

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

CAIO DE BRITTO

**ANÁLISE EM TÚNEL DE VENTO DO COMPORTAMENTO
AERODINÂMICO DE UM EDIFÍCIO ALTO A PARTIR DA
INSERÇÃO DE UMA ABERTURA DE GRANDES
DIMENSÕES NO TOPO**

Porto Alegre

2022

CAIO DE BRITTO

**ANÁLISE EM TÚNEL DE VENTO DO COMPORTAMENTO
AERODINÂMICO DE UM EDIFÍCIO ALTO COM UMA
ABERTURA DE GRANDES DIMENSÕES NO TOPO**

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

Orientador: Acir Mércio Loredo-Souza

Porto Alegre

2022

CIP - Catalogação na Publicação

de Britto, Caio
ANÁLISE EM TÚNEL DE VENTO DO COMPORTAMENTO
AERODINÂMICO DE UM EDIFÍCIO ALTO A PARTIR DA INSERÇÃO
DE UMA ABERTURA DE GRANDES DIMENSÕES NO TOPO / Caio de
Britto. -- 2022.
165 f.
Orientador: Acir Mércio Loredo-Souza.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,
BR-RS, 2022.

1. Vento. 2. Edifícios altos. 3. Aerodinâmica das
construções. I. Mércio Loredo-Souza, Acir, orient.
II. Título.

CAIO DE BRITTO

**ANÁLISE EM TÚNEL DE VENTO DO COMPORTAMENTO
AERODINÂMICO DE UM EDIFÍCIO ALTO COM UMA
ABERTURA DE GRANDES DIMENSÕES NO TOPO**

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

Porto Alegre, 30 de junho de 2022

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

Prof. Lucas Festugato
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Alexandre Luis Braun (UFRGS)
D.Sc., Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

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

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

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

Dedico este trabalho aos meus pais, Alvaro e Denize.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Alvaro e Denize, e à minha namorada Luciane pelo apoio incondicional que prestam durante toda minha caminhada.

Agradeço ao Prof. Acir Mércio Loredou-Souza, meu orientador, pela tutoria, disponibilidade e ensinamentos pelos quais sou extremamente grato.

Agradeço à equipe do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC – UFRGS).

Agradeço ao CNPq pela bolsa de estudos.

O momento em que você aceita total responsabilidade por tudo em sua vida é o momento em que você reivindica o poder para mudar qualquer coisa em sua vida.

Hal Elrod

RESUMO

O anseio do ser humano pelas alturas, aliado ao desenvolvimento contínuo da Engenharia, permitiu a disseminação de estruturas alteadas pelo mundo. Em edifícios altos, o carregamento imposto pelo vento é de grande relevância, sendo, muitas vezes, o carregamento mais significativo para o projeto. Nesse sentido, dá-se destaque à implementação e desenvolvimento de técnicas capazes de mitigar a ação do vento, modificando propriedades estruturais e/ou aerodinâmicas dos edifícios. Dentre as diversas possibilidades que hoje existem, este trabalho tem o intuito de estudar a inserção de grandes aberturas em edifícios altos. Essa modificação aerodinâmica já foi estudada por alguns autores e implementada em vários edifícios do mundo; porém a exploração da técnica no âmbito nacional é inexistente. O presente trabalho analisa a linha do tempo das pesquisas sobre o tema a fim de entender quais fatores mais influenciam no sucesso da implementação desse recurso. Foi desenvolvido um estudo em túnel de vento de um edifício brasileiro, com a inserção de aberturas de grandes dimensões (4% da área da fachada) de diferentes relações altura:base. Foram criados quatro modelos, sendo um deles sem abertura e os demais com aberturas de mesma área, porém com diferentes relações de altura e largura. Após o ensaio, foram analisados coeficientes de força e momento global para todos modelos, além de espectros de potência de forças e momentos para cada ângulo de incidência do vento analisado. O modelo que apresentou maiores reduções de coeficientes de força, momento e pico de densidade espectral foi o modelo com abertura mais verticalizada (maior relação altura:base).

Palavras-chave: Grandes Aberturas; Engenharia do Vento; Edifícios Altos; Túnel de Vento.

ABSTRACT

The human being's yearning for heights, allied to the continuous development of Engineering, allowed the dissemination of tall structures around the world. In high-rise buildings, the load imposed by the wind is of great relevance, being, often, the most significant load for the project. In this sense, emphasis is given to the implementation and development of techniques capable of mitigating the action of the wind, modifying structural and/or aerodynamic properties of buildings. Among the various possibilities that exist today, this work aims to study the insertion of large openings in tall buildings. This aerodynamic modification has already been studied by some authors and implemented in several buildings around the world; however, the exploitation of the technique at the national level is non-existent. The present work analyzes the timeline of research on the subject in order to understand which factors most influence the success of the implementation of this resource. A study was carried out in a wind tunnel of a Brazilian building, with the insertion of large openings (4% of the façade area) of different slenderness. Four models were created, one of them without opening and the others with openings of the same area, but with different height and width ratios. After the test, coefficients of force and global moment were analyzed for all models, in addition to power spectra of forces and moments for each angle of incidence of the analyzed wind. The model that showed the greatest reductions in force, moment and peak spectral density coefficients was the model with the most vertical opening (greater slenderness).

Palavras-chave: Great Openings; Wind Engineering; Tall Buildings; Wind tunnel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de modificações nos cantos de uma planta quadrada	15
Figura 2 – Taipei 101	16
Figura 3 – Modificações nos cantos da planta do <i>Taipei 101</i>	16
Figura 4 – (a) Afunilamento vertical e (b) Variações na seção em determinadas cotas	17
Figura 5 – <i>Sears Tower</i> (Chicago, Estados Unidos da América)	18
Figura 6 – <i>Burj Khalifa</i> (Dubai, Emirados Árabes Unidos)	18
Figura 7 – <i>Shanghai Tower</i> (Xangai, China).....	19
Figura 8 - <i>The Cayan Tower Dubai</i> (Dubai, Emirados Árabes Unidos).....	19
Figura 9 – Kingdom Centre (Riad, Arábia Saudita)	21
Figura 10 – Kingdom Centre e vizinhança (Riad, Arábia Saudita)	21
Figura 11 – SWFC (Xangai, China)	22
Figura 12 – Parcela superior do SWFC (Xangai, China)	22
Figura 13 – 432 Park Avenue (Nova Iorque, Estados Unidos da América)	23
Figura 14 – Ensaio no túnel de vento RWDI do 432 Park Avenue	23
Figura 15 – Espectro de Momentos Fletores na base na direção perpendicular ao vento.....	25
Figura 16 – Deslocamento rms normalizada no topo do edifício na direção perpendicular ao vento	26
Figura 17 – Seção do modelo construído para o teste do estudo de pressões.....	28
Figura 18 – Espectro de potência de força de algumas faces	29
Figura 19 – Coeficiente rms de força na direção perpendicular ao vento (faces selecionadas e combinações)	30
Figura 20 – Modelos 1 a 6 que foram estudados em túnel de vento.....	31
Figura 21 – Modelos 1 a 4 que foram estudados em túnel de vento.....	32
Figura 22 – Coeficiente aerodinâmico de força flutuante para (a) o eixo x e (b) para o eixo Y	33
Figura 23 – Espectros de potência da flutuação da força do vento na direção Y , para o vento a (a) 0° e (b) de 10° a 30°	34
Figura 24 – Gráficos de comparação entre σ_{Xd} , σ_{Xd} e σ_{Yd} , σ_{Yd}	35
Figura 25 – Deslocamento dinâmico do modelo com 0,38% de amortecimento.....	37
Figura 26 – Deslocamento dinâmico do modelo com 2,6% de amortecimento.....	37
Figura 27 – Comparação do espectro de potência para o modelo sem aberturas e com aberturas nas quatro faces (<i>lock-in phenomenon</i>).....	38
Figura 28 - Alguns dos modelos testados por Kikitsu e Okada (2003)	39
Figura 29 - Tipos de abertura testados.....	39
Figura 30 - Modelos com diferentes formatos e dimensões de aberturas testados	40
Figura 31 - Modelos dotados de abertura testados	42
Figura 32 - Espectros de potência para os modelos com aberturas (a) transversais e (b) oblíquas	43
Figura 33 – Modelos ensaiados em túnel de vento.....	44
Figura 34 – Espectros de potência de momentos na base.....	45
Figura 35 – Camada Limite Atmosférica	49
Figura 36 – Registro e velocidade do vento indicando a parcela média e a parcela flutuante.....	50
Figura 37 – Representação gráfica de um espaço amostral genérico	54
Figura 38 - Definição de coeficiente de pressão externa	59
Figura 39 - Decomposição da força horizontal do vento segundo (a) a direção do vento e (b) segundo os eixos x e Y	63
Figura 40 - Variação do coeficiente de arrasto para corpo paralelepípedo	65
Figura 41 - Tipos de carregamento devido ao vento	66
Figura 42 - Diagrama de resposta de pontes em função da velocidade do vento (linha contínua = escoamento uniforme; linha tracejada = escoamento turbulento)	68
Figura 43 - Mecanismo de formação de desprendimento de vórtices.....	71
Figura 44 - Impacto do desprendimento de vórtices na resposta transversal de uma estrutura	71
Figura 45 - Aproximação de uma (a) função periódica por uma (b) soma de funções harmônicas.....	74
Figura 46 - Espectro de frequências	75
Figura 47 - Processo Probabilístico de Davenport.....	76
Figura 48 - Espectros de Davenport, Harris, Kaimal e Von Kármán	79
Figura 49 - Função de Admitância Aerodinâmica em função da frequência.....	80
Figura 50 - Procedimento de cálculo da densidade espectral da resposta no domínio da frequência	86
Figura 51- Planta baixa do Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann	90
Figura 52 - Corpos semelhantes e condições de semelhança	92
Figura 53 - Dispositivos utilizados para simulação do vento natural	93

Figura 54 – Perfil de velocidades médias, intensidade de turbulência e escala da componente longitudinal da turbulência para simulações no Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann	94
Figura 55 - Edifício a ser analisado (modelo não modificado) (a) vista lateral (b) vista frontal	96
Figura 56 - Edifício em planta	97
Figura 57 - Modelo M0	99
Figura 58 - Modelos M1, M2 e M3	100
Figura 59 - Instrumentação dos modelos M1, M2 e M3	101
Figura 60 - Modelo M1	102
Figura 61 - Coeficientes C_x dos modelos M0 e M1 em função do ângulo de incidência ensaiado	104
Figura 62 - Coeficientes C_y dos modelos M0 e M1 em função do ângulo de incidência ensaiado	105
Figura 63 - Coeficientes C_x dos modelos M0 e M2 em função do ângulo de incidência ensaiado	106
Figura 64 - Coeficientes C_y dos modelos M0 e M2 em função do ângulo de incidência ensaiado	107
Figura 65 - Coeficientes C_x dos modelos M0 e M3 em função do ângulo de incidência ensaiado	108
Figura 66 - Coeficientes C_y dos modelos M0 e M3 em função do ângulo de incidência ensaiado	109
Figura 67 - Comparação C_x entre os modelos M0, M1, M2 e M3	110
Figura 68 - Comparação C_y entre os modelos M0, M1, M2 e M3	111
Figura 69 - Coeficientes C_t dos modelos M0, M1, M2 e M3 em função do ângulo de incidência ensaiado	112
Figura 70 - Espectro de potência F_x para incidência de 60°	117
Figura 71 - Espectro de potência F_x para incidência de 90°	118
Figura 72 - Espectro de potência F_x para incidência de 105°	118
Figura 73 - Espectro de potência F_x para incidência de 120°	118
Figura 74 - Espectro de potências F_x para incidência de 270°	120
Figura 75 - Espectro de potência F_x para incidência de 300°	121
Figura 76 - Espectro de potência F_x para incidência de 330°	122
Figura 77 - Espectro de potência F_y para incidência de 0°	123
Figura 78 - Espectro de potência F_y para incidência de 150°	124
Figura 79 - Espectro de potência F_y para incidência de 165°	125
Figura 80 - Espectro de potência F_y para incidência de 180°	125
Figura 81 - Espectro de potência F_y para incidência de 270°	126
Figura 82 - Espectro de potência F_y para incidência de 315°	127
Figura 83 - Espectro de potência F_y para incidência de 330°	127
Figura 84 - Espectro de potência M_t a 0°	127
Figura 85 - Espectro de potência M_t a 15°	128
Figura 86 - Espectro de potência M_t a 180°	129
Figura 87 - Espectro de potência M_t a 195°	130
Figura 88 - Espectro de potência M_t a 240°	131
Figura 89 - Espectro de potência M_t a 255°	132
Figura 90 - Espectro de potência M_t a 270°	132
Figura 91 - Faixas dos modelos analisadas	133
Figura 92 - Análise por faixa de F_x na incidência 105°	134
Figura 93 - Análise por faixa de F_x na incidência 240°	135
Figura 94 - Análise por faixa de F_x na incidência 270°	136
Figura 95 - Análise por faixa de F_y na incidência 165°	137
Figura 96 - Análise por faixa de F_y na incidência 180°	138
Figura 97 - Análise por faixa de F_y na incidência 270°	139
Figura 98 - Gráfico que relaciona a razão altura:base da abertura com coeficiente de força C_x	142
Figura 99 - Gráfico que relaciona a razão altura:base da abertura com coeficiente de força C_y	142

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação entre o perfil em lei de potência e o perfil em lei logarítmica.....	52
Quadro 2 – Descrição das mesas do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do modelo M0.....	98
Tabela 2 – Dimensões das aberturas dos modelos.....	100
Tabela 3 – Características dos modelos M1, M2 e M3.....	101
Tabela 4 – Coeficientes de força x e y máximos e mínimos dos modelos M0, M1, M2, M3.....	111
Tabela 5 – Coeficientes de torção máximos e mínimos dos modelos M0, M1, M2 e M3..	113
Tabela 6 – Coeficientes de Força C_x nos modelos M0, M1, M2 e M3 para incidências de 0° , 90° , 180° e 270°	141
Tabela 7 – Coeficientes de Força C_y nos modelos M0, M1, M2 e M3 para incidências de 0° , 90° , 180° e 270°	142

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BLWTL – *Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory*

CAARC - *Commonwealth Advisory Aeronautical Council*

CLA – Camada Limite Atmosférica

CTBUH – *Council on Tall Buildings and Urban Habitat*

FFT – *Fast Fourier Transform*

NBR – Norma Brasileira

rms – *Root Mean Square*

RWDI – *Rowan Williams Davies & Irwin Inc*

SWFC – *Shanghai World Financial Center*

LISTA DE SÍMBOLOS

$\overline{\ddot{u}}_t$ – vetor de acelerações (m/s²);

$\overline{\dot{u}}_t$ – vetor de velocidades (m/s);

\overline{F}_t – vetor de forças (N);

\overline{q}_k – vetor de forma modal (adimensional);

\overline{u}_T – resposta média (m);

\overline{u}_k – vetor da resposta em deslocamentos da estrutura no modo k (m);

\overline{u}_t – vetor de deslocamentos (m);

\overline{z}_{ij} – altura média das duas zonas de integração (m).

$\widetilde{\sigma}_{Xd} = \sigma_{Xd}$ – resposta rms em x (m).

$\widetilde{\sigma}_{Yd} = \sigma_{Yd}$ – resposta rms em y (m).

\overline{F} – parcela média da força do vento (N);

$I_i(\vec{r})$ – intensidade local de turbulência (adimensional);

$I_{io}(\vec{r})$ – intensidade normalizada de turbulência (adimensional);

\overline{V} – Parcela de Velocidade Média do vento (m/s);

$\overline{V}(z_{ref})$ – velocidade média na altura de referência (m/s);

$\overline{V}(z)$ – velocidade média na altura z (m/s);

\vec{r} – vetor posição (m);

$\bar{x} = \langle x(t) \rangle$ – valor médio da função x(t) (dimensão da variável);

$\overline{x^2} = \langle x^2(t) \rangle$ – valor quadrado médio da função x(t) (dimensão da variável)²;

β_k – razão de frequência ressonante (adimensional);

ζ_k – razão de amortecimento crítico (adimensional);

σ_M – valor *rms* do momento fletor flutuante (kNm);

$\sigma_i(\vec{r})$ – desvio padrão (dimensão da variável);

$\sigma_x^2 = \langle [x(t) - \bar{x}]^2 \rangle$ – variância (dimensão da variável)²;

A – área de exposição (m²);

$[C]$ – matriz de amortecimento de Rayleigh (kg/s);

C'_F – Coeficiente aerodinâmico da força flutuante (adimensional);

C_a – coeficiente de arrasto (adimensional);

C_k – amortecimento modal (kg/s);

c_p – coeficiente de pressão (adimensional).

c_{pe} – coeficiente de pressão externa (adimensional);

c_{pi} – coeficiente de pressão interna (adimensional);

D – largura do edifício (m);

f – frequência (Hz);

$f(t)$ – função no domínio do tempo;

$F(t)$ – parcela flutuante da força do vento (N);

f_k – frequência de vibração associada ao k-ésimo modo (Hz);

$F_k(t)$ – força modal (N);

f_n - n-ésimo valor da função discretizada no domínio do tempo;

$g = g_T$ – fator de pico (adimensional);

H – altura do edifício (m);

$H_k(f)$ – admitância mecânica (m^2/N^2);

[K] – matriz de rigidez (N/m);

K_k – rigidez modal (N/m);

L – comprimento característico de um corpo (m);

[M] – matriz de massa (kg);

M_k – massa modal (kg);

N – número de pontos de aquisição;

p – parâmetro de rugosidade (adimensional);

$PSD(f)$ - densidade espectral de potência;

q – pressão dinâmica do vento (N/m^2).

q_H – pressão do vento no topo do edifício (kN/m^2);

Re – número de Reynolds (adimensional);

$R_{ij}(f)$ – função de coerência (adimensional);

$R_x(\tau) = \langle x(t)x(t+\tau) \rangle$ – função de autocorrelação (dimensão da variável)²;

S_F – espectro de forças (N);

$S_{F_i F_j}(f)$ – espectro cruzado entre as parcelas flutuantes das forças nas zonas de integração i e j (N);

S_{F_k} – espectro das forças modais (N);

St – número de Strouhal (adimensional);

S_{u_k} – espectro da resposta modal em deslocamentos (m);

S_V – espectro de velocidades (m/s);

T – tamanho do intervalo de tempo medido (s);

u – velocidade característica do escoamento (m/s);

u^* – velocidade de fricção (m/s);

$u_k(t)$ – resposta modal (m);

$v(t)$ – Parcela de velocidade flutuante do vento (m/s);

$V(t)$ – Velocidade do vento (m/s);

V_{ref} – velocidade de normalização (m/s);

x – coordenada cartesiana (m);

y – coordenada cartesiana (m);

y^* – distância adimensional da parede (adimensional);

z – altura (m);

z_0 – rugosidade aerodinâmica (m);

z_{ref} – altura de referência (m);

Δp – pressão efetiva (N/m);

Δp_e – pressão efetiva externa (N/m);

Δp_i – pressão efetiva interna (N/m);

Δr_{ij} – distância entre centros aerodinâmicos de duas zonas de integração (m);

κ – constante de Karman (adimensional);

ν – viscosidade cinemática (s⁻¹).

ρ – massa específica do fluido (kg/m³)

χ_A – função de admitância aerodinâmica (adimensional);

ω – frequência angular (rad/s);

ω_n – frequência natural (rad/s).

ν – taxa de cruzamentos ascendentes do nível zero (1/s);

τ – retardo em relação ao instante t (s);

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	14
1.2 TÉCNICAS UTILIZADAS PARA MELHORAR O DESEMPENHO AERODINÂMICO DE EDIFÍCIOS ALTOS.....	14
1.2.1 Modificação da Geometria das Bordas.....	15
1.2.2 Afunilamento Vertical	17
1.2.3 <i>Twisting</i>	18
1.2.4 Grandes Aberturas	19
1.3 EDIFÍCIOS COM GRANDES ABERTURAS NO MUNDO.....	20
1.3.1 <i>Kingdom Centre</i>	20
1.3.2 <i>Shanghai World Financial Center</i>	21
1.3.3 <i>432 Park Avenue</i>	22
1.4 REVISÃO SOBRE PESQUISAS PASSADAS	23
1.4.1 Dutton e Isyumov (1990).....	23
1.4.1.1 Estudo da Balança de Força.....	24
1.4.1.2 Estudo do Modelo de Pressões	27
1.4.2 Miyashita et al. (1993).....	31
1.4.3 Okada e Kong (1999)	36
1.4.4 Kikitsu e Okada (2003).....	38
1.4.5 Bekele e Putten (2005)	40
1.4.6 Tanaka et al. (2012).....	41
1.4.7 Li et al. (2020).....	43
1.5 OBJETIVOS DO ESTUDO	46
2 ENGENHARIA DO VENTO.....	48
2.1 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA.....	48
2.2 VELOCIDADE DO VENTO	49
2.2.1 Velocidade Média do Vento	51
2.2.2 Velocidade Flutuante do Vento	52
2.3 TEORIA DE PROCESSOS ALEATÓRIOS	53
2.3.1 Experimentos Aleatórios	54
2.3.2 Parâmetros Estatísticos	55
2.3.3 Propriedades Estatísticas da Turbulência	57
2.4 INTERAÇÃO VENTO-ESTRUTURA.....	58
2.4.1 Número de Reynolds	58
2.4.2 Coeficientes Aerodinâmicos.....	59
2.4.2.1 Coeficientes de Pressão	59
2.4.2.2 Coeficientes de Forma	61
2.4.2.3 Coeficiente de Força.....	62
2.4.3 Carregamento Devido ao Vento em Edificações	66
2.5 EFEITOS DINÂMICOS CAUSADOS PELO VENTO.....	67

2.5.1 Galope	68
2.5.2 Drapejamento	69
2.5.3 Martelamento.....	69
2.5.4 Desprendimento de Vórtices	70
2.6 ANÁLISE DINÂMICA.....	73
2.6.1 Equação do Movimento.....	73
2.6.2 Análise no Domínio do Tempo.....	73
2.6.3 Análise no Domínio da Frequência	74
2.6.4 Processo Probabilístico de Davenport	75
2.6.4.1 Espectros.....	77
2.6.4.2 Admitância Aerodinâmica	79
2.6.5 Procedimento de Cálculo.....	80
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	89
3.1 O TÚNEL DE VENTO PROF. JOAQUIM BLESSMANN.....	89
3.2 LEIS DE SEMELHANÇA	91
3.3 SIMULAÇÃO DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA EM TÚNEL DE VENTO	92
3.4 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL	94
3.5 AQUISIÇÃO DE DADOS EM TÚNEL DE VENTO	94
3.6 DESCRIÇÃO DOS MODELOS	96
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	103
4.1 COEFICIENTES DE FORÇA E TORÇÃO.....	103
4.1.1 Coeficientes de Força	103
4.1.2 Coeficientes de Torção	111
4.2 ESPECTROS DE FORÇA E MOMENTO	113
4.2.1 Transformada de Fourier	114
4.2.2 Densidade Espectral de Potência	115
4.2.3 Obtenção dos Espectros.....	116
4.2.3.1 Análise dos espectros de F_x	116
4.2.3.2 Análise dos espectros de F_y	122
4.2.3.3 Análise dos espectros de M_t	127
4.3 ANÁLISE POR FAIXAS.....	133
4.3.1 Análise por faixa em x.....	134
4.3.2 Análise por faixa em y.....	136
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	140
REFERÊNCIAS	144
APÊNDICE A – ESPECTROS DE POTÊNCIA	148

1 INTRODUÇÃO

O anseio do homem pela construção de edifícios altos é evidente. Desde a antiguidade, grandes construções eram vistas como sinal de imponência, poder e respeito. Nos tempos atuais, o desejo humano de se aproximar do céu por meio de grandes edificações não mudou: edifícios altos continuam representado fortes sinais de ostentação e poderio tecnológico. Inclusive, o desenvolvimento da Engenharia ao longo dos anos tornou essa aspiração pelas alturas algo mais viável.

Tendo em vista essa verticalização das cidades e o desenvolvimento de arrojadas concepções arquitetônicas, torna-se fundamental o aperfeiçoamento das técnicas construtivas da Engenharia e o domínio pleno dos fatores que são determinantes no projeto de edifícios altos. Em se tratando desse tipo de edificação, salienta-se a importância das cargas de vento na análise estrutural: na maioria dos casos, elas se tornam o carregamento mais significativo do projeto.

Conforme afirmam Dutton e Isyumov (1990), várias estratégias existem para amenizar a movimentação de grandes estruturas devido ao vento. Uma alternativa é promover alterações nas características dinâmicas do edifício, como a inserção de amortecedores de massa sintonizada, por exemplo. Outra maneira de se atenuar a vibração de edifícios altos é modificar o próprio mecanismo de excitação (os desprendimentos de vórtices, por exemplo), por meio da introdução de modificações aerodinâmica (forma/geometria do edifício), tais como a suavização de arestas, os afunilamentos verticais e as formas espiraladas. Este trabalho trata de uma modificação aerodinâmica, em especial em edifícios altos: **a introdução de grandes aberturas no topo.**

Busca-se trazer, ao longo deste capítulo, uma breve contextualização sobre artifícios utilizados na Engenharia e na Arquitetura para tornar a ação do vento menos nociva em edificações altas, em especial a inserção de grandes aberturas. Ainda neste capítulo, serão expostas as pesquisas passadas sobre grandes aberturas em edificações e estruturar o escopo da presente dissertação, apresentando seus objetivos.

1.1 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

No “**Capítulo 1 – INTRODUÇÃO**” desta dissertação, tem-se o objetivo de expor as técnicas existentes utilizadas para melhorar o desempenho aerodinâmico de edifícios altos, em especial e inserção de aberturas de grandes dimensões. Serão exibidos exemplos notáveis do emprego dessa técnica em edifícios ao redor do mundo. Além disso, serão abordadas as principais pesquisas que já foram feitas sobre o assunto, bem como serão apresentados os objetivos do presente trabalho, evidenciando a relevância do tema e a contribuição para a área em estudo.

No “**Capítulo 2 – ENGENHARIA DO VENTO**” é feita uma revisão bibliográfica dos conceitos fundamentais da Engenharia do Vento, como a camada limite atmosférica, interação vento-estrutura, efeitos dinâmicos causados pelo vento, etc.

No “**Capítulo 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL**” é apresentado o túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, no qual serão conduzidos os estudos experimentais da dissertação. Nesse capítulo, busca-se apresentar os modelos com grandes aberturas que serão avaliados no túnel e a aquisição de dados correspondente.

No “**Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES**” será feito o tratamento dos dados adquiridos experimentalmente, além de duas comparações: uma entre os modelos com aberturas de diferentes relações altura:base e outra entre os modelos com e sem abertura.

No “**Capítulo 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS**” serão apresentadas as conclusões, além da sugestão de temas para trabalhos futuros.

1.2 TÉCNICAS UTILIZADAS PARA MELHORAR O DESEMPENHO AERODINÂMICO DE EDIFÍCIOS ALTOS

Segundo Tanaka et al. (2012), ao longo da história, edifícios altos foram projetados com seção retangular, triangular ou circular em planta, no intuito de evitar vibrações torcionais excessivas devido a excentricidade de carregamentos laterais. No entanto, atualmente há uma tendência de sofisticções no formato dos edifícios, levando a desafios aos projetistas estruturais. Nesse contexto, a introdução de modificações aerodinâmicas nos edifícios se mostrou bastante efetiva na redução de carregamentos provenientes do vento.

Amin e Ahuja (2010) indicam que a introdução de modificações aerodinâmicas altera o padrão de escoamento ao redor dos edifícios, amenizando carregamentos laterais e colaborando para uma economia de recursos.

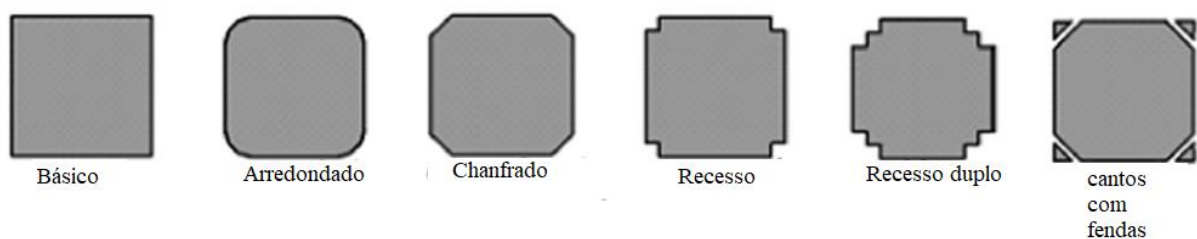
Ilgin e Günel (2007) reforçam a importância de prever modificações aerodinâmicas em edifícios altos para garantir o conforto dos usuários, visto que carregamentos laterais intensos podem causar tontura, dor de cabeça e náusea.

A seguir, serão abordadas algumas das principais modificações aerodinâmicas que são empregadas em edifícios altos.

1.2.1 Modificação da Geometria das Bordas

Uma modificação aerodinâmica simples de se prever em um edifício alto é a suavização das bordas. Essa ideia consiste em modificar os cantos de uma planta baixa originalmente retangular. As modificações dos cantos, tais como as da Figura 1, podem reduzir as vibrações de um edifício em até 30% (KIM; KANDA¹, 2008 apud SHARMA et al., 2018).

Figura 1 – Exemplos de modificações nos cantos de uma planta quadrada



(fonte: adaptado de SHARMA ET AL., 2018)

Além disso, o carregamento na direção do vento pode ser reduzido em até 60% com tais modificações (TAMURA et al., 1998 apud SHARMA et al., 2018). Para que a eficácia seja máxima, a largura da modificação deve ser em torno de um décimo da largura do edifício (IRWIN, 2008 apud SHARMA et al., 2018).

¹ Y.C. Kim, J. Kanda, Wind pressures on tapered and set-back tall buildings, *J. Fluids Struct.* 39 (2013) 306–321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2013.02.008>.

Um exemplo do emprego dessa técnica pode ser observado no edifício *Taipei 101*, localizado em Taiwan, ilustrado na Figura 2.

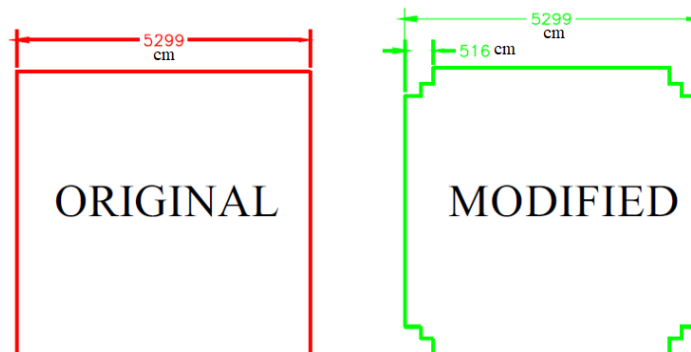
Figura 2 – Taipei 101



(fonte: UNSPLASH²)

Em sua fase inicial de projeto, o *Taipei 101* apresentava grandes carregamentos na direção perpendicular ao vento e acelerações além daquelas que permitem o conforto dos ocupantes. Para solucionar esse problema, foi previsto um amortecedor de massa sintonizada e modificações nos cantos da planta, como pode ser visto na Figura 3 (IRWIN, 2008).

Figura 3 – Modificações nos cantos da planta do *Taipei 101*



(fonte: IRWIN, 2008)

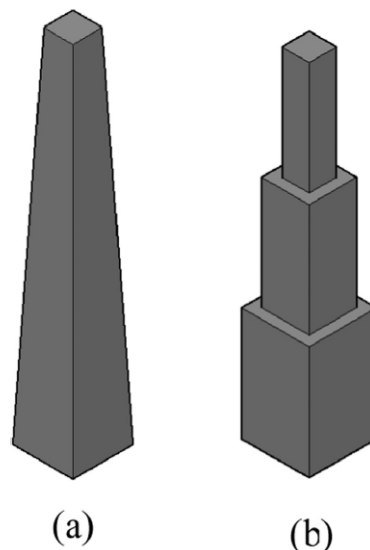
² Disponível em: <https://unsplash.com/photos/F_p_T6eUww0> Acesso em jan. 2020.

1.2.2 Afunilamento Vertical

Davenport (1988) apud Kim et al. (2008) sugeriu que ao se prever sucessivas reduções na seção transversal ao longo da altura de um edifício (afunilamento), a banda de frequências de despreendimento de vórtices pode ser alongada, reduzindo a resposta perpendicular da estrutura ao vento.

Sumariamente, existem duas maneiras de promover o afunilamento vertical de um edifício: por meio da técnica de *tapering* (afunilamento vertical) ou por meio da inserção de *set-backs* (variações na seção em determinadas cotas). A Figura 4 ilustra essas duas configurações.

Figura 4 – (a) Afunilamento vertical e (b) Variações na seção em determinadas cotas



(fonte: SHARMA ET AL., 2018)

Como apontado por Amin e Ahuja (2010), a *Sears Tower* (ilustrada na Figura 5) nos Estados Unidos da América é um exemplo de edifício que explora a técnica do afunilamento vertical, reduzindo as movimentações induzidas pelo vento no topo da estrutura. Outro exemplo é dado por Sharma et al. (2018) ao citar o *Burj Khalifa* (ilustrado na Figura 6), situado em Dubai, que possui seção transversal altamente não uniforme, o que inibe a formação de vórtices organizados e sincronizados, minimizando as forças laterais atuantes na estrutura.

Figura 5 – *Sears Tower* (Chicago, Estados Unidos da América)



(fonte: UNSPLASH³)

Figura 6 – *Burj Khalifa* (Dubai, Emirados Árabes Unidos)



(fonte: UNSPLASH⁴)

1.2.3 *Twisting*

A técnica conhecida como *Twisting* consiste em prever uma forma helicoidal para o edifício. Essa forma espiralada promove uma redução no desprendimento de vórtices. Essa técnica é capaz de minimizar o carregamento do vento em direções preferenciais e evitar o desprendimento de vórtices simultaneamente ao longo da altura do edifício (AMIN; AHUJA, 2010).

Conforme apontado por Sharma et al. (2018), um exemplo do emprego da técnica de *Twisting* pode ser observado na *Shanghai Tower* em Xangai, na China, ilustrada na Figura 7. Se a estrutura de 632 metros de altura possuísse planta retangular uniforme, os carregamentos de vento seriam em média 24% maiores. Sharma et al. (2018) ainda assinala o *The Cayan Tower*

³ Disponível em: <https://unsplash.com/photos/YFxydild_20> Acesso em jan. 2020.

⁴ Disponível em: <<https://unsplash.com/photos/9dhGqMzqkso>> Acesso em jan. 2020.

Dubai em Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, como um exemplo notável do emprego dessa técnica. A rotação do edifício, como pode ser visualizado na Figura 8, varia 90° da base ao topo.

Figura 7 – *Shanghai Tower* (Xangai, China)



(fonte: UNSPLASH⁵)

Figura 8 - *The Cayan Tower Dubai* (Dubai, Emirados Árabes Unidos)



(fonte: CTBUH, c2020)

1.2.4 Grandes Aberturas

Segundo Dutton e Isyumov (1990), grandes aberturas no topo de edifícios altos melhoram o comportamento aerodinâmico das edificações, por meio da amenização das forças provenientes de desprendimento de vórtices, o que causa redução das movimentações da estrutura.

Pesquisas conduzidas por Miyashita et al. (1993) e Okada e Kong (1999) complementaram os estudos de Dutton e Isyumov (1990) e formaram a base dos estudos existentes sobre a inserção de grandes aberturas como uma estratégia para melhorar o desempenho aerodinâmico de edifícios altos. Todas essas pesquisas e outras mais recentes serão detalhadas na Seção 1.3.

⁵ Disponível em: <https://unsplash.com/photos/Cyne7_kcI80> Acesso em jan. 2020.

A inserção de grandes aberturas em edifícios como um recurso para atenuar efeitos dinâmicos é uma tecnologia ainda não explorada no Brasil. No entanto, como será visto adiante, vários países do mundo já adotam esta técnica.

1.3 EDIFÍCIOS COM GRANDES ABERTURAS NO MUNDO

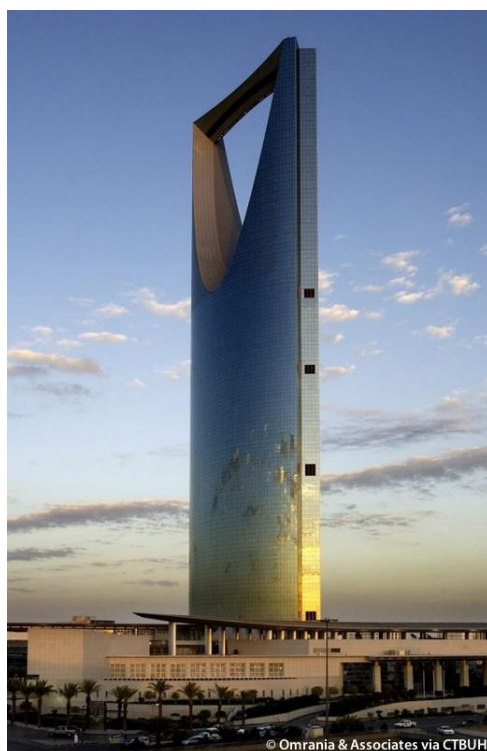
A seguir, serão apresentados três edifícios altos que possuem grandes aberturas. São eles: o *Kingdom Centre* (Riad, Arábia Saudita), o *Shanghai World Financial Center* (Xangai, China) e o *432 Park Avenue* (Nova Iorque, Estados Unidos da América).

1.3.1 *Kingdom Centre*

Segundo o CTBUH (c2020), o *Kingdom Centre*, localizado em Riad, Arábia Saudita, teve sua construção iniciada em 1999 e foi concluído em 2002. O edifício é composto por apartamentos residenciais, hotel e escritórios. Possui uma estrutura mista de concreto e aço, chegando aos 302,3 m de altura.

De acordo com a empresa *Riva Engineering* (c2018), a grande abertura tem formato parabólico e uma ponte de 56 m de comprimento conecta as duas pontas superiores do edifício. Nas Figuras 9 e 10 podem ser observadas fotografias do *Kingdom Centre*.

Figura 9 – Kingdom Centre (Riad, Arábia Saudita)



(fonte: CTBUH, c2020)

Figura 10 – Kingdom Centre e vizinhança (Riad, Arábia Saudita)



(fonte: CTBUH, c2020)

1.3.2 *Shanghai World Financial Center*

Segundo o CTBUH (c2020), o *Shanghai World Financial Center* (SWFC), localizado em Xangai, China, teve sua construção iniciada em 1997 e foi concluído em 2008. O edifício é composto por hotel e escritórios, possuindo uma estrutura mista de concreto e aço, chegando aos 494,3 m de altura.

Segundo Amin e Ahuja (2010), a abertura no topo do edifício possui formato quadrangular com 54 m de dimensão, previsto no intuito de amenizar as pressões oriundas do vento naquela região. Nas Figuras 11 e 12 podem ser observadas fotografias do SWFC.

Figura 11 – SWFC (Xangai, China)



(fonte: CTBUH, c2020)

Figura 12 – Parcela superior do SWFC (Xangai, China)



(fonte: CTBUH, c2020)

1.3.3 432 Park Avenue

Segundo o CTBUH (c2020), o *432 Park Avenue*, localizado em Nova Iorque, Estados Unidos da América, teve sua construção iniciada em 2011 e foi concluído em 2015. O edifício é inteiramente residencial, com uma estrutura de concreto chegando aos 425,7 m de altura.

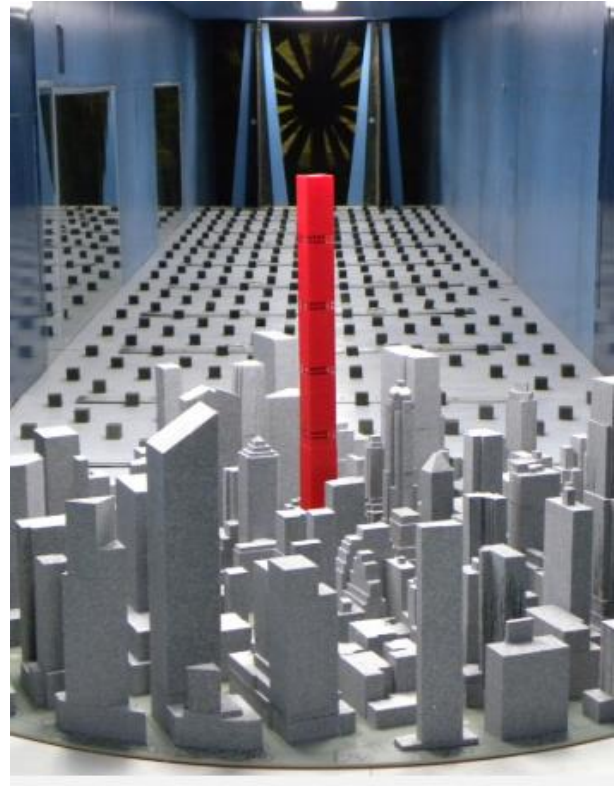
Segundo RWDI (c2020), diversas soluções foram avaliadas para neutralizar os efeitos dinâmicos aos quais o edifício de alta esbelteza estaria sujeito devido ao vento. A proporção altura-largura de 15:1, aliada às características dinâmicas da estrutura, tornaria o edifício demasiadamente sensível a desprendimentos de vórtices. A solução escolhida para resolver esse problema foi a introdução de aberturas de dois andares consecutivos em cinco regiões do edifício. A decisão adotada permitiu a manutenção da arquitetura prevista e o conforto de seus ocupantes. Nas Figuras 13 e 14 podem ser observadas fotografias do *432 Park Avenue* construído e em túnel de vento, respectivamente.

Figura 13 – 432 Park Avenue (Nova Iorque, Estados Unidos da América)



(fonte: CTBUH, c2020)

Figura 14 – Ensaio no túnel de vento RWDI do 432 Park Avenue



(fonte: RWDI, c2020)

1.4 REVISÃO SOBRE PESQUISAS PASSADAS

Neste item serão apresentadas, em ordem cronológica, pesquisas realizadas sobre edifícios altos com grandes aberturas.

1.4.1 Dutton e Isyumov (1990)

Dutton e Isyumov (1990) realizaram dois estudos: o estudo em balança de força e o estudo do modelo de pressões para estudar o efeito de aberturas em edifícios altos. A seguir, serão abordados em detalhes esses estudos.

1.4.1.1 Estudo da Balança de Força

Dutton e Isyumov (1990) conduziram um teste no *Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory* (BLWTL), da *Carleton University*, para mostrar que aberturas em edifícios podem reduzir a resposta dinâmica perpendicular à direção do vento. Foi construído um modelo reduzido rígido de 0,9 m de altura, de seção transversal quadrada com 0,1 m de lado. Esse modelo possuía seis aberturas (três paralelas ao vento e três perpendiculares ao vento), sendo que todas poderiam ser fechadas. Tal modelo foi estudado sob três configurações:

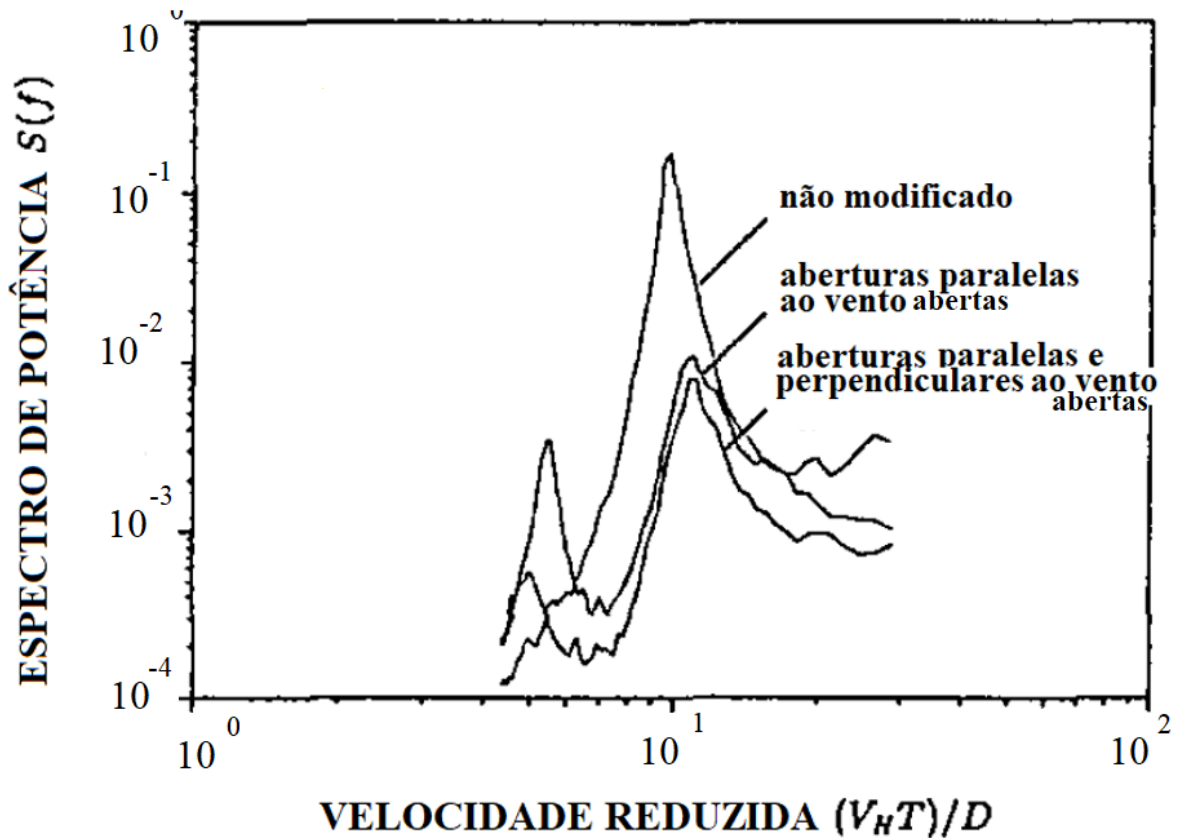
- a) todas aberturas fechadas, designado também como “não modificado”;
- b) as três aberturas na direção do vento abertas;
- c) todas aberturas abertas.

Salienta-se que todas aberturas foram feitas ao longo de toda largura do edifício e todas com a mesma dimensão: $D/6$ de largura e $1,25D$ de altura, sendo D a largura da base do edifício. As aberturas em uma mesma face foram distribuídas verticalmente pela metade superior do edifício, distando $0,25D$ umas das outras.

O perfil de vento utilizado no ensaio foi típico de um terreno aberto, sem vizinhança, e a velocidade do vento foi estabelecida em 6,1 m/s. A partir deste ensaio, foram extraídos espectros de potência de momentos fletores, cisalhamento e torção, todos em relação à base do edifício, tanto para a componente paralela como para a componente perpendicular ao vento. Com base nesses dados, foram gerados novos espectros, correspondentes a um edifício real de altura $H = 360$ m, com seção transversal quadrada de lado $D = 40$ m, de frequência fundamental $f_0 = 0,125$ Hz e razão de amortecimento em relação ao crítico de $\zeta = 1,0\%$.

A Figura 15 apresenta o espectro de momentos fletores na base do edifício, na direção perpendicular ao vento:

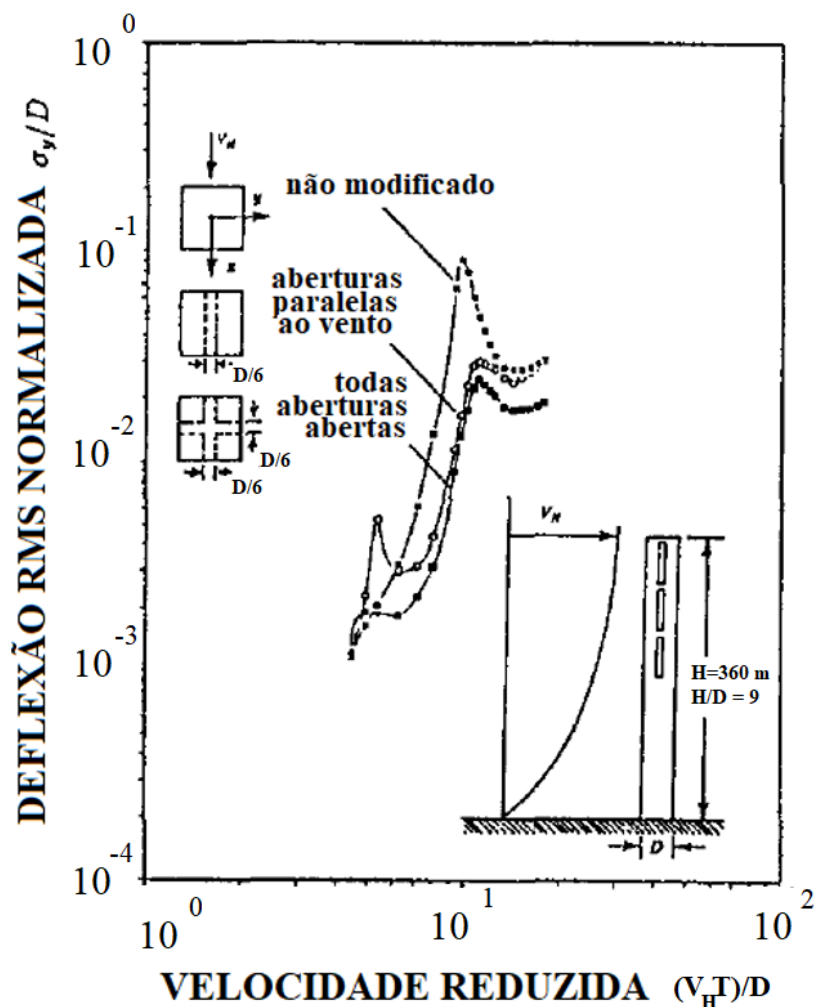
Figura 15 – Espectro de Momentos Fletores na base na direção perpendicular ao vento



(fonte: adaptado de DUTTON; ISYUMOV, 1990)

A Figura 16 apresenta o deslocamento rms normalizada no topo do edifício na direção perpendicular ao vento:

Figura 16 – Deslocamento rms normalizada no topo do edifício na direção perpendicular ao vento



(fonte: adaptado de DUTTON; ISYUMOV, 1990)

O efeito das aberturas no edifício, segundo Dutton e Isyumov (1990), estão listados abaixo:

- a introdução de aberturas reduz as forças induzidas por desprendimento de vórtices, o que diminui o deslocamento dinâmico na direção perpendicular ao vento;
- uma redução significativa na excitação e na resposta é observada quando se introduzem aberturas na direção paralela ao vento. Ao serem incluídas aberturas na direção perpendicular ao vento, a redução se torna sutilmente maior;
- aberturas perpendiculares ao vento, se usadas isoladamente, não se mostram tão efetivas quanto as aberturas paralelas ao vento, usadas isoladamente;
- a introdução de aberturas desloca o pico do espectro para uma maior velocidade reduzida. Isso significa que a frequência de desprendimento de vórtices é diminuída (em relação ao modelo não modificado) e as vibrações ressonantes do edifício serão acionadas em velocidades mais altas do vento;

- e) o número de Strouhal diminui de $S = 0,10$ no modelo não modificado para $S = 0,09$ nos modelos com aberturas.

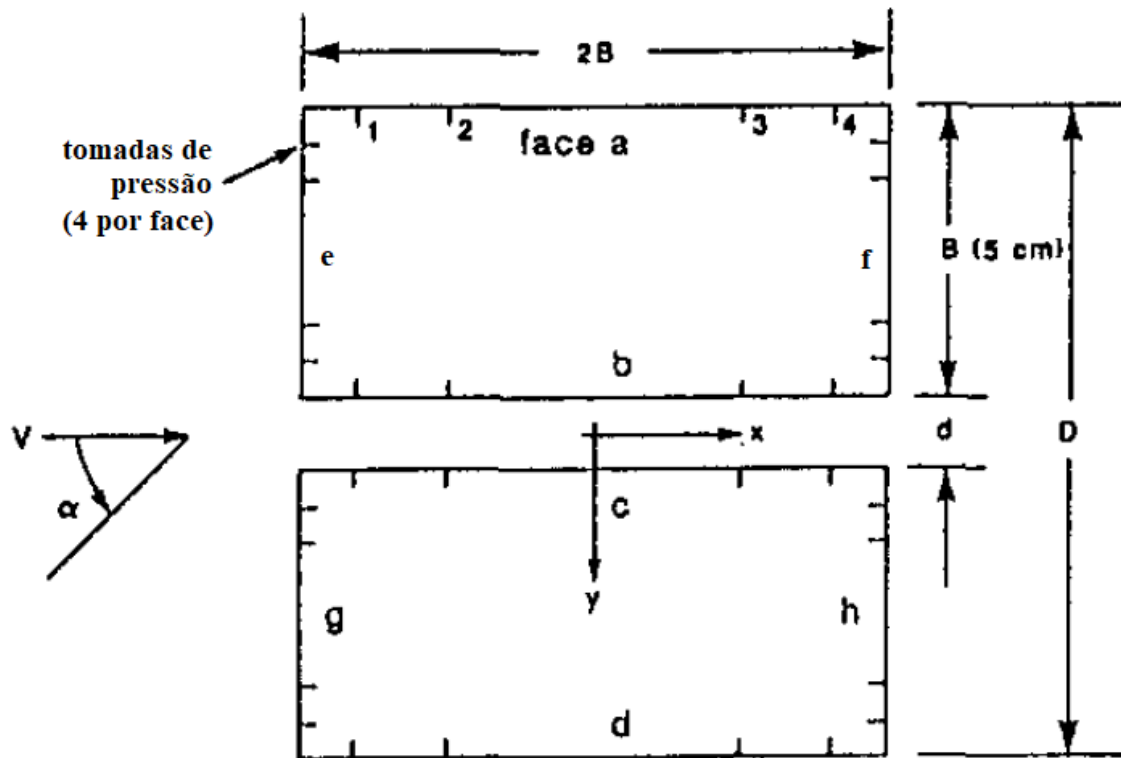
Não foram considerados efeitos aeroelásticos nesse estudo. No entanto, segundo Dutton e Isyumov (1990), experimentos feitos no BLWTL indicam que a efetividade das aberturas é mantida na presença de movimentos do edifício.

1.4.1.2 Estudo do Modelo de Pressões

Esse segundo estudo guiado por Dutton e Isyumov (1990) teve o intuito de compreender como se comporta a distribuição de pressões ao redor de um edifício com aberturas e qual a influência da largura da abertura.

Para esse experimento, foram usados dois tubos de alumínio de seção $5\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ e $1,2\text{ m}$ de comprimento. Os tubos foram colocados um do lado do outro e o espaçamento entre eles podia variar de 0 a $2,5\text{ cm}$. Foi instalada uma estação de medição de pressão neste modelo: em cada face dos tubos foram inseridos quatro pontos de tomada de pressão. O escoamento do vento utilizado no teste foi uniforme com intensidade de turbulência $I_u < 1\%$. A Figura 17 mostra um esquema deste modelo, indicando os pontos de tomada de pressão.

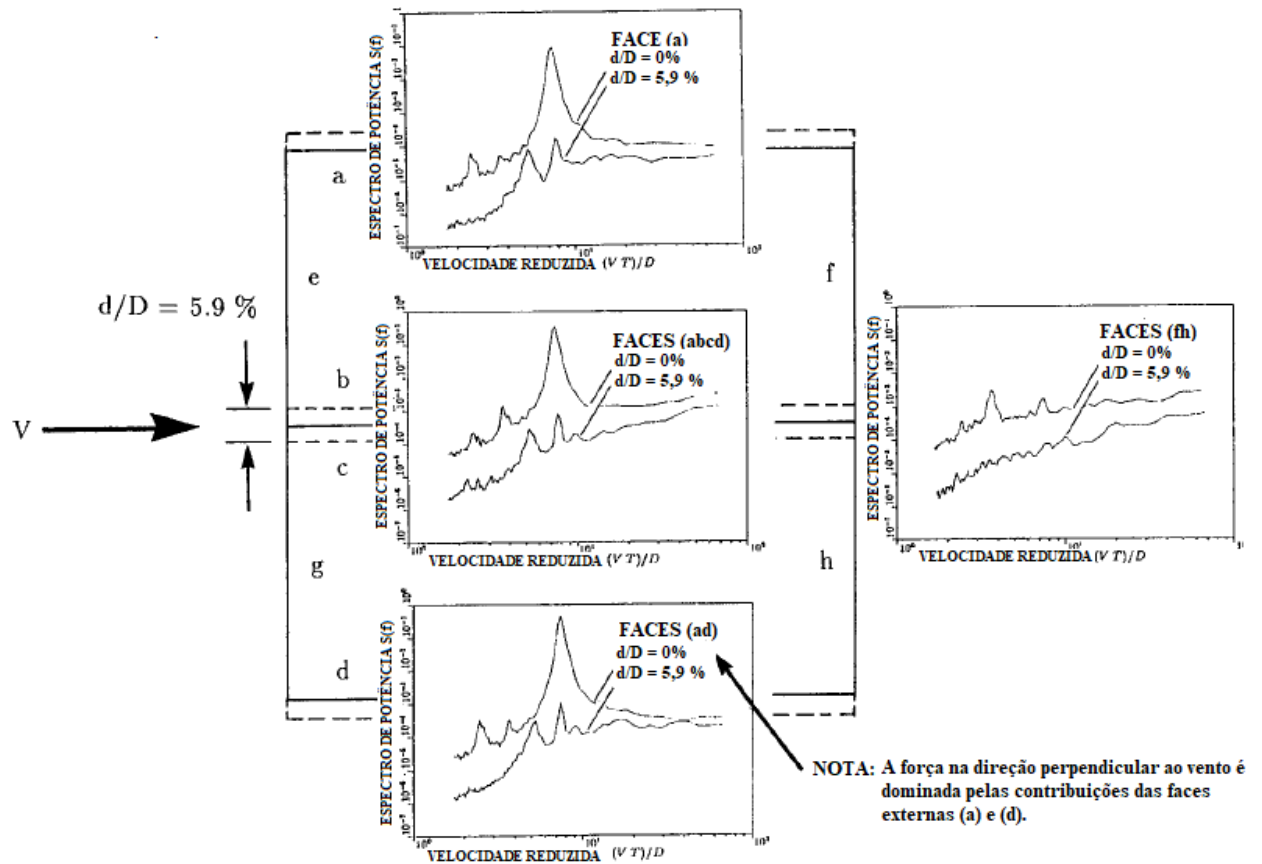
Figura 17 – Seção do modelo construído para o teste do estudo de pressões



(fonte: adaptado de DUTTON; ISYUMOV, 1990)

O teste em túnel de vento mostrou que as pressões em uma mesma face são bem correlacionadas. A Figura 18 mostra o espectro de potência de força de faces selecionadas e combinações para 0% e 5,9% de abertura (em relação à face perpendicular ao vento).

Figura 18 – Espectro de potência de força de algumas faces



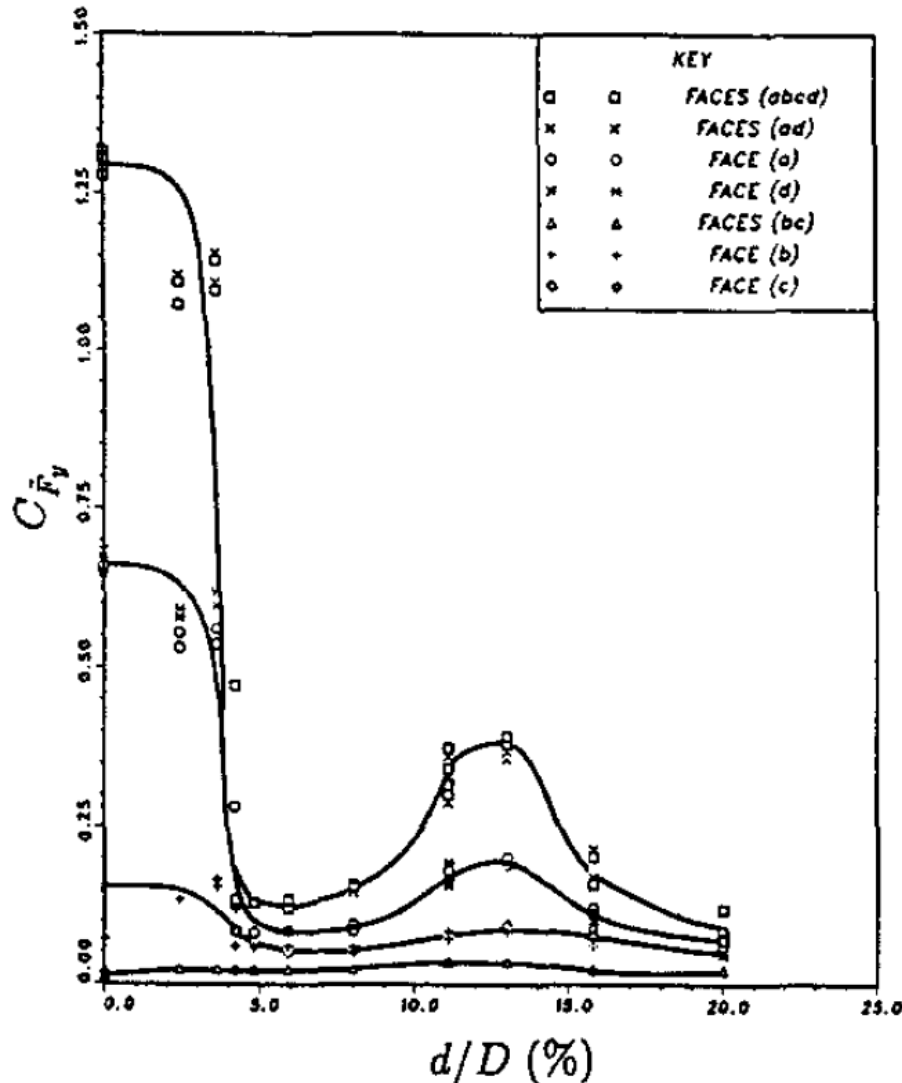
(fonte: adaptado de DUTTON; ISYUMOV, 1990)

A partir da figura acima, Dutton e Isyumov (1990) fizeram as seguintes observações:

- a introdução de uma abertura ao longo da direção do vento causa uma drástica diminuição nas forças perpendiculares ao vento em todas as faces examinadas e suas combinações;
- no modelo com 0% de abertura, há uma concentração de energia espectral na frequência de desprendimento de vórtices, que ocorre aproximadamente em $V_{rc} = 7$. Na presença de aberturas, o pico no espectro é diminuído significativamente. Além disso, ocorre o surgimento de um novo pico, em $V_r = 5,5$, cuja origem não é clara;
- o espectro de força na face de trás do modelo (perpendicular ao vento) segue a mesma tendência das faces laterais. Como esperado, a presença da abertura gera uma diminuição considerável na intensidade do espectro de potência.

A Figura 19 mostra os coeficientes rms de força para algumas faces perpendiculares ao vento isoladas e algumas combinações médias de faces em função da largura da abertura.

Figura 19 – Coeficiente rms de força na direção perpendicular ao vento (faces selecionadas e combinações)



(fonte: adaptado de DUTTON; ISYUMOV, 1990)

Dutton e Isyumov (1990) assinalam as seguintes observações com respeito ao gráfico acima:

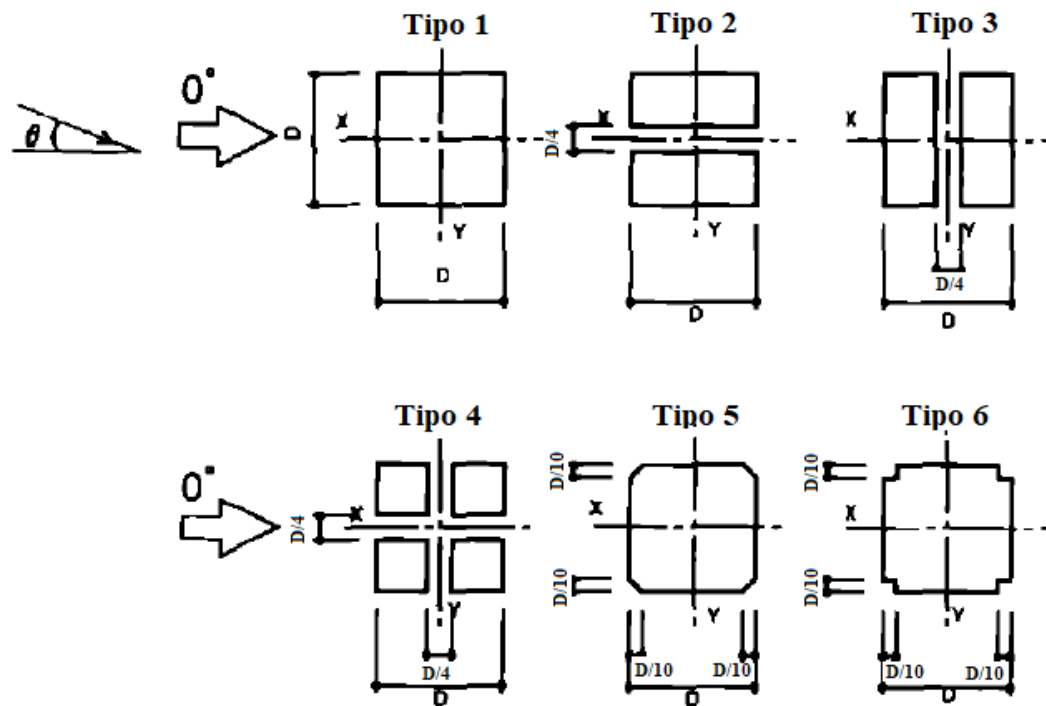
- há uma grande diminuição na força em todas as faces para a faixa $4\% < d/D < 5\%$;
- a força total na direção perpendicular ao vento (efeitos combinados das faces a, b, c e d) e forças em faces externas (a,d) aumentam e depois caem quando d/D está entre 10 e 15%. Não há uma explicação clara para esse fato;
- as faces da abertura (b,c) contribuem pouco para a força perpendicular ao vento. A força resultante nessas faces é muito menor que em qualquer outra face independentemente. Isso indica um cancelamento das componentes das forças nas faces da abertura. Portanto, a força na direção perpendicular ao vento é essencialmente igual aos efeitos combinados das faces (a,d) para qualquer largura de abertura.

1.4.2 Miyashita et al. (1993)

Miyashita et al. (1993) conduziram um estudo sobre dois tipos de modificações em edifícios altos: cantos chanfrados e grandes aberturas. Serão discutidos aqui, com mais ênfase, os pontos que dizem respeito ao efeito da introdução de grandes aberturas em edifícios. Os autores destacam que o estudo de Dutton e Isyumov (1990) se limitou a analisar a incidência do vento na direção perpendicular ao vento. Com isso, Miyashita et al. (1993) propuseram uma investigação da incidência do vento sob vários ângulos.

Em túnel de vento, foram testados seis modelos de edifícios com planta quadrada de largura D = 13 cm e altura H = 79 cm, o que corresponde a uma proporção altura-largura de 6:1. Na Figura 20, são mostrados os diferentes modelos, nomeados de Tipo 1 a Tipo 6.

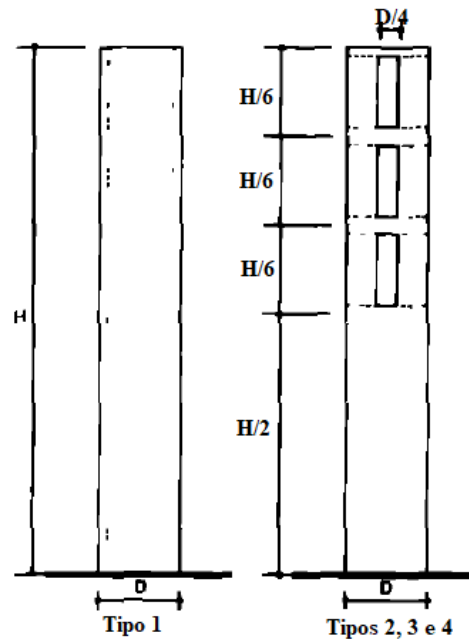
Figura 20 – Modelos 1 a 6 que foram estudados em túnel de vento



(Fonte: adaptado de MIYASHITA ET AL., 1993)

A Figura 21 mostra a elevação do modelo, contendo as dimensões das fachadas e dos furos introduzidos.

Figura 21 – Modelos 1 a 4 que foram estudados em túnel de vento



(Fonte: adaptado de MIYASHITA ET AL., 1993)

Foi utilizado um perfil de vento cuja velocidade no topo do modelo foi de aproximadamente 4 m/s e foram testados ângulos de incidência do vento variando de $\theta = 0^\circ$ a $\theta = 45^\circ$, de 5° em 5° .

Miyashita et al. (1993) definem o coeficiente aerodinâmico de força flutuante conforme a Equação 1.

$$C'_F = \frac{\sigma_M}{q_H D H^2} \quad (1)$$

onde:

σ_M = valor rms do momento fletor flutuante (kNm);

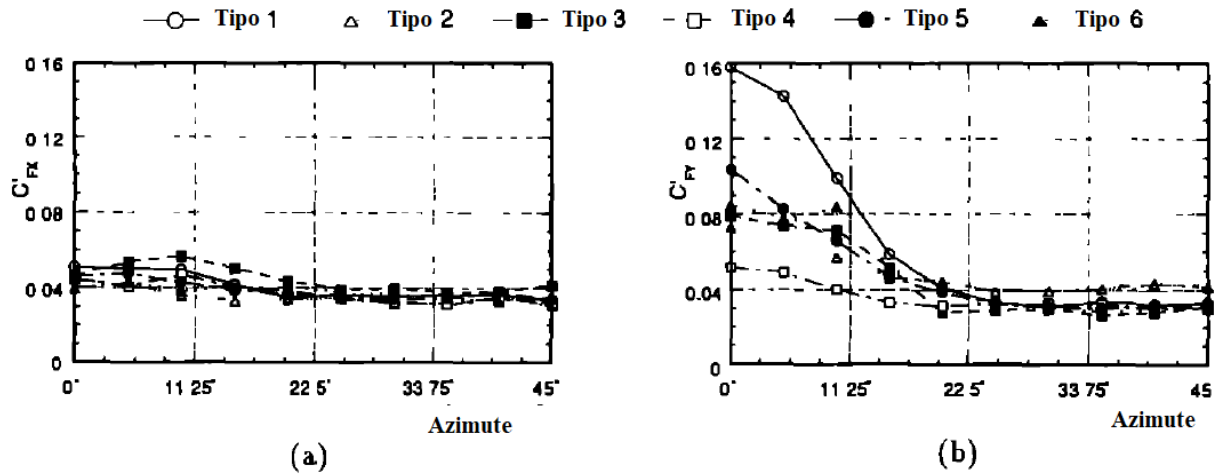
q_H = pressão do vento no topo do edifício (kN/m²);

D = largura do edifício (m);

H = altura do edifício (m).

A partir do ensaio em túnel de vento e da definição do coeficiente acima, foram gerados os gráficos da Figura 22:

Figura 22 – Coeficiente aerodinâmico de força flutuante para (a) o eixo x e (b) para o eixo Y

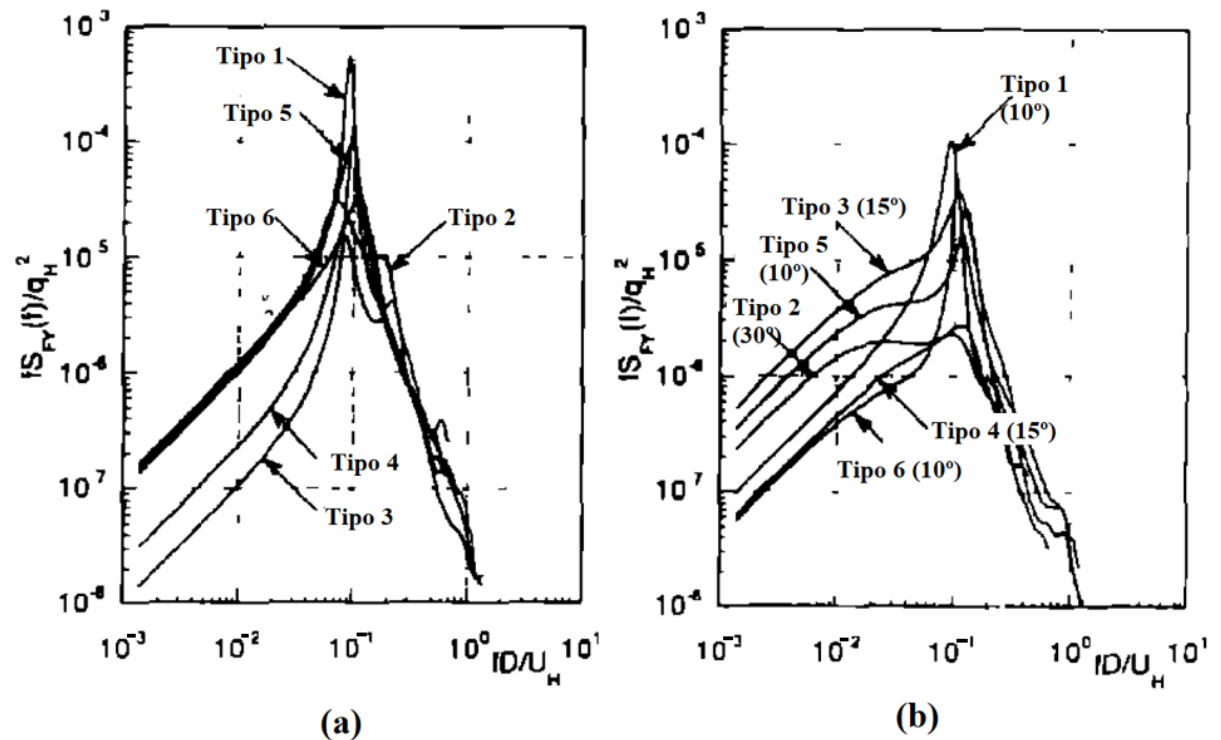


(Fonte: adaptado de MIYASHITA ET AL., 1993)

Percebe-se que, para um ângulo de incidência de $\theta = 0^\circ$, o coeficiente de força no eixo y é muito superior no modelo Tipo 1 do que nos modelos modificados. Particularmente, o modelo tipo 4 (aquele que contém aberturas tanto em x quanto em Y) apresentou uma significativa redução do coeficiente, se comparado com o modelo não modificado. Além disso, na direção Y , o coeficiente de força se mostra praticamente o mesmo para todos modelos entre $\theta = 22,5^\circ$ e $\theta = 45^\circ$. A forma dos modelos se mostra independente do coeficiente de força na direção x (MIYASHITA ET AL., 1993).

O espectro de potência das flutuações da força do vento na direção Y , para vento a 0° (vide Figura 23) mostrou que o pico do modelo sem modificações (Tipo 1) é significativamente mais alto que o dos outros modelos. Além disso, a frequência reduzida correspondente ao pico também é diferente em cada caso: o pico do Tipo 1 corresponde a uma frequência reduzida de 1,0, enquanto que nos Tipos 2 e 4 (modelos com abertura na direção do vento), ela vale 0,08 e 0,18, respectivamente. Os espectros de potência para forças na direção x não apresentaram grandes diferenças dentre os modelos testados (MIYASHITA ET AL., 1993).

Figura 23 – Espectros de potência da flutuação da força do vento na direção Y, para o vento a (a) 0° e (b) de 10° a 30°



(Fonte: adaptado de MIYASHITA ET AL., 1993)

As forças devido ao vento apresentam baixa correlação em todos modelos para vento a 0°. Com a incidência do vento de 5° a 20° uma grande correlação é enxergada ao redor da frequência de desprendimento de vórtices nos modelos, exceto no Tipo 2. Quando o vento incide a 45°, há uma correlação alta apenas na faixa de frequências mais baixas.

Quanto ao comportamento vibratório, percebeu-se que com vento incidindo de 0° a 20°, o movimento do edifício ocorre em forma elíptica, onde a direção de maior amplitude é aquela perpendicular ao vento.

A resposta *rms* foi calculada sob duas perspectivas: a partir da correlação (Equação 2) e a partir do máximo deslocamento somado a um desvio padrão (Equação 3).

$$\tilde{\sigma}_{Xd} = \sqrt{\sigma_X^2 + |R(f_0)|\sigma_Y^2} \quad \tilde{\sigma}_{Yd} = \sqrt{\sigma_Y^2 + |R(f_0)|\sigma_X^2} \quad (2)$$

onde:

$$|R(f_0)| = 0,1;$$

$\widetilde{\sigma}_{Xd}$ = deslocamento rms combinado em x;

$\widetilde{\sigma}_{Yd}$ = deslocamento rms combinado em y;

$$\sigma_{Xd} = \sqrt{\sigma_X^2 + \left(\frac{\sigma_Y}{g}\right)^2} \quad \sigma_{Yd} = \sqrt{\sigma_Y^2 + \left(\frac{\sigma_X}{g}\right)^2} \quad (3)$$

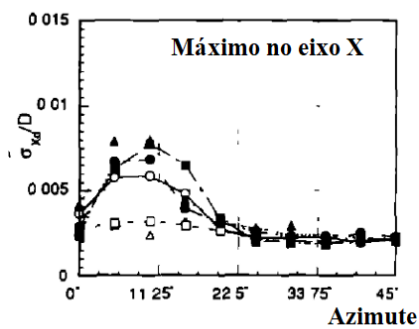
onde:

g = fator de pico = 3,2.

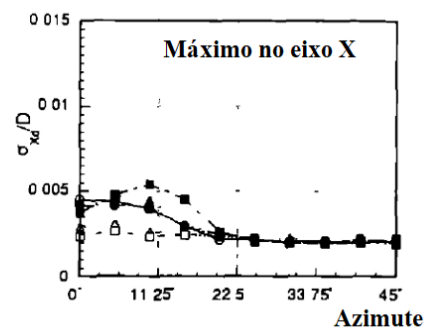
Na Figura 24 são mostrados os gráficos de comparação entre σ_d e $\widetilde{\sigma}_{Xd}$ para as direções x e Y.

Figura 24 – Gráficos de comparação entre σ_{Xd} , $\widetilde{\sigma}_{Xd}$ e σ_{Yd} , $\widetilde{\sigma}_{Yd}$

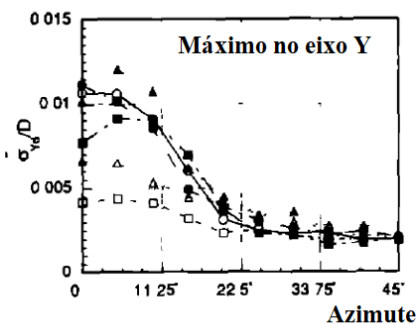
—○— Tipo 1 △ Tipo 2 —■— Tipo 3 -□- Tipo 4 ● Tipo 5 ▲ Tipo 6



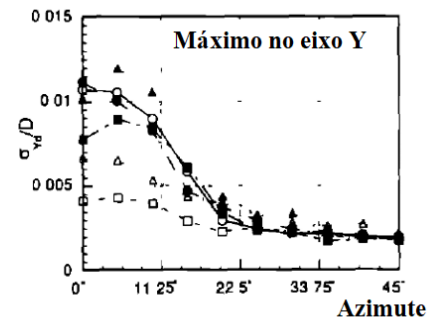
(a-1) Combinação considerando correlação



(a-2) Combinação de valor máximo + desvio padrão



(b-1) Combinação considerando correlação



(b-2) Combinação de valor máximo + desvio padrão

(Fonte: adaptado de MIYASHITA ET AL., 1993)

Percebe-se, a partir da figura 24, que os modelos com aberturas (Tipos 2, 3 e 4) apresentaram boas reduções de deslocamentos se comparados ao modelo sem modificações (Tipo 1). Para a análise na direção X, a redução mais significativa no pico dos gráficos (a-1) e (a-2) ocorre para o tipo 4 (com aberturas em todas direções). Essa redução é ainda mais expressiva quando analisamos os resultados em Y.

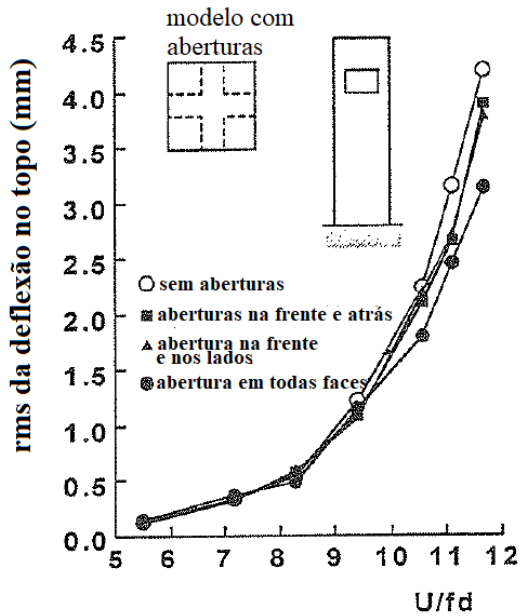
1.4.3 Okada e Kong (1999)

Okada e Kong (1999) enfatizam que os estudos conduzidos por Dutton e Isyumov (1990) se restringiram a uma balança de força estática e que, dependendo do modelo, um estudo dinâmico pode trazer resultados diferentes. Nesse sentido, os autores se propuseram a realizar experimentos sobre edifícios com aberturas em balança dinâmica.

A investigação consistiu em estudar três modelos de edifícios altos com aberturas: o primeiro modelo possui cantos vivos, o segundo possui bordas arredondadas e o terceiro possui bordas chanfradas. Os testes foram conduzidos no túnel de vento do *Building Research Institute of Japan*. Todos modelos são rígidos e possuem uma proporção altura-largura de 8:1, com seção transversal quadrada de 70 mm de lado. Apenas o modelo de cantos vivos possui aberturas em todas paredes, as quais são posicionadas em torno de 80% da altura do edifício. Para o modelo de cantos vivos, foram conduzidos dois ensaios: um sem aberturas e outro com pequenas aberturas de 30x20 mm (base da abertura representa 43% da base do edifício). O amortecimento na direção do vento foi definido em 0,42% enquanto que na direção perpendicular ao vento foi definido em 0,38%. Esse coeficiente de amortecimento pode ser variado por meio de um silicone líquido de densidade 10000 kg/m³. Com a introdução do líquido, o amortecimento na direção do vento passa a ser 2,6% e na direção perpendicular ao vento passa a ser 0,94%. O perfil de velocidades adotado é o típico da camada limite atmosférica, com velocidade básica do vento variando de 5 a 17 m/s (OKADA E KONG, 1999).

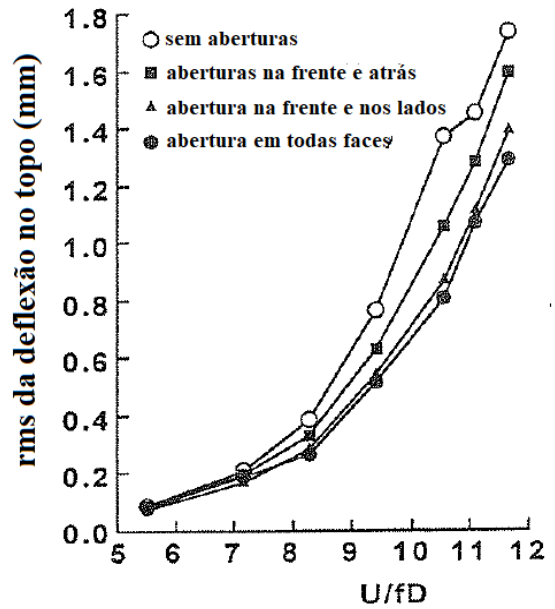
Resultados para o modelo de cantos vivos, com diferentes condições de abertura podem ser observados nas Figuras 25 e 26, sem e com a introdução do sistema de amortecimento, respectivamente. Nesses gráficos, o eixo horizontal corresponde à velocidade do vento dividida pelo produto da frequência natural do edifício com a largura da seção transversal.

Figura 25 – Deslocamento dinâmico do modelo com 0,38% de amortecimento



(fonte: adaptado de OKADA E KONG, 1999)

Figura 26 – Deslocamento dinâmico do modelo com 2,6% de amortecimento

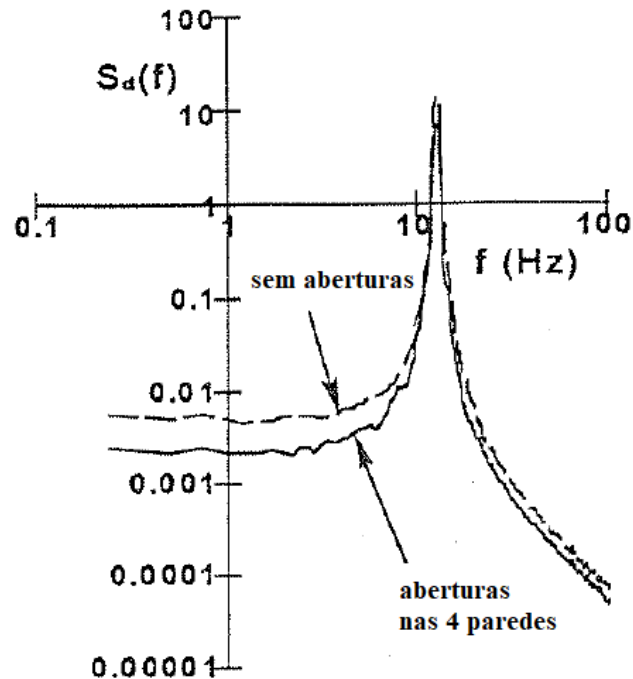


(fonte: adaptado de OKADA E KONG, 1999)

Como apontam Okada e Kong (1999), o valor *rms* da deslocação no topo diminui significativamente (20 a 25%) quando são introduzidas aberturas no modelo, em especial a condição de aberturas em toda as paredes. Os autores destacam que uma abertura maior poderia diminuir ainda mais os valores *rms* de deslocação.

Na Figura 27 é apresentado um espectro de potência de deflexões no topo do modelo com amortecimento de 0,38% a uma velocidade do vento de 10,8 m/s sob duas condições: com nenhuma abertura e com abertura nas quatro faces:

Figura 27 – Comparação do espectro de potência para o modelo sem aberturas e com aberturas nas quatro faces (*lock-in phenomenon*)



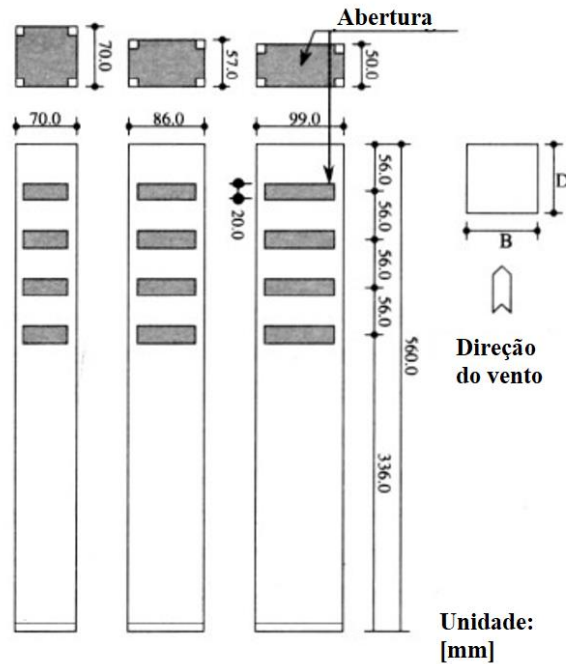
(fonte: adaptado de OKADA E KONG, 1999)

Percebe-se que o modelo sem aberturas possui um pico de densidade espectral cerca de duas vezes maior que o modelo com aberturas e que, tanto para frequências baixas como para frequências altas, o modelo sem aberturas apresenta maior densidade espectral (OKADA E KONG, 1999).

1.4.4 Kikitsu e Okada (2003)

Kikitsu e Okada (2003) testaram vários modelos dinâmicos de edifícios com aberturas com diferentes configurações. Os modelos testados tinham razão de largura/comprimento de 1/2, 2/3, 1, 3/2 e 2. A introdução das aberturas foi feita a 0,6H, 0,7H, 0,8H e 0,9H, sendo H a altura do modelo. Cada abertura foi testada isoladamente. A Figura 28 mostra alguns desses modelos.

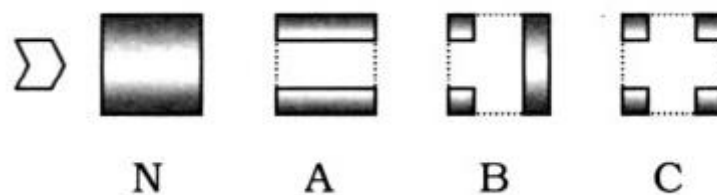
Figura 28 - Alguns dos modelos testados por Kikitsu e Okada (2003)



(Fonte: KIKITSU E OKADA, 2003)

Em relação aos tipos de abertura, foram propostas 4 configurações: sem abertura, com abertura na direção paralela ao vento, com abertura na face frontal e perpendicular ao vento e com abertura nas duas direções, nomeadas respectivamente de N, A, B e C, como pode ser observado na Figura 29.

Figura 29 - Tipos de abertura testados



(Fonte: KIKITSU E OKADA, 2003)

A partir da análise dos resultados experimentais, foi possível verificar que:

- a inserção de uma abertura na direção do vento é mais vantajosa na mitigação da resposta aerodinâmica transversal do que uma abertura na direção perpendicular ao

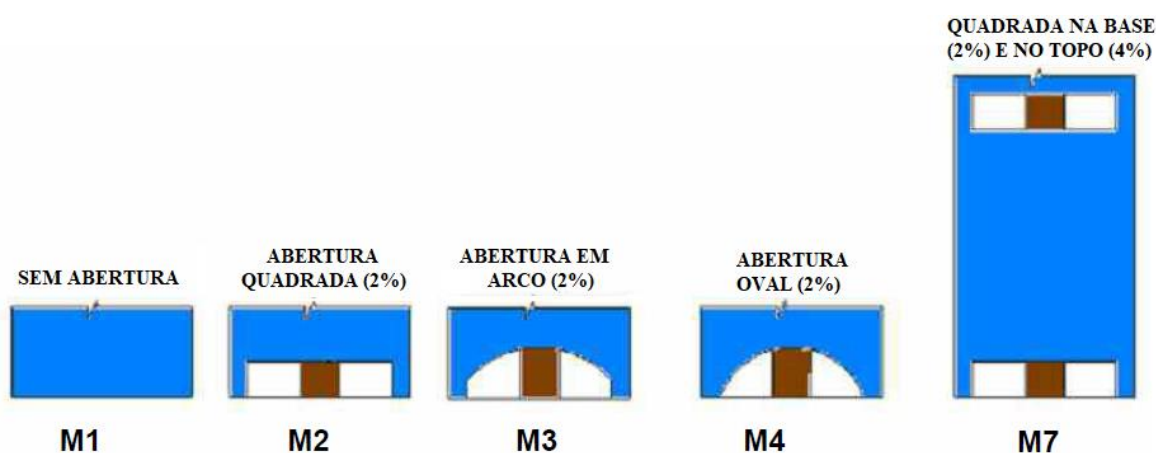
vento. Isso é devido ao fato de que o escoamento do ar através da abertura controla a pressão negativa na região próxima às faces laterais;

- b) as aberturas do tipo A resultaram em um amortecimento aerodinâmico maior em relação aos tipos N, B e C. Além disso, aberturas somente na direção transversal ao vento mostraram causar um enfraquecimento do amortecimento aerodinâmico;
- c) no caso da abertura na direção paralela ao vento, as alturas de $0,8H$ e $0,9H$ mostraram o melhor desempenho na mitigação da resposta transversal. Por outro lado, modelos com abertura a $0,6H$ se mostraram mais adversos que modelos sem abertura.

1.4.5 Bekele e Putten (2005)

Bekele e Putten (2005) conduziram um estudo sobre o efeito da inserção de aberturas na região da base de edifícios, em complemento aos pesquisadores anteriores que se concentraram em estudar aberturas no topo. Os autores estudaram a influência que diferentes dimensões e formatos de aberturas na base de edifícios altos exerciam nos carregamentos de projeto, de serviço e no conforto de pedestres. Os formatos de abertura testados foram quadrado, oval e em arco, com porosidades (definida como a razão entre a área da abertura e a área da fachada correspondente) de 2 a 6%, totalizando sete modelos, nomeados de M1 a M7, conforme Figura 30.

Figura 30 - Modelos com diferentes formatos e dimensões de aberturas testados



(Fonte: BEKELE E PUTTEN, 2005)

Os modelos M5 e M6, que não aparecem na Figura 30, são análogos ao modelo M2, porém com porosidades de 3 e 4%, respectivamente.

Os ensaios em túnel de vento foram conduzidos em túnel de 16 metros de comprimento com seção transversal de 2 x 3 m. Todos os ensaios foram realizados levando-se em conta um perfil de turbulência associado a terrenos ocupados por cidades. Foram testadas incidências de 0° a 360°, variando-se de 15° em 15°.

As características gerais dos modelos ensaiados, na escala real, correspondem a um edifício de 200 m de altura, com largura de 25 m, frequência fundamental de 0,125 Hz, amortecimento em relação ao crítico de 1%. Os modelos foram construídos na escala 1:400.

Para interpretação dos resultados, ressalta-se que as aberturas foram concebidas em uma única direção, paralelamente ao eixo x. Diante dos resultados coletados, percebeu-se que – devido à inserção de aberturas – o coeficiente de momento médio na base do edifício reduziu em x, mas aumentou em y. A resposta dinâmica apresentou melhorias nas duas direções. Na direção y, o coeficiente de momento rms na base mostrou reduções de 15 a 20%: a maior redução ocorreu para o modelo M7. A resposta rms de deslocamentos na direção do vento mostrou que a inserção de aberturas na base melhora substancialmente as condições de serviço da estrutura. O modelo M7 mostrou 25% de redução dos deslocamentos, enquanto que os outros modelos mostraram de 10 a 20% de melhoria.

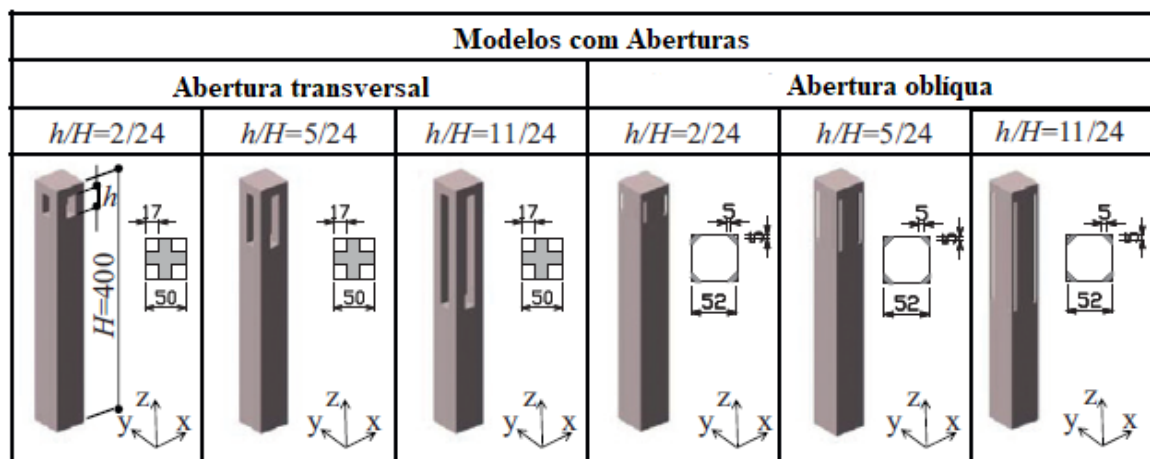
Em termos de conforto de pedestres, os edifícios com abertura na base mostraram uma menor área coberta pelo escoamento acelerado, se comparado ao edifício sem aberturas. No entanto, ventos fortes através das aberturas da base sugerem que a arquitetura do edifício deve levar em conta lugares adequados para se prever o acesso ao público.

1.4.6 Tanaka et al. (2012)

Tanaka et al. (2012) conduziram uma série de experimentos em túnel de vento a fim de investigar as características aerodinâmicas e avaliar a mais efetiva forma estrutural no quesito resistência ao vento no projeto de edifícios altos. Foram testados vários modelos com diferentes tipos de modificações aerodinâmicas, tais como: cantos chanfrados, modelos inclinados, afunilamento vertical, forma helicoidal, aberturas de grandes dimensões, além de alguns modelos híbridos que combinavam mais de uma configuração. Todos os protótipos possuíam

mesmo volume e mesma altura. Na Figura 31, é dada ênfase aos modelos com aberturas que foram testados.

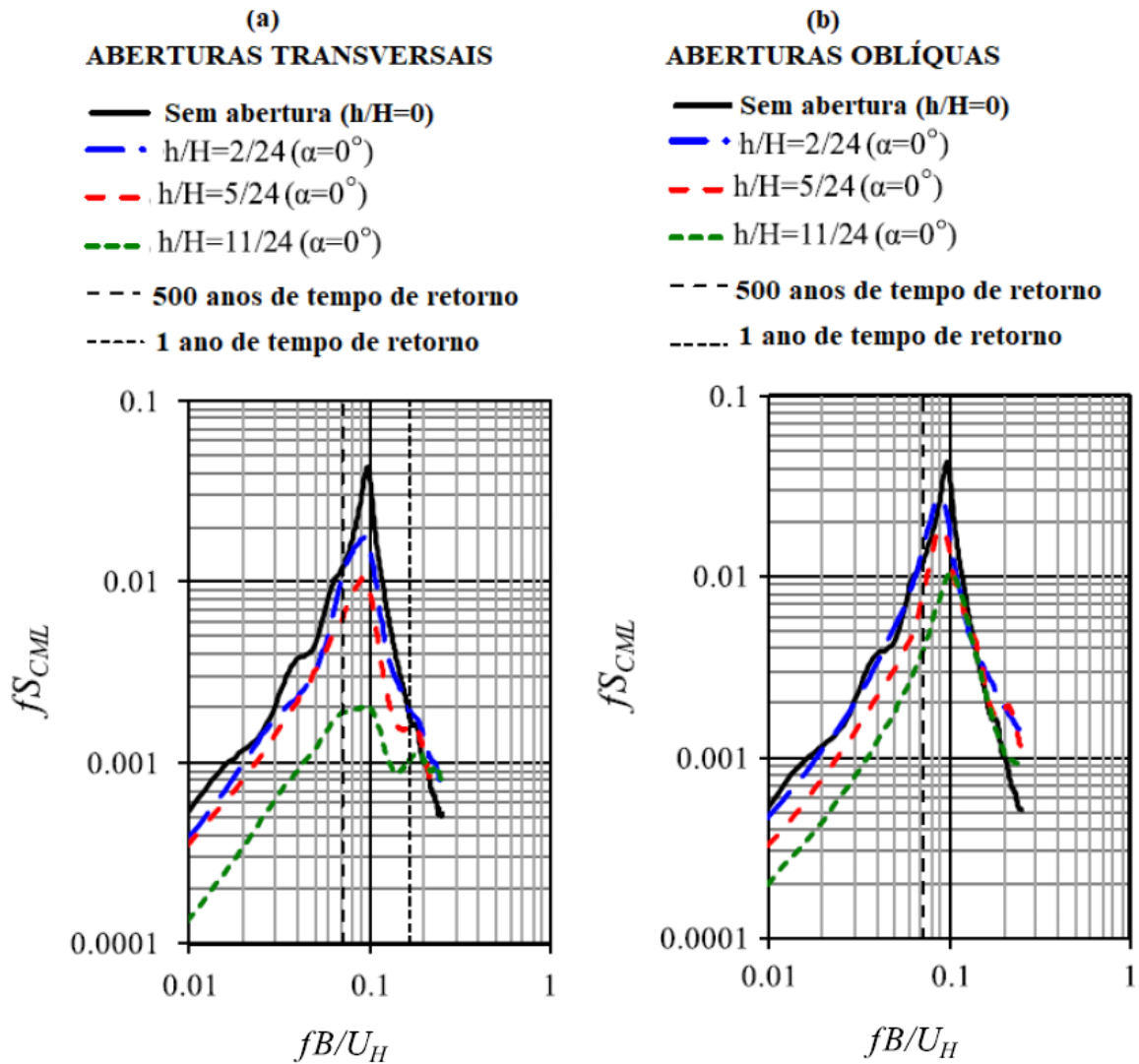
Figura 31 - Modelos dotados de abertura testados



(Fonte: adaptado de TANAKA ET AL., 2012)

Como pode ser observado na figura acima, foram testados seis modelos com diferentes aberturas, sendo que três possuem aberturas transversais em x e em y e outros três possuem aberturas oblíquas. A altura h de cada abertura está dada em relação à altura H do edifício. Os espectros de potência dos coeficientes de momento fletor na direção perpendicular ao vento dos modelos com aberturas podem ser visualizados na Figura 32. Considera-se a incidência de 0° apontando para o sentido positivo do eixo X .

Figura 32 - Espectros de potência para os modelos com aberturas (a) transversais e (b) oblíquas



(Fonte: adaptado de TANAKA ET AL., 2012)

Percebe-se que o modelo de aberturas transversais de relação $h/H = 11/24$ mostrou o menor pico dos espectros, tanto para 1 como para 500 anos de tempo de retorno e, além disso, apresentou a maior largura de banda.

1.4.7 Li et al. (2020)

Li et al. (2020) dirigiram um estudo investigando o carregamento do vento em edifícios altos com aberturas por meio de experimentos em túnel de vento. Diversos e distintos modelos foram criados a partir do *CAARC Standard Tall Building*, um modelo padrão com dimensões 30,48m

x 45,72m x 183,88m. O objetivo central era comparar o modelo sem aberturas com modelos com distintas aberturas, variando os seguintes parâmetros: localização vertical, porosidade e direção da abertura e categoria do terreno. Os modelos testados podem ser visualizados na Figura 33.

Figura 33 – Modelos ensaiados em túnel de vento

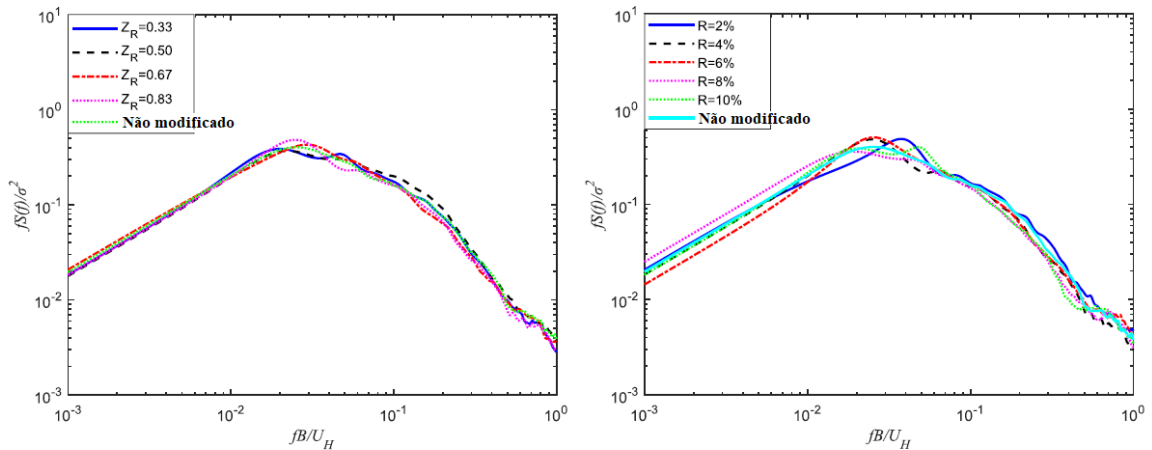


(Fonte: Li et al., 2020)

A partir dos ensaios conduzidos pelos autores, coeficientes de força, coeficientes de momentos fletores na base e espectros de potência foram gerados e interpretados.

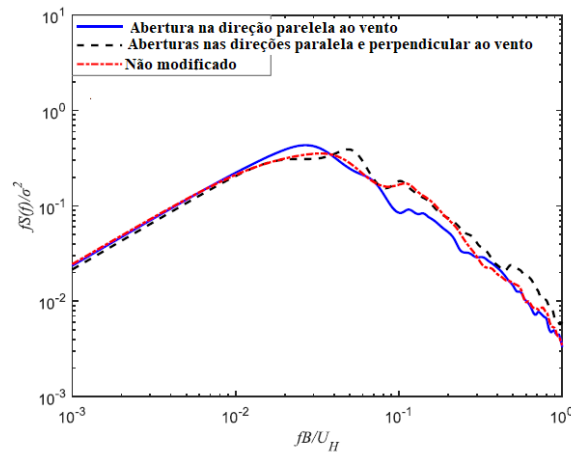
Os espectros de potência de momentos fletores na base relativos às comparações entre altura da abertura, porosidade e direções de abertura estão representados na Figura 34.

Figura 34 – Espectros de potência de momentos na base



(a) Opening height

(b) Opening rate



(c) Opening pattern

(Fonte: Li et al., 2020)

As principais conclusões obtidas estão enunciadas a seguir.

Em relação à altura das aberturas:

- os modelos com as aberturas dispostas de 33% a 83% da altura do edifício apresentam um declínio de 55% dos coeficientes médios e 53% dos coeficientes rms da força de arrasto;
- o coeficiente de força na direção transversal ao vento, no geral, diminuiu com o aumento da altura da abertura e da porosidade da abertura;
- o momento fletor na base na direção do vento decresce exponencialmente com o aumento da altura da abertura e da porosidade.

Em relação à porosidade das aberturas:

- quando a porosidade associada à abertura é maior que 4%, podem ser observadas significativas amplificações no coeficiente de força lateral rms à altura da abertura;
- o coeficiente de momento rms na direção perpendicular ao vento primeiro decresce e depois cresce à medida que a porosidade aumenta, indicando que a porosidade não deve ser maior que 8% sob o ponto de vista dos carregamentos perpendiculares ao vento.

Em relação à categoria do terreno:

- a redução dos coeficientes de força lateral e de arrasto causada pela abertura gradualmente aumenta à medida que a intensidade de turbulência aumenta.

Em relação às direções da abertura:

- modelos com aberturas nas duas direções reduzem o coeficiente de força lateral rms se comparado a modelos com abertura unidirecional;
- em se tratando de coeficientes de momento rms, as aberturas bidirecionais se mostraram significativamente mais efetivas do que aberturas unidirecionais.

Observações sobre os espectros:

- para o espectro de potências das forças do vento, a abertura tem pouca influência na direção do vento, entretanto pode reduzir consideravelmente o pico do espectro, podendo dar origem a dois picos;
- para o espectro de potência dos momentos da base, os parâmetros de abertura têm pouca influência na direção do vento;
- já na direção perpendicular ao vento, as frequências reduzidas correspondentes aos picos são menores nos modelos com abertura do que no modelo sem aberturas;
- o espectro de momentos de torção indicaram que certas áreas de abertura podem causar efeitos adversos em relação ao modelo sem aberturas.

1.5 OBJETIVOS DO ESTUDO

Esse capítulo mostrou que a inserção de grandes aberturas (porosidade em relação à fachada maior que 1%) em edifícios altos melhora o comportamento dinâmico das estruturas, atenuando carregamentos laterais causados pelo vento.

Nesse contexto, e considerando o fato de que essa técnica ainda não é explorada no Brasil, o estudo desse tema é de notável relevância. A presente dissertação terá dois objetivos, os quais são listados abaixo.

- a) Analisar experimentalmente, a partir de ensaios em túnel de vento, a inserção de uma grande abertura em um edifício alto de formato não convencional que

originalmente não possui abertura. Busca-se elaborar uma comparação entre os resultados provenientes dos relatórios de pressões do ensaio na configuração com e sem a abertura.

- b) Propor aberturas de diferentes relações altura:base, porém mantendo a área da abertura – e, conseqüentemente, a porosidade do edifício– constante. Busca-se entender a influência desse fator no comportamento da estrutura.

2 ENGENHARIA DO VENTO

Neste capítulo serão abordados alguns tópicos de importância da Engenharia do Vento, buscando levantar uma base teórica para o desenvolvimento da dissertação.

2.1 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

Para Irwin et al. (2013), as pressões devidas ao vento em um edifício alto podem ser bastante complexas. Ao passo que elas dependem da forma do edifício, elas dependem também da turbulência causada pela rugosidade do terreno e da interação aerodinâmica com edificações vizinhas. A superfície terrestre desacelera o vento próximo do terreno, dando origem à camada limite atmosférica (CLA), onde a velocidade do vento cresce com a altura.

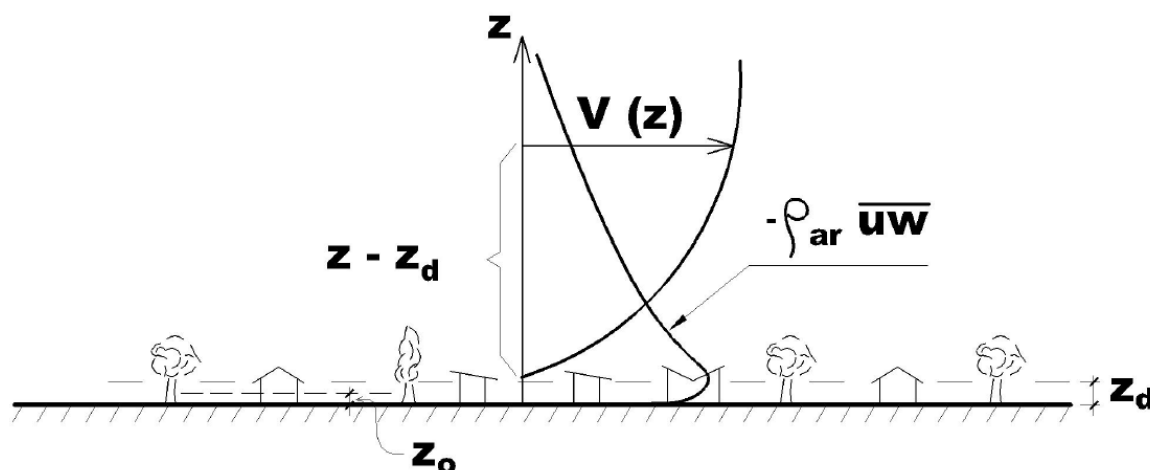
Segundo Loredou-Souza et al. (2004), a CLA corresponde à porção da troposfera que é diretamente influenciada pela superfície terrestre. Arrasto, evaporação e evapotranspiração, transferência de calor, emissão de poluentes e modificações do escoamento induzidas pela topografia são alguns dos fenômenos aos quais a CLA reage.

A espessura da CLA corresponde à altura gradiente (z_g) que, de acordo com Irwin et al. (2013), pode variar consideravelmente. Na presença de ventos velozes, a camada pode ter de dois a três quilômetros de espessura. Antigamente, como uma alternativa de simplificação, as normas de vento ao redor do mundo consideravam a velocidade do vento em altitudes de 250 a 450 metros constante, visto que a maioria das mudanças de turbulência ocorrem dentro dos primeiros duzentos metros da CLA. No entanto, atualmente, a consideração da variação da velocidade do vento em alturas superiores a 400 m é importante, pois edifícios cada vez mais altos estão sendo construídos e a necessidade de se considerar a inteira espessura da CLA torna-se relevante.

Segundo Loredou-Souza et al. (2004), as tensões turbulentas dentro da CLA dão origem a duas camadas com características distintas. A primeira é a dita camada superficial, onde os fluxos de tensão pouco variam em relação a sua média. Dentro da camada superficial, destaca-se a subcamada interfacial, cuja espessura é chamada de deslocamento do plano-zero (z_d) e corresponde à altura média dos edifícios. Nessa subcamada, o transporte molecular sobrepõe-

se ao transporte turbulento. A segunda é a camada de Ekman, onde as tensões de Reynolds, denotadas por $-\rho_{ar}\overline{u'w'}$, atingem seu valor máximo em $z = z_d$ e decrescem com a altura até se tornarem muito baixas próximas à altura gradiente z_g . A Figura 35 ilustra a camada limite atmosférica.

Figura 35 – Camada Limite Atmosférica



(Fonte: LOREDO-SOUZA ET AL., 2004)

A seguir, será visto com mais detalhes como a velocidade do vento se comporta dentro da CLA.

2.2 VELOCIDADE DO VENTO

Segundo Irwin et al. (2013), as pressões do vento em um edifício alto flutuam não somente pelo fato do escoamento ser turbulento, mas também porque o edifício cria sua própria turbulência. As flutuações devido a essas duas turbulências ocorrem muito mais rapidamente do que as mudanças na velocidade do vento devidas a algum fenômeno meteorológico. Mudanças na velocidade do vento devido à passagem de algum fenômeno meteorológico acontecem dentro de horas, enquanto que as flutuações de turbulência ocorrem dentro de segundos. A linha divisória entre eventos de turbulência e eventos meteorológicos de larga escala temporal costuma se posicionar entre 10 e 60 minutos. Assim, é conveniente tratar carregamentos médios do vento a partir de medições dentro desse intervalo. Para caracterizar as flutuações em relação à média, são usados tratamentos estatísticos.

Como visto, a velocidade do vento possui duas parcelas: uma flutuante (ligada aos efeitos dinâmicos) e uma média (ligada aos efeitos estáticos). A Equação 4 mostra como lidar matematicamente com essas duas parcelas e o gráfico da Figura 36 mostra um registro típico de velocidades ao longo do tempo.

$$V(t) = \bar{V} + v(t) \quad (4)$$

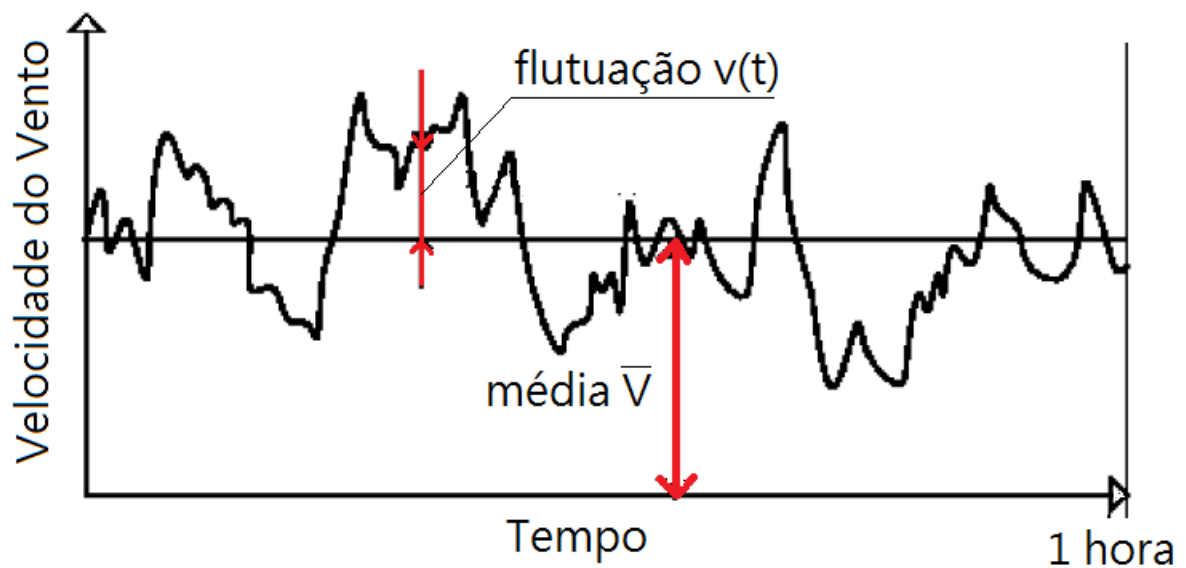
onde:

$V(t)$ = Velocidade do vento (m/s);

\bar{V} = Parcela de velocidade média do vento (m/s);

$v(t)$ = Parcela de velocidade flutuante do vento (m/s).

Figura 36 – Registro e velocidade do vento indicando a parcela média e a parcela flutuante



(Fonte: adaptado de KLEIN, 2004)

A seguir, será visto como modelar matematicamente a velocidade média e a velocidade flutuante do vento.

2.2.1 Velocidade Média do Vento

De acordo com Loredo-Souza et al. (2004), tradicionalmente, são usados modelos matemáticos para representar o desenvolvimento da velocidade média do vento na camada limite atmosférica: o perfil em lei de potência e o perfil logarítmico.

O perfil em lei de potência é dado pela Equação 5.

$$\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}(z_{ref})} = \left(\frac{z - z_d}{z_{ref}} \right)^p \quad (5)$$

onde:

$\bar{V}(z)$ = velocidade média na altura z (m/s);

z_{ref} = altura de referência (m);

$\bar{V}(z_{ref})$ = velocidade média na altura de referência (m/s);

z = altura (m);

z_d = deslocamento do plano-zero (m);

p = parâmetro de rugosidade (adimensional).

A altura de referência é tomada como 10 m e a velocidade de referência é a velocidade nessa altura. O parâmetro p pode variar de 0,11 para superfícies pouco rugosas (como oceanos e campos abertos) a 0,34 para superfícies de alta rugosidade (como núcleos urbanos de cidades grandes). Esse perfil é usado em várias normas ao redor do mundo, inclusive na NBR 6123 (ABNT, 1988).

O perfil de velocidades dado pela lei logarítmica é apresentado na Equação 6.

$$\frac{\bar{V}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \left(\frac{z - z_d}{z_0} \right) \quad (6)$$

onde:

u_* = velocidade de fricção (m/s);

κ = constante de Kàrmàn (adimensional);

z_0 = rugosidade aerodinâmica (m).

Na Equação 6, a constante de Kàrmàn é usualmente tomada como 0,4. Os parâmetros u^* e z_0 dependem das características físicas do terreno e do vento.

Acima foram apresentadas as expressões matemáticas dos perfis de velocidade média do vento mais usados na Engenharia do Vento. A seguir, a partir de Loredou-Souza et al. (2004), apresenta-se o Quadro 1, que discorre sobre vantagens e desvantagens em se usar cada perfil:

Quadro 1 – Comparação entre o perfil em lei de potência e o perfil em lei logarítmica

Lei potencial		Lei logarítmica	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
Representa bem o perfil médio de velocidades.	Não reconhece o topo da CLA e a velocidade do vento aumenta indefinidamente.	Bom ajuste na camada próxima à superfície.	Pobre ajuste na região superior da CLA.
Bom ajuste na camada de Ekman.	Não está vinculada a uma justificativa teórica.	Apresenta fator de escala (z_0).	Problema na transição de perfil de velocidades entre duas rugosidades diferentes.
	Pobre ajuste na camada próxima à superfície.	Possui justificativa teórica.	

(Fonte: elaborado pelo Autor a partir de LOREDO-SOUZA ET AL., 2004)

2.2.2 Velocidade Flutuante do Vento

Segundo Troian (2018), o número de variáveis envolvidas na previsão das flutuações do vento é grande. Dessa forma, para estudar a resposta de estruturas solicitadas pelo vento, emprega-se um tratamento estatístico, o que gera resultados fieis à realidade. O processo de análise dinâmica de uma estrutura consiste em simular o campo de velocidades do vento, composto pela sua parcela flutuante e pela sua parcela média, para obter a variação dos esforços nos elementos estruturais. No item 2.6 deste capítulo, a análise dinâmica será exposta com mais detalhes.

Cabe ressaltar, como aponta Klein (2004), que a parcela flutuante do vento se torna relevante em estruturas de baixa frequência natural. Admite-se que as rajadas de vento sejam um fenômeno **aleatório estacionário ergódico**. Tal fenômeno é dito **aleatório**, segundo Simiu e

Yeo (2019), pois a velocidade do vento em qualquer ponto do espaço é uma função aleatória do tempo e, em qualquer momento, a velocidade é uma função aleatória da posição no espaço. No entanto, ressalta-se que se o número de amostras for grande o suficiente, haverá regularidade estatística. O fenômeno é dito **estacionário** pois as propriedades estatísticas não dependem da escolha da origem do tempo e não variam com o tempo. Por fim, o fenômeno é dito **ergódico**, pois qualquer registro de velocidades em função do tempo suficientemente longo é capaz de gerar parâmetros estatísticos representativos desse processo.

A seguir, será apresentada a teoria de processos aleatórios e como aplicá-la em Engenharia do Vento.

2.3 TEORIA DE PROCESSOS ALEATÓRIOS

A ideia de usar um modelo matemático para descrever um fenômeno físico é bem estabelecida na Engenharia. Nesse contexto, distinguem-se duas classes de modelos matemáticos: os determinísticos e os estocásticos. Quando um modelo não apresenta incertezas em relação ao seu comportamento no tempo, ele é dito determinístico. No entanto, muitos problemas do mundo real apresentam muitos fatores desconhecidos, impossibilitando o emprego de um modelo determinístico. Porém, pode ser possível determinar a probabilidade de que valores futuros de algum fenômeno se encontrem dentro de algum intervalo. Nesse caso, o modelo é dito estocástico (HAYKIN, 2001).

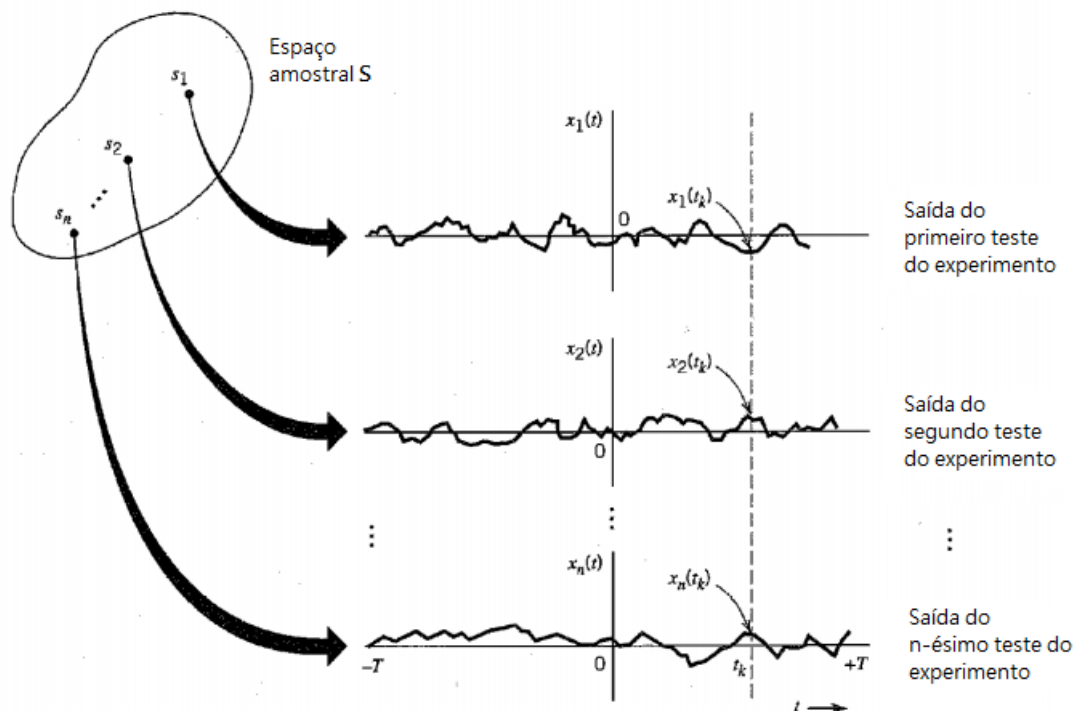
As rajadas de vento podem ser modeladas por meio da teoria de processos aleatórios. A seguir, serão abordados alguns tópicos importantes da teoria de processos aleatórios.

2.3.1 Experimentos Aleatórios

Quando se trata de experimentos aleatórios, convém pensar em termos de espaço amostral. Cada saída do experimento estará associada a um ponto amostral e a totalidade dos pontos amostrais que correspondem a todas possíveis saídas do experimento é chamado de espaço amostral. Cada ponto amostral é uma função do tempo. O espaço amostral de um conjunto de funções do tempo é chamado de processo aleatório ou estocástico. Ainda, assume-se a existência de uma distribuição de probabilidade definida sobre uma classe apropriada de conjuntos no espaço amostral para que seja possível definir a probabilidade de vários eventos (HAYKIN, 2001).

Seja S um espaço amostral, s_n o ponto amostral n e x_n a função amostral n , graficamente pode ser representado conforme a Figura 37.

Figura 37 – Representação gráfica de um espaço amostral genérico



(Fonte: HAYKIN, 2001)

Segundo Haykin (2001), pode-se definir formalmente um processo aleatório como um conjunto de funções temporais, juntamente com uma regra de probabilidade que atribui uma

probabilidade a qualquer evento significativo associado à observação de uma das funções de amostra do processo aleatório.

2.3.2 Parâmetros Estatísticos

Segundo Blessmann (2011), sendo $x(t)$ uma variável aleatória em um processo ergódico, podem ser definidos os seguintes parâmetros estatísticos.

a) **Valor médio ou média:** dado pela Equação 7.

$$\bar{x} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt = \langle x(t) \rangle \quad (7)$$

onde:

T = tamanho do intervalo medido (s);

$\bar{x} = \langle x(t) \rangle$ = valor médio da função $x(t)$.

b) **Valor quadrado médio:** dado pela Equação 8.

$$\overline{x^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt = \langle x^2(t) \rangle \quad (8)$$

onde:

$\overline{x^2} = \langle x^2(t) \rangle$ = valor quadrado médio da função $x(t)$.

c) **Variância:** dado pela Equação 9.

$$\sigma_x^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \bar{x}]^2 dt = \langle [x(t) - \bar{x}]^2 \rangle \quad (9)$$

onde:

$\sigma_x^2 = \langle [x(t) - \bar{x}]^2 \rangle = \text{variância.}$

- d) **Desvio padrão:** é a raiz quadrada da variância.
- e) **Valor *Root Mean Square (rms)*:** é a raiz quadrada do valor quadrado médio. Também recebe o nome de média quadrática.
- f) **Função de autocorrelação ou correlação temporal:** é dado conforme a Equação 10 e quantifica a dependência entre o valor do fenômeno em um instante t e o valor em um instante $t+\tau$. Segundo Zampiron (2008), em engenharia do vento, esse parâmetro permite estudar a natureza repetitiva da turbulência.

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt = \langle x(t)x(t+\tau) \rangle \quad (10)$$

onde:

$R_x(\tau) = \langle x(t)x(t+\tau) \rangle = \text{função de autocorrelação (dimensão da variável)}^2;$

$\tau = \text{retardo em relação ao instante } t \text{ (s).}$

Segundo Blessmann (2011), ao aplicar os parâmetros estatísticos vistos acima ao caso do escoamento de um fluido, tem-se o seguinte:

- a) **Velocidade média:** conforme Equação 11.

$$\bar{V}(\vec{r}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T V(\vec{r}; t)dt = \langle V(\vec{r}; t) \rangle \quad (11)$$

onde:

$\bar{V}(\vec{r}) = \langle V(\vec{r}; t) \rangle = \text{velocidade média (m/s);}$

$\vec{r} = \text{vetor posição.}$

- b) Variância da flutuação da velocidade: conforme Equação 12.

$$\sigma_v^2(\vec{r}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T v^2(\vec{r}; t) dt = \langle v^2(\vec{r}; t) \rangle \quad (12)$$

onde:

$\bar{V}(\vec{r}) = \langle V(\vec{r}; t) \rangle =$ velocidade média (m/s).

2.3.3 Propriedades Estatísticas da Turbulência

A seguir serão apresentadas algumas propriedades estatísticas associadas à turbulência do vento.

- a) **Intensidade da Turbulência:** segundo Blessmann (2011), corresponde ao quociente entre o desvio padrão das flutuações e uma velocidade de referência. Essa velocidade pode ser tomada no ponto em que se mediu o desvio padrão (intensidade local de turbulência, conforme Equação 13) ou pode ser uma velocidade de normalização (intensidade normalizada de turbulência, conforme Equação 14). Fisicamente, a intensidade de turbulência pode ser enxergada como uma medida adimensional da energia cinética contida nas componentes flutuantes da velocidade.

$$I_i(\vec{r}) = \frac{\sigma_i(\vec{r})}{\bar{V}(\vec{r})}, \quad i = 1,2,3 \quad (13)$$

onde:

$\sigma_i(\vec{r}) =$ desvio padrão.

$$I_{io}(\vec{r}) = \frac{\sigma_i(\vec{r})}{V_{ref}}, \quad i = 1,2,3 \quad (14)$$

onde:

$V_{ref} =$ velocidade de normalização (m/s).

- b) **Correlação Cruzada (espacial):** segundo Blessmann (2011), indica a similaridade existente entre as flutuações da velocidade do vento em dois pontos. Configura-se, conforme Zampiron (2008), como uma maneira alternativa de descrever as características espaciais da turbulência.
- c) **Espectro de Potência:** de acordo com Blessmann (2011), o espectro de potência é uma representação da distribuição em frequências da energia cinética contida nas rajadas do vento. Esse conceito será aprofundado no item 2.6.
- d) **Distribuição de Probabilidades:** segundo Blessmann (1995) apud Zampiron (2008), a distribuição de probabilidades permite que se entenda a frequência relativa da ocorrência de cada velocidade. É razoável afirmar que essa distribuição assume o formato da distribuição normal de probabilidades, podendo ser simplesmente representada pela velocidade média e pelo desvio padrão.

2.4 INTERAÇÃO VENTO-ESTRUTURA

Neste item, serão abordados os principais tópicos que dizem respeito à interação do vento com as estruturas. Inicia-se por uma breve contextualização do Número de Reynolds e segue-se em direção aos coeficientes e carregamentos aerodinâmicos.

2.4.1 Número de Reynolds

Em um escoamento, as forças que atuam são as forças gravitacionais, inerciais, viscosas e de pressão. No caso do vento, serão relevantes as forças inerciais e viscosas. A relação entre as forças de viscosidade e as forças de inércia é chamada de número de Reynolds, como mostra a Equação 15 (BLESSMANN, 2011).

$$Re = \frac{uL}{\nu} \quad (15)$$

onde:

u = velocidade característica do escoamento (m/s);

L = comprimento característico do corpo em estudo (m);

ν = viscosidade cinemática (m²/s).

Um baixo valor do número de Reynolds aponta que as forças viscosas são predominantes, em relação às forças inerciais. Um número de Reynolds alto evidencia um predomínio das forças inerciais frente às viscosas (BLESSMANN, 2011). Com um Reynolds significativo, um corpo é capaz forçar seu movimento através das linhas de corrente. Um bom exemplo disso é um grande navio (com número de Reynolds em torno de 1×10^9) comparado a um barco de papel: o navio pode forçar seu caminho através da corrente e das ondas, enquanto o leve barco de papel não pode, sendo a única alternativa possível ser arrastado pelo escoamento (RAPP, 2017).

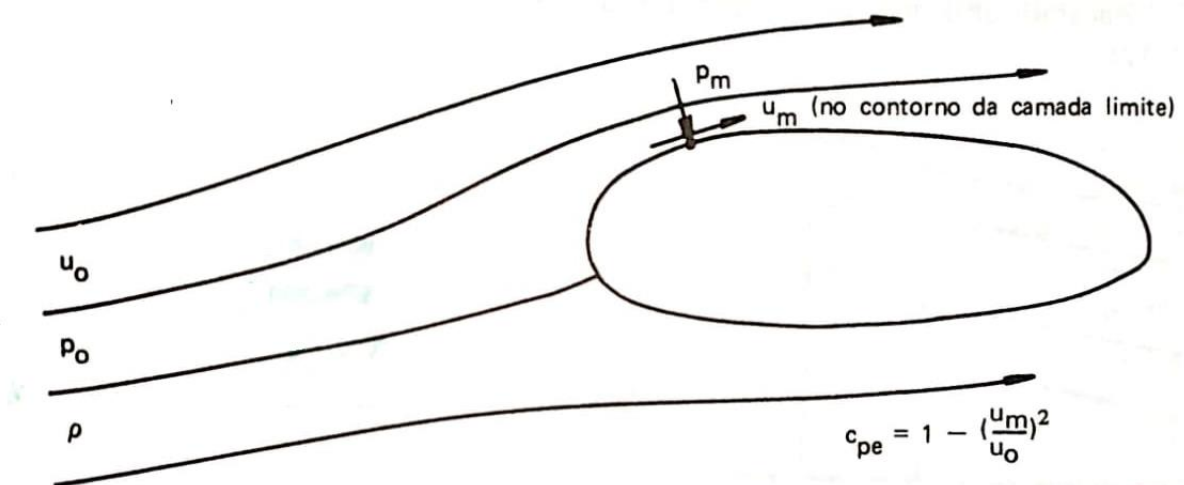
2.4.2 Coeficientes Aerodinâmicos

Os coeficientes aerodinâmicos que aqui serão abordados são os coeficientes de pressão, de forma e de força.

2.4.2.1 Coeficientes de Pressão

Inicia-se pela definição do **coeficiente de pressão externa**. Para introduzir este conceito, considera-se a Figura 38.

Figura 38 - Definição de coeficiente de pressão externa



(Fonte: BLESSMANN, 2011)

Em relação à figura acima, u_o e p_o são, respectivamente, a velocidade e a pressão estática do escoamento em um ponto da corrente não afetada pela presença do corpo. Por outro lado, p_m e u_m são, respectivamente, a pressão estática e a velocidade junto ao corpo (a rigor, no contorno da camada limite). A diferença entre p_m e p_o é chamada de pressão efetiva externa, Δp_e . Da Equação de Bernoulli, tem-se:

$$\Delta p_e = p_m - p_o = \frac{1}{2} \rho u_o^2 - \frac{1}{2} \rho u_m^2 \quad (16)$$

onde:

ρ = massa específica do fluido (kg/m^3).

Manipulando-se algebricamente a Equação 16, tem-se:

$$\Delta p_e = p_m - p_o = \frac{1}{2} \rho u_o^2 \left[1 - \left(\frac{u_m}{u_o} \right)^2 \right] = \frac{1}{2} \rho u_o^2 c_{pe} = q c_{pe} \quad (17)$$

onde:

c_{pe} = coeficiente de pressão externa (adimensional);

q = pressão dinâmica do vento (N/m^2), região não perturbada.

O maior valor que o coeficiente de pressão externa assume é +1 (maior sobrepressão possível), quando a velocidade u_m é nula (isso ocorre no ponto de estagnação). O coeficiente será nulo quando as velocidades u_m e u_o forem iguais. Por fim, o coeficiente será negativo (sucção) quando a velocidade u_m for maior que a velocidade u_o (BLESSMANN, 2011).

O **coeficiente de pressão interna**, segundo Blessmann (2011), é análogo ao coeficiente de pressão externa. A pressão efetiva interna será dada conforme a Equação 18.

$$\Delta p_i = q c_{pi} \quad (18)$$

onde:

c_{pi} = coeficiente de pressão interna (adimensional).

Por fim, a pressão efetiva será a diferença entre a pressão externa e a interna, conforme a Equação 19.

$$\Delta p = \Delta p_e - \Delta p_i = (c_{pe} - c_{pi})q = c_p q \quad (19)$$

onde:

c_p = coeficiente de pressão (adimensional).

2.4.2.2 Coeficientes de Forma

Segundo NBR 6123 (1988), a força do vento agindo em um elemento plano de área A é dada pela Equação 20.

$$F = F_e - F_i \quad (20)$$

onde:

F_e = força externa à edificação, resultante das pressões externas na área A (N);

F_i = força interna à edificação, resultante das pressões internas na área A (N).

As forças externas e internas são calculadas a partir das Equações 21 e 22:

$$F_e = C_e q A \quad (21)$$

onde:

C_e = coeficiente de forma externo (adimensional).

$$F_i = C_i q A \quad (22)$$

onde:

C_i = coeficiente de forma interno (adimensional).

Portanto, o **coeficiente de forma** é definido pela diferença entre os coeficientes de forma externo e interno:

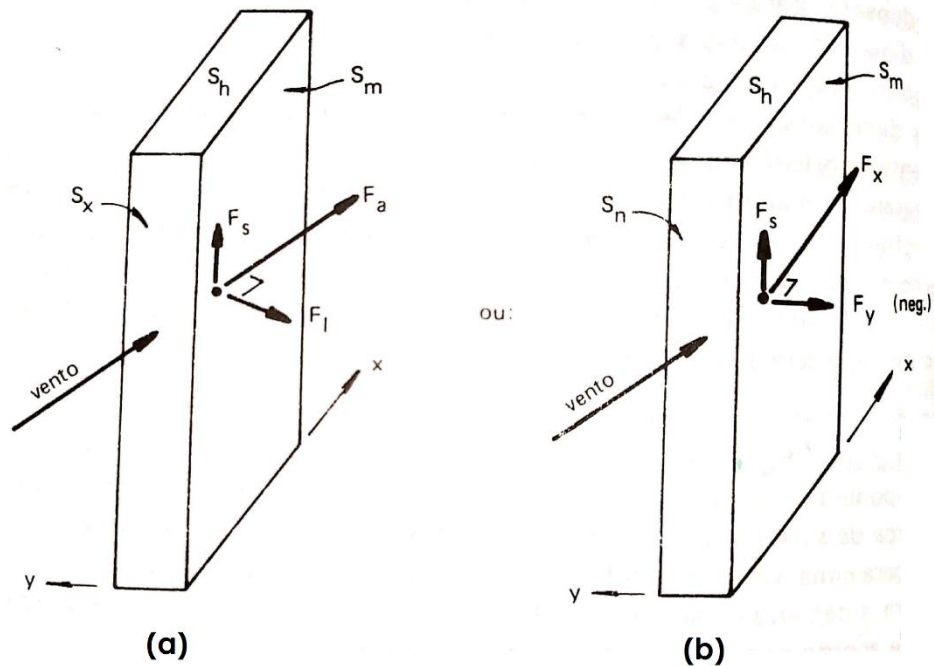
$$C = C_e - C_i \quad (23)$$

É importante destacar que quando o coeficiente de pressão c_{pe} é constante em uma superfície plana, tem-se $c_{pe} = C_e$. Às mesmas condições, tem-se $c_{pi} = C_i$ e, conseqüentemente, $c_p = C$.

2.4.2.3 Coeficiente de Força

De acordo com Blessmann (2011), o vento que incide em um edifício gera uma força resultante sobre ele, chamada de **força global**. Esta força tem uma componente vertical (chamada de força de sustentação) e uma componente horizontal. Existem duas maneiras de decompor a força horizontal: de acordo com os eixos x e y ou de acordo com a direção do vento. Isso pode ser visualizado na Figura 39:

Figura 39 - Decomposição da força horizontal do vento segundo (a) a direção do vento e (b) segundo os eixos x e y



(Fonte: BLESSMANN, 2011)

No primeiro sistema de referência (Figura 37a), a força na direção do vento leva o nome de **força de arrasto**, enquanto que a força perpendicular a ela leva o nome de **força lateral**. A definição dessas duas forças permite a introdução do coeficiente de força (C_f), que assume a forma da Equação 24.

$$C_f = \frac{F}{qA} \quad (24)$$

Os coeficientes de força são determinados experimentalmente e a Equação acima é utilizada para determinar a força atuante nas edificações.

Pela abordagem da força horizontal decomposta nos eixos x e y , tem-se os seguintes coeficientes (Equações 25 e 26).

$$C_x = \frac{F_x}{qA} \quad (25)$$

onde:

C_x = coeficiente de força na direção x (adimensional);

F_x = força na direção x (N).

$$C_y = \frac{F_y}{qA} \quad (26)$$

onde:

C_y = coeficiente de força na direção y (adimensional);

F_y = força na direção y (N).

Utilizando-se a abordagem de força de arrasto e força lateral, tem-se os seguintes coeficientes (Equações 27 e 28).

$$C_a = \frac{F_a}{qA} \quad (27)$$

onde:

C_a = coeficiente de arrasto (adimensional);

F_a = força de arrasto (N).

$$C_l = \frac{F_l}{qA} \quad (28)$$

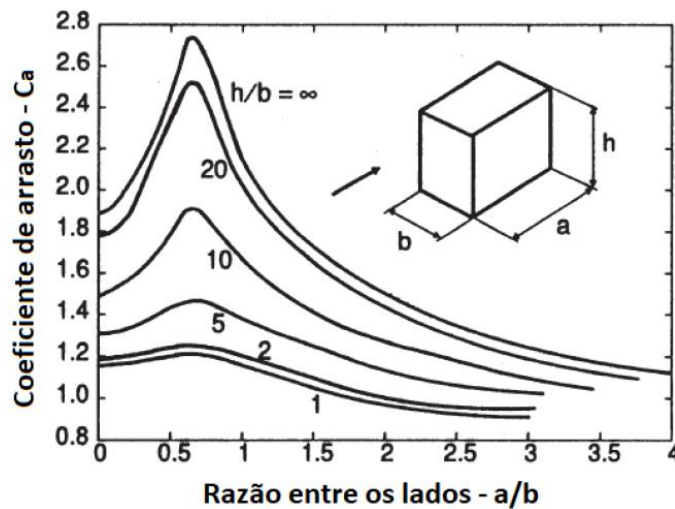
onde:

C_l = coeficiente de força lateral (adimensional);

F_l = força lateral (N).

O coeficiente de arrasto, para um edifício paralelepípedo, segundo SOCKEL (1994) apud SCHARNBERG (2018), varia com relação às suas dimensões, como pode ser visualizado na Figura 40.

Figura 40 - Variação do coeficiente de arrasto para corpo paralelepípedo



(Fonte: SOCKEL, 1994 apud SCHARNBERG, 2018)

Ainda, pode-se definir um coeficiente para a força de sustentação, conforme a Equação 29.

$$C_s = \frac{F_s}{qA} \quad (29)$$

onde:

C_s = coeficiente de sustentação (adimensional);

F_s = força de sustentação (N).

Nos casos em que a força horizontal do vento não coincidir com eixo vertical de torção da edificação, passará a atuar nela um momento de torção ao qual também se atribui um coeficiente:

$$C_t = \frac{M_t}{qAL} \quad (30)$$

onde:

C_t = coeficiente de torção (adimensional);

M_t = momento de torção (Nm);

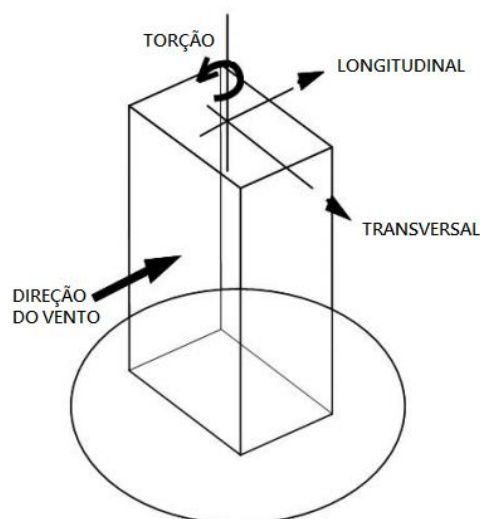
L = dimensão linear de referência (m).

O momento de torção, por sua vez, é calculado através do produto da força horizontal do vento pela excentricidade associada (BLESSMANN, 2011).

2.4.3 Carregamento Devido ao Vento em Edificações

Segundo Vogado (2018), pode-se classificar o carregamento do vento quanto a sua direção como de flexão e de torção. O de flexão ainda pode ser dividido em de flexão transversal e de flexão longitudinal. A Figura 41 representa bem estes três carregamentos.

Figura 41 - Tipos de carregamento devido ao vento



(Fonte: adaptado de MENDIS ET AL., 2007)

De acordo com Kareem e Zhou (2003), em grande parte dos casos, a resposta devido a carregamentos transversais e torcionais são tão importantes quanto o carregamento longitudinal. No entanto, as normas usadas no mundo dão muito mais foco ao carregamento longitudinal.

Causado pelas pressões atuantes nas fachadas a barlavento e sotavento, o **carregamento longitudinal** é o mais conhecido e mais aprofundado em normas de vento. Em edifícios baixos, ele representa a parcela mais significativa do carregamento (VOGADO, 2018).

Quanto ao **carregamento transversal**, Mendis et al. (2007) explicam que existem muitas estruturas que são suscetíveis a movimentações perpendiculares à incidência do vento, tais como grandes chaminés, postes de luz, torres e cabos. Essa excitação transversal em edifícios altos é basicamente dividida em três mecanismos: desprendimento de vórtices, a turbulência incidente e galope. Estes mecanismos serão abordados no item 2.5.

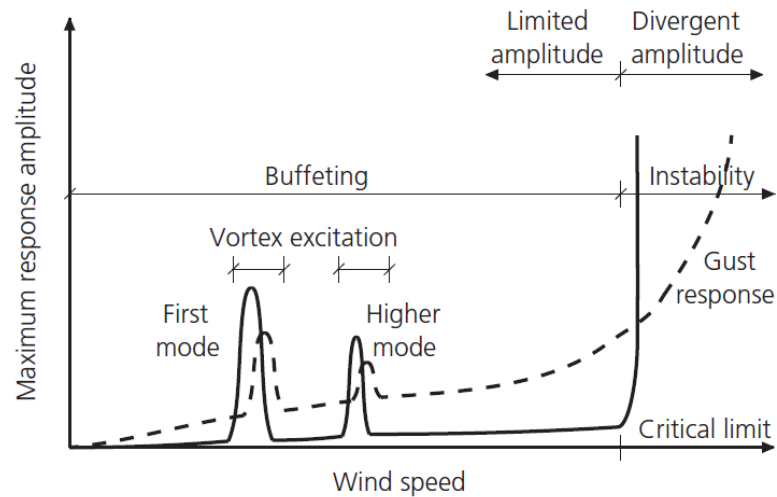
Isyumov e Case (2000) indicam que a magnitude do **carregamento torcional** depende da forma do edifício, da influência da vizinhança e da direção do vento. Até mesmo em edifícios de planta simétrica, como retangular, e com vizinhanças que exercem pouca influência, o carregamento torcional pode existir se a direção do vento não for ao longo de uma linha de simetria. Os efeitos da torção podem ser acentuados em caso de excentricidade entre os centros de rigidez, massa e força do vento ou em edifícios de longos períodos fundamentais. A torção excessiva pode colaborar para o surgimento de fissuras no edifício e causar desconforto aos ocupantes.

2.5 EFEITOS DINÂMICOS CAUSADOS PELO VENTO

Estruturas flexíveis dinamicamente sensíveis ao vento, tais como pontes de longos vãos e edifícios altos, oscilam sob a ação do vento. O movimento dessas estruturas gera forças aerodinâmicas conhecidas como forças auto induzidas. O amortecimento total de uma estrutura é definido como a combinação do amortecimento estrutural e do amortecimento aerodinâmico (o qual será abordado no item 2.5.1). Quando o amortecimento total é negativo, as amplitudes de movimento crescem e podem divergir. A velocidade do vento a partir da qual esse fenômeno ocorre é chamada de velocidade crítica (ABBAS ET AL., 2017, tradução nossa). Na figura 42,

tem-se o comportamento de pontes de longos vãos submetidas a uma crescente velocidade do vento.

Figura 42 - Diagrama de resposta de pontes em função da velocidade do vento (linha contínua = escoamento uniforme; linha tracejada = escoamento turbulento)



(Fonte: ABBAS ET AL., 2017)

A seguir, serão abordados alguns dos efeitos dinâmicos do vento, como Galope, Drapejamento, Martelamento e Desprendimento de Vórtices.

2.5.1 Galope

É necessário, antes de definir galope, expor o conceito de **amortecimento aerodinâmico**. Conforme afirma Beards (1996, tradução nossa) energia pode ser dissipada através do ar em que uma estrutura vibra. As forças amortecedoras normalmente possuem uma natureza retardadora, atuando contra o movimento. No entanto, há casos em que o próprio movimento da estrutura gera forças amortecedoras que alimentam este movimento. Uma estrutura que experimenta movimento relativo do vento está sujeita a amortecimento aerodinâmico negativo e se esse valor negativo superar, em módulo, o amortecimento estrutural, instabilidades aerodinâmicas severas podem ocorrer. Enfatiza-se, no entanto, que o amortecimento aerodinâmico também pode ser positivo, o que não causa instabilidade.

Essa instabilidade aerodinâmica pode ser manifestar através do galope (*galloping*, em inglês). Trata-se de um fenômeno que causa oscilações de alta amplitude e baixa frequência em corpos alongados expostos transversalmente ao vento, observado frequentemente em cabos de linhas de transmissão de energia (BEARDS, 1996, tradução nossa).

2.5.2 Drapejamento

O drapejamento (*flutter*, em inglês) é o movimento resultante do acoplamento aerodinâmico de dois modos de vibração. As estruturas mais afetadas pelo drapejamento são pontes suspensas e altas torres não circulares, onde a ocorrência de flexão e torção é significativa (BEARDS, 1996, tradução nossa).

Segundo Abbas et al. (2017, tradução nossa), o drapejamento é um fenômeno aeroelástico autoalimentado e têm uma grande relevância quando observado em pontes. As forças aerodinâmicas geradas na laje da ponte se acoplam com o movimento dela e, se a energia proveniente das forças aerodinâmicas sob altas velocidades do vento supera a energia dissipada pelo amortecimento estrutural da ponte, as amplitudes de vibração crescem. Essa crescente vibração amplifica as forças aerodinâmicas, resultando em um contínuo crescimento de forças e oscilações auto excitadas.

Abbas et al. (2017, tradução nossa) ainda afirma que a condição crítica para que haja ocorrência de drapejamento é alcançada na velocidade do vento em que a entrada de energia no sistema se iguala à energia dissipada pelo amortecimento estrutural. Movimento vertical e torcional ocorrem com uma diferença de fase, a qual é essencial para que a energia do vento seja transferida à estrutura. Quanto menor for a frequência de separação desses dois modos, maior será o risco de ocorrer drapejamento.

2.5.3 Martelamento

Segundo Blessmann (2005) apud Scharnberg (2018), estruturas situadas a sotavento de obstáculos (como outras estruturas ou árvores) podem sofrer influência da esteira aerodinâmica. Dependendo da localização de tais obstáculos e da intensidade de turbulência do vento, a estrutura que se encontrar imersa na esteira, poderá sofrer o fenômeno chamado de

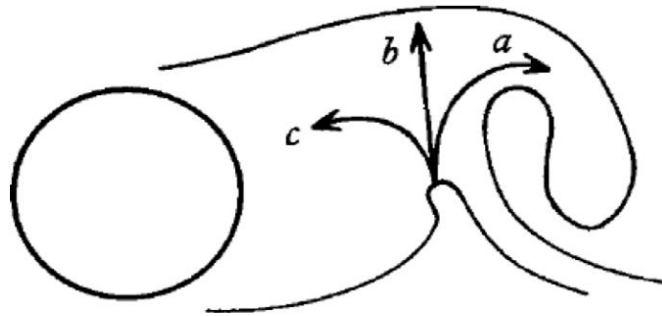
martelamento (*buffeting*, em inglês). Isso ocorre quando os turbilhões gerados a barlavento incidem contra a estrutura, de maneira compassada, com uma frequência definida. Se essa frequência se aproximar a uma das frequências naturais da estrutura, oscilações de grande amplitude poderão ocorrer. Se a intensidade de turbulência na região da esteira for grande, a energia se distribuirá sob uma grande gama de frequências, tornando o espectro de potências notavelmente alargado, o que ameniza a amplitude das vibrações. As vibrações ocorrerão paralelamente ao sentido do vento.

2.5.4 Desprendimento de Vórtices

Um corpo submetido a turbilhões associados a um determinado número de Reynolds, poderá experimentar desprendimentos desses turbilhões de maneira alternada em ambos lados do corpo paralelos ao escoamento. Se esse desprendimento ocorre de maneira alternada e ordenada, esses turbilhões são chamados de vórtices de Von Kármán. Esses vórtices permitem o surgimento de forças periódicas, nos dois lados do corpo paralelos ao escoamento, que geram oscilações transversais à direção do vento. É de suma relevância constatar que se a frequência dessas forças periódicas se igualar à frequência natural da estrutura, as oscilações bastante significativas, esse fenômeno é conhecido como *lock-in*. (BLESSMANN, 2011).

Em relação ao mecanismo de formação do desprendimento de vórtices, Gerrard (1966) apud Hrisheekesh et al. (2019, tradução nossa) explica o fenômeno para um corpo rombudo cilíndrico. Havendo uma região vorticial crescente no topo deste cilindro, fluidos serão atraídos através dessa região. Este fluido atraído se divide em três ramos, conforme ilustrado na figura 43. O ramo (a) alimenta o vórtice já desprendido, o ramo (b) causa a separação da estrutura vorticial inicial, liberando-a para a esteira e o ramo (c), atuando no sentido anti-horário, alimenta o vórtice recém-formado, que ficará mais forte ao longo de um período de tempo.

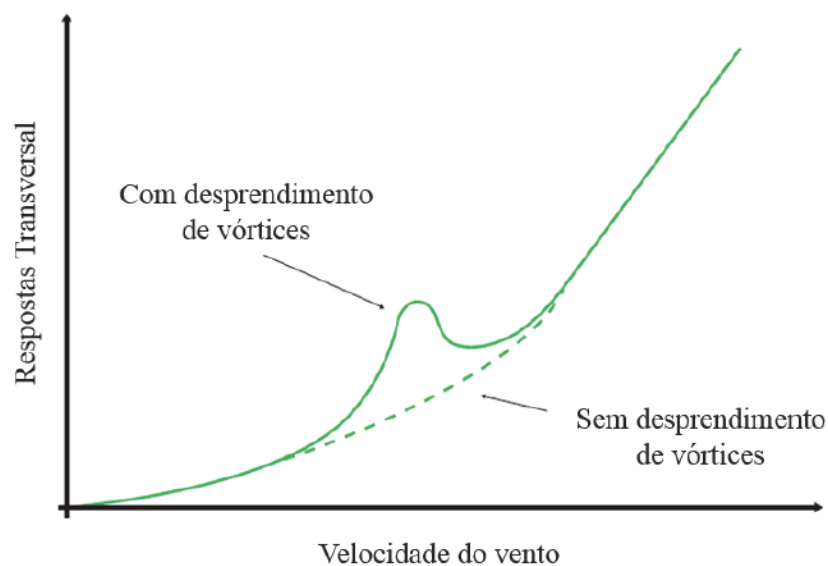
Figura 43 - Mecanismo de formação de desprendimento de vórtices



(Fonte: GERRARD, 1966 apud HRISHEEKESH ET AL., 2019)

Já foi mencionado acima que o desprendimento alternado de vórtices tem grande impacto sobre a **resposta transversal da estrutura**. A figura 44, a seguir, demonstra graficamente esse impacto. Caso não haja desprendimento de vórtices, a resposta transversal aumentará proporcionalmente à velocidade do vento. Entretanto, quando o fenômeno acontece, torna-se visível que, para uma determinada velocidade, dita velocidade crítica, há uma significativa amplificação na resposta. Quando essa amplificação ocorre, as oscilações da estrutura serão consideráveis e ela irá passar a oscilar na frequência fundamental da estrutura, mesmo que a velocidade do vento mude. Cabe ressaltar que a velocidade crítica é menor que a velocidade de projeto (VOGADO, 2018).

Figura 44 - Impacto do desprendimento de vórtices na resposta transversal de uma estrutura



(Fonte: adaptado de IRWIN et al., 2013 apud VOGADO, 2018)

Segundo Loredou-Souza et al. (2019), a velocidade crítica (aquela em que a frequência de desprendimento de vórtices iguala a frequência natural da estrutura) é dada pela equação 31, a seguir.

$$V_{cr} = \frac{f_n D}{St} \quad (31)$$

Onde:

V_{cr} = velocidade crítica (m/s);

f_n = frequência natural da estrutura (Hz);

D = diâmetro (m);

St = número de Strouhal (adimensional).

O número de Strouhal é um importante parâmetro associado ao fenômeno de desprendimento de vórtices. Segundo Rosa (2019), ele representa uma associação entre a frequência de desprendimento de vórtices, a dimensão da estrutura e a velocidade do vento. Esse parâmetro adimensional é dado pela equação 32 abaixo.

$$St = \frac{f_v D}{V} \quad (32)$$

Onde:

V = velocidade do vento (m/s);

f_v = frequência de desprendimento de vórtices (Hz).

Percebe-se que quando a frequência de desprendimento de vórtices se iguala à frequência natural da estrutura, a velocidade V será a velocidade crítica, o que está coerente com a equação 31.

2.6 ANÁLISE DINÂMICA

A seguir serão expostos os princípios básicos da análise dinâmica. Será dado enfoque à análise no domínio do tempo e à análise no domínio da frequência, bem como a ferramenta utilizada para fazer a conversão entre elas. Este item é de importante revisão para o entendimento geral dos estudos que serão conduzidos em túnel de vento e para a compreensão das pesquisas apresentadas no Capítulo 1.

2.6.1 Equação do Movimento

Segundo Troian (2018), a análise dinâmica consiste na solução da Equação do movimento de um sistema. Existem, sumariamente, duas formas de solução: por superposição modal ou por métodos de integração direta e indireta. A Equação do movimento, em sua forma mais geral, é dada por:

$$[M]\ddot{\vec{u}}_t + [C]\dot{\vec{u}}_t + [K]\vec{u}_t = \vec{F}_t \quad (33)$$

onde:

$[M]$ = matriz de massa (kg);

$\ddot{\vec{u}}_t$ = vetor de acelerações (m/s²);

$[C]$ = matriz de amortecimento de Rayleigh (kg/s);

$\dot{\vec{u}}_t$ = vetor de velocidades (m/s);

$[K]$ = matriz de rigidez (N/m);

\vec{u}_t = vetor de deslocamentos (m);

\vec{F}_t = vetor de forças (N).

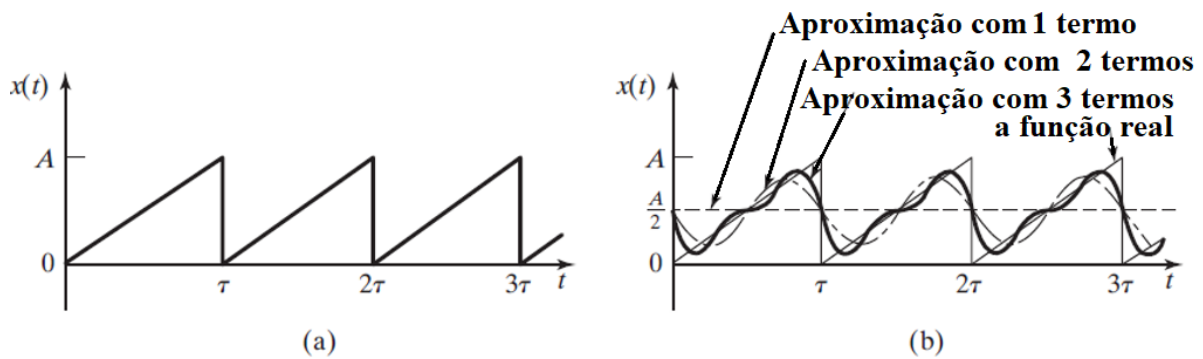
2.6.2 Análise no Domínio do Tempo

Movimentos oscilatórios podem se repetir regularmente, como o caso do pêndulo. Se o movimento é repetido em iguais intervalos de tempo, ele é dito periódico. Se a aceleração for

diretamente proporcional ao deslocamento e direcionada à posição média (caso do pêndulo), tem-se um movimento harmônico simples (RAO, 2004).

Embora o movimento harmônico seja de simples manipulação, vários sistemas vibratórios não são harmônicos. No entanto, na maioria dos casos a vibração é periódica. Felizmente, toda função periódica pode ser representada por uma soma infinita de senos e cossenos, pela série de Fourier. Além disso, a maioria das funções periódicas pode ser aproximada pela superposição de apenas algumas funções harmônicas, como pode ser graficamente observado na Figura 45 (RAO, 2004).

Figura 45 - Aproximação de uma (a) função periódica por uma (b) soma de funções harmônicas

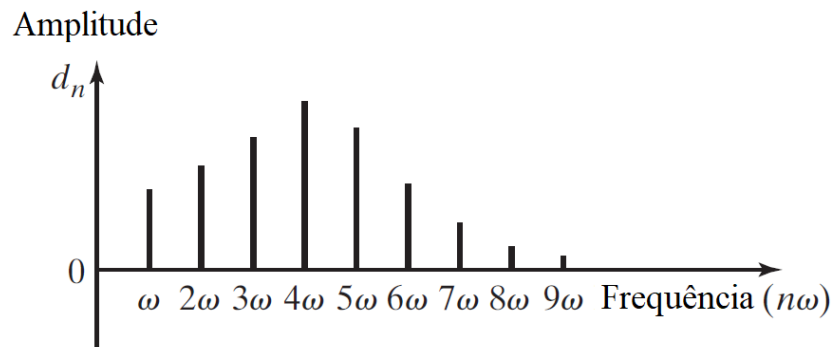


(Fonte: RAO, 2004)

2.6.3 Análise no Domínio da Frequência

As funções harmônicas, descritas no item anterior, que, somadas, geram uma função periódica, podem ser plotadas como linhas verticais em um diagrama de amplitude *versus* frequência, como se observa na Figura 46. Esse diagrama é chamado de espectro de frequências.

Figura 46 - Espectro de frequências



(Fonte: adaptado de RAO, 2004)

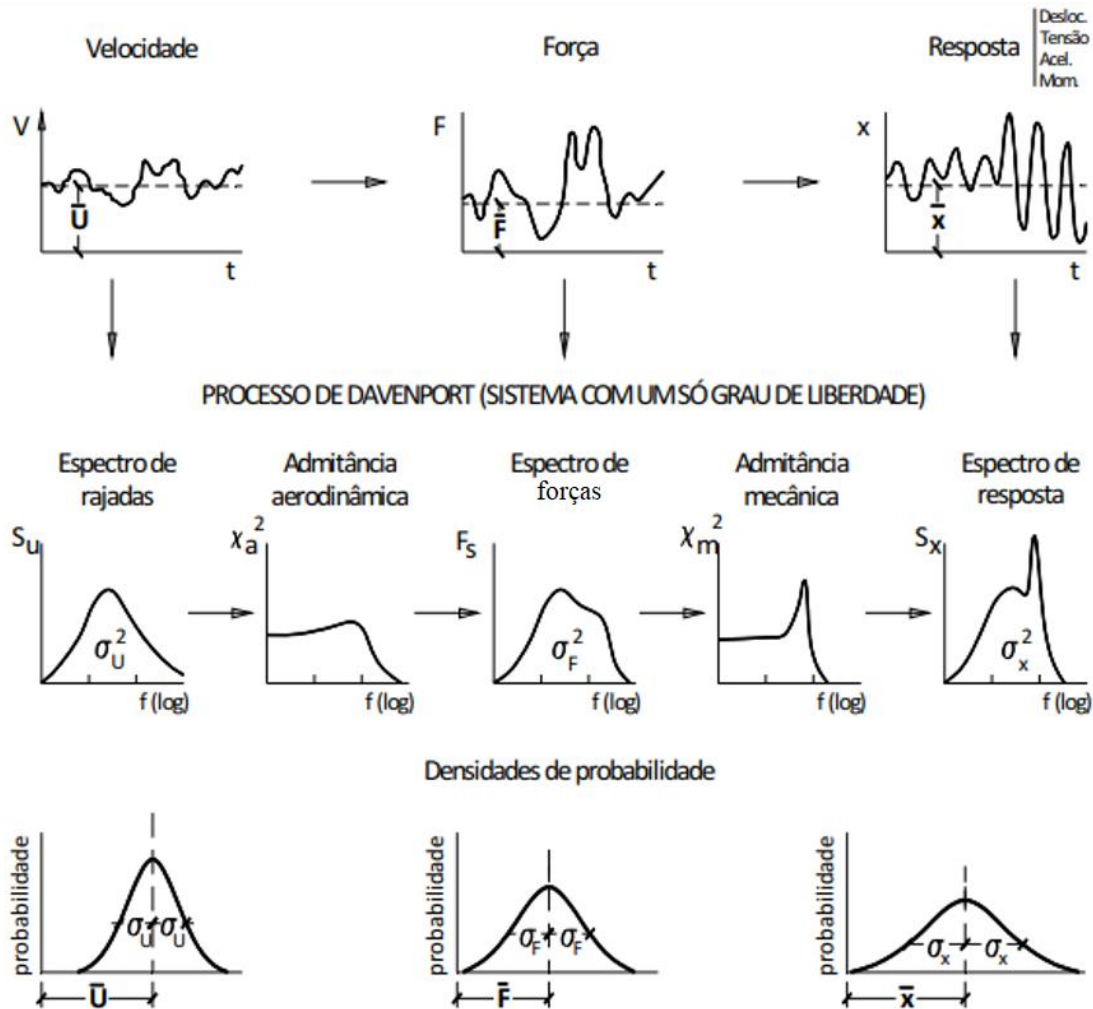
Cada linha vertical representa uma parcela harmônica. Segundo Rao (2004), a integral de Fourier permite a representação de funções não periódicas pares no domínio da frequência e do tempo.

2.6.4 Processo Probabilístico de Davenport

Segundo Algaba (2016), as flutuações da velocidade do vento, em torno de seu valor médio, são representadas pelo espectro de velocidades S_u , também conhecido como função de densidade espectral.

Na Figura 47, tem-se, graficamente, o processo probabilístico de Davenport.

Figura 47 - Processo Probabilístico de Davenport



(Fonte: DAVENPORT, 1962 apud ALGABA, 2016)

Na primeira linha de gráficos da Figura 45, tem-se a análise de um sinal no domínio do tempo. Primeiramente, há a identificação da velocidade média do registro e as correspondentes flutuações. Após, é feita a conversão para forças aerodinâmicas e, por fim, por meio da solução da Equação do movimento, é gerado o gráfico da resposta da estrutura.

Na segunda linha, tem-se o procedimento no domínio da frequência. O primeiro gráfico representa o espectro de velocidades do vento. O segundo gráfico descreve a admitância aerodinâmica, que carrega a forma da edificação e como a turbulência se organiza, inclusive a correlação espacial de pressões. O produto do espectro de velocidades pelo gráfico da admitância aerodinâmica gera o espectro de forças (terceiro gráfico). O quarto gráfico retrata a admitância mecânica, que associa características de amortecimento, rigidez e massa da estrutura. Este, multiplicado pelo espectro de forças, gera o espectro da resposta.

Por fim, na terceira linha, tem-se as densidades de probabilidade de cada parte do processo, onde são destacadas a média e o desvio padrão das velocidades, forças e resposta (ALGABA, 2016).

2.6.4.1 Espectros

Segundo Bec (2010), dois tipos de espectro de turbulência do vento podem ser distinguidos: os independentes e os dependentes da altura. Os espectros de Davenport e Harris compõem o primeiro grupo e suas formulações são dadas nas Equações 34 e 35, respectivamente.

$$\frac{f S_u(f)}{u_*^2} = 4 \frac{n^2}{(1 + n^2)^{4/3}} \quad \text{onde } n = \frac{fL}{\bar{V}_{10}} \quad \text{e } u_* = 0,4 \frac{\bar{V}(z_{ref})}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (34)$$

onde:

f = frequência (Hz);

$S_u(f)$ = espectro da componente longitudinal da velocidade do vento;

u_* = velocidade de fricção (m/s);

$L = 1200$ m;

\bar{V}_{10} = velocidade média na altura de 10 m (m/s);

z_{ref} = altura de referência (m);

z_0 = comprimento de rugosidade (m).

$$\frac{f S_u(f)}{u_*^2} = 4 \frac{n}{(2 + n^2)^{5/6}} \quad \text{onde } n = \frac{fL}{\bar{V}_{10}} \quad \text{e } u_* = 0,4 \frac{\bar{V}(z_{ref})}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (35)$$

onde:

$L = 1800$ m.

Os espectros dependentes da altura são os de Kaimal e Von Kármán e são apresentados nas Equações 36 e 37, respectivamente.

$$\frac{fS_u(f)}{u_*^2} = \frac{200n}{(1 + 50n)^{5/3}} \quad \text{onde } n = \frac{fz}{\bar{V}(z)} \quad \text{e } u_* = 0,4 \frac{\bar{V}(z_{ref})}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (36)$$

onde:

z = altura (m);

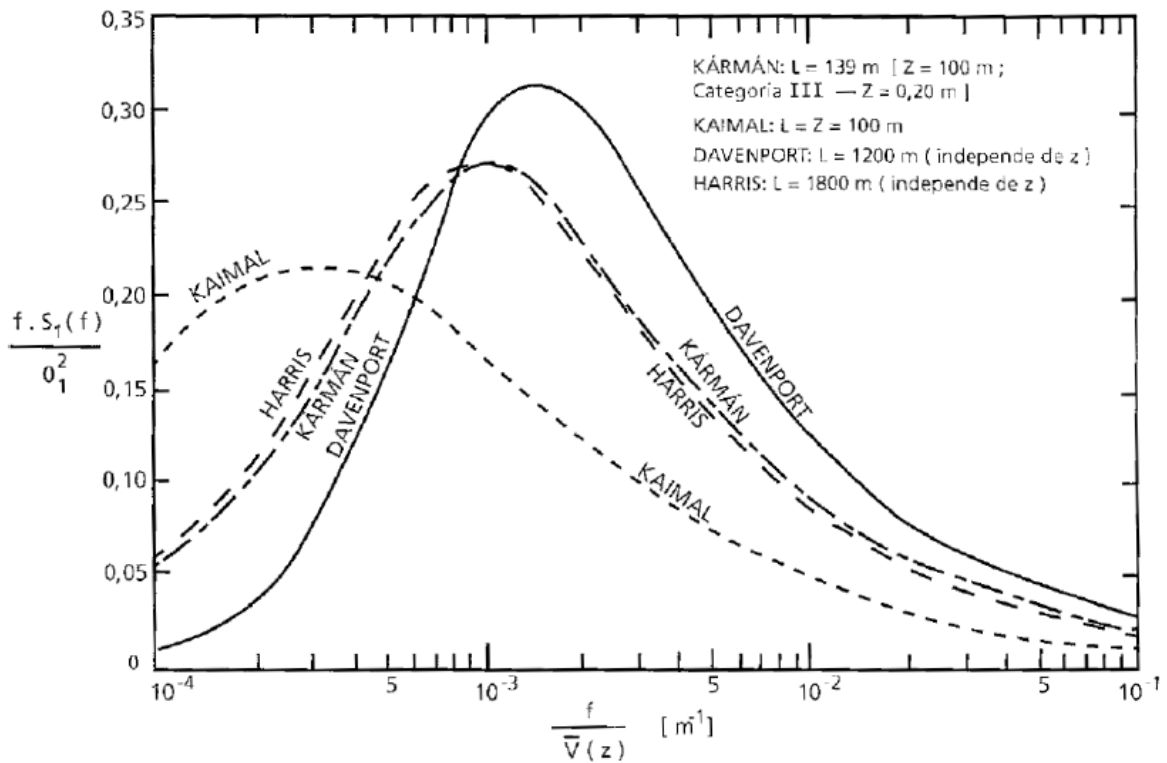
$\bar{V}(z)$ = velocidade média na altura z (m/s).

$$\frac{fS_u(f)}{u_*^2} = \frac{24x_u}{(1 + 70,7x_u^2)^{5/6}} \quad \text{onde } x_u = 300 \left(\frac{z}{350}\right)^{\frac{1}{k}} x \quad (37)$$

$$u_* = 0,4 \frac{\bar{V}(z_{ref})}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad \text{e } \frac{1}{k} = 0,437 + 0,153 \log z_0$$

Na Figura 48, tem-se a representação dos quatro espectros descritos acima:

Figura 48 - Espectros de Davenport, Harris, Kaimal e Von Kármán



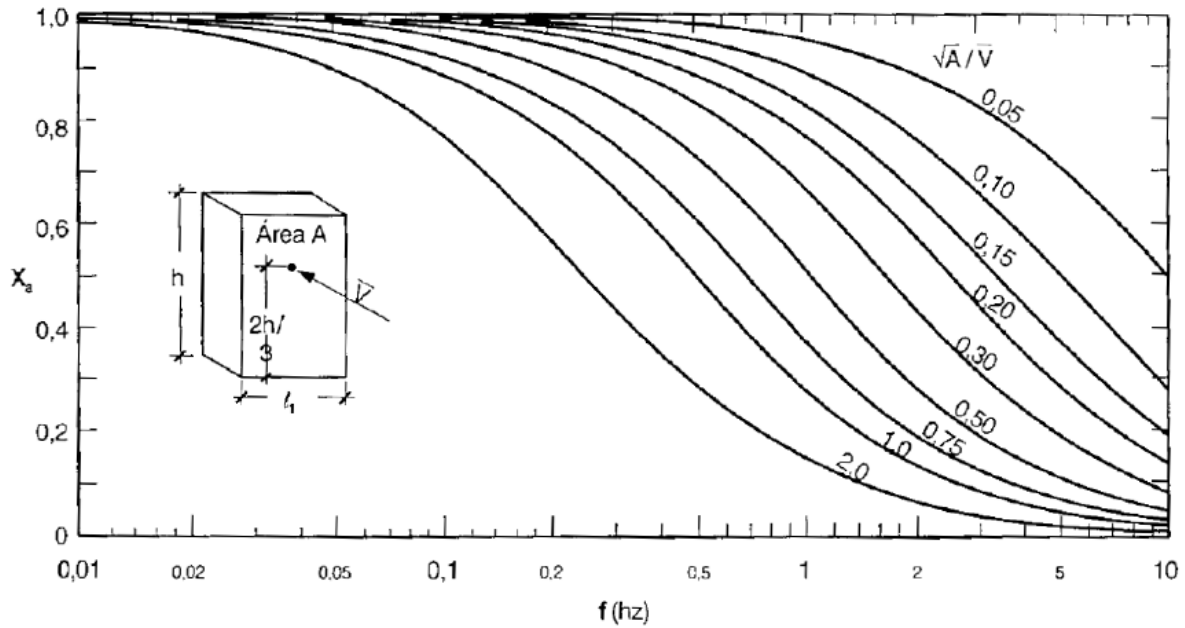
(Fonte: DAVENPORT, 1995 apud VOGADO, 2018)

2.6.4.2 Admitância Aerodinâmica

Segundo Vogado (2018), a função de admitância aerodinâmica tem a função de representar a variação espacial da ação do vento sobre a estrutura. Ela depende da forma da estrutura, da intensidade de turbulência e do tamanho dos turbilhões do vento em relação ao tamanho da estrutura.

O gráfico da Figura 49 é utilizado para se determinar a função de admitância aerodinâmica de uma edificação.

Figura 49 - Função de Admitância Aerodinâmica em função da frequência



(Fonte: BLESSMANN, 1998 apud VOGADO, 2018)

2.6.5 Procedimento de Cálculo

Neste item será apresentado o procedimento de cálculo da análise dinâmica na direção do vento, buscando-se trazer as principais fórmulas com base no estudo de Loredo-Souza et al. (2019).

Segundo Loredo-Souza et al. (2019), a força dinâmica devido ao vento em uma dada zona de pressões é dada pela Equação 38.

$$F(t) = 0,613 \cdot V(t)^2 \cdot Ca \cdot A \quad (38)$$

onde:

$F(t)$ = força (N);

$V(t)$ = velocidade do vento (m/s);

Ca = coeficiente de arrasto (adimensional);

A = área de exposição (m²).

Como já foi visto neste capítulo, a velocidade do vento possui duas componentes: uma média \bar{V} e uma flutuante $v(t)$. Dessa forma, a Equação 39 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$F(t) = 0,613 \cdot (\bar{V} + v(t))^2 \cdot C_a \cdot A = 0,613 \cdot (\bar{V}^2 + 2\bar{V}v(t) + v(t)^2) \cdot C_a \cdot A \quad (39)$$

Na expressão 39 acima, o termo $v(t)^2$ tem um valor muito pequeno, já que $\bar{V} \gg v(t)$. Assim sendo, essa parcela pode ser desprezada. Finalmente, resta:

$$\begin{aligned} F(t) &= 0,613 \cdot (\bar{V}^2 + 2\bar{V}v(t)) \cdot C_a \cdot A & (40) \\ &= 0,613\bar{V}^2 \cdot C_a \cdot A + 0,613 \cdot 2\bar{V}v(t) \cdot C_a \cdot A \\ &= \bar{F} + F(t) \end{aligned}$$

onde:

\bar{F} = parcela média da força do vento (N);

$F(t)$ = parcela flutuante da força do vento (N).

Ao desprezar a componente $v(t)^2$, observa-se que haverá uma relação de proporcionalidade entre as densidades espectrais de força e velocidade. Essa relação de proporcionalidade pode ser escrita da seguinte forma:

$$S_F(f) = \left[\chi_A(f) \frac{2\bar{F}}{\bar{V}} \right] S_V(f) \quad (41)$$

onde:

f = frequência (Hz);

S_F = espectro de forças (N);

S_V = espectro de velocidades (m/s);

χ_A = função de admitância aerodinâmica (adimensional).

O espectro de velocidades do vento apresentado na Equação 41 pode ser qualquer um dos apresentados no item 2.6.4.1. A NBR 6123, no capítulo de análise dinâmica, recorre ao uso do Espectro de Harris, apresentado na Equação 35.

Um dos objetivos de uma análise dinâmica é calcular a densidade espectral da resposta da estrutura. Esse resultado é obtido por meio do método de superposição modal, processo pelo qual a equação do movimento (Equação 33) pode ser desacoplada por meio dos vetores de forma modal do sistema não amortecido. Esses vetores são obtidos ao solucionar o seguinte problema de autovalores e autovetores:

$$[K]\vec{q}_k = \omega_n^2[M]\vec{q}_k \quad (42)$$

onde:

$[K]$ = matriz de rigidez (N/m);

$[M]$ = matriz de massa (kg);

ω_n = frequência natural (rad/s);

\vec{q}_k = vetor de forma modal (adimensional).

A resposta de uma estrutura em vibração livre, no k-ésimo modo, é dada pelo vetor abaixo:

$$\vec{u}_k(t) = \vec{q}_k u_k(t) \quad (43)$$

onde:

\vec{u}_k = vetor da resposta em deslocamentos da estrutura no modo k (m);

$u_k(t)$ = resposta modal (m).

Substituindo a Equação 43 na equação do movimento (33) e fazendo uso de manipulações matemáticas, obtém-se a Equação 44.

$$M_k \ddot{u}_k(t) + C_k \dot{u}_k(t) + K_k u_k(t) = F_k(t) \quad (44)$$

onde:

M_k = massa modal no modo k (kg);

C_k = amortecimento modal no modo k (kg/s);

K_k = rigidez modal no modo k (N/m);

$F_k(t)$ = força modal no modo k (N).

Ressalta-se que os termos M_k , C_k , K_k e $F_k(t)$ são escalares. A Equação acima é dita desacoplada, pois para cada modo k , há uma Equação independente.

Considerando a força modal como um processo aleatório ergódico e estacionário, uma solução da Equação 45 no domínio da frequência resulta no seguinte espectro da resposta em deslocamentos:

$$S_{u_k}(f) = |H_k(f)|^2 S_{F_k}(f) \quad (45)$$

onde:

S_{u_k} = espectro da resposta modal em deslocamentos (m);

$H_k(f)$ = admitância mecânica (m²/N²);

S_{F_k} = espectro das forças modais (N).

A admitância mecânica é calculada segundo a Equação 46.

$$|H_k(f)| = \frac{1}{K_k \sqrt{(1 - \beta_k^2)^2 + (2\zeta_k \beta_k)^2}} \quad (46)$$

onde:

ζ_k = razão de amortecimento crítico (adimensional);

β_k = razão de frequência ressonante (adimensional).

A razão de frequência ressonante β_k e a razão de amortecimento crítico ζ_k são dadas pelas Equações 47 e 48, respectivamente.

$$\beta_k = \frac{f}{f_k} \quad (47)$$

onde:

f_k = frequência de vibração associada ao k-ésimo modo (Hz).

$$\zeta_k = \frac{C_k}{4\pi M_k f_k} \quad (48)$$

Para que seja possível a aplicação da Equação 45, deve-se definir o espectro de força modal. Previamente a isso, expõe-se a Equação 49, que descreve a força modal como um somatório das forças em todas n zonas de integração.

$$F_k(t) = \sum_{i=1}^n q_{k,i} F_i(t) \quad (49)$$

Uma densidade espectral consiste em uma densidade de variância. Sabendo-se que a variância de uma soma pode ser escrita como a soma cruzada das covariâncias, pode-se definir o espectro de força modal como:

$$S_{F_k}(f) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n q_{k,i} q_{k,j} S_{F_i F_j}(f) \quad (50)$$

onde:

$S_{F_i F_j}(f)$ = espectro cruzado entre as parcelas flutuantes das forças nas zonas de integração i e j (N).

O espectro cruzado, por sua vez, é dado pela Equação 51.

$$S_{F_i F_j}(f) = R_{ij}(f) \sqrt{S_{F_i}(f) S_{F_j}(f)} \quad (51)$$

onde:

$R_{ij}(f)$ = função de coerência (adimensional).

A NBR 6123 adota a função de coerência dada na Equação 50, com $C = 10$ e $\gamma = -0.3$.

$$R_{ij}(f) = \exp \left[-C \frac{f \Delta r_{ij}}{V_{10}} \left(\frac{\bar{z}_{ij}}{10m} \right)^\gamma \right] \quad (52)$$

Δr_{ij} = distância entre centros aerodinâmicos de duas zonas de integração (m);

\bar{z}_{ij} = altura média das duas zonas de integração (m).

A partir das Equações 53 e 54, pode-se calcular, respectivamente, Δr_{ij} e \bar{z}_{ij} .

$$\Delta r_{ij} = \sqrt{(y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (53)$$

$$\bar{z}_{ij} = \frac{z_i + z_j}{2} \quad (54)$$

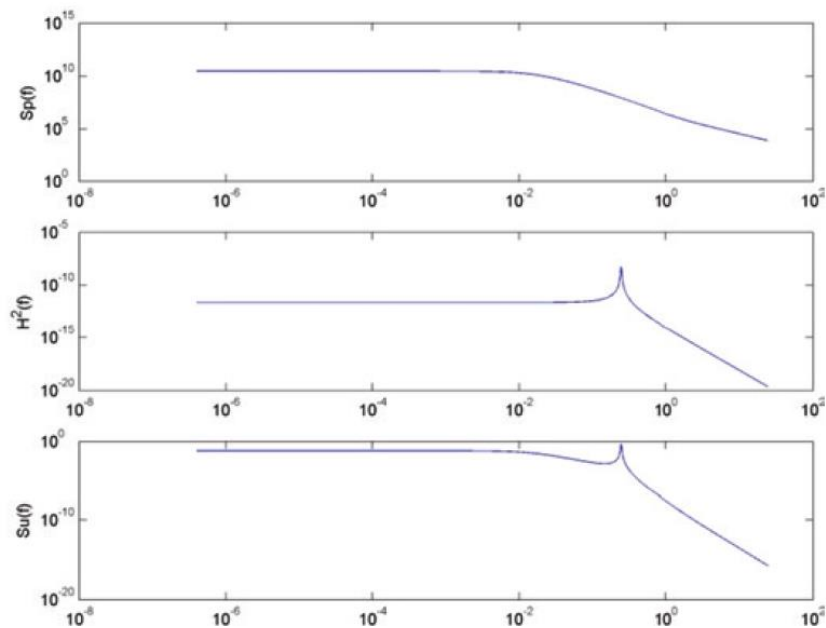
Por meio de manipulações algébricas, chega-se à expressão 55 para a densidade espectral da resposta modal.

$$S_{uk}(f) = 4|H_k(f)|^2 S_V(f) \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{q_{k,i} \bar{F}_i}{\bar{V}_i} \right) \left(\frac{q_{k,j} \bar{F}_j}{\bar{V}_j} \right) R_{ij}(f, y_i, y_j, z_i, z_j) \right] \quad (55)$$

Na Equação acima, considerou-se que o espectro de velocidades do vento S_V não depende da zona de integração de pressões e que a admitância aerodinâmica vale 1. Para edifícios altos, as zonas de integração serão dadas ao longo do eixo vertical, portanto $y_i = y_j = 0$.

A Figura 50 representa graficamente, sob o olhar do domínio da frequência, o procedimento de cálculo descrito até aqui.

Figura 50 - Procedimento de cálculo da densidade espectral da resposta no domínio da frequência



(Fonte: LOREDO-SOUZA ET AL., 2019)

Sabendo-se que a área sob o espectro representa a variância da resposta estrutural, tem-se a seguinte igualdade:

$$\sigma_{uk}^2 = \int_0^{\infty} S_{uk}(f) df \quad (56)$$

O valor esperado do pico da resposta estrutural é dado pela Equação 57.

$$u_{k,peak} = g_T \sigma_{uk} \quad (57)$$

onde:

g_T = fator de pico (adimensional).

O fator de pico para o tempo de média T é dado a seguir.

$$g_T = \sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \ln(vT)}} \quad (58)$$

onde:

v = taxa de cruzamentos ascendentes do nível zero (1/s).

A taxa de cruzamentos ascendentes do nível zero é dada conforme a Equação 59.

$$v = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} f^2 S_{uk}(f) df}{\sigma_{uk}^2}} \quad (59)$$

A NBR 6123 adota um fator de pico $g_T = 4$ para todos os casos. Entretanto, salienta-se que o cálculo do fator de pico por meio da Equação 58 conduz a economias de projeto.

A resposta estrutural total será composta pela resposta média e pelo pico da resposta flutuante de cada modo de vibração. Como esses picos possuem baixa probabilidade de ocorrência, recorre-se à superposição quadrática:

$$\vec{u}_{total} = \vec{u}_T + \sqrt{\sum_k \vec{q}_k (u_{k,peak})^2} \quad (60)$$

onde:

\vec{u}_T = resposta média (m).

Antigamente, a retenção apenas do primeiro modo de vibração já era suficiente para compor a resposta total, dada a alta rigidez das estruturas. Contudo, atualmente, concepções arquitetônicas arrojadas e edificações cada vez mais alteadas fazem com que as frequências relativas aos primeiros modos de vibração estejam abaixo de 1 Hz.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os estudos experimentais com modelos reduzidos em túnel de vento iniciaram no final do século XIX, em Melbourne, na Austrália. Os testes eram feitos em um pequeno túnel aerodinâmico de seção quadrada de 30,5 cm de lado, sendo o vento artificialmente gerado por ventiladores. Com o advento da aviação, os túneis aerodinâmicos passaram a ser desenvolvidos para servir a este novo método de transporte. Por muito tempo, os experimentos de construção civil foram realizados nesse tipo de túnel. Embora os experimentos geravam resultados próximos da realidade para configurações simples de edificações, os resultados, em alguns casos, poderiam divergir consideravelmente dos reais efeitos experimentados pela edificação (BLESSMANN, 2011).

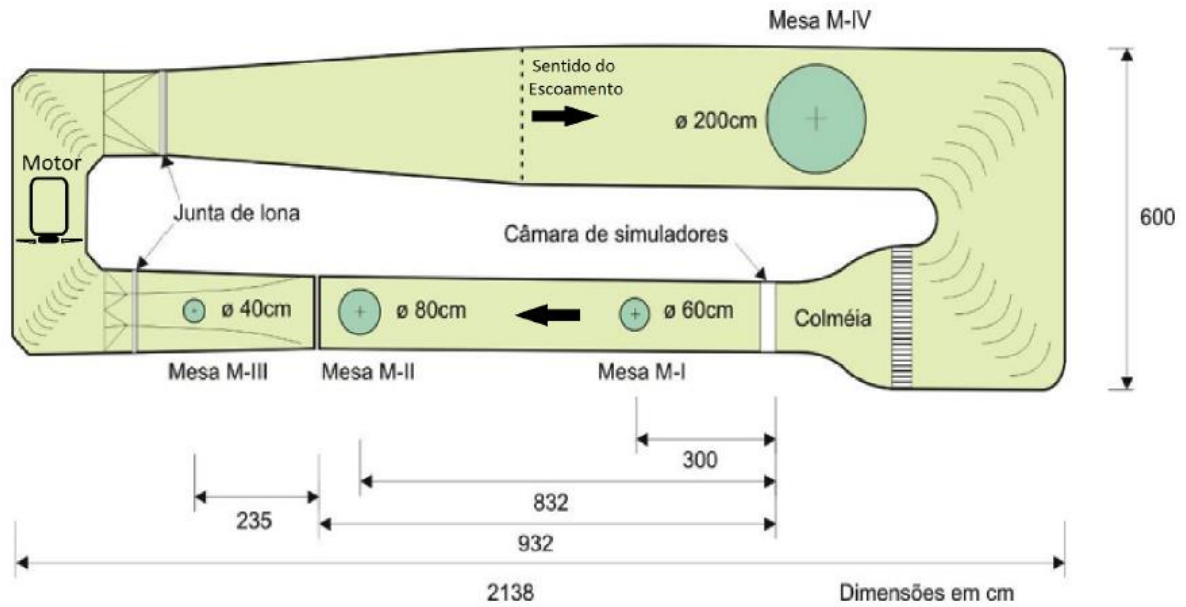
3.1 O TÚNEL DE VENTO PROF. JOAQUIM BLESSMANN

Com o intuito de obter simulações fiéis às características do vento natural e seus efeitos sobre construções civis, passaram a ser projetados túneis específicos para este fim, os quais passaram a ser chamados de “túneis de vento”. Desta forma, construções civis e aviões passaram a ser testados em diferentes túneis (BLESSMANN, 2011).

Em 1977, iniciaram-se as operações do **Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann** ou Túnel de Vento TV-2 da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tal túnel, que possui uma relação comprimento/altura de 10,3, permite a avaliação de efeitos estáticos e dinâmicos sobre estruturas civis. Além disso, viabiliza o estudo do efeito do vento sobre transeuntes, veículos, vegetações, usuários de edificações e poluição. (BLESSMANN, 2011).

O túnel é composto por quatro mesas, como se vê na Figura 51.

Figura 51- Planta baixa do Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann



(Fonte: ALBERTI, 2015)

As finalidades das mesas são apresentadas de maneira resumida no Quadro 2.

Quadro 2 – Descrição das mesas do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann

Mesa M-I	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaios aeronáuticos no piso do túnel; • Ensaios para construção civil com geradores de turbulência fixados na câmara de simuladores; • Usada comumente para modelos de geometria básica.
Mesa M-II	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaios aeronáuticos realizados no eixo do túnel; • Ensaios para construção civil com blocos fixados ao longo do piso.
Mesa M-III	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaios dinâmicos de estruturas alteadas como chaminés, pilares de viadutos, etc; • Mesa altamente rígida.
Mesa M-IV	<ul style="list-style-type: none"> • Mesa de diâmetro 200 cm e seção transversal 240 x 210 cm; • Ensaios de dissipação de fumaça; • Estudos de influência da topografia; • Modelos de pontes.

(Fonte: adaptado de BLESSMANN, 2011)

3.2 LEIS DE SEMELHANÇA

Para que as condições reais de um escoamento sejam bem representadas para um modelo reduzido, deve-se atentar às chamadas condições de semelhança. Segundo Blessmann (2011), as seguintes condições de semelhança devem ser satisfeitas:

- (a) **semelhança geométrica:** as dimensões e a rugosidade do modelo reduzido devem ser semelhantes ao real. Deve ser constante em cada seção a relação entre os comprimentos do modelo e os reais. Matematicamente, isso pode ser expressado conforme a Equação 61;

$$\frac{l_1}{l_2} = constante \quad (61)$$

onde:

l_1 – comprimento do modelo reduzido [m];

l_2 – comprimento real [m].

- (b) **semelhança cinemática:** a distribuição de velocidades médias e a turbulência do modelo reduzido devem ser semelhantes ao real. Matematicamente, isso pode ser expressado conforme a Equação 62;

$$\frac{u_1}{u_2} = constante \quad (62)$$

onde:

u_1 – velocidades no modelo reduzido [m/s];

u_2 – velocidades reais [m/s].

- (c) **semelhança dinâmica:** diz respeito às forças que induzem o movimento de um corpo. As forças que agem na estrutura real e no modelo reduzido devem ser proporcionais. Matematicamente, isso pode ser expressado conforme a Equação 61;

$$\frac{F_1}{F_2} = \text{constante} \quad (63)$$

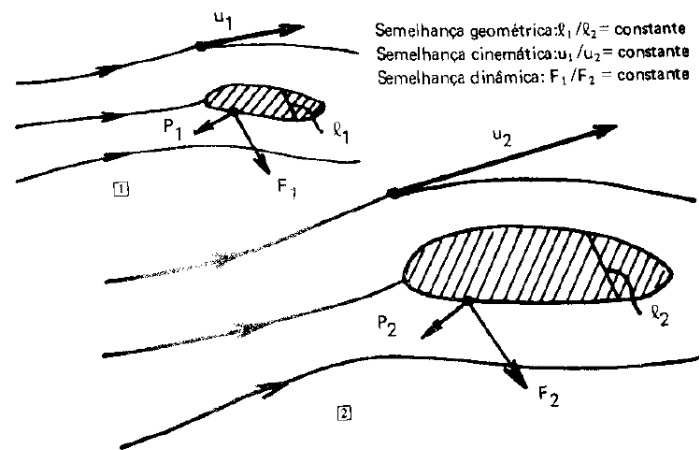
onde:

F_1 – forças no modelo reduzido [N];

F_2 – forças reais [N].

A Figura 52 ilustra os três tipos de semelhança abordados acima.

Figura 52 - Corpos semelhantes e condições de semelhança



(Fonte: BLESSMANN, 2011)

3.3 SIMULAÇÃO DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA EM TÚNEL DE VENTO

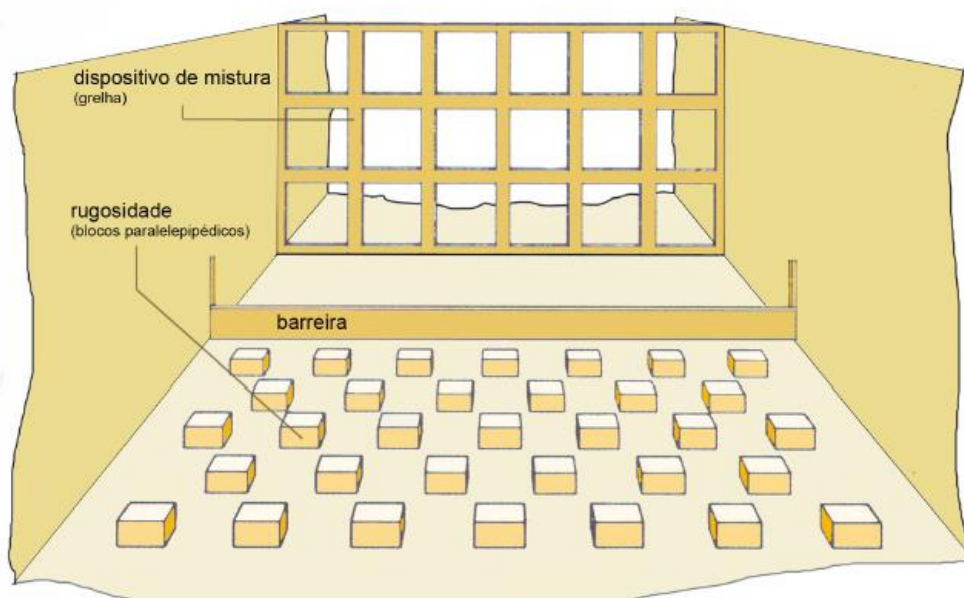
Para uma simulação eficiente dos efeitos reais do vento sobre edifícios, é imprescindível que seja feita uma reprodução fiel da **camada limite atmosférica** (Blessmann, 2011).

Segundo Loredou-Souza et al. (2004), ao cobrir uma área do piso do túnel com material rugoso, obtém-se uma escala conveniente da estrutura do vento natural. Entretanto, o desenvolvimento natural da camada limite é longo, dependendo da rugosidade do terreno. Isto significa que

seriam necessários túneis excessivamente compridos se não fossem utilizados dispositivos artificiais para aumentar a espessura da camada limite.

A Figura 53 mostra uma configuração típica de simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento.

Figura 53 - Dispositivos utilizados para simulação do vento natural



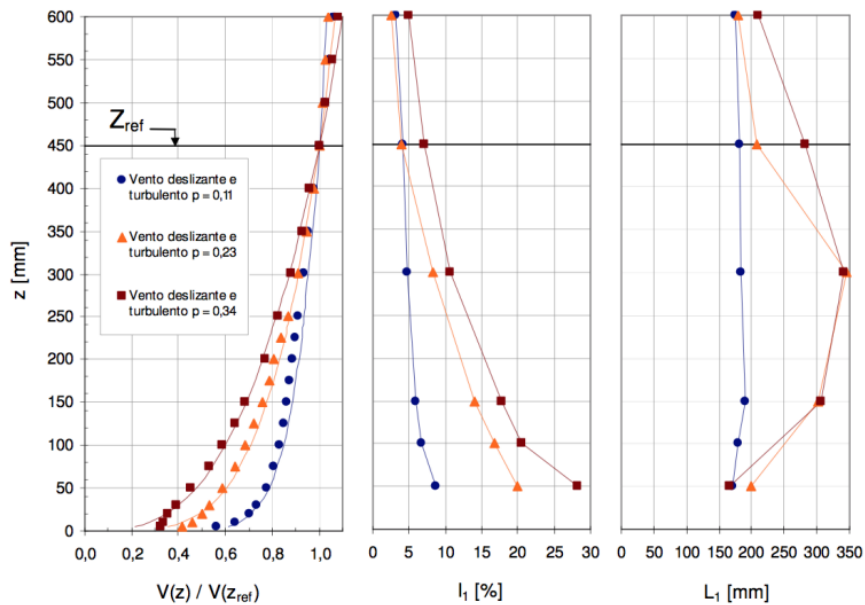
(Fonte: COOK, 1978 apud LOREDO-SOUZA et al., 2004)

Os **blocos paralelepípedicos** simulam a rugosidade superficial do terreno. Em se tratando de simulação do perfil de velocidades do vento, a rugosidade assume fundamental importância, visto que ela é responsável por três parâmetros da lei logarítmica de velocidades: z_0 , u^* e z_d . A **barreira** provoca um déficit de quantidade de movimento no nível do piso e impõe altura à camada limite. O **dispositivo de mistura** gera turbulência uniformemente. Segundo Blessmann (2011), conforme o dispositivo utilizado, podem-se simular diferentes características do vento, como intensidade de turbulência, escala de turbulência, espectro, curva de autocorrelação, etc.

3.4 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL

O perfil de velocidades médias utilizado foi o dado pela Equação da lei potencial, em que o valor do expoente p foi definido como 0,23, correspondente às categorias III e IV de rugosidade de terreno, conforme NBR 6123 (ABNT, 1988). O perfil de velocidades médias, a intensidade e a escala da componente longitudinal de turbulência para diferentes valores de p estão representados no gráfico da Figura 54.

Figura 54 – Perfil de velocidades médias, intensidade de turbulência e escala da componente longitudinal da turbulência para simulações no Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann



(Fonte: ALBERTI, 2015)

3.5 AQUISIÇÃO DE DADOS EM TÚNEL DE VENTO

A pressão dinâmica nas regiões próximas à mesa de medição é dada pela Equação 64.

$$q = k_0 \Delta p a \quad (64)$$

onde:

k_0 = fator de calibração do túnel de vento (adimensional);

Δp_a = diferença entre as medidas de pressões estáticas em dois anéis piezométricos.

A leitura de Δp_a é feita em dois anéis piezométricos conectados a um micromanômetro ManoAir500. O mesmo equipamento foi utilizado para medição da temperatura e pressão atmosférica de cada ensaio.

A velocidade média do escoamento é dada pela Equação 65.

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{2q}{\rho_{ar}}} \quad (65)$$

onde:

ρ_{ar} = massa específica do ar dada por $0,0474 \frac{P_{atm}}{T}$ (kgf·s²/m²);

P_{atm} = pressão atmosférica (mmHg);

T = temperatura (K);

Nos modelos reduzidos ensaiados foram instaladas tomadas de pressão que serão descritas no item 3.6. O equipamento de aquisição simultânea de pressões flutuantes utilizado é do tipo Scanivalve, de 6 módulos e 64 canais por módulo (taxa de aquisição máxima de 20 kHz).

O cálculo dos coeficientes de pressão média, máxima, mínima e *rms* foram realizados a partir de rotinas computacionais fornecidas pela equipe técnica do LAC. Após essa etapa, procedeu-se ao processamento de dados, visando ao cálculo dos coeficientes de força globais, bem como forças e momentos globais atuantes na estrutura.

3.6 DESCRIÇÃO DOS MODELOS

Estão em estudo quatro modelos: o modelo não modificado (M0) e os modelos com uma abertura (M1, M2 e M3), todos isolados, sem vizinhança.

Todos os modelos são baseados no mesmo edifício real. Por motivos de confidencialidade, o detalhamento arquitetônico das fachadas será omitido. A Figura 55 expõe o edifício em estudo (modelo M0).

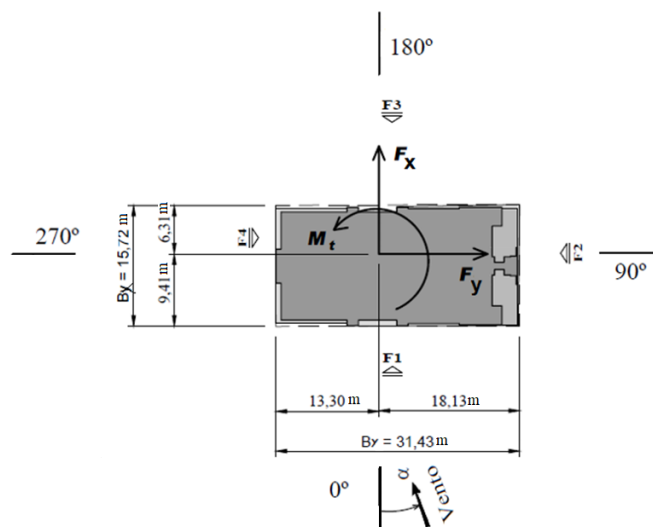
Figura 55 - Edifício a ser analisado (modelo não modificado) (a) vista lateral (b) vista frontal



(Fonte: adaptado de LAC, 2019)

Na Figura 56 tem-se o edifício em planta, com a inferência do centro de rigidez do modelo com referência de forças e momentos.

Figura 56 - Edifício em planta



(Fonte: adaptado de LAC, 2019)

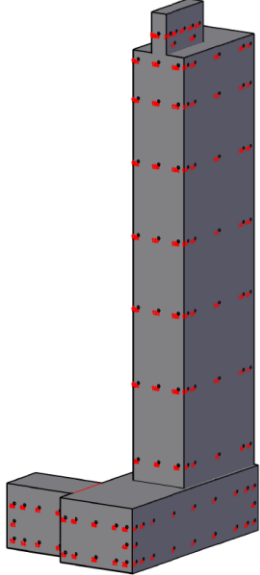
O número de direções do vento ensaiadas foi 24, de 0° a 360° , variando de 15° em 15° .

Na Tabela 1 são apresentadas as principais características do modelo não modificado, bem como do edifício real. Foram utilizadas as mesmas características do ensaio original do edifício real. Para fins de compreensão da tabela, definem-se os seguintes conceitos:

- escala do modelo reduzido: razão entre as medidas do modelo e as medidas do edifício real;
- categoria do terreno: conjunto de características do terreno (III – terrenos planos ou ondulados com obstáculos e IV – terrenos cobertos por obstáculos numerosos), definidos na NBR 6123 (ABNT, 1988).
- coeficientes S_1 , S_2 e S_3 : dizem respeito aos fatores topográfico, de rugosidade e probabilístico, definidos na NBR 6123 (ABNT, 1988).
- velocidade básica V_0 : é definida como a velocidade básica do vento (velocidade de uma rajada de 3 s, excedida na média uma vez em 50 anos, a 10 m do terreno, em campo aberto e plano).
- velocidade característica V_k : é o produto da velocidade básica pelos fatores S_1 , S_2 e S_3 .

- pressão dinâmica de referência q_{ref} : pressão dinâmica correspondente à velocidade características em condições normais de pressão (1 atm) e de temperatura 15°C calculada para a altura de 140,88 m (altura do edifício).

Tabela 1 - Características do modelo M0 e do edifício real

	Altura (m)	140,88
	Largura (m)	31,43
	Profundidade (m)	15,72
	Número de tomadas	210
	Número de zonas	10
	Escala do modelo reduzido	1:400
	p	0,23
	Categoria	III e IV
	V_0 (m/s)	41,3
	S_1	1
	S_2	1,17
S_3	1	
V_k (m/s)	48,32	
q_{ref} (Pa)	1430	

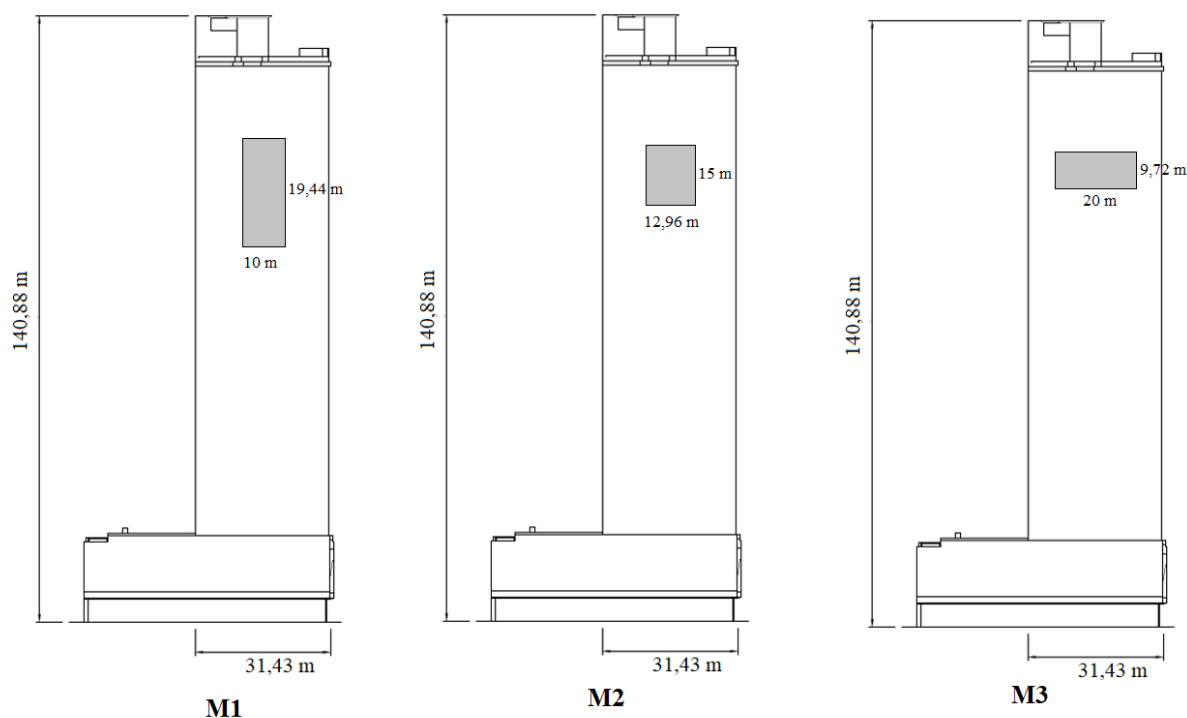
Na Figura 57, tem-se o modelo M0 dentro do túnel de vento, posicionado sobre a mesa MII.

Figura 57 - Modelo M0



Os modelos modificados (M1, M2, M3) serão dotados de apenas uma abertura na direção x (direção de menor inércia do edifício). A porosidade associada à grande abertura é fixada em 4%, o que é um valor recomendado por Li et al. (2020). A diferença principal entre os modelos M1, M2 e M3 está na relação altura:base da abertura, como se pode observar no esboço da Figura 58.

Figura 58 - Modelos M1, M2 e M3



(Fonte: adaptado de LAC, 2019)

A Tabela 2 apresenta as principais informações relativas aos modelos modificados.

Tabela 2 - Dimensões das aberturas dos modelos

Modelo	Dimensões da Abertura		Área (m ²)	Altura/Base	Porosidade
	Base (m)	Altura (m)			
M1	10,00	19,44	194,4	1,944	4%
M2	12,96	15,00	194,4	1,157	4%
M3	20,00	9,72	194,4	0,486	4%

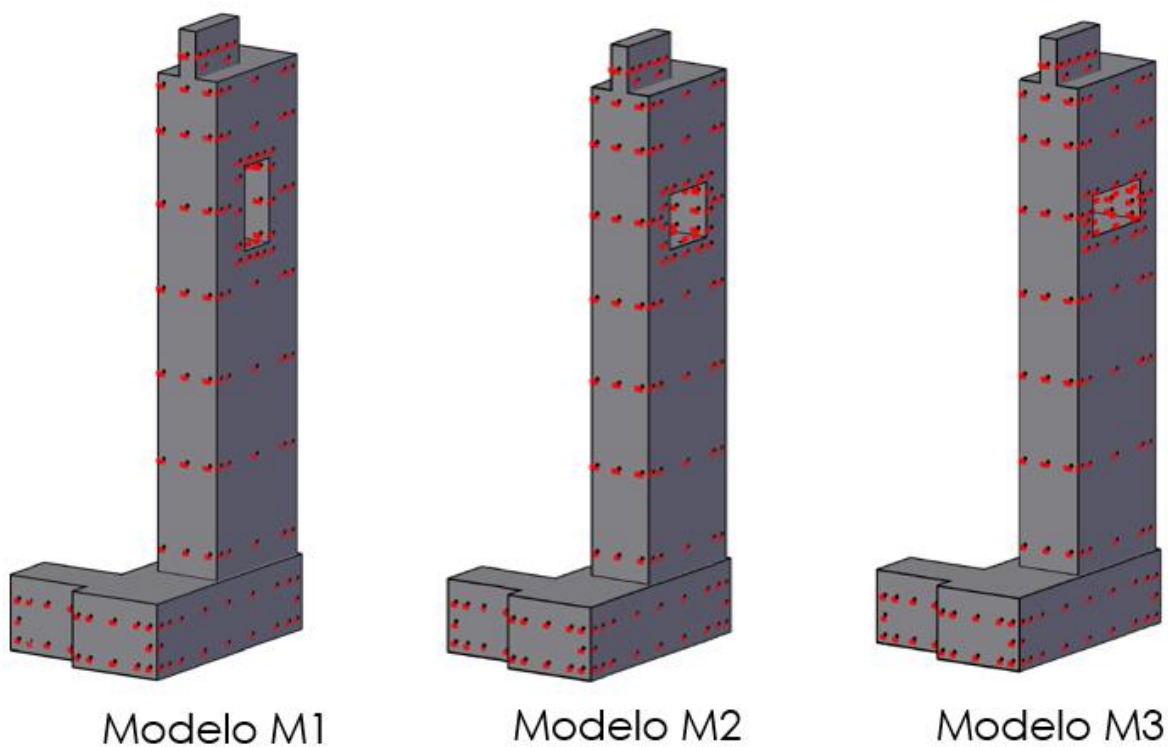
Nos modelos M1, M2 e M3, a abertura de grandes dimensões está instalada a 78% da altura total do edifício (medida do centro da abertura), o que é razoavelmente aceitável, conforme o que foi atestado por Kikitsu e Okada (2003), que indicaram que o ideal é instalar a abertura entre 80% e 90% da altura do edifício. Na tabela 3, tem-se informações gerais sobre os modelos com abertura.

Tabela 3 - Características dos modelos M1, M2 e M3 e dos edifícios reais correspondentes

Altura (m)	140,88
Largura (m)	31,43
Profundidade (m)	15,72
Número de tomadas	276
Número de zonas	10
Escala do modelo reduzido	1:400
p	0,23
Categoria	III e IV
V_0 (m/s)	41,3
S_1	1
S_2	1,17
S_3	1
V_k (m/s)	48,32
q_{ref} (Pa)	1430

Na Figura 59, tem-se a instrumentação dos modelos M1, M2 e M3.

Figura 59 - Instrumentação dos modelos M1, M2 e M3



Na Figura 60, tem-se o modelo M1 dentro do túnel de vento sobre a mesa MII.

Figura 60 - Modelo M1



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do processamento dos dados adquiridos nos ensaios dos quatro modelos em estudo. Primeiramente, serão vistos os coeficientes de força e, em sequência, espectros de força e momento torçor global.

4.1 COEFICIENTES DE FORÇA E TORÇÃO

Nesta seção, serão enunciados os métodos de determinação dos coeficientes de força e torção, bem como a apresentação dos coeficientes obtidos.

4.1.1 Coeficientes de Força

Os coeficientes de força globais nas direções x e y foram calculados a partir das Equações 66 e 67.

$$C_x = \frac{\sum_i^n C_{x,i}}{A_{ref,x}} \quad (66)$$

onde:

i = número da tomada de pressão (adimensional);

$C_{x,i}$ = coeficiente de força calculado para cada tomada i na direção x (adimensional);

$A_{ref,x}$ = área da fachada na direção x (m²).

$$C_y = \frac{\sum_i^n C_{y,i}}{A_{ref,y}} \quad (67)$$

onde:

i = número da tomada de pressão (adimensional);

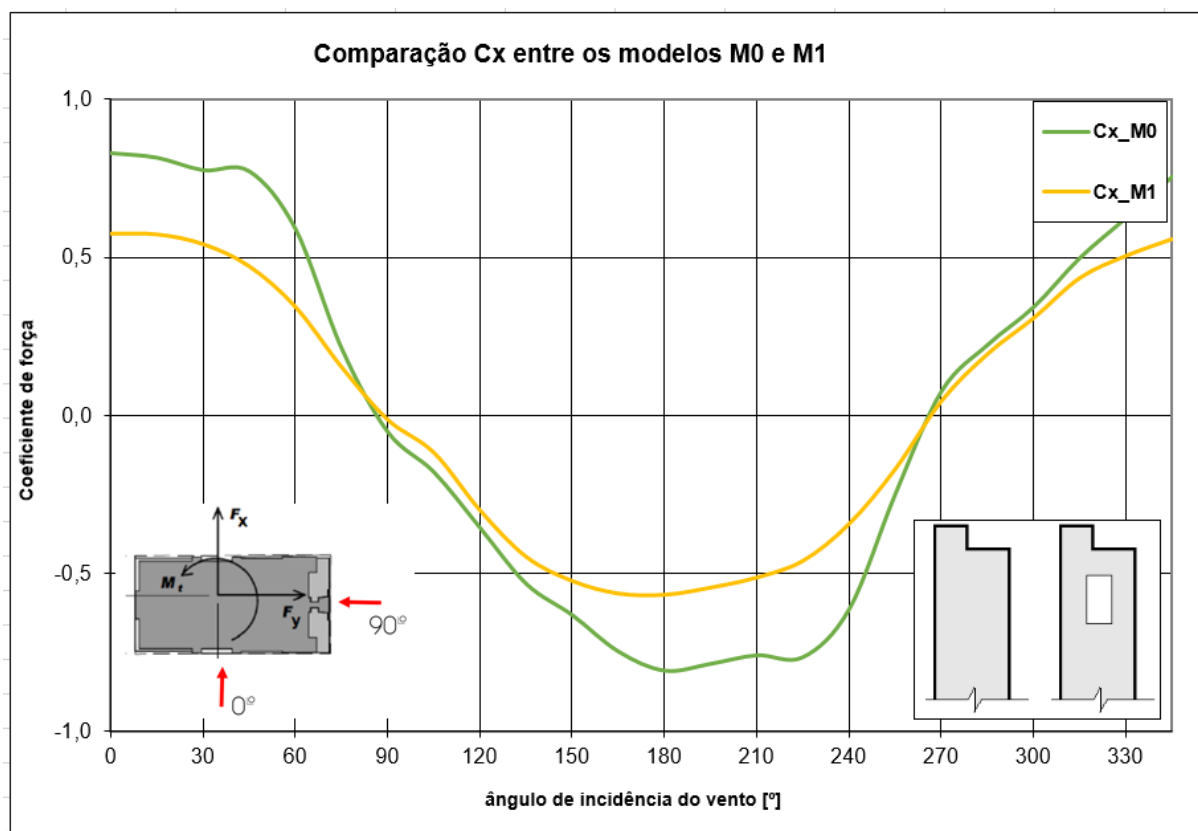
$C_{y,i}$ = coeficiente de força calculado para cada tomada i na direção y (adimensional);

$A_{ref,y}$ = área da fachada na direção y (m^2).

Os coeficientes de força para cada ângulo de incidência do vento ensaiado nas direções x e y do modelo sem aberturas (M0) serão comparados a seguir com os modelos com aberturas M1, M2 e M3, separadamente.

Na Figura 61, tem-se a a comparação dos coeficientes de força global na direção x entre os modelos M0 e M1.

Figura 61 - Coeficientes C_x dos modelos M0 e M1 em função do ângulo de incidência ensaiado

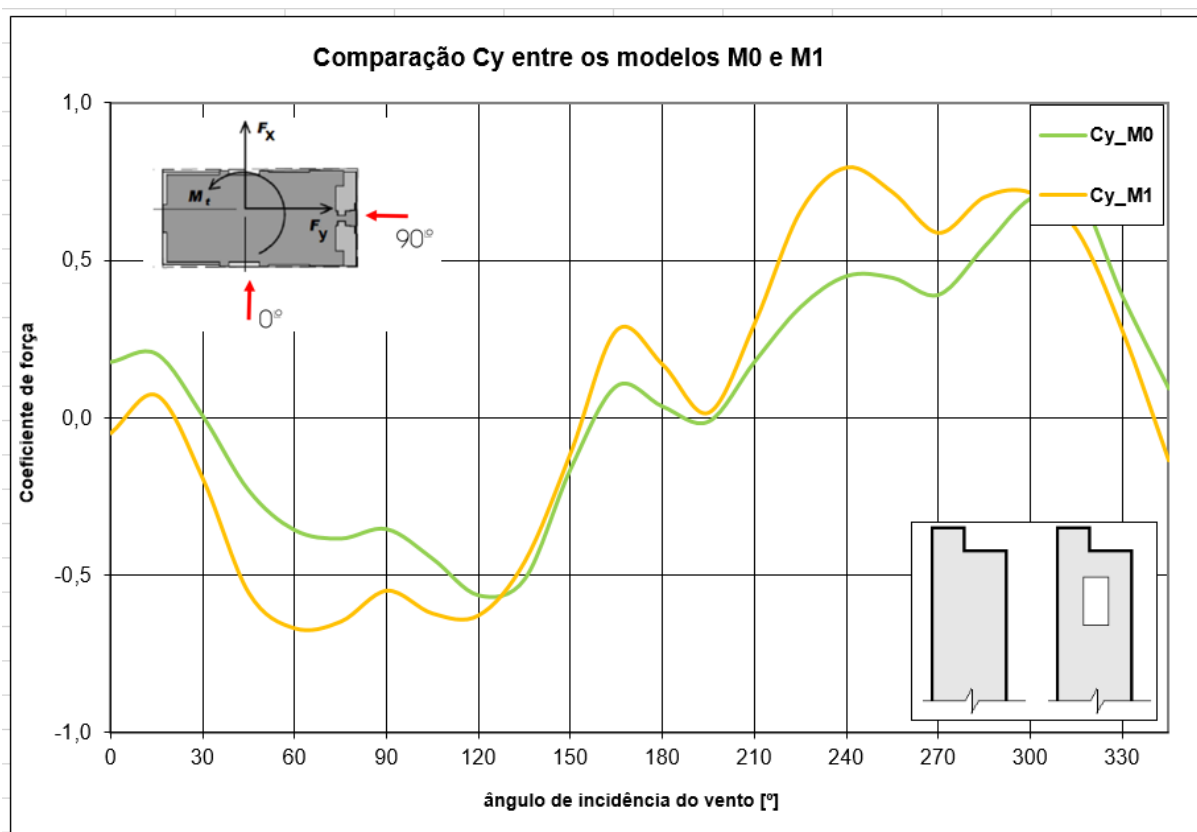


Percebe-se que o modelo M1 apresenta significativa redução do coeficiente C_x , exceto para as incidências de 75° a 135° e 270° a 315° , mostrando que para incidências perpendiculares à direção da abertura, não há redução do coeficiente. O maior valor da configuração sem aberturas para C_x é referente ao ângulo de 0° ($C_{x,M0,0^\circ} = 0,83$), enquanto que o maior valor de C_x no

modelo M1, para o mesmo ângulo de incidência, é $C_{x,M1,0^\circ} = 0,57$, uma significativa redução de 31%. Observou-se atenuação do coeficiente C_x para todas incidências de vento testadas.

Na Figura 62, tem-se a comparação dos coeficientes de força global na direção y entre os modelos M0 e M1.

Figura 62 - Coeficientes C_y dos modelos M0 e M1 em função do ângulo de incidência ensaiado



Percebe-se que o modelo M1 apresenta aumento geral do coeficiente C_y . O maior valor da configuração sem aberturas para C_y é referente ao ângulo de 315° ($C_{y,M0,315^\circ} = 0,71$), enquanto que o maior valor de C_y no modelo M1, para o ângulo de incidência 240°, é $C_{x,M1,240^\circ} = 0,79$, um aumento de 10%.

Alguns aumentos notáveis no módulo de C_y são registrados a seguir:

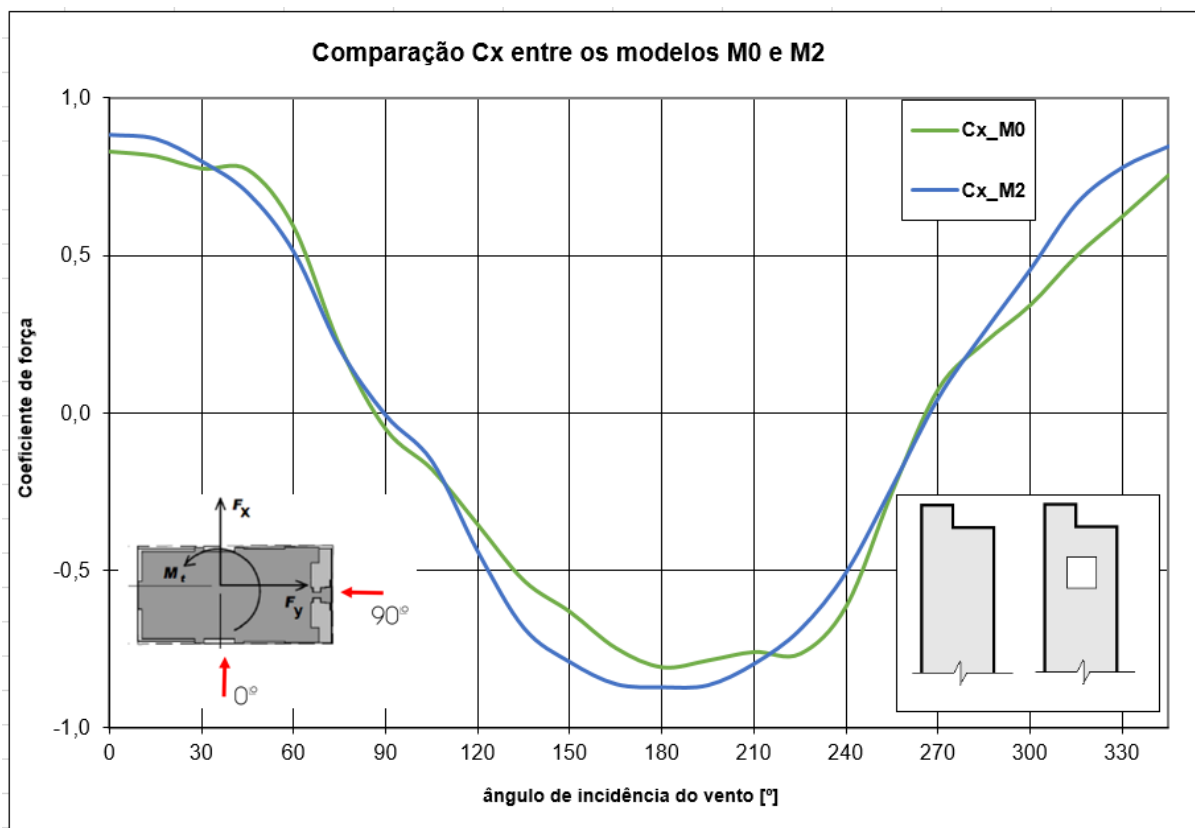
- incidência de 45° → $|C_{yM0}| = 0,23$, $|C_{yM1}| = 0,56$. Aumento de 143,4%.
- incidência de 60° → $|C_{yM0}| = 0,36$, $|C_{yM1}| = 0,70$. Aumento de 94,4%.

incidência de $180^\circ \rightarrow C_{yM0} = 0,04, C_{yM1} = 0,17$. Aumento de 373%.

incidência de $240^\circ \rightarrow C_{yM0} = 0,45, C_{yM1} = 0,79$. Aumento de 75,5%.

Na Figura 63, tem-se a os coeficientes de força global na direção x entre os modelos M0 e M2.

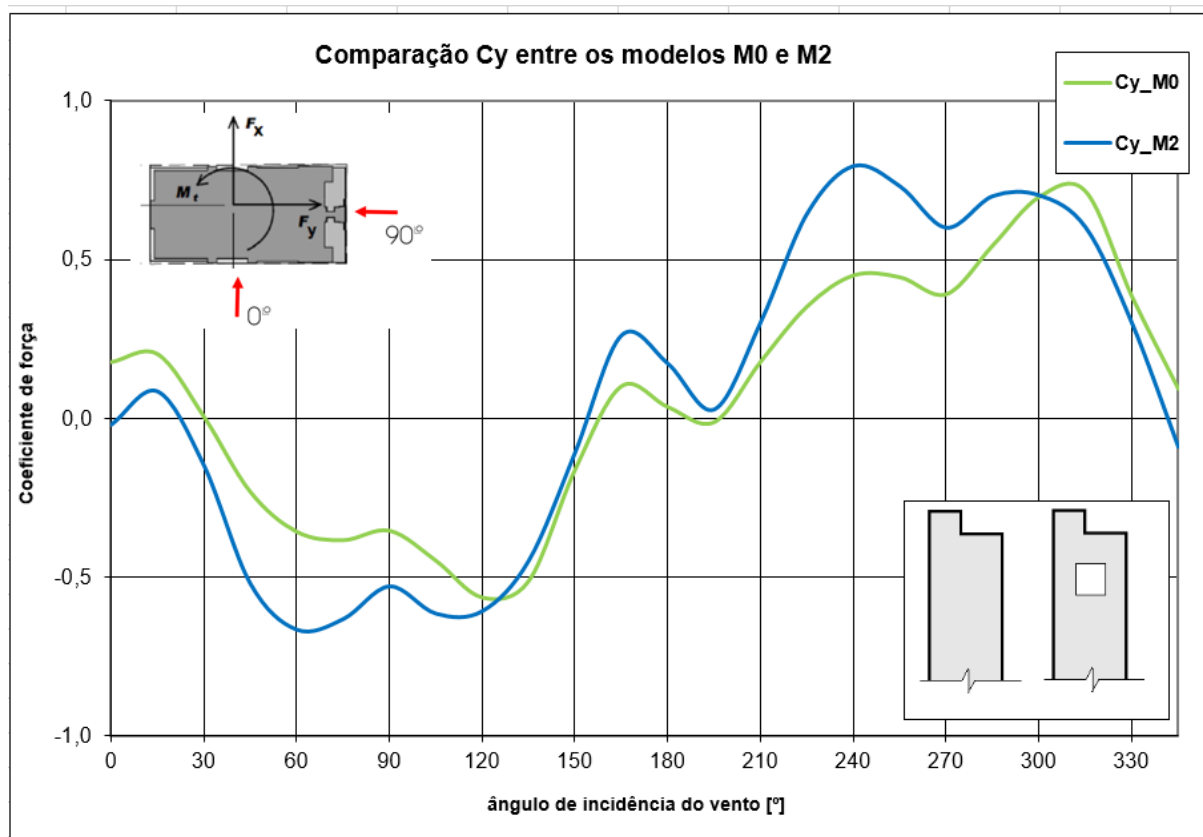
Figura 63 - Coeficientes C_x dos modelos M0 e M2 em função do ângulo de incidência ensaiado



Percebe-se que a configuração M2 não gerou reduções significativas ao coeficiente C_x , indicando que a redução da relação altura:base da abertura (em relação ao modelo M1) provoca aumento nos coeficientes C_x . O maior valor registrado para C_x no modelo M2 foi de 0,88 (vento incidindo a 0°), correspondendo a um aumento de aproximadamente 7% em relação ao valor máximo do modelo M0 para o mesmo ângulo.

Nos intervalos de 0 a 30° , 75° a 210° e 270° a 345° o coeficiente C_x no modelo M2 é mais nocivo do que no modelo M0. Esse aumento foi ocasionado pela inserção da abertura.

Na Figura 64, tem-se a comparação dos coeficientes de força global na direção y entre os modelos M0 e M2.

Figura 64 - Coeficientes C_y dos modelos M0 e M2 em função do ângulo de incidência ensaiado

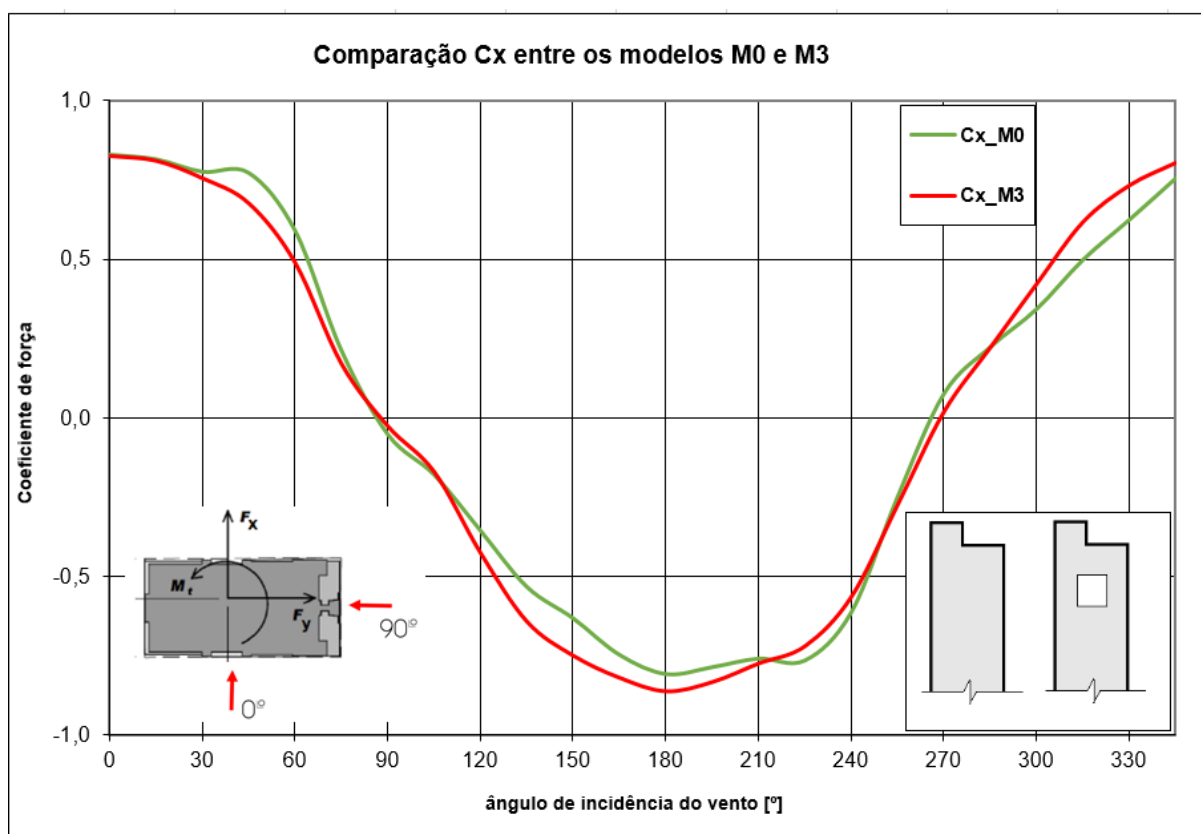
Percebe-se que a configuração M2 é mais nociva aos efeitos do vento, quando comparada com a configuração original, mostrando uma fragilização no coeficiente C_y possivelmente provocado pela inserção da abertura. O valor máximo apresentado para C_y no modelo M2 foi de 0,79 (ângulo de incidência 240°), cerca de 11% de aumento em relação ao valor máximo observado em M0.

Alguns aumentos notáveis no valor de C_y são registrados a seguir:

- incidência de 45° → $|C_{yM0}| = 0,23$, $|C_{yM1}| = 0,52$. Aumento de 125,9%.
- incidência de 60° → $|C_{yM0}| = 0,36$, $|C_{yM1}| = 0,67$. Aumento de 87,2%.
- incidência de 240° → $C_{yM0} = 0,45$, $C_{yM1} = 0,79$. Aumento de 75,5%.

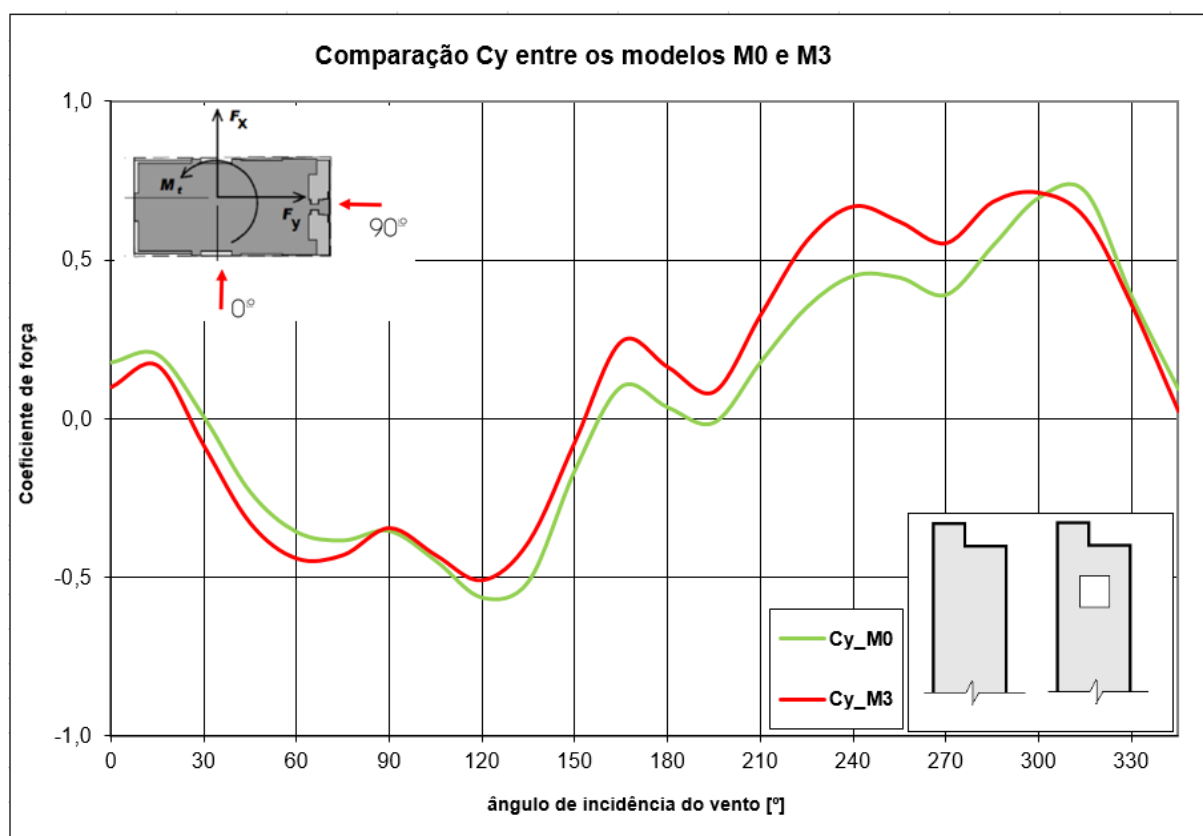
Na Figura 65, tem-se a comparação dos coeficientes de força global na direção x entre os modelos M0 e M3.

Figura 65 - Coeficientes C_x dos modelos M0 e M3 em função do ângulo de incidência ensaiado



Percebe-se que a configuração M3 não gerou reduções visíveis ao coeficiente C_x , mostrando novamente, conforme observou-se para o modelo M2, que a redução da relação altura:base da abertura, em relação ao modelo M1, tornou o C_x maior. O maior valor registrado para C_x no modelo M3 foi de 0,83 (vento incidindo a 0°), igual ao valor máximo do modelo M0.

Na Figura 66, tem-se a comparação dos coeficientes de força global na direção y entre os modelos M0 e M3.

Figura 66 - Coeficientes C_y dos modelos M0 e M3 em função do ângulo de incidência ensaiado

Percebe-se que a configuração M3 em geral é mais nociva aos efeitos do vento, quando comparada com a configuração original (como pode se observar na faixa de 90° a 300°). Isso possivelmente se deve ao fato da inserção de uma abertura na direção x provocar redução na inércia do edifício na direção y . Os valores máximos apresentados de C_y no modelo M3 e M0 são praticamente iguais (ângulo de incidência 300°): 0,712 e 0,714 respectivamente.

Na Figura 67 e 68, são apresentados gráficos com as curvas de F_x e F_y , respectivamente, para todos os 4 modelos.

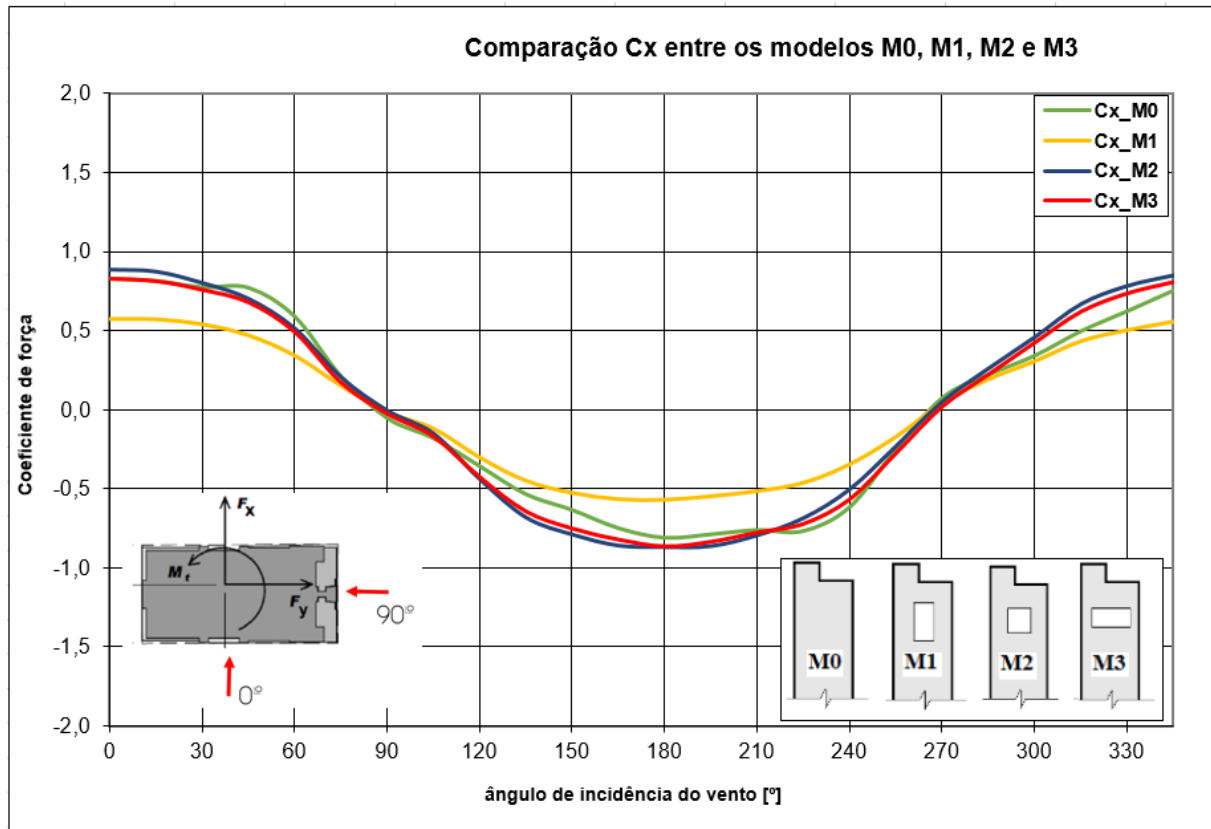
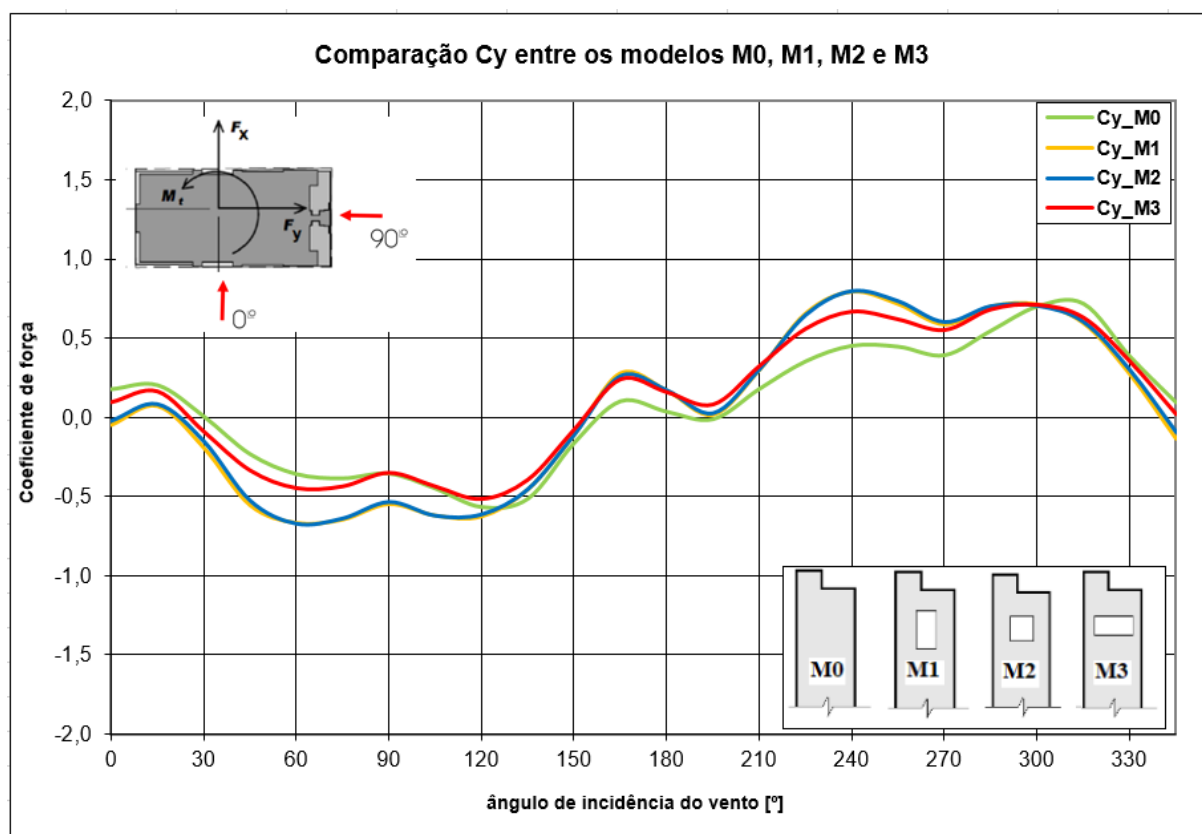
Figura 67 - Comparação C_x entre os modelos M0, M1, M2 e M3

Figura 68 - Comparação C_y entre os modelos M0, M1, M2 e M3

Na Tabela 4, tem-se o resumo dos valores máximos e mínimos de coeficientes de força C_x e C_y dos quatro modelos.

Tabela 4 – Coeficientes de força x e y máximos e mínimos dos modelos M0, M1, M2 e M3

	M0		M1		M2		M3	
	C_x	C_y	C_x	C_y	C_x	C_y	C_x	C_y
máximo	0,83	0,71	0,57	0,79	0,88	0,79	0,83	0,71
mínimo	-0,81	-0,56	-0,57	-0,67	-0,87	-0,67	-0,86	-0,51

4.1.2 Coeficientes de Torção

O coeficiente de torção foi calculado a partir da Equação 68.

$$C_t = 100 \cdot \frac{\sum_n^i C_{t,i}}{V} \quad (68)$$

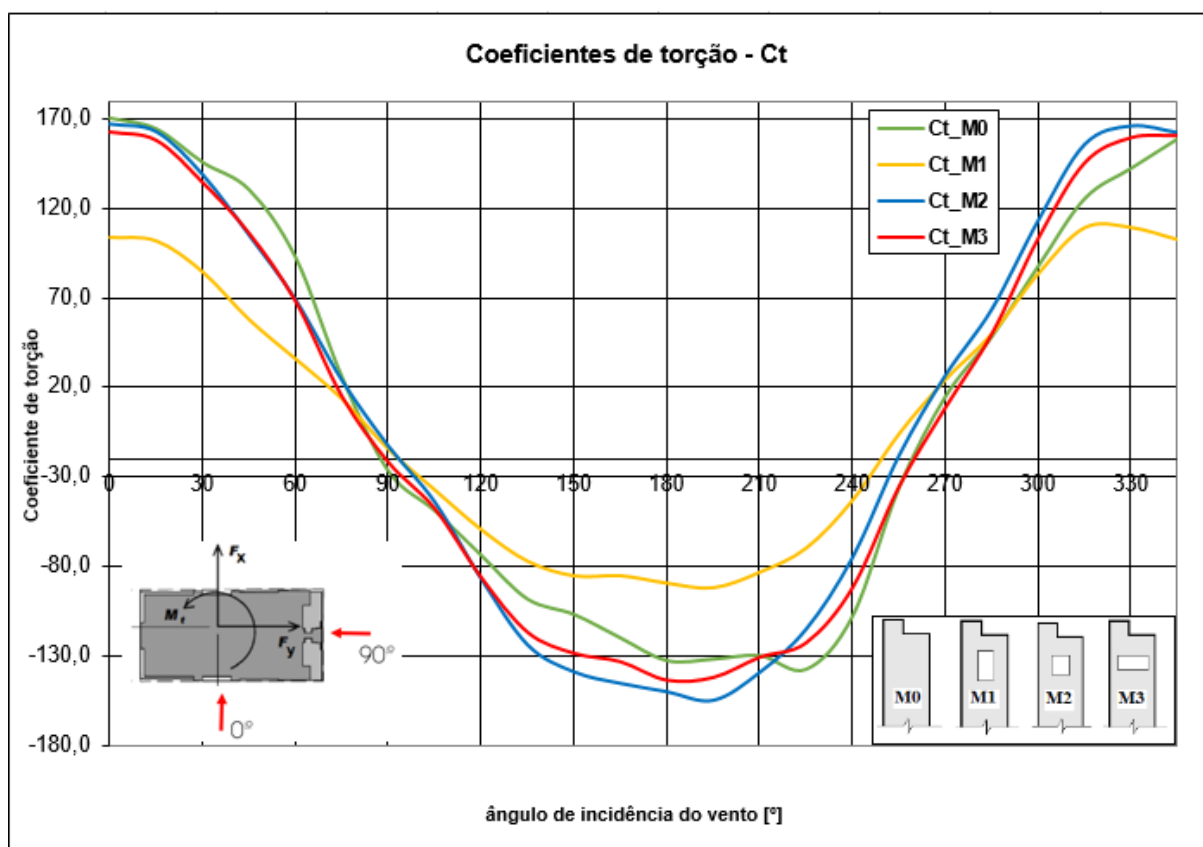
onde:

$C_{t,i}$ = coeficiente de torção calculado para cada tomada i (adimensional);

V = volume do edifício (m^3).

Na Figura 69, tem-se a comparação do coeficiente de torção para cada ângulo de incidência do vento nos quatro modelos ensaiados.

Figura 69 - Coeficientes C_t dos modelos M0, M1, M2 e M3 em função do ângulo de incidência ensaiado



Percebe-se que de 0° a 75°, os modelos com abertura apresentam menor coeficiente de torção. A redução mais expressiva é do coeficiente do modelo M1: o valor máximo (relativo ao ângulo

0°) apresenta cerca de 36% de redução quando comparado com o valor do coeficiente de torção do modelo M0 para o mesmo ângulo de incidência.

De 75° a 210°, percebe-se que os coeficientes de torção dos modelos M2 e M3 superam (em módulo) os valores relativos ao modelo não modificado M0. O modelo M1, nesse mesmo intervalo, apresenta coeficiente de torção mais brando em relação ao modelo M0.

De 210° a 285° os valores de coeficiente dos modelos M2 e M3 voltam a ficar mais amenos em relação aos coeficientes do modelo M0. A partir de 300° até 345°, observa-se um novo aumento nos coeficientes dos modelos M2 e M3 em relação ao modelo não modificado. Esse comportamento mostra que a inserção de aberturas com menor relação altura:base, tais como o modelo M2 e M3 podem ser nociva ao momento torçor atuando no edifício. Na Tabela 5 tem-se o resumo dos valores máximos e mínimos de coeficientes de torção dos quatro modelos.

Tabela 5 – Coeficientes de torção máximos e mínimos dos modelos M0, M1, M2 e M3

	M0	M1	M2	M3
$C_{t,máx}$	170,59	109,74	166,99	162,65
$C_{t,mín}$	-137,24	-92,38	-154,81	-143,81

4.2 ESPECTROS DE FORÇA E MOMENTO

Nesta seção, será visto o método de obtenção dos espectros de força e momento globais, onde as séries temporais de força global em x e y foram calculadas a partir das Equações 69 e 70.

$$F_x(t) = - \sum_{i=1}^N P_i(t) \cos \theta_i A_i \quad (69)$$

$$F_y(t) = - \sum_{i=1}^N P_i(t) \sen \theta_i A_i \quad (70)$$

onde:

$P_i(t)$ = pressão instantânea na i -ésima tomada [kPa];

N = número de tomadas de cada modelo;

A_i = área de influência da tomada [m²].

A série temporal de momento torçor global foi calculada a partir da Equação 71.

$$M_t(t) = \sum_{i=1}^N P_i(t) A_i L_i \quad (71)$$

onde:

L_i = distância entre a projeção da linha de atuação da tomada e o centro de torção do edifício [m].

4.2.1 Transformada de Fourier

Calculadas as séries temporais de forças e momento globais, procede-se à análise no domínio da frequência, lançando-se mão, para isso, da Transformada de Fourier. De acordo com Melo (2020), por definição, a transformada de Fourier aplicada a uma função contínua no domínio do tempo $f(t)$ é dada pela Equação 72:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (72)$$

onde:

$f(t)$ = função no domínio do tempo;

$F(\omega)$ = função no domínio da frequência;

ω = frequência angular (rad/s).

Devido ao fato das funções temporais serem discretas (possuem um número finito de instantes de aquisição), deve-se utilizar a versão discreta da transformada de Fourier, conforme a Equação 73 (MELO, 2020).

$$F_k = \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-i \omega_k n / N} \quad (73)$$

onde:

f_n = n-ésimo valor da função discretizada no domínio do tempo;

N = número de pontos de aquisição;

ω_k = frequência angular (rad/s).

Com o objetivo de simplificar a aplicação da Transformada de Fourier, Cooley e Tukey (1965) introduziram a chamada *Fast Fourier Transform* (FFT), que reduz significativamente o esforço computacional necessário.

4.2.2 Densidade Espectral de Potência

A obtenção da densidade espectral de potência, através da FFT, é dada pela Equação 74.

$$PSD(f) = 2 \frac{\Delta t}{N} |FFT_k|_{k=2}^{N/2}|^2 \quad (74)$$

onde:

$PSD(f)$ = densidade espectral de potência;

FFT = transformada de Fourier na versão discreta, conforme mostrado na seção 4.2.1.

4.2.3 Obtenção dos Espectros

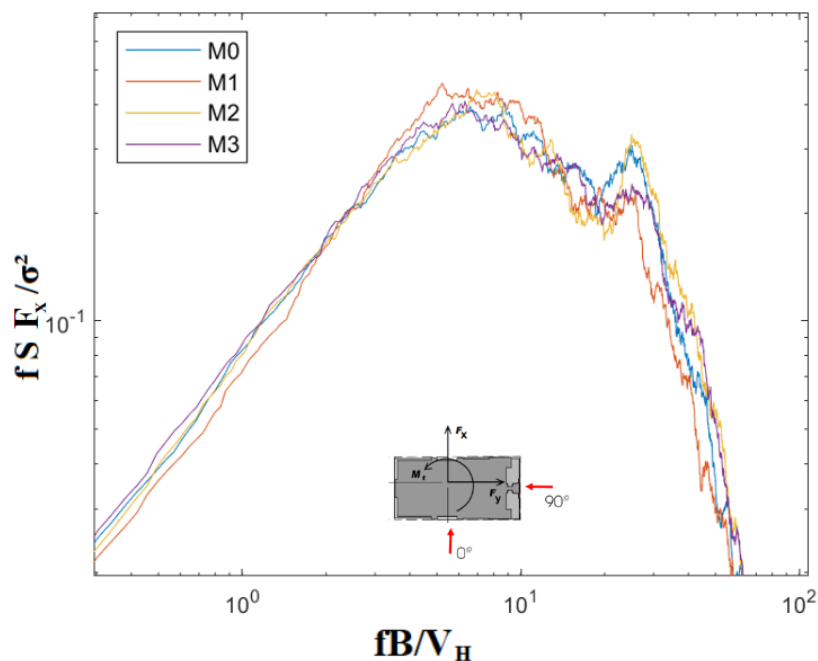
Foi criado um código em Python pelo autor para a geração das séries temporais de forças (F_x e F_y) e momentos (M_t) globais de cada um dos quatro modelos ensaiados para as 24 incidências de vento previstas. A partir destas séries, utilizou-se um código desenvolvido por Melo (2020) para obtenção dos espectros de potência, conforme descrito em 4.2.1 e 4.2.2, gerando-se, assim, um total de 72 espectros para cada modelo ensaiado. Todos espectros podem ser visualizados no Apêndice A.

4.2.3.1 Análise dos espectros de F_x

Para as incidências de 345° , 0° , 15° e 30° (vide Apêndice A), as curvas de densidade espectral são muito parecidas (a incidência de 0° corresponde a um escoamento perpendicular à direção da abertura), o que indica que a força global F_x nos modelos M1, M2 e M3 não sofre influência significativa para essas incidências. Além disso, estas incidências não apresenta pico de densidade espectral bem pronunciado, devido ao fato de se tratar de uma força de arrasto.

As incidências de 315° e 45° (vide Apêndice A) apresentam comportamento parecido, por serem incidências simétricas em relação ao eixo x. Nessas incidências, as curvas de densidade espectral não apresentam significativa diferença entre si.

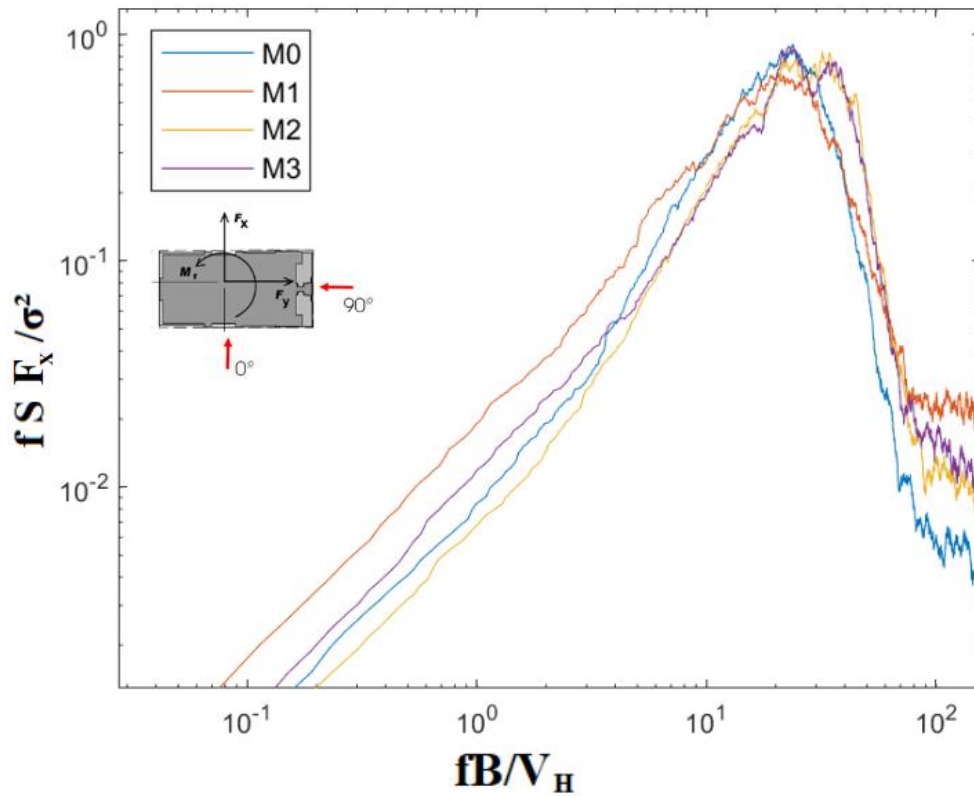
Para incidência de 60° , é apresentado o espectro da Figura 70.

Figura 70 - Espectro de potência F_x para incidência de 60° 

O pico de energia referente ao modelo M0 (associado à frequência reduzida de 9, aproximadamente) é **menor** que o pico referente aos modelos M1, M2, M3, embora a diferença seja pequena (no caso de M1, tem-se a maior diferença, em torno de 12%), mostrando que a inserção da abertura de maior relação altura:base tende a apresentar um pico de densidade espectral mais ameno. Além disso, a frequência reduzida associada ao pico de M1, M2 e M3 é menor que a relacionada ao pico de M0.

Para incidência de 90° , tem-se o gráfico da Figura 71.

Figura 71 - Espectro de potência F_x para incidência de 90°



Nessa incidência, tem-se uma redução de 22% no pico de densidade espectral do modelo M1 em relação ao modelo não modificado, M0.

Para as incidências de 105° e 120° , tem-se os gráficos das Figuras 72 e 73.

Figura 72 - Espectro de potência F_x para incidência de 105°

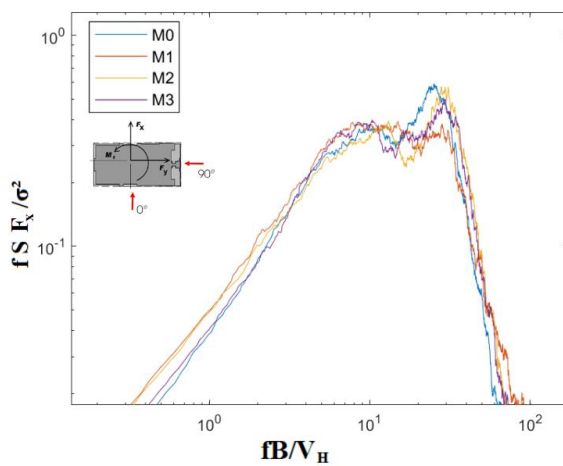
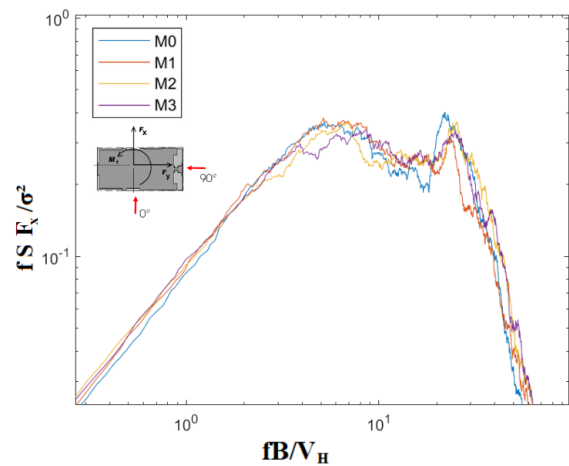


Figura 73 - Espectro de potência F_x para incidência de 120°



Os espectros acima possuem dois picos, tal como foi observado para a incidência de 285° (vide Apêndice A). Para a incidência de 105°, observa-se uma das maiores reduções de densidade espectral: o modelo M1 apresenta redução de pico de 36% se comparado com o modelo M0. No caso da incidência de 120°, a redução do pico não é tão significativa.

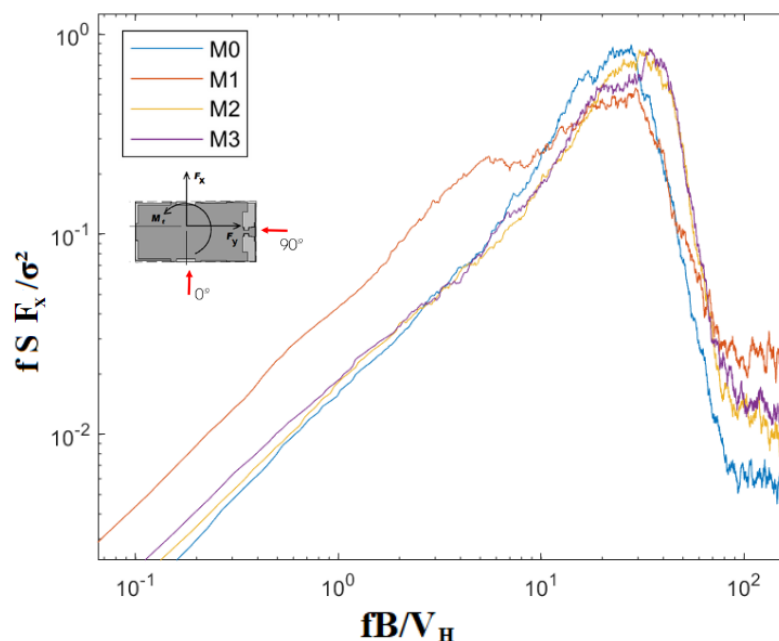
Para as incidências de 135°, 150°, 165°, 180° e 195 ° (vide Apêndice A), as curvas de densidade espectral são muito parecidas (a incidência de 180° é paralela à direção da abertura), o que indica que a força global F_x nos modelos M1, M2 e M3 não sofre influência significativa para estas incidências.

No escoamento a 210° (vide Apêndice A), os espectros de M0 e M2 apresentam picos semelhantes, enquanto que M1 e M3 apresentam redução de cerca de 12%.

No escoamento a 225° (vide Apêndice A), o modelo M1 apresenta pico superior aos demais modelos, superando o pico de M0 em cerca de 10%.

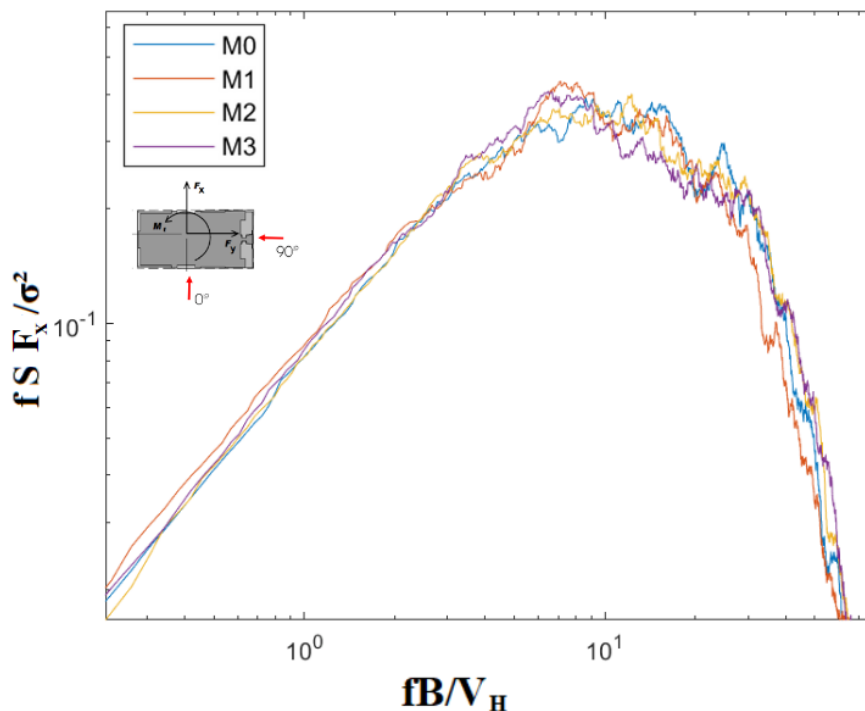
Para os escoamentos de 240° e 255° (vide Apêndice A), novamente há o surgimento de um segundo pico de energia. Para essas incidências, o modelo M3 se destacou, apresentando redução de pico de aproximadamente 30% com vento a 240° e 20% com vento a 255°.

Para a incidência de 270° (perpendicular à abertura nos modelos M1, M2 e M3), através da Figura 74, observa-se que há uma significativa diferença em termos de densidade espectral de potência, sobretudo se compararmos o modelo M0 (curva azul) com o M1 (curva vermelha).

Figura 74 - Espectro de potências F_x para incidência de 270° 

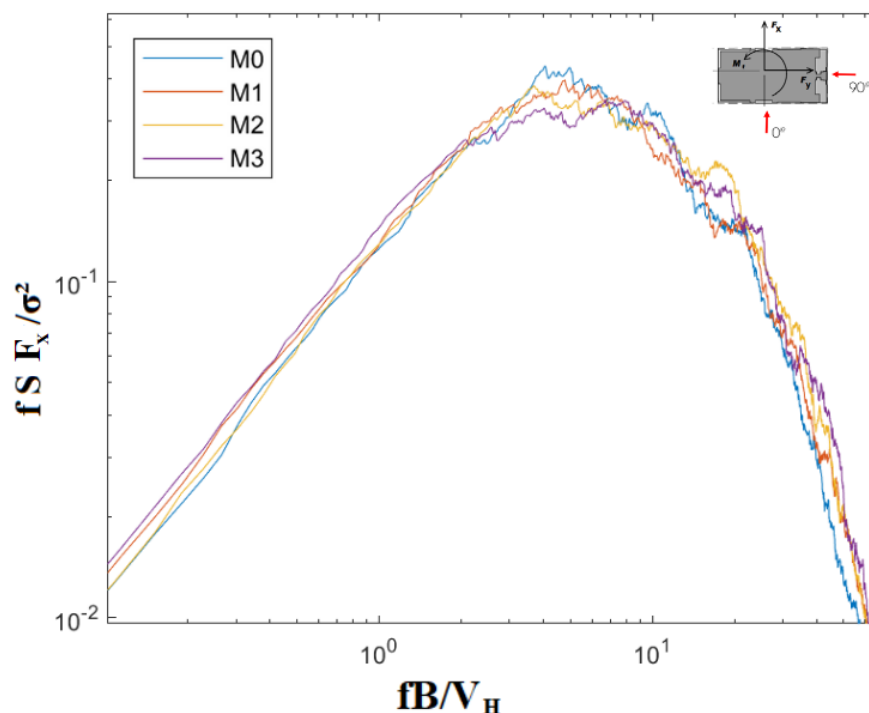
O pico de energia sofreu redução de cerca de 40% em relação ao M0, não modificado, para o modelo M1, com a mais esbelta das aberturas, indicando um potencial de redução de energia espectral de F_x para uma incidência perpendicular à direção da abertura. A frequência reduzida associada ao pico manteve-se praticamente igual, indicando que a abertura não ocasionou mudanças significativas na frequência natural de excitação do edifício. Para os modelos M2 e M3, percebe-se que os picos do espectro são próximos do pico de M0, porém a frequência reduzida associada ao pico é maior, indicando que as aberturas menos esbeltas tendem a modificar as características dinâmicas da estrutura.

Para incidência de 300° , tem-se o espectro da Figura 75.

Figura 75 - Espectro de potência F_x para incidência de 300° 

O pico de energia referente ao modelo M1 é maior que o pico referente ao modelo M0, como se pode observar acima, indicando que a abertura de M1 colabora para uma atenuação dos efeitos dinâmicos ocasionados pelo vento a 300° . Além disso, a frequência reduzida associada ao pico é ligeiramente menor.

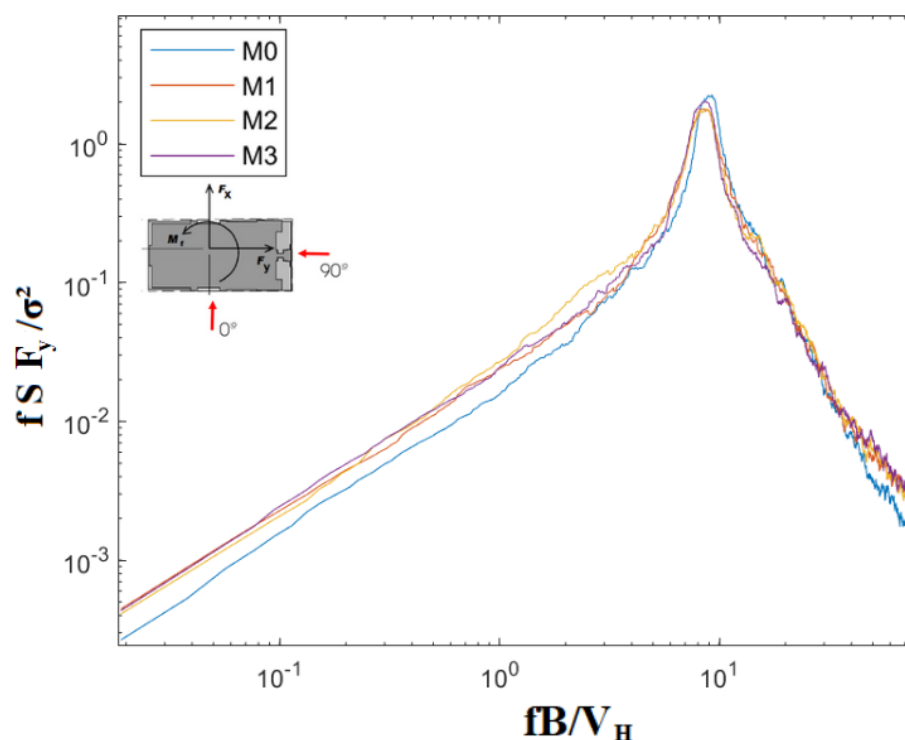
Para a incidência de 330° , tem-se o espectro da Figura 76.

Figura 76 - Espectro de potência F_x para incidência de 330° 

Como se percebe, para tal incidência, o pico de energia do modelo M3, em relação ao modelo M0, sofreu redução de cerca de 12%, além de um leve aumento na frequência reduzida associada ao pico.

4.2.3.2 Análise dos espectros de F_y

Para as incidências de 345° , 0° e 15° (incidências paralelas às aberturas nos modelos M1, M2 e M3, vide Apêndice A), tem-se espectros com picos bem pronunciados, devido a F_y nessas incidências ser considerada força lateral. No vento a 345° , os picos têm praticamente o mesmo valor e a mesma frequência reduzida associada, indicando que as aberturas pouco influem em F_y para incidências paralelas a sua direção. No vento a 0° , o pico do modelo M0 está levemente acima dos outros, como pode ser analisado na Figura 77.

Figura 77 - Espectro de potência F_y para incidência de 0° 

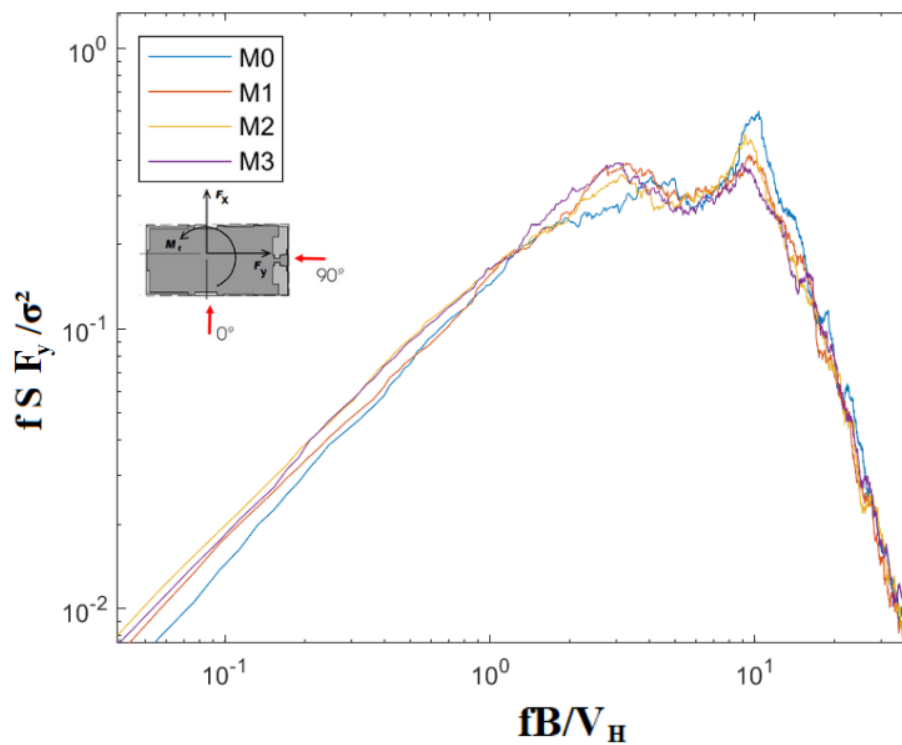
O espectro acima mostra que o pico de M0 está levemente acima dos demais, sendo a maior diferença em relação ao pico de M2 (cerca de 14%). A frequência reduzida associada é praticamente a mesma.

Para incidências de 30° e 45° (vide Apêndice A), tem-se novamente um formato de espectro semelhante à incidência de 315° (vide Apêndice A), dada a significativa simetria do modelo. Para ambas incidências, tem-se picos com valores semelhantes, entretanto, com diferentes valores de frequência reduzida associados.

Para incidências de 75° , 90° e 115° (vide Apêndice A), tem-se espectros parecidos com a incidência de 270° (vide Apêndice A). Isto é, curvas com valores de picos semelhantes, com curvas praticamente sobrepostas.

Para a incidência de 120° (vide Apêndice A), o modelo M3 apresenta pico 20% maior que M1. Com vento a 135° , o pico de M0 está acima dos demais, sendo a maior diferença em relação a M1 (cerca de 15%).

Para incidência de 150° , tem-se a Figura 78.

Figura 78 - Espectro de potência F_y para incidência de 150° 

Pode-se observar nos espectros acima, que os picos de M1, M2 e M3 são menores que o de M0, havendo uma redução máxima de 20% no pico do espectro M3.

Para as incidências de 165° e 180° , tem-se os gráficos das Figuras 79 e 80.

Figura 79 - Espectro de potência F_y para incidência de 165°

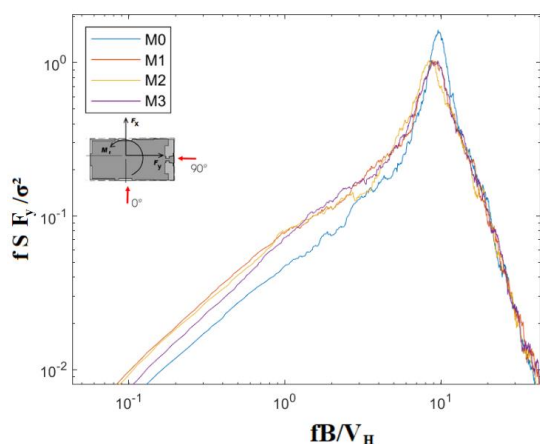
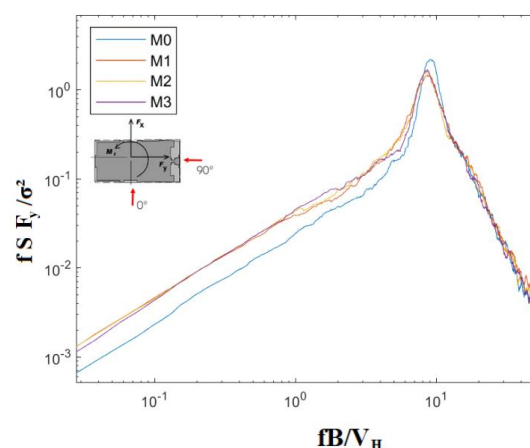


Figura 80 - Espectro de potência F_y para incidência de 180°



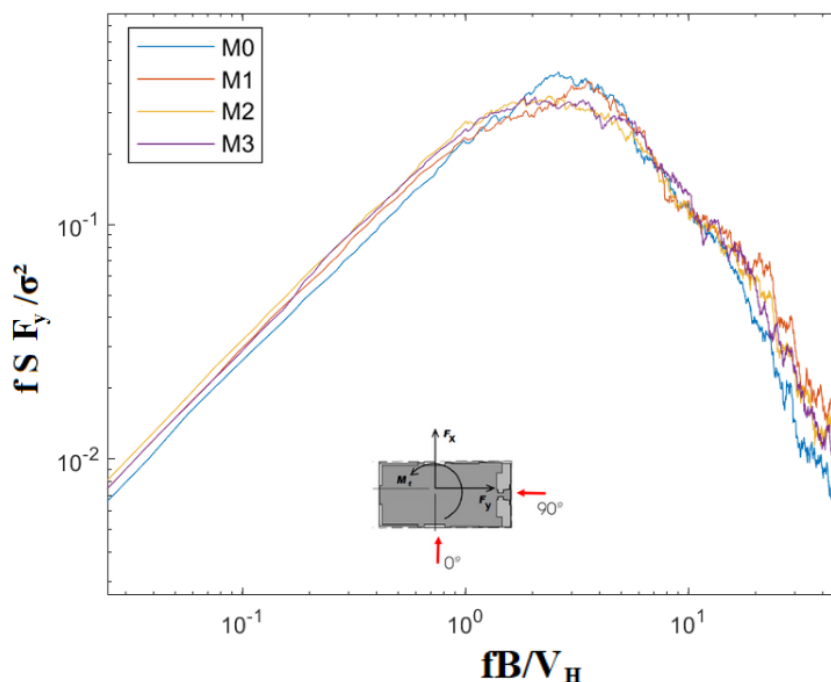
Para incidência de 165° , observa-se uma significativa redução no pico de M0 para M1, M2 e M3, chegando a uma expressiva redução de 55%. Para a incidência de 180° , observa-se uma redução máxima no pico de 33%, de M0 para M2, sendo esta uma incidência paralela à direção da abertura. O fato das incidências de 165° e 180° terem apresentado grandes redução do pico, enquanto que as incidências 345° e 0° terem apresentado reduções sutis do pico (tanto 180° como 0° são incidências paralelas à direção da abertura), indica que a base do edifício e/ou heliponto (regiões que tornam o edifício assimétrico em planta) têm influência nos picos de densidade espectral.

Para a incidência de 195° (vide Apêndice A), observa-se também uma redução no pico de 30%, de M0 para os demais modelos.

Para a incidência de 210° (vide Apêndice A), os modelos M0, M1 e M2 apresentam picos de valores semelhantes. No entanto, o modelo M3 apresenta uma redução de 25% no pico.

Para o escoamento a 225° , 240° e 255° (vide Apêndice A), os picos dos modelos apresentam valores muito próximos uns dos outros.

Para a incidência de 270° , tem-se o gráfico da Figura 81.

Figura 81- Espectro de potência F_y para incidência de 270° 

Os espectros acima mostram que há uma similaridade entre os desenvolvimentos e picos dos modelos M0 e M1. No entanto, para os modelos M2 e M3, é observada uma redução de 22% no pico, indicando que para incidência perpendicular à direção da abertura os espectros de força em y se comportam de forma semelhante.

O mesmo se observa ara a incidência de 285° (vide Apêndice A), os espectros apresentam praticamente o mesmo valor de pico, exceto pelo modelo M2, que apresenta redução de 12% do pico em relação aos demais.

Para o escoamento a 300° (vide Apêndice A), os espectros seguem apresentando comportamento semelhante e, nesse caso, a diferença de picos é ínfima.

Para as incidências de 315° e 330° , tem-se as Figuras 82 e 83.

Figura 82 - Espectro de potência F_y para incidência de 315°

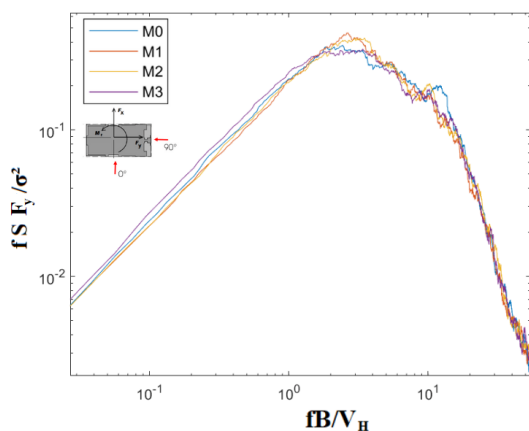
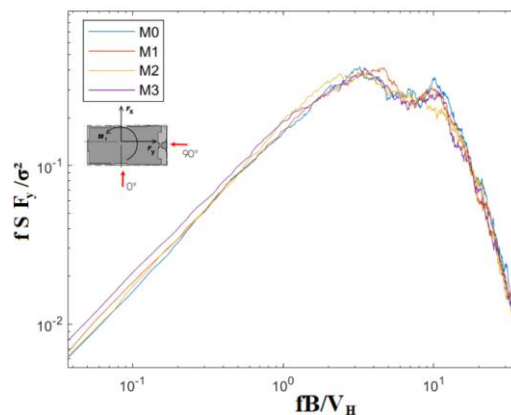


Figura 83 - Espectro de potência F_y para incidência de 330°

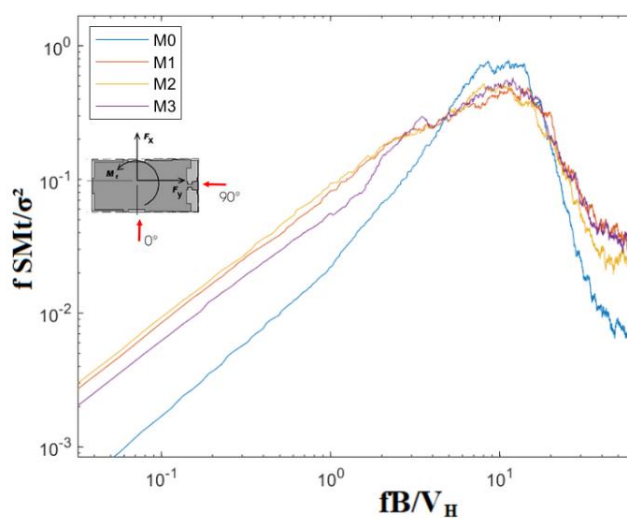


Nas figuras acima, percebe-se que surge um segundo pico, indicando a possível excitação de mais de um modo de vibração para as incidências analisadas. Para 315° , observa-se um aumento do pico de energia de 10% do modelo M0 para o modelo M1 e de 5% do modelo M0 para M2. Para 330° , os picos se mostram praticamente iguais para todos modelos.

4.2.3.3 Análise dos espectros de M_t

Para incidência de 0° , tem-se a Figura 84.

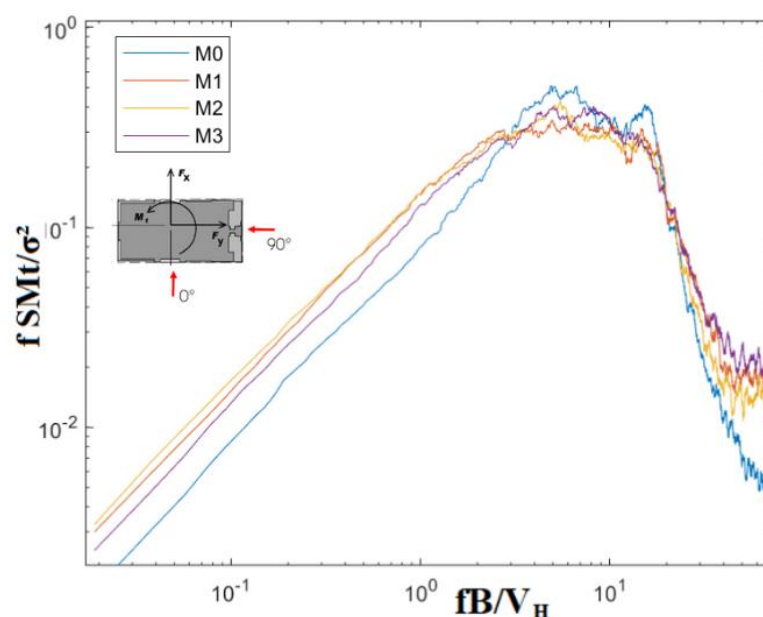
Figura 84 - Espectro de potência M_t a 0°



Como pode se perceber no gráfico, existe uma significativa redução de pico nos modelos M1, M2, M3, em relação ao modelo M0, chegando a 37,5%, o que indica que a incidência do vento paralela à direção da abertura tem efeito atenuador sobre o momento torçor. A frequência reduzida associada ao pico é praticamente a mesma em todos os modelos.

Para incidência de 15°, tem-se a Figura 85.

Figura 85 - Espectro de potência Mt a 15°



Como pode ser observado na Figura 82, há uma redução significativa no pico de M0 para os modelos com abertura, principalmente para o modelo M1, chegando a uma redução de 30%, indicando que uma maior relação altura:base da abertura proporciona reduções no momento torçor para esta incidência.

Para as incidências de 30° e 45° (vide Apêndice A), o desenvolvimento dos espectros, bem como o pico de energia para todos modelos é semelhante.

Para escoamento a 60° (vide Apêndice A), o modelo M3 apresentou significativa redução de pico de energia no espectro em relação ao modelo M0 (cerca de 25%). Os demais modelos com abertura não apresentaram significativa redução de pico.

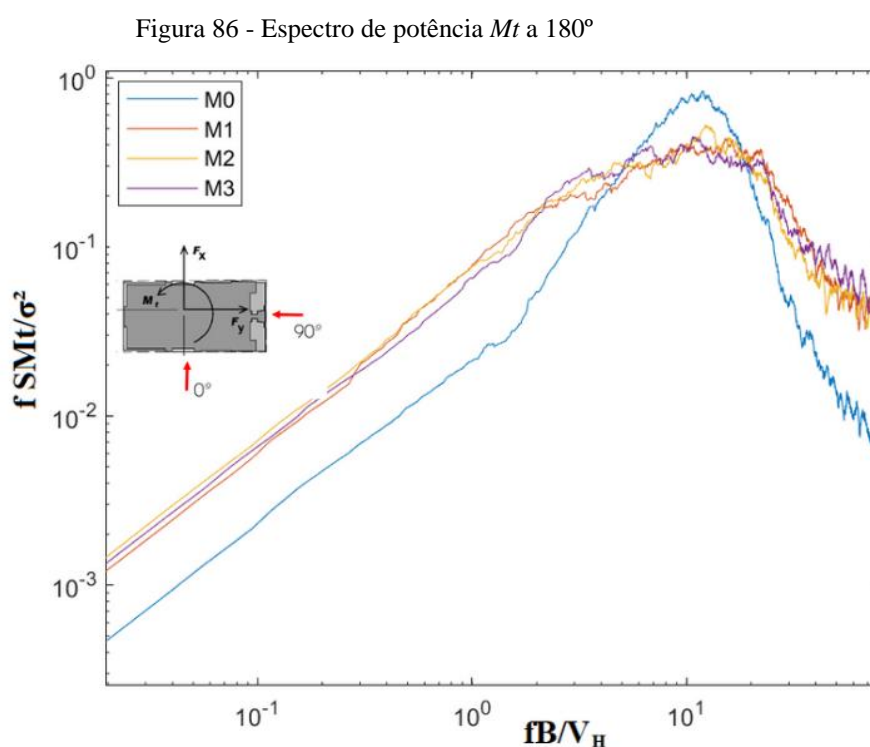
Para as incidências de 75°, 90°, 105° e 120° (vide Apêndice A) o desenvolvimento dos espectros, bem como o pico de energia para todos modelos é semelhante, o que indica que para incidência perpendicular à direção do vento, não há alterações significativas no momento torçor dada pela inserção de aberturas.

Para a incidência de 135° (vide Apêndice A), percebe-se uma redução no pico dos espectros dos modelos com abertura comparado com o modelo com abertura, chegando a cerca de 14%.

Para escoamento a 150° (vide Apêndice A), percebe-se uma redução no pico dos espectros dos modelos com abertura comparado com o modelo com abertura, chegando a cerca de 14%.

Para escoamento a 165° (vide Apêndice A), todos modelos apresentaram picos semelhantes.

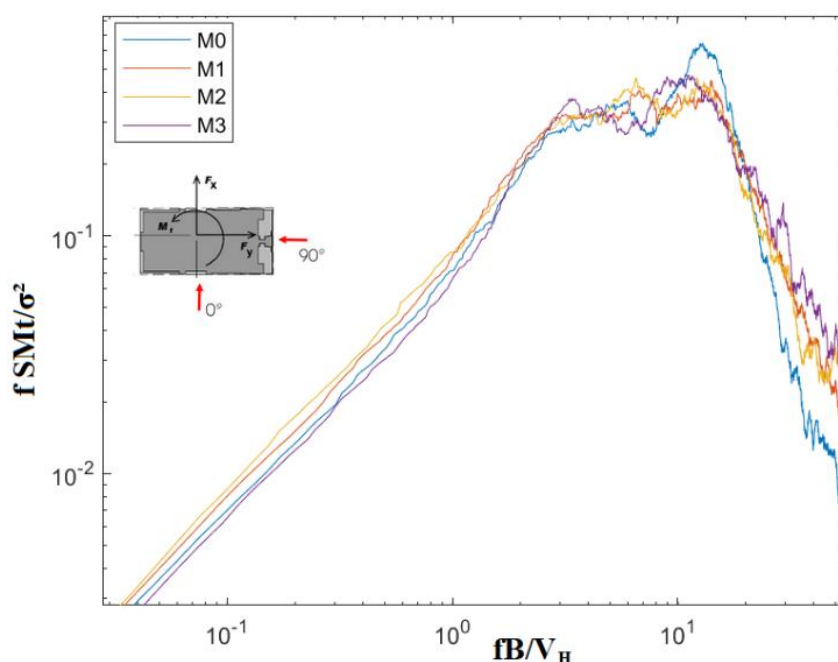
Para escoamento a 180°, direção paralela ao desenvolvimento das aberturas nos modelos modificados, tem-se o gráfico da Figura 86.



Percebe-se uma significativa redução no pico de energia para os modelos com abertura, chegando a 47% de redução no caso de M1, novamente indicando o potencial de redução do momento fletor com a inserção de aberturas para incidências paralelas à incidência do vento.

O mesmo pode ser observado no escoamento a 195° , também se percebe uma significativa redução no pico do espectro, vide Figura 87.

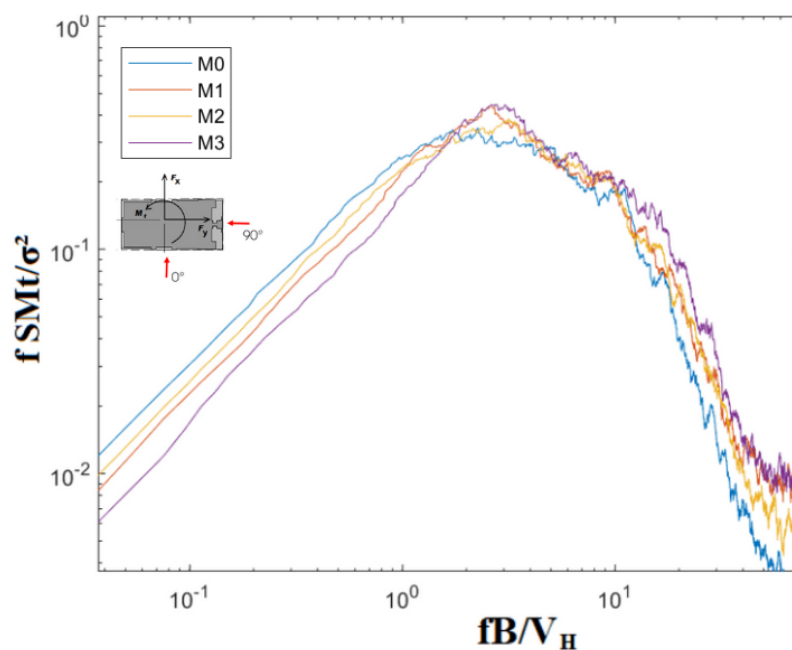
Figura 87 - Espectro de potência Mt a 195°



Na Figura 87, pode-se identificar uma redução de 30% no pico do espectro de M0 para M1.

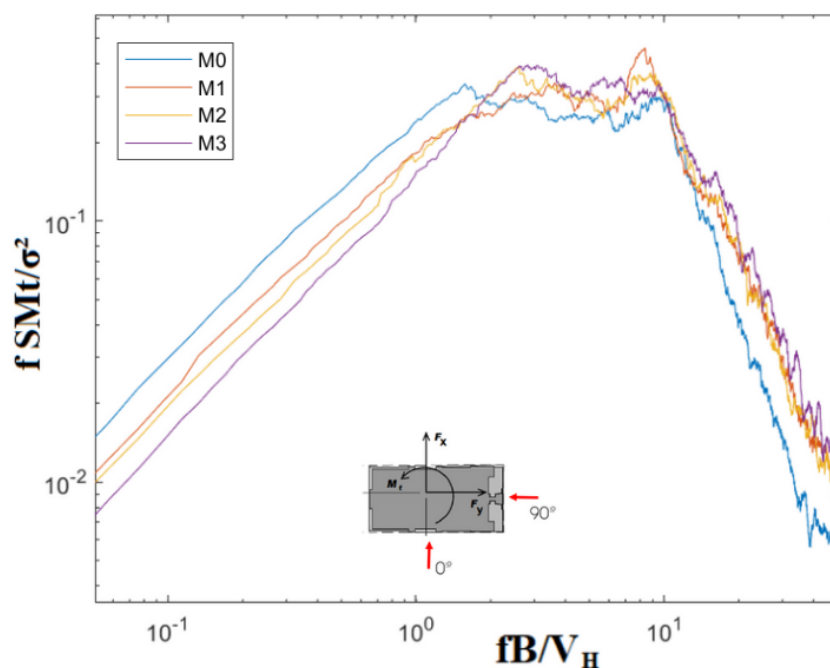
Para as incidências de 210° e 225° (vide Apêndice A), o desenvolvimento dos espectros, bem como o pico de energia para todos modelos é semelhante.

Para incidência de 240° , 255° , 270° e 285° (vide Apêndice A) observa-se efeito adverso. Para a incidência de 240° , tem-se a Figura 88.

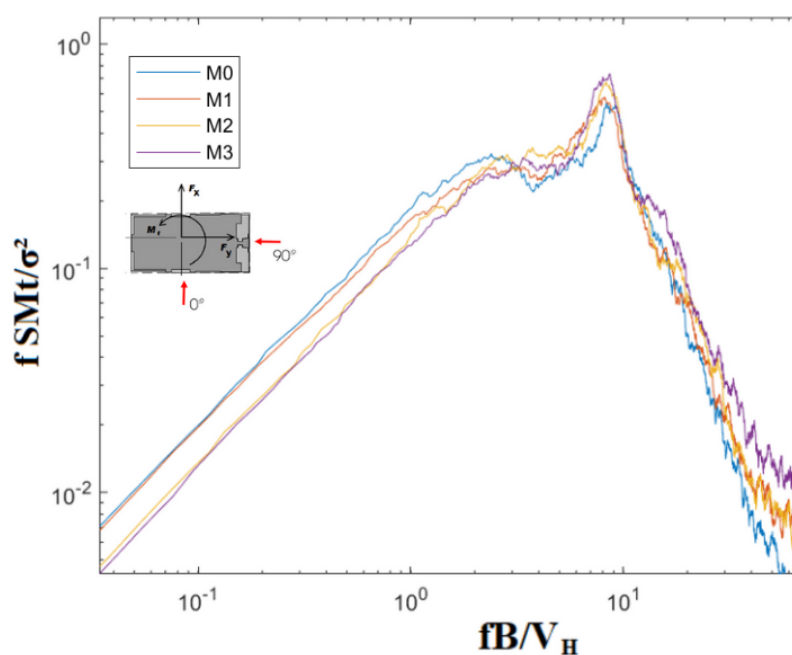
Figura 88 - Espectro de potência M_t a 240° 

Na Figura 88, percebe-se que há aumento dos picos de energia nos modelos com abertura quando comparado com o modelo não modificado M0. Esse aumento chega a 20% no caso de M1 e M3.

O aumento no pico de energia é ainda maior para a incidência de 255° , chegando a 36% no caso de M1, vide Figura 89.

Figura 89 - Espectro de potência Mt a 255° 

Para incidência de 270° , foi observado um aumento no pico de energia nos modelos modificados, chegando a 42% no caso do M3 comparado ao modelo não modificado, vide Figura 90.

Figura 90 - Espectro de potência Mt a 270° 

Para a incidência de 285°, o aumento do pico chega a 40% no caso de M3 e M2. O modelo M1 não apresenta aumento do pico em relação a M0.

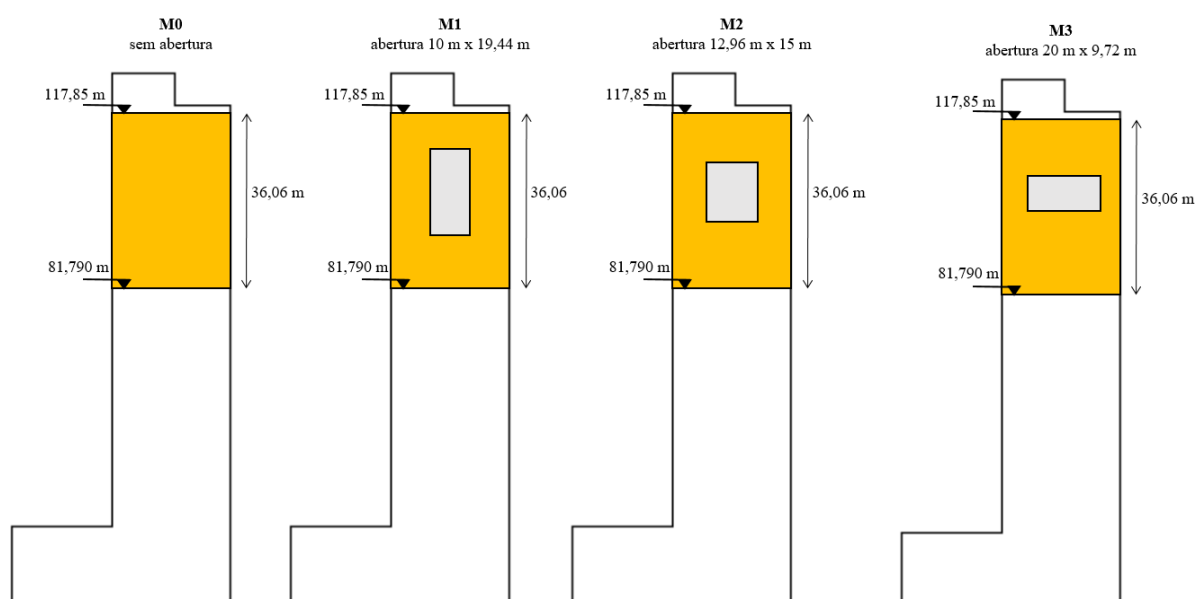
Para as incidências de 300°, 330° e 345° (vide Apêndice A), o desenvolvimento dos espectros, bem como o pico de energia para todos modelos, é semelhante.

Finalmente, para a incidência de 315° (vide Apêndice A), novamente se observa um aumento no pico dos espectros dos modelos com abertura, chegando a um aumento máximo de 25% no caso de M1.

4.3 ANÁLISE POR FAIXAS

Para as incidências que apresentaram significativas reduções no pico do espectro, buscou-se analisar no domínio da frequência a faixa do edifício que contempla a abertura. Para os modelos M0, M1, M2 e M3, foram analisadas as faixas hachuradas que podem ser observadas na Figura 91.

Figura 91 - Faixas dos modelos analisadas



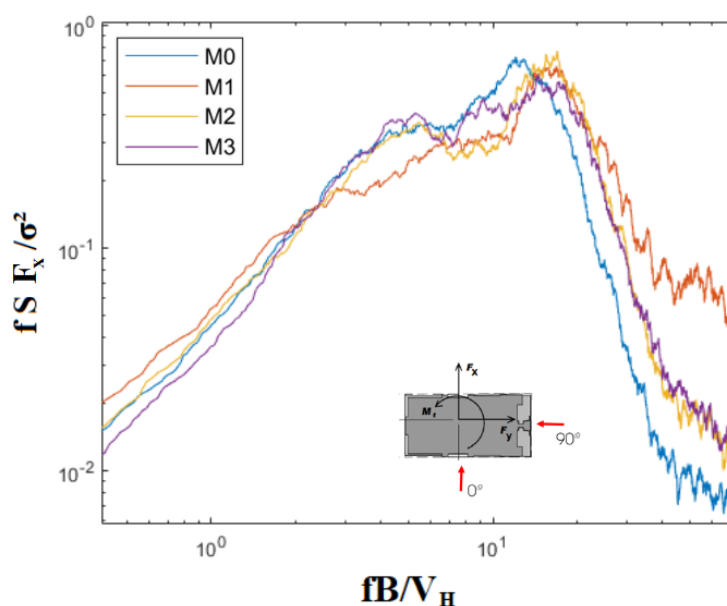
As incidências de 105° , 240° e 270° , para os espectros de força global na direção x , chamaram atenção por apresentar significativas reduções no pico, se comparado o modelo M0 com os modelos modificados. Estas foram as incidências escolhidas para análise em x .

As incidências de 165° , 180° e 270° , para os espectros de força global na direção y , chamaram atenção por apresentar significativas reduções no pico, se comparado o modelo M0 com os modelos modificados. Estas foram as incidências escolhidas para análise em y .

4.3.1 Análise por faixa em x

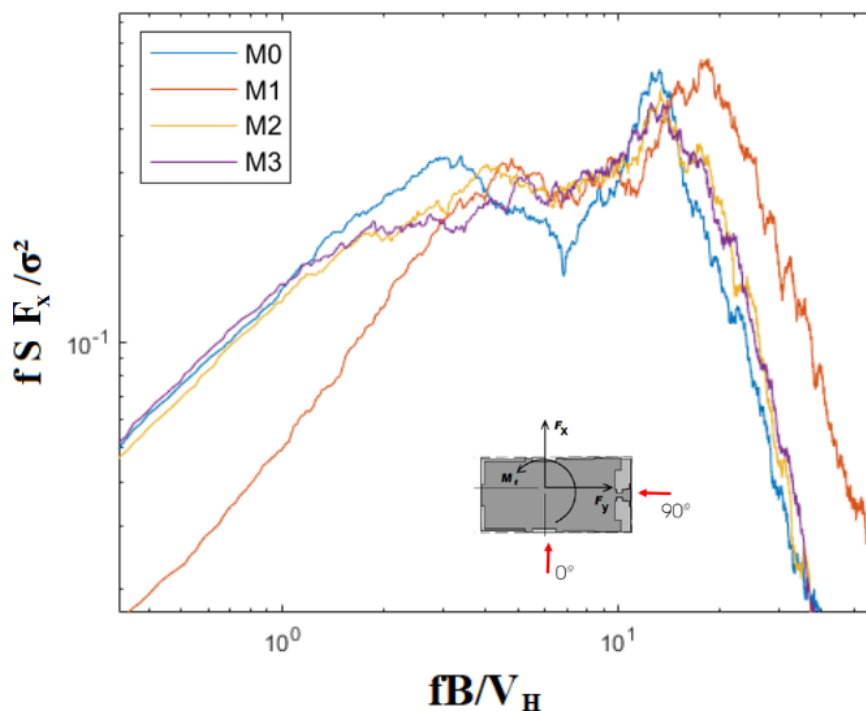
Para o a incidência de 105° , obteve-se os seguintes espectros de potência da Figura 92.

Figura 92 - Análise por faixa de F_x na incidência 105°



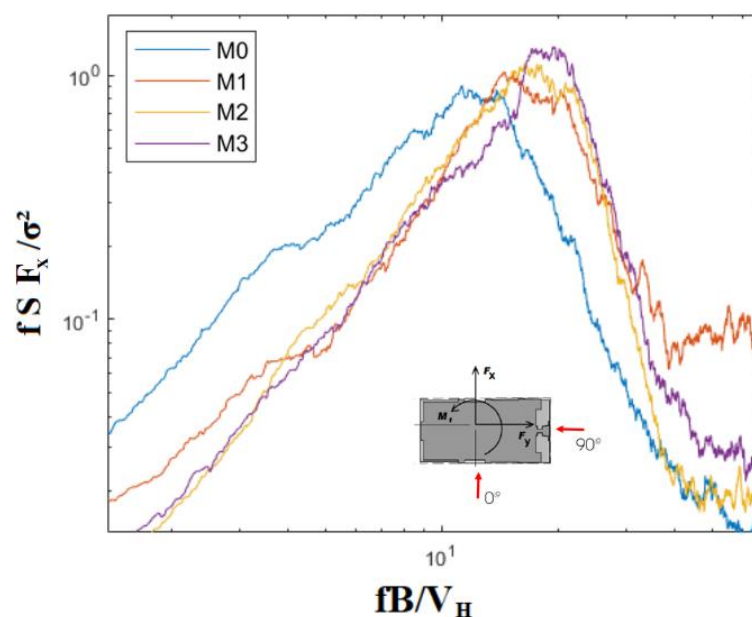
Para essa incidência, observou-se, em relação a M0, uma redução de 13% no pico de M1, um aumento de 10% no pico de M2 e uma redução de 17% no pico de M3. Além disso, em relação a M0, os modelos M1, M2 e M3 apresentam aumento significativo na frequência reduzida associada ao pico do espectro.

Para a incidência de 240° , obteve-se os seguintes espectros de potência da Figura 93.

Figura 93 - Análise por faixa de F_x na incidência 240° 

Para essa incidência, observou-se, em relação a M0, um aumento de 10% no pico de M1, uma redução de 14% no pico de M2 e uma redução de 17% no pico de M3. Além disso, em relação a M0, os modelos M2 e M3 apresentam frequências reduzidas associadas ao pico do espectro semelhantes, enquanto isso M1 tem uma frequência reduzida associada ao pico significativamente maior.

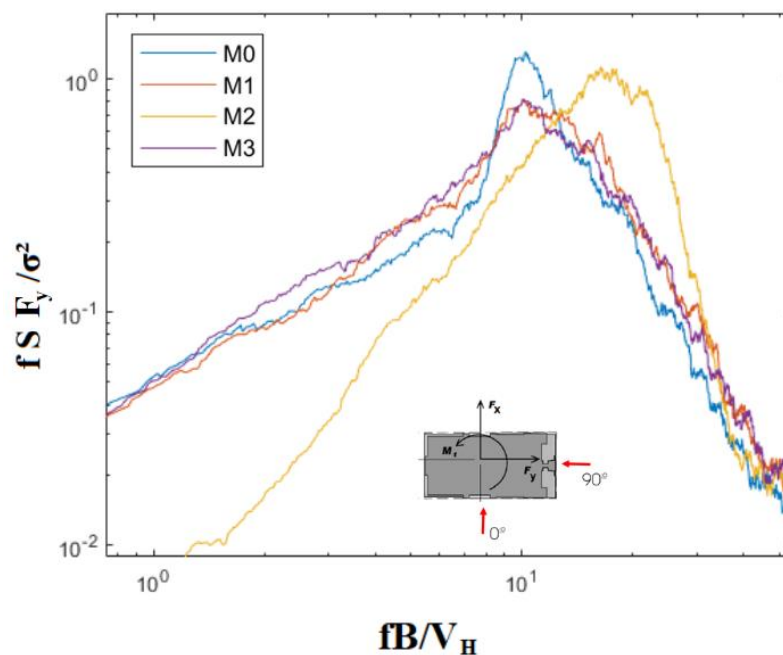
Para a incidência de 270° , obteve-se os seguintes espectros de potência da Figura 94.

Figura 94 - Análise por faixa de F_x na incidência 270° 

Para essa incidência, observou-se, em relação a M0, um aumento de 6% no pico de M1, uma redução de 7% no pico de M2 e um aumento de 10% no pico de M3. Além disso, em relação a M0, os modelos M1, M2 e M3 apresentam aumento significativo na frequência reduzida associada ao pico do espectro.

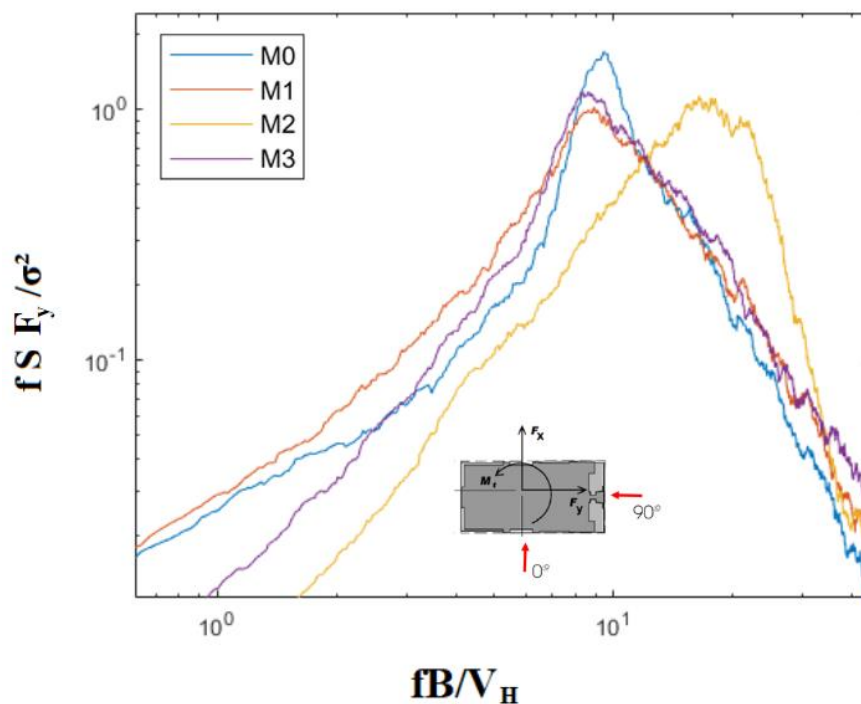
4.3.2 Análise por faixa em y

Para o a incidência de 165° , obteve-se os seguintes espectros de potência da Figura 95.

Figura 95 - Análise por faixa de F_y na incidência 165° 

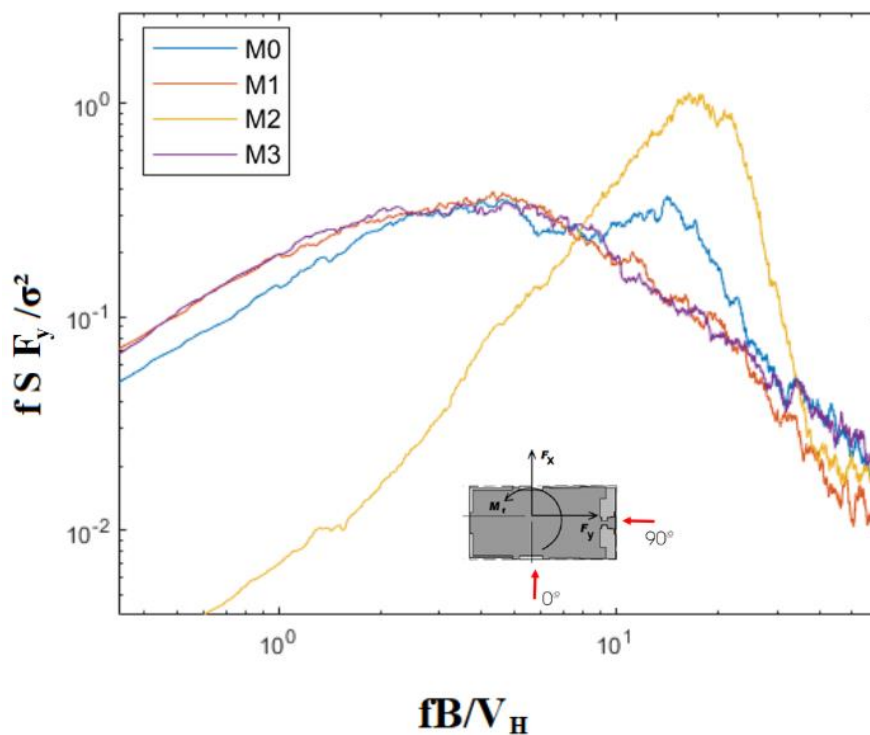
Para essa incidência, observou-se, em relação a M0, uma redução de 24% no pico de M1, uma redução de 2% no pico de M2 e uma redução de 24% no pico de M3. Além disso, em relação a M0, os modelos M1 e M3 apresentam frequências reduzidas associadas ao pico do espectro semelhantes, enquanto isso M2 tem uma frequência reduzida associada ao pico significativamente maior.

Para o a incidência de 180° , obteve-se os seguintes espectros de potência da Figura 96.

Figura 96 - Análise por faixa de F_y na incidência 180° 

Para essa incidência, observou-se, em relação a M0, uma redução de 6% no pico de M1, uma redução de 7% no pico de M2 e uma redução de 7% no pico de M3. Além disso, em relação a M0, os modelos M1 e M3 apresentam frequências reduzidas associadas ao pico do espectro semelhantes, enquanto isso M2 tem uma frequência reduzida associada ao pico significativamente maior.

Para o a incidência de 270° , obteve-se os seguintes espectros de potência da Figura 97.

Figura 97 - Análise por faixa de F_y na incidência 270° 

Para essa incidência, em relação a M0, observa-se um aumento de 300% no pico de M2. Os valores máximos do espectro para M0, M1 e M3 são semelhantes, com a diferença de que M0 apresenta um pico pronunciado (bem como a curva representativa do modelo M2).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, serão feitos comentários gerais e conclusões acerca dos resultados obtidos a partir dos ensaios em túnel de vento.

A configuração não modificada, M0, apresentou resultados coerentes com o esperado para um modelo cujas características seguem o exposto no item 3.6 desta dissertação.

A introdução de aberturas nos modelos M1, M2 e M3 foi feita no intuito de atenuar a ação do vento sobre o edifício. De forma geral, observou-se que o coeficiente C_y para as configurações modificadas apresentou **aumento** em relação à configuração original, sendo a direção y a direção perpendicular à abertura. Quanto à análise da força global F_y no domínio da frequência, pode-se concluir que:

- para vento a 270° , a inserção de aberturas nos modelos M2 e M3 promoveu uma redução de 22% no pico do espectro de potência;
- para incidência de 165° , direção oblíqua às aberturas, observa-se uma significativa redução no pico de M0 para M1, M2 e M3, chegando a uma expressiva redução de 55%. Para a incidência de 180° , observa-se uma redução máxima no pico de 33%, de M0 para M2.

A introdução da abertura gerou um aumento significativo em termos percentuais no coeficiente de força na direção perpendicular ao vento, conforme se observou para a incidência de 180° (incidência paralela à abertura). Essa tendência se manteve em todos os modelos modificados.

A introdução de abertura mais efetiva na atenuação dos coeficientes de força foi a do modelo M1, de 10,0 m de largura e 19,4 m de altura, a mais esbelta das aberturas testadas. Ressalta-se que essa atenuação, de cerca de 30%, ocorreu para o coeficiente de força C_x , sendo x a direção da abertura. Os espectros de potência de força global F_x apontaram, nas direções perpendiculares ao escoamento (270° e 90°), significativas reduções no pico de energia referente ao modelo M1 (40% para 270° e 22% para 90°). Para as direções paralelas à abertura (0° e 180°), a introdução de aberturas não influenciou no desenvolvimento dos espectros de força global F_x de M1.

Os modelos M2 e M3, cujas aberturas possuíam dimensões $12,96 \text{ m} \times 15,00 \text{ m}$ e $20,0 \text{ m} \times 9,72 \text{ m}$, respectivamente, apresentaram intensificação dos coeficientes de força C_x e C_y . A análise de F_x no domínio da frequência tornou possível concluir que:

- há redução de 22% no pico do espectro de potência de F_x para vento a 90° (perpendicular às aberturas) no modelo M1;
- há redução de 36% no pico do espectro de potência de F_x para vento a 105° no modelo M1;
- para a incidência de 240° , o modelo M3 apresenta pico no espectro de F_x 30% menor que M0;
- para a incidência de 270° , observa-se uma redução máxima no pico de 40% no pico do espectro de F_x , de M0 para M1.

O cálculo do C_y mostra que todos os modelos modificados apresentaram inversão de esforços, embora sutis, para algumas incidências do vento. Em relação ao cálculo de C_x , não há inversão de esforços.

Em relação aos ângulos de incidência de maior relevância para dimensionamento estrutural (0° , 90° , 180° e 270°), criou-se as Tabelas 6 e 7, resumindo os valores calculados de C_x e C_y , respectivamente, a partir dos ensaios realizados.

Tabela 6 – Coeficientes de Força C_x nos modelos M0, M1, M2 e M3 para incidências de 0° , 90° , 180° e 270°

	0°	90°	180°	270°
M0	0,827	-0,054	-0,809	0,075
M1	0,574	-0,014	-0,568	0,046
M2	0,885	-0,007	-0,871	0,050
M3	0,826	-0,025	-0,861	0,020

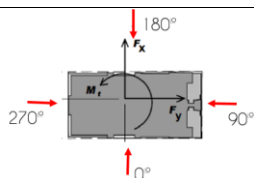
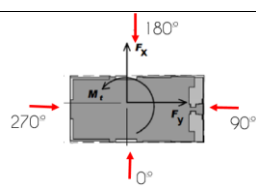


Tabela 7 – Coeficientes de Força C_y nos modelos M0, M1, M2 e M3 para incidências de 0° , 90° , 180° e 270°

	0°	90°	180°	270°
M0	0,177	-0,354	0,035	0,391
M1	-0,050	-0,550	0,167	0,586
M2	-0,022	-0,531	0,171	0,600
M3	0,098	-0,347	0,161	0,553



Considerando-se a relação altura:base, foram gerados os gráficos das Figuras 98 e 99, que relacionam essa medida com os coeficientes C_x e C_y respectivamente. Na Figura 98, as incidências de 90° e 270° não foram representadas por não apresentarem significativas mudanças de um modelo para o outro. Na Figura 99, omitiu-se as incidências 0° e 180° pelos mesmos motivos.

Figura 98 - Gráfico que relaciona a razão altura:base da abertura com coeficiente de força C_x

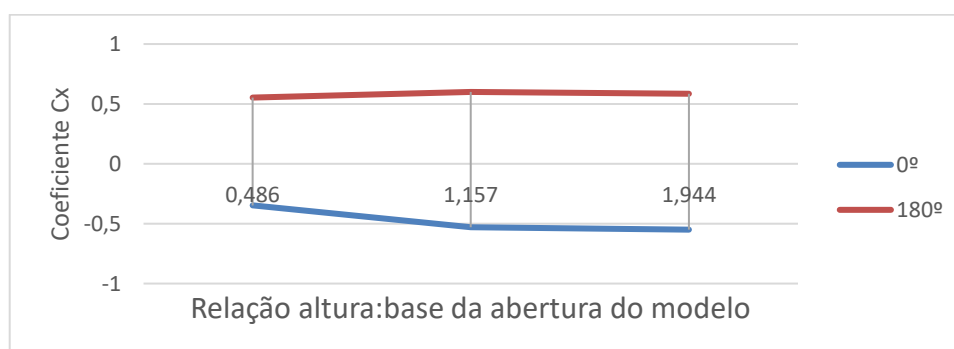
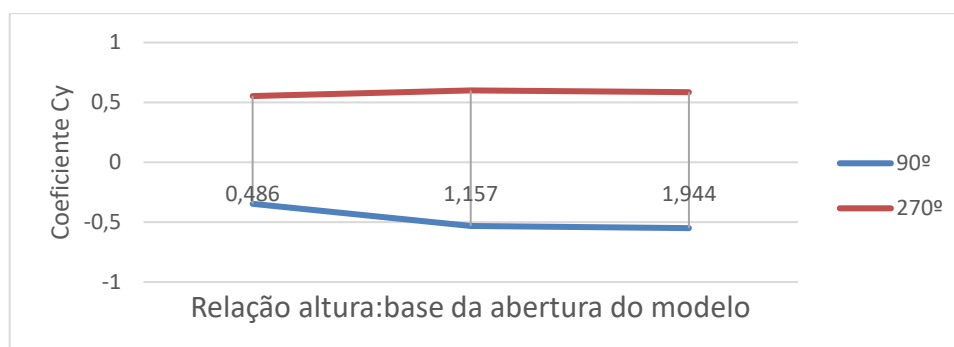


Figura 99 - Gráfico que relaciona a razão altura:base da abertura com coeficiente de força C_y



Propõe-se, como sugestões para trabalhos futuros, as seguintes abordagens:

- a. analisar o comportamento de edifícios altos com aberturas com diferentes configurações de vizinhança, visto que esse aspecto não foi considerado no presente trabalho.
- b. analisar em túnel de vento o comportamento de edifícios altos dotados com mais de uma abertura.
- c. analisar aberturas nas duas direções (x e y) e comparar configurações com diferentes relações altura:base.
- d. analisar a viabilidade econômica da inserção de aberturas, comparando atenuação dos efeitos do vento com a perda de espaço.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, T.; KAVRAKOV, I.; MORGHENTAL, G. Methods for flutter stability analysis of long-span bridges: a review. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, v. 170, p. 271 – 310, 2017.
- ALBERTI, F. A. **Determinação experimental em túnel de vento dos efeitos estáticos de proteção causados por edificações vizinhas: Contribuição para a revisão dos fatores de vizinhança da NBR-6123**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ALGABA, G. A. **Avaliação de Métodos Teóricos para Estimativa do Comportamento de Edifícios Altos sob a Ação de Vento Turbulento**. 2016. 157p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro.
- AMIN, J.A.; AHUJA, A.K. aerodynamic modifications to the shape of the buildings: a review of the state-of-the-art. **Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)**, Amsterdam, v. 11, n. 4, p. 433 – 450, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.
- BEARDS, C. E. **Structural Vibration: Analysis and Damping**. 1.ed. Londres: Arnold, 1996.
- BEC, J. Influence of wind spectrum formula choice on footbridge response. In: The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010), Chapel Hill, Carolina do Norte, Estados Unidos da América, p.23-27, 2010.
- BEKELE, S.; PUTTEN, K. The Effect of Tall Building Base Opening on Wind Loads and Local Flow Structures. In: CTBUH 7TH WORLD CONGRESS, 2005, New York. **Anais...** Não paginado. 1 CD.
- BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das Construções**. 3.ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2011.
- COOK, N. Wind-tunnel simulation of the adiabatic atmospheric boundary layer by roughness, barrier and mixing-device methods. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 3, n. 2, p. 157-176, 1978.
- COOLEY, J. W.; TUKEY, J. W. An Algorithm for Machine Calculation of Complex Fourier Series. **Mathematics of Computation**, v. 19, pp. 297-301, 1965.
- CTBUH. Skyscraper Center, c2020. 432 Park Avenue. Disponível em: <<http://www.skyscrapercenter.com/building/432-park-avenue/13227>>. Acesso em: 30, janeiro de 2020.

CTBUH. Skyscraper Center, c2020. Cayan Tower. Disponível em: <<http://www.skyscrapercenter.com/building/cayan-tower/464>>. Acesso em: 03, setembro de 2020.

CTBUH. Skyscraper Center, c2020. Kingdom Centre. Disponível em: <<http://www.skyscrapercenter.com/building/kingdom-centre/494>>. Acesso em: 30, janeiro de 2020.

CTBUH. Skyscraper Center, c2020. Shanghai World Financial Center. Disponível em: <<http://www.skyscrapercenter.com/building/shanghai-world-financial-center/131>>. Acesso em: 30, janeiro de 2020.

DUTTON, R.; ISYUMOV, N. Reduction of tall building motion by aerodynamic treatments. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 36, p. 739 – 747, 1990.

HAYKIN, S. **Communication Systems**. 4.ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2001.

HRISHEEKESH, K.; AGRAWAL, A.; SHARMA, A., THOMPSON, M. C., SHERIDAN, J. On the mechanism of symmetric vortex shedding. **Journal of Fluids and Structures**, v. 91, p. 1 – 19, 2019.

ILGIN, H.E.; GÜNEL M.A The Role of Aerodynamic Modifications in the Form of Tall Buildings against Wind Excitation. **METU Journal of the Faculty of Architecture**, Turquia, v. 24, n. 2, p. 17 – 25, 2007.

IRWIN, P. Bluff body aerodynamics in wind engineering. , p. 1–12, 2008.

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

ISYUMOV, N.; CASE, P.C. Wind-Induced Torsional Loads and Responses of Buildings. In: SEI/ASCE Structures Congress, Filadélfia, Pensilvânia, Estados Unidos da América, p.1-9, 2000.

KAREEM, A.; ZHOU, Y. Gust loading factor—past, present and future. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 91, p. 1301 – 1328, 2003.

KIKITSU, H.; OKADA H. Characteristics of Aerodynamic Response of High-Rise Buildings with Open Passage. In: CIB-CTBUH International Conference on Tall Buildings, 2003, Kuala Lumpur, Malásia. **Anais...** Malásia: Shafii, F.; Bukowski, R.; Klemencic, R., Editors, 2003, p. 515-522.

KIM, Y.M.; YOU, K.P.; KO, N.H.; Across-Wind Responses of an Aeroelastic Tapered Tall Building. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, p. 1307 – 1319, 2008.

KLEIN, T. **Estudo em Túnel de Vento das Características Aerodinâmicas de Torres Metálicas Treliçadas**. 2004. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

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

- LI, Y.G.; ZHANG, M.Y.; LI, Y.; LI, Q.S.; LIU, S.J. Experimental study on wind load characteristics of high-rise buildings with opening. **The Structural Design of Tall and Special Buildings**, 2020.
- LOREDO-SOUZA, A. M. Acervo do LAC – dados de ensaio do Edifício. Porto Alegre, 2019.
- LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M.M.; OLIVEIRA, M.G.K., GRALA, P. Efeitos aerodinâmicos em uma chaminé de concreto armado de elevada esbelteza. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, p. 1353 – 1382, 2019.
- LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. **IV Escola de Primavera de Transição e Turbulência**, n. 1, p. 2906-2914, 2004.
- MELO, L. P. C. **Influência de detalhes arquitetônicos e efeitos de vizinhança sobre a caracterização aerodinâmica de um edifício alto**. 2020. 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- MENDIS, P.; NGO, T.; HARITOS, N.; HIRA, A.; SAMALI, B.; CHEUNG, J. Wind Loading on Tall Buildings. **Electronic Journal of Structural Engineering**, Melbourne, v. 7, p. 41 – 54, 2007.
- MIYASHITA, K.; KATAGIRI, J.; NAKAMURA, O. Wind-induced response of high-rise buildings: effects of corner cuts or openings in square buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 50, p. 319 – 328, Dec. 1993.
- OKADA, H.; KONG, L. **The Effects of Open Passage on Reducing Wind Response of Tall Building**. 29th Technical Report, Public Works Research institute, Japan, p. 561 – 566, 1999.
- RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. 5.ed. New Jersey: Pearson Education, 2004.
- RAPP, B. E. **Microfluids: Modelling, Mechanics and Mathematics**. 1.ed. [S.l.], 2017
- RIVA ENGINEERING. Riva GmbH, c2018. Kingdom Centre. Disponível em: <<https://www.rivagmbh.de/en/projekt-details/kingdom-centre.html>>. Acesso em: 30, janeiro de 2020.
- ROSA, E. G. **Determinação experimental da resposta transversal de uma ponte em arco metálico frente ao fenômeno de desprendimento de vórtices**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- RWDI. RWDI, c2020. 432 Park Avenue Wind Engineering. Disponível em: <https://rwdi.com/en_ca/projects/432-park-avenue-wind-engineering>. Acesso em: 30, janeiro de 2020.
- SCHARNBERG, F. A. **Caracterização Aerodinâmica de Edifícios através do Espectro das Cargas Totais Medidas em Túnel de Vento** 2018. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

SHARMA, A.; MITTAL, H.; GAIROLA, A.; Mitigation Of Wind Load On Tall Buildings Through Aerodynamic Modifications: Review. **Journal of Building Engineering**, v. 18, p. 180 – 194, 2018.

SIMIU, E.; YEO, D. **Wind Effect on Structures: Modern Structural Design for Wind**. 4.ed. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd, 2019.

TANAKA, H.; TAMURA, Y.; OHTAKE, K.; NAKAI, M.; KIM, Y. C. Experimental investigation of aerodynamic forces and wind pressures acting on tall buildings with various unconventional configurations. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 107-108, p. 179-191, May, 2012.

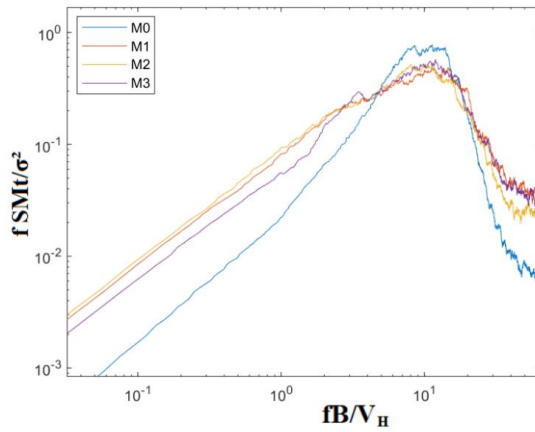
TROIAN, S. P. **Sobre a resposta estrutural dinâmica de uma torre estaiada de linha de transmissão submetida a ventos do tipo EPS**. 2018. 211p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

VOGADO, M. W. **Caracterização Aerodinâmica de Edifícios Altos com Planta em Formato de “V” Através de Análise Espectral** 2018. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

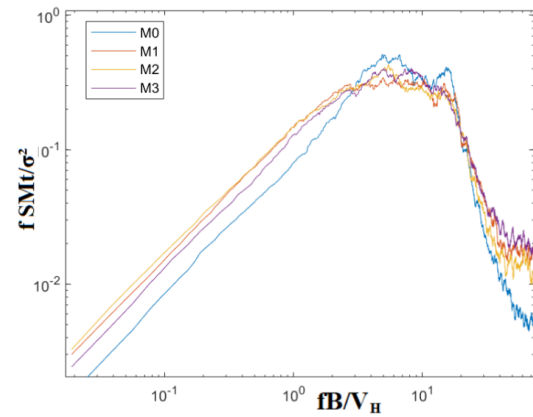
ZAMPIRON, I. **Avaliação das características e desempenho de estruturas para telecomunicações visando o projeto de novo modelo de torre autoportante**. 2008. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

APÊNDICE A – ESPECTROS DE POTÊNCIA

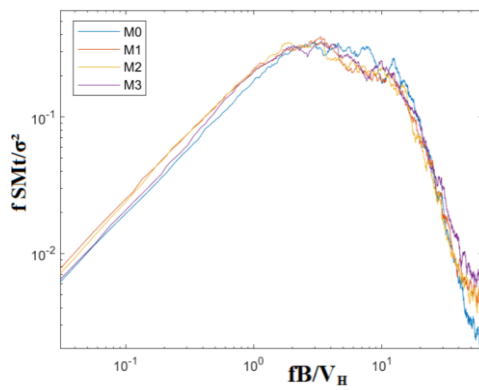
Espectro de momento torçor – Vento a 0°



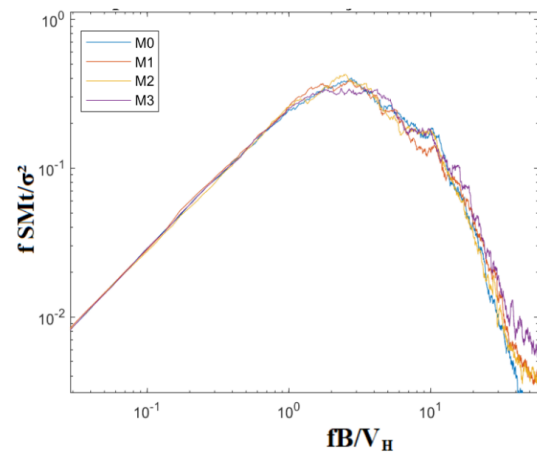
Espectro de momento torçor – Vento a 15°



Espectro de momento torçor – Vento a 30°

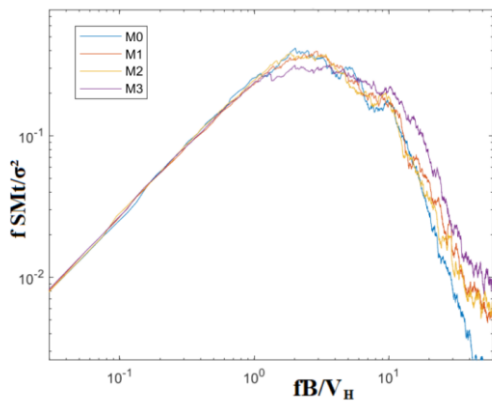


Espectro de momento torçor – Vento a 45°

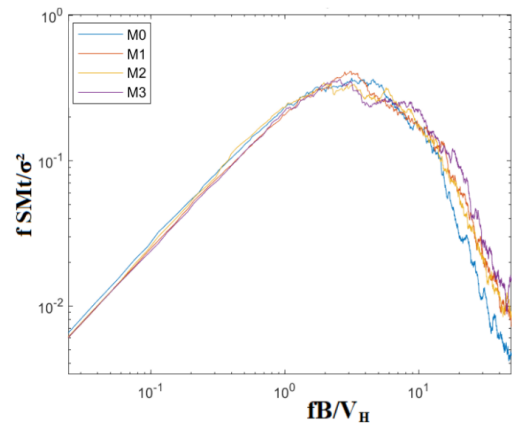


Espectro de momento torçor – Vento a 60°

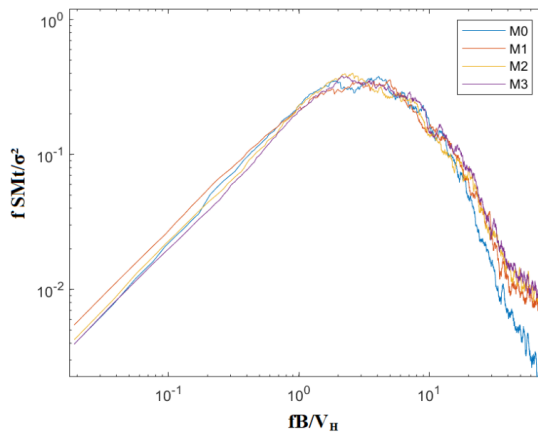
Espectro de momento torçor – Vento a 75°



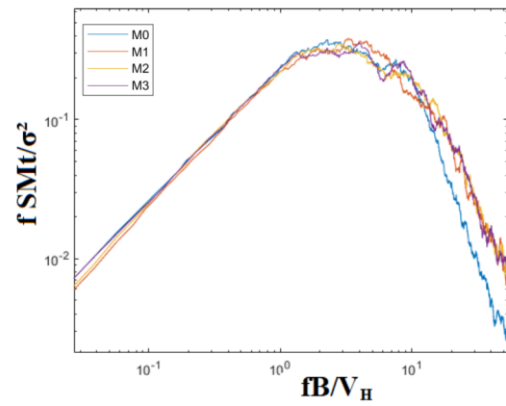
Espectro de momento torçor – Vento a 90°



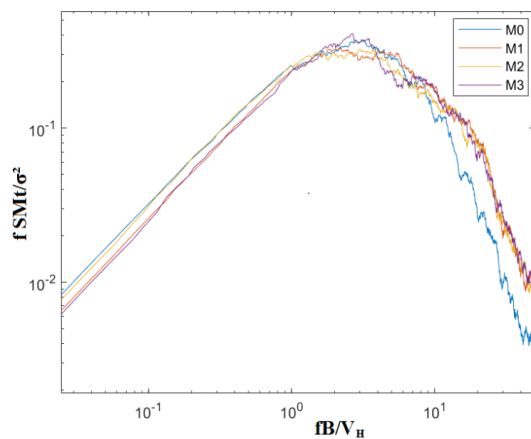
Espectro de momento torçor – Vento a 105°



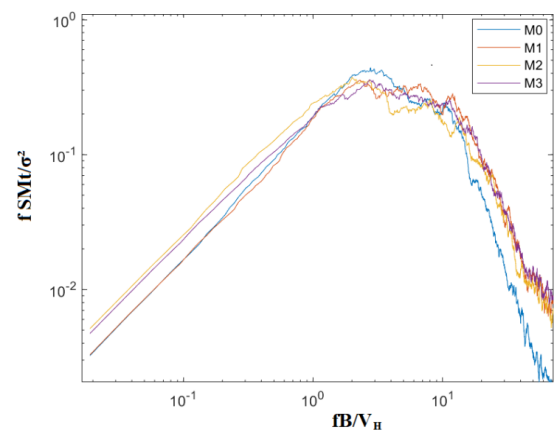
Espectro de momento torçor – Vento a 120°



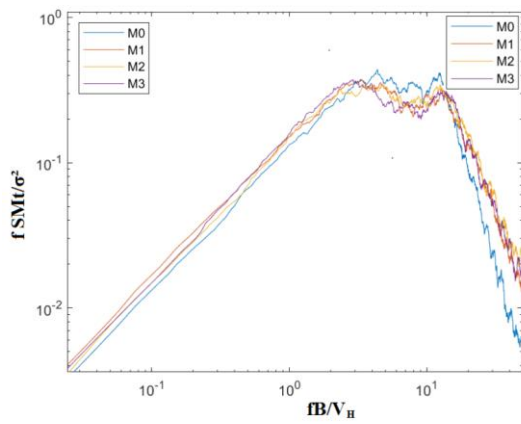
Espectro de momento torçor – Vento a 135°



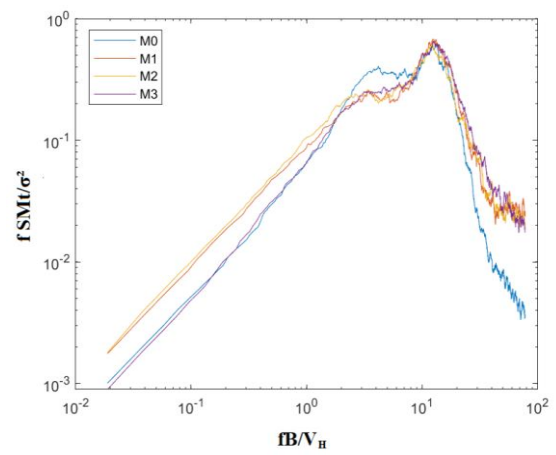
Espectro de momento torçor – Vento a 150°



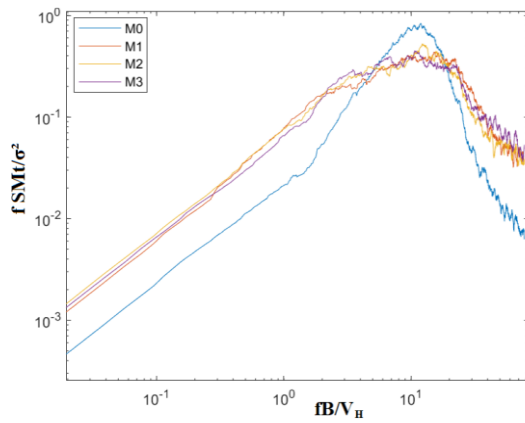
Espectro de momento torçor – Vento a 165°



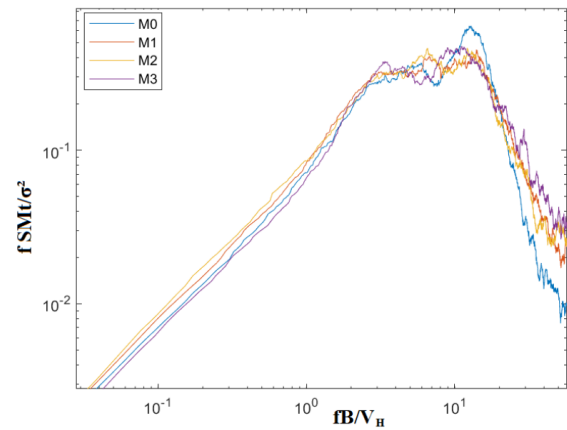
Espectro de momento torçor – Vento a 180°



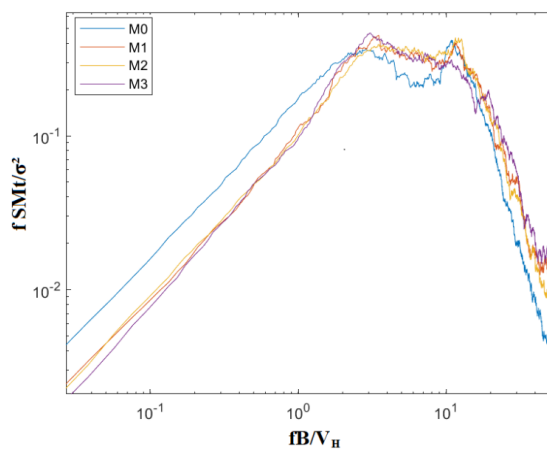
Espectro de momento torçor – Vento a 195°



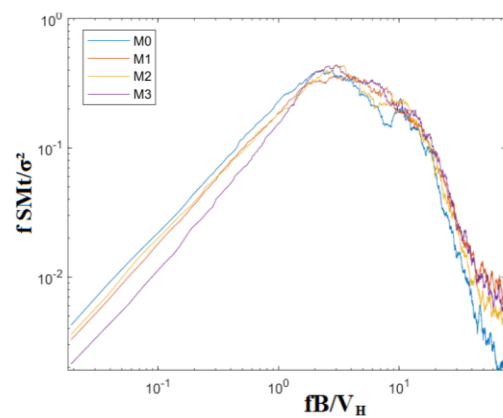
Espectro de momento torçor – Vento a 210°



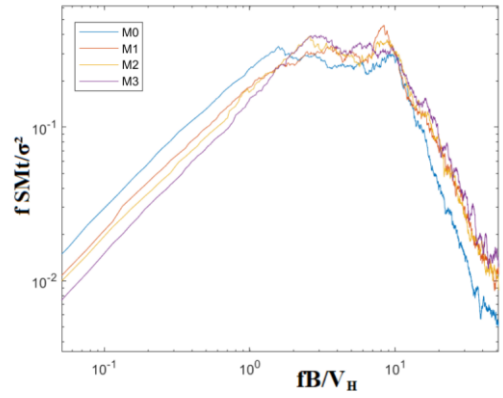
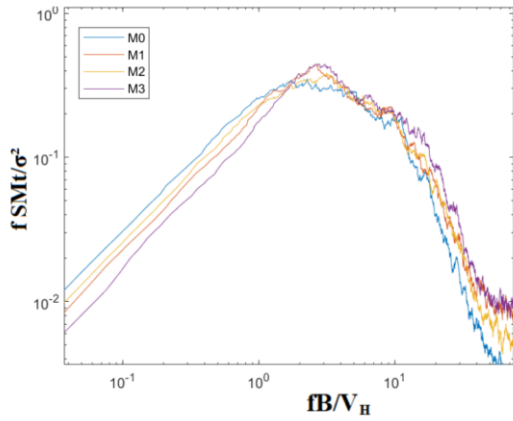
Espectro de momento torçor – Vento a 225°



Espectro de momento torçor – Vento a 240°

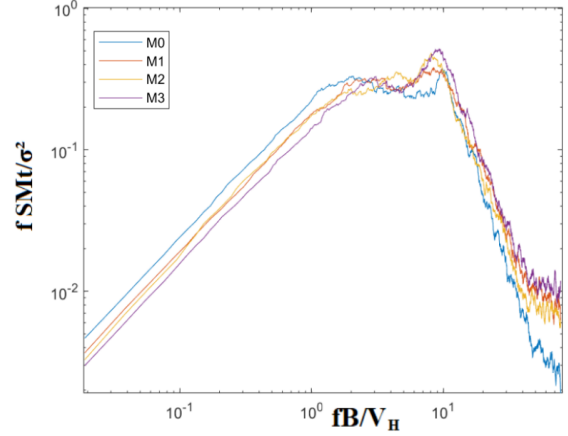
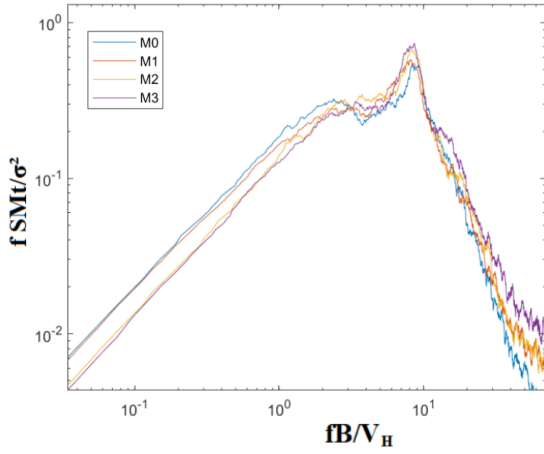


Espectro de momento torçor – Vento a 255°



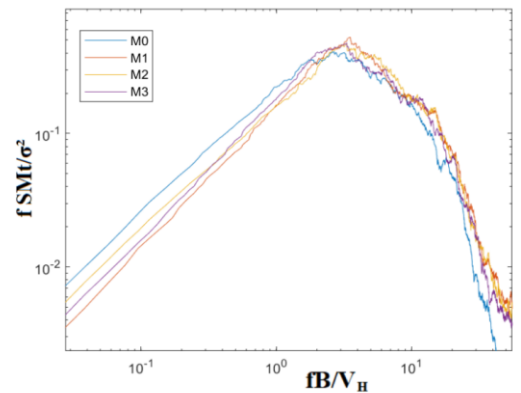
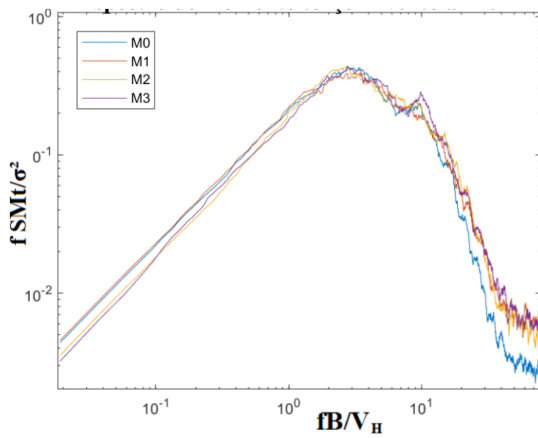
Espectro de momento torçor – Vento a 270°

Espectro de momento torçor – Vento a 285°



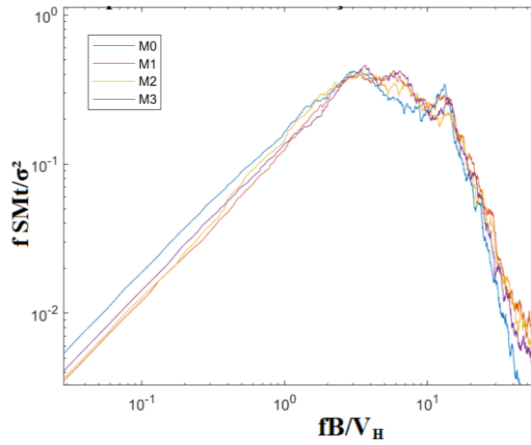
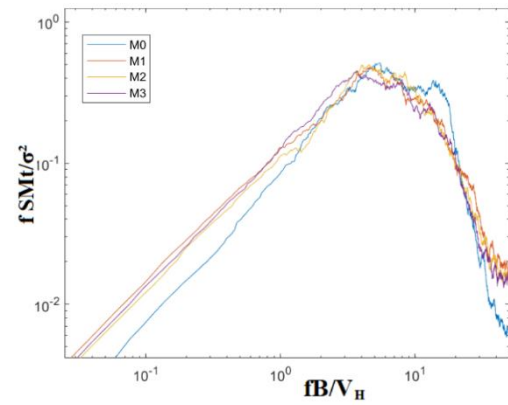
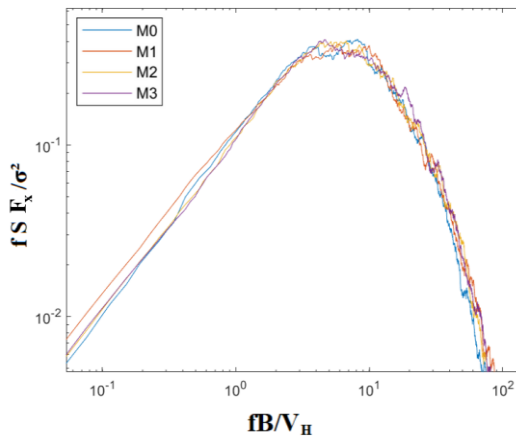
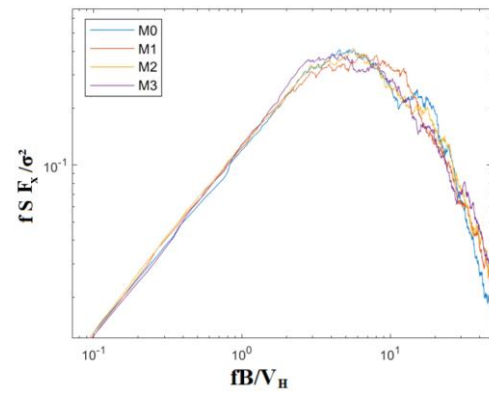
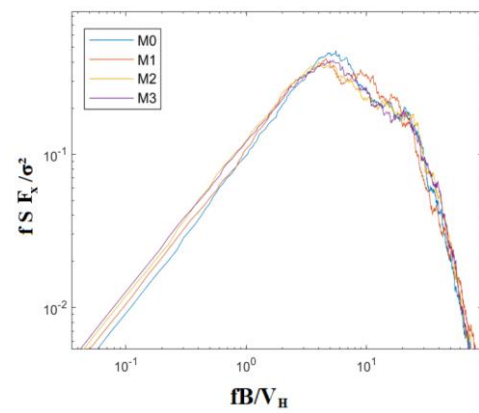
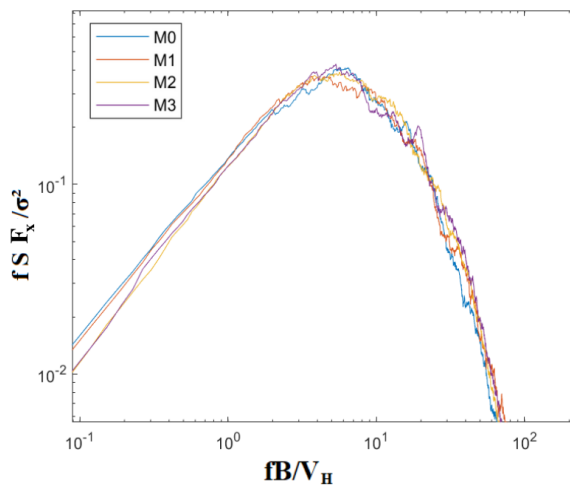
Espectro de momento torçor – Vento a 300°

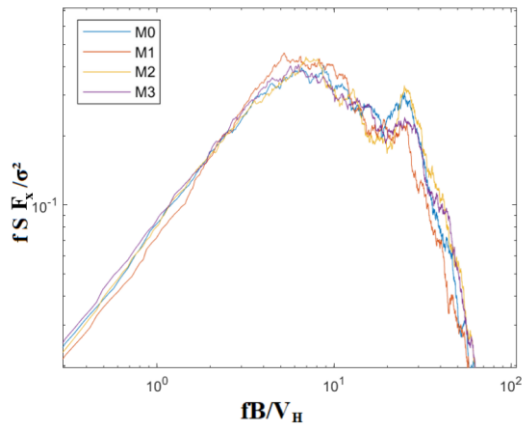
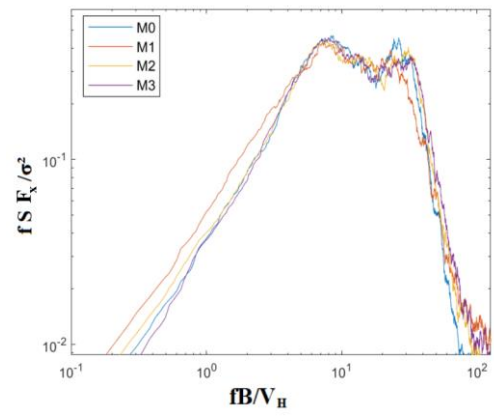
Espectro de momento torçor – Vento a 315°

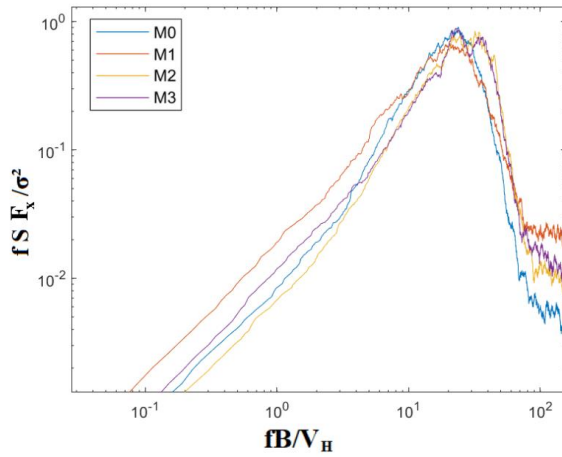
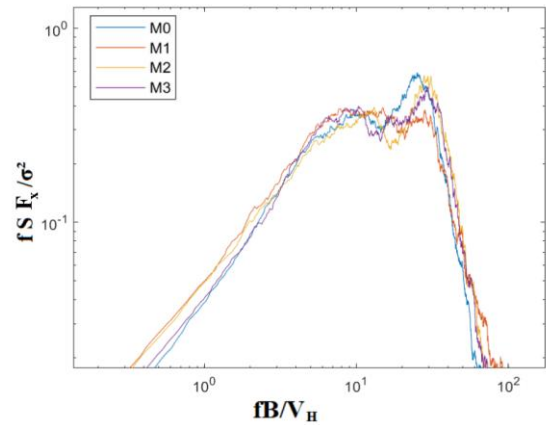
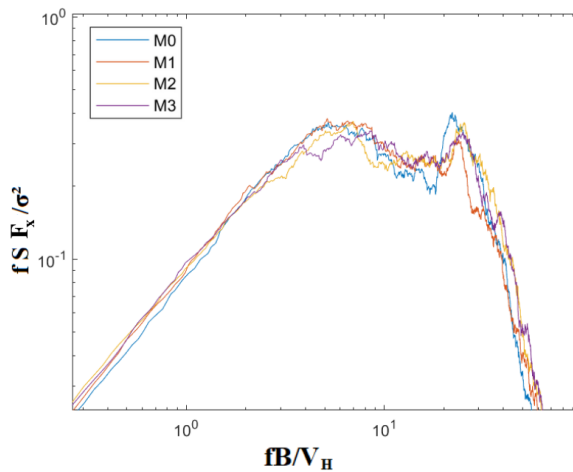
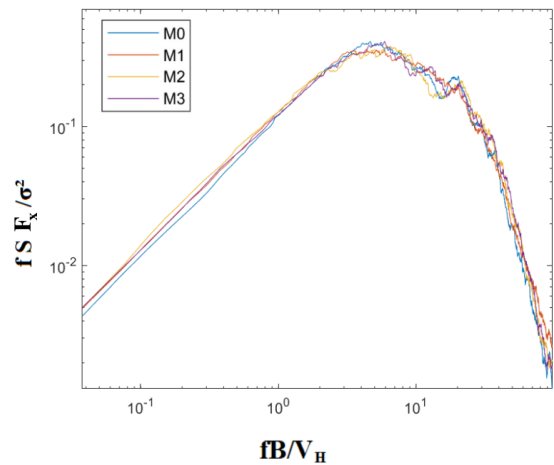
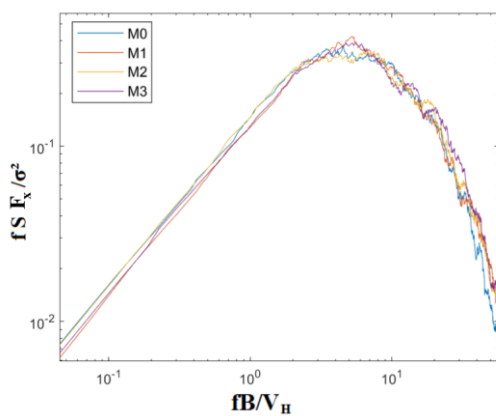
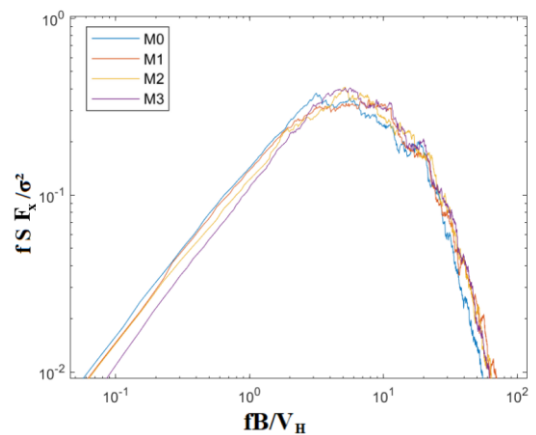


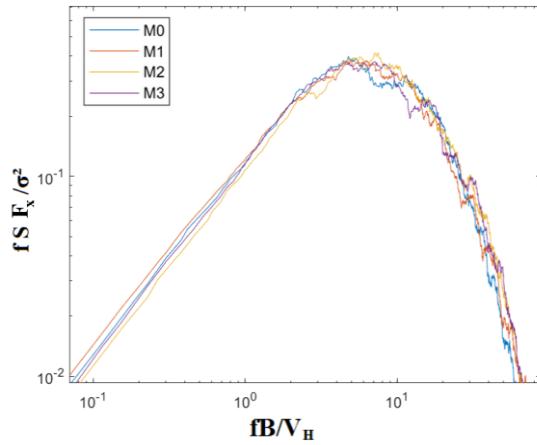
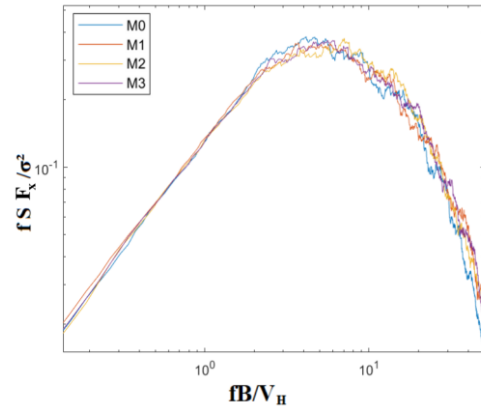
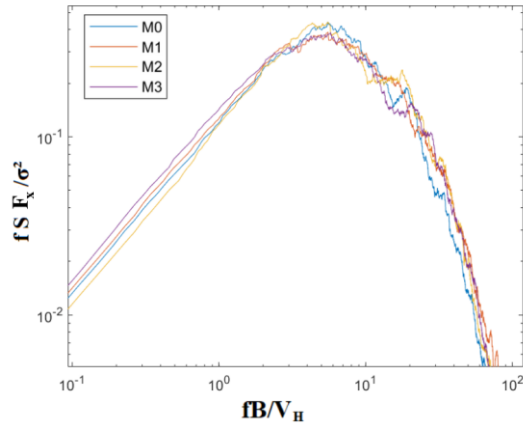
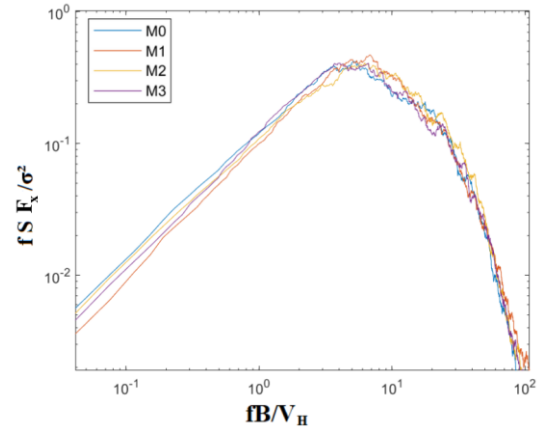
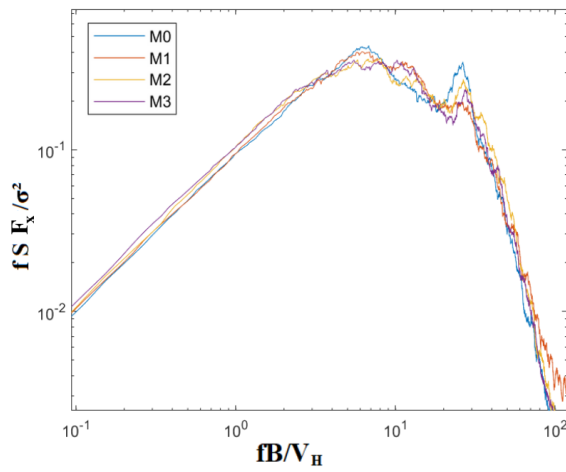
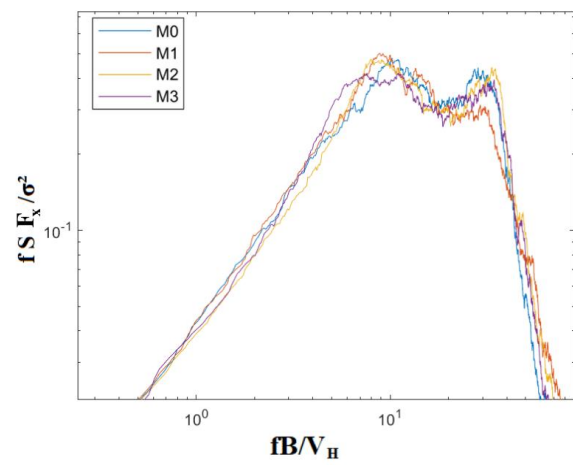
Espectro de momento torçor – Vento a 330°

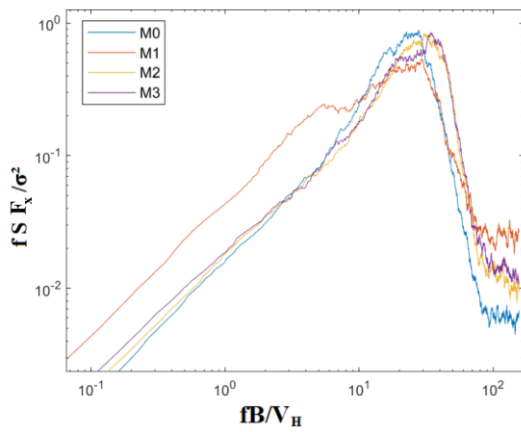
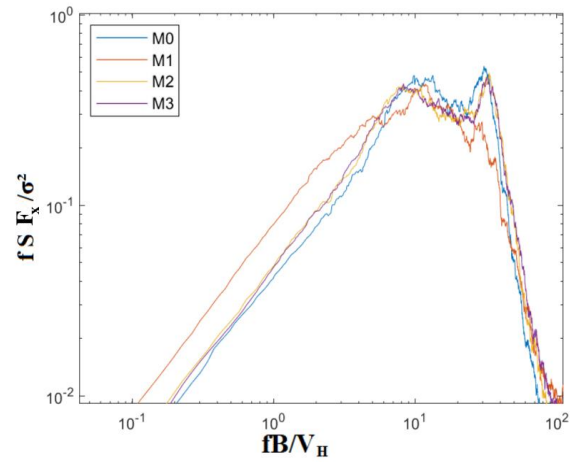
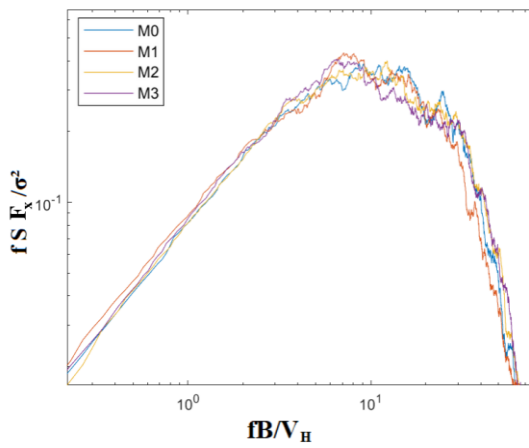
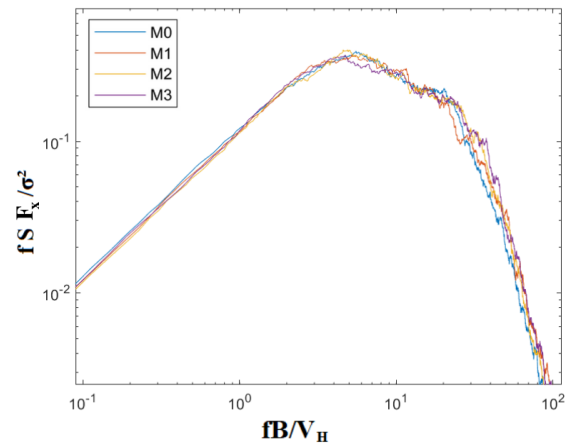
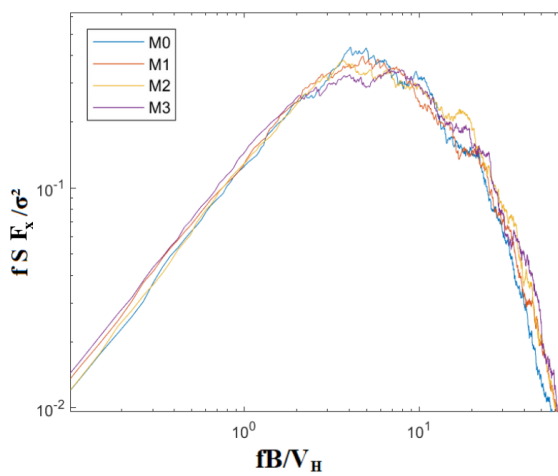
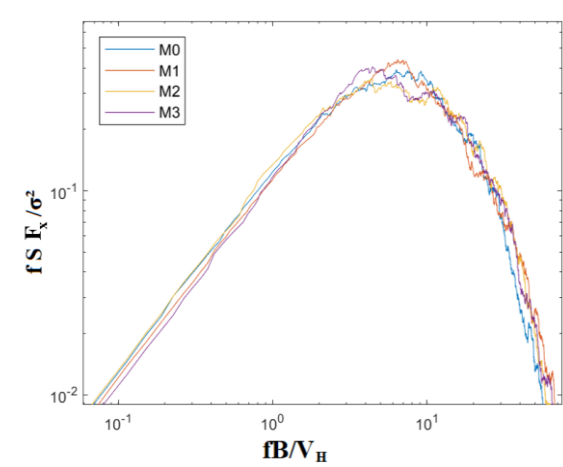
Espectro de momento torçor – Vento a 345°

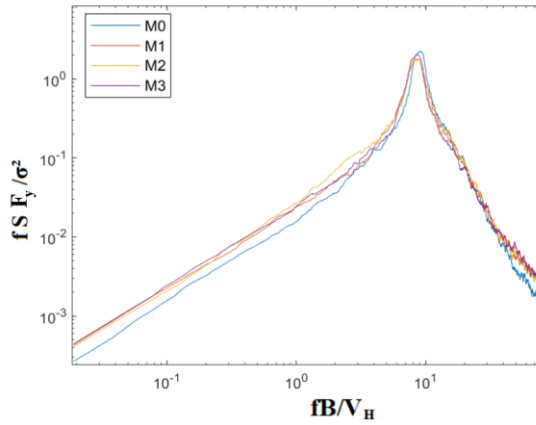
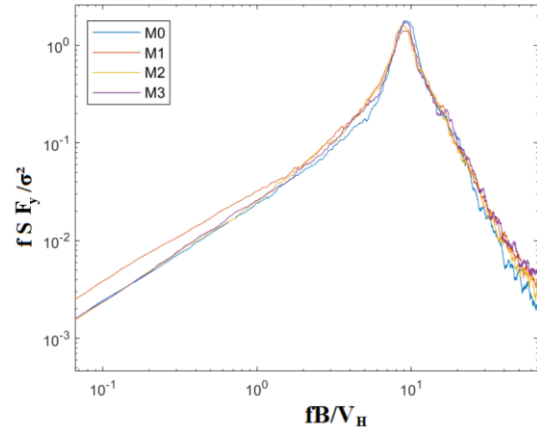
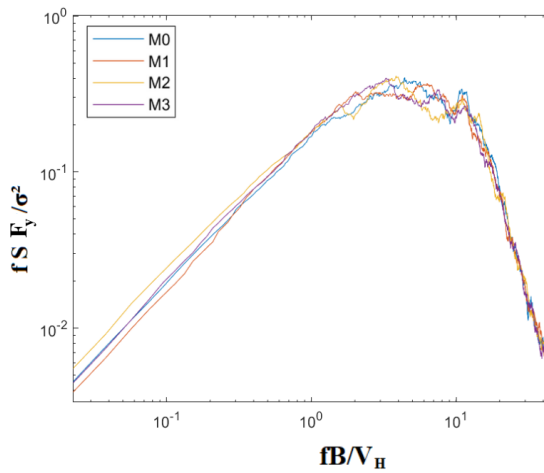
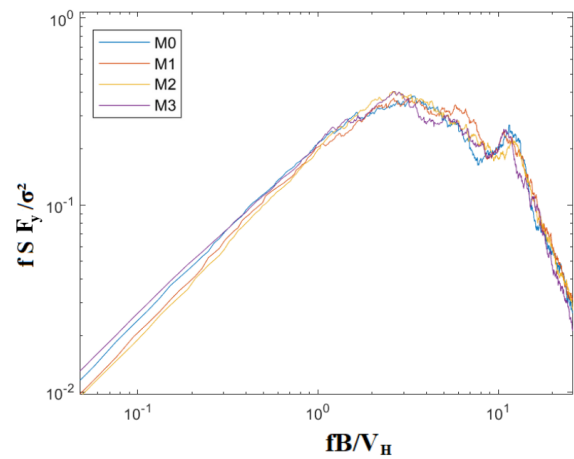
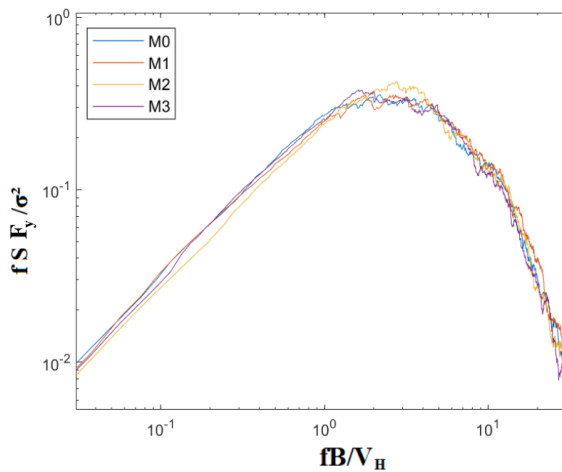
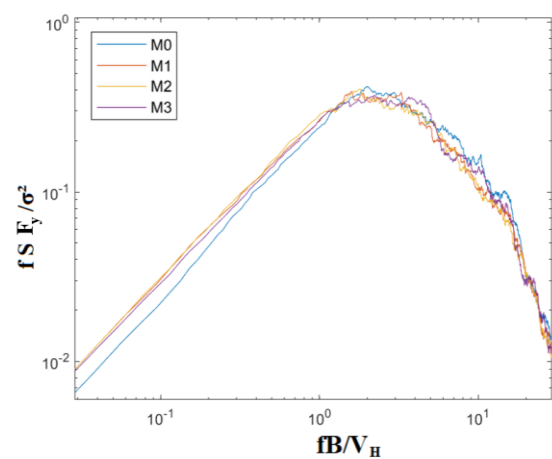
Espectro de força global F_x – Vento a 0° Espectro de força global F_x – Vento a 15° Espectro de força global F_x – Vento a 30° Espectro de força global F_x – Vento a 45° 

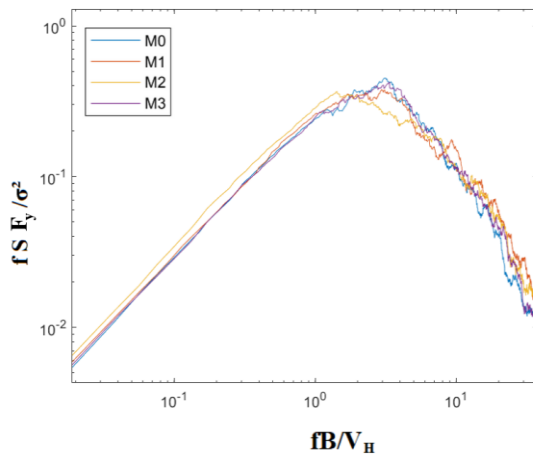
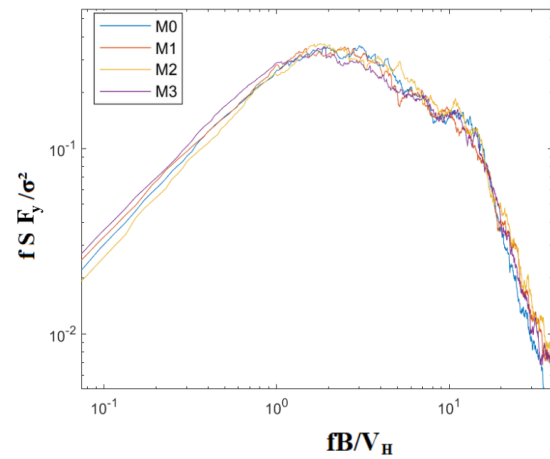
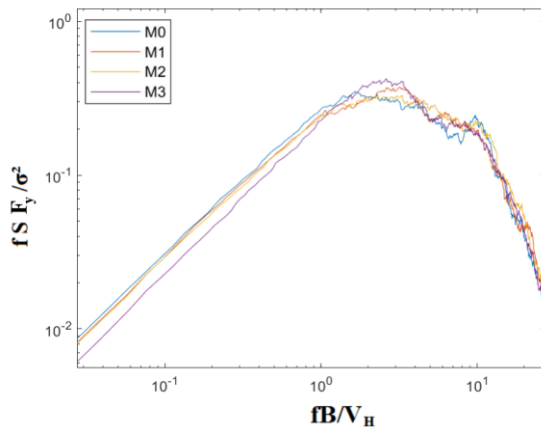
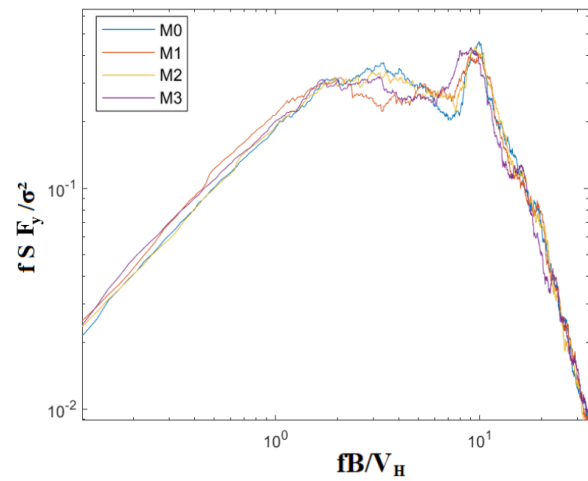
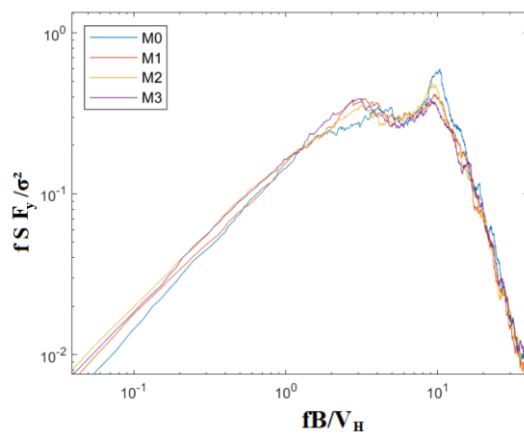
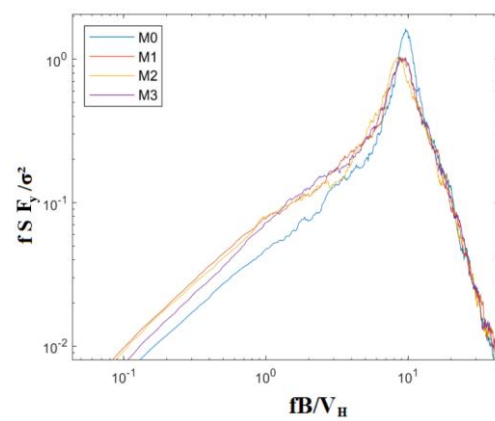
Espectro de força global F_x – Vento a 60° Espectro de força global F_x – Vento a 75° 

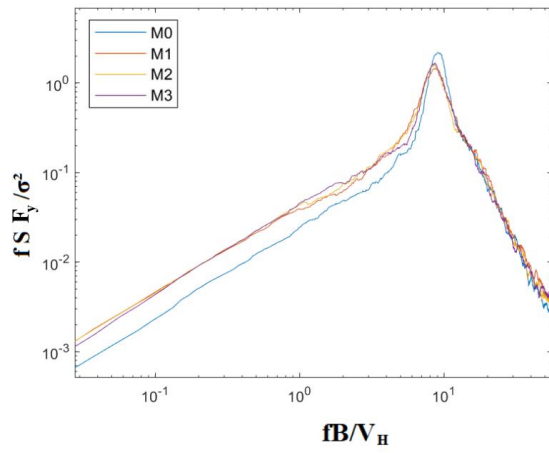
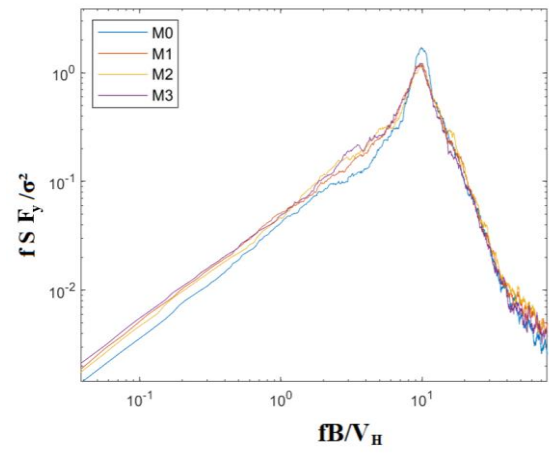
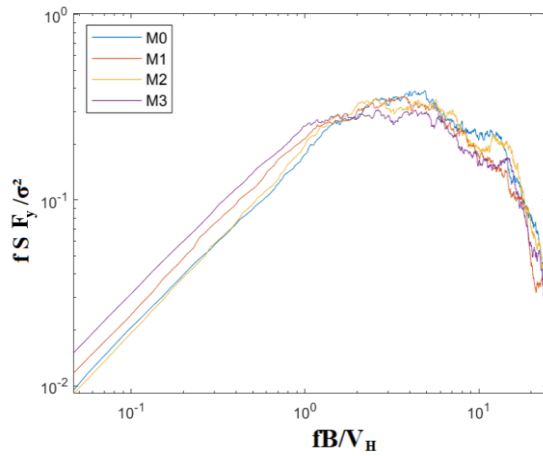
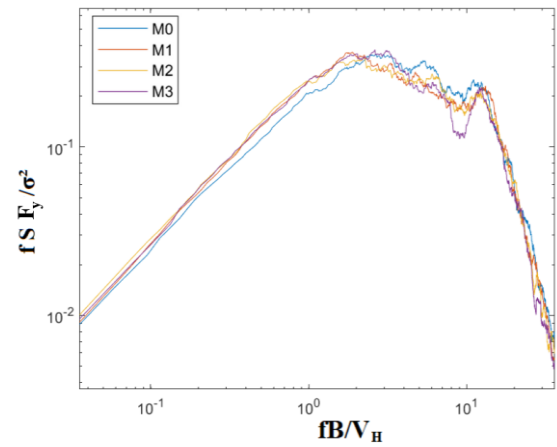
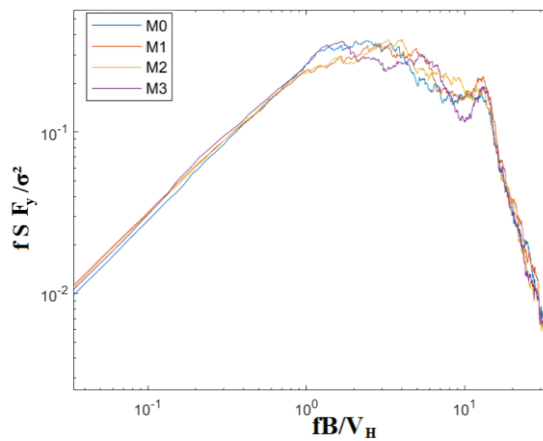
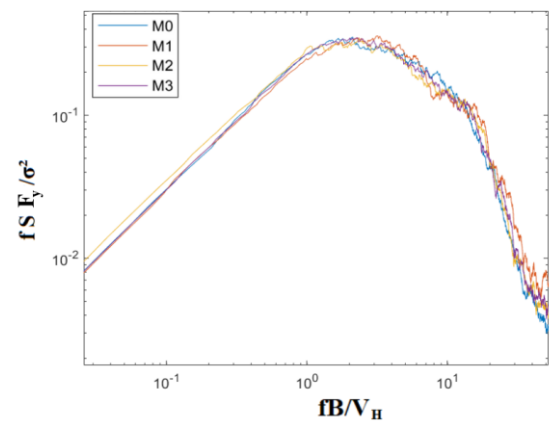
Espectro de força global F_x – Vento a 90° Espectro de força global F_x – Vento a 105° Espectro de força global F_x – Vento a 120° Espectro de força global F_x – Vento a 135° Espectro de força global F_x – Vento a 150° Espectro de força global F_x – Vento a 165° 

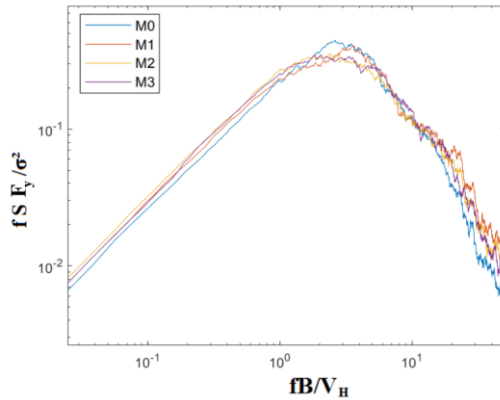
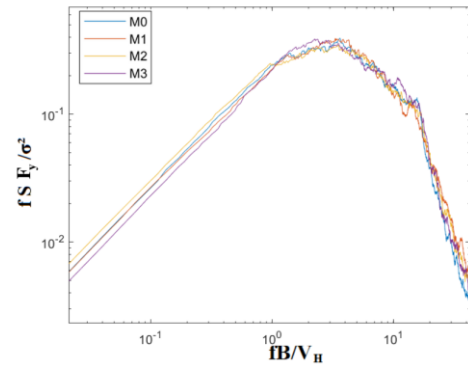
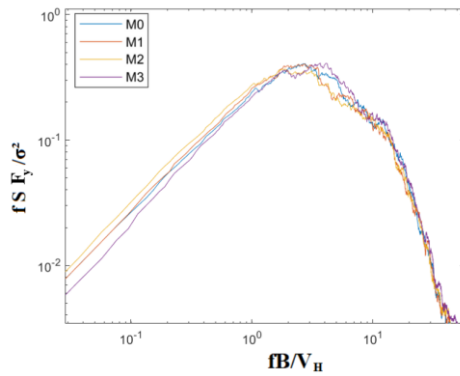
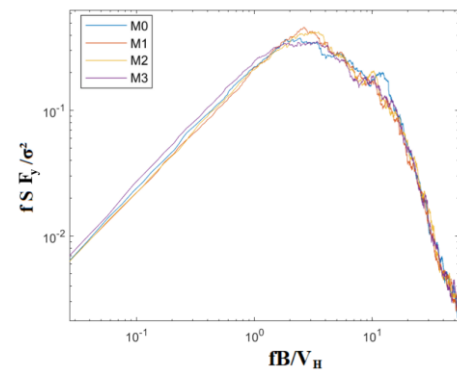
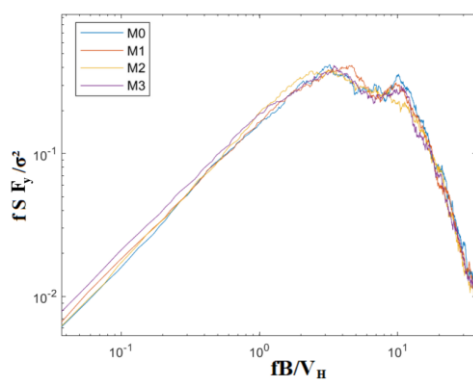
Espectro de força global F_x – Vento a 180°Espectro de força global F_x – Vento a 195°Espectro de força global F_x – Vento a 210°Espectro de força global F_x – Vento a 225°Espectro de força global F_x – Vento a 240°Espectro de força global F_x – Vento a 255°

Espectro de força global F_x – Vento a 270°Espectro de força global F_x – Vento a 285°Espectro de força global F_x – Vento a 300°Espectro de força global F_x – Vento a 315°Espectro de força global F_x – Vento a 330°Espectro de força global F_x – Vento a 345°

Espectro de força goblal F_y – Vento a 0° Espectro de força goblal F_y – Vento a 15° Espectro de força goblal F_y – Vento a 30° Espectro de força goblal F_y – Vento a 45° Espectro de força goblal F_y – Vento a 60° Espectro de força goblal F_y – Vento a 75° 

Espectro de força goblal F_y – Vento a 90° Espectro de força goblal F_y – Vento a 105° Espectro de força goblal F_y – Vento a 120° Espectro de força goblal F_y – Vento a 135° Espectro de força goblal F_y – Vento a 150° Espectro de força goblal F_y – Vento a 165° 

Espectro de força gobl F_y – Vento a 180° Espectro de força gobl F_y – Vento a 195° Espectro de força gobl F_y – Vento a 210° Espectro de força gobl F_y – Vento a 225° Espectro de força gobl F_y – Vento a 240° Espectro de força gobl F_y – Vento a 255° 

Espectro de força goblal F_y – Vento a 270°Espectro de força goblal F_y – Vento a 285°Espectro de força goblal F_y – Vento a 300°Espectro de força goblal F_y – Vento a 315°Espectro de força goblal F_y – Vento a 330°Espectro de força goblal F_y – Vento a 345°