

A: XXXIX-0000

VERIFICAÇÃO DE METODOLOGIA TEÓRICA PARA ESTIMATIVA DE RESPOSTA DINÂMICA DE EDIFÍCIOS NA DIREÇÃO DE VENTO

VERIFICATION OF THEORETICAL PROCEDURE TO ESTIMATE THE ALONGWIND RESPONSE OF BUILDINGS

Michèle S. Pfeil (A) (1); Redescar Virel (2); Lucas T. Souza (3); Carolina R. Fernandes (4)

(1) Dr. Profa. Titular, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

(2) MSc., doutorando, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

(3) MSc., Prof., Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecn. do Sudeste de Minas Gerais, Juiz de Fora, Brasil.

(4) Eng., mestranda, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Endereço para correspondência: mpfeil@coc.ufrj.br; (A) Apresentador

Área temática: Análise Estrutural: métodos teóricos.

Resumo

O método do modelo discreto adotado pela norma brasileira NBR-6123 para estimativa de resposta dinâmica de estruturas alteadas por ação de vento turbulento (resposta na direção do vento) foi revisado e novos ábacos foram elaborados e propostos para inclusão na nova versão do citado documento. O procedimento teórico utilizado se baseou em análises modais no domínio da frequência considerando a vibração da estrutura no modo fundamental de flexão, tendo sido verificado frente a alguns resultados experimentais. O presente trabalho complementa esta verificação apresentando novas comparações teórico-experimentais a partir dos resultados obtidos de modelos reduzidos de 8 edifícios de planta retangular ensaiados em túnel de vento para duas condições de escoamento (terreno aberto e terreno urbano) no laboratório norte-americano NatHaz. Os resultados comparativos mostram que as respostas em termos de esforços na base dos edifícios tiveram em geral muito boa correlação teórico-experimental para situação de escoamento em terreno aberto. Para terreno urbano o procedimento teórico se mostrou um pouco conservador frente aos resultados experimentais. Conclui-se que a nova versão do método do modelo discreto é apropriada para uso em projetos.

Palavras-chave: ação de vento; edifícios; dinâmica; NBR-6123; método do modelo discreto.

Abstract

The so-called discrete model method indicated in the Brazilian code NBR-6123 to estimate the alongwind response of buildings was revised and new graphics were elaborated and proposed to be included in the next edition of this code. The theoretical procedure is based on modal analysis in the frequency domain considering the fundamental vibration bending mode and was verified against few experimental results. This paper extends this verification by presenting new comparisons between theoretical and experimental results based on wind tunnel tests of reduced models of 8 buildings performed at the north American laboratory Nathaz in two flow conditions (open and urban terrain). The comparisons show that the responses in terms of base bending moment achieved very good theoretical – experimental correlation for open terrain. For urban terrain the theoretical procedure displayed a conservative behavior as compared to the experimental one. It is concluded that the new version of the discrete model method is qualified to design practice.

Keywords: wind action; buildings; dynamics; NBR-6123; discrete model method.



1. INTRODUÇÃO

Em geral, aplica-se um critério baseado no valor da frequência do modo fundamental de vibração da estrutura para caracterizar o tipo de comportamento frente à ação do vento, se quase-estático ou dinâmico: sendo a frequência menor do que 1Hz é esperado comportamento dinâmico. Entretanto, outros fatores também devem ser considerados como, por exemplo, a taxa de amortecimento do modo fundamental.

As normas de projeto adotam diferentes procedimentos para a determinação de forças devidas ao vento em estruturas que apresentam comportamento dinâmico decorrente da turbulência do vento incidente. Em geral estes procedimentos são baseados no Método de Davenport (1967) (Blessmann 2005), também conhecido como método do fator de rajada. Fundamenta-se na solução da equação de movimento de um sistema de um grau de liberdade, com base na aplicação de conceitos estatísticos de processo aleatório estacionário à velocidade de vento para determinar seu valor de pico, admitindo distribuição de probabilidades de Gauss. A velocidade de vento, e também as forças, são descritas como somas de uma parcela média e outra flutuante. A resposta da estrutura à parcela média da força é estática. A máxima resposta esperada da estrutura à parcela flutuante das forças é subdividida em resposta quase-estática e resposta ressonante, sendo esta última desprezível para estruturas de comportamento puramente quase-estático. Desse modo, o método é também aplicável a este tipo de comportamento.

A NBR-6123 apresenta o método do modelo discreto (MMD), também baseado no método de Davenport, mas sem a separação da resposta flutuante nas parcelas quase-estática e ressonante. O MMD foi revisado (Santos *et al.*, 2018) a partir de divergências encontradas em estudos anteriores (Guerra *et al.*, 2016) e novos ábacos foram desenvolvidos e incorporados no projeto de norma ora em revisão. Um estudo comparativo aplicado a um prédio de 180m de altura foi apresentado em Guerra *et al.* (2018) mostrando boa correlação entre os resultados teóricos do MMD revisado e os resultados experimentais de ensaios de modelos reduzido em túnel de vento.

O presente trabalho complementa esta verificação apresentando novas comparações teórico-experimentais a partir dos resultados obtidos de modelos reduzidos de 8 edifícios de planta retangular ensaiados em túnel de vento para duas condições de escoamento (locais abertos e sem obstáculos, e centros urbanos densos) no Laboratório de Modelagem *Natural Hazards (NatHaz)* da Universidade de Notre Dame, EUA (Zhou *et al.*, 2003). Os resultados são apresentados em termos de momento fletor na base dos edifícios.

2. METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DINÂMICA DE ESTRUTURAS SOB A AÇÃO DE VENTO TURBULENTO

Nesta seção apresentam-se, de maneira breve, os procedimentos teóricos de análise modal no domínio da frequência e o MMD da NBR 6123, bem como o método teórico-experimental baseado em dados de simulações em túnel de vento, para a análise dinâmica de estruturas submetidas a ação de vento.

2.1. Análise modal no domínio da frequência - NFREQ

De acordo o método de Davenport (1961) a resposta estática da estrutura à ação do vento (devida à velocidade média) é multiplicada pelo fator de rajada para resposta G de modo a considerar as suas vibrações devidas à turbulência do vento. O fator G é, portanto, definido como a razão entre a resposta máxima esperada x_{max} em certo intervalo de tempo (em geral igual a 10 minutos) e a resposta média neste mesmo intervalo \bar{x} :



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

Vê-se na eq. (1) que a resposta flutuante máxima esperada, é calculada multiplicando-se o desvio padrão da resposta flutuante σ_x pelo fator de pico g .

Este método foi inicialmente desenvolvido para estruturas representadas por um sistema do tipo massa-mola-amortecedor com frequência natural f_r para a qual a função densidade espectral da resposta em deslocamento $S_a(f)$ é dada por:

$$S_a(f) = \frac{1}{\bar{m}^2(2\pi f_r)^4} |H(f)|^2 S_F(f) \quad 2$$

sendo \bar{m} a massa, $H(f)$ a função de admitância mecânica e $S_F(f)$ a função densidade espectral da força devida ao vento. O cálculo da variância da resposta σ_a^2 , igual à área sob a curva de $S_a(f)$, é convenientemente dividida em duas parcelas: sub-ressonante e ressonante. Como a resposta na região sub-ressonante é quase-estática, a área correspondente é calculada a partir da integral do espectro da própria força de vento. Já a área associada à parcela ressonante é calculada a partir da magnitude do espectro de resposta na frequência f_r de ressonância.

Neste trabalho, a análise modal é aplicada a uma estrutura representada por um modelo de elementos de barra, com base no método de Davenport. A eq. (2) constitui a solução no domínio da frequência da equação de movimento em coordenadas generalizadas associada à forma modal j da estrutura, sendo \bar{m} igual à massa generalizada e $S_F(f)$ substituída pela função de densidade espectral da força generalizada.

O procedimento completo para o cálculo da resposta de acordo segundo a solução NFREQ pode ser encontrado em Pfeil *et al.* (2012). Na solução numérica NFREQ, a variância da resposta σ_a^2 não é subdividida em duas parcelas como no método de Davenport, mas sim obtida por integração numérica com intervalos de frequência igual a 10^{-3} Hz.

2.2. Método do Modelo Discreto segundo a NBR-6123

Proposto por Riera e Galindez (1979) e adotado na norma brasileira NBR 6123 (ABNT,1988), o processo MMD apresenta uma formulação modal no domínio da frequência para determinar uma ação estática equivalente do vento, que represente os efeitos dinâmicos em termos de deslocamentos máximos da estrutura.

Para descrever matematicamente o campo de velocidade de vento, o método utiliza a lei potencial para o perfil vertical de velocidade média, a função de densidade espectral da velocidade flutuante S_u de Harris, e o espectro cruzado. Para uma estrutura representada por um modelo unifilar de elementos de barra o método determina um vetor de forças nodais composto por uma parcela correspondente à ação do vento com velocidade média em 10 minutos, \bar{U} , e outra correspondente à ação da parcela flutuante do vento $u(t)$. Conforme Blessmann (2005), esta última parcela, \hat{F}_j , pico, é dada por:

$$\hat{F}_j, \text{ pico} = g \sigma_{a,j} \omega_j^2 \mathbf{M} \Phi_j \quad 3$$

sendo \mathbf{M} a matriz de massa e Φ_j o autovetor associado ao modo j . Desenvolvimentos matemáticos conduzem ao fator ξ denominado dinâmico, composto de uma integral cuja solução numérica com algumas aproximações e considerando g igual a 4,0 resultaram nos ábacos e equações apresentados pela norma NBR6123.

A partir de divergências observadas em trabalhos anteriores entre o MMD e outros métodos, Santos *et al.* (2018) revisaram o método e propuseram a adoção de novos ábacos para



determinação do fator dinâmico ξ os quais foram elaborados a partir da solução modal descrita na seção 2.1.

Destacam-se os seguintes aspectos da revisão do método (Santos *et al.*, 2018):

- Utilização de uma função de co-espectro normalizado médio $\Psi_{u,med}(f)$ reformulada, de forma que a integral que define a variância da resposta $\sigma_{a,j}^2$ independa das posições dos nós na estrutura discretizada (Guerra *et al.*, 2016). Na definição do $\Psi_{u,med}(f)$ é necessária a consideração de um coeficiente corretor C_{corr} para compensação de erros decorrentes das simplificações na formulação adotada para o MMD;
- Implementação do fator de pico g calculado conforme a eq. (2), adotando-se a frequência efetiva de resposta v igual à razão dos momentos espectrais do espectro de deslocamento generalizado. Os fatores de pico calculados desta forma, em função da frequência natural de vibração, são inferiores ao $g=4,0$ adotado originalmente no MMD;
- Desenvolvimento de um fator corretor que permita a aplicação do método a formas modais típicas de 2º modo de flexão de vigas engastadas e livres, em que é observada uma inversão no sinal. Isso porque os gráficos para determinação do fator dinâmico ξ foram elaborados considerando a forma modal linear, aplicável a formas modais típicas de 1º modo de vibração de edifícios e torres.

2.3. Método teórico-experimental baseado em dados de túnel de vento (NatHaz)

O laboratório disponibiliza uma base de dados na internet (NatHaz, 2021), associada a resultados de ensaios em túnel de vento de modelos reduzidos de edifícios obtidos com o método *High Frequency Base Balance* (HFBB). Essa técnica consiste de um ensaio de modelo reduzido rígido, em cuja base é acoplada uma balança de força de alta frequência, com a capacidade de medir diretamente esforços cortantes e momentos aerodinâmicos na base (Tschanz & Davenport, 1983). A partir do registro no tempo do momento produzido pelas forças aerodinâmicas em relação à base do modelo é possível estimar a resposta dinâmica induzida pelo vento turbulento ao admitir a forma modal linear de vibração e considerar a relação entre o momento aerodinâmico e a força generalizada associada a este modo. Trata-se então de um processo teórico-experimental para análise dinâmica de estruturas.

Os resultados experimentais são fornecidos na forma adimensional por meio de um gráfico ilustrando o coeficiente de momento aerodinâmico definido em função da função de densidade espectral do momento aerodinâmico medido e a sua variância.

Tratando as variáveis como processos aleatórios estacionários, o valor máximo esperado da resposta em termos de momento fletor na base M_{max} (Zhou *et al.*, 2003) é tomado como a soma do momento médio \bar{M} e o valor máximo esperado do momento flutuante \hat{M} , igual ao seu desvio padrão $\sigma_{\hat{M}}$ vezes o fator de pico g . O desvio padrão da resposta $\sigma_{\hat{M}}$ é calculado com a abordagem baseada no método de Davenport a partir dos registros experimentais. Separando a resposta flutuante nas parcelas quase-estática (\hat{M}_B) e ressonante (\hat{M}_R), tem-se que:

$$M_{max} = \bar{M} + \sqrt{\hat{M}_B^2 + \hat{M}_R^2} \quad 4$$

3. PARÂMETROS DO VENTO E EDIFÍCIOS ANALISADOS

3.1. Características dos campos de velocidade de vento

O perfil de velocidade média do vento pode ser descrito pela lei potencial:



$$\bar{U}(z) = \beta \cdot \bar{U}_{ref} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad 5$$

em que $\bar{U}(z)$ é a velocidade média em 1h, \bar{U}_{ref} é a velocidade de referência a uma altura de 10m e em terrenos abertos, e β e α são parâmetros ajustados em função da categoria do terreno e do tempo de rajada de \bar{U}_{ref} .

Os ensaios de modelos reduzidos no túnel de vento de camada limite do *NatHaz* foram realizados para duas condições de rugosidade de terreno, caracterizadas pelo valor do expoente α da lei potencial expressa na equação 5 para velocidade média horária: BL1 ($\alpha=0,16$), correspondente a terreno aberto e BL2 ($\alpha=0,35$), correspondente a terreno urbano. Os perfis BL1 e BL2 (Kwon & Kareem, 2013) são similares, respectivamente, às condições de exposição C da norma ASCE 7-05 (ASCE, 2005) e A da norma ASCE 7-98 (ASCE, 1998). A Figura 1a (Zhou *et al.*, 2003) mostra os perfis experimentais adimensionalizados em relação a uma velocidade de referência comparando-os aos da lei potencial correspondente. Verifica-se que o perfil de BL1 apresenta desvios da lei potencial menores do que o de BL2.

Comparando-se os valores dos parâmetros α e β da equação 5 associados ao tempo de rajada de 3s das referidas normas conclui-se que, para terreno aberto, os perfis de categoria II da NBR6123 e Exposição C da norma ASCE (BL1) estão bem ajustados. Em relação ao terreno urbano verifica-se que o perfil de velocidade média da categoria V da NBR6123 corresponde à exposição A da norma ASCE (BL2).

A **intensidade de turbulência** local I_u é definida por (Blessmann, 2013):

$$I_u(z) = \frac{\sigma_u(z)}{\bar{U}(z)} \quad 6$$

sendo σ_u o desvio padrão da componente flutuante da velocidade. em que z_0 é o comprimento de rugosidade.

A Figura 1b ilustra os perfis verticais de intensidade de turbulência das categorias II e V da norma NBR6123 (linhas cheias) em comparação com os perfis de I_u experimentais das condições BL1 e BL2 do *NatHaz*, em função da razão z/z_{ref} em que z_{ref} é a altura da camada limite. A mesma figura também ilustra a altura dos modelos físicos em relação à altura z_{ref} . Observa-se que a correspondência encontrada para os perfis de velocidade média entre a categoria II e BL1 e entre a categoria V e BL2 não se reproduz no caso dos perfis de intensidade de turbulência. Em razão da falta de correspondência entre os perfis de velocidade média e de intensidade de turbulência para uma mesma categoria da NBR-6123 e os perfis experimentais não é possível se fazer uma comparação direta entre os resultados do MMD e os experimentais. Procede-se, então, a uma comparação entre os resultados teóricos da análise modal descrita na seção 2.1 (NFREQ) e os experimentais. Considerando que as forças atuantes no terço superior da estrutura dominam o comportamento à flexão, tomou-se o valor da intensidade de turbulência do perfil experimental no meio da altura do terço superior de cada um dos modelos físicos como dado de entrada para a análise teórica. Mesmo assim, a correspondência entre perfis experimentais e teóricos pode ser inadequada, como por exemplo, no caso do modelo de menor altura em terreno aberto para o qual a curva tracejada vermelha é aplicada na análise teórica.

3.2. Características dos edifícios analisados

A Tabela apresenta os valores das dimensões geométricas dos edifícios utilizados para comparar as respostas dinâmicas teóricas e experimentais. O coeficiente de arrasto (C_a) referente



a cada prédio é obtido pelo ábaco da NBR 6123 (ABNT, 1988), considerando edificações paralelepédicas em vento de baixa turbulência.

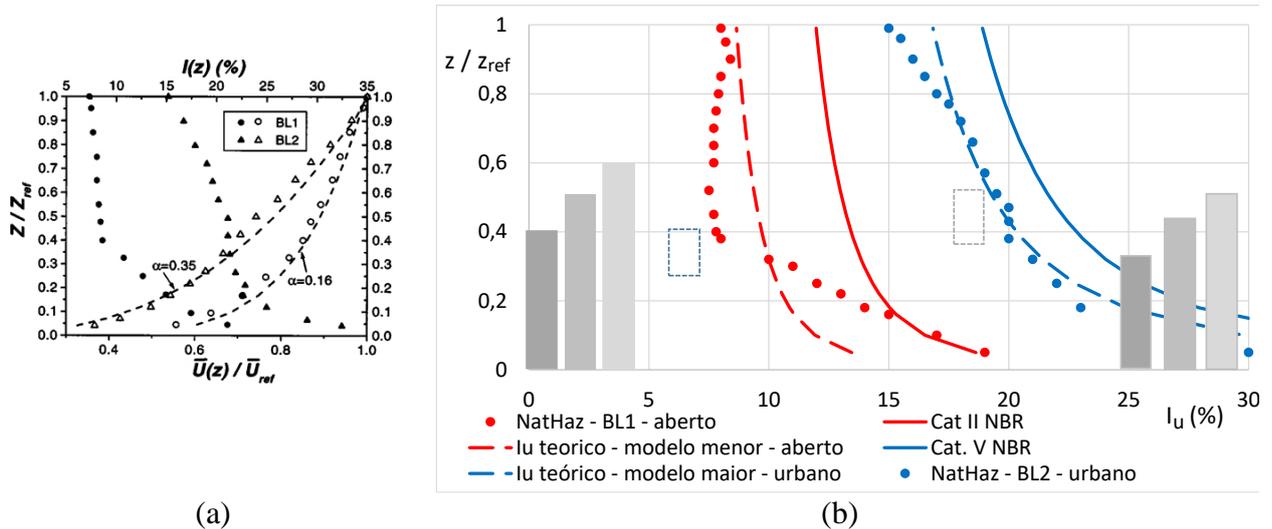


Figura 1. Perfis verticais de velocidade média e de intensidade de turbulência; (a) perfis experimentais (Zhou *et al.*, 2003); (b) perfis de I_u para terreno aberto e para terreno urbano.

Tabela 1. Parâmetros considerados nos diferentes casos-exemplo.

edifício		1	2	3	4	5	6	7	8
	B (m)	15	15	30	30	30	45	40	60
	D (m)	22,5	30	30	30	30	30	20	20
	H (m)	60	80	120	150	180	150	160	200
	C_a	1,18	1,07	1,36	1,40	1,43	1,42	1,49	1,49
Taxa de distribuição de massa = 250 kg/m ³									
Taxa de amortecimento = 2,0 %									

4. COMPARAÇÕES TEÓRICO-EXPERIMENTAIS

A Figura 2 apresenta um gráfico para cada edifício analisado mostrando a variação do momento fletor na base M_{max} (adimensionalizado em relação ao valor médio \bar{M} , ver a Eq. 4) em função da frequência do modo fundamental de flexão da estrutura. As dimensões B x D x H de cada edifício estão indicadas no topo de cada gráfico.

Observa-se na Figura 2 que, em geral, o resultado do modelo teórico NFREQ para terreno aberto (representado em linha cheia vermelha) se ajustou muito bem aos resultados de base experimental do NatHaz nos casos dos edifícios 4 a 8, cujas dimensões correspondem aos modelos físicos de altura 20” e 24” no túnel de vento. Já os resultados experimentais dos edifícios 1 a 3 foram obtidos com os modelos de 16” para os quais os perfis de intensidade de turbulência experimental e teórico (mostrados na Figura 1) são bastante distintos, apesar de terem o mesmo valor no centro no terço superior deste trecho. Este fato certamente prejudicou a comparação teórico-experimental ao contrário dos outros modelos para os quais a I_u é praticamente constante no terço superior em boa correlação com o perfil teórico (não mostrado na Figura 1).

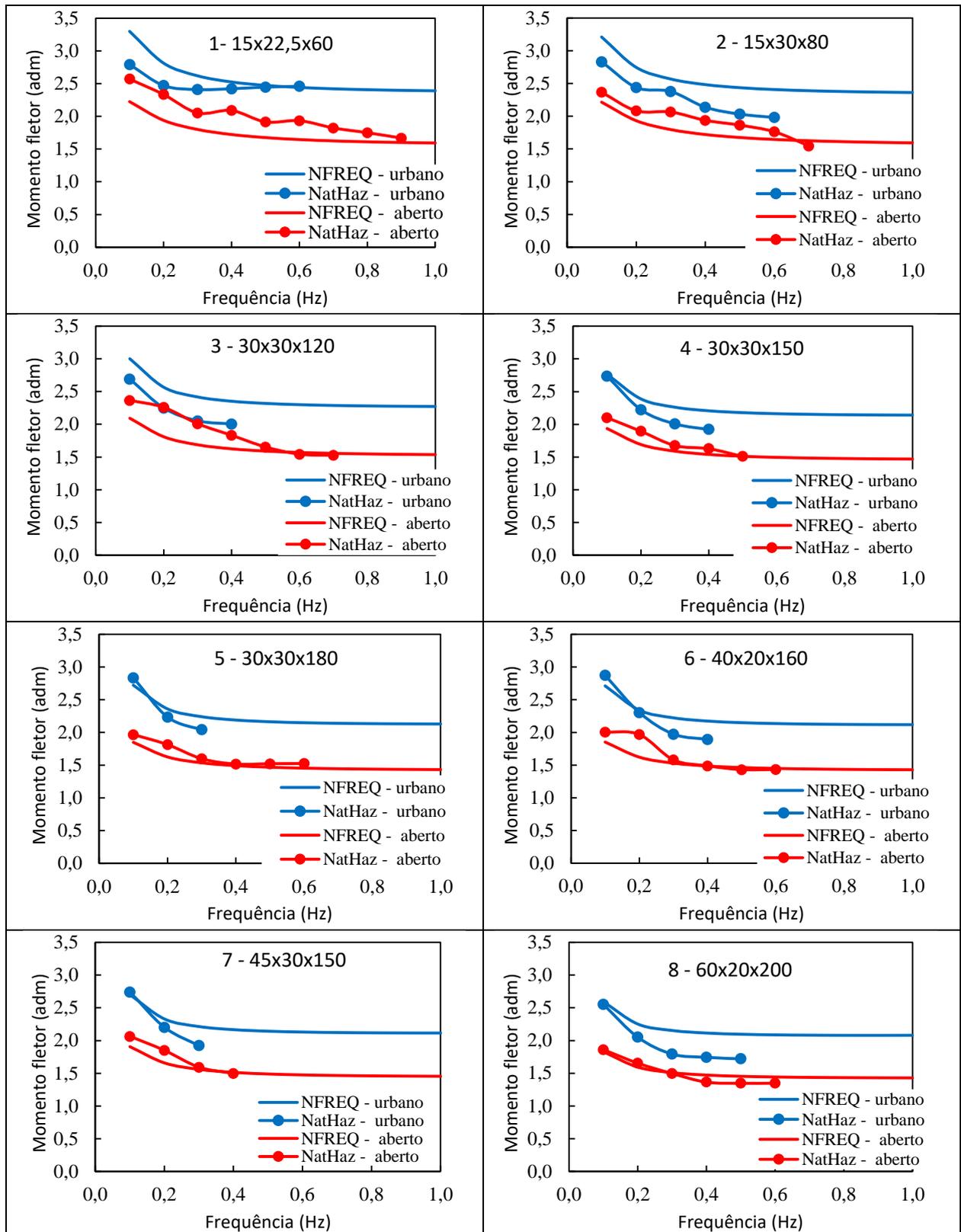


Figura 2. Variação do momento fletor máximo na base M_{max} (adimensionalizado em relação ao valor médio \bar{M}) em função da frequência do modo fundamental de flexão da estrutura.



A comparação dos resultados em terreno urbano mostra que os modelos de 4 a 8 forneceram ótima correlação teórico-experimental para baixas frequências na faixa entre 0,1 e 0,2Hz. Para frequências superiores a 0,2Hz os resultados teóricos são um pouco superiores aos experimentais, assim como para os edifícios 1 a 3 em toda a faixa de frequências.

5. CONCLUSÕES

Em virtude de não haver correspondência entre os perfis de velocidade média e de intensidade de turbulência para uma mesma categoria da NBR-6123 e os perfis experimentais dos ensaios em túnel de vento do laboratório *NatHaz*, não foi possível se fazer uma comparação direta entre os resultados do método do modelo discreto (MMD) e os experimentais. Procedeu-se, então, a uma comparação entre os resultados experimentais e os teóricos da análise modal teórico-numérica (NFREQ) na qual se introduziu como dado de entrada o valor de intensidade de turbulência no meio da altura do terço superior de cada modelo físico ensaiado. Verificou-se que, em geral, os resultados teóricos de terreno aberto se ajustaram bem aos experimentais (nos 3 exemplos do modelo de menor altura o resultado teórico foi inferior ao experimental em até 20%); para o terreno urbano os resultados teóricos se mostraram conservadores em relação aos experimentais.

Os novos ábacos propostos para o MMD da NBR-6123 foram elaborados com a análise modal teórico-numérica. As comparações favoráveis obtidas entre os resultados deste método e os de base experimental permitem se concluir que o MMD é apropriado para uso em projetos.

REFERÊNCIAS

- American Society of Civil Engineers – ASCE, (2005). Minimum design loads for buildings and other structures – ASSCE 7-05, ASCE, Reston, USA.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, (1988). NBR-6123: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro.
- Blessmann, J., 2005, Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento. 2. ed. Ed. UFRGS, Porto Alegre.
- Blessmann, J., 2013, O vento na engenharia estrutural. 2a ed. Editora da UFRGS, Porto Alegre.
- 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.
- Kwon, D. K., Kareem, A., 2013. Comparative study of major international wind codes and standards for wind effects on tall buildings. Engineering Structures, Vol. 51, pp 23-35.
- NATHAZ, Aerodynamic loads data base, disponível em < <http://aerodata.ce.nd.edu/>>, acesso fev. 2021.
- Pfeil, M.S., Cardoso, D., Conceição, R. e Battista, R.C. (2012). Edificações flexíveis sob a ação dinâmica de vento turbulento. XXXV Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural, Rio de Janeiro, Brasil.
- Riera, J., Galindez, E, 1979. “Determinación de la acción dinámica del viento em normas sobre cargas em las construcciones”. XX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería 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 Ingeniería Estructural, Lima, Peru.
- Tschanz, T.; Davenport, A.G., 1983. The base balance technique for the determination of dynamic wind loads. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 13 (1983) 429-439. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- Zhou, Y., Kijewski, T., Kareem, A., 2003. Aerodynamic Loads on tall buildings: Interactive Database. Journal of Structural Engineering, Vol. 129, N°3, pp 394-404.