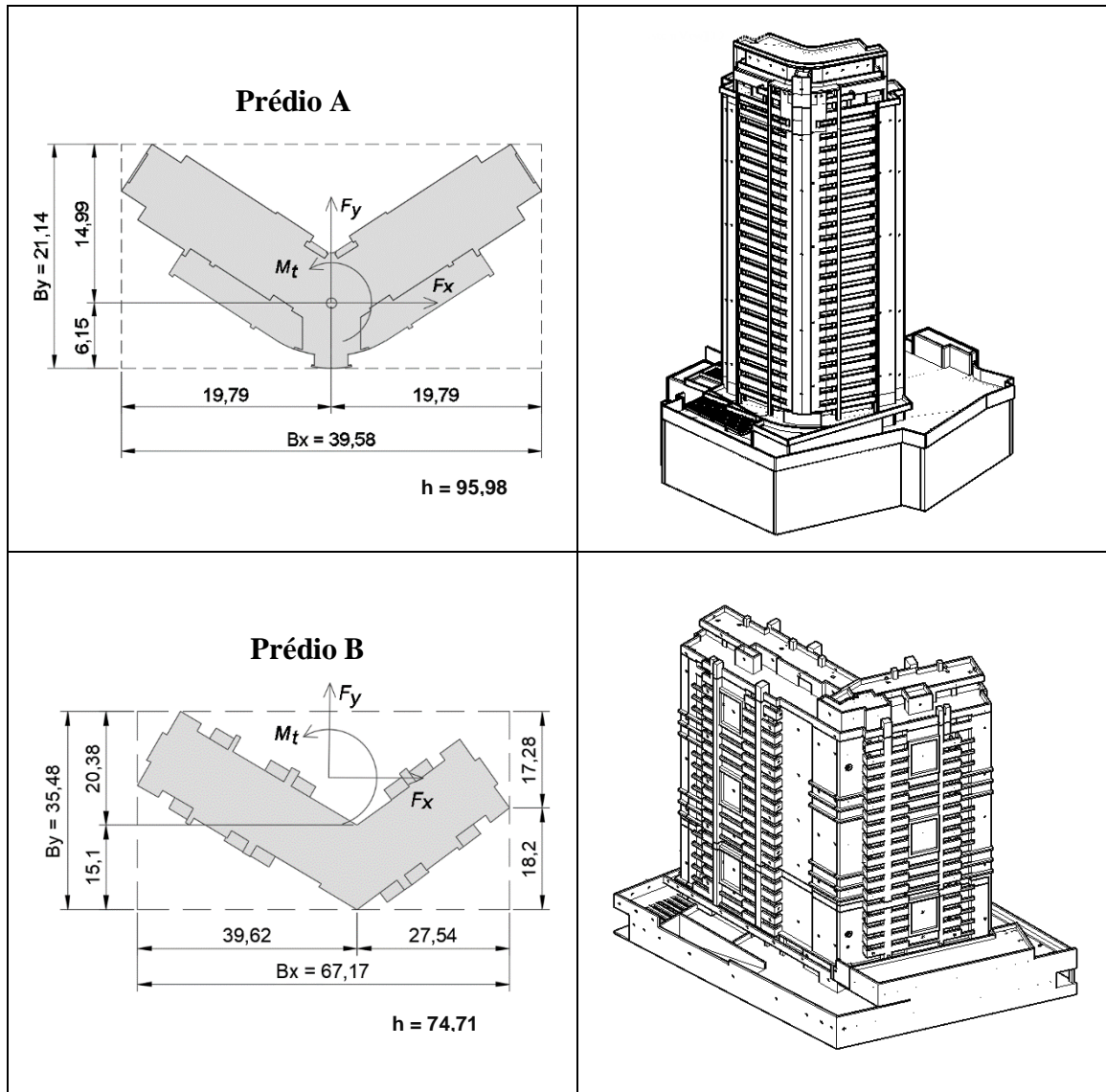
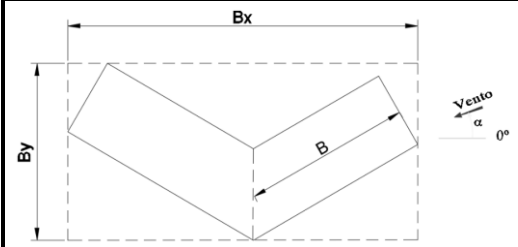


Figura 3. 1 – Representação em planta e vista 3D dos edifícios em estudo.
Fonte: Adaptado de Loredo-Souza e Rocha (2011a e 2017)

Convenções	PA	PB
		
h [m]	95,98	74,71
Bx [m]	39,58	67,17
By [m]	21,14	35,48
B [m]	25,69	29,98
t [m]	7,5	15
Escala	1:300	1:350
Tomadas	208	347

Quadro 3. 1 – Resumo das principais características dos edifícios em estudo
Fonte: O autor (2018)

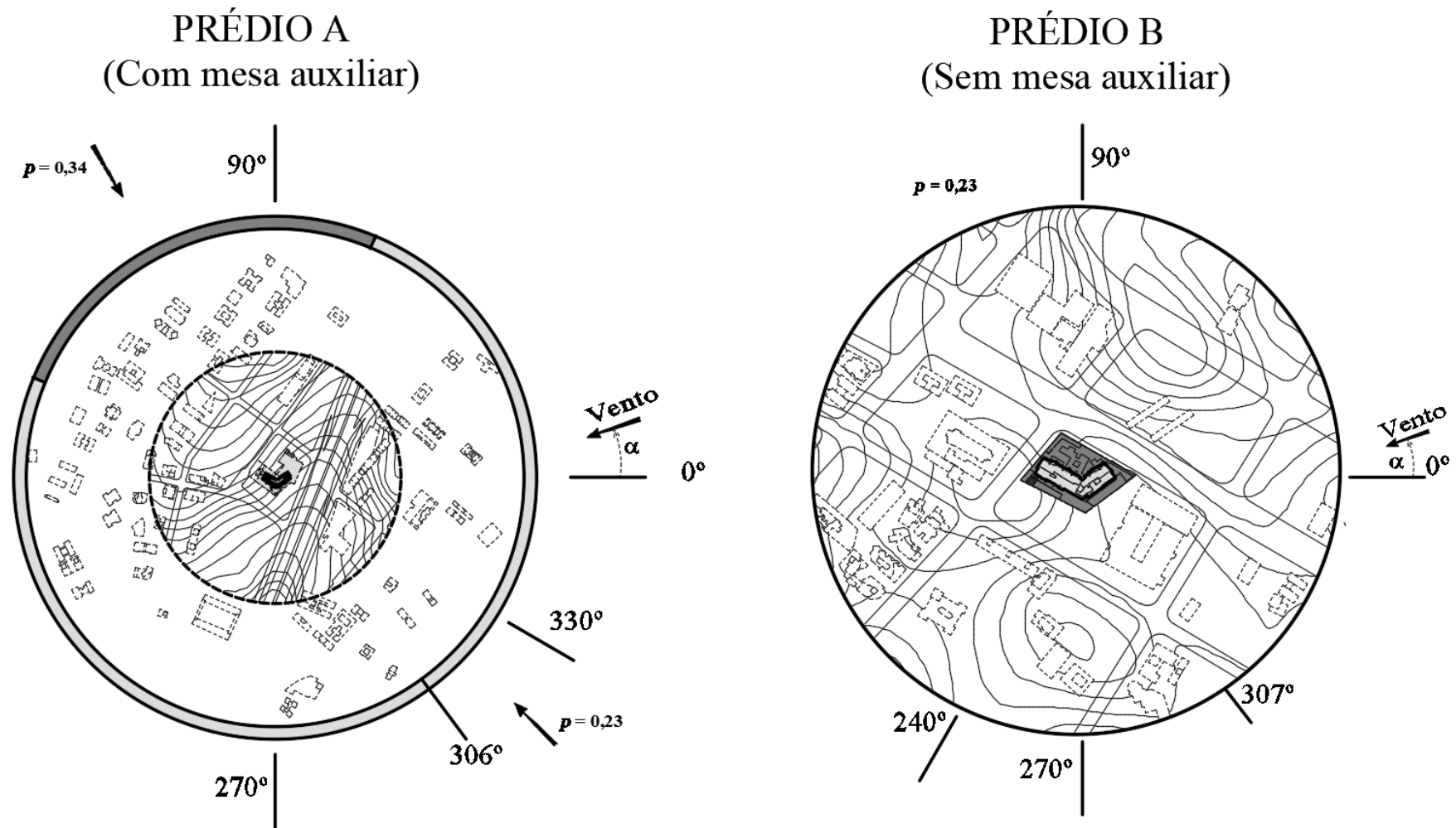


Figura 3. 2 – Representação da vizinhança dos edifícios em estudo.
Fonte: Adaptado de Loredou-Souza e Rocha (2011a e 2017)



Figura 3.3 – Ensaio em túnel de vento considerando as condições de vizinhança – vista da fachada frontal do Prédio A. Fonte: Loredo-Souza e Rocha (2011a).



Figura 3.4 – Ensaio em túnel de vento considerando as condições de vizinhança – vista da fachada frontal do Prédio B. Fonte: Loredo-Souza e Rocha (2017)

3.1.1 Configurações de ensaio

Para realizar uma análise preliminar das ações atuantes em cada um dos edifícios, foram selecionados inicialmente quatro ângulos de incidência do vento, dos quais se espera obter as características predominantes dos carregamentos globais. A Figura 3.5 ilustra a convenção do

ângulo de incidência do vento e a numeração das fachadas, e a Figura 3. 6 (Prédio A) e Figura 3. 7 (Prédio B) apresentam os casos de estudo considerados conforme o ângulo de incidência do vento, que seguem:

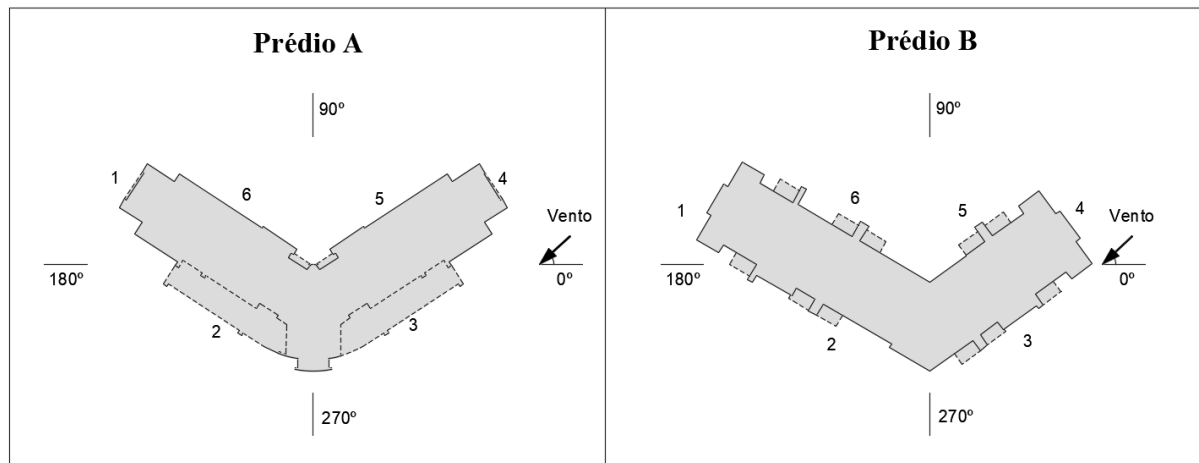


Figura 3. 5 – Representação das fachadas e convenção para o ângulo de incidência do vento
Fonte: Adaptado de Loredo-Souza e Rocha (2011a e 2017)

- a) CASO 1-A: Vento atuando com incidência de 90° (Prédio A);
- b) CASO 2-A: Vento atuando com incidência de 306° (Prédio A);
- c) CASO 3-A: Vento atuando com incidência de 330° (Prédio A);
- d) CASO 4-A: Vento atuando com incidência de 270° (Prédio A);
- e) CASO 1-B: Vento atuando com incidência de 90° (Prédio B);
- f) CASO 2-B: Vento atuando com incidência de 307° (Prédio B);
- g) CASO 3-B: Vento atuando com incidência de 270° (Prédio B);
- h) CASO 4-B: Vento atuando com incidência de 240° (Prédio B);

Os resultados globais das referidas incidências serão utilizados como base para análises mais detalhadas. Para as configurações que mostrarem os resultados mais críticos, os carregamentos serão avaliados localmente, separando-os por zonas e fachadas, de modo a compreender a influência da esteira e da altura na formação dos carregamentos. Adicionalmente, em alguns casos específicos serão consideradas as tomadas de pressão individualmente.

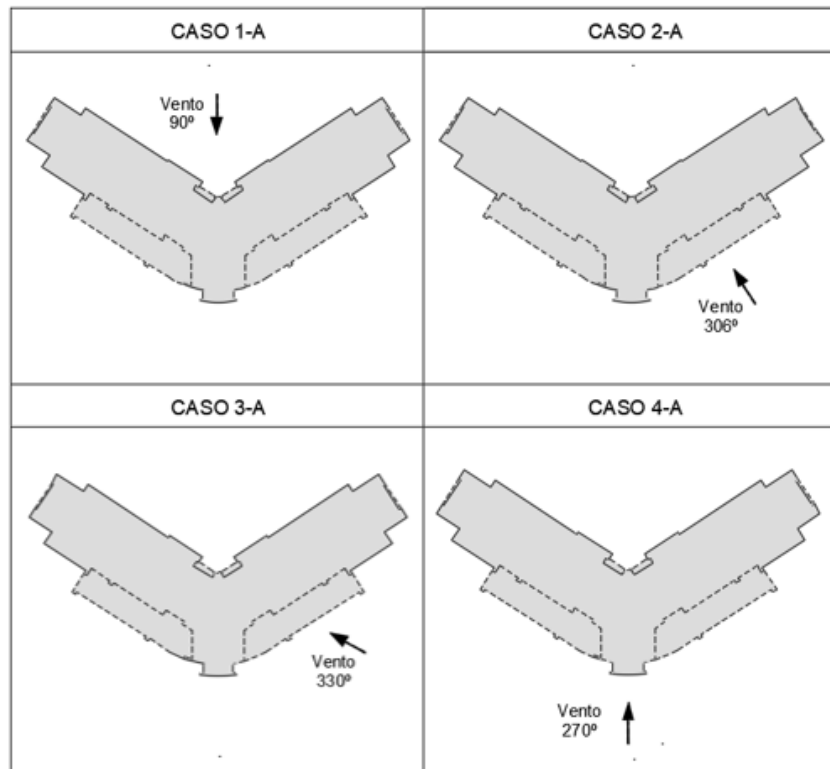


Figura 3. 6 – Ilustração dos casos de estudo – Prédio A
 Fonte: O Autor (2018)

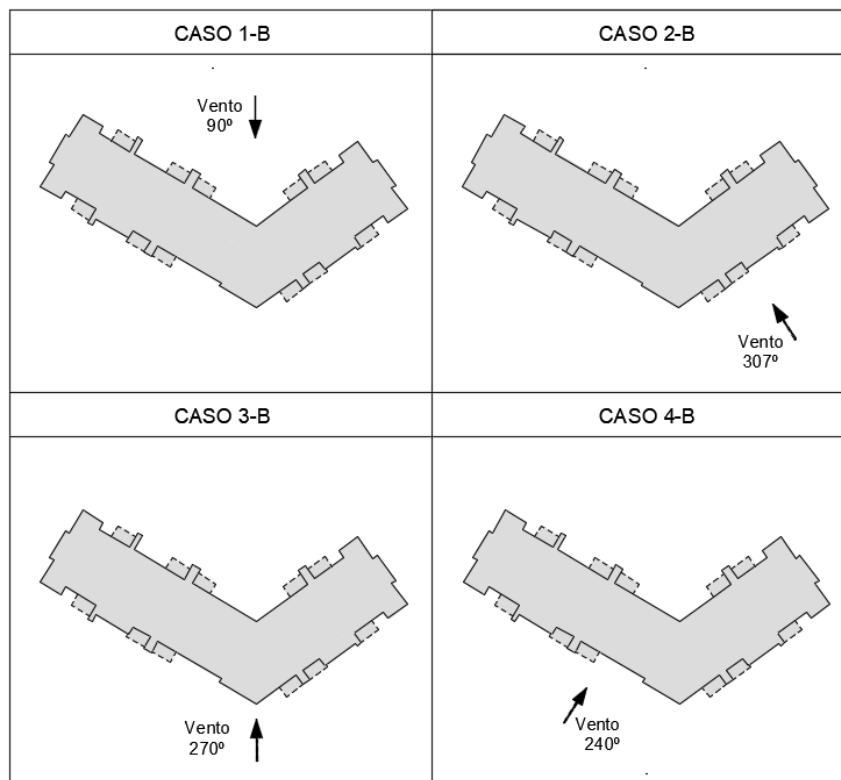


Figura 3. 7 – Ilustração dos casos de estudo – Prédio B
 Fonte: O Autor (2018)

3.1.2 Método de medição de pressões simultâneas

Neste procedimento de ensaio, que serve de base para o método conhecido como HFPI (*High Frequency Pressure Integration*), são medidas simultaneamente as pressões em centenas de pontos localizados no modelo rígido, e por integração numérica podem ser determinadas as forças médias, flutuantes e modais de cada modo de vibração. A vantagem deste método é a de que ele é capaz de determinar com maior precisão as ações em torção, por exemplo, em função da altura do edifício. A desvantagem, no entanto, é que para edifícios com uma arquitetura mais complexa pode não ser viável realizar a medição de tantos pontos de pressão no modelo.

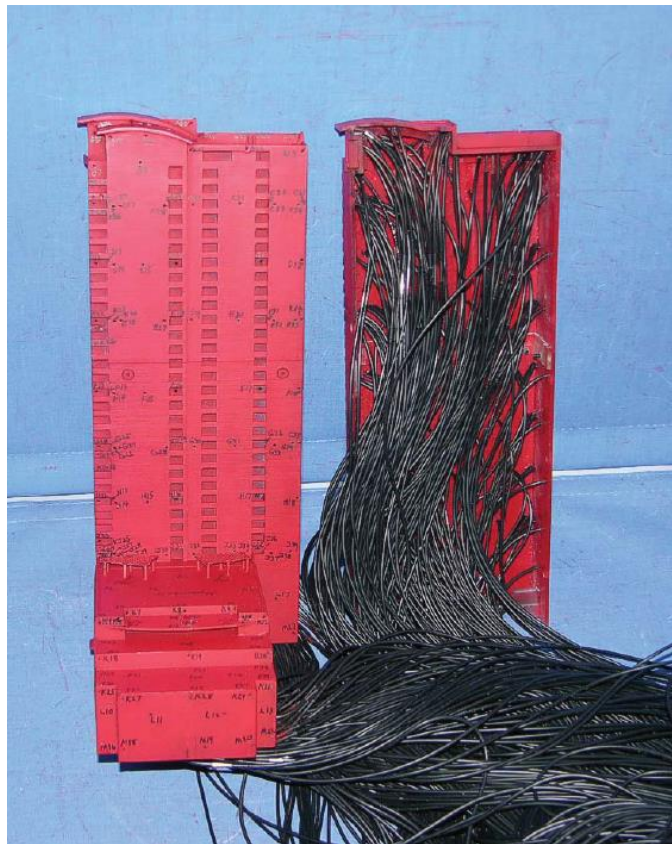


Figura 3. 8 – Exemplo de modelo instrumentado com centenas de tomadas de pressões. Fonte: Irwin *et al.* (2013)

Os equipamentos utilizados no ensaio em questão, da marca *Scanivalve*®, incluem um transdutor de pressões modelo ZOC33 e um *software* para aquisição de pressões RAD 4000. Maiores detalhes sobre o registro das pressões serão expostos no tópico 3.4.2.

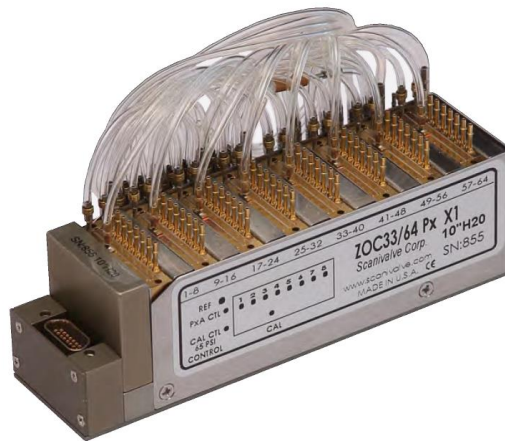


Figura 3. 9 – Modelo do transdutor de pressões utilizado.
Fonte: Scanivalve® (2016)

Os modelos do presente estudo foram instrumentados com tomadas de pressões posicionadas de modo a permitir uma representação adequada da distribuição de pressões. Foram utilizadas 208 tomadas no Prédio A e 347 no Prédio B. Na Figura 3. 10 (Prédio A) e Figura 3. 12 (Prédio B) é possível observar o padrão de distribuição das tomadas de pressão em planta, e ao longo da altura na Figura 3. 13 (Prédio A) e Figura 3. 11 (Prédio B). A definição da quantidade de tomadas utilizadas refere-se principalmente ao volume de detalhes arquitetônicos presentes no modelo.

As edificações foram divididas em zonas, identificadas por **I, II, III, IV, V e VI**, permitindo a análise dos resultados no âmbito local.

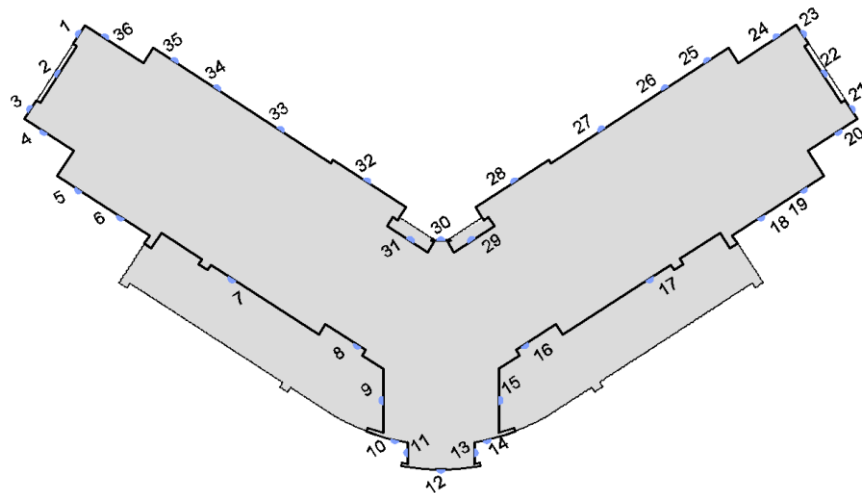


Figura 3. 10 – Representação em planta da distribuição das tomadas de pressão – corte representativo da Zona I do Prédio A
Fonte: Adaptado de Loredo-Souza e Rocha (2011a)

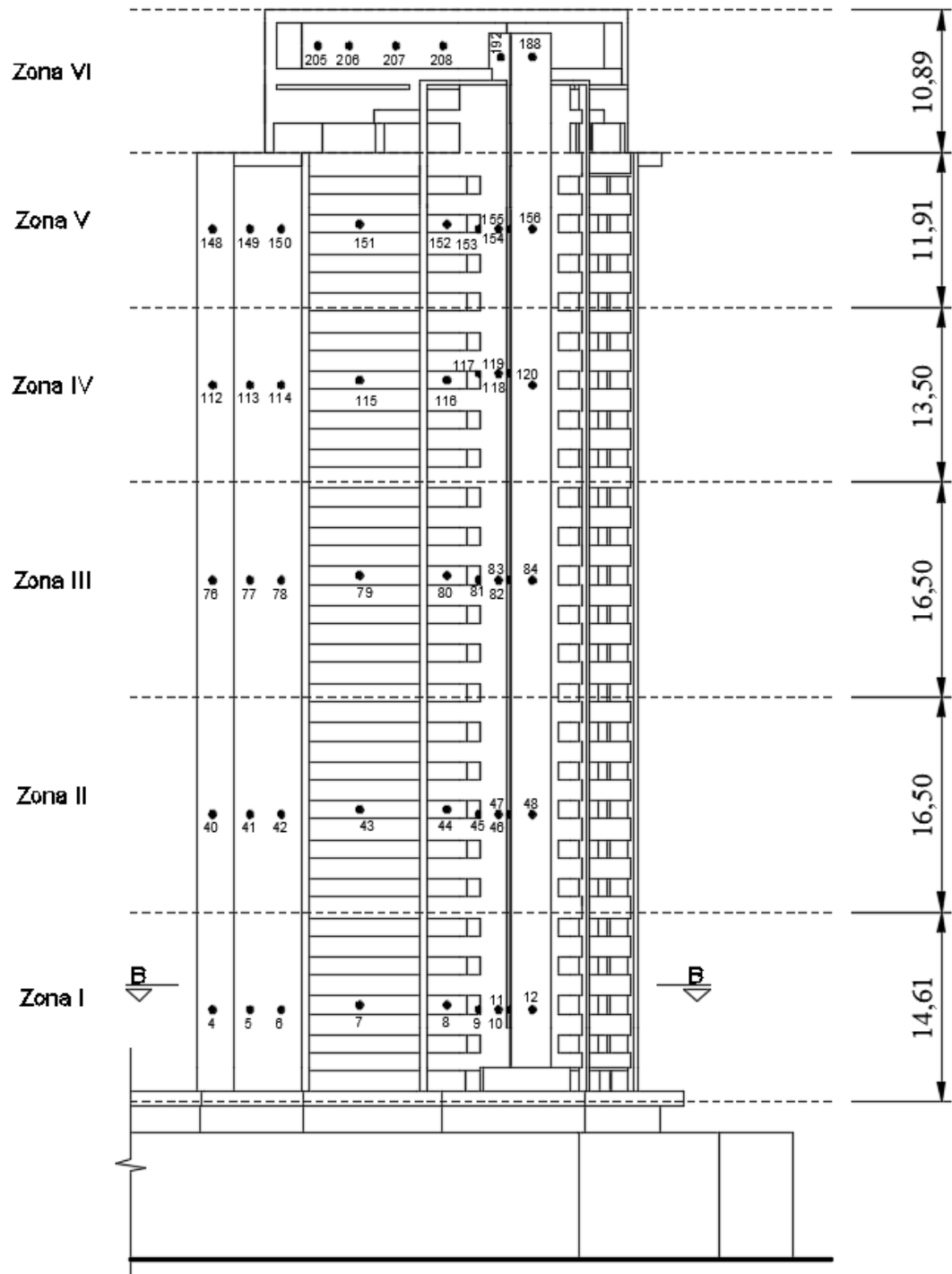


Figura 3. 11 – Representação da distribuição das tomadas de pressão ao longo da altura - Fachada 2, Prédio A.

Fonte: Adaptado de Loredou-Souza e Rocha (2011a)

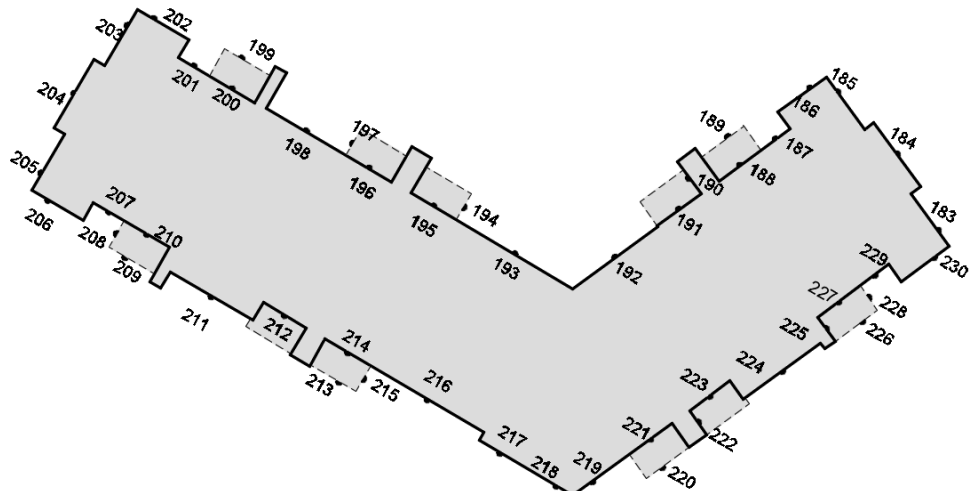


Figura 3. 12 – Representação em planta da distribuição das tomadas de pressão – corte representativo da Zona II, Prédio B.
Fonte: Adaptado de Loredo-Souza e Rocha (2017)

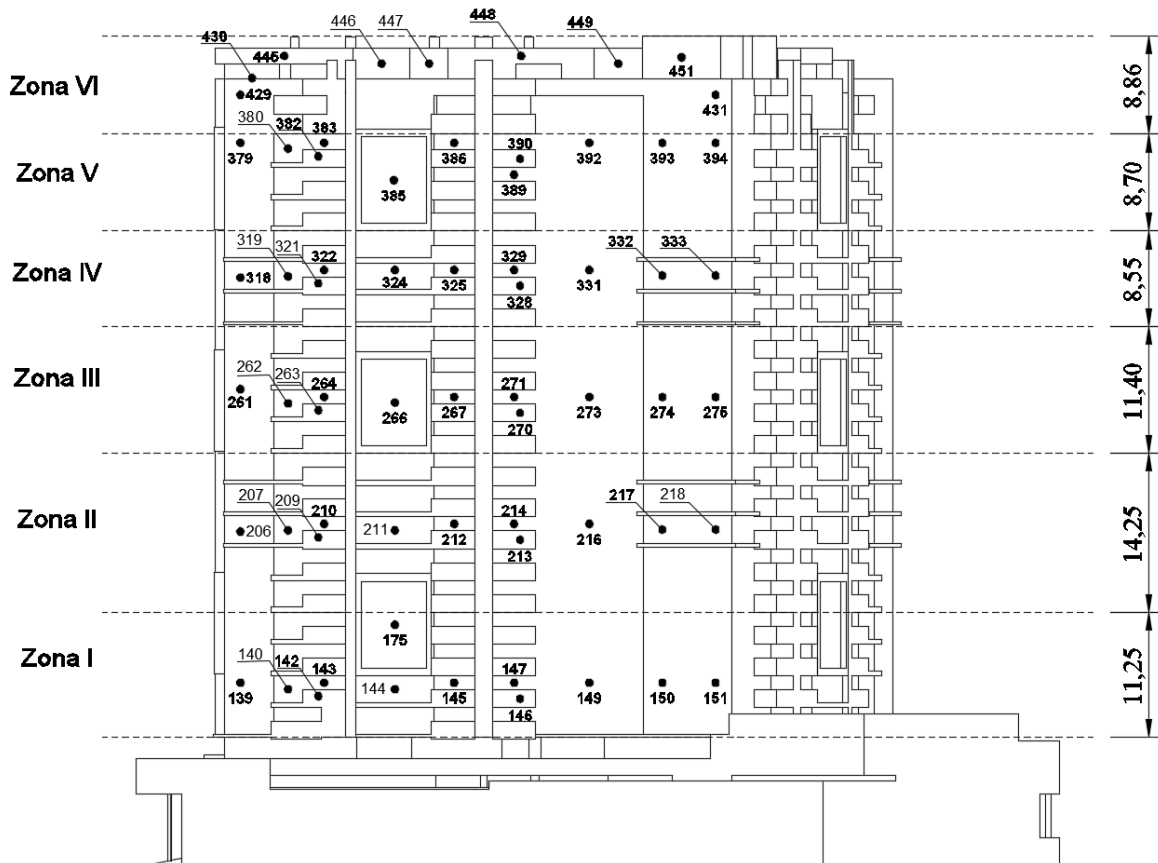


Figura 3. 13 – Representação da distribuição das tomadas de pressão ao longo da altura - Fachada 2, Prédio B.
Fonte: Adaptado de Loredo-Souza e Rocha (2017)

Em estruturas alteadas, o carregamento aerodinâmico pode ser descrito por três componentes: Força na direção x (F_x), força na direção y (F_y) e Momento torçor (M_t) (ver convenções adotadas na Figura 3. 1).

$$F_x(z,t) = (p_d \Delta z D) C_x(z,t) \quad (3.1)$$

$$F_y(z,t) = (p_d \Delta z D) C_y(z,t) \quad (3.2)$$

$$M_z(z,t) = (p_d \Delta z DB) C_t(z,t) \quad (3.3)$$

Sendo:

C_x, C_y, C_t – coeficientes aerodinâmicos adimensionais;

p_d – pressão dinâmica de referência (em geral no topo do edifício);

Δz – altura do segmento (vertical) da edificação;

B e D – dimensões de referência da seção transversal.

Conforme (LOREDO-SOUZA e ROCHA, 2011b), durante o ensaio mede-se um valor de pressão em cada tomada, e a ela é atribuída uma área de influência (A_i) correspondente. Analisando-se um segmento vertical da edificação, por exemplo, realiza-se a integração correspondente a todas as tomadas situadas no segmento em estudo. A título de exemplo, a Figura 3. 14 ilustra uma seção transversal horizontal de uma estrutura com forma arbitrária. A integração sobre o referido segmento é feita com a expressão:

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

Sendo:

$\vec{P}(t)$ – força resultante no tempo t ;

$p(t)$ – pressão local no tempo t ;

\vec{u} – cossenos diretores da superfície onde $p(t)$ é medido;

S – superfície (“zona”) para a qual se deseja obter a resultante $\vec{P}(t)$;

n – número de tomadas presentes na zona de integração;

$p_i(t)$ – pressão medida na i -ésima tomada no tempo t ;

\vec{u}_i – cossenos diretores da normal à superfície onde $p_i(t)$ é medido;

A_i – área de influência da i -ésima tomada;

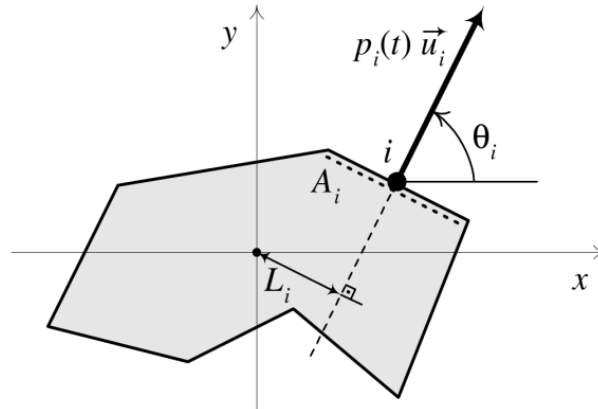


Figura 3. 14 – Referências para conversão de registros de pressão em registros de componentes horizontais de força, F_x e F_y , e de momento torçor, M_t . Fonte: Loredo-Souza e Rocha (2011b)

3.2 TÚNEL DE VENTO *PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN*

Os ensaios foram realizados no túnel de vento *Prof. Joaquim Blessmann* da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Figura 3. 15). Trata-se de um túnel de vento de camada limite de circuito fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis. Este túnel permite a simulação das principais características de ventos naturais. Tem relação “comprimento / altura” da câmara de ensaios superior a 10. A velocidade do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme e sem modelos, ultrapassa 160 km/h. (LOREDO-SOUZA; ROCHA, 2011a).

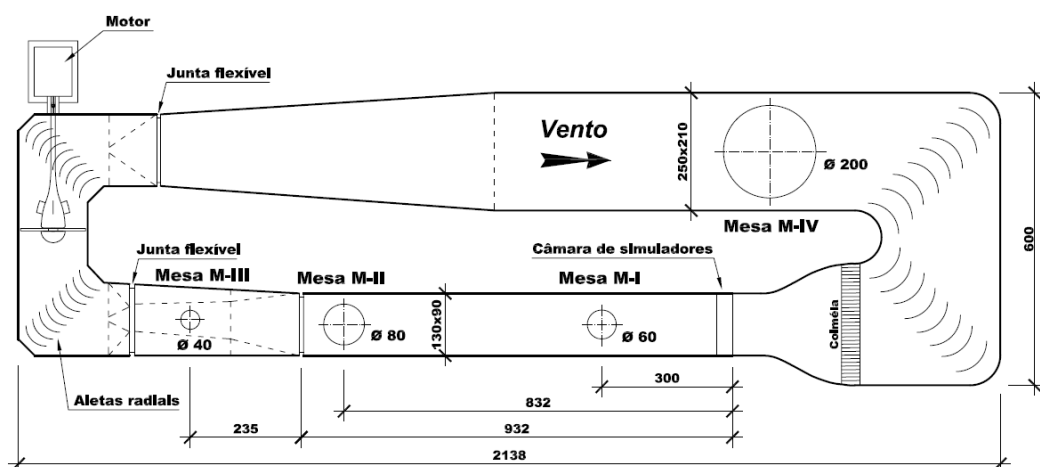


Figura 3. 15 – Túnel de vento *Prof Joaquim Blessmann*
Fonte: Loredo-Souza e Rocha (2011a)

O túnel de vento dispõe de quatro mesas giratórias, onde são realizados ensaios estáticos e dinâmicos, cada qual com uma finalidade específica. Neste estudo foi utilizada a mesa M-II que, de acordo com Blessmann (2011), permite a execução de ensaios para a construção civil com a correta simulação da camada limite atmosférica, por meio de blocos colocados no piso e geradores de turbulência na câmara de simuladores ou com jatos transversais.

Durante a realização dos ensaios, a velocidade do vento é monitorada através da medida diferencial de pressão estática (Δpa), medida entre dois anéis piezométricos situados nos extremos do convergente da entrada da câmara principal. Para cada perfil de velocidades simulado, há um valor do coeficiente k_0 , que vincula o diferencial de pressão estática com a pressão dinâmica de referência (CARINI, 2017, p. 37).

$$q_m = k_0 \Delta pa \quad (3.5)$$

Sendo:

q_m – pressão dinâmica correspondente à altura do topo do modelo [Pa];

k_0 – coeficiente que vincula q_m a Δpa ;

Δpa – diferencial de pressão estática [Pa].

A partir da pressão dinâmica, determina-se a velocidade do ar no túnel de vento:

$$v_m = k_b \sqrt{\frac{2q_m}{\rho_{ar}}} \quad (3.6)$$

Sendo:

v_m – velocidade de escoamento no topo do modelo [m/s];

k_b – fator de bloqueio, considerado igual a 1;

ρ_{ar} – massa específica do ar [kg/m³].

A massa específica do ar é função da temperatura e da umidade relativa do ar dentro do túnel:

$$\rho_{ar} = \frac{1}{\Theta} \left(\frac{P_{atm}}{R_0} - \phi P_w \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) \right) \quad (3.7)$$

Sendo:

Θ – temperatura [K];

P_{atm} – pressão atmosférica [Pa];

R_0 – constante dos gases para o ar seco (igual a 287,05 J/kgK);

R_w – constante dos gases para o vapor d'água (igual a 461,5 J/kgK);

ϕ – umidade relativa do ar;

P_w – pressão de vapor (igual a $0,0000205e^{0,0631846T}$).

3.3 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL

De acordo com as características da rugosidade do terreno em torno do Prédio A, foram simulados dois ventos, com perfis potenciais de velocidades médias de expoentes p iguais a 0,23 (rugosidade representativa das Categorias III e IV - NBR 6123) e 0,34 (rugosidade Categoria V - NBR 6123) (LOREDO-SOUZA; ROCHA, 2011a). No Prédio B foi utilizado apenas o perfil potencial p igual a 0,23.

As características das rugosidades dos terrenos simulados, de acordo com a NBR 6123 (ABNT, 1988), são as seguintes:

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

Exemplos:

- Granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos;
- Fazendas com sebes e/ou muros;
- Subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas;

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

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

- Zonas de parques e bosques com muitas árvores;
- Cidades pequenas e seus arredores;
- Subúrbios densamente construídos de grandes cidades;
- Áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.

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

Categoria V – terreno coberto por obstáculos numerosos, grandes, altos e poucos espaçados. Exemplos:

- Florestas com árvores altas e copas isoladas;
- Centros de grandes cidades;
- Complexos industriais bem desenvolvidos;

A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 25,0m.

Em torno do modelo instrumentado foram reproduzidas as edificações mais próximas e relevantes, de modo que as condições de escoamento correspondessem o mais fielmente possível às condições reais às quais a edificação testada estará sujeita depois de construída. Os perfis de velocidades médias são expressos, aproximadamente, pela lei potencial:

$$\frac{\bar{V}(x_3)}{\bar{V}_{ref}} = \left(\frac{x_3}{x_{ref}} \right)^p \quad (3.8)$$

Sendo:

$\bar{V}(x_3)$ – Velocidade média na altura;

\bar{V}_{ref} – velocidade média em uma altura de referência (no túnel, = 450 mm – cota do eixo longitudinal do túnel);

$p = 0,23$ e $0,34$.

3.4 TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Neste item serão apresentados os procedimentos adotados para tratamento e análise dos dados de ensaio. Os procedimentos serão apresentados em três tópicos distintos: vento incidente, ações atuantes e admitância aerodinâmica.

3.4.1 Vento incidente

Inicialmente foi simulado o vento natural em túnel de vento, sem a inclusão do modelo do edifício, e foram aferidas as velocidades de escoamento do vento que se aproxima, utilizando um anemômetro de fio quente para uma melhor precisão.

Toda a aparelhagem utilizada nesse ensaio, incluindo calibrador, *software* e o anemômetro propriamente dito (Figura 3. 16), são da marca *Dantec Dynamics*®, sendo o *software* de aquisição denominado *Streamware*.



Figura 3. 16 – Anemômetro de fio quente para medição da velocidade do vento
Fonte: O autor (2018)

Do ensaio, foram obtidas séries temporais da componente longitudinal da velocidade com duração de 60 segundos, à taxa de aquisição de 2048 Hertz. As medidas foram realizadas em 32 alturas diferentes até a posição de 650 milímetros, com destaque para as alturas de 200 e 140 milímetros, que correspondem em escala a aproximadamente 70% da elevação dos prédios A e B, respectivamente. O valor de 70% da altura foi adotado pois corresponde ao ponto de

estagnação, onde o escoamento do ar se divide, tendo uma parcela direcionada para o topo do edifício e outra que deflete para baixo.

As séries temporais de velocidade do vento foram convertidas para o domínio da frequência, a partir de um *script* em Matlab elaborado pelo professor Marcelo Maia Rocha. Para facilitar a compreensão dos gráficos, os espectros foram suavizados utilizando o comando *smooth* do programa Matlab, que processa uma média móvel centrada com o número de pontos desejado.

3.4.2 Ações atuantes

A partir da medição de pressões simultâneas, são obtidas séries temporais das medidas de pressão de cada uma das tomadas instaladas no modelo reduzido do edifício. O registro das pressões é feito por um período total de 16,8 segundos, a uma taxa de aquisição de aproximadamente 488 Hz.

Com auxílio do *Software* Matlab, a partir de um *script* próprio, essas pressões são convertidas em forças (nas direções x e y) e em momentos torçores (conforme item 3.1.2). Neste trabalho optou-se por apresentar as forças seguindo os eixos x e y, ao invés de utilizar as direções longitudinal e transversal ao vento, por ser a maneira mais prática para fins de projeto.

Por fim, utilizando integração numérica foi possível determinar as solicitações nas regiões de interesse para o estudo, sendo possível representar os esforços globais, por zonas e fachadas do edifício, ou ainda para cada tomada de pressão individualmente, nos casos em que se julgar relevante.

As séries temporais acima descritas são igualmente convertidas para o domínio da frequência (como descrito no item anterior). Por intermédio da análise espectral é possível descrever as características dos carregamentos atuantes nos dois edifícios e identificar eventuais fenômenos dinâmicos.

Além da utilização da média móvel para suavização dos espectros, os eixos x e y foram adimensionalizados, o que possibilita confrontar os resultados obtidos de um prédio com o outro, e ainda com estudos de outros autores.

Na adimensionalização do eixo x foi adotada, por convenção, uma dimensão característica do edifício (denominada B), que corresponde ao comprimento de uma aba da seção transversal – no Prédio B foi utilizada a aba de menor comprimento. A frequência reduzida (eixo x

adimensionalizado) corresponde ao número de Strouhal nas situações onde é observado desprendimento cadenciado de vórtices e, por este motivo, optou-se por utilizar uma dimensão equivalente ao utilizado por Blessmann (1998) ao determinar o número de Strouhal característico de diferentes seções transversais. Já no eixo y, os valores foram adimensionalizados multiplicando-os pela frequência correspondente e dividindo pela variância.

3.4.3 Admitância aerodinâmica

Dados o espectro da velocidade do vento e o espectro da solicitação de interesse, obtém-se a referida admitância aerodinâmica.

Visto que as séries de velocidade do vento e de pressões atuantes no edifício foram obtidas por meio de ensaios distintos, com diferentes taxas de aquisição, foi necessário realizar alguns ajustes para que ambas as curvas fossem apresentadas com a mesma quantidade de pontos e com um eixo x em comum, para assim possibilitar a divisão entre os termos. Para tanto, foi utilizado o comando *interp1* do programa Matlab, a partir do qual reduziu-se o espectro de velocidade do vento para o mesmo número de termos do espectro das ações atuantes, e realizou-se uma interpolação linear com o fim de apresentar aquele espectro com um eixo x coincidente.

Feitos os devidos ajustes das curvas, utilizou-se a equação 2.2 (conforme item 2.7.1) para se determinar a admitância aerodinâmica. Na divisão, considerou-se o espectro da velocidade do vento incidindo na elevação de 70% da altura do edifício em estudo e o espectro global da força de interesse (ambos não adimensionalizados).

Consciente das limitações da fórmula proposta, já discutidas no tópico 2.7.1, foi feita uma investigação sobre qual seria a forma de uma função que promova a transferência do espectro de velocidade do vento (que já foi extensivamente estudado e possui formulações teóricas bem consolidadas) para o espectro das forças atuantes nesses edifícios com planta em formato de “V” (para os quais não existe ainda nenhuma formulação proposta).

Não é objetivo deste trabalho a proposição de um método para a determinação da admitância aerodinâmica ou das forças atuantes, mas apenas iniciar uma investigação sobre as principais características de tais variáveis, discutindo-se os pontos de divergência mais relevantes observados entre os edifícios em estudo e os modelos teóricos existentes para edifícios bem comportados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão comentados os resultados dos casos de estudo referidos no item 3.1 do capítulo anterior. Além dos resultados da simulação do vento natural, serão apresentadas uma análise das ações atuantes em cada um dos edifícios separadamente e o estudo da admitância aerodinâmica correspondente. Por fim, este tópico será finalizado com o resumo das comparações obtidas de ambas as edificações, pontuando-se as semelhanças e divergências de maior destaque.

4.1 CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO DO VENTO

A Figura 4. 1 mostra o perfil de velocidade média e velocidade rms da componente longitudinal do vento simulado para p é igual a 0,23, enquanto que na Figura 4. 2 é apresentado o espectro na altura de referência equivalente a 70% da altura do Prédio A comparado ao espectro teórico de Von Kármán. Percebe-se que ambos estão em bom acordo.

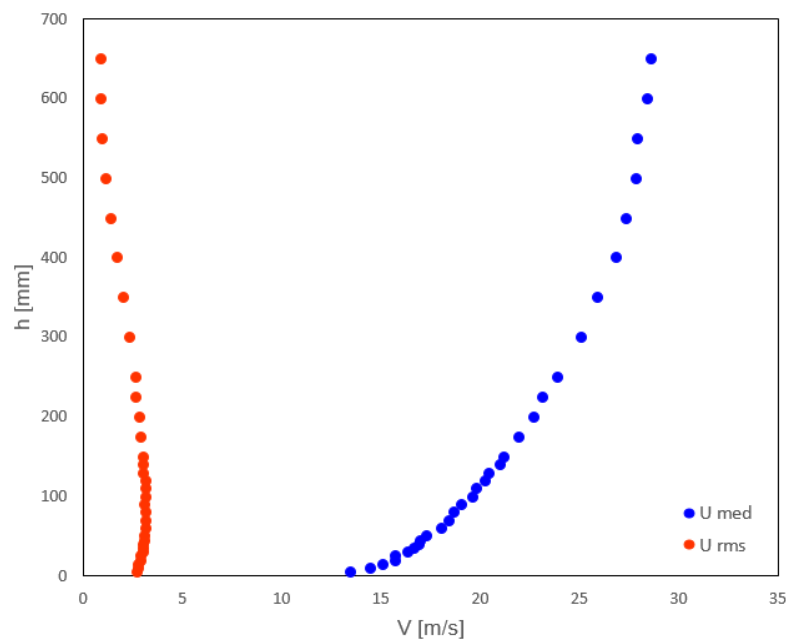


Figura 4. 1 – Perfil das velocidades média e rms para $p = 0,23$.
Fonte: O autor (2018)

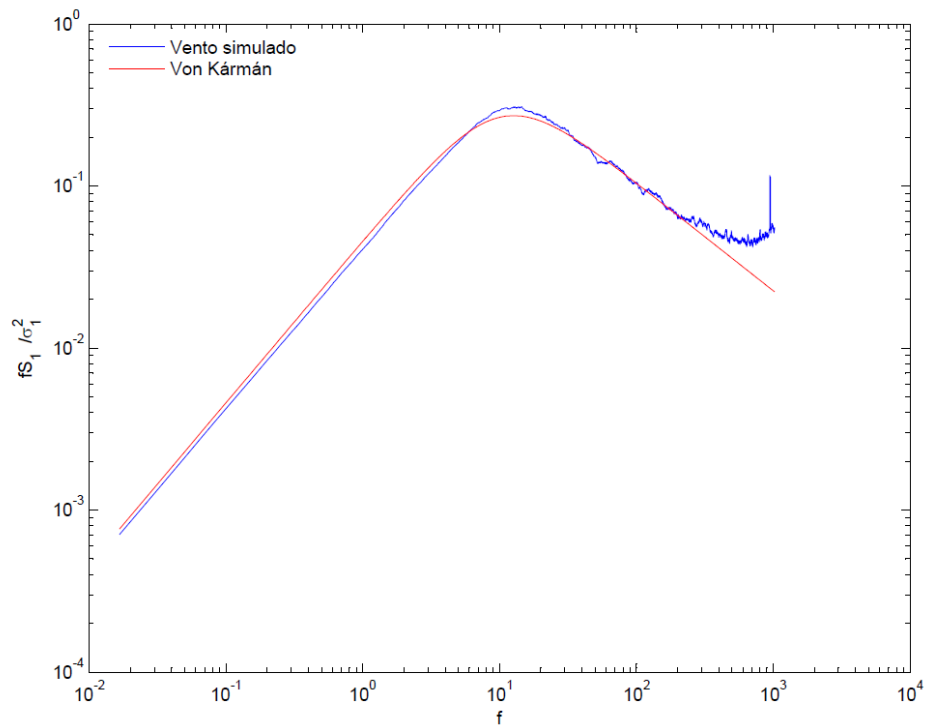


Figura 4. 2 – Espectro da componente longitudinal da velocidade na altura de referência equivalente a 70% da altura do prédio A ($p = 0,23$). Fonte: O autor (2018)

O espectro teórico de Von Kármán é dado pelas seguintes expressões:

$$\frac{fS_1}{\sigma_1^2} = \frac{4X_1}{(1 + 70,78^2)^{5/6}} \quad (4.1)$$

$$X_1 = \frac{fL}{\bar{V}} \quad (4.2)$$

$$L = \frac{\bar{V}}{2\pi f_{pico}} \quad (4.3)$$

Sendo:

S_1 – Componente longitudinal da velocidade do vento

\bar{V} – Velocidade média;

L – Escala de turbulência;

f_{pico} – Frequência corresponde ao pico do espectro de velocidade.

4.2 RESULTADOS PRÉDIO A

Com o objetivo de se obter uma análise preliminar dos carregamentos globais, foram selecionados inicialmente alguns ângulos de incidência do vento, conforme mostram os resultados ilustrados na Figura 4. 3. São mostrados os espectros das ações F_x , F_y e M_t , para o modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA).

De modo geral, espectros que apresentam um pico acentuado sugerem a ocorrência de algum fenômeno dinâmico, visto que estes apresentam uma grande quantidade de energia para uma mesma frequência, possibilitando assim a ocorrência de efeitos ressonantes. Desta forma, percebe-se que os ângulos de incidência de 90° e 330° são os mais susceptíveis a efeitos dinâmicos e, portanto, foram selecionados para uma análise mais detalhada, conforme será exposto nos próximos itens. Nos casos em que ocorreram picos, o gráfico mostra a frequência reduzida ($f_r = fB/V_H$) correspondente, aqui denominada f_{r_pico} .

É importante salientar que inicialmente havia sido selecionado o ângulo de incidência do vento de 306° para a análise, por ser este perpendicular a uma das fachadas frontais do edifício. No entanto, como pode-se notar pela figura, esta incidência não apresentou nenhuma característica notável do ponto de vista dinâmico, contrariando a tendência esperada de estudos anteriores em edifícios com formato em “L” (Li et al., 2016 e 2017). Deste modo, optou-se por ampliar os ângulos de análise, adicionando uma pequena inclinação em relação a esta mesma fachada (correspondente ao ângulo de 330°). Os resultados desta incidência, por outro lado, indicam a existência de efeitos relevantes.

Tanto o ângulo de 306° quanto o de 270° evidenciaram espectros com um formato muito próximo ao do espectro de velocidade do vento antes do contato com a estrutura, como evidenciado na Figura 4. 4 para a componente F_y a 270° . Isto sugere que nesses casos a turbulência gerada pelo próprio edifício não se mostrou significativa, e o fator que governa a ação nessa direção, portanto, é a turbulência gerada pelo vento natural que se aproxima.

Uma maneira de avaliar se os fenômenos observados podem se manifestar na prática é por meio da análise dos modos de vibração da estrutura construída. Conforme ilustrado na Figura 4. 5, Loredou-Souza e Rocha (2011a) determinaram as formas modais dos quatro primeiros modos de vibração da estrutura. O primeiro modo corresponde, predominantemente, à translação em x (apesar de existir uma pequena torção), o segundo à translação em y, o terceiro refere-se à

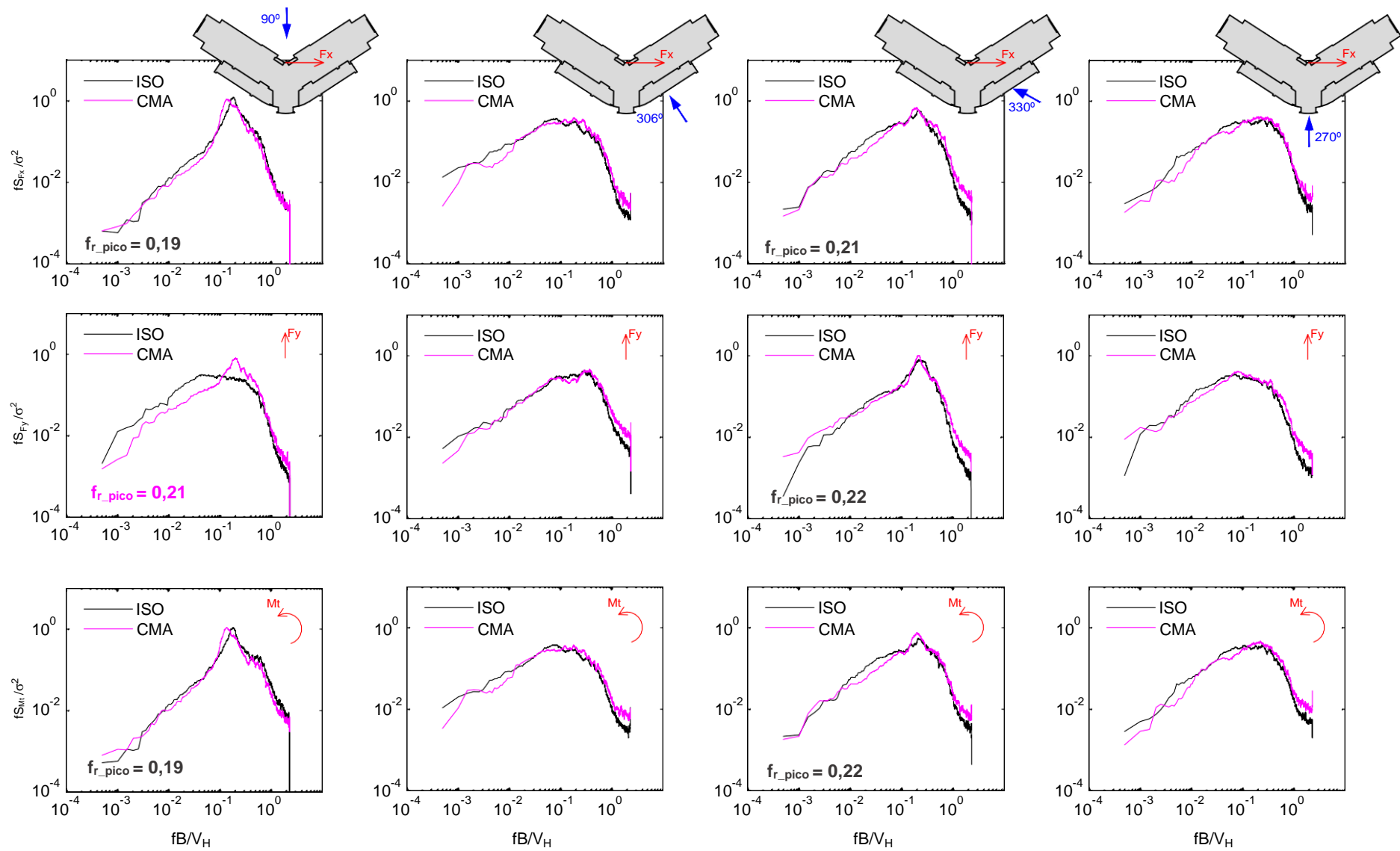


Figura 4. 3 – Resultados globais do Prédio A, em termos de F_x , F_y e M_t , considerando modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA)

Fonte: O autor (2018)

torção, e o quarto à flexão em torno de x. Comentários mais detalhados sobre o assunto serão dados nos próximos tópicos.

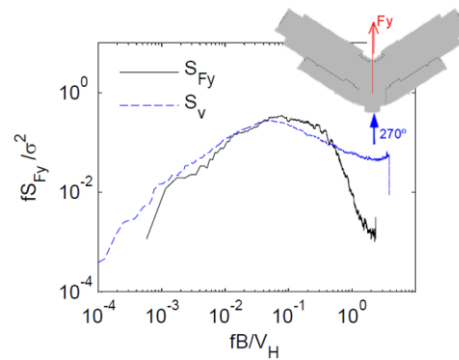


Figura 4. 4 – Comparação do espectro de F_y com o espectro de velocidade do vento
Fonte: O autor (2018)

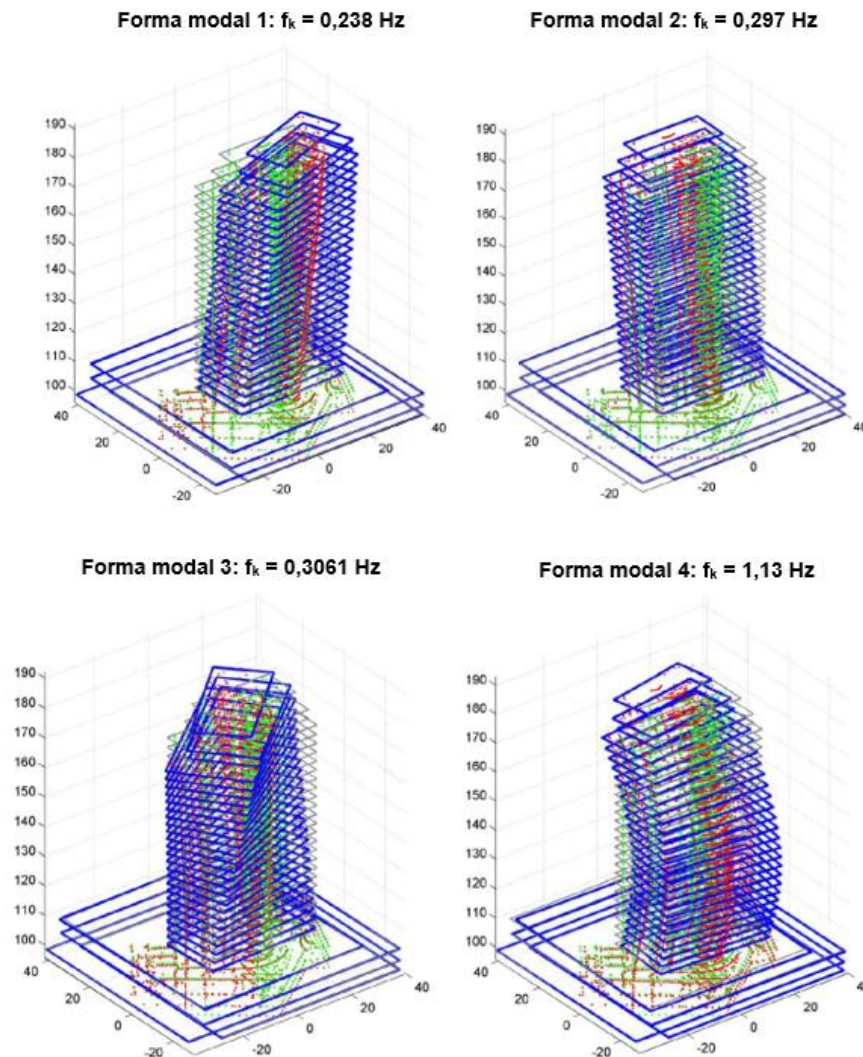


Figura 4. 5 – Formas modais do Prédio A. Fonte: Adaptado de Loredo-Souza e Rocha (2011a).

4.2.1 Caso de estudo 1-A – Análise local para o modelo isolado (ISO)

A Figura 4. 6 ilustra os resultados na direção x para a incidência do vento de 90°, o que corresponde à direção transversal. No canto superior esquerdo é apresentado o espectro da força global nessa direção, enquanto ao lado direito são apresentados os espectros de cada zona do edifício, para as fachadas a barlavento (em vermelho) e sotavento (em azul).

Comparando-se o resultado global com os espectros de cada zona, percebe-se claramente que as fachadas a sotavento apresentam um formato muito similar ao da estrutura como um todo. Nestas fachadas, que se situam na esteira para a incidência analisada, os espectros apresentam um pico acentuado, que está associado ao fenômeno de desprendimento de vórtices². No espectro global, o pico ocorre para a frequência reduzida de aproximadamente 0,19, enquanto que para os espectros de cada zona, os picos ocorrem para frequências reduzidas muito próximas desse valor, sendo a variação máxima em torno de 5% (Quadro 4. 1). Uma explicação plausível é a de que o formato do edifício facilite a estagnação do ar nessa região a barlavento, mantendo uma velocidade constante ao longo da altura, e permitindo, portanto, que os vórtices se desprendam praticamente ao mesmo tempo em todas as zonas, causando grandes excitações na direção transversal.

Utilizando as variáveis envolvidas em escala real, é possível estimar os valores de velocidade crítica para os primeiros modos de vibração da estrutura (ver Quadro 4. 2). Os valores utilizados para as frequências naturais foram retirados do relatório técnico de Loredou-Souza e Rocha (2011a), conforme já citado na Figura 4. 5. Sabendo que a velocidade característica para o local da edificação é de 40,21 m/s (considerando o edifício isolado), percebe-se que o desprendimento de vórtices observado é capaz de amplificar a excitação da estrutura no primeiro modo de vibração (translação em x). A velocidade crítica de torção, embora superior à velocidade característica, apresenta valores muito próximos.

Variação da frequência reduzida de pico (f_{r_pico}) ao longo da altura						
Global	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV	Zona V	Zona VI
0,19	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19
Erro (%)	5,26	5,26	0,00	0,00	0,00	0,00

Quadro 4. 1 – Variação da frequência reduzida de pico (f_{r_pico}) de cada zona em relação ao valor global. Fonte: O autor (2018)

² Neste trabalho, o termo desprendimento de vórtices é utilizado de modo generalista, indicando um escoamento complexo, e não necessariamente o caso clássico de Kármán.

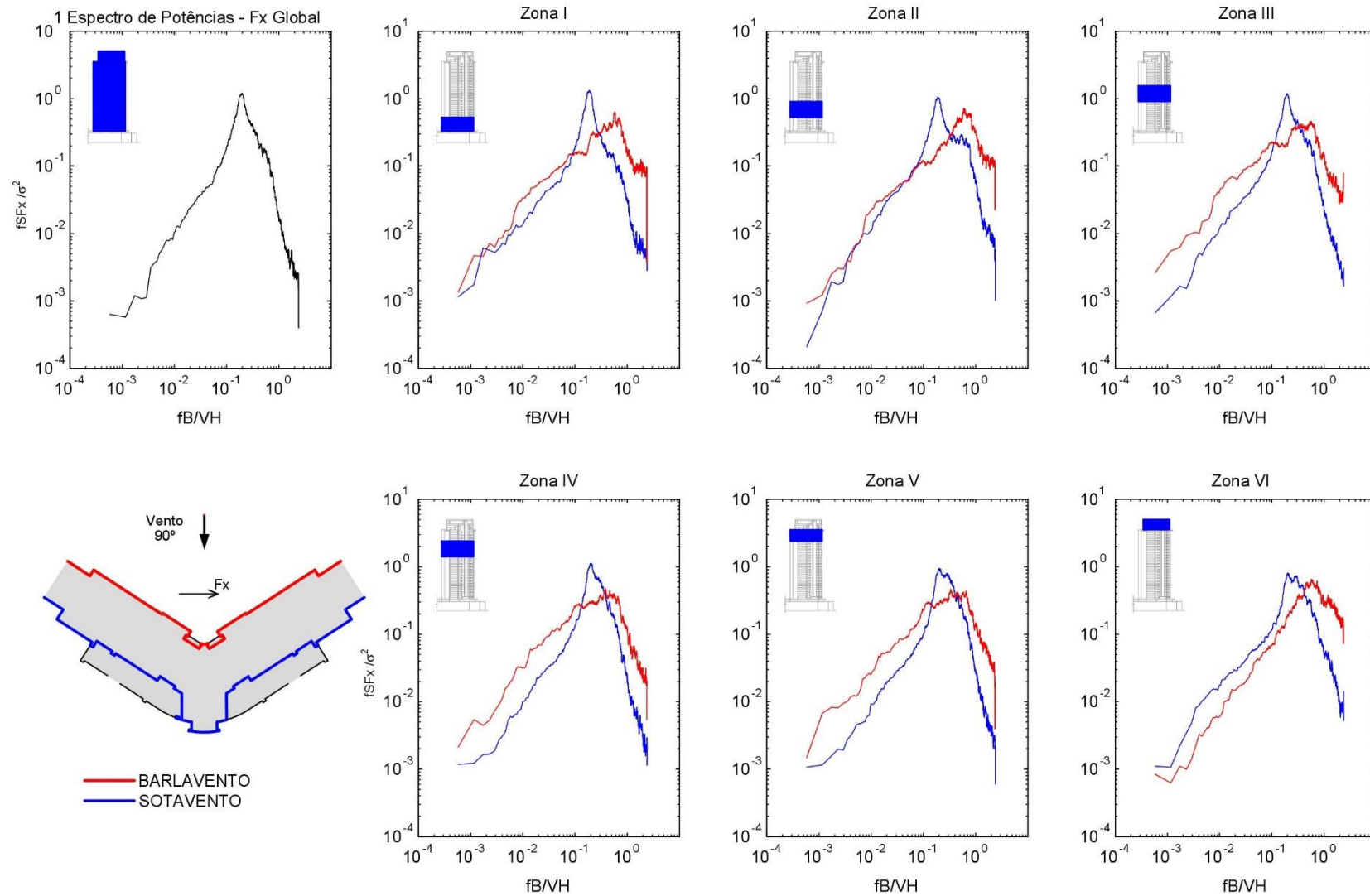


Figura 4. 6 – Análise local dos resultados de 90° (CASO 1-A) em termos de F_x , por zonas e fachadas (Prédio A, Isolado). Fonte: O autor (2018)

Velocidade crítica para os primeiros modos					
Modo	Descrição	S_t	B (m)	f_n (Hz)	V_{cr} (m/s)
1	Translação em x	0,19	25,7	0,238	32,2
3	Torção	0,19	25,7	0,3061	41,4

Quadro 4. 2 – Determinação da velocidade crítica para os primeiros modos de vibração da estrutura (90°). Fonte: O autor (2018)

O comportamento explicitado é similar ao que foi observado por Liang *et al.* (2002), conforme Figura 4. 7, que propuseram uma formulação empírica para o espectro da força transversal de edifícios com geometria retangular. Segundo eles, para valores de D/B entre $\frac{1}{4}$ e 3, com vento incidindo perpendicularmente à fachada de dimensão B , um pico evidente emerge na curva do espectro na frequência de desprendimento de vórtices. O número de Strouhal, no entanto, apresenta um valor de 0,084 para $D/B = 1$.

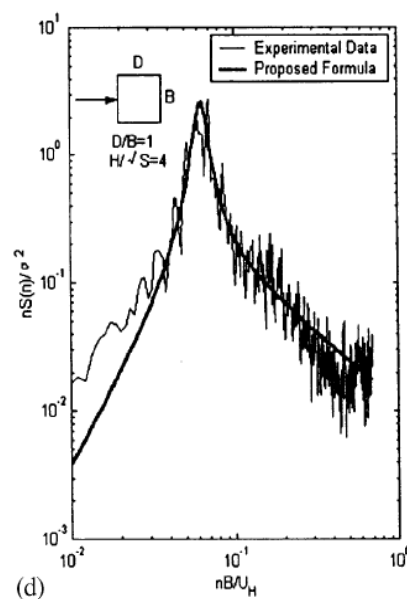


Figura 4. 7 – Formulação empírica proposta por LIANG *et. al.* (2002) para o espectro da força transversal em prédios retangulares, a razão D/B variando entre $\frac{1}{4}$ e 3.

Resultado semelhante foi obtido por Li e Li (2016) na formulação do espectro global da força transversal de edifícios com formato em “L”. Na situação em que as duas fachadas possuem o mesmo comprimento ($D/B = 1$), o espectro apresentou a forma ilustrada na Figura 4. 8, mas com número de Strouhal próximo a 0,1.

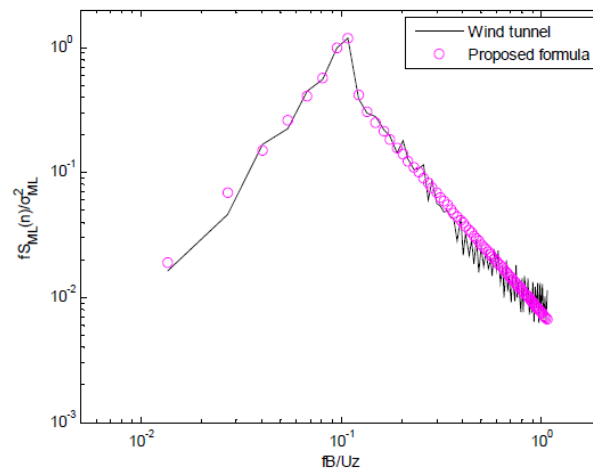
(c) $D/B=1.0$

Figura 4. 8– Formulação empírica proposta por Li e Li (2016) para o espectro da força transversal em prédios retangulares, a razão D/B igual a 1.

Ainda, para a seção cantoneira determinada por Blessmann (1998, Quadro 2. 1) o número de Strouhal equivalente para esta direção seria de 0,14. A divergência pode ser explicada pela diferença do formato, além da superfície irregular do prédio em estudo.

Investigando o fenômeno de forma mais detalhada, no âmbito das tomadas de pressão, é possível observar onde o desprendimento se inicia (ver Figura 4.10). O gráfico ilustra o espectro em termos de c_p (coeficiente de pressão) de algumas tomadas situadas numa altura correspondente à **Zona V** do edifício. A primeira linha é representativa das tomadas situadas a barlavento, as quais evidenciaram um formato de espectro muito próximo ao do espectro de velocidade do vento. A segunda linha, equivalente às fachadas laterais, apresenta um comportamento contrário: são observados picos em frequências reduzidas próximas de 0,19 (como no espectro global da força transversal), indicando que o desprendimento tenha sido iniciado nas arestas. Esta mesma tendência foi mantida para as tomadas da fachada frontal (sotavento). Desta forma, uma hipótese para o padrão de desprendimento é indicada na Figura 4. 9.

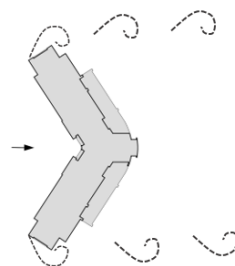


Figura 4. 9 – Hipótese para os pontos de desprendimento dos vórtices para a incidência de 90° . Fonte: O autor (2018)

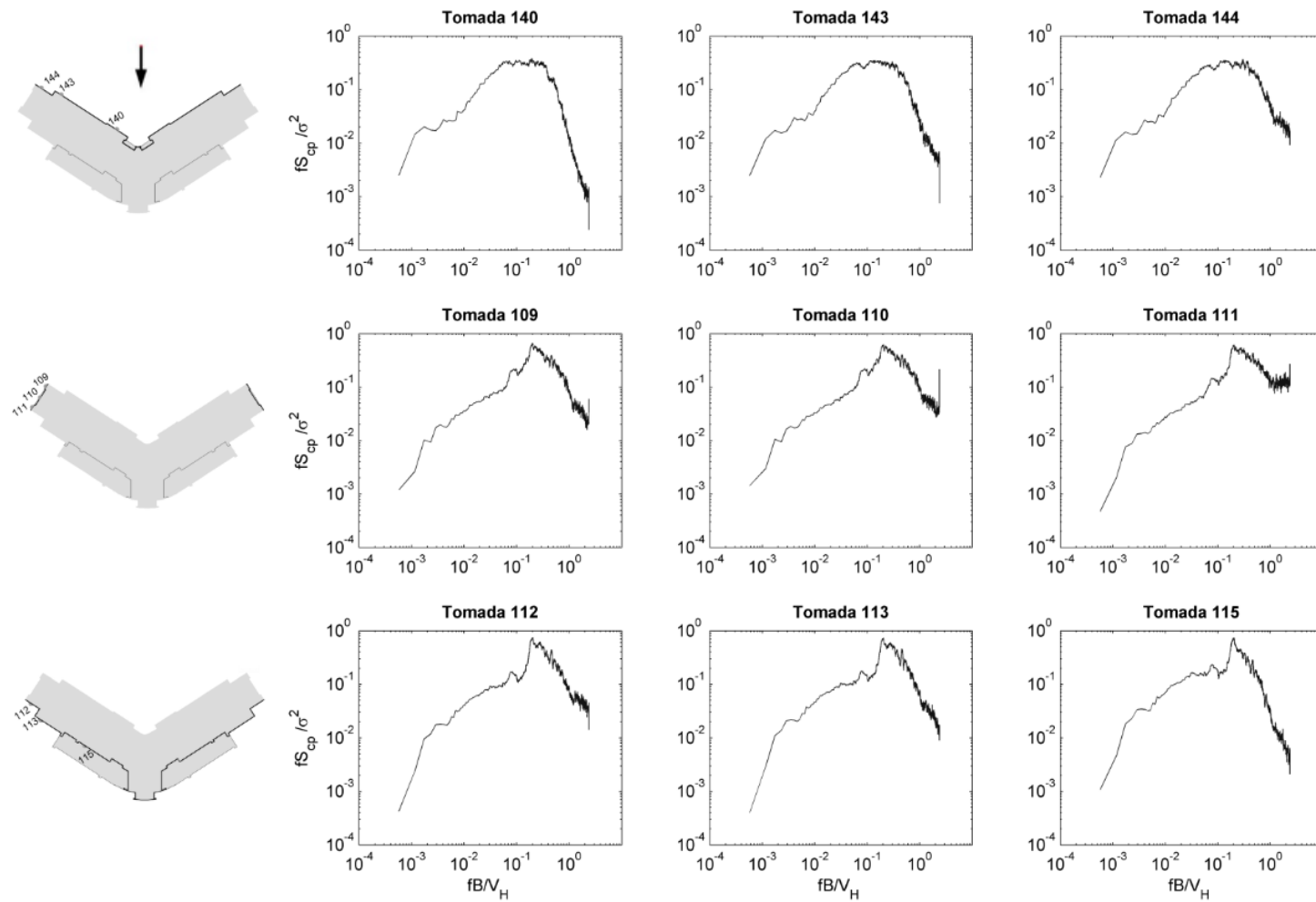


Figura 4. 10 – Resultados em termos de c_p no âmbito das tomadas de pressão – Ângulo incidente: 90° (Caso 1-A). Prédio A, Isolado.
Fonte: O autor (2018)

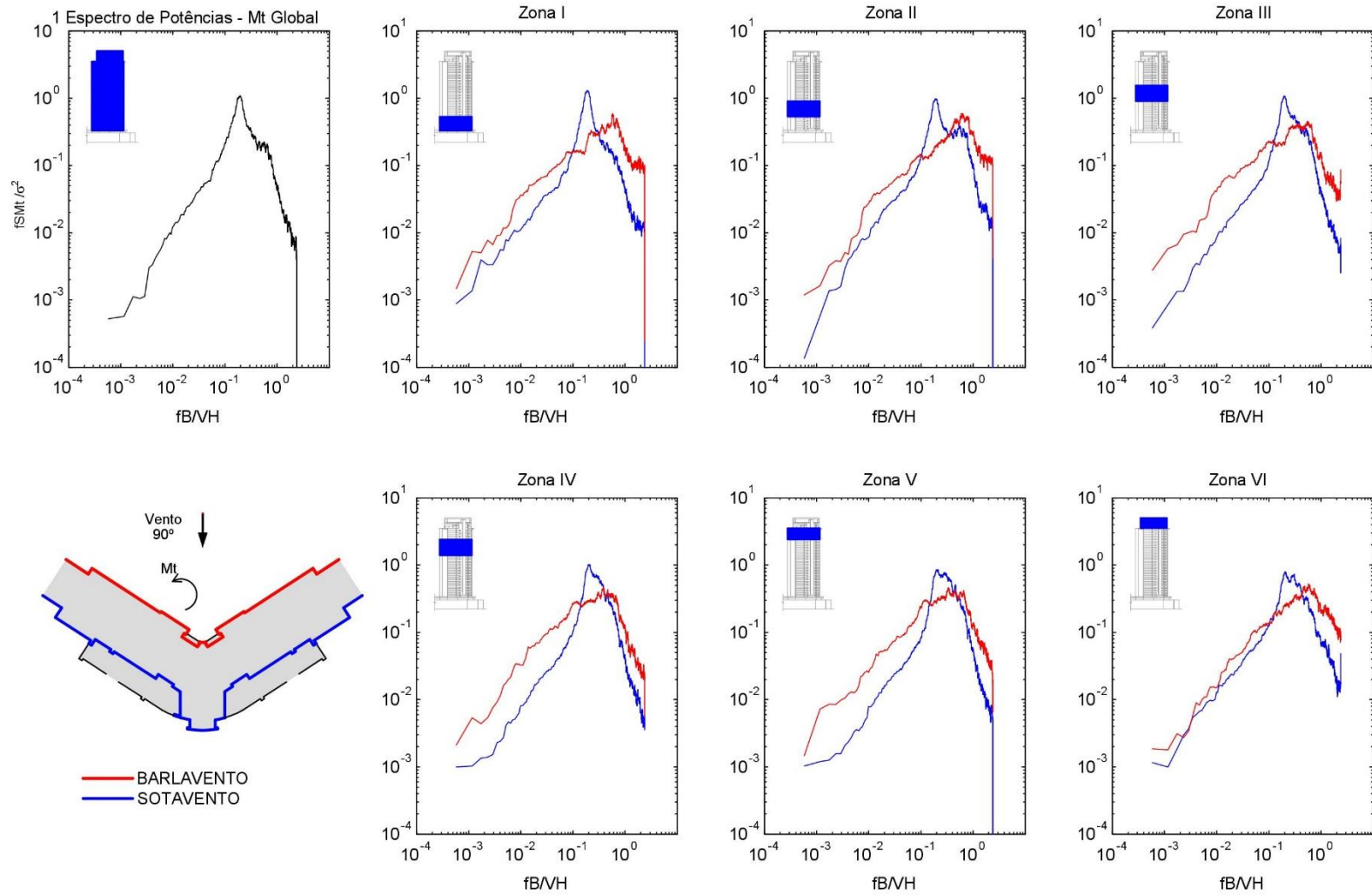


Figura 4. 11 – Análise local dos resultados de 90° (CASO 1-A) em termos de M_t , por zonas e fachadas (Prédio A, Isolado). Fonte: O autor (2018)

Os espectros do momento torçor (Figura 4. 11) se mostraram muito similares ao que foi observado para a força na direção x – que neste caso de estudo corresponde à direção transversal. Já os espectros na direção y – aqui correspondentes à direção longitudinal – não apresentaram resultados notáveis do ponto de vista dinâmico para o edifício isolado.

4.2.2 Caso de estudo 1-A – Análise local para o modelo com vizinhança (CMA)

Dentre os espectros considerando interferências de vizinhança na direção de 90° , os resultados mais significativos foram observados em F_y (direção longitudinal ao vento). Considerando os efeitos nas fachadas a barlavento e a sotavento (Figura 4. 12 e Figura 4. 13, respectivamente), apenas o modelo com interferência de vizinhança revelou um pico no espectro global. Numa análise mais local, esse pico mostra-se mais evidente para as zonas mais baixas do edifício, e é suavizado nas zonas mais altas.

Considerando que essa característica não se manifestou no espectro do modelo isolado, e ainda que os efeitos são similares a barlavento e sotavento, fica claro que o fenômeno se relaciona com as edificações presentes no entorno, e não com a turbulência gerada pela própria estrutura. Os resultados sugerem a ocorrência de “martelamento”, em que a configuração de vizinhança gera uma turbulência capaz de provocar impactos periódicos no edifício, com uma frequência dominante ($f_{r_pico} = 0,21$). Levando em conta que os prédios do entorno tendem a ser mais baixos que o edifício em estudo, e adicionando-se o fator da própria rugosidade natural da superfície, é lógico admitir que o fenômeno se manifeste mais claramente nas zonas mais baixas, assim como foi observado nos resultados.

Já para as observações em termos de F_x (direção transversal ao vento), conforme Figura 4. 14, era esperado que a turbulência gerada na vizinhança pudesse ter anulado o efeito de desprendimento de vórtices visto no edifício isolado, por ser este um fenômeno que se manifesta com mais vigor em escoamento suave. No entanto, os resultados mostraram que a turbulência gerada pelo entorno não foi suficiente para mitigar o desprendimento de vórtices. Situação semelhante ocorreu no carregamento torcional (Figura 4. 15).

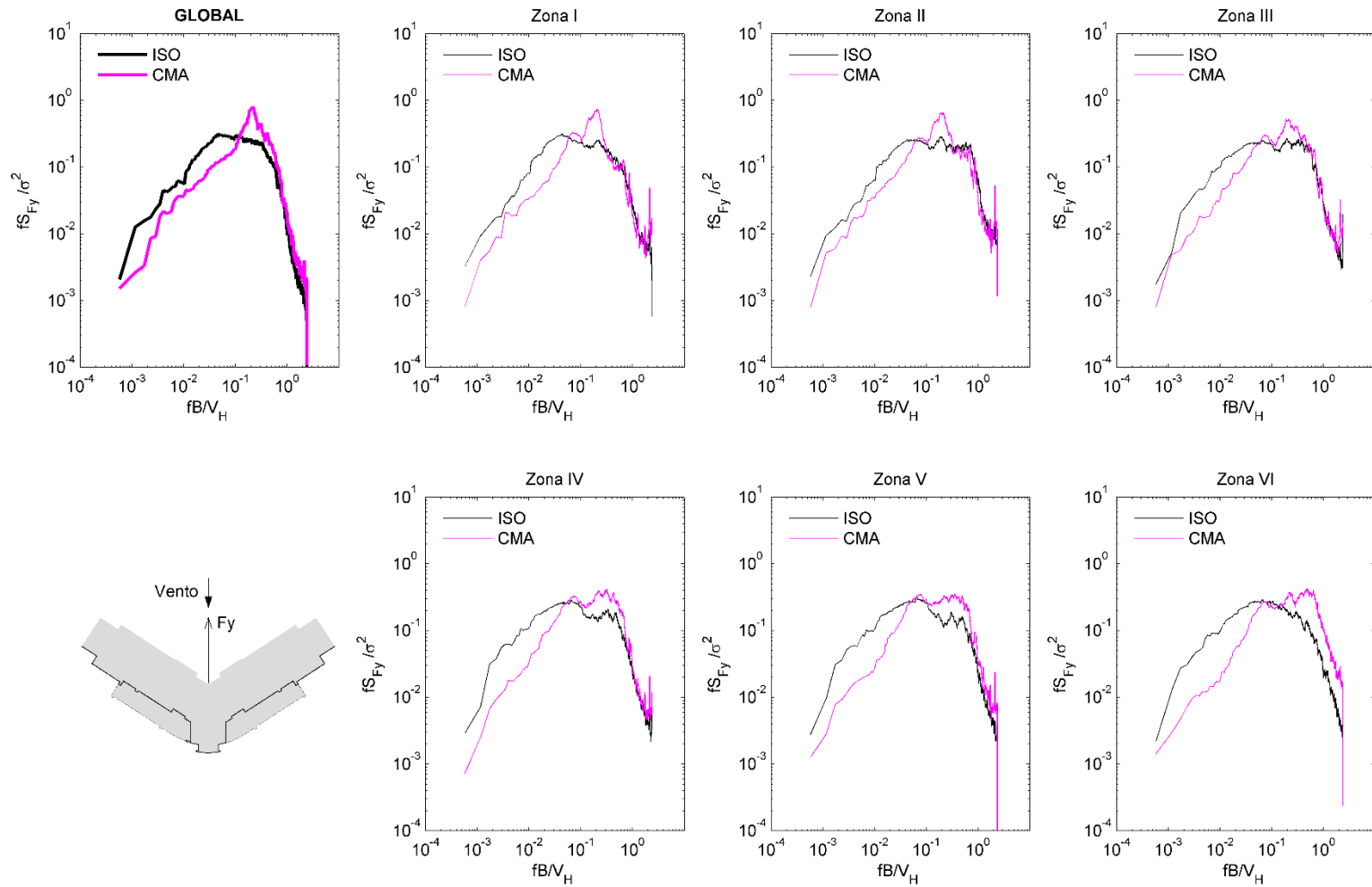


Figura 4. 12 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de F_y para o CASO 1-A - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

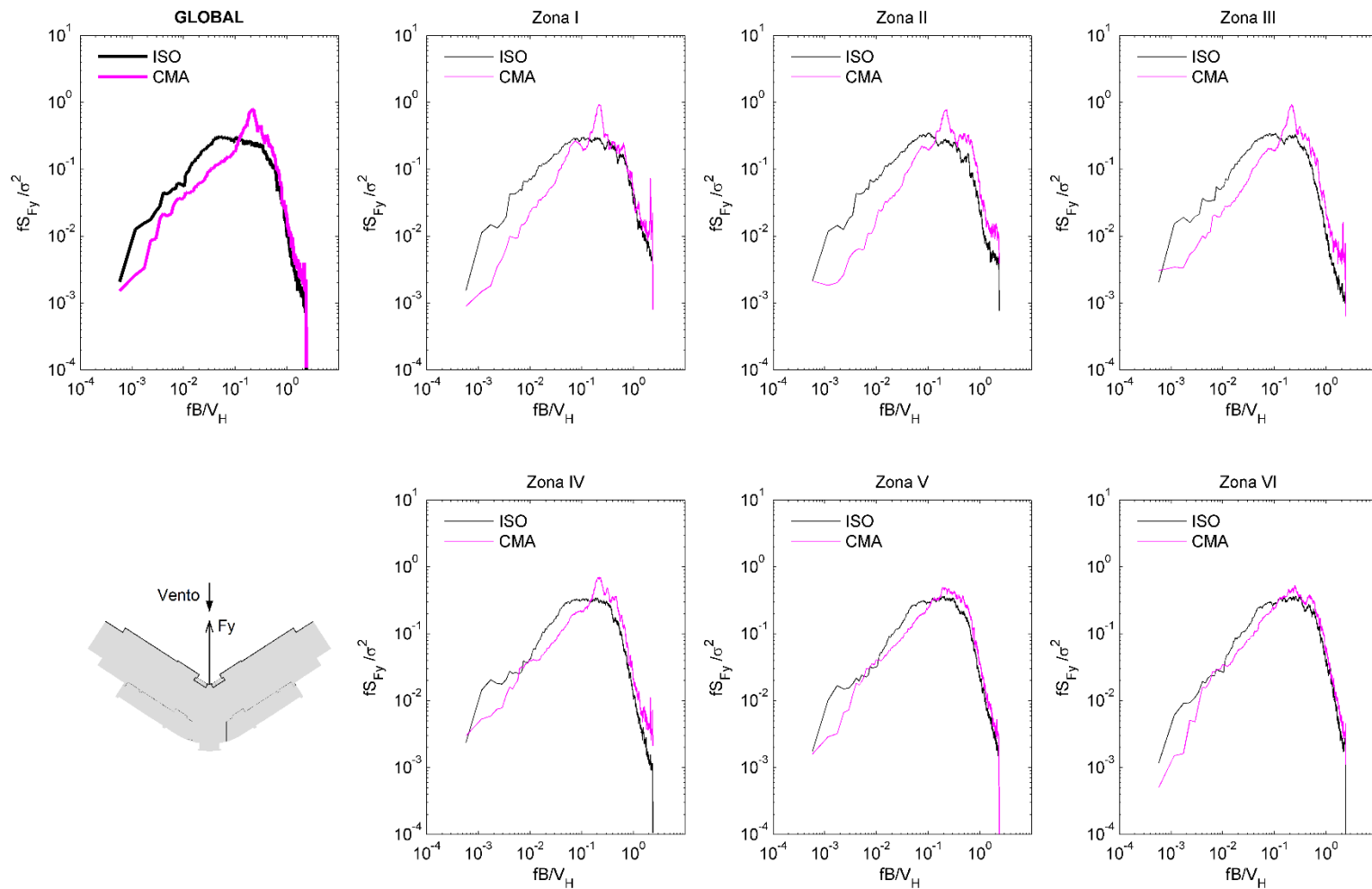


Figura 4. 13 – Resultados global e por zonas (apenas barlavento) em termos de F_y para o CASO 1-A - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

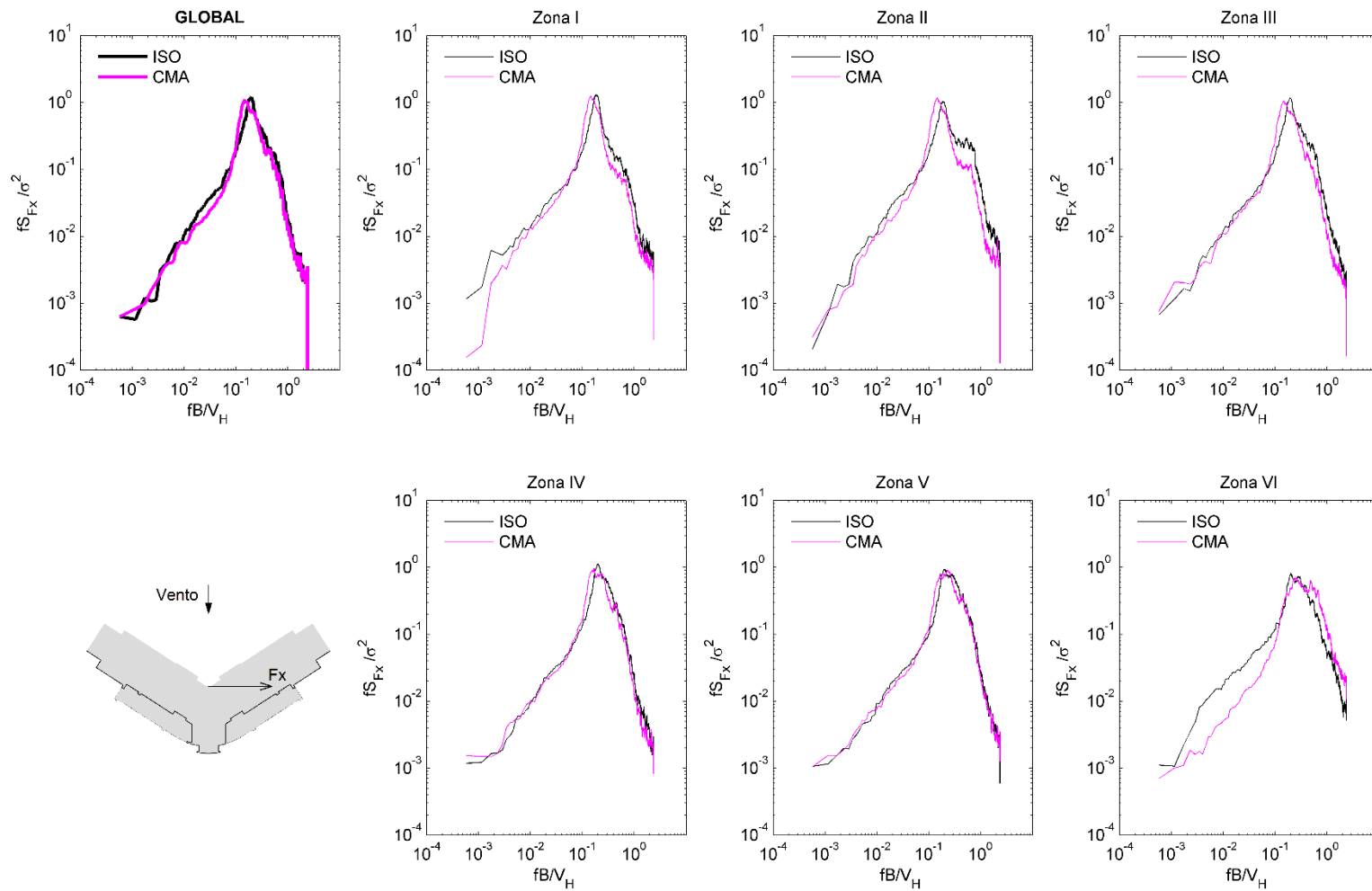


Figura 4. 14 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de F_x para o CASO 1-A, modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

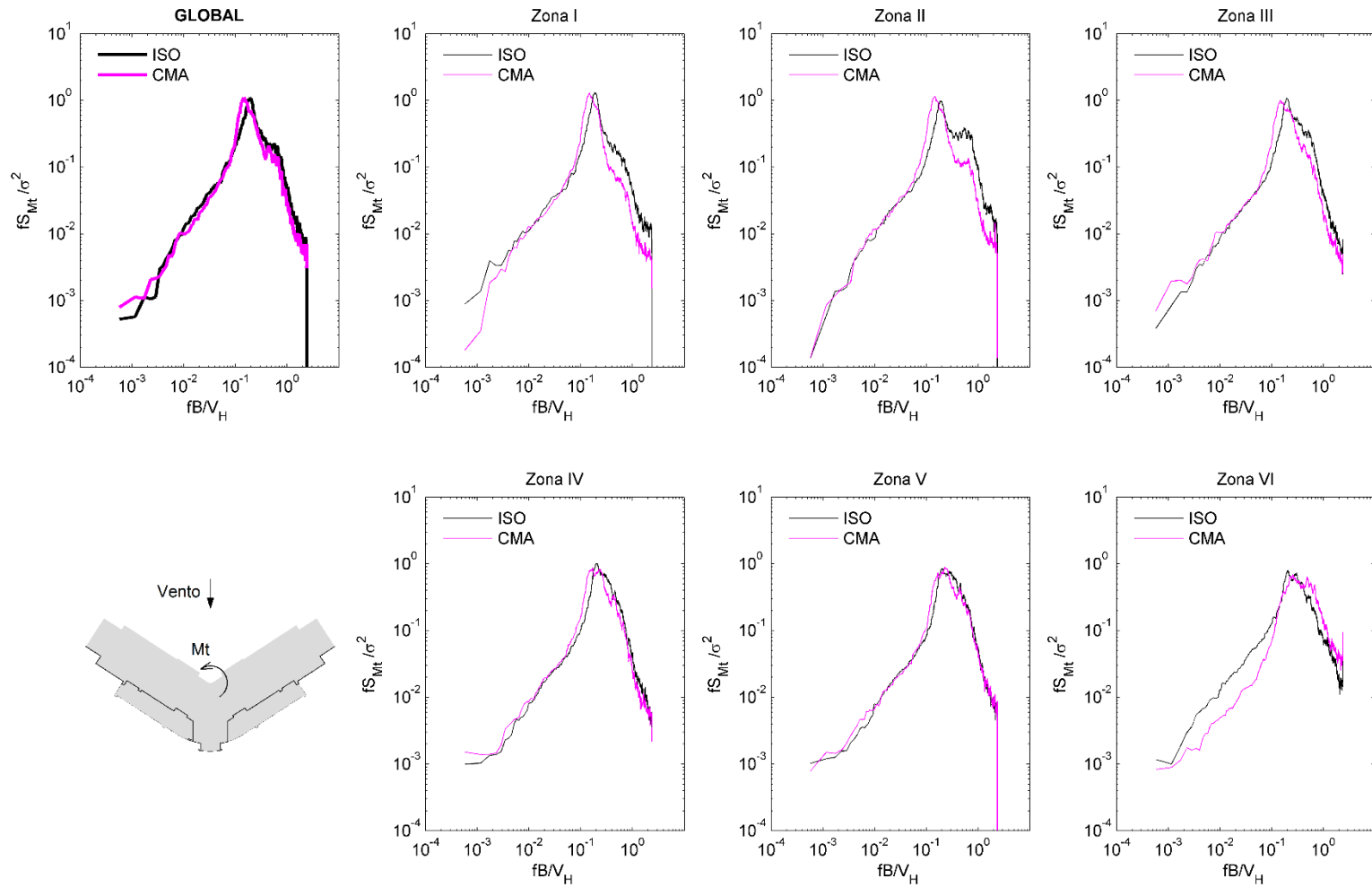


Figura 4. 15 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de Mt para o CASO 1-A, modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

4.2.3 Caso de estudo 3-A – Análise local para o modelo isolado (ISO)

Os resultados do ângulo de 330° evidenciam picos nas direções x, y e torcional (ver Figura 4. 3). Percebe-se que nesta incidência, as direções x e y já não coincidem com as direções transversal e longitudinal ao vento, como era o caso da incidência de 90°. Por este motivo, o pico que se supõe representar o desprendimento de vórtices se manifesta em partes no espectro de Fx e em partes no espectro de Fy.

As frequências reduzidas para as quais ocorrem os picos dos espectros são de 0,21 em Fx e 0,22 em Fy. Para determinar a possibilidade de ocorrência do fenômeno no caso concreto, adotou-se como estimativa uma média destas duas como valor base. Em termos técnicos, pode não ser adequado afirmar que este seria o número de Strouhal, visto que conceitualmente a variável é definida em corpos regulares onde são conhecidos os pontos de separação da camada limite. No entanto, para fins práticos a simplificação é razoável. Determinando as velocidades críticas percebe-se novamente que é possível a ocorrência no primeiro e no terceiro modo de vibração.

Velocidade crítica para os primeiros modos				
Modo	S_t	B (m)	f_n (Hz)	V_{cr} (m/s)
1	0,22	25,7	0,238	27,8
3	0,22	25,7	0,3061	35,8

Quadro 1. 2 – Determinação da velocidade crítica para os primeiros modos de vibração da estrutura (330°). Fonte: O autor (2018)

De modo análogo ao que foi constatado para a incidência de 90°, as fachadas localizadas na esteira apresentaram um formato de espectro muito próximo ao do carregamento global (vide Figura 4. 16). Existe pouca variação de comportamento entre uma zona e outra da estrutura, exceto pela região mais alta do edifício, onde o pico se mostra menos acentuado mesmo nas fachadas a sotavento.

A análise das tomadas individualmente (Figura 4. 17) indica que o desprendimento ocorre nas arestas da fachada 3. Nesta fachada (a barlavento, primeira linha do gráfico), o espectro dos coeficientes de pressão se mostra com o formato similar ao do espectro da velocidade do vento. Em contraste, nas fachadas 2 e 4 (segunda e terceira linha do gráfico, respectivamente), os espectros apresentam picos acentuados. A hipótese para o padrão de desprendimento descrito é ilustrado na Figura 4. 18.

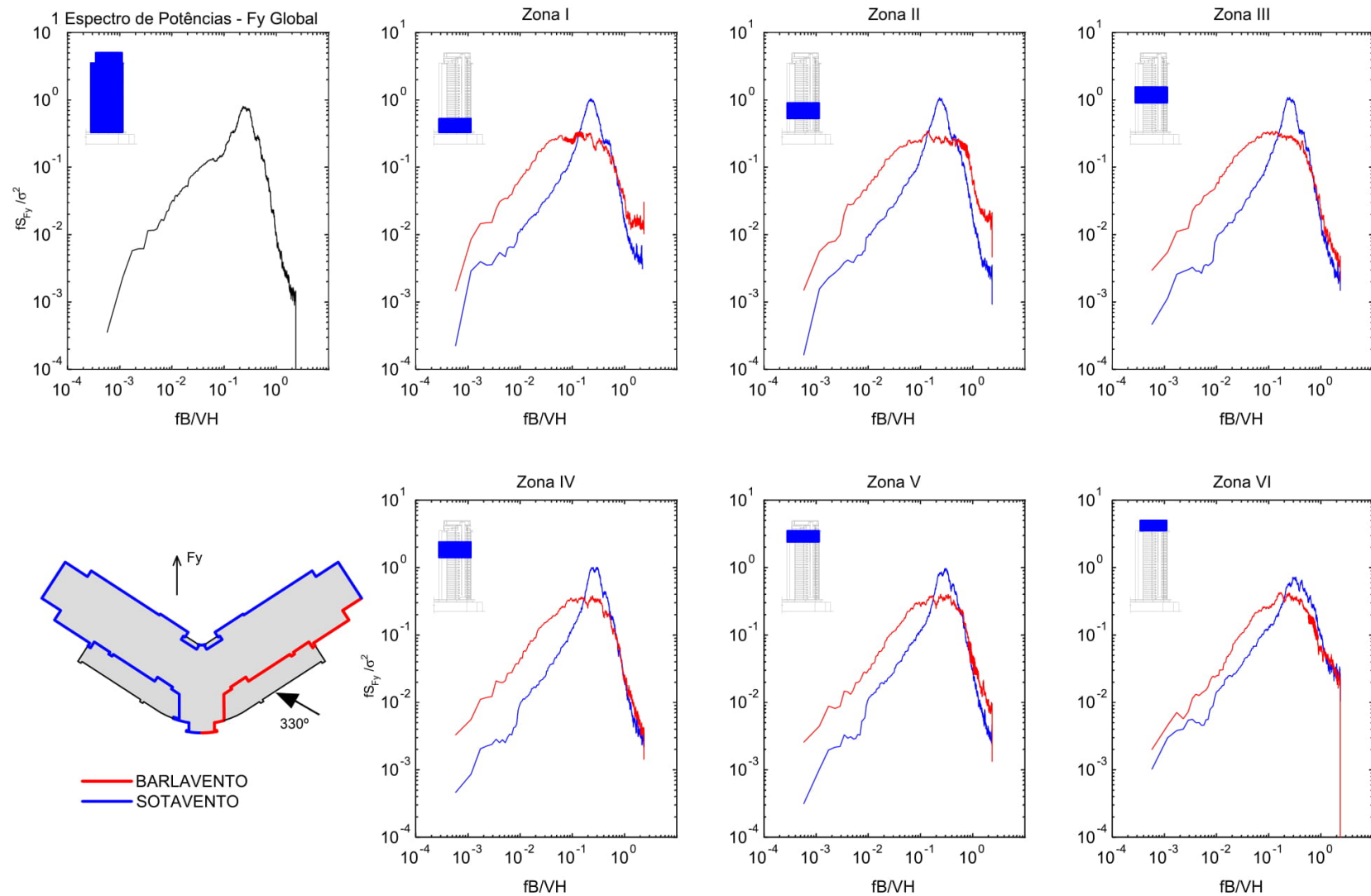


Figura 4. 16 – Análise local dos resultados de 330° em termos de F_y , por zonas e fachadas (Caso 3-A). Prédio A, Isolado. Fonte: O autor (2018)

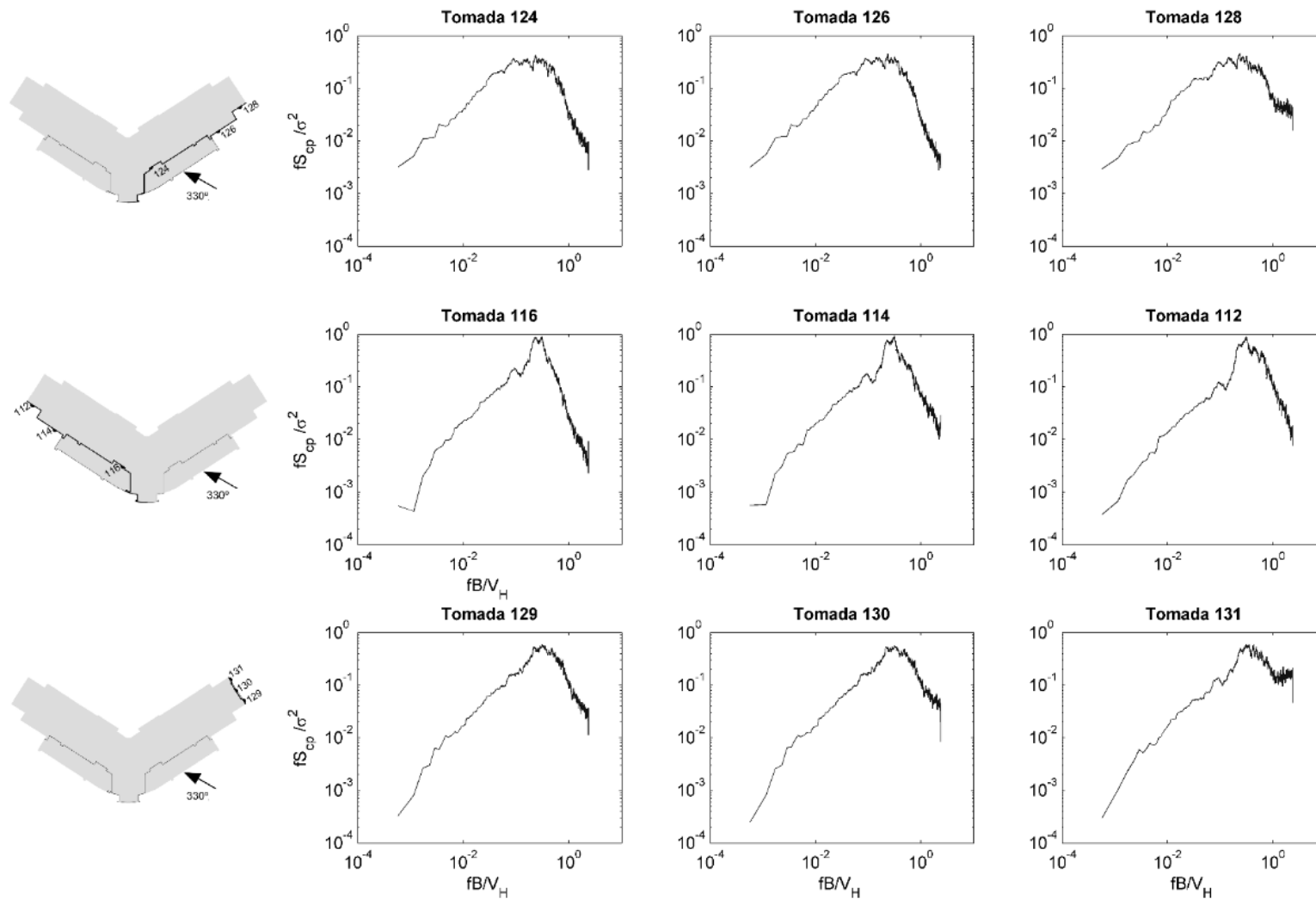


Figura 4. 17 – Resultados em termos de c_p no âmbito das tomadas de pressão – Ângulo incidente: 330° (Caso 3-A). Fonte: O autor (2018)

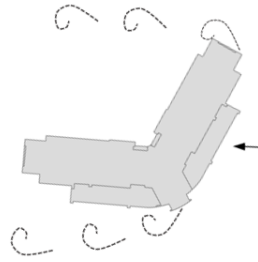


Figura 4. 18 – Hipótese para os pontos de desprendimento dos vórtices para incidência 330°. Fonte: O autor (2018)

4.2.4 Caso de estudo 3-A – Análise local para o modelo com vizinhança (CMA)

De modo geral os resultados com vizinhança apresentaram boa concordância com o que foi observado para o modelo isolado, o que já era esperado tendo em vista que existem poucos obstáculos nesta direção (ver Figura 3. 2). À título de exemplo mostra-se a Figura 4. 19 e a Figura 4. 20, referentes às componentes F_y e F_x , respectivamente, agindo nas fachadas a sotavento (330°).

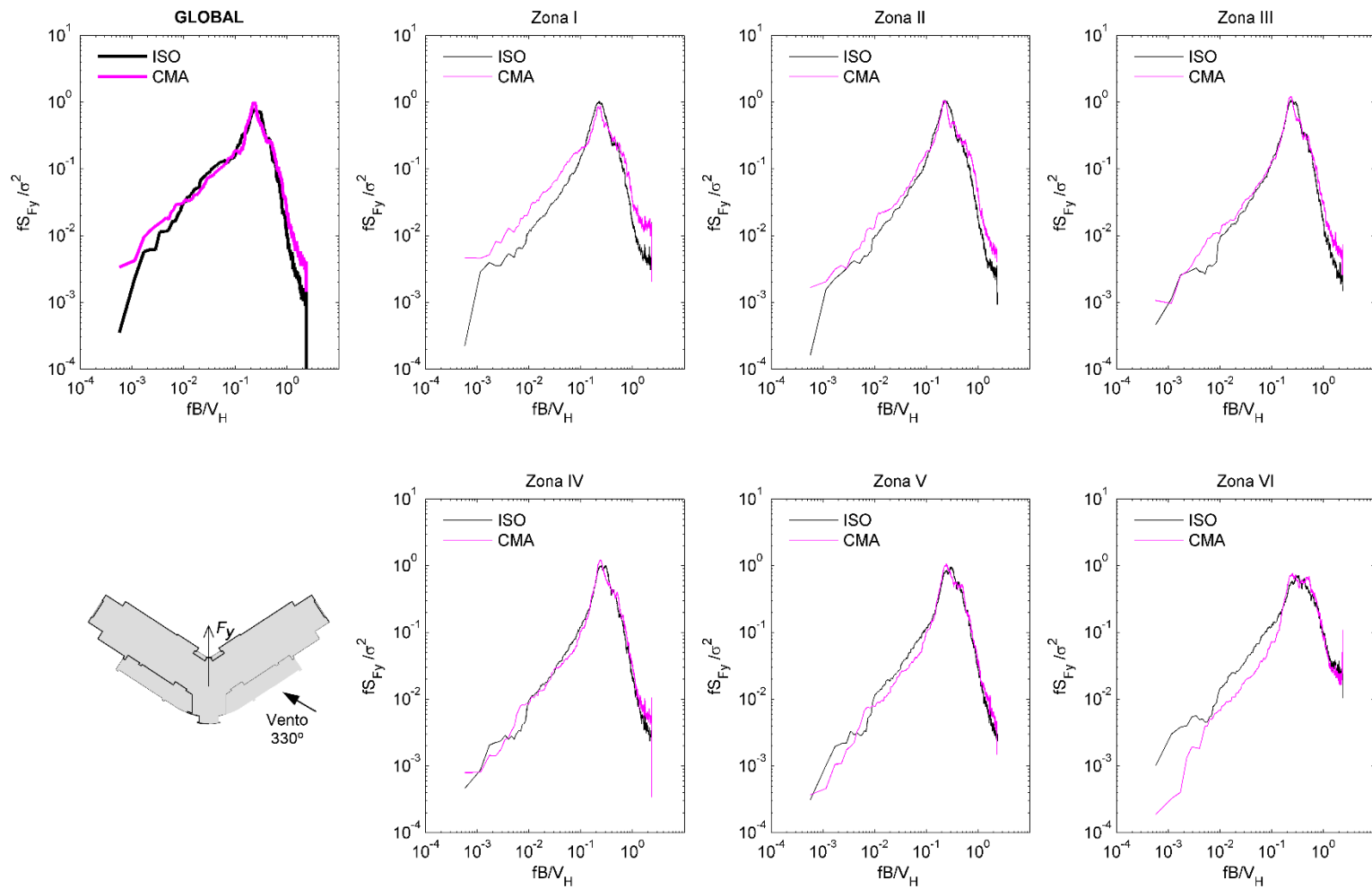


Figura 4. 19 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de F_y para o CASO 3-A - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

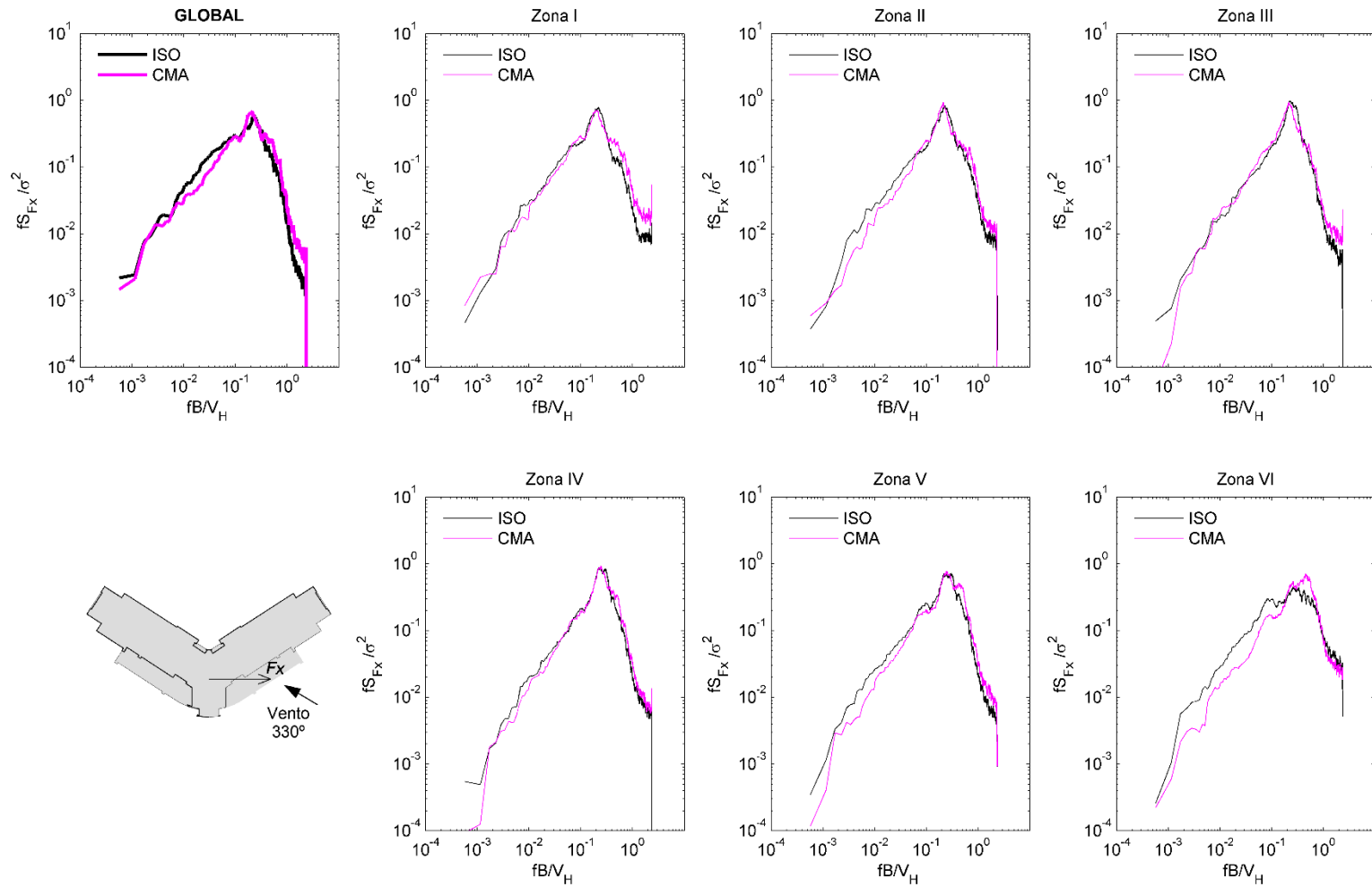


Figura 4. 20 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de F_x para o CASO 3-A - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

4.2.5 Admitância aerodinâmica

A Figura 4. 21 ilustra os resultados de admitância aerodinâmica do Prédio A, para os quatro principais ângulos de incidência, conforme as ações F_x , F_y e M_t (primeira, segunda e terceira linhas, respectivamente).

O ângulo de 306° foi o que apresentou os padrões mais similares ao modelo teórico conhecido de admitância aerodinâmica: apontou valores próximos a um na gama de baixas frequências, com maiores perturbações nas frequências mais elevadas. Esse comportamento era previsível, já que o espectro das forças resultantes tinha apresentado um formato muito próximo ao espectro de velocidade do vento.

Importante ressaltar, ainda, que existe uma certa imprecisão do túnel de vento nas medições de frequências muito baixas, o que justifica o fato de os valores de admitância não coincidirem com o valor de 1,0 nesse intervalo. No entanto, para uso prático os valores relevantes estão acima dessa gama. Nesse prédio em estudo, por exemplo, o primeiro modo de vibração é de 0,238 Hz, o que em termos de frequência reduzida representaria em torno de 0,15 no eixo x do gráfico.

Vale ressaltar que algumas componentes apresentaram valores inválidos para a formulação utilizada, como é o caso referente a F_x para a incidência de 90° . Como ela representa diretamente a componente transversal ao vento nesse caso específico, e sabendo que a força dominante nessa direção é a ação dinâmica, com a força média próxima de zero, percebe-se que a divisão $S_F(f)/\bar{F}^2$ leva o termo a valores elevados. Por esse motivo, a curva de admitância nem sequer apareceu dentro dos limites definidos para o gráfico. A mesma situação ocorre para a componente em torção nesta mesma incidência, assim como para F_x e M_t a 270° .

Explicando fisicamente, quando ocorre algum fenômeno dinâmico tal como desprendimento cadenciado de vórtices, as ações atuantes da estrutura não dependem apenas da turbulência do vento que se aproxima, mas são influenciados predominantemente pela turbulência que a própria estrutura cria ao seu redor ao entrar em contato com o vento. Dessa forma, as ações não acompanham a turbulência do vento que se aproxima, e a relação entre o espectro do vento e o da força não será unitário nem para as frequências mais baixas.

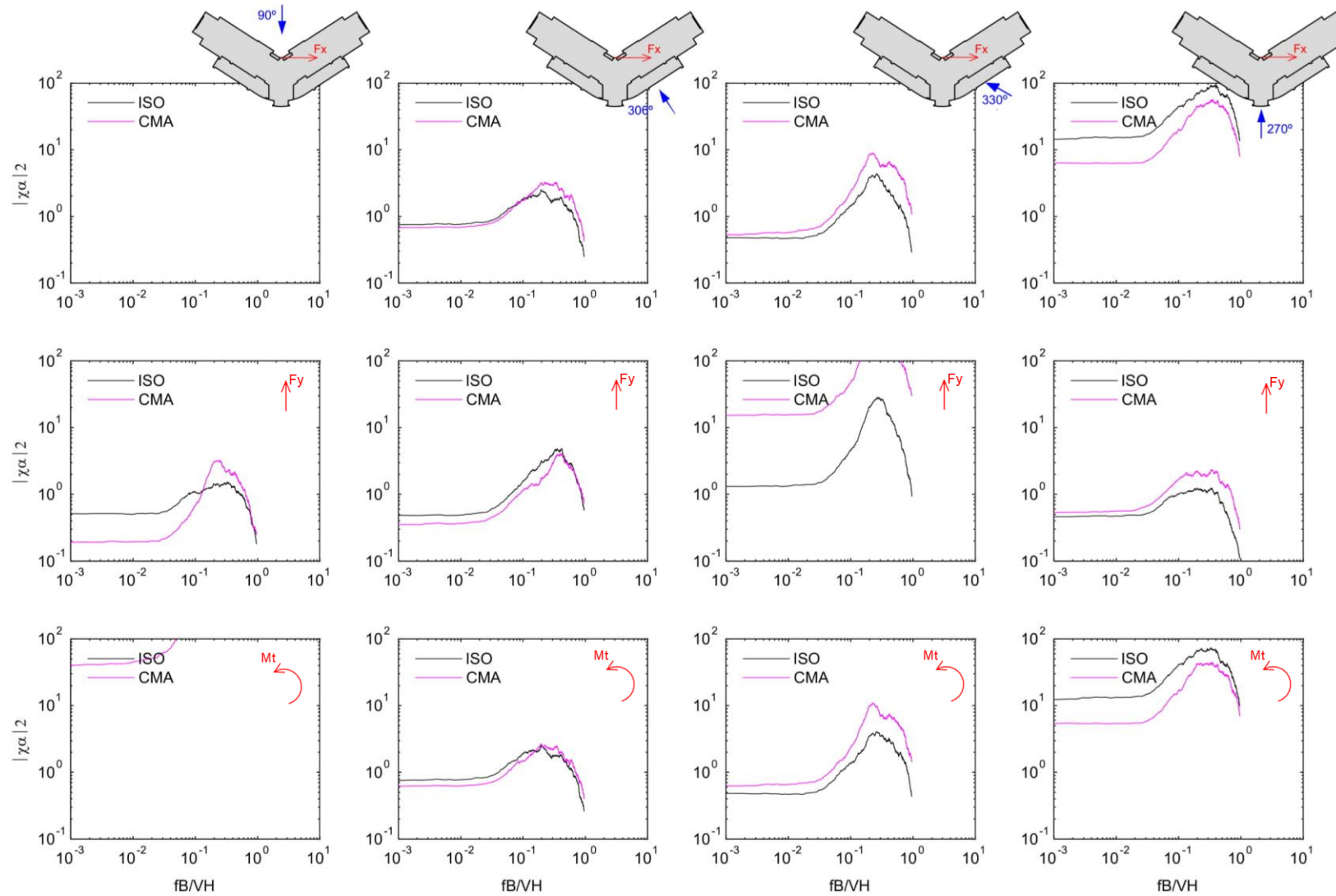


Figura 4. 21 – Resultados de admitância aerodinâmica do Prédio A, em termos de F_x , F_y e M_t , considerando modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

4.3 RESULTADOS PRÉDIO B

De modo análogo ao procedimento realizado com o Prédio A, foram selecionados inicialmente alguns ângulos de incidência de modo a se obter uma visão mais abrangente do comportamento do edifício. Como nesse caso o prédio em estudo é assimétrico, incluiu-se nas análises as incidências perpendiculares a cada uma das abas (307° e 240°).

Como se pode observar pela Figura 4. 22, os espectros de torção apresentaram um aspecto similar para as quatro direções consideradas, com dois picos emergentes, sendo o segundo com menos energia. Li *et. al* (2017) observaram um comportamento semelhante em edifícios com formato em “L”, de razão $D/B < 1$ (em que D é o comprimento da aba perpendicular ao vento, e B o comprimento da outra aba). Os autores afirmam que o comportamento é similar ao que ocorre em edifícios retangulares com o vento se aproximando da fachada de menor dimensão, e associa o primeiro pico ao desprendimento da camada limite, e o segundo pico ao seu recolamento.

Quanto aos carregamentos F_x e F_y , os resultados mais relevantes se mostraram para as incidências de 307° e 240°. Dentre estes, os resultados com vizinhança apontaram variações mais significativas no ângulo de 307°, apesar de esta direção ter obstáculos menos numerosos.

4.3.1 Caso de estudo 2-B – Análise local para o modelo isolado (ISO)

Na incidência de 307° os espectros globais de F_x e F_y apresentaram picos emergentes numa frequência reduzida de aproximadamente 0,17. Neste prédio o autor não teve acesso aos valores de frequências naturais calculadas pelo projetista para os primeiros modos de vibração, o que inviabiliza verificar as velocidades críticas de desprendimento de vórtices nestes modos, e assim avaliar a possibilidade de ocorrência do fenômeno na prática. De modo alternativo, optou-se então por fazer o cálculo inverso, e determinar qual seria o limite da frequência natural para que o fenômeno pudesse se manifestar na prática, tomando como base a velocidade de projeto.

Portanto, por meio da Equação 2.1, com $V = 44,1$ m/s, $St = 0,17$ e $L = B = 29,98$ m, chega-se a uma frequência de desprendimento de vórtices de 0,25 Hz. Para modos de vibração abaixo deste valor, o edifício poderia estar susceptível ao fenômeno. Em termos de modo de vibração em torção, esse valor limite seria de 0,13 Hz (para $f_{r_pico} = 0,09$).

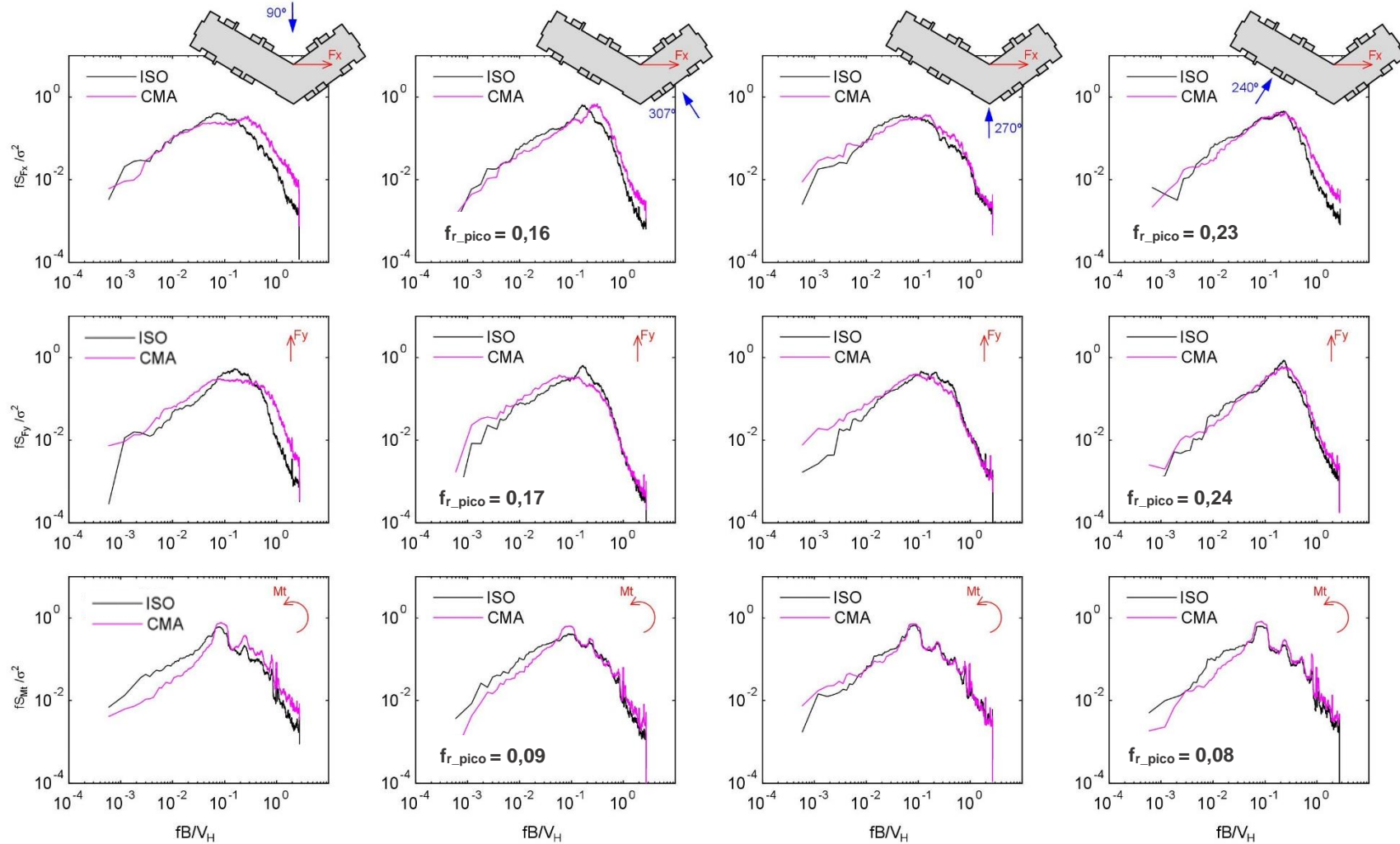


Figura 4. 22 – Resultados globais do Prédio B, em termos de F_x , F_y e M_t , considerando modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA)

Fonte: O autor (2018)

Fazendo uma estimativa grosseira da frequência natural do edifício conforme a NBR 6123/1987 (p.35), utilizando a Equação 4.1, chega-se ao valor de 0,85 Hz. A equação leva em conta apenas o tipo de construção (neste caso edifício de concreto armado, sem cortinas) e a altura da edificação (74,71 m). No entanto, tal estimativa é questionável, visto que já foi verificado na prática que edifícios com alturas não muito diferentes deste apresentaram frequências naturais próximas de 0,2 Hz (ver Quadro 1. 1).

$$T_1 = \frac{1}{f_1} = 0,5h + 0,015h \quad (4.4)$$

Sendo:

T_1 – Período fundamental [s];

f_1 – Frequência fundamental [Hz];

h – Altura [m].

Cachuço (2014) propôs uma estimativa conforme base de dados de edifícios construídos no Brasil, no qual chegou à seguinte expressão para determinação da frequência fundamental:

$$f_1 = \frac{25}{h} \quad (4.5)$$

Segundo tal estimativa, a frequência fundamental da estrutura em estudo seria de 0,33 Hz. Apesar deste valor se encontrar acima de 0,25 Hz, vale lembrar que ele é apenas uma estimativa, e como foi ressaltado pelo próprio autor, está sujeito a várias incertezas. Desta forma, não se pode afirmar com convicção que a estrutura estaria isenta da ocorrência do fenômeno.

Investigando a formação do carregamento por zonas e fachadas do edifício (Figura 4. 23), percebe-se curiosamente um comportamento oposto ao que foi observado no Prédio A. Para esta configuração é a fachada a barlavento (Fachada 3, em vermelho) que governa o carregamento global e apresenta picos nos espectros. A princípio considerou-se que poderia ter ocorrido algum equívoco na numeração das fachadas ao realizar os cálculos, mas após exaustivas verificações, concluiu-se que de fato era a fachada a barlavento que apresentava picos nos espectros.

Na tentativa de compreender melhor esse mecanismo, foram escolhidas tomadas de pressão da Zona V do edifício para uma análise individualizada (Figura 4. 24). Percebe-se que na fachada a barlavento (segunda linha da imagem), os picos se mostram mais evidentes próximos ao vértice da direita – Tomadas 404 e 407 –, enquanto que próximo ao vértice central observa-se espectros com picos duplos – Tomadas 395, 398 e 401. Essa mesma característica é mantida na fachada 2 também próximo ao vértice central – Tomadas 392 e 394 –, até que ocorre uma suavização no restante da fachada. A suavização também é observada nas fachadas 4, 5 e 6 (terceira linha da imagem).

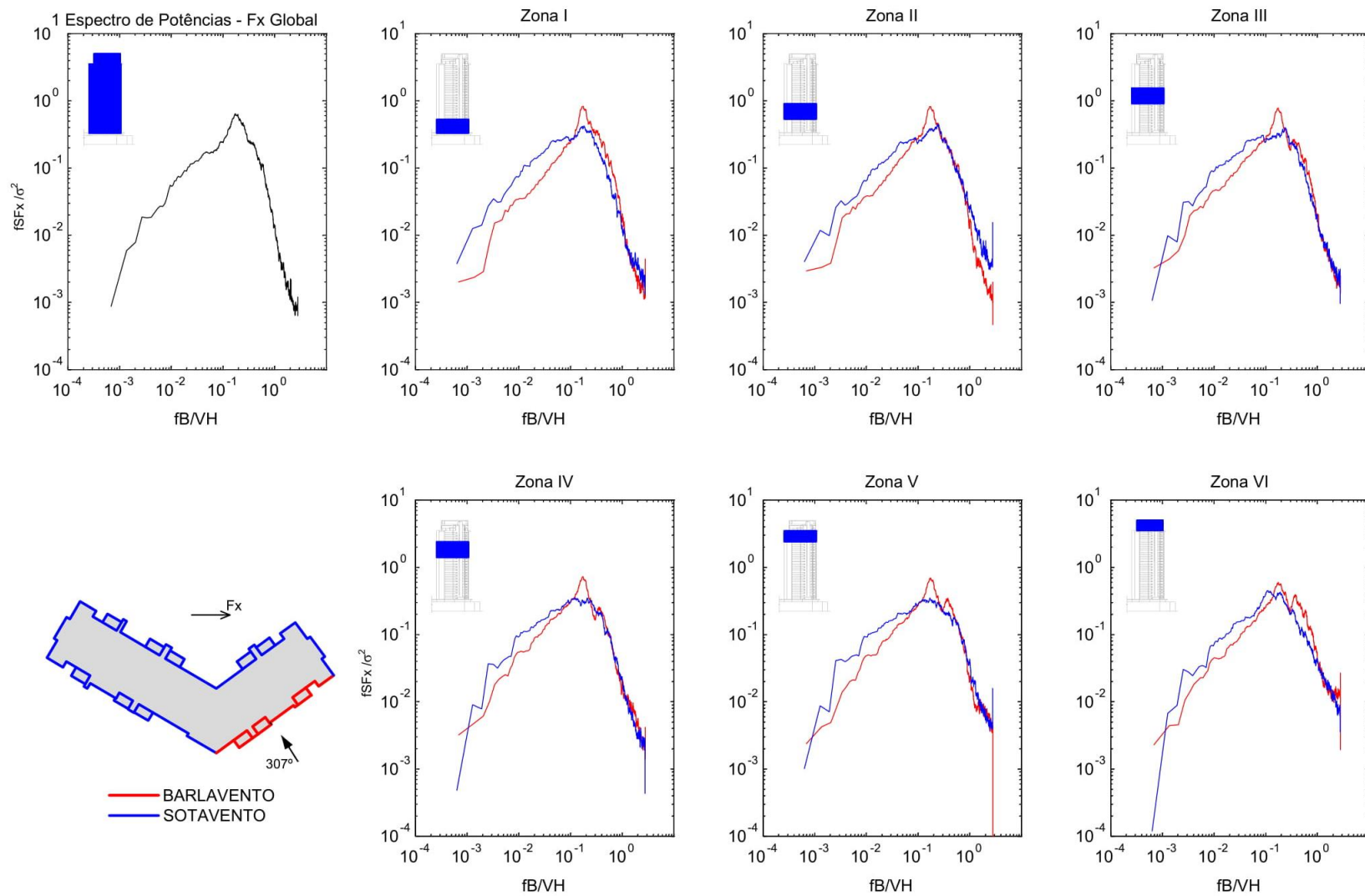


Figura 4. 23 – Análise local dos resultados de 307° em termos de F_x , por zonas e fachadas (Caso 2-B). Fonte: O autor (2018)

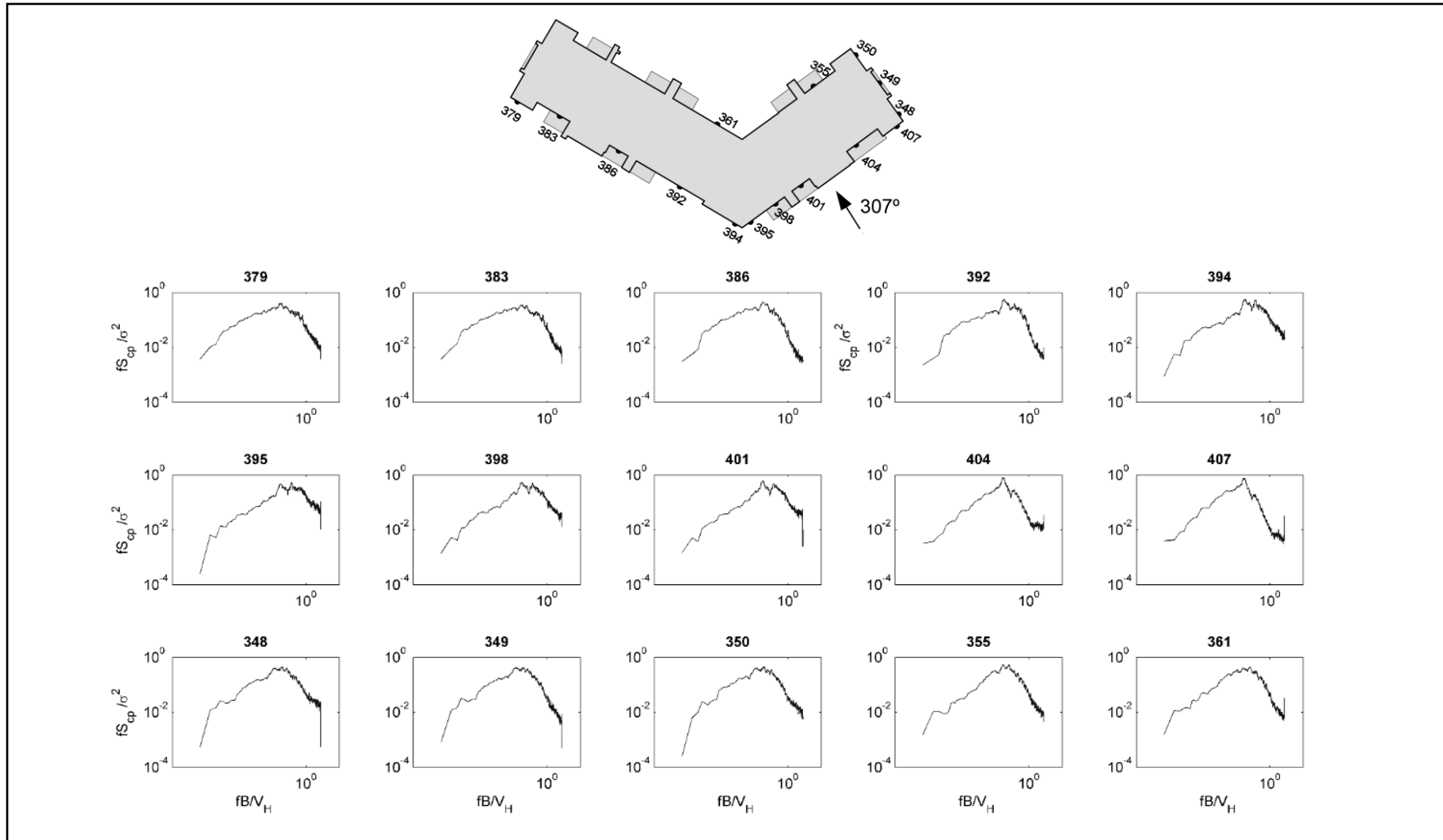


Figura 4. 24 – Resultados em termos de c_p no âmbito das tomadas de pressão – Ângulo incidente: 307° (Caso 2-B).
Fonte: O autor (2018)

Apenas com os dados obtidos neste estudo torna-se difícil explicar com clareza as razões da divergência. Uma possibilidade razoável é a de que a riqueza de detalhes na fachada do Prédio B tenha contribuído para o aumento das perturbações nesta região frontal (ver Figura 4. 25). Isto somado à geometria complexa do edifício torna complexo determinar como se desenvolve o escoamento no entorno da estrutura.



Figura 4. 25 – Detalhamento da fachada frontal do PRÉDIO B
Fonte: O autor (2018)

Existem algumas técnicas de visualização de escoamento, que não foram objeto deste estudo, mas que podem ser utilizadas em trabalhos futuros a fim de proporcionar uma melhor compreensão do fenômeno envolvido. As opções variam desde técnicas mais simples e intuitivas, como por exemplo a utilização de tufo de lã - posicionando o material de maneira a permitir que ele se alinhe com a direção do escoamento, tornando-o visível -, até métodos mais sofisticados e precisos, como é o caso do P.I.V. (particle image velocimetry). Este último permite a visualização e análise do movimento de partículas em um fluido, que contém partículas as quais acompanharão o escoamento.

Para fins de pesquisa, normalmente se adotam modelos de superfície plana, que não apresentam tantos detalhes ou reentrâncias como no edifício deste estudo de caso. Não obstante a possibilidade desses detalhes terem sido a causa de um comportamento local inesperado, percebe-se que globalmente ambas as estruturas apresentaram ações semelhantes nesta direção. Em termos práticos, as solicitações globais são suficientes para determinar o dimensionamento da estrutura. No entanto, seria necessário a utilização das técnicas citadas acima para se

compreender mais profundamente o mecanismo de formação do carregamento atuante neste caso específico.

4.3.2 Caso de estudo 2-B – Análise local para o modelo com vizinhança (CMA)

Com o vento incidindo a 307° , apesar da presença de poucos obstáculos nessa direção, a vizinhança claramente corta o efeito dos fenômenos observados na fachada a barlavento para os três carregamentos. No carregamento F_y (Figura 4. 28 e Figura 4. 29), essa observação é mantida também para o espectro global. Tal comportamento era esperado visto que a presença da vizinhança aumenta a turbulência, e com isso tende a diminuir o efeito de desprendimento de vórtices.

Em contraste, nas solicitações F_x (Figura 4. 26 e Figura 4. 27) e M_t (Figura 4. 30 e Figura 4. 31), as regiões que apresentam o formato de espectro mais próximo do carregamento global são as fachadas a sotavento das zonas mais baixas (I e II).

4.3.3 Caso de estudo 4-B – Análise local para o modelo isolado (ISO)

Em relação à incidência de 240° , obteve-se uma frequência reduzida correspondente ao pico do espectro de aproximadamente 0,24. Realizando um procedimento análogo ao que foi executado para o ângulo de 307° , estimou-se que o fenômeno pode ser observado na prática caso o edifício apresente frequências naturais abaixo de 0,35 Hz. Percebe-se que a frequência fundamental de 0,33 Hz estimada para o Prédio B no item 4.3.1 encontra-se abaixo deste limite, o que chama atenção para os reais riscos de manifestação do fenômeno dinâmico no caso concreto.

Quanto à análise local, percebe-se nesta incidência ainda mais perturbações nos resultados, como aponta a Figura 4. 32. Neste caso de estudo tanto as fachadas a barlavento quanto a sotavento apresentam picos nos gráficos. Mais uma vez, assume-se que tal fato esteja relacionado à riqueza de detalhes da fachada, mas seriam necessários outros estudos para se tomar uma conclusão acerca do tema.

4.3.4 Caso de estudo 4-B – Análise local para o modelo com vizinhança (CMA)

Em geral, os resultados apresentaram pouca divergência entre o modelo isolado e o modelo com vizinhança para a incidência de 240° . Esta observação pode ser verificada com maior detalhe nas imagens que vão da Figura 4. 33 até a Figura 4. 38.

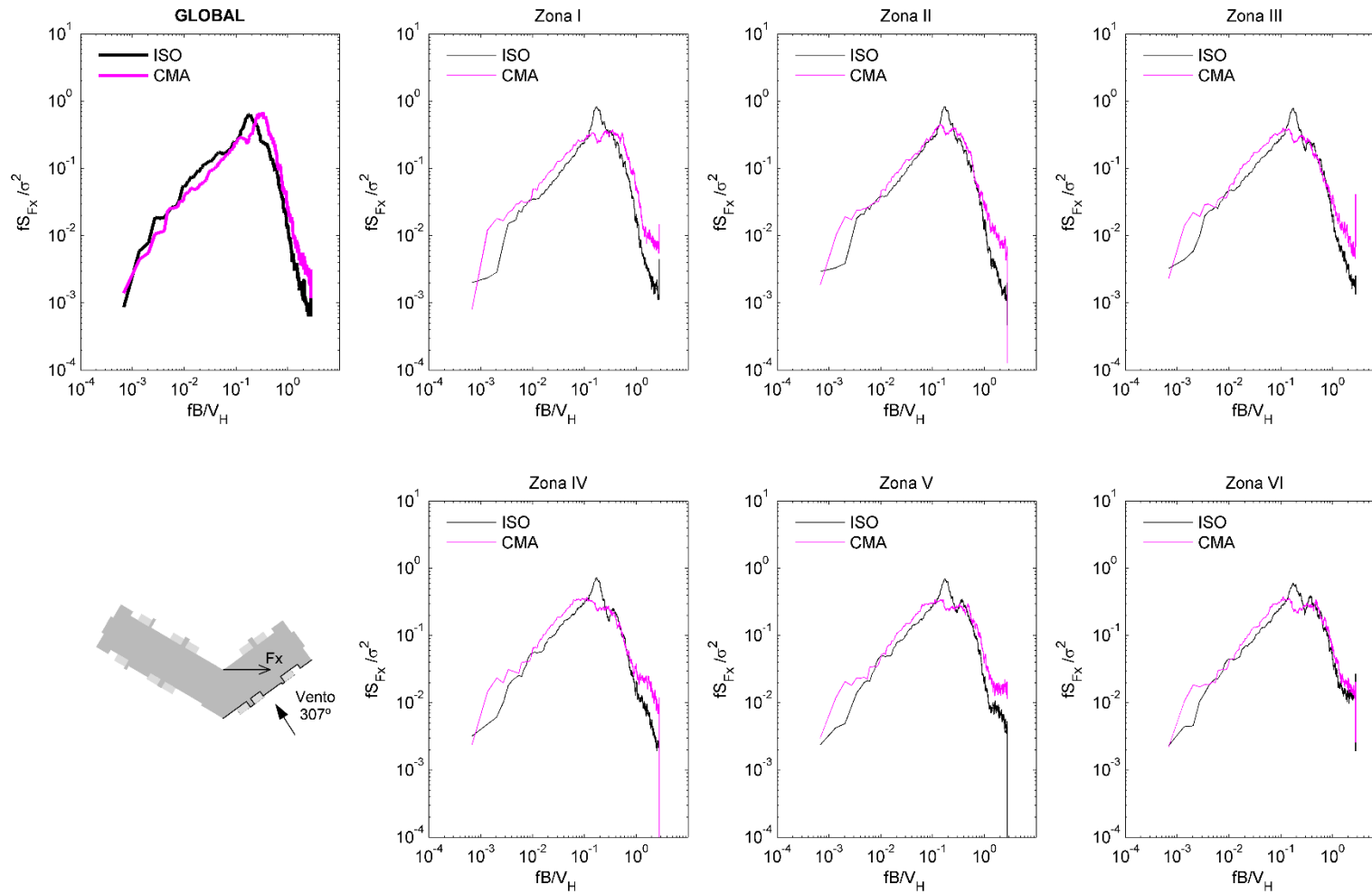


Figura 4. 26 – Resultados global e por zonas (apenas barlavento) em termos de F_x para o CASO 2-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

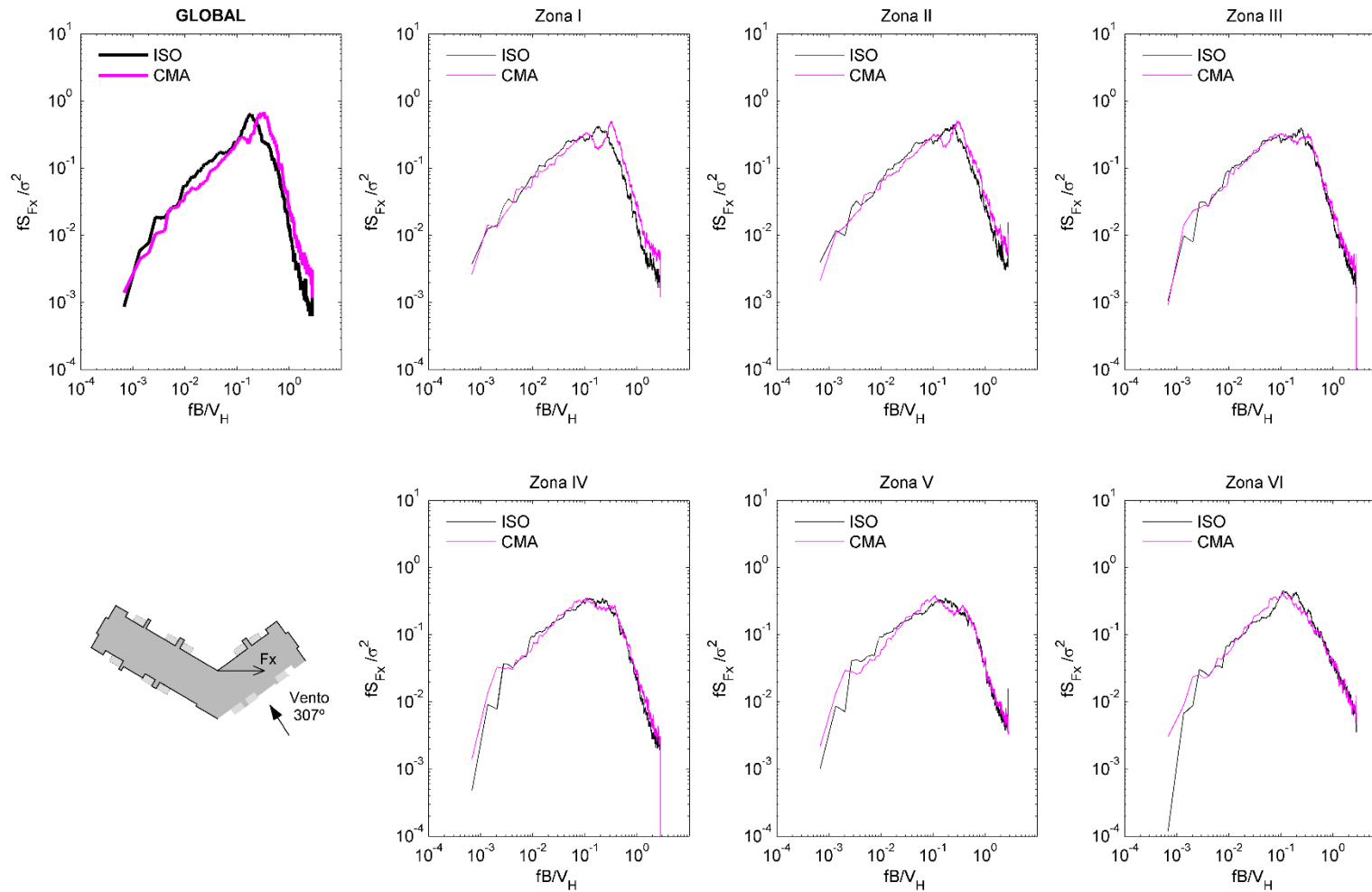


Figura 4. 27 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de F_x para o CASO 2-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

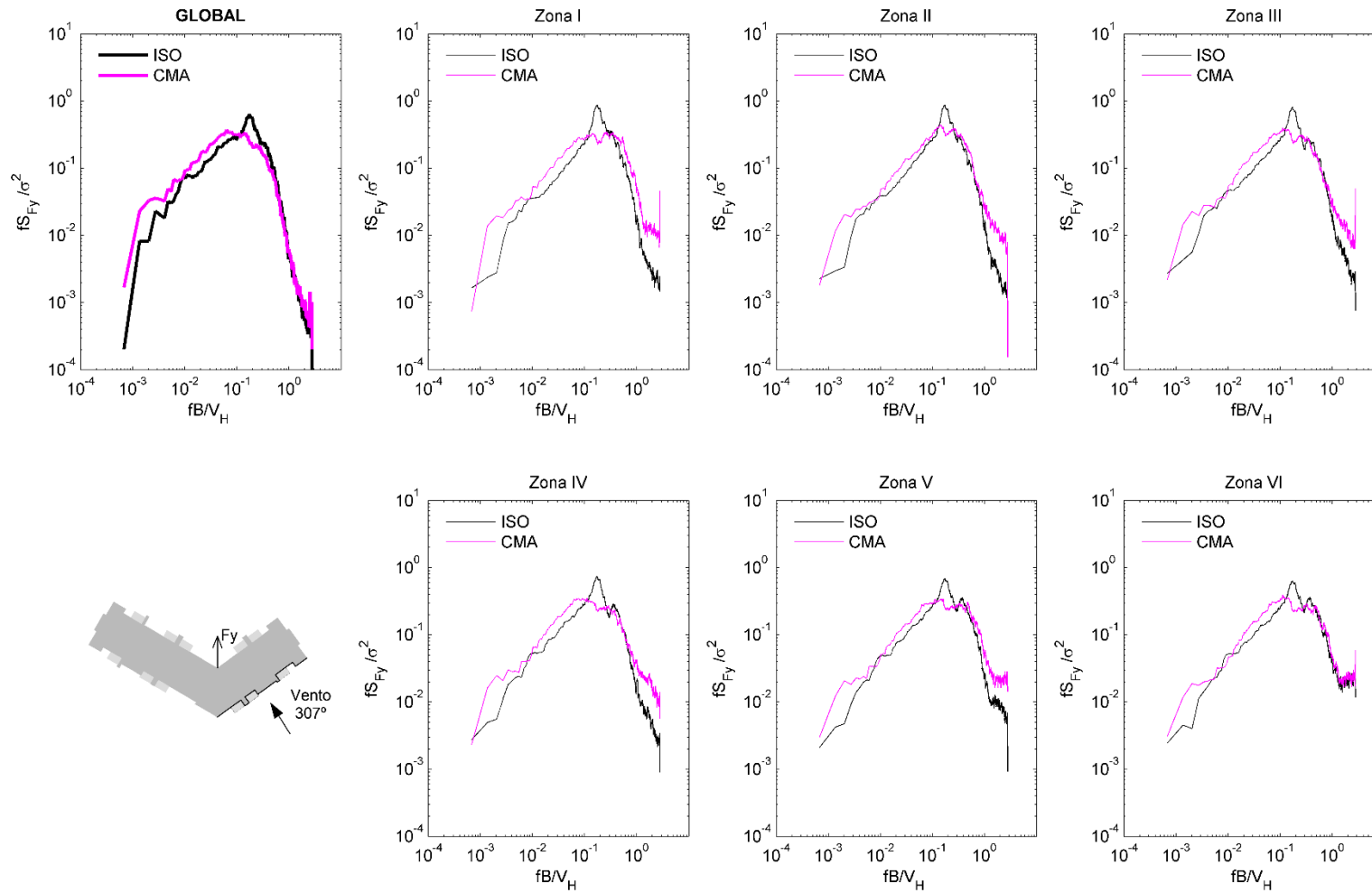


Figura 4. 28 – Resultados global e por zonas (apenas barlavento) em termos de F_y para o CASO 2-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

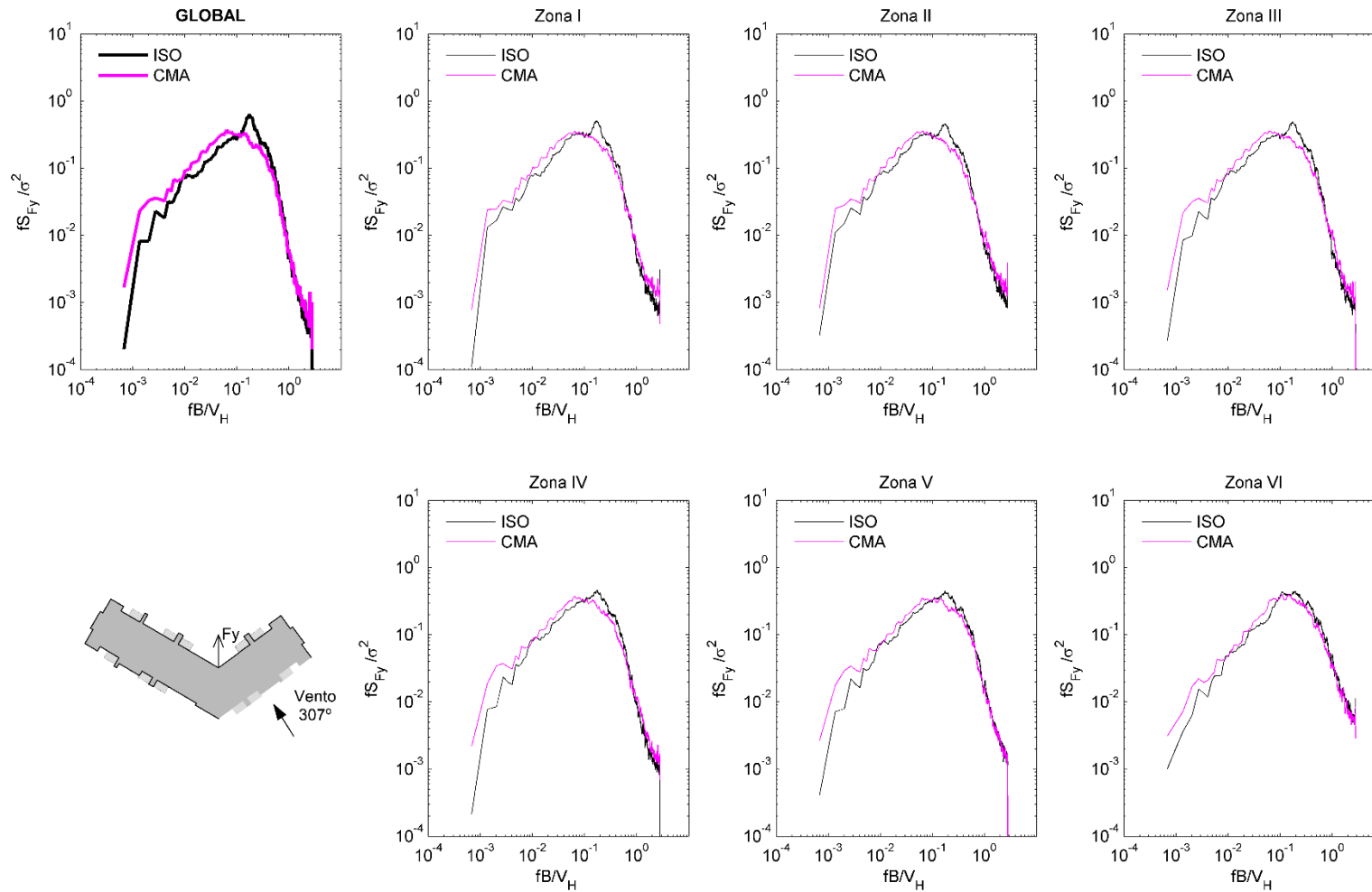


Figura 4. 29 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de F_y para o CASO 2-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

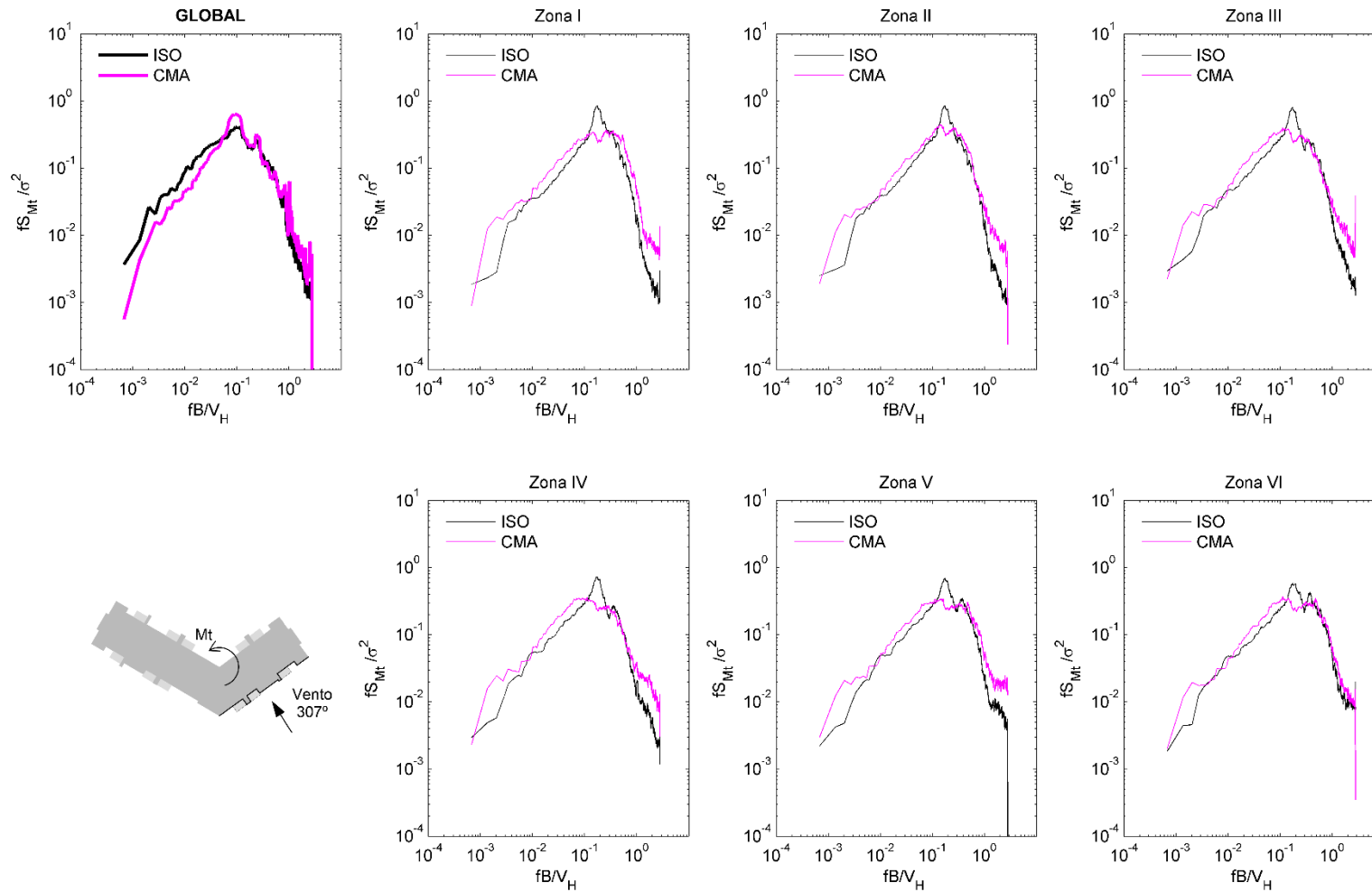


Figura 4. 30 – Resultados global e por zonas (apenas barlavento) em termos de Mt para o CASO 2-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

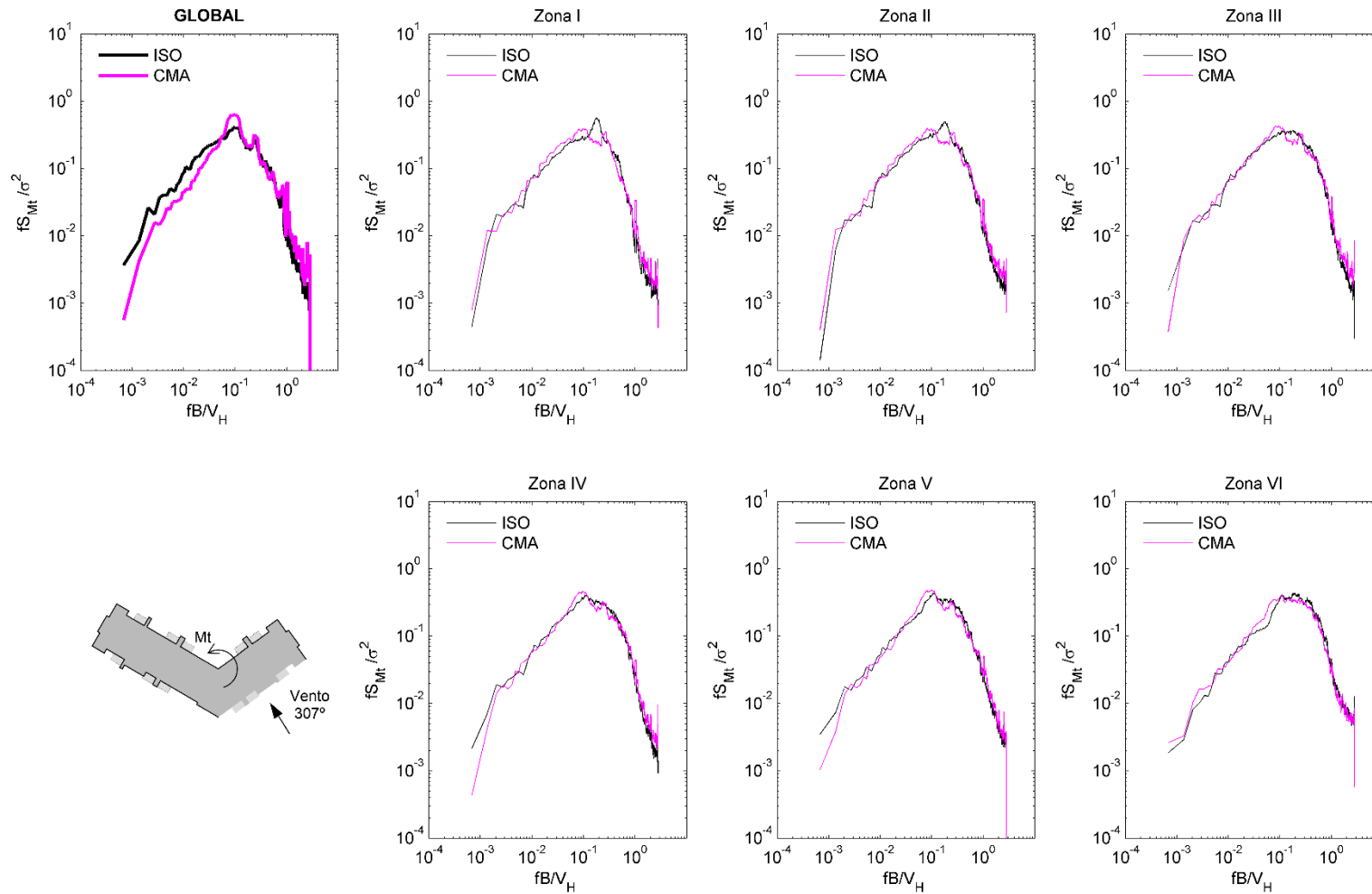


Figura 4. 31 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de Mt para o CASO 2-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

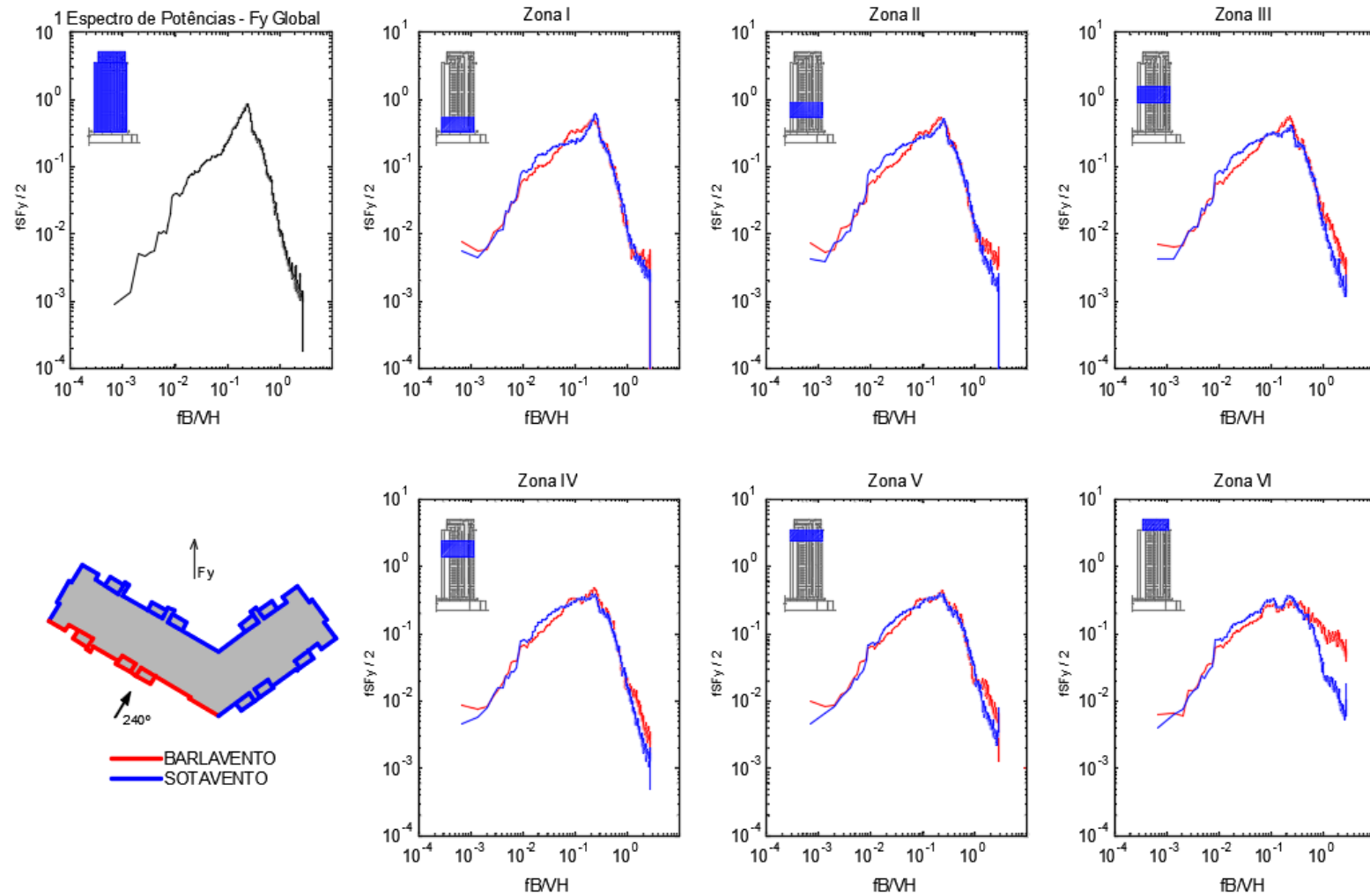


Figura 4. 32 – Análise local dos resultados de 240° em termos de F_y , por zonas e fachadas (Caso 4-B). Fonte: O autor (2018)

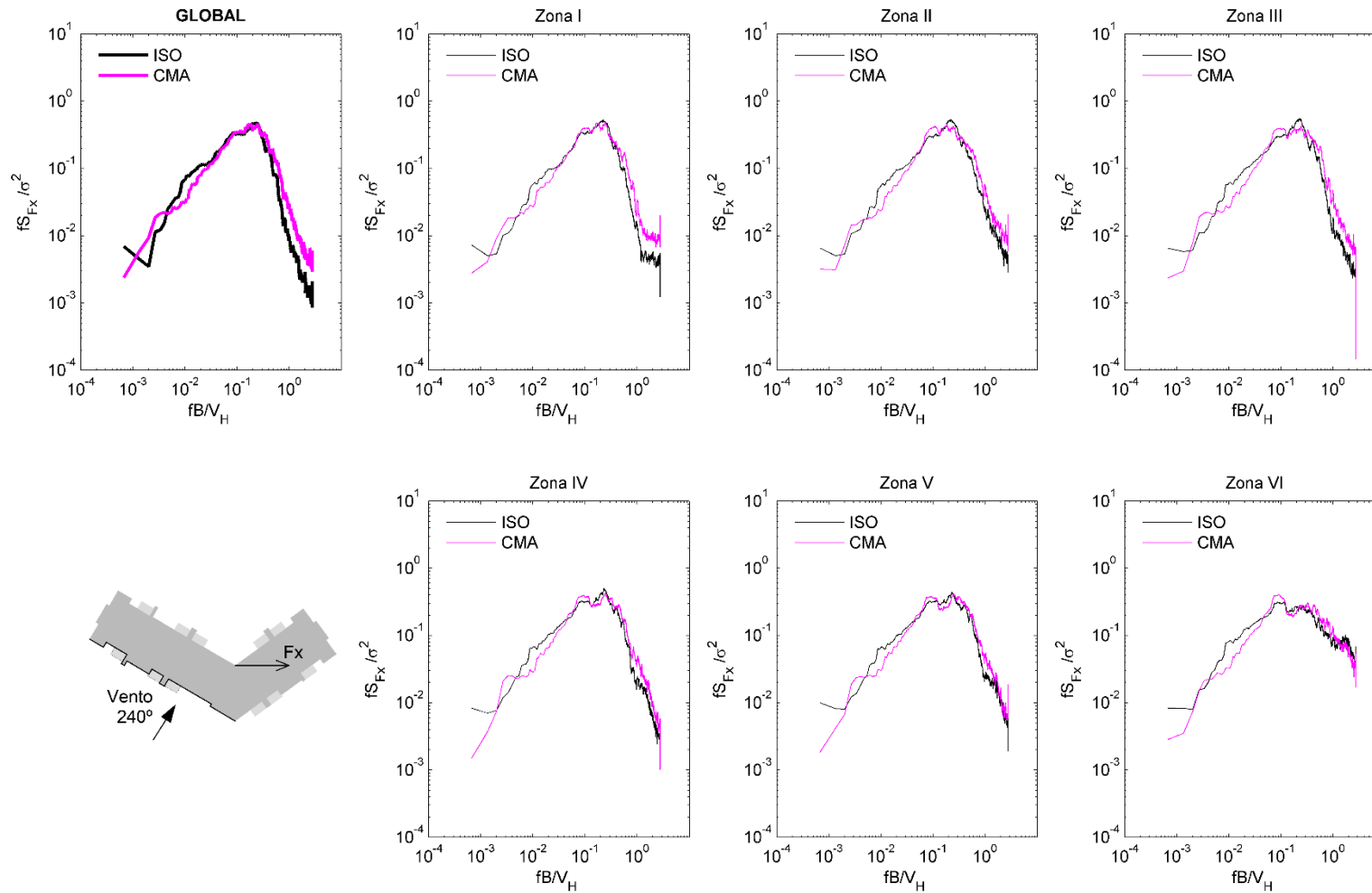


Figura 4. 33 – Resultados global e por zonas (apenas barlavento) em termos de F_x para o CASO 4-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

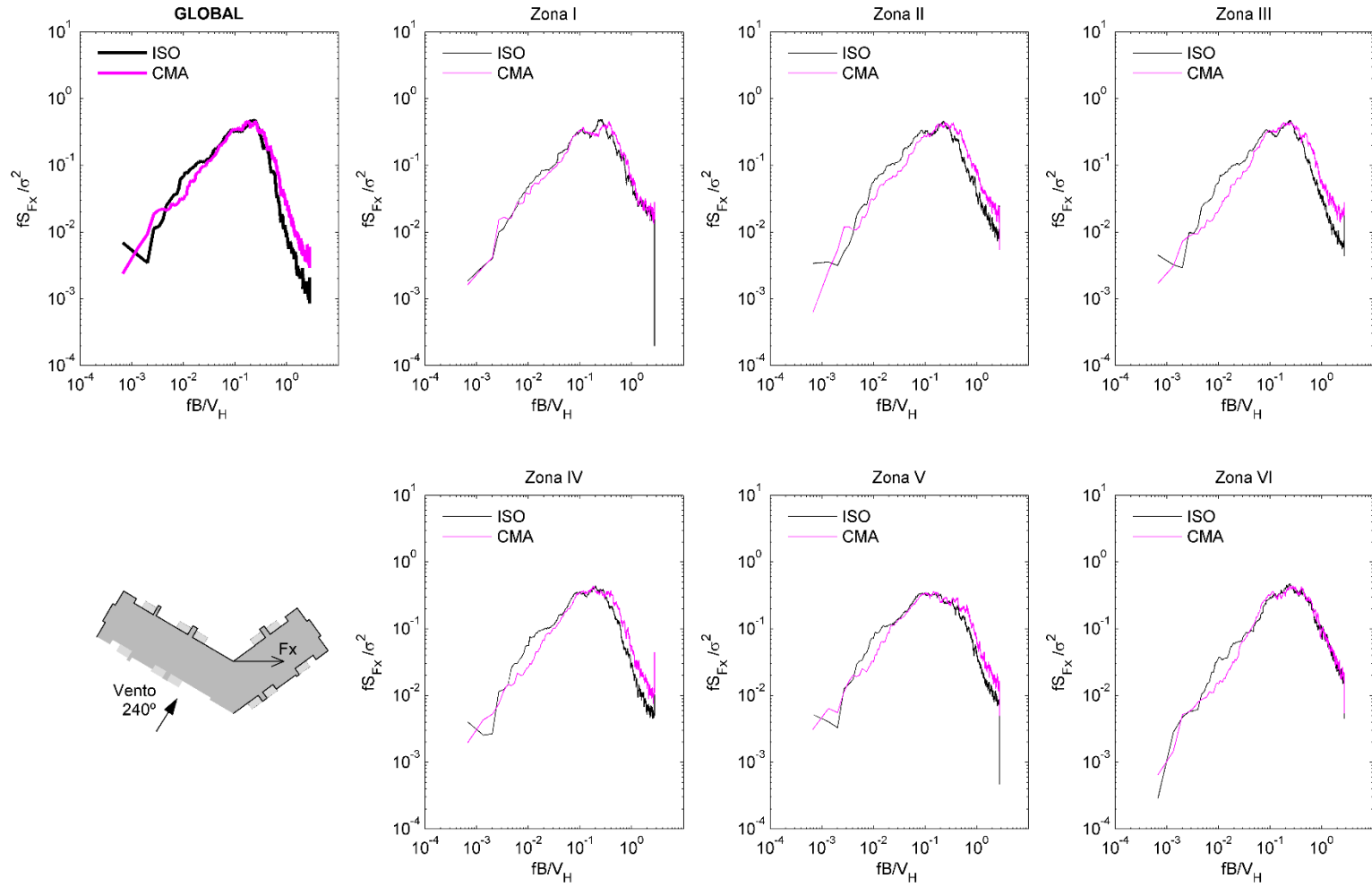


Figura 4. 34 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de F_x para o CASO 4-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

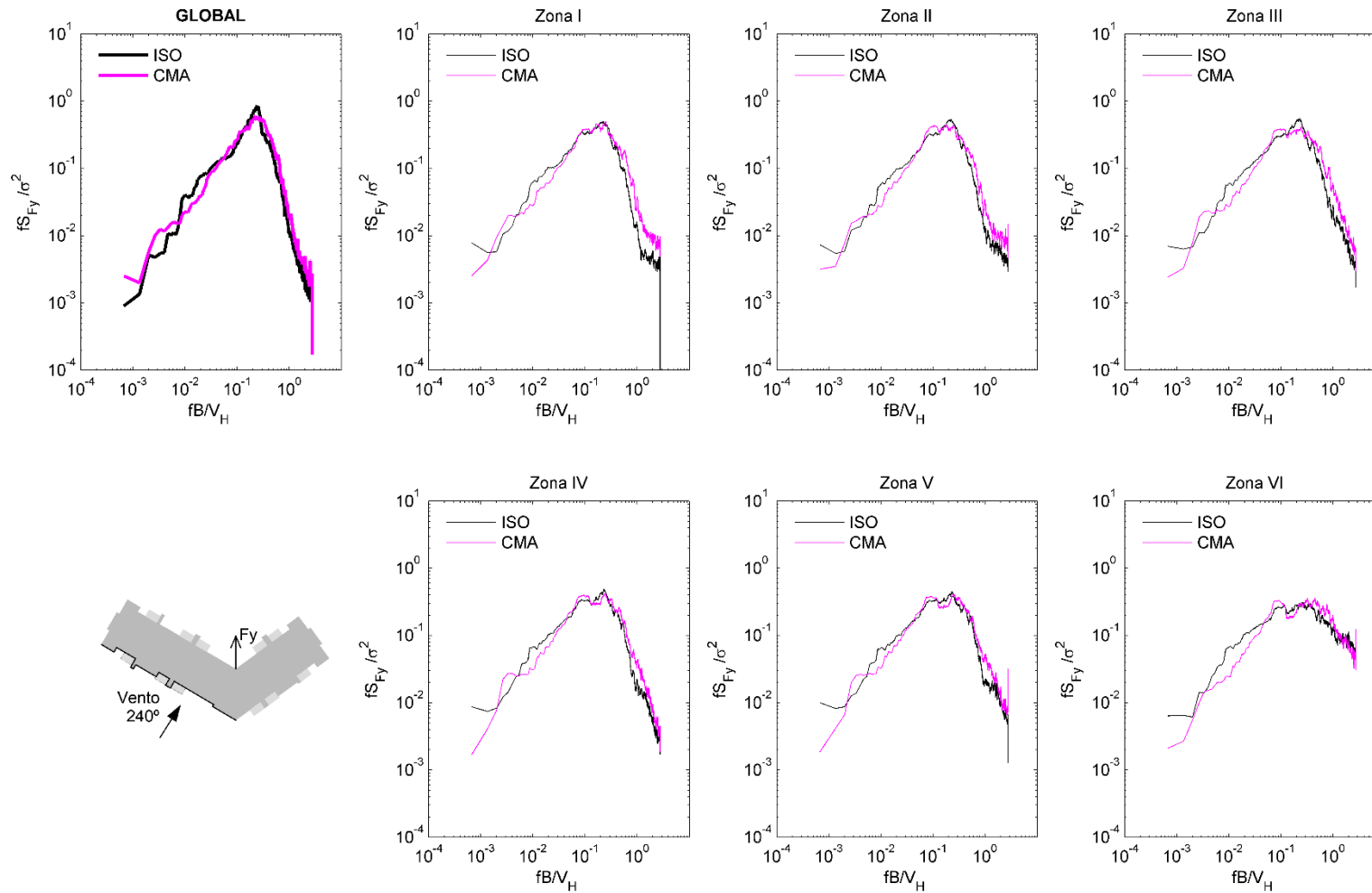


Figura 4. 35 – Resultados global e por zonas (apenas barlavento) em termos de Fy para o CASO 4-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

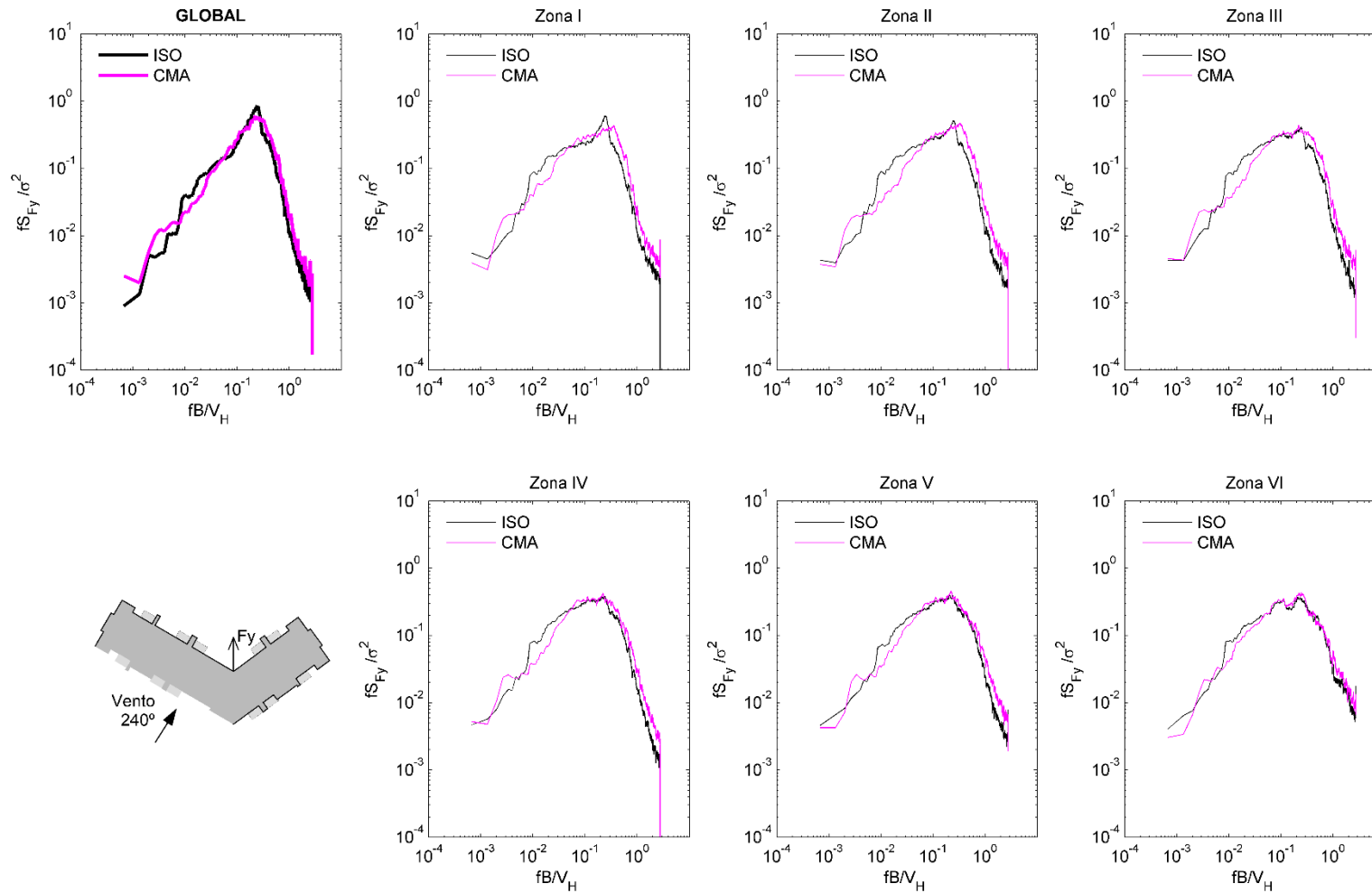


Figura 4. 36 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de F_y para o CASO 4-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

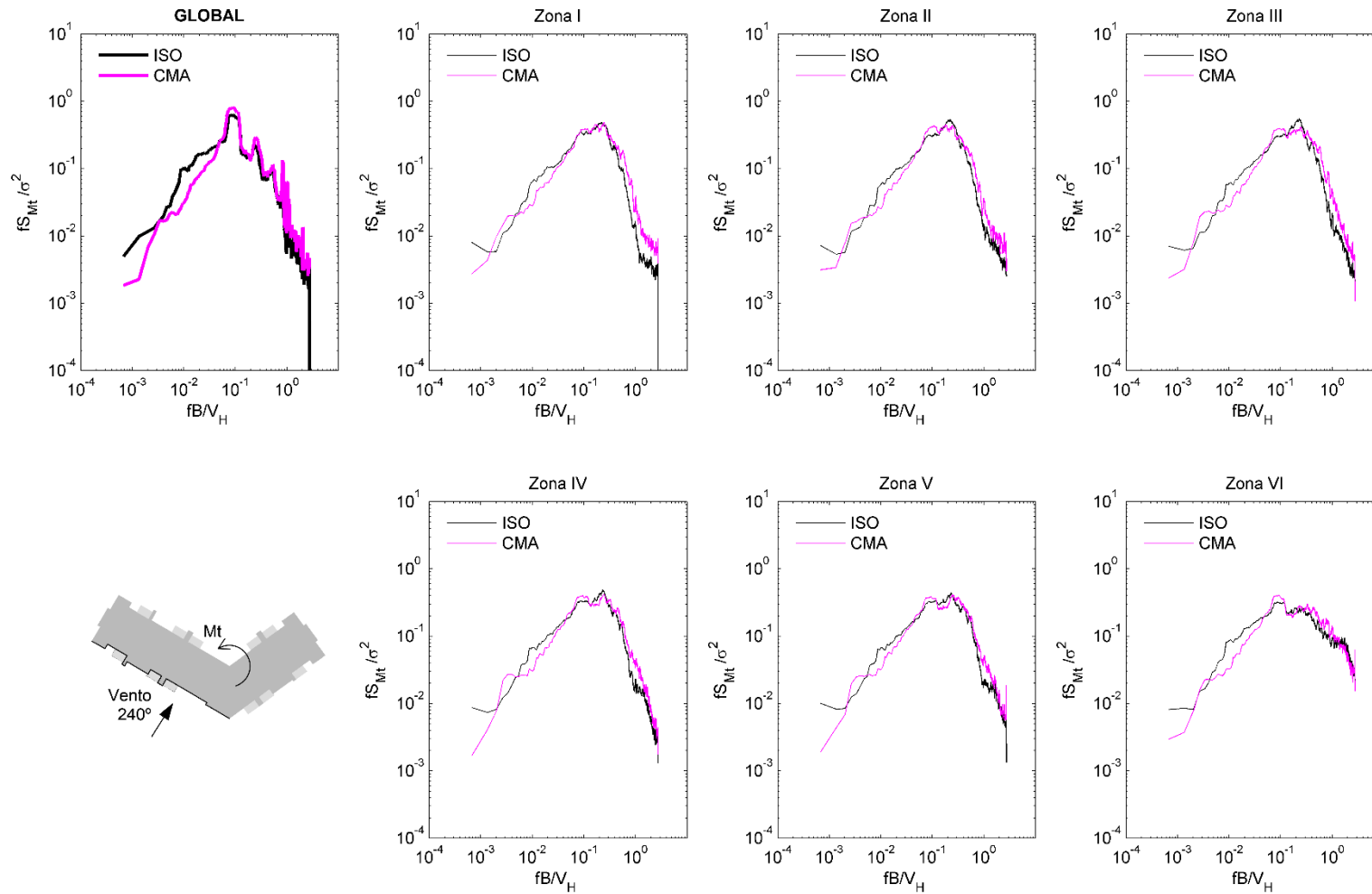


Figura 4. 37 – Resultados global e por zonas (apenas barlavento) em termos de Mt para o CASO 4-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

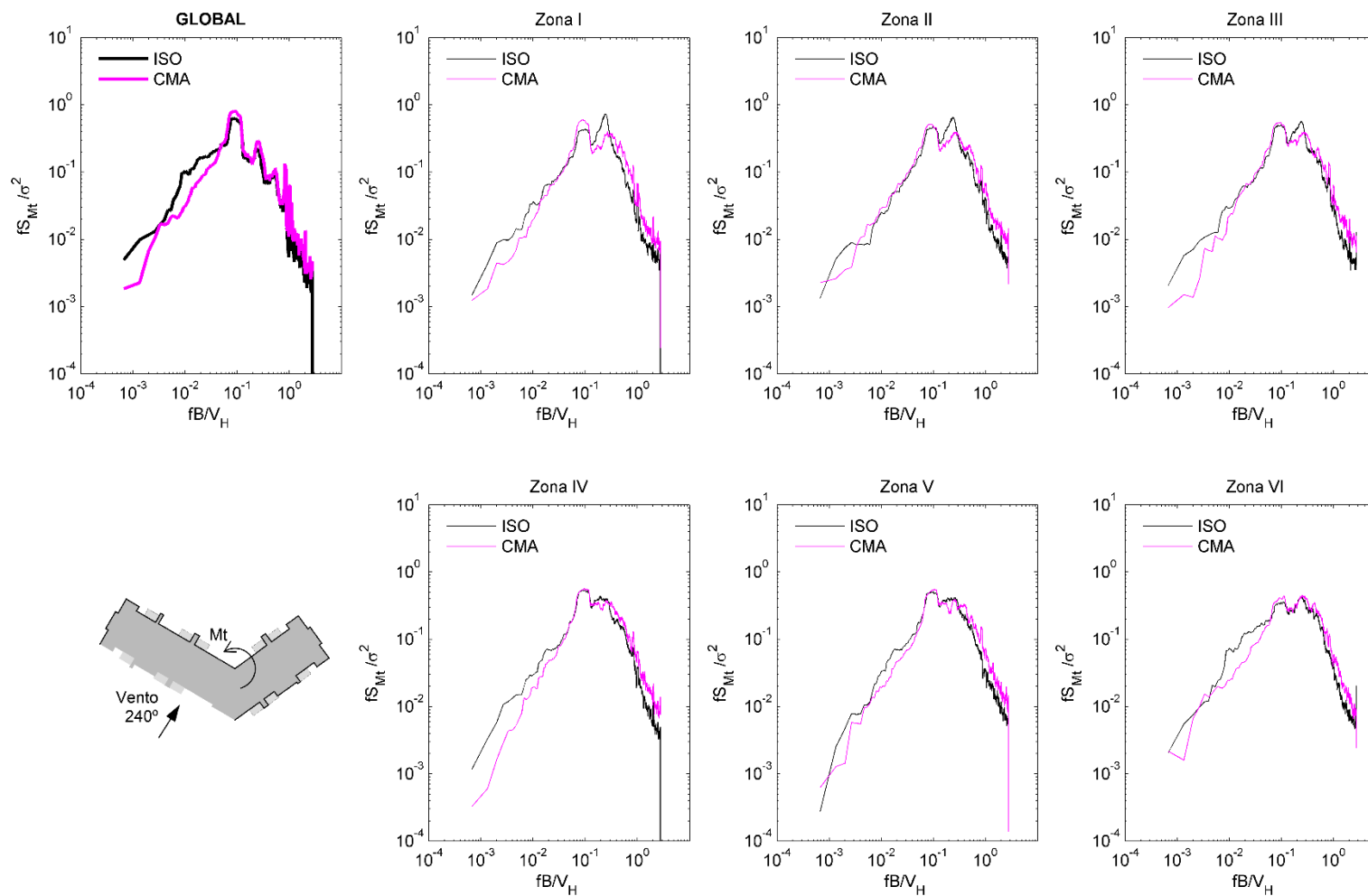


Figura 4. 38 – Resultados global e por zonas (apenas sotavento) em termos de M_t para o CASO 4-B - Modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

4.3.5 Admitância aerodinâmica

A Figura 4. 39 ilustra os resultados de admitância aerodinâmica do Prédio B, para os quatro principais ângulos de incidência, conforme as ações F_x , F_y e M_t (primeira, segunda e terceira linhas, respectivamente).

Perceba que este edifício é assimétrico, o que significa que a força transversal ao vento não será próxima de zero necessariamente. Desta forma, mesmo para a incidência de 90° a componente F_x apresentou resultados muito consistentes. Na realidade, devido ao formato do edifício e a consequente distribuição de pressões, as componentes de força média em F_x e F_y mostraram valores muito próximos entre si. Por outro lado, os valores inconsistentes apareceram para a maioria dos momentos torçores, e também para a componente F_y na direção de 270° , para os quais a solicitação média apresentou valores muito baixos.

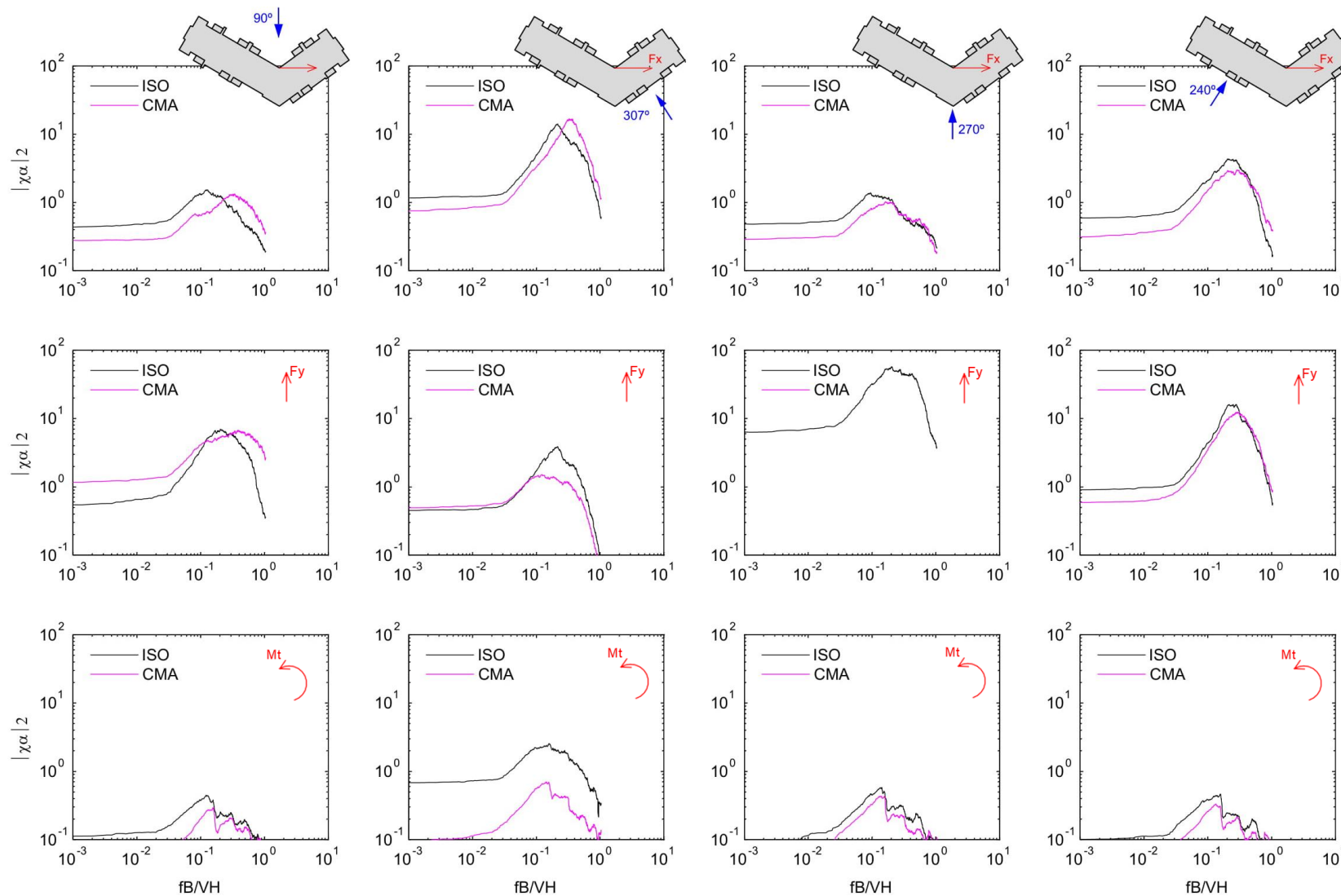


Figura 4. 39 – Resultados de admitância aerodinâmica do Prédio B, em termos de F_x , F_y e M_t , considerando modelo isolado (ISO) e com vizinhança (CMA). Fonte: O autor (2018)

4.4 RESUMO DAS COMPARAÇÕES

De modo geral, os espectros dos carregamentos globais em termos de F_x e F_y apresentaram grandes similaridades entre os dois edifícios, exceto pela incidência de 90° em que apenas o Prédio A apresentou picos emergentes.

Quanto ao carregamento torcional, o Prédio B apresentou em regra um espectro com dois picos (sendo o segundo menos evidente) em contraste ao Prédio A, no qual destacou-se apenas um. Esta observação está de acordo com o que foi estudado por Li et al. (2017) em edifícios com formato em “L”, sendo influenciada pela razão entre os comprimentos das duas abas – quando a relação é menor do que 1, o gráfico apresentou dois picos.

A Figura 4. 40 ilustra os resultados relativos à incidência crítica aproximadamente perpendicular à fachada externa de uma das abas, considerando cada modelo isolado. Apesar das diferenças em termos de dimensões e detalhamento de ambas as construções, e ainda que as análises locais tenham sugerido mecanismos distintos, percebe-se que a forma geométrica possui um papel importante no comportamento global da estrutura.

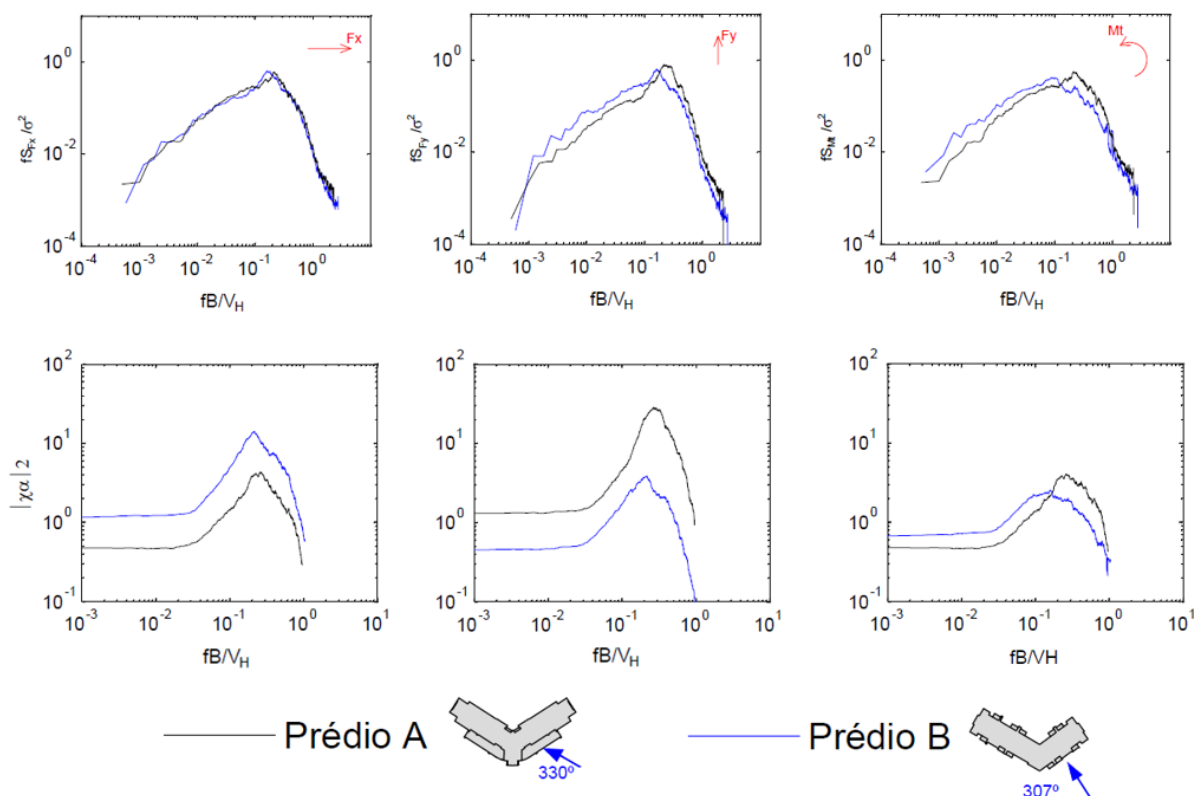


Figura 4. 40 – Comparação dos resultados globais dos dois edifícios, em termos de espectros das ações atuantes e funções de admitância aerodinâmica, para uma incidência crítica. Fonte: O autor (2018)

A figura expõe, ainda, as funções de admitância aerodinâmica correspondentes. Apesar das imprecisões nas medidas em baixa frequência, fica evidente um formato muito similar para os dois edifícios. Nas direções das componentes F_y e M_t , nota-se uma admitância maior para o Prédio A, o que tem uma ligação lógica com o fato de este ser o mais esbelto e, portanto, tende a apresentar maiores flutuações da força em relação à turbulência do vento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho realizou-se a caracterização aerodinâmica de dois edifícios reais em formato de “V”, construídos no Brasil, por meio dos dados de ensaio do acervo do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da UFRGS. Foram analisados inicialmente os espectros globais para os principais ângulos de incidência do vento, e então prosseguiu-se para um estudo mais detalhado das direções que apresentaram algum efeito dinâmico considerável. Nesta análise mais aprofundada, avaliou-se a atuação das cargas de vento por zonas e fachadas da estrutura, e ainda no âmbito das tomadas de pressão individualmente, com o fim de investigar os mecanismos de formação dos carregamentos.

A partir da análise espectral realizada, foi possível observar fenômenos de grande relevância no cálculo estrutural dos edifícios, como o desprendimento de vórtices alternados, ou ainda a ocorrência do fenômeno de “martelamento” considerando a presença de vizinhança. A incidência do vento na direção aproximadamente perpendicular à fachada externa de uma das abas se mostrou crítica nas duas estruturas, como já era esperado de estudos anteriores (LI, Y, et al., 2016 e 2017). Nesse ângulo, o comportamento global dos dois modelos foi muito similar, sugerindo que o formato dos espectros obtidos para os carregamentos poderia ser extrapolado a outros prédios com o mesmo padrão arquitetônico.

Quanto ao estudo das ações agindo localmente, foi possível identificar como se desenvolveu o escoamento e os pontos de desprendimento de vórtices quando considerado o Prédio A. No entanto, a análise detalhada não foi suficiente para se chegar a respostas conclusivas quanto ao Prédio B.

No dimensionamento de uma estrutura para fins comerciais, geralmente preocupa-se apenas com os carregamentos globais atuantes. Entretanto, uma análise local, como a proposta neste trabalho, é de grande utilidade para uma compreensão mais aprofundada do comportamento do edifício, sendo possível identificar com maior precisão as regiões onde os fenômenos se manifestam, e quais características do edifício facilitam sua ocorrência. Quanto mais aprofundada a compreensão, maior o potencial de se evitar ou mitigar a manifestação de efeitos indesejáveis.

O estudo incluiu, ainda, a investigação quanto à forma da função de admitância aerodinâmica, a partir da qual foi possível identificar mais uma vez um aspecto muito similar em ambos os prédios quando analisada a incidência crítica quase perpendicular à fachada externa de uma das abas. A informação sobre a função de admitância é muito relevante quando se pretende normatizar um procedimento para o cálculo das ações: visto que os espectros de velocidade do vento já foram amplamente estudados, possuindo modelos teóricos bem estabelecidos, com a definição de uma função que consiga representar a admitância de edifícios com esse formato seria possível determinar as forças atuantes. Apenas os dados dos dois edifícios aqui estudados são insuficientes para se traçar um gráfico geral, mas já foi possível observar que determinados padrões se repetem devido à geometria do edifício.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os casos de estudo aqui realizados ofereceram uma amostra sobre como ocorre a ação do vento em edifícios com formato em “V”, afastando-se da abstração teórica de edifícios regulares e superfície plana comumente empregados nas pesquisas, e incluindo toda a riqueza de detalhes de edificações que são de fato construídas. Apesar da grande relevância em termos de aplicação prática, um estudo desse teor dificulta a distinção entre as reais relações das variáveis envolvidas e as perturbações provocadas por detalhes arquitetônicos. Deste modo, sugere-se para pesquisas futuras uma investigação similar à que foi desenvolvida por Li et al. (2016 e 2017), mas adotando geometria em “V”. Utilizando modelos planos e fixando diferentes relações entre as dimensões da estrutura, será possível identificar de forma mais clara a influência das dimensões nos carregamentos e concluir qual seria o melhor padrão em termos de desempenho aerodinâmico.

Adicionalmente, inclui-se como sugestão a utilização de técnicas de visualização de escoamento e o uso de um anemômetro de fio quente para medir com maior precisão a velocidade do vento nas regiões próximas à superfície da estrutura. Com isso, permite-se uma análise local mais conclusiva quanto à formação dos carregamentos.

Por fim, este trabalho oferece um meio de validação para trabalhos futuros que se utilizem de modelos de ensaio teóricos e simplificados, além de servir como referência para futuras revisões normativas que venham a se adequar à realidade atual dos projetos. Desta forma, contribui-se

com os avanços do conhecimento acerca dos fenômenos dinâmicos que se manifestam em prédios altos e com seções transversais que fogem do padrão retangular.

REFERÊNCIAS

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

BÊNIA, M. C. D. **Determinação dos efeitos de vizinhança na resposta dinâmica de edifícios altos sob a ação do vento**, 2013. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

BLESSMANN, J. **O vento na engenharia estrutural**. 1st ed. Porto Alegre, 1995.

BLESSMANN, J. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. 1st ed. Porto Alegre, 1998.

BLESSMANN, J. **Acidentes causados pelo vento**. 4. ed. rev. e amp. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001.

BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das construções**. 3rd ed. Porto Alegre: Universidade/UFRGS, 2011.

CACHUÇO, F. B. **Estudo da incerteza em estimativas de frequências naturais de vibração livre de edifícios altos em concreto armado**, 2014. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

CARPEGGIANI, E. A. **Determinação dos efeitos estáticos de torção em edifícios altos devidos à ação do vento**, 2004. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

CARDOSO JR., S. D. **Edificações flexíveis sob ação dinâmica de vento turbulento**, 2011. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

CARINI, M. R. **Resposta dinâmica em torção de edifícios sob ação do vento**, 2017. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

COOK, N. J. **Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures**. 1st ed. Garston, 1985.

EUROCÓDIGO 1, **Actions on structures – Part 1-4: General Actions – Wind actions**. EN 1991-1-4, The European Standard, 2010.

GRALA, P. **Estudo das metodologias para o cálculo da resposta de estruturas cilíndrico circulares frente ao fenômeno de desprendimento de vórtices: proposta atualizada para a NBR-6123**, 2016, 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

HOLMES, J. D. **Wind Loading of Structures**. 3rd ed. Boca Raton, 2014.

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

LI, Y.; LI, Q. S. Across-wind dynamic loads on L-shaped tall buildings. **Wind and Structures**, v. 23, n. 5, p. 385-403, 2016.

LI, Y.; LI, Q. S.; CHEN, F. Wind tunnel study of wind-induced torques on L-shaped tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 167, p. 41–50, 2017.

LIANG, S.; LIU, S.; LI, Q. S.; ZHANG, L.; GU, M. Mathematical model of acrosswind dynamic loads on rectangular tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 90, n. 12-15, p. 1757–1770, 2002.

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

LIN, N.; LETCHFORD, C.; TAMURA, Y.; LIANG, B.; NAKAMURA, O. Characteristics of wind forces acting on tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Texas, v. 93, n. 3, p. 217-242, 2005.

LOREDO-SOUZA, A. M.; CARPEGGIANI, E. A.; NÚÑEZ, G. J.; RIPPEL, L. I.; PALUCH, M. J. Estudo comparativo sobre a ação e efeito do vento em edifício altos de concreto armado. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 6., 2006, São Paulo. **SIMP0163**. São Paulo: USP, 2006. p. 1226 - 1241. CD-ROM.

LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M. **Acervo do LAC – dados do ensaio estático para o Prédio A**. Porto Alegre, 2011a.

LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M. **Acervo do LAC – dados do ensaio dinâmico para o Prédio A**. Porto Alegre, 2011b.

LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M. **Acervo do LAC – dados do ensaio estático para o Prédio B**. Porto Alegre, 2017.

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

MELBOURNE, W. H.; SHARP, D. B. Effects of upwind buildings on the response of tall buildings. In: REGIONAL CONFERENCE ON TALL BUILDINGS, 1976, Hong Kong. **Proceedings...** 1976, p. 174-191.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA. **NBC**: Supplement to the National Building Code of Canada. Ottawa, 1985.

IRWIN, P.; DENOON, R.; SCOTT, D. Wind Tunnel Testing of High-Rise Buildings. , p. 1–48, 2013.

RAO, S. S. **Mechanical vibrations**. 5th ed. Upper Saddle River, 2004.

ROCHA, M. M.; LOREDO-SOUZA, A. M. **Resposta estrutural de edifícios altos frente à ação dinâmica do vento**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53o., 2011, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2011c.

SCANIVALVE®. **ZOC33 Service Manual**. Washington, 2016.

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**, v. 107–108, p.179–191, 2012.

VANIN, D. D. **Resposta dinâmica de edifícios altos frente à ação do vento: comparação de técnicas experimentais em túnel de vento**, 2011. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.