

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

**CARACTERIZAÇÃO AERODINÂMICA DAS FORÇAS
LATERAIS DEVIDAS A DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES
EM EDIFICAÇÕES ESBELTAS DE SEÇÃO RETANGULAR**

Emerson Sena Almeida

Porto Alegre
2023

EMERSON SENA ALMEIDA

**CARACTERIZAÇÃO AERODINÂMICA DAS FORÇAS
LATERAIS DEVIDAS A DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES
EM EDIFICAÇÕES ESBELTAS DE SEÇÃO RETANGULAR**

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

Porto Alegre
2023

CIP - Catalogação na Publicação

Almeida, Emerson Sena

Caracterização aerodinâmica das forças laterais
devidas a desprendimento de vórtices em edificações
esbeltas de seção retangular / Emerson Sena Almeida.

-- 2023.

108 f.

Orientador: Acir Mércio Loredou-Souza.

Coorientador: Marcelo Maia Rocha.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,
BR-RS, 2023.

1. desprendimento de vórtices. 2. estruturas de
seção retangular. 3. NBR - 6123. I. Loredou-Souza, Acir
Mércio, orient. II. Rocha, Marcelo Maia, coorient.
III. Título.

EMERSON SENA ALMEIDA

**CARACTERIZAÇÃO AERODINÂMICA DAS FORÇAS
LATERAIS DEVIDAS A DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES
EM EDIFICAÇÕES ESBELTAS DE SEÇÃO RETANGULAR**

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

Porto Alegre, 28 de junho de 2023

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

Prof. Marcelo Maia Rocha
Dr. techn. pela Universität Innsbruck
Coorientador

Prof. Lucas Festugato
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Adrián Roberto Wittwer (UNNE)
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Alexandre Luis Braun (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

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

Dedico este trabalho a Deus e minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, pelo seu amor e por sempre colocar pessoas boas em meu caminho.

Aos meus pais Simoni e Eulálio, à minha avó Lourdes, aos meus irmãos Nívea, Eloiza e Daniel por sempre acreditarem em mim e apoiarem meus sonhos e objetivos, mesmo que isso custe a presença física em momentos importantes de nossas vidas. Será sempre por eles.

À minha namorada Aline, que não mede esforços para me ajudar e apoiar nos momentos mais difíceis, com conselhos, ombro amigo e tudo que estiver ao seu alcance. Te amarei para sempre. Assim como a Lia, que sempre estará por perto para ser nossa fonte de alegria.

Aos meus grandes amigos Felipe, Matheus e Eliabe que sempre estiveram comigo desde o início da graduação e sei que sempre poderei contar com eles.

Aos grandes amigos que fiz no mestrado e levarei para vida, Isabel que desde o início me recebeu como se fossemos amigos de infância, saiba que moras em meu coração, para sempre. Ao Lucas e Marcos pela amizade e companheirismo. Ao Patrick por me ajudar em diversos momentos e por estar sempre disposto em fazer o bem, muito obrigado meu amigo.

Agradeço à equipe técnica do Laboratório de Aerodinâmica das Construções pelo auxílio na execução deste estudo. E pelas amizades que cultivei neste local, a citar a Carol que por diversas vezes foi minha conselheira, incentivadora, parceira e por quem tenho admiração e amizade.

Ao professor Acir Mércio Loredo-Souza, orientador deste trabalho, por tudo. Desde conselhos, explicações técnicas, conversas descontraídas e amizade. Obrigado por acreditar em mim e apoiar meus objetivos profissionais, serei eternamente grato.

Ao professor Marcelo Maia Rocha, coorientador deste trabalho, pelo empenho e dedicação nos ensinamentos na área de Dinâmica de Estruturas.

À Vento-S através do Eng. Dr Mário Gustavo, do Eng. Marcelo Zanfelice e a todos que um dia fizeram parte, pela cooperação, suporte, desenvolvimento profissional e amizades construídas.

À CAPES pelas bolsas concedidas ao longo do curso que foram fundamentais.

RESUMO

ALMEIDA, E. S. **Caracterização aerodinâmica das forças laterais devidas a desprendimento de vórtices em edificações esbeltas de seção retangular.** 2023. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O projeto de uma estrutura esbelta exige o conhecimento dos fatores ambientais que venham a impactá-la estática e dinamicamente. No caso desse tipo de estrutura, a ação do vento é um fator determinante a ser considerado na avaliação do comportamento estrutural na sua fase de projeto. Nesse sentido, um fenômeno dinâmico importante relacionado à ação do vento em estruturas é o desprendimento de vórtices. Ao longo dos anos as pesquisas sobre o tema avançaram com o intuito de caracterizar o fenômeno, estimar suas ações e mitigar seus efeitos. Diante desse contexto, diversos pesquisadores vêm empenhando esforços para propor metodologias e procedimentos técnicos que façam previsões suficientemente precisas a respeito das respostas que a estrutura pode apresentar quando submetida às condições do fenômeno de desprendimento de vórtices, seja a estrutura de seção circular, retangular ou qualquer outra. Quando se trata de estruturas de seção retangular os estudos ainda necessitam ser mais explorados, frente a isso, o presente trabalho busca abordar o fenômeno para o caso destas estruturas com o intuito de contribuir com a caracterização aerodinâmica das forças laterais provenientes do fenômeno de desprendimento de vórtices. A partir da análise dos dados extraídos de cada modelo estudado foi possível a obtenção dos coeficientes r.m.s. da força lateral e dos espectros da força lateral possibilitando assim a caracterização das relações dimensionais de estruturas de seção retangular e sua suscetibilidade em sofrer os efeitos do desprendimento de vórtices.

Palavras-chave: *desprendimento de vórtices; estruturas de seção retangular; NBR – 6123.*

ABSTRACT

ALMEIDA, E.S. **Aerodynamic characterization of lateral forces due to vortex shedding in slender buildings with rectangular cross-section.** 2023. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The design of a slender structure requires knowledge of the environmental factors that can statically and dynamically impact it. In the case of this type of structure, wind action is a crucial factor to be considered in the evaluation of structural behavior during the design phase. In this regard, an important dynamic phenomenon related to wind action on structures is vortex shedding. Over the years, research on this topic has advanced with the aim of characterizing the phenomenon, estimating its effects, and mitigating its consequences. In this context, numerous researchers have been making efforts to propose methodologies and technical procedures that provide sufficiently accurate predictions regarding the responses that a structure may exhibit when subjected to vortex shedding conditions, whether the structure has a circular, rectangular, or any other cross-section. When it comes to structures with rectangular cross-sections, studies are still scarce. Therefore, this study aims to address the phenomenon specifically for structures of this type, with the objective of contributing to the aerodynamic characterization of the lateral forces resulting from vortex shedding. By analyzing the data extracted from each studied model, it was possible to obtain the r.m.s. coefficients of lateral force and the spectra of lateral force. This enabled the characterization of dimensional relationships in structures with rectangular cross-sections and their susceptibility to experiencing vortex shedding effects.

Keywords: *vortex shedding; rectangular section structures; NBR - 6123.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	7
1.2 RELEVÂNCIA DO ESTUDO	8
1.3 OBJETIVOS	11
1.4 DELIMITAÇÕES	12
2 REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	13
2.1 PERFIL VERTICAL DE VELOCIDADES MÉDIAS	13
2.2 TURBULÊNCIA DO VENTO	15
2.3 AERODINÂMICA DE CORPOS DE SEÇÃO RETANGULAR	19
2.3.1 Frequência de desprendimento de vórtices	23
2.3.2 Número de Reynolds	23
2.3.3 Número de Strouhal e velocidade crítica	24
2.3.4 Número de Scruton	26
2.3.5 Interação fluido-estrutura	26
2.3.6 Análise no domínio da frequência e estudos relacionados ao fenômeno	27
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	33
3.1 TÚNEL DE VENTO <i>PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN</i>	33
3.2 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL	36
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS	38
3.4 PROCESSO EXPERIMENTAL E TRATAMENTO DE DADOS	44

4 RESULTADOS	504
4.1 MODELOS DO GRUPO 1	50
4.2 MODELOS DO GRUPO 2	60
4.2.1 Modelo 3 (7,5/1/1,5) e (7,5/1,5/1)	60
4.2.2 Modelo 4 (6,5/1/1,5) e (6,5/1,5/1)	65
4.2.3 Modelo 5 (5,5/1/1,5) e (5,5/1,5/1)	69
4.3 MODELOS DO GRUPO 3	73
4.3.1 Modelo 6 (3/1/2) e (3/2/1)	73
4.3.2 Modelo 7 (3/1/1,5) e (3/1,5/1)	77
4.3.3 Modelo 8 (6/1/2,5) e (6/2,5/1)	81
4.3.4 Modelo 9 (9/1/2,5) e (9/2,5/1)	85
5 CONCLUSÕES	90
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Corrente de carregamento do vento	9
Figura 2.1: Perfil de velocidades médias do vento	14
Figura 2.2: Distribuição de vórtices formados ao longo de uma estrutura de seção retangular	16
Figura 2.3: Perfil de velocidades do vento	16
Figura 2.4: Influência da turbulência no espectro de força lateral $SL(f)$	18
Figura 2.5: Atuação dos vórtices sobre uma estrutura de seção retangular	19
Figura 2.6: Relação do ângulo de incidência do vento e o número de Reynolds com o número de Strouhal	20
Figura 2.7: escoamento em torno de um corpo de seção transversal retangular	21
Figura 2.8: Relação entre o coeficiente de arrasto e b/h para corpos paralelepípedicos.	22
Figura 2.9: Valores para o número de Strouhal referente às seções retangulares com arestas vivas	25
Figura 2.10: Representação do fenômeno de captura	27
Figura 2.11: Processo probabilístico de Davenport	28
Figura 2.12: Espectro da força transversal para estruturas distintas	29
Figura 3.1: Túnel de vento Professor Joaquim Blessmann	33
Figura 3.2: Circuito aerodinâmico do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann, dimensões em cm	34
Figura 3.3: Elementos de geração das diferentes camadas-limite do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann. (a) grelha; (b) $p = 0,11$; (c) $p = 0,23$; (d) $p = 0,34$	36
Figura 3.4: Perfis de velocidade média, intensidade e macroescala da componente longitudinal da turbulência, para o eixo vertical de duas câmaras de ensaio do túnel de vento	37
Figura 3.5: Geometria dos modelos ensaiados e eixos de coordenadas considerado	38
Figura 3.6: Identificação das características dos modelos do Grupo 1, medidas em mm	40

Figura 3.7: Identificação das características dos modelos do Grupo 2, medidas em mm ...	41
Figura 3.8: Identificação das características dos modelos do Grupo 3, medidas em mm ...	41
Figura 3.9: Alocação das tomadas de pressão nas faces dos modelos, medidas em mm	43
Figura 3.10: Posição do modelo na mesa de ensaio em planta	44
Figura 3.11: Transdutores de pressão e tubos pneumáticos conectados	45
Figura 3.12: Sistema de aquisição de dados completo: (a) receptor dos transdutores de pressão; (b) fonte alimentadora de tensão e corrente; (c) computadores e softwares de comando dos ensaios no túnel de vento	46
Figura 3.13: Efeito da aplicação do filtro de média móvel em uma série de dados	49
Figura 4.1: Modelo 1 do Grupo 1 na Mesa M-II do túnel de vento túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann	50
Figura 4.2: Modelo 2 do Grupo 1 na Mesa M-II do túnel de vento túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann	51
Figura 4.3: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx) e \tilde{C}_y (CFy) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 1	52
Figura 4.4: Coeficientes de força \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 1	53
Figura 4.5: Espectro adimensionalizado da força lateral SL do Modelo 1 (6/1/3)	55
Figura 4.6: Espectro adimensionalizado da força lateral SL do Modelo 1 (6/3/1)	55
Figura 4.7: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx) e \tilde{C}_y (CFy) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 2	56
Figura 4.8: Coeficientes de força \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 2	57
Figura 4.9: Espectro adimensionalizado da força lateral SL do Modelo 2 (9/1/3)	59
Figura 4.10: Espectro adimensionalizado da força lateral SL do Modelo 2 (9/3/1)	59

Figura 4.11: Modelo 3 do Grupo 2 na Mesa M-II do túnel de vento túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann	60
Figura 4.12: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx), \tilde{C}_y (CFy), \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 3	61
Figura 4.13: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 3 (7,5/1/1,5)	62
Figura 4.14: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 3 (7,5/1,5/1)	63
Figura 4.15: Distribuição dos coeficientes de pressão média, externos, nas fachadas do Modelo 3, considerando o vento na incidência de 0°	64
Figura 4.16: Modelo 4 do Grupo 2 na Mesa M-II do túnel de vento túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann	65
Figura 4.17: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx), \tilde{C}_y (CFy), \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 4	66
Figura 4.18: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 4 (6,5/1/1,5)	67
Figura 4.19: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 4 (6,5/1,5/1)	68
Figura 4.20: Modelo 5 do Grupo 2 na Mesa M-II do túnel de vento túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann	69
Figura 4.21: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx), \tilde{C}_y (CFy), \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 5	70
Figura 4.22: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 5 (5,5/1/1,5)	71
Figura 4.23: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 5 (5,5/1,5/1)	72
Figura 4.24: Modelo 6 do Grupo 3 na Mesa M-II do túnel de vento túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann	73
Figura 4.25: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx), \tilde{C}_y (CFy), \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 6	74

Figura 4.26: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 6 (3/1/2)	75
Figura 4.27: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 6 (3/2/1)	76
Figura 4.28: Modelo 7 do Grupo 3 na Mesa M-II do túnel de vento túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann	77
Figura 4.29: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx), \tilde{C}_y (CFy), \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 7	78
Figura 4.30: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 7 (3/1/1,5)	79
Figura 4.31: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 7 (3/1,5/1)	80
Figura 4.32: Distribuição dos coeficientes de pressão média, externos, nas fachadas do Modelo 7, considerando o vento na incidência de 0°	81
Figura 4.33: Modelo 8 do Grupo 3 na Mesa M-II do túnel de vento túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann	81
Figura 4.34: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx), \tilde{C}_y (CFy), \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 8	82
Figura 4.35: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 8 (6,5/1/2,5)	84
Figura 4.36: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 8 (6,5/2,5/1)	84
Figura 4.37: Modelo 9 do Grupo 3 na Mesa M-II do túnel de vento túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann	85
Figura 4.38: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx), \tilde{C}_y (CFy), \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 9.....	86
Figura 4.39: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 9 (9/1/2,5)	87
Figura 4.40: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 9 (9/2,5/1)	88

Figura 4.41: Distribuição dos coeficientes de pressão média, externos, nas fachadas do Modelo 9, considerando o vento na incidência de 0°	89
Quadro 3.1: Características dos modelos 1 e 2 ensaiados no Grupo 1	42
Quadro 3.2: Características dos modelos 3, 4 e 5 ensaiados no Grupo 2	42
Quadro 3.3: Características dos modelos 6, 7, 8 e 9 ensaiados no Grupo 3	43
Quadro 4.1: Parâmetros e resultados do Modelo 1	54
Quadro 4.2: Parâmetros e resultados do Modelo 2	58
Quadro 4.3: Parâmetros e resultados do Modelo 3	62
Quadro 4.4: Parâmetros e resultados do Modelo 4	67
Quadro 4.5: Parâmetros e resultados do Modelo 5	71
Quadro 4.6: Parâmetros e resultados do Modelo 6	75
Quadro 4.7: Parâmetros e resultados do Modelo 7	79
Quadro 4.8: Parâmetros e resultados do Modelo 8	83
Quadro 4.9: Parâmetros e resultados do Modelo 9	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Relações dimensionais estudadas	39
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas maiúsculas

A	área de uma superfície plana
A_r	amplitude reduzida
B	parâmetro de largura de banda
C_a	coeficiente de arrasto
CF	coeficiente de força
\tilde{C}_a	coeficiente r.m.s. da força de arrasto
C_L	coeficiente da força lateral
\tilde{C}_L	coeficiente r.m.s. da força lateral
C_T	coeficiente de torção
\tilde{C}_x	coeficiente r.m.s. da força na direção X
\tilde{C}_y	coeficiente r.m.s. da força na direção Y
F_a	força de arrasto
F_L	força lateral
$H(f)$	função de ganho
$I_i(\mathbf{r})$	intensidade local da componente i da turbulência, no ponto \mathbf{r}
I_l	intensidade local da componente longitudinal da turbulência
L_l	macroescala da componente longitudinal de turbulência
M_T	momento torçor
P_{atm}	pressão atmosférica
R	constante universal dos gases
Re	número de Reynolds
$S_L(f)$	Densidade espectral da força lateral
St	número de Strouhal

T	período de amostragem
V	velocidade do escoamento
V_{cr}	velocidade crítica do vento
$\mathbf{V}(\mathbf{r}, t)$	vetor velocidade em um ponto \mathbf{r}
$\bar{\mathbf{V}}(\mathbf{r})$	vetor velocidade média em um ponto \mathbf{r}
$\bar{V}(z)$	velocidade média do vento na altura z
$\bar{V}(z_{ref})$	velocidade média do vento na altura de referência
\bar{V}_h	velocidade média no topo do modelo

Letras romanas minúsculas

b	dimensão da estrutura na direção do escoamento
c_p	coeficiente de pressão
c_{pe}	coeficiente de pressão externa
d	dimensão da estrutura na direção transversal ao vento
f_n	frequência natural
f_r	frequência reduzida
f_s	frequência de desprendimento de um par de vórtices
h	altura de uma edificação medida da base até o topo
k_b	fator de bloqueio
k_0	coeficiente que vincula a pressão dinâmica à pressão estática diferencial
m_e	massa equivalente por unidade de comprimento
$m(z)$	massa por unidade de comprimento
n	cosseno diretor
p	expoente característico da lei potencial do perfil de velocidade média do vento
p	pressão estática em um ponto
p_0	pressão estática de referência no escoamento não perturbado
q	pressão dinâmica

\overline{q}_h	pressão dinâmica média no topo do modelo
\mathbf{r}	vetor posição
t	tempo
u_*	velocidade de corte, fricção ou de cisalhamento
$\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$	vetor rajada ou vetor das flutuações da velocidade
ν	viscosidade cinemática de um fluido
v_i	componentes escalares do vetor rajada
z_o	rugosidade aerodinâmica do terreno
z_d	deslocamento do plano-zero

Letras gregas

θ	temperatura medida durante o ensaio
ΔP_a	diferença de pressão estática
ρ	massa específica
ρ_{ar}	massa específica do ar
κ	constante de von Kármán
ζ_e	razão de amortecimento estrutural crítico
δ_e	amortecimento estrutural expresso pelo decremento logarítmico
$\sigma_i(\mathbf{r})$	desvio padrão da componente flutuante da velocidade no ponto \mathbf{r}
$\varphi(z)$	forma modal da estrutura

1 INTRODUÇÃO

Nesta seção apresenta-se uma breve contextualização sobre o fenômeno de desprendimento de vórtices para melhor introduzir ao leitor suas características e relevância para estruturas esbeltas. Em seguida, busca-se expor os objetivos do estudo, assim como as suas delimitações.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Para que um projeto de uma estrutura esbelta seja concebido de maneira plena é necessário que seja levado em consideração a influência dos fatores ambientais que venham a impactar estática e dinamicamente a estrutura em algum momento ao longo de sua vida útil. Para esse tipo de estrutura, a ação do vento é um fator muito importante e conhecer sua influência no comportamento estrutural é indispensável. Blessmann (2001) afirma que para edificações baixas e com paredes espessas o vento não era um fator preocupante, porém com o avanço tecnológico que possibilitou a otimização no uso de materiais e o surgimento de estruturas esbeltas esse fator ambiental passou a ser mais impactante.

Um fenômeno importante relacionado à ação do vento e que acomete estruturas esbeltas é o desprendimento de vórtices, o qual abrange uma ampla gama de tipos estruturais, seja a estrutura de seção circular, retangular, triangular ou qualquer outra seção, e conhecer a maneira como esta responde frente à ação do vento é extremamente importante. O desprendimento de vórtices se dá por meio do escoamento em torno de um corpo a partir da redução de pressão a barlavento e da conseqüente separação do escoamento e formação da zona de recirculação a sotavento (SANTOS, 2013). Na ocorrência de excitação da estrutura em frequências próximas a sua frequência natural de vibração, podem ocorrer oscilações de grandes amplitudes na direção transversal ao escoamento (BLESSMANN, 2005).

Sabe-se que as características dos vórtices formados são influenciadas pela forma da seção transversal da edificação, distribuição de pressões, rugosidade superficial, efeitos de tridimensionalidade, além das características do vento. Devido a esses elementos, torna-se consideravelmente desafiador estimar os efeitos de vibração (TAMURA *et al.*, 1996).

Apesar de ser um fenômeno estudado há décadas e com muitas especificidades conhecidas, principalmente que estruturas esbeltas respondem predominantemente de maneira dinâmica devido às parcelas flutuantes das forças provenientes da turbulência atmosférica, este ainda é pouco considerado em procedimentos normativos, sendo levado em conta somente a partir da década de 1970 (DALY, 1986). Apesar disso, os procedimentos normativos existentes que abordam o tema possibilitam estimativas satisfatórias acerca dos efeitos do desprendimento de vórtices em estruturas de seção circular ou retangular. Quando não é possível fazer um estudo para determinada estrutura que aborde as influências causadas pela vizinhança ou forma arquitetônica complexa da estrutura, por exemplo, recomenda-se que sejam realizadas análises experimentais em túnel de vento.

Segundo Loredo-Souza *et al.* (2019), as pesquisas sobre o fenômeno têm sido mais frequentes e com o objetivo de propor uma abordagem que englobe diversos tópicos que integram o desprendimento de vórtices. Apesar disso, os modelos existentes, principalmente para estruturas de seção circular, ainda são de caráter empírico e com diversas limitações, sendo que quando se trata de estruturas de seções quadradas e retangulares, as metodologias necessitam ainda de algum tipo de complementação para sua aplicação ser abrangente.

Dessa forma, o presente estudo objetiva a determinação de coeficientes de força lateral e espectros de potência da força lateral provenientes de formas paralelepípedicas baseadas em estruturas construídas no Brasil nos últimos anos e que foram submetidas a ensaios no Túnel de vento *Professor Joaquim Blessmann*, as quais possuem características dimensionais que podem ser sensíveis aos impactos provenientes do fenômeno de desprendimento de vórtices.

1.2 RELEVÂNCIA DO ESTUDO

No projeto de uma estrutura esbelta a previsão adequada do seu comportamento dinâmico ainda é uma questão complexa, devido a várias interações entre tópicos importantes da Engenharia Estrutural. Sabe-se que o projeto estrutural demanda uma porcentagem relevante do custo total de um empreendimento; para torres eólicas, por exemplo, Fontecha *et al.* (2017) cita valores em torno de 15 a 25% de todo o investimento. Ou seja, é interessante que excessos de segurança desnecessários sejam evitados e para isso é preciso que o projetista tenha à disposição

procedimentos normativos e metodologias técnicas consolidadas que supram suas necessidades de projeto.

De forma geral, os procedimentos normativos que tratam das ações do vento sobre as edificações seguem a abordagem proposta por Davenport (1967, *apud* HOLMES, 2015), como a seguir:

- Definição da velocidade básica do vento;
- Fatores que contribuem para a adequação do vento e sua velocidade, tipo de terreno, topografia, efeitos de vizinhança;
- Coeficientes de pressão, de forma e força aerodinâmica para o tipo de edificação em estudo;
- Considerações sobre os efeitos dinâmicos aos quais a estrutura possa estar sujeita.

Essas características são expostas na corrente de Davenport, em que quando os elos são bem estabelecidos é possível definir um processo coeso para análises de estruturas submetidas à ação do vento. O processo de avaliação dos efeitos da ação do vento o qual Davenport se referiu como “corrente de carregamento do vento” está ilustrado na Figura 1.1.

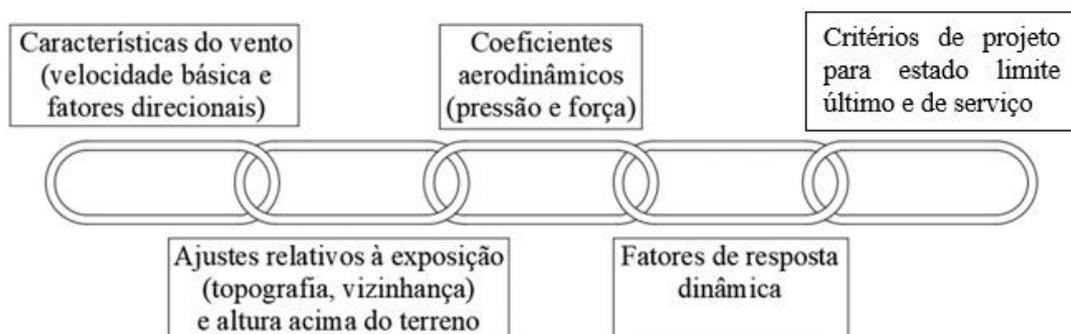


Figura 1.1: Corrente de carregamento do vento (fonte: adaptado de Davenport, 1961).

Apesar do avanço nas pesquisas sobre o tema de vibrações causadas pelo desprendimento de vórtices, ainda há muito para explorar, pois com o avanço tecnológico existe a tendência de construir estruturas com formas arquitetônicas cada vez mais sofisticadas, utilização de materiais mais leves, melhor aproveitamento da área construtiva (o que leva a estruturas mais altas), dentre outros aspectos.

As vibrações provenientes desse fenômeno acometem diversos tipos de estruturas, independentemente da forma de sua seção transversal, e essas vibrações serão influenciadas pela turbulência do vento, pelo amortecimento estrutural e pela rigidez estrutural (NÚÑEZ, 2001). Uma simples verificação da forma da seção transversal, elementos estruturais e dimensões principais do edifício ou estrutura já nortearão, em muitos casos, qual procedimento normativo seguir, porém nem sempre serão suficientes tais requisitos. Em algumas situações de projeto se torna uma tarefa extremamente difícil estimar a sensibilidade da estrutura frente às ações do vento, uma vez que a interação vento/estrutura é dependente da distribuição de massa, rigidez e amortecimento estrutural (KWOK, 2013).

É evidente que uma estrutura sujeita à ação do vento pode estar submetida a mais de um fenômeno aeroelástico, tais como martelamento (*buffeting*), galope e desprendimento de vórtices, e apesar de ser possível estimar separadamente o efeito de cada fenômeno muitas vezes a resposta do corpo será amplificada pela atuação mútua desses e outros fenômenos. Contudo, ainda não existe um método analítico geral que torne possível estimar com precisão a resposta de uma estrutura complexa submetida a vários fenômenos aeroelásticos, o que demanda exaustivos estudos sobre o tema.

O efeito causado pelas vibrações desse fenômeno pode promover deslocamentos com limites inaceitáveis e, por consequência da atuação periódica das forças laterais provenientes dos vórtices desprendidos, pode ocorrer a redução da vida útil por fadiga em diversos tipos de estruturas. Os deslocamentos excessivos não estão relacionados somente ao estado limite último, mas também de serviço, quando o movimento dessas estruturas causar desconforto nos usuários, além da sensação de falta de segurança na utilização delas.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é o estudo do fenômeno de desprendimento de vórtices em estruturas de seção retangular para a determinação de coeficientes de força lateral e espectros de força lateral para grupos de modelos de edificações que possuem relações dimensionais praticadas em edificações construídas no Brasil. O presente estudo faz parte de um projeto de pesquisa em andamento do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

1.4 DELIMITAÇÕES

Esta dissertação está direcionada, de maneira geral, ao estudo da caracterização aerodinâmica das forças laterais oriundas do desprendimento de vórtices, porém alguns tópicos estão fora do escopo do presente trabalho.

- **Efeitos de vizinhança:** A influência de edificações vizinhas no entorno das estruturas em estudo foi considerada apenas como categoria do terreno, ou seja, outras estruturas ou configurações de vizinhança que poderiam diminuir ou aumentar os efeitos do vento sobre a estrutura principal em estudo não serão abordadas.
- **Formas estruturais:** o estudo realizado está direcionado para edificações de seção retangular com cantos vivos representadas por modelos rígidos. Efeitos de melhorias aerodinâmicas ou a influência de detalhes arquitetônicos na estrutura estão fora do escopo deste estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico serão expostos alguns conceitos gerais considerados essenciais para o entendimento do tema em estudo, revisando também aspectos do vento e seus efeitos em torno de prismas retangulares, complementando com estudos realizados acerca do fenômeno de desprendimento de vórtices.

2.1 PERFIL VERTICAL DE VELOCIDADES MÉDIA

Os ventos naturais têm sua origem a partir do aquecimento diferencial das massas de ar pela energia solar, onde essas massas de ar se deslocarão entre zonas de maior e menor pressão. A diferença de pressão atmosférica também é causada por forças provenientes da rotação da Terra (forças de Coriolis).

Para nosso interesse é importante o conceito de Camada Limite Atmosférica (CLA), que consiste na porção de ar afetada diretamente pelas interações com as características topográficas do terreno, sua rugosidade e pela temperatura do ar.

Segundo Loredou-Souza *et al.* (2004), a CLA pode ser dividida em duas camadas, sendo a camada superficial e a camada de Ekiman, em que atuam as tensões de Reynolds ou tensões turbulentas ($-\rho_{ar} \overline{uw}$). Além disso, os autores definem a camada superficial como a parcela da CLA próxima da superfície terrestre onde o escoamento e as tensões variam pouco. Já na camada de Ekiman há um decréscimo de tensões de Reynolds com a altitude, até se tornarem praticamente zero na região da altura gradiente, na qual agem as forças de pressão e de Coriolis. A Figura 2.1 ilustra o perfil de velocidades médias do vento.

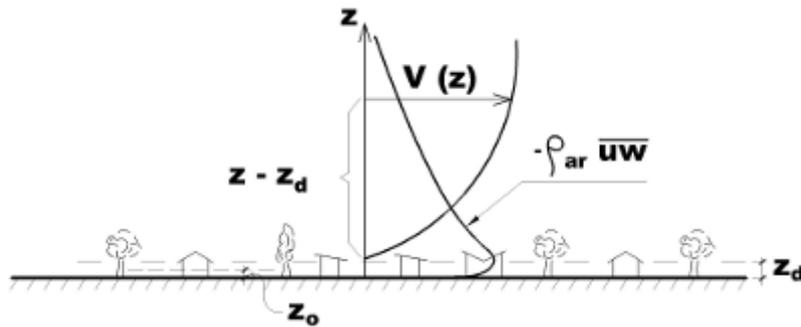


Figura 2.1: Perfil de velocidades médias do vento (Loredou-Souza *et al.*, 2004).

Na Figura 2.1, z_o indica a rugosidade aerodinâmica do terreno, já o termo z_d representa uma subcamada de fina espessura da CLA denominada “deslocamento do plano-zero”, sendo que para o caso de cidades este representa a altura média dos edifícios.

Para a Engenharia do Vento são utilizados dois perfis de velocidades médias consagrados, são eles: lei de potência e logarítmico. O perfil em lei de potência está representado pela equação (2.1):

$$\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}(z_{ref})} = \left(\frac{z - z_d}{z_{ref}} \right)^p \quad (2.1)$$

onde:

$\bar{V}(z)$ consiste na velocidade média do vento na altura de interesse;

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

p é o expoente que representa o tipo de terreno;

A lei de potência representa bem a CLA na região mais afastada da superfície, já para um ajuste melhor próximo à camada superficial a lei logarítmica fornece uma boa caracterização. Porém para a região superior da camada limite atmosférica essa lei não se apresenta uma boa opção. A Equação (2.2) expressa o perfil de velocidades médias do vento em lei logarítmica (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2004).

$$\frac{\bar{V}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z - z_d}{z_o} \right) \quad (2.2)$$

em que z_0 representa a altura média da rugosidade do terreno ou rugosidade aerodinâmica, κ a constante de Kármán e u_* a velocidade de corte, de fricção ou cisalhamento.

2.2 TURBULÊNCIA DO VENTO

A influência da turbulência sobre as pressões médias e flutuantes em torno de estruturas tanto retangulares quanto circulares não é algo de fácil caracterização devido à interação entre tópicos complexos da Mecânica dos Fluidos, somado ao escoamento ao redor de corpos rombudos (*bluff bodies*) e a própria turbulência (NÚÑEZ, 2001). A turbulência no vento natural resulta em variações na velocidade e na direção do vento incidente, o que gera o arrasto flutuante e as forças laterais do vento nas estruturas (CAVALCANTE, 2020).

A turbulência origina-se, basicamente, a partir da interação do vento com a rugosidade presente na superfície e movimentos da atmosfera, formando turbilhões de dimensões distintas com rajadas de intensidade e frequências aleatórias. Na caracterização de escoamentos turbulentos no presente estudo são apresentados os parâmetros de intensidade da componente longitudinal da turbulência I_l , e a macroescala da componente longitudinal da turbulência L_l , a qual nos permite caracterizar as dimensões dos turbilhões.

Blessmann (2011) ressalta a importante transferência de energia envolvida dentro da turbulência, onde apesar da dissipação de energia cinética no processo entre vento e terreno, parte dessa energia cinética é transferida entre os turbilhões de maior para os de menor dimensão. Os turbilhões grandes o suficiente para envolver estruturas esbeltas são capazes de produzir forças de baixa frequência, que ao se aproximarem ou se igualarem à frequência natural de vibração da estrutura podem amplificar os deslocamentos horizontais. Já os turbilhões menores formarão rajadas concentradas e mais danosas. A ocorrência simultânea desses turbilhões provoca uma superposição de efeitos em diversos pontos da estrutura, dessa maneira, conhecer a influência da turbulência é um fator indispensável para a avaliação da resposta dinâmica estrutural. A Figura 2.2 ilustra, basicamente, o padrão de turbilhões envolvendo uma estrutura de seção retangular inserida em um escoamento.

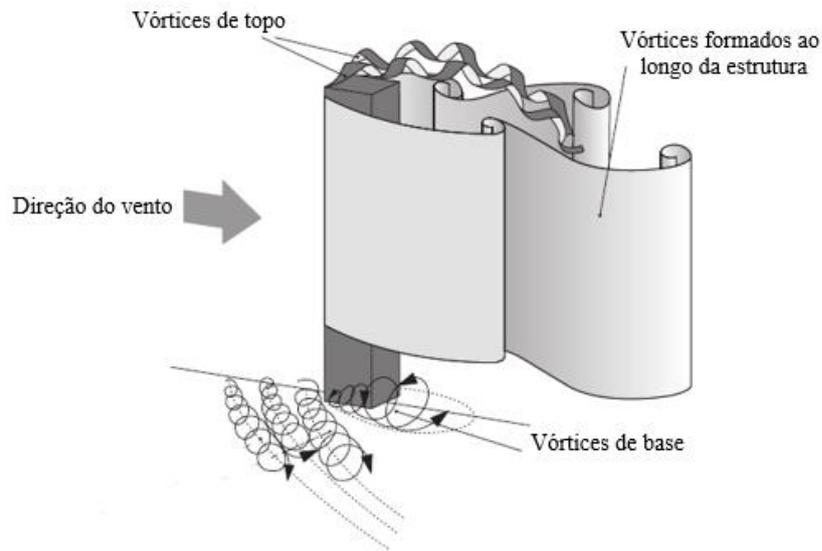


Figura 2.2: Distribuição de vórtices formados ao longo de uma estrutura de seção retangular. (fonte: adaptado de Joubert *et al.*, 2015).

O perfil de vento natural pode ser expresso por dois termos, sendo uma componente média $\bar{V}(\mathbf{r})$ e outra flutuante $v(\mathbf{r}, t)$, componente de turbulência, conforme mostra a equação (2.3):

$$\mathbf{V}(\mathbf{r}, t) = \bar{\mathbf{V}}(\mathbf{r}) + v(\mathbf{r}, t) \quad (2.3)$$

Essa equação expressa um vetor de velocidade que varia com a altura, sendo função da posição \mathbf{r} e do tempo t com componentes em x , y e z . A Figura 2.3 ilustra o que foi exposto anteriormente.

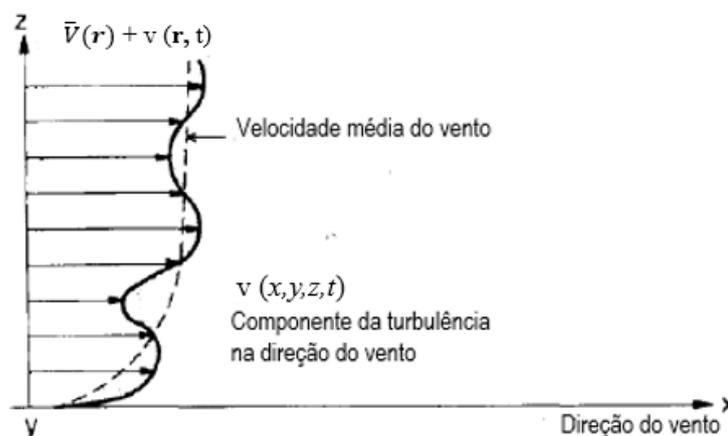


Figura 2.3: Perfil de velocidades do vento (fonte: adaptado de Dyrbye e Hansen, 1997).

Podemos definir a intensidade da turbulência ($I_i(\mathbf{r})$) em um determinado ponto dentro de um escoamento a partir da razão entre o desvio padrão de cada componente flutuante ($\sigma_i(\mathbf{r})$) e a velocidade média no ponto de análise, como mostra a Equação (2.4):

$$I_i(\mathbf{r}) = \frac{\sigma_i(\mathbf{r})}{\bar{V}(\mathbf{r})} \quad (i = 1,2,3) \quad (2.4)$$

O desvio padrão das componentes flutuantes de velocidade (v_i) em consideração pode ser definido a partir da Equação (2.5), em que T representa o período de medição:

$$\sigma_i(\mathbf{r})^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v_i^2(\mathbf{r}, t) dt \quad (i = 1,2,3) \quad (2.5)$$

Segundo Miguel (2003), devido à irregularidade das flutuações, o estudo da turbulência é conduzido através da teoria de probabilidade e de médias estatísticas. A turbulência fica caracterizada como um processo aleatório estacionário ergódico, sendo essa hipótese adotada na prática onde se analisa um único registro no tempo do fenômeno, considerando o mesmo como representativo de todos os registros que podem ser feitos.

Pode-se também descrever as flutuações da velocidade fazendo uso de densidades espectrais de potência, sendo que essa abordagem trata da energia do vento em termos de suas frequências correspondentes. Blessmann (2005) apresentou o espectro da força lateral influenciado pela turbulência no espectro em função da razão f/f_s , onde pode-se observar um pico no escoamento em baixa turbulência, evidenciando uma força lateral harmônica, como mostra a Figura 2.4.

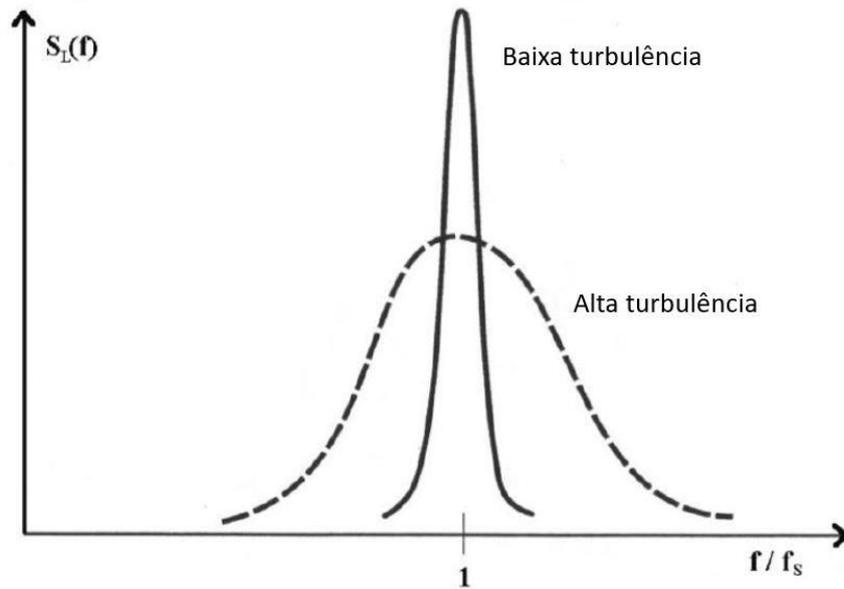


Figura 2.4: Influência da turbulência no espectro de força lateral $S_L(f)$ (fonte: Blessmann, 2005).

Contudo, a largura de banda desse pico e a turbulência aumentam na mesma proporção e ao mesmo tempo em que a altura do pico diminui. A partir disso é possível notar que quanto maior a turbulência do vento, mais baixo o pico será, o que torna também o espectro mais alargado, englobando assim uma gama maior de frequências. Isso evidencia que as variações da velocidade em torno da sua média não impedem o desprendimento de vórtices (GRALA, 2020).

2.3 AERODINÂMICA DE CORPOS DE SEÇÃO RETANGULAR

Diferente de corpos de seção circular, a separação do escoamento para seções retangulares se dá nas arestas comuns entre a face de barlavento e as faces laterais, enquanto para a primeira é obedecido o regime de escoamento em que se encontra o corpo. Nestes locais de separação do escoamento de corpos retangulares as tensões de cisalhamento produzem movimentos de rotação às partículas do fluido, ocasionando vórtices (BALENDRA, 1993). Para estabelecer uma base de entendimento sobre o fenômeno de desprendimento de vórtices é necessário a definição de parâmetros relacionados a este, o que será exposto a seguir.

Sabe-se que as vibrações ocorrem quando os vórtices se desprendem da estrutura de maneira alternada, produzindo as forças equivalentes na direção transversal ao escoamento, como mostra a Figura 2.5. Esse destacamento alternado de vórtices pode assumir características de comportamento de dois tipos, sendo um o desprendimento aleatório e outro o desprendimento alternado e ordenado caracterizando os vórtices de Von Kármán, os quais dão origem às forças perpendiculares à direção de incidência do vento. Essas forças são periódicas e surgem alternadamente em ambos os lados da estrutura na mesma frequência do desprendimento dos vórtices (Santos, 2013).

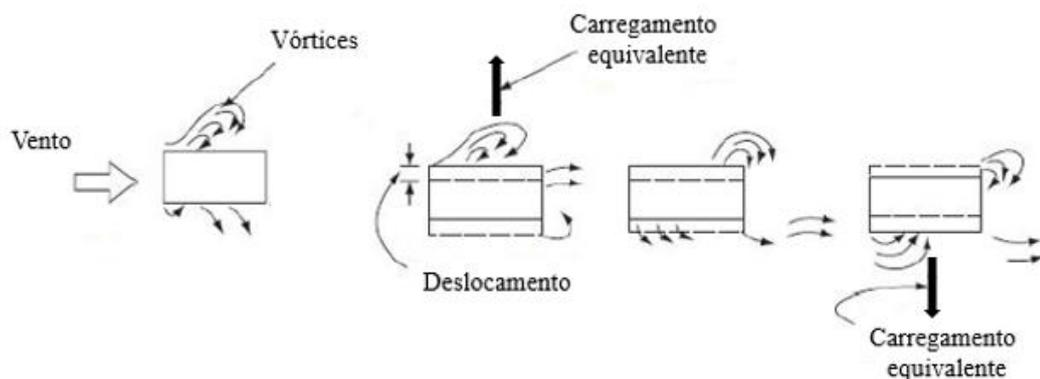


Figura 2.5: Atuação dos vórtices sobre uma estrutura de seção retangular (fonte: adaptado de Lopatinski, 2020).

Em corpos rombudos de arestas vivas, como expresso anteriormente, o número de Reynolds (Re) não exerce tanta influência sobre fenômeno, o ângulo de incidência terá maior importância em comparação com o Re . Para esses corpos as linhas de corrente não seguem toda a superfície do corpo na direção do escoamento, elas se desprendem deixando regiões de descolamento e

recolamento (dependendo do comprimento do corpo na direção do escoamento), além de uma esteira turbulenta mais larga.

Huang *et al.* (2010) mostraram essa dependência considerada desprezível do número de Reynolds. Na Figura 2.6 é possível observar a dependência no número de Strouhal (St) com o ângulo de incidência e sua relação com a variação do número de Reynolds.

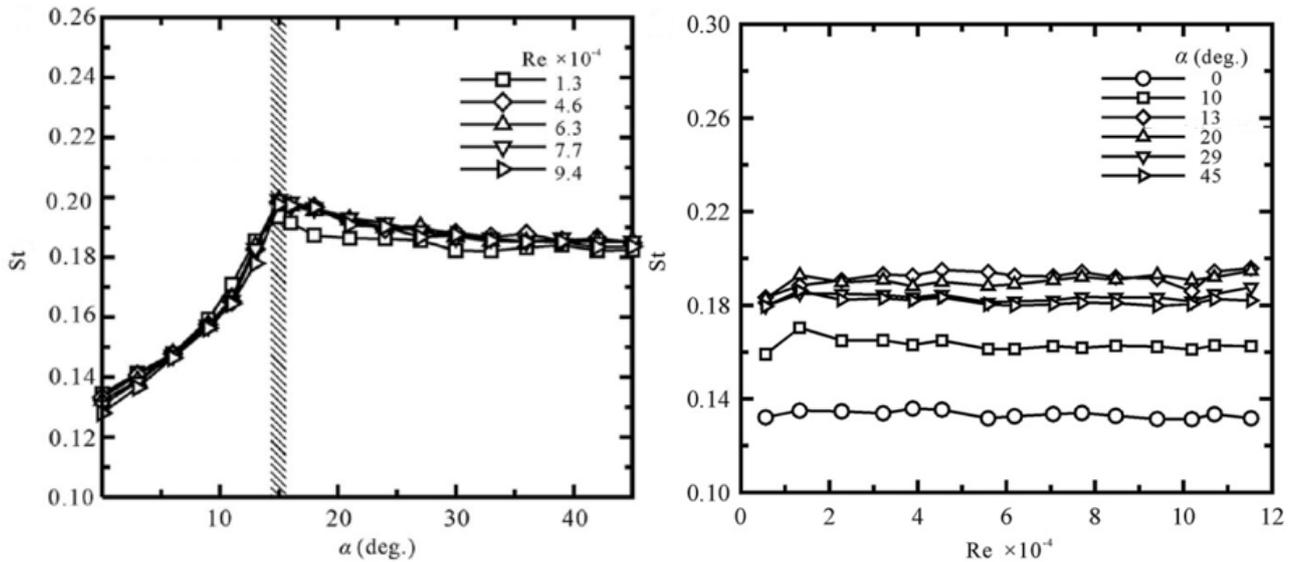


Figura 2.6: Relação do ângulo de incidência do vento e o número de Reynolds com o número de Strouhal (fonte: adaptado de Huang *et al.* 2010).

Quando o vento atinge a superfície da estrutura perpendicularmente, sua velocidade torna-se nula definindo assim o ponto de estagnação. Prosseguindo o escoamento em torno da estrutura, o vento atinge o ponto de separação ou descolamento, em que as baixas velocidades próximas à superfície do corpo combinadas com a desaceleração crescente para sotavento tornam novamente a velocidade nula. Este ponto de separação é dependente da geometria do corpo, da sua rugosidade e da turbulência do escoamento (AMARAL, 2021). A Figura 2.7 ilustra a explicação dada para uma seção transversal retangular simples de cantos vivos.

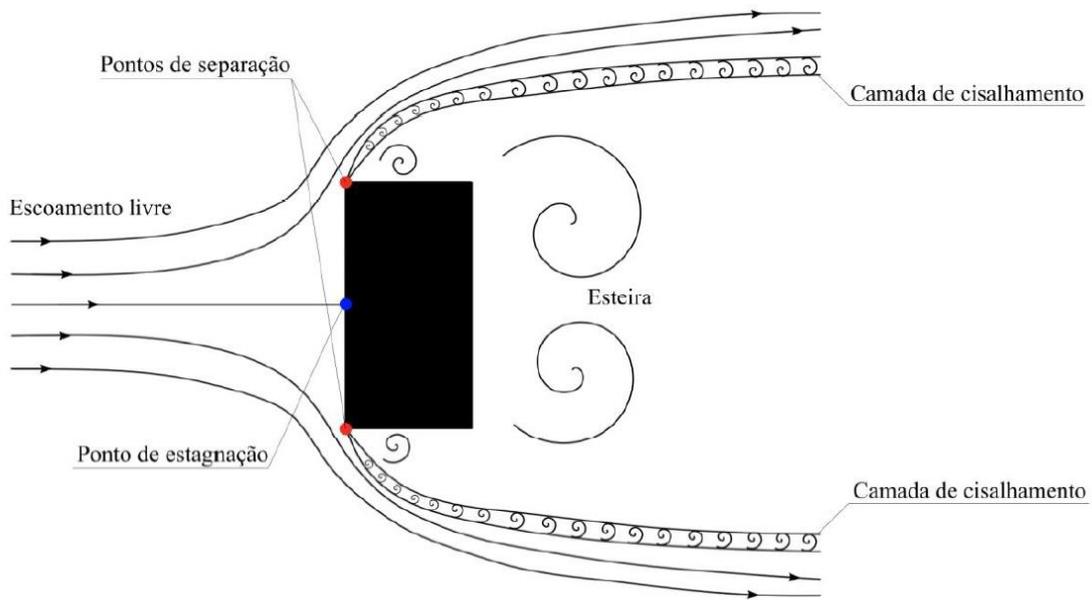


Figura 2.7: Escoamento em torno de um corpo de seção transversal retangular (fonte: Amaral, 2021).

Estando o corpo imerso nesse escoamento ele estará submetido a forças em duas direções, uma na mesma direção do escoamento e outra perpendicular a este. A primeira é denominada força de arrasto e a segunda é a força lateral. Caso a força resultante no corpo seja dada de maneira excêntrica em relação ao seu centro elástico, o corpo sofrerá a ação de um momento torçor.

As equações (2.6), (2.7) e (2.8) definem essas três forças apresentadas:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho C_a d [\bar{V} + v(\mathbf{r}, t)]^2 = \frac{1}{2} \rho C_a d [\bar{V}^2 + 2\bar{V}v(\mathbf{r}, t)] \quad (2.6)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L d [\bar{V} + v(\mathbf{r}, t)]^2 = \frac{1}{2} \rho C_L d [\bar{V}^2 + 2\bar{V}v(\mathbf{r}, t)] \quad (2.7)$$

$$M_T = \frac{1}{2} \rho C_T d^2 [\bar{V} + v(\mathbf{r}, t)]^2 = \frac{1}{2} \rho C_T d [\bar{V}^2 + 2\bar{V}v(\mathbf{r}, t)] \quad (2.8)$$

em que, F_a é a força de arrasto, F_L a força lateral e M_T o momento torçor. Já C_a é o coeficiente de arrasto, C_L o coeficiente lateral e C_T o coeficiente de torção. O termo $v(\mathbf{r}, t)$ elevado ao quadrado é desprezado.

As pressões externas, as quais o corpo imerso no escoamento é submetido, são expressas por meio do coeficiente de pressão c_{pe} , apresentado na Equação (2.9):

$$c_{pe} = \frac{p - p_0}{q} \quad (2.9)$$

em que p é a pressão estática em um ponto da superfície do elemento e p_0 uma pressão estática de referência no escoamento não perturbado (BLESSMANN, 2011).

A Figura 2.8 mostra os valores para o coeficiente de arrasto para corpos paralelepípedicos em função da variação da relação comprimento/largura. Os valores expostos foram obtidos para escoamento turbulento, valores finitos de h/b e velocidade de referência medida em h .

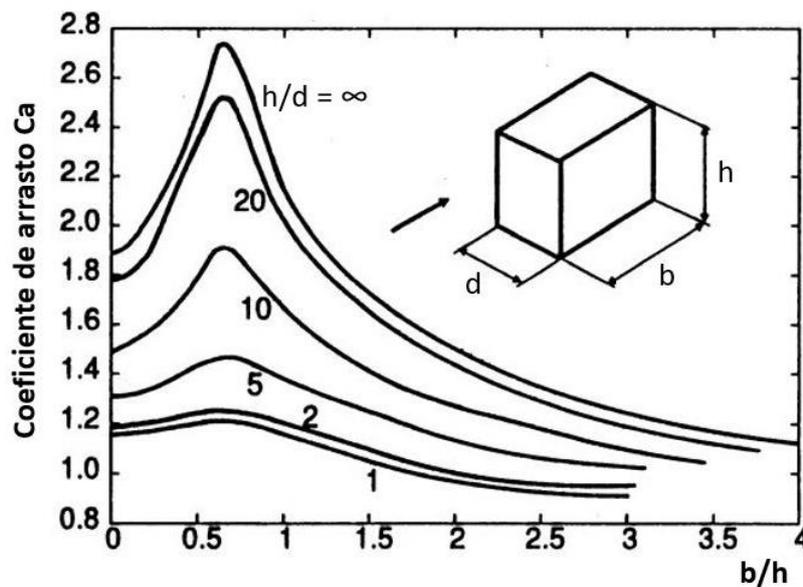


Figura 2.8: Relação entre o coeficiente de arrasto e b/h para corpos paralelepípedicos (fonte: Adaptado de Sockel, 1994).

Quando o corpo é alongado, as linhas de corrente separadas a barlavento recolam na superfície do corpo, gerando um estreitamento da esteira, o que diminui o arrasto.

2.3.1 Frequência de desprendimento de vórtices

Como visto, na medida em que os vórtices são desprendidos surgem forças equivalentes alternadamente nas laterais da estrutura. A frequência desse desprendimento pode ser obtida a partir da Equação (2.10):

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

em que:

f_s é a frequência de desprendimento de vórtices;

St é o número de Strouhal;

V é a velocidade do escoamento na região não perturbada;

d é a dimensão característica do corpo;

À medida que a frequência de desprendimento de vórtices se aproxima da frequência natural da estrutura, vibrações significativas poderão ocorrer e ocasionar a amplificação dos deslocamentos na direção transversal ao vento.

2.3.2 Número de Reynolds

Este conceito tem fundamental importância nos estudos envolvendo fluidos. O número de Reynolds (Re) é um coeficiente que está relacionado às propriedades do fluido e condições de escoamento. Esse coeficiente estabelece a razão entre as forças de inércia e as de viscosidade, de forma a caracterizar o tipo de escoamento.

O número de Reynolds é definido a partir da Equação (2.11):

$$Re = \frac{V d}{\nu} \quad (2.11)$$

onde d consiste na dimensão característica do corpo, a qual pode ser o comprimento na direção transversal ao escoamento em que se desenvolveu a camada limite ou alguma medida de espessura da camada limite, e ν é a viscosidade cinemática do fluido. Para este estudo, a dimensão característica a ser considerada será a dimensão da estrutura na direção perpendicular ao escoamento, assim como empregado por Grala (2020).

2.3.3 Número de Strouhal e velocidade crítica

O número de Strouhal (St) determina uma frequência adimensional de desprendimento de vórtices sobre uma dada estrutura, seja qual for a forma de sua seção transversal. Este parâmetro é a relação entre a frequência de desprendimento de vórtices f_s e a velocidade de escoamento V incidente sobre um corpo rombudo com dimensão característica d , como pode-se observar por meio da Equação (2.12):

$$St = \frac{f_s d}{V} \quad (2.12)$$

Para corpos rombudos angulosos, com incidência de vento perpendicular a este, a frequência de desprendimento de vórtices é praticamente constante e independente do número de Reynolds (GIACHETTI, 2018). Porém, de maneira geral, o número de Strouhal é um adimensional dependente da seção transversal, do ângulo de ataque, da oscilação do corpo, da rugosidade superficial, das características presentes no escoamento e do número de Reynolds (PINHEIRO, 2004).

Através desse parâmetro é possível também ser determinada a velocidade crítica do vento V_{cr} , para a qual se tem a condição em que a frequência de desprendimento de vórtices se iguala a uma das frequências naturais da estrutura ou de um elemento estrutural. Esse conceito é abordado em alguns procedimentos normativos, a citar a NBR – 6123 (1988) e o Eurocódigo 1 (2010). Essa velocidade é obtida a partir da Equação (2.13):

$$V_{cr} = \frac{f_n d}{St} \quad (2.13)$$

em que f_n é a frequência natural da estrutura associada ao modo de vibração considerado na verificação. Os valores para St são geralmente tabelados de acordo com cada tipo de seção transversal, sendo que para seções retangulares o Eurocódigo 1 (2010) apresenta os valores conforme expostos na Figura 2.9, que serão utilizados para o cálculo de St e f_s no presente estudo.

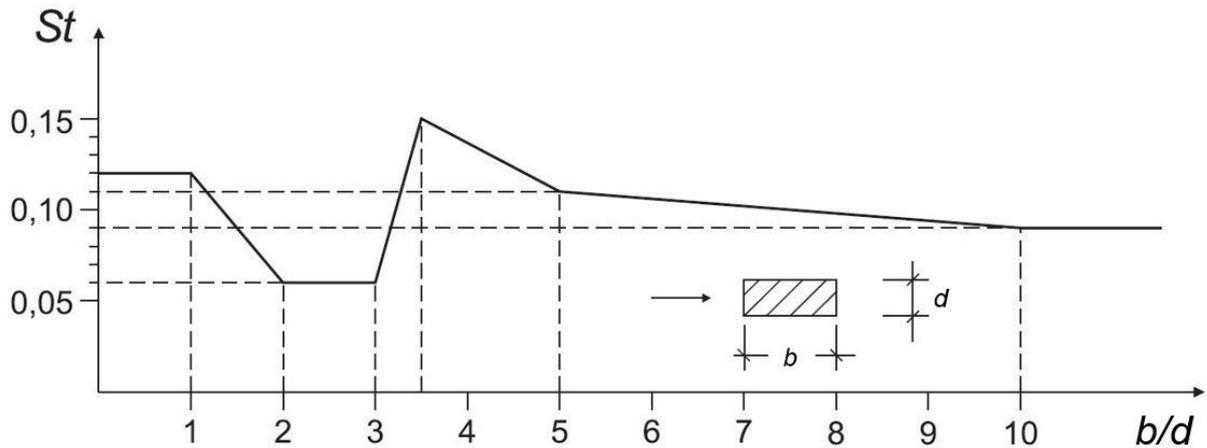


Figura 2.9: Valores para o número de Strouhal referente às seções retangulares com arestas vivas (fonte: adaptado de Eurocódigo, 2010).

Outros parâmetros importantes na análise do fenômeno de desprendimento de vórtices são: velocidade, frequência e amplitude reduzidas. A velocidade reduzida (V_r) consiste na relação entre a velocidade do escoamento V , a dimensão característica d e a frequência natural da estrutura, como mostra a Equação (2.14). A frequência reduzida f_r é definida como o inverso da velocidade reduzida:

$$V_r = \frac{V}{f_n d} = \frac{1}{f_r} \quad (2.14)$$

Já a amplitude reduzida A_r é a relação entre a amplitude de vibração no topo da estrutura (y_0) e a dimensão característica d , como mostra a Equação (2.15):

$$A_r = \frac{y_0}{d} \quad (2.15)$$

Vale ressaltar que de acordo com Blessmann (2005), as contribuições aleatórias para as forças flutuantes ocorrem em uma dada faixa de frequências, entretanto, o número de Strouhal se refere à frequência que é predominante dentro dessa faixa.

2.3.4 Número de Scruton

O número de Scruton (Sc) é outro parâmetro muito importante na análise de vibrações, possibilitando uma estimativa da tendência de uma estrutura sofrer vibrações ou instabilidades significativas quando submetida a uma excitação dinâmica, como o desprendimento de vórtices. Seu cálculo é dado por meio da Equação (2.16):

$$Sc = \frac{4\pi m_e \zeta_e}{\rho d^2} = \frac{2 \delta_e m_e}{\rho d^2} \quad (2.16)$$

em que m_e é a massa equivalente por unidade de comprimento ao longo da altura do corpo, ζ_e razão de amortecimento estrutural crítico, δ_e é o decremento logarítmico calculado sobre a resposta da estrutura e ρ a massa específica do ar.

A massa equivalente por unidade de comprimento m_e pode ser definida a partir de:

$$m_e = \frac{\int_0^h m(z) \varphi^2(z) dz}{\int_0^h \varphi^2(z) dz} \quad (2.17)$$

onde $m(z)$ é a massa por unidade de comprimento ao longo da altura do corpo, e $\varphi(z)$ é a forma modal da estrutura.

2.3.5 Interação fluido-estrutura

A ação do desprendimento de vórtices alternados, em uma determinada faixa de frequências, sobre a estrutura gera as forças laterais que transferem energia para o corpo ocasionando movimento na direção perpendicular ao escoamento. Esse movimento da estrutura começa com pequenos deslocamentos, os quais aumentam à medida que a frequência de desprendimento dos vórtices chega próxima a frequência natural da estrutura. Quando o movimento atinge deslocamentos maiores, o corpo começa a interagir com o fluido de maneira a influenciar a frequência de desprendimento dos vórtices, que antes era presumida em função do número de Strouhal.

A esse fenômeno dá-se o nome de sincronização ou captura (“*lock in*”), em relação ao qual Blessmann (2005) explica que o movimento da estrutura promove uma série de efeitos sobre a formação de vórtices, tais como, aumento da energia dos vórtices, amplificação das forças flutuantes de arrasto e melhoria da correlação longitudinal, além do próprio fenômeno de sincronização. A Figura 2.10 ilustra que a frequência de desprendimento de vórtices se mantém constante em uma determinada faixa de velocidades e permanece sincronizada com a frequência natural da estrutura. Sendo que, fora da região de trancamento é obedecida uma função linear da velocidade do vento.

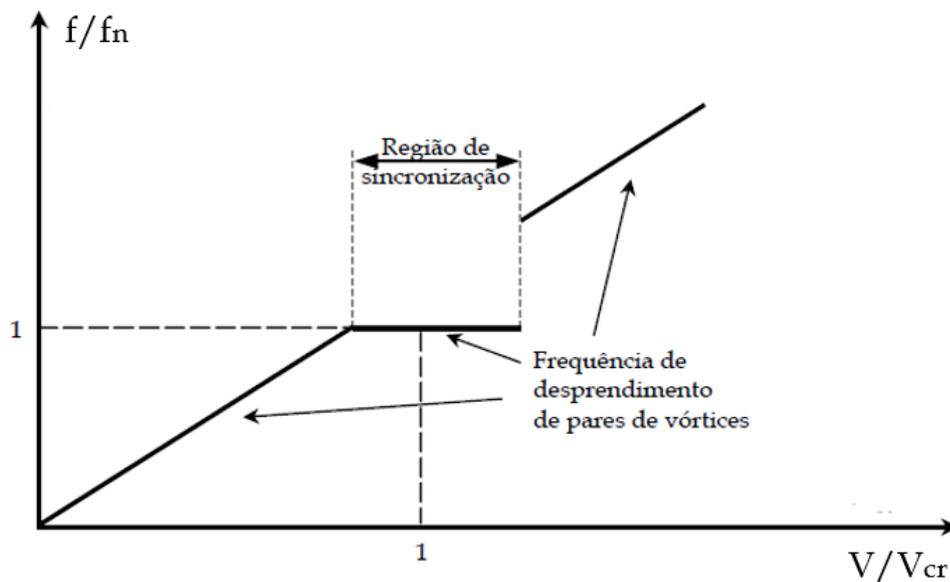


Figura 2.10: Representação do fenômeno de captura (fonte: adaptado de Blessmann, 2005).

Diante de um amortecimento estrutural menor é possível que faixa de velocidades do vento maior para a ocorrência do efeito de sincronização, devido a uma amplitude de oscilação maior (DYRBYE E HANSEN, 1997).

2.3.6 Análise no domínio da frequência e estudos relacionados ao fenômeno

De acordo com o que foi citado na seção (2.2), diante de uma variável aleatória o tratamento mais adequado passa pela utilização de medidas estatísticas como desvio padrão e correlações, incluindo densidades espectrais. Isso porque esse tipo de variável não pode ser determinado com exatidão por depender de fatores aleatórios, a citar a velocidade do vento em um dado instante do tempo (MELO, 2020).

Davenport (1967) elaborou uma abordagem para determinar a resposta ressonante induzida pelo vento em estruturas por meio do método do fator de rajada. Foram utilizados conceitos estatísticos de um processo aleatório estacionário à velocidade do vento utilizando distribuição Gaussiana, dessa forma determinando a velocidade de pico. A função de densidade espectral descreve a flutuação da velocidade em torno do seu valor médio. A utilização do método permite a determinação da resposta da estrutura em termos de deslocamento, partindo antes da determinação da força do vento sobre a estrutura.

Os conceitos intrínsecos ao método de Davenport estão esquematizados na Figura 2.11, no qual parte-se da determinação das flutuações de velocidade no domínio do tempo em torno de um valor médio. Com isso é possível a obtenção das forças aerodinâmicas exercidas pelo vento na estrutura, sendo a resposta da estrutura obtida pela solução da equação de movimento. No domínio da frequência, multiplicando-se o espectro de velocidade flutuante do vento pela função de admitância aerodinâmica, é possível determinar o espectro da força generalizada. Essa função de admitância aerodinâmica leva em consideração a correlação espacial das pressões na superfície. Ao final, o espectro da resposta é obtido a partir da função de admitância mecânica.

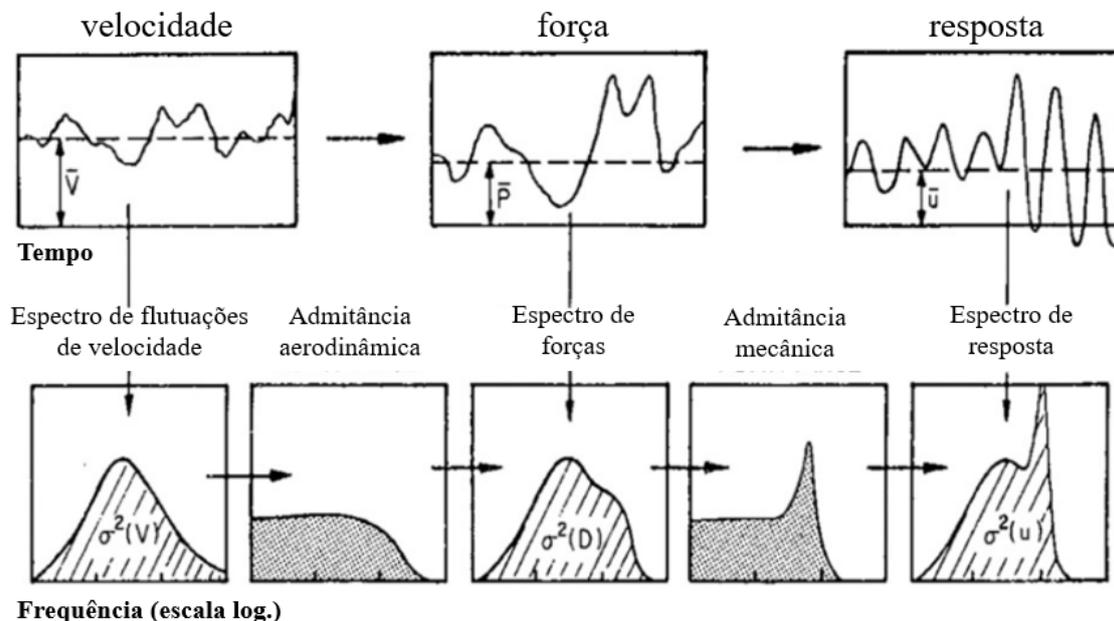


Figura 2.11: Processo probabilístico de Davenport (fonte: adaptado de Davenport, 1967).

O desprendimento de vórtices gera um espectro de força lateral $S_L(f)$ dado por:

$$S_L(f) = \frac{\left(\tilde{C}_L \frac{1}{2} \rho d V^2\right)^2}{\sqrt{\pi} B f_s} e^{-\left(\frac{1-f/f_s}{B}\right)^2} \quad (2.18)$$

em que \tilde{C}_L é o valor r.m.s. do coeficiente de força lateral e $B = 0,1 + 2l_1$ representa o parâmetro de largura de banda do espectro.

A Equação (2.19) representa a função de ganho (FLAY, 2015). Tal função, quando integrada em conjunto com o espectro de força lateral, compõe a função de admitância mecânica, permitindo, assim, o cálculo da resposta da estrutura:

$$H(f) = \frac{1}{\left\{ \left[1 - \left(\frac{f}{f_n} \right)^2 \right]^2 + \left[2 \zeta \frac{f}{f_n} \right]^2 \right\}^{1/2}} \quad (2.19)$$

Com os estudos desenvolvidos até então é possível resumir a distribuição das forças devidas ao fenômeno de desprendimento de vórtices na Figura 2.12, mesmo que existam diferenças entre os diversos estudos elaborados sobre o tema.

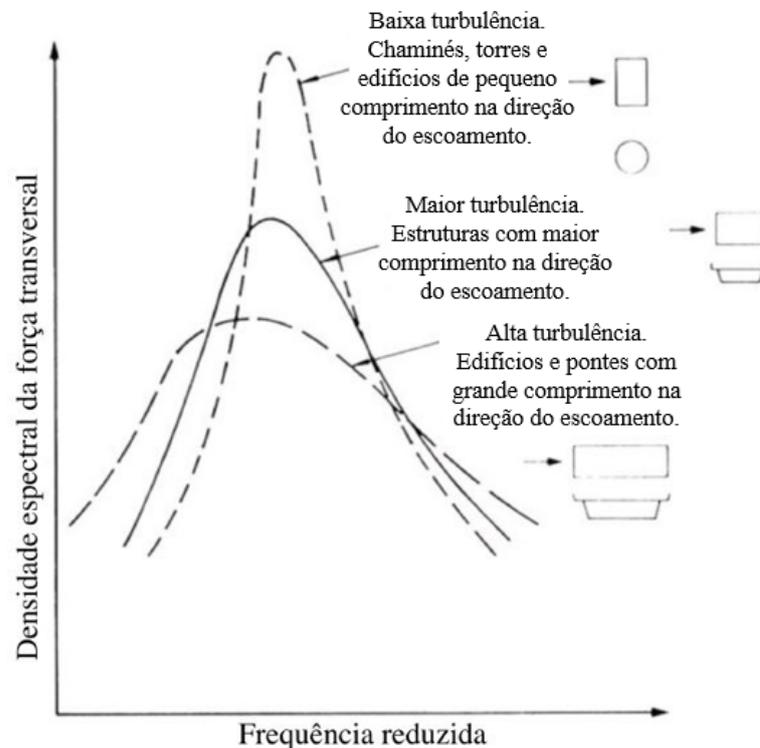


Figura 2.12: Espectro da força transversal para estruturas distintas (fonte: Adaptado de Melbourne, 1977).

O fenômeno de desprendimento de vórtices para estruturas que apresentam uma pequena esbelteza é menos organizado, o que explica o alargamento da banda do espectro de força transversal.

Outras pesquisas acerca do fenômeno podem ser encontradas na literatura, pois ainda é uma área da Engenharia do Vento que demanda esforços para que as lacunas do conhecimento sejam cada vez mais suprimidas.

Os estudos sobre o fenômeno e maneiras de estimar seus efeitos já fazem referência desde a década de 1970, quando Vickery e Clark (1972) propuseram uma formulação de espectro de força para simular o efeito do desprendimento de vórtices em um cilindro em repouso, desconsiderando a interação fluido-estrutura devido aos pequenos deslocamentos, porém levando em conta a influência da turbulência longitudinal como fator redutor da resposta.

Vickery e Basu (1983a, 1983b, 1984) e Basu e Vickery (1983) continuaram a contribuição com uma nova metodologia, após complementações e simplificações a partir dos próprios estudos por eles iniciados, sendo um dos modelos mais aceitos pela comunidade científica acerca dos efeitos do desprendimento de vórtices em estruturas cilíndricas de seção circular. Esse modelo é baseado na força de auto excitação não-linear, onde o termo proporcional à velocidade dá origem ao amortecimento aerodinâmico negativo (SANTOS e PFEIL, 2014).

Nakamura e Matsukawa (1986) analisaram, por meio de testes em túnel de vento, o efeito do fenômeno de desprendimento de vórtices em corpos de seção retangular para diferentes relações d/b . Os resultados mostraram que as vibrações provenientes do fenômeno são fortemente dependentes da relação d/b , constatando que, para os casos em que as incidências do vento onde d assume valores menores que b , as vibrações têm maior amplitude e apresentam os maiores valores para força lateral.

Wang *et al.* (2004) analisaram em túnel de vento o escoamento em torno de um cilindro de seção quadrada de comprimento finito com diferentes relações H/d (sendo H a altura do cilindro e d a dimensão paralela ao escoamento). As frequências dominantes de desprendimento de vórtices foram monitoradas com o auxílio de um fio quente e foi utilizada também uma velocimetria de imagem de partículas DANTEC (PIV) para caracterizar o escoamento nos planos perpendicular e paralelo ao escoamento para obter ao final do estudo propostas de modelos de estruturas de escoamento para diferentes proporções de prisma.

Shao *et al.* (2006) estudaram maneiras de mitigar as vibrações oriundas do desprendimento de vórtices em torres de seção circular e quadrada a partir da adição de um elemento de controle acoplado paralelamente ao eixo das estruturas. O objetivo do estudo foi determinar a melhor posição para o elemento de controle. Sendo que os resultados apresentados evidenciaram a supressão do desprendimento de vórtices para os casos ensaiados em túnel de vento.

Parracho (2012), analisou as vibrações transversais devidas ao fenômeno para torres cilíndricas a partir dos deslocamentos obtidos por meio de métodos analíticos e empíricos, comparando seus resultados com outros obtidos a partir de ensaios em túnel de vento e com outros modelos analíticos.

Nemes *et al.* (2012) realizaram estudos experimentais em um prisma de seção quadrada para analisar os ângulos de incidência nos quais o prisma pode sofrer vibrações induzidas por vórtices (VIV) ou galope. Foi possível constatar que para ângulos de incidência menores que $7,5^\circ$, o prisma sofre galope, além de observar que a transição de VIV para galope ocorre em uma curta faixa de ângulos entre $7,5$ e 10° .

Mannini *et al.* (2014) estudaram também a interação entre o galope e a ressonância por vibrações induzidas pelo desprendimento de vórtices em estruturas retangulares com o objetivo de caracterizar a seção retangular mais propensa a sofrer instabilidade, concluindo que a seção mais propensa a sofrer os efeitos dinâmicos é a de $3/2$ (d/b).

Santos e Pfeil (2014), no âmbito nacional, também apresentaram considerações importantes acerca do fenômeno estudando o caso de vibrações induzidas por vórtices oriundos de ventos de tormentas EPS (ciclones extratropicais) em torres de seção circular, desenvolvendo uma análise teórico-numérica por métodos de domínio do tempo e da frequência.

Banafsheh *et al.* (2020) analisaram as VIV e o galope em prismas de seção triangular a partir de um estudo experimental. Eles constataram, dentre diversas observações, que para ângulos de incidência menores que 25° (considerando que o ângulo 0° corresponde à condição em que um dos vértices está voltado para barlavento) nenhuma oscilação é observada em toda a faixa de velocidade reduzida testada. Em ângulos de incidência iguais a 30° e 35° , existe uma faixa de velocidades em que o prisma é submetido a VIV, já para ângulos maiores que 35° este experimenta oscilações de amplitude crescente continuamente com o aumento da velocidade reduzida, dando lugar a uma resposta induzida por galope.

Lopatinski (2020), em seu estudo, analisou as vibrações por vórtices com foco no estado limite de serviço de edifícios altos, onde foi realizada uma comparação entre uma análise baseada no Método dos Elementos Finitos e procedimentos normativos. Ao final, constatou que os procedimentos normativos comparados apresentaram resultados mais conservadores do que as estimativas encontradas a partir do Método de Elementos Finitos, porém ressaltando que o procedimento precisa de comparações com dados obtidos a partir de medições em escala real para avaliar sua precisão.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta-se o túnel de vento utilizado para os estudos experimentais deste trabalho. É apresentada também a caracterização do túnel de vento *Professor Joaquim Blessmann*, os parâmetros para a modelagem do vento natural, assim como a apresentação dos modelos reduzidos utilizados.

3.1 TÚNEL DE VENTO *PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN*

O túnel de vento *Professor Joaquim Blessmann* (Figura 3.1) tem sua fundação no ano de 1977 e está localizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), mais precisamente no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC). O LAC é responsável por inúmeras contribuições técnicas, normativas e científicas no Brasil (e fora do país) por meio dos diversos estudos realizados na área de Engenharia do Vento.

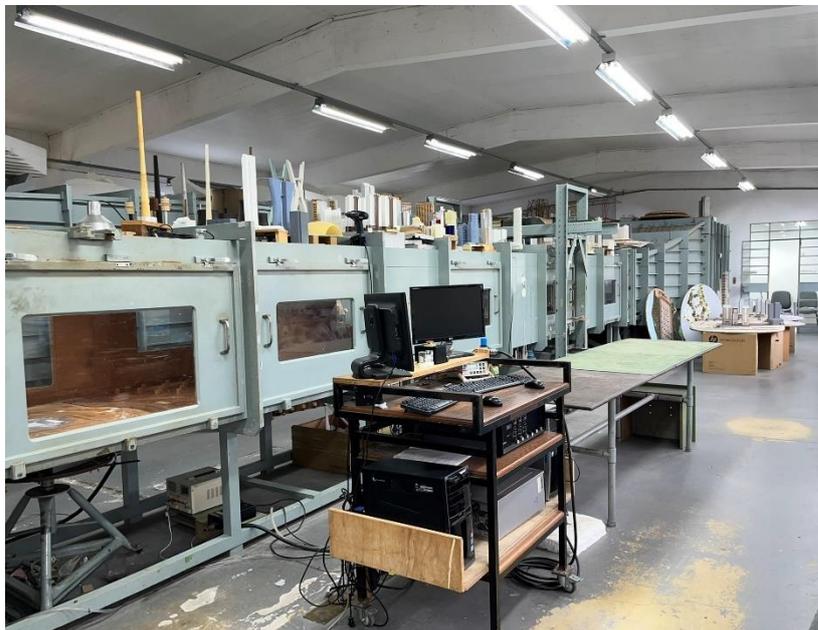


Figura 3.1: Túnel de vento *Professor Joaquim Blessmann* (fonte: autor).

O túnel de vento em questão é classificado quanto à circulação como de circulação fechada e tem como tipo de vento simulado em seu interior o de camada limite, sendo produzidos ventos suaves e turbulentos. A câmara principal de realização da maioria dos estudos neste túnel de

vento, que engloba as mesas M-I e M-II, possui dimensão de 1,30 x 0,90 x 9,32 metros de largura, altura e comprimento, respectivamente. A velocidade máxima atingida em seu interior pode ser superior a 45 m/s, considerando a ausência de modelos e considerando um vento suave e uniforme (Blessmann, 2011). Os estudos realizados no LAC englobam os de efeitos estáticos e dinâmicos sobre construções em geral, vizinhança e seus usuários. No que se refere ao meio ambiente também são realizadas análises de dispersão de poluentes e resíduos na atmosfera. A Figura 3.2 mostra o circuito aerodinâmico do túnel em questão, além das mesas de ensaios que o compõe.

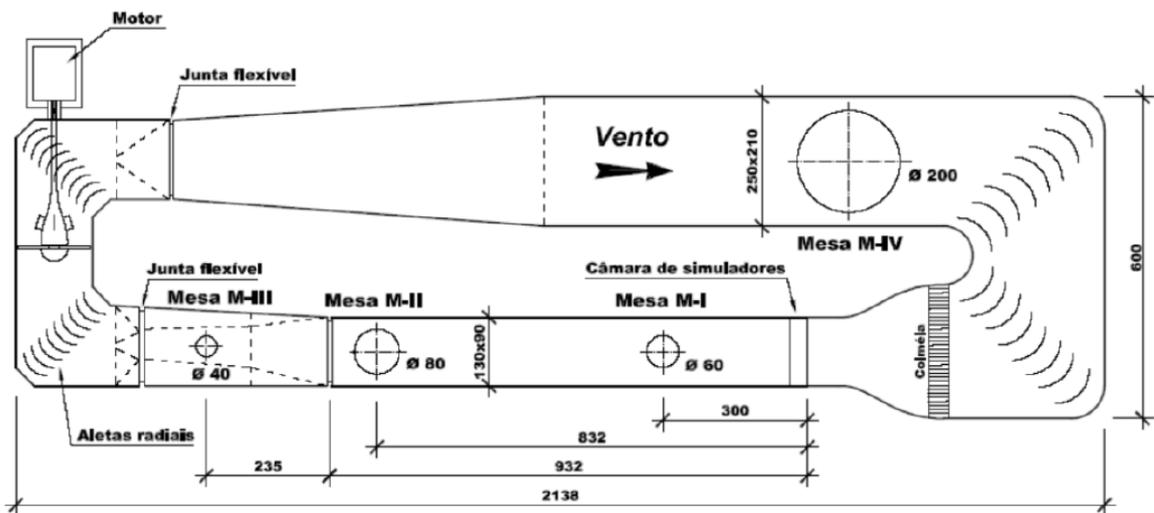


Figura 3.2: Circuito aerodinâmico do túnel de vento *Professor Joaquim Blessmann*, dimensões em cm (fonte: adaptado de Oliveira, 2009).

As mesas presentes no túnel são: Mesa M-I, M-II, M-III e M-IV. Cada mesa tem seu uso específico para cada tipo de ensaio e os diâmetros de cada uma, respectivamente, são 60, 80, 40 e 200 centímetros. Para o presente trabalho foi utilizada a Mesa M-II, direcionada, geralmente, para ensaios de modelos rígidos para a construção civil em análises estáticas. A relação comprimento/altura nesta seção é superior a 10, ideal para a formação completa da camada limite. Nesta seção é possível obter os perfis de velocidade desejados por meio da adição de elementos na entrada e ao longo do túnel.

Com o intuito de calcular a velocidade média do vento em cada ensaio, três variáveis são medidas, a citar: diferença de pressão estática (ΔP_a), temperatura (θ) e pressão atmosférica (P_{am}), onde a diferença de pressão estática é obtida a partir da medição de dois anéis

piezométricos localizados nos extremos convergentes da câmara principal, com unidade em mmH₂O.

A pressão dinâmica de referência (q) é o produto entre o ΔP_a e um coeficiente adimensional k_0 , o qual varia com o perfil de velocidade do vento estudado e com a altura no interior do túnel, sendo este normalmente definido em relação ao topo do modelo, como mostra a equação (3.1).

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

A velocidade média no topo do modelo será então definida pela equação a seguir:

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

em que \bar{V}_h é a velocidade média no topo do modelo (m/s), \bar{q}_h a pressão dinâmica média no topo do modelo (mmH₂O), k_b o fator de bloqueio e ρ_{ar} a massa específica do ar (kg/m³). o fator de bloqueio é influenciado pelo bloqueio de parte da seção transversal do túnel, disponível para o escoamento dentro do túnel de vento, pelo próprio modelo a ser ensaiado. Para este estudo o valor adotado para k_b será igual a 1, pois considerou-se que a influência área bloqueada pelo Modelo isolado posicionado no centro da mesa M-II sobre os resultados é desprezível.

A massa específica do ar ρ_{ar} é calculada a partir de parâmetros obtidos durante os ensaios tais como a pressão atmosférica P_{atm} em Pascal e a temperatura θ em graus Celsius. A massa específica do ar é definida então pela equação:

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

sendo R a constante universal dos gases, que para o ar seco é igual a 287,05 J/kgK. Porém, para o presente estudo ρ_{ar} é considerada igual a 1,226 kg/m³, em conformidade com o que está presente na NBR – 6123.

3.2 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL

Para a adequada simulação do vento próximo do que se presencia na realidade é necessária a consideração correta das características do vento natural, isso é um pré-requisito básico para a aplicação na Engenharia do Vento. Essas características são obtidas por meio de obstáculos que simulam a rugosidade do terreno, dispostos ao longo do piso do túnel e combinados com dispositivos verticais posicionados no início da câmara de ensaios, os quais geram turbulência no escoamento. A simulação do vento citada é um método denominado “passivo” (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2004) e é o método mais utilizado no túnel de vento *Professor Joaquim Blessmann*. Os dispositivos mencionados que conferem as características do vento que se deseja incluem blocos paralelepípedicos constituídos de chapas de madeira, os quais são fixados no piso do túnel, gavetas com agulhas e placas verticais perfuradas, posicionadas na vertical, e outros elementos. A Figura 3.3 ilustra algumas combinações com os elementos citados para quatro tipos de escoamento.

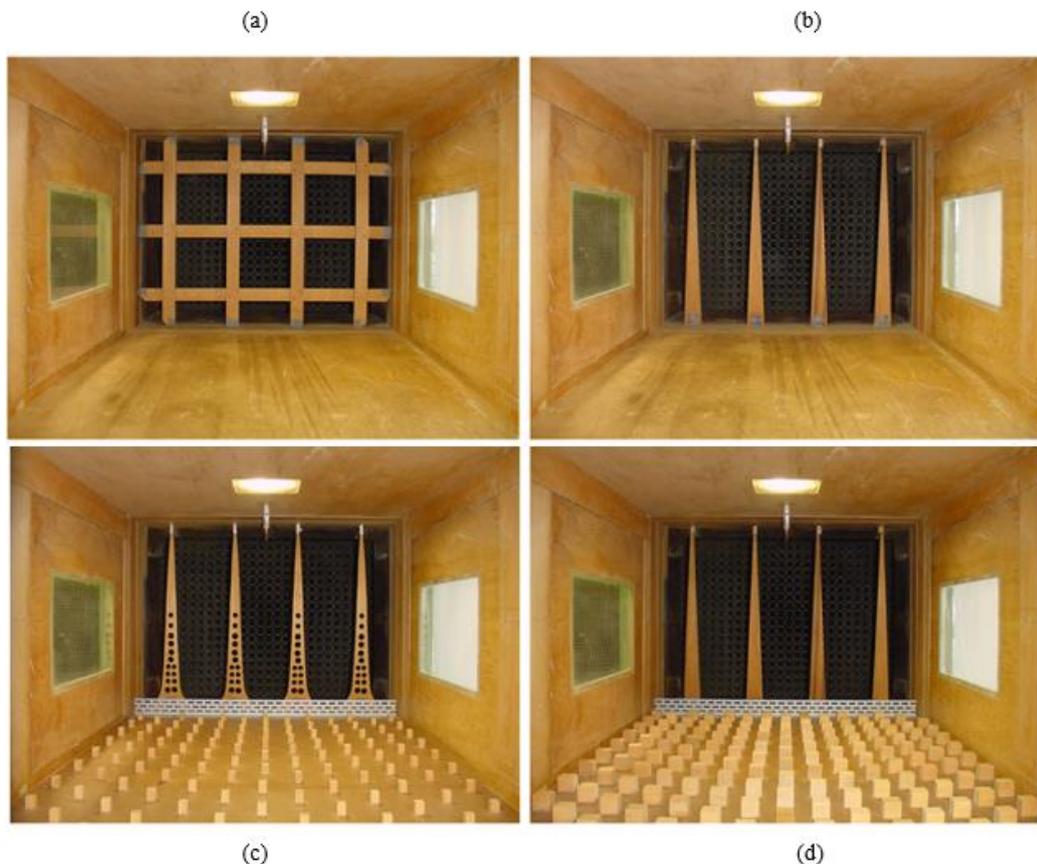


Figura 3.3: Elementos de geração das diferentes camadas-limite do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann: (a) grelha; (b) $p = 0,11$; (c) $p = 0,23$; (d) $p = 0,34$ (fonte: adaptado de Loredo-Souza *et al.*, 2004).

Os coeficientes p , que se referem às diferentes camadas-limite expostas, são utilizados na Equação (2.1), lei potencial. Na Mesa M-II do túnel em questão, são simulados os ventos suave e turbulento, segundo os perfis de velocidades que são descritos pela lei potencial. Na norma brasileira NBR – 6123 (1988) são apresentadas algumas categorias de terreno e suas características, onde cada uma dessas tem um valor de p associado, como por exemplo, para $p = 0,23$ tem-se as correspondências entre as categorias III e IV, sendo a categoria III um terreno plano ou ondulado com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas.

A Figura (3.4) ilustra algumas características dos perfis de velocidade média, intensidade I_l e a macroescala da componente longitudinal de turbulência L_l , para três diferentes valores do expoente p .

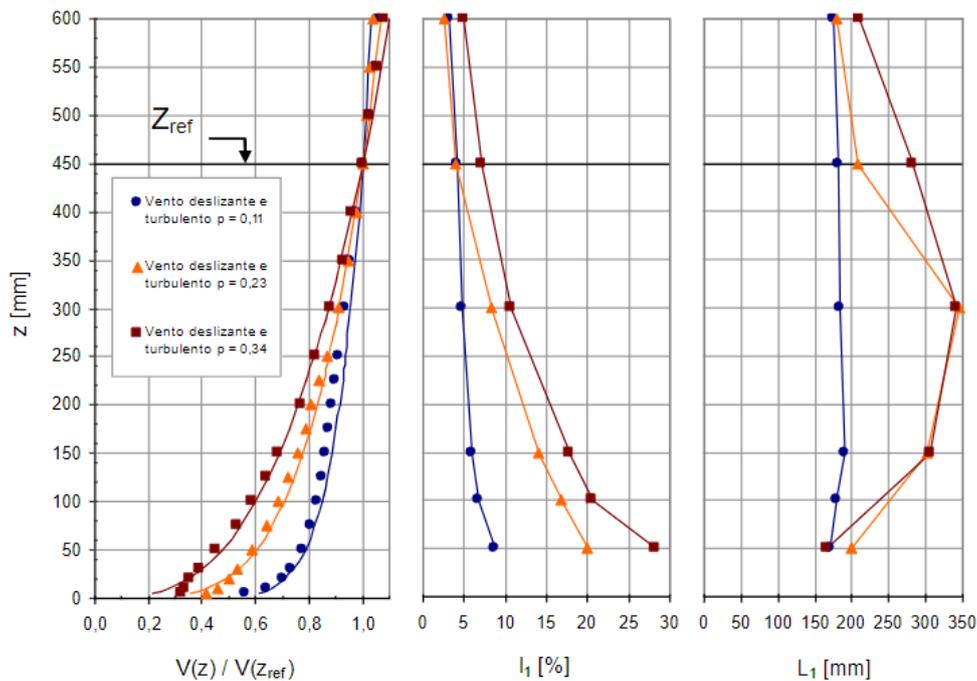


Figura 3.4: Perfis de velocidade média, intensidade e macroescala da componente longitudinal da turbulência, para o eixo vertical de duas câmaras de ensaio do túnel de vento (fonte: Núñez, Loredo-Souza e Rocha, 2012).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS

Com o intuito de expandir e contribuir com os estudos acerca do fenômeno de desprendimento de vórtices em estruturas paralelepípedicas foram selecionadas relações dimensionais ($h/d/b$) que abrangem edifícios construídos atualmente no Brasil e possuem dimensões que preencham outras opções de possíveis projetos de novas estruturas, em que h é a altura do modelo, d a dimensão do modelo transversal ao escoamento do vento e b a dimensão do modelo na direção do escoamento. Vale ressaltar que um modelo reduzido é resultado de um processo de interação entre os parâmetros de similaridade a serem atingidos e as limitações existentes no túnel de vento, visando que as condições do modelo e do ensaio representem uma situação real (NÚÑEZ; LOREDO-SOUZA; ROCHA, 2012).

Os ensaios realizados foram direcionados para o escoamento $p = 0,23$, categoria presente na NBR – 6123. Para cada ensaio o modelo foi submetido a 24 diferentes ângulos de incidência de vento a cada 15° (0° a 345°), sem a inserção de outros modelos que configurassem algum efeito de vizinhança, ou seja, foi considerada somente a configuração isolada de cada modelo. Os modelos foram confeccionados em peças de acrílico com 3,0 milímetros de espessura com paredes internas e externas planas, sem parapeitos ou sacadas. A geometria dos modelos e a consideração dos eixos X , Y e Z são mostradas na Figura 3.5.

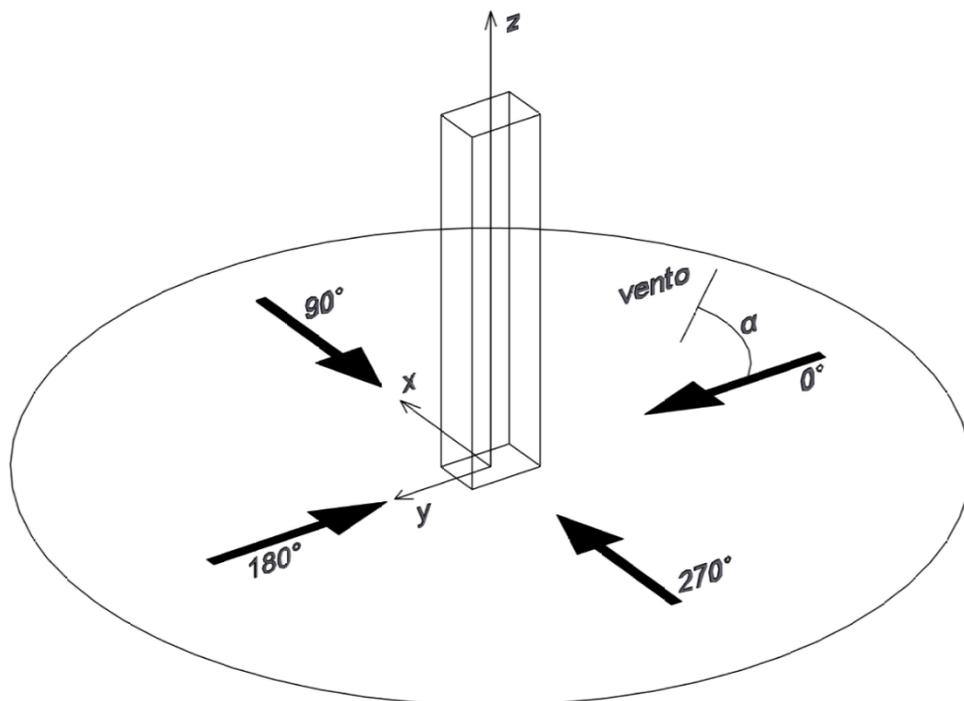


Figura 3.5 Geometria dos modelos ensaiados e eixos de coordenadas considerado (fonte: autor).

Para a validação dos resultados foram ensaiados dois modelos propostos por Grala (2020), denominados Grupo 1. Já para este trabalho, as relações denominadas Grupo 2 são referentes aos edifícios construídos nos últimos anos no Brasil e para o Grupo 3 as relações intermediárias propostas no estudo de referência, mas que não foram investigadas. As relações $h/d/b$ de cada grupo de ensaio são apresentadas na Tabela 3.1. Como os modelos foram submetidos a 24 ângulos de incidência e por apresentarem as dimensões d e b diferentes, cada um será avaliado em duas relações dimensionais, pois hora o vento incidirá perpendicularmente sobre a menor face e hora sobre a maior, alterando assim o valor de d .

Tabela 3.1: Relações dimensionais estudadas.

Grupo	Relações $h/d/b$			Identificação do Modelo
	h	d	b	
1	6,0	1,0	3,0	1
	6,0	3,0	1,0	
	9,0	1,0	3,0	2
	9,0	3,0	1,0	
2	7,5	1,0	1,5	3
	7,5	1,5	1,0	
	6,5	1,0	1,5	4
	6,5	1,5	1,0	
	5,5	1,0	1,5	5
	5,5	1,5	1,0	
3	3,0	1,0	2,0	6
	3,0	2,0	1,0	
	3,0	1,0	1,5	7
	3,0	1,5	1,0	
	6,0	1,0	2,5	8
	6,0	2,5	1,0	
	9,0	1,0	2,5	9
	9,0	2,5	1,0	

(fonte: autor).

Na Figura 3.6 tem-se a identificação e as dimensões dos modelos do Grupo 1. Todos os modelos de cada grupo foram construídos na escala 1:400, de forma geral, tal escala abrange uma gama de alturas reais equivalentes entre 118 a 150 metros. A adoção da escala em questão objetivou a limitação do maior valor para a altura h dos modelos reduzidos a serem estudados na mesa

M-II, para que não houvesse interferência da parede superior da câmara do túnel sobre os resultados dos ensaios.

A instrumentação dos modelos foi realizada com tomadas de pressão distribuídas em linhas horizontais ao longo da altura, ou seja, de maneira variável, buscando-se atingir um equilíbrio entre a limitação física do volume de tomadas internas a cada Modelo e as regiões de interesse de medição. Vale ressaltar também que os modelos ensaiados são considerados rígidos, porém na prática não é possível atingir tal condição, pois pequenas vibrações sempre vão ocorrer durante os ensaios à medida que forças alternadas são exercidas sobre o modelo.

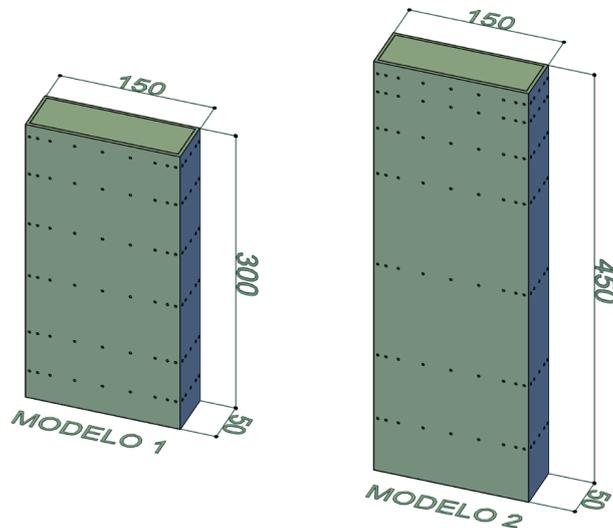


Figura 3.6 Identificação das características dos modelos do Grupo 1, medidas em mm (fonte: autor).

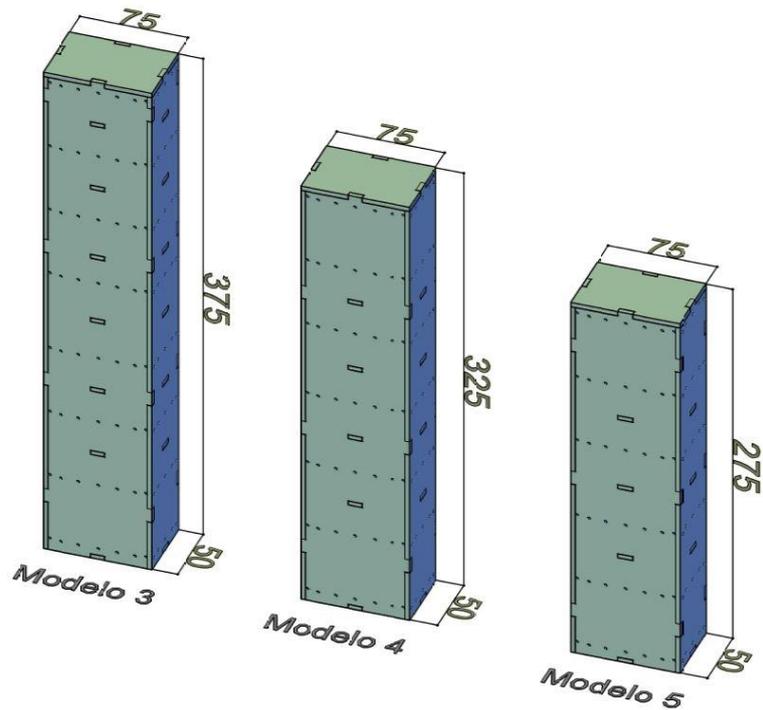


Figura 3.7: Identificação das características dos modelos do Grupo 2, medidas em mm (fonte: autor).

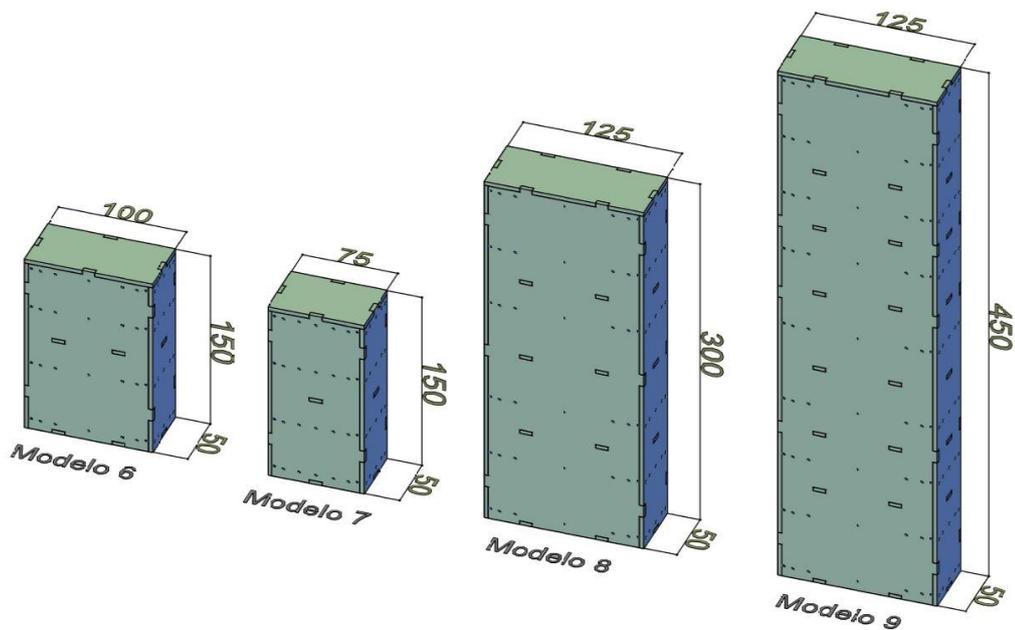


Figura 3.8: Identificação das características dos modelos do Grupo 3, medidas em mm (fonte: autor).

A distribuição das tomadas de pressão segue a mesma proporção para todos os modelos a serem ensaiados e do Quadro 3.1 ao Quadro 3.3 são indicadas as características de cada um.

Quadro 3.1: Características dos modelos 1 e 2 ensaiados no Grupo 1.

Características	Modelo 1		Modelo 2	
h/d/b	6/1/3	6/3/1	9/1/3	9/3/1
h (mm)	300		450	
d (mm)	50	150	50	150
b (mm)	150	50	150	50
Escala	1:400		1:400	
Número de tomadas	168		196	

(fonte: autor).

Quadro 3.2: Características dos modelos 3, 4 e 5 ensaiados no Grupo 2.

Características	Modelo 3		Modelo 4		Modelo 5	
h/d/b	7,5/1/1,5	7,5/1,5/1	6,5/1/1,5	6,5/1,5/1	5,5/1/1,5	5,5/1,5/1
h (mm)	375		325		275	
d (mm)	50	75	50	75	50	75
b (mm)	75	50	75	50	75	50
Escala	1:400		1:400		1:400	
Número de tomadas	192		168		144	

(fonte: autor).

Quadro 3.3: Características dos modelos 6, 7, 8 e 9 ensaiados no Grupo 3.

Características	Modelo 6		Modelo 7		Modelo 8		Modelo 9	
h/d/b	3/1/2	3/2/1	3/1/1,5	3/1,5/1	6/1/2,5	6/2,5/1	9/1/2,5	9/2,5/1
h (mm)	150		150		300		450	
d (mm)	50	100	50	75	50	125	50	125
b (mm)	100	50	75	50	125	50	125	50
Escala	1:400		1:400		1:400		1:400	
Número de tomadas	96		96		144		216	

(fonte: autor).

A disposição das tomadas de pressão para cada face dos modelos é apresentada na Figura 3.9. As distâncias para alocação de cada ponto de tomadas de pressão são referentes à aresta mais próxima, a partir de então na face de maior dimensão foram alocadas a 4 mm, 12 mm e 24 mm, além de ser posicionada uma tomada central em cada cota. Nas faces onde a menor dimensão é igual a 50 mm as tomadas foram posicionadas a 4 mm e 12 mm da aresta mais próxima, além de uma no centro de cada cota.

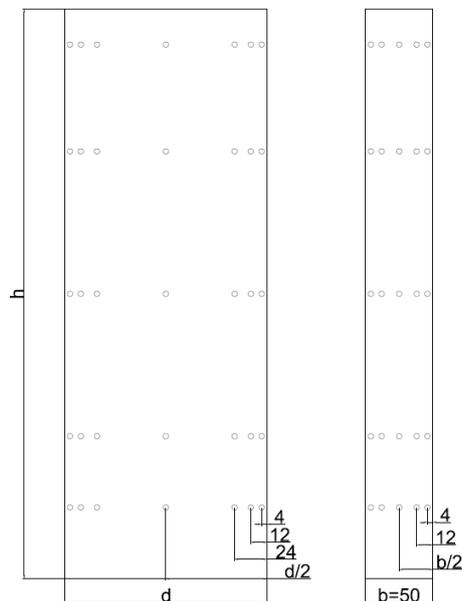


Figura 3.9: Alocação das tomadas de pressão nas faces dos modelos, medidas em mm. (fonte: autor).

A Figura 3.10 ilustra a direção em que o vento incide de acordo com os ângulos para os quais cada modelo foi ensaiado, assim como o eixo de coordenadas X e Y considerado para o estudo em uma vista em planta.

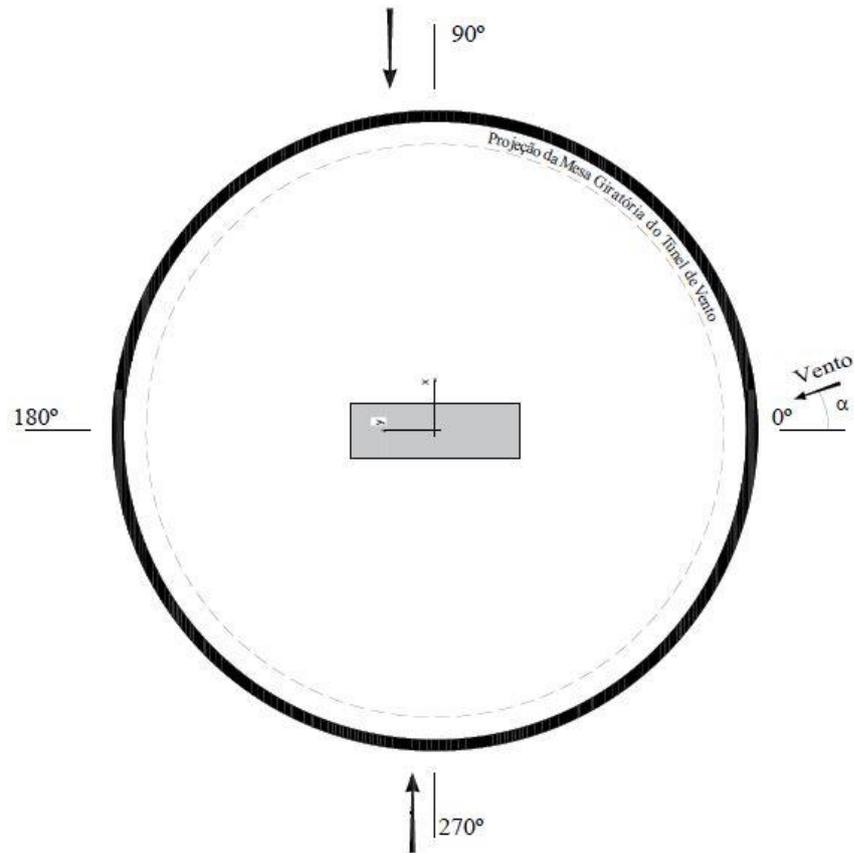


Figura 3.10: Posição do modelo na mesa de ensaio em planta (fonte: autor).

Para o ângulo 0° , em todos os modelos ensaiados, o eixo de arrasto e o de força lateral coincidem com os eixos Y e X , respectivamente.

3.4 PROGRAMA EXPERIMENTAL E TRATAMENTO DE DADOS

A partir do posicionamento das tomadas de pressão, os modelos são instrumentados por meio de tubos pneumáticos que possuem cerca de 1,5 mm de diâmetro, os quais em seguida são conectados a transdutores de pressão. A Figura 3.11 apresenta os tubos pneumáticos citados e os transdutores, sendo esses responsáveis pela conversão das medições de pressões nos pontos

alocados em sinais elétricos analógicos, os quais são adquiridos por um sistema computadorizado de aquisição de dados e armazenados para posterior processamento.



Figura 3.11: Transdutores de pressão e tubos pneumáticos conectados (fonte: autor).

O sistema de aquisição é composto ainda pelo receptor dos transdutores, que adquire as medições e é composto pela fonte alimentadora de tensão e corrente que permite o funcionamento do sistema (Figura 3.12). Os aparelhos de aquisição são conectados ao computador, que por meio do *software RAD4000*, da empresa *Scanivalve*, são controlados em todo o processo. Cada aquisição de dados demanda 16 segundos a uma taxa de aquisição de aproximadamente 500 Hz, totalizando 8192 dados por tomada de pressão.



Figura 3.12: Sistema de aquisição de dados completo: (a) receptor dos transdutores de pressão; (b) fonte alimentadora de tensão e corrente; (c) computadores com softwares de comando dos ensaios no túnel de vento (fonte: autor).

Para o cálculo dos coeficientes r.m.s. de força de arrasto \tilde{C}_a (CFD), força lateral \tilde{C}_L (CFL) e coeficientes de força nas direções X e Y, \tilde{C}_x (CFx) e \tilde{C}_y (CFy), respectivamente, é associada uma área A de uma das faces do modelo, que para esse estudo será sempre tomada a área da maior face com o objetivo de simplificar os processos de cálculos dos coeficientes, sem prejuízo de comparação com os resultados de estudos semelhantes. Essa equação para coeficientes de força é descrita pela equação:

$$CF_i = \frac{1}{A} \int_A c_p n_i dA \quad (3.4)$$

Onde CF_i é o coeficiente de força i , n_i o cosseno diretor da normal em um ponto da face que se deseja obter o coeficiente de força i de cada ponto de pressão em relação ao plano XY e dA é a área de influência de cada tomada de pressão no modelo.

Nesse estudo o valor r.m.s. é utilizado como o desvio padrão para tratar da parte flutuante das forças. Quando o vento incidente é perpendicular à fachada de edifícios que são simétricos, a média da força na direção transversal é igual a zero e o valor r.m.s. coincide com o desvio padrão. Quando essa simetria não ocorre, ou seja, para outros ângulos e edifícios que não apresentam simetria, o valor da média se torna diferente de zero e o valor r.m.s. também difere do desvio padrão.

Vale reforçar também que a obtenção da frequência de desprendimento de vórtices foi dada por meio da utilização da Figura 2.9, a qual permite estimar o valor de St , o qual, no presente estudo, é denominado St Eurocódigo para cada Modelo. A partir da obtenção de St Eurocódigo é calculada a frequência de desprendimento de vórtices f_s Eurocódigo.

Realizada a análise dos coeficientes r.m.s. da força lateral, escolheu-se os ângulos em que tal coeficiente apresentou seu maior valor. A partir da escolha dos ângulos, os espectros da força lateral adimensionalizados foram gerados por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT – Fast Fourier Transform), que se apresenta como uma ferramenta algorítmica bastante eficiente e rápida para a realização de operações matemáticas de grande ordem (COOLEY e TUKEY, 1965). Tal algoritmo foi utilizado através da biblioteca *Numpy*, presente na linguagem de programação Python.

Dado que a aplicação da FFT permite o fornecimento de números complexos simétricos em torno de uma frequência central, apenas metade do sinal é necessária quando se consideram os valores absolutos. Dessa forma, a densidade espectral de potência é obtida pela equação.

$$PSD(f) = 2 \frac{\Delta t}{N} |FFT_k|_{k=2}^{N/2}|^2 \quad (3.5)$$

onde $PSD(f)$ é a densidade espectral de potência e N é o número de pontos da amostra.

Os espectros obtidos no presente estudo são apresentados para os escoamentos incidindo a 90° das fachadas e são adimensionalizados por $(0,5 \rho_{ar} V^2 d h)^2$, os quais são parâmetros relativos às propriedades dos respectivos modelos a que se referem e informações referentes aos ensaios

realizados. O motivo da utilização de tais parâmetros para adimensionalização surge a partir da proposta de metodologia para a NBR – 6123 presente em Grala (2020), baseada na metodologia presente na Norma Australiana e Neozelandesa (STANDARDS AUSTRALIA, 2011) para estimativa dos efeitos provenientes do desprendimento de vórtices em estruturas de seção retangular.

Além disso, os resultados dos espectros dos Modelos 1 e 2 foram suavizados a partir de um filtro de média móvel de 16 períodos, a fim de garantir a fidelidade da comparação com o estudo de referência, o qual mescla. O filtro em questão mescla dados resultantes em um dado instante específico com dados de momentos passados e futuros. O objetivo da utilização do filtro em questão se deu pela sua aplicação em sistemas com conjunto de dados armazenados previamente, como é o caso do presente estudo.

No entanto, para os demais modelos estudados, o filtro utilizado passou a ser de 96 períodos, objetivando a obtenção de curvas com menos ruídos. Os ruídos são os valores flutuantes que foram calculados nas séries temporais e que dificultam a identificação de padrões de comportamento no sinal a ser analisado no domínio da frequência. Para tanto, considerou-se que para existir um equilíbrio entre a preservação das características dos espectros e a redução do ruído, optou-se por escolher um valor múltiplo de 16 de maneira iterativa após a obtenção dos dados, o qual é o período de obtenção das aquisições (16 segundos) para cada um dos 24 ângulos de incidência do vento analisados. Tais espectros são obtidos somente para os ângulos produziram os maiores valores para o coeficiente r.m.s. de força lateral. A Figura 3.13 ilustra a suavização de uma série após a aplicação do filtro citado.

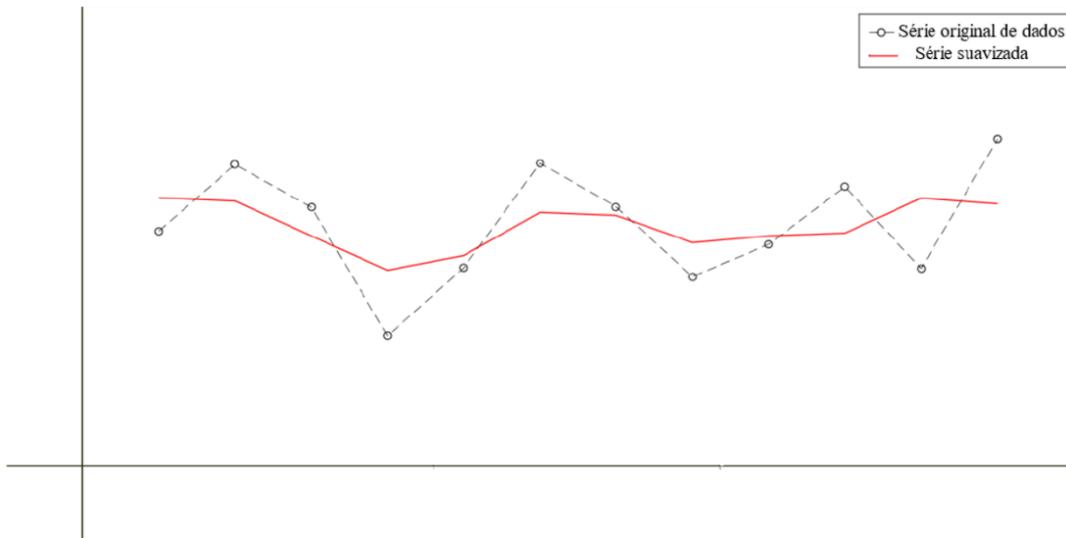


Figura 3.13: Efeito da aplicação do filtro de média móvel em uma série de dados (fonte: adaptado de Melo, 2020).

Por fim, os valores médios dos coeficientes de força foram verificados para todos os modelos ensaiados, os quais apresentaram resultados coerentes com o esperado. Apesar de não serem apresentados neste estudo, para todos os modelos foram observados valores coerentes com o esperado para uma distribuição média de tais coeficientes.

4 RESULTADOS

Este capítulo dedica-se à apresentação dos principais resultados obtidos por meio dos ensaios realizados no túnel de vento. Serão mostradas as distribuições dos coeficientes de pressão externas nas faces de determinados modelos para determinados ângulos de incidência. Além disso, serão apresentados os coeficientes r.m.s. de força em função do ângulo de incidência do vento para cada modelo ensaiado. Em seguida serão exibidos os espectros de potência da força lateral para cada relação dimensional estudada.

4.1 MODELOS DO GRUPO 1

Conforme mencionado anteriormente, os modelos pertencentes ao Grupo 1 foram previamente testados por Grala (2020). Tais modelos foram reensaiados com o objetivo de comparar os resultados, de forma a confirmar os mesmos procedimentos que são aplicados no presente estudo. A Figura 4.1 apresenta a identificação do Modelo 1, posicionado dentro da câmara de ensaio na Mesa M-II.



Figura 4.1: Modelo 1 do Grupo 1 na Mesa M-II do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (fonte: autor).

A Figura 4.2 apresenta o Modelo 2, o qual também foi ensaiado para as mesmas condições que se refere a categoria IV ($p = 0,23$) da NBR – 6123.



Figura 4.2: Modelo 2 do Grupo 1 na Mesa M-II do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (fonte: autor).

O Modelo 1 foi analisado nas relações dimensionais $6/1/3$ e $6/3/1$, uma vez que a dimensão d corresponde à dimensão do modelo na direção transversal ao escoamento. Tal modelo possui 168 tomadas de medição dispostas em 6 cotas distribuídas ao longo de sua altura. Vale ressaltar que, os ângulos 0° e 180° ($6/1/3$) correspondem ao vento incidindo perpendicularmente à menor face do modelo e os ângulos 90° e 270° ($6/3/1$) resultam em incidências perpendiculares à maior face. Para cada modelo ensaiado foi gerado o espectro de potência da força lateral para o ângulo em que o coeficiente r.m.s. de força lateral foi o maior obtido entre os ângulos em que a face estiver perpendicular à incidência do vento. Como o presente estudo não possui análises para seções transversais quadradas, cada modelo terá duas relações dimensionais, como exposto na Seção 3.3.

O Modelo 2 possui 196 tomadas dispostas em 7 cotas ao longo da altura, sendo analisado para as mesmas condições que o Modelo 1, nas relações dimensionais $9/1/3$ e $9/3/1$, respeitando a direção de incidência do vento e com a dimensão d transversal ao escoamento.

Para o escoamento $p = 0,23$, o qual foi adotado para o presente estudo, os resultados a serem comparados com os que foram obtidos no estudo de referência para os coeficientes de força em X e Y estão presentes na Figura 4.3, para o Modelo 1. É possível observar que os valores dos coeficientes obtidos no presente trabalho são coerentes com os obtidos no estudo de referência, tanto para \tilde{C}_x quanto para \tilde{C}_y .

A diferença presente nos resultados evidencia que, mesmo em condições semelhantes de instrumentação e confecção dos modelos, os valores obtidos não serão iguais, pois todos os processos são realizados de forma manual, desde a instrumentação até o posicionamento do modelo em cada ângulo de incidência estudado. Tais processos influenciam diretamente nos resultados, então por mais que os procedimentos sejam altamente controlados, imperfeições nas montagens dos modelos, posicionamento deslocado dos 15° na mesa giratória e condições ambientais distintas sempre existirão.

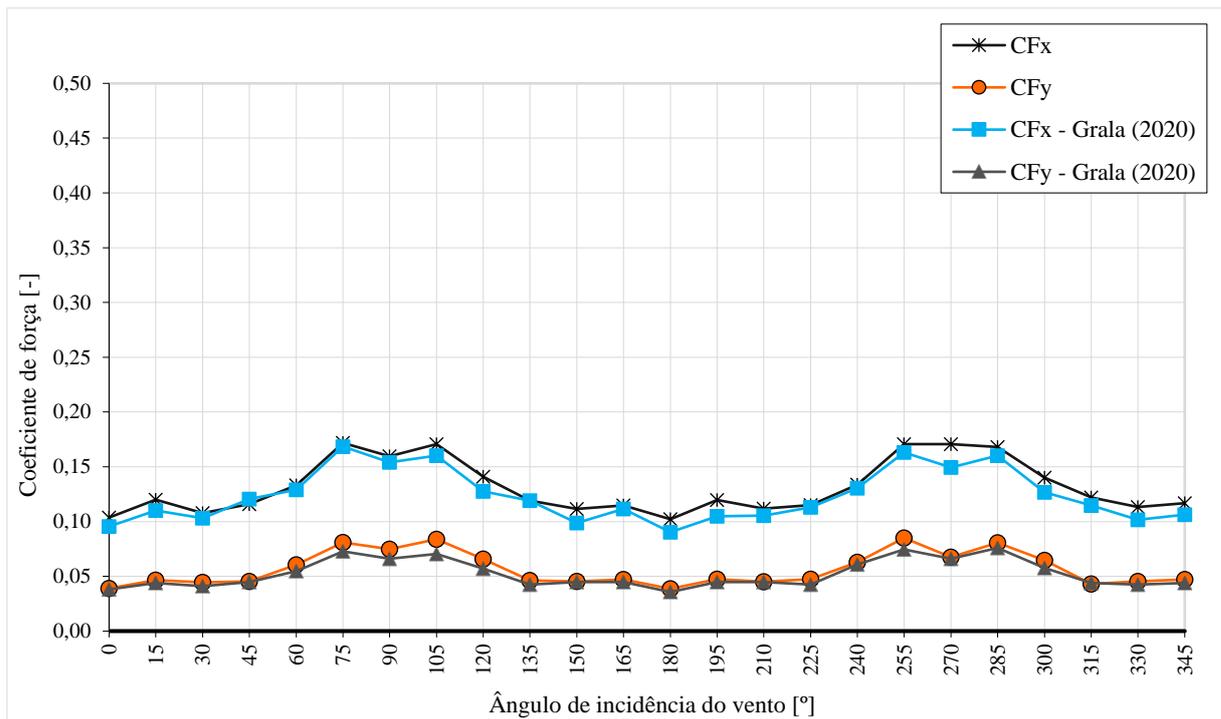


Figura 4.3: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx) e \tilde{C}_y (CFy) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 1 (fonte: autor).

Da mesma forma, é possível notar os valores bem próximos para os coeficientes \tilde{C}_L e \tilde{C}_a , presentes na Figura 4.4.

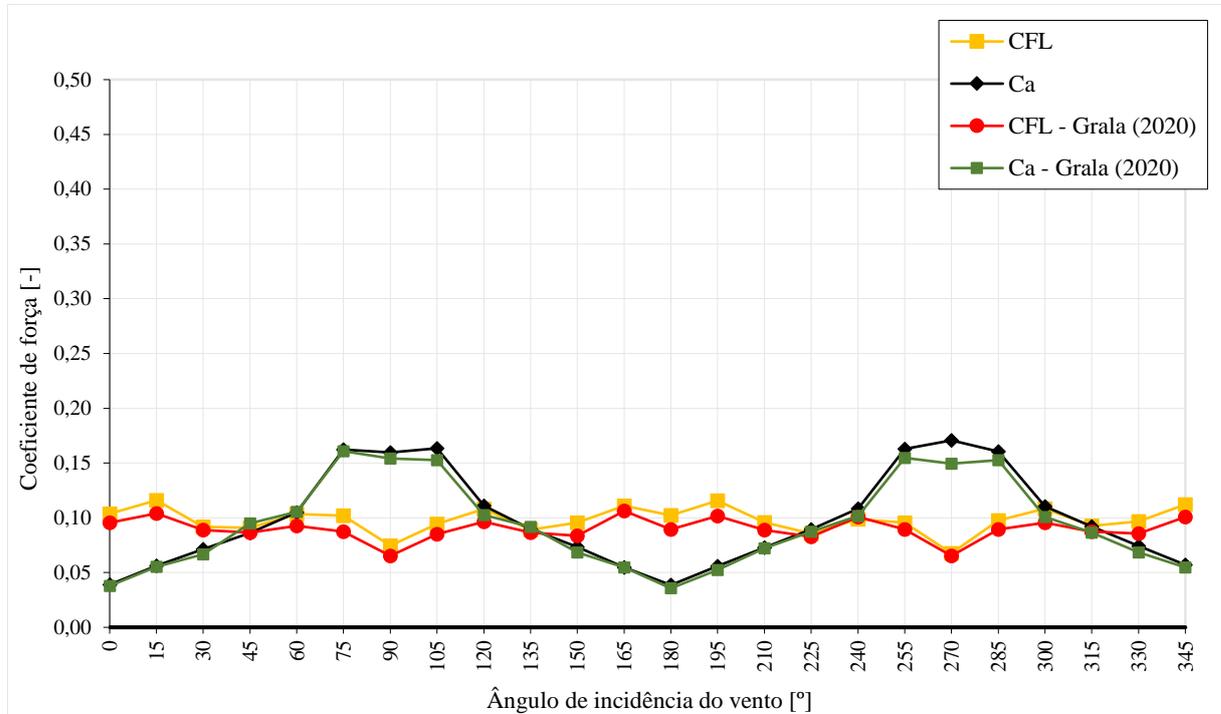


Figura 4.4: Coeficientes de força \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 1 (fonte: autor).

Os espectros adimensionalizados da força lateral S_L obtidos no presente trabalho também são comparados. No Quadro 4.1 encontram-se os parâmetros e resultados utilizados para a determinação dos espectros do Modelo 1.

Quadro 4.1: Parâmetros e resultados do Modelo 1.

Parâmetros	Modelo 1	
	6/1/3	6/3/1
h (m)	0,3	0,3
d (m)	0,05	0,15
b (m)	0,15	0,05
k_0	0,989	0,989
CFL	0,104	0,075
ρ (kg/m ³)	1,226	1,226
p	0,23	0,23
V (m/s)	22,86	23,09
Δp_a (mmH ₂ O)	31,3	31,4
P_{atm} (mmHg)	99,93	99,87
t (°C)	26,6	31,4
St Eurocódigo	0,05	0,12
f_s Eurocódigo (Hz)	22,86	28,86
Ângulo de incidência (°)	0	90

(fonte: autor).

Nas figuras 4.5 e 4.6 pode-se observar os espectros da força lateral para o Modelo 1 nas direções de incidência do vento onde se obtiveram os maiores valores para o coeficiente de força lateral. Do mesmo modo, é possível notar a concordância com os resultados encontrados no estudo de referência, principalmente para a relação dimensional 6/1/3. Os picos dos espectros também se encontram próximos ao número de Strouhal calculado.

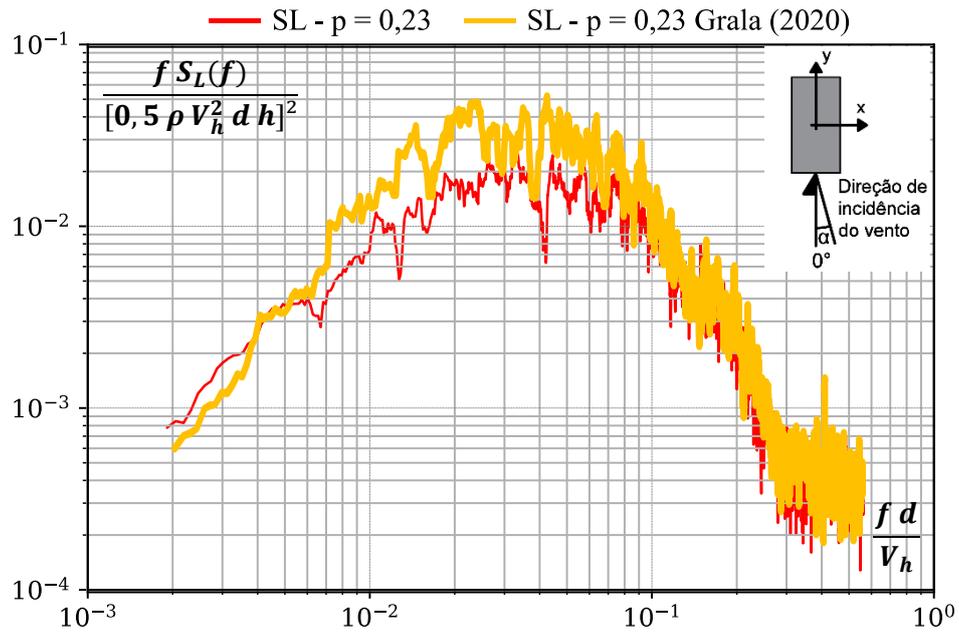


Figura 4.5: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 1 (6/1/3) (fonte: autor).

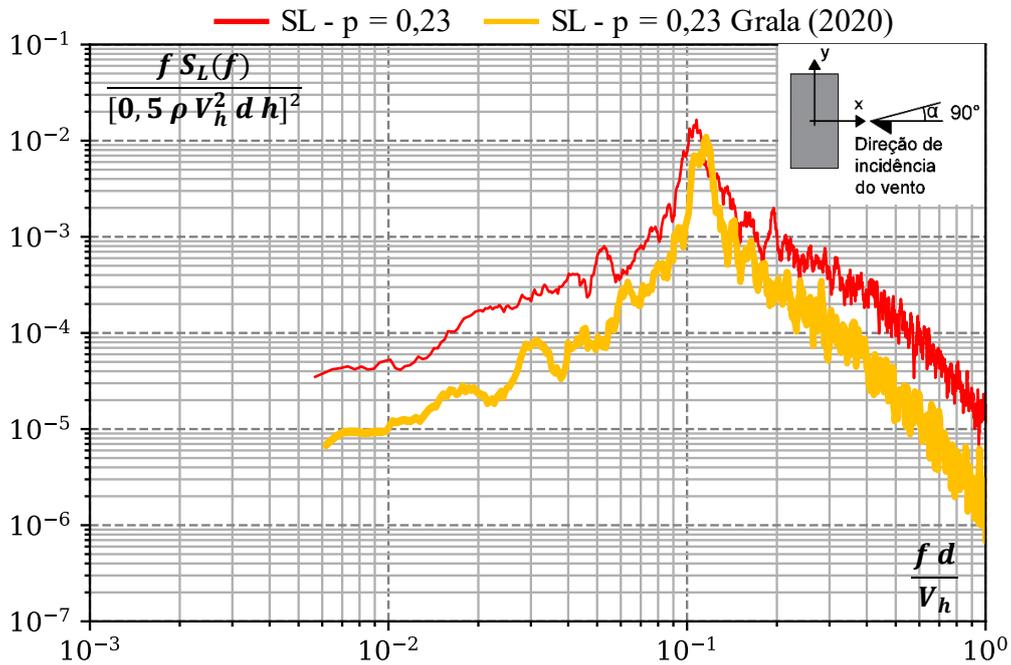


Figura 4.6: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 1 (6/3/1) (fonte: autor).

Para o Modelo 2 (9/1/3 e 9/3/1) os resultados obtidos também mostraram uma boa concordância para todos os coeficientes r.m.s. comparados. Vale ressaltar que é improvável que os resultados fossem exatamente os mesmos para ambos os casos, uma vez que os ensaios e seus resultados são influenciados por diversos fatores, tais como temperatura ambiente, densidade do ar, pressão atmosférica, entre outros, além das próprias imperfeições nas confecções dos modelos e sua fixação na base que sempre existirão por mais que os processos de fabricação e instrumentação dos modelos sejam minuciosamente controlados, assim como ocorreu para o Modelo 1 e para os demais a seguir.

As imperfeições nos modelos, principalmente nas arestas de encontro das peças que os formam, podem produzir descolamentos fora do padrão mostrado na Figura 2.7. O que insere as diferenças nos resultados ao alterar a distribuição de pressão, ainda que minimamente.

Na Figura 4.7 são expostos os coeficientes de força r.m.s. em X e Y , já na Figura 4.8 os coeficientes r.m.s. da força lateral e arrasto.

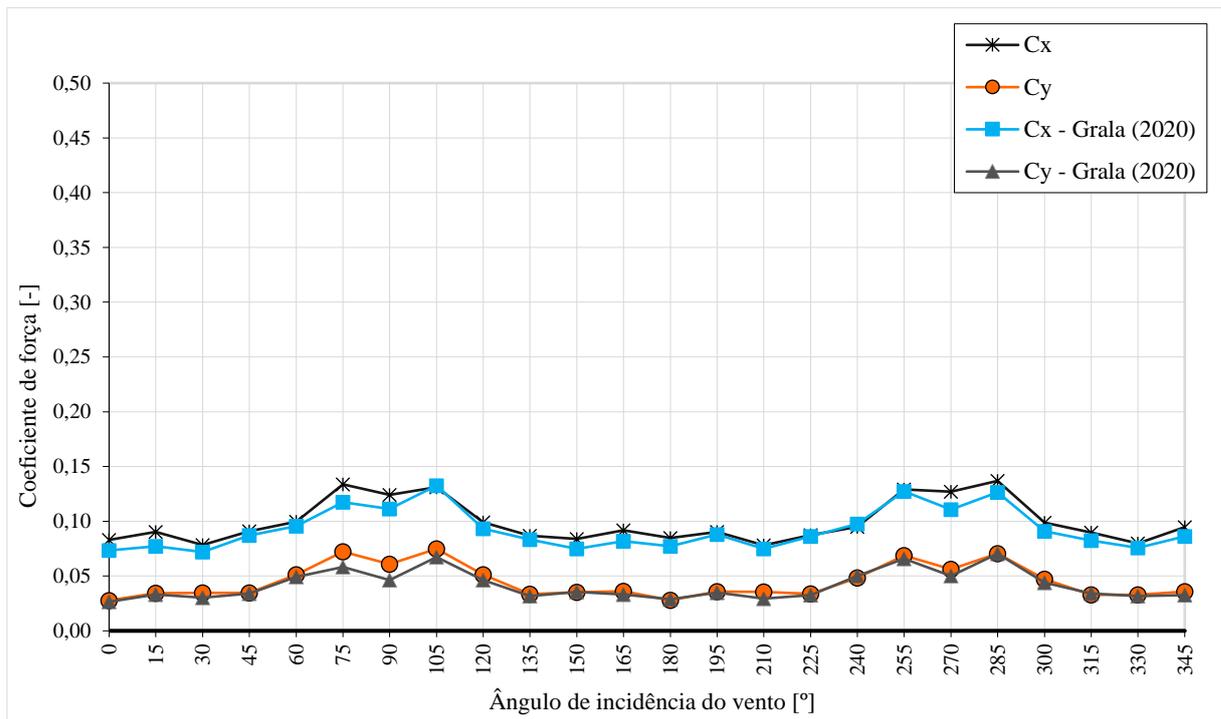


Figura 4.7: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CF_x) e \tilde{C}_y (CF_y) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 2 (fonte: autor).

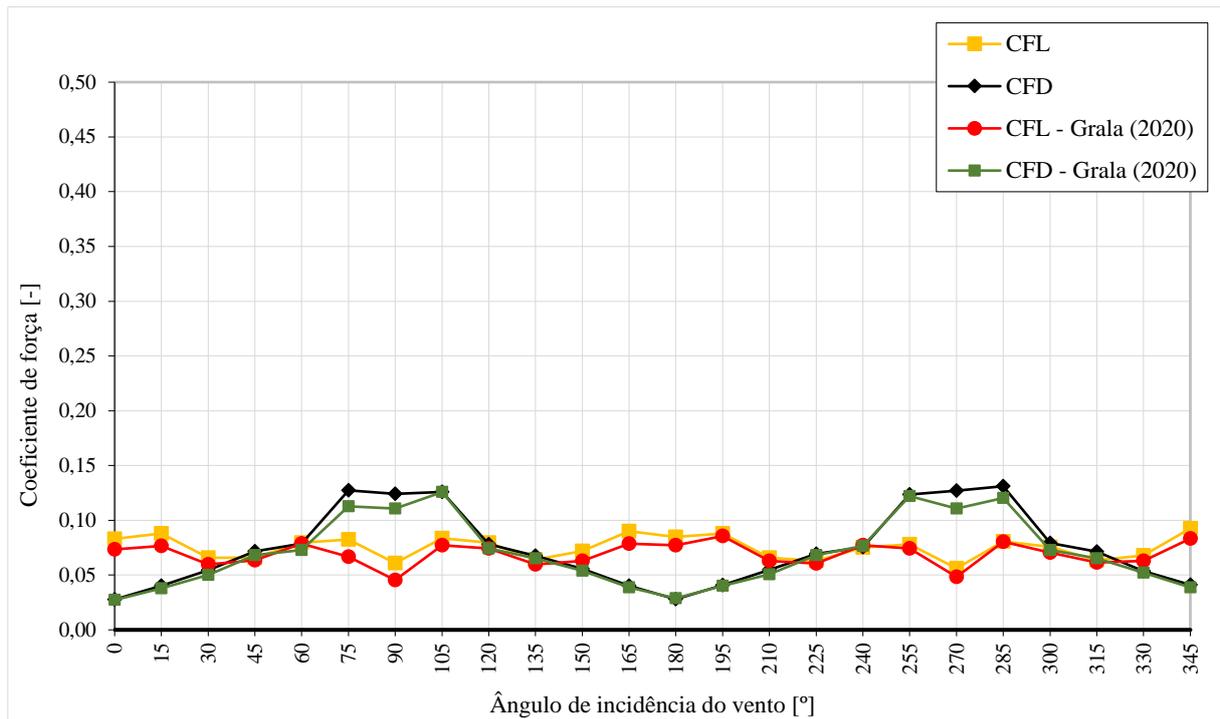


Figura 4.8: Coeficientes de força \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 2 (fonte: autor).

O Quadro 4.2 traz os parâmetros e resultados obtidos durante os ensaios e cálculos para a montagem dos espectros da força lateral do Modelo 2, presentes nas figuras 4.9 e 4.10.

Quadro 4.2: Parâmetros e resultados do Modelo 2.

Parâmetros	Modelo 2	
	9/1/3	9/3/1
h (m)	0,45	0,45
d (m)	0,05	0,15
b (m)	0,15	0,05
k_0	1,185	1,185
CFL	0,085	0,061
ρ (kg/m ³)	1,226	1,226
p	0,23	0,23
V (m/s)	23,92	24,24
Δp_a (mmH ₂ O)	30,2	31,0
P_{atm} (kPa)	99,97	99,94
t (°C)	28,3	32,6
St Eurocódigo	0,05	0,12
f_s Eurocódigo (Hz)	23,927	19,394
Ângulo de incidência (°)	180	90

(fonte: autor).

É possível observar que o espectro obtido na condição 9/1/3 apresenta uma boa relação qualitativa com o estudo de referência, porém exibe uma diferença importante no pico de potência. Já para a condição em que o Modelo 2 apresenta a relação dimensional 9/3/1, os espectros mostram uma melhor concordância entre os resultados. Dessa forma, é possível validar os procedimentos de cálculos utilizados no presente estudo.

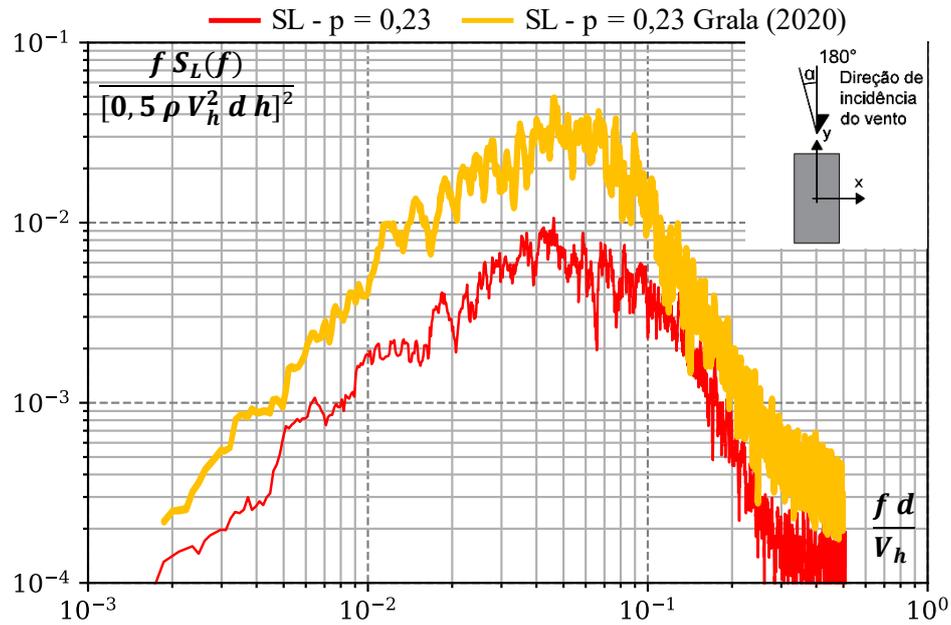


Figura 4.9: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 2 (9/1/3) (fonte: autor).

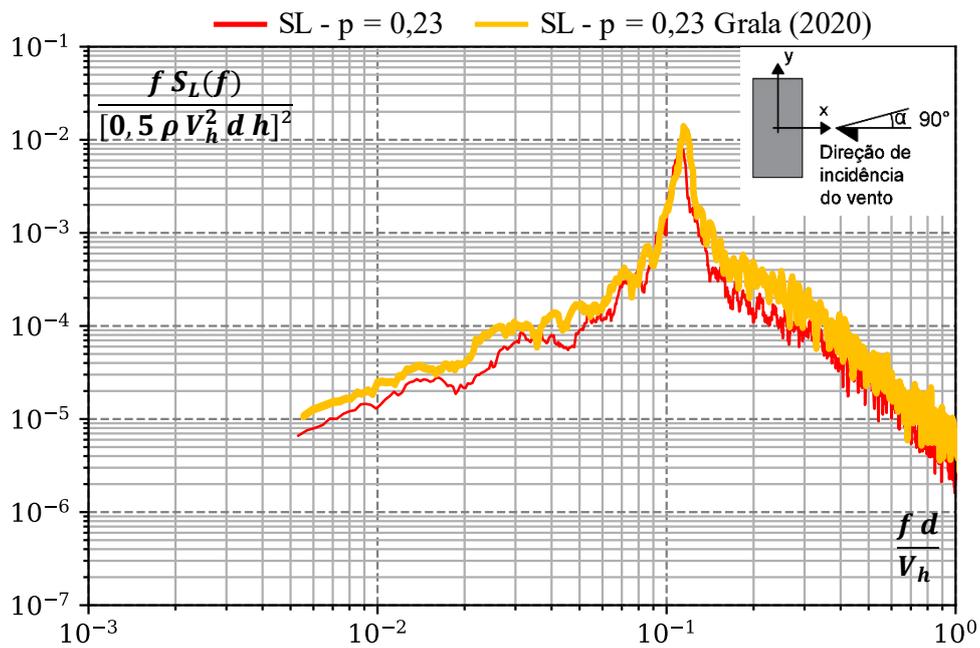


Figura 4.10: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 2 (9/3/1) (fonte: autor).

4.2 MODELOS DO GRUPO 2

Os modelos referentes ao Grupo 2 fazem parte das relações dimensionais de estruturas de seção retangular praticadas no Brasil nos últimos anos e que foram estudadas no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann, presentes no Quadro 3.2. Os modelos desse grupo estão relacionados às seguintes denominações, Modelo 3, Modelo 4 e Modelo 5.

4.2.1 Modelo 3 (7,5/1/1,5) e (7,5/1,5/1)

Na Figura 4.11 está presente o Modelo 3 (7,5/1/1,5 e 7,5/1,5/1) posicionado no centro do túnel de vento. Este modelo possui 375 mm de altura com 192 tomadas de pressão dispostas em 8 cotas diferentes.

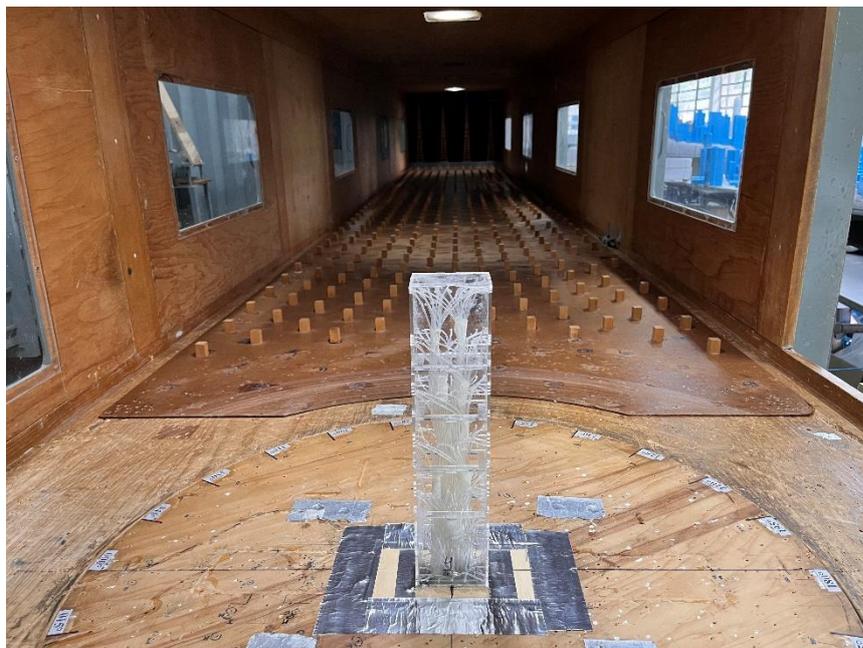


Figura 4.11: Modelo 3 do Grupo 2 na Mesa M-II do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (fonte: autor).

Da mesma forma que os modelos anteriores, as incidências de vento a 0° e a 180° (7,5/1/1,5) resultam em incidências perpendiculares à face menor, enquanto a 90° e a 270° (7,5/1,5/1) resultam em incidências perpendiculares à maior face. A Figura 4.12 mostra os coeficientes r.m.s. de força obtidos, sendo possível observar que os picos do coeficiente r.m.s. da força lateral ocorrem nos ângulos 0° , 90° , 180° e 270° . Os vales ocorrem nos ângulos 45° , 135° , 225°

e 315°, o que permite inferir que para esses ângulos não é necessária a verificação do desprendimento de vórtices de Kármán em edificações com essa relação dimensional.

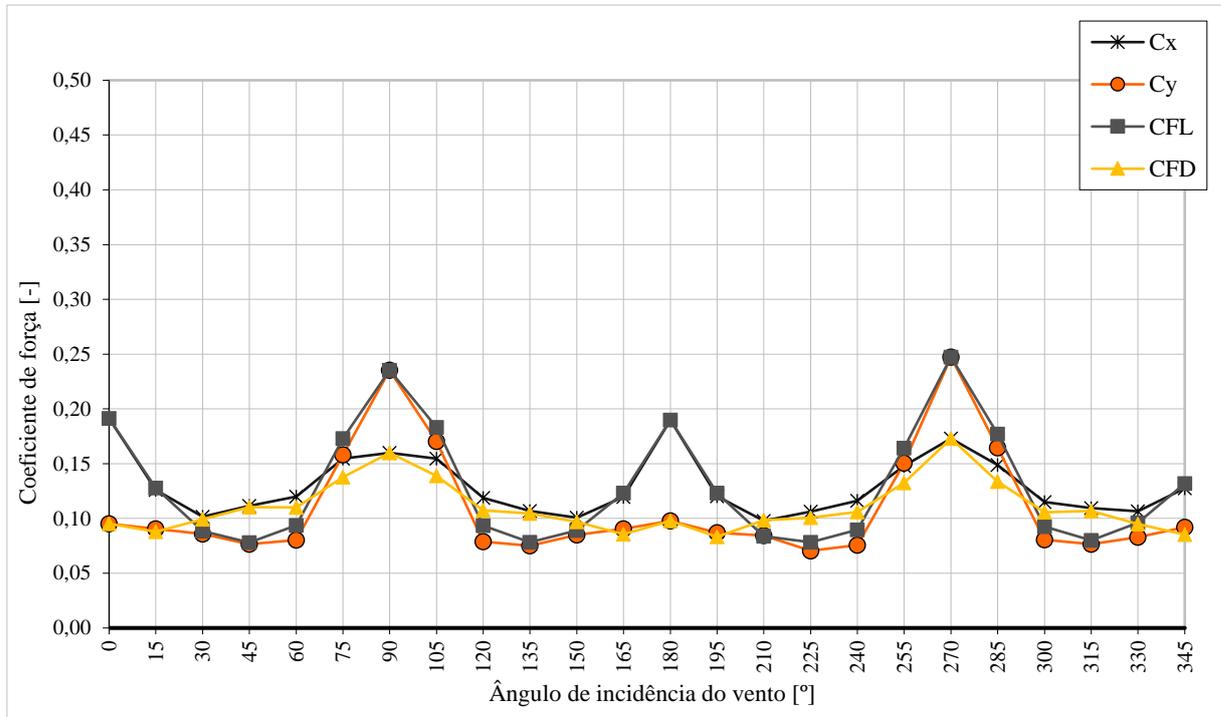


Figura 4.12: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx), \tilde{C}_y (CFy), \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 3 (fonte: autor).

Pode-se observar que quando comparado com os modelos 1 e 2, o Modelo 3 apresenta os picos da força lateral bem pronunciados nos ângulos 0°, 90°, 180° e 270° onde atinge seu valor máximo igual a 0,247 na relação dimensional 7,5/1,5/1, sendo que para a relação 7,5/1/1,5 o ângulo 0° proporcionou um \tilde{C}_L igual a 0,191. O fato do Modelo 3 apresentar boa parte de suas tomadas de pressão inseridas dentro de um escoamento menos turbulento (devido a estarem posicionadas mais afastadas do piso do túnel) contribui para tal resultado, além de apresentar uma relação d/b bem próximas aos valores constatados por Nakamura e Matsukawa (1986) e Mannini *et al.* (2014) para estruturas mais suscetíveis ao fenômeno de desprendimento de vórtices.

Para a geração do espectro de força lateral representativo do Modelo 3, os ângulos que apresentaram os maiores coeficiente de força lateral foram 0° e 270°, sendo cada um representativo de uma relação dimensional, como mostra o Quadro 4.3. Como consta na Figura

4.12, o coeficiente de força lateral tem sua maior magnitude nos ângulos em que o modelo está totalmente alinhado com o eixo do túnel de vento e, conseqüentemente, com a direção em que incide o vento.

Quadro 4.3: Parâmetros e resultados do Modelo 3

Parâmetros	Modelo 3	
	7,5/1/1,5	7,5/1,5/1
h (m)	0,375	0,375
d (m)	0,05	0,075
b (m)	0,075	0,05
k_0	1,103	1,103
CFL	0,191	0,247
ρ (kg/m ³)	1,226	1,226
p	0,23	0,23
V (m/s)	24,23	24,13
Δpa (mmH ₂ O)	31,3	31,2
P_{atm} (mmHg)	99,52	99,53
t (°C)	26	27,5
St Eurocódigo	0,09	0,12
f_s Eurocódigo (Hz)	43,625	38,611
Ângulo de incidência (°)	0	270

(fonte: autor).

Os espectros adimensionalizados da força lateral gerados para cada uma das relações dimensionais do Modelo 3 estão presentes nas figuras 4.13 e 4.14.

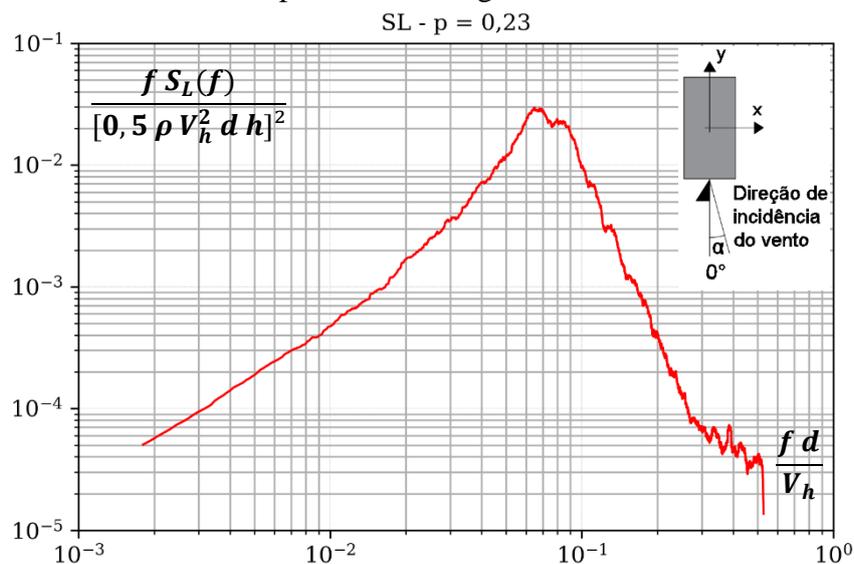


Figura 4.13: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 3 (7,5/1/1,5) (fonte: autor).

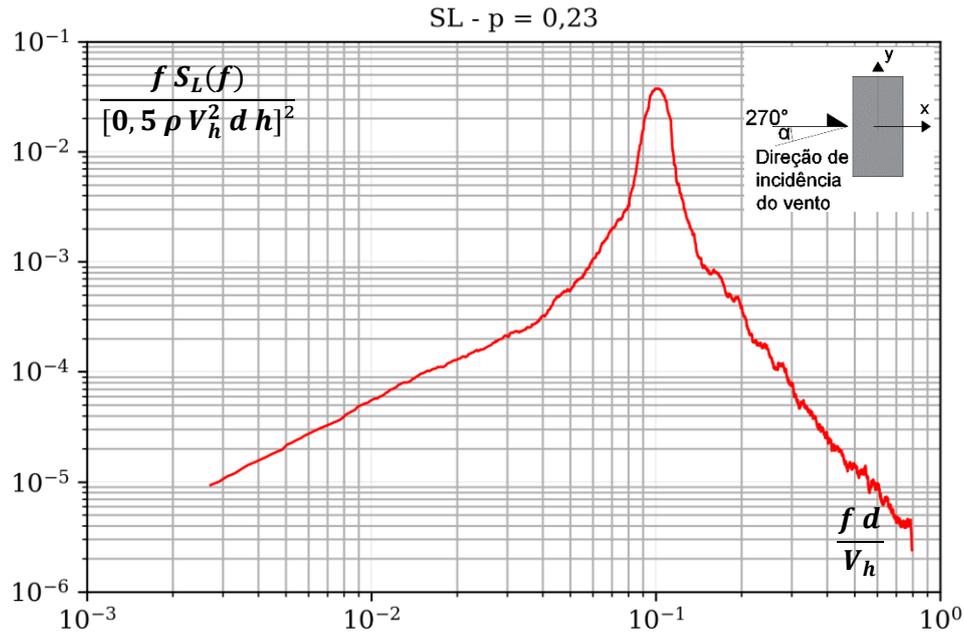


Figura 4.14: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 3 (7,5/1,5/1) (fonte: autor).

Os espectros exibidos para o Modelo 3 também apresentam picos próximos ao número de Strouhal calculado, evidenciando o aparecimento de vórtices de Kármán.

A título de visualização da distribuição dos coeficientes de pressão médios externos a partir da incidência do vento, na Figura 4.15 apresenta-se a distribuição para a incidência do vento no ângulo 0° . É possível observar a sobrepressão ao longo de toda a Fachada 2, com os maiores valores de coeficientes concentrados no centro da face com valores predominantemente situados entre +0,4 e +0,8, porém com a presença também de valores menores, entre +0,01 e +0,03, devido as tomadas de pressão nesses casos estarem situadas em regiões de maior turbulência ou próximos da borda de separação do escoamento na estrutura.

Nas demais fachadas constata-se apenas sucções com valores predominantes situados entre -0,4 e -0,9, principalmente nas fachadas 1 e 3 paralelas ao escoamento para o ângulo em questão, onde os vórtices atuam de maneira a potencializar tais sucções, a partir do surgimento de seus turbilhões.

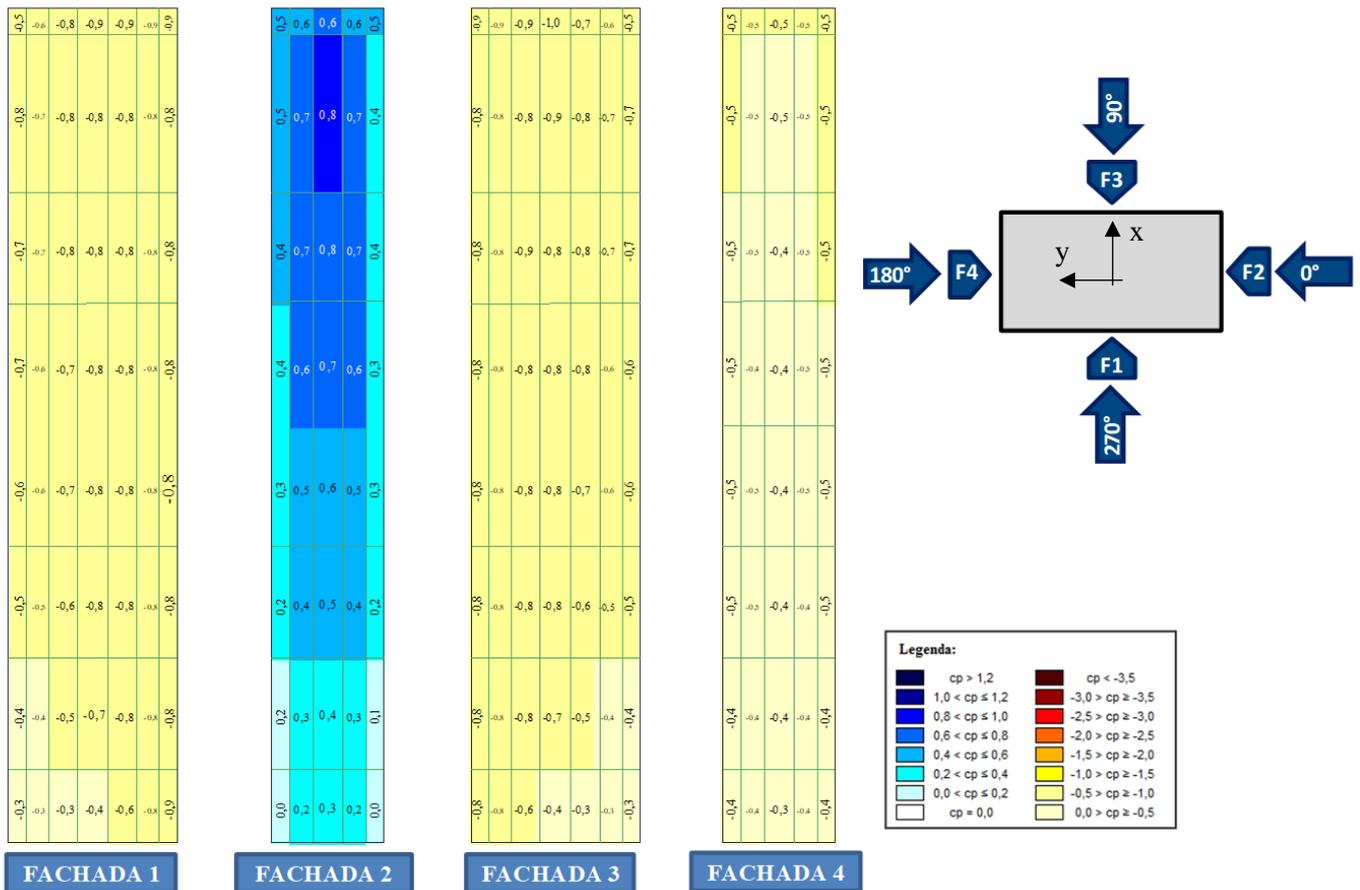


Figura 4.15: Distribuição dos coeficientes de pressão média, externos, nas fachadas do Modelo 3, considerando o vento na incidência de 0° (fonte: autor).

Nas bordas das fachadas 1 e 3 próximas às bordas de descolamento da Fachada 1 é possível notar também os picos de sucção, a qual diminui ao longo da largura das faces, mostrando o gradiente de pressões para esta estrutura de seção retangular isolada.

4.2.2 Modelo 4 (6,5/1/1,5) e (6,5/1,5/1)

O modelo em questão apresenta 325 mm de altura e um total de 168 tomadas divididas em 7 cotas diferentes, totalizando 24 tomadas por cota. A Figura 4.16 apresenta o Modelo 4 posicionado no túnel de vento.

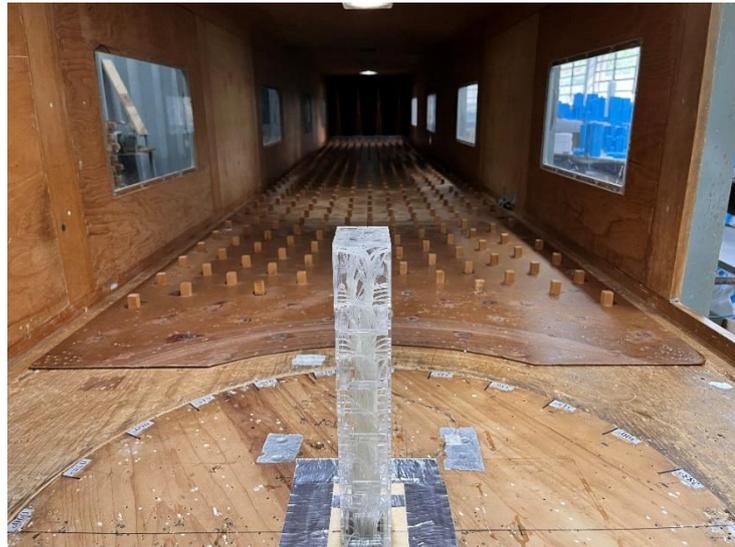


Figura 4.16: Modelo 4 do Grupo 2 na Mesa M-II do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (fonte: autor).

Para o Modelo 4 tem-se as formas geométricas 6,5/1/1,5 e 6,5/1,5/1, semelhante ao que apresenta o Modelo 3, sendo diferente somente o valor da altura, que é 50 mm menor no presente modelo. Na Figura 4.17 estão presentes os valores dos coeficientes r.m.s. de força para o escoamento com $p = 0,23$, onde pode-se notar a semelhança dos valores obtidos com o Modelo 3, inclusive com os valores de pico próximos.

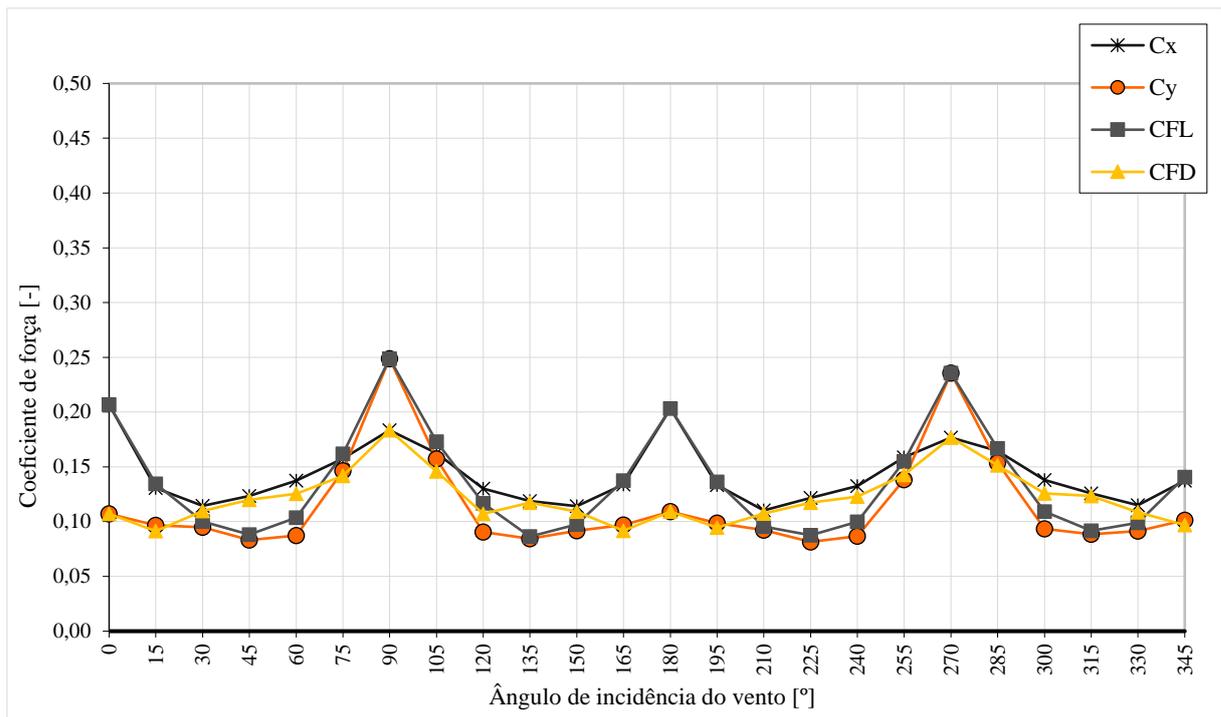


Figura 4.17: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx), \tilde{C}_y (CFy), \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 4 (fonte: autor).

O \tilde{C}_L máximo obtido é igual a 0,207 para o Modelo 4 na relação dimensional 6,5/1/1,5, ocorrendo para a incidência do vento a 0°. Já para a relação 6,5/1,5/1, o máximo ocorreu em 90° com o valor de 0,249. Os picos dos coeficientes r.m.s. entre os modelos 3 e 4 foram próximos, apresentando uma diferença de 0,016 para as relações 7,5/1/1,5 e 6,5/1/1,5 e 0,002 para as relações 7,5/1,5/1 e 6,5/1,5/1, ou seja, a alteração de h não influenciou de maneira impactante o fenômeno, porém ambas as relações dimensionais para as estruturas são suscetíveis à ocorrência do fenômeno de desprendimento de vórtices.

Para a geração dos espectros da força lateral representativos do Modelo 4 também foram considerados os ângulos que apresentaram o maior coeficiente da força lateral, ou seja, os ângulos perpendiculares às faces nas quais incide o vento. No Quadro 4.4 estão os resultados e detalhes de cada parâmetro referentes ao Modelo 4.

Quadro 4.4: Parâmetros e resultados do Modelo 4

Parâmetros	Modelo 4	
	6,5/1/1,5	6,5/1,5/1
h (m)	0,325	0,325
d (m)	0,05	0,075
b (m)	0,075	0,05
k_0	1,029	1,029
CFL	0,207	0,249
ρ (kg/m ³)	1,226	1,226
p	0,23	0,23
V (m/s)	23,44	23,37
Δp_a (mmH ₂ O)	31,4	31,1
P_{atm} (mmHg)	99,45	99,44
t (°C)	27,5	28,6
St Eurocódigo	0,09	0,12
f_s Eurocódigo (Hz)	42,201	37,403
Ângulo de incidência (°)	0	90

(fonte: autor).

Os espectros adimensionalizados da força lateral para cada relação dimensional do Modelo 4 encontram-se nas figuras 4.18 e 4.19. É possível observar que os picos aparecem próximos do número de Strouhal, caracterizando o aparecimento dos vórtices de Kármán.

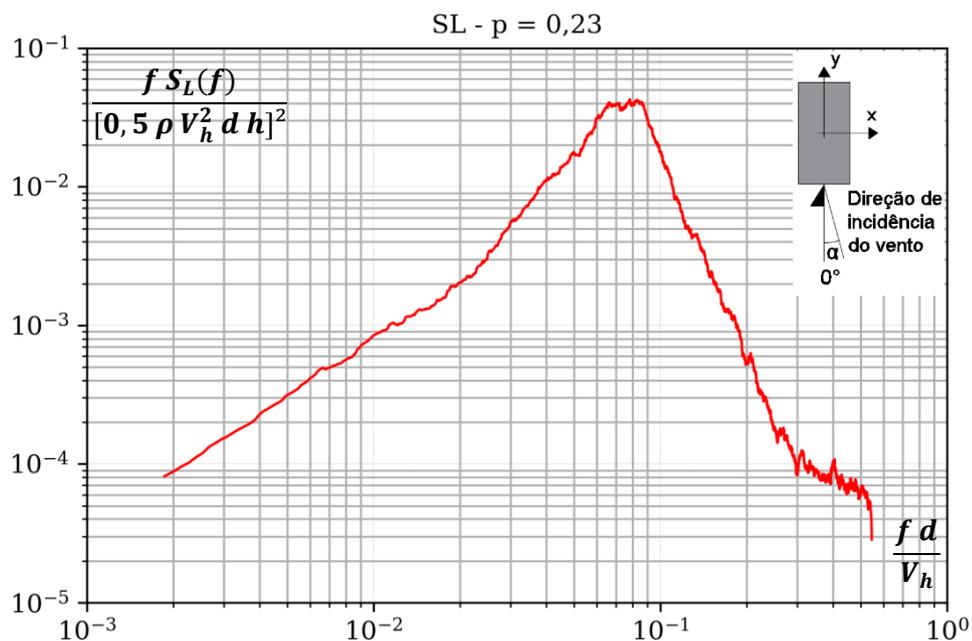


Figura 4.18: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 4 (6,5/1/1,5) (fonte: autor).

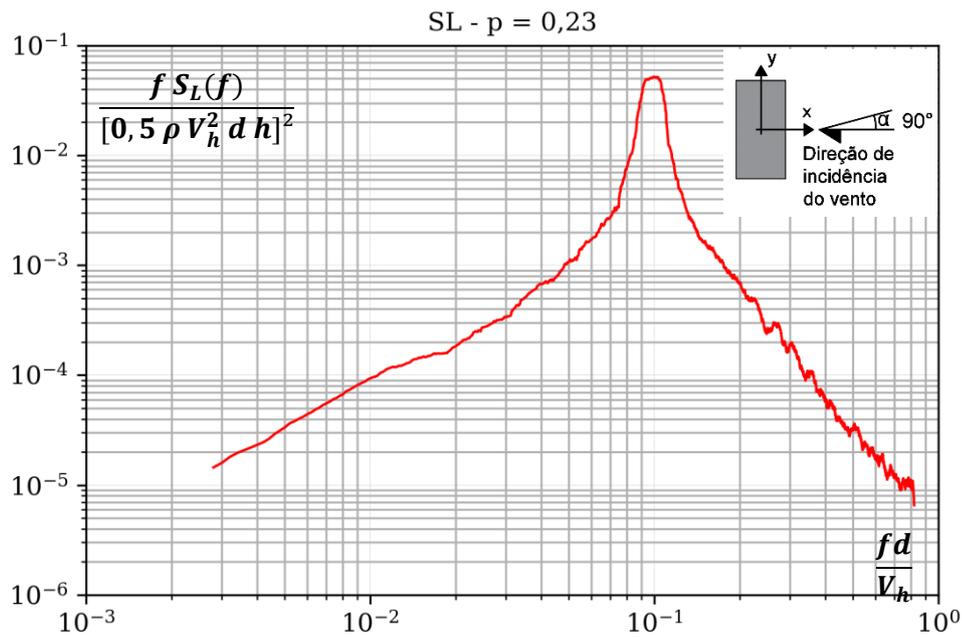


Figura 4.19: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 4 (6,5/1,5/1) (fonte: autor).

O espectro exposto na Figura 4.18 para a relação 6,5/1,5/1 apresenta uma forma mais alargada que o espectro da relação 6,5/1/1,5, englobando uma gama maior de frequências excitantes. No entanto, a diferença entre os espectros é mais sutil quando comparada com o espectro dos demais modelos. Isso se deve à pequena diferença inserida nas dimensões da seção retangular, a qual se aproxima de uma seção quadrada, que apresentaria qualitativamente a mesma resposta para os espectros.

4.2.3 Modelo 5 (5,5/1/1,5) e (5,5/1,5/1)

O Modelo 5 apresenta 275 mm de altura e um total de 144 tomadas divididas em 6 cotas diferentes, totalizando 24 tomadas por cota. A Figura 4.20 apresenta o Modelo 5 posicionado no túnel de vento.

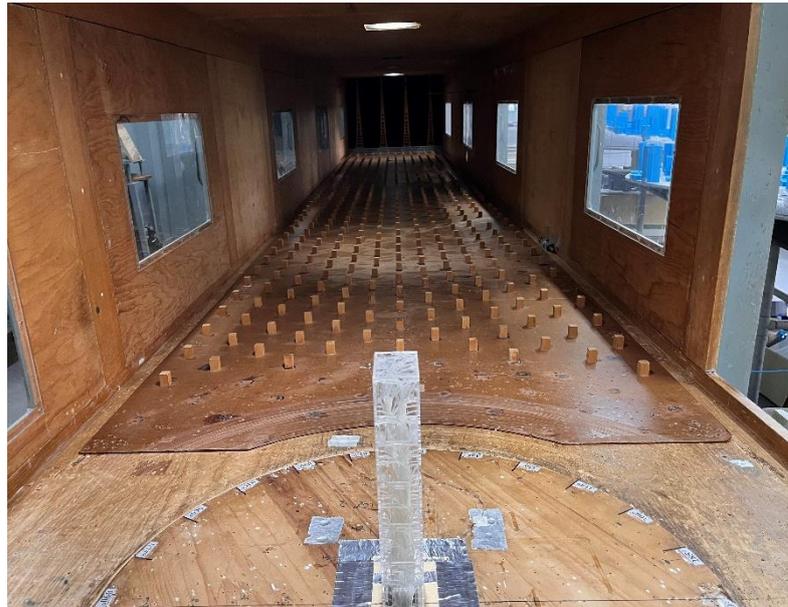


Figura 4.20: Modelo 5 do Grupo 2 na Mesa M-II do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (fonte: autor).

O modelo em questão possui a relação dimensional 5,5/1/1,5 para o vento incidindo na menor face e 5,5/1,5/1 quando incide na maior face. Analisando a Figura 4.21, a qual apresenta os coeficientes r.m.s. de força para o Modelo 5, é possível constatar a semelhança das respostas em comparação com os modelos 3 e 4. Pode-se inferir, a partir da análise dos três modelos do Grupo 2, que a diferença apresentada nos valores para h não influenciou na característica de atuação da força lateral. Isso se torna evidente pela semelhança nos picos encontrados para CFL próximos a 0,20 quando o vento incide perpendicularmente na menor face e 0,25 quando incide perpendicular à maior face.

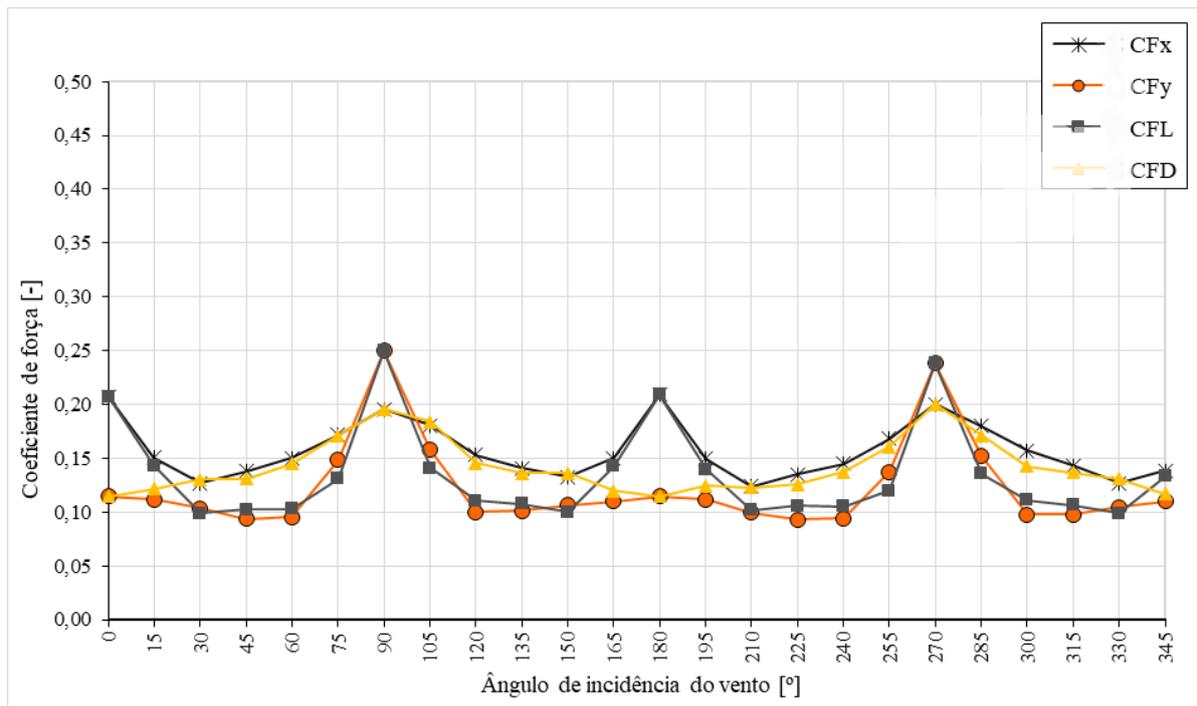


Figura 4.21: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx), \tilde{C}_y (CFy), \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 5 (fonte: autor).

O \tilde{C}_L máximo obtido para o Modelo 5 foi igual a 0,209 para a relação 5,5/1/1,5 referente ao ângulo 180° e 0,250 para a relação 5,5/1,5/1 referente ao ângulo 90°. Para gerar os espectros referentes a cada ângulo utilizaram-se as informações presentes no Quadro 4.5.

Quadro 4.5: Parâmetros e resultados do Modelo 5

Parâmetros	Modelo 5	
	5,5/1/1,5	5,5/1,5/1
h (m)	0,275	0,275
d (m)	0,05	0,075
b (m)	0,075	0,05
k_0	0,946	0,946
CFL	0,209	0,25
ρ (kg/m ³)	1,226	1,226
p	0,23	0,23
V (m/s)	22,47	22,53
Δp_a (mmH ₂ O)	31,3	31,4
P_{atm} (mmHg)	99,5	99,5
t (°C)	28,4	29,2
St Eurocódigo	0,09	0,12
f_s Eurocódigo (Hz)	40,459	36,054
Ângulo de incidência (°)	180	90

(fonte: autor).

Para o Modelo 5, os espectros adimensionalizados da força lateral para cada relação dimensional encontram-se nas figuras 4.22 e 4.23.

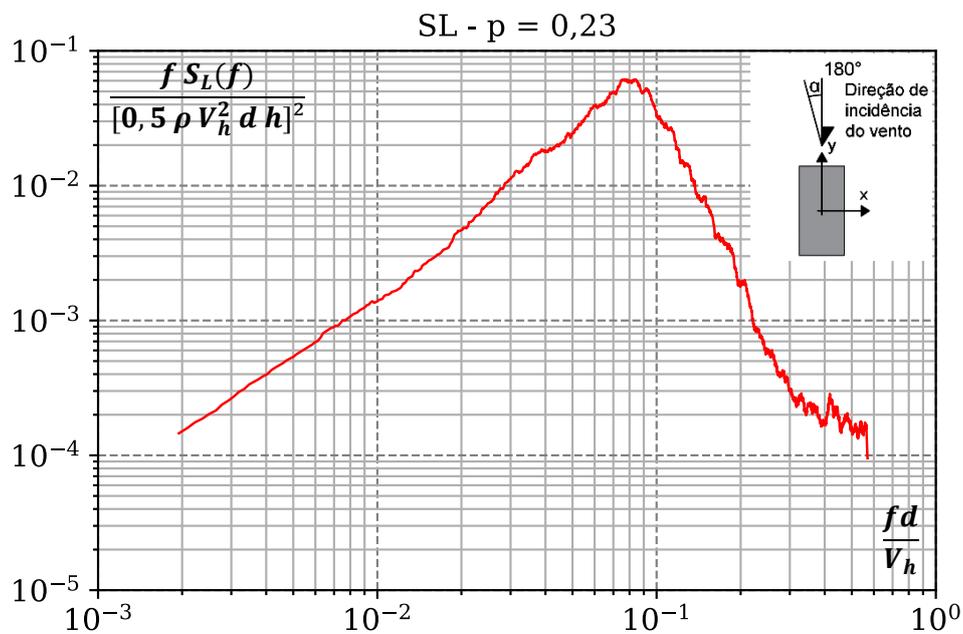


Figura 4.22: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 5 (5,5/1/1,5) (fonte: autor).

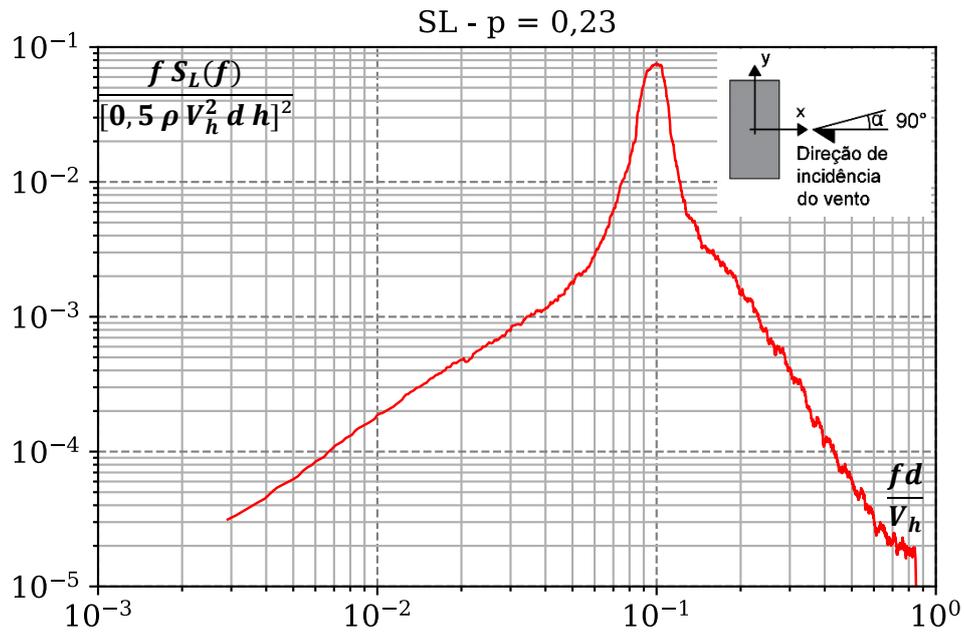


Figura 4.23: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 5 (5,5/1,5/1) (fonte: autor).

Como observado ao analisar os valores de CFL encontrados próximos aos valores obtidos para os modelos 3 e 4, era esperado que os espectros da força lateral fossem semelhantes para o Modelo 5, tanto para os valores de pico quanto para a gama de frequências englobadas.

4.3 MODELOS DO GRUPO 3

O Grupo 3 de ensaios consiste nos modelos referentes a relações dimensionais intermediárias propostas no estudo de Grala (2020) e que não foram ensaiadas. Tais modelos também possuem formas geométricas $h/d/b$ que necessitam ser apresentadas para os casos em que o vento incide perpendicularmente à maior e menor face, de maneira que cada modelo seja estudado com as duas relações.

4.3.1 Modelo 6 (3/1/2) e (3/2/1)

Na Figura 4.24 está presente o Modelo 6, o qual possui uma altura de 150 mm, onde 96 tomadas de pressão estão distribuídas em 4 cotas distintas.

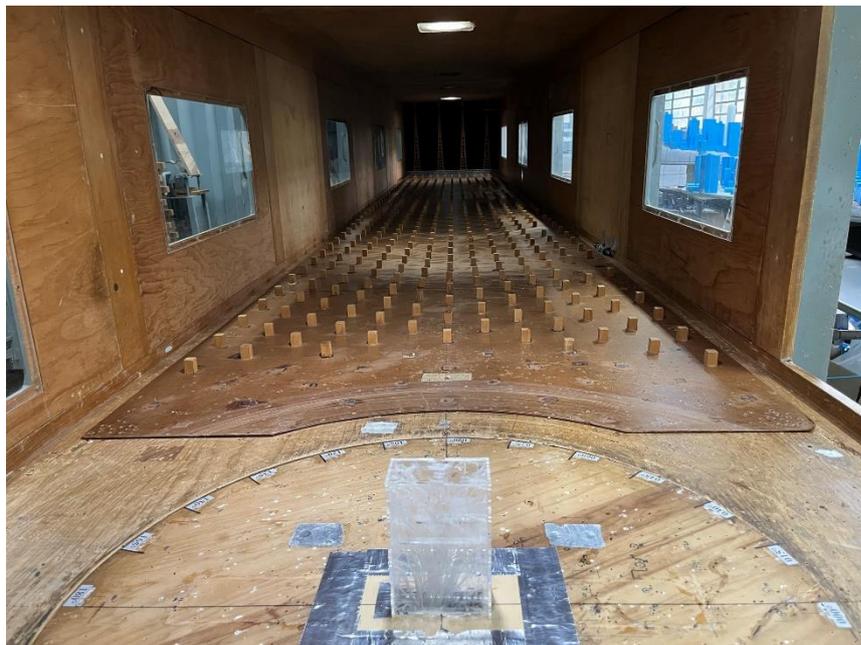


Figura 4.24: Modelo 6 do Grupo 3 na Mesa M-II do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (fonte: autor).

A Figura 4.25 mostra os coeficientes r.m.s. de força para o modelo em questão, os quais evidenciam que o coeficiente r.m.s. de arrasto (CFD) com picos em 90° e 270° são maiores que os picos obtidos a 0° e 180° para o coeficiente r.m.s. de força lateral (CFL).

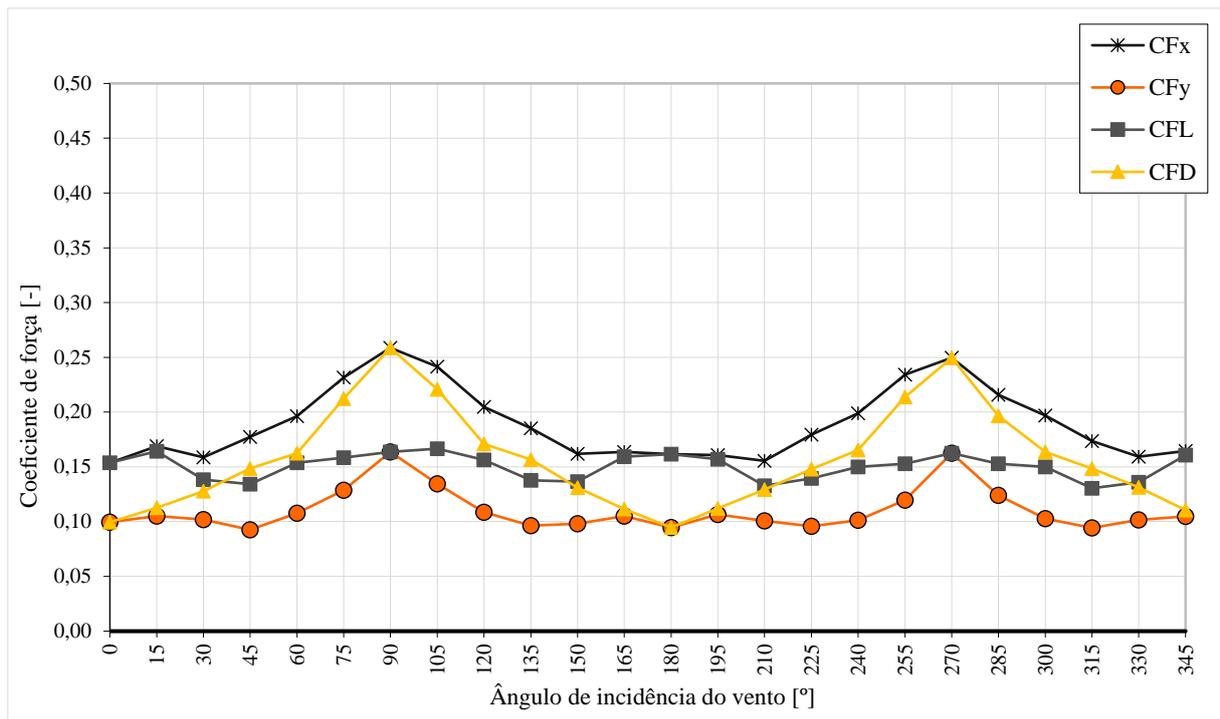


Figura 4.25: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx), \tilde{C}_y (CFy), \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 6 (fonte: autor).

Para o Modelo 6 os valores r.m.s. dos coeficientes de força lateral apresentaram valores mais “espalhados” e sem picos pronunciados quando comparados aos expostos para os modelos anteriormente analisados. Existem alguns fatores que podem contribuir para esses resultados, a citar a altura menor, a qual faz com que o modelo esteja inserido totalmente em um escoamento turbulento, diminuindo assim a correlação do desprendimento de vórtices (BLESSMANN, 2005). Logo, para estruturas que apresentarem tais relações dimensionais presentes no Modelo 6, o maior impacto será causado pela força de arrasto causada pelo vento (quando comparado com a força lateral).

Para o modelo em questão, os espectros da força lateral são referentes aos ângulos em que se obteve o maior valor para \tilde{C}_L , tanto para a relação 3/1/2 quanto para 3/2/1. No Quadro 4.6 estão presentes as informações sobre os parâmetros utilizados para gerar os espectros.

Quadro 4.6: Parâmetros e resultados do Modelo 6

Parâmetros	Modelo 6	
	3/1/2	3/2/1
h (m)	0,15	0,15
d (m)	0,05	0,1
b (m)	0,1	0,05
$k0$	0,681	0,681
CFL	0,162	0,164
ρ (kg/m ³)	1,226	1,226
p	0,23	0,23
V (m/s)	19,13	19,11
Δpa (mmH ₂ O)	31,2	31,2
$Patm$ (mmHg)	99,39	99,39
t (°C)	30,4	30,9
St Eurocódigo	0,05	0,12
f_s Eurocódigo (Hz)	19,13	22,937
Ângulo de incidência (°)	180	90

(fonte: autor).

Os espectros gerados para cada relação dimensional do modelo estão presentes nas figuras 4.26 e 4.27.

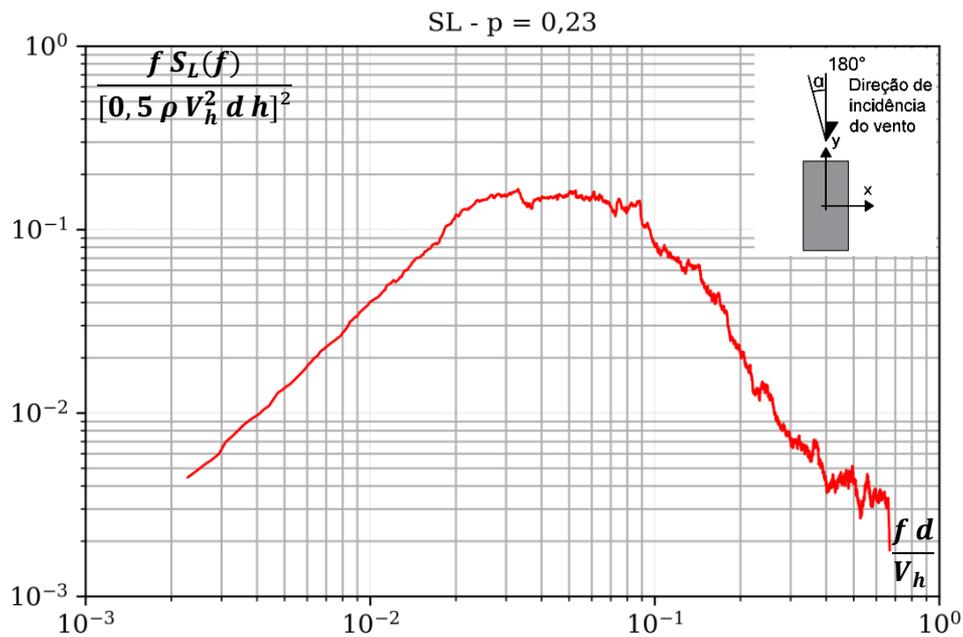


Figura 4.26: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 6 (3/1/2) (fonte: autor).

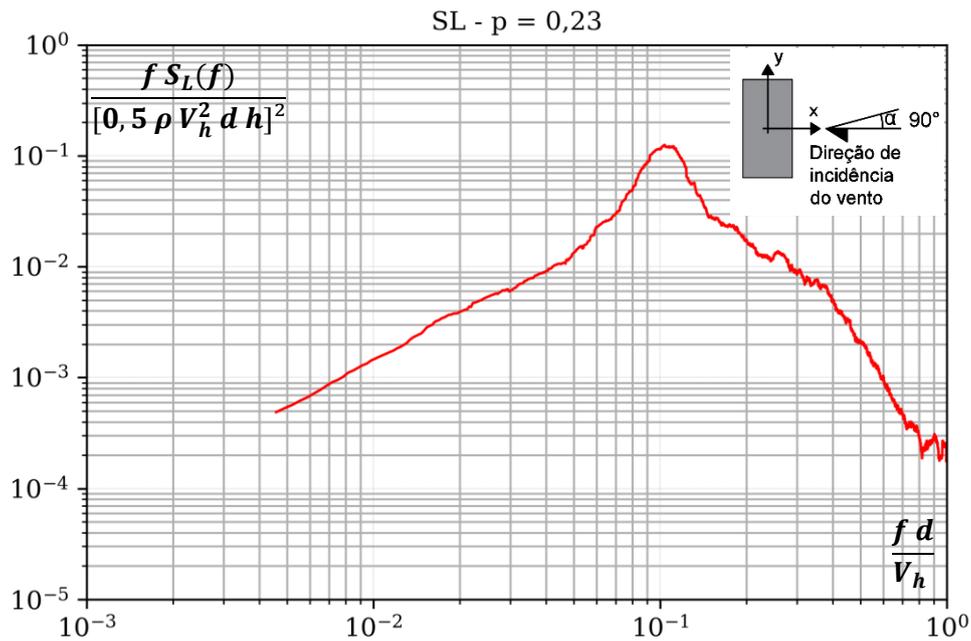


Figura 4.27: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 6 (3/2/1) (fonte: autor).

É possível notar a influência que a inserção do modelo na parte mais turbulenta do escoamento exerce analisando-se os picos dos espectros. De maneira comparativa, estes picos se apresentaram menos pronunciados que os exibidos para os modelos em que a maior parte das tomadas de pressão estão inseridas em um escoamento menos turbulento, ou seja, mais distante do piso do túnel. Os picos aparecem menos pronunciados e a largura de banda aumenta, como apresentado na Figura 2.4.

4.3.2 Modelo 7 (3/1/1,5) e (3/1,5/1)

Na Figura 4.28 está presente o Modelo 7, o qual apresenta a mesma altura que o Modelo 6 de 150 mm, porém com relações geométricas de 3/1/1,5 e 3/1,5/1. A partir da análise dos resultados do Modelo 6, foi possível notar sua inserção na parcela mais turbulenta do escoamento, devido sua altura h menor. Para o Modelo 7 os resultados esperados deveriam evidenciar também os efeitos da turbulência, como se verá a seguir.

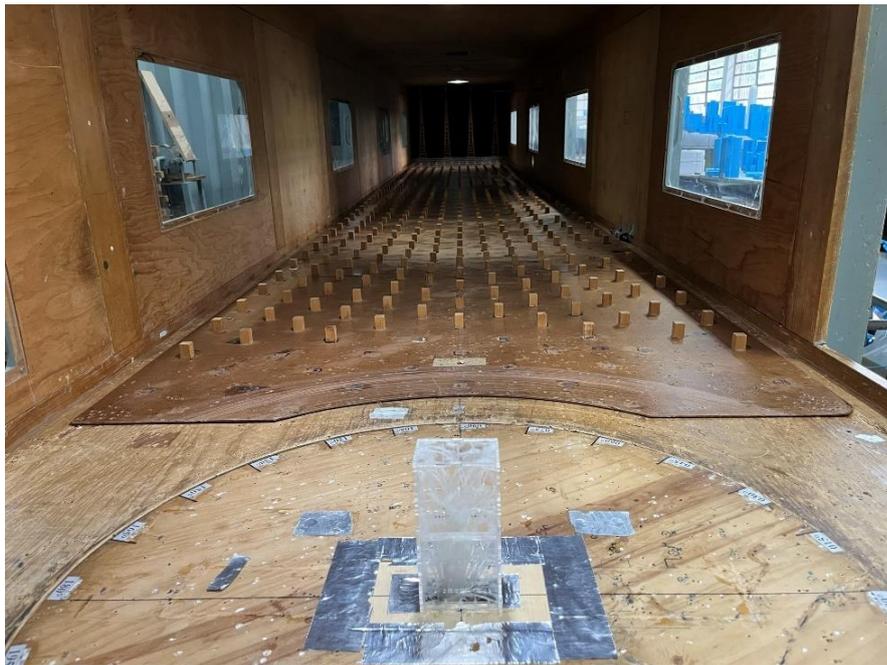


Figura 4.28: Modelo 7 do Grupo 3 na Mesa M-II do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (fonte: autor).

Na Figura 4.29 estão presentes os coeficientes r.m.s. de força para o modelo em questão. Nota-se que os valores para os coeficientes r.m.s. da força de arrasto e lateral estão situados dentro de uma faixa de 0,10 a 0,15. Isso indica que a turbulência está reduzindo os picos para esses coeficientes, quando comparamos com o que foi apresentado para o Modelo 6.

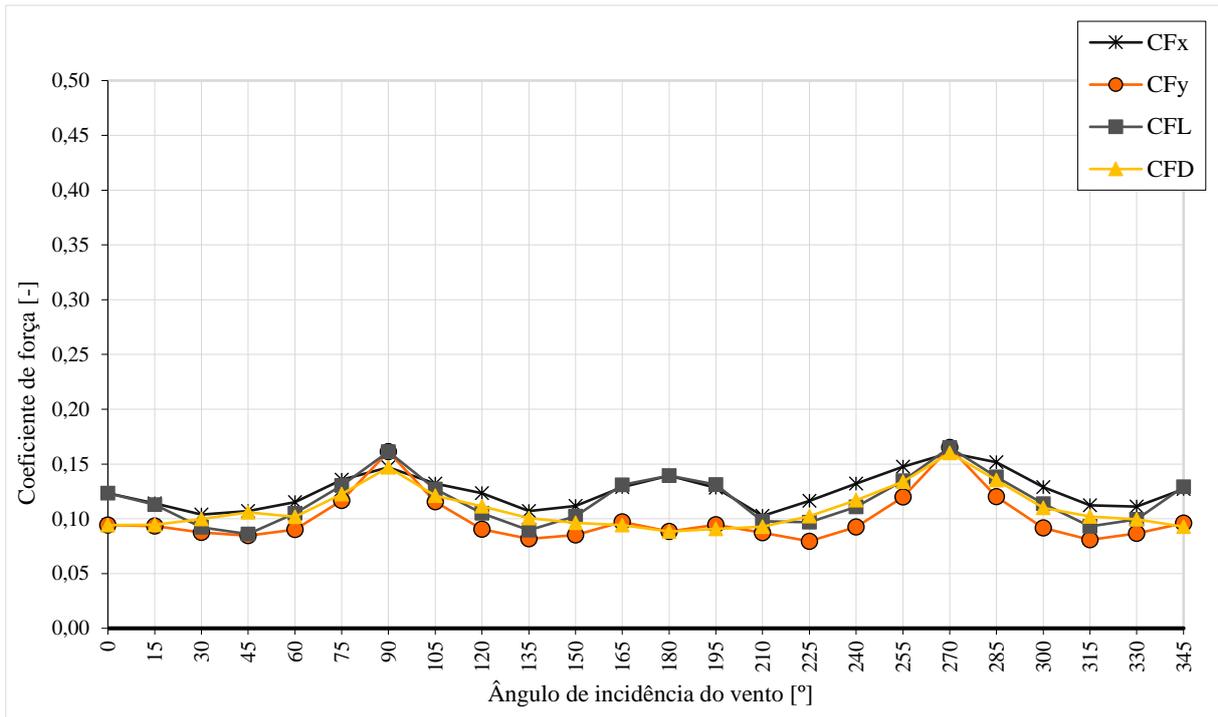


Figura 4.29: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx), \tilde{C}_y (CFy), \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 7 (fonte: autor).

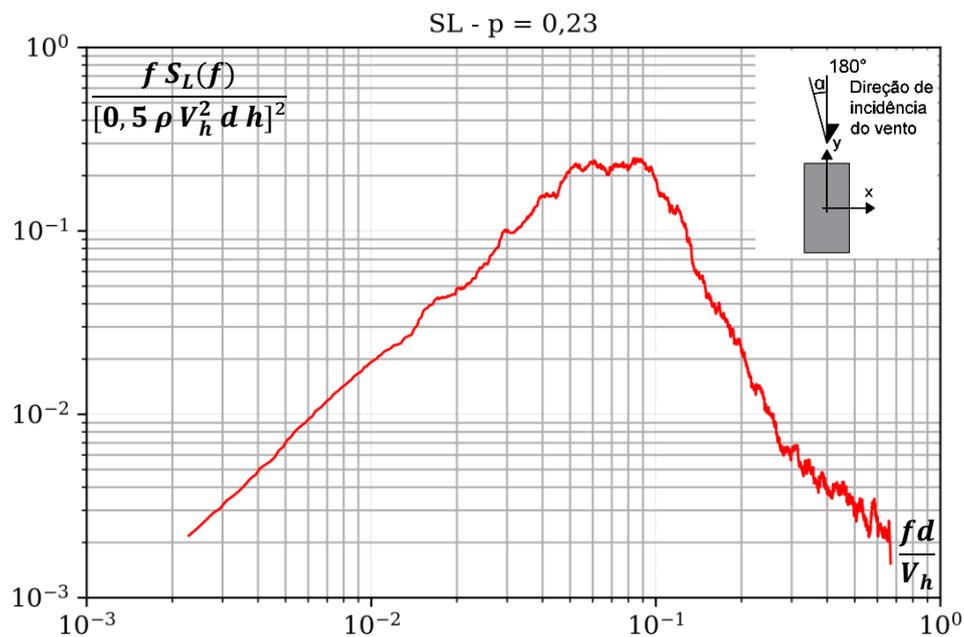
Apesar da influência da turbulência no escoamento ainda se nota a existência de picos referentes a \tilde{C}_L nos ângulos em que as faces estão perpendiculares ao escoamento, ou seja, esses picos são devidos ao desprendimento de vórtices. É interessante observar que, para o modelo em questão, os valores para \tilde{C}_L e \tilde{C}_a são próximos nos ângulos 90° e 270° , onde a maior face é perpendicular à incidência do vento, embora com \tilde{C}_L ligeiramente maior. Isso indica que, mesmo estando a estrutura inserida na faixa onde o escoamento é mais turbulento a velocidade do vento é menor, ainda existe um impacto causado pela força lateral, resultante do desprendimento de vórtices para tal relação dimensional.

Os parâmetros extraídos através dos ensaios e resultados utilizadas para o cálculo dos espectros de potência estão expostos no Quadro 4.7 para o Modelo7.

Quadro 4.7: Parâmetros e resultados do Modelo 7

Parâmetros	Modelo 7	
	3/1/1,5	3/1,5/1
h (m)	0,15	0,15
d (m)	0,05	0,075
b (m)	0,075	0,05
$k0$	0,681	0,681
CFL	0,139	0,165
ρ (kg/m ³)	1,226	1,226
p	0,23	0,23
V (m/s)	19,13	19,12
Δpa (mmH ₂ O)	31,4	31,7
P_{atm} (mmHg)	99,33	99,37
t (°C)	28,9	25,9
St Eurocódigo	0,09	0,12
f_s Eurocódigo (Hz)	34,439	30,6
Ângulo de incidência (°)	180	270

(fonte: autor).

Figura 4.30: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 7 (3/1/1,5) (fonte: autor).

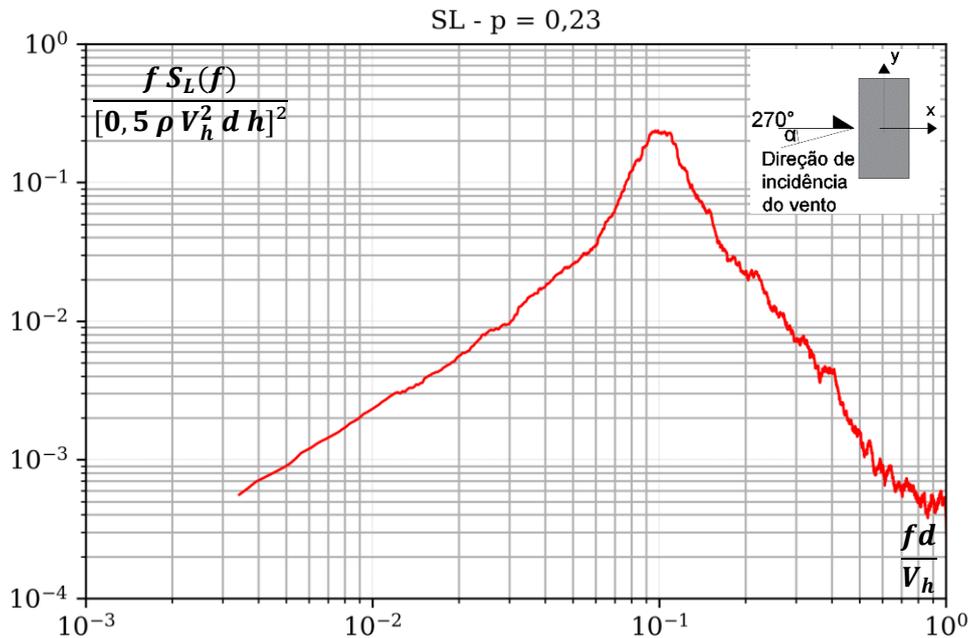


Figura 4.31: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 7 (3/1,5/1) (fonte: autor).

Analisando os espectros gerados para o Modelo 7, verifica-se o mesmo tipo de influência da turbulência do escoamento ocorrido para o Modelo 6. Os espectros para o Modelo 7 apresentam picos menos pronunciados e bandas mais alargadas, que abrangem gamas maiores de frequências.

Na Figura 4.32 está presente a representação da distribuição dos coeficientes de pressão médios para cada área de influência das tomadas de pressão, obtidos para o Modelo 7. Assim como ocorreu para o Modelo 3, a distribuição das pressões externas segue o padrão esperado para corpos de seção retangular semelhantes a este. Observam-se picos de sucção nas bordas de separação do escoamento da Fachada 2 nas fachadas 1 e 3, com valores próximos aos encontrados no Modelo 3. No entanto, a visualização dos coeficientes de pressão médios não permite uma avaliação precisa da magnitude das respostas transversais ou da direção do vento, ainda que fosse realizada uma análise em gráfico de linhas.

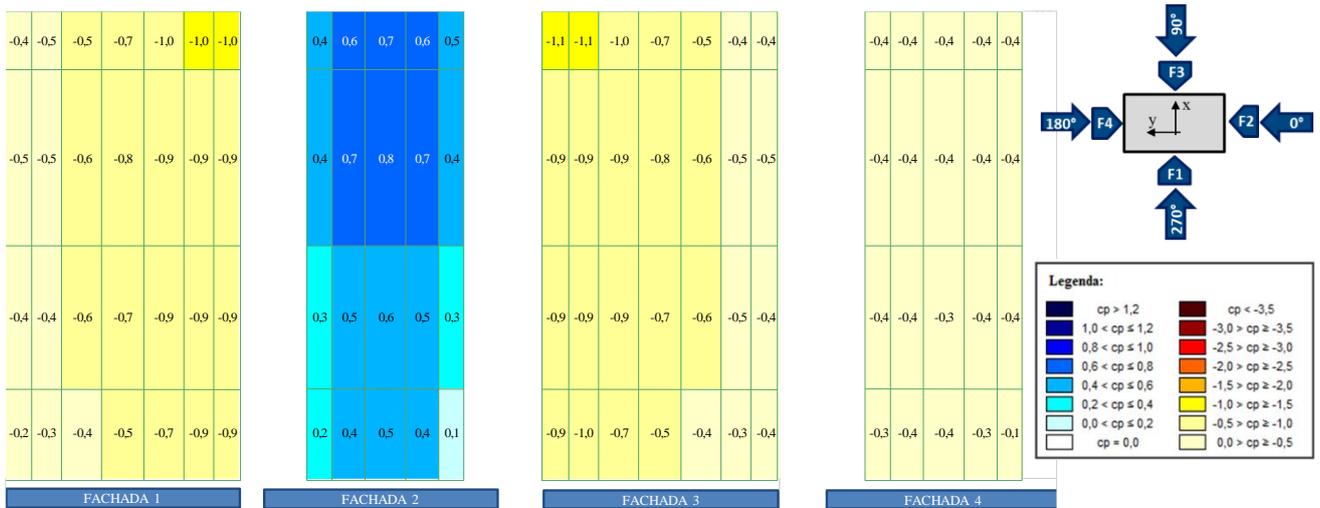


Figura 4.32: Distribuição dos coeficientes de pressão média, externos, nas fachadas do Modelo 7, considerando o vento na incidência de 0° (fonte: autor)

4.3.3 Modelo 8 (6/1/2,5) e (6/2,5/1)

O Modelo 8 apresenta uma altura de 300 mm, onde 144 tomadas estão dispostas em 6 cotas diferentes, totalizando 24 tomadas por cota. A Figura 4.33 apresenta o Modelo 8 posicionado no centro da mesa de ensaios no túnel de vento.

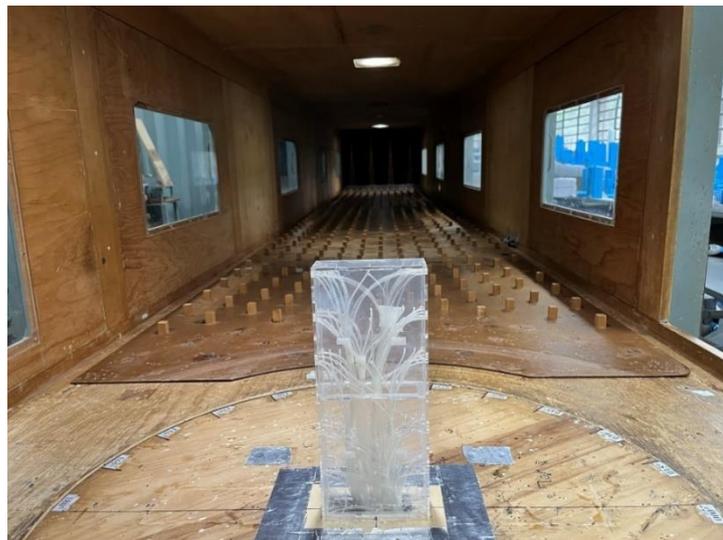


Figura 4.33: Modelo 8 do Grupo 3 na Mesa M-II do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (fonte: autor).

Para o escoamento analisado, verificou-se que os ângulos vizinhos aos ângulos em que as faces do modelo são perpendiculares à incidência do vento ($345^\circ, 15^\circ, 75^\circ, 105^\circ, 165^\circ, 195^\circ, 255^\circ, 285^\circ$) apresentaram um maior coeficiente r.m.s. da força lateral, assim como ocorreu nos modelos 1 e 2. No entanto, devido às diferenças observadas serem pequenas, os ângulos considerados para gerar os espectros continuaram sendo referentes ao maior valor obtido para \tilde{C}_L , entre os ângulos 0° e 180° para a relação 6/1/2,5 e 90° e 270° para a relação 6/2,5/1.

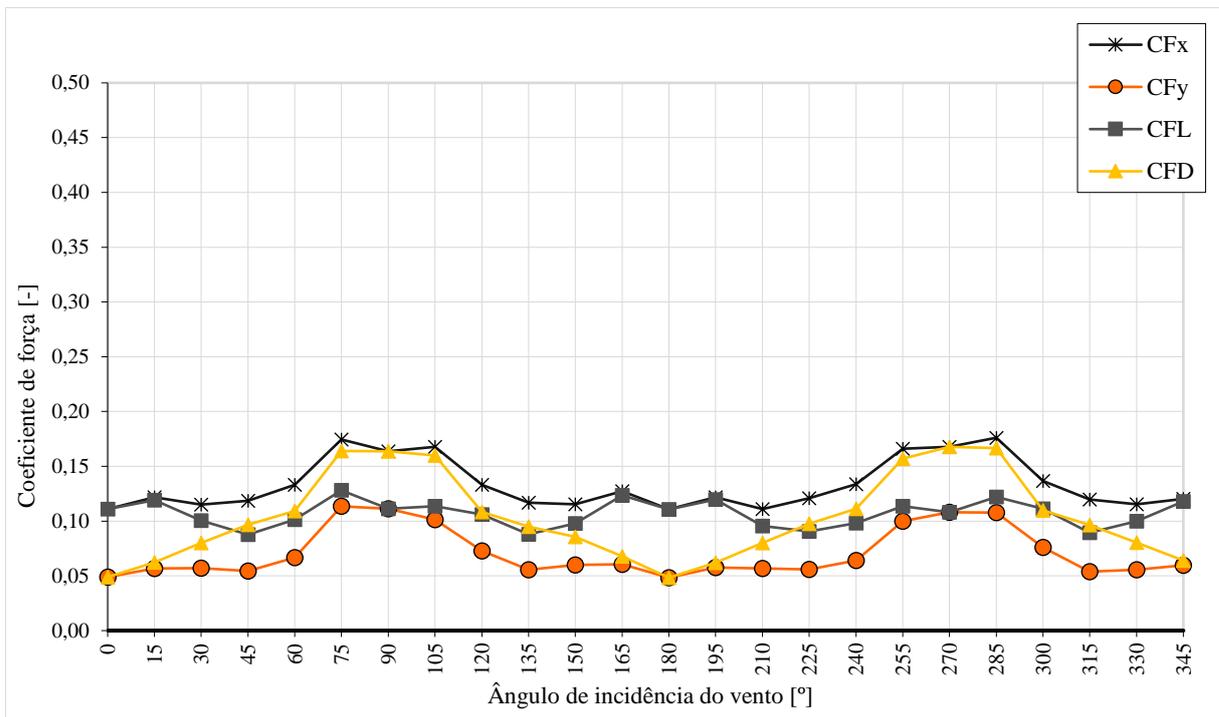


Figura 4.34: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx), \tilde{C}_y (CFy), \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 8 (fonte: autor).

A partir da análise da Figura 4.34 é possível observar que para os ângulos em que a maior face está perpendicular à incidência do vento, a influência da força de arrasto é maior sobre a estrutura quando comparada à força lateral. O que não ocorre para os ângulos em que a menor face é perpendicular ao escoamento. Tal comportamento é o esperado para corpos rombudos em que a maior área das faces está perpendicular à incidência do vento.

Outra influência sobre os coeficientes de força importante de ser mencionada é o recolamento do escoamento na face de maior dimensão para os ângulos 0° e 180° , constatado pela diminuição dos picos exibidos.

Para a relação 6/1/2,5 foi obtido um coeficiente r.m.s. de força lateral igual a 0,111 nos ângulos 0° e 180°, quando a menor face está perpendicular à incidência do vento. Com base no observado, decidiu-se gerar o espectro da força lateral referente à incidência a 0°, conforme apresentado na Figura 4.34. Já para a relação dimensional 6/2,5/1, o maior valor obtido para \tilde{C}_L foi na incidência de 90°, apresentando um valor de 0,111, o mesmo encontrado nos ângulos de 0° e 180° para a relação dimensional 6/1/2,5.

Os parâmetros referentes ao Modelo 8 e ao ensaio, utilizados para gerar os espectros da força lateral, são informados no Quadro 4.8.

Quadro 4.8: Parâmetros e resultados do Modelo 8.

Parâmetros	Modelo 8	
	6/1/2,5	6/2,5/1
h (m)	0,3	0,3
d (m)	0,05	0,125
b (m)	0,125	0,05
k_0	0,989	0,989
CFL	0,111	0,111
ρ (kg/m ³)	1,226	1,226
p	0,23	0,23
V (m/s)	23,01	22,85
Δp_a (mmH ₂ O)	31,3	30,8
P_{atm} (mmHg)	99,25	99,23
t (°C)	28,4	29,1
St Eurocódigo	0,05	0,12
f_s Eurocódigo (Hz)	23,011	21,940
Ângulo de incidência (°)	0	90

(fonte: autor).

Os espectros adimensionalizados das forças lateral para o Modelo 8 são exibidos nas figuras 4.35 e 4.36. É possível observar que os espectros apresentados para o Modelo 8 são semelhantes aos obtidos para o Modelo 1 para ambas as relações dimensionais estudadas. Isso se deve à proximidade entre as dimensões geométricas existente entre os dois modelos, por isso é de se

esperar que as respostas fossem qualitativamente próximas, tanto para a largura de banda quanto para as frequências englobadas nos espectros.

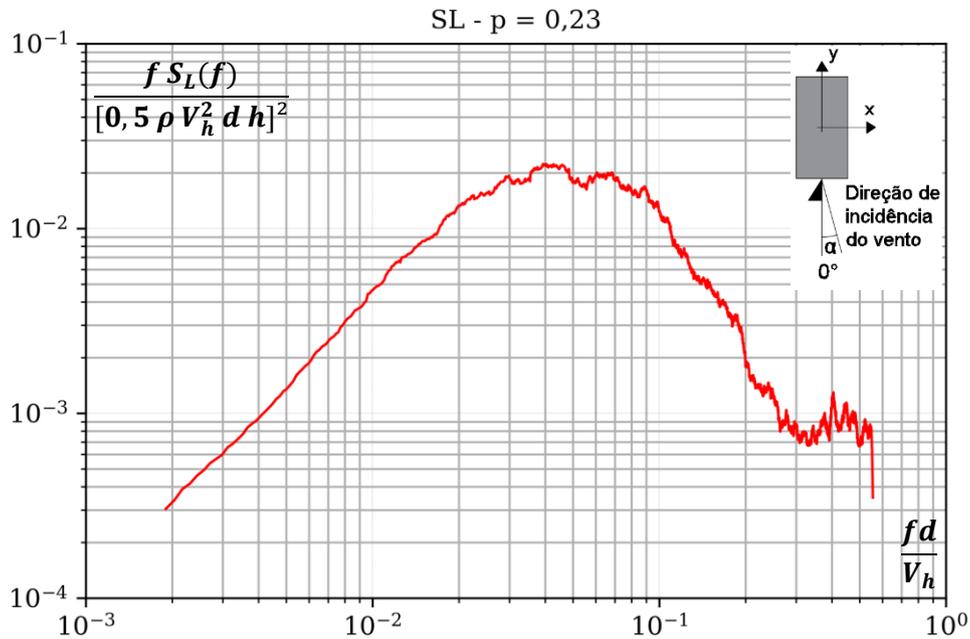


Figura 4.35: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 8 (6,5/1/2,5) (fonte: autor).

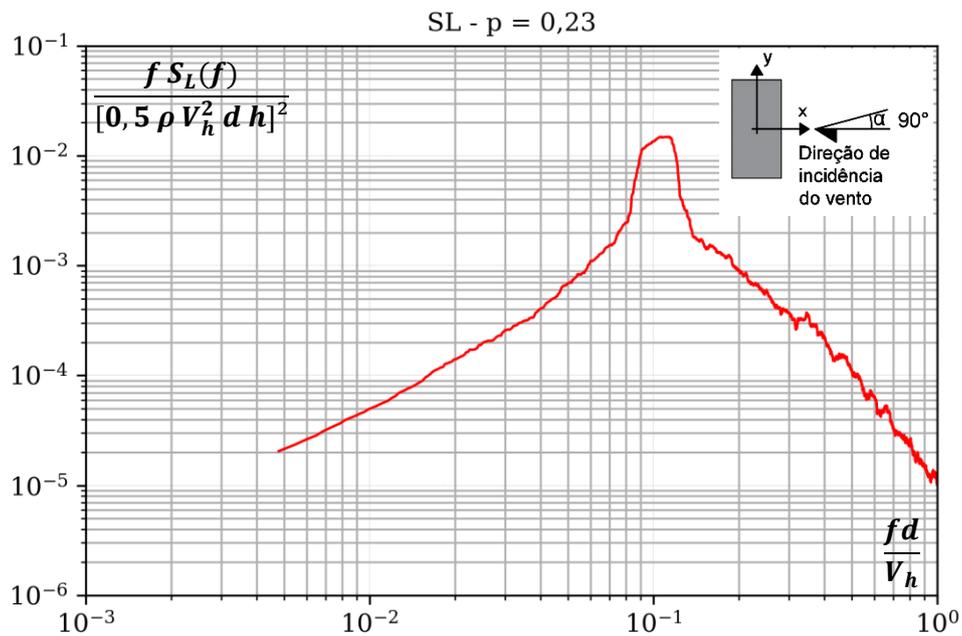


Figura 4.36: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 8 (6,5/2,5/1) (fonte: autor).

4.3.4 Modelo 9 (9/1/2,5) e (9/2,5/1)

O Modelo 9 apresenta o maior valor adotado para h no presente estudo. O modelo em questão possui 450 mm de altura e 216 tomadas de pressão distribuídas em 9 cotas. A Figura 4.37 exhibe o Modelo 9 dentro do túnel de vento.



Figura 4.37: Modelo 9 do Grupo 3 na Mesa M-II do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (fonte: autor).

Para o escoamento com $p = 0,23$ o Modelo 9 apresentou os coeficientes r.m.s. de força expostos na Figura 4.38. Assim como ocorreu para os Modelos 1, 2 e 8, observa-se para o Modelo 9 que os coeficientes r.m.s. da força lateral nos ângulos 75° e 105° , apresentaram valores maiores para CFL. Uma das possíveis causas (mas sem afirmativa concreta) para o observado, está ligada às imperfeições nas montagens dos modelos, que apesar de serem compostos por chapas em acrílico cortadas a laser, o processo de junção das peças ainda é manual e sempre apresentará imperfeições. Todavia, os espectros da força lateral foram gerados para o maior valor de CFL obtido entre os ângulos em que a incidência do vento é perpendicular às faces (0° , 90° , 180° e 270°), devido à diferença observada para tais ângulos vizinhos ser pequena.

Para se ter uma certeza maior da possível causa para o observado, sugere-se a realização de ensaios com o auxílio de um anemômetro de fio quente posicionado a sotavento da estrutura,

dessa forma, será possível realizar a caracterização da esteira para cada ângulo de incidência com o intuito de investigar tal ocorrência.

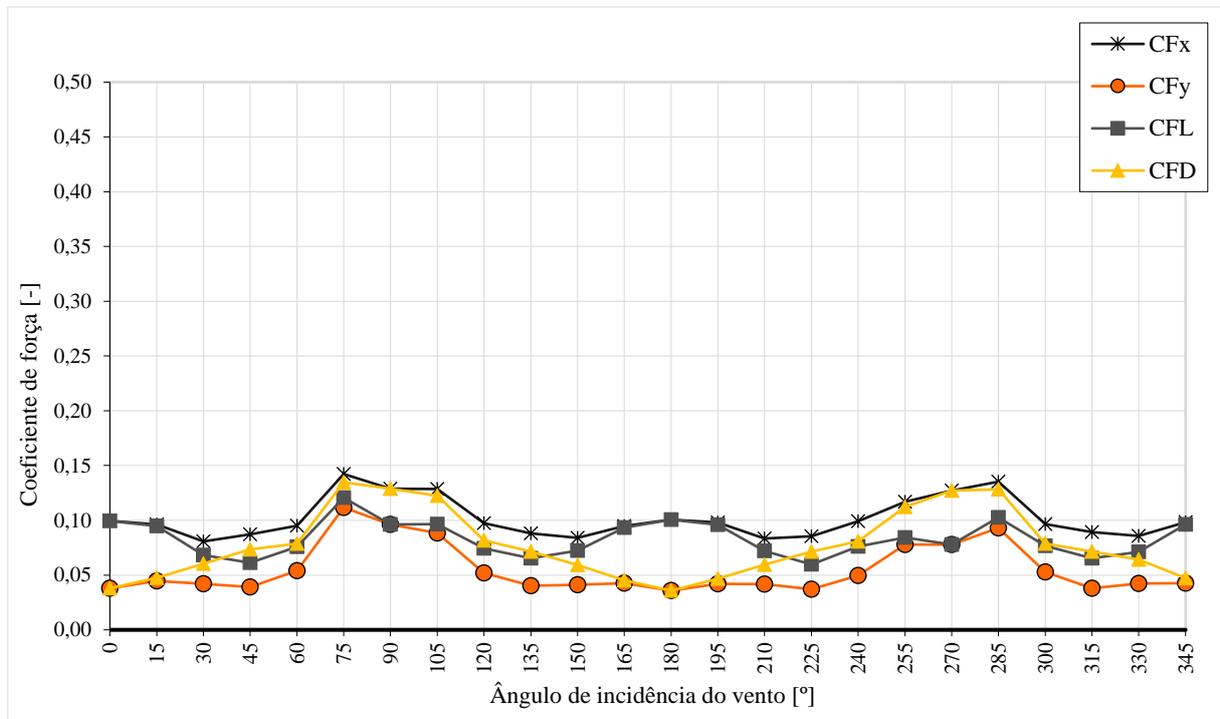


Figura 4.38: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx), \tilde{C}_y (CFy), \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 9 (fonte: autor).

Analisando os coeficientes r.m.s. de força, observa-se que para os ângulos em que a incidência do vento é perpendicular à maior face, a força de arrasto é mais crítica que a força lateral para as relações dimensionais estudadas no modelo em questão, sendo que esse fato não ocorre somente para a relação 9/1/2,5.

O maior valor para CFL obtido para a relação dimensional 9/1/2,5 foi igual a 0,101 para o ângulo 180°, já para a relação 9/2,5/1 foi 0,096 para o ângulo 90°. No Quadro 4.9 estão presentes os resultados e parâmetros referentes ao Modelo 9 utilizadas para gerar os espectros da força lateral para as relações dimensionais analisadas.

Quadro 4.9: Parâmetros e resultados do Modelo 9

Parâmetros	Modelo 9	
	9/1/2,5	9/2,5/1
h (m)	0,45	0,45
d (m)	0,05	0,125
b (m)	0,125	0,05
$k0$	1,185	1,185
CFL	0,101	0,096
ρ (kg/m ³)	1,226	1,226
p	0,23	0,23
V (m/s)	22,62	22,29
Δpa (mmH ₂ O)	25,3	24,6
P_{atm} (mmHg)	99,17	99,16
t (°C)	27,2	27,5
St Eurocódigo	0,05	0,12
f_s Eurocódigo (Hz)	22,621	21,404
Ângulo de incidência (°)	180	90

(fonte: autor).

As figuras 4.39 e 4.40 apresentam os espectros da força lateral gerados para as relações dimensionais do Modelo 9.

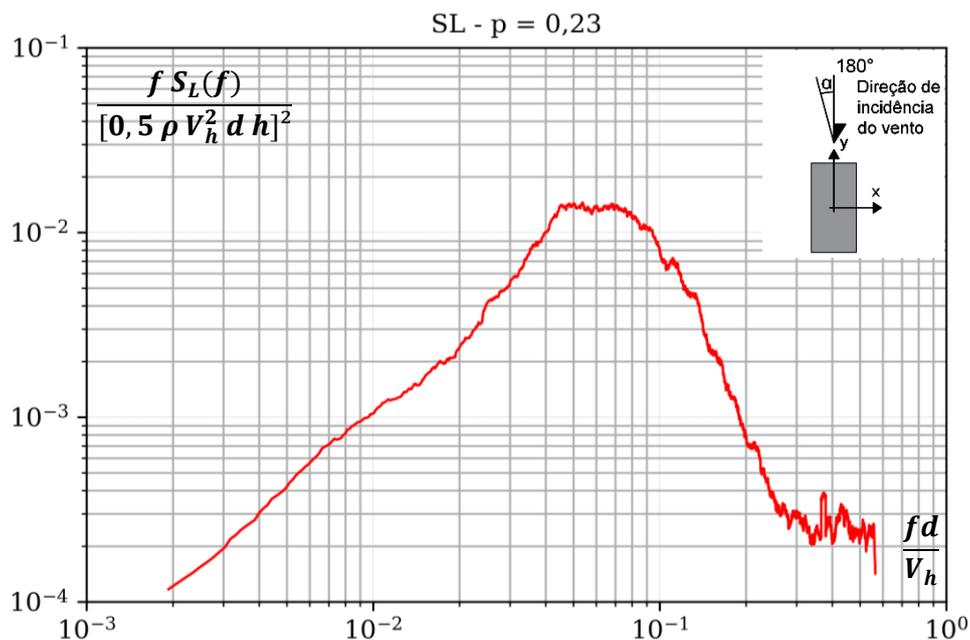


Figura 4.39: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 9 (9/1/2,5) (fonte: autor).

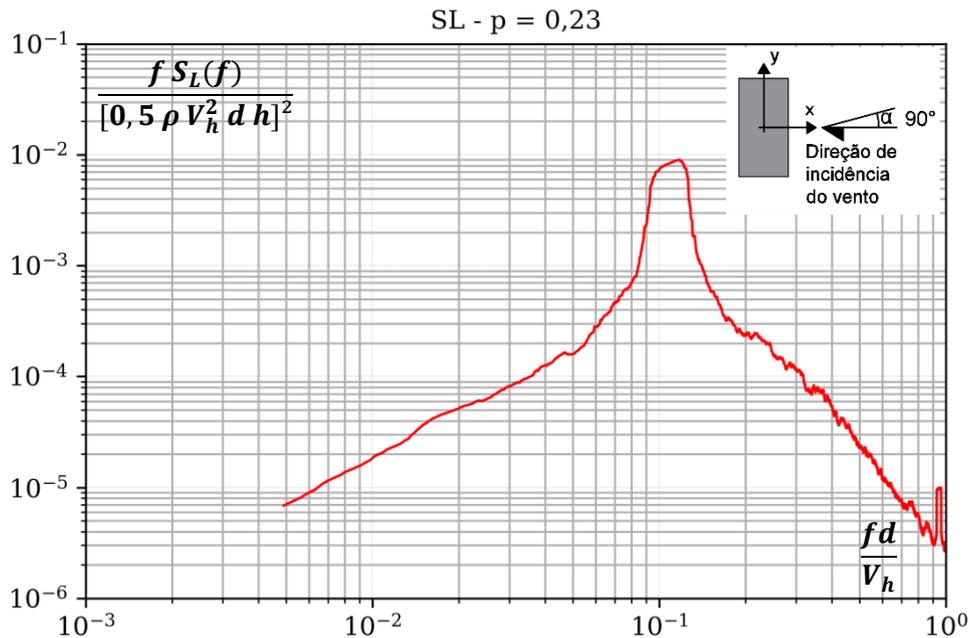


Figura 4.40: Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 9 (9/2,5/1) (fonte: autor).

Para os espectros do Modelo 9 exibidos é possível observar o “contorno” de espectros que foram mostrados para a maioria dos modelos estudados. Para a relação em que a menor face é perpendicular à incidência do vento o espectro não apresenta um pico de frequência predominante, enquanto para a situação em que a maior face é perpendicular à incidência do vento, o espectro apresenta um pico bem pronunciado.

Para o Modelo 9 também é exibida a visualização da distribuição dos coeficientes de pressão médios para a incidência do vento a 0° na Figura 4.41, a fim de permitir uma interpretação visual da influência da turbulência do escoamento nos valores de tais coeficientes médios.

5 CONCLUSÕES

No presente estudo foram realizadas caracterizações aerodinâmicas das forças laterais devidas ao desprendimento de vórtices para estruturas de seção retangular a partir da apresentação dos coeficientes r.m.s. da força lateral e os espectros de potência da força lateral de 9 modelos ensaiados em túnel de vento para o escoamento com $p = 0,23$ referente à categoria III e IV da NBR – 6123. A presente pesquisa se propôs a contribuir com um maior entendimento de como as características dimensionais de estruturas de seção retangular interferem em sua suscetibilidade aos efeitos do fenômeno de desprendimento de vórtices. As relações dimensionais $h/d/b$ alvos deste estudo consistiram em relações praticadas no Brasil e que foram estudadas no Túnel de Vento *Professor Joaquim Blessmann* nos últimos anos.

Os resultados semelhantes encontrados tanto para os coeficientes r.m.s. de força, quanto para os espectros da força lateral para os modelos de validação dos procedimentos aplicados neste estudo, referentes ao Grupo 1, possibilitaram atestar uma boa concordância na metodologia aplicada desde os ensaios realizados no túnel de vento até o tratamento dos dados obtidos. Atestando, dessa forma, que os resultados deste trabalho foram ao encontro com o que está presente na bibliografia.

A análise em termos dos coeficientes r.m.s. da força lateral \tilde{C}_L para os modelos do Grupo 2, os quais apresentaram apenas diferença na altura entre si, permitiu concluir que tais relações dimensionais são potencialmente suscetíveis em sofrer os efeitos causados pelo desprendimento de vórtices por apresentarem picos pronunciados semelhantes para incidências do vento a 90° sobre as fachadas, além de exibirem os espectros de potência da força lateral sempre dentro de uma mesma gama de frequências excitantes com picos próximos ao número de Strouhal. Tais relações d/b , presentes no Grupo 2, são semelhantes as relações d/b estudadas por Nakamura e Matsukawa (1986) e Mannini *et al.* (2014), os quais constataram também a potencial suscetibilidade em sofrer pelo fenômeno.

Para os modelos apresentados no Grupo 3, diferentes observações podem ser efetuadas. O Modelo 6 apresentou em seus coeficientes r.m.s. de força, alterações causadas pela turbulência do escoamento, devido a sua altura o inserir na faixa mais turbulenta do escoamento próxima ao piso do túnel, fazendo com que existisse uma interferência na correlação do desprendimento de vórtices, os quais apesar de serem menos impactantes que a força de arrasto, ainda

apresentaram picos menos pronunciados que o observado nos modelos do Grupo 2, possibilitando concluir que para tais relações dimensionais o fenômeno de desprendimento de vórtices não é o principal fator de preocupação em tais condições observadas no presente estudo.

O Modelo 7 exibiu a maior influência causada pela turbulência sobre a força lateral proveniente do desprendimento de vórtices, diminuindo os picos encontrados para \tilde{C}_L . Isso se deve à altura apresentada para o modelo em questão, assim como ocorreu para o Modelo 6. Todavia, o pico presente na relação 3/1,5/1 próximo ao número de Strouhal evidencia que baixos valores para o coeficiente r.m.s. da força lateral não necessariamente excluem a atuação do fenômeno para estruturas em situações semelhantes às observadas.

Ao se analisar os modelos 8 e 9, verificaram-se alterações nos picos esperados para os coeficientes r.m.s. da força lateral. Tais alterações foram constatadas ao se observar que ângulos vizinhos a 0° , 90° , 180° e 270° apresentaram valores maiores para \tilde{C}_L em alguns casos, quando o que se espera é a possibilidade de não haver recolamento do escoamento quando o vento incide perpendicularmente na maior fachada. Apesar disso, os espectros da força lateral gerados, principalmente para as incidências em que a maior face é transversal ao escoamento, apresentaram picos pronunciados próximos ao número de Strouhal calculado.

Finalmente, a partir dos resultados expostos e analisados para as relações dimensionais presentes neste estudo, foi fornecida a caracterização aerodinâmica das forças laterais através da exposição dos coeficientes r.m.s. da força lateral e espectros de potência da força lateral. Diante disso, o presente trabalho demonstrou a existência de relações dimensionais mais e menos suscetíveis ao fenômeno de desprendimento de vórtices, evidenciando que a relação d/b tem efeito direto para a menor suscetibilidade de estruturas com alturas menores frente ao fenômeno e que estruturas maiores e esbeltas estarão mais suscetíveis em sofrer pelos efeitos do desprendimento de vórtices. Dessa forma, verificou-se que os resultados constatados estão de acordo com o que vem sendo observado em estudos similares.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de complementar o presente estudo, que se limitou ao ensaio de modelos isolados e sem características arquitetônicas que influenciem o fenômeno de desprendimento de vórtices, sugere-se a realização de novos estudos com configurações de vizinhança que influenciem no fenômeno de desprendimento de vórtices, assim como a inserção de detalhes arquitetônicos que atenuem ou possam agravar os efeitos do fenômeno.

Além disso, sugere-se a realização de análises dinâmicas das vibrações causadas pelo desprendimento de vórtices, por meio de ensaios de modelos aeroelásticos com medições do escoamento na esteira do modelo com auxílio de um anemômetro de fio quente.

Também é relevante que mais relações dimensionais, corriqueiramente praticadas pela indústria construtiva, sejam estudadas para outros tipos de escoamentos que representem as demais categorias normativas da NBR – 6123, a fim de caracterizar o fenômeno com maior propriedade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, C. M. **Avaliação de brises sob ação do vento e sua influência na distribuição de pressões nas fachadas de um edifício alto**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2021.

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

BALENDRA, T. **Vibration of buildings to wind and earthquake loads**. London: Springer-Verlag, 1993.

BANAFSHEH, S. A.; CARLSON, D. W.; MODARRES-SADEGHI, Y. Vortex-induced vibration na galloping of prisms with triangular cross-sections. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 817, p. 590-618, 2020.

BASU, R. I., VICKERY, B. J. Across-wind vibrations of structures of circular cross-section part ii development of a mathematical model for full-scale application. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 12, p. 75-97, 1983.

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

BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das construções**. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2011.

BLESSMANN, J. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. 2 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

CAVALCANTE, M. Z. **Determinação experimental em túnel de vento dos fatores de vizinhança estáticos e dinâmicos para um modelo de edifício alto em distintas condições de vizinhança**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2020.

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

DALY, A. F. **The response of chamneys to Wind-induced loads na the evaluation of the resulting fatigue damage**. Ph.D. Thesis, University of Western Ontario London, Ontario, Canada, 1986.

DAVENPORT, A.G. **A Statistical Approach to the Treatment of Wind Loading on Tall Masts and Suspension Bridges**. Ph.D. Thesis. Department of Civil Engineering, University of Bristol, United Kingdom, 1961.

DAVENPORT, A.G. Gust loading factors. In: Proceedings of the American Society of Civil Engineers. **Journal of Structural Division**, vol. 93. 1967.

DYRBYE, C.; HANSEN, S. O. **Wind loads on structures**. Chichester: John Wiley & Sons, 1997.

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

FLAY, R. G. J. The gust factor approach to evaluate the along-wind response of structures to wind excitation. In: TAMURA, Y (Ed.). **4th International Advanced School on Wind Engineering**. Porto Alegre, 2015.

FONTECHA, R., HENNEKE, B., KEMPER, F., FELDMANN, M., Aerodynamic properties of wind turbine towers based on wind tunnel experiments. **X International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2017**. Rome, 2017.

GIACHETTI, A. **Wind effects on permeable building envelopes: A two dimensional exploratory study**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Department of Civil and Environmental Engineering, University of Florence, Florença, 2018.

GRALA, P. **Resposta de estruturas paralelepípedicas esbeltas frente ao fenômeno de desprendimento de vórtices: proposta para a NBR – 6123**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2020.

HOLMES, J. D. **Wind loading of structures**. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.

HUANG, R.F., LIN, B.H. & YEN, S.C. Time-averaged topological flow patterns and their influence on vortex shedding of a square cylinder in cross flow at incidence. **Journal of Fluids and Structures**, v. 26, p. 406-429. 2010.

JOUBERT, E. C.; VENTER, G.; HARMS, T. M. Computational simulation of the turbulent flow around a surface mounted rectangular prism. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 142, p. 173-187, 2015.

KWOK, K. C. S. Wind-induced vibrations of structures: with special reference to tall building aerodynamics. In: TAMURA, Y.; KAHREEM, A. (Ed.). **Advanced Structural Wind Engineering**. Japan: Springer. p. 121-155. 2013.

LOPATINSKI, V. **Vortex induced vibrations in high-rise buildings**. 2020. Dissertação. Master programme Building Technology, Aalto University School of Engineering. Finland, 2020.

LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M.; OLIVEIRA, M. G. K.; Aerodynamic effects on a high slenderness concrete chimney. **Rev. IBRACON Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 12, n. 6, p. 1353-1382, 2019.

LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. In: ESCOLA DE PRIMAVERA DE TRANSIÇÃO E TURBULÊNCIA, 4, 2004, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre, 2004.

- MANNINI, C., MARRA, A. M.; BARTOLI, G. VIV-galloping instability of rectangular cylinders: review and new experiments. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 132, p. 109-124, 2014.
- MELBOURNE, W. H. Cross-wind response of structures to wind actions. **International conference on wind effects on buildings and structures**, 4, 1975, Heathrow. Proceedings... Cambridge: Cambridge University Press., p. 343-358. 1977.
- MELO, L. P. C. **Influência de detalhes arquitetônicos e efeitos de vizinhança sobre a caracterização aerodinâmica de um edifício alto**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2020.
- MIGUEL, L. F. F. **Estudo teórico e experimental de um edifício alto submetido à ação dinâmica do vento**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2003.
- NAKAMURA, Y., MATSUKAWA, T. Vortex excitation of rectangular cylinders with a long side normal to the flow. **Journal of Fluid Mechanics**. v. 180, p. 171–191. 1986.
- NEMES, A., ZHAO, J., LO JACONO, D. & SHERIDAN, J. The interaction between flow-induced vibration mechanisms of a square cylinder with varying angles of attack. **Journal of Fluid Mechanics**. v. 710, p. 102–130. 2012.
- NÚÑEZ, G. J. Z. **Determinação experimental e teórica da resposta transversal à ação do vento de uma torre de telecomunicações de concreto armado**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2001.
- NÚÑEZ, G. J. Z.; LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M. Uso do túnel de vento como ferramenta de projeto no design aerodinâmico. **Design & Tecnologia**, v. 4, p. 10–23, 2012.
- OLIVEIRA, M. G. K. **Desenvolvimento de uma balança dinâmica de três graus de liberdade para estudos dos efeitos de flexo-torção em edifícios altos submetidos à ação do vento**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2009.
- PARRACHO, J. **A semi-empirical model for vortex-induced vibrations of tall circular towers**. 2012. Dep. Civil Engineering, IST, Lisbon, Portugal. 2012
- PINHEIRO, M. A. S. **Vibrações aeroelásticas em torres esbeltas**. 2012. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2004.
- SANTOS, M. L. **Vibrações induzidas por vórtices em torres de seção circular**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2013.

SANTOS, M. L.; PFEIL, M. S. Torres e chaminés de seção circular sob vibrações induzidas por vórtices. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS*, 7, 2014, Rio de Janeiro. **Anais** [...] Rio de Janeiro, 2014.

SHAO, C. P.; WANG, J. M.; WEI, Q. D. Visualization study on suppression of vortex shedding from a cylinder. **Journal of Visualization**, v. 10, p. 57-64, 2006.

SOCKEL, H. Fundamentals of wind engineering. **CISM Courses and Lectures: windexcited vibrations**. Vienna, v. 335, p. 85-160, 1994.

STANDARDS AUSTRALIA. AS/NZ 1170.2: **Structural design actions** – Part 2: Wind actions, Australian/New Zealand Standard, 2011.

TAMURA, Y.; KAWAI, H.; UEMATSU, Y.; MARUKAWA, H.; FUJII, K.; TANIIKE, Y. Wind load and Wind-induced response estimations in the recommendation for loads on buildings. **Engineering Structures**, v. 18, p. 399-411, 1996.

VICKERY, B. J., BASU, R. I. Across-wind vibrations of structures of circular cross-section. Part I. development of a mathematical model for two-dimensional conditions. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 12, p.49-73, 1983a.

VICKERY, B. J., BASU, R. I. Simplified Approaches to the Evaluation of the Across-Wind Response of Chimneys. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 14, p. 153-166, 1983b.

VICKERY, B. J., BASU, R. I. The response of reinforced concrete chimneys to vortex shedding. **Engineering Structures**, v. 6, p.324-333, 1984.

VICKERY, B. J.; CLARK, A. W. Lift or across-wind response of tapered stacks. **Journal of the Structural Division**, New York, v. 98, n. 1, p. 1-20, 1972.

WANG, H. F.; ZHOU, Y.; CHAN, C. K.; WONG, W. O.; LAM, K. S. Flow structure around a finite-length square prism. *In: AUSTRALASIAN FLUID MECHANICS CONFERENCE THE UNIVERSITY OF SYDNEY*, 15, 2004, Sydney. 2004.