



A: XXXIX-0000

DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES EM ESTRUTURAS PARALELEPIPÉDICAS: PROPOSTA PARA A NBR-6123

VORTEX SHEDDING IN RECTANGULAR SECTION BUILDINGS: A PROPOSAL FOR THE BRAZILIAN WIND CODE NBR-6123

Pedro Grala (A) (1) ; Acir Mércio Loredo Souza (2); Marcelo Maia Rocha (3)

(1) D.Sc, Engenheiro Civil, Grala Engenharia, Porto Alegre, Brasil.

(2) Ph.D. Prof., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, Brasil.

(3) Dr. Techn. Prof., Marcelo Maia Rocha, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, Brasil.

Endereço para correspondência: pedro@egrala.com.br; (A) Apresentador

Área temática: Desprendimento de vórtices em estruturas paralelepípedicas.

Resumo

Estruturas como torres e edifícios são vulneráveis ao fenômeno de desprendimento de vórtices, devido à sua esbelteza e forma rombuda. A influência de tal fenômeno é tão importante no projeto estrutural, que a arquitetura externa de edifícios proeminentes é desenvolvida de forma a mitigar os esforços gerados pelo desprendimento de vórtices. Tendo em vista a magnitude dessas forças laterais no dimensionamento estrutural de edifícios, e com o intuito de se subsidiar a NBR-6123, é importante o desenvolvimento de uma metodologia para a quantificação da força lateral equivalente em estruturas paralelepípedicas. Para tanto, foi realizado um estudo experimental em túnel de vento com cinco diferentes modelos com diferentes relações dimensionais, sob quatro diferentes perfis de vento e com velocidade do vento capaz de desprender os vórtices de Kármán. Os modelos ensaiados foram construídos em escalas entre 1:300 e 1:400, sendo que o modelo 3/1/1 foi ensaiado também em escalas entre 1:600 e 1:800. Após, aplicou-se os espectros de força do vento na equação de admitância mecânica, sendo possível a elaboração de um método compatível com a NBR-6123. A análise de dados disponíveis na bibliografia validou os resultados obtidos, concluindo-se que a metodologia apresentada é satisfatória para edificações dentro dos padrões estudados.

Palavras-chave: desprendimento de vórtices; edifícios altos; resposta dinâmica

Abstract

Structures such as towers and tall buildings are quite vulnerable to the vortex shedding phenomenon, due to their slenderness and non-aerodynamic form. The influence of the phenomenon is so important in the structural design, that the external architecture of prominent tall buildings is developed in order to mitigate the efforts generated by vortex shedding. By considering the magnitude of these lateral forces in the structural design of buildings, and in order to support NBR-6123, it is important to develop a methodology to quantify the equivalent lateral force in rectangular cross-sectional structures. For this purpose, tests of five models with different dimensional ratios, under four different wind profiles and with wind speed capable of shedding the Kármán Vortex. The tested models were built in scales between 1:300 and 1:400, being that the model 3/1/1 was also tested in a scale between 1:600 and 1:800. After, the wind force spectra were applied to the mechanical admittance equation, making it possible to develop a method compatible to the Brazilian Wind Code NBR-6123. The analysis of data available in the bibliography validated the obtained results, concluding that the presented methodology is satisfactory for buildings within the studied models.

Keywords: vortex shedding; tall buildings; dynamic response



1. INTRODUÇÃO

O fenômeno de desprendimento de vórtices, que causa forças laterais, afeta dinamicamente tanto estruturas de seção circular, como também estruturas de seção retangular, como edifícios. Como este carregamento dinâmico pode exceder carregamentos estáticos em algumas situações, a magnitude das forças transversais define especificações de projeto. Apesar de essas estruturas serem simples dos pontos de vista estrutural e aerodinâmico, a determinação de sua resposta estrutural ainda é um dos grandes problemas da Engenharia do Vento.

Esses vórtices são chamados Vórtices de Kármán, e, de acordo com Blessmann (2005), para o fenômeno ocorrer, as estruturas devem ter seção circular ou poligonal e considerável esbelteza. Além disso, é necessário que haja coesão entre o desprendimento dos vórtices ao longo de todo o corpo e que o escoamento seja pouco turbulento. Isso que faz com que, na prática, diversos fatores afetem a correlação do desprendimento dos vórtices, como o perfil do vento e a variação da seção com a altura. Segundo Dyrbye e Hansen (1997), um escoamento com desprendimento de vórtices em somente uma frequência é idealizado, por conta da turbulência.

O número de Strouhal St é um dos parâmetros mais importantes na análise de desprendimento de vórtices. Ele depende da forma da estrutura, do movimento do corpo, da rugosidade superficial, do número de Reynolds e de características do escoamento. Este parâmetro estabelece a relação entre a frequência de desprendimento de um par de vórtices f_s , uma dimensão característica da estrutura d (dimensão da estrutura na direção transversal ao escoamento) e a velocidade do vento V . Esta relação pode ser observada na Eq. (1):

$$St = \frac{f_s d}{V} \quad (1)$$

Ao substituir f_s pela frequência natural da estrutura f_n e St pelo valor adequado, a Eq. (1) fornece a velocidade crítica V_{cr} , a qual é a velocidade em que o fenômeno inicia. Outro parâmetro de grande importância é o número de Scruton Sc , o qual é conhecido também por parâmetro de massa-amortecimento e relaciona a massa da estrutura com a do escoamento no qual a estrutura está inserida. A Eq. (2) apresenta o número de Scruton:

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

Onde m_e é a massa equivalente por unidade de comprimento, definida na Eq. (3); ζ_e é a razão de amortecimento estrutural crítico; ρ é a massa específica do ar.

$$m_e = \frac{\int_0^h m(z) \varphi^2(z) dz}{\int_0^h \varphi^2(z) dz} \quad (3)$$

Onde h é a altura total da estrutura; $m(z)$ é a massa por unidade de comprimento; $\varphi(z)$ é a forma modal da estrutura. Outro parâmetro importante é o número de Reynolds, o qual consiste na razão entre as forças de inércia e de viscosidade do fluido. O número de Reynolds Re é fornecido pela Eq. (4):



$$Re = \frac{v d}{\nu} \quad (4)$$

Onde ν é a viscosidade cinemática do fluido. O movimento da estrutura exerce certo controle sobre o desprendimento de vórtice, causando oscilações não só na velocidade crítica, mas também em velocidades próximas a ela (principalmente as maiores). Este fenômeno é conhecido também como captura, sincronização, lock-in ou lock-on. Quando a velocidade do escoamento aumenta ou decresce, de forma que a frequência de desprendimento de vórtices se aproxime da frequência natural da estrutura, e a estrutura oscila, os vórtices começam a se desprender na frequência natural da estrutura, e, segundo Ruscheweyh (1994), f_s não segue mais a lei de Strouhal, sendo constante ao longo de uma gama específica de velocidades.

Vickery e Clark (1972) foram os primeiros a aplicar o espectro da força de sustentação dentro da equação de admitância mecânica, visando a calcular a resposta da estrutura frente ao fenômeno de desprendimento de vórtices. Posteriormente, Vickery e Basu (1983a, 1983b) aprimoraram o modelo de Vickery e Clark para estruturas de seção circular, acrescentando o conceito de amortecimento aerodinâmico negativo. Saunders e Melbourne (1977), bem como a Norma Australiana e Neozelandesa (AS-NZ) (2011) utilizam do mesmo conceito de aplicação do espectro da força de sustentação na equação de admitância mecânica, no entanto para estruturas de seção retangular. A equação de admitância mecânica é apresentada na Eq. (5) e pode ser simplificada, segundo Kwok (2013), conforme apresentado na Eq. (6):

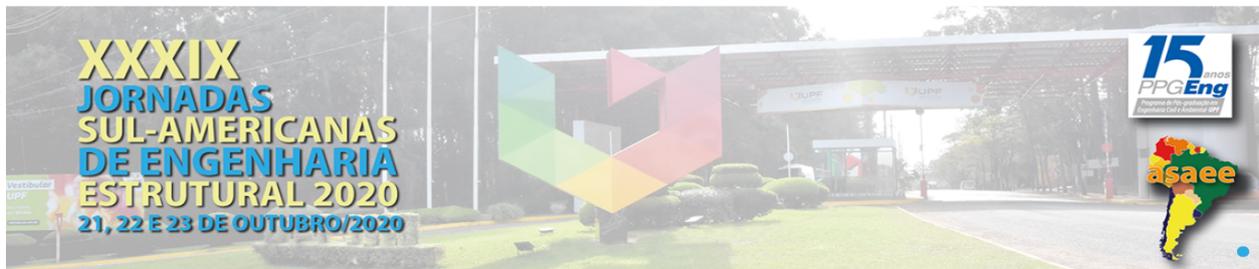
$$\sigma_y^2 = \frac{1}{(2\pi f_n)^4 M^2} \int_0^\infty S_L(f) |H(f)|^2 df \quad (5)$$

$$\sigma_y^2 \approx \frac{1}{(2\pi f_n)^4 M^2} \left[\frac{\pi f_n S_L(f_n)}{4\zeta_e} \right] \quad (6)$$

Onde σ_y^2 é a variância da resposta transversal do topo da estrutura; M é a massa modal igual a $m_e \int_0^h \varphi^2(z) dz$; $S_L(f)$ é a densidade espectral da força lateral na frequência f ; e $|H(f)|^2$ é a função de ganho. Kwok (2013) ainda informa que o uso das Eq. (5) e (6) para prever a resposta transversal de edifícios é satisfatório quando o desprendimento de vórtices é o mecanismo dominante e quando a velocidade reduzida ($V_r = \frac{v}{f_n d} = \frac{1}{f_r}$, onde f_r é a frequência reduzida) é baixa. Para altas velocidades reduzidas (maiores que 10), tal procedimento pode vir a subestimar a resposta transversal da estrutura, dado que outros mecanismos de excitação podem se acoplar, como o galope.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados no Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1982). É um túnel de vento de circuito fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis. Este túnel permite a simulação das principais características de ventos naturais, ou seja, simula a camada limite atmosférica. Sua seção de altas velocidades (a câmara principal de ensaios) tem relação comprimento/altura superior a 10, e dimensões 1,30 m x 0,90 m x 9,32 m (largura x altura x comprimento). A velocidade máxima do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme e suave e sem modelos, é de 45 m/s. As hélices do ventilador são acionadas por um motor elétrico



de 100 HP e o controle da velocidade do escoamento é feito através de um inversor de frequências. Outras informações sobre o Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann podem ser encontradas em Blessmann (1982, 2011) e em Loredo-Souza et al. (2004).

O Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann dispõe de quatro mesas giratórias para fixação de modelos, sendo que cada uma dessas mesas tem suas aplicações específicas. A mesa escolhida para realizar os ensaios deste trabalho foi a M-II, pois nela é possível se trabalhar com os perfis de velocidades desejados, obtidos através da colocação de blocos de madeira no piso do túnel, os quais simulam a rugosidade do terreno.

Os ensaios foram realizados com cinco diferentes perfis de escoamento: perfil uniforme e suave, e os perfis com expoente p da Lei de Potência iguais a 0,11, 0,23 e 0,34. O expoente $p = 0,34$ representa terrenos dentro da Categoria V da NBR-6123 (Loredo-Souza et al., 2004); $p = 0,23$ pode representar os terrenos das Categorias III e IV da NBR-6123 (Loredo-Souza et al., 2004); já os terrenos enquadrados nas Categorias I e II podem ser representados pelo escoamento com expoente $p = 0,11$.

Durante os ensaios, o registro da velocidade média do vento no túnel foi obtido através da diferença entre as medidas de pressões estáticas (Δp_a), lidas nos dois anéis piezométricos instalados na entrada da seção de trabalhos, conectadas a um micromanômetro tipo ManoAir 500 para medições. A temperatura interna (t) do túnel de vento durante os ensaios também é medida por este equipamento. A massa específica do ar (ρ_{ar}) foi calculada através da pressão atmosférica (P_{atm}), a qual foi medida por um barômetro digital modelo N1500/691. Através dessas informações obtidas, é possível obter-se a pressão dinâmica do vento e a velocidade média do vento em qualquer ponto do túnel.

Os modelos reduzidos foram instrumentados a partir da instalação de tomadas de pressões estrategicamente fixadas às fachadas dos edifícios, cujas leituras foram realizadas por um equipamento de aquisição simultânea de pressões flutuantes da marca Scanivalve. O equipamento possui 6 módulos, cada um com 64 canais e taxa de aquisição de 500 Hz. Os dados adquiridos foram processados em rotinas computacionais próprias do LAC, o que possibilitou o cálculo dos coeficientes de pressão. Os valores dos coeficientes de pressão médios e r.m.s. medidos nos ensaios foram utilizados como base de dados para o cálculo dos esforços cortantes e momentos fletores na base dos edifícios, devido à pressão estática do vento sobre os modelos estudados.

Os ensaios foram feitos com modelos com as seguintes relações dimensionais ($h/d/b$): 3/1/1, 6/1/1, 6/2/1, 6/1/2, 6/1,5/1 e 6/1/1,5, sendo h a altura do modelo; d a dimensão do modelo transversal ao escoamento; b a dimensão do modelo na direção do escoamento. A Fig. 1 apresenta as relações dimensionais dos modelos. Para cada um dos ensaios, foi simulado escoamento com $p = 0,11$ (referente às categorias I e II), com $p = 0,23$ (referente às categorias de terreno III e IV) e com $p = 0,34$ (referente à categoria de terreno V), visando a analisar as estruturas para diferentes intensidades de turbulência. Além disso, também foi analisado o caso de escoamento uniforme e suave. Em cada ensaio foram medidos os coeficientes de pressão para 24 diferentes ângulos de incidência do vento, ou seja, a cada 15°.

Os ensaios em modelos rígidos serviram para medição das pressões instantâneas e posterior integração para obtenção dos coeficientes aerodinâmicos e espectros da força de sustentação (lateral). Tais espectros foram comparados com os dados encontrados na bibliografia. Aplicando-se esses espectros à equação de admitância mecânica, torna-se possível a quantificação da força lateral exercida pelo desprendimento de vórtices em estruturas de arestas vivas, o que complementa o capítulo 11 da nova NBR-6123.

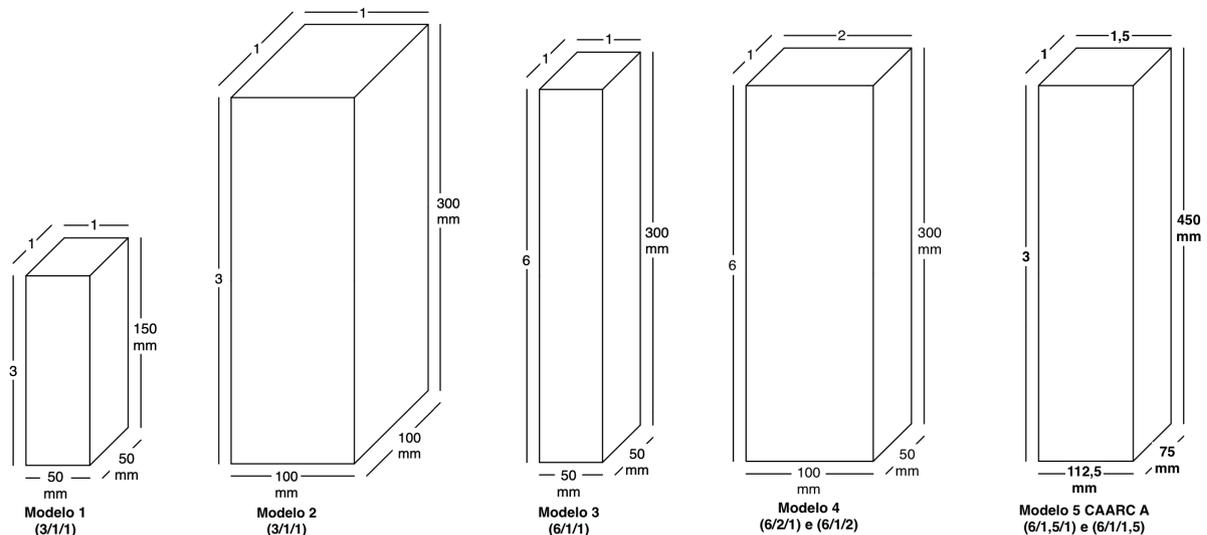


Fig. 1 – Identificação e características dos modelos, com suas dimensões.

3. RESULTADOS DOS ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

Os coeficientes de força (CF) e de momento fletor na base (CM) são calculados segundo a Eq. (7) e Eq. (8), respectivamente:

$$CF = \frac{1}{A} \int_A c_p n dA \quad (7)$$

$$CM = \frac{1}{A \times h} \int_A c_p z n dA \quad (8)$$

Onde A é a área da fachada na qual o escoamento incide perpendicularmente; c_p é o coeficiente de pressão; n é o cosseno diretor; z é a cota; e dA é a área de influência de cada tomada no modelo. A partir da análise dos coeficientes r.m.s. da força de sustentação, obteve-se os espectros de força de sustentação adimensionalizados através da Transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*). Os espectros, então, foram suavizados através da média móvel com 16 períodos. Deve-se observar que neste trabalho está se seguindo a nomenclatura utilizada na Engenharia do Vento, na qual o valor r.m.s. é usado como o desvio padrão para tratar da parte flutuante das forças. Para vento incidente perpendicularmente a fachadas de edifícios simétricos, a média da força transversal é nula e o valor r.m.s. coincide com o desvio padrão. No entanto, para outros ângulos de incidência e em edifícios não simétricos, o valor da média é diferente de zero e o valor r.m.s. difere do desvio padrão.

As características dos modelos seguem no quadro da Tab. 1. Deve-se observar que os Modelos 1 e 2 possuem a mesma relação $h/d/b$, mudando somente a escala, para verificar se os resultados obtidos se mantêm mesmo para escalas diferentes. A área de referência é tida sempre como a área da face transversal ao escoamento, para o cálculo dos espectros. Já a altura de referência é a altura do modelo e é usada para o cálculo dos coeficientes de momento fletor na base.

Tab. 1 – Dimensões e características dos modelos



Características	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
h/d/b	3/1/1	3/1/1	6/1/1	6/2/1 e 6/1/2	6/1,5/1 e 6/1/1,5
h (mm)	150	300	300	300	450
d (mm)	50	100	50	100 e 50	112,5 e 75
b (mm)	50	100	50	50 e 100	75 e 112,5
Escala	1:300	1:150	1:300	1:300	0,319444444
Número de Tomadas	100	168	120	144	280
Área ref. (mm ²)	7500	30000	15000	30000 e 15000	50625 e 33750
Altura de ref. (mm)	150	300	300	300	450

3.1. Modelos 1 e 2

Os gráficos com os espectros adimensionalizados do momento fletor na base de Saunders e Melbourne (1977) fornecem resultados para perfis com $I_1 = 12\%$ e $I_1 = 19\%$. O Modelo 1 tem intensidade de turbulência igual a 19% em sua altura com o perfil com $p = 0,34$, possibilitando sua comparação com os gráficos de Saunders e Melbourne (1977), conforme apresentado na Fig. 2. Já o Modelo 2 com $p = 0,34$ pode ser comparado com o espectro de Saunders e Melbourne (1977) com $I_1 = 12\%$ (Fig. 3). A análise das figuras permite perceber que não há problemas com as escalas, ou com os métodos utilizados, dado que os dados obtidos foram de encontro aos da bibliografia analisada.

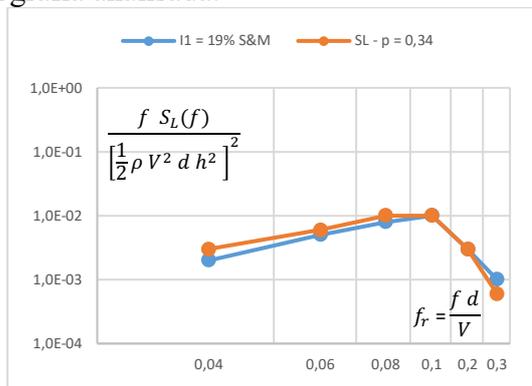


Fig. 2 – Comparação entre os espectros de momento na base de Saunders e Melbourne (1977) com $I_1 = 19\%$, e os obtidos no ensaio com expoente $p = 0,34$ para o Modelo 1.

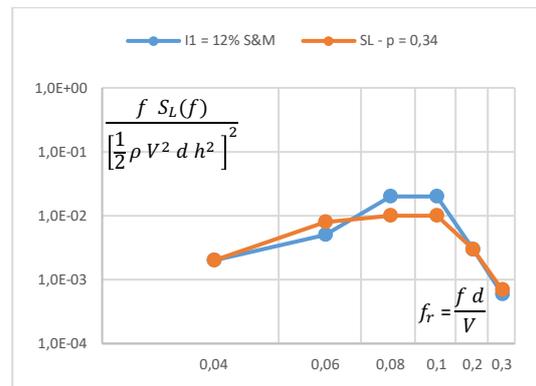


Fig. 3 – Comparação entre os espectros de momento na base de Saunders e Melbourne (1977) com $I_1 = 12\%$, e os obtidos no ensaio com expoente $p = 0,34$ para o Modelo 2.

Também é possível comparar os dados dos ensaios realizados com os da AS-NZ (2011) a qual fornece resultados para intensidades de turbulência de 12% e 20% a $2h/3$. Para a altura requerida, o Modelo 1 com $p = 0,34$ pode ser comparado ao perfil com $I_1 = 20\%$, enquanto o Modelo 2 com $p = 0,23$ pode ser comparado ao perfil com $I_1 = 12\%$. A Fig. 4 e a Fig. 5 apresentam essas comparações e permitem concluir que, novamente, os ensaios de ambos os Modelos 1 e 2 possuem coerência com os resultados encontrados na bibliografia.

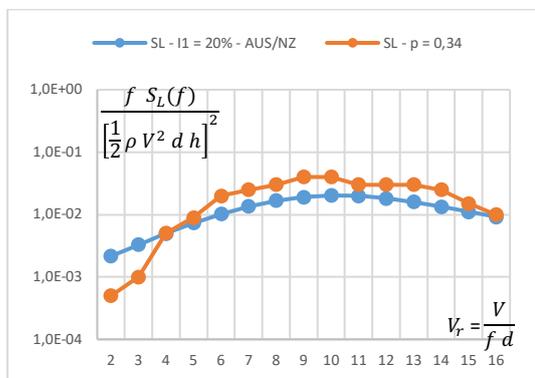


Fig. 4 – Comparação entre os espectros de força de sustentação da Norma Australiana e Neozelandesa com $I_1 = 20\%$, e os obtidos no ensaio com expoente $p = 0,34$ para o Modelo 1.

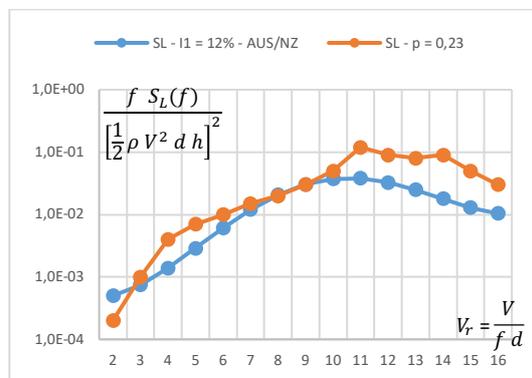


Fig. 5 – Comparação entre os espectros de força de sustentação da Norma Australiana e Neozelandesa com $I_1 = 12\%$, e os obtidos no ensaio com expoente $p = 0,23$ para o Modelo 2.

3.2. Modelo 3

Os gráficos com os espectros adimensionalizados do momento fletor na base de Saunders e Melbourne (1977) fornecem resultados para perfis com $I_1 = 12\%$ e $I_1 = 19\%$. Assim, o Modelo 3, com perfil de vento com expoente $p = 0,34$, que possui intensidade de turbulência de 12% na altura da edificação, foi comparado com o perfil suburbano de Saunders e Melbourne (1977) (Fig. 6). A comparação com os dados da AS-NZ (2011), a qual fornece resultados para intensidades de turbulência de 12% e 20% a $2h/3$, é feita com o Modelo 3 com perfil com $p = 0,23$ (Fig. 7). As duas análises permitem concluir que os dados novamente vão de encontro aos encontrados na bibliografia.

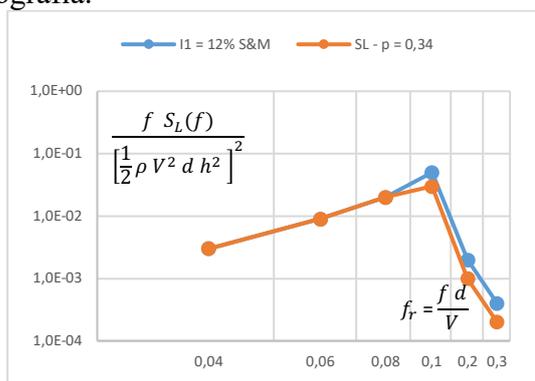


Fig. 6 – Comparação entre os espectros de momento na base de Saunders e Melbourne (1977a) com $I_1 = 12\%$, e os obtidos no ensaio com expoente $p = 0,34$ para o Modelo 3.

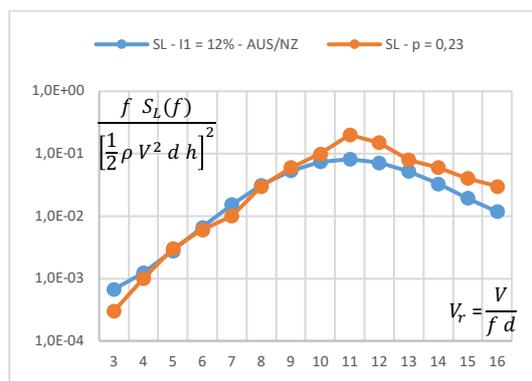


Fig. 7 – Comparação entre os espectros de força de sustentação da Norma Australiana e Neozelandesa com $I_1 = 12\%$, e os obtidos no ensaio com expoente $p = 0,23$ para o Modelo 3.



3.3. Modelo 4

A princípio, como uma forma geométrica, 6/2/1 e 6/1/2 são equivalentes. No entanto, como este trabalho apresenta a relação na forma $h/d/b$, onde d é a dimensão do modelo na direção transversal ao escoamento e b é a dimensão do modelo na direção do escoamento, e este trabalho avalia o desprendimento de vórtices com escoamento incidente tanto na fachada menor quanto na maior, fez-se necessária a separação entre os modelos. Assim, 6/2/1 refere-se a escoamento incidindo sobre a maior fachada do modelo, enquanto 6/1/2 refere-se a escoamento incidente sobre a menor. Os resultados obtidos com o Modelo 4 (6/2/1) e (6/1/2) com perfil de vento com $p = 0,34$ podem ser comparados com os de Saunders e Melbourne (1977) com intensidade de turbulência no topo da edificação igual a 12%, pois para esta altura as intensidades de turbulência ensaiadas coincidem com as da bibliografia. A Fig. 8 e a Fig. 9 apresentam essa comparação com os modelos 6/2/1 e 6/1/2, respectivamente.

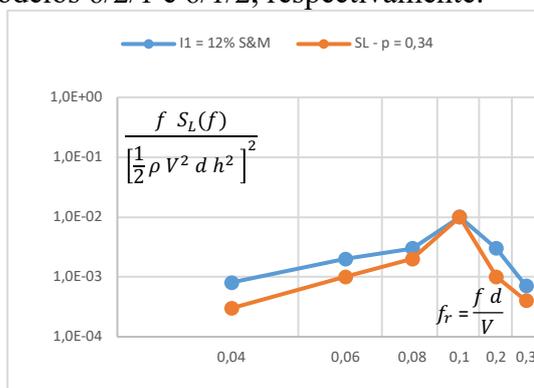


Fig. 8 – Comparação entre os espectros de momento na base de Saunders e Melbourne (1977) com $I_1 = 12\%$, e os obtidos no ensaio com expoente $p = 0,34$ para o Modelo 4 (6/2/1).

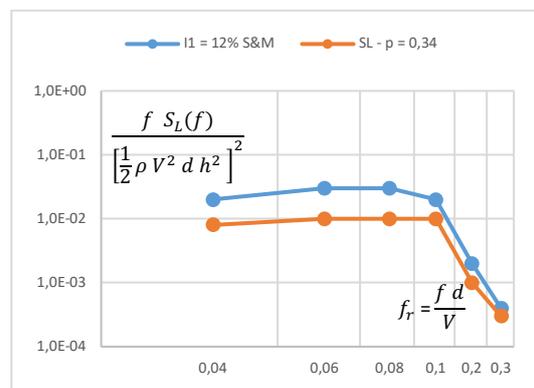


Fig. 9 – Comparação entre os espectros de momento na base de Saunders e Melbourne (1977) com $I_1 = 12\%$, e os obtidos no ensaio com expoente $p = 0,34$ para o Modelo 4 (6/1/2).

Com relação aos resultados da AS-NZ (2011), tanto o 6/2/1 (Fig. 10) como o 6/1/2 (Fig. 11) ensaiados com $p = 0,23$ podem ser comparados com os perfis com $I_1 = 12\%$ da AS-NZ para a referida altura. Qualitativamente, ambos os resultados coincidem com os espectros encontrados na bibliografia, mas quantitativamente os modelos ensaiados possuem espectros com mais intensidade a partir da velocidade reduzida de 11 para 6/2/1 e de 7 para o 6/1/2.

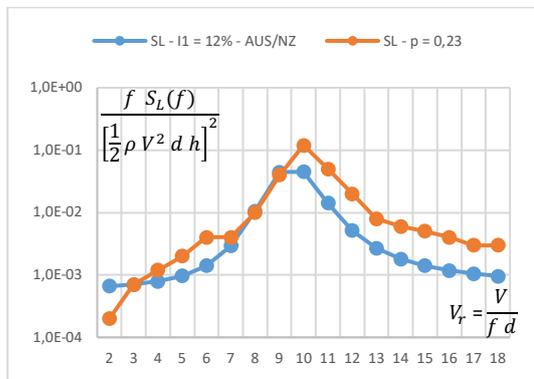


Fig. 10 – Comparação entre os espectros de força de sustentação da Norma Australiana e Neozelandesa com $I_1 = 12\%$, e os obtidos no ensaio com expoente $p = 0,23$ para o Modelo 4 (6/2/1).

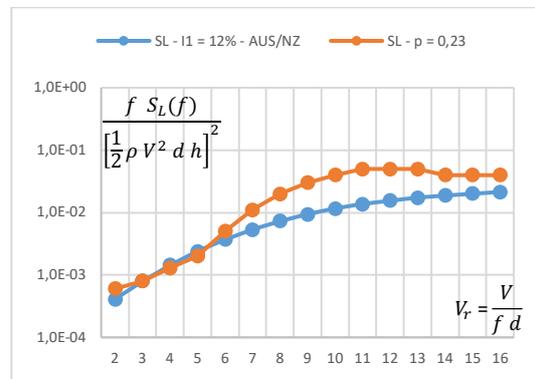


Fig. 11 – Comparação entre os espectros de força de sustentação da Norma Australiana e Neozelandesa com $I_1 = 12\%$, e os obtidos no ensaio com expoente $p = 0,23$ para o Modelo 4 (6/1/2).

3.4. Modelo 5

Assim, como o Modelo 4, o Modelo 5 é retangular. Então, 6/1,5/1 refere-se a escoamento incidente na maior fachada, enquanto que 6/1/1,5 refere-se a escoamento perpendicular à menor. Os resultados obtidos com o Modelo 5 (6/1,5/1) e (6/1/1,5) com perfil de vento com $p = 0,34$ podem ser comparados com os de Saunders e Melbourne (1977) com intensidade de turbulência no topo da edificação igual a 12%, pois para esta altura as intensidades de turbulência ensaiadas coincidem com as da bibliografia. A Fig. 12 e a Fig. 13 apresentam essa comparação com os modelos 6/1,5/1 e 6/1/1,5, respectivamente. Ao se analisar os resultados, novamente os espectros coincidiram com os resultados encontrados na bibliografia.

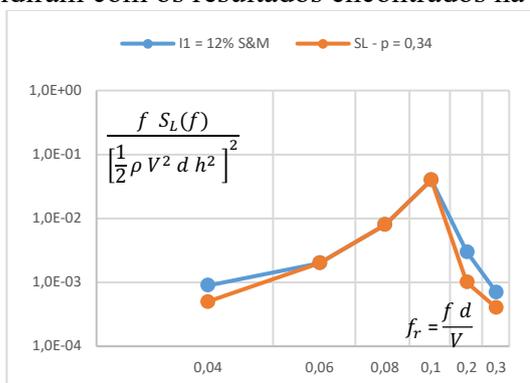


Fig. 12 – Comparação entre os espectros de momento na base de Saunders e Melbourne (1977) com $I_1 = 12\%$, e os obtidos no ensaio com expoente $p = 0,34$ para o Modelo 5 (6/1,5/1).

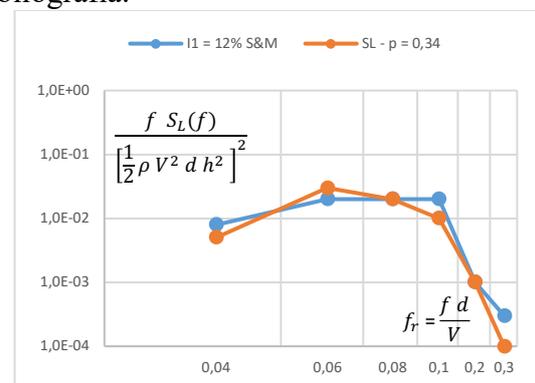


Fig. 13 – Comparação entre os espectros de momento na base de Saunders e Melbourne (1977) com $I_1 = 12\%$, e os obtidos no ensaio com expoente $p = 0,34$ para o Modelo 4 (6/1/1,5).



4. PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA A NBR-6123

A força lateral equivalente distribuída ao longo da altura da estrutura $F_L(z)$ pode ser encontrada através da Eq. (9), enquanto o momento fletor na base devido a essa força M_L pode ser encontrado através da Eq. (10):

$$F_L(z) = (2\gamma + 1) \left(0,5 \rho_{ar} \bar{V}_h^2 d\right) g_y \left(\frac{z}{h}\right)^\gamma \sqrt{\left[\frac{\pi C_{FL}}{4\zeta_e}\right]} \quad (9)$$

$$M_L = \left(2 - \frac{3}{\gamma + 2}\right) \left(0,5 \rho_{ar} \bar{V}_h^2 d h^2\right) g_y \sqrt{\left[\frac{\pi C_{FL}}{4\zeta_e}\right]} \quad (10)$$

Onde:

z – cota;

γ – expoente da forma modal (tabela 19 da NBR-6123 (1988));

$\rho_{ar} = 1,226 \text{ kg/m}^3$ – massa específica do ar;

$\bar{V}_h = V_0 S_1 S_{2,t=600s} S_3$ – velocidade média na altura da edificação;

V_0 – velocidade básica do vento: velocidade de uma rajada de três segundos excedida na média uma vez em 50 anos, a dez metros acima do terreno, em campo aberto e plano;

S_1 – fator topográfico;

S_3 – fator baseado em conceitos probabilísticos;

$S_{2,t=600s}$ – fator de rugosidade do terreno e dimensões da edificação, com intervalo de tempo de 600 segundos, dependente da categoria e da altura da edificação (tabela 22 – Anexo A da NBR-6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988));

$g_y = \sqrt{2 \ln(f_n 600)}$ – fator de pico;

f_n – frequência natural da estrutura;

C_{FL} – coeficiente do espectro da força lateral;

ζ_e – razão de amortecimento estrutural crítico (tabela 19 da NBR-6123 (1988)).

O valor de $C_{FL} = \frac{f S_L(f)}{\left[\frac{1}{2}\rho V^2 d h\right]^2}$, é obtido nos gráficos dos espectros adimensionalizados da

força de sustentação, tomando-se o valor para a respectiva frequência reduzida $f_r = (f_n d)/\bar{V}_h$. Para valores intermediários entre as relações $h/d/b$, utilizar o maior valor de C_{FL} obtido.

5. CONCLUSÕES

Visando a determinar qual a escala seria mais adequada para utilizar nos modelos ensaiados no túnel de vento, o modelo com $h/d/b = 3/1/1$ foi elaborado com duas diferentes escalas. Os referidos modelos, chamados de Modelos 1 ($h = 15 \text{ cm}$) e 2 ($h = 30 \text{ cm}$) apresentaram resultados bem semelhantes nos espectros da força de sustentação.

A comparação dos resultados de todos os ensaios com os valores encontrados na bibliografia confirmou os resultados encontrados, além de validar os resultados obtidos. No entanto, as comparações feitas com os valores obtidos na AS-NZ (2011) não foram tão coesas como foi com os trabalhos de Saunders e Melbourne (1977). Isso pode se dever ao fato de que a AS-NZ utiliza de equações polinomiais para aproximar as curvas dos espectros, o que pode não representá-las com muita exatidão.



A metodologia baseada na aplicação do espectro da força de sustentação na equação de admitância mecânica também foi utilizada por Saunders e Melbourne (1977) e pela AS-NZ (2011). Ou seja, este método já vem sendo utilizado há mais tempo por um código renomado, o que qualifica seu uso. Grala (2020) apresenta demais comentários e comparações entre as metodologias, além de espectros para outras relações dimensionais, permitindo-se concluir no trabalho que, confirmada a validade total da equação de admitância mecânica, a metodologia pode sim ser utilizada para o dimensionamento de estruturas de seção retangular.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à CAPES e ao CNPq pelas bolsas concedidas ao longo desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Blessmann, J. (1982). The boundary layer wind tunnel of UFRGS. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Amsterdam, v. 10, 231-248.
- Blessmann, J., (2005). *Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento*. 2. ed. Porto Alegre, Editora da UFRGS, Brasil.
- Blessmann, J. (2011). *Aerodinâmica das construções*. 3. ed. fac-similar. Porto Alegre: Editora da UFRGS, Brasil.
- Dyrbye, C.; Hansen, S. O., (1997). *Wind Loads on Structures*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Grala, P. (2020). *Resposta de estruturas paralelepípedicas esbeltas frente ao fenômeno de desprendimento de vórtices: Proposta para a NBR-6123*. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Kwok, K C. S. (2013). Wind-induced vibrations of structures: with special reference to tall building aerodynamics. In: Tamura, Y.; Kahreem, A. (Ed.). *Advanced Structural Wind Engineering*. Japan: Springer. 121-155.
- Loredou-Souza, A. M.; Schettini, E. B.; Paluch, M. J. (2004). Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. In: Möller, S. V.; Silvestrini, J. H. (EE.). *IV Escola de Primavera de Transição e Turbulência*. Porto Alegre, 137-163.
- Ruscheweyh, H. (1994). Vortex Excited Vibrations. In: Sockel, H. (Ed.). *Wind-Excited Vibrations of Structures*, International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures, n. 335, New York: Springer-Verlag Wien. 51-84.
- Saunders, J. W.; Melbourne, W. H. (1977). Cross-wind moment spectra on rectangular buildings and the prediction of dynamic response. *Proceeding of Australian Hydraulics And Fluid Mechanics Conference*, 6, 1977, Adelaide. 17-20.
- Standards Australia. (2011) AS/NZ 1170.2: Structural design actions – Part 2: Wind actions, Australian/New Zealand Standard.
- Vickery, B. J.; Clark, A. W. (1972). Lift or across-wind response of tapered stacks. *Journal of the Structural Division*, New York, v. 98, n. 1, 1-20.
- Vickery, B. J.; Basu, R. I. (1983a) Across-wind vibrations of structures of circular cross-sections. Part I. Development of a mathematical model for two-dimensional conditions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Amsterdam, v. 12, 49-73.
- Vickery, B. J.; Basu, R. I. (1983b). Simplified approaches to the evaluation of the across-wind response of chimneys. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Amsterdam, v. 14, 153-166.