



Caracterização Aerodinâmica das Forças Laterais Devidas a Desprendimento de Vórtices em Edificações Paralelepípedicas Esbeltas

Emerson Sena Almeida¹, Acir Mércio Loredou-Souza², Marcelo Maia Rocha³

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul / PPGEC / emerson.sena.almeida@gmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul / PPGEC / acir@ufrgs.br

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul / PPGEC / marcelo.maiarocha@gmail.com

Resumo

O projeto de uma estrutura esbelta exige o conhecimento dos fatores ambientais que venham a impactá-la estaticamente 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. 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.

Introdução

O fenômeno de desprendimento de vórtices é um fator importante a ser analisado no projeto de uma estrutura esbelta, pois as vibrações provenientes da força lateral advinda do desprendimento dos vórtices podem promover deslocamentos estruturais em níveis inaceitáveis. Tal fenômeno abrange uma ampla gama de tipos estruturais, seja a estrutura de seção circular, retangular, triangular ou qualquer outra, e conhecer a maneira como esta responde frente à ação do vento é extremamente importante.

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). Os deslocamentos excessivos não estão relacionados somente ao estado limite último, mas também ao de serviço, quando o movimento dessas estruturas causar desconforto nos usuários, além da sensação de falta de segurança na utilização delas. Além disso, por consequência da atuação periódica das forças laterais, pode ocorrer a redução da vida útil por fadiga em diversos tipos de estruturas.

A determinação de coeficientes de força lateral e espectros de potência da força lateral provenientes de estruturas com formas paralelepípedicas permitem estimar a sua sensibilidade – com base nos picos de força para determinadas incidências do vento – aos impactos provenientes do fenômeno de desprendimento de vórtices.

Dessa forma, o presente estudo objetiva a determinação de coeficientes r.m.s. 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.

Aerodinâmica de corpos de seção retangular

A separação do escoamento para seções retangulares se dá nas arestas comuns entre a face de barlavento e as faces laterais, enquanto para corpos de seção circular 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).

Sabe-se que as vibrações ocorrem quando os vórtices se desprendem da estrutura de maneira alternada, produzindo forças equivalentes na direção transversal ao escoamento, como mostra a Figura 1. Essas forças periódicas surgem alternadamente em ambos os lados da estrutura na mesma frequência do desprendimento dos vórtices.

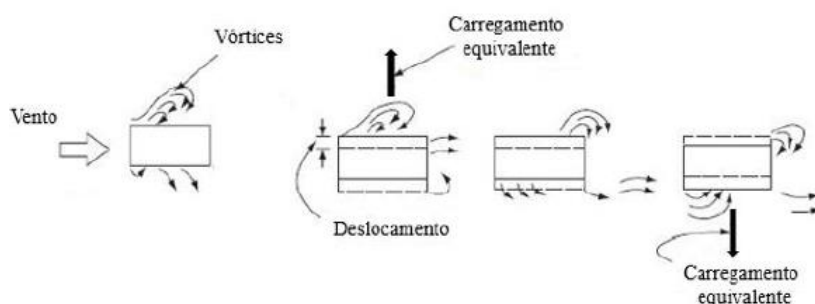


Figura 1 – Característica dos vórtices sobre uma estrutura de seção retangular (fonte: adaptado de Lopatinski, 2020).

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 ilustra a explicação dada para uma seção transversal retangular simples de cantos vivos.

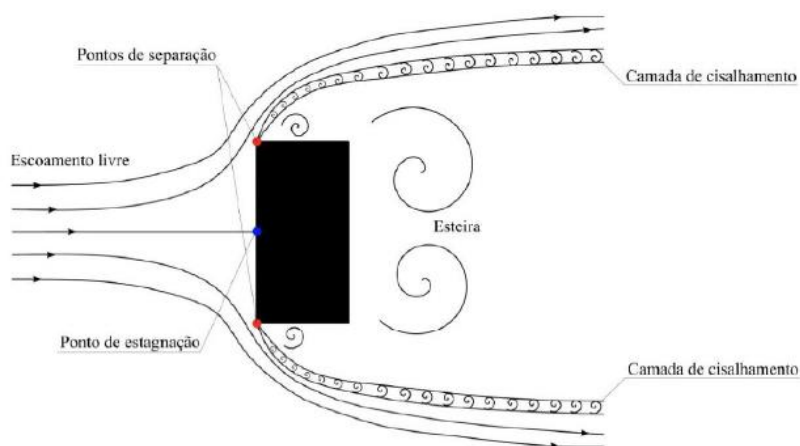


Figura 2 – Escoamento em torno de um corpo de seção transversal retangular (fonte: Amaral, 2021).



Quando o corpo está 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.

A Figura 3 mostra os valores para o coeficiente de arrasto (C_a) para corpos paralelepípedicos em função da variação da relação comprimento/largura (largura na direção perpendicular ao vento). Os valores expostos foram obtidos para escoamento turbulento, valores finitos de h/b e velocidade de referência medida em h .

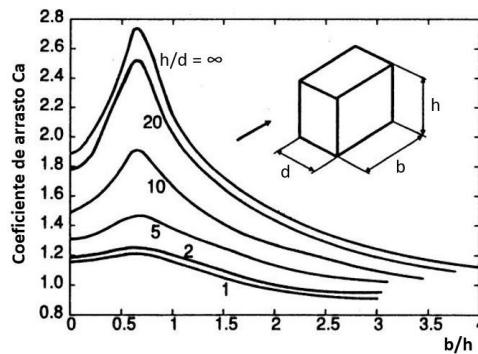


Figura 3 – Relação entre o coeficiente de arrasto e b/h para corpos paralelepípedicos (fonte: Adaptado de Sockel, 1994).

Para corpos alongados, as linhas de corrente separadas a barlavento recolam na superfície do corpo, gerando um estreitamento da esteira, o que diminui o arrasto. Para uma compreensão suficiente do fenômeno é necessário definir alguns conceitos como número de Strouhal, velocidade crítica e frequência de desprendimento de vórtices.

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 (que para o presente trabalho se refere à direção perpendicular a incidência do vento), como pode-se observar por meio da Equação (4):

$$St = \frac{f_s d}{V} \quad (4)$$

Através desse parâmetro é possível também ser determinada a velocidade crítica do vento V_{cr} como mostra a Equação (5), 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).

$$V_{cr} = \frac{f_n d}{St} \quad (5)$$

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 expostos na Figura 3, que serão utilizados para o cálculo de St e f_s (frequência de desprendimento de um par de vórtices) no presente estudo.

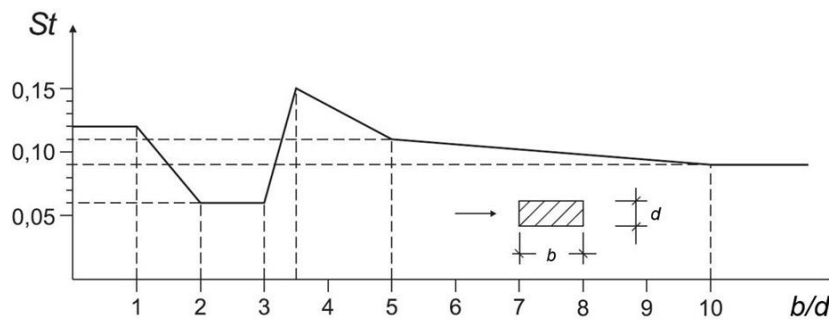


Figura 3 – Valores para o número de Strouhal referente às seções retangulares com arestas vivas (fonte: adaptado de Eurocódigo, 2010).

Análise no domínio da frequência

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 utilização do método permite a determinação da resposta da estrutura em termos de deslocamentos, partindo antes da determinação da força do vento sobre a estrutura.

Os conceitos intrínsecos ao método de Davenport estão esquematizados na Figura 4, 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.

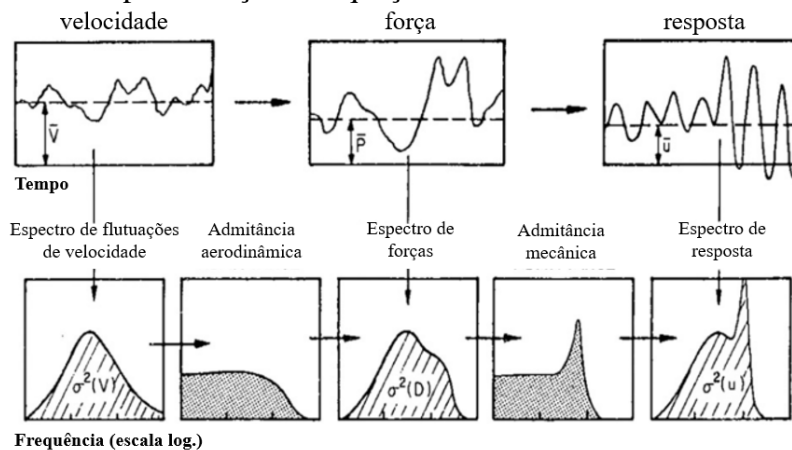


Figura 4 – Processo probabilístico de Davenport (fonte: adaptado de Davenport, 1967).

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

$$S_L(f) = \frac{\left(\tilde{C}_L \frac{1}{2} \rho d V^2\right)^2}{\sqrt{\pi} B f_s} e^{-\left(\frac{1-f/f_s}{B}\right)^2} \quad (6)$$

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. Com os estudos desenvolvidos até então é possível resumir a distribuição das forças devidas ao fenômeno de desprendimento de vórtices na Figura 5, mesmo que existam diferenças entre os diversos estudos elaborados sobre o tema.

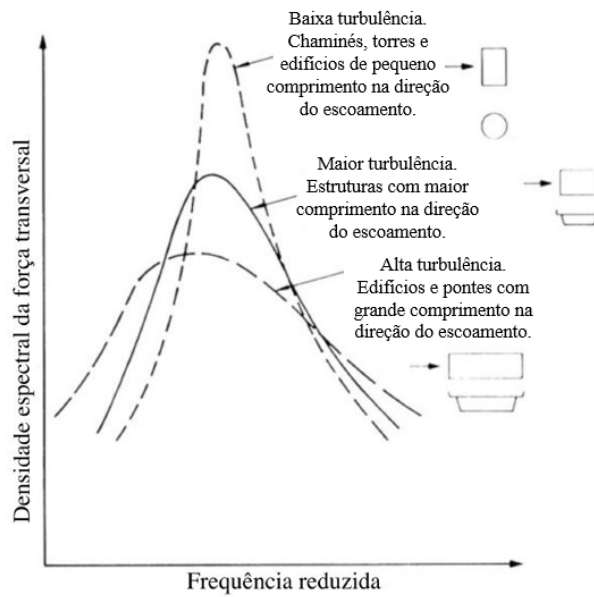


Figura 5 – Espectro da força transversal para estruturas distintas (fonte: Adaptado de Melbourne, 1977).

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

Caracterização dos modelos e tratamento de dados

Foram selecionadas relações dimensionais ($h/d/b$) representativas de edifícios atualmente construídos no Brasil e que também podem ser aplicadas a projetos de novas estruturas. As dimensões consideradas são: h (altura dos modelos, que em escala real representam edifícios entre 120 e 150 m), d (dimensão na direção transversal ao vento), e b (dimensão na direção do vento). Os ensaios realizados foram direcionados para o escoamento $p = 0,23$, categorias III e IV presentes na NBR – 6123. Os modelos foram projetados na escala 1:400 e, para cada ensaio, o Modelo isolado foi exposto a 24 ângulos de incidência de vento diferentes, a cada 15 graus (de 0° a 345°). Os modelos foram fabricados em acrílico com 3,0 milímetros de espessura, com paredes internas e externas planas, sem parapeitos ou sacadas. A Figura 6 mostra a geometria dos modelos e a sua disposição na câmara de ensaio, levando em consideração os eixos X, Y e Z.

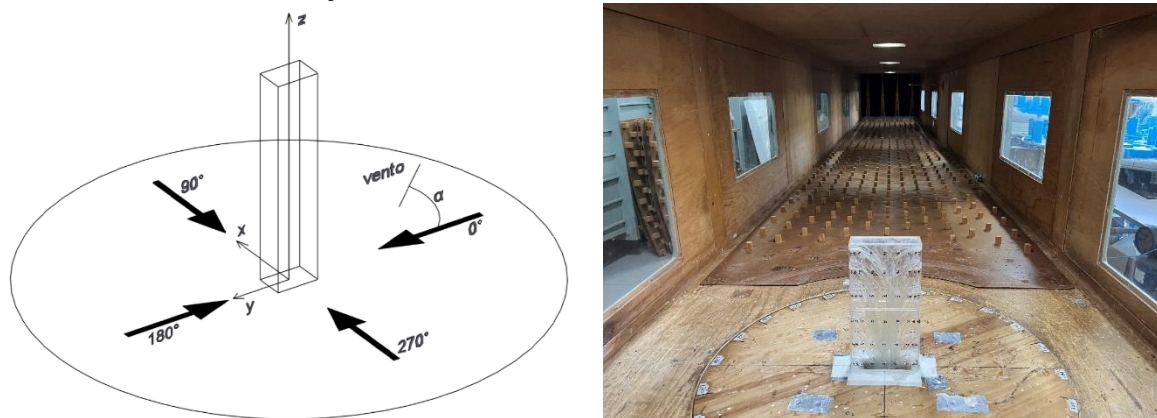


Figura 6 – Geometria dos modelos ensaiados e eixos de coordenadas considerado (fonte: autor).

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



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 Grala (2020), mas que não foram investigadas. As relações $h/d/b$ de cada grupo de ensaio são apresentadas na Tabela 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 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	
2	7,5	1,0	1,5	2
	7,5	1,5	1,0	
	6,5	1,0	1,5	3
	6,5	1,5	1,0	
3	3,0	1,0	2,0	4
	3,0	2,0	1,0	
	6,0	1,0	2,5	5
	6,0	2,5	1,0	

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 (NAKAMURA e MATSUKAWA, 1986; MANNINI *et al.*, 2014). Essa equação para coeficientes de força é descrita pela Equação (7):

$$CF_i = \frac{1}{A} \int_A c_p n_i dA \quad (7)$$

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.

Vale reforçar também que a obtenção da frequência de desprendimento de vórtices foi dada por meio da utilização da Figura 3, a qual permite estimar o valor de St para cada Modelo. A partir da obtenção de St é possível calcular a frequência de desprendimento de vórtices f_s .

Realizada a análise dos coeficientes r.m.s. da força lateral, escolheram-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).

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 8:

$$PSD(f) = 2 \frac{\Delta t}{N} |FFT_k|_{k=2}^{N/2}|^2 \quad (8)$$

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 $(0,5 \rho_{ar} V^2 d h)^2$. 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 do Modelo 1 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 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.

Para os demais modelos estudados, utilizou-se um filtro de 96 períodos para reduzir os ruídos nas séries temporais, facilitando a identificação de padrões no sinal a ser analisado no domínio da frequência. Considerou-se iterativamente um valor múltiplo de 16 após a coleta dos dados, o qual corresponde ao período de aquisição (16 segundos) para cada um dos 24 ângulos de incidência do vento analisados.

Todos os ensaios foram realizados no Túnel de Vento *Professor Joaquim Blessmann* do Laboratório de Aerodinâmica das Construções na UFRGS.

Resultados

O Modelo do Grupo 1 foi reensaiado com o objetivo de comparação de resultados, de forma a confirmar os mesmos procedimentos que são aplicados no 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 , e para \tilde{C}_L e \tilde{C}_a estão presentes na Figura 7, 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 e da mesma maneira para \tilde{C}_L e \tilde{C}_a .

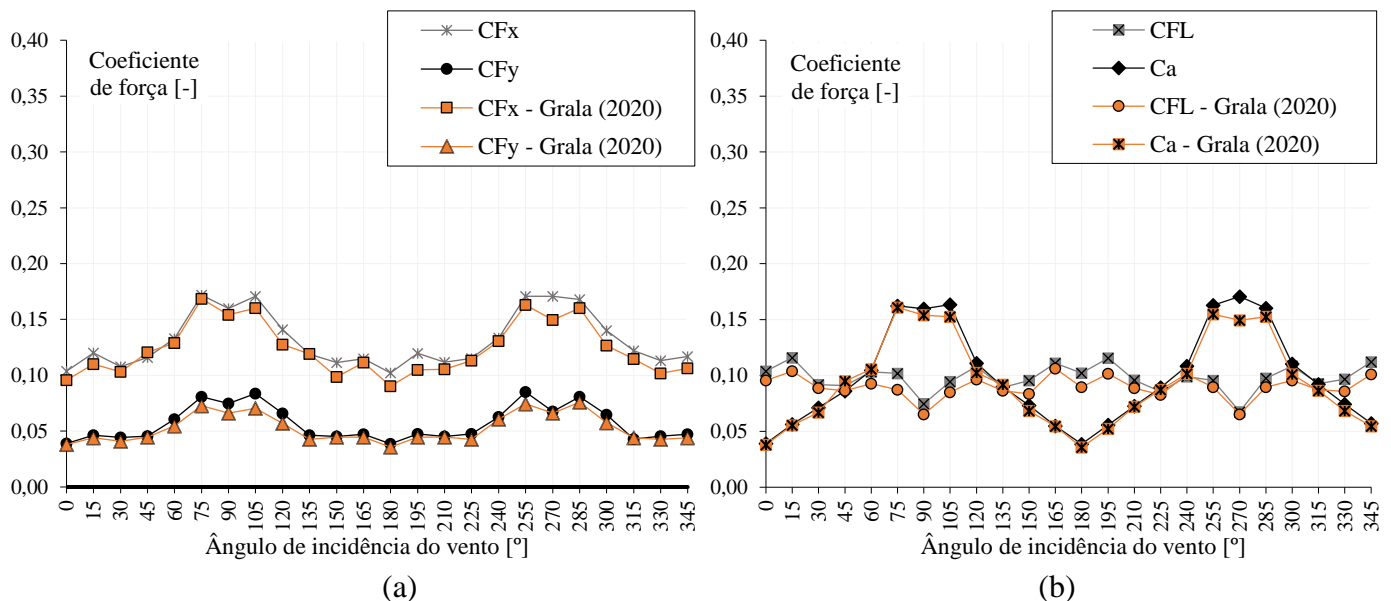


Figura 7 – (a) Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx) e \tilde{C}_y (CFy) r.m.s em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 1; (b) Coeficientes de força \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 1. (fonte: autor).

Os espectros adimensionalizados da força lateral S_L obtidos no presente trabalho também são comparados com o estudo de referência na Figura 8. Para a determinação dos espectros do Modelo 1 (6/1/3 e 6/3/1) os principais parâmetros utilizados foram CFL igual a 0,104 e 0,075 para as relações 6/1/3 e 6/3/1 respectivamente. Os picos para St foram 0,05 para 6/1/3 e 0,12 para 6/3/1, como expostos na Figura 8.

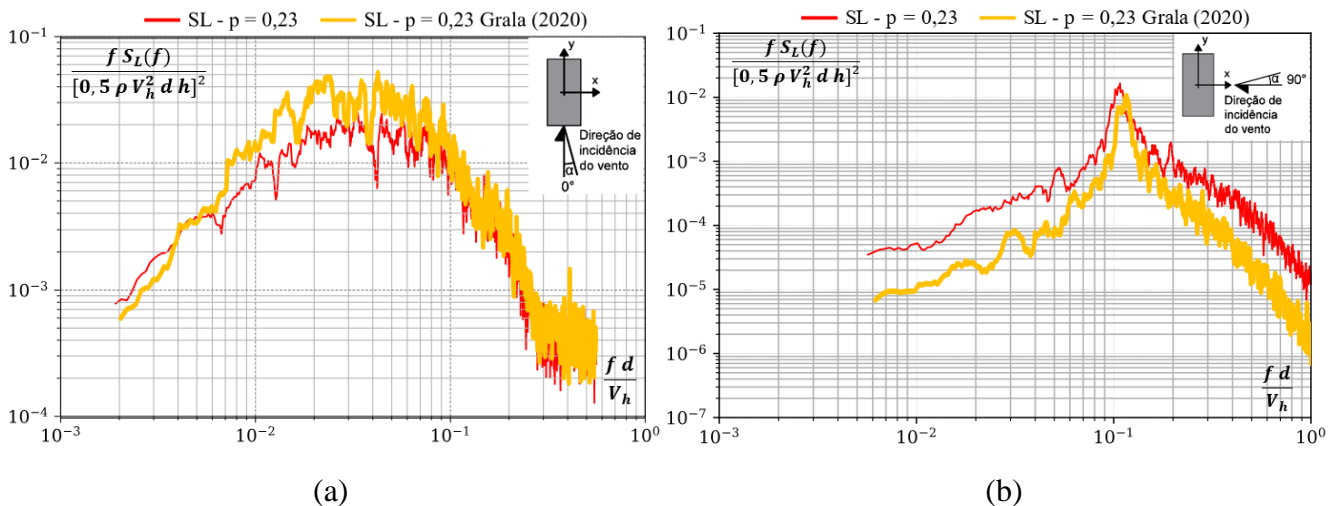


Figura 8 – (a) Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 1 (6/1/3); (b) Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 1 (6/3/1) (fonte: autor).

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 e tais processos influenciam diretamente nos resultados. Porém, evidenciam uma boa concordância a partir da verificação dos resultados.

Para o Modelo 2, a Figura 9 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 tais relações dimensionais.

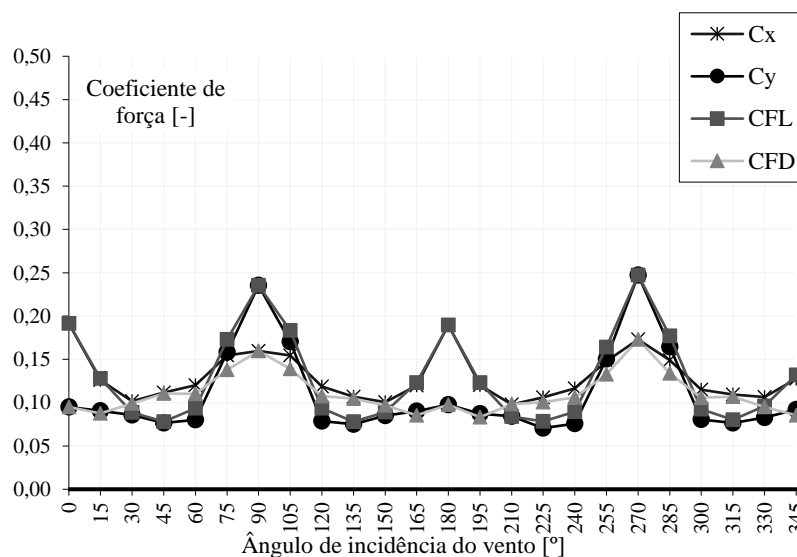


Figura 9: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx), \tilde{C}_y (CFy), \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 2 (fonte: autor).

Pode-se observar que quando comparado com o Modelo 1, o Modelo 2 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 (1986) e Mannini *et al.* (2014) para estruturas mais suscetíveis ao fenômeno de desprendimento de vórtices. Os espectros adimensionalizados da força lateral gerados para cada uma das relações dimensionais do Modelo 2 estão presentes na Figura 10.

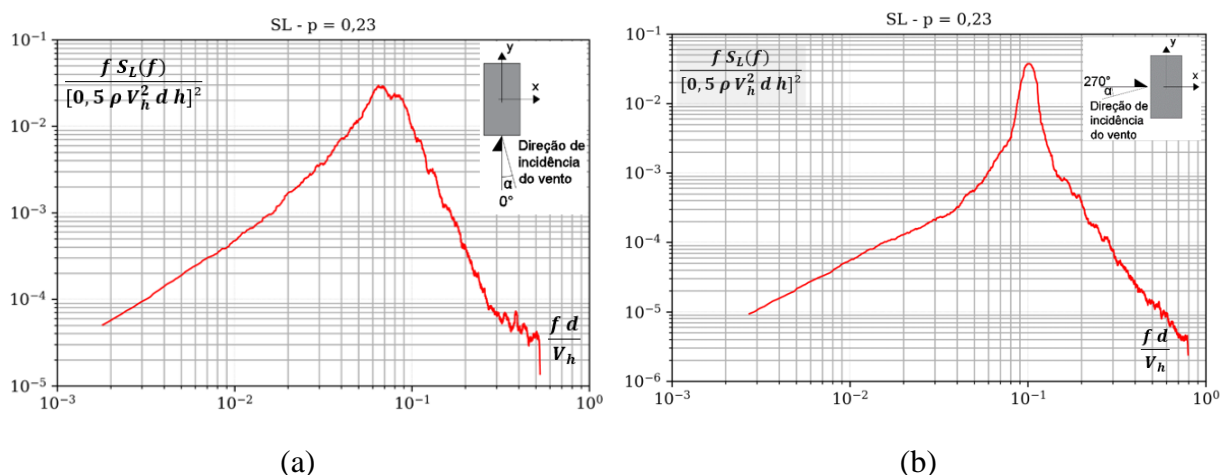


Figura 10 – (a) Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 2 (7,5/1,5); (b) Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 2 (7,5/1,5/1) (fonte: autor).

Os picos evidenciados na Figura 10 estão em concordância com os valores de St 0,09 (7,5/1,5) e 0,12 (7,5/1,5/1) calculados a partir da metodologia do Eurocódigo.

Para o Modelo 3, na Figura 11 estão presentes os valores dos coeficientes r.m.s. de força. O \tilde{C}_L máximo obtido é igual a 0,207 para o Modelo 3 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.

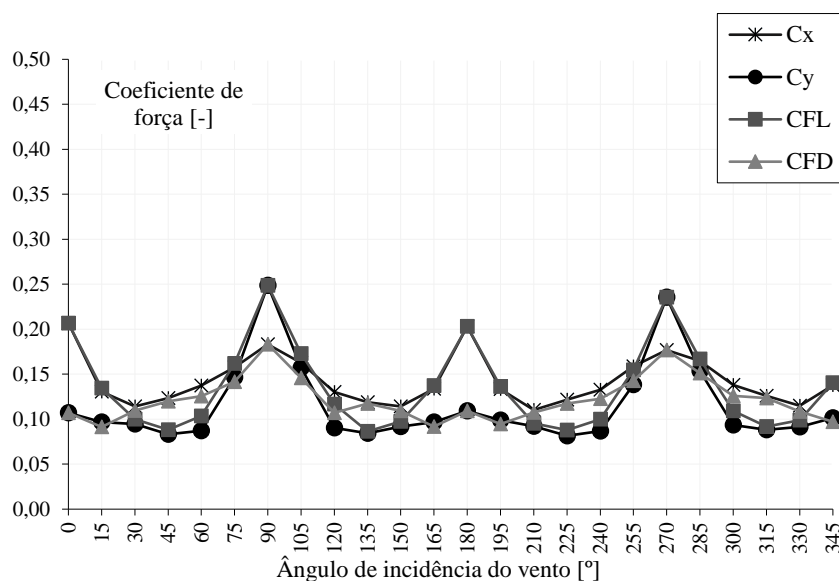


Figura 11: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx), \tilde{C}_y (CFy), \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 3 (fonte: autor).



Os picos dos coeficientes r.m.s. entre os modelos 2 e 3 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. Os espectros adimensionalizados da força lateral gerados para cada uma das relações dimensionais do Modelo 3 estão presentes na Figura 12.

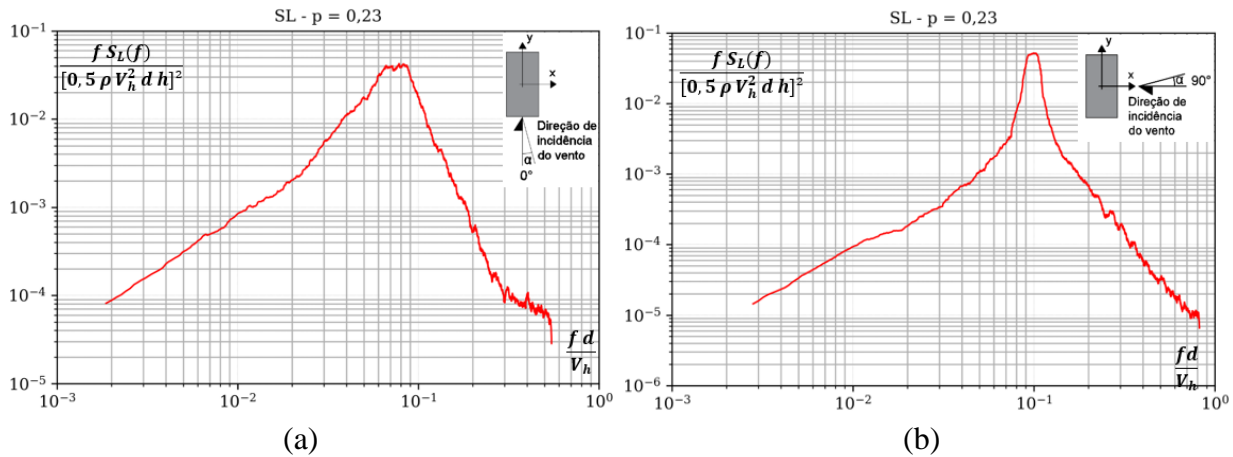


Figura 12 – (a) Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 3 (6,5/1,5); (b) Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 3 (6,5/1,5/1) (fonte: autor).

O espectro exposto na Figura 12 (a) para a relação 6,5/1,5/1 ($St = 0,12$) apresenta uma forma mais alargada que o espectro da relação 6,5/1/1,5 ($St = 0,09$), 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.

Para o Modelo 4, a Figura 13 mostra os coeficientes r.m.s. de força, 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).

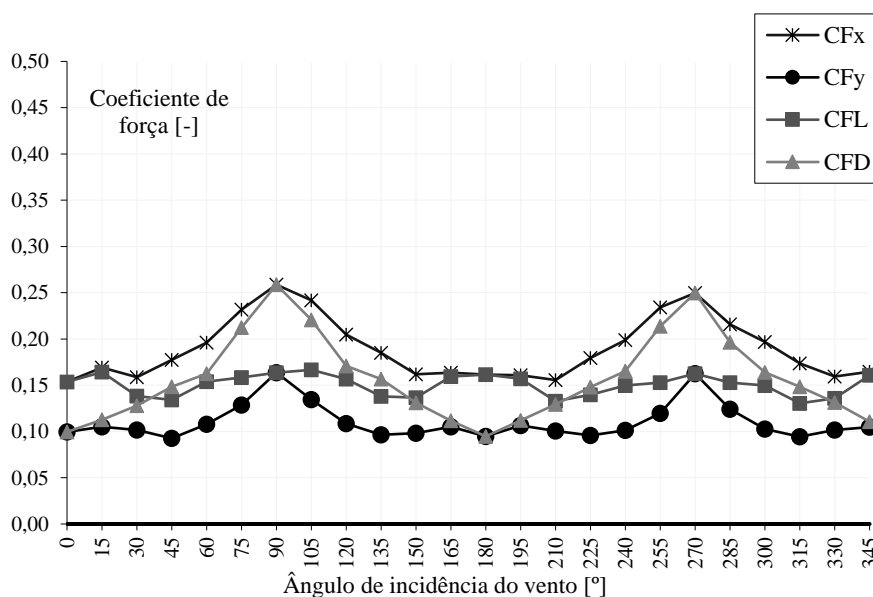


Figura 13: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx), \tilde{C}_y (CFy), \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 4 (fonte: autor).



Para o Modelo 4 os valores r.m.s. dos coeficientes de força lateral apresentaram valores mais “espalhados” e sem picos pronunciados quando comparados com 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 apresentem tais relações dimensionais presentes no Modelo 4, o maior impacto será causado pela força de arrasto causada pelo vento (quando comparado com a força lateral). Os espectros gerados para cada relação dimensional 3/1/2 ($St=0,05$) e 3/2/1 ($St=0,12$) estão presentes na Figura 14.

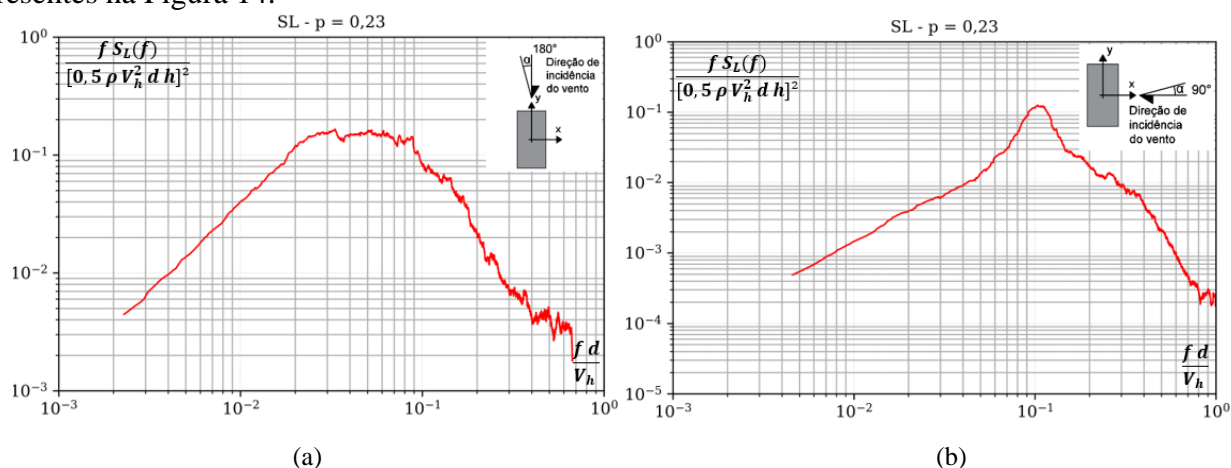


Figura 14 – (a) Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 4 (3/1/2); (b) Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 4 (3/2/1) (fonte: autor).

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 5.

Para o Modelo 5, 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 no Modelo 1.

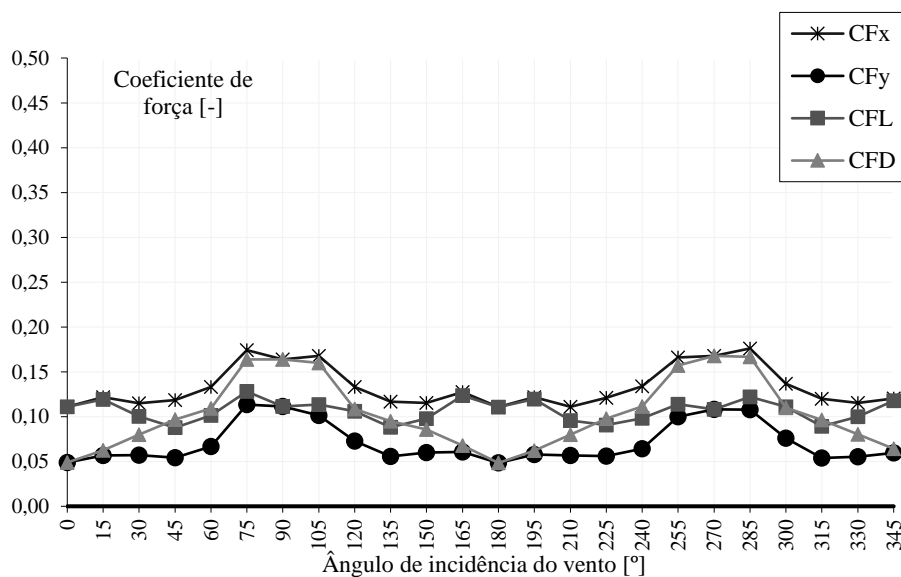


Figura 15: Coeficientes de força \tilde{C}_x (CFx), \tilde{C}_y (CFy), \tilde{C}_L (CFL) e \tilde{C}_a (CFD) r.m.s. em função do ângulo de incidência do vento no Modelo 5 (fonte: autor).

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 $6/1/2,5$ ($St=0,05$) e 90° e 270° para a relação $6/2,5/1$ ($St=0,12$). 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 16 (a). 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 $6/1/2,5$.

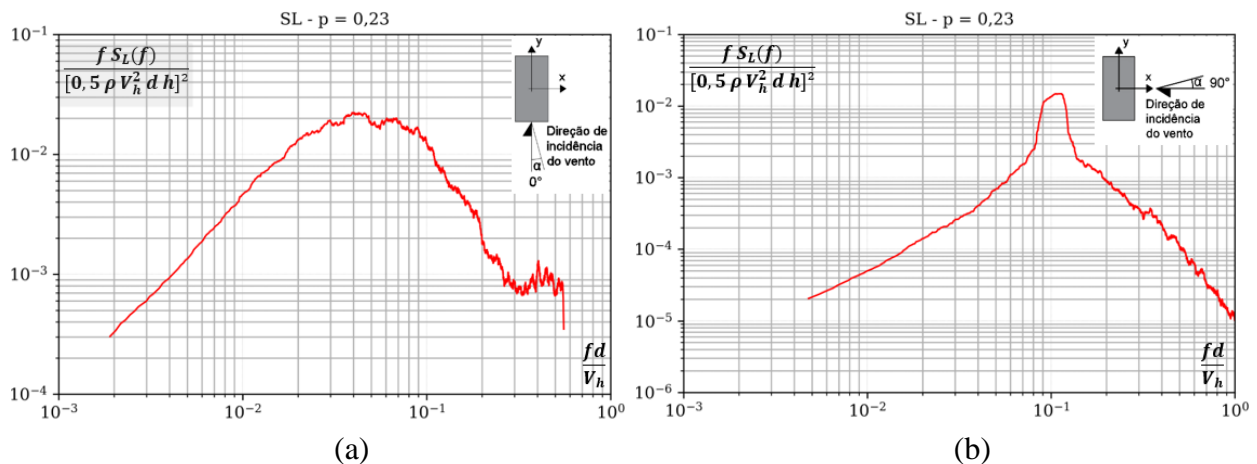


Figura 14 – (a) Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 5 (6,5/2,5/1); (b) Espectro adimensionalizado da força lateral S_L do Modelo 5 (6,5/1/2,5) (fonte: autor).

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 5 modelos ensaiados em túnel de vento para o escoamento com $p = 0,23$ referente à categoria III e IV da NBR – 6123. Os resultados semelhantes encontrados tanto para os coeficientes r.m.s. de força, quanto para os espectros da força lateral para o Modelo de verificação dos procedimentos aplicados neste estudo, referente ao Grupo 1, possibilitou atestar uma boa concordância na metodologia aplicada desde os ensaios realizados no túnel de vento até o tratamento dos dados obtidos.

A análise em termos dos coeficientes r.m.s. da força lateral \tilde{C}_L para os modelos do Grupo 2 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.

No que se refere ao Grupo 3, o Modelo 4 apresentou em seus coeficientes r.m.s. de força, alterações causadas, possivelmente, pela turbulência do escoamento, devido a sua altura o inserir na faixa mais turbulenta do escoamento próxima ao piso do túnel (hipótese), 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.

Ao se analisar o Modelo 5, 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.

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.

Referências

- 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.
- BLESSMANN, J. Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento. 2 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.
- BALENDRA, T. Vibration of buildings to wind and earthquake loads. London: Springer-Verlag, 1993.
- COOLEY, J. W.; TUKEY, J. W. An Algorithm for Machine Calculation of Complex Fourier Series. Mathematics of Computation, v. 19, p. 297-301, 1965.
- DAVENPORT, A.G. Gust loading factors. In: Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of Structural Division, vol. 93. 1967.
- EUROCÓDIGO 1, Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions. EN 1991-1-4, The European Standard, 2010.
- 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.
- LOPATINSKI, V. Vortex induced vibrations in high-rise buildings. 2020. Dissertação. Master Programme Building Technology, Aalto University School of Engineering. Finland, 2020.
- 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.
- 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.
- 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.