

VERIFICAÇÃO DO CONFORTO HUMANO EM EDIFÍCIOS ALTOS SUBMETIDOS A CARREGAMENTOS NÃO DETERMINÍSTICOS DE VENTO

Human Comfort Assessment of Buildings when Subjected to Nondeterministic Wind Loads

Alan Barile (1); Leonardo de Souza Bastos (2) José Guilherme Santos da Silva (3)

(1) Aluno de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.

(2) Aluno de Doutorado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.

(3) Professor Doutor, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.

E-mail para Correspondência: alan.barile@gmail.com; lbastosjdf@hotmail.com; jgss@uerj.br

Resumo: Atualmente, a construção de edifícios altos e esbeltos para atender ao crescimento populacional e a redução dos espaços livres disponíveis em áreas urbanas, tem resultado em relevantes problemas estruturais relacionados a vibrações excessivas e desconforto humano causados pelas características dinâmicas do vento. Dessa forma, uma verificação do conforto humano confiável depende da correta caracterização das cargas dinâmicas de vento quando comparadas com estudos do vento natural. Nesse trabalho de pesquisa, uma metodologia de análise foi desenvolvida baseada no estudo de Shinozuka, objetivando a geração de um carregamento dinâmico de vento nas quais a densidade espectral de potência e a função de coerência sugeridos por Kaimal e Davenport são utilizadas para obtenção da amplitude de um número finitos de harmônicos superpostos com ângulos de fase gerados randomicamente. Objetivando testar o sinal gerado, um modelo em elementos finitos foi criado baseado em um edifício real de concreto armado, com altura total de 74,60 m, altura entre pavimentos de 3,24 m, e dimensões em planta de 20,24 m por 29,19 m. Finalmente, utilizando o modelo em elementos finitos, uma análise dinâmica de vibração forçada foi executada considerando o carregamento não determinístico de vento e as acelerações de pico no topo do edifício foram obtidas para uma verificação do conforto humano.

Palavras chaves: Edifícios altos; Dinâmica estrutural; Conforto humano.

Abstract: Nowadays, the construction of tall and slender buildings to attend population growth and the reduction of free spaces available in urban areas has resulted in significant structural problems related to excessive vibration and human discomfort caused by the dynamic characteristics of the wind. Thus, a reliable human comfort analysis depends on the correct description of dynamic wind loads when compared with natural wind studies. In this research, an analysis methodology was developed based on the study of Shinozuka, aiming the generation of a dynamic wind load in which the spectral power density and the coherence function suggested by Kaimal and Davenport are used to obtain the amplitude of a number of overlapping harmonics with randomly generated phase angles. In order to test the generated signal, a finite element model was created based on a real reinforced concrete building, with a total height of 74.60 m, storey height equal to 3.24 m, and rectangular dimensions of 20.24 m 29.19 m. Finally, using the finite element model, a forced vibration dynamic analysis was carried out considering the non-deterministic wind load and the peak accelerations at the top of the building were obtained for a human comfort assessment.

Keywords: Tall buildings; Structural dynamics; Human comfort.

1 INTRODUÇÃO

Edifícios altos podem apresentar problemas de conforto humano devido à vibração, quando as frequências naturais da estrutura estão próximas das frequências da parcela flutuante da velocidade do vento (Bastos, 2015). A vibração apesar de não apresentar um risco à integridade da estrutura pode causar desconforto aos usuários, levando a perda de eficiência, insegurança e no pior dos casos enjoos (Kilpatrick, 1995).

Para evitar a construção de edifícios que apresentem problemas de vibração, existem normas de projeto que indicam maneiras simplificadas de verificação. A NBR 6123/88 indica que edifícios com período fundamental maior que um segundo podem apresentar problemas de vibração e aconselha a verificação do projeto considerando o efeito dinâmico do vento, que pode ser realizado utilizando o método contínuo simplificado ou através de análise dinâmica utilizando o vento com seu caráter não determinístico.

A obtenção do vento não determinístico pode ser feita adotando a metodologia proposta por Shinozuka (1987) que representa a velocidade do vento como um somatório de um número finito de harmônicos superpostos com ângulos de fase aleatórios. A amplitude de cada um dos harmônicos é determinada através de uma função de densidade espectral de energia e de uma função de coerência. Por causa da aleatoriedade do carregamento de vento, o Método de Monte Carlo é utilizado para através da análise de séries de carregamento e posterior tratamento estatístico, obter a resposta final. A verificação do conforto humano é realizada utilizando a aceleração da edificação que é comparada com limites normativos.

Este trabalho de pesquisa pretende estudar o conforto humano de um edifício real em concreto armado através da elaboração de um modelo em elementos finitos utilizando o carregamento de vento simplificado da NBR 6123/88 e o vento não determinístico gerado através da metodologia proposta por Shinozuka (1987). A avaliação do conforto humano será realizada utilizando os critérios da NBR 6123/88 e o critério de Hirsch e Bachmann (1995). Finalmente, os resultados obtidos ao longo desta investigação mostram com clareza a importância da correta caracterização não determinística do vento para uma verificação mais realista do conforto humano.

2 MODELAGEM NUMÉRICA DAS AÇÕES DE VENTO

Esta seção do trabalho de pesquisa apresenta os métodos utilizados para o cálculo dos carregamentos de vento empregados para as análises desenvolvidas para avaliação do conforto humano do modelo de edifício investigado.

2.1 Método Contínuo Simplificado da NBR 6123/88

A NBR 6123/88 propõe uma metodologia simplificada para a consideração dos efeitos dinâmicos das ações do vento sobre edifícios, de acordo com as Eqs. (1) a (4). Em relação a Eq. (1), o primeiro termo corresponde à resposta média (parcela estática) e o segundo representa a amplitude máxima da resposta flutuante (parcela dinâmica).

$$q(z) = \bar{q}_0 b^2 \left[\left(\frac{z}{z_r} \right)^{2p} + \left(\frac{h}{z_r} \right)^p \left(\frac{z}{h} \right)^\gamma \frac{1+2\gamma}{1+\gamma+p} \xi \right] \quad (1)$$

$$\bar{q}_0 = 0,613 \bar{V}_p^2 \quad (2)$$

$$\bar{V}_p = 0,69 V_0 S_1 S_3 \quad (3)$$

$$F_j(t) = q(z) C_{aj} A_{efj}, \quad j=1,2,3,\dots,N_p \quad (4)$$

Quanto aos parâmetros utilizados nas Eqs. (1) a (4), z é a altura de atuação do vento, z_r é a altura de referência e h a altura total da edificação. Os parâmetros b e p são obtidos de acordo com a categoria de rugosidade do terreno. O termo V_p é a velocidade de projeto para um vento com duração de 10 minutos a uma altura de 10 metros do solo, S_1 e S_3 representam os fatores topográfico e estatístico, respectivamente. Os parâmetros γ e ξ estão relacionados aos efeitos dinâmicos do vento sendo obtidos através da Tabela 19 da NBR 6123/88. A força estática equivalente causada pela ação do vento é obtida simplificadamente multiplicando-se a pressão q pelo coeficiente de arrasto C_a e área efetiva A_{ef} , conforme Eq. (4).

2.2 Método de Shinozuka (1987)

O modelo de vento não determinístico foi obtido utilizando a metodologia proposta por Shinozuka (1987) onde a parcela flutuante da velocidade do vento é gerada a partir do somatório de um número finito de harmônicos superpostos com ângulos de fase aleatórios Eq. (5). A amplitude de cada harmônico é obtida através da densidade espectral de potência e da correlação espacial. Para este trabalho foi utilizada a densidade espectral de Kaimal (1989) fornecida pela Eq. (7) e a correlação espacial de Davenport (1979) mostrada na Eq. (8).

A velocidade total é o somatório da parcela flutuante e da parcela média, conforme indicado na Eq. (9) que varia de acordo com a altura do pavimento da edificação. A força do vento atuante na estrutura é obtida através da Eq. (4). A resposta final é obtida através do Método de Monte Carlo que utiliza uma quantidade finita de análises e tratamento estatístico para obtenção do valor que irá atender a um critério definido pelo usuário.

$$v_j(t) = \sum_{m=1}^{N_p} \sum_{k=1}^{N_\omega} |H_{jm}(\omega_k)| \sqrt{\Delta\omega} \cos(\omega_k t + \phi_k), \quad j=1,2,3,\dots,N_p \quad (5)$$

$$S_{jk}(\omega) = \sqrt{S_j(\omega) S_k(\omega) \gamma_{jk}(\omega)}, \quad j,k=1,2,\dots,N_p, j \neq k \quad (6)$$

$$S(\omega) = \frac{2\pi u^{*2}}{\omega} \frac{200n}{(1+50n)^{5/3}}; \quad n = \frac{\omega z}{2\pi \bar{V}(z)} \quad (7)$$

$$\text{Coh}(r, n_k) = e^{-f}, f = \frac{n_k \sqrt{C_z^2 \Delta z^2 + C_y^2 \Delta y^2}}{\frac{1}{2}(\bar{V}(z_1) + \bar{V}(z_2))} \quad (8)$$

$$v(t) = \bar{V} + v_f(t) \quad (9)$$

$$v(t) = 0.613v^2 \quad (10)$$

Sobre os parâmetros utilizados nas Eqs. (5) a (10), $\Delta\omega$ é o incremento de frequência, ω é a frequência angular, ambos relacionados à discretização da densidade espectral de potência em $N\omega$ partes, Φ é o ângulo de fase randômico para cada harmônico e H é parcela inferior da matriz de correlação cruzada Eq. (6). As variáveis Δy e Δz são as distâncias vertical e horizontal entre pontos da edificação e C_y e C_z são coeficientes obtidos através de resultados experimentais que geralmente são adotados como sendo 10 e 7.

3 CONFORTO HUMANO

As acelerações produzidas pelo vento nas edificações podem afetar o conforto dos ocupantes. Dependendo da amplitude das acelerações e da sensibilidade do edifício às vibrações, os ocupantes podem apresentar sintomas de cansaço, perda de motivação, diminuição da concentração na execução de tarefas e leves enjoos (Lamb et al, 2014). Apesar do caráter subjetivo da reação dos ocupantes quando submetidos a acelerações de baixa frequência, experimentos têm sido realizados para a obtenção de limites para as acelerações de forma a não causar desconforto (Kwok et al, 2009 e Burton, 2015).

Neste trabalho serão utilizados os critérios para limites de aceleração propostos pela NBR 6123/88 e por Hirsch e Bachmann (1995). A NBR 6123/88 estabelece o limite de $0,1 \text{ m/s}^2$ para a aceleração que pode ser excedida em média uma vez em cada 10 anos. Assim sendo, com base nos resultados obtidos a partir da análise estática simplificada [Eqs. (1) a (4)], a aceleração de pico pode ser calculada via emprego da Eq. (11). Com referência a Eq. (11) cabe ressaltar que f é a frequência do harmônico j e u é a amplitude do deslocamento obtido para a parcela flutuante do referido harmônico. Por outro lado, Hirsch e Bachmann (1995) através de estudos de vibração sobre seres humanos sugerem faixas de percepção, conforme indicadas na Tabela 1.

$$a_j = 4\pi^2 f_j^2 u_j \quad (11)$$

Tabela 1. Definição das faixas limites para o conforto humano

Percepção Humana	Valores limites de aceleração	Valores limites de aceleração (m/s ²)
Imperceptível	$a < 0,005g$	$a < 0,049$
Perceptível	$0,005g < a < 0,015g$	$0,049 < a < 0,147$
Incômodo	$0,015g < a < 0,05g$	$0,147 < a < 0,49$
Muito Incômodo	$0,05g < a < 0,15g$	$0,49 < a < 1,47$
Intolerável	$0,15 < a$	$1,47 < a$

4 MODELO ESTRUTURAL

No âmbito desta investigação foi considerado o projeto de um edifício real em concreto armado construído na cidade do Rio de Janeiro com 4 pavimentos de garagem com dimensões em planta de 34,15 x 40,80 metros e pé direito de 3,24 metros, 17 pavimentos de apartamentos com dimensões em planta de 20,24 x 29,18 metros com pé direito de 3,15 metros e um pavimento de cobertura com dimensões em planta de 9,30 x 9,36 metros e pé direito de 3,24 metros. A altura total da edificação é de 74,60 metros.

O concreto utilizado possui resistência à compressão (f_{ck}) igual a 35 MPa, módulo de elasticidade (E) igual a 27 GPa, coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,2 e peso específico (γ_c) de 25 kN/m³. Para as armaduras foram utilizados aços do tipo CA-50A e CA-60B. O carregamento aplicado na estrutura consiste em peso próprio dos elementos estruturais, revestimento de 1 kN/m², sobrecarga de 1,5 kN/m² (apartamentos), 3,0 kN/m² (garagem) e peso das alvenarias considerado como 12 kN/m³.

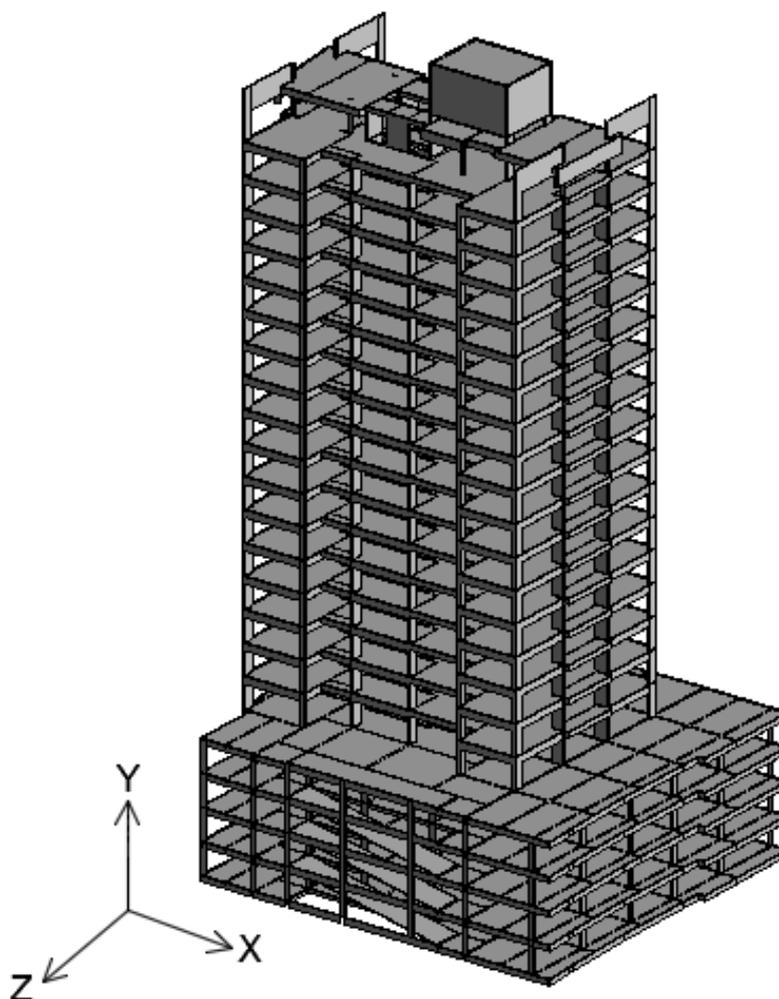


Figura 1. Vista em perspectiva do edifício estudado

5 MODELO NUMÉRICO EM ELEMENTOS FINITOS

Neste trabalho de pesquisa foi desenvolvido um modelo numérico com base no emprego do método dos elementos finitos através da utilização do programa ANSYS v12.1 (2009). Com referência a representação das vigas e pilares foi utilizado o elemento de viga espacial BEAM44 que possui dois nós com seis graus de liberdade cada, representando as três translações e as três rotações possíveis do elemento. As lajes foram representadas utilizando o elemento de casca SHELL63, que possui seis graus de liberdade em cada um dos quatro nós, sendo três graus associados às translações e os três restantes relacionados às rotações. A fundação da estrutura foi inicialmente representada considerando que a base dos pilares do térreo encontra-se com os deslocamentos translacionais impedidos. A Tabela 2 apresenta um resumo quantitativo do modelo numérico desenvolvido representado na Figura 2.

Tabela 2. Características do Modelo em Elementos Finitos

Número de Elementos	465802
Número de Nós	439134
Número de Graus de Liberdade	2588499

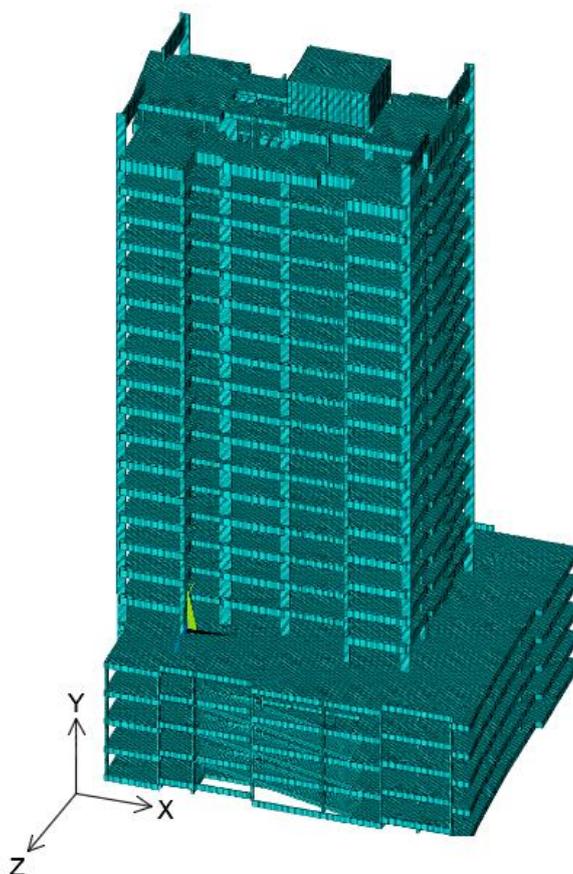


Figura 2. Modelo em elementos finitos desenvolvido para o edifício em concreto armado

6 ANÁLISES DESENVOLVIDAS NO ESTUDO

Com referências as análises desenvolvidas no âmbito deste trabalho de pesquisa, são desenvolvidas as análises do tipo estática, modal e transiente, as quais serão descritas mais detalhadamente na sequência do texto.

6.1 Análise Estática

A análise estática foi realizada utilizando o método contínuo simplificado da NBR 6123/88, utilizando as equações de 1 a 4 do item 2.1. O método considera o efeito de ressonância para gerar o carregamento de vento através da utilização de uma das frequências harmônicas da estrutura que está incluída na segunda parcela da Eq. (1).

O carregamento foi aplicado nos encontros dos pilares de cada pavimento, na direção X, na fachada da edificação perpendicular a esta direção, o deslocamento e a aceleração no topo do edifício foram obtidos para a comparação com a análise dinâmica não determinística.

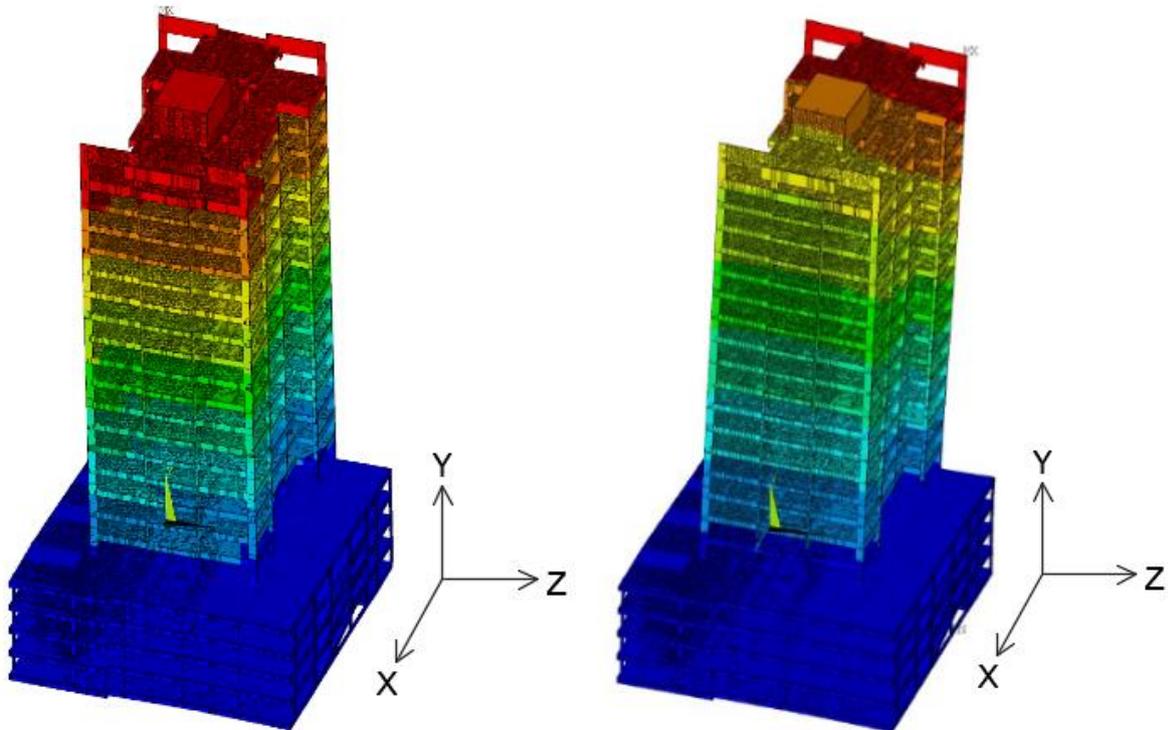
6.2 Análise Modal

O edifício estudado irá movimentar-se de acordo com o modo de vibração em que a frequência do carregamento dinâmico estiver próxima da frequência natural da, logo é necessária a realização de uma análise modal do modelo. As frequências naturais e os modos de vibração da estrutura investigada foram obtidos através de uma análise de vibração livre empregando-se o programa computacional ANSYS (2009). A Tabela 3 apresenta as seis primeiras frequências naturais do modelo e as Figs. 3 e 4 apresentam os três primeiros modos de vibração do modelo estudado.

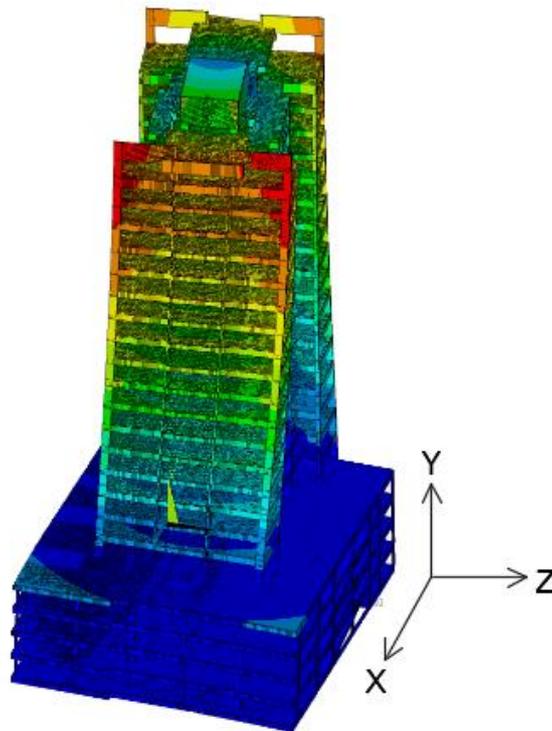
Tabela 3. Frequências naturais do edifício investigado

Modo	Frequência Natural (Hz)	Modo de Vibração
1	0,52	Flexão em torno de Z
2	0,57	Flexão em torno de X
3	0,68	Torção em torno de Y
4	1,87	Flexão em torno de Z
5	1,91	Flexão em torno de X
6	2,06	Torção em torno de Y

Observando a Tabela 3, podemos perceber que a primeira frequência natural está abaixo de 1 Hz, o que torna a análise dinâmica recomendável. Como a menor frequência, representa uma flexão em torno do eixo Z, neste trabalho o vento será aplicado perpendicular a esta direção a fim de obter o maior deslocamento do modelo estudado.



(a) 1º Modo ($f = 0,52$ Hz) – Flexão em torno de Z (b) 2º Modo ($f = 0,57$ Hz) – Flexão em torno de X
Figura 3. Modos de vibração para as frequências naturais de 0,52 Hz (a) e 0,57 Hz (b)



3º Modo ($f = 0,68$ Hz) – Torção em torno Y
Figura 4. Modos de vibração para a frequência natural de 0,68 Hz

6.3 Análise Dinâmica Não Determinística (Transiente)

Utilizando-se a metodologia exposta no item 2.2, com base no emprego das Eqs. (5) a (10), foram geradas 30 séries de carregamento de vento para a posterior análise estatística dos resultados e obtenção da resposta final. Para cada uma das 30 séries foi executada uma análise transiente com o carregamento de vento aplicado na direção X, na fachada do edifício perpendicular a esta direção.

Tabela 4. Características adotadas para a representação das ações de vento

Parâmetro	Valor
Velocidade Característica	35 m/s
Categoria de Rugosidade do Terreno	IV
Fator Topográfico S1	1
Fator Estatístico S3 (10 anos e probabilidade de 0,63)	0,78
Duração das amostras	10 minutos
Incremento de tempo	0,05 segundos

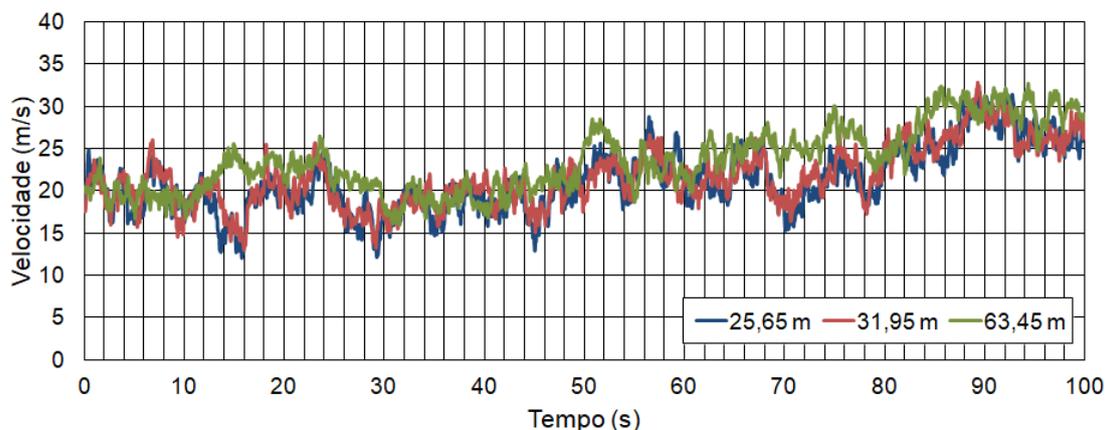


Figura 5. Velocidade para as alturas de 25, 65, 31,95 e 63,45 metros para o mesmo alinhamento vertical

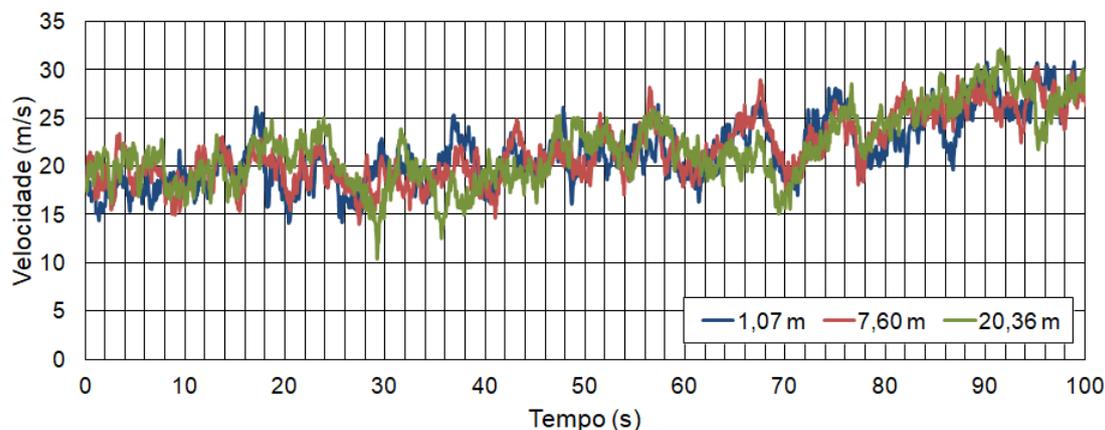


Figura 6. Velocidade para as distâncias horizontais de 25, 65, 31, 95 e 63,45 metros para o mesmo alinhamento horizontal

As Figuras 5 e 6 mostram que para distâncias próximas, verticais ou horizontais, as velocidades geradas são semelhantes, esta característica foi estudada através de resultados experimentais por Davenport (1967) que sugeriu a Eq. (8) para a correlação espacial.

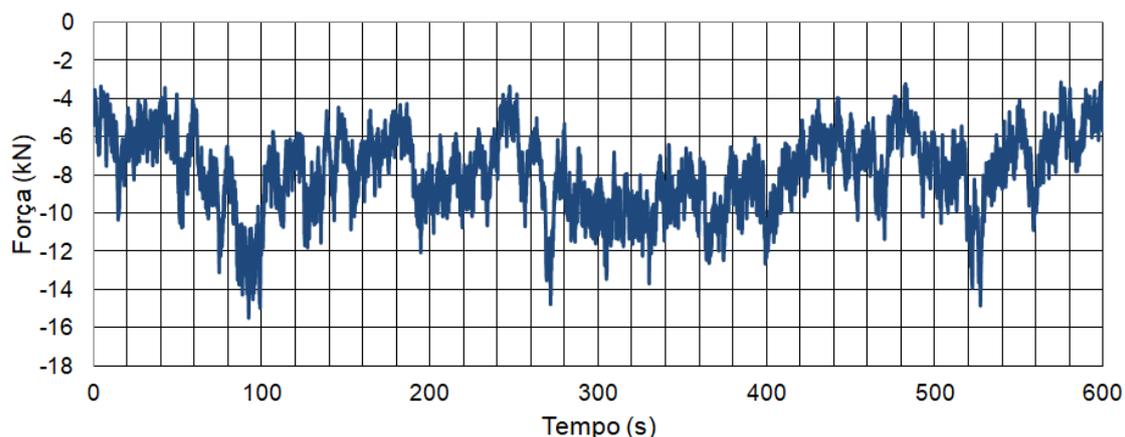


Figura 7. Exemplo típico de força aplicada na altura de 60,3 metros no domínio do tempo.

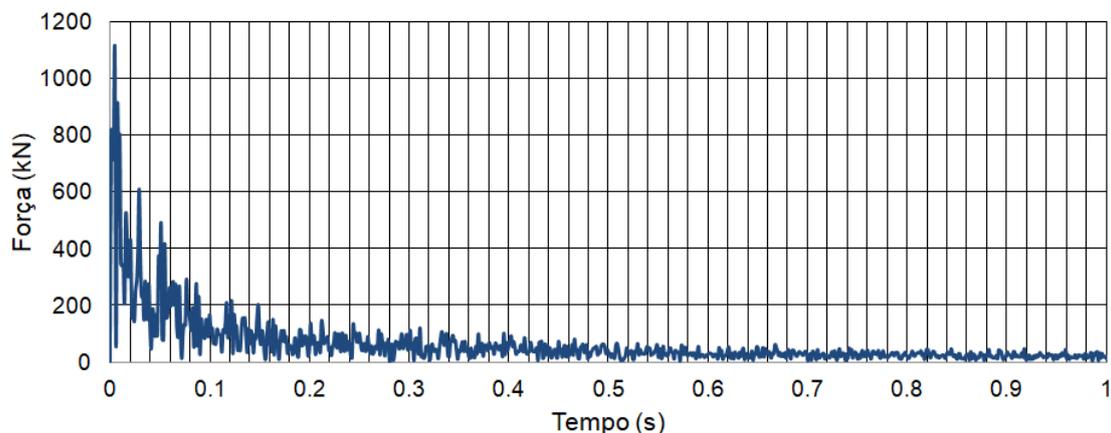


Figura 8. Exemplo típico de força aplicada na altura de 60,3 metros no domínio da frequência.

A Figura 7 apresenta um exemplo de sinal de força do vento gerado onde percebemos seu caráter não determinístico. Na Figura 8, verifica-se o mesmo sinal de força no domínio da frequência, sendo possível verificar as diversas frequências utilizadas nos harmônicos que são superpostos para compor o sinal final.

7 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A utilização do vento com características não determinísticas implica no tratamento estatístico dos resultados para a confiabilidade da resposta. Deste modo, a resposta estrutural final é obtida com base no emprego da Eq. (12), considerando-se que os resultados de todas as séries não determinísticas apresentam uma distribuição normal ou gaussiana. Assim sendo, é possível obter a média (μ), desvio padrão (σ) e valores característicos das respostas com um grau de confiabilidade de 95% ($X_{95\%}$), através da Eq. (12) (Montgomery & Runger, 2012).

$$X_{95\%} = \mu + 1,65\sigma \tag{12}$$

A Fig. 9 apresenta o valor de pico de deslocamento encontrado para cada uma das 30 séries e o valor característico de 1,16 cm que foi calculado utilizando-se a Eq. (12) e os valores da média (μ) e do desvio padrão (σ), apresentados na Tabela 5. Observando-se a Fig. 9, é possível notar que a série 18 apresentou o resultado mais próximo do valor característico; e, desta maneira, a verificação de conforto humano será realizada utilizando os resultados desta série de carregamento dinâmico não determinístico.

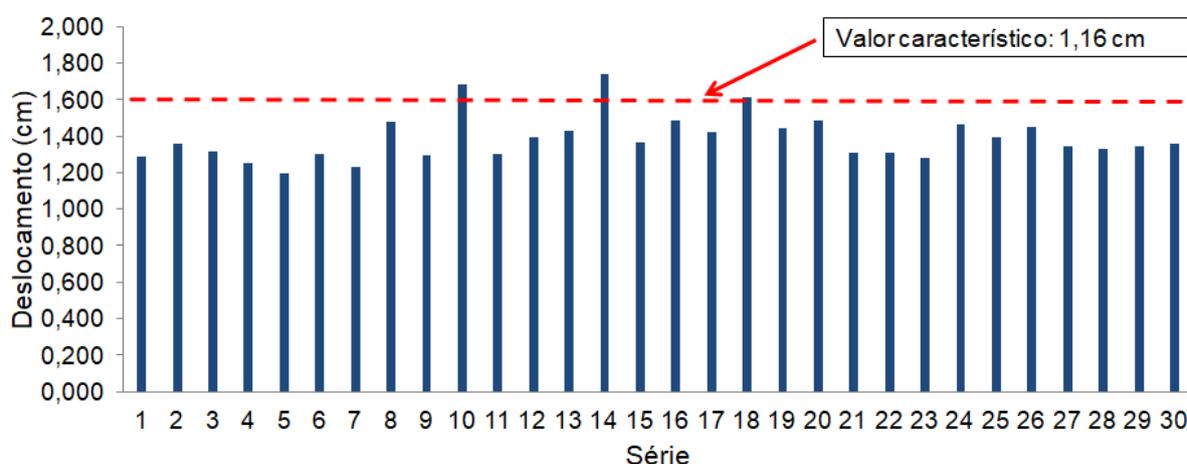


Figura 9. Resultados obtidos para cada uma das séries de vento não determinísticas

Tabela 5. Valor das variáveis utilizadas para o cálculo do valor característico

Média (μ)	1,39 cm
Desvio Padrão (σ)	0,13 cm
Probabilidade de Ocorrência*	5%

* Probabilidade para que apenas 5% dos valores possíveis sejam maiores do que o valor utilizado

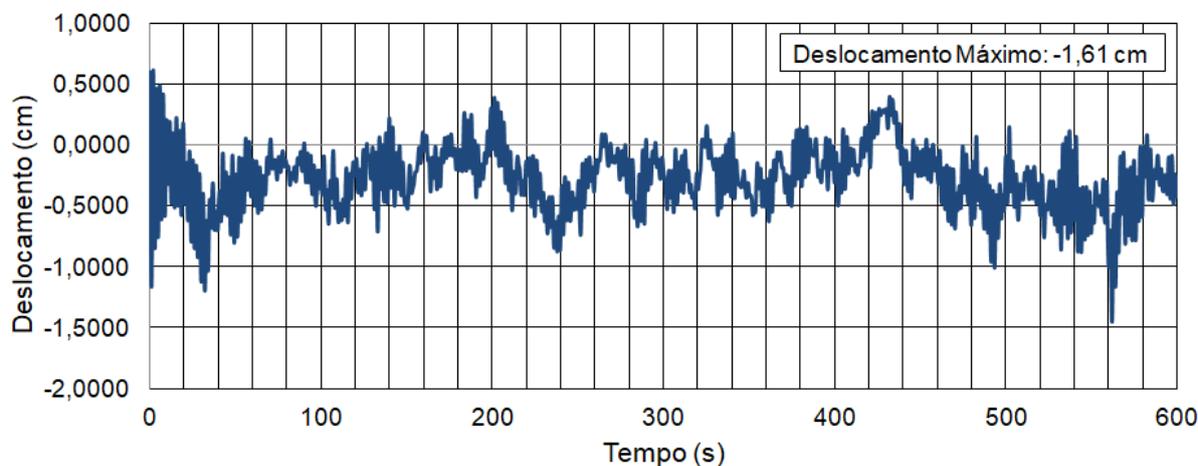


Figura 10. Deslocamento translacional horizontal obtido para uma seção estrutural (nó do MEF) do último pavimento do edifício, no domínio do tempo, para a série 18

As Figs. 10 e 11 apresentam os resultados da série 18 para deslocamentos e acelerações, respectivamente e a Fig. 12 mostra que a amplitude máxima da resposta em aceleração ocorre para a frequência de ressonância para o primeiro harmônico do modelo estrutural.

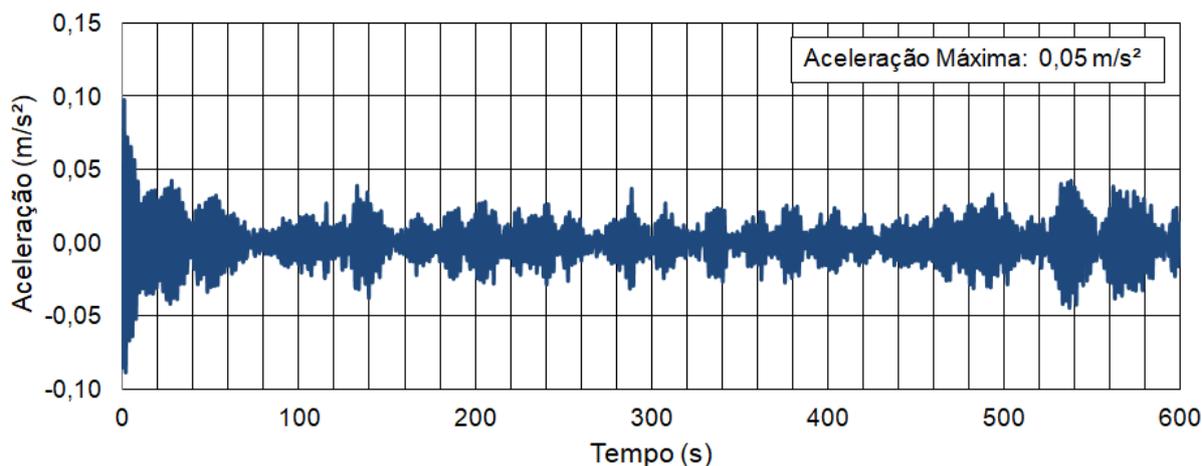


Figura 11. Aceleração obtida para uma seção estrutural (nó do MEF) do último pavimento do edifício, no domínio do tempo, para a série 18

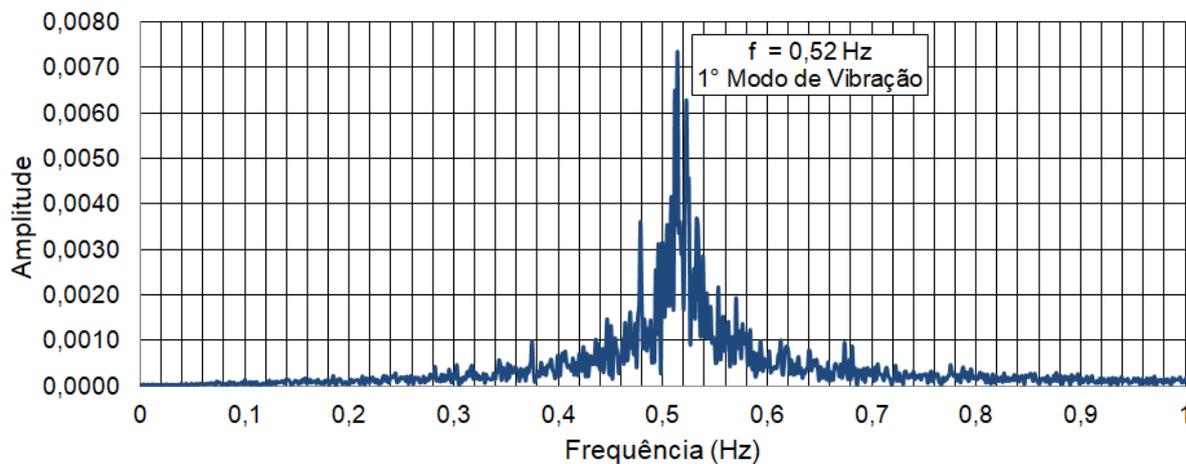


Figura 12. Aceleração obtida para uma seção estrutural (nó do MEF) do último pavimento do edifício, no domínio da frequência, para a série 18.

Em seguida, a Tabela 6 apresenta o resumo dos resultados obtidos para cada análise realizada ao longo desta investigação, destacando-se que os valores dos deslocamentos translacionais horizontais e das acelerações representam os valores máximos ou de pico.

Tabela 6. Resultados das análises desenvolvidas

Tipo de Análise	Deslocamento Máximo (cm)	Deslocamento Parcela Flutuante (cm)	Aceleração Máxima (m/s ²)
Estática [Eqs. (1) a (4)] (Método Contínuo Simplificado)	1,68	1,00	0,11
Dinâmica [Eqs. (5) a (10)] (Não Determinística)	1,61	0,22	0,05

Comparando-se as duas metodologias de análise investigadas neste estudo, observa-se que apesar do valor final do deslocamento translacional horizontal máximo do edifício em estudo ser muito próximo, com diferenças da ordem de 4,35%, destaca-se que em relação aos valores das acelerações de pico, o quadro é bastante distinto, pois o método contínuo simplificado [Eqs. (1) a (4)] apresentou uma resposta com diferenças quantitativas bastante significativas, da ordem de 120%, em relação ao modelo dinâmico não determinístico [Eqs. (5) a (10)], de acordo com os resultados apresentados na Tabela 6.

A Tabela 7 apresenta os resultados da verificação do conforto humano do edifício, evidenciando a diferença entre os resultados fornecidos pelas metodologias de análise investigadas neste trabalho de pesquisa. O valor de aceleração de pico obtido com o método contínuo simplificado não atende a recomendação da NBR 6123/88 e representa uma situação de desconforto para o critério de Hirsch e Bachmann (1995).

Tabela 7. Verificação do conforto humano

Análise	Critério para Verificação de Conforto Humano	
	NBR 6128/88	Hirsch e Bachmann
Estática [Eqs. (1) a (4)] (<i>Método Contínuo Simplificado</i>)	Não Atende	Perceptível
Dinâmica [Eqs. (5) a (10)] (<i>Não Determinística</i>)	Atende	Imperceptível

8 CONCLUSÕES

Este trabalho de pesquisa investigou o comportamento estrutural dinâmico de um edifício real em concreto armado construído na cidade do Rio de Janeiro a fim de verificar se a estrutura atende a critérios de conforto humano. Para a verificação foram utilizados o método contínuo simplificado proposto pela NBR 6123/88 para geração de carregamento estático de vento e o método de Shinozuka (1987) que considera as características não determinísticas do vento. Os critérios de conforto humano utilizados foram o da referida norma que estabelece o limite de $0,1 \text{ m/s}^2$ para a máxima aceleração que pode ocorrer em média uma vez em cada 10 anos e o critério proposto Hirsch e Bachmann (1995) que estabelece intervalos que indicam a percepção dos seres humanos às vibrações com base na aceleração do edifício.

A NBR 6123/88 sugere a realização de análises dinâmicas para estruturas que apresentam frequências menores que 1 Hz. Através da análise modal do modelo estudado foi possível verificar que a edificação apresenta para a primeira frequência natural o valor de 0,52 Hz o que evidencia a necessidade de se realizar a análise dinâmica.

Com base os resultados das análises, verifica-se que o método simplificado da NBR6123/88 conduz a deslocamentos próximos do resultado da análise dinâmica não determinística. Porém quando os valores das acelerações de pico são comparados, o método simplificado conduz a um valor 120% superior, o que pode levar a conclusão que a edificação não irá atender ao critério de avaliação do conforto dos usuários.



Comparando-se os resultados da aplicação dos critérios de conforto humano da NBR 6123/88 e de Hirsch e Bachmann (1995), é possível verificar que utilizando o método contínuo simplificado a edificação apresentaria desconforto aos ocupantes para ambos os critérios, o que não ocorre com a utilização do modelo de vento não determinístico que possui características mais próximas do vento natural.

Finalmente, destaca-se que os autores têm em mente que a consideração dos efeitos da alvenaria e, bem como, da interação solo-estrutura sobre a resposta dinâmica da edificação é relevante, conforme estudos realizados anteriormente por Nascimento (2015) e Drummond (2017); e, portanto, faz-se necessário o prosseguimento desta investigação com o objetivo de incluir estes efeitos na análise dos resultados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país, CAPES, CNPq e FAPERJ, que possibilitaram a realização deste trabalho de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANSYS Swanson Analysis Systems Inc., 2009. Theory Reference (R.12.1).

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988. NBR 6123 - Forças devidas ao vento em edificações, Rio de Janeiro.

BASTOS, L. de S., 2015. *Estudo do comportamento estrutural e análise de conforto humano de edifícios de concreto armado*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGE CIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

DRUMMOND, R. C. O., 2017. *Modelagem do comportamento estrutural de edifícios submetidos à ação randômica do vento considerando-se o efeito da interação solo-estrutura*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGE CIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

BURTON, M. D., KWOK K.C.S, ABDELRAZAQ A., *Wind-Induced Motion of Tall Buildings: Designing for Occupant Comfort*, International Journal of High-Rise Buildings 2015, Number 1, mar. 2015.

HIRSCH, G., BACHMANN, H., *Wind-induced vibrations*, Vibration Problems in Structures: Pratical Guidelines, p.73-112, Jul. 2009.

KILPATRICK, J., *The influence of Wind-Induced Motions on the Performance of Tall Buildings*. University of Western Ontario, London, Ontario, May, 1996.

KWOK K.C.S, HITICHOCK, P.A., BURTON, M. D., *Perception of vibration and occupant comfort in wind-induced in wind-excited tall buildings*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 97 p.368-380, Aug. 2014.



LAMB, S., KWOK, K.C.S, WALTON, D., *A longitudinal field study of the effects of wind-induced building motion on occupant wellbeing and work performance*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 133 p.39-51, Aug. 2014.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. Editora LTC. 520 p. 2012.

NASCIMENTO, A. C. R., 2015. *Estudo numérico-experimental da influência da alvenaria de vedação na rigidez de edifícios de concreto armado*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PPGEC, Universidade Federal do Pará, UFPA, Belém/PA, Brasil.

SHINOZUKA M., *Stochastic Fields and Their Digital Simulation*, Mechanics: Dynamics Systems - Stochastic Methods in Structural Dynamics, p.93-133, 1987.