

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

**CARACTERIZAÇÃO AERODINÂMICA DE EDIFÍCIOS
ATRAVÉS DO ESPECTRO DAS CARGAS TOTAIS MEDIDAS
EM TÚNEL DE VENTO**

Fábio Augusto Scharnberg

Porto Alegre
2018

FÁBIO AUGUSTO SCHARNBERG

**CARACTERIZAÇÃO AERODINÂMICA DE EDIFÍCIOS
ATRAVÉS DO ESPECTRO DAS CARGAS TOTAIS MEDIDAS
EM TÚNEL DE VENTO**

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

Porto Alegre
2018

FÁBIO AUGUSTO SCHARNBERG

**CARACTERIZAÇÃO AERODINÂMICA DE EDIFÍCIOS
ATRAVÉS DO ESPECTRO DAS CARGAS TOTAIS MEDIDAS
EM TÚNEL DE VENTO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração (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 Loredou-Souza
Ph.D., pela University of Western Ontario,
Canadá
Orientador

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

Prof. Nilo Cesar Consoli
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Adrian Roberto Wittwer (UNNE/Argentina)
Dr., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

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

Eng. Mario Gustavo Klaus Oliveira (Vento-S)
Dr., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Acir Mércio Loredou-Souza, orientador deste trabalho, pelo enorme apoio, incentivo constante e sempre prestativo ao esclarecimento de “dúvidas e angústias”.

Agradeço ao Prof. Marcelo Rocha pela coorientação, apoio, sugestões e esclarecimentos, os quais contribuíram para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Agradeço aos demais professores do PPGEC pelos conhecimentos transmitidos.

Agradeço a minha namorada por estar ao meu lado sempre apoiando e incentivando, pela paciência e companheirismo.

Agradeço aos meus pais por me proporcionarem uma vida digna, sempre acreditando em mim. Agradeço a minha irmã por me apoiar e incentivar.

Agradeço a todos os colegas e amigos do LAC por sempre serem prestativos e dispostos a me ajudar na resolução dos problemas enfrentados durante a realização deste trabalho. Agradeço principalmente aos colegas Marcelo Z. Cavalcante, Arthur Bones e Roges Leopoldo. Também agradeço a colega Monique pela ajuda e discussões relativas ao trabalho.

Agradeço a todos os meus colegas do mestrado, Sandro Troian, Guilherme Fornel, Maílson Scherer, Japa (Arthur Oliveira), Rafael Moresco, Felipe Quevedo, Wallace Ferrão, Marina Franco, Carla Scherer e Monique Wogado, por compartilharem todos os momentos e sentimentos durante o período do curso.

Agradeço à CAPES e ao CNPQ pela bolsa concedida.

"É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota".

Theodore Roosevelt

RESUMO

SCHARNBERG, F. A. **Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento**. 2018. 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Nos últimos anos cresceu o interesse por construir edifícios cada vez mais altos, os quais estampam o poderio tecnológico e econômico das nações. Concomitantemente as estruturas se tornaram mais esbeltas e flexíveis e os fenômenos dinâmicos oriundos da ação do vento, que em edificações baixas não representam grande relevância no carregamento, começam a surgir e apresentar seus efeitos. Desta maneira, é importante conhecer como se desenvolve o escoamento do ar e a distribuição das pressões no entorno destas estruturas. Neste trabalho, caracteriza-se aerodinamicamente, através de dados oriundos de ensaios em túnel de vento, dois empreendimentos reais e presentes na engenharia nacional. Os carregamentos foram gerados através da integração simultânea de pressões e transformados em espectros de força, os quais auxiliam na visualização da energia cinética contida nas rajadas, na ocorrência de desprendimento cadenciado de vórtices, martelamento e na influência que as edificações vizinhas apresentam no escoamento. A análise é realizada local e globalmente, possibilitando verificar em que “zona”, ou faixa de altura, é mais significativa para o carregamento da estrutura como um todo. O fenômeno de desprendimento de vórtices é caracterizado por um pico no espectro transversal à incidência do vento. Quando existem edificações ou obstáculos na região a barlavento, a estrutura pode ser martelada até a altura média destes obstáculos. Por fim, os resultados aqui apresentados podem servir de auxílio no pré-dimensionamento de estruturas com configurações similares, como comparativo e validação para pesquisas futuras e como referencial na elaboração de códigos normativos referentes ao tema. Destaca-se a importância de ensaios em túnel de vento, principalmente quando a estrutura a ser analisada possui um detalhamento arquitetônico complexo. Estes ensaios permitem ao projetista simular todos os casos de carregamento e os efeitos de vizinhança com maior confiabilidade e precisão em relação a métodos simplificados contidos, atualmente, em códigos e normas.

Palavras-chave: espectro de força do vento, ensaio em túnel de vento, ação dinâmica do vento em prédios altos

ABSTRACT

SCHARNBERG, F. A. **Aerodynamic characterization of buildings through power spectrum of wind tunnel measured loads**. 2018. 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

In recent years many high-rise buildings have been built, which are a way to represent the economic and technological power of nations. Concomitantly, the structures have become slender and more flexible, and the dynamic phenomena of wind, which in low buildings do not represent a great relevance in the loading, start to show their effects. In this way, it is extremely important to know how the wind flow and the pressure distribution occur around these structures. In this research, two real projects, present in the national engineering, are characterized aerodynamically through data from wind tunnel tests. The loadings were processed through the simultaneous integration of pressures and transformed into force spectra, which aid in the visualization of the kinetic energy contained in the bursts, in the occurrence of vortex shedding, buffeting and the influence of the neighboring buildings on the wind flow. The analysis is performed locally and globally, making it possible to verify which "zone", or height range, is more significant to the loading of the structure as a whole. It can be seen that the phenomenon of vortex shedding is characterized by a peak in the crosswind spectrum and the buffeting phenomenon appears when there are buildings or obstacles in the windward region. Finally, the results presented here can be helpful in the pre-design of structures with similar configurations, in the comparison and validation for future researches and as a reference in the review of normative codes. Emphasis is given to the importance of wind tunnel testing, which allows the designer to simulate all loading cases and neighborhood effects with greater precision compared to simplified methods currently contained in codes and standards.

Keywords: wind force spectrum, wind tunnel test, wind dynamic effects in tall buildings

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – <i>Home Insurance Building</i>	18
Figura 1.2 – Edifício mais alto do mundo atualmente – <i>Burj Khalifa</i>	19
Figura 1.3 – Histórico dos edifícios altos na América do Sul.....	19
Figura 1.4 – Desenho genérico com representação das zonas e tomadas	22
Figura 2.1 – Formação dos ventos.....	24
Figura 2.2 – Esquema dos perfis de velocidades médias e tensões de Reynolds da CLA e alturas características.....	26
Figura 2.3 – Característica de perfis de velocidades médias do vento de acordo com a rugosidade superficial.....	27
Figura 2.4 – (a) registro da variação da velocidade do vento no tempo e (b) componentes da velocidade do vento.....	29
Figura 2.5 – Função de autocorrelação normalizada da turbulência do vento	31
Figura 2.6 – Forças de arrasto e lateral e momento torçor em uma edificação arbitrária	33
Figura 2.7 – Variação do coeficiente de arrasto para seção retangular	34
Figura 2.8 – Variação do coeficiente de arrasto para corpos cilíndricos em função do número de Reynolds.....	35
Figura 2.9 – Vórtices de Kármán.....	38
Figura 2.10 – Vórtices aleatórios.....	39
Figura 2.11 – Influência da turbulência no espectro de pressões	40
Figura 2.12 – Número de Strouhal para diversas seções transversais	41
Figura 2.13 – Processo de Davenport para obtenção da resposta.....	43
Figura 2.14 – Função de densidade espectral da resposta e área sob o gráfico para obtenção da variância da resposta.....	44
Figura 2.15 – Curvas da função de admitância aerodinâmica	45
Figura 2.16 – Distribuição das tomadas e configuração de ensaios	46
Figura 2.17 – Espectro de potência para as tomadas A41, A43 e A47 – configuração (a) isolada e (b) lado a lado ($S/B=0,5$).....	47
Figura 2.18 – Seção transversal dos modelos estudados por Zhou <i>et al.</i>	48

Figura 2.19 – Perfis de velocidade média e intensidade de tubulência	48
Figura 2.20 – (a) coeficientes <i>rms</i> , (b) espectro com influência da intensidade de turbulência e (c) espectro com a influência da altura para direção longitudinal	49
Figura 2.21 – (a) coeficientes <i>rms</i> , (b) espectro com influência da intensidade de turbulência e (c) espectro com a influência da altura para direção lateral/transversal.....	50
Figura 2.22 – coeficientes <i>rms</i> para a torção.....	51
Figura 2.23 – (a) perfil de velocidade média e (b) intensidade de turbulência gerados por Lin, <i>et al.</i> (2005).....	52
Figura 2.24 – Níveis do modelo e referência de forças e momento	53
Figura 3.1 – Túnel de vento <i>Professor Joaquim Blessmann</i>	58
Figura 3.2 – Circuito aerodinâmico do túnel de vento <i>Professor Joaquim Blessmann</i>	59
Figura 3.3 – Anemômetro localizado no eixo transversal do túnel e geradores de turbulência e rugosidade.....	61
Figura 3.4 – Gráficos do perfil de velocidade média e intensidade de turbulência para o expoente $p=0,23$ da lei de potência	62
Figura 3.5 – Espectro da velocidade do vento no eixo do túnel de vento $z = 450$ mm.	62
Figura 3.6 – Perfil de velocidades médias, intensidade de turbulência e macroescala da componente longitudinal da turbulência.....	63
Figura 3.7 – Croqui da forma e dimensões, em metros, das torres.....	65
Figura 3.8 – Elevações lateral e frontal, dimensões em metros	66
Figura 3.9 – Configurações de ensaio	67
Figura 3.10 – Modelo reduzido – configuração 1.....	67
Figura 3.11 – Formas modais simplificadas da estrutura.....	68
Figura 3.12 – Subdivisão da altura em zonas para o empreendimento I	68
Figura 3.13 – Croqui da forma, dimensões em planta baixa e referência para o ângulo de incidência do vento (a) e elevação (b), em metros, do empreendimento II.....	70
Figura 3.14 – Imagens dos modelos reduzidos no túnel de vento para as configurações de ensaio	70
Figura 3.15 – Desenho das configurações de ensaio para o empreendimento II.....	71
Figura 3.16 – Subdivisão da altura em zonas para o empreendimento II	71
Figura 4.1 – Fluxograma dos procedimentos para obtenção dos resultados.....	74

Figura 4.2 – Sistema eletrônico de medição de pressões dinâmicas do LAC/UFRGS.....	75
Figura 4.3 – Referências para conversão de um registro de pressão dinâmica em um registro de parcelas de componentes horizontais de forças F_x e F_y e de momento torçor M_z para uma seção transversal da edificação.....	76
Figura 4.4 – Mudança do domínio do tempo para a frequência	79
Figura 4.5 – Suavização da série	81
Figura 4.6 – Convenção de sinais para os coeficientes de pressão.....	81
Figura 4.7 – Domínio tempo e frequência da tomada 446 (Empr. I, torre A, config. 1, $\alpha=270^\circ$)	82
Figura 4.8 - Densidades espectrais de forças e momentos globais para a torre A.....	84
Figura 4.9 - Densidades espectrais de forças e momentos globais para a torre B.....	85
Figura 4.10 – Densidades espectrais das forças e momento torçor por zona na torre A e vento incidindo a $\alpha=225^\circ$	89
Figura 4.11 – Densidades espectrais das forças e momento torçor por zona na torre A e vento incidindo a $\alpha=270^\circ$	90
Figura 4.12 – Densidades espectrais das forças e momento torçor por zona na torre B e vento incidindo a $\alpha=225^\circ$	91
Figura 4.13 – Densidades espectrais das forças e momento torçor por zona na torre B e vento incidindo a $\alpha=270^\circ$	92
Figura 4.14 – Funções de admitância aerodinâmica para a torre A do vento incidindo a $\alpha=225^\circ$	95
Figura 4.15 – Funções de admitância aerodinâmica para a torre A do vento incidindo a $\alpha=270^\circ$	95
Figura 4.16 – Funções de admitância aerodinâmica para a torre B do vento incidindo a $\alpha=225^\circ$	96
Figura 4.17 – Funções de admitância aerodinâmica para a torre B do vento incidindo a $\alpha=270^\circ$	96
Figura 4.18 – Densidades espectrais de forças e momentos globais do empreendimento II ...	98
Figura 4.19 – Densidades espectrais das forças e momento torçor por zona no empreendimento II e vento incidindo a $\alpha=150^\circ$	101
Figura 4.20 – Densidades espectrais das forças e momento torçor por zona no empreendimento II e vento incidindo a $\alpha=270^\circ$	102
Figura 4.21 – Funções de admitância aerodinâmica da torre do empreendimento II com vento incidindo a $\alpha=150^\circ$	104

Figura 4.22 – Funções de admitância aerodinâmica da torre do empreendimento II com vento incidindo a $\alpha=270^\circ$	105
---	-----

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Modelos testados por Lin, <i>et al.</i> (2005)	52
Quadro 2.2 – Espectros de força longitudinal e transversal e momento de torção para os níveis 2, 5 e 8 dos diversos modelos estudados por Lin, <i>et al.</i> (2005)	53
Quadro 3.1 – Categorias de rugosidade do terreno segundo a NBR 6123 (1988)	61
Quadro 3.2 – Dimensões dos modelos em estudo	64
Quadro 3.3 – Resumo das características do empreendimento I	69
Quadro 3.4 – Resumo das características do empreendimento II	72
Quadro 4.1 - Frequências reduzidas de pico no espectro de forças da direção transversal	99
Quadro 4.2 – Velocidade crítica de desprendimento de vórtices - $\alpha=180^\circ$ e $\alpha=270^\circ$	100

LISTA DE SÍMBOLOS

A é a área da superfície de referência

A_i é a área de influência da i -ésima tomada

C_L é o coeficiente de arrasto (sentido longitudinal ao vento)

C_T é o coeficiente de força transversal (ou lateral)

C_{MT} é o coeficiente de torção

F_L é a força de arrasto (sentido longitudinal ao vento)

F_T é a força transversal (ou lateral)

M_T é o momento torçor

F_x é a força na direção x

F_y é a força na direção y

\bar{F} é a força média

$\vec{F}(t)$ é a força resultante no tempo t

L é a dimensão linear característica da estrutura (em geral perpendicular ao escoamento)

L_i é a distância ortogonal do eixo de atuação da pressão na i -ésima tomada à origem do sistema de referência (centro de rigidez)

L_1^1 é a escala integral da componente longitudinal

P_{atm} é a pressão atmosférica no momento do ensaio, em mmH₂O

R_e é o número de Reynolds, adimensional

$R_1(r, \tau)$ é a função de autocorrelação normalizada para a componente longitudinal

S é a superfície, ou zona, para a qual se deseja obter a resultante $\vec{F}(t)$

S_t é o número de Strouhal

T é a temperatura dentro do túnel no momento do ensaio, em °C

T_0 é o período de medição

T_1 é o período médio dos turbilhões

V é a velocidade média do vento, em m/s

V_{cr} é a velocidade crítica do vento para desprendimento de vórtices

$\bar{V}(z)$ é a velocidade média na cota z

$\bar{V}(z_{ref})$ é a velocidade média na cota de referência z_{ref}

$\underline{V}(r, t)$ é o vetor velocidade em um ponto r e no instante t

$\underline{\bar{V}}(r)$ é o vetor velocidade média em um ponto r

d é o diâmetro do cilindro ou dimensão característica, em metros

f_s é a frequência de desprendimento de um par de vórtices

f_n é a frequência natural da estrutura

k é o número de elementos considerados na média devendo sempre ser um número ímpar

k_0 é o coeficiente que vincula q e Δp_a , adimensional

n é o número de tomadas presentes na zona de integração

p é o expoente da curva de potência

$p(t)$ é a pressão local no tempo t

$p_i(t)$ é a pressão medida na i -ésima tomada no tempo t

q_m é a pressão dinâmica, ($q_m = \rho_{ar} V^2/2$), em mmH₂O

q é a pressão dinâmica, $q = 1/2 \rho \bar{V}^2$

\bar{u} é a componente das flutuações na direção do vento, ou $\underline{v}_1(r, t)$

u_* é a velocidade de fricção

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

$\underline{v}(r, t)$ é o vetor rajada, ou o vetor de flutuações da velocidade

$\underline{v}_1(r, t)$, $\underline{v}_2(r, t)$ e $\underline{v}_3(r, t)$ são as componentes escalares nas direções 1, 2 e 3

x_n é a amostra original

y_n é o valor da amostra suavizada

z_0 altura média da rugosidade do terreno, ou rugosidade aerodinâmica

z_{ref} é a cota de referência

$z - z_d$ é a diferença entre a cota e o plano zero

$\bar{w}_{máx}$ é a componente vertical máxima das flutuações, ou $\underline{v}_3(r, t)_{máx}$

Δp_a é a pressão de referência (diferença de pressão entre os anéis piezométricos), em mmH₂O

χ_a é a função de admitância aerodinâmica

τ_0 é a tensão de cisalhamento

κ é a constante de Von Kármán, geralmente adotado igual a 0,4

$\sigma_i(r)$ é o desvio padrão das componentes de flutuação da velocidade ou o valor *rms* quando a média for considerada igual a 0

ν é a viscosidade cinemática do fluido, em m²/s

ρ ou ρ_{ar} é a massa específica do ar

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 GENERALIDADES	18
1.2 OBJETIVOS	21
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 CARACTERÍSTICAS E CONCEITOS DO VENTO	24
2.1.1 Camada limite atmosférica (CLA)	25
2.1.2 Perfil vertical da velocidade média do vento	26
2.1.3 Turbulência no escoamento do vento	28
2.1.3.1 Desvio padrão e valor <i>rms</i>	30
2.1.3.2 Intensidade de turbulência	30
2.1.3.3 Escala integral de turbulência	30
2.2 FORÇAS ORIGINADAS DEVIDO À INCIDÊNCIA DO VENTO	32
2.3 VIBRAÇÕES CAUSADAS PELO VENTO.....	36
2.3.1 Energia cinética das rajadas	36
2.3.2 Martelamento (<i>buffeting</i>)	37
2.3.3 Desprendimento de vórtices	38
2.3.4 Galope	41
2.4 PROCESSO DE DAVENPORT.....	42
2.4.1 Admitância aerodinâmica	44
2.5 ESTADO DA ARTE	46
2.5.1 Estudo realizado por Bronkhorst, et al. (2013)	46
2.5.2 Estudo realizado por Zhou, et al. (2003)	48
2.5.3 Estudo realizado por Lin, et al. (2005)	52
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	57
3.1 TÚNEL DE VENTO <i>PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN</i>	57
3.2 SIMULAÇÃO DO VENTO	60
3.3 DESCRIÇÃO DAS ESTRUTURAS E DOS MODELOS	63
3.3.1 Empreendimento I	64
3.3.2 Empreendimento II	69
4. PROCESSAMENTO DE DADOS E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	73
4.1 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS E PROCESSAMENTO DE DADOS	75
4.1.1 Integração simultânea das pressões	75
4.1.2 Transformada de Fourier	77
4.1.3 Suavização dos espectros	80

4.1.4 Considerações sobre o processamento dos dados.....	81
4.2 RESULTADOS.....	83
4.2.1 Empreendimento I.....	83
4.2.1.1 Resultados globais.....	83
4.2.1.2 Resultados por zonas	88
4.2.1.3 Funções de admitância aerodinâmica para as torres A e B	94
4.2.2 Empreendimento II	97
4.2.2.1 Resultados globais.....	97
4.2.2.2 Resultados por zonas	100
4.2.2.3 Funções de admitância aerodinâmica para o empreendimento II	104
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
5.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	107
REFERÊNCIAS.....	108
APÊNDICE A – Espectros de força – Empreendimento I	111
APÊNDICE B – Funções de admitância aerodinâmica – Empreendimento I.....	128
APÊNDICE C – Espectros de força – Empreendimento II.....	146
APÊNDICE D – Funções de admitância aerodinâmica - Empreendimento II.....	155

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma síntese da história dos edifícios altos e importância de sua caracterização aerodinâmica, bem como os objetivos e a organização desta dissertação.

1.1 GENERALIDADES

O homem sempre almejou alcançar alturas elevadas. Ao longo dos séculos foram sendo construídos edifícios cada vez mais altos e imponentes para promover as cidades, a cultura e como uma forma de demonstração de poder econômico e tecnológico. A primeira geração de arranha céus foi datada na década de 1880 com a construção do *Home Insurance Building* em Chicago, com 12 andares, conforme ilustra a Figura 1.1.

Figura 1.1 – *Home Insurance Building*



(fonte: ROBERTELLA,2016)

Nos dias atuais, a demonstração de riqueza e poder persistem e ocorrem por meio da construção de edifícios ainda mais altos, como por exemplo, o *Burj Khalifa* apresentado na Figura 1.2, com mais de 828 metros de altura e 160 andares, localizado em Dubai nos Emirados Árabes, sendo atualmente o edifício mais alto do mundo. Porém, já está sendo construído em Gidá na Arábia

Saudita a *Jeddah Tower*, um arranha céu com mais de 1000 metros de altura e com previsão de término para o ano de 2020.

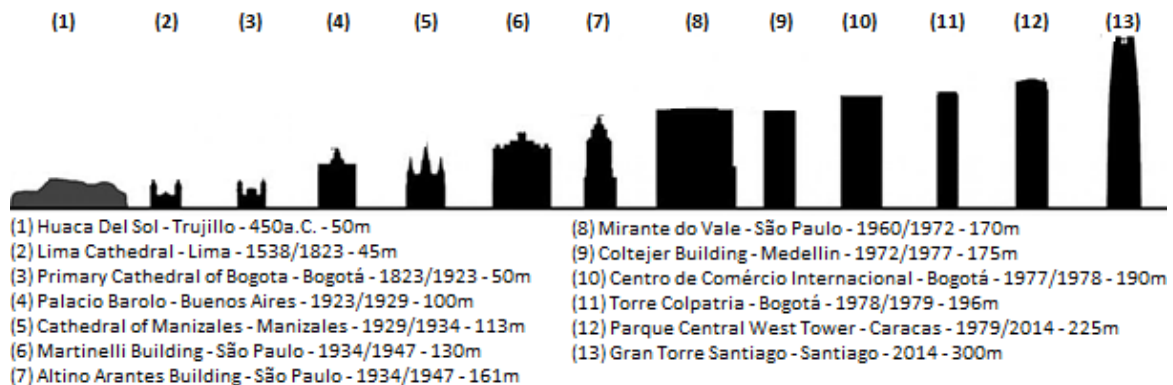
Figura 1.2 – Edifício mais alto do mundo atualmente – *Burj Khalifa*



(fonte: SOM, 2017)

Na América do Sul e no Brasil esta tendência por edificar estruturas de grandes alturas também foi desenvolvida ao longo dos anos, como podemos verificar na Figura 1.3. Com o ganho na altura das edificações, houve também a necessidade de novas considerações para os carregamentos que atuariam nestas estruturas, como por exemplo a ação do vento.

Figura 1.3 – Histórico dos edifícios altos na América do Sul



(fonte: adaptada de SWANSON, 2015)

O vento não era considerado um problema em edificações baixas e pesadas de paredes espessas, nas quais o carregamento vertical era predominante. Porém, na medida em que as edificações foram se tornando mais leves e esbeltas, o vento passou a ter grande importância, originando carregamentos horizontais que muitas vezes produzem as principais solicitações da estrutura. Desta maneira, as características mecânicas da estrutura, como a rigidez, o fator de amortecimento, as frequências naturais e a massa tornaram-se imprescindíveis para a determinação da resposta e do dimensionamento (BLESSMANN, 2001).

Até 1960, os estudos na área da aerodinâmica das construções buscavam somente a resposta estática das edificações, avaliando apenas as pressões médias que o vento exercia sobre as estruturas e por consequência, os esforços oriundos deste carregamento, nos quais eram considerados apenas os fatores meteorológicos, climatológicos e aerodinâmicos estáticos. No entanto, com o avanço tecnológico e almejando-se sempre um menor custo de produção e utilização de materiais, as estruturas tornam-se cada vez mais esbeltas, flexíveis e os edifícios mais alteados, ocasionando ocorrência de efeitos dinâmicos, os quais provocam vibrações e podem resultar em desconforto dos usuários ou produzir danos na estrutura (VANIN, 2011).

O carregamento do vento varia com o tempo e causa vibrações, que são dominantes em algumas bandas de frequências. Quando a frequência das vibrações oriundas da ação do vento se aproxima de uma das frequências naturais da estrutura, as vibrações aumentam e podem se tornar ressonantes. A resposta das estruturas que são carregadas pelo vento é obtida pela soma da resposta estática e resposta dinâmica, também chamada de resposta flutuante (BALENDRA, 1993).

Oscilações nas direções longitudinais e transversais à incidência do vento, e vibrações de torção são comumente observadas em edifícios altos. O movimento na direção longitudinal a incidência do vento é resultado de flutuações de pressão atuando nas faces de barlavento e sotavento da edificação. Por isso, a maioria dos códigos e normas utilizam o fator de rajada, baseado na teoria da quase-estática, para avaliar a resposta longitudinal. O movimento transversal à incidência do vento é ocasionado por flutuações devido ao desprendimento do vento nas faces laterais, já os movimentos de torção resultam de assimetrias da seção, efeitos de interferência e turbulência do vento. Para alguns edifícios altos, a resposta de torção e transversal podem ultrapassar a resposta longitudinal à direção do vento. No entanto, a maioria

dos códigos indicam apenas os procedimentos para a obtenção da resposta longitudinal do vento, devido à complexidade das respostas transversais e torcionais (LIN, *et al.*, 2005).

Segundo o *American Society of civil Engineers* (1980, apud Oliveira, 2003), os primeiros experimentos em túnel de vento com corpos rombudos (de formato não aerodinâmico), são do final do século XIX, e creditados principalmente para Eiffel, Prandtl e Irmiger. Desde o colapso da ponte de Tacoma Narrows, em 1940, despertou-se ainda mais o interesse entre os engenheiros pelo estudo das ações do vento em estruturas.

O túnel de vento é a principal ferramenta que é disposta ao engenheiro para resolver os problemas aerodinâmicos das estruturas (OLIVEIRA, 2003). Embora existam importantes ferramentas computacionais que também podem servir de subsídio para análise de estruturas, nem todas as situações de projeto podem ser atendidas, principalmente nas situações que existe a iteração de outros objetos, por exemplo, a simulação envolvendo o estudo de uma edificação imersa em uma região densamente construída, como é o caso de centros de grandes cidades. Neste caso, a melhor maneira de estudar os efeitos do vento é através de modelos reduzidos que levam em consideração toda a vizinhança existente em um determinado raio limite de simulação (NÚÑEZ, *et al.*, 2012).

1.2 OBJETIVOS

Com o grande desenvolvimento na área das engenharias e a evolução dos materiais nos últimos anos, as edificações tendem a cada vez se tornarem mais altas e esbeltas, e o escoamento do vento que envolve estas estruturas deve ser conhecido para uma correta análise e dimensionamento.

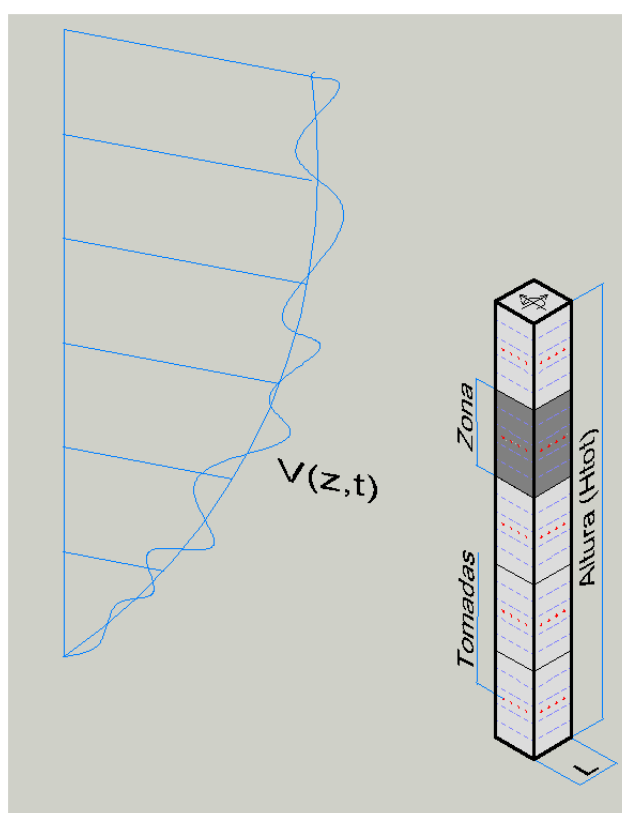
Neste trabalho, busca-se, através de ensaios realizados em modelos reduzidos de edifícios, no túnel de vento *Prof. Joaquim Blessmann* do LAC-UFRGS (Laboratório de Aerodinâmica das Construções), avaliar os fenômenos oriundos da ação do vento no entorno dos edifícios altos, suas respectivas forças e a velocidade crítica de ocorrência.

Este trabalho tem como foco principal avaliar as densidades espectrais de potência dos carregamentos e determinar as funções de transferência aerodinâmica, conhecida também como admitância aerodinâmica, utilizando a integração simultânea de pressões nas tomadas.

A avaliação é realizada globalmente envolvendo a estrutura em sua totalidade e localmente - em regiões, onde se subdividiu o modelo em faixas de altura, denominado de zonas, conforme a Figura 1.4.

Desta maneira, o presente estudo poderá colaborar como uma base de dados para futuros códigos e normas, em que se busca estimar os carregamentos devido à ação do vento em edificações com geometria e características similares às estudadas, que são estruturas reais e presentes na engenharia nacional.

Figura 1.4 – Desenho genérico com representação das zonas e tomadas



(fonte: elaborado pelo autor)

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está organizado em 5 capítulos. Estes capítulos representam as etapas realizadas deste trabalho.

No capítulo introdutório são apresentados alguns aspectos referentes à relevância da caracterização aerodinâmica de edifícios alteados, os objetivos do estudo e a forma como o mesmo está organizado.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica do assunto, tais como o perfil de velocidade média do vento, os tipos de escoamento, a turbulência do vento e estudos já realizados referentes ao tema.

No terceiro capítulo é exposto o túnel de vento *Prof. Joaquim Blessmann*, do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC), bem como a simulação do vento natural no túnel. Neste capítulo também são apresentadas as características geométricas dos edifícios em estudo e as configurações dos ensaios.

No capítulo quatro é apresentada a forma como foi realizado o processamento dos resultados, a transformação das forças aerodinâmicas do domínio do tempo para o domínio da frequência, a partir dos dados oriundos de ensaios no túnel de vento nas configurações utilizadas, e também os resultados obtidos desta análise.

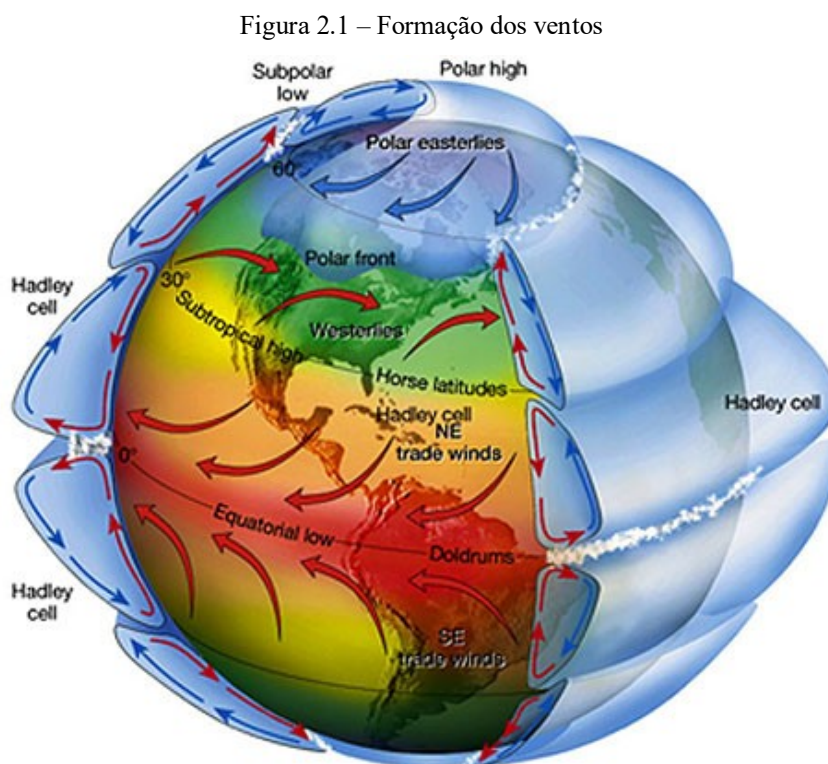
O quinto capítulo expõe as considerações finais, destacando os principais fenômenos aerodinâmicos observados nas edificações estudadas e sugere temas para realização de pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos relevantes e necessários para a determinação dos carregamentos devido à ação do vento nas edificações e estudos relacionados à ação localizada do vento em estruturas.

2.1 CARACTERÍSTICAS E CONCEITOS DO VENTO

A formação dos ventos se dá através da diferença de pressão atmosférica oriunda das variações na temperatura do ar, causada pela energia procedente do sol, gerando movimentos de ar na superfície da terra. A energia solar atinge a terra em forma de ondas eletromagnéticas (com diversos comprimentos). A maior parte desta energia não é calorífica, mas grande parte é transformada em calor ao ser absorvida pela superfície da terra, como podemos visualizar na Figura 2.1. É de interesse da engenharia estrutural conhecer a velocidade média do vento e as flutuações em torno desta média. (BLESSMANN, 2013).



(fonte: SERC, 2017)

2.1.1 Camada limite atmosférica (CLA)

A camada limite atmosférica é a região da troposfera diretamente afetada pela presença da superfície da Terra e responde a forçantes superficiais (arrasto, evaporação, evapotranspiração, transferência de calor, emissão de poluentes e modificações do escoamento induzidos pela topografia) com escala de tempo em torno de uma hora ou menos (LOREDO-SOUZA, *et al.*, 2004).

Na CLA a velocidade do vento é alterada por inúmeros fatores. Nesta região o vento é dependente da topografia do terreno, da forma das dimensões e distribuição dos obstáculos naturais e artificiais, ou seja, da rugosidade superficial e da variação da temperatura na direção vertical (BLESSMANN, 2013).

A espessura da CLA corresponde à altura gradiente (z_g). Para ventos fortes, a altura gradiente pode chegar a 2500 metros e depende da rugosidade do terreno e do *fetch* (distância a barlavento para o deslocamento de ar sobre o terreno). Na altura gradiente o vento atinge a velocidade gradiente, na qual os efeitos da rugosidade do terreno não possuem interferência direta. O número de Reynolds na CLA é consideravelmente elevado, para qualquer velocidade, e se espera que o escoamento seja turbulento. Para os ventos com velocidades médias horárias superiores a 10 m/s, o escoamento é considerado suficientemente turbulento para que os efeitos térmicos sejam suprimidos e a CLA possa ser considerada neutralmente estável e tratada como adiabática. Para a maioria dos casos de estudo de cargas sobre estruturas em túnel de vento essas hipóteses podem ser aplicadas (LOREDO-SOUZA, *et al.*, 2004).

As tensões correspondentes ao intercâmbio da quantidade de movimento na CLA são designadas pelas tensões aparentes de Reynolds ou tensões turbulentas, $-\rho_{ar}\overline{u'w'}$. O efeito desta tensão é capaz de subdividir a CLA em duas partes: a camada superficial e a camada de Ekman. A camada superficial é classificada como a região da CLA mais próxima da superfície, na qual a variação dos fluxos e tensões possuem valores inferiores a 10% de seu valor médio. Na camada superficial, identifica-se uma fina subcamada, a subcamada interfacial ou microcamada, na qual o transporte molecular é dominante em relação ao transporte turbulento. A espessura desta camada é denominada de “deslocamento do plano zero”, representada na Figura 2.2 como z_d . O deslocamento do plano zero é dependente da rugosidade superficial, e atinge valores distintos para cada região. Para centro de grandes cidades o z_d corresponde à

altura média das edificações, já em campo aberto ou mar, o valor do deslocamento do plano zero não é significativo. A camada de Ekman apresenta um decréscimo das tensões de Reynolds com a altitude, até valores praticamente nulos nas regiões próximas a altura gradiente. As forças de pressão e a força de Coriolis, devido à rotação da Terra, são forças que também atuam nesta camada. As tensões de Reynolds são máximas para a altura z_d , e a tensão de cisalhamento (τ_0) é transmitida através da microcamada. A tensão de cisalhamento pode ser escrita conforme a equação 2.1.

$$\tau_0 = \rho_{ar} u_*^2 = \rho_{ar} \overline{u w}_{máx} \quad \text{equação 2.1}$$

Onde:

τ_0 é a tensão de cisalhamento;

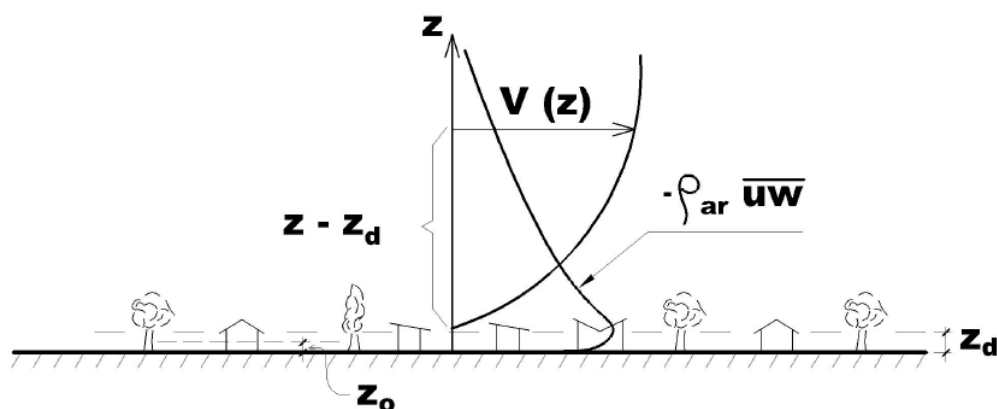
ρ_{ar} é a massa específica do ar;

u_* é a velocidade de fricção;

\bar{u} é a componente das flutuações na direção do vento;

$\bar{w}_{máx}$ é a componente vertical máxima das flutuações.

Figura 2.2 – Esquema dos perfis de velocidades médias e tensões de Reynolds da CLA e alturas características



(fonte: LOREDO-SOUZA, *et al.*, 2004)

2.1.2 Perfil vertical da velocidade média do vento

Na engenharia do vento, o perfil de velocidade média pode ser representado de duas formas, o perfil em lei de potência e o perfil logarítmico (LOREDO-SOUZA, *et al.*, 2004).

A lei de potência é expressa conforme a equação 2.2:

$$\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}(z_{ref})} = \left(\frac{z - z_d}{z_{ref}} \right)^p \quad \text{equação 2.2}$$

Onde:

$\bar{V}(z)$ é a velocidade média na cota z ;

$\bar{V}(z_{ref})$ é a velocidade média na cota de referência z_{ref} ;

$z - z_d$ é a diferença entre a cota e o plano zero;

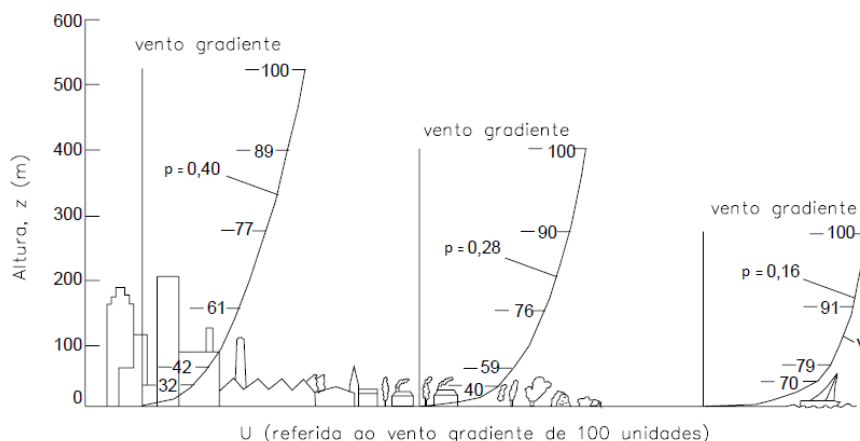
z_{ref} é a cota de referência;

p é o expoente da curva de potência.

A lei da potência apresenta alguns inconvenientes, o primeiro é que ela é válida para qualquer valor de $(z - z_d)$ sendo este positivo ou nulo, não reconhecendo o topo da CLA, o segundo é que este modelo não possui justificativa teórica, porém representa satisfatoriamente o perfil de velocidades média, e o terceiro destaca-se por possuir um bom ajuste do perfil de velocidades na camada de Ekman, porém o ajuste na camada próximo a superfície é considerado pobre. Contudo, este problema pode ser sanado através de técnicas adequadas nos tuneis de vento de camada limite (LOREDO-SOUZA, *et al.*, 2004).

Na Figura 2.3 pode-se visualizar o perfil de velocidades para diferentes rugosidades:

Figura 2.3 – Característica de perfis de velocidades médias do vento de acordo com a rugosidade superficial



(fonte: adaptado de PARKER, 1977, apud WITTWER, 2006)

Outro modelo que pode representar o perfil de velocidades média do vento é expresso pela lei logarítmica, conforme apresentado na equação 2.3:

$$\frac{\bar{V}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z - z_d}{z_0} \right) \quad \text{equação 2.3}$$

Onde:

$\bar{V}(z)$ é a velocidade média na cota z ;

u_* é a velocidade de corte;

$z - z_d$ é a diferença entre a cota e o plano zero;

z_0 altura média da rugosidade do terreno, ou rugosidade aerodinâmica;

κ é a constante de Von Kármán, geralmente adotado igual a 0,4.

Esta lei representa bem a camada próxima a superfície, porém o ajuste é pobre em regiões superiores da CLA. A lei logarítmica não representa o perfil de velocidade na transição entre duas rugosidades distintas (LOREDO-SOUZA, *et al.*, 2004).

2.1.3 Turbulência no escoamento do vento

As flutuações de velocidade são causadas pela agitação mecânica do ar, formando um grande número de turbilhões. Os turbilhões são originados pela rugosidade natural e artificial da superfície terrestre e possuem dimensões com ordem de grandeza que vão desde a altura da camada limite atmosférica até o milímetro. A turbulência é a agitação do escoamento médio causado pelos diversos tamanhos de turbilhões (BLESSMANN, 2013).

Segundo Blessmann (2011), a velocidade do vento pode ser representada de forma vetorial conforme indicado na equação 2.4:

$$\underline{V}(r, t) = \underline{\bar{V}}(r) + \underline{v}(r, t); \quad \text{sendo } \underline{v}(r, t) = \underline{v}_1(r, t) + \underline{v}_2(r, t) + \underline{v}_3(r, t) \quad \text{equação 2.4}$$

Onde:

$\underline{V}(r, t)$ é o vetor velocidade em um ponto r e no instante t ;

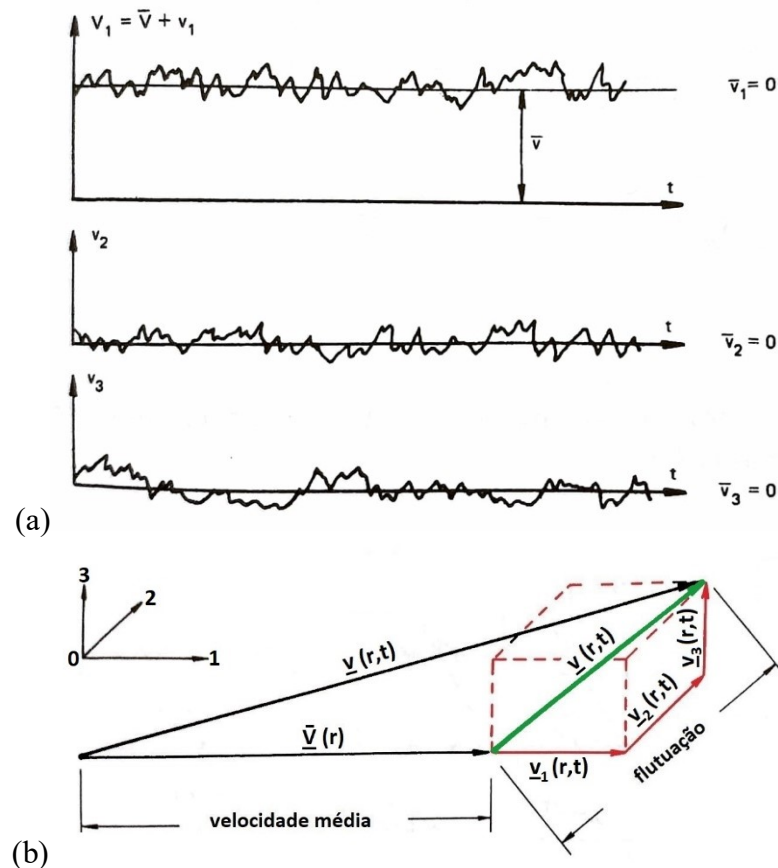
$\bar{V}(r)$ é o vetor velocidade média em um ponto r ;

$\underline{v}(r, t)$ é o vetor rajada, ou o vetor de flutuações da velocidade;

$\underline{v}_1(r, t)$, $\underline{v}_2(r, t)$ e $\underline{v}_3(r, t)$ são as componentes escalares nas direções 1, 2 e 3;

Na Figura 2.4 é exemplificado através de um gráfico a variação da velocidade do vento no tempo e as componentes de velocidade do vento turbulento.

Figura 2.4 – (a) registro da variação da velocidade do vento no tempo e (b) componentes da velocidade do vento



(fonte: adaptado de BLESSMANN, 2011)

Pode-se extrair alguns parâmetros dos registros de velocidades, os quais auxiliam na caracterização do escoamento. Estes parâmetros são:

- desvio padrão e valor *rms*;
- intensidade de turbulência;
- escala integral de turbulência.

2.1.3.1 Desvio padrão e valor *rms*

Blessmann (2011) expõe uma medida para as componentes da flutuação da velocidade que é dado através da média quadrática, ou *rms* (*root mean square*). O valor *rms* (que coincide com o valor do desvio padrão de amostras com média zero) é calculado através da equação 2.5.

$$\sigma_i(r) = \left[\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} v_i(r, t)^2 dt \right]^{1/2}, \quad i = 1, 2, 3; \quad \text{equação 2.5}$$

Onde:

$\sigma_i(r)$ é o desvio padrão das componentes de flutuação da velocidade ou o valor *rms* quando a média for considerada igual a 0;

T_0 é o período de medição;

$v_i(r, t)$ é a componente de flutuações da velocidade, nas direções 1, 2 ou 3.

2.1.3.2 Intensidade de turbulência

O valor *rms* dividido pela velocidade média $\bar{V}(r)$, definido na equação 2.6, é chamado de intensidade de turbulência, $I_1(r)$, $I_2(r)$ e $I_3(r)$, sendo que $I_1(r)$ aumenta com a rugosidade do solo e diminui com a altitude.

$$I_1(r) = \sigma_1(r) / \bar{V}(r); \quad I_2(r) = \sigma_2(r) / \bar{V}(r); \quad I_3(r) = \sigma_3(r) / \bar{V}(r) \quad \text{equação 2.6}$$

2.1.3.3 Escala integral de turbulência

As características espaciais da turbulência podem ser caracterizadas através das funções de correlação. E isto é feito através das escalas de turbulência, que são parâmetros que servem para avaliar as dimensões dos turbilhões. A maior parte da energia cinética do vento está contida nestes turbilhões (BLESSMANN, 2013).

Uma medida do tamanho dos turbilhões é o comprimento de onda, que é dado por $\lambda = \bar{V}/n$ (cada turbilhão causa uma flutuação periódica neste ponto com uma frequência n). A média dos

tamanhos dos turbilhões é medida através da escala integral de turbulência. Para turbilhões com flutuações da velocidade longitudinal \underline{v}_1 , as escalas integrais são L_1^1 , L_1^2 e L_1^3 , indicando o tamanho dos turbilhões no sentido longitudinal, lateral e vertical, respectivamente. Da mesma maneira, existem três escalas integrais associadas com as componentes lateral, \underline{v}_2 , e vertical, \underline{v}_3 , da turbulência (BALENDRA, 1993).

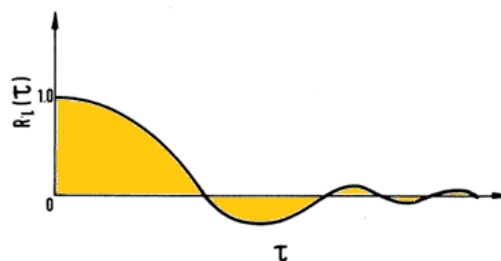
O carregamento dinâmico em uma estrutura é dependente do tamanho dos turbilhões. Se as dimensões da estrutura na direção perpendicular ao vento forem inferiores as dimensões dos turbilhões, caracterizados pelas escalas de turbulência L_1^2 e L_1^3 , estes turbilhões envolverão a estrutura e darão origem a pressões bem correlacionadas, produzindo um efeito significativo na resposta. Porém, se L_1^2 e L_1^3 possuírem valores pequenos em relação as dimensões da estrutura, os turbilhões produzirão pressões não correlacionadas e o efeito da componente longitudinal na resposta da estrutura será pequeno (BALENDRA, 1993).

A escala longitudinal da turbulência em qualquer posição r é calculada através da função de autocorrelação da turbulência. A função de autocorrelação normalizada para a componente longitudinal da turbulência $\underline{v}_1(r, t)$ pode ser calculada conforme a equação 2.7:

$$R_1(r, \tau) = \frac{\int_0^{T_0} \underline{v}_1(r, t) \underline{v}_1(r, t + \tau) dt}{\int_0^{T_0} \underline{v}_1(r, t)^2 dt} \quad \text{equação 2.7}$$

Onde τ é o intervalo de tempo entre um valor de velocidade $\underline{v}_1(r, t)$, em dado instante t e o valor deste registro em um instante de tempo $t + \tau$ em relação ao primeiro instante. Podemos visualizar a função de autocorrelação na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Função de autocorrelação normalizada da turbulência do vento



(fonte: adaptado de BALENDRA, 1993)

A autocorrelação pode servir como termo de comparação na simulação em laboratório de fenômenos naturais. Por exemplo, no caso do vento camparam-se as curvas de autocorrelação medidas no vento natural e no vento artificialmente gerado em túnel de vento. Ainda no caso do vento, a função de autocorrelação permite determinar a escala de turbulência, que está relacionada ao tamanho médio dos turbilhões (BLESSMANN, 2005).

O período médio dos turbilhões (T_1) é determinado pela área sob a função de autocorrelação e a escala integral é dada através da equação 2.8:

$$L_1^1 = \bar{V}(r) T_1 ; \text{ sendo } T_1 = \int_0^{\infty} R_1(r, \tau) d\tau \quad \text{equação 2.8}$$

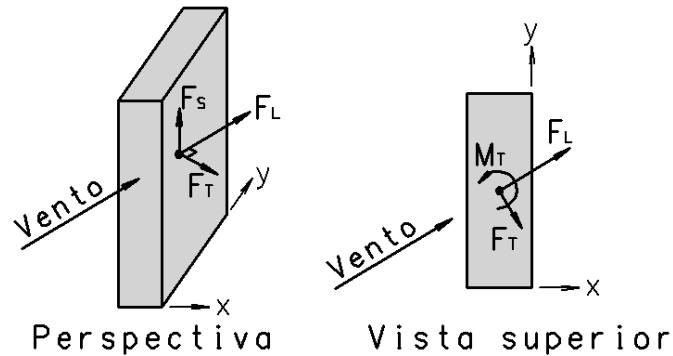
Balendra (1993) sugere, para as componentes lateral e vertical, a utilização das expressões $L_1^2 = 0,2L_1^1$ e $L_1^3 = 6z^{0,5}$, propostas por Duchêne-Marallaz e Simiu e Scanlan, respectivamente.

2.2 FORÇAS ORIGINADAS DEVIDO À INCIDÊNCIA DO VENTO

A resultante das forças devidas ao vento sobre uma edificação é designada força global. Esta força pode ser decomposta em componentes. A componente longitudinal, que atua no sentido da direção do vento, é denominada força de arrasto. As outras componentes atuam no sentido perpendicular ao vento e são denominadas de força transversal (ou lateral) e força de sustentação, como apresentado na Figura 2.6 (BLESSMANN, 2011).

Quando uma força horizontal é excêntrica em relação ao centro elástico da edificação, a estrutura fica submetida a um momento de torção (BALENDRA, 1993).

Figura 2.6 – Forças de arrasto e lateral e momento torçor em uma edificação arbitrária



(fonte: adaptado de BLESSMANN, 2011)

De acordo com Blessmann (2011), as forças e momento torçor podem ser determinados a partir das seguintes equações:

$$F_L = C_L q A \quad \text{equação 2.9}$$

$$F_T = C_T q A \quad \text{equação 2.10}$$

$$M_T = C_{MT} q A L \quad \text{equação 2.11}$$

Onde:

F_L , F_T e M_T são a força de arrasto (sentido longitudinal ao vento), a força transversal (ou lateral) e o momento torçor, respectivamente;

q é a pressão dinâmica, $q = 1/2 \rho \bar{V}^2$;

ρ é a massa específica do ar;

C_L é o coeficiente de arrasto;

C_T é o coeficiente de força transversal (ou lateral);

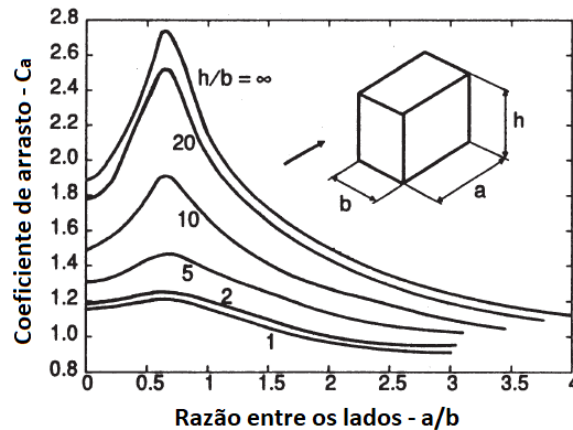
C_{MT} é o coeficiente de torçor;

A é a área da superfície de referência;

L é a dimensão linear de referência.

É apresentado na Figura 2.7 a variação do coeficiente de arrasto em relação a dimensão dos lados de um prisma de seção retangular. Estas medidas foram obtidas em escoamento turbulento com a velocidade de referência na altura h do prisma. Percebe-se que os valores do coeficiente de arrasto são menores quanto menor for a relação h/b (SOCKEL, 1994).

Figura 2.7 – Variação do coeficiente de arrasto para seção retangular



(fonte: SOCKEL, 1994)

Em corpos com formato cilíndrico, o coeficiente de arrasto é dependente do número de Reynolds, como apresentado na Figura 2.8 (BALENDRA, 1993).

O número de Reynolds é definido conforme a equação 2.12:

$$R_e = \frac{V d}{\nu} \quad \text{equação 2.12}$$

Onde:

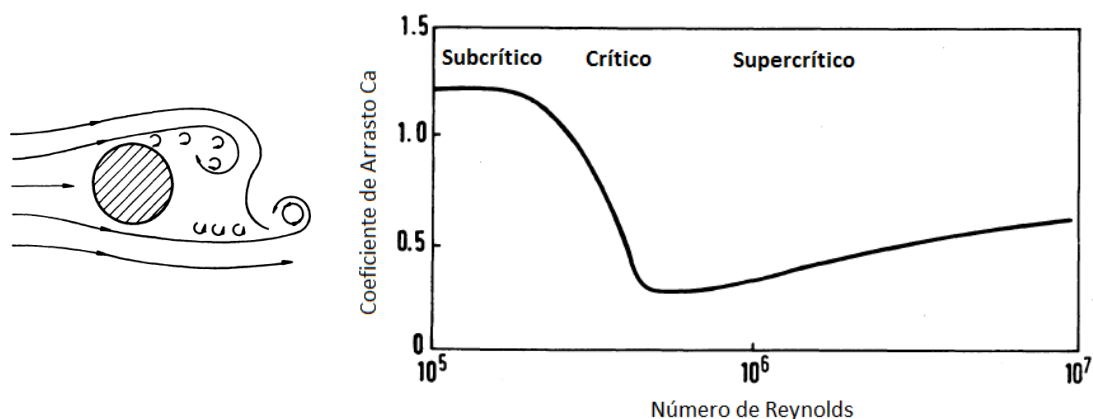
R_e é o número de Reynolds, adimensional;

V é a velocidade do vento, em m/s;

d é o diâmetro do cilindro ou dimensão característica, em metros;

ν é a viscosidade cinemática do fluido, em m^2/s .

Figura 2.8 – Variação do coeficiente de arrasto para corpos cilíndricos em função do número de Reynolds



(fonte: BALENDRA, 1993)

Em oposição ao que ocorre com a força de arrasto, a força lateral e o momento de torção não possuem um valor médio para um corpo imerso em escoamento simétrico, uma vez que as distribuições simétricas das forças médias que atuam na direção transversal ao vento se anulam. Se a direção do vento não for paralela aos eixos de simetria, ou se o objeto for assimétrico, haverá forças transversais e momento torçor. Porém, devido ao desprendimento de vórtices, ocorrerão forças transversais e momento torçor em corpos simétricos e assimétricos (BALENDRA, 1993).

Para um vento turbulento, a componente longitudinal pode ser expressa conforme a equação 2.13:

$$V(t) = \bar{V} + v_1(t) \quad \text{equação 2.13}$$

Podemos determinar a força de arrasto para escoamentos turbulentos substituindo \bar{V} por $V(t)$ na equação 2.9.

A variação da força transversal em escoamento uniforme deve-se principalmente ao desprendimento de vórtices. A regularidade do desprendimento de vórtices é afetada pela componente longitudinal de turbulência, fazendo com que os movimentos transversais e de torção diminuam na medida em que a intensidade de turbulência cresce (BALENDRA, 1993).

2.3 VIBRAÇÕES CAUSADAS PELO VENTO

As vibrações causadas pelo vento podem ser geradas pelos seguintes fatores:

- a) energia cinética das rajadas;
- b) martelamento (*buffeting*);
- c) desprendimento de vórtices;
- d) galope.

2.3.1 Energia cinética das rajadas

A agitação do escoamento médio, formado pela rugosidade natural ou artificial do terreno, formam turbilhões que originam as flutuações de velocidades. As dimensões destes turbilhões vão desde a grandeza da altura da CLA até o milímetro. As flutuações da velocidade do vento em torno de sua média são também denominadas de rajadas. Além das solicitações estáticas do vento, dependentes da velocidade média, surgem também solicitações dinâmicas na estrutura oriundas da energia cinética contida nas flutuações e da forma que esta energia se distribui nas diversas frequências (BLESSMANN, 2013).

Os turbilhões que envolvem toda a estrutura geram forças de baixa frequência, e podem estar aproximadamente em fase com a estrutura, já os turbilhões que geram rajadas mais violentas possuem dimensões bem menores e agem localmente na estrutura, possuindo frequências bem maiores, porém, por possuir dimensões menores, não são tão influentes na excitação da estrutura como um todo, mas são de extrema importância para efeitos localizados e para o dimensionamento de peças de revestimento, vidros e janelas (BLESSMANN, 2005).

Conforme Rausch (1973, apud Blessmann, 2005), quando surge uma rajada de vento a pressão dinâmica média cresce subitamente, permanece constante em um pequeno intervalo de tempo e volta a cair para o valor médio anterior. Com o passar do tempo surgem novas rajadas que podem aumentar ou diminuir o valor da pressão dinâmica, mas sempre retornando ao valor médio. Com base nas observações, não se pode concluir que exista periodicidade das rajadas, nem que sua duração seja a mesma. Trata-se de uma série de cargas e descargas com valores e durações variáveis, separados por intervalos desiguais de tempo.

2.3.2 Martelamento (*buffeting*)

Quando uma edificação está situada a sotavento de obstáculos – naturais ou edificações – ela estará imersa na esteira por eles gerada. A turbulência nesta região é do mesmo tipo da turbulência existente no vento natural incidente nestes obstáculos, com uma gama grande de frequências e dimensões de turbilhões, ou seja, o espectro de energia é bastante alargado, sem um pico evidenciado (BLESSMANN, 2005).

Se a edificação estiver localizada na esteira de apenas uma ou poucas edificações de dimensões semelhantes, convenientemente situadas, ela poderá estar sendo “martelada”, compassadamente, por turbilhões gerados nas edificações a barlavento com uma frequência predominante. Este fenômeno recebe o nome de martelamento (em inglês, “*buffeting*”) (BLESSMANN, 2005).

Os efeitos dinâmicos devido ao martelamento podem atingir grandes valores se a frequência dominante dos turbilhões gerados nos obstáculos a barlavento coincidir com uma das frequências naturais da edificação. Além da frequência dos turbilhões, a intensidade de turbulência do vento incidente também influenciará na vibração. Se a intensidade for pequena, a turbulência do vento incidente terá pouca influência na esteira das edificações a barlavento, com vórtices que se desprenderão cadenciadamente e irão incidir também cadenciadamente na edificação em estudo, dando origem a uma força excitadora aproximadamente periódica e com um espectro de energia estreito. Por outro lado, se a intensidade de turbulência for grande, haverá uma desorganização dos turbilhões, com a energia passando a se distribuir em uma banda maior de frequências e com o espectro de energia mais largo, acarretando em vibrações de menor amplitude. Para um mesmo conjunto de edificações e submetidos a um vento de mesma velocidade, o fenômeno de martelamento será mais importante quanto menor for a rugosidade do terreno, ou seja, será maior à beira mar do que no centro de uma grande cidade (BLESSMANN, 2005).

Blessmann (2005) relata que, para o fenômeno de martelamento, os maiores efeitos dinâmicos aparecem com um distanciamento grande entre as edificações. Mesmo com uma estrutura a barlavento estando distante a cerca de dez vezes a dimensão característica da base de uma edificação, podem aparecer efeitos consideráveis.

2.3.3 Desprendimento de vórtices

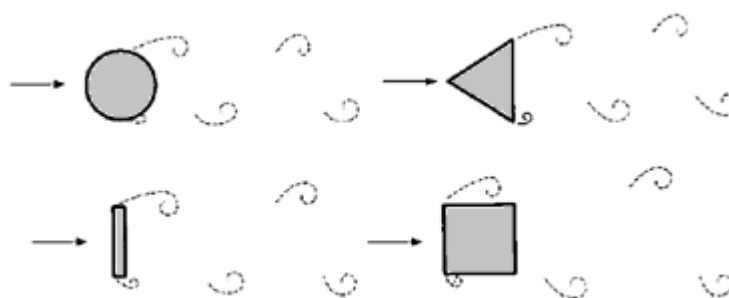
A principal resposta dinâmica de um edifício, em geral, ocorre devido a esforços laterais originados a partir do desprendimento cadenciado de vórtices. Esta resposta pode levar a movimentos laterais elevados passando a ser o principal problema do projeto (OLIVEIRA, 2003).

Quando corpos rombudos sujeitos a escoamentos com número de Reynolds maior ou aproximadamente 30, ocorre o desprendimento de vórtices (também chamados de vórtices de von Kármán). Esses vórtices produzem forças periódicas na estrutura. As forças alternadas na direção longitudinal ao vento ocorrem na frequência de desprendimento individual de vórtices, enquanto que as forças alternadas na direção transversal ao vento ocorrem na frequência de desprendimento de um par de vórtices. Essas forças tendem a produzir oscilações na direção em que elas estão agindo. Entretanto, a magnitude das forças que agem na direção longitudinal ao vento é muito menor comparada à que age na direção transversal. Na prática, as oscilações devidas ao desprendimento de vórtices agindo na direção longitudinal ao vento são raramente encontradas (WOOTTON e SCRUTON, 1970).

O fenômeno de von Kármán ocorrerá de um modo bem definido e coerente ao longo de todo o cilindro, se o mesmo dispor de uma forma não aerodinâmica (rombuda) de contorno curvo ou poligonal e possuir alongamento considerável (relação entre o comprimento do eixo do cilindro e sua largura). O escoamento deve ser de baixa turbulência (suave) e aproximadamente uniforme (em sua velocidade média). Não deve haver recolamento após a primeira separação (BLESSMANN, 2005).

Na Figura 2.9 é mostrado o sincronismo do desprendimento de vórtices:

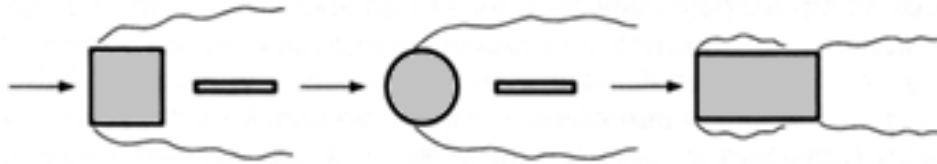
Figura 2.9 – Vórtices de Kármán



(fonte: BLESSMANN, 2005)

Quando os pulsos de pressão são interceptados na esteira ou pelas faces laterais do corpo em estudo, não aparecem os vórtices de Kármán, mas sim vórtices aleatoriamente desprendidos. Este mecanismo pode ser melhor visualizado na Figura 2.10 (BLESSMANN, 2005).

Figura 2.10 – Vórtices aleatórios



(fonte: BLESSMANN, 2005)

O número de Strouhal é um parâmetro importante para a caracterização do fenômeno de desprendimento de vórtices, o qual relaciona a frequência de desprendimento de um par de vórtices com as dimensões da estrutura e a velocidade do vento (WOOTTON e SCRUTON, 1970).

O número de Strouhal depende da geometria da seção, da oscilação da estrutura, do acabamento superficial, do número de Reynolds e das características do escoamento (BLESSMANN, 2005).

A definição do número de Strouhal é escrita através da equação 2.14:

$$S_t = \frac{f_s L}{V} \quad \text{equação 2.14}$$

Onde:

S_t é o número de Strouhal;

f_s é a frequência de desprendimento de um par de vórtices;

L é a dimensão linear característica da estrutura (em geral perpendicular ao escoamento);

V é a velocidade do vento.

A velocidade crítica para o desprendimento de vórtices é obtida através da equação 2.15:

$$V_{cr} = \frac{f_n L}{S_t} \quad \text{equação 2.15}$$

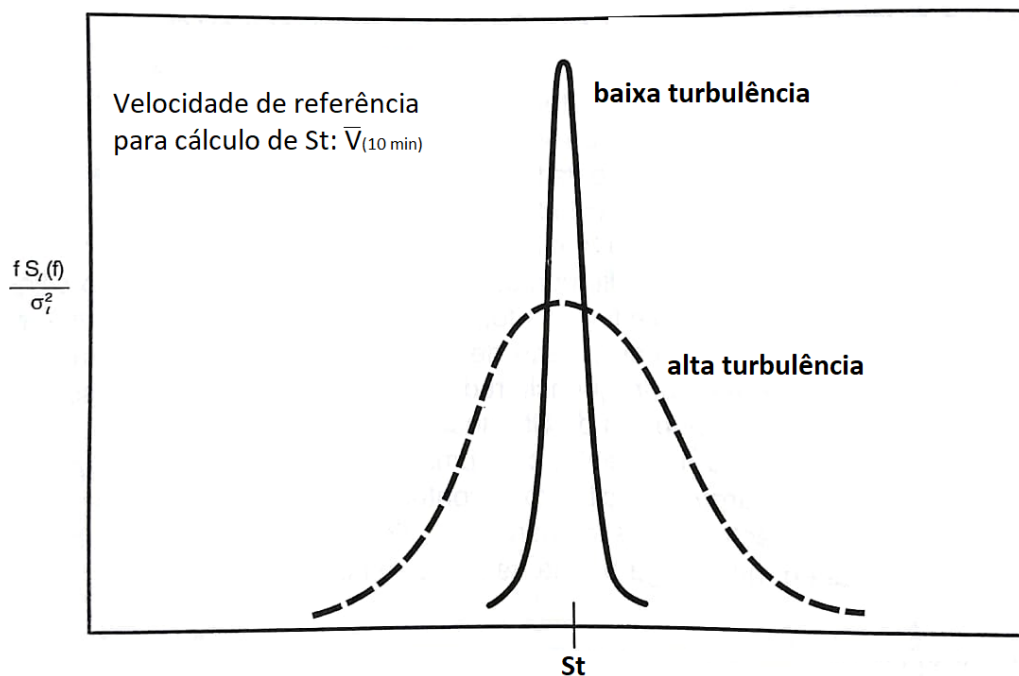
Onde:

f_n é a frequência natural da estrutura;

V_{cr} é a velocidade crítica do vento para desprendimento de vórtices.

As forças laterais geradas pelo desprendimento alternado de vórtices dependem da turbulência do escoamento incidente e do movimento lateral da estrutura. Na Figura 2.11 observamos que o espectro de potência da força lateral tem um pico muito pronunciado em escoamento de baixa turbulência, ou seja, a força é praticamente harmônica. Porém, a largura da banda deste pico vai aumentando proporcionalmente à turbulência, ao mesmo tempo em que a altura do pico diminui. Portanto, quanto maior a turbulência do vento, mais baixo o pico e mais alargado o espectro (BLESSMANN, 2005).

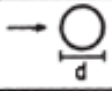
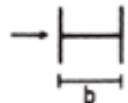
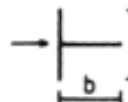
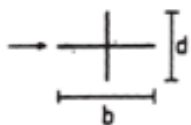
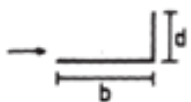
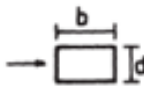
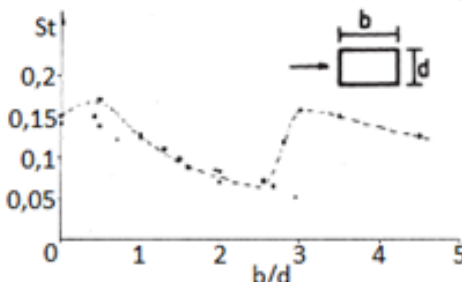
Figura 2.11 – Influência da turbulência no espectro de pressões



(fonte: BLESSMANN, 2005)

Na Figura 2.12 são apresentados alguns valores sugeridos para o número de Strouhal de diversas seções transversais (RUSCHEWEYH, 1994).

Figura 2.12 – Número de Strouhal para diversas seções transversais

Seção Transversal	$S_r = \frac{f_v \cdot d}{u}$
 $10^3 \leq Re \leq 2 \times 10^5$	0,2
 $b/d = 1$ $b/d = 1,5$ $b/d = 2$ interpolação linear	0,11 0,10 0,14
 $b/d = 1$ $b/d = 2$ interpolação linear	0,13 0,08
 $b/d = 1$ $b/d = 2$ interpolação linear	0,16 0,12
 $b/d = 1,3$ $b/d = 2,0$ interpolação linear	0,11 0,07
 $0,5 \leq b/d \leq 2$	

(fonte: adaptada de RUSCHEWEYH, 1994)

2.3.4 Galope

Embora a instabilidade por galope seja mais comumente associada às oscilações de cabos ou torres de transmissão, algumas estruturas da engenharia civil (edificações alteadas) podem também estar suscetíveis a este fenômeno (WOOTTON e SCRUTON, 1970).

O galope só pode aparecer a partir de uma velocidade mínima do vento, denominada de velocidade de disparo. Esta velocidade limite é usualmente muito alta para edifícios. Entretanto,

o amortecimento cada vez menor de certas estruturas está fazendo com que a velocidade de disparo se aproxime cada vez mais da velocidade de projeto (BLESSMANN, 2005).

Estruturas leves e flexíveis, com pequeno amortecimento, estão sujeitas a oscilações causadas pelo fenômeno de instabilidade aerodinâmica denominado de galope. Prismas de seção quadrada, retangular, triangular, poligonal, semicircular e cantoneiras são seções comuns na construção civil e estão propensas a vibrarem devido a este fenômeno (BLESSMANN, 2005).

No galope a amplitude de oscilação na direção transversal à do vento aumenta com o aumento da velocidade do mesmo. Durante esta oscilação, o ângulo de incidência do vento em relação ao corpo oscilante está continuamente mudando. Se, em resposta a esta incidência variável, for desenvolvida uma força na direção e sentido do movimento do corpo, energia será retirada do vento e a oscilação será mantida (BLESSMANN, 2005).

Segundo Blessmann (2005), as principais características do galope são:

- a) sua intensidade violenta;
- b) seu súbito aparecimento, que ocorre quando o vento atinge a velocidade de disparo. Esta velocidade é usualmente muito alta para edifícios, no entanto, o amortecimento cada vez menor de algumas estruturas está fazendo com que a velocidade de disparo se aproxime cada vez mais da de projeto;
- c) o aumento da amplitude de vibração com o aumento da velocidade do vento, sem um limite superior;
- d) movimento oscilatório em um modo simples, não acoplado, perpendicular à direção do vento médio.

2.4 PROCESSO DE DAVENPORT

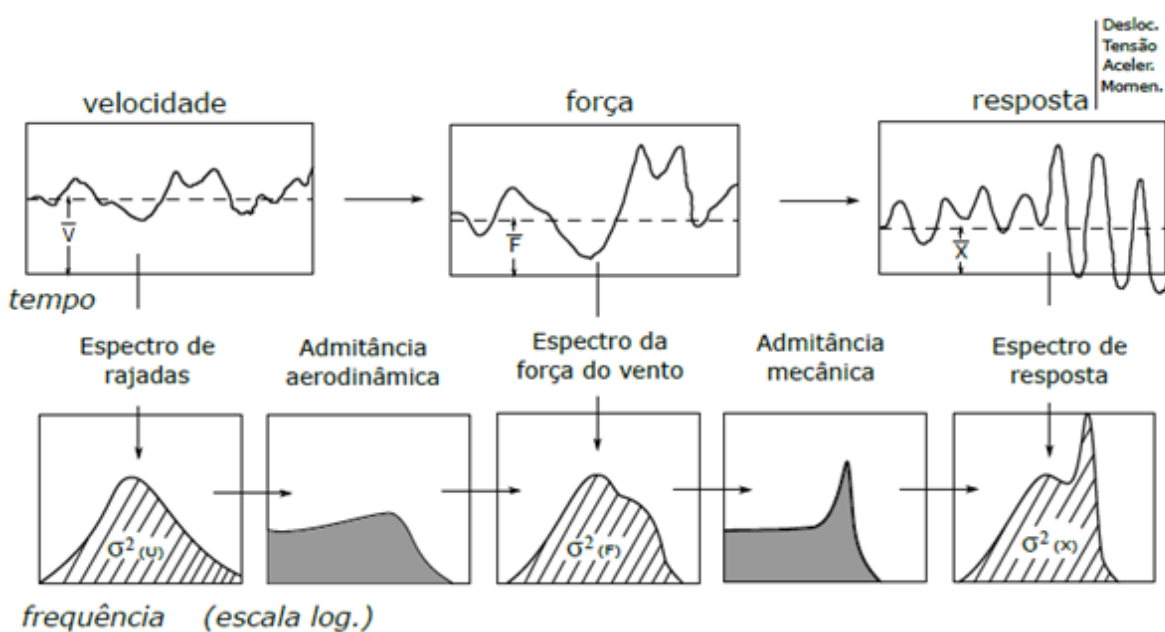
Em alguns estudos realizados na década de 1960, Alan Garnett Davenport delineou uma abordagem para vibrações induzidas pelo vento em estruturas, baseado na teoria das vibrações aleatórias.

A abordagem utiliza o conceito de processo aleatório estacionário para descrever velocidades, as pressões e as forças do vento, admitindo uma distribuição de probabilidade Gaussiana (normal). Isso pressupõe que as complexidades da natureza são tais que nunca podemos descrever, ou prever, perfeitamente as forças geradas pela ação de vento. Entretanto, somos capazes de usar quantidades médias, desvio padrão, correlações e densidades espectrais (ou

“espectros”) para descrever as principais características das forças excitantes e da resposta estrutural. A densidade espectral é a quantidade mais importante a ser considerada nesta abordagem, que usa principalmente o domínio da frequência para realizar cálculos, também conhecido como abordagem espectral (HOLMES, 2015).

A Figura 2.13, elaborada por Davenport, ilustra graficamente os elementos da abordagem espectral. Os cálculos principais são realizados na segunda linha da representação, na qual a resposta flutuante quadrática média é calculada a partir da densidade espectral da resposta. Os espectros de resposta são calculados a partir dos espectros de força, que, por sua vez, são oriundos da turbulência do vento ou espectro de rajada. Dependente das frequências, as funções de admitância aerodinâmica (que será abordada no item 2.4.1 deste trabalho) e mecânica formam vínculos entre estes espectros (HOLMES, 2015).

Figura 2.13 – Processo de Davenport para obtenção da resposta

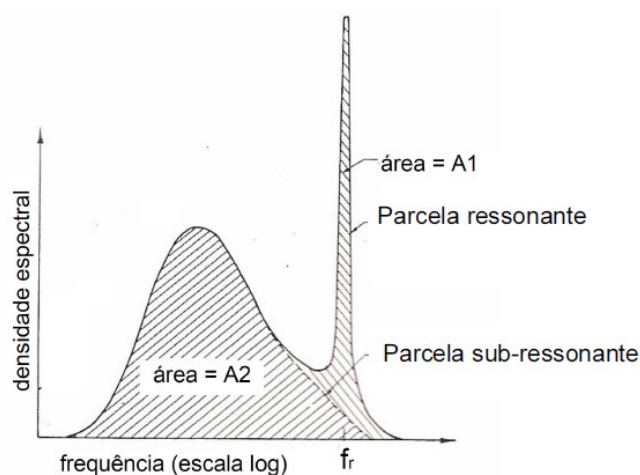


(fonte: adaptado de HOLMES, 2015)

O uso de processos aleatórios estacionários é apropriado para tempestades de vento em grande escala, como ventos fortes em latitudes temperadas e ciclones tropicais. Pode não ser apropriado para tempestades transitórias de curta duração, como *downbursts* ou tornados associados a tempestades. Métodos para esses tipos de tempestades ainda estão em desenvolvimento (HOLMES, 2015).

O desvio padrão da resposta flutuante, σ_x , é obtido através da raiz quadrada da variância, σ_x^2 , que é a área sob o gráfico da função de densidade espectral de resposta. Esta área é convenientemente calculada em duas parcelas conforme indicado na Figura 2.14, parcela ressonante e sub-ressonante, correspondentes as áreas $A1$ e $A2$, respectivamente. A resposta na área sub-ressonante é quase-estática, então a área $A2$ é calculada a partir da integral do espectro da própria força do vento. Já a área $A1$ é calculada a partir da magnitude do espectro de resposta na frequência f_r de ressonância (ALGABA, 2016).

Figura 2.14 – Função de densidade espectral da resposta e área sob o gráfico para obtenção da variância da resposta



(fonte: ALGABA, 2016)

2.4.1 Admitância aerodinâmica

A admitância aerodinâmica leva em consideração tanto a influência das dimensões dos turbilhões de vento em relação às dimensões da estrutura como também a variação dos coeficientes aerodinâmicos causada pelas flutuações do escoamento. Relaciona, portanto, as dimensões da estrutura e dos turbilhões incidentes (BLESSMANN, 2005).

Quando se tratam de estruturas de grandes dimensões, as flutuações de velocidade no escoamento não ocorrem simultaneamente em toda a face da edificação atingida pelas rajadas. Desta maneira, deve ser considerada a correlação das flutuações na função que define as pressões dinâmicas atuantes no edifício com base na velocidade do escoamento. Este conceito é contemplado na função de admitância aerodinâmica, χ_a , que traduz a operação completa de transformação de pressões em velocidades, caracterizadas pelas respectivas funções de densidade espectral de potência (CAMARINHA e CRUZ, 2011).

Vickery e Davenport (1965 e 1963, apud Blessmann, 2005) mostraram experimentalmente que para objetos rombudos, obedecendo certas condições, existe uma relação linear entre a função de densidade espectral da força, $S_F(f)$, e da componente longitudinal da velocidade do vento, $S_u(f)$, expressa na equação 2.16:

$$S_F(f) = \frac{4 \bar{F}^2}{\bar{V}^2} \chi_a^2 S_u(f) \rightarrow \chi_a^2 = \frac{1}{4} \frac{S_F(f)}{\bar{F}^2} \frac{\bar{V}^2}{S_u(f)} \tag{equação 2.16}$$

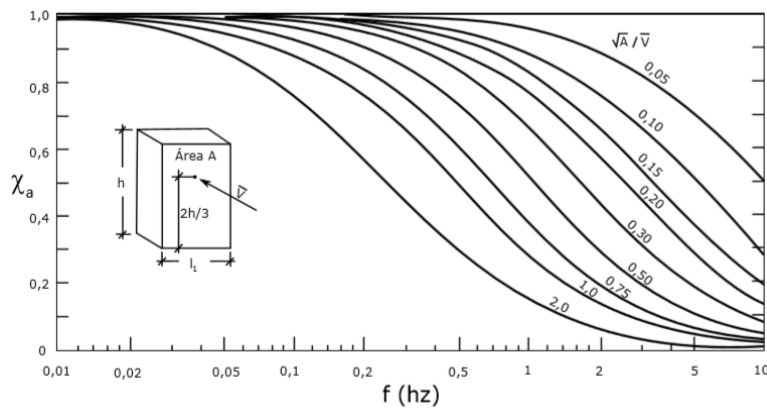
Sendo \bar{F} a força média e χ_a a admitância aerodinâmica.

Os autores, baseados em estudos experimentais e teóricos, sugerem a equação 2.17 empírica para a determinação da admitância aerodinâmica:

$$\chi_a = \frac{1}{1 + \left(\frac{2f\sqrt{A}}{\bar{V}}\right)^{4/3}} \tag{equação 2.17}$$

Porém, esta fórmula (definida para placas) tem limitações. O valor de χ_a também é função da intensidade de turbulência e da forma da construção, e não somente da escala de turbulência e das dimensões da edificação. A figura indica as curvas de admitância aerodinâmica para diversas dimensões da estrutura em função da frequência (BLESSMANN, 2005).

Figura 2.15 – Curvas da função de admitância aerodinâmica



(fonte: BLESSMANN, 2005)

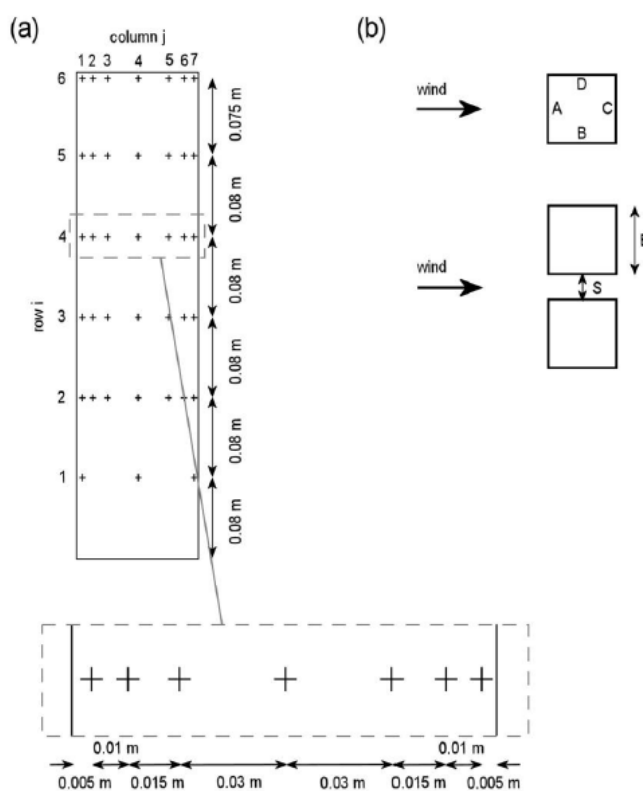
2.5 ESTADO DA ARTE

2.5.1 Estudo realizado por Bronkhorst, *et al.* (2013)

Bronkhorst, Geurts, van Bentum e Blocken realizaram um estudo referente a distribuição de pressões locais no entorno de edificações. O estudo analisa as características espectrais das pressões locais, determinadas para um prisma quadrado isolado e dois prismas quadrados e semelhantes dispostos lado a lado. O modelo instrumentado tem altura $H = 0,48\text{ m}$ e largura $B = 0,12\text{ m}$.

Os dados foram obtidos através de ensaios realizados no túnel de vento de camada limite atmosférica de circuito aberto da TNO na Holanda. A Figura 2.16(a) mostra a distribuição das tomadas de pressão, indicadas pela especificação da face “A, B, C ou D”, linha “i” e coluna “j”, por exemplo a tomada A41 é posicionada na face A, linha 4 e coluna 1. Já a Figura 2.16(b), ilustra as configurações dos ensaios realizados, com a indicação da dimensão de separação “S” e do lado “B”.

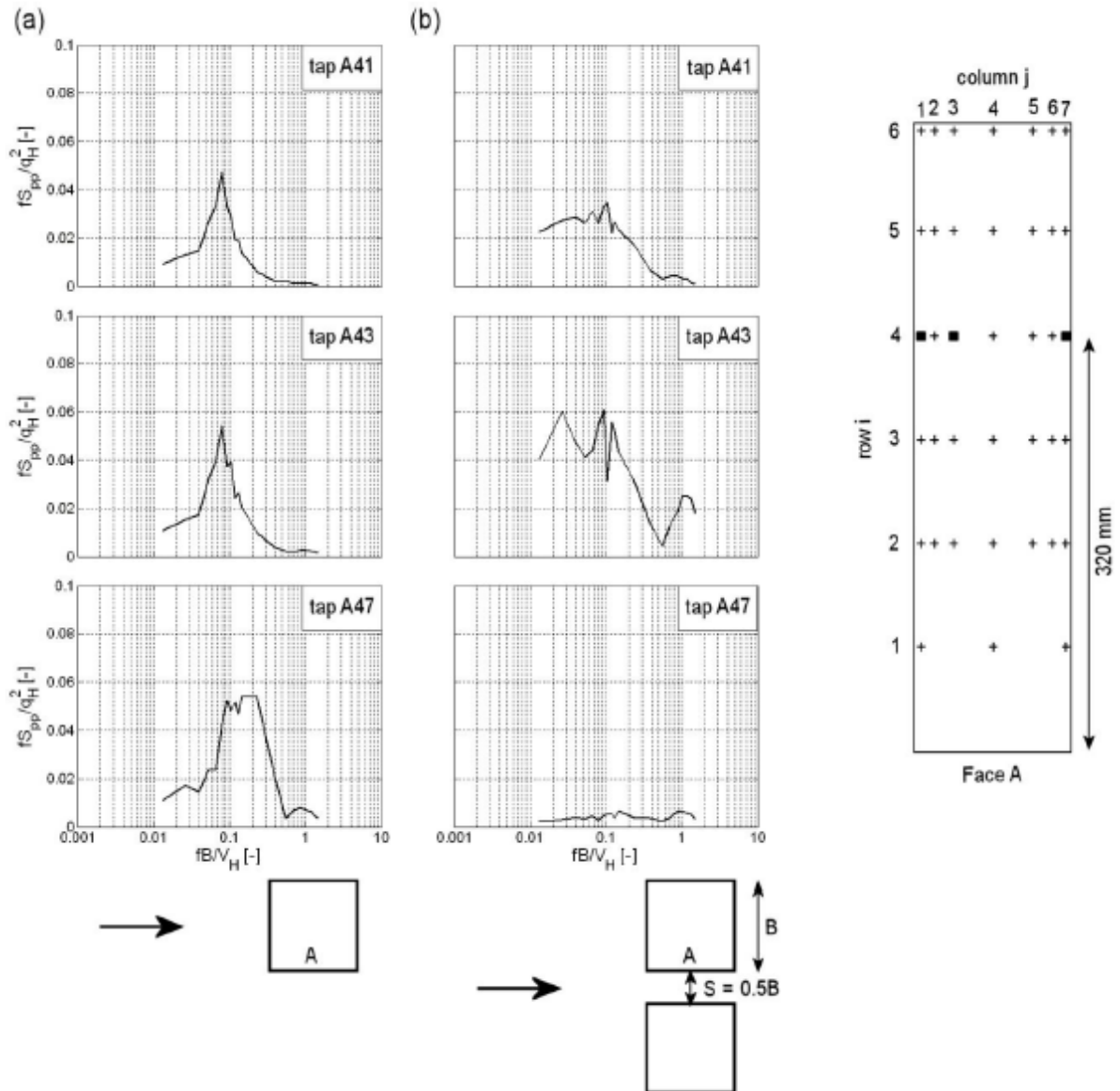
Figura 2.16 – Distribuição das tomadas e configuração de ensaios



(fonte: BRONKHORST, *et al.*, 2013)

Na Figura 2.17 é apresentado o espectro de potência para três tomadas de pressão da face “A”, para a configuração isolada e lado a lado:

Figura 2.17 – Espectro de potência para as tomadas A41, A43 e A47 – configuração (a) isolada e (b) lado a lado ($S/B=0,5$)



(fonte: BRONKHORST, *et al.*, 2013)

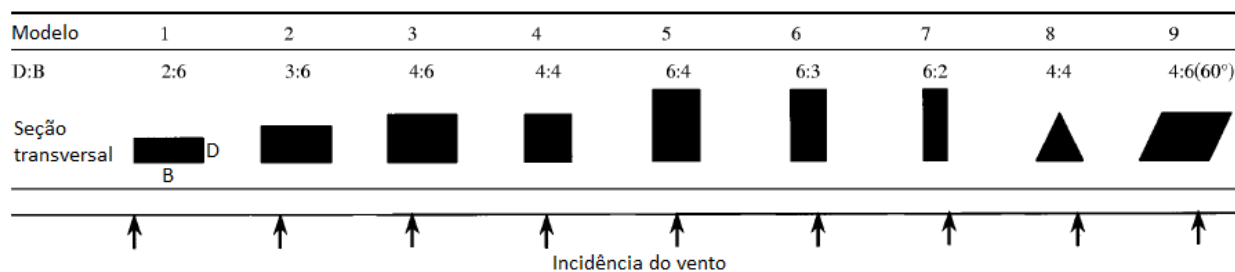
Os valores dos espectros, para a situação isolada e para a disposição lado a lado, foram obtidos através da transformada rápida de Fourier (*FFT – Fast Fourier Transform*). Para o modelo isolado o pico no espectro de potência foi determinado na face lateral com uma frequência reduzida $fB/V_H = 0,08$. Este valor está próximo ao número de Strouhal $S_t = 0,09$, valor típico para o fenômeno de desprendimento de vórtices para seção transversal quadrada. Na

configuração lado a lado, os picos no espectro de potência na tomada A43 são observados na frequência reduzida $fB/V_H = 0,03$, $fB/V_H = 0,09$ e $fB/V_H = 0,12$, o primeiro pico está relacionado ao desprendimento de vórtices devido à combinação dos dois modelos, o segundo pico refere-se ao desprendimento de vórtices de um modelo único e o último pico é causado pelo recolamento do escoamento (BRONKHORST, *et al.*, 2013).

2.5.2 Estudo realizado por Zhou, *et al.* (2003)

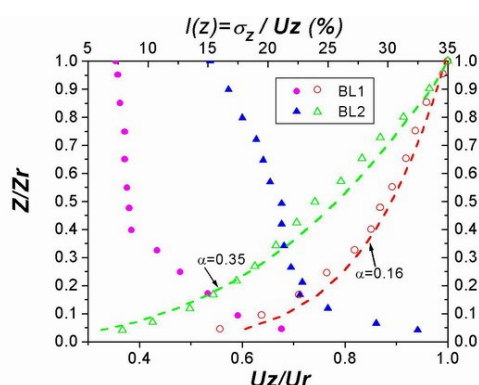
Zhou, Kiejewski e Karrem realizaram experimentos para determinar os espectros de forças longitudinal e transversal e momento torçor devido à incidência do vento. Foram avaliados 9 seções transversais distintas e 3 diferentes alturas ($H=16, 20$ e 24 in), totalizando 27 modelos, conforme indicado na Figura 2.18. Duas abordagens foram realizadas em relação ao escoamento do vento, *BL1* ($p = 0,16$, onde p é o expoente do perfil de velocidade média do vento) e *BL2* ($p = 0,35$), correspondendo, respectivamente, a uma rugosidade de terreno aberto e a uma zona urbanizada conforme apresentado na Figura 2.19. Foi utilizado o método *HFBB* (*High frequency base balance*) para a determinação e processamento dos esforços.

Figura 2.18 – Seção transversal dos modelos estudados por Zhou *et al*



(fonte: ZHOU, *et al.*, 2003)

Figura 2.19 – Perfis de velocidade média e intensidade de tubulência

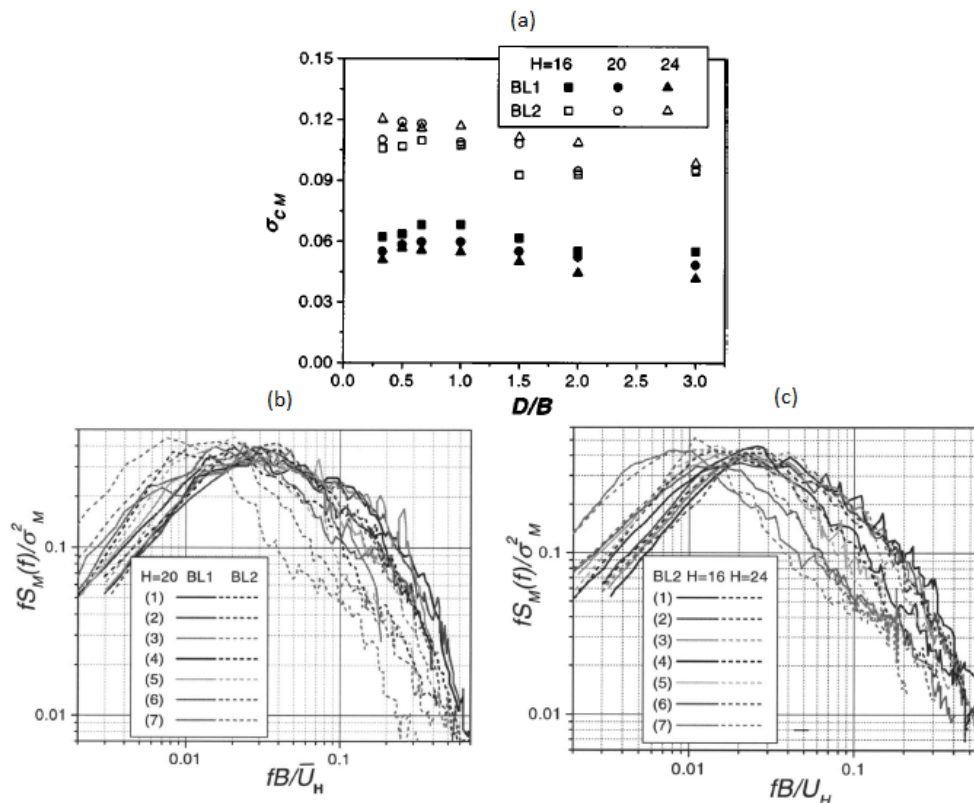


(fonte: ZHOU, *et al.*, 2003)

As discussões realizadas pelos autores em relação às cargas aerodinâmicas medidas são em termos dos valores *rms* dos coeficientes dos momentos da base e da densidade espectral de potência adimensional, expressos, respectivamente, por $\sigma_{C_M} = \sigma_M / \bar{M}'$ e $C_M(f) = f \cdot S_M(f) / \sigma_M^2$, onde C_M é o coeficiente de momento adimensional e \bar{M}' são os momentos de referência ou torque, definidos por $\bar{M}'_D = \rho \cdot \bar{U}_H^2 \cdot B \cdot H^2$, $\bar{M}'_L = \rho \cdot \bar{U}_H^2 \cdot D \cdot H^2$ e $\bar{M}'_T = \rho \cdot \bar{U}_H^2 \cdot B \cdot D \cdot H$ para as direções longitudinal, transversal e de torção respectivamente. Onde, ρ é a massa específica do ar, B é a largura e D é a profundidade da edificação e \bar{U}_H é a velocidade média avaliada na altura H do edifício.

Na Figura 2.20 são apresentados os gráficos para os coeficientes *rms* de momentos na base bem como a densidade espectral para a direção longitudinal, na Figura 2.21 para a direção transversal e na Figura 2.22 somente os coeficientes *rms* para a torção.

Figura 2.20 – (a) coeficientes *rms*, (b) espectro com influência da intensidade de turbulência e (c) espectro com a influência da altura para direção longitudinal

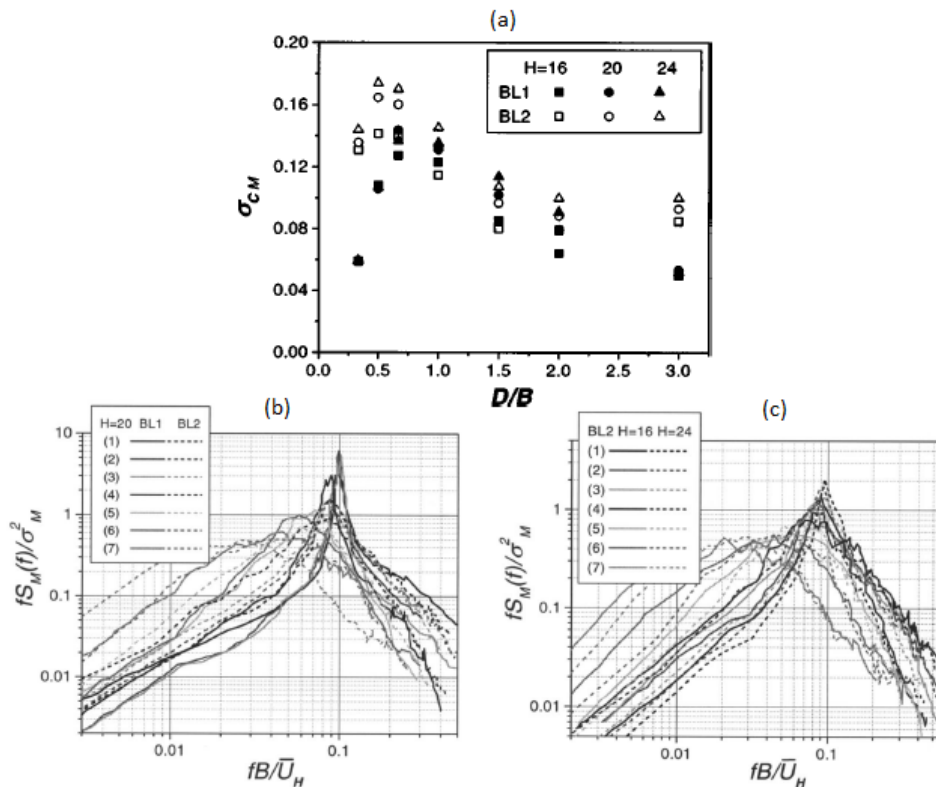


(fonte: ZHOU, *et al.*, 2003)

Conforme pode ser visto na Figura 2.20, o coeficiente *rms* de momento para a direção longitudinal manifesta dependência da relação D/B . Enquanto $D/B \leq 1$, o coeficiente é aproximadamente constante. Entretanto, o coeficiente decresce quando esta relação se torna maior do que um. O campo turbulento afeta significativamente o coeficiente *rms* que aumenta aproximadamente na proporção da intensidade de turbulência.

Com relação à densidade espectral de potência, os autores limitam-se a análise das altas frequências reduzidas, isto é, $f \cdot B / \bar{U}_H > 0,1$, que engloba a faixa de velocidade do vento para a maioria dos edifícios altos. O comportamento do espectro é muito próximo um do outro quando a relação $D/B < 1$, enquanto diminui à medida que a razão dos lados se torna maior do que um. Com o aumento da razão entre os lados, a profundidade do corpo aumenta, resultando no recolamento do fluxo que vicia as flutuações organizadas da esteira. O crescimento da intensidade da turbulência geralmente reduz o espectro nas altas frequências e produz o recolamento do escoamento antecipadamente, resultando também na redução das flutuações da esteira nesta faixa de frequências (ZHOU, *et al.*, 2003).

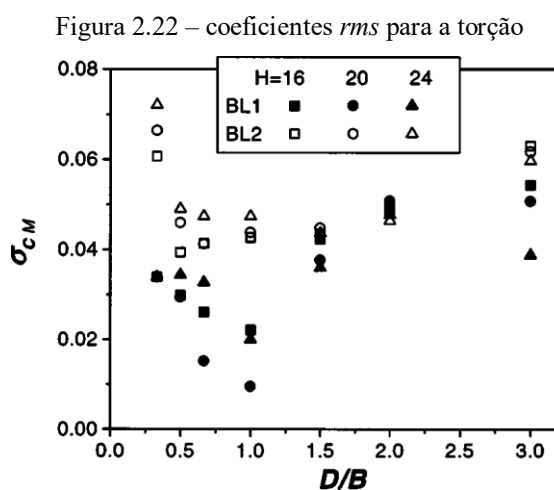
Figura 2.21 – (a) coeficientes *rms*, (b) espectro com influência da intensidade de turbulência e (c) espectro com a influência da altura para direção lateral/transversal



(fonte: ZHOU, *et al.*, 2003)

Conforme visto na Figura 2.21, o coeficiente *rms* de momento para a direção transversal apresenta visível dependência da relação entre os lados. Enquanto $D/B \leq 0,67$, o coeficiente é aumentado. Entretanto, o coeficiente decresce quando esta relação se torna maior do que 0,67. Quando $D/B \leq 0,67$ ou $D/B = 3,0$, quanto maior a turbulência maior será o coeficiente *rms*, porém o coeficiente não é afetado pela turbulência quando a razão dos lados se situa na faixa de 0,67 e 2. Este coeficiente é relativamente insensível com a relação de altura/lado, embora geralmente, quanto maior esta relação, maior é o coeficiente *rms* para o momento transversal.

Diferentemente da direção longitudinal, para a direção lateral o espectro exibe um pico evidente próximo ao número de Strouhal. A amplitude e a banda de frequências desta ocorrência são dependentes principalmente da razão entre os lados, embora geralmente, quanto maior o valor do pico, mais estreita é esta banda. Nota-se que o pico ocorre próximo a frequência reduzida 0,1 quando $D/B < 1,0$, 0,09 quando $D/B = 1,0$ e diminui rapidamente quando a razão entre os lados é superior a 1,0. Enquanto as baixas relações entre os lados produzem valores espectrais altos, o aumento da turbulência geralmente produz picos mais baixos, amplia a largura de banda e desloca o pico para uma frequência reduzida ligeiramente menor (ZHOU, *et al.*, 2003).



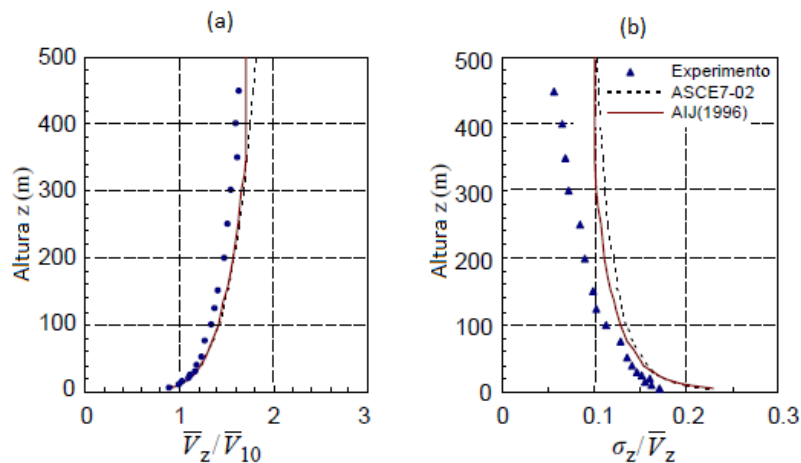
(fonte: ZHOU, *et al.*, 2003)

De acordo com a Figura 2.22, o coeficiente *rms* para o momento de torção é muito sensível a razão entre os lados. O coeficiente diminui com o aumento da relação D/B até 1,0 e aumenta com D/B além deste ponto. O aumento da turbulência produz coeficientes de torque na base marcadamente maiores somente quando $D/B < 1,0$ (ZHOU, *et al.*, 2003).

2.5.3 Estudo realizado por Lin, *et al.* (2005)

Lin, Letchford, Tamura, Liang e Nakamura também realizaram estudos para determinar os espectros de força devido à ação do vento em estruturas. Os ensaios foram realizados no túnel de vento de camada limite WEI (*Wind Engineering Institute*) no Japão. O perfil de velocidade média utilizado nos ensaios corresponde a um valor para o expoente da lei de potência igual a 0,15 e é apresentado na Figura 2.23 juntamente com a intensidade de turbulência. Diferentemente do trabalho apresentado no subcapítulo 2.4.2, são verificados os espectros não somente na base dos edifícios, mas também em alguns níveis da estrutura, como pode ser verificado na Figura 2.24. Foram estudados 9 modelos distintos, cujas características estão indicadas no Quadro 2.1 com escala 1:500.

Figura 2.23 – (a) perfil de velocidade média e (b) intensidade de turbulência gerados por Lin, *et al.* (2005)



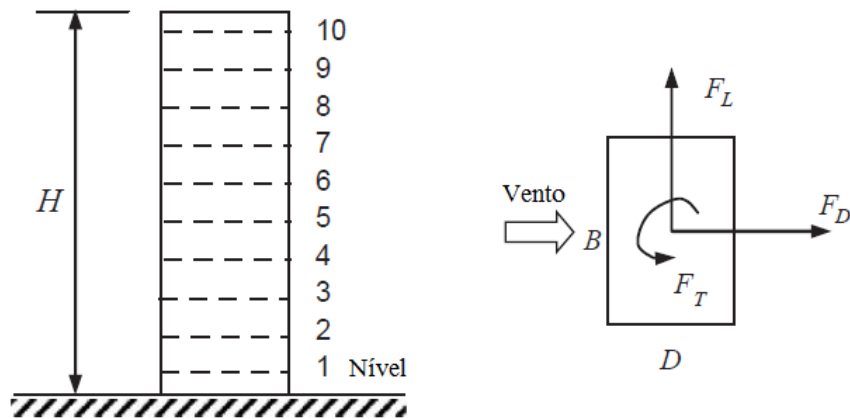
(fonte: LIN, *et al.*, 2005)

Quadro 2.1 – Modelos testados por Lin, *et al.* (2005)

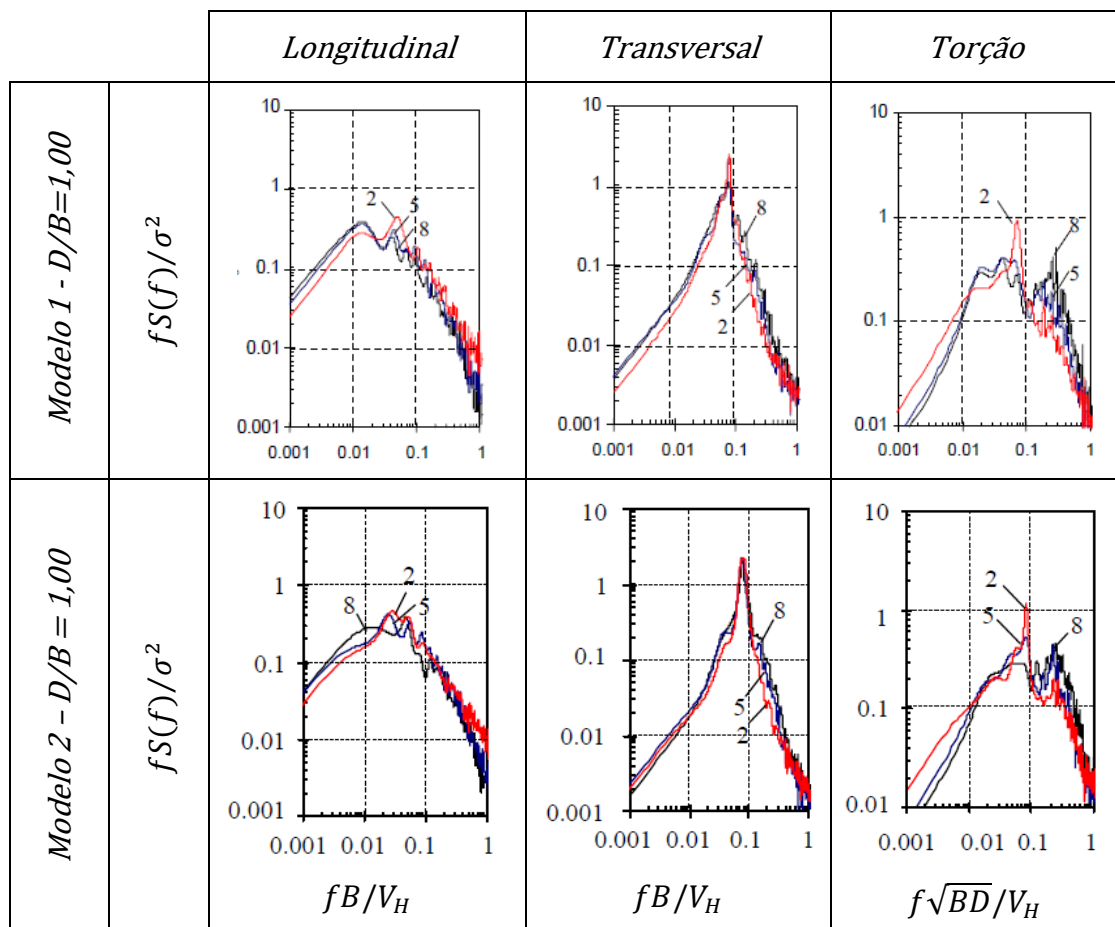
Modelo	Largura B (mm)	Profundidade D (mm)	Altura H (mm)	Razão dos lados D/B	Razão da altura H/\sqrt{DB}
M1	100	100	300	1.00	3.0
M2	100	100	400	1.00	4.0
M3	100	100	500	1.00	5.0
M4	79	126	400	1.59	4.0
M5	71	142	400	2.00	4.0
M6	58	173	400	2.98	4.0
M7	126	79	400	0.63	4.0
M8	142	71	400	0.50	4.0
M9	173	58	400	0.34	4.0

(fonte: LIN, *et al.*, 2005)

Figura 2.24 – Níveis do modelo e referência de forças e momento

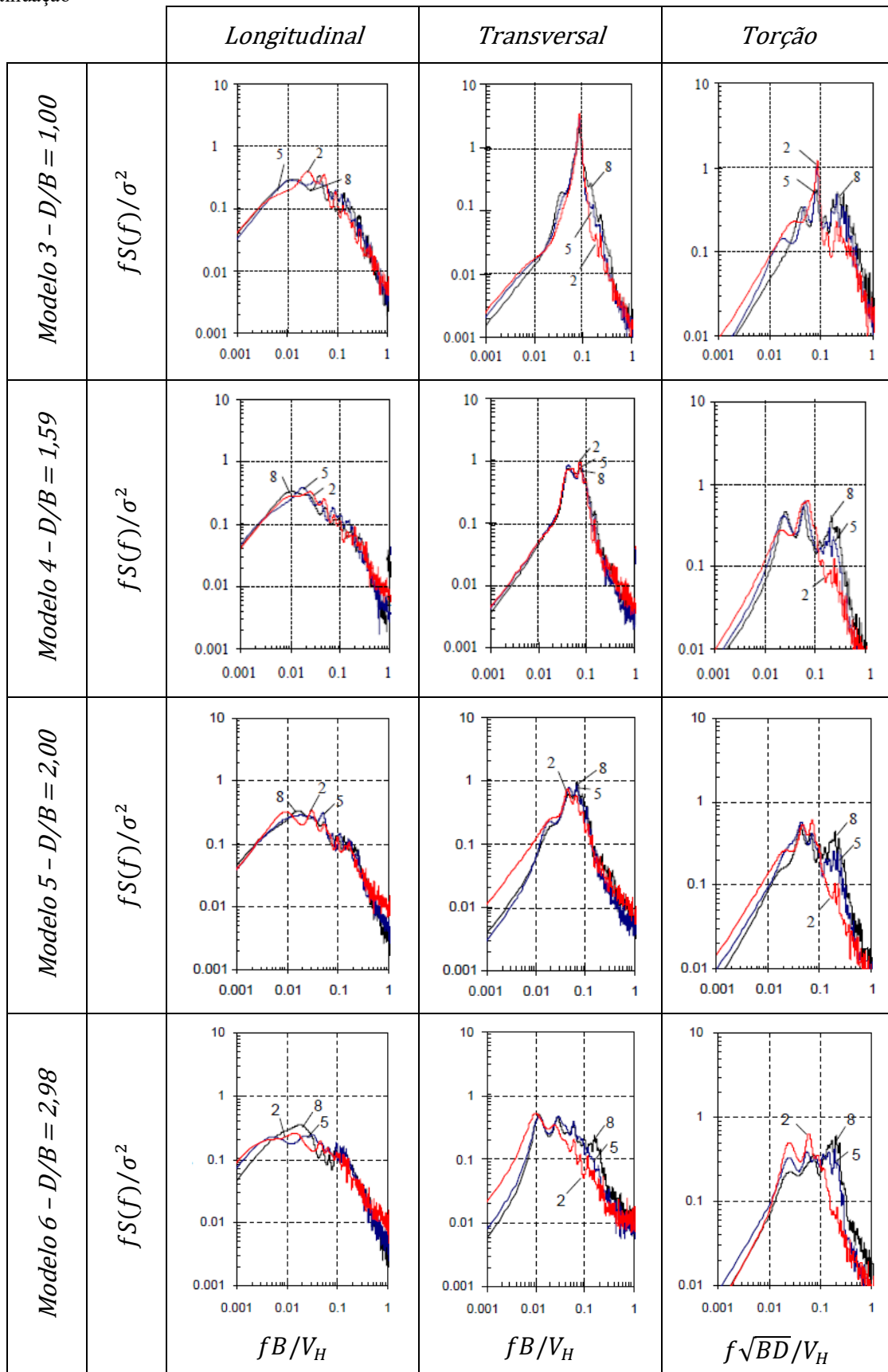
(fonte: LIN, *et al.*, 2005)

Os resultados obtidos pelos autores estão expostos no Quadro 2.2, nele são apresentados os espectros de força e momento para os nove modelos nos níveis 2, 5 e 8.

Quadro 2.2 – Espectros de força longitudinal e transversal e momento de torção para os níveis 2, 5 e 8 dos diversos modelos estudados por Lin, *et al.* (2005)

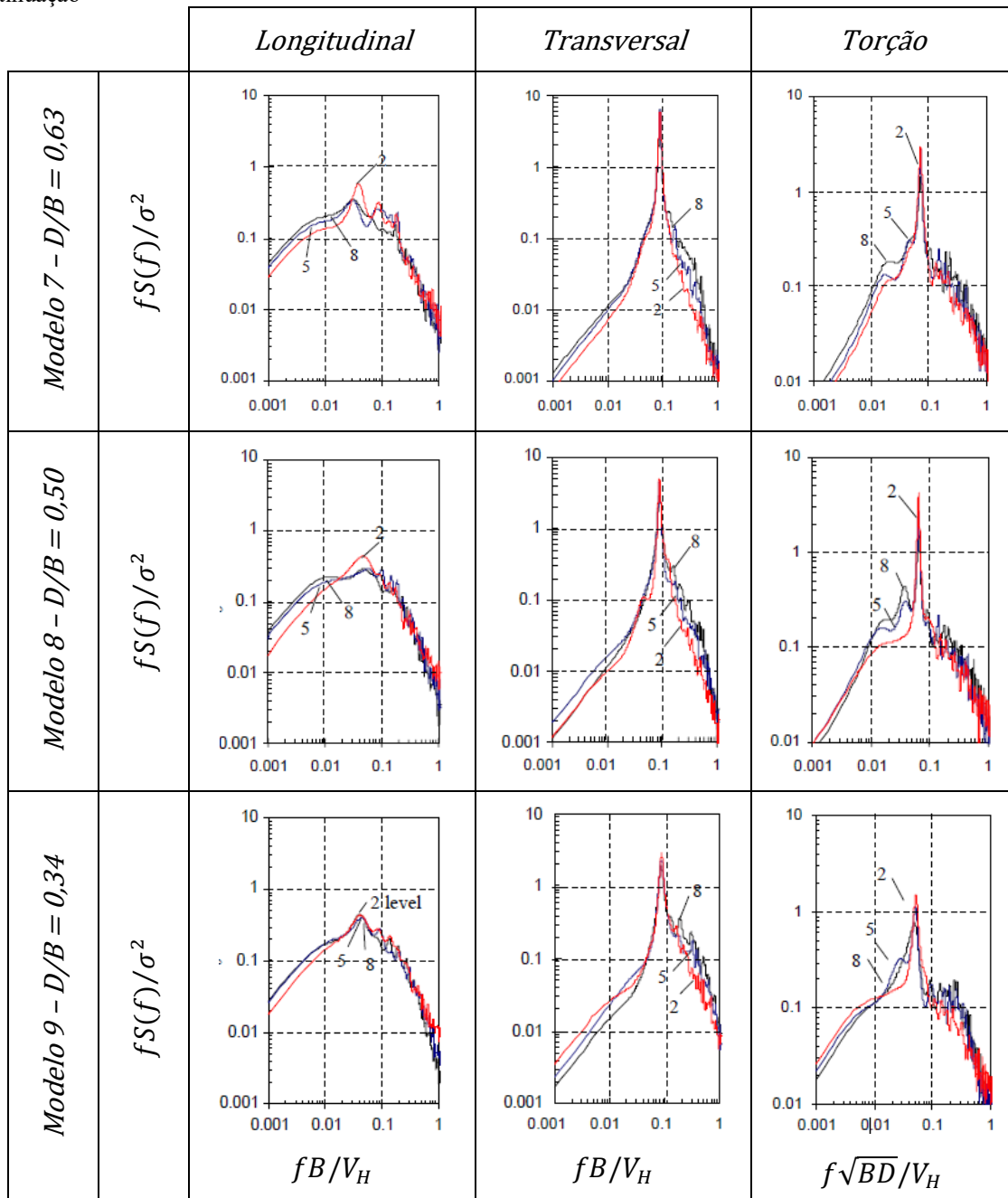
continua

continuação



continua

continuação

(fonte: LIN, *et al.*, 2005)

De acordo com o Quadro 2.2, o espectro na direção longitudinal do vento contém energia em uma larga banda de frequências e depende, principalmente, das flutuações no sentido do fluxo. Portanto, o espectro é relativamente insensível às propriedades geométricas da estrutura. A variação com a elevação também não é óbvia, exceto para os picos apresentados em níveis baixos em que a relação $D/B \leq 1,0$, enfatizando o efeito do fluxo descendente que parte do ponto de estagnação para níveis mais inferiores da face localizada a barlavento. Para $D/B >$

1,0, com largura relativamente menor, o fluxo tende a se mover para os lados e reduz o efeito de fluxo descendente, de modo que o espectro se torna mais insensível à elevação (LIN, *et al.*, 2005).

De acordo com o Quadro 2.2, os espectros na direção transversal exibiram um pico em distintas bandas de frequência, com valores correspondentes ao número de Strouhal em torno de 0,1 para os modelos com razão entre os lados $D/B < 1,0$, atingindo o maior valor de pico no espectro quando $D/B = 0,63$ (modelo 7). A energia de desprendimento de vórtices para $D/B \geq 1,0$ foi reduzida devido a maior razão profundidade/largura, que provoca um espectro com pico menor e banda mais larga (modelo 4). Quando a razão D/B se aproxima de 3, o recolamento do escoamento é verificado, surgindo vários pequenos picos em uma banda larga de frequências (LIN, *et al.*, 2005).

De acordo com os espectros de torção do Quadro 2.2, quando $D/B = 1,0$, dois picos são exibidos no espectro de torção, o primeiro é muito próximo à frequência reduzida 0,1, indicando a contribuição do desprendimento de vórtices na flutuação do torque devido as assimetrias da força transversal para modelos quadrados. O segundo pico ocorre em uma frequência reduzida mais elevada, sugerindo um papel mais importante no caso de edifícios altos (LIN, *et al.*, 2005).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nos casos em que a edificação, devido a sua forma ou dimensão, causar perturbações importantes no escoamento ou quando há uma perturbação devido à presença de obstáculos vizinhos, é recomendada a realização de ensaios em túnel de vento. Em muitos casos, as vibrações ocasionadas pelo vento são oriundas de mais de um fator, como por exemplo os vórtices de von Kármán, galope, martelamento e energia cinética das rajadas (BLESSMANN, 2005).

Neste capítulo abordar-se-á as características relativas ao túnel de vento, no qual foram realizados os ensaios das estruturas analisadas, a simulação do vento natural e a apresentação das características das edificações em estudo no presente trabalho.

3.1 TÚNEL DE VENTO *PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN*

O túnel de vento *Professor Joaquim Blessmann* (Figura 3.1) está localizado no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e está em operação desde 1977. Nele são desenvolvidas pesquisas relacionadas aos efeitos estáticos e dinâmicos sobre as estruturas, dispersão de gases e resíduos na atmosfera, efeitos do vento sobre usuários de edificações, transeuntes e veículos (BLESSMANN, 2011).

Este túnel é de retorno fechado, no qual o vento é gerado por um ventilador de pás acionado por um motor elétrico de 75 kW de potência. Sua câmara principal possui a relação comprimento/altura de 10,3 e dimensões de 1,30 x 0,90 x 9,32 m (largura, altura e comprimento, respectivamente). A velocidade máxima do escoamento do ar nesta câmara supera 42 m/s, sem modelos e com vento suave e uniforme (CARINI, 2017).

Figura 3.1 – Túnel de vento *Professor Joaquim Blessmann*



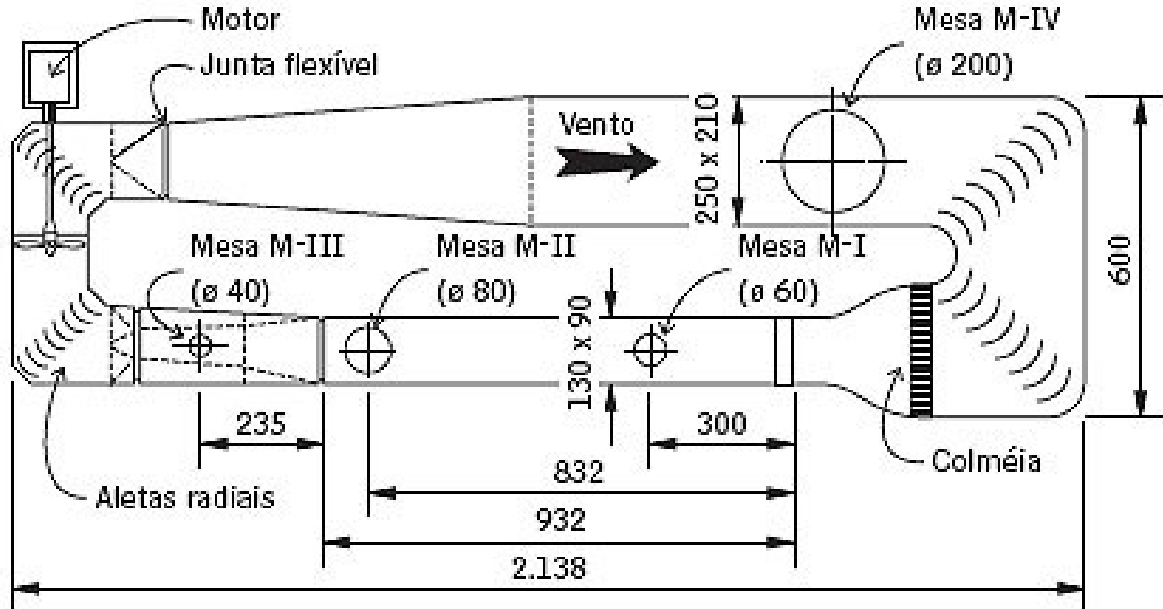
(fonte: NÚÑEZ, *et al.*, 2012)

O túnel de vento *Professor Joaquim Blessmann* dispõe atualmente de 4 mesas giratórias para realização de ensaios estáticos e dinâmicos. Cada mesa é utilizada conforme a requerida aplicação, e são caracterizadas por Blessmann (2011) da seguinte maneira:

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

Na Figura 3.2 é apresentado o circuito aerodinâmico do túnel de vento.

Figura 3.2 – Circuito aerodinâmico do túnel de vento *Professor Joaquim Blessmann*



(fonte: adaptado de BLESSMANN, 2011)

Os ensaios utilizados neste trabalho foram realizados na mesa M-II, que permite a correta simulação do perfil de velocidades, obtido adicionando-se blocos disseminados de madeira que simulam a rugosidade do terreno e elementos verticais no início da câmara de testes.

Durante a realização dos ensaios, a velocidade do vento é monitorada através da diferença da pressão estática, Δp_a , que é lida em dois anéis piezométricos situados nos extremos do convergente. As medições são realizadas através de sensores eletrônicos. Para cada perfil de velocidades do vento simulados no túnel foram determinados valores para o coeficiente k_0 , que vincula a pressão dinâmica q_m , no eixo do túnel ($z=450\text{mm}$) e a pressão de referência Δp_a . Desta maneira, é possível calcular a velocidade do escoamento em qualquer ponto da seção transversal.

Podemos compreender melhor, através da equação 3.1, esta relação entre a pressão dinâmica, k_0 e Δp_a :

$$q_m = k_0 \Delta p_a \quad \text{equação 3.1}$$

Onde:

q_m é a pressão dinâmica, ($q_m = \rho_{ar} V^2/2$), em mmH₂O;

V é a velocidade média do vento, em m/s;

ρ_{ar} é a massa específica do ar, em kg/m³;

k_0 é o coeficiente que vincula q e Δp_a , adimensional;

Δp_a é a pressão de referência (diferença de pressão entre os anéis piezométricos), em mmH₂O.

Podemos calcular também a velocidade média do vento, através da equação 3.2, para uma determinada temperatura e pressão, isolando-se a velocidade e incluindo a expressão para o cálculo de ρ_{ar} em função de T e P_{atm} na equação 3.1:

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

Onde:

V é a velocidade média do vento, em m/s;

T é a temperatura dentro do túnel no momento do ensaio, em °C;

P_{atm} é a pressão atmosférica no momento do ensaio, em mmH₂O.

3.2 SIMULAÇÃO DO VENTO

O tipo de vento simulado foi o deslizante e turbulento, o seu perfil vertical de velocidades média é representado pela lei de potência, conforme apresentado no presente trabalho pela equação 2.2. Este perfil de velocidades foi obtido através da inserção de elementos de rugosidade no piso da seção de trabalho do túnel (tacos de madeira) e elementos verticais geradores de turbulência. O valor do expoente da curva de potência, p , foi de 0,23, que corresponde a uma

rugosidade intermediária entre as categorias III e IV indicadas na NBR 6123 (1988), local onde estão inseridas as estruturas em estudo.

A medição das velocidades no túnel de vento foi realizada (sem modelos) através de um anemômetro de fio quente, conforme Figura 3.3, a aquisição ocorreu em um período de 60 segundos a uma taxa de aquisição de 2048 Hz, constituindo em uma amostra de 122880 pontos para cada altura. Mediu-se as velocidades nas alturas de 5 a 600 mm em relação ao piso do túnel.

Figura 3.3 – Anemômetro localizado no eixo transversal do túnel e geradores de turbulência e rugosidade



(fonte: elaborado pelo autor)

A NBR 6123 (1988) define as categorias de rugosidade do terreno conforme o Quadro 3.1:

Quadro 3.1 – Categorias de rugosidade do terreno segundo a NBR 6123 (1988)

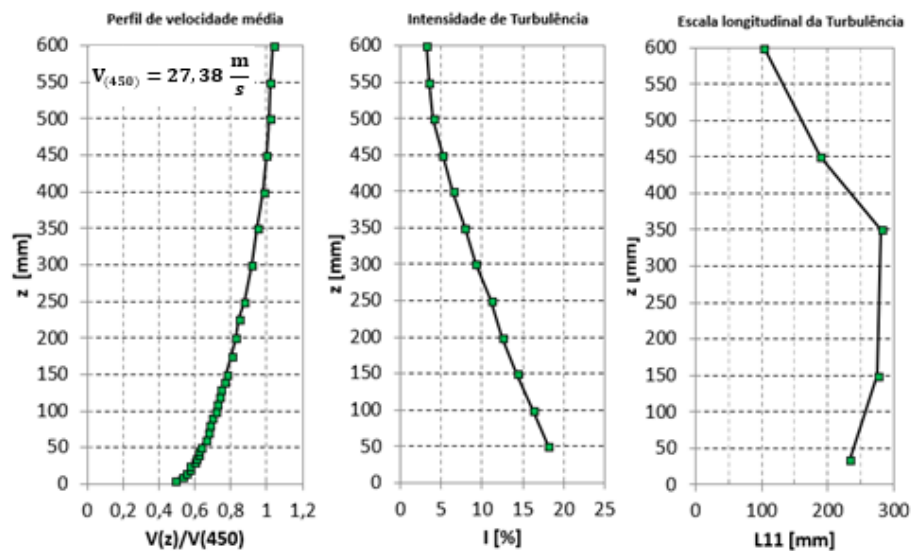
Expoente ' p '	Rugosidade do Terreno - NBR 6123	Alguns exemplos
0,11	Categoria I	mar calmo, lagos e rios
	Categoria II	zonas costeiras planas, campos de aviação
0,23	Categoria III	granjas e casas de campo, subúrbios com casas baixas
	Categoria IV	subúrbios densamente construídos, áreas industriais e bosques
0,34	Categoria V	centro de grandes cidades, complexos industriais desenvolvidos

(fonte: elaborado pelo autor)

Na Figura 3.4 estão apresentados os gráficos do perfil de velocidades média, a intensidade de turbulência e a escala da componente longitudinal de turbulência para a medição realizada, referente ao expoente $p=0,23$ da lei de potência.

A escala da turbulência foi obtida através da expressão $L_{1,1} = \bar{V}(z)/2\pi f_{pico}$, onde f_{pico} representa a frequência correspondente ao pico do espectro (LOREDO-SOUZA, *et al.*, 2004).

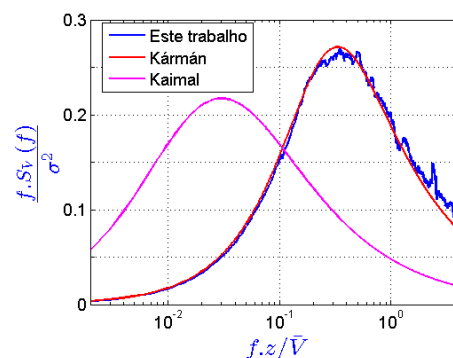
Figura 3.4 – Gráficos do perfil de velocidade média e intensidade de turbulência para o expoente $p=0,23$ da lei de potência



(fonte: elaborado pelo autor)

Foi processado o espectro de velocidade do vento para a altura de 450 mm (medidos a partir do piso do túnel – eixo do túnel) e comparado com o espectro de von Kármán e Kaimal. O eixo x está expresso em função da frequência, da altura da medição e da velocidade média. Os gráficos dos espectros estão apresentados na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Espectro da velocidade do vento no eixo do túnel de vento $z = 450$ mm.

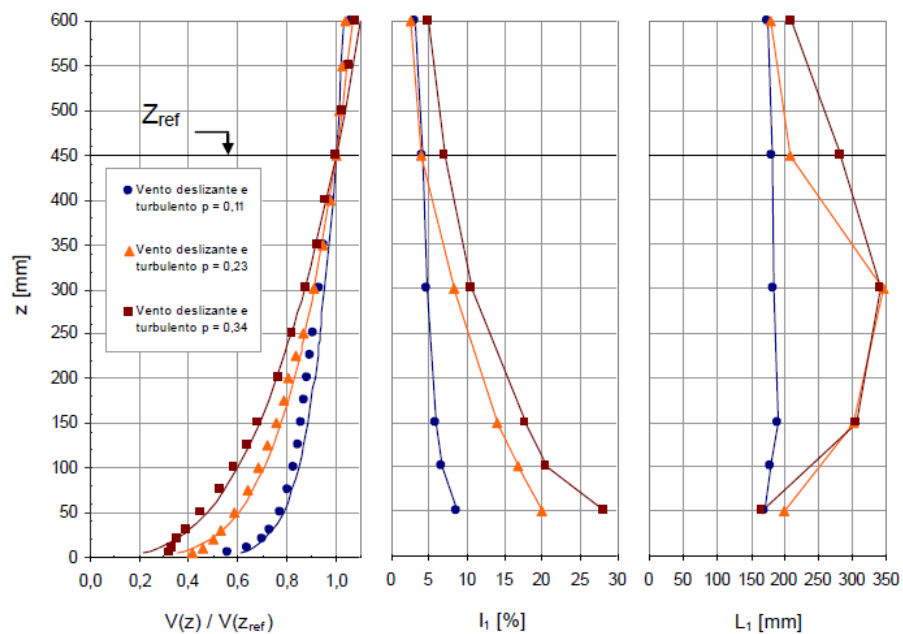


(fonte: elaborado pelo autor)

Núñez, *et al.* (2012) apresentaram o perfil de velocidades média, intensidade de turbulência e macroescala longitudinal da turbulência para o túnel de vento *Prof. Joaquim Blessmann* com diversos coeficientes de rugosidade ($p=0,11$; $p=0,23$; $p=0,34$).

Na Figura 3.6 é possível visualizar os resultados apresentados por Núñez, *et al.* (2012). Se compararmos os resultados obtidos pelos autores para o expoente de rugosidade $p=0,23$, nota-se algumas diferenças de valores em relação aos ensaiados para este trabalho.

Figura 3.6 – Perfil de velocidades médias, intensidade de turbulência e macroescala da componente longitudinal da turbulência

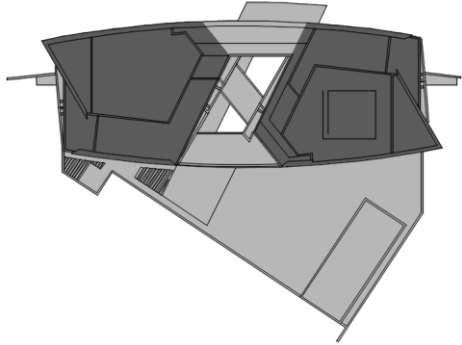
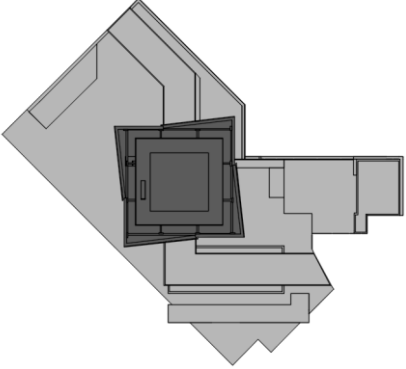
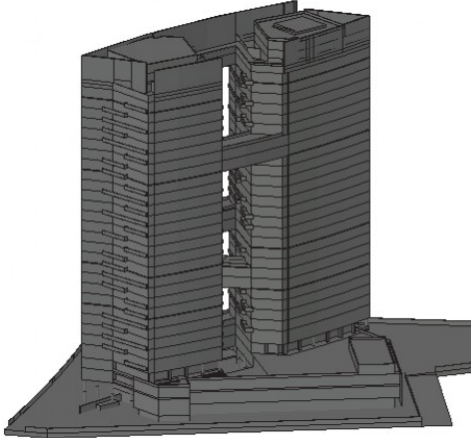
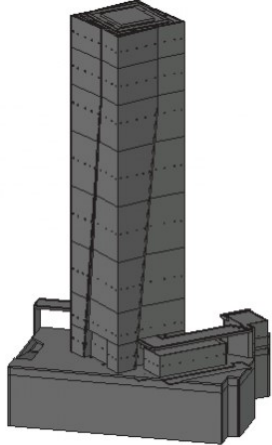


(fonte: NÚÑEZ, LOREDO-SOUZA e ROCHA, 2012)

3.3 DESCRIÇÃO DAS ESTRUTURAS E DOS MODELOS

Foram selecionados dois empreendimentos da base de dados do LAC para a realização do presente trabalho, que serão denominados de empreendimento I e empreendimento II, conforme indicados no Quadro 3.2, sendo ainda apresentados os valores de largura e profundidade. Esses valores são de um retângulo envolvente que circunscreve as estruturas.

Quadro 3.2 – Dimensões dos modelos em estudo

	<i>Empreendimento I</i>	<i>Empreendimento II</i>
Altura H (m)	139,48	170,99
Largura L (m)	55,22	35,82
Profundidade P (m)	41,90	35,82
Vista de topo		
Visualização 3D		

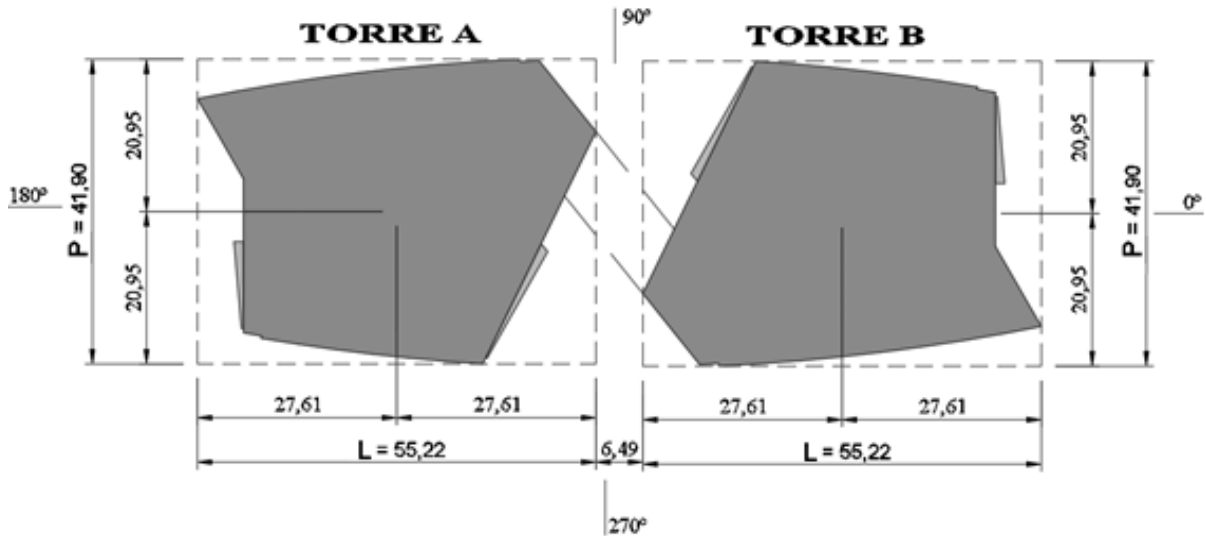
(fonte: elaborado pelo autor)

3.3.1 Empreendimento I

O empreendimento I é caracterizado por possuir duas torres justapostas e espelhadas em torno de dois eixos perpendiculares. As torres possuem cinco “passarelas” em diferentes alturas, interligando-as e permitindo o acesso entre elas, no entanto, as passarelas não transmitem esforços horizontais oriundos da movimentação de uma torre em relação à outra. Portanto, as torres possuem os deslocamentos horizontais independentes entre si.

É apresentado na Figura 3.7 um croqui com a forma e as das dimensões em planta da referida estrutura:

Figura 3.7 – Croqui da forma e dimensões, em metros, das torres

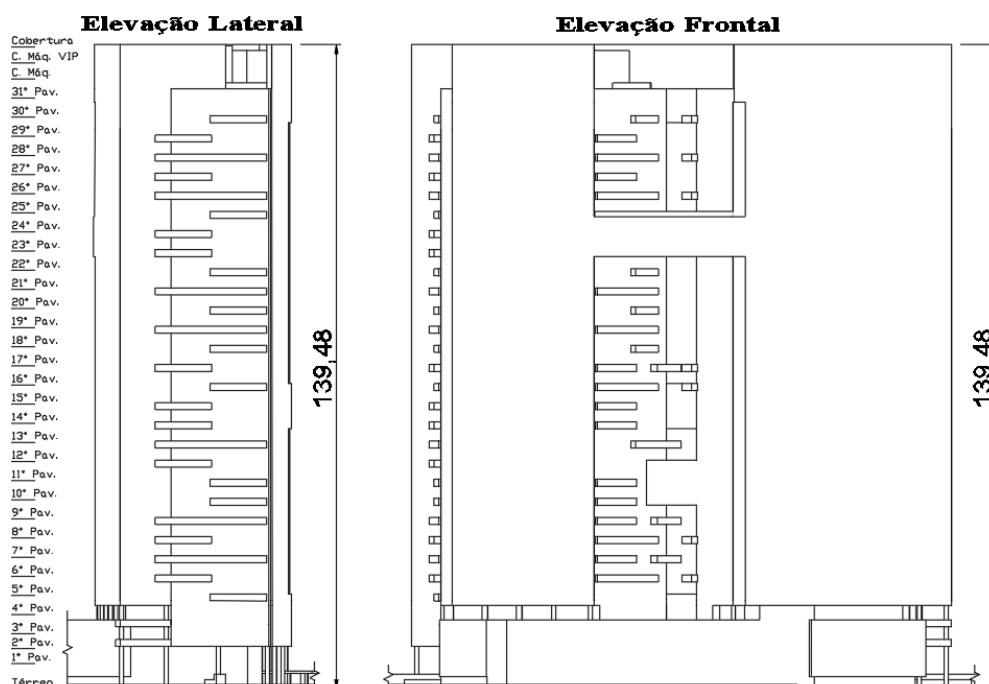


(fonte: adaptado de LAC, 2017)

A estrutura possui 139,48 metros de altura composta pelo pavimento térreo mais 31 pavimentos, duas casas de máquinas e cobertura, totalizando 35 pavimentos. Na Figura 3.8 mostra-se a elevação lateral e frontal da mesma:

O modelo reduzido foi construído em uma escala de 1/500. Este modelo foi confeccionado com resina de impressão 3D e trata-se de um modelo rígido. Possui 970 tomadas de pressão, somando-se ambas as torres. As 970 tomadas foram utilizadas para a avaliação das pressões nos revestimentos, a qual foi realizada em três partes devido a limitação do número de tomadas de medição simultânea do túnel de vento, porém a avaliação dos revestimentos não faz parte do estudo em questão.

Figura 3.8 – Elevações lateral e frontal, dimensões em metros



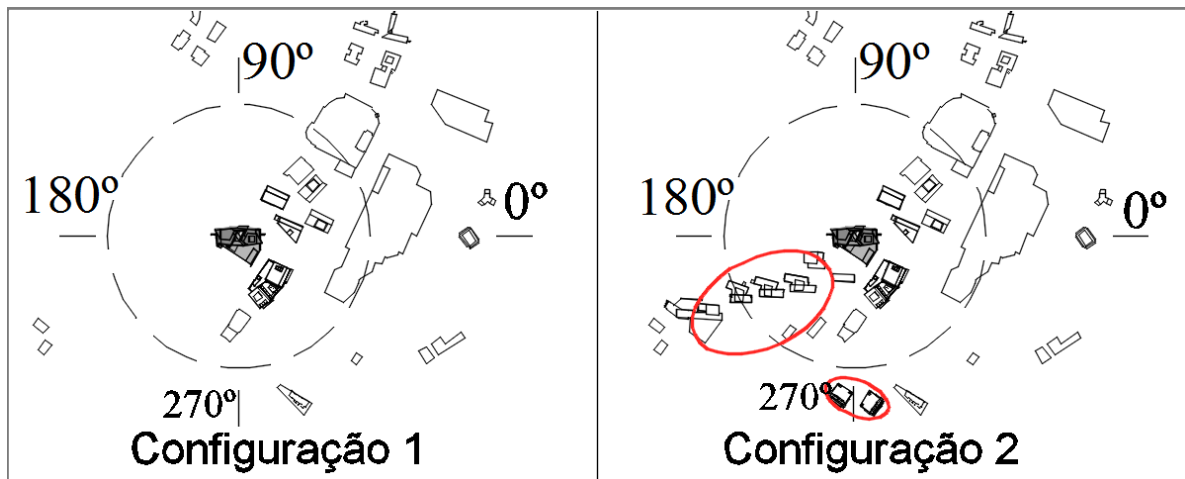
(fonte: adaptado de LAC, 2017)

Para a correta avaliação dinâmica da estrutura como um todo, e para que as correlações das flutuações se mantenham, as medições de pressão de toda a estrutura devem ser realizadas simultaneamente e no mesmo ensaio, sendo assim, selecionaram-se 326 das 970 tomadas para ambas as torres. Isso se deve a limitação do equipamento de aquisição de dados simultâneos, que é de 380 tomadas.

Os ensaios foram realizados em duas configurações, uma com a vizinhança atual da época da construção do empreendimento (configuração 1) e outra com empreendimentos adicionais que estariam sendo construídos simultaneamente ou em um curto espaço posterior de tempo ao da estrutura em estudo (configuração 2). Estas edificações no entorno do modelo foram construídas na mesma escala do modelo. Não foi realizado ensaio com o modelo isolado neste empreendimento.

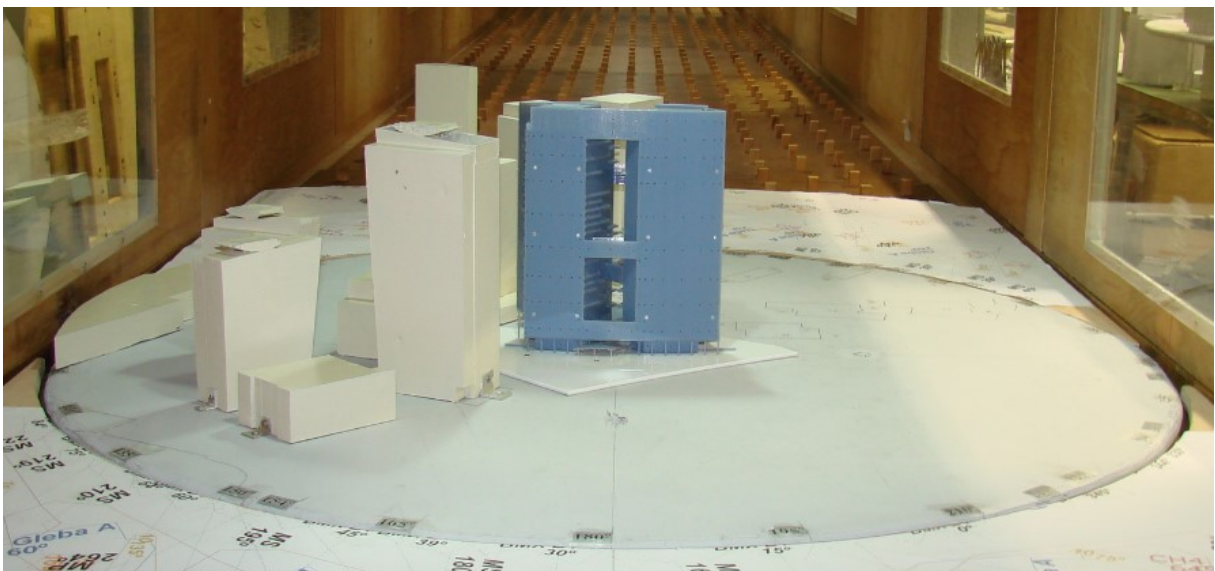
As configurações de ensaio e a fotografia do modelo reduzido estão apresentadas na Figura 3.9 e na Figura 3.10, respectivamente:

Figura 3.9 – Configurações de ensaio



(fonte: adaptado de LAC, 2017)

Figura 3.10 – Modelo reduzido – configuração 1



(fonte: adaptado de LAC, 2017)

As frequências naturais e os modos de vibração da estrutura foram fornecidos pelo projetista, sendo que a mesma possui 3 frequências naturais inferiores a 1 Hz, mais suscetíveis à excitação pelo vento.

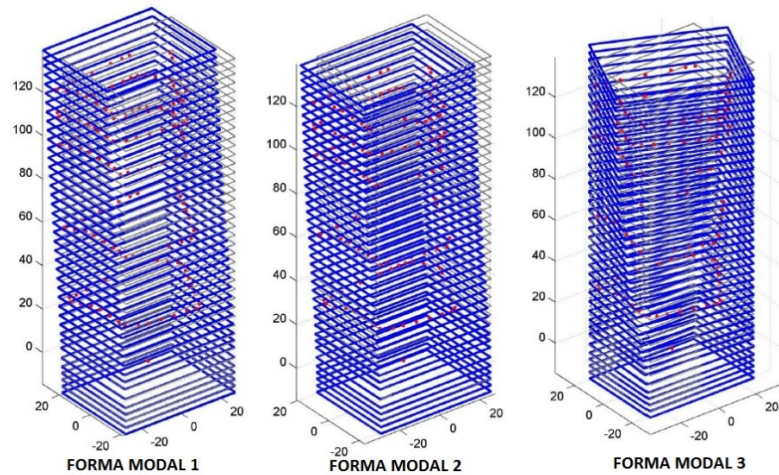
Edificações com período fundamental superior a um segundo, ou seja, frequências abaixo de 1 Hz, podem apresentar uma importante resposta flutuante na direção do vento médio (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988).

As frequências naturais da estrutura, abaixo de 1 Hz, são:

- a) $f_1 = 0,27213$ Hz;
- b) $f_2 = 0,33434$ Hz;
- c) $f_3 = 0,55837$ Hz (torcional).

As formas modais simplificadas estão apresentadas na Figura 3.11:

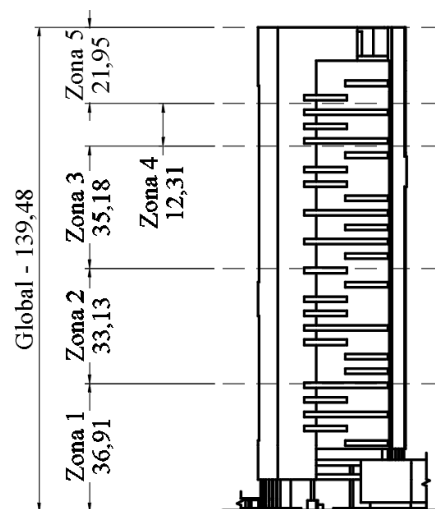
Figura 3.11 – Formas modais simplificadas da estrutura



(fonte: adaptado de LOREDO-SOUZA, *et al.*, 2012)

A estrutura foi subdividida e avaliada em 5 zonas de altura, a subdivisão pode ser visualizada na Figura 3.12:

Figura 3.12 – Subdivisão da altura em zonas para o empreendimento I



(fonte: adaptado de LAC, 2017)

No Quadro 3.3 é apresentado um resumo com as principais características do empreendimento I:

Quadro 3.3 – Resumo das características do empreendimento I

Nome	Empreendimento I
Número de torres	2 (torre A e torre B)
Altura H (m)	139,48
Largura L (m)	55,22
Profundidade P (m)	41,90
Escala do modelo	1/500
Número de tomadas utilizadas	326
Número de zonas	5
Configurações de ensaio	2 (config. 1 e config. 2)
Incidências do vento	24
Frequências Naturais (Hz)	$f_1 = 0,27213$; $f_2 = 0,33434$; $f_3 = 0,55837$

(fonte: elaborado pelo autor)

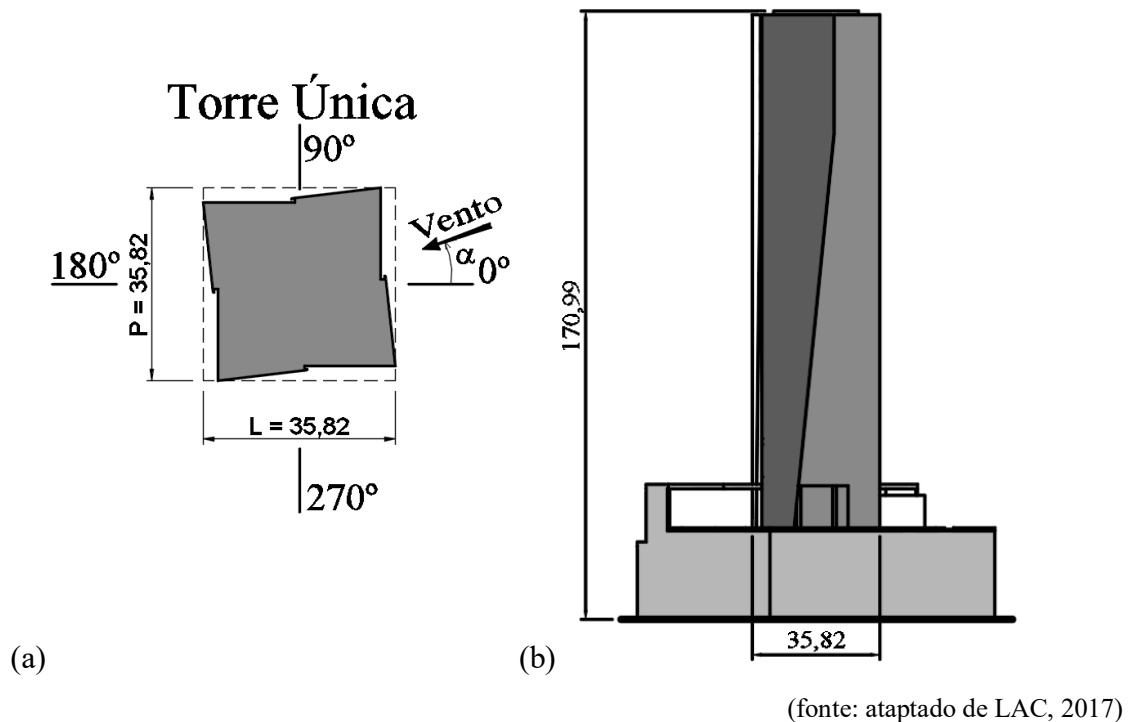
3.3.2 Empreendimento II

O empreendimento II é composto de apenas uma torre e possui uma seção transversal aproximadamente quadrada com lado igual a 35,82 metros. Esta estrutura possui 170,99 metros de altura distribuídos em 44 pavimentos.

É apresentado na Figura 3.13 um croqui com a forma, as dimensões em planta baixa e uma elevação da referida estrutura:

Foi construído um modelo reduzido na escala de 1/400. O modelo foi instrumentado com 382 tomadas de pressão no total, sendo 366 tomadas selecionadas para a realização e aplicação na integração simultânea de pressões, utilizado neste trabalho. Para a confecção do modelo utilizou-se resina e alguns detalhes em chapa metálica.

Figura 3.13 – Croqui da forma, dimensões em planta baixa e referência para o ângulo de incidência do vento (a) e elevação (b), em metros, do empreendimento II



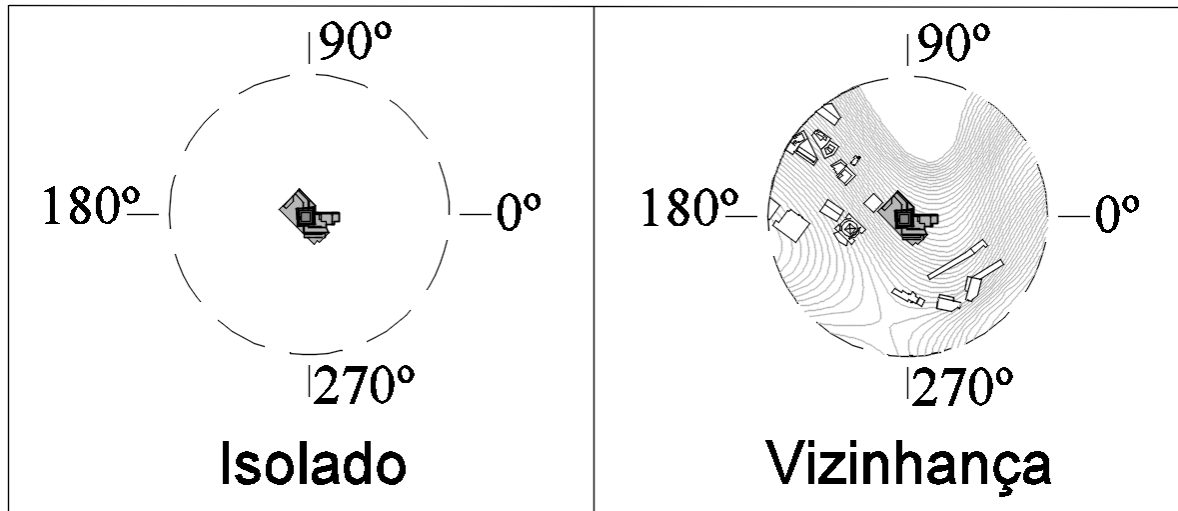
Os ensaios foram realizados em duas configurações, uma com o modelo isolado e outra com o efeito da vizinhança e características do relevo do terreno. Nas duas configurações de ensaio utilizou-se o expoente $p = 0,23$ para a caracterização do perfil de velocidade do vento. Na Figura 3.14 é apresentado o modelo no interior do túnel de vento nas duas configurações. Já na Figura 3.15 são mostradas em forma de desenho as duas configurações de ensaio.

Figura 3.14 – Imagens dos modelos reduzidos no túnel de vento para as configurações de ensaio



(fonte: adaptado de LAC, 2017)

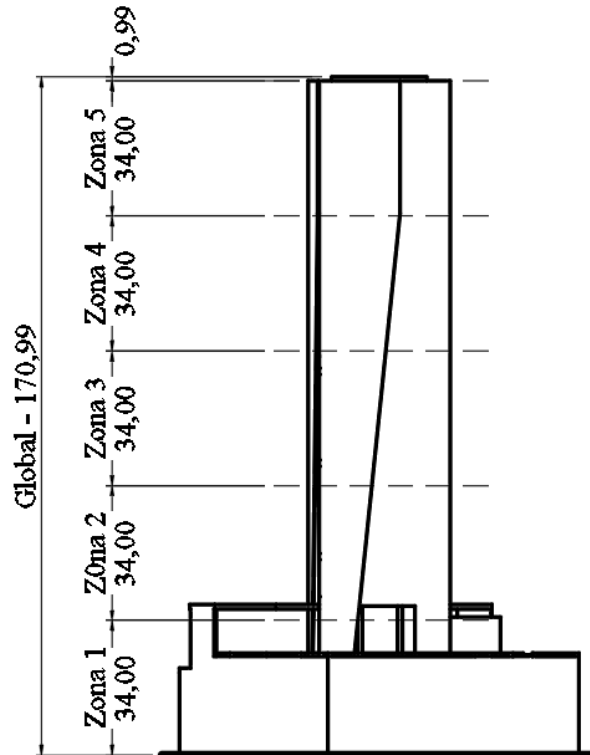
Figura 3.15 – Desenho das configurações de ensaio para o empreendimento II



(fonte: adaptado de LAC, 2017)

A estrutura foi subdividida e avaliada em 5 zonas de altura, a subdivisão pode ser visualizada na Figura 3.16:

Figura 3.16 – Subdivisão da altura em zonas para o empreendimento II



(fonte: adaptado de LAC, 2017)

No Quadro 3.4 é apresentado um resumo das principais características do empreendimento II:

Quadro 3.4 – Resumo das características do empreendimento II

Nome	Empreendimento II
Número de torres	1 (torre única)
Altura H (m)	170,00
Largura L (m)	35,82
Profundidade P (m)	35,82
Escala do modelo	1/400
Número de tomadas utilizadas	366
Número de zonas	5
Configurações de ensaio	2 (isolado e vizinhança)
Incidências do vento	24

(fonte: elaborado pelo autor)

4. PROCESSAMENTO DE DADOS E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as considerações e a maneira de como foi realizado o processamento dos dados oriundos do túnel de vento. Também é exibido uma síntese da integração simultânea de pressões e da Transformada Rápida de Fourier (*FFT – Fast Fourier Transform*), ambos utilizados para a obtenção das densidades espectrais de potência das forças e momentos que agem na estrutura. Também é descrito como foi realizado a suavização dos espectros obtidos.

Os resultados deste trabalho foram processados com o auxílio do *software Matlab* através de um *script* de programação elaborado pelo autor e sub-rotinas (*SpectralDensity.m* e *SqrWindow.m*) fornecidas pelo Prof. Dr. Marcelo Maia Rocha (ROCHA, 2000;2006).

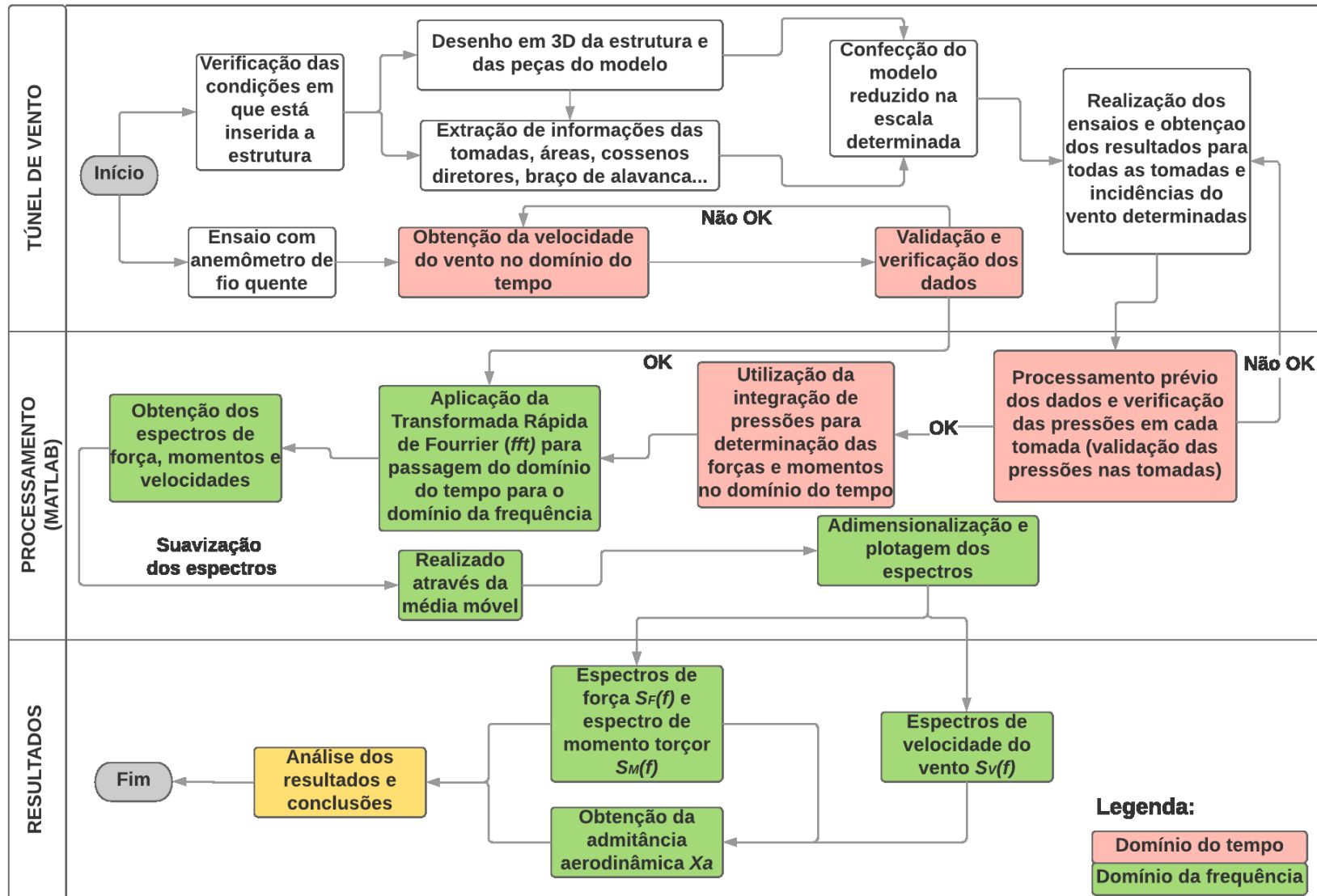
Neste capítulo também são apresentados os resultados obtidos no processamento dos dados para o empreendimento I e II. Os resultados estão relacionados aos espectros de força no sentido do eixo *x* e no sentido do eixo *y* e também espectros de momento torçor.

Outra característica que foi determinada na análise são as funções de admitância aerodinâmica, as quais foram obtidas a partir dos espectros de velocidade do vento e dos espectros de força e momento torçor.

Na Figura 4.1 é exposto um fluxograma com as principais etapas para a obtenção dos dados em túnel de vento e com os procedimentos para a aquisição dos resultados, ressaltando os períodos em que a análise se encontra no domínio do tempo e a mudança para o domínio da frequência.

Assim, este capítulo se subdivide em duas grandes partes, a primeira apresentando os métodos para avaliação e processamento de dados e a segunda expondo os resultados obtidos no âmbito global das estruturas e para efeitos localizados (zonas).

Figura 4.1 – Fluxograma dos procedimentos para obtenção dos resultados



(fonte: elaborado pelo autor)

4.1 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS E PROCESSAMENTO DE DADOS

4.1.1 Integração simultânea das pressões

No método de integração, as pressões dinâmicas são medidas simultaneamente através de sensores eletrônicos e registrados através de um sistema de aquisição de dados, para vários locais em uma estrutura. Os registros de pressões consistem em um grande número de séries temporais correlacionadas, que incorporam as densidades espectrais e funções de coerências corretas para o vento natural simulado. As pressões aerodinâmicas no modelo são registradas por meio de transdutores elétricos (LOREDO-SOUZA, *et al.*, 2012).

O LAC possui um sistema de medição simultânea de pressões de 380 canais com o qual é possível obter uma descrição precisa das pressões atuantes na superfície de edifícios altos. Na Figura 4.2 é apresentado o sistema de aquisição de dados utilizado no túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da UFRGS (*Scanivalve*).

Figura 4.2 – Sistema eletrônico de medição de pressões dinâmicas do LAC/UFRGS



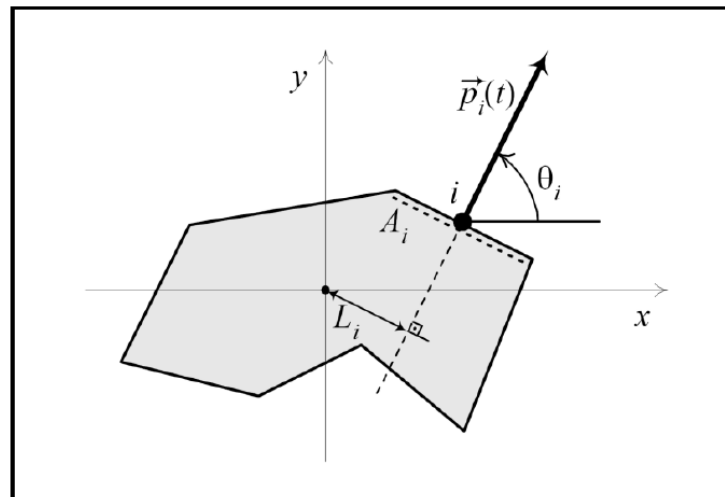
(fonte: SARTORI, 2010)

A admitância aerodinâmica é uma função dependente da frequência que transforma a flutuação da velocidade do vento em uma flutuação de força aerodinâmica. Esta função de admitância

reflete, entre outros aspectos, as correlações da flutuação de pressões para a região da edificação onde estas pressões estão sendo integradas. Para uma região de integração correspondente a um pavimento, ou uma zona, do edifício alto, a admitância aerodinâmica incorpora as correlações entre as flutuações de pressão a barlavento e sotavento, que não seriam consideradas se fossem utilizados coeficientes de pressão média aplicados a uma velocidade de rajada (SARTORI, 2010).

A integração das pressões, embora seja matematicamente simples, requer maciço trabalho de processamento numérico. A Figura 4.3 ilustra uma seção transversal genérica de uma estrutura alteada.

Figura 4.3 – Referências para conversão de um registro de pressão dinâmica em um registro de parcelas de componentes horizontais de forças F_x e F_y e de momento torçor M_z para uma seção transversal da edificação



(fonte: SARTORI, 2010)

Cada tomada de pressão instalada no modelo reduzido está associada a uma área de influência, A_i , e com isso a integração sobre uma dada região ou “zona” é realizada a partir da equação 4.1:

$$\vec{F}(t) = \int_S [p(t) \vec{u}_F] dA \cong \sum_{i=1}^n [p_i(t) \vec{u}_F] A_i \quad \text{equação 4.1}$$

Onde:

$\vec{F}(t)$ é a força resultante no tempo t ;

$p(t)$ é a pressão local no tempo t ;

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

S é a superfície, ou zona, para a qual se deseja obter a resultante $\vec{F}(t)$;

n é o número de tomadas presentes na zona de integração;

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

A_i é a área de influência da i -ésima tomada.

Da mesma maneira, a componente z do momento (torção em torno do eixo vertical “z”) produzido pelas pressões é dada pela equação 4.2:

$$\vec{M}_z(t) \cong \sum_{i=1}^n p_i(t)L_iA_i \quad \text{equação 4.2}$$

Onde:

L_i é a distância ortogonal do eixo de atuação da pressão na i -ésima tomada à origem do sistema de referência (centro de rigidez), conforme ilustrado na Figura 4.3.

Uma vez que as resultantes de forças e momentos tenham sido integradas para todas as zonas nas quais se subdividiu a superfície externa da edificação, pode-se proceder com o cálculo dos espectros de força e momento torçor através da Transformada Rápida de Fourier.

4.1.2 Transformada de Fourier

A transformada de Fourier é uma ferramenta matemática que realiza a transição entre o domínio do tempo para o domínio da frequência de sinais.

Jean-Baptiste Joseph Fourier descobriu no início do século XIX que qualquer função periódica, por mais complicada que seja, pode ser representada como uma soma de várias funções seno e cosseno com amplitudes, fases e períodos escolhidos convenientemente. A transformada de Fourier de um sinal $x(t)$ é definida através da equação 4.3 (MARTINS, *et al.*, 2016):

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-i\omega t} \quad \text{equação 4.3}$$

Onde $x(t)$ é uma função real no tempo e $X(\omega)$ é uma função complexa da frequência. As condições para a existência da transformada de Fourier são complicadas, porém é suficiente que a função $x(t)$ seja absolutamente integrável. A transformada de Fourier, como dito anteriormente, é a ferramenta essencial para se obter a transformação do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. Esta representação, denominada de espectro, é a maneira mais usual de visualizar as características de um sinal captado.

Uma solução encontrada para se obter o espectro em frequência é denominada de Transformada Discreta de Fourier (*DFT – Discrete Fourier Transform*), na qual a integral é substituída pelo somatório de acordo com a equação 4.4 (MARTINS, *et al.*, 2016):

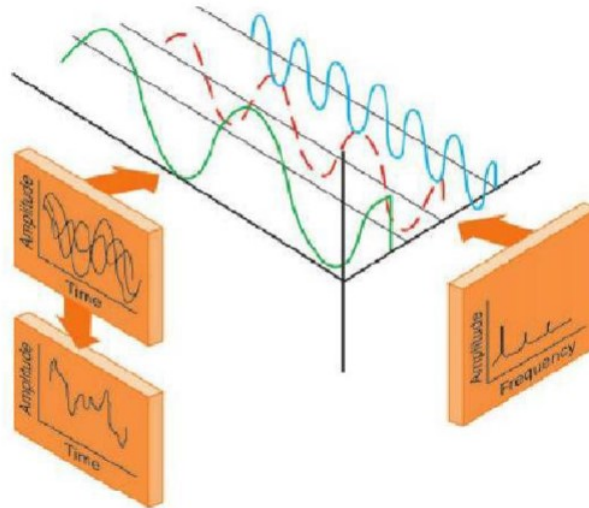
$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{\frac{-i2\pi nm}{N}} \rightarrow m = 1, 2, \dots, N - 1 \quad \text{equação 4.4}$$

Onde $x(n)$ é o conjunto de pontos que representa o sinal no tempo e N é o número total de pontos amostrados. Evidentemente, que quanto maior o número de pontos amostrados melhor será a resolução do espectro e maior o tempo computacional gasto. Visando otimizar a utilização da Transformada Discreta de Fourier, foi desenvolvido um algoritmo para executar a equação 4.4 de forma mais rápida, reduzindo o trabalho computacional, denominado de Transformada Rápida de Fourier (*FFT – Fast Fourier Transform*). O algoritmo da FFT divide a sequência $x(n)$ em duas sequências menores, uma com coeficientes de índices par e outra com coeficientes de índices ímpares, calculando a DFT para cada uma delas e depois combinando-as de modo a se obter a DFT da sequência completa (MARTINS, *et al.*, 2016).

Os gráficos obtidos no domínio do tempo contêm um excesso de informações, já que são influenciados por diferentes amplitudes que se repetem em diferentes períodos de tempo. Ocorre então a superposição de ondas tornando o sinal excessivamente complexo. Com a mudança de domínio é possível filtrar o sinal evitando a repetição e superposição das

amplitudes. A Figura 4.4 representa esquematicamente a mudança de um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência.

Figura 4.4 – Mudança do domínio do tempo para a frequência



(fonte: MARTINS, *et al.*, 2016)

Para o cálculo da densidade espectral de potência (PSD), podemos utilizar a equação 4.5:

$$PSD(f) = \frac{\Delta t}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-i2\pi f n} \right|^2, \quad -1/2\Delta t < f \leq 1/2\Delta t \quad \text{equação 4.5}$$

Onde Δt é o intervalo de amostragem e N é o número total de amostras. Como a densidade espectral de potência possui valores reais e pares, precisamos apenas dos valores da PSD para os valores positivos de frequência. Para conservar a potência espectral total multiplica-se os valores por um fator 2, com exceção do valor de frequência 0 e da frequência de Nyquist (determinadas através da equação 4.5), obtendo assim a densidade espectral de potência unilateral. Desta maneira, podemos reescrever a equação 4.5 e obtermos a densidade espectral de potência unilateral através da equação 4.6.

$$PSD(f) = 2 \frac{\Delta t}{N} \left| \sum_{n=2}^{\frac{N}{2}} f t_n \right|^2 \quad \text{equação 4.6}$$

4.1.3 Suavização dos espectros

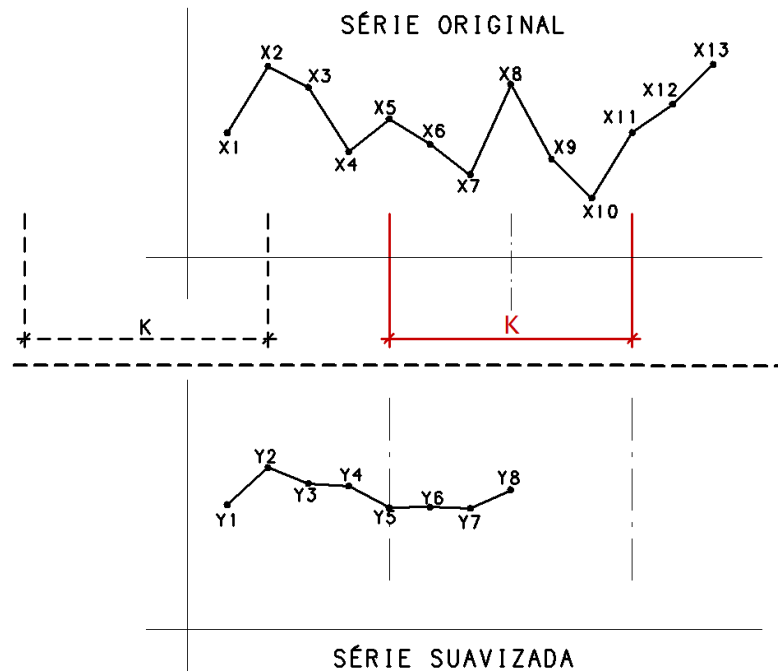
Os espectros gerados a partir da aplicação da integração simultânea de pressões e da transformada de Fourier apresentam uma tendência em seu comportamento, porém, muitas vezes é complicado compreender esta tendência sem realizar uma suavização. A alternância dos valores do espectro, que neste trabalho se apresentaram nas frequências mais altas, podem dificultar a compreensão ou a visualização dos resultados. Desta maneira optou-se pela aplicação de um filtro do tipo média móvel simples centrada.

Para cada elemento da série (espectro) é aplicado a média móvel centrada conforme a equação 4.7, a Figura 4.5 demonstra graficamente a suavização.

$$y_n = \frac{x_{n-j} + \dots + x_{n-1} + x_n + x_{n+1} + \dots + x_{n+j}}{k} \quad \text{sendo que } j = \frac{k-1}{2} \quad \text{equação 4.7}$$

Onde y_n é o valor da amostra suavizada, x_n é a amostra original e k é o número de elementos considerados na média devendo sempre ser um número ímpar, caso k seja par, é adotado o valor $k - 1$ para o número de elementos.

Figura 4.5 – Suavização da série



(fonte: elaborado pelo autor)

4.1.4 Considerações sobre o processamento dos dados

As pressões medidas nos ensaios foram obtidas através de um sistema de aquisição de dados, *Scanivalve*, que mede as pressões em milímetros de coluna de água (mmH₂O). As pressões foram adquiridas durante um período de aproximadamente 16,7 segundos à uma taxa de aquisição de 488 Hz, totalizando, para cada tomada dos modelos, 8192 pontos de amostragem. As características da aquisição são as mesmas para ambos empreendimentos estudados.

Utilizando a equação 4.1, é possível determinar as forças atuando em cada tomada e em cada instante de tempo nos modelos. Adotou-se a convenção de sinais, para os coeficientes de pressão, indicados na Figura 4.6:

Figura 4.6 – Convenção de sinais para os coeficientes de pressão

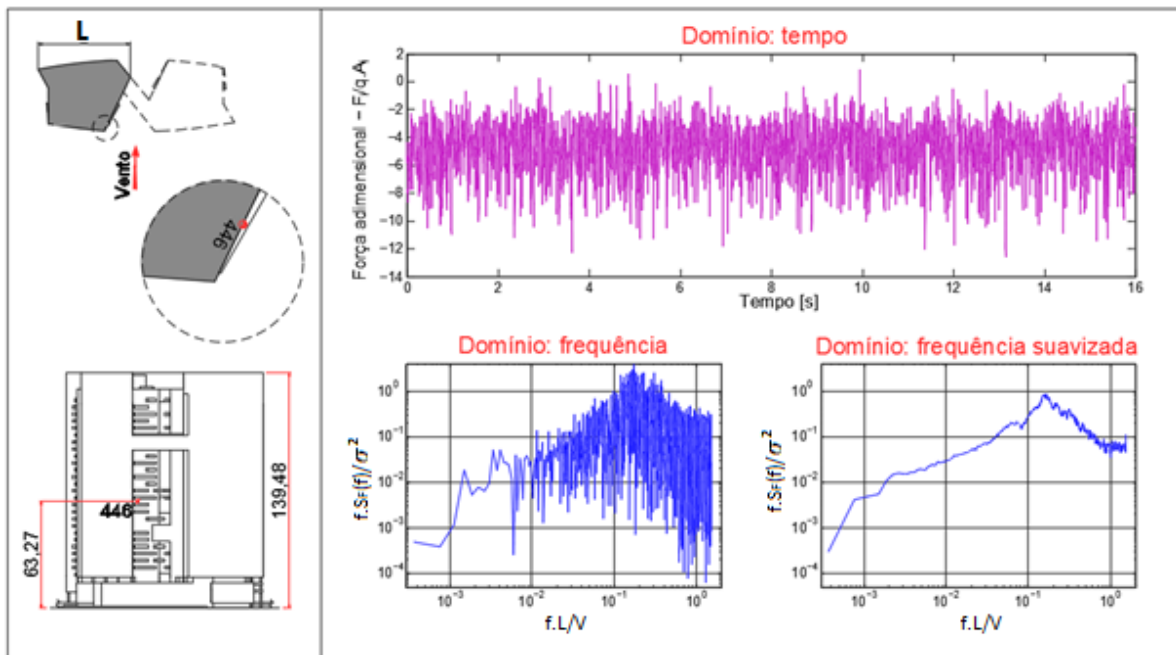
coeficientes positivos: sobrepressão (+)
coeficientes negativos: sucção (-)

(fonte: LOREDO-SOUZA, *et al.*, 2012)

Com o auxílio da Transformada Rápida de Fourier (*FFT*), obtiveram-se os espectros das forças e dos momentos torçores para cada incidência do vento, saindo do domínio do tempo e passando para o domínio da frequência. Realizou-se então a suavização das densidades espectrais de potência. A suavização foi realizada através da média móvel simples centrada, como exposto anteriormente, com $k = 51$ elementos.

Para exemplificar, na Figura 4.7 são apresentados os gráficos da variação da força adimensionalizada em cada instante de tempo, o espectro original da força e o espectro suavizado da força, para a tomada de número 446, configuração 1 e incidência do vento a 270° do empreendimento I. Nesta exemplificação a força é mantida conforme a disposição original da tomada, ou seja, não está decomposta nos eixos x e y.

Figura 4.7 – Domínio tempo e frequência da tomada 446 (Empr. I, torre A, config. 1, $\alpha=270^\circ$)



(fonte: elaborado pelo autor)

As estruturas foram avaliadas globalmente, integrando-se todas as tomadas e obtendo os espectros globais, e também em 5 regiões de altura (zonas), para os dois empreendimentos. No empreendimento I as zonas possuem valores distintos de altura, já no empreendimento II, as alturas das zonas são equivalentes. Desta maneira é possível avaliar as regiões que mais afetam a estrutura como um todo, comparando os resultados individuais de cada zona com os espectros globais da edificação.

Com as densidades espectrais (de forças e momento torçor) definidas, realizou-se o cálculo das funções de admitância aerodinâmica das estruturas. Foi calculada a função de transferência aerodinâmica para as forças nas direções x e y , para o momento torçor e nas direções longitudinal e transversal ao vento, levando em conta a contribuição de todas as tomadas dos modelos simultaneamente.

Utilizou-se a equação 2.16 para a determinação das funções de admitância aerodinâmica. O espectro da velocidade do vento foi escolhido de maneira a ser o mais próximo da altura do topo do modelo, sendo que para o empreendimento I foi o de $z = 250 \text{ mm}$ (do piso do túnel) e para o empreendimento II $z = 400 \text{ mm}$ (do piso do túnel).

4.2 RESULTADOS

A análise dos resultados está subdividida em 2 etapas, global e por zona, para ambos os empreendimentos estudados. Em função da grande quantidade de informações produzidas, devido a várias incidências do vento, selecionou-se algumas incidências, as quais apresentaram características marcantes nos espectros, para realizar a avaliação.

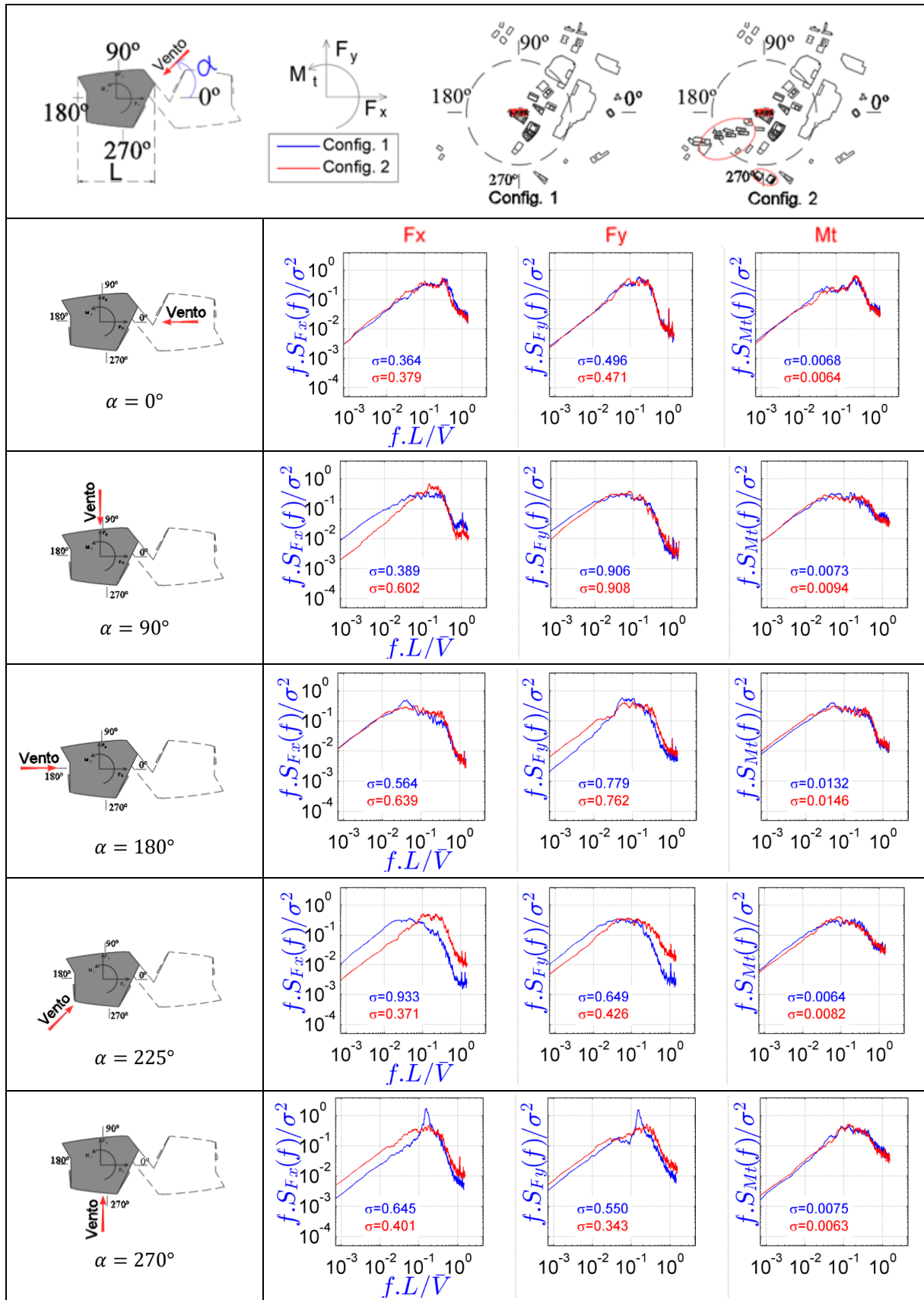
Os demais resultados obtidos, tanto para densidades espectrais de forças e momentos globais quanto para as funções de admitância aerodinâmica estão expostos nos apêndices deste trabalho.

4.2.1 Empreendimento I

4.2.1.1 Resultados globais

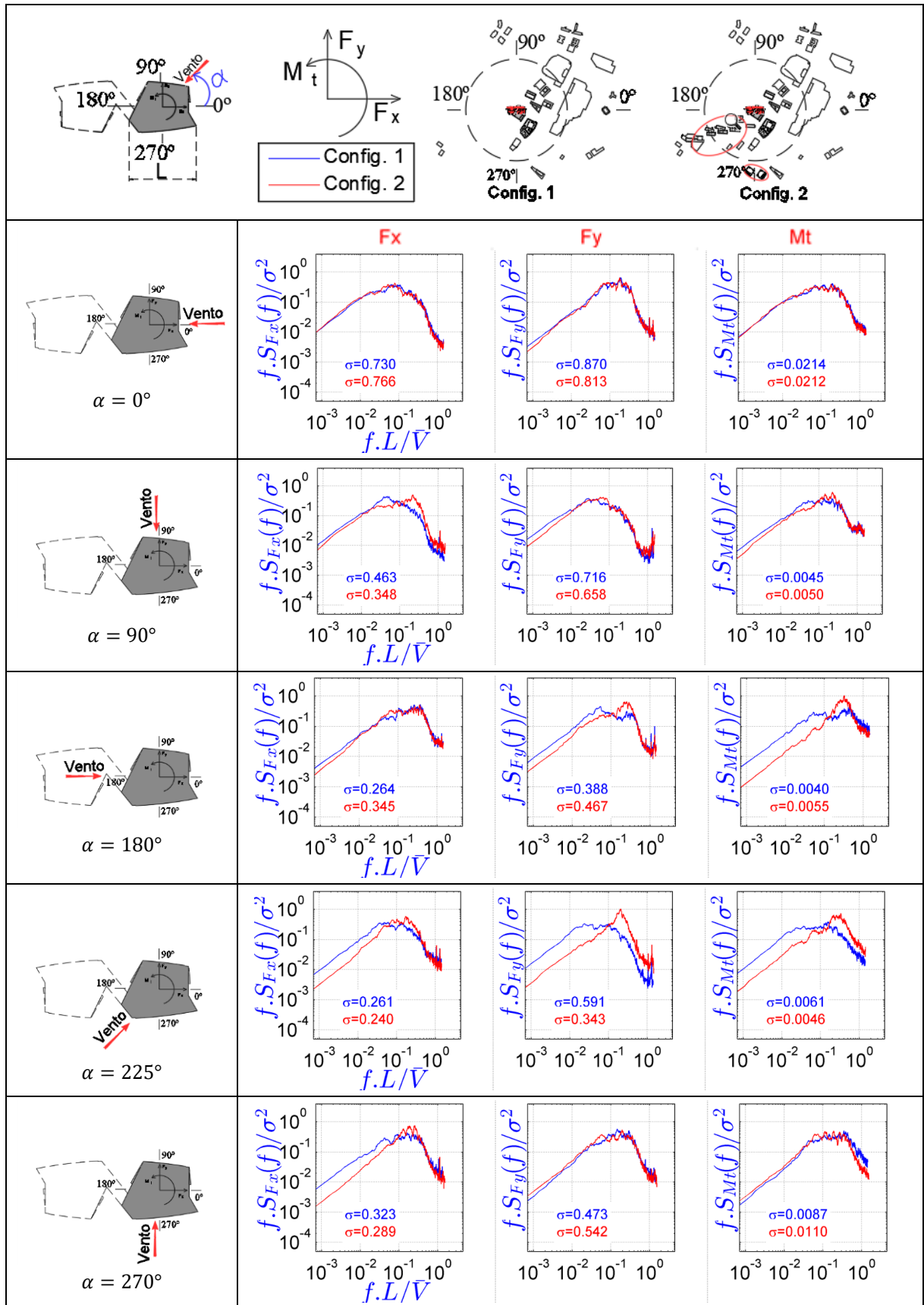
No empreendimento I foram avaliadas as densidades espectrais para cinco incidências do vento (0° , 90° , 180° , 225° e 270°) tanto para a torre A quanto para a torre B. As densidades espectrais da torre A estão apresentadas na Figura 4.8 e as da torre B na Figura 4.9.

Figura 4.8 - Densidades espectrais de forças e momentos globais para a torre A



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.9 - Densidades espectrais de forças e momentos globais para a torre B



(fonte: elaborado pelo autor)

Percebe-se na torre A, com o vento incidindo a 0° , que os espectros possuem uma forma similar para ambas as configurações, o que é coerente, pois nas duas hipóteses avaliadas a torre A se encontra na esteira da torre B, e o aumento de obstáculos vizinhos, para esta incidência do vento, não perturba significativamente o escoamento que age sobre a torre A. Percebe-se também que os valores *rms* possuem similaridade para ambas as configurações. No espectro do momento torçor verifica-se a ocorrência de um pico na frequência reduzida igual a 0.2981 porém este valor encontra-se afastado da frequência correspondente ao modo de torção, que é 0,5584 Hz. Se fossemos calcular a velocidade crítica devido ao desprendimento de vórtices para esta situação teríamos $V_{cr} = 103$ m/s, conforme apresentado abaixo, o que é uma velocidade muito elevada para a região onde está inserida a estrutura.

$$V_{cr} = \frac{f_n L}{S_t} \gg V_{cr} = \frac{0,5584 \cdot 55,22}{0,2981} = 103 \frac{m}{s}$$

Na incidência de 90° , para a torre A, comparando as 2 configurações de ensaio, observa-se que o valor *rms* é alterado significativamente para a força em x e não possui grande variação na densidade espectral da força em y e no momento torçor. Percebe-se no espectro da força em x, para a configuração 2, uma densidade espectral com valores mais elevados na faixa de frequência reduzida entre 0,1 e 1 e isto pode estar ocorrendo devido a presença de obstáculo a sotavento da edificação, ocasionando alterações do escoamento no entorno da torre e elevando o valor do espectro.

Para a incidência de 180° na torre A, diferentemente do esperado, não se percebe um pico acentuado no espectro da força em y, que caracteriza o desprendimento de vórtices. Neste caso, o espectro de forças em y coincide com o espectro de forças transversais.

Quando o vento incide a um ângulo de 225° , na torre A, percebe-se um aumento da energia contida na faixa de frequência reduzida entre 0,1 e 1 nas componentes x e y para a configuração 2. Este aumento possivelmente é gerado devido a turbulência do escoamento originado pela presença de prédios vizinhos, que é muito mais densa na configuração 2 em relação a configuração 1 para esta direção do vento. Este aumento pode estar caracterizando o fenômeno de martelamento.

Na torre A, com o vento incidindo a 270° , nota-se um pico no espectro de forças em x e em y para a configuração 1, mas o mesmo não ocorre para a 2ª configuração. Este pico pode ser caracterizado, conforme visto na Figura 2.11, por possuir um escoamento mais suave na

configuração 1 e mais turbulento na configuração 2 devido a presença de edificações vizinhas. A saliência no espectro é apresentada na frequência reduzida com valor de 0,1514, o que pode representar o fenômeno de desprendimento cadenciado de vórtices, pois para uma seção retangular, o número de Strouhal indicado na NBR 6123 é de $St=0,15$. Sendo assim, podemos calcular a velocidade crítica de desprendimento de vórtices, para esta edificação, utilizando a equação 2.15, com $f_n = 0,3343 \text{ Hz}$, $L = 55,22 \text{ m}$ e $S_t = 0,1514$.

$$V_{cr} = \frac{f_n L}{S_t} \gg V_{cr} = \frac{0,3343 \cdot 55,22}{0,1514} = 121 \frac{m}{s}$$

A velocidade crítica de desprendimento de vórtices é de 121 m/s, muito superior às velocidades realmente incidentes na estrutura.

Na torre B com o vento incidindo a 0° , não se percebe grandes alterações do espectro comparando os resultados obtidos entre as configurações 1 e 2, porém nota-se um leve estreitamento na densidade espectral da força em y na região da frequência reduzida igual a 0,1.

Na configuração 2, com o vento incidindo a 90° na torre B, percebe-se um pico característico do fenômeno de desprendimento de vórtices no espectro de forças transversal que é equivalente ao das forças em x para esta incidência.

Na torre B com o vento incidindo a 180° , observa-se um pico no espectro de forças na direção y e no momento torçor, na faixa de frequências reduzidas entre 0,15 e 0,45 na configuração 2. Este pico pode ser originado devido à presença de edificações vizinhas, já que na configuração 1 esta saliência não ocorre. Nesta incidência a torre B situa-se na esteira da torre A e pode estar sofrendo o fenômeno de martelamento.

Verifica-se no espectro de forças da torre B, que para a incidência de 225° , surgem picos em todas as componentes de forças e no momento torçor na faixa de frequência reduzida entre 0,1 e 1 para a configuração 2. Estes picos não aparecem na configuração 1, e os mesmos podem ser oriundos da turbulência gerada na esteira das edificações a barlavento da torre B, ocorrendo o martelamento e gerando amplitudes de flutuações mais elevadas quando a vizinhança é mais densa, no caso desta incidência.

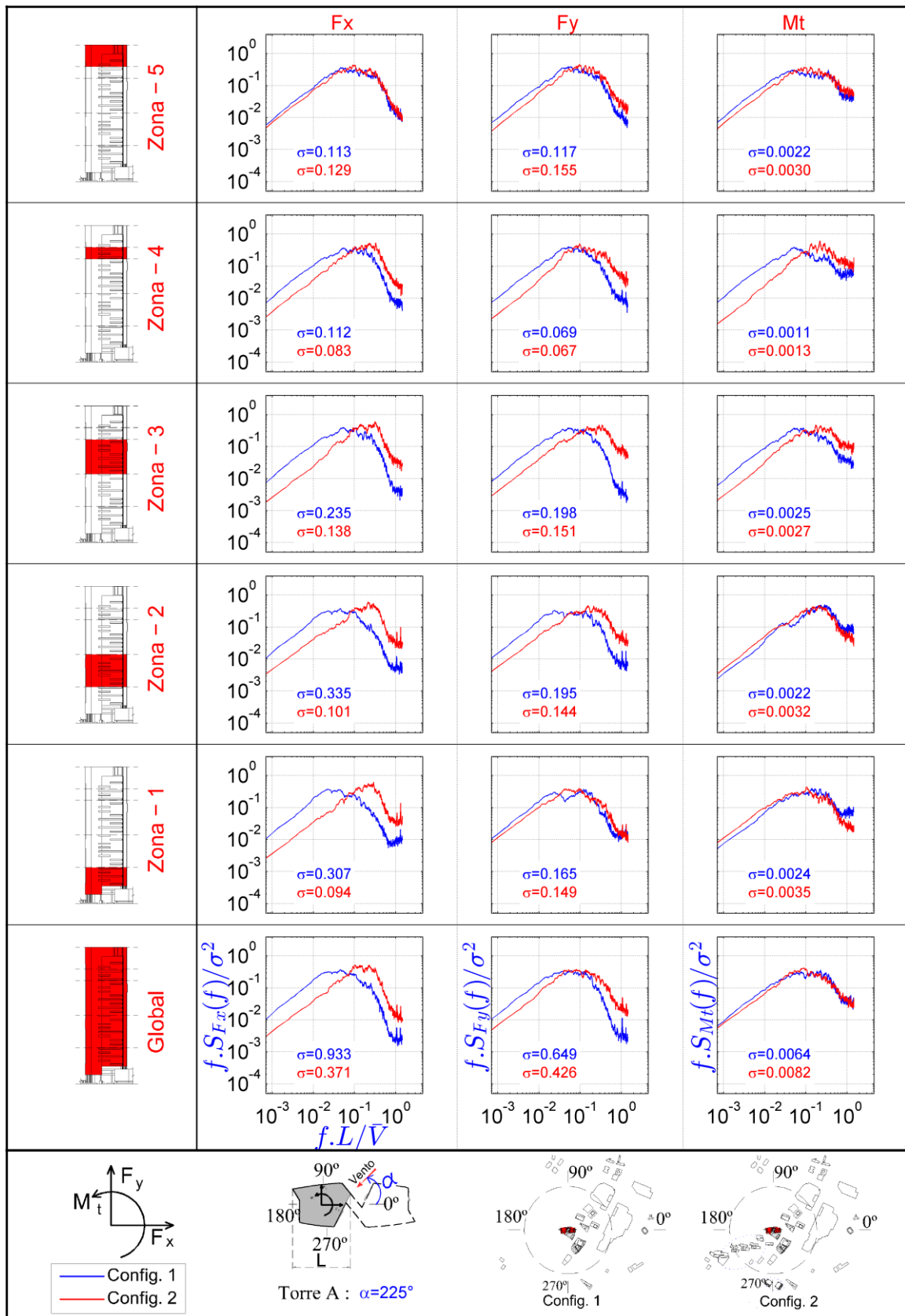
Quando o vento incide a 270° na torre B, diferentemente do que ocorre na torre A, não é percebido picos salientes nos espectros, que possuem um formato mais achatado em relação aos espectros da torre A nesta incidência.

4.2.1.2 Resultados por zonas

Na avaliação dos resultados por zona, foram selecionadas duas incidências do vento (225° e 270°) para as torres A e B.

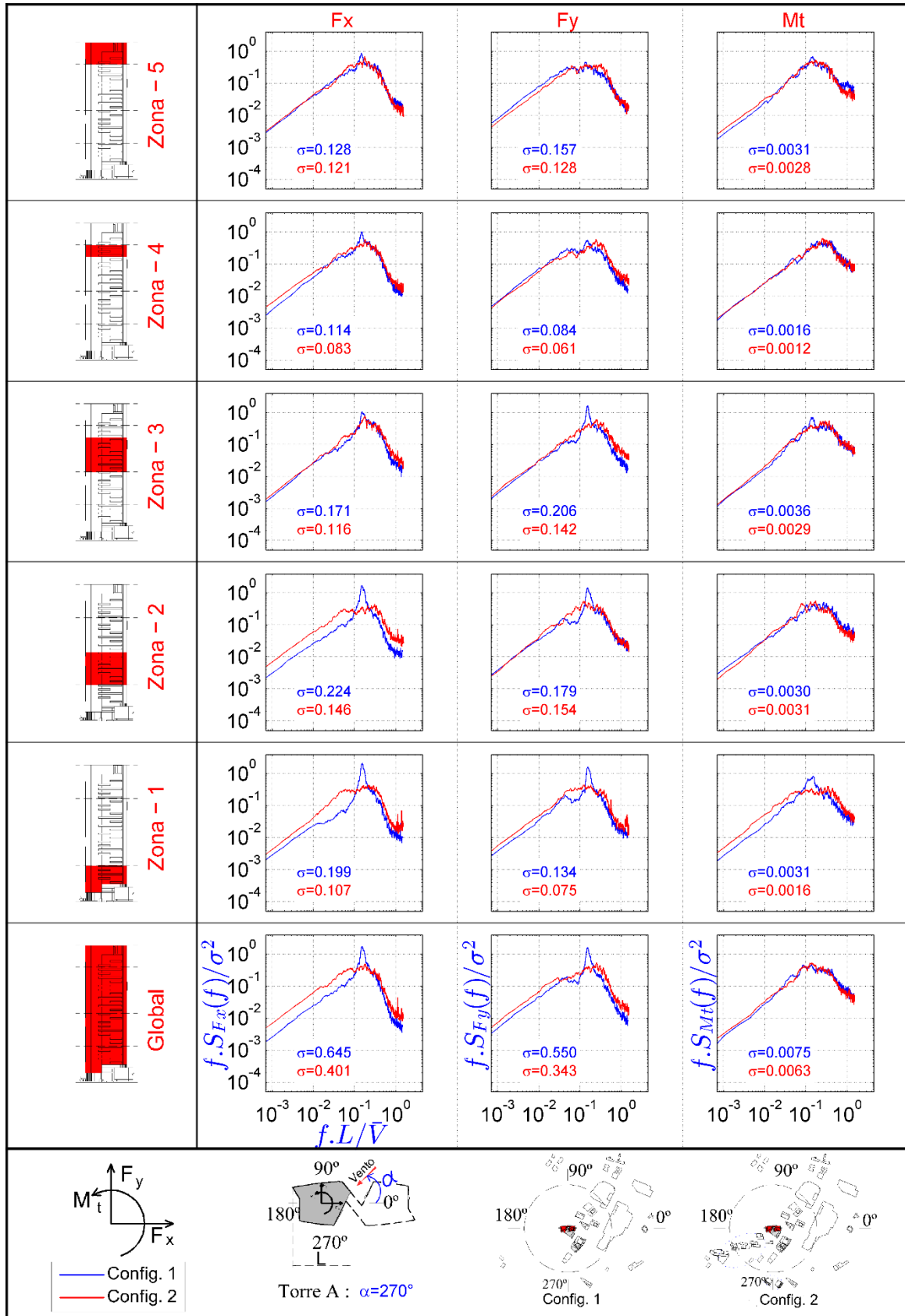
Os resultados obtidos para a torre A estão apresentados na Figura 4.10 e Figura 4.11 e na torre B expressos na Figura 4.12 e Figura 4.13, para as respectivas incidências.

Figura 4.10 – Densidades espectrais das forças e momento torçor por zona na torre A e vento incidindo a $\alpha=225^\circ$



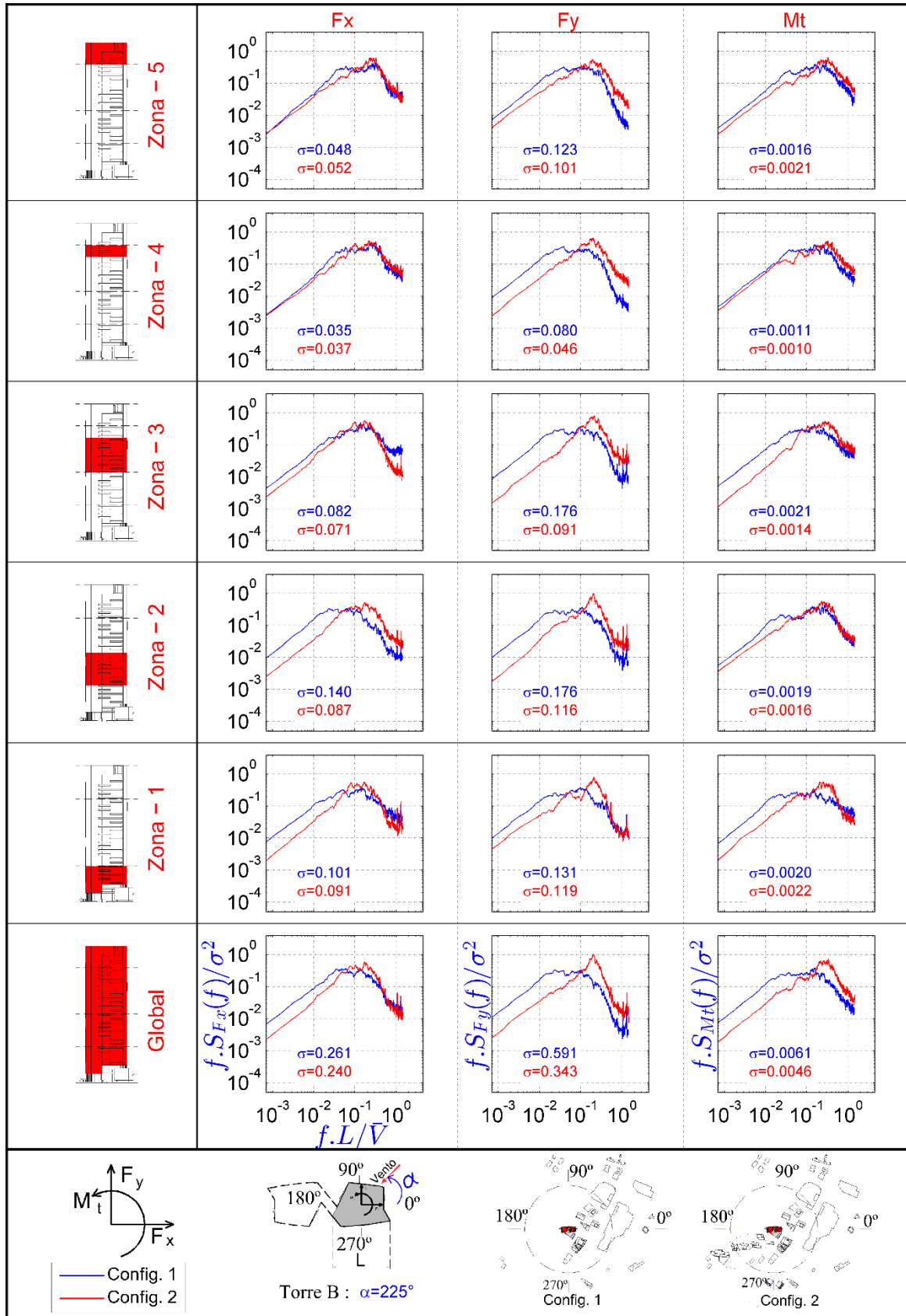
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.11 – Densidades espectrais das forças e momento torçor por zona na torre A e vento incidindo a $\alpha=270^\circ$



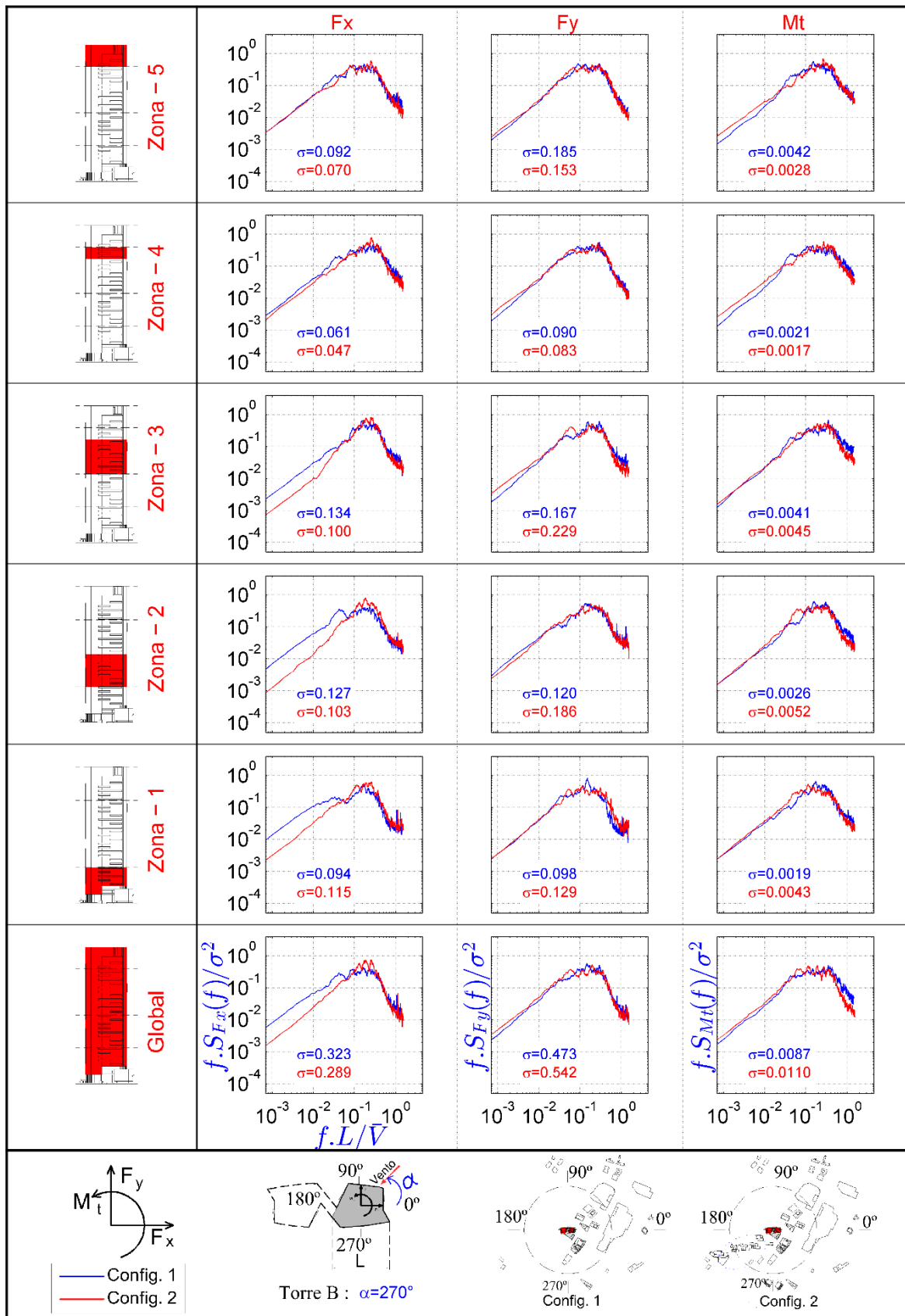
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.12 – Densidades espectrais das forças e momento torçor por zona na torre B e vento incidindo a $\alpha=225^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.13 – Densidades espectrais das forças e momento torçor por zona na torre B e vento incidindo a $\alpha=270^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

Com o vento incidindo a 225° na torre A, percebe-se que a zona 3 apresenta os espectros de força em x e y mais semelhantes ao espectro global nestas direções, porém, isto não ocorre para o momento torçor que é afetado globalmente por todas as zonas. Também se observa que na banda de frequência reduzida maior que 0,1, a energia contida nos espectros é maior para a configuração 2 em todas as faixas de altura, o que pode estar indicando a ocorrência do fenômeno de martelamento na estrutura como um todo, pois na região de barlavento é notável a maior densidade de edificações em relação a configuração 1.

Na torre A e com a incidência do vento a 270°, os picos observados no espectro global nas direções x e y, ocorrem também nas zonas localizadas em pequenas alturas da edificação. Nota-se que estes picos, a medida em que a altura aumenta, são amenizados, chegando a desaparecer em regiões mais próximas ao topo da edificação, o que é o caso do espectro da força em y na zona 5. Já na direção x, este pico não chega a desaparecer, porém é também amenizado. Essas características ocorrem na configuração 1 de ensaio e podem estar caracterizando o fenômeno de martelamento, ocorrendo apenas em algumas regiões da edificação. Na configuração 2, por possuir um escoamento mais turbulento devido a presença de edificações vizinhas, não possui nenhuma saliência considerável nos espectros, o que caracteriza este tipo de escoamento.

Na torre B e com a incidência do vento a 225°, nota-se um pico nos espectros de força em x e y e no espectro do momento torçor, na configuração 2. Este pico é evidenciado em todas as zonas, porém menos saliente nas zonas mais altas. Percebe-se que este pico não ocorre na configuração 1. Comparando-se as duas configurações, é observado a diferença de vizinhança localizada à barlavento nesta incidência, e, mesmo que a configuração 2 apresente valores *rms* menores em relação a configuração 1, os espectros apresentam valores mais elevados na faixa de frequência reduzida entre 0,1 e 1.

Adimensionalizando as 3 primeiras frequências naturais da estrutura e tomando os valores de $L=55,22$ m e $V=38$ m/s (velocidade básica na região em que está inserida a estrutura), teremos:

$$\frac{f_1 \times L}{\bar{V}} = \frac{0,2721 \times 55,22}{38} = 0,39$$

$$\frac{f_2 \times L}{\bar{V}} = \frac{0,3343 \times 55,22}{38} = 0,48$$

$$\frac{f_3 \times L}{\bar{V}} = \frac{0,5584 \times 55,22}{38} = 0,81$$

Percebemos que as 3 primeiras frequências naturais da estrutura se encontram na região de maior energia do espectro (entre as frequências reduzidas 0,1 e 1). Assim a Torre B pode estar sendo martelada, devido a presença das edificações à barlavento, e sofrendo grandes oscilações.

Observando as densidades espectrais, para incidência do vento a 270° agindo na torre B, não se percebe grandes alterações entre as configurações 1 e 2 e as funções de densidade espectral das forças e momento apresentam similaridade em todas as zonas da estrutura, ou seja, o aumento da densidade de edificações vizinhas não altera significativamente o escoamento no entorno da torre B nesta incidência. Os espectros não apresentam nenhuma característica marcante em que se possa determinar a ocorrência de algum fenômeno aerodinâmico.

4.2.1.3 Funções de admitância aerodinâmica para as torres A e B

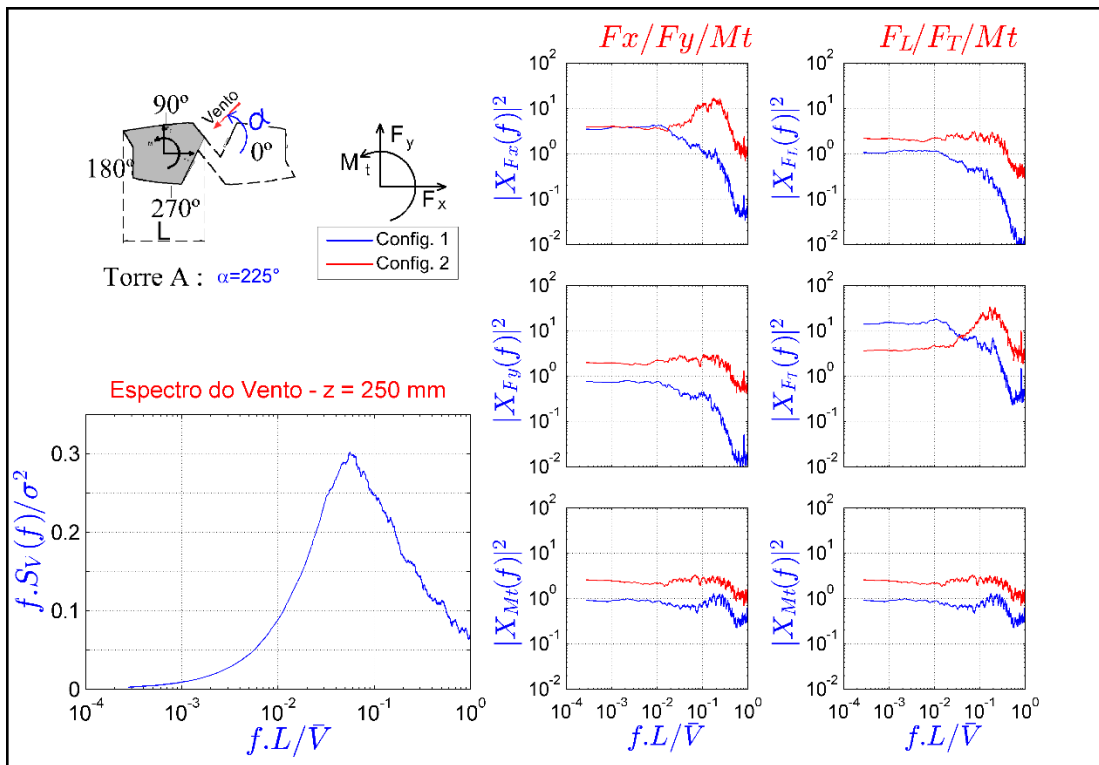
As funções de admitância aerodinâmica foram estimadas baseadas nas densidades espectrais de força e momento torçor e no espectro da velocidade do vento medido próxima ao topo do modelo (espectro correspondente à altura de 250 mm em relação ao piso do túnel). Estas funções foram estimadas para a estrutura como um todo (global).

As funções de admitância aerodinâmica para o vento incidindo a 225° e 270° nas torres A e B são apresentadas nas Figura 4.14 e Figura 4.15 para a torre A e Figura 4.16 e Figura 4.17 para a torre B.

Estas funções, dependentes da frequência, transformam a flutuação da velocidade do vento em flutuações de forças aerodinâmicas e incorporam as correlações entre as flutuações de pressão de barlavento e sotavento.

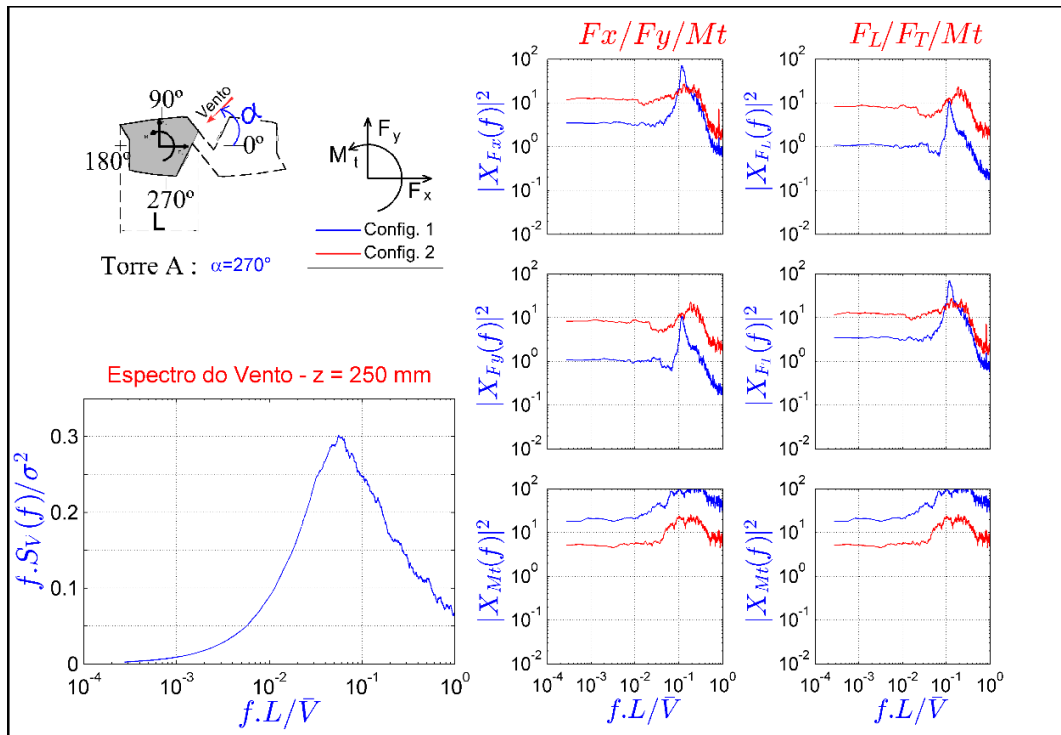
Realizou-se, para a análise das funções de admitância aerodinâmica, a plotagem das funções para o sentido longitudinal e transversal à incidência do vento e também para as direções x e y.

Figura 4.14 – Funções de admitância aerodinâmica para a torre A do vento incidindo a $\alpha=225^\circ$



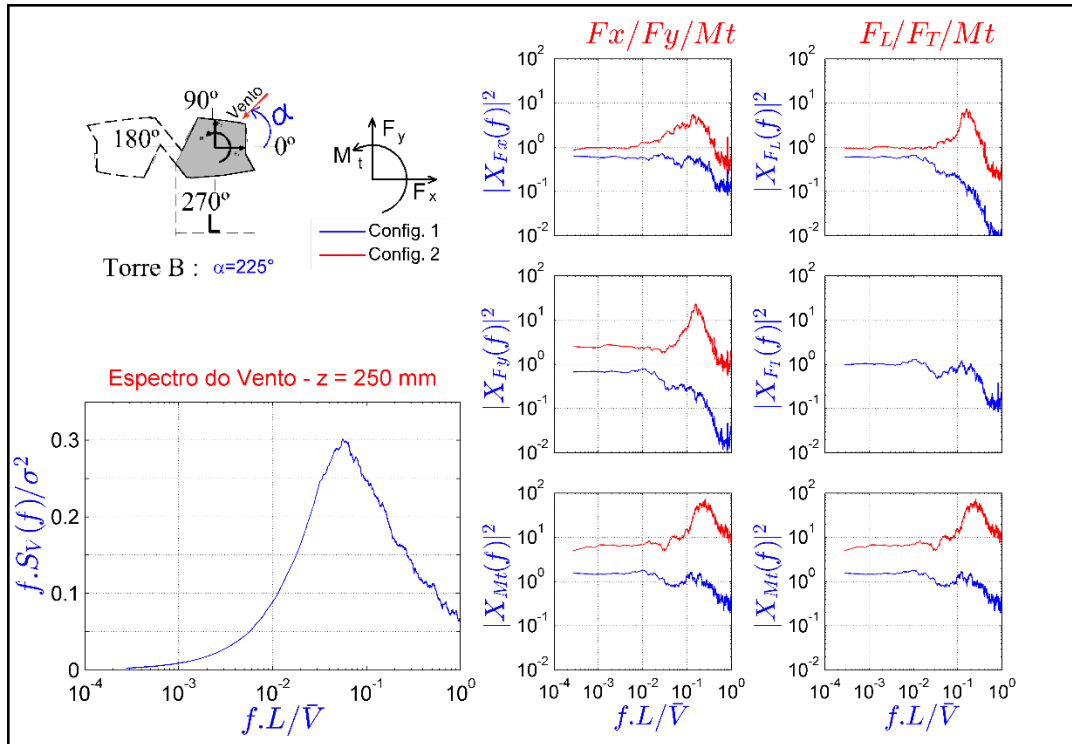
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.15 – Funções de admitância aerodinâmica para a torre A do vento incidindo a $\alpha=270^\circ$



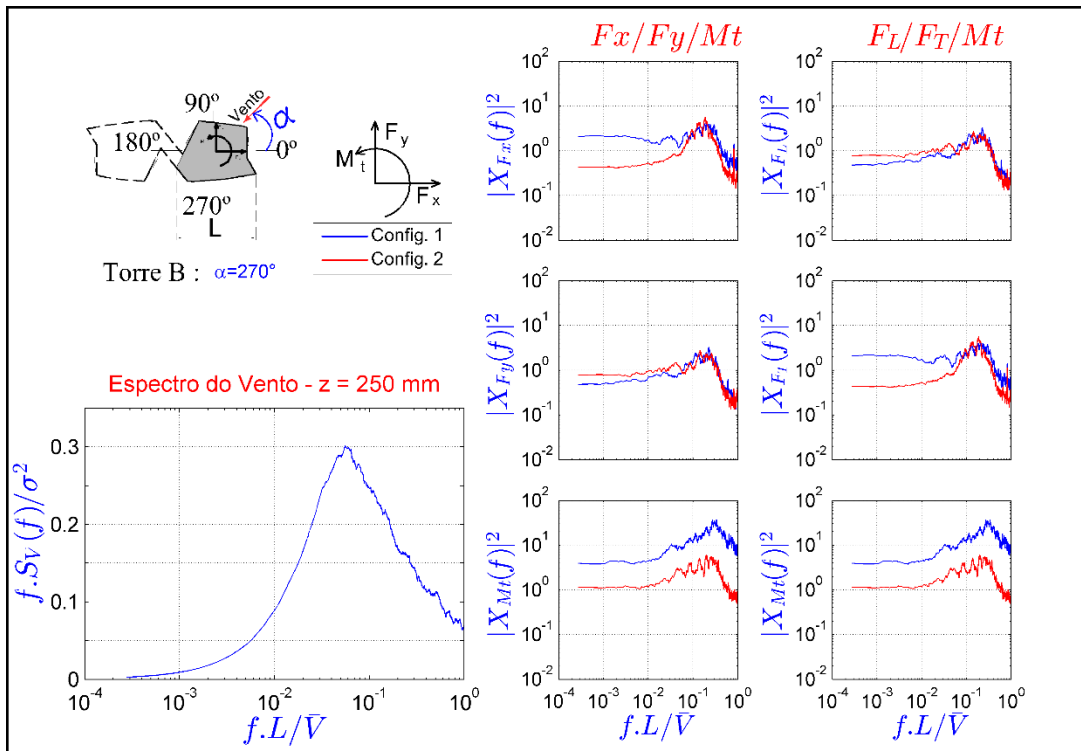
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.16 – Funções de admitância aerodinâmica para a torre B do vento incidindo a $\alpha=225^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.17 – Funções de admitância aerodinâmica para a torre B do vento incidindo a $\alpha=270^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

Verifica-se um comportamento complexo das funções de admitância aerodinâmica, para ambas as torres. Este comportamento ocorre devido as estruturas estarem inseridas em meio a edificações vizinhas que perturbam o escoamento e também devido a presença dos fenômenos aerodinâmicos que estão envolvidos, distorcendo as funções apresentadas das funções teóricas esperadas.

Blessmann (2005) destaca que a dedução da equação 2.16 é válida para uma estrutura pequena em relação às dimensões dos turbilhões incidentes, ou seja, quando a escala longitudinal da turbulência é muito maior que a dimensão característica da estrutura, a correlação das velocidades do vento incidente localiza-se próxima a unidade.

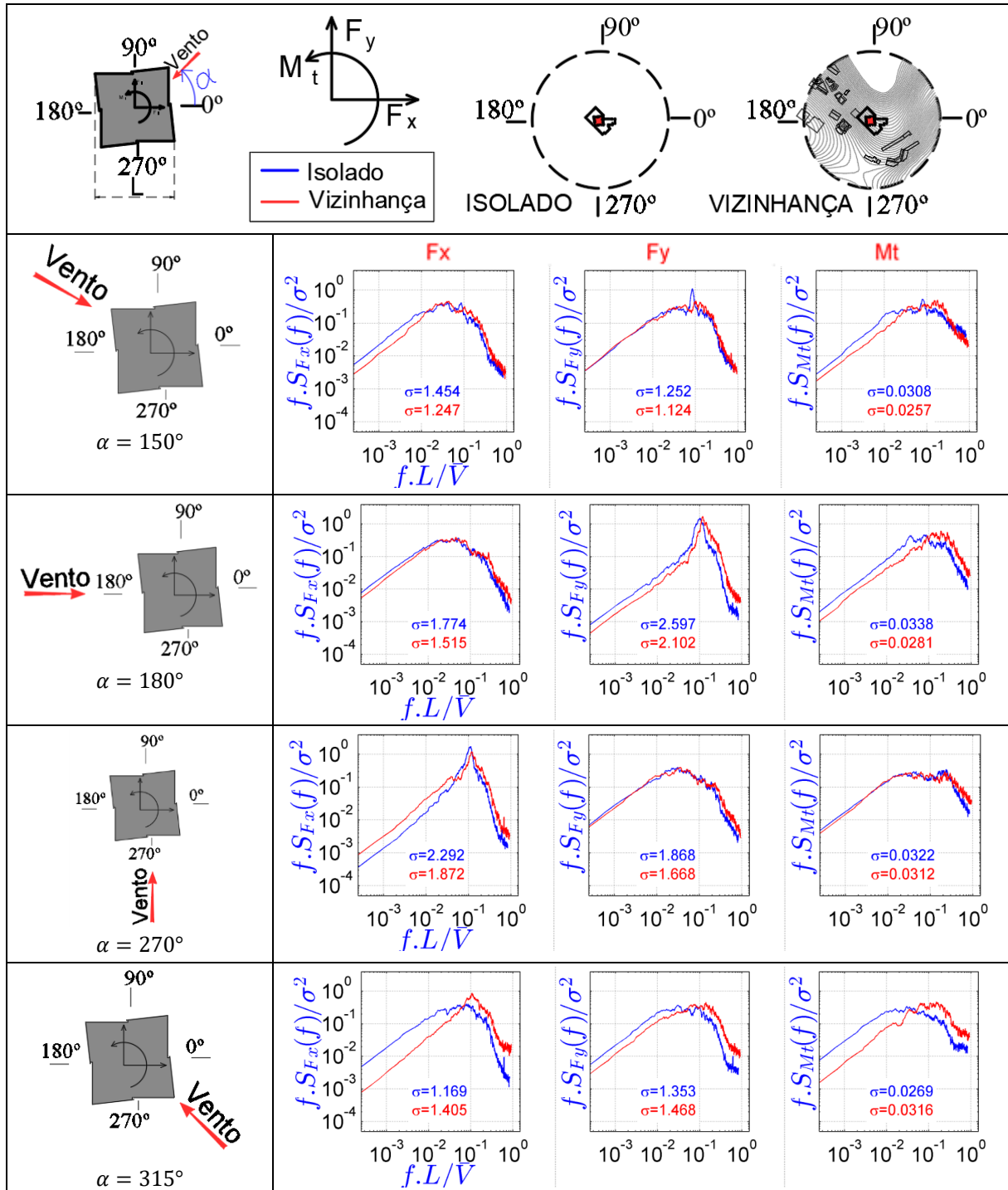
A função de admitância aerodinâmica é uma medida do efeito que a turbulência exerce sobre os coeficientes de arrasto da estrutura. Percebemos que ela apresenta um formato mais similar ao teórico quando avaliada em relação ao vento longitudinal, porém, ainda assim apresenta distorções. Com relação a componente transversal ao vento, em ventos estacionários e com geometria simétrica, a força média é zero e a equação 2.16 não é válida. As torres não são simétricas, porém as forças transversais tendem a um valor próximo a zero, invalidando o uso desta dedução para esta direção.

4.2.2 Empreendimento II

4.2.2.1 Resultados globais

No empreendimento II foram avaliadas as densidades espectrais para quatro incidências do vento (150° , 180° , 270° e 315°). Os espectros de força e momento torçor estão apresentados na Figura 4.18.

Figura 4.18 – Densidades espectrais de forças e momentos globais do empreendimento II



(fonte: elaborado pelo autor)

Percebe-se que na incidência do vento a 150° a função de densidade espectral da força em y apresenta um pico na configuração isolada e o mesmo não ocorre quando existe a presença de vizinhança, isto pode estar ocorrendo, pois, a rugosidade e elevação do terreno altera o escoamento, tornando mais turbulento em relação a configuração isolada. O espectro de

pressões em escoamento turbulento possui uma forma mais achatada, diferentemente com o que ocorre em escoamento suave, que possui um pico saliente. Analisando a Figura 2.11 deste trabalho, podemos verificar graficamente este comportamento.

Nas incidências do vento a 180° e 270° percebemos uma semelhança no comportamento das funções espectrais das forças e momentos. Particularmente, as direções x e y coincidem com os espectros de forças no sentido longitudinal e transversal ao vento ($\alpha=180^\circ$ - F_x =Longitudinal e F_y = Transversal e $\alpha=270^\circ$ - F_x = Transversal e F_y = Longitudinal). Percebemos o aparecimento de um pico nos espectros das forças transversais, em ambas as direções do vento. Este pico na densidade espectral é característico do fenômeno de desprendimento cadenciado de vórtices. Verificamos a ocorrência deste fenômeno em ambos os casos de ensaio, isolado e com vizinhança. Os valores das frequências reduzidas, as quais se encontram os picos do espectro, estão indicados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Frequências reduzidas de pico no espectro de forças da direção transversal

Direção transversal		
Incidência	Configuração	$f \cdot L/\bar{V}$
180°	Isolado	0,1023
	Vizinhança	0,1188
270°	Isolado	0,1134
	Vizinhança	0,1203

(fonte: elaborado pelo autor)

A frequência natural desta estrutura não foi fornecida, mas pode ser estimada através da equação 4.8 indicada por Cachuçó (2014), que estima a primeira frequência natural (sem um modo de torção predominante) para estruturas correntes na engenharia brasileira.

$$f_n = \frac{25}{H} = \frac{25}{170,99} = 0,146 \text{ Hz} \quad \text{equação 4.8}$$

Podemos então calcular as velocidades de desprendimento de vórtices para cada frequência reduzida, tomando $L = 35,82 \text{ m}$ e $f = 0,146 \text{ Hz}$, e substituindo na equação 2.15, obtemos os resultados apresentados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Velocidade crítica de desprendimento de vórtices - $\alpha=180^\circ$ e $\alpha=270^\circ$

Direção transversal		
Incidência	Configuração	Velocidade crítica
180°	Isolado	51,2 m/s
	Vizinhança	44,1 m/s
270°	Isolado	46,2 m/s
	Vizinhança	43,5 m/s

(fonte: elaborado pelo autor)

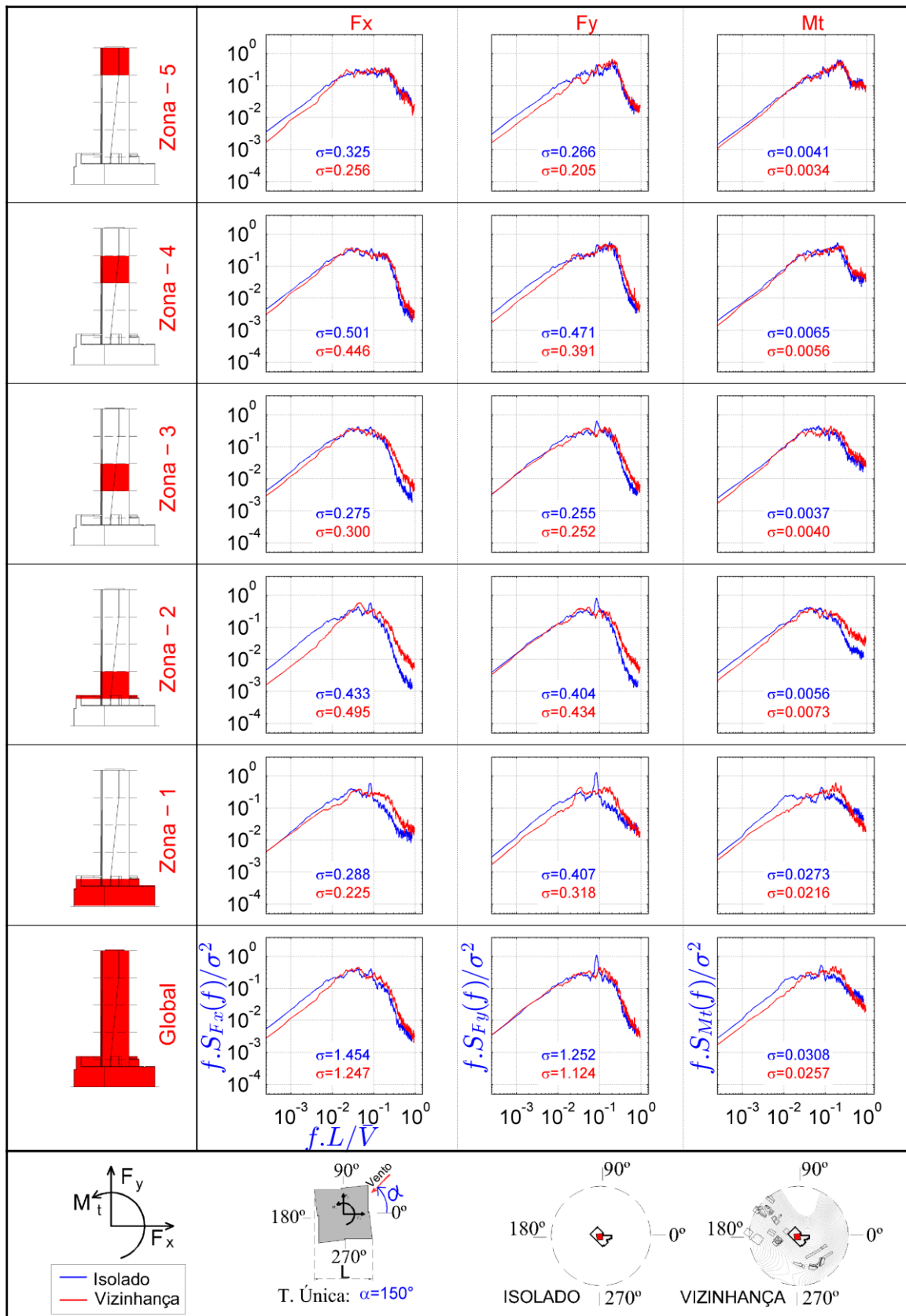
Caso a velocidade do vento atinja os valores apresentados no Quadro 4.2 (e a frequência natural da estrutura for próxima à estimada), o fenômeno de desprendimento de vórtices poderá acarretar oscilações elevadas na estrutura.

Na incidência do vento a 315° são observados, na presença de vizinhança, valores mais elevados no espectro das forças na faixa de frequências reduzidas entre 0,1 e 1, em comparação com situação da estrutura isolada. A energia contida nesta faixa de frequências pode estar sendo originada na esteira das edificações a barlavento da estrutura e ocasionando o fenômeno de martelamento.

4.2.2.2 Resultados por zonas

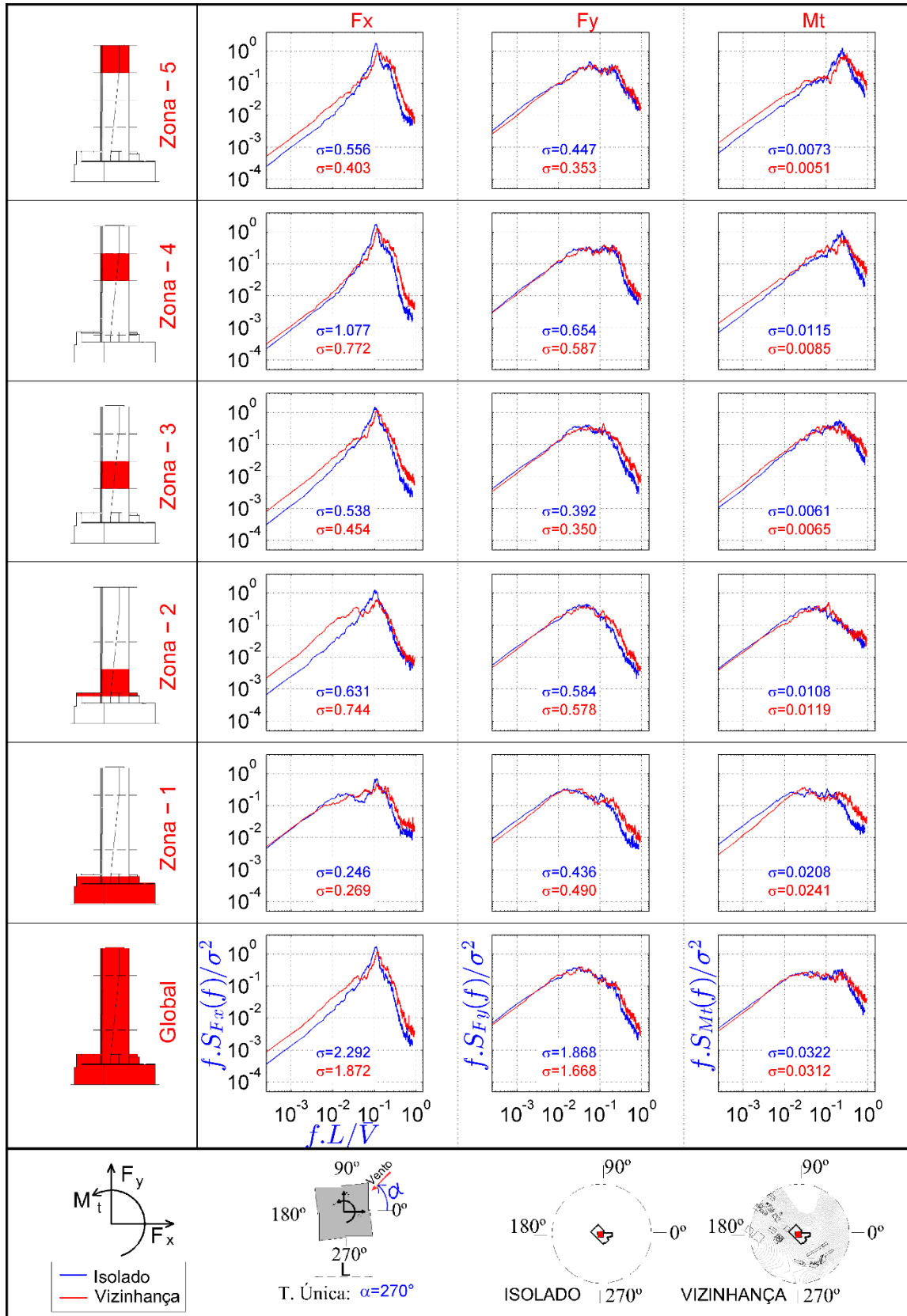
Na avaliação dos resultados por zona, foram selecionadas duas incidências do vento (150° e 270°) para o empreendimento II. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.19 e Figura 4.20, para as respectivas incidências.

Figura 4.19 – Densidades espectrais das forças e momento torçor por zona no empreendimento II e vento incidindo a $\alpha=150^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.20 – Densidades espectrais das forças e momento torçor por zona no empreendimento II e vento incidindo a $\alpha=270^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

De acordo com a Figura 4.19, nota-se na zona 2, para a incidência de 150° , que a energia contida no espectro de forças e de momento torçor é maior no caso com vizinhança na faixa de frequências reduzidas entre 0,1 e 1. Porém isto não representa de forma significativa o espectro global, o qual é mais representativo pelas zonas 3, 4 e 5. Exceção ocorre para o espectro da força global na direção y, em que, na situação da torre isolada, salienta-se um pico no espectro global, o qual é caracterizado nas zonas mais baixas da edificação (zonas 1, 2 e 3). Este pico pode estar indicando o fenômeno de desprendimento de vórtices nestas regiões. Nota-se que este fenômeno surge apenas na situação da torre isolada, na qual o escoamento é menos turbulento. Quando a estrutura está inserida em meio a vizinhança, o escoamento torna-se mais turbulento e este efeito é descaracterizado.

Na Figura 4.20, para a incidência de 270° , verifica-se notoriamente a ocorrência do fenômeno de desprendimento de vórtices, apresentado na direção x, que coincide com o espectro de forças transversais. Nota-se que o fenômeno é característico em todas as zonas da estrutura, sendo que, quanto mais alta a região, mais acentuado é o pico no espectro. Esta característica pode ser observada também no estudo do modelo 3 realizado por Lin, *et al.* (2005) indicado no Quadro 2.2, no capítulo 2 deste trabalho.

Verifica-se grande semelhança entre os resultados obtidos por Lin, *et al.* (2005) e os obtidos no presente trabalho. Salienta-se que o pico ocorre próximo a frequência reduzida de 0,1 em ambos os estudos. Os espectros de força longitudinal (coincidente com a direção y) e momento torçor também apresentam semelhanças.

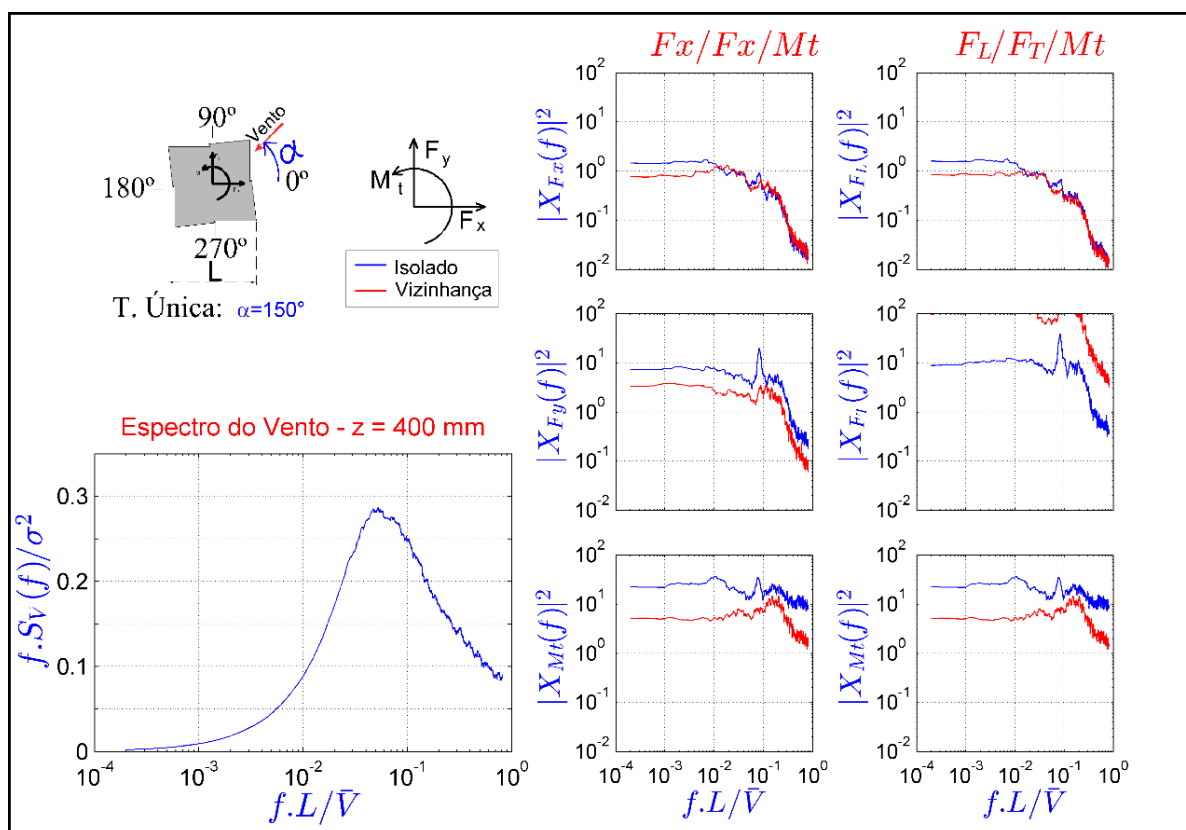
Nota-se que o fenômeno de desprendimento de vórtices ocorre tanto na situação da torre isolada quanto na presença de vizinhança, ou seja, o aumento da turbulência devido a presença de edificações vizinhas, não é capaz de cortar o efeito nesta incidência.

4.2.2.3 Funções de admitância aerodinâmica para o empreendimento II

As funções de admitância aerodinâmica, da mesma maneira que no empreendimento I, foram estimadas baseadas nas densidades espectrais de força e momento torçor e no espectro da velocidade do vento medido próxima ao topo do modelo (espectro correspondente a altura de 400 mm em relação ao piso do túnel). Estas funções foram estimadas para a estrutura como um todo (global).

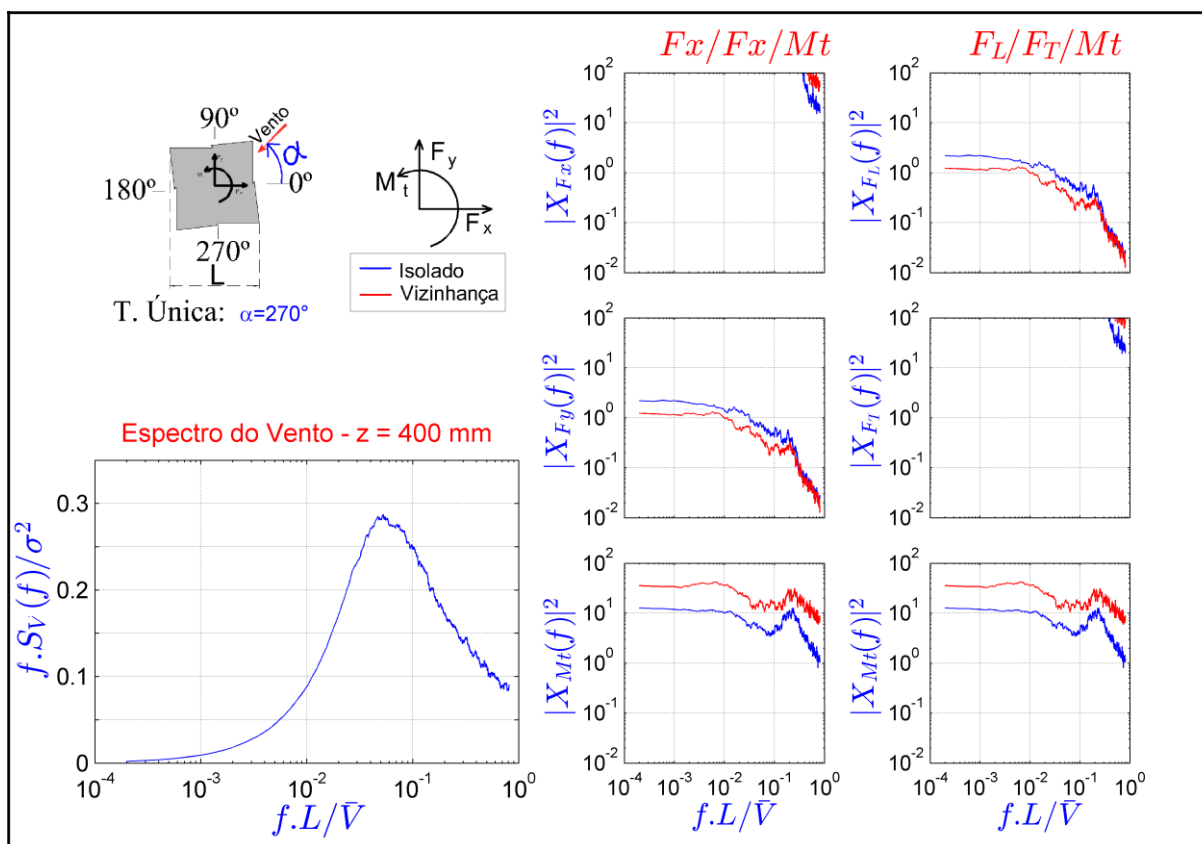
As funções de admitância aerodinâmica para o vento incidindo a 150° e 270° na torre do empreendimento II estão apresentadas, respectivamente, na Figura 4.21 e Figura 4.22.

Figura 4.21 – Funções de admitância aerodinâmica da torre do empreendimento II com vento incidindo a $\alpha=150^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 4.22 – Funções de admitância aerodinâmica da torre do empreendimento II com vento incidindo a $\alpha=270^\circ$



(fonte: elaborado pelo autor)

Por possuir uma geometria menos complexa em relação ao empreendimento I, é possível verificar um comportamento mais próximo ao teórico para as funções de transferência aerodinâmica na direção longitudinal ao vento.

Este comportamento é observado tanto para a incidência à 150° bem como para 270° . Verifica-se que, para baixas frequências, o valor da função é próximo de 1 e em frequências mais elevadas a função apresenta um decaimento.

De maneira análoga ao apresentado para o empreendimento I, as funções de admitância aerodinâmica possuem um comportamento complexo para a direção transversal e para o momento torçor. Estas funções encontram-se, na maioria das vezes, fora dos limites do gráfico, constatando valores médios para a força próximo a zero, invalidando o uso da equação 2.16.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho analisou-se dois empreendimentos da base de dados do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da UFRGS. Caracterizou-se os mesmos aerodinamicamente através das funções de densidade espectral das cargas, sendo também apresentadas as funções de admitância aerodinâmica para os dois empreendimentos.

Percebe-se a variabilidade dos espectros em relação ao ângulo de incidência do vento e à forma geométrica da estrutura. Com relação ao empreendimento I, o qual estava inserido, em ambas as configurações de ensaio, em meio a edificações vizinhas, os espectros de força apresentaram formatos distintos em cada ângulo de incidência, dificultando a determinação de uma tendência específica. Em certas incidências foi possível verificar ou sugerir o aparecimento do fenômeno de desprendimento de vórtices e martelamento. Esta dificuldade também se deve ao fato do empreendimento possuir duas torres com arquitetura complexa, sendo que as mesmas estão ligadas por passarelas em diferentes alturas, o que contribui para a alteração e complexidade do escoamento no entorno destas edificações.

Já no empreendimento II, o qual foi ensaiado isoladamente e em meio a vizinhança e por ser arquitetonicamente menos complexo, notou-se um comportamento mais bem definido dos espectros, possibilitando a comparação com trabalhos realizados anteriormente. Esta comparação foi possível pois a estrutura possui uma seção transversal próxima a um quadrado, equivalente ao apresentado por outros autores em suas pesquisas. Verificou-se a semelhança do formato do espectro no sentido longitudinal e transversal ao vento, o qual foi possível destacar a ocorrência do fenômeno de desprendimento cadenciado de vórtices, não só na situação da torre isolada, mas também em meio a edificações vizinhas.

Verificou-se a variabilidade das funções de admitância aerodinâmica e a dificuldade de obter um comportamento ou uma padronização para estas funções, pois as mesmas são afetadas por diversos fatores, tais como, o coeficiente de arrasto, a turbulência do escoamento, a geometria da edificação e a velocidade do vento incidente, o que a torna única para cada edificação. A função de transferência aerodinâmica faz a ligação entre as flutuações da velocidade do vento e os carregamentos por ele originados em uma determinada estrutura.

As variabilidades que afetam o carregamento devido à ação do vento nas estruturas são dependentes de diversos fatores (tipo terreno, a vizinhança, a arquitetura da edificação, o relevo, etc.) dificultando muito a avaliação. Salienta-se, portanto, a importância da análise através dos ensaios em túnel de vento, onde os fenômenos podem ser quantificados e representados com maior precisão e confiabilidade.

Cálculos realizados através de espectros teóricos podem ser utilizados, porém o projetista deve estar ciente de que os resultados serão uma aproximação da realidade. Eles devem ser utilizados para obter uma ordem de grandeza de esforços e solicitações, mas nenhum resultado é mais confiável do que os obtidos através de ensaios em túnel.

Destaca-se ainda, que a análise espectral pode ser utilizada para verificação de dados oriundos dos ensaios no túnel de vento. Analisando os resultados obtidos para a incidência do vento à 30° no empreendimento I, apresentadas no apêndice A, verifica-se distorções muito salientes nos espectros de força. Estas distorções refletem erros de medição constatados em algumas tomadas do modelo reduzido.

5.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Sugere-se para os trabalhos futuros que mais torres sejam avaliadas, com diferentes rugosidades de terreno e outras formas geométricas, elaborando um banco de dados mais consistente, o qual pode vir a contribuir para futuras revisões de códigos normativos.

REFERÊNCIAS

- ALGABA, F. G. **Avaliação de métodos teóricos para estimativa do comportamento de edifícios altos sob a ação do vento turbulento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro. 1988.
- BALENDRA, T. **Vibration on buildings to wind and earthquake loads**. Londres: Springer-Verlag London. 1993.
- BLESSMANN, J. **Acidentes causados pelo vento**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001.
- BLESSMANN, J. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.
- BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das construções**. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2011.
- BLESSMANN, J. **O vento na engenharia estrutural**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2013.
- BRONKHORST, A. J.; GEURTS, C. P. W.; VAN BENTUM, C. A.; BLOCKEN, B. 6th European & African Conference on Wind Engineering. **Spectral analysis of pressures measured on two high-rise building models in side-by-side arrangement**, Cambridge, 7-11 Julho 2013.
- CACHUÇO, F. B. **Estudo da incerteza em estimativas de frequências naturais de vibração livre de edifícios altos em concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre. 2014.
- CAMARINHA, R. M. D. M.; CRUZ, J. S. N. D. **Ação Longitudinal do Vento em Edifícios Altos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), IST. Lisboa. 2011.
- CARINI, M. R. **Resposta dinâmica em torção de edifícios sob ação do vento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre. 2017.
- HOLMES, J. D. **Wind Loading of Structures**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- LAC. **Base de dados - Torres analisadas**. Porto Alegre: dados e desenhos, 2017.
- LIN, N.; LETCHFORD, C.; TAMURA, Y.; LIANG, B.; NAKAMURA, O. Characteristics of wind forces acting on tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v.93, 2005. p. 217-242.

LOREDO-SOUZA, M.; ROCHA, M.; OLIVEIRA, M. G. K. **Relatório Técnico**. Porto Alegre: LAC. 2012.

LOREDO-SOUZA, M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. In: MÖLLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. **Turbulência**. Porto Alegre: Comissão organizadora e editorial da ETT, v. 4, 2004. p. 137-163.

MARTINS, M. L.; MAGALHÃES JÚNIOR, P. A. A.; DA SILVA, G. C.; ALMEIDA, V. C.; MARTINS, N.; MACIEL, D. D. C.; CAMPOS, T. R. Estudo da aplicação da FFT (Fast Fourier Transform) em análise da condição de máquinas rotativas. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia - CILAMCE 2016**, Brasília, novembro 2016.

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

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

OLIVEIRA, M. G. K. **Desenvolvimento de uma balança dinâmica de três graus de liberdade para estudo dos efeitos de flexo-torção em edifícios altos submetidos à ação do vento**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre. 2009.

ROBERTELLA, L. A. **The Last Building at Packerton Yards**, 2016. Disponível em: <<http://lousweb.com/Packerton%20Building/INTRODUCTION.html>>. Acesso em: 12 dezembro 2017.

ROCHA, M. M. **SpectralDensity.m**. Script Matlab. Porto Alegre. 2000.

ROCHA, M. M. **SqrWindow.m**. Script Matlab. Porto Alegre. 2006.

RUSCHEWEYH, H. Vortex Excited Vibrations. **Wind-Excited Vibrations of Structures**, Viena, n. 335, p. 51-84, 1994.

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

SERC. **Science Education Resource Center College**, 2017. Disponível em: <http://serc.carleton.edu/images/eslabs/hurricanes/3d_hadley_md.v3.jpg>. Acesso em: 04 novembro 2017.

SIMIU, E.; SCANLAN, R. H. **Wind effects on structures: fundamentals and applications to design**. New York: Wiley Interscience, v. 1, 1996.

SOCKEL, H. Fundamentals of Wind Engineering. **Wind-Excited Vibrations of Structures**, Viena, n. 335, p. 85-160, 1994.

SOM. **Burj Khalifa / SOM**, 2017. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/882100/burj-khalifa-som/>>. Acesso em: 8 dezembro 2017.

SWANSON, A. The Washington Post. **The tallest buildings in the world for any year in history**, 2015. Disponível em: <https://www.washingtonpost.com/news/wonk/wp/2015/03/11/charted-the-tallest-buildings-in-the-world-for-any-year-in-history/?utm_term=.5fdbf3cc0a84>. Acesso em: 8 dezembro 2017.

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

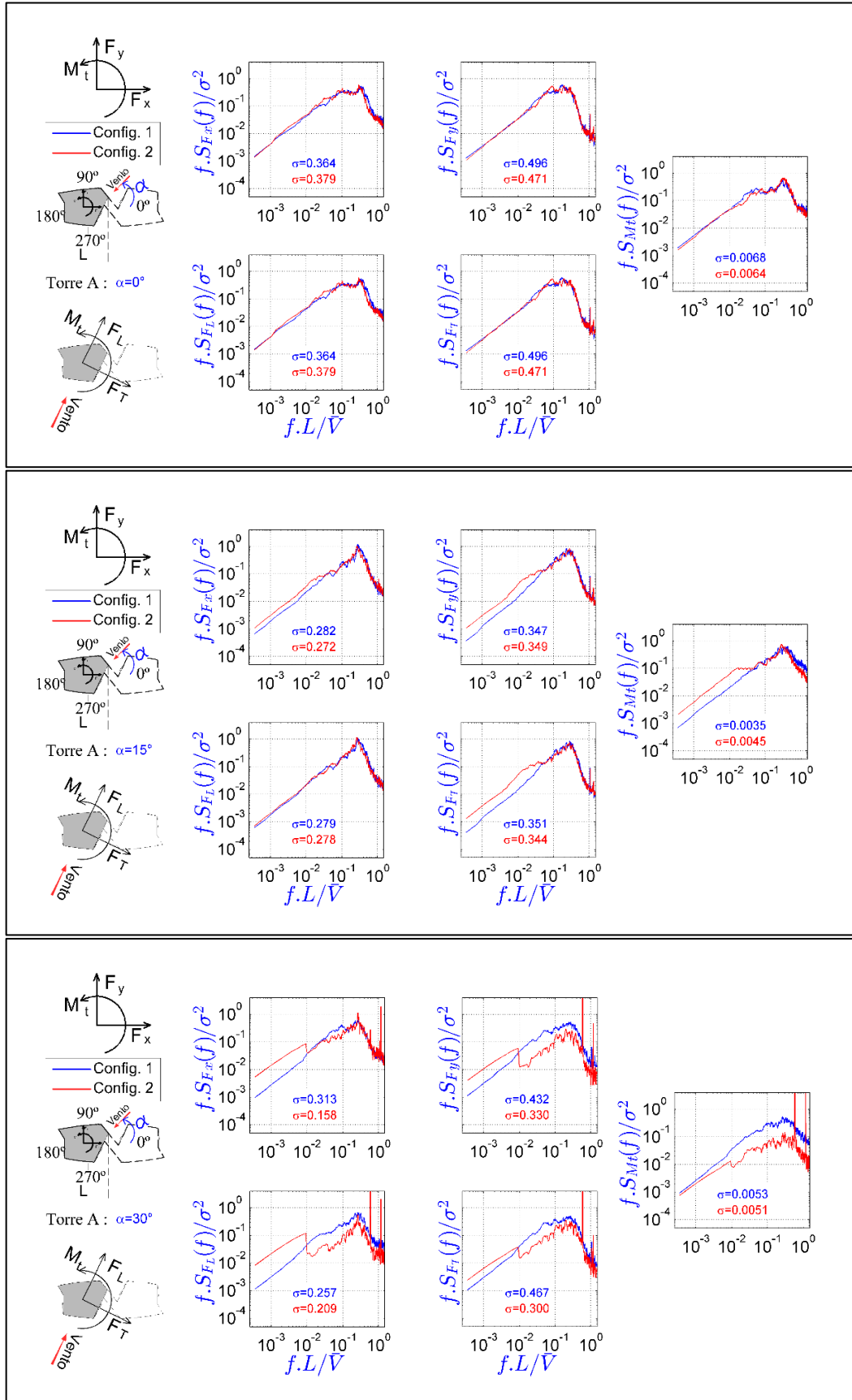
WITTEWER, A. R. **Simulação do vento atmosférico e dos processos de dispersão de poluentes em túnel de vento**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre. 2006.

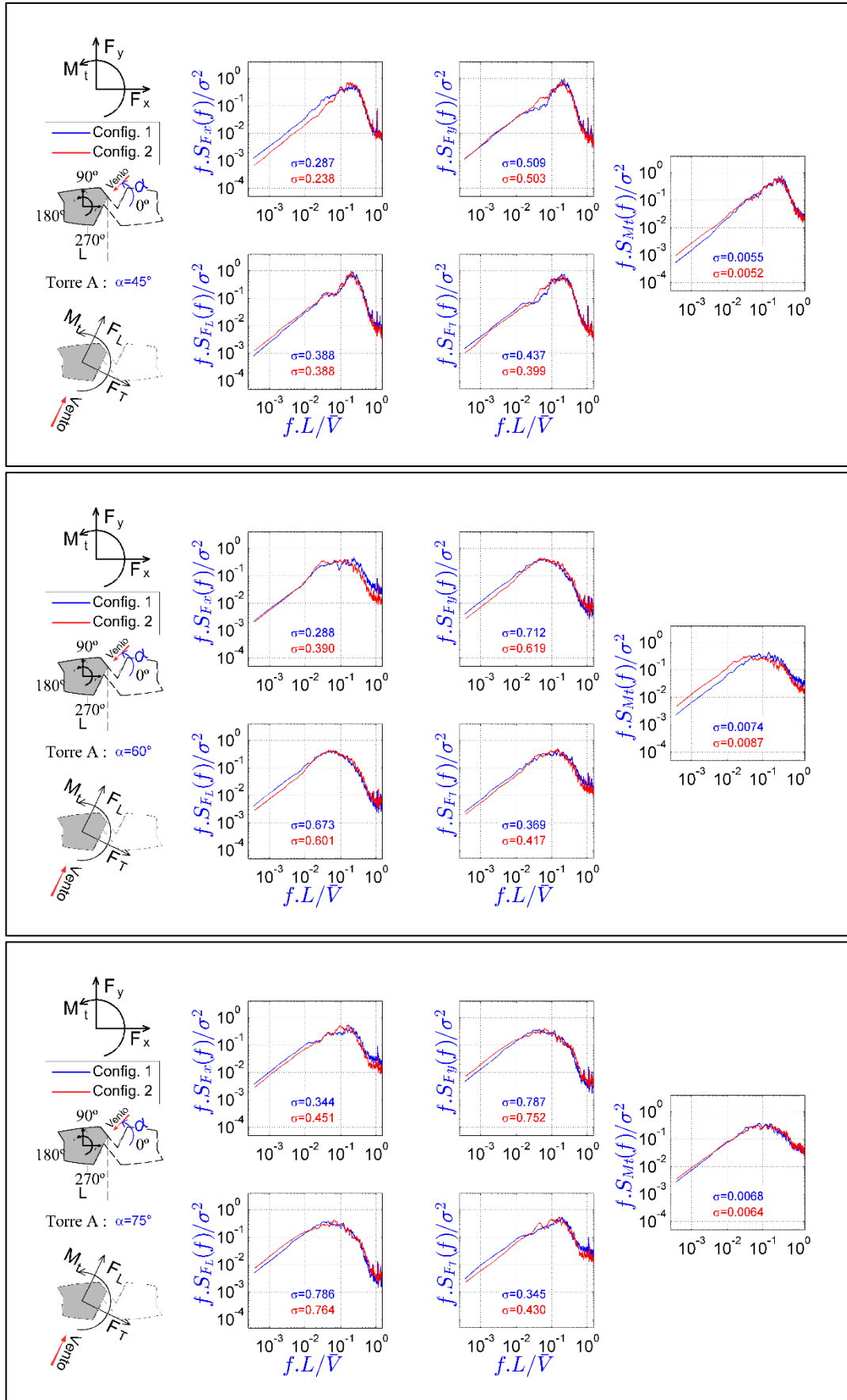
WOOTTON, L. R.; SCRUTON, C. Aerodynamic stability. **The modern design of wind-sensitive structures**, Londres, 18 Junho 1970. 65-81.

ZHOU, Y.; KIJEWski, T.; KAREEM, A. Aerodynamic loads on tall buildings: interactive database. **Journal of Structural Engineering**, 2003. p.394-404.

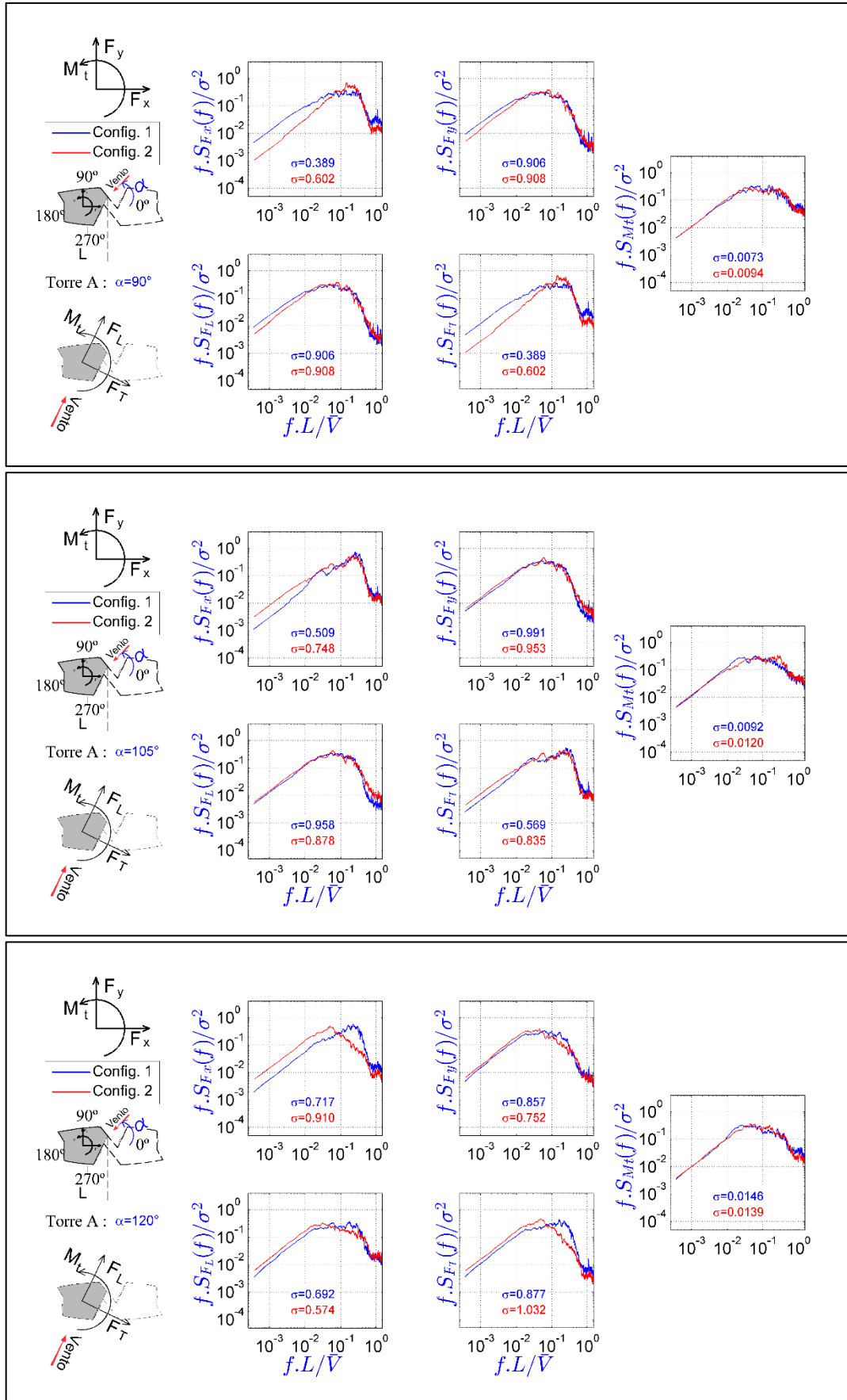
APÊNDICE A – Espectros de força – Empreendimento I

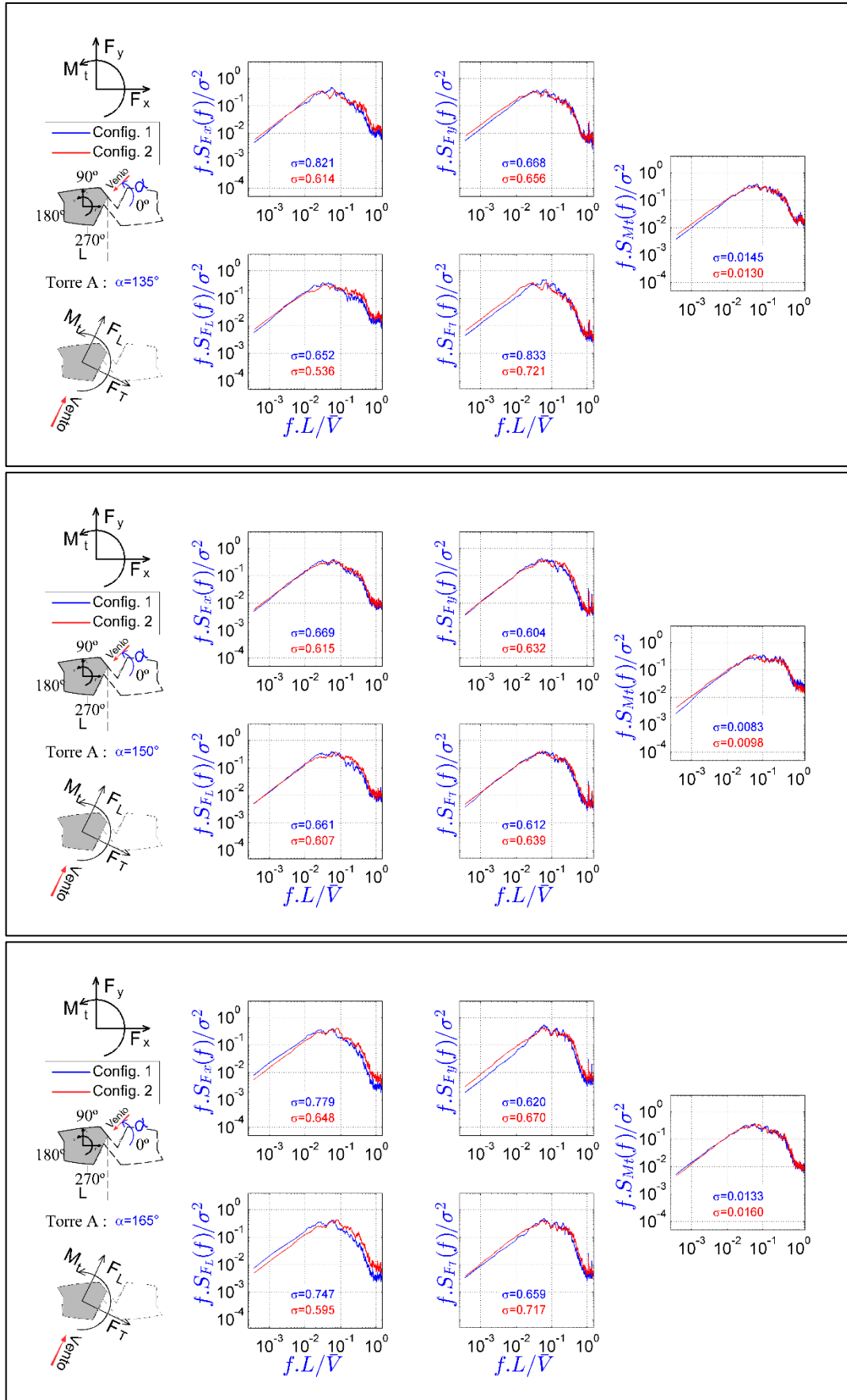
Espectros de força nas direções x e y, nas direções longitudinal e transversal a incidência do vento e momento torçor para o empreendimento I, torre A e incidências de 0° a 345°



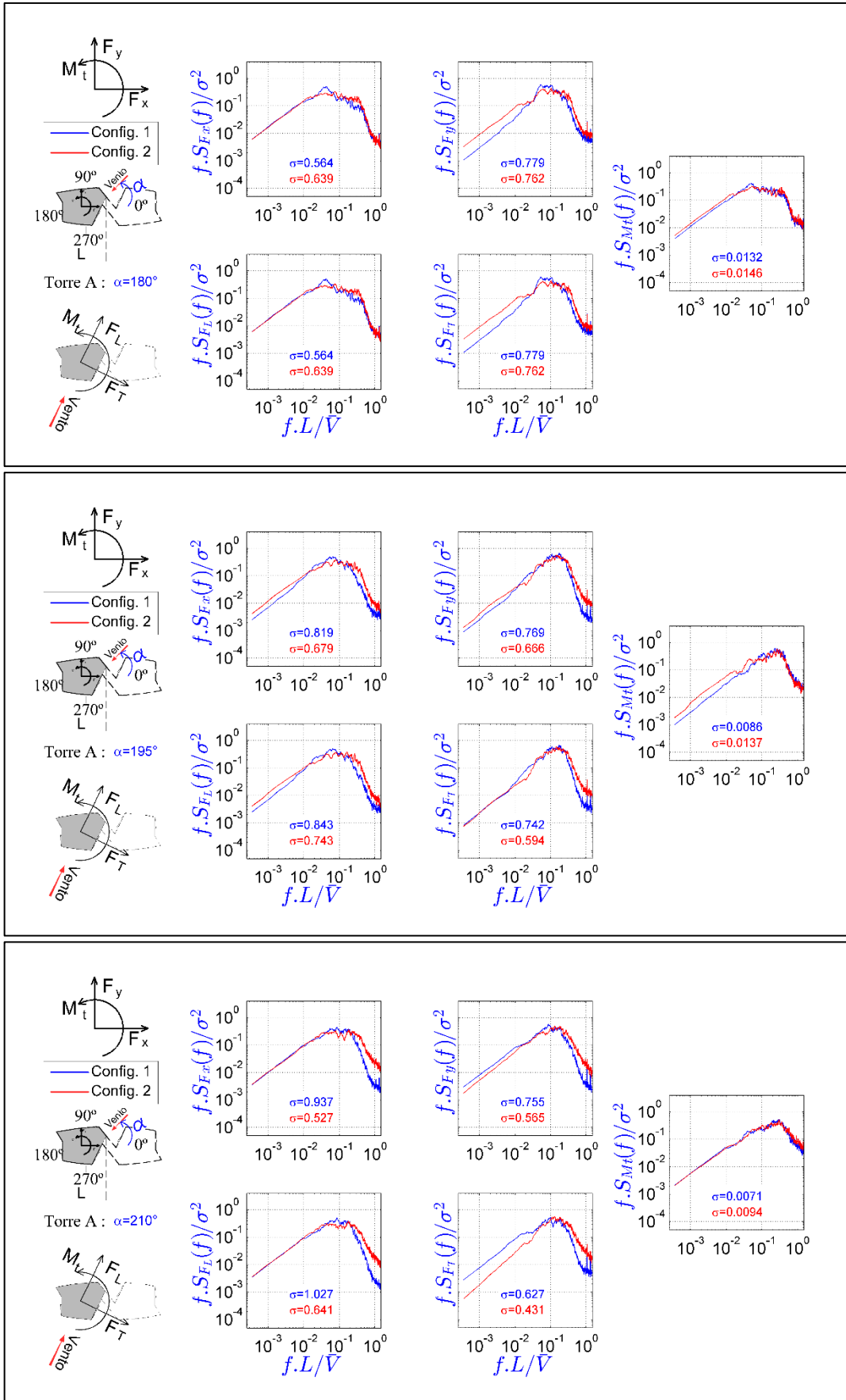


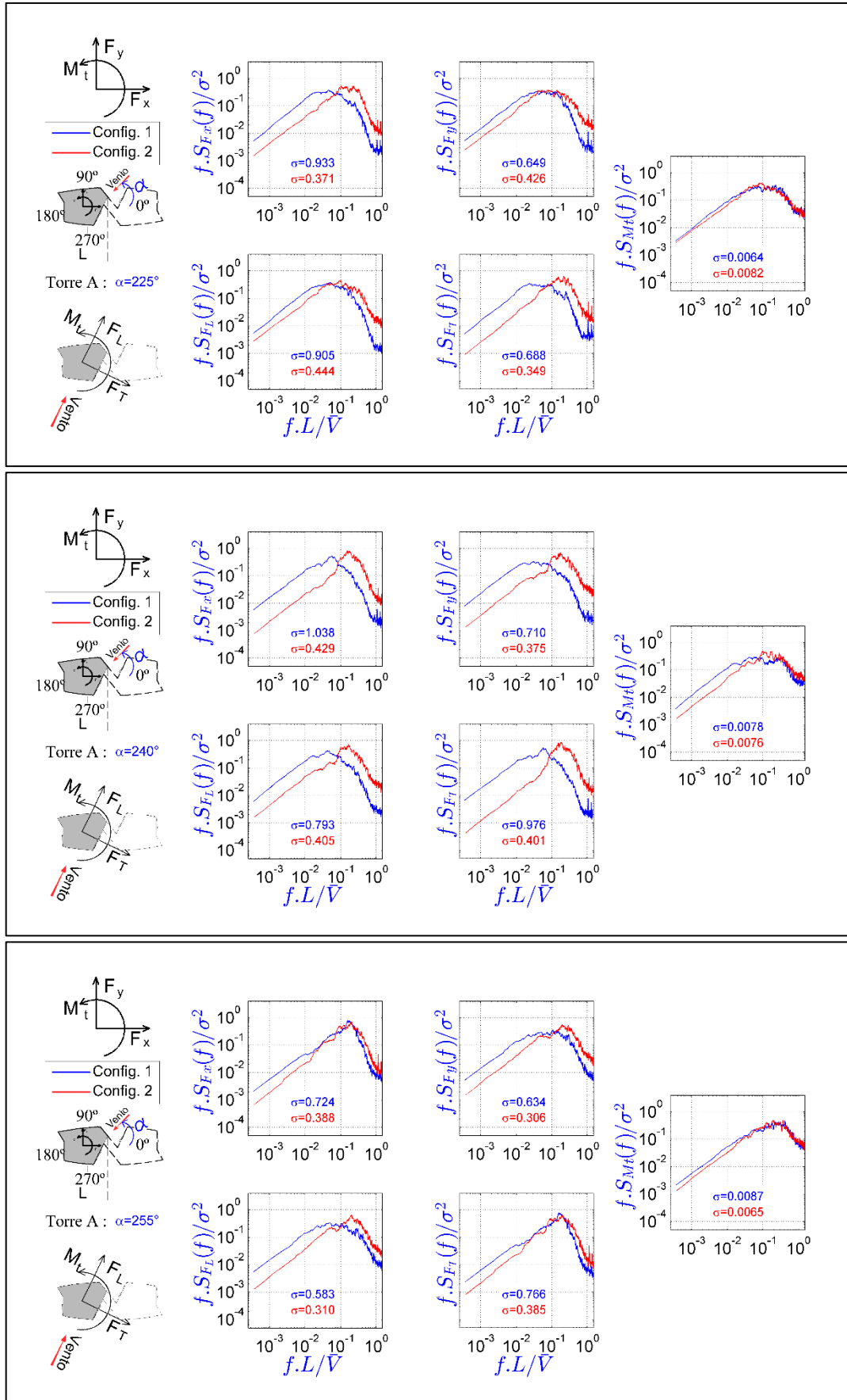
Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento



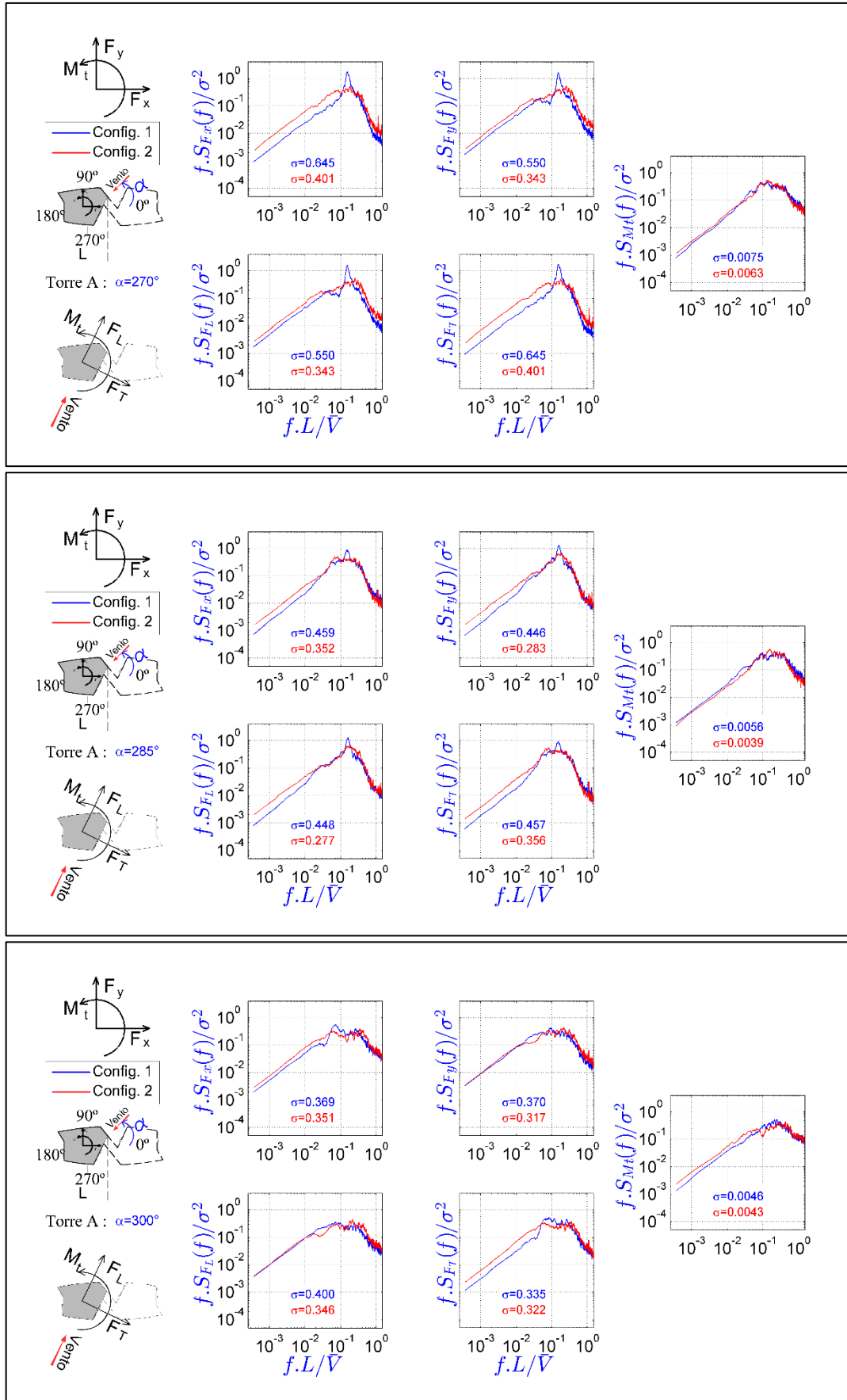


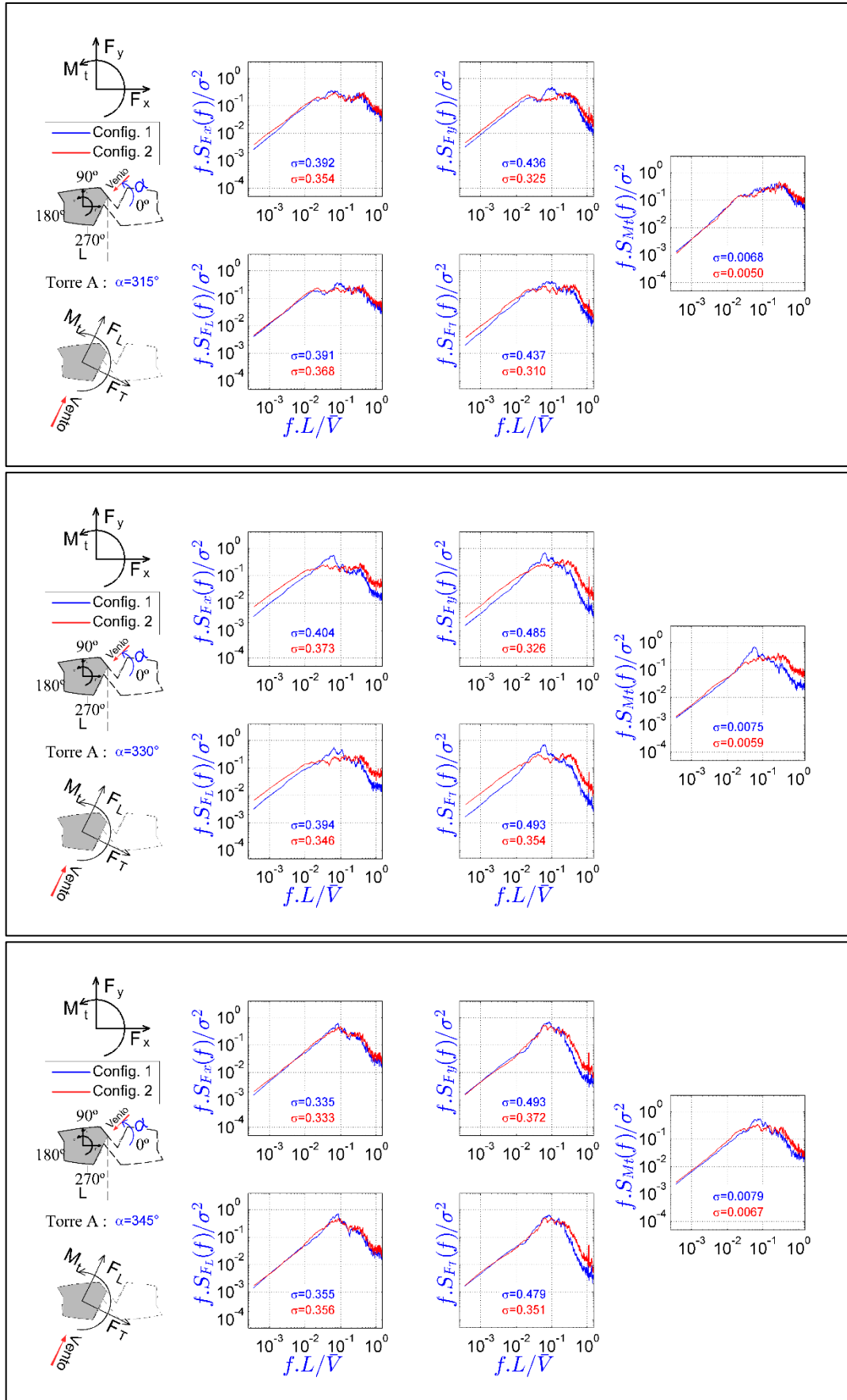
Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento





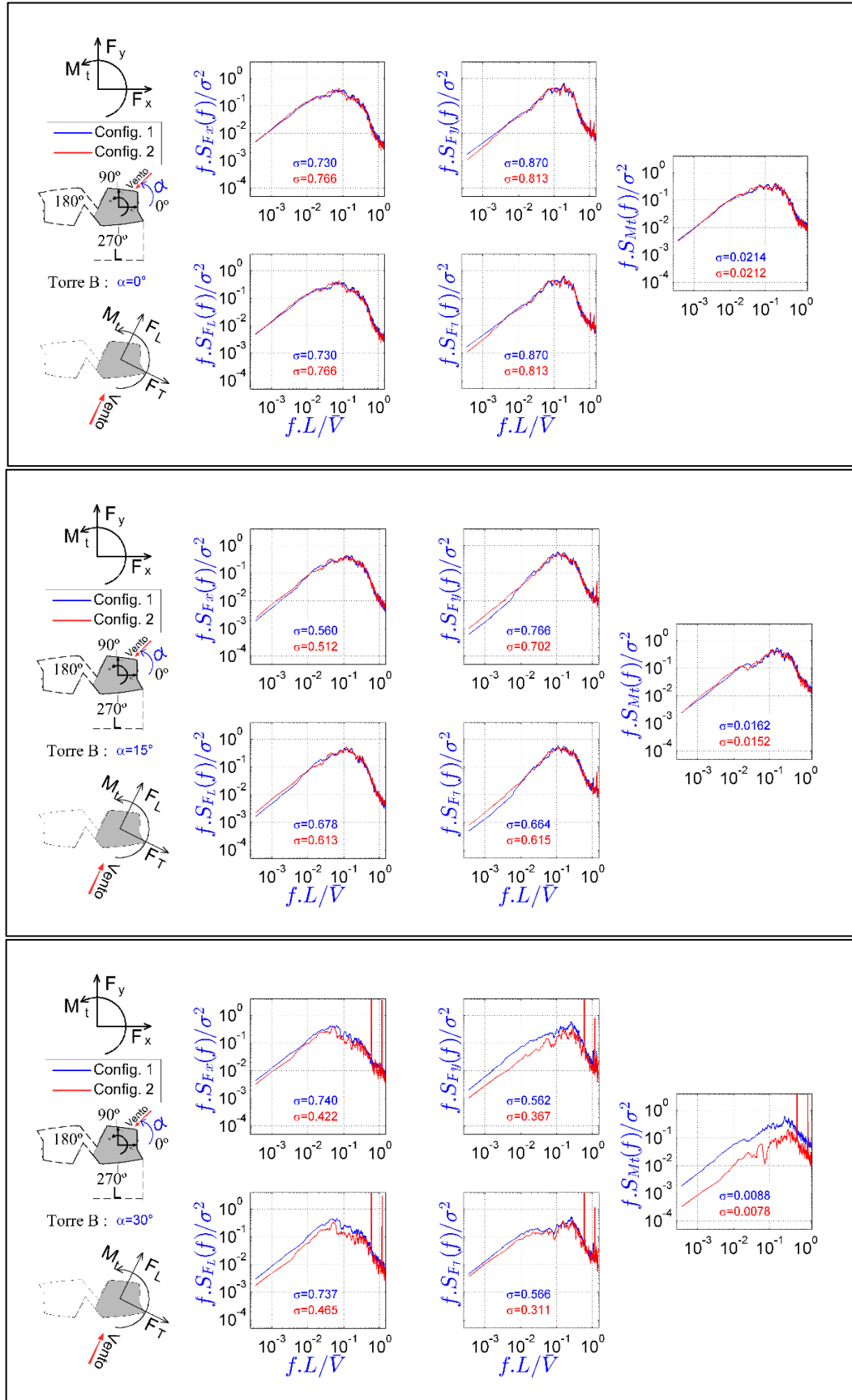
Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento

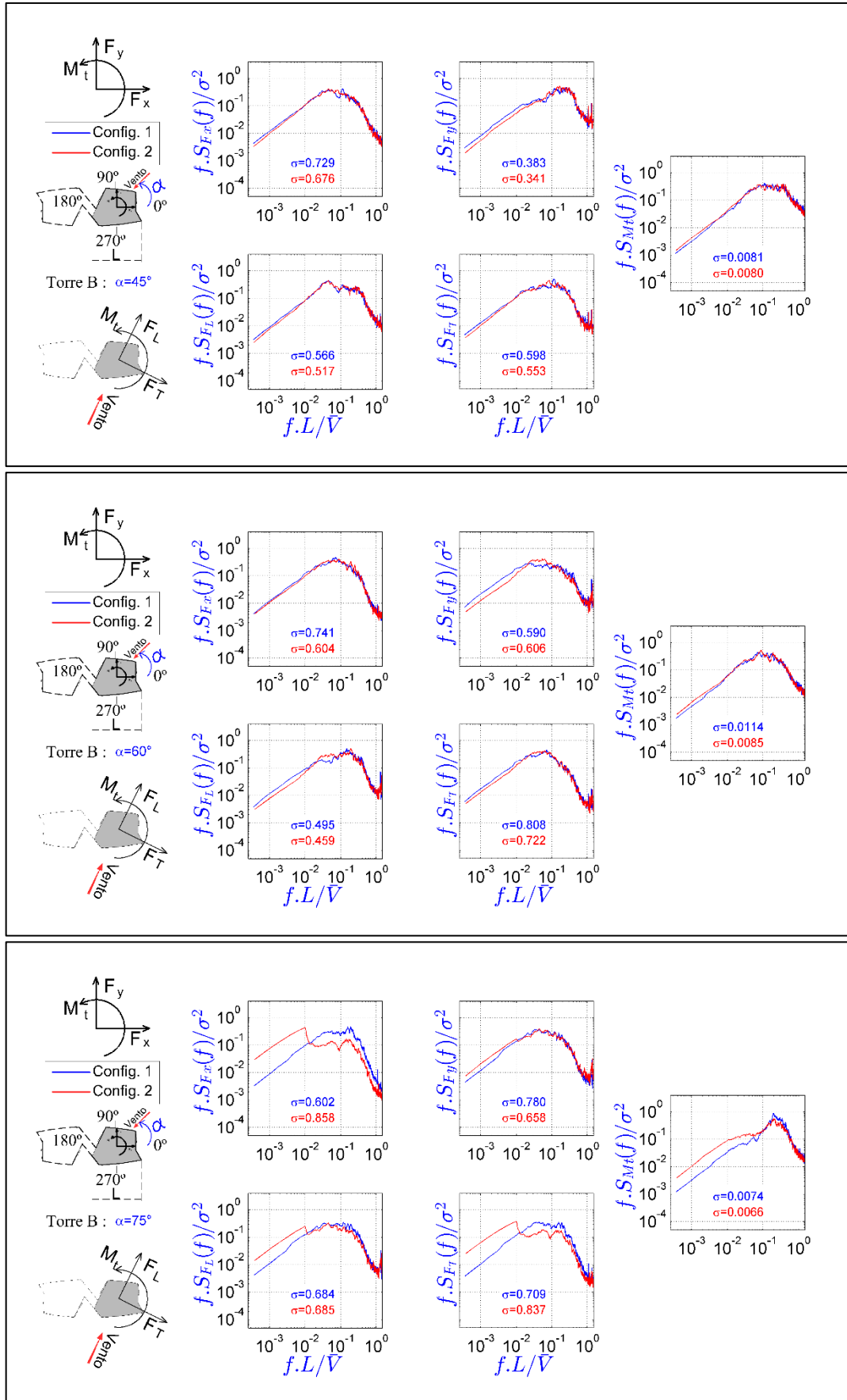




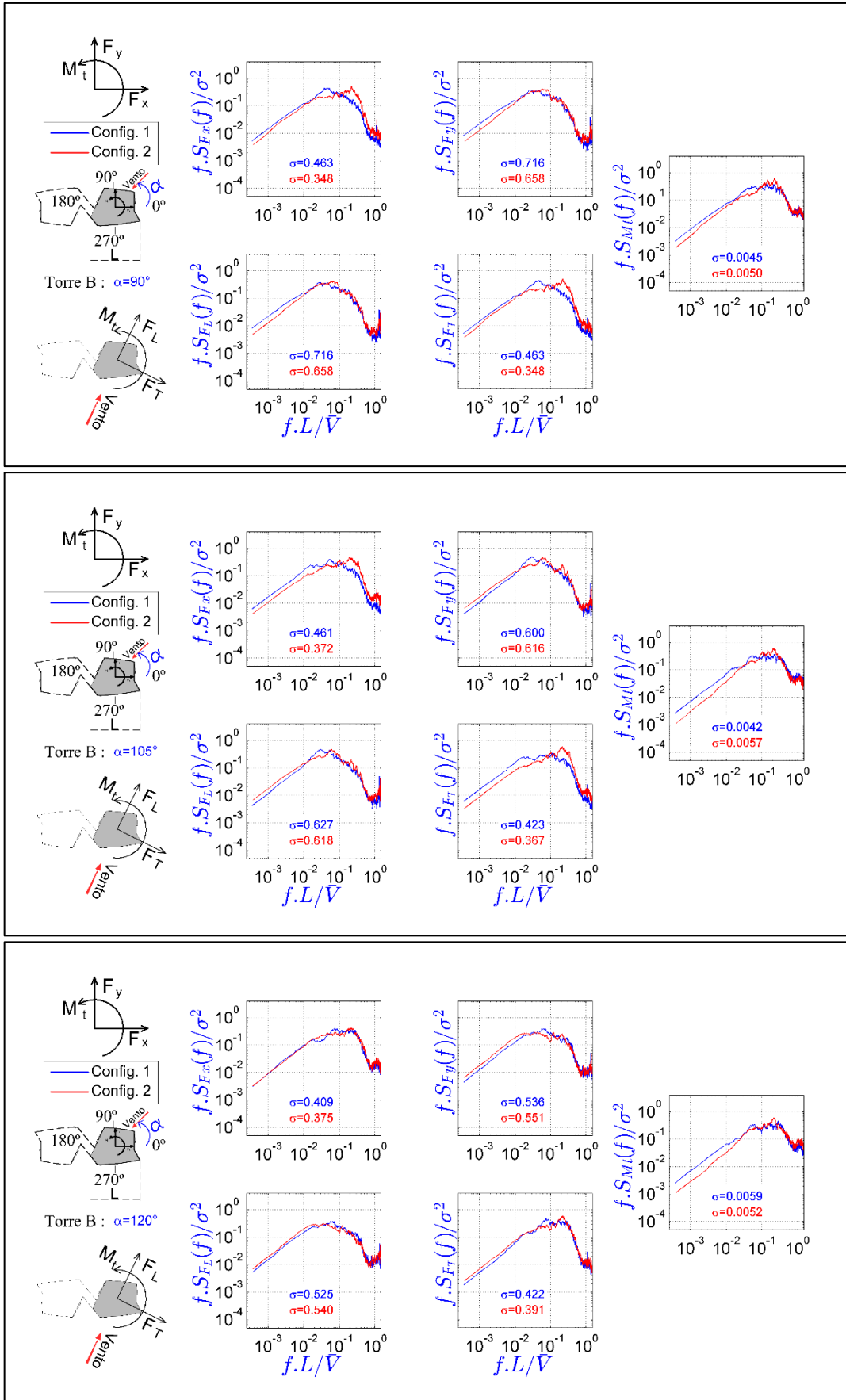
Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento

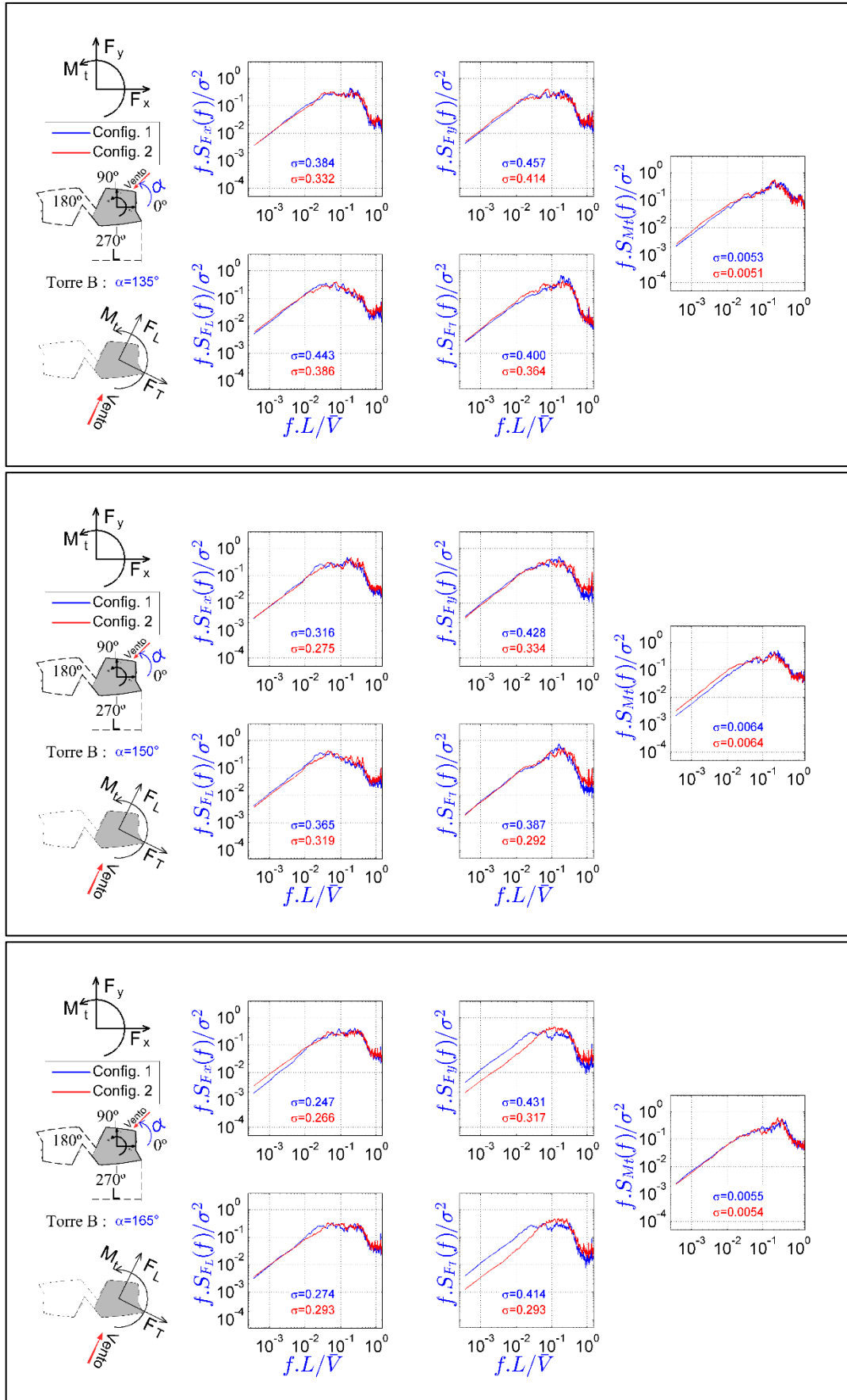
Espectros de força nas direções x e y, nas direções longitudinal e transversal a incidência do vento e momento torçor para o empreendimento I, torre B e incidências de 0° a 345°



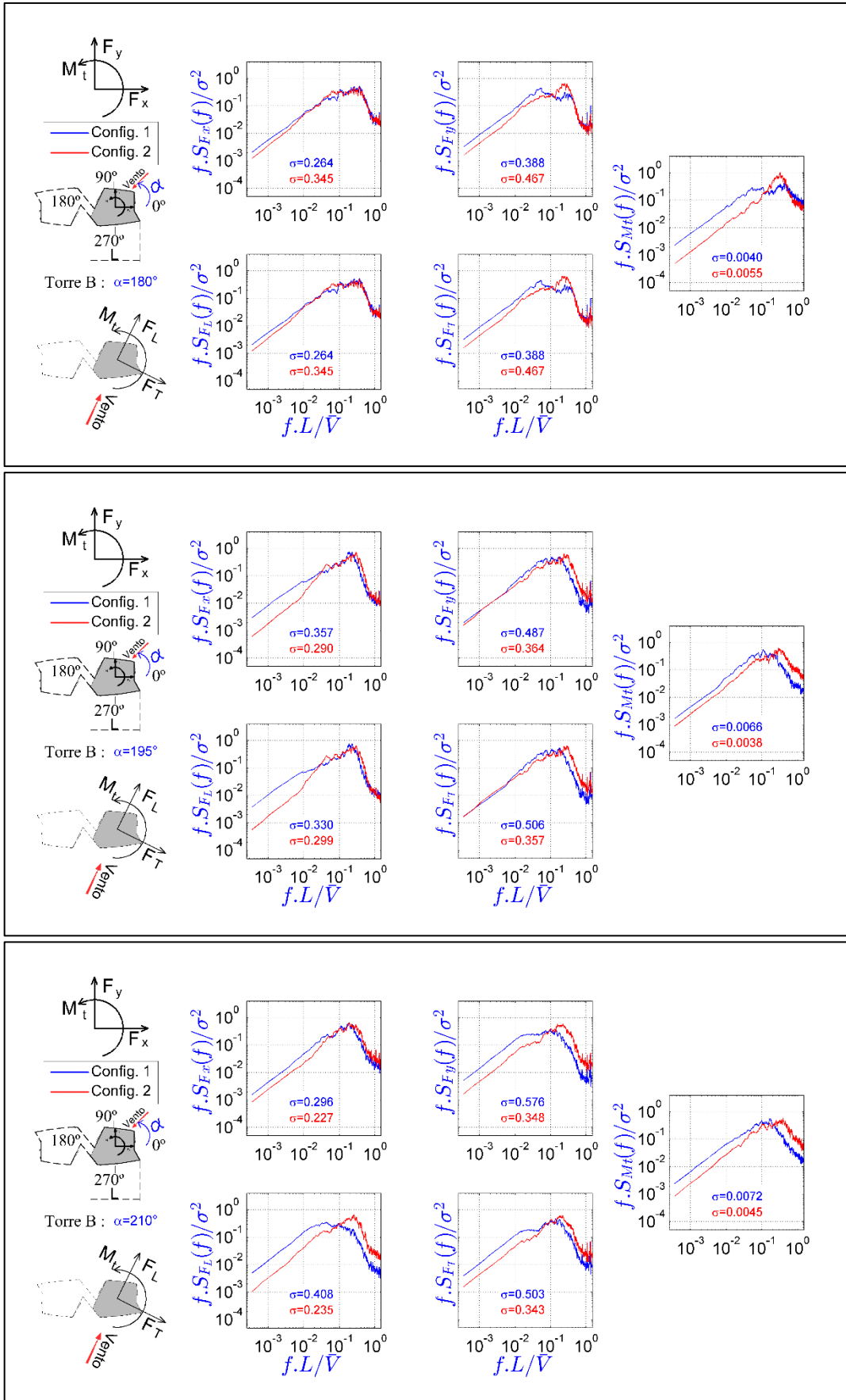


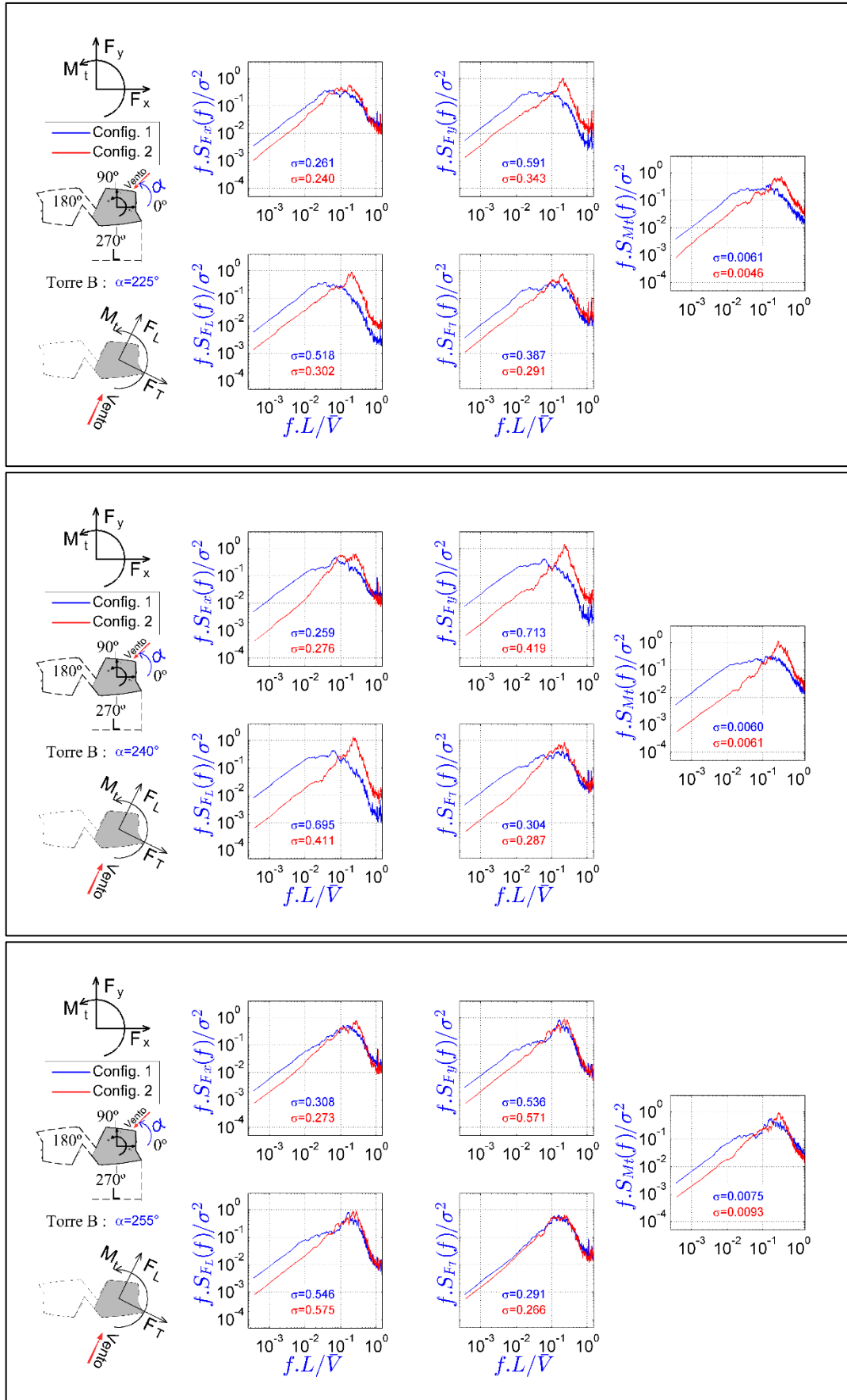
Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento



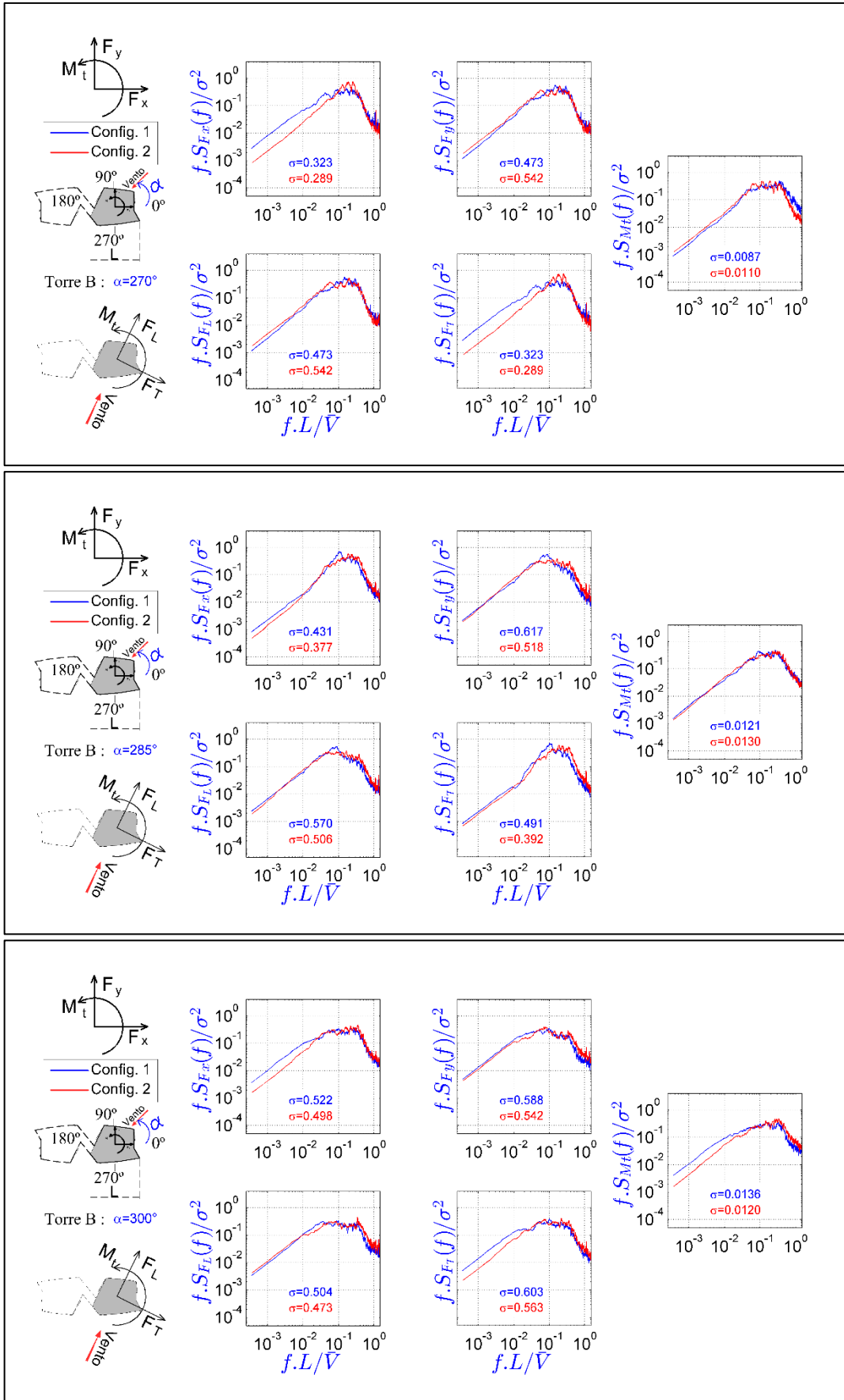


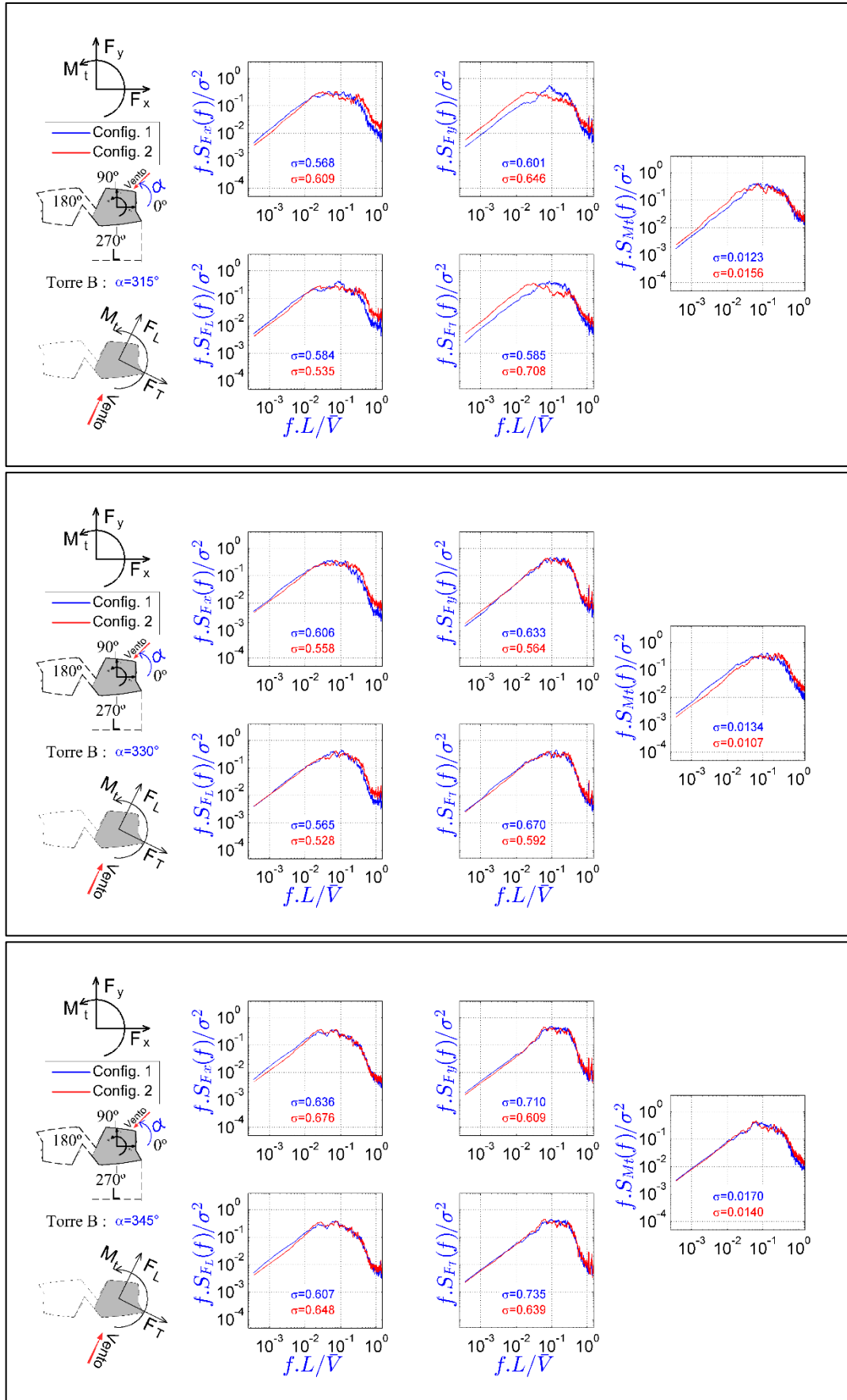
Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento





Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento

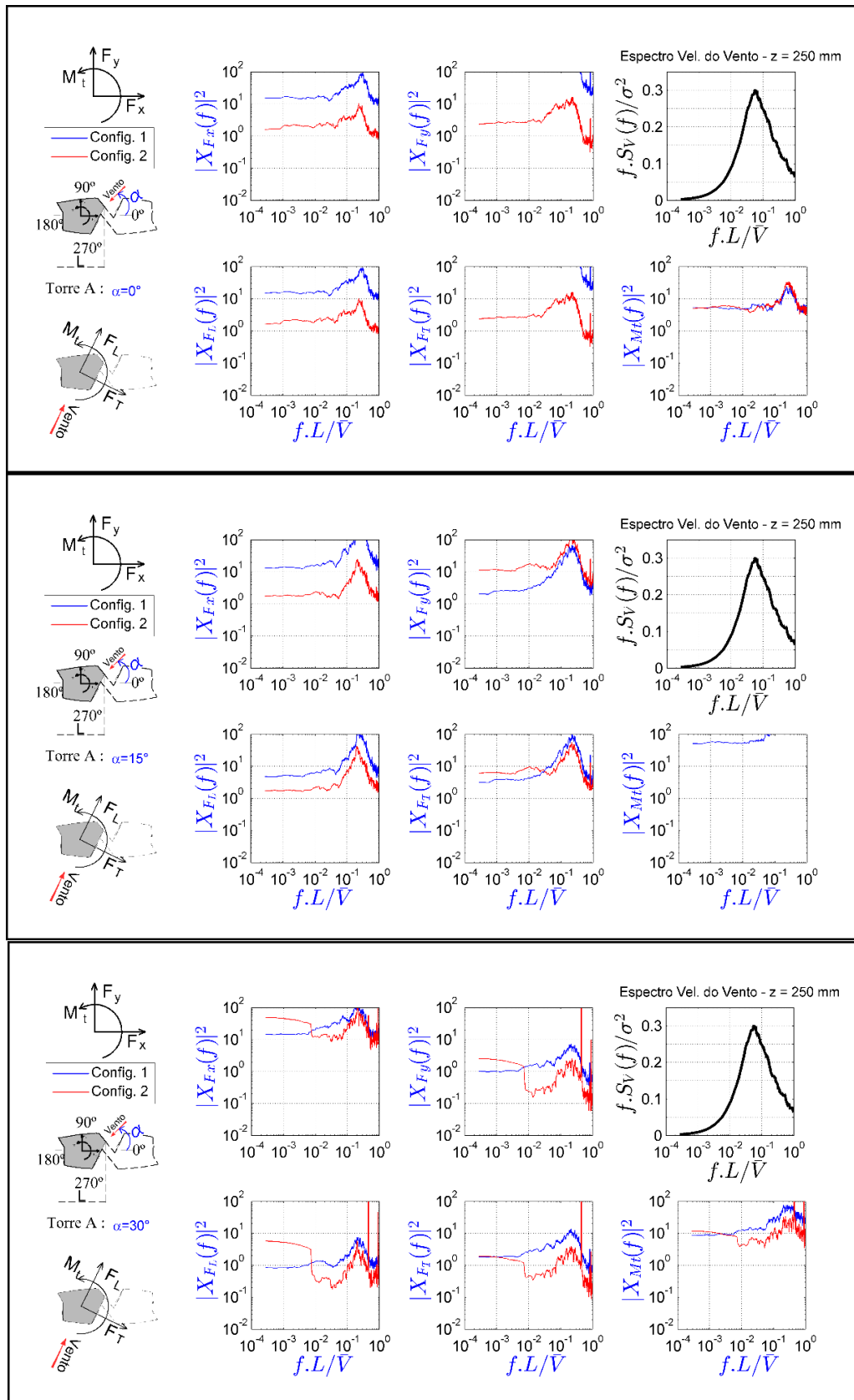


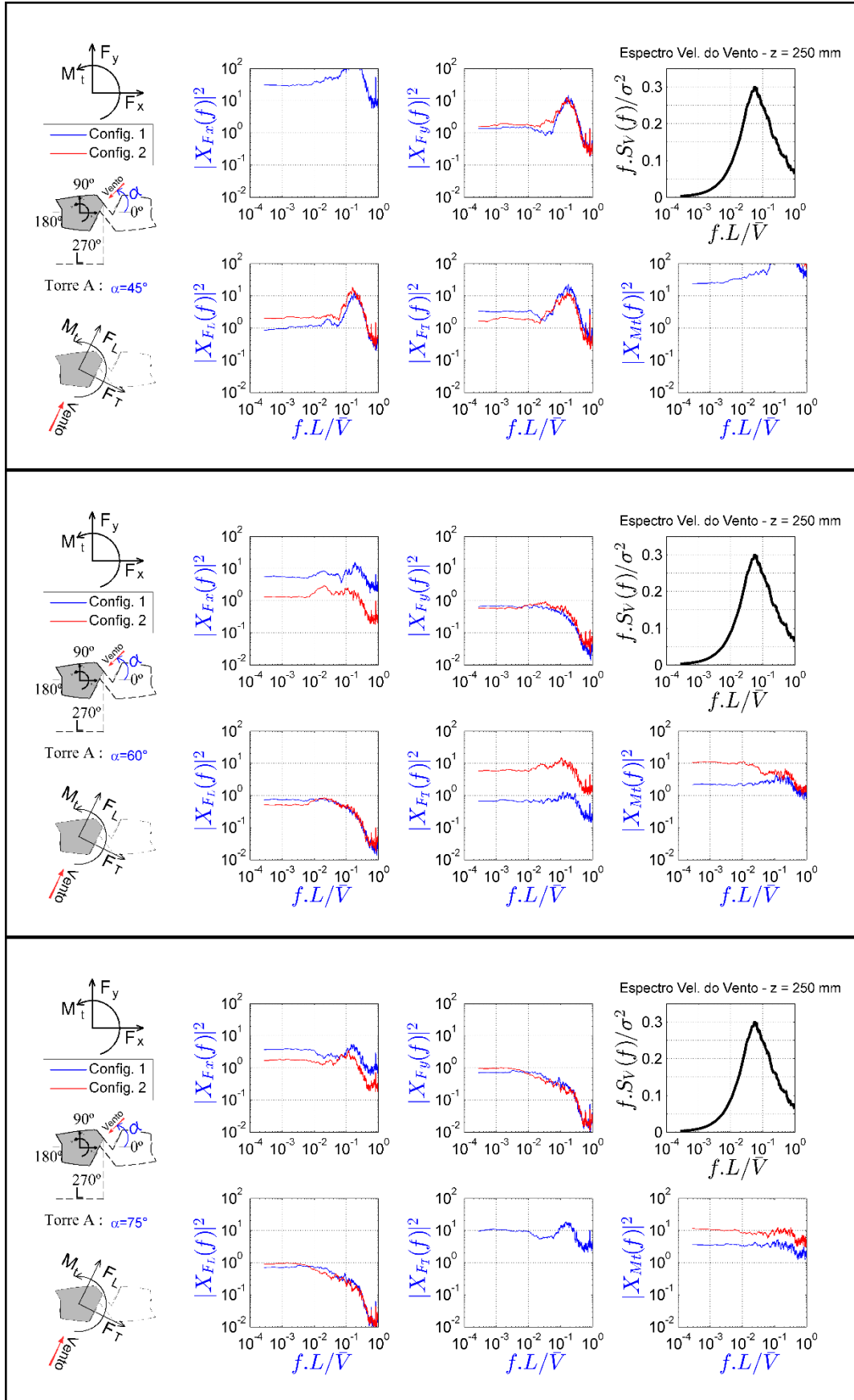


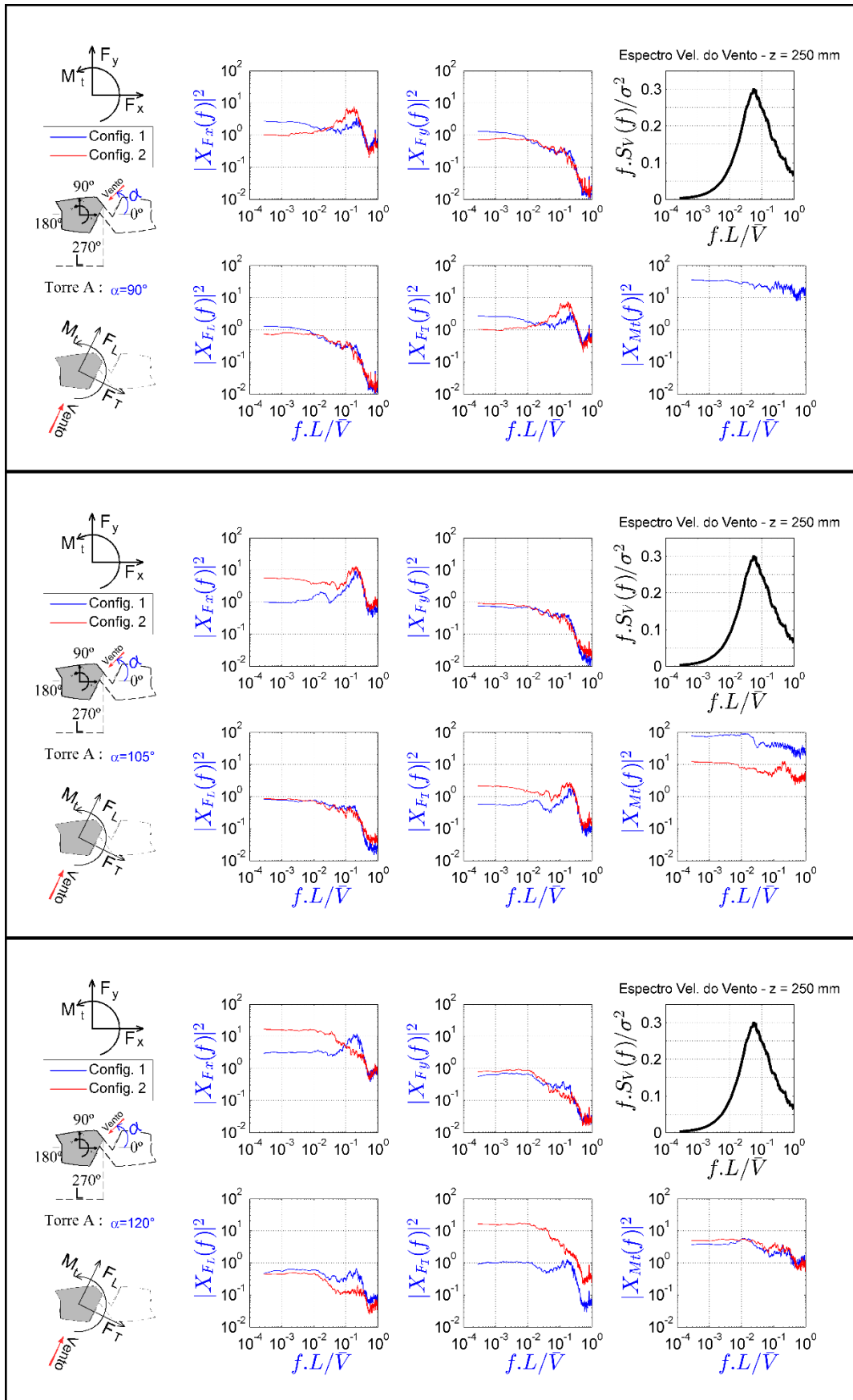
Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento

APÊNDICE B – Funções de admitância aerodinâmica – Empreendimento I

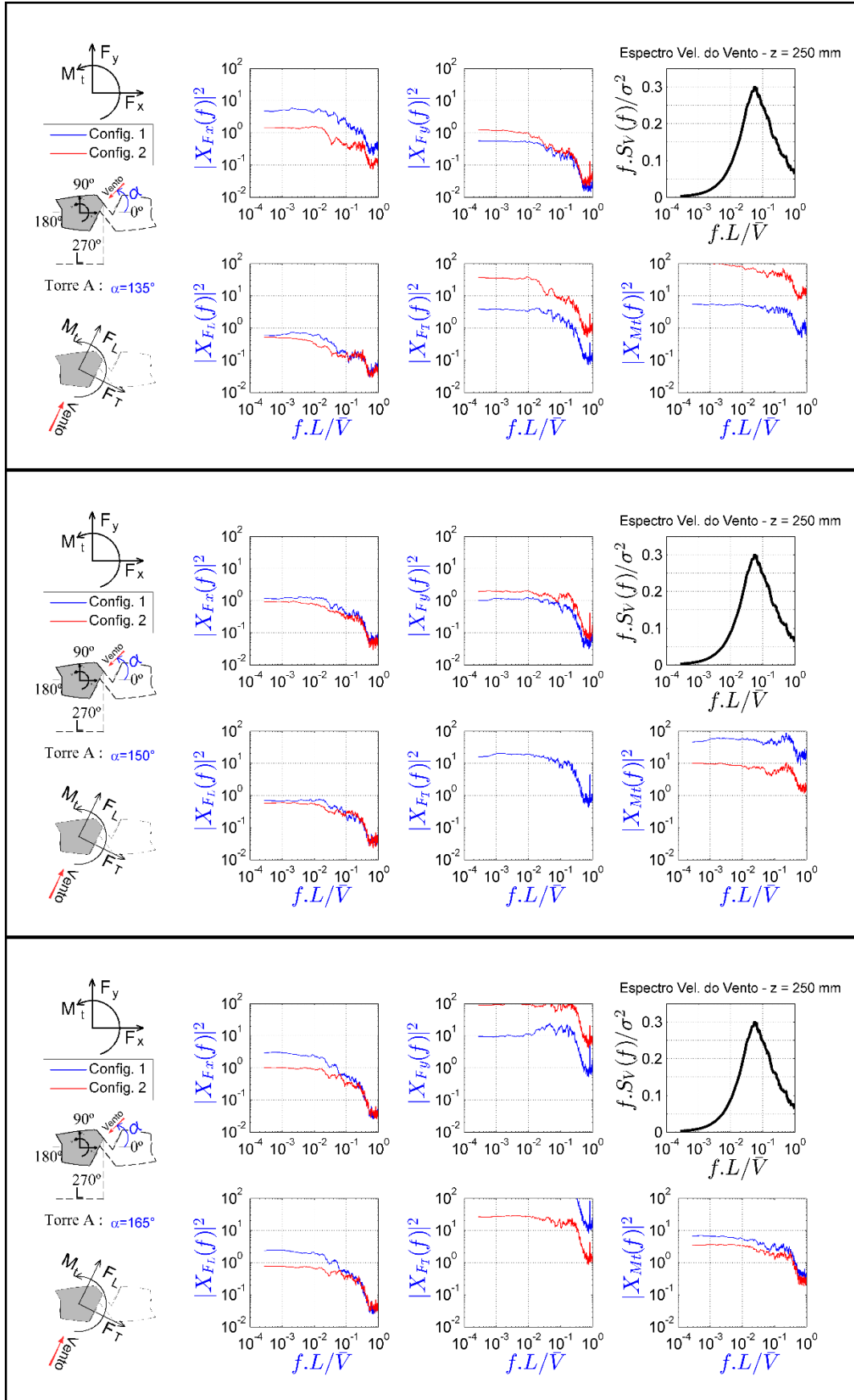
Funções de admitância aerodinâmica nas direções x e y, nas direções longitudinal e transversal a incidência do vento e momento torçor para o empreendimento I, torre A e incidências de 0° a 345°

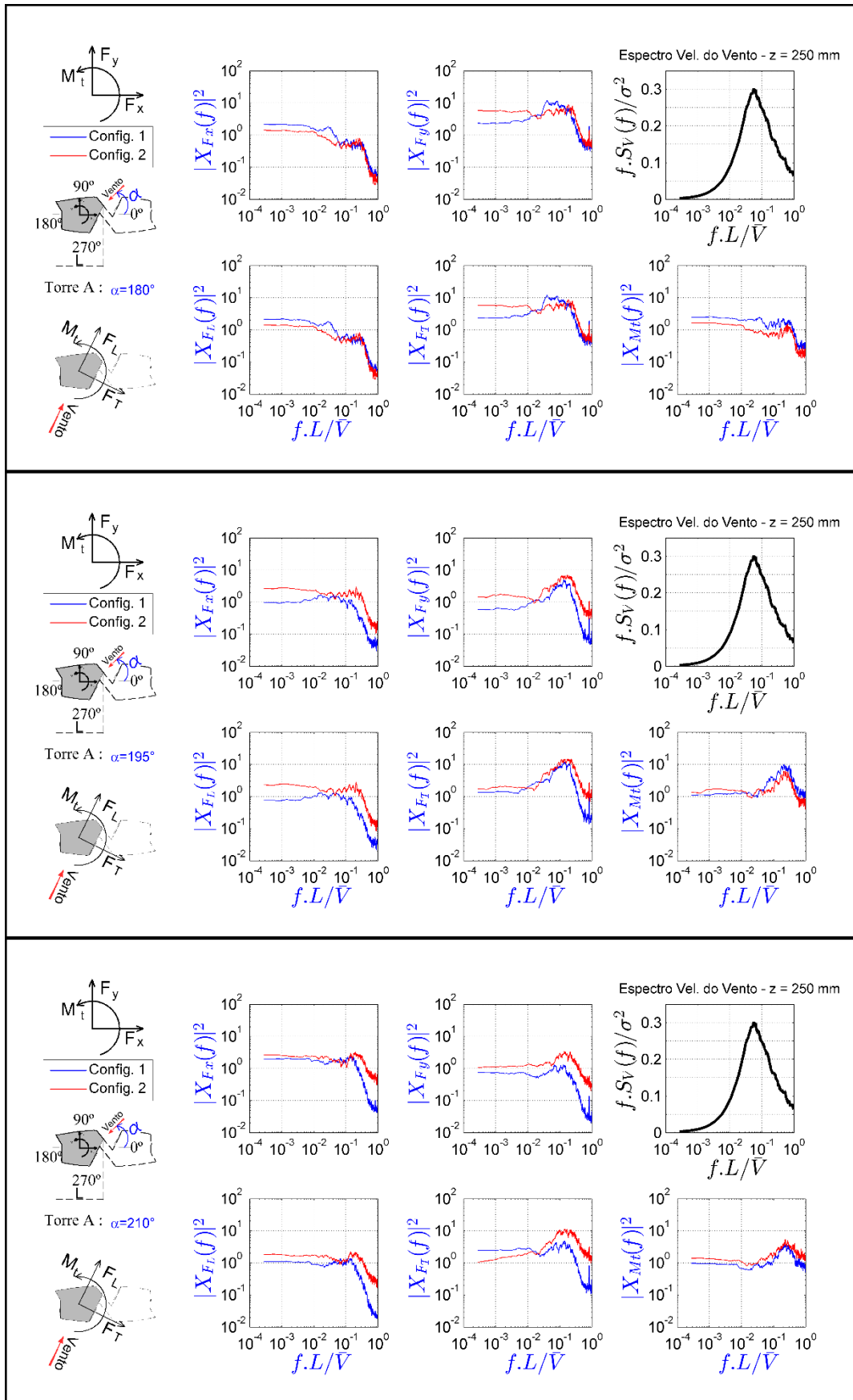




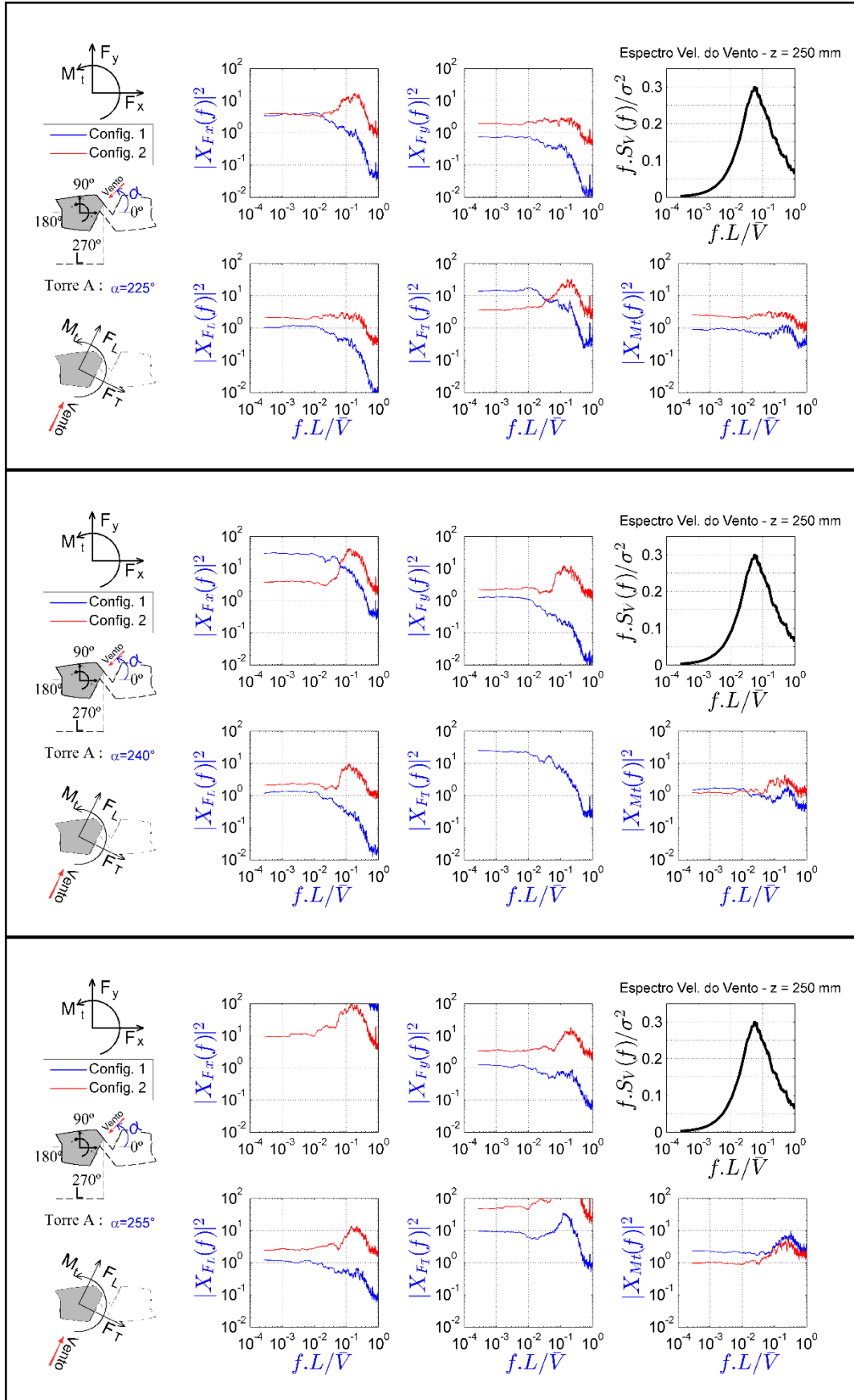


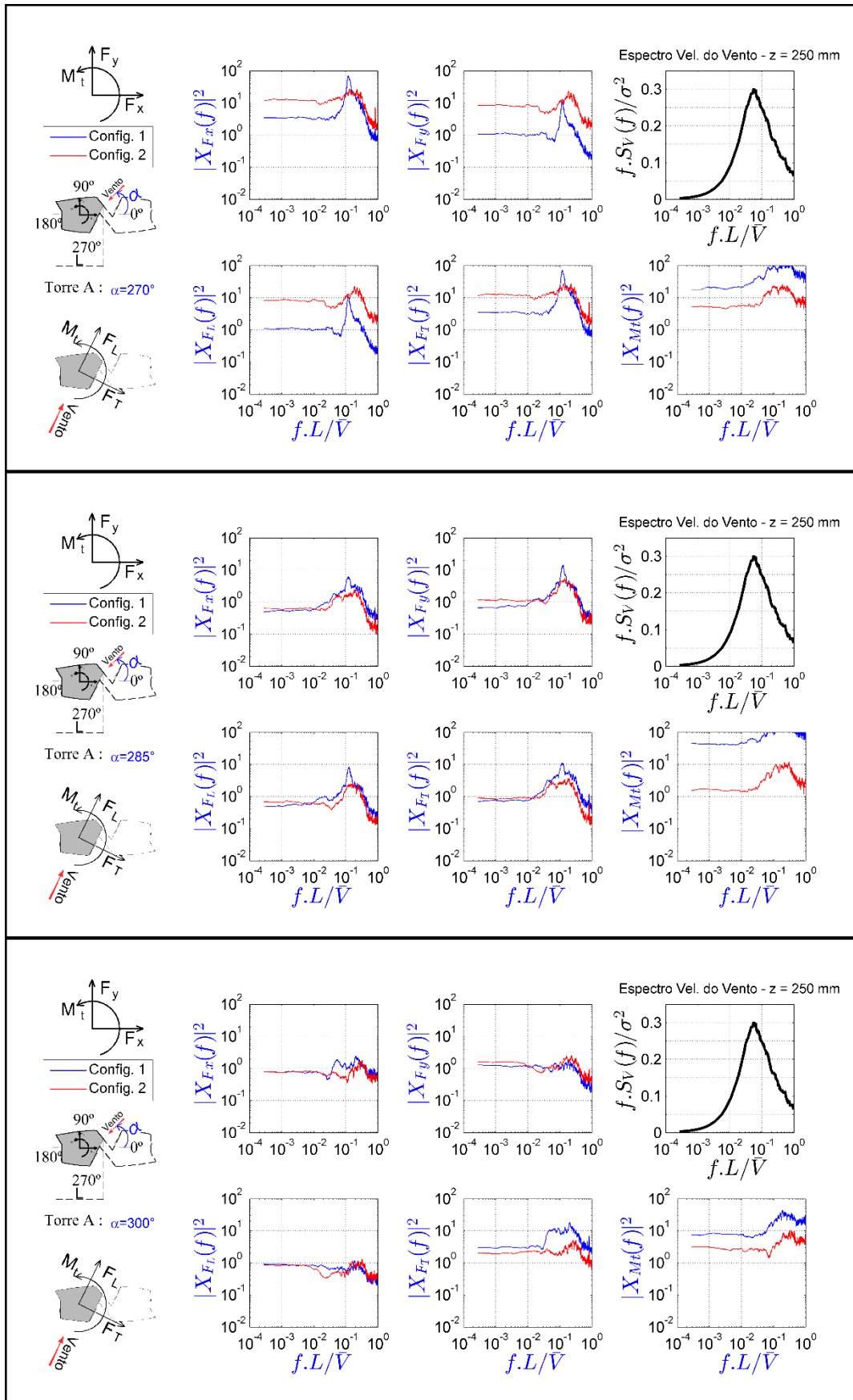
Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento



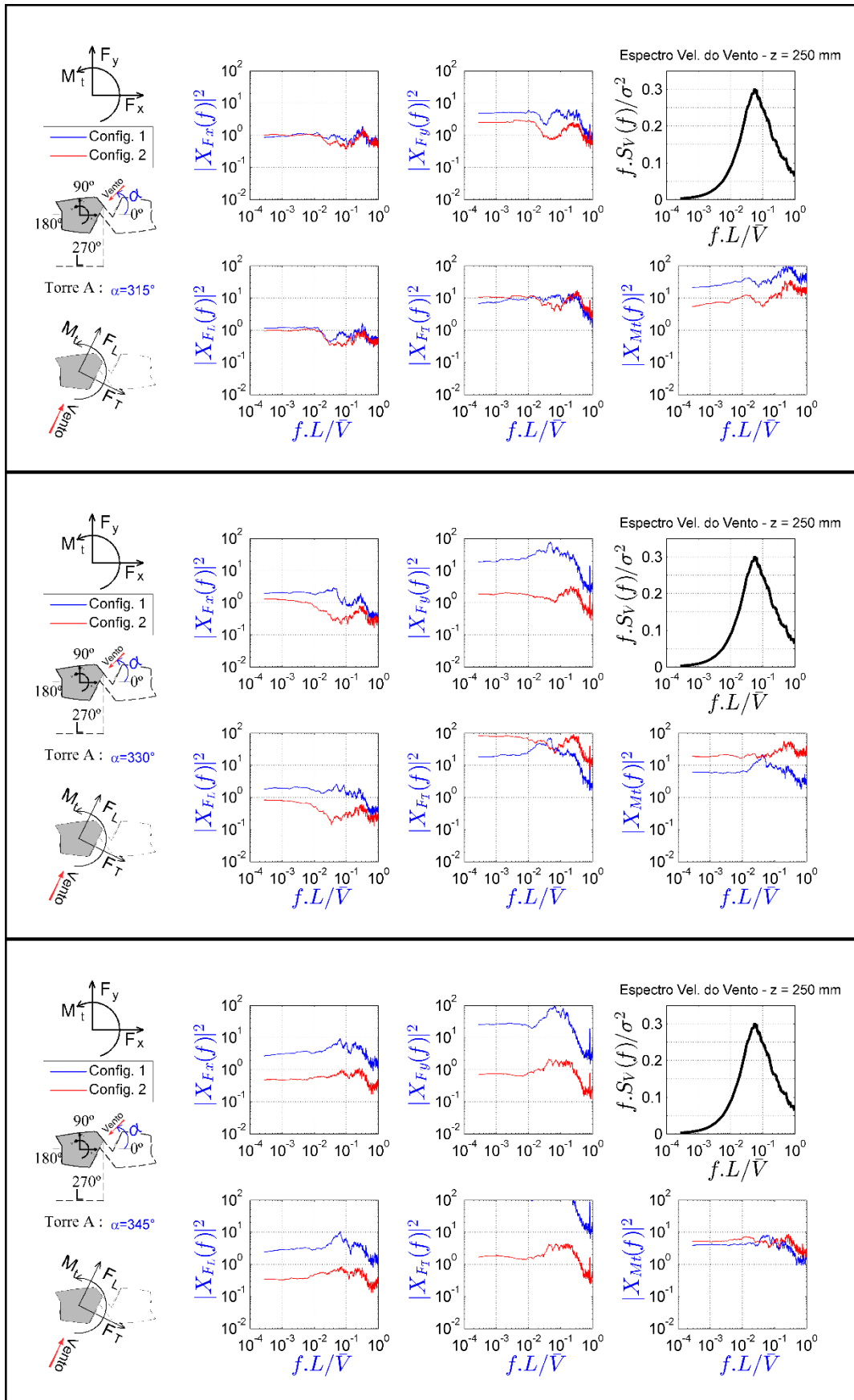


Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento

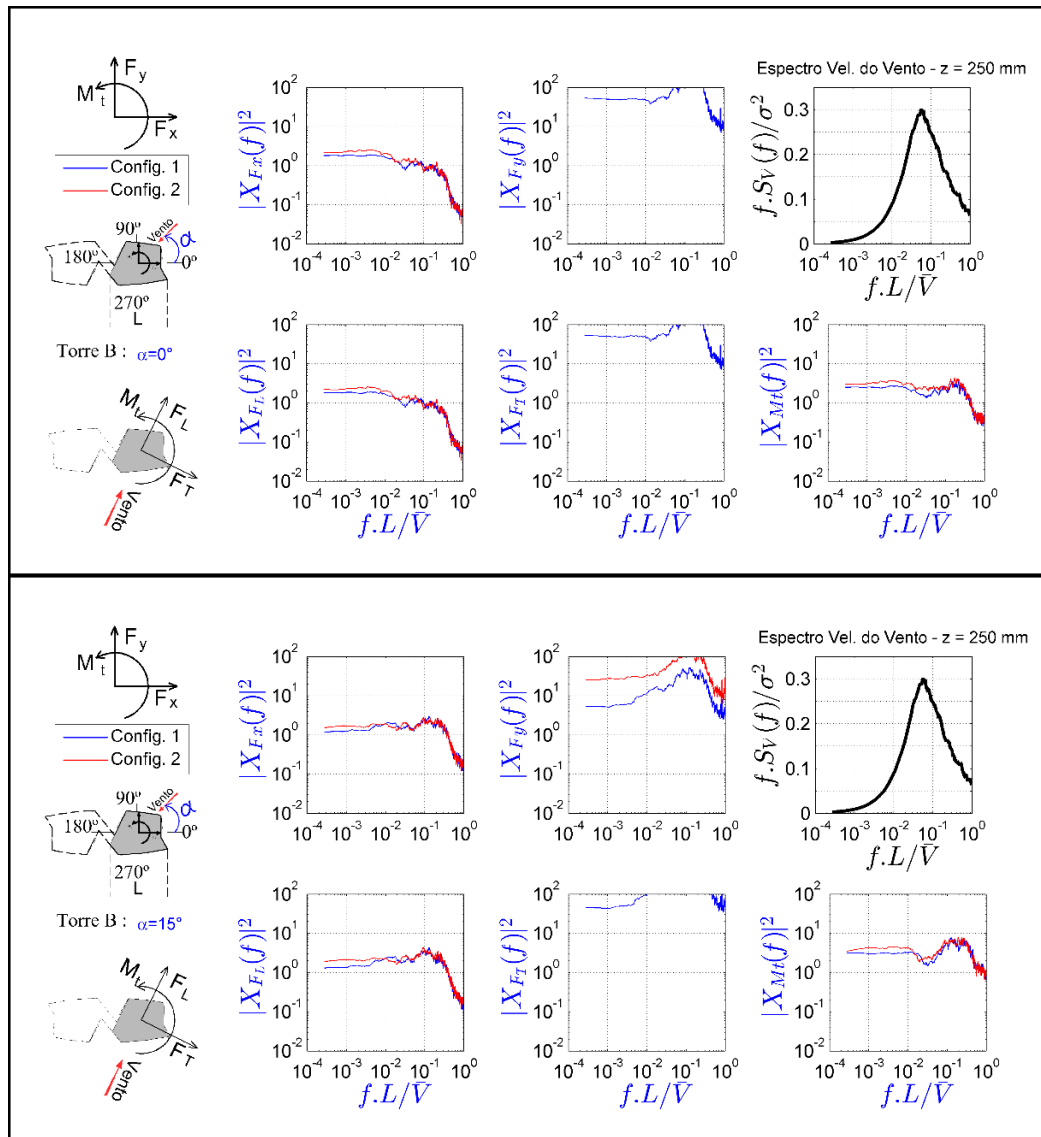


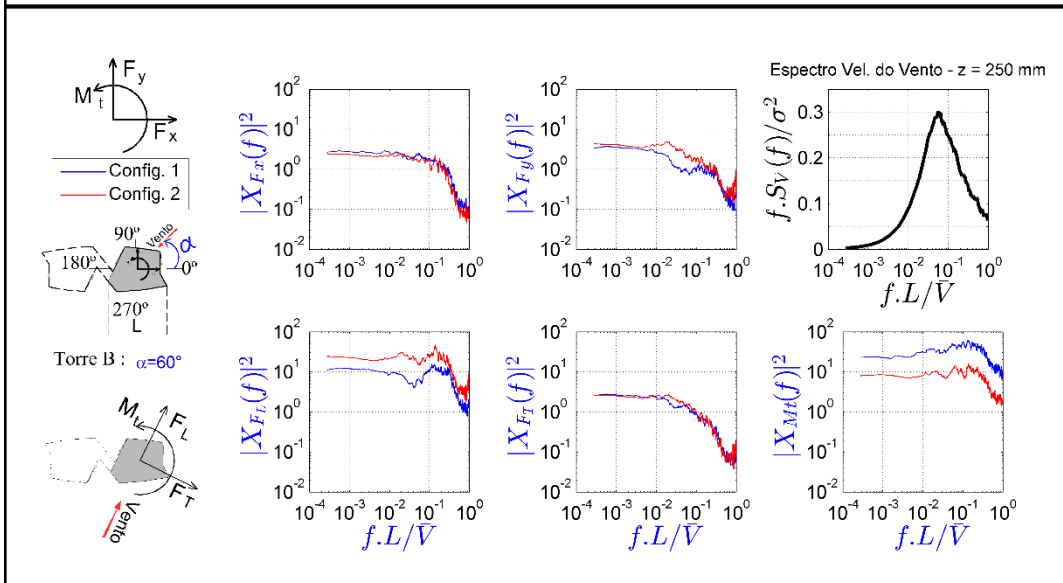
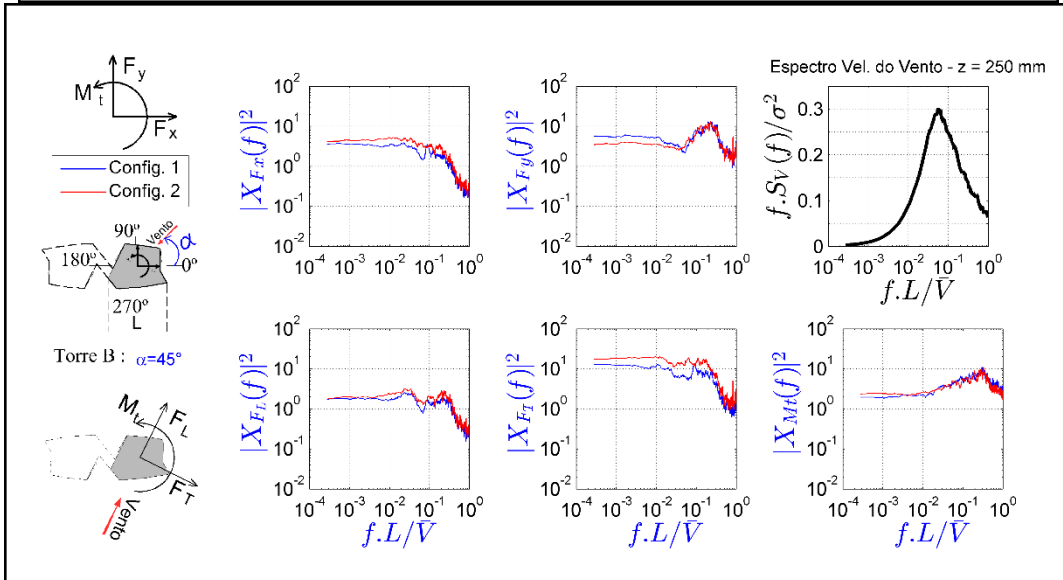
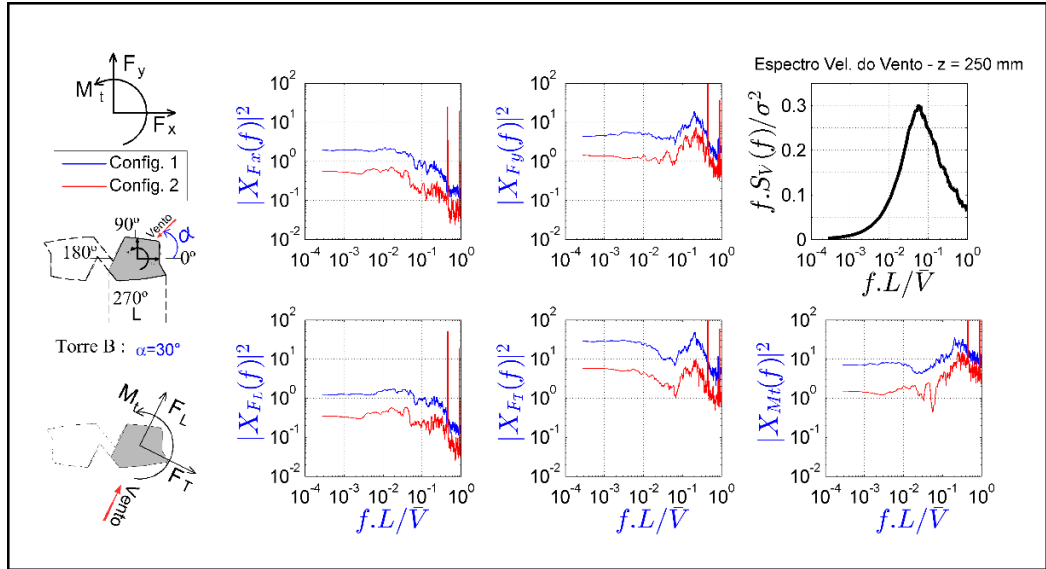


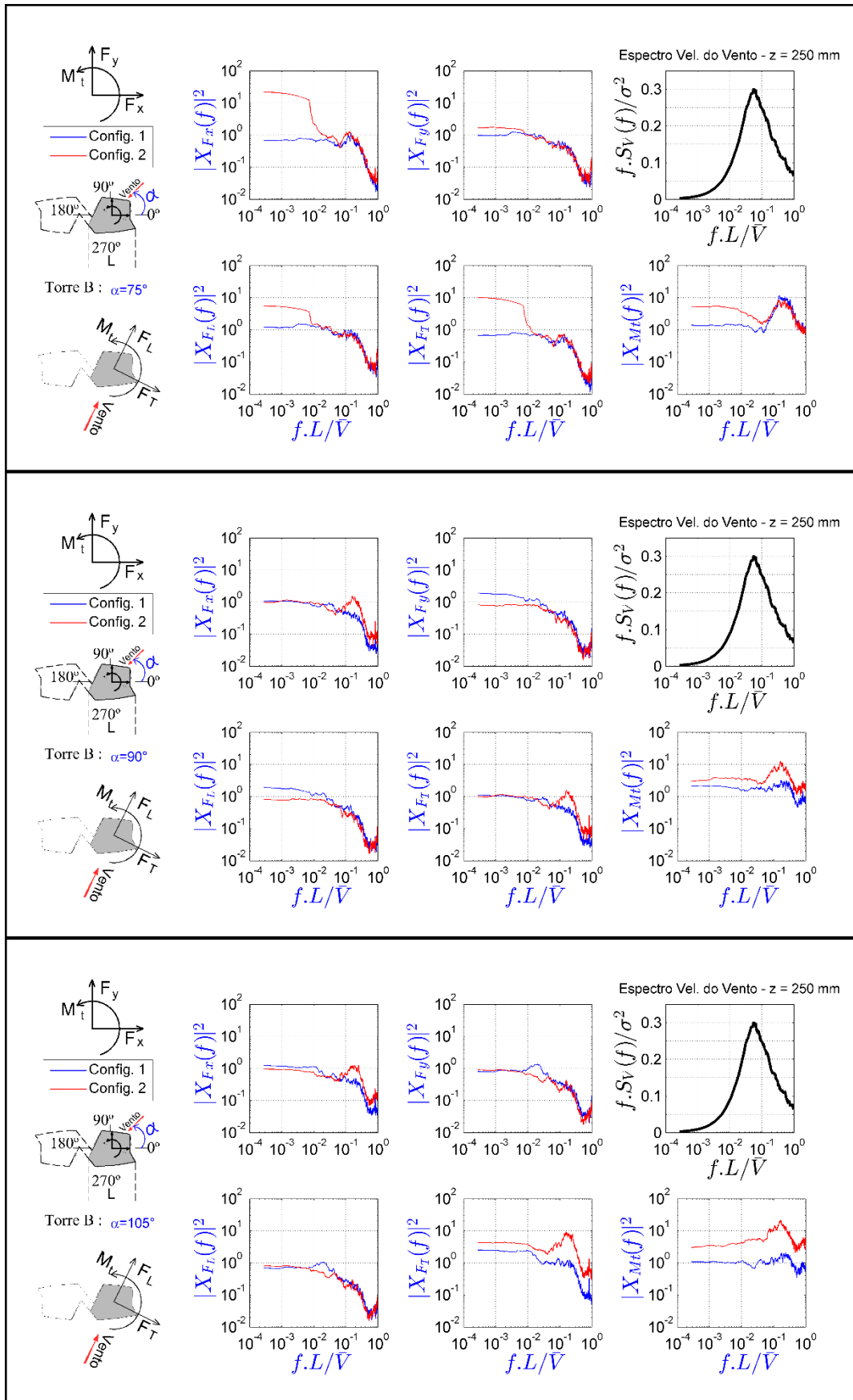
Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento



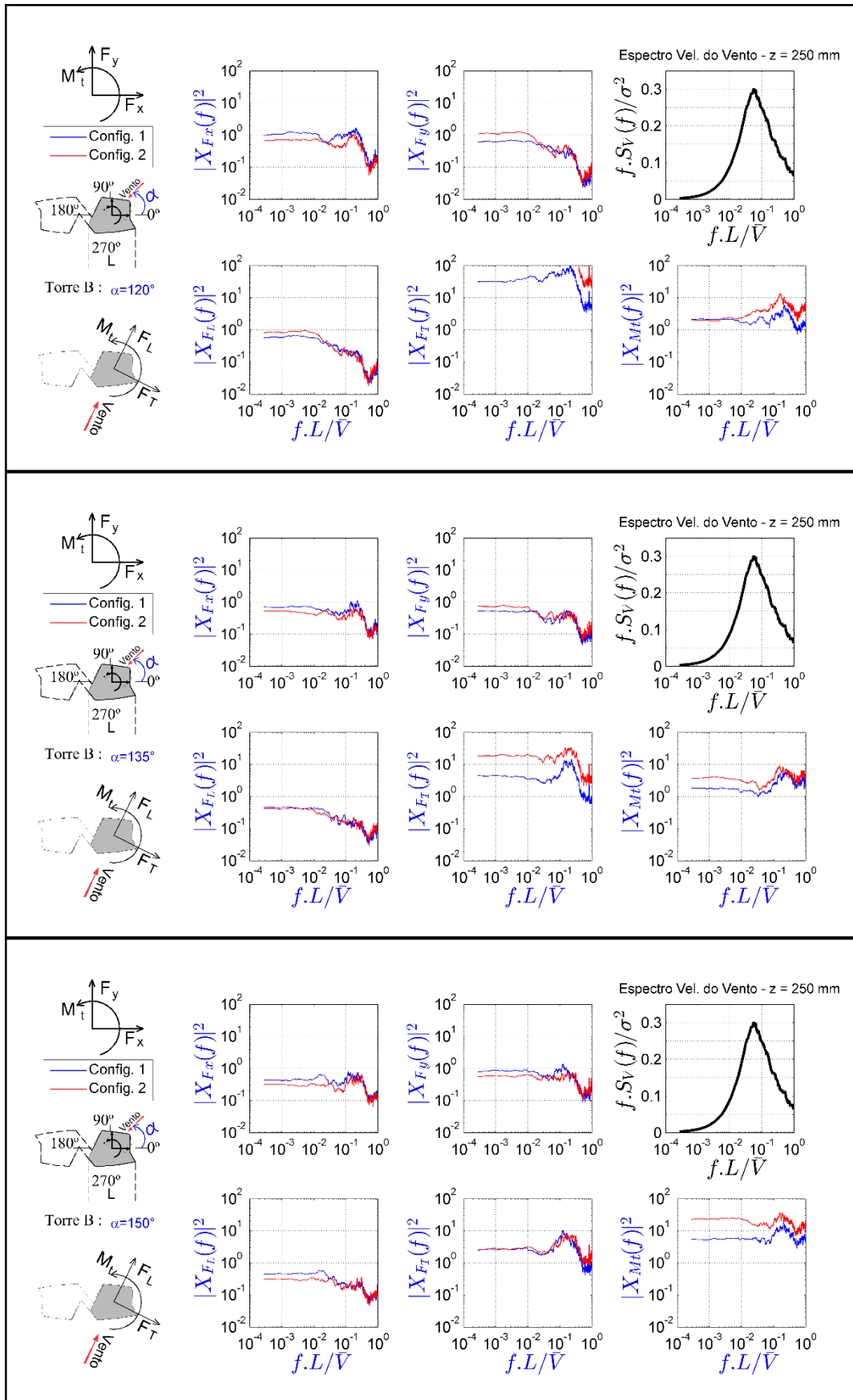
Funções de admitância aerodinâmica nas direções x e y, nas direções longitudinal e transversal a incidência do vento e momento torçor para o empreendimento I, torre B e incidências de 0° a 345°

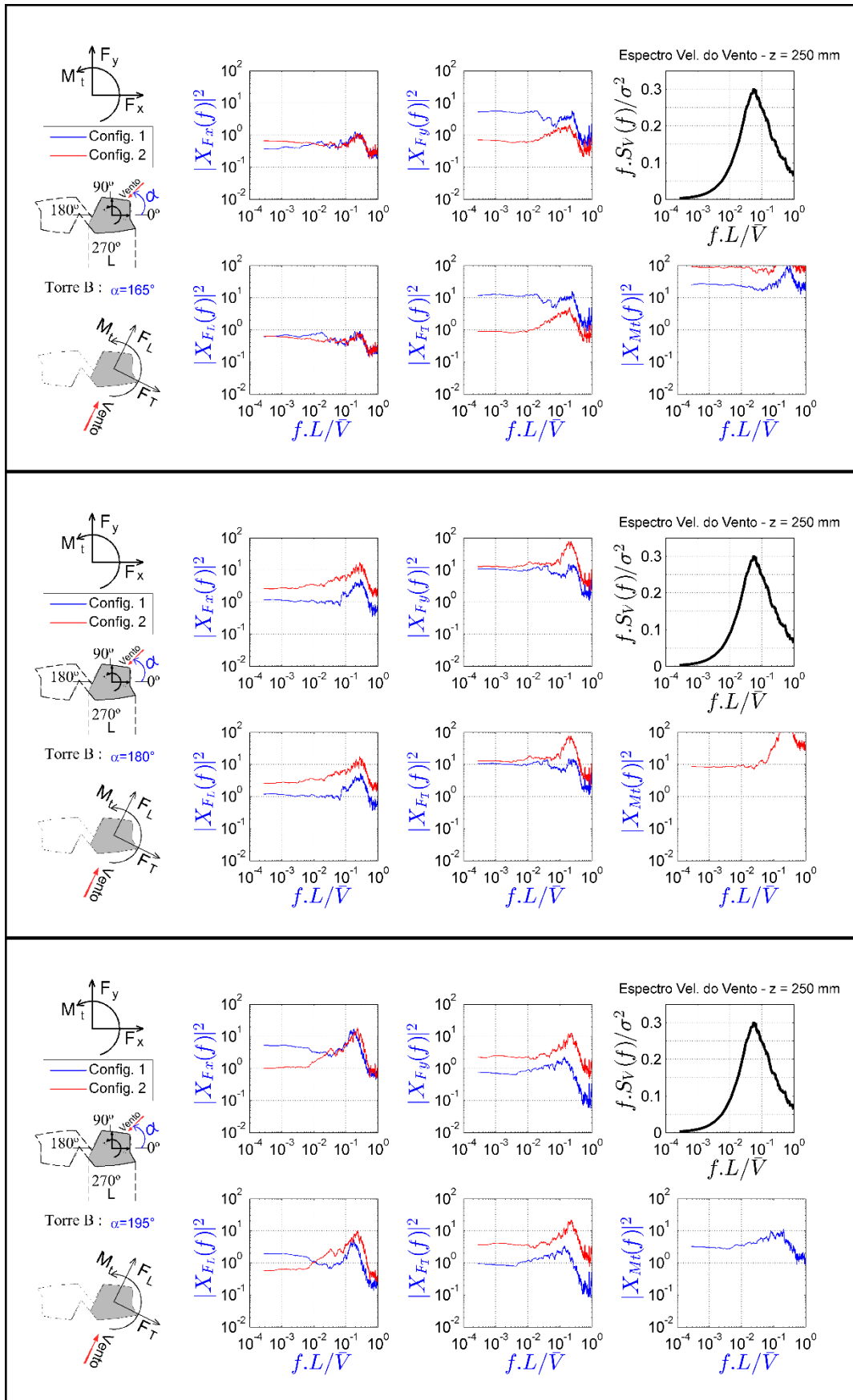




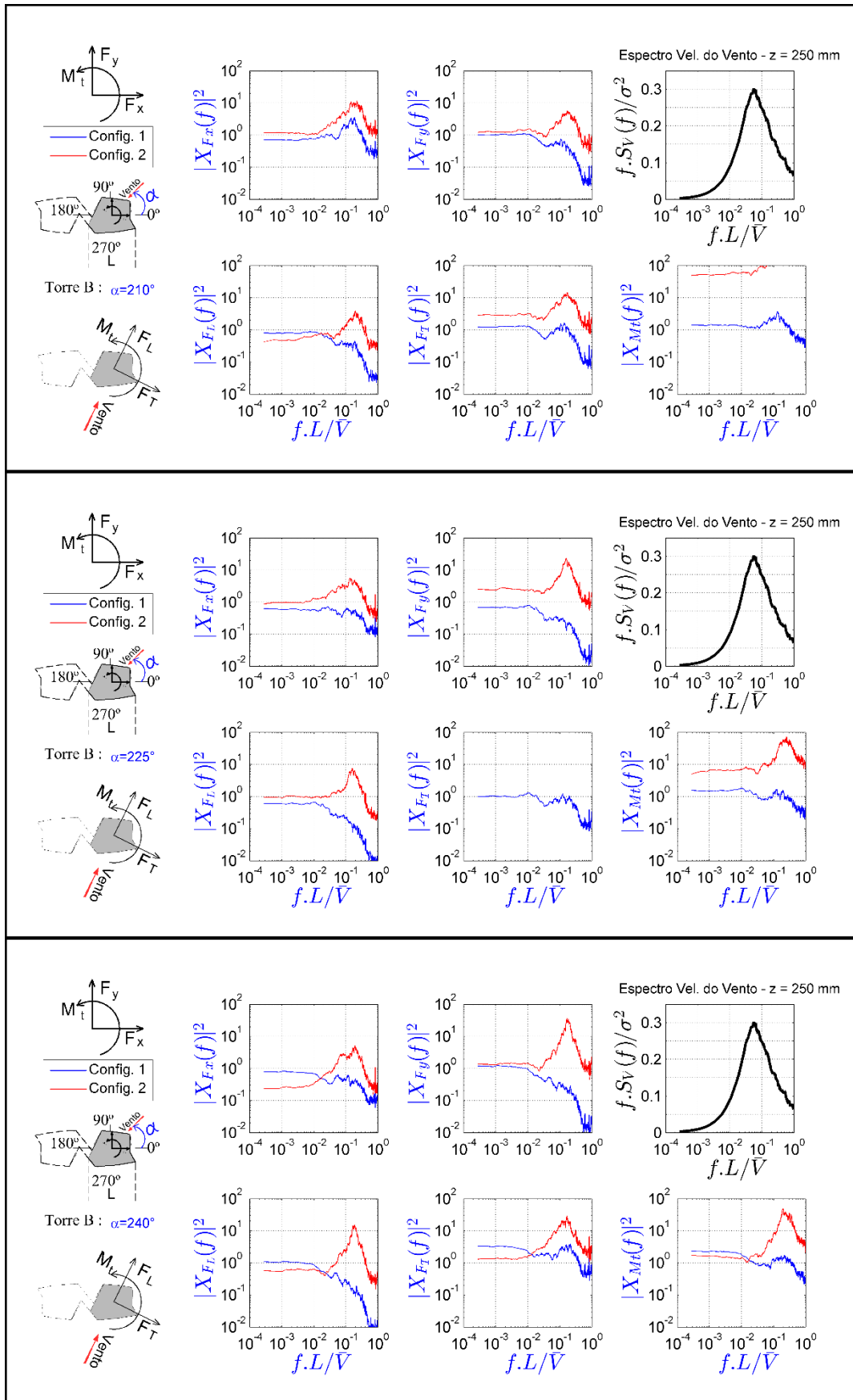


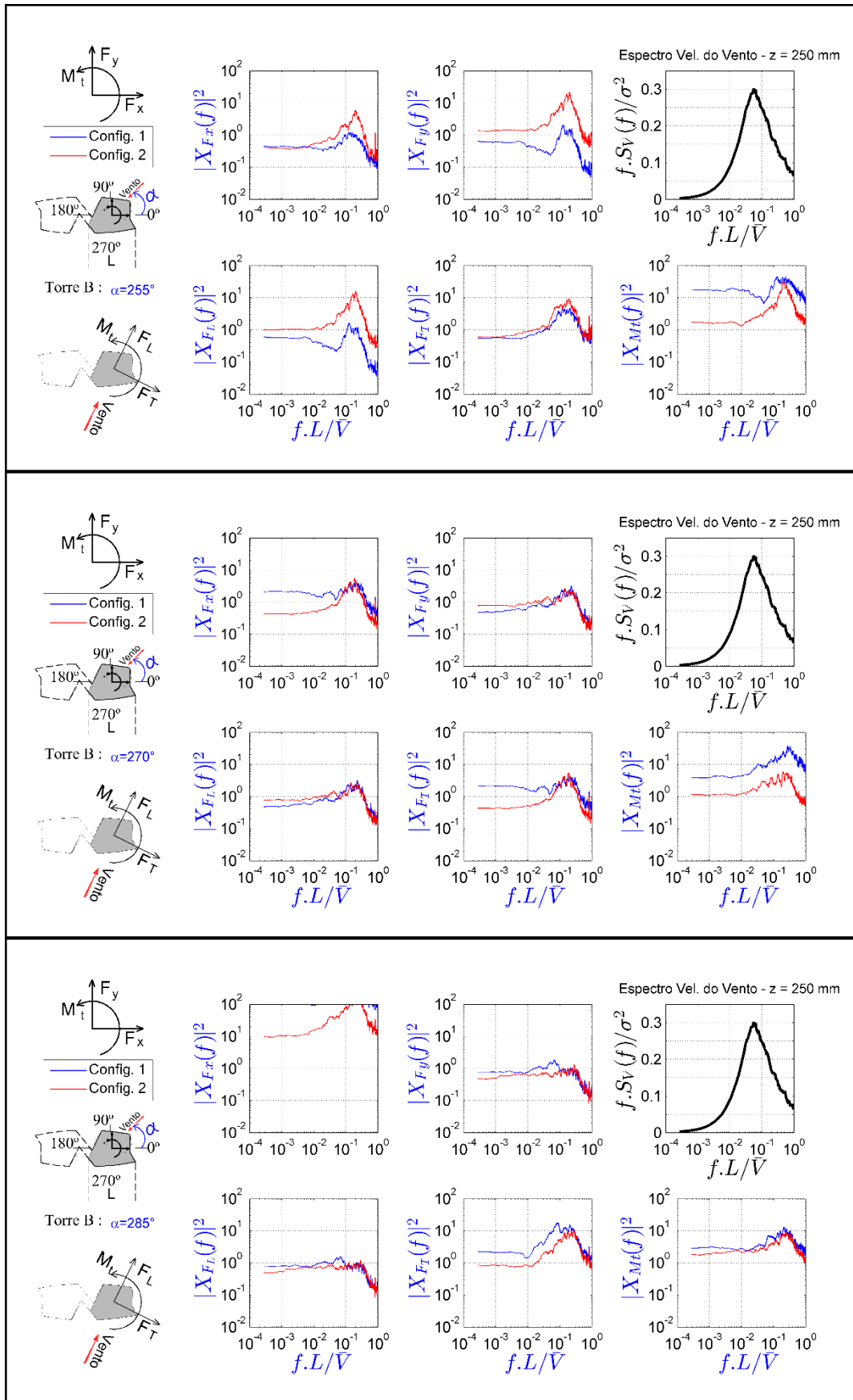
Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento



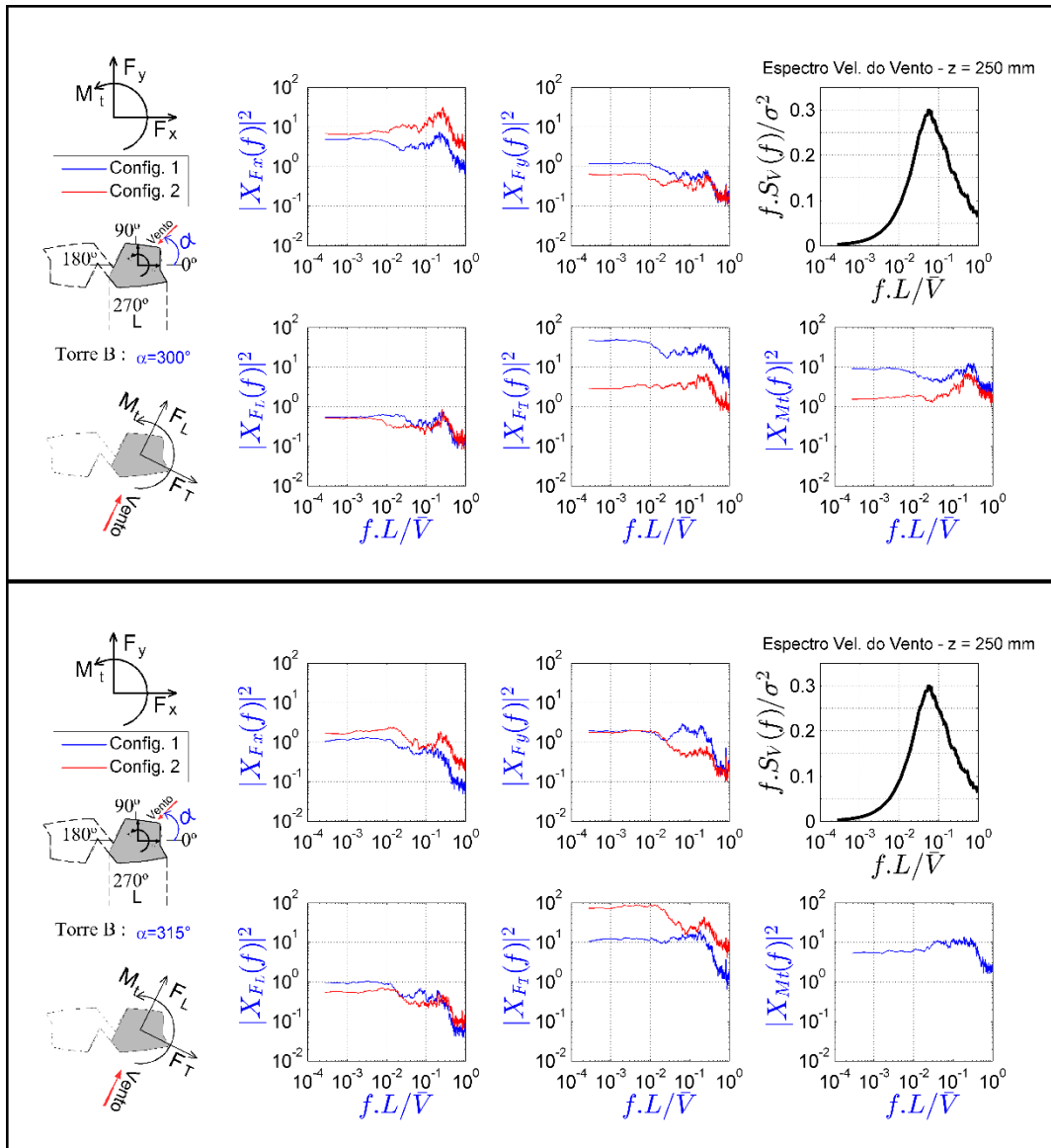


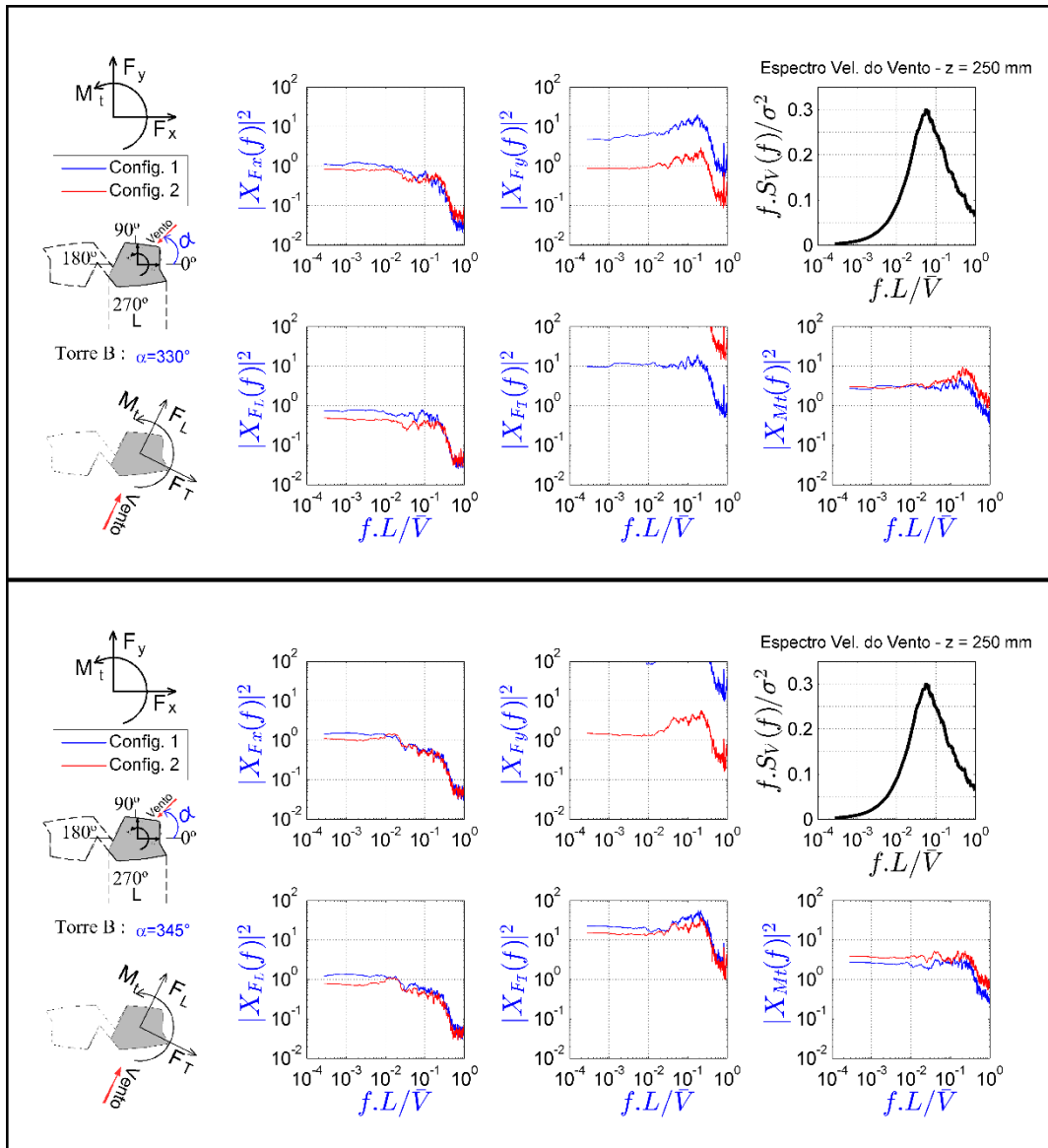
Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento





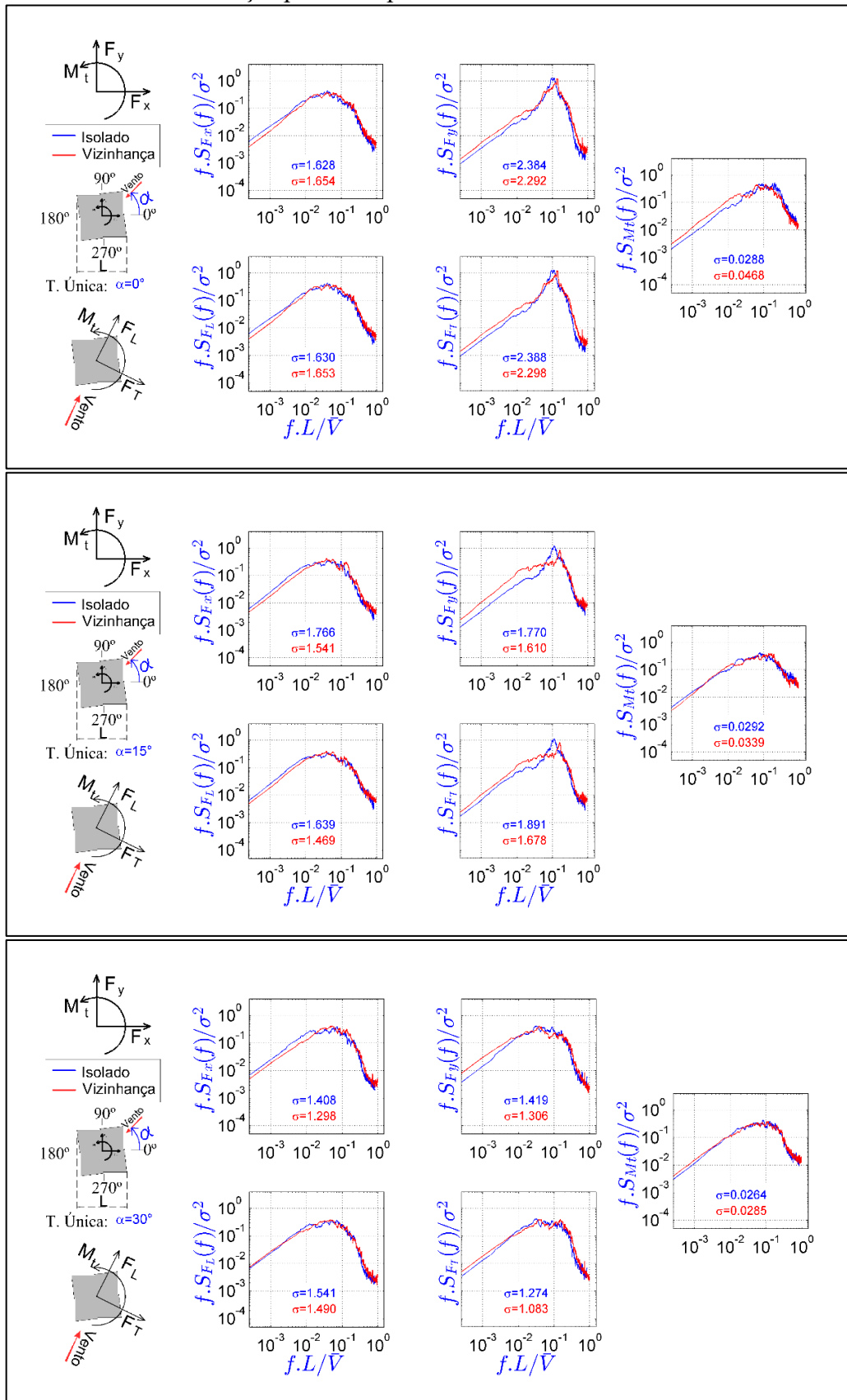
Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento

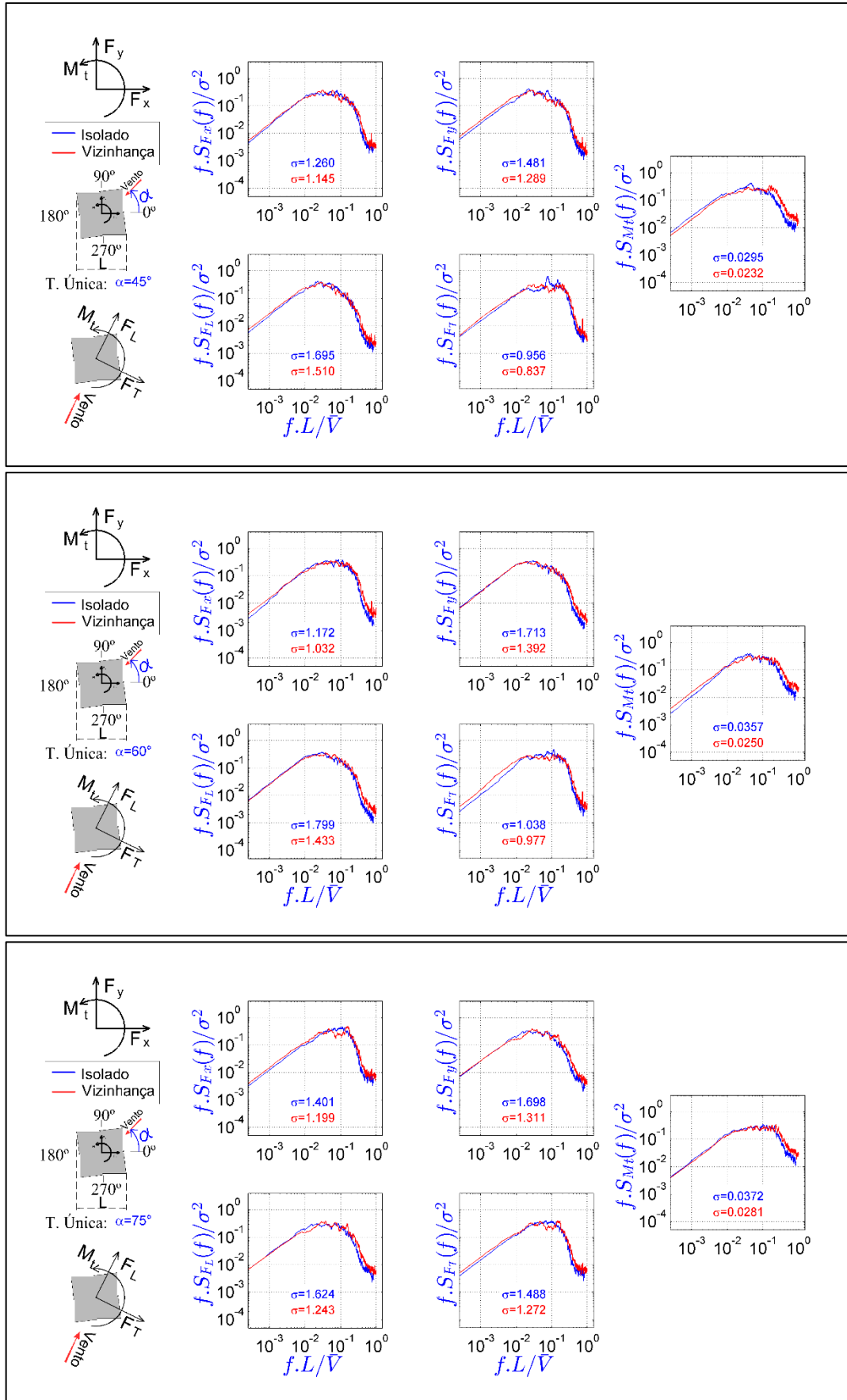


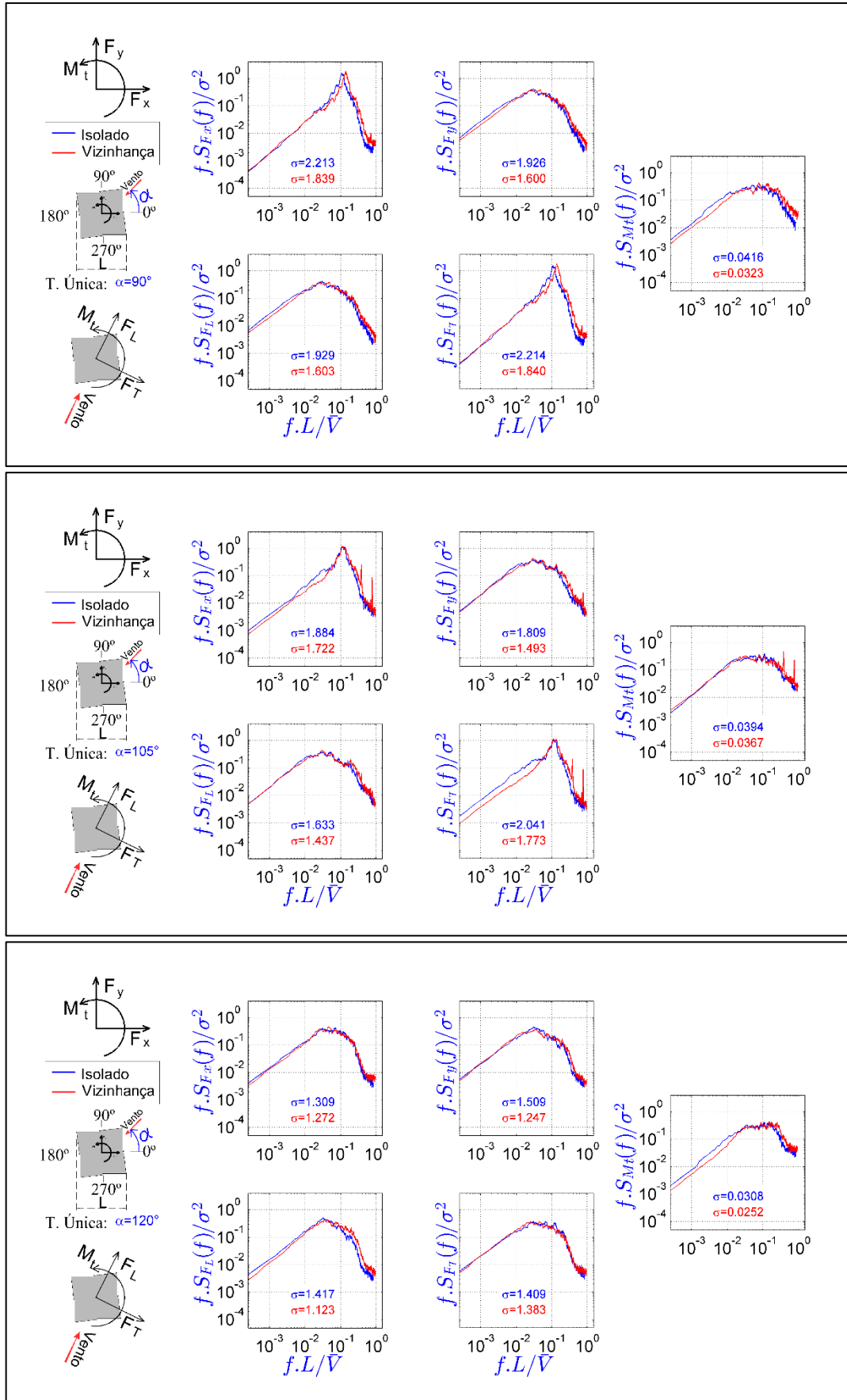


APÊNDICE C – Espectros de força – Empreendimento II

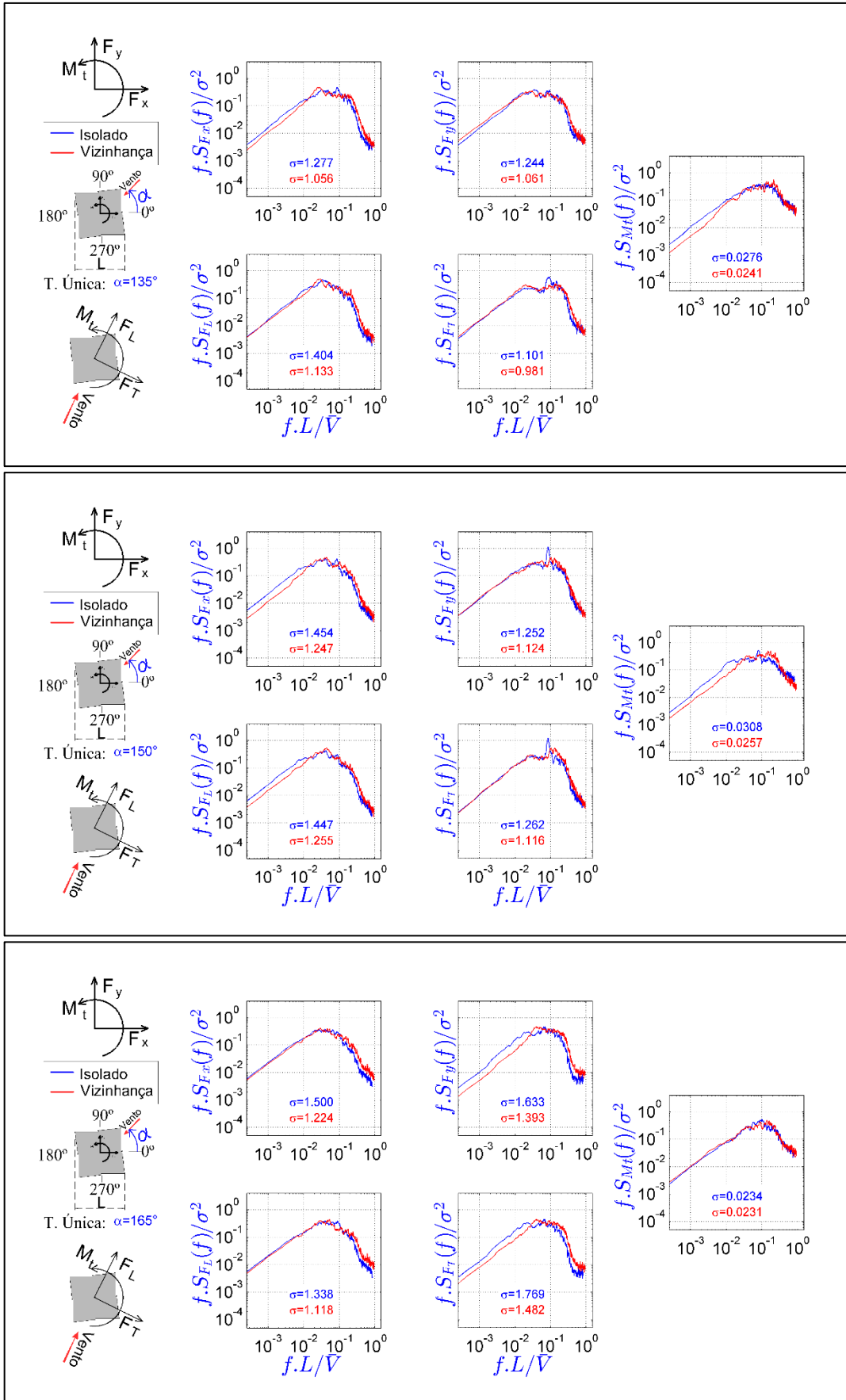
Espectros de força nas direções x e y, nas direções longitudinal e transversal a incidência do vento e momento torçor para o empreendimento II - incidências de 0° a 345°

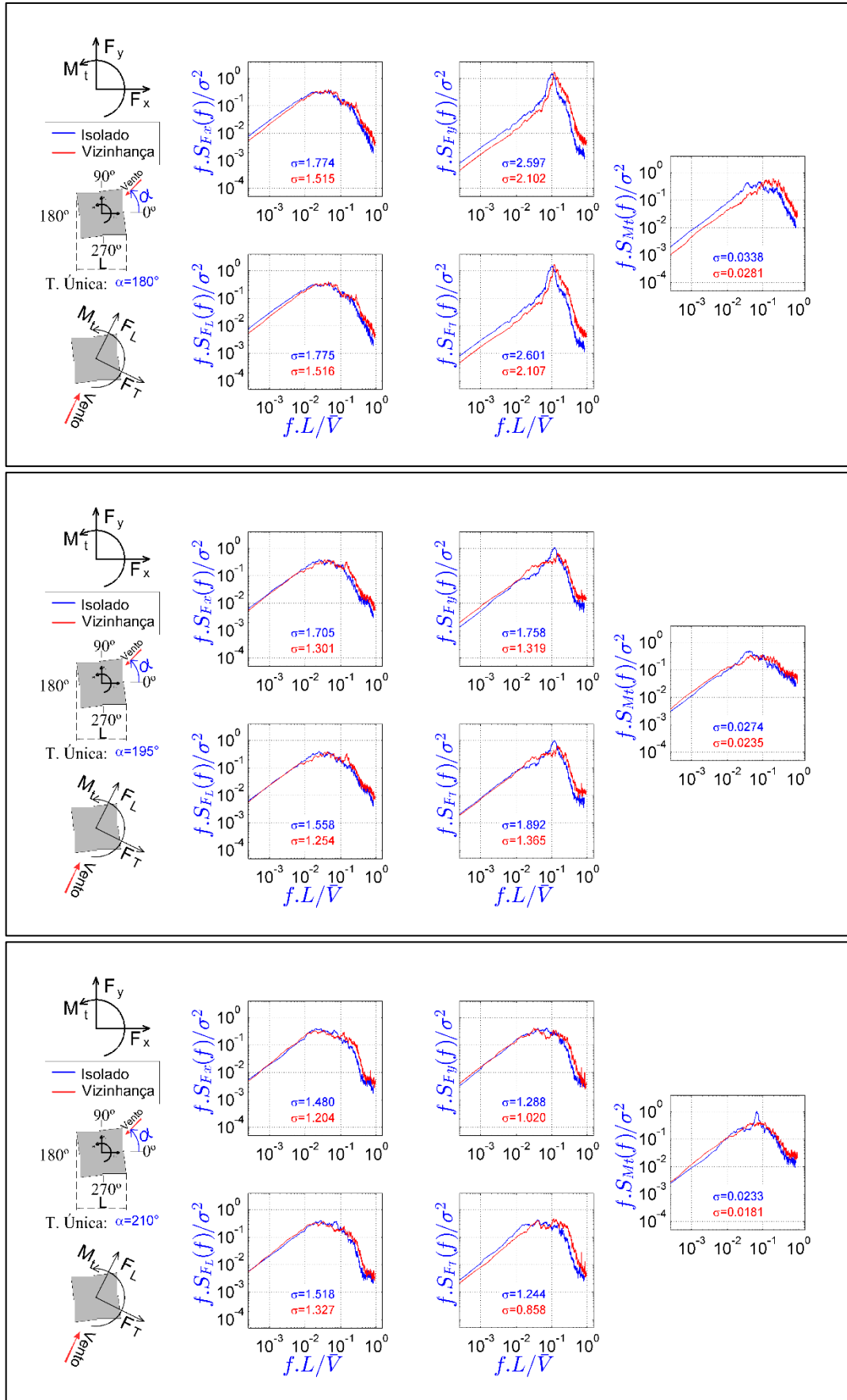




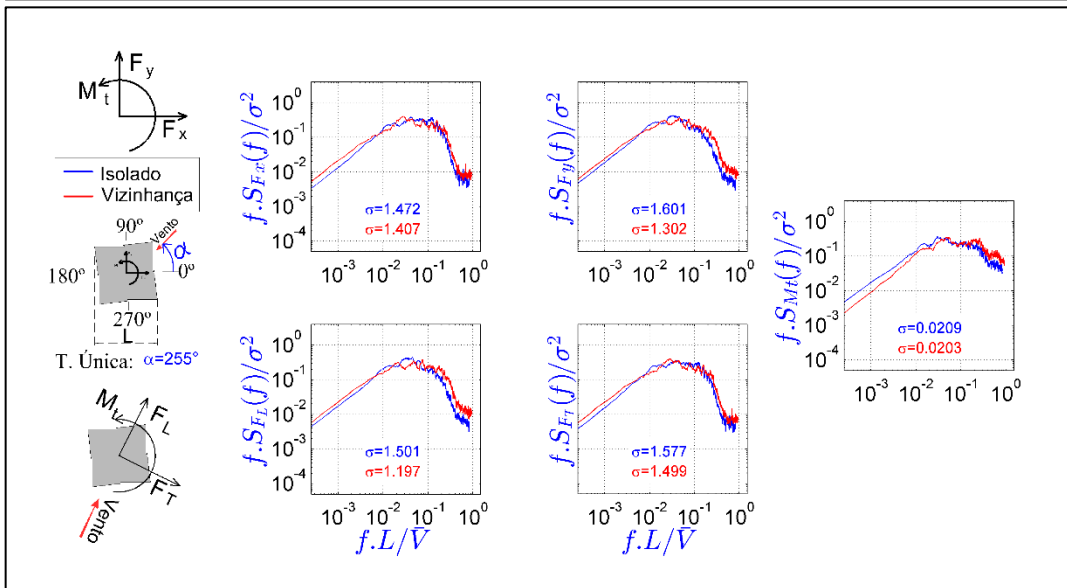
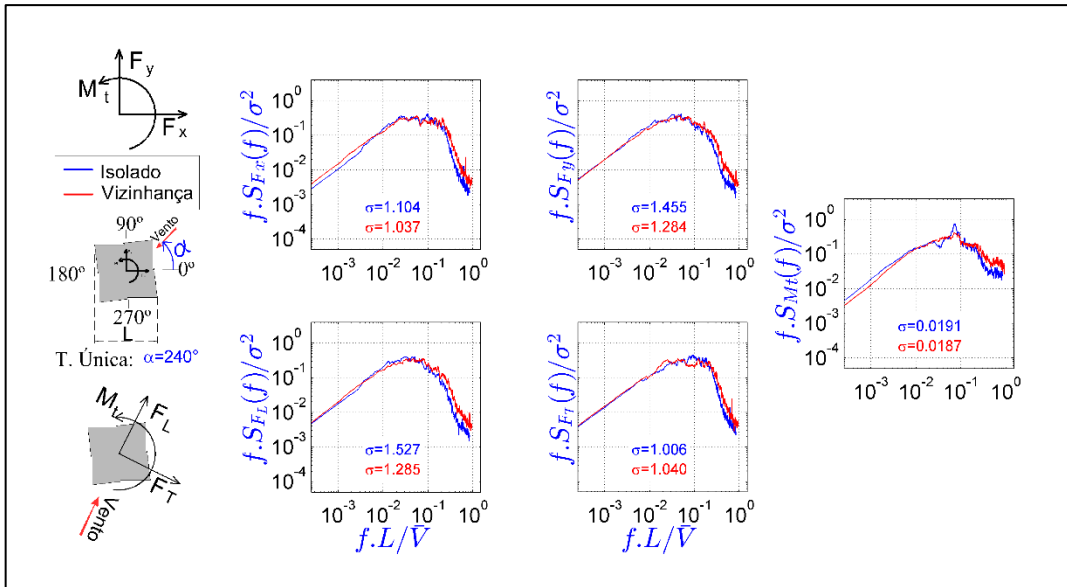
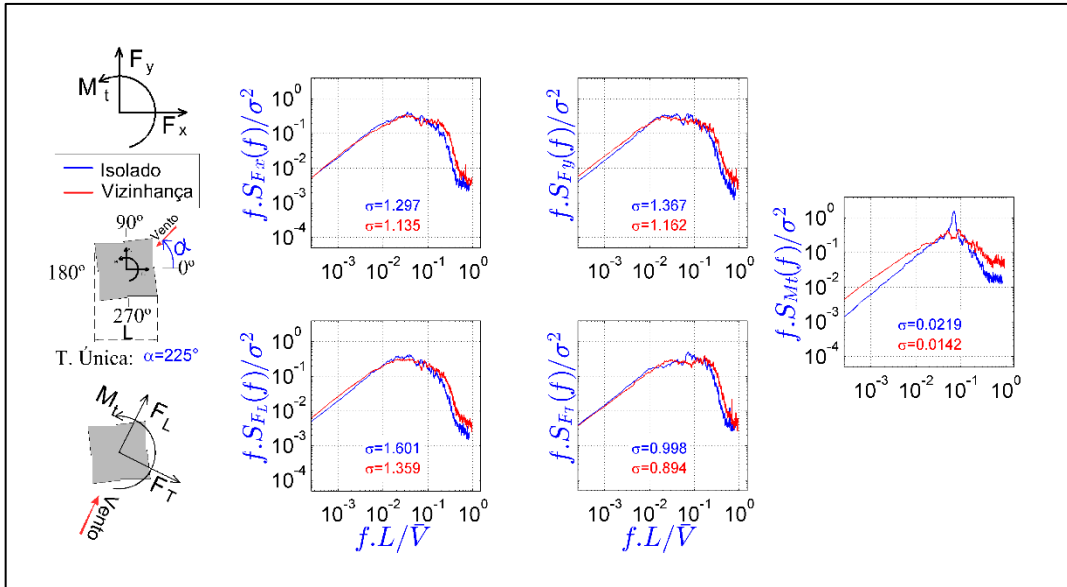


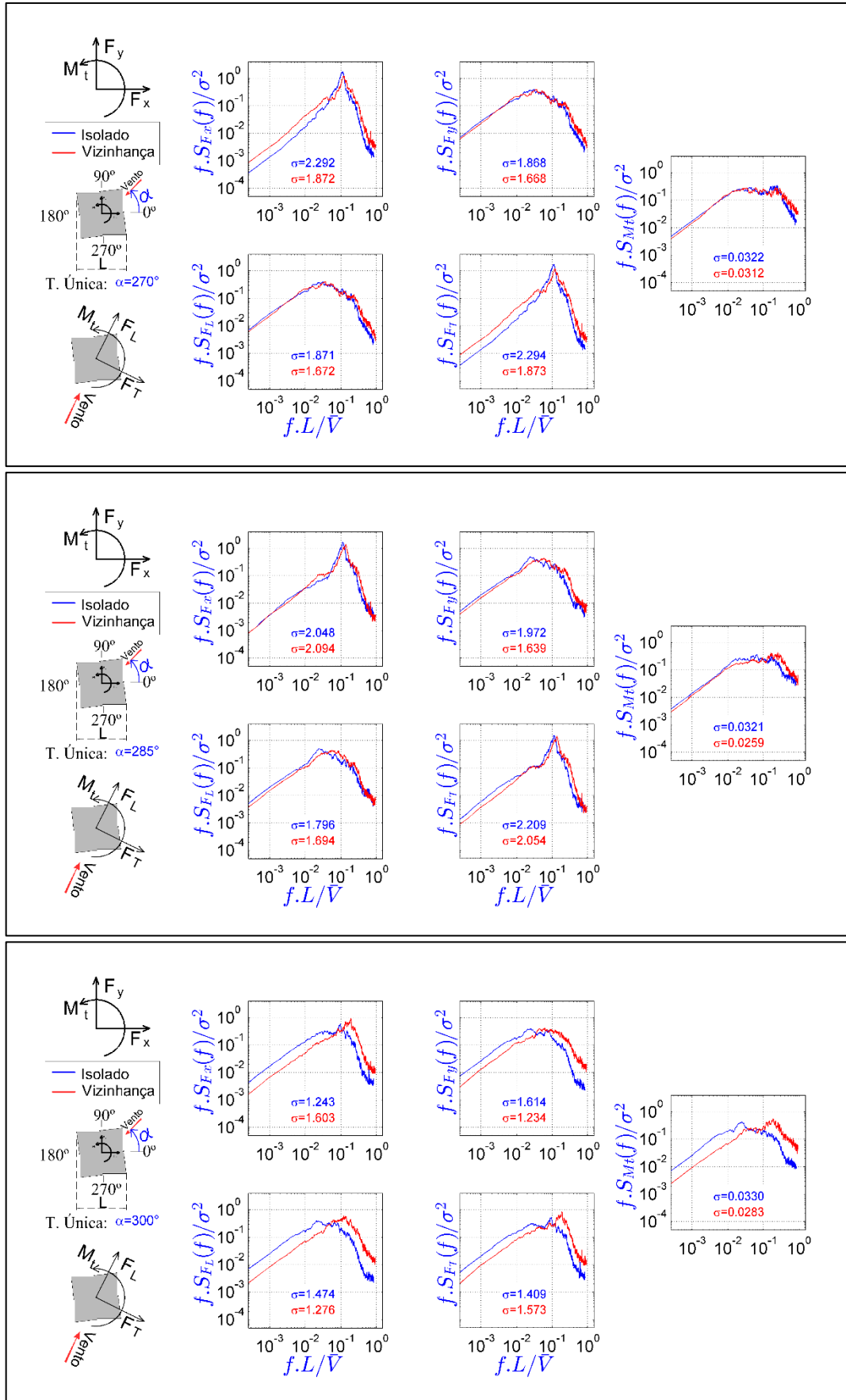
Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento



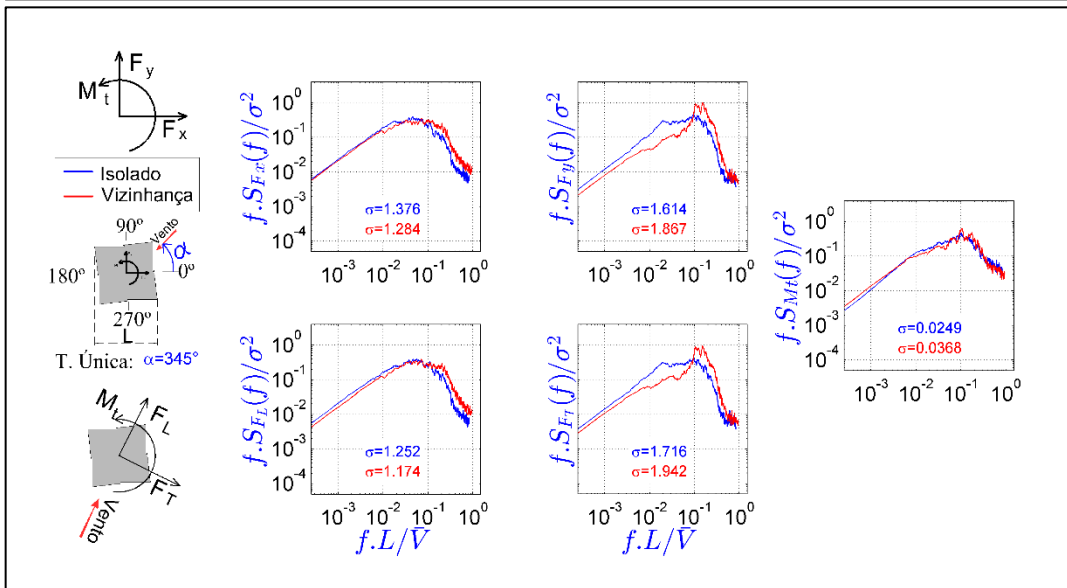
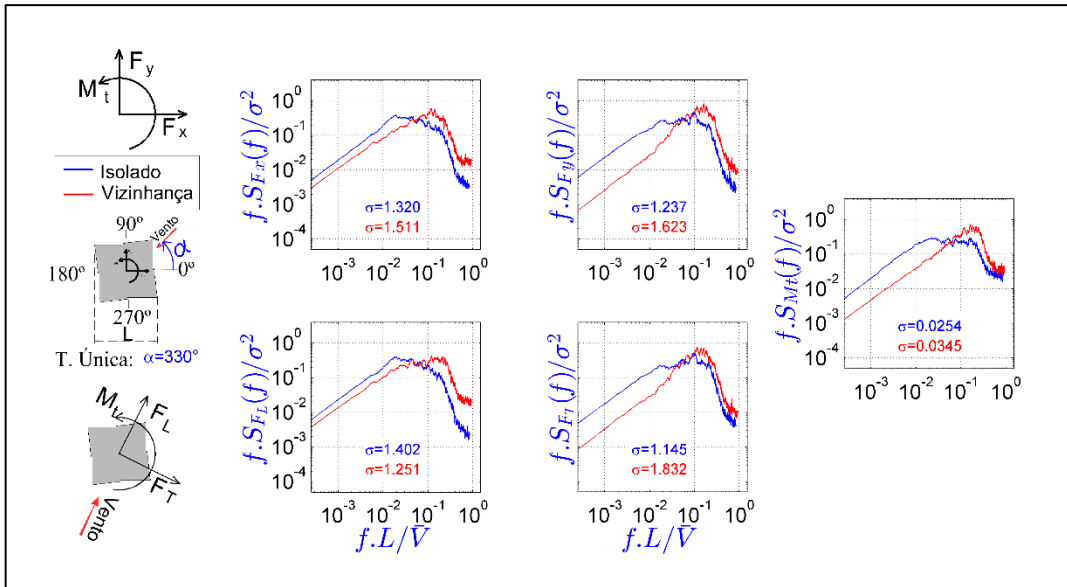
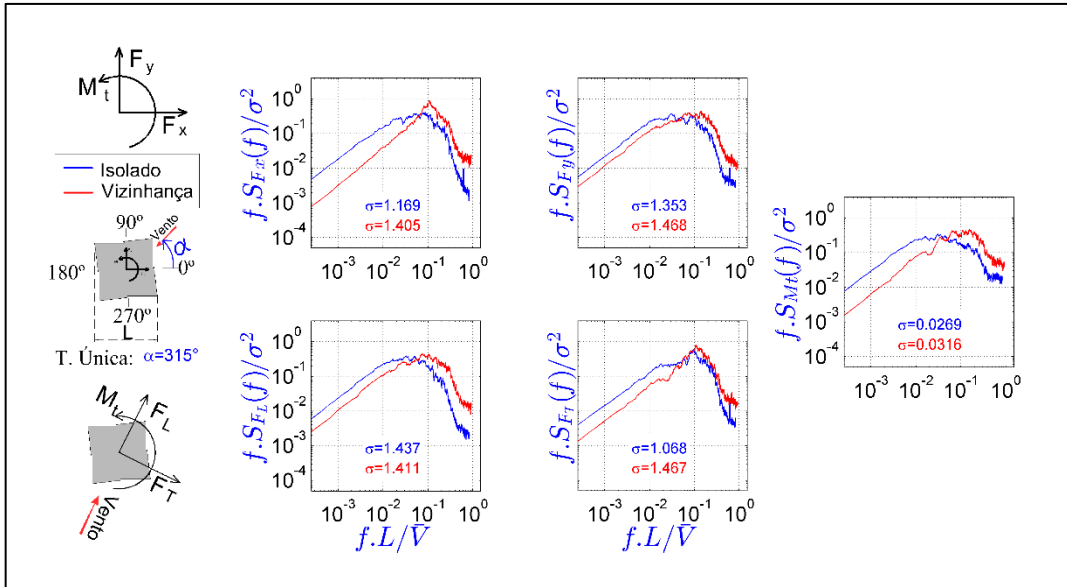


Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento



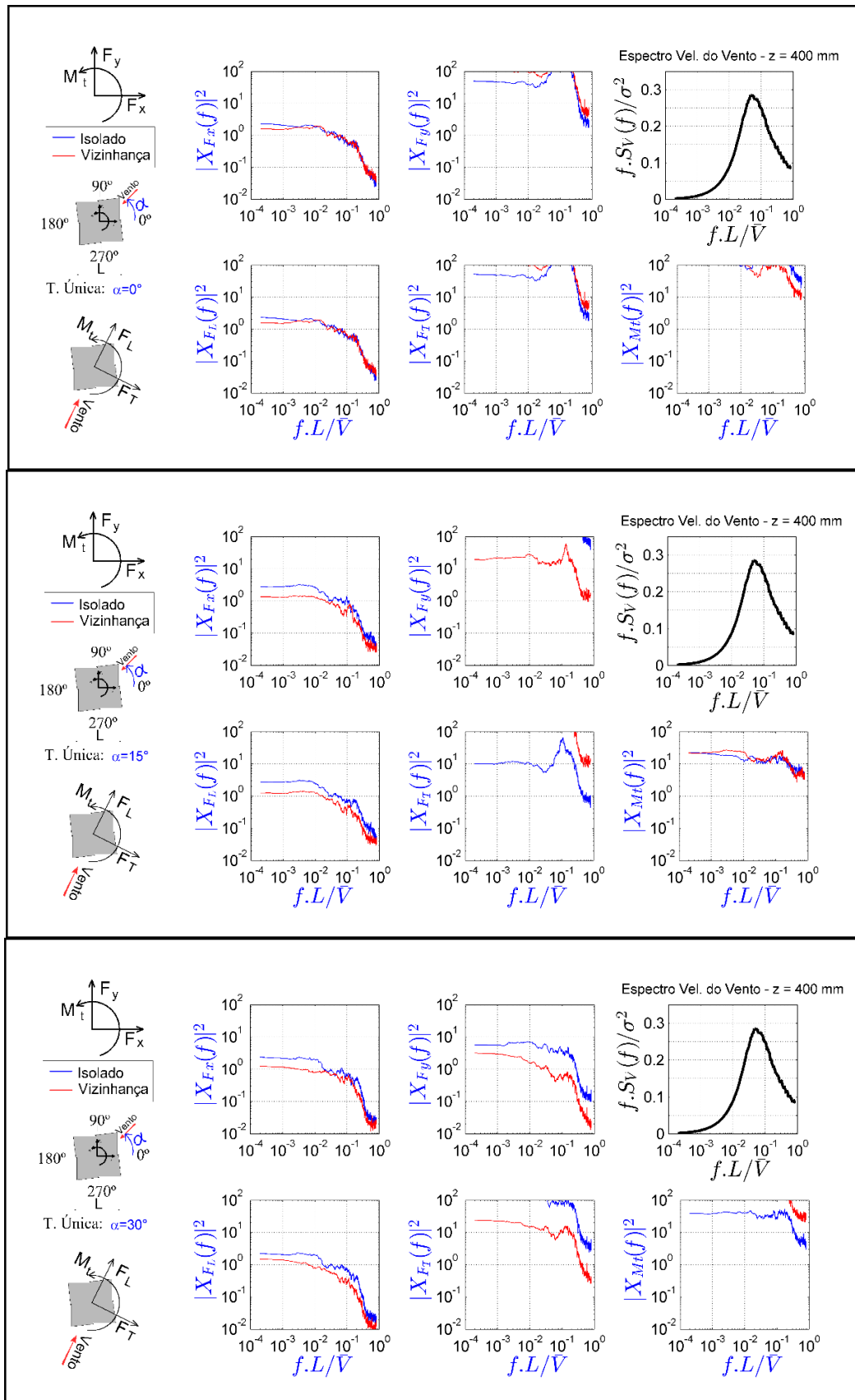


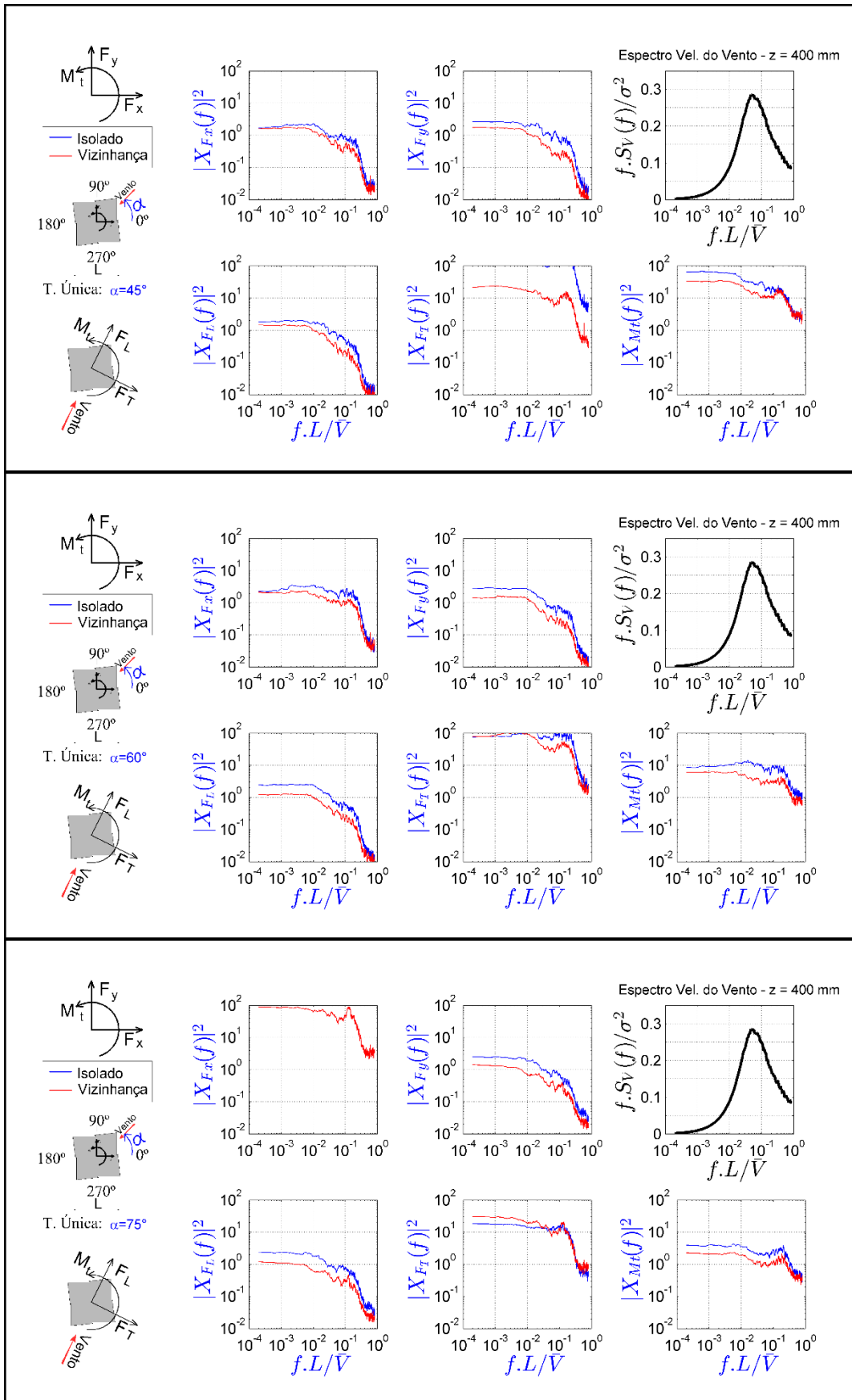
Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento



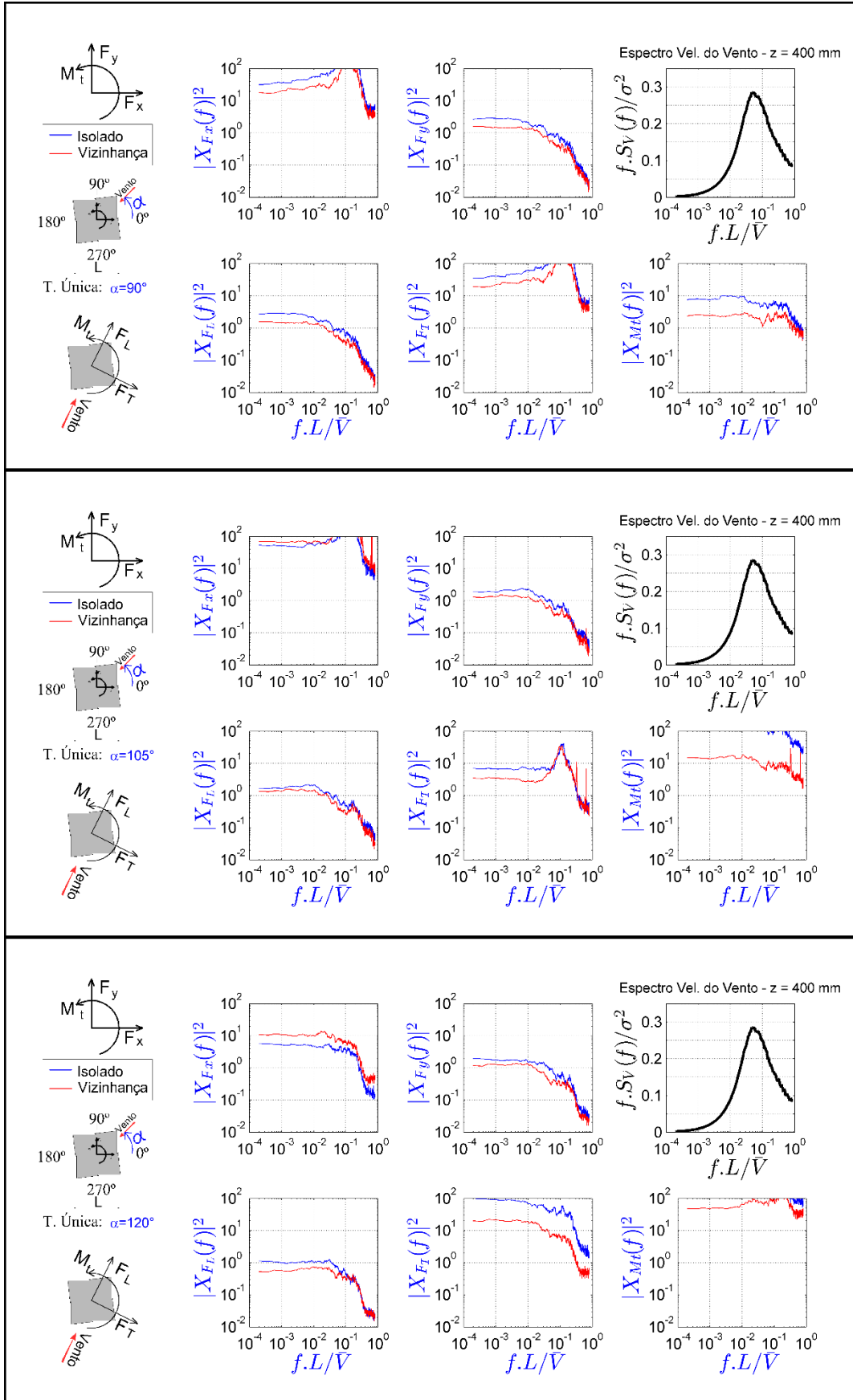
APÊNDICE D – Funções de admitância aerodinâmica - Empreendimento II

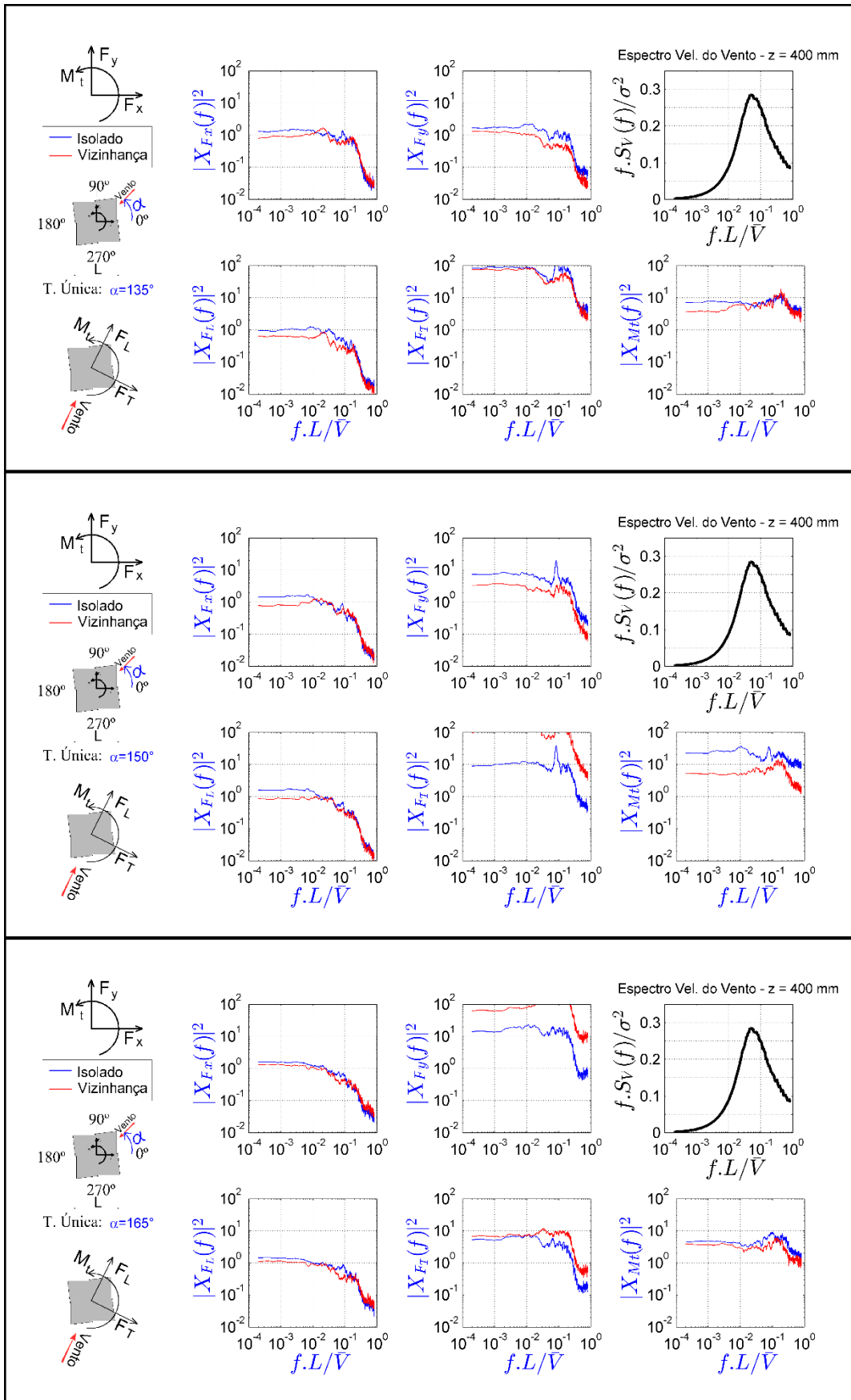
Funções de admitância aerodinâmica nas direções x e y, nas direções longitudinal e transversal a incidência do vento e momento torçor para o empreendimento II - incidências de 0° a 345°



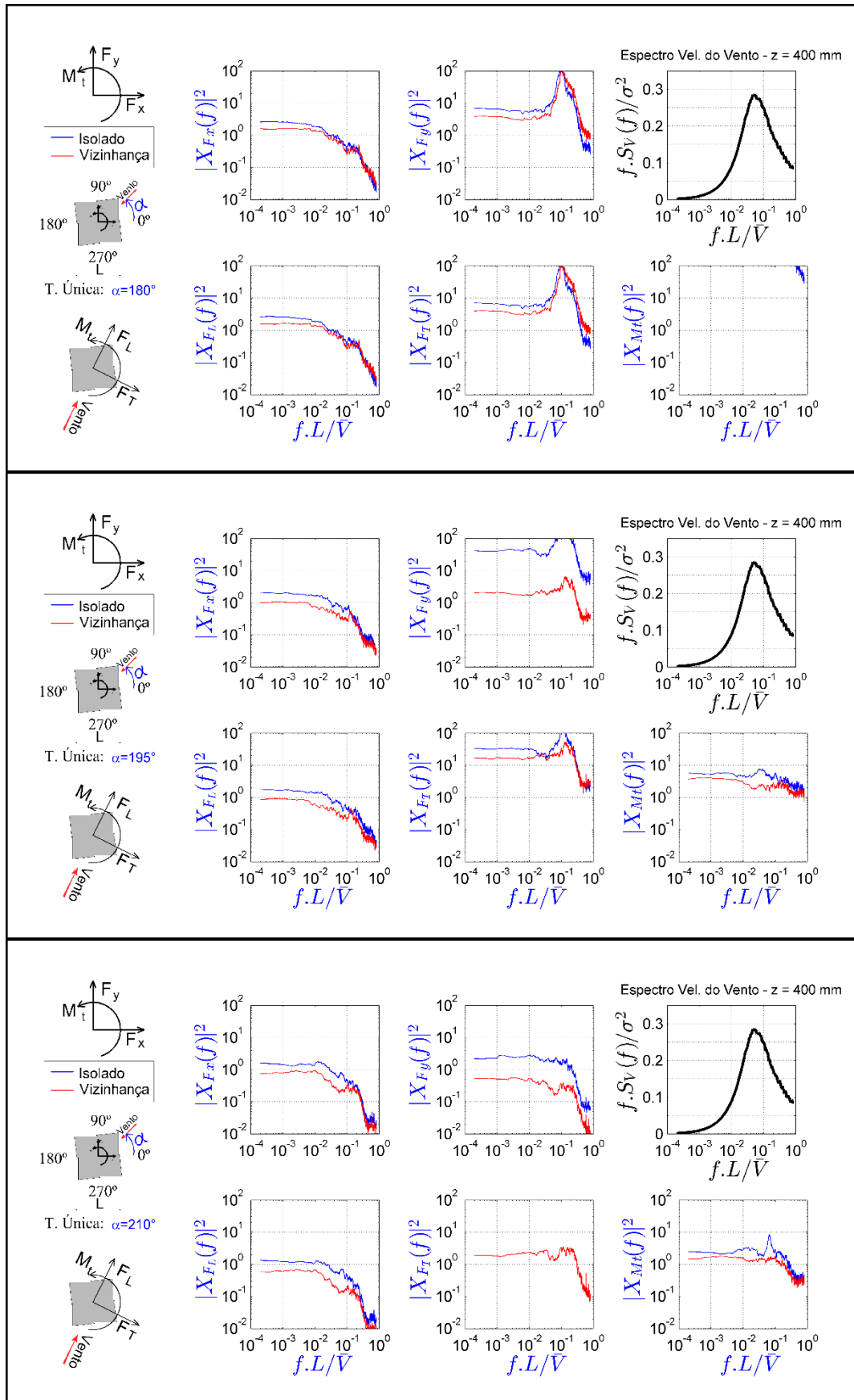


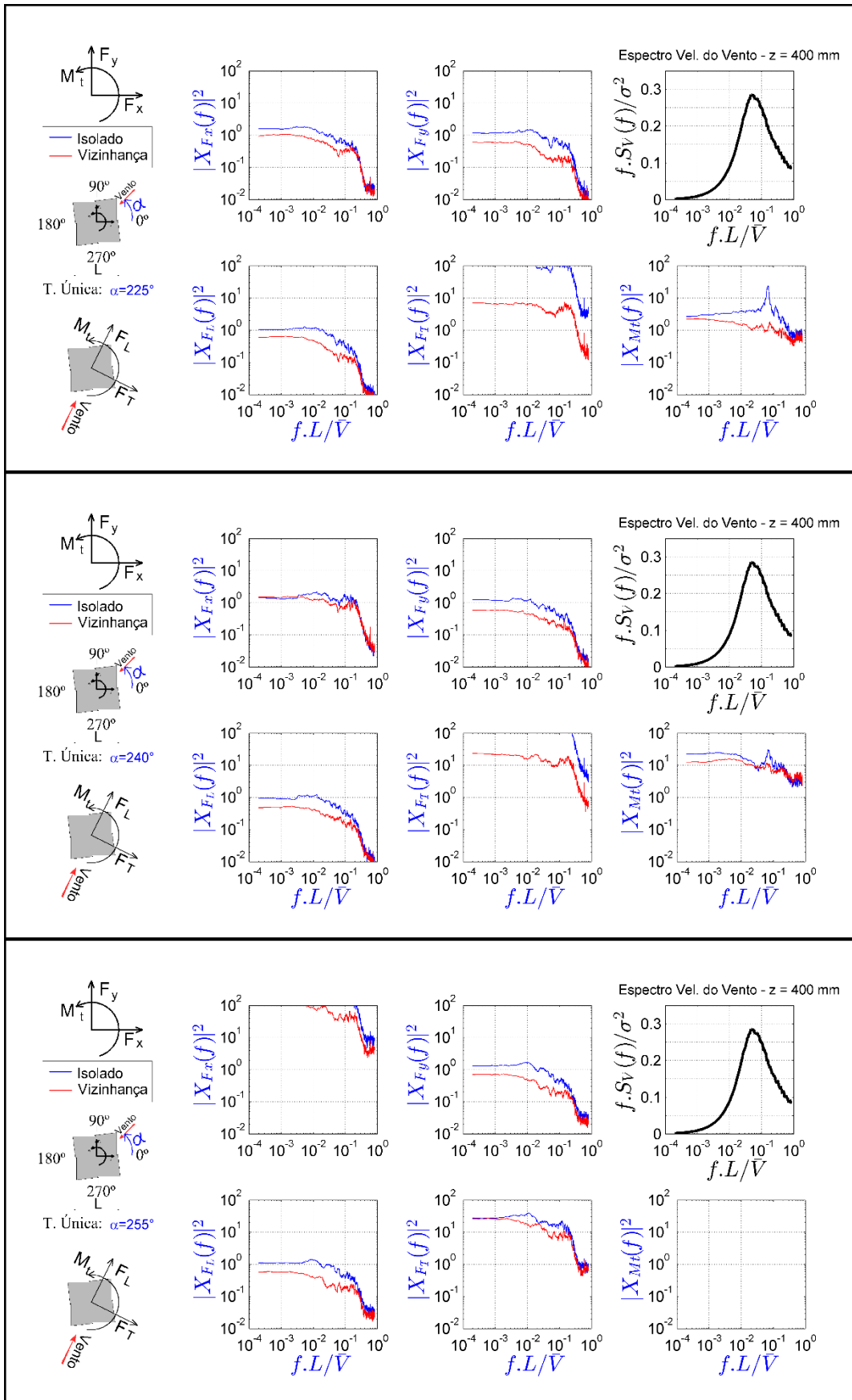
Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento



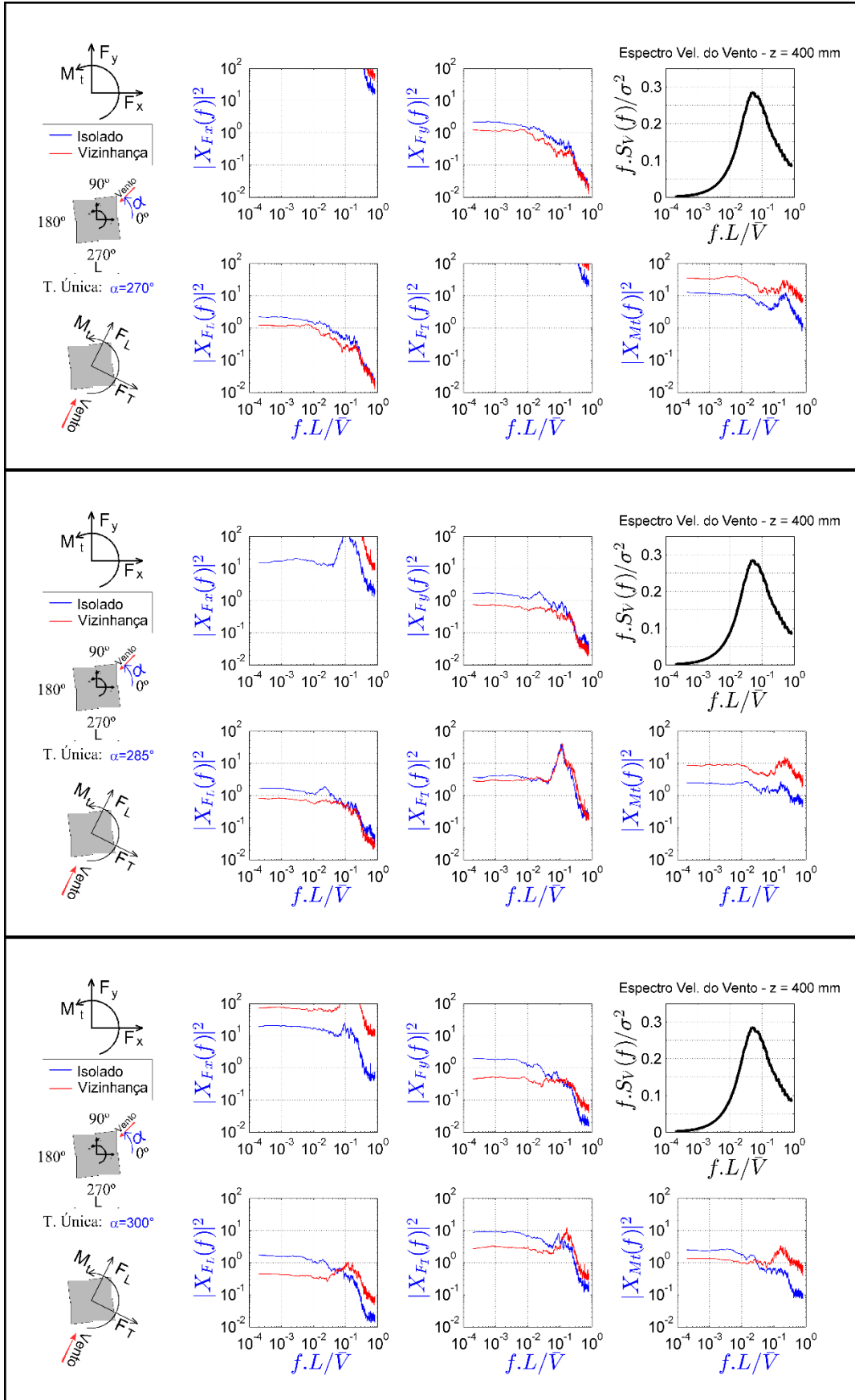


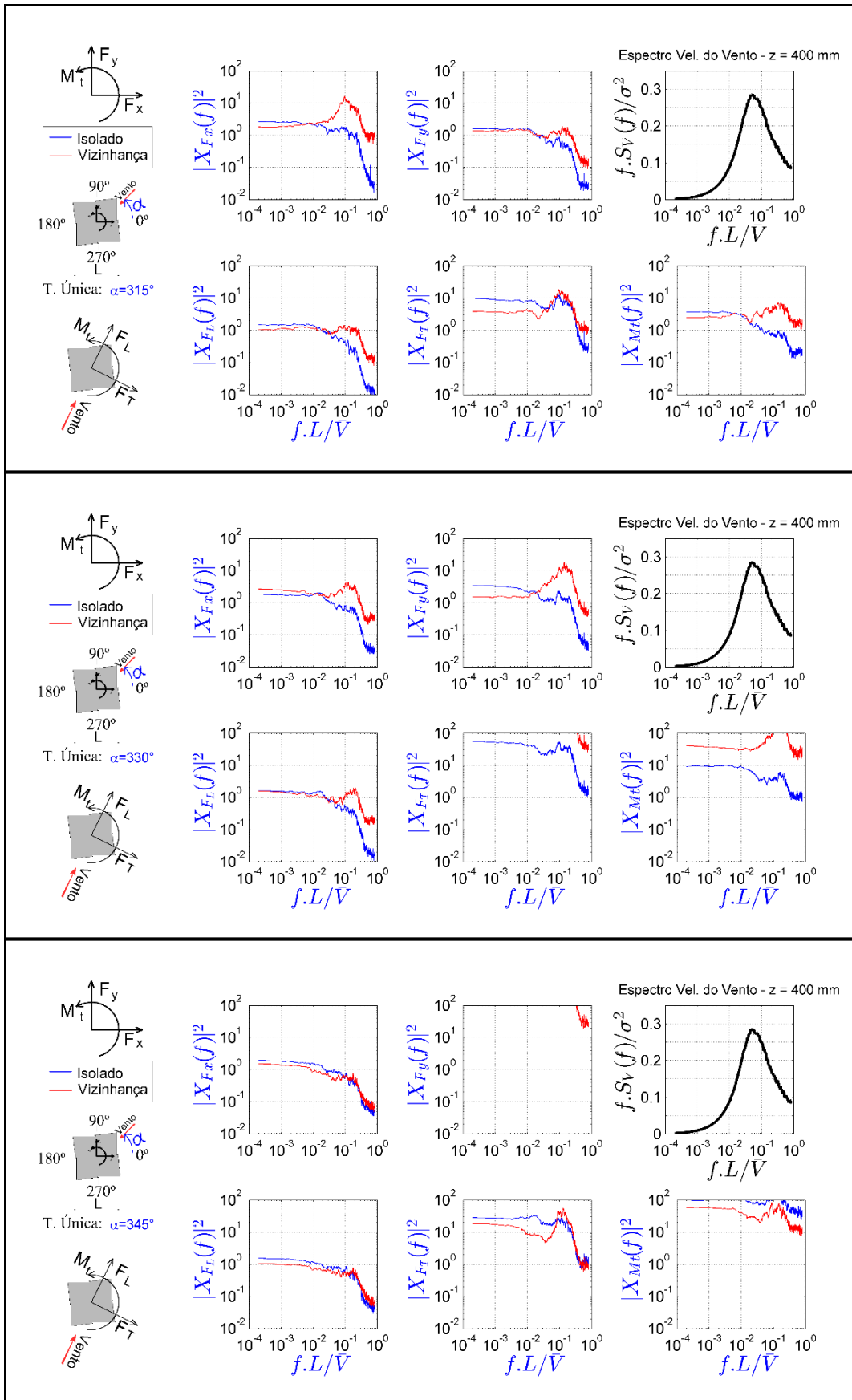
Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento





Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento





Caracterização aerodinâmica de edifícios através do espectro das cargas totais medidas em túnel de vento