

Estudo Comparativo entre a Nova Norma NBR 6123 e Normas Internacionais para o Efeito Dinâmico do Vento em Edifícios Altos

Samuel Izaías de Oliveira Costa¹, Manoel Rodrigues Justino Filho²,
Sérgio Hampshire de Carvalho Santos³, Michèle Schubert Pfeil⁴

¹ Escola Politécnica da UFRJ / DES - Departamento de Estruturas / s_costa@poli.ufrj.br

² Escola Politécnica da UFRJ / DES - Departamento de Estruturas / manoeljustino@poli.ufrj.br

³ Escola Politécnica da UFRJ / DES - Departamento de Estruturas / sergiohampshire@poli.ufrj.br

⁴ Escola Politécnica da UFRJ / DES - Departamento de Estruturas / mpfeil@poli.ufrj.br

Resumo

A natureza flutuante da velocidade do vento originado de diferentes tipos de tormentas é uma das causas da resposta dinâmica de estruturas. Em geral, as normas de projeto sobre ação de vento em estruturas apresentam procedimentos para estimar a resposta dinâmica de edifícios baseados no método de Davenport a partir de distintas adaptações e desenvolvimentos; por exemplo, os métodos do modelo contínuo simplificado e do modelo discreto apresentados na norma brasileira NBR 6123, os quais foram recentemente revisados. Este trabalho tem por objetivo analisar o efeito dinâmico do vento em edifícios altos segundo diversas normas de projeto. Inicialmente, a resposta dinâmica do Edifício CAARC sob a ação do vento será estimada aplicando-se os procedimentos analíticos indicados pelas normas brasileira NBR 6123 e internacionais Eurocódigo EN-1991-1-4:2005, ASCE/SEI 7:2016 e AS/NZS 1170.2:2011. Posteriormente, faz-se uma análise comparativa dos esforços solicitantes na base da edificação com os resultados experimentais, obtidos da literatura. Os resultados indicam que a revisão da norma brasileira gera resultados mais conservadores do que os resultados obtidos pela versão original da NBR 6123:1988 e estão em consonância com os esforços obtidos experimentalmente e apresentados na literatura.

Palavras-chave

Norma NBR 6123; Estudo comparativo de normas; Análise dinâmica; Ação do vento.

Introdução

Os procedimentos apresentados pelas normas de projeto para a estimativa da resposta dinâmica de edifícios na direção da velocidade média do vento são, em geral, baseados no método de Davenport (1967), também conhecido como método do fator de rajada. A resposta máxima $x_{máx}$ é a soma da resposta estática \bar{x} induzida pela parcela média das forças aerodinâmicas e da resposta flutuante máxima. De acordo com o método citado, $x_{máx}$ pode ser calculada como o produto do fator de rajada G pela resposta \bar{x} . Sendo assim, o fator G é definido por:

$$G = \frac{x_{max}}{\bar{x}} = 1 + g \frac{\sigma_x}{\bar{x}} \quad (1)$$

em que g é o fator de pico e σ_x é o desvio padrão da resposta flutuante.

As normas Eurocódigo EN-1991-1-4 (CEN, 2005), ASCE/SEI 7 (ANSI, 2016) e AS/NZS 1170.2 (SA/SNZ, 2011) apresentam expressões analíticas para o cálculo do fator G em função das características do vento, das propriedades dinâmicas da estrutura e de suas dimensões. Este fator é

aplicável à resposta em termos de deslocamentos e de esforços solicitantes, neste último caso de forma aproximada.

A norma brasileira NBR 6123 (ABNT, 1988) apresenta os métodos do modelo contínuo simplificado (MCS) e do modelo discreto (MMD), idealizados por Riera e Galindez (1979) com base no método de Davenport. Os métodos MCS e MMD são equivalentes para edifícios com distribuição de massa e largura constantes ao longo da altura e fornecem a distribuição de forças a serem aplicadas estaticamente no modelo da estrutura do edifício de modo a reproduzir a resposta dinâmica em termos de deslocamento considerando um sistema de um grau de liberdade. A revisão destes métodos descrita em Santos *et al.* (2018) foi motivada por divergências encontradas em estudos anteriores (Guerra *et al.*, 2016) em relação a outras normas de projeto. Novos ábacos de aplicação dos métodos foram desenvolvidos e incorporados no projeto de norma ora em revisão (ABNT, 2022). Estudos comparativos aplicados a edifícios de diversas configurações geométricas foram apresentados em Guerra *et al.* (2018) e em Pfeil *et al.* (2022) mostrando boa correlação entre os resultados teóricos dos citados métodos revisados e os resultados experimentais de ensaios de modelos reduzidos em túnel de vento.

Considerando este contexto, o objetivo do presente trabalho é comparar os resultados de estimativa de resposta dinâmica de edificações alteadas na direção da velocidade média do vento obtidos com as normas de ação do vento NBR 6123 (ABNT, 2022), Eurocódigo EN-1991-1-4 (CEN, 2005), ASCE/SEI 7 (ANSI, 2016) e AS/NZS 1170.2 (SA/SNZ, 2011).

O estudo consiste em duas etapas complementares. O primeiro passo foi comparar os métodos de cálculo da pressão e força do vento através das normas referenciadas e caracterizar propriedades tais como perfil e velocidade característica do vento, pressão dinâmica e força. Uma vez identificadas as diferenças e semelhanças dos cálculos, seguiu-se com a aplicação dos procedimentos indicados pelas normas a um edifício alto. O modelo adotado é o edifício B (Holmes e Tse, 2012) com dimensão em planta de 30 metros e 45 metros e altura de 180 metros.

Os resultados teóricos obtidos foram também comparados com valores experimentais de ensaios de modelos em túnel de vento, disponibilizados por Holmes e Tse (2012). Esta segunda etapa comparativa objetivou avaliar os resultados dos métodos revisados da norma NBR 6123 (ABNT, 2022).

Modelo de Velocidade do Vento

A velocidade de vento originado de ciclones extratropicais pode ser representada pela superposição de duas parcelas: a velocidade média ($\bar{U}(z)$) e a parcela flutuante ($u(z, t)$), tomada com um processo aleatório no decorrer do tempo (Blessmann, 2013).

$$U(z, t) = \bar{U}(z) + u(z, t) \quad (1)$$

A velocidade média do vento varia de acordo com a altura observada e a rugosidade do terreno. À medida que se eleva a cota acima do terreno, a velocidade média aumenta de forma ordenada. Duas leis físicas se consagraram como capazes de traduzir o comportamento desta parcela do vento: a lei potencial e a lei logarítmica.

A primeira lei é dada por:

$$\bar{U}(z) = \bar{U}_{ref} \times \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^p \quad (2)$$

sendo \bar{U}_{ref} a velocidade média em uma altura de referência; z a altura de interesse; z_{ref} é a altura de referência e p a constante empírica associada ao intervalo de tempo e à rugosidade. A elaboração da lei potencial é empírica. Contudo, Blessmann (2013) afirma que seus resultados se mostram suficientemente aproximados, tornando viável sua aplicação. A lei logarítmica (Eq. 3), por sua vez, representa a lei de Prandtl (lei da parede), desenvolvida a partir de estudos do escoamento turbulento em superfície de placas (Blessmann, 2013) e dada por:

$$\bar{U}(z) = \frac{u^*}{\kappa} \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3)$$

sendo u^* a velocidade de cisalhamento que atua próxima à superfície; κ a constante de Von Kármán e z_0 o comprimento de rugosidade, dependente das características da superfície.

Algumas peculiaridades podem ser destacadas com relação à aplicação de cada lei. A lei logarítmica é válida para ventos fortes, abrangendo intervalos de tempo superior a dez minutos. Já a lei potencial pode ser aplicada em intervalos de tempo menores, sendo representativa para rajadas de até três segundos (Blessmann, 2013).

A caracterização da parcela flutuante da velocidade é dada pela intensidade de turbulência I_u , pela função de densidade espectral da velocidade flutuante e pelo comprimento de escala da turbulência. A intensidade da turbulência pode ser calculada por:

$$I_u(z) = \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right]^{-1} \quad (3)$$

no caso de adoção da lei logarítmica.

Força de Arrasto do Vento

A norma NBR 6123 (ABNT, 2022) define a força de arrasto como a componente da força do vento na direção de incidência, ou seja, a força resultante devido à velocidade $U(z, t)$. Assim como a velocidade do vento, a força de arrasto é calculada pela soma de duas parcelas denominadas força média \bar{F}_a e força flutuante $\widehat{F}_a(z, t)$:

$$F_a(z, t) = \bar{F}_a(z) + \widehat{F}_a(z, t) \quad (5)$$

Norma Brasileira – NBR 6123

A última revisão da NBR 6123 (ABNT, 2022) contempla as seguintes características limitantes: edificações com frequência natural superior a 0,2Hz, altura limite das edificações de 200 metros, não são englobados modos fundamentais de torção e modos de vibração associados à flexão com frequências próximas.

No projeto da norma NBR 6233 (ABNT, 2022) as expressões para o cálculo das forças aerodinâmicas no MCS e no MMD foram mantidas iguais às da versão vigente da norma (ABNT, 1988). A alteração efetuada se refere aos ábacos para a determinação do fator dinâmico ξ .

A Figura 1 apresenta o formato dos ábacos revisados. A seleção do ábaco a ser aplicado é feita em função da categoria do terreno e da taxa de amortecimento associada ao modo de vibração considerado da estrutura. A escolha da curva a ser utilizada depende da altura h do edifício e da relação l_1/h , sendo l_1 a largura média da face exposta ao vento. Para valores diferentes dos parâmetros definidos nos ábacos pode-se adotar interpolação ou extrapolação do resultado obtido.

As curvas da nova versão resultam em respostas dinâmicas maiores do que as da primeira versão. Além disso, os ábacos apresentam intervalo maior de valores no eixo das abcissas, abrangendo frequências menores.

A aplicabilidade do modelo discreto, no entanto, varia entre as versões da norma. Enquanto a versão vigente não restringe o método para um número específico de modos de vibração, a versão revisada indica o método para, no máximo, os dois primeiros modos. Havendo modos de vibração superiores e com frequência menor que 1 Hz, estes devem ser considerados na resposta dinâmica, mas outro método deve ser empregado.

Para a adoção do segundo modo de vibração, aplica-se um coeficiente de correção ao fator dinâmico. Portanto, o cálculo da força devida ao vento para o segundo modo de vibração consiste nas etapas já apresentadas na versão de 1988, considerando o fator dinâmico ξ_2 calculado com:

$$\xi_2 = \xi_2^* \times C_2 \quad (6)$$

sendo C_2 o coeficiente de correção, obtido no gráfico da Figura 2 e ξ_2^* obtidos nos ábacos do tipo da Figura 1.

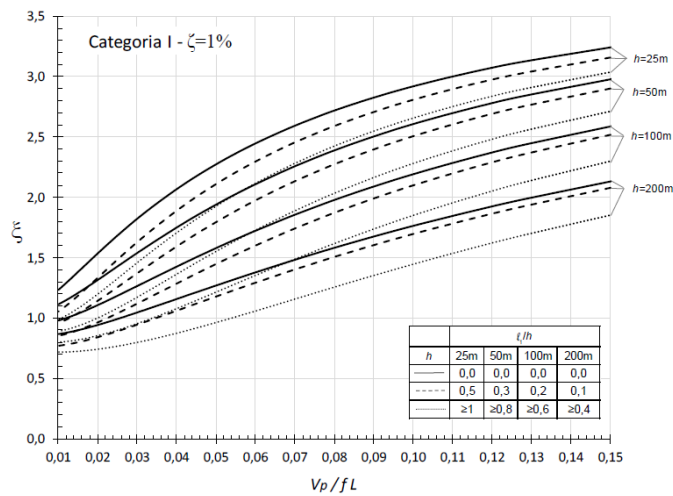


Figura 1 – Ábacos para fator dinâmico para terreno de Categoria I (ABNT, 2022).

A combinação das respostas de cada modo para obter o valor resultante é possível adotando a raiz quadrada da soma dos quadrados das respostas dinâmicas.

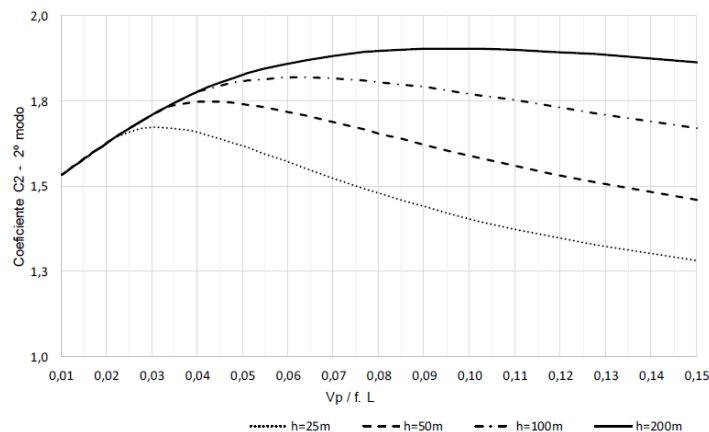


Figura 2 – Ábaco do fator de correção C_2 (NBR 6123 (ABNT, 2022)).

Norma Europeia – Eurocódigo EN-1991-1-4

A EN-1991-1-4 (CEN, 2005) apresenta um procedimento único baseado no método de Davenport para o cálculo da ação do vento em estruturas alteadas de comportamento quase-estático ou dinâmico. O fator de rajada G é dado em função do chamado coeficiente estrutural definido como o produto de coeficientes $c_d c_s$. O coeficiente dinâmico c_d é que diferencia o tipo de comportamento na determinação da resposta, tendo valor unitário para comportamento quase-estático e maior do que 1,0 no caso de resposta dinâmica. O coeficiente c_s é denominado fator de dimensão e se destina a considerar o efeito da correlação espacial da velocidade flutuante em função das dimensões da superfície exposta da estrutura.

Com relação às limitações de aplicação da EN-1991-1-4 (CEN, 2005), vale ressaltar os seguintes pontos: aplicação para edificações de até 200 metros de altura; não são considerados efeitos de vibrações torcionais; não se aplica quando necessário considerar mais de um modo de vibração.

Norma Americana – ASCE/SEI 7

Esta norma também apresenta algumas limitações e premissas para edificações altas, como: estruturas cuja frequência natural seja inferior a 1Hz; altura máxima definida para cada classe de rugosidade do terreno, e pressão de projeto mínima de 0,77 kN/m².

Em sua formulação, a norma apresenta o fator de rajada (G), similar ao fator estrutural da EN-1991-1-4 (CEN, 2005). Este fator pode ser obtido através da literatura, contudo, a norma apresenta dois métodos de cálculo de acordo com a classificação da estrutura como rígida ou flexível. O fator de rajada abrange frequência e modo fundamentais, efeito do amortecimento e dimensões da edificação.

Norma Australiana e Neozelandesa – AS/NZS 1170.2

A AS/NZS 1170.2:2011 (SA/SNZ, 2011) define os critérios de dimensionamento do vento para estruturas diversas, exceto ventos característicos de tornados. Entre as limitações de aplicação da norma, destacam-se: aplicabilidade para estruturas de até 200m, exclusão de estruturas “offshore”, pontes e torres de transmissão. No caso de edificações com frequência natural inferior a 1 Hz, a norma destaca a necessidade de se considerar a análise dinâmica. Há ainda a determinação de um valor mínimo de velocidade de 30 m/s para o Estado Limite Último.

A norma também adota tabelas e procedimento de interpolação para obtenção do fator associado à rugosidade e altitude ($M_{z,cat}$).

Comparações Normativas

A Tabela 1 resume as principais diferenças de premissas adotadas pelas normas. A NBR 6123, assim como a europeia e a norte-americana, estabelece a velocidade básica com tempo de recorrência de 50 anos e apresenta um mapa de isopletas para obtenção da velocidade básica. A AS/NZS 1170.2:2011, por sua vez, apresenta valores tabelados por região, tempo de recorrência e classe de vento (ciclônico ou não-ciclônico). As normas NBR-6123 e ASCE/SEI 7 adotam a lei potencial para definir o perfil vertical da velocidade média enquanto as normas AS/NZS e EN-1991-1-4 adotam a lei logarítmica. Todos os procedimentos para tratar a vibração por flexão induzida pela turbulência do vento se baseiam no método de Davenport, entretanto, com diferentes expressões para o fator de rajada G .

Tabela 1 – Resumo comparativo das normas estudadas.

CARACTERÍSTICA		NORMA			
		NBR 6123	EN-1991-1-4	ASCE/SEI 7	AS/NZS 1170.2
Tempo de velocidade da rajada de vento	Básica	3 s	10 min	3 s	3s
	Média	10 min		1 h	10 min
Perfil vertical da velocidade média		Lei potencial	Lei logarítmica	Lei potencial	Lei logarítmica
Espectro de turbulência do vento		Harris	ESDU (Kaimal)	Kaimal	Von Karman
Fator de rajada G		*	$1 + 2 \times k_p \times I_v \times \sqrt{B^2 + R^2}$	$0,925 \left(\frac{1 + 1,7I_z \sqrt{g_q^2 \times Q^2 + g_k^2 \times R^2}}{1 + 1,7I_z \times g_v} \right)$	$\left(\frac{1 + 2I_h \sqrt{g_v^2 \times B_s + \frac{H_s \times g_k^2 \times S \times E_t}{\zeta}}}{1 + 2I_h \times g_v} \right)$

Obs.: * Embora não seja apresentado explicitamente na norma brasileira, o fator de rajada pode ser obtido através da razão entre a resposta máxima e a resposta média.

O Edifício B

O edifício CAARC foi proposto pelo “Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council”, em 1969, e analisado experimentalmente em laboratórios ao redor do mundo. Após a compatibilização dos resultados por Melbourne (1980), notou-se uma margem de erro de 15% nos

resultados, percentual aceitável para ensaios em túnel de vento, consagrando o modelo como referência para estudo do vento.

O Edifício “Básico”, denominado Edifício B, foi apresentado na XII Conferência Internacional de Engenharia de Vento (IAWE, 2012a) no âmbito do *International HFBB Comparison Project* e representa uma adaptação do CAARC para o Sistema Internacional (SI), tendo 180 m de altura e dimensões em planta de 30 m e 45 m. O projeto teve como objetivo comparar os resultados obtidos com a técnica HFBB (*High Frequency Base Balance*) por diversos laboratórios em todo o mundo. As frequências naturais dos modos fundamentais de flexão são $n_y = 0,20$ Hz e $n_x = 0,23$ Hz, com formas modais linearmente variáveis com a altura (Holmes e Tse, 2012).



Figura 4 – Geometria do Edifício Básico e direção de incidência do vento (IAWE, 2012a).

A IAWE (2012a) descreve as propriedades do terreno como associadas a um subúrbio com as seguintes características: expoente p da lei potencial, que descreve o perfil vertical da velocidade média, igual a 0,25 (ou comprimento de rugosidade z_0 aproximadamente igual a 0,2); intensidade longitudinal de turbulência no topo do prédio igual 0,143 e comprimento de escala da turbulência longitudinal de 175 m.

Os resultados experimentais são fornecidos em (IAWE, 2012b) na forma de gráficos de esforços solicitantes na base do edifício, como o da Figura 5 que apresenta os valores de momento fletor máximo em torno do eixo x em função da direção do vento incidente, considerando a velocidade média horária no topo do edifício igual a 30m/s e taxa de amortecimento igual a 1%.

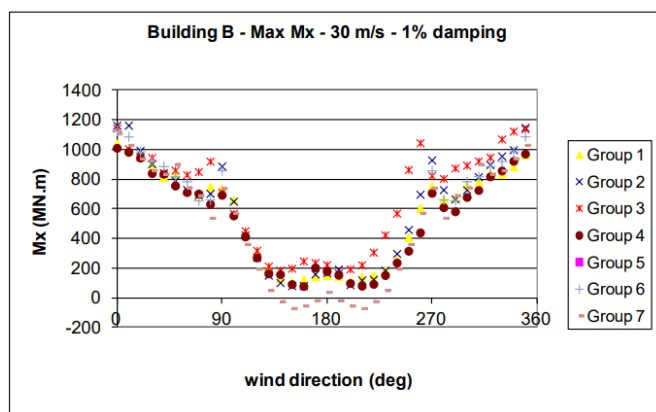


Figura 5 – Momentos máximos M_x para o Edifício B – $\zeta = 1,0\%$ (IAWE, 2012b).

Premissas do Estudo Comparativo

Para permitir a comparação entre os resultados das normas de projeto e os experimentais é necessário haver compatibilidade entre as características do escoamento simulado e do teórico. Para isto, a seleção da categoria de rugosidade do terreno de cada norma projeto a ser considerada deve ser cuidadosamente efetuada. A Tabela 2 apresenta a comparação entre valores dos parâmetros que

caracterizam o perfil vertical da velocidade média horária (expoente p da lei potencial ou comprimento de rugosidade z_0 no caso de lei logarítmica) e da intensidade de turbulência no topo do edifício ($z = 180\text{m}$).

Observa-se que, em termos de definição do perfil vertical da velocidade média, as categorias IV da NBR-6123, B da ASCE/SEI 7 e 3 da AS/NZS têm correspondência exata com o perfil experimental. A categoria III da EN-1991-1-4 é aproximadamente equivalente ao z_0 experimental. Em relação à intensidade de turbulência verifica-se correspondência entre a categoria 3 da norma AS/NZS e o valor experimental. As categorias B da ASCE/SEI 7 e IV da NBR-6123, que apresentaram correspondência em termos de perfil vertical da velocidade média com a simulação experimental, conduzem a valores de I_u bem superiores a 0,143. A categoria C da ASCE/SEI 7 fornece valor inferior ao experimental e a categoria III da NBR-6123 ainda fornece valor superior àquele. Os valores da Tabela 2 ilustram a dificuldade em se comparar resultados obtidos de diferentes normas de projeto uma vez que os parâmetros que definem o vento não têm compatibilidade entre as categorias de terreno normativas. Com base nos dados da Tabela 2 foram adotadas as categorias de terreno marcadas com asterisco na mesma tabela para fins do estudo comparativo proposto. A seleção da categoria III da NBR-6123 é notoriamente conservadora dado que, apesar de fornecer I_u compatível com o experimental, apresenta perfil de velocidade média mais desfavorável do que o experimental em termos de esforços solicitantes resultantes. O mesmo ocorre com a seleção da categoria III da norma europeia, equivalente à categoria III da NBR-6123.

O estudo comparativo a partir do Edifício B considerou valor unitário para coeficientes associados à direção do vento, tipo de uso da edificação, coeficientes topográficos e de elevação do terreno, coeficientes sazonais e efeito de vizinhança. Fatores dinâmicos, estruturais, de rugosidade do terreno e coeficientes de pressão e de força foram calculados conforme cada norma. Mais detalhes a respeito da aplicação dos procedimentos normativos para o estudo comparativo podem ser encontradas em Costa (2022).

Tabela 2 – Valores dos parâmetros que caracterizam o escoamento.

	Categoria de rugosidade do terreno	Expoente p da lei potencial	Comprimento z_0 de rugosidade da lei logarítmica (m)	Intensidade de turbulência I_u ($z=180\text{m}$)
Experimental		0,25	~ 0,20	0,143
NBR-6123	III*	0,20	(0,30)	0,156
	IV	0,25	(1,0)	0,196
ASCE/SEI 7	C	0,15		0,124
	B*	0,25		0,185
AS/NZS	3*		0,20	0,143
EN-1991-1-4	II		0,05	0,122
	III*		0,30	0,156

* Categorias adotadas no estudo comparativo

Comparação dos Resultados Analíticos e da Literatura

As Tabelas 3 a 6 apresentam os valores de esforços cortantes F e momentos fletores M na base do edifício obtidos pelos procedimentos normativos para ação de vento nas direções X e Y da Figura 4, com velocidades médias de 20m/s, 30m/s e 40m/s no topo do edifício. As formas modais de vibração em flexão são admitidas lineares (na forma z/h). Foram tomados dois valores de taxa de amortecimento, iguais a 1,0% e 2,5%.

Os resultados mostram que tanto os esforços cortantes quanto os momentos obtidos pela AS/NZS 1170.2:2011 possuem o menor valor dentre todas as normas consideradas, seguidos pelos esforços fornecidos pela norma norte-americana ASCE. Os valores obtidos pelo procedimento da nova versão da NBR 6123 se aproximam dos resultados da EN-1991-1-4 para categorias de terreno equivalentes. Estas constatações estão de acordo com os parâmetros da Tabela 2 os quais mostram que a categoria

3 da AS/NZS e a categoria B da ASCE possuem perfil de velocidade média mais favorável do que o das normas brasileira e europeia, sendo a intensidade de turbulência da categoria 3 da AS/NZS menor do que a categoria B da ASCE.

Com relação aos esforços cortantes, os valores obtidos na nova versão da NBR 6123 se aproximam dos resultados da EN-1991-1-4. Contudo, quando analisados os momentos fletores, a NBR 6123 apresenta os maiores valores. Observa-se, também, que os métodos MCS e MMD da NBR 6123 fornecem os mesmos valores quando os modelos de mesmas características dinâmicas (frequência, natural, taxa de amortecimento e forma modal) possuem distribuição uniforme de massa e largura l_1 constante.

Tabela 3 - Comparação dos esforços cortantes F e momentos fletores M para vento incidindo na direção Y (Figura 4) e taxa de amortecimento igual 1%.

\bar{U}_{topo} (m/s)	F (MN)						M (MNm)					
	NBR 6123		EN-1991-1-4		ASCE/ SEI 7	AS/ NZS 1170.2	NBR 6123		EN-1991-1-4		ASCE/ SEI 7	AS/ NZS 1170.2
	MCS	MMD	Anexo B	Anexo C			MCS	MMD	Anexo B	Anexo C		
20	4,65	4,66	4,24	4,34	3,32	3,76	522	522	427	437	318	355
30	11,20	11,20	10,53	11,15	8,10	7,41	1262	1262	1060	1123	776	706
40	21,41	21,41	20,61	22,13	15,79	14,11	2425	2424	2075	2228	1514	1345

Tabela 4 - Comparação dos esforços cortantes F e momentos fletores M para vento na direção X (Figura 4) e taxa de amortecimento igual 1%.

\bar{U}_{topo} (m/s)	F (MN)						M (MNm)					
	NBR 6123		EN-1991-1-4		ASCE/ SEI 7	AS/ NZS 1170.2	NBR 6123		EN-1991-1-4		ASCE/ SEI 7	AS/ NZS 1170.2
	MCS	MMD	Anexo B	Anexo C			MCS	MMD	Anexo B	Anexo C		
20	2,60	2,60	2,32	2,39	2,05	2,29	292	292	234	240	198	213
30	6,29	6,29	5,82	6,12	5,04	4,62	710	710	586	616	487	434
40	12,03	12,03	11,41	12,08	9,85	8,85	1365	1365	1149	1216	950	831

Tabela 5 - Comparação dos esforços cortantes F e momentos fletores M para vento na direção Y (Figura 4) e taxa de amortecimento igual 2,5%.

\bar{U}_{topo} (m/s)	F (MN)						M (MNm)					
	NBR 6123		EN-1991-1-4		ASCE/ SEI 7	AS/ NZS 1170.2	NBR 6123		EN-1991-1-4		ASCE/ SEI 7	AS/ NZS 1170.2
	MCS	MMD	Anexo B	Anexo C			MCS	MMD	Anexo B	Anexo C		
20	4,27	4,27	4,00	3,96	3,20	3,60	476	476	403	399	307	340
30	9,77	9,77	9,52	9,65	7,48	6,94	1091	1091	958	971	717	662
40	17,82	17,82	17,93	18,44	13,98	12,79	1994	1994	1805	1856	1340	1219

A Tabela 7 apresenta a comparação entre os valores experimentais, extraídos dos gráficos do tipo do ilustrado na Figura 5 e os da NBR 6123. Vale ressaltar que os resultados experimentais obtidos a partir de ensaios em túnel de vento (IAWE, 2012b) apresentam variabilidade e fornecem apenas uma estimativa dos esforços cortantes e momentos de tombamento na base do prédio. Segundo Holmes e Tse (2012), as variações nos resultados obtidos estão em torno de 8 a 12%. Através da Figura 5, nota-se que os momentos fletores máximos M_x para vento na direção Y com velocidade de 30 m/s no topo da edificação e taxa de amortecimento de 1,0% estão em torno de 1000 a 1200 MN.m.

Da Tabela 7, tem-se, para ventos de 30 m/s no topo da edificação, os momentos de 1262 MN.m para os métodos simplificado e discreto. A mesma análise pode ser estendida para demais velocidades,

taxa de 2,5% e para momento mínimo M_y , tanto para a taxa de 1,0% quanto para a taxa de 2,5%. Considerando que os parâmetros da categoria III da NBR 6123 são conservadores em relação aos do escoamento simulado experimentalmente, conclui-se que os resultados dos métodos revisados da NBR 6123 são compatíveis com os experimentais e que podem ser considerados como metodologia de cálculo segura e compatível com a prática.

Tabela 6 - Comparação dos esforços cortantes F e momentos fletores M para vento na direção X (Figura 4) e taxa de amortecimento igual 2,5%.

\bar{U}_{topo} (m/s)	F (MN)						M (MNm)					
	NBR 6123		EN-1991-1-4		ASCE/ SEI 7	AS/ NZS 1170.2	NBR 6123		EN-1991-1-4		ASCE/ SEI 7	AS/ NZS 1170.2
	MCS	MMD	Anexo B	Anexo C			MCS	MMD	Anexo B	Anexo C		
20	2,37	2,37	2,17	2,15	1,97	2,17	264	264	218	216	190	202
30	5,41	5,41	5,19	5,25	4,29	4,34	605	605	523	528	445	402
40	9,90	9,90	9,80	10,00	8,63	7,93	1109	1109	987	1007	833	744

Tabela 7 - Comparação entre momentos fletores obtidos pela NBR 6123:2022 e valores experimentais do projeto HFBB da IAWE

\bar{U}_{topo} (m/s)	Vento incidente em B = 45 m (direção Y)				Vento incidente em B = 45 m (direção Y)			
	M (MNm) para $\zeta=1,0\%$				M (MNm) para $\zeta=2,5\%$			
	NBR 6123		IAWE		NBR 6123		IAWE	
	MCS	MMD	Máximo	Mínimo	MCS	MMD	Máximo	Mínimo
20	522	522	450	400	476	476	450	350
30	1262	1262	1200	1000	1091	1091	1050	900
40	2425	2424	2500	2000	1994	1994	2000	1700

\bar{U}_{topo} (m/s)	Vento incidente em B = 30 m (direção X)				Vento incidente em B = 30 m (direção X)			
	M (MNm) para $\zeta=1,0\%$				M (MNm) para $\zeta=2,5\%$			
	NBR 6123		IAWE		NBR 6123		IAWE	
	MCS	MMD	Máximo	Mínimo	MCS	MMD	Máximo	Mínimo
20	292	292	300	250	264	264	260	200
30	710	710	700	600	605	605	600	450
40	1365	1365	1400	1100	1109	1109	1200	800

Conclusões

O objetivo deste trabalho foi analisar as alterações feitas no método de cálculo da norma NBR 6123 (ABNT, 2022) para estruturas alteadas e avaliar sua compatibilidade com diversas normas internacionais e com resultados experimentais de ensaios em túnel de vento.

Em relação ao padrão normativo brasileiro, a principal alteração aplicada compete ao ábaco de fator dinâmico. A nova versão da norma resulta em esforços cortantes e momentos fletores significativamente maiores aos obtidos da versão da NBR 6123:1988.

A comparação direta entre os resultados fornecidos pelas diferentes normas consideradas está submetida às ressalvas decorrentes da falta de compatibilidade entre os perfis verticais de velocidade média e de intensidade de turbulência das categorias de terreno selecionadas. Os resultados obtidos foram consistentes com os parâmetros do escoamento, ou seja, os esforços solicitantes fornecidos pelos procedimentos normativos se mostraram aproximadamente proporcionais a estes. Os esforços

cortantes na base do edifício segundo a NBR 6123 (ABNT, 2022) correspondem aos esforços segundo o Eurocódigo EN-1991-1-4 (CEN, 2005) considerando categoria de terreno de mesma definição. No entanto, o padrão nacional mostra-se mais conservador em termos de momentos fletores. A comparação dos resultados da NBR-6123 (ABNT, 2022) com os experimentais forneceu valores de esforços solicitantes próximos aos limites superiores dos experimentais, em consonância com o fato de que a categoria de terreno selecionada apresenta parâmetros do escoamento mais desfavoráveis do que os do escoamento simulado. Com isso foi demonstrado que a norma brasileira fornece resultados compatíveis com os obtidos em ensaios em túnel de vento.

Referências

- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE ANSI, 2016, ASCE/SEI 7: Minimum design loads and associated criteria for building and other structures, Estados Unidos da América.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT, 1988, NBR6123: Forças devidas ao vento em edificações, Rio de Janeiro.
- _____, ABNT, 2022, Projeto NBR6123: Forças devidas ao vento (em revisão), Rio de Janeiro.
- AUSTRALIAN/NEW ZEALAND STANDARD SA/SNZ, 2011, AS/NZS 1170.2: Structural design actions – Part 2: Wind actions, Sydney.
- BLESSMANN, J., O vento na engenharia estrutural, 2 ed. Porto Alegre, Editora da UFRGS, 2013.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION CEN, 2005, EN 1991-1-4: Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions, Bruxelas.
- COSTA, S. I. O., 2022, Estudo Comparativo entre a Nova Norma NBR 6123 e Normas Internacionais para o Efeito Dinâmico do Vento em Edifícios Altos, Monografia, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- DAVENPORT, A.G., 1967, Gust loading factors, Journal of Structural Division, ASCE, v.93, pp. 11-34.
- GUERRA, F.A., PFEIL, M.S. e BATTISTA, R., 2016. Avaliação de métodos teóricos para estimativa de comportamento de edificações flexíveis sob a ação de vento turbulento. IX Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, Brasil.
- HOLMES, J. D. e TSE, T. K. T., 2012, International high-frequency base balance benchmark study, Artigo, The 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM' 12), Seul, Coreia do Sul.
- INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR WIND ENGINEERING IAWE, 2012a, Benchmark buildings for an international HFBB comparison. Disponível em: <<https://www.iawe.org/committees.html>>. Acesso em 10 jun. 2022, 23:38:00.
- _____, IAWE, 2012b, International HFBB comparison – Building B summary results. Disponível em: <<https://www.iawe.org/committees.html>>. Acesso em 10 jun. 2022, 23:24:00.
- MELBOURNE, W. H., 1980, Comparison of measurements on the CAARC Standard Tall Building model in simulated model wind flows, Artigo, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Monash, Clayton, Austrália.
- PFEIL, M. S., VIREL, R., SOUZA, L. T. e FERNANDES, C. R., 2022, Verificação de metodologia teórica para estimativa de resposta dinâmica de edifícios na direção de vento, Artigo, XXXIX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Passo Fundo, Brasil.
- RIERA, J., GALINDEZ, E., 1979. “Determinación de la acción dinámica del viento em normas sobre cargas em las construcciones”. *XX Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural*, Córdoba, Argentina.
- SANTOS, L. F., GUERRA, F., PFEIL, M.S., 2018. Resposta dinâmica de estruturas flexíveis sob ação do vento segundo a norma brasileira: proposta de novos ábacos, XXXVIII Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural, Lima, Peru.
- SANTOS, L. F., 2018, Avaliação de métodos normativos para determinação da resposta aerodinâmica de edificações, Dissertação, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.