COMPARAÇÃO DE FORÇAS TRANSVERSAIS ANALÍTICAS DO VENTO EM MODELO PADRONIZADO DE EDIFÍCIO ALTO CAARC

COMPARISON OF ANALITICAL CROSS-WIND LOADS ON STANDARDIZED CAARC MODEL

> Matheus Nunes Reis, José Luis Vital de Brito, Patricia Cristina Cunha Nunes

RESUMO

A ação dos ventos é o motivo de muitos colapsos e/ou danos causados nas estruturas, sobretudo em coberturas leves, estruturas de vedação, seja por efeitos estáticos ou dinâmicos. Essas forças tendem a excitar a estrutura com oscilações nas direções em que seus componentes atuam. Entretanto, importante ressaltar que as forças longitudinais são bastante baixas quando comparadas com as forças transversais resultantes. Dentre os diversos impactos gerados nas estruturas, como fadiga, esforços e deformações, pode-se citar o efeito dinâmico chamado desprendimento de vórtices, grande originador de forças transversais em relação à direção do vento em estruturas. Neste trabalho, são comparadas forças transversais dinâmicas de edifícios altos prismáticos de seção retangular. Estas forças são determinadas pelos processos das normas do Brasil (NBR 6123 1988), da Austrália/Nova Zelândia (AS-NZS 1170-2), do Japão (AIJ 2004), da China (CNS 2012) e por meio do procedimento analítico desenvolvido por Liang et al. (2002). Os resultados utilizados para comparação das duas últimas normas citadas e do método analítico citado foram determinados no estudo de Araghi (2019). A ideia principal das comparações é de averiguar o quão próximo estão os valores determinados em normas em relação ao processo analítico sugerido. As soluções provaram que os resultados normativos demonstraram conformidade entre si e com o analítico, podendo então ser aplicado seguramente. Para dimensionamento em projetos de até médio porte, pode-se adotar o que for melhor para a região em guestão. Recomenda-se realizar ensaios em túnel de vento para se obter resultados mais precisos no caso de projetos mais sofisticados.

Palavra Chave: Análise Dinâmica, Força Transversal de Vento, CAARC, NBR 6123, AS-NZS 1170-2

ABSTRACT

Wind action is the reason for many collapses and / or damage to structures, especially lightweight roofing, sealing structures, either by static or dynamic effects. These forces tend to excite the structure with oscillations in the directions in which its components act. However, it is important to note that the longitudinal forces are quite low compared to the resulting transverse forces. Among the various impacts generated on structures, such as fatigue, stress and deformation, we can mention the dynamic effect called vortex shedding, which originates from transverse forces in relation to wind direction in structures. In this work, dynamic transverse forces of rectangular prismatic tall buildings are compared. These forces are determined by the standards processes of Brazil (NBR 6123 1988), Australia / New Zealand (AS-

NZS 1170-2), Japan (AIJ 2004), China (CNS 2012) and the analytical procedure developed by Liang et al. (2002). The results used to compare the last two cited standards and the analytical method cited were determined in the study by Araghi (2019). The main idea of the comparisons is to find out how closely the values determined in norms are in relation to the suggested analytical process. The solutions proved that the normative results demonstrated compliance with each other and with the analytical and can then be safely applied. For designing to mid-size projects, you can adopt best process for the region in question. Wind tunnel testing is recommended for more accurate results for more sophisticated designs.

Keywords: Dynamic Analysis, CAARC, Wind Transversal Force, NBR 6123, AS-NZS1170-22011

INTRODUÇÃO

A ação dos ventos é o motivo de muitos colapsos e/ou danos causados nas estruturas, sobretudo em coberturas leves, estruturas de vedação, seja por efeitos estáticos ou dinâmicos. Com o estudo do fluxo do ar, é possível aprimorar as estruturas para torná-las mais fortes e confiáveis quando submetidas às pressões do vento, levando em consideração os conceitos imprescindíveis da dinâmica estrutural (AGUILERA, 2007).

Dentre os diversos e variáveis impactos gerados nas estruturas, como fadiga, esforços e deformações, podemos citar também os efeitos dinâmicos das vibrações causadas pelo vento, como o efeito de martelamento, instabilidade aerodinâmica por galope, vibrações por energia cinética das rajadas e o desprendimento de vórtices, sendo o último objeto de estudo deste trabalho, em conjunto com algumas soluções para redução das vibrações causadas por este.

CONCEITOS INICIAIS

Em corpos que não possuem forma considerada aerodinâmica em locais sob escoamento com número de Reynolds à partir de 30, surge desprendimento alternado de vórtices com frequência bastante definida. Estes são chamados de vórtices de Kármán, mostrados na Figura 01, que dão origem a forças periódicas, oblíquas e diagonais em relação à direção representativa média do vento.



Figura 01 – VÓRTICES DE KÁRMÁN E ALEATÓRIOS

FONTE: BLESSMANN, 1998

Levando em consideração as componentes alternadas das forças, que não

ocorrem apenas numa direção exata do vento, mas numa direção preponderante, originam-se na frequência do desprendimento individual dos vórtices, enquanto as forças alternadas na direção transversal à direção média do vento, denominadas forças laterais, ocorrem na frequência do desprendimento de cada par de vórtices.

Essas forças tendem a excitar a estrutura com oscilações nas direções em que suas componentes atuam. Entretanto, importante ressaltar que as forças longitudinais são bastante baixas quando comparadas com as forças transversais resultantes. Na prática, as longitudinais não são nem consideradas, tendo mais importância em escoamentos relacionados com água, como é o caso de estruturas localizadas no mar, por exemplo.

Oscilações causadas pelas forças periódicas transversais acontecem com frequência em edificações que possuem seção, em planta baixa, circular ou quase circular (seção transversal variando). Edificações prismáticas de seção retangular (incluindo quadrada), triangular ou outras de cantos vivos são susceptíveis a excitações ainda mais fortes por desprendimento de vórtices que o de seção cilíndrica.

Como mostrado na Figura 01, no caso dos vórtices de Kármán, os pulsos de pressão se transmitem de um lado para o outro, mantendo a harmonia do desprendimento de vórtices. No caso dos vórtices aleatórios, ainda na Figura 01, os pulsos de pressão de vento são interceptados pelas placas existentes na esteira, ou palas próprias faces laterais dos prismas.

Neste estudo são consideradas apenas os deslocamentos transversais gerados pelas forças periódicas laterais em escoamentos de ar. Para que sejam desprendidos vórtices de Kármán de maneira bem definida e ao longo de todo o prisma, isto é, de forma correta em relação à altura da edificação, é preciso que a edificação tenha um formato rombudo, ou seja, não-aerodinâmico, de contorno poligonal e que tenha alongamento considerável (relação entre a comprimento do eixo prismático e a largura).

Em relação ao escoamento, ainda para que se forme vórtices de Kármán, é necessário que seja do tipo suave (baixa turbulência), preferencialmente o mais próximo do uniforme, considerando sua velocidade média, não havendo recolamento do escoamento após primeira separação, mostrado na Figura 01-c. Na prática é complicado encontrar compatibilidade exata nesses desprendimentos.

Um importante parâmetro a ser citado é o número de Strouhal, St, que define uma relação entre a frequência de desprendimento de um par de vórtices, fs, a dimensão característica linear da edificação, L, e a velocidade do vento incidente V, mostrado na Equação 1:

$$St = \frac{fs\,L}{V} \tag{1}$$

No cálculo do número de Strouhal a frequência considerada é a predominante, pois na prática há um conjunto de frequências que contribuem de forma variável para as forças flutuantes. Este número varia de acordo com a forma da seção do cilindro, isto é, da edificação, do seu acabamento superficial, do número de Reynolds e do tipo de escoamento.

Em cilindros flexíveis com amortecimento estrutural pequeno, representando edificação em menor escala, surge uma considerável oscilação transversal sempre

que a frequência de um par de vórtices fs se aproximar ou igualar à uma das frequências naturais fn do modelo. BLESSMANN (1998) define velocidade crítica aquela em que a frequência fs se iguala à fn, conforme Equação 2:

$$Vcr = \frac{fnL}{St}$$
(2)

Um exemplo simples, para uma chaminé de seção circular, com diâmetro d, que tenha para o 1º modo uma frequência f1, o valor de St = 0,20 determinado em experimento, indicaria uma velocidade crítica Vcr = 5f1d. Ou seja, um vento com esta velocidade crítica geraria par de vórtices de frequência igual à frequência natural do 1º modo da chaminé.

MÉTODO DA NORMA DE AUSTRÁLIA / NOVA ZELÂNDIA

A norma AS-NZS 1170-2 de 2011: "Structural design actions - Part 2: Wind actions" preconiza a força transversal estática equivalente por unidade de altura em função de z (avaliada utilizando força igual a massa vezes a aceleração) em newtons por metro, como se segue:

$$Weq(z) = 0.5\rho_{air}[V_{des0}]^2 dC_{fig}C_{dyn}$$
(3)

onde V_{des0} é determinada para z = h. e d é a dimensão horizontal da edificação paralela à direção atuante do vento, e:

$$C_{fig}C_{dyn} = \frac{1.5g_r\left(\frac{b}{d}\right)K_m}{(1+g_v I_h)} \left(\frac{z}{h}\right)^k \sqrt{\frac{\pi C_{fs}}{\zeta}}$$
(4)

em que $K_m = 0.76 + 0.24$ k, para k = 1,5 para estruturas de base fixa e C_{fs} sendo o coeficiente de espectro de força transversal generalizado para o modo de vibração linear. ζ é o coeficiente de amortecimento crítico, V_{des0} é velocidade do vento considerado em projeto no topo da edificação. g_v é o fator de pico para velocidade flutuante do vento, considerado seu valor de 3,7. I_h é a intensidade de turbulência, em função da categoria de terreno e altura da edificação em questão. g_r é o fator de pico para velocidade do vento de resposta ressonante para um período de 10 minutos:

$$gr = \sqrt{2 \log_e \left(600 \, n_c\right)} \tag{5}$$

em que n_c é a primeira frequência natural de vibração na direção transversal do vento, em hertz.

Para determinar o valor de C_{fs} deve-se primeiramente calcular a velocidade reduzida através da equação

$$Vn = \frac{V_{des0}}{n_c b \left(1 + g_v I_h\right)} \tag{6}$$

para então aproximar o valor de C_{fs}

$$\log_{10} C_{fs} = \frac{-3.2 + 0.0683Vn^2 - 0.000394Vn^4}{1 - 0.02Vn^2 + 0.000123Vn^4}$$
(7)

MÉTODO DA NORMA BRASILEIRA

A norma brasileira NBR 6123 (1988) traz um procedimento de cálculo para a determinação da amplitude de vibração, Y0, devido ao desprendimento de vórtices. Este método é indicado para estruturas apoiadas apenas na base e com pouca variação de seção transversal. A equação da amplitude de vibração é dada por:

$$Y_0 = \frac{q_{cr} \ l1}{8\pi^2 f \ 1^2 \zeta_{ef}} \ \frac{1+2\gamma}{1+\gamma} \ \frac{C_l \ CR}{M_0}$$
(8)

Referente à Equação 8, A pressão dinâmica, q_{cr} , é determinada através da Equação 2, isto é, em termos da velocidade crítica. O coeficiente de força lateral, C_1 , é definido através do gráfico da Figura 02, dependendo do Número de Reynolds da forma da edificação e da rugosidade do terreno, dada seção transversal.



Os parâmetros f1, $\zeta_{ef} \in \gamma$, que são a frequência fundamental da estrutura, razão de amortecimento efetivo e o expoente de deformada, respectivamente, são

Tipo de edificação	γ	ζ	T1=1/f1	
Edifícios com estrutura aporticada de concreto, sem cortinas	1,2	0,020	0,05 + 0,015 h (h em metros)	
Edifício com estrutura de concreto, com cortinas para a absorção de forças horizontais	1,6	0,015	0,05 + 0,012 h	
Torres e chaminés de concreto,	2,7	0,015	0,02 h	

determinados através da aplicação dos dados definidos na Tabela 01, quando não se tem os dados da estrutura estudada. *ζ*ef considera a amplificação do movimento da estrutura devido às oscilações.

seção variável

Torres, mastros e chaminés de concreto, seção uniforme	1,7	0,010	0,015 h		
Edifícios com estrutura de aço	1,2	0,010			
soldada Torres e chaminés de		0 000	0,29√ <u>h</u> - 0,4		
aço, seção uniforme	1,7	0,000			
Estruturas de madeira		0,030			
FONTE: NBR 6123, 1988					

Na Equação 9, M_0 é a massa equivalente por unidade de altura, sendo determinado, considerando as cotas z, por:

$$M_0 = \frac{\int_0^h m(z) \left(\frac{z}{h}\right)^{2\gamma} dz}{\int_0^h \left(\frac{z}{h}\right)^{2\gamma} dz}$$
(9)

O coeficiente de correlação, CR, é dado por:

$$CR = 1 - \left(1 - \frac{LR/l}{\lambda}\right)^{1+\gamma}$$
(10)

Na Equação 10, λ representa o alteamento da edificação (h/l1) e LR o comprimento de correlação da força lateral. O comprimento de correlação é associado à amplitude de vibração transversal pela expressão:

$$\frac{LR}{l1} = 12 - 10e^{-4 Y0/l1} \tag{11}$$

Para determinar a amplitude de vibrações transversais Y_0 é necessário seguir um procedimento iterativo. Considerar inicialmente que $Y_0/l1$ é nulo. Assim, pela Equação 11, LR/l1 vale 2, inicialmente. Aplica-se este resultado na Equação 10 e determina o valor inicial de CR. Com este último aplicado na Equação 8 determinase, então, o valor inicial de Y₀. Dividindo-o por *l*1 há então um novo valor não nulo para $Y_0/l1$. O procedimento é repetido até que um haja convergência no valor de Y_0 , fazendo-o valer como resultado final.

Após a definição do valor da amplitude de vibração transversal no topo da estrutura, a força lateral equivalente por unidade de altura é determinada pela seguinte expressão:

$$q_{y}(z) = Y_{0} (2\pi f 1)^{2} m(z) \left(\frac{z}{h}\right)^{\gamma}$$
(12)

MODELO PADRONIZADO CAARC

O modelo padronizado CAARC foi utilizado neste estudo representando edificações altas. Caracterizado pelo seu formato de prisma retangular, com topo horizontal, sem inclinação. Todas as paredes externas são planas e sem qualquer rugosidade que interfira no escoamento do ar. O edifício modelo possui frequência

natural de 0,2 Hz para as direções horizontais de oscilação e 0,3 Hz na direção Z de torção. O amortecimento estrutural é aproximadamente 1% em relação ao crítico. A massa é distribuída na proporção de 160 kg/m3. A Figura 03 demonstra as dimensões principais do edifício padronizado CAARC.





FONTE: LAVÔR, 2017

O cômputo da carga transversal do vento na maior altura do edifício foi realizado para as três categorias de terreno aberto, suburbanos e da cidade, considerando dois ângulos perpendiculares de 90 e 180 graus, como mostra a Figura 04.

Figura 04 - ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA DO VENTO



FONTE: LAVÔR, 2017

MÉTODOS UTILIZADOS POR ARAGHI (2019)

O autor citado aplicou em seu estudo o modelo matemático de Lian et al. (2002), e dois métodos normativos, da China (CNS 2012) e do Japão (AIJ 2004).

O modelo analítico de Liang et al. (2002) não cita quais são as categorias de terreno e não traz valores para o índice do perfil de velocidade do vento (p) e o parâmetro meteorológico do perfil de velocidade do vento (b). Sendo assim, considera-se para esta aplicação matemática os estes parâmetros citados na NBR 6123 para os cálculos da força. Aplicando o estudo para um intervalo de tempo de 10 min, utilizou-se os valores de 0.10, 0.15, 0.19, 0.23 e 0.31 para o "p" e os valores de 1.23, 1.00, 0.86, 0.71 e 0.50 para o "b", correspondente a rugosidade do terreno ao nível do mar, terreno aberto, suburbanos, da cidade e do centro da cidade com grande concentração de edifícios altos, respectivamente.

Para aplicação dos aspectos normativos da China, CNS (2012), considerouse V0 a velocidade básica do vento, considerando um período de retorno de 50 anos na rugosidade de terreno aberto a 10 m de altura, similar ao adotado na norma brasileira NBR 6123. μ z, caracterizado por ser fator de exposição de um perfil de pressão média do vento de 10 minutos, com valores de 1.284, 1.00, 0.544, 0.262 para CE correspondente a rugosidade ao nível do mar, terreno aberto, suburbanos e da cidade, respectivamente. α está relacionado ao perfil de velocidade do vento, tendo valores de 0.12, 0.15, 0.22 e 0.30 respectivamente para cada rugosidade já citada. Ainda na mesma ordem de cada rugosidade, CR, fator de rugosidade do solo, possui valores de 0.236, 0.211, 0.202 e 0.197 correspondentes.

Para o cálculo seguindo normativo do Japão, AIJ (2004), a velocidade básica do vento é considerada em terreno sem obstáculos para um período de retorno de 100 anos a 10 m de altura. O parâmetro meteorológico b, relacionado ao perfil de velocidade do vento, possui valores de 1.23, 1.00, 0.79, 0.58 e 0.39, correspondente a rugosidade ao nível do mar, terreno livre sem obstáculos, suburbanos, da cidade e do centro da cidade, respectivamente. Enquanto índice do perfil de velocidade do vento p possui valores de 0.10, 0.15, 0.20, 0.27 e 0.35 correspondentes às mesmas rugosidades respectivamente.

RESULTADOS

Neste estudo, para todos os métodos, foi considerada velocidade reduzida igual a 9 para o cálculo das forças transversais, definida por V/f1D, em que V é a velocidade atuante do vento, f1 é a frequência fundamental do modelo e D é a dimensão perpendicular à direção de incidência do vento.

Os dados de forças transversais relacionados ao modelo matemático de Liang et al. (2002), e dos dois métodos normativos, da China (CNS 2012) e do Japão (AIJ 2004) foram determinados no trabalho de Araghi (2019), utilizados neste para serem comparados com resultados da NBR 6123 (1988) e da AS-NZS 1170-2 (2011).

A Figuras 05 a 07 mostram os resultados em ordem decrescente das forças transversais com vento na direção de 90° e suas linhas de tendência, para as categorias de rugosidade do terreno 2, 3 e 4, isto é, do terreno mais aberto ao mais obstruído, respectivamente.

É perceptível a proximidade dos resultados para todos os casos analíticos aplicados, especialmente entre o método analítico de Liang et al. (2002) e a

NBR 6123 (1988), pois foram considerados os mesmos índices do perfil de velocidade do vento e os parâmetros meteorológicos do perfil de velocidade do vento.



Figura 05 – CATEGORIA 2, VENTO 90°



Figura 06 – CATEGORIA 3, VENTO 90°





transversais com vento na direção de 180° e suas linhas de tendência, para as categorias de rugosidade do terreno 2, 3 e 4.



Figura 08 – CATEGORIA 2, VENTO 180°



Figura 10 – CATEGORIA 4, VENTO 180° 8 Força transversal no topo do modelo 7 6 5 4+3 (N) 2 1 0 CNS (2012) AIJ (2004) AS-NZS (2011) NBR 6123 Liang et al (2002) (1988) FONTE: AUTORES

Nestes casos também percebe-se boas proximidades entre os resultados,

principalmente entre a NBR 6123 (1988) e Liang et al.(2001), novamente, e entre os de maiores valores, que são CNS (2012) e AlJ (2004).

CONCLUSÕES

Primeiramente, com observa-se que os resultados seguem uma mesma tendência quando comparados para uma mesma direção de vento, variando apenas a rugosidade do terreno, além de resultarem em valores próximos. Isso indica que os métodos são confiáveis para estimativa de forças transversais de vento.

É possível perceber que a comparação direta entre os processos de cálculo é válida de certa forma, pois a diferença se mantém igual quando a rugosidade aumenta para alguns casos. Esse caso ocorre entre os procedimentos da AIJ (2004) e a AS-NZS 1170-2 (2011) para ventos na direção de 90°. O mesmo ocorre entre CNS (2012) e AIJ (2004) para ventos na direção de 180°.

Para ambas as direções de vento consideradas neste trabalho, à medida que a rugosidade é aumentada, os procedimentos com maiores valores tendem a estabilizar, ou seja, têm um menor aumento nos seus valores, contra um maior crescimento dos valores nos procedimentos que resultaram em forças mais baixas. Isso é percebido avaliando as linhas de tendência mostradas nas figuras, que tendem a diminuir a inclinação com esse aumento de rugosidade.

Como todos os procedimentos apresentados são aproximações analíticas, não há regras específicas que obriguem projetistas a adotarem um ou outro. Para dimensionamento em projetos de pequeno e médio porte, escolhe-se o que se adequar melhor para a região planejada. É sugerido que se faça ensaios em túnel de vento para se obter resultados mais precisos no caso de projetos mais sofisticados.

REFERÊNCIAS

AGUILERA, J. R. F. Estruturas treliçadas esbeltas soba ação do vento. Dissertação (Mestrado) – Pontifica Universidade Católica do Rido de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC – Rio. Rio de Janeiro, 2007. 119p.

AIJ Recommendations for Loads on Buildings. Architectural Institute of Japan, Japan, 2004.

ARAGHI, A.M. Estudo comparativo das cargas tranversais do vento nos edifícios altos retangulares. In: 61º Congresso Brasileiro do Concreto IBRACON, outubro, 2019.

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

BLESSMANN, J. Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento. 1° edição. Porto Alegre, RS. Editora da Universidade/UFRGS, 1998. 282p.

AS/NZS 1170.2:2011 Joint technical committee. structural design actions - part 2: Wind actions. australian/new zealand standard (as/nzs): Joint technical committee bd-006, australia/new zealand; 2011.

JIN, X.; GE, Y.; CAO, S.. Chinese country report 2012 - revision of wind loading code and wind tunnel test guidelines. China, 2018.

LAVÔR, T. F. A. Análise dinâmica do modelo padrão de edifício alto sob a ação do vento. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2017.

LIANG, S. et al. Mathematical model of acrosswind dynamic loads on rectangular tall buildings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002.