



A: XXXIX-0000

ANÁLISE DINÂMICA DE UM EDIFÍCIO ALTO SUBMETIDO A CARGA DO VENTO

DYNAMIC ANALYSIS OF A HIGH-RISE BUILDING SUBJECTED TO THE WIND LOAD

Guilherme P. Santos (A) (1); Danielle A. Barros (2); Raiza M. Guimarães (3); Leticia F. F. Miguel (4)

- (1) Doutorando Engenharia Civil – Estruturas pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- (2) Doutoranda Engenharia Civil – Estruturas pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- (3) Msc. Engenharia Civil – Estruturas pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- (4) Dr. Prof. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, Brasil.

Endereço para correspondência: guilherme.piva.santos@gmail.com; (A) Apresentador

Área temática: Métodos Computacionais

Resumo

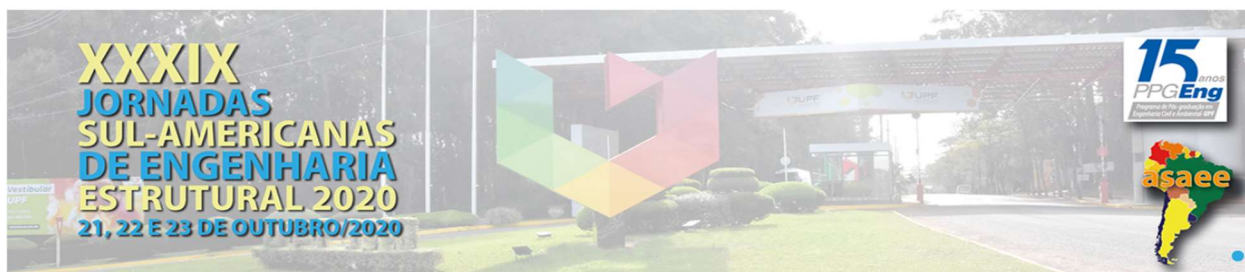
Este artigo apresenta uma análise dinâmica de um edifício alto com 34 pavimentos tipo, submetido a ação de vento tipo sinótico (*EPS - Extended Pressure System*), por meio de uma rotina computacional implementada em MATLAB. A equação de movimento dinâmico foi resolvida no domínio do tempo através do método de Newmark e, para a parcela flutuante o espectro de velocidade é baseado no modelo de Davenport. Como resultados, tem-se os deslocamentos médios e máximos para os nós localizados no topo da estrutura, sendo esses valores comparados com os deslocamentos máximos permitidos pela NBR 6118:2014 pelo método estático equivalente, onde foi constatado que análise dinâmica apresentou valores acima que o máximo permitido pela norma.

Palavras-chave: Análise Dinâmica, Carga do Vento, Espectro de Davenport, Edifício Alto.

Abstract

This paper analysis the dynamic response of a 34-story building subjected to the action of synoptic wind (*EPS - Extended Pressure System*) by applying a computational routine implemented in MATLAB. The dynamic motion equation was solved by the Newmark Method and Davenport's stationary assumption is applicable for determining the floating wind. The maximum values of the nodes displacements at the top of the building were calculated and compared to the maximum displacements established by national code NBR 6118:2014 as a limiting parameter. The results indicate that the dynamic response presented values higher than the maximum allowed by the code.

Keywords: Dynamic Analysis, Wind Load, Davenport Spectrum, High Building.



1. INTRODUÇÃO

Uma premissa básica de qualquer sistema estrutural é o atendimento aos requisitos mínimos de segurança, desempenho, estabilidade e durabilidade. No Brasil, a ação do vento constitui um fator de essencial importância no projeto de estruturas, especialmente em casos de construções altas e esbeltas que, quando não verificada adequadamente, em casos extremos, pode causar danos ou acidentes estruturais. Do ponto de vista da segurança, uma estrutura submetida à ação do vento deve ser suficientemente resistente para um desempenho adequado de seus componentes e suficientemente rígida para evitar deslocamentos exagerados, além de ser projetada para que o movimento induzido pelo vento não ocasione desconforto aos usuários da edificação.

Ventos do tipo sinótico são aqueles caracterizados por atingirem grandes extensões horizontais, longa duração e por apresentarem um perfil vertical da velocidade média definido por uma parábola cujo expoente varia com a rugosidade do terreno, tendo como exemplo os ventos do tipo EPS (*Extended Mature Pressure Systems* ou *Extratropical Pressure Systems*). O vento sinótico apresenta flutuações aleatórias em torno do valor médio de velocidades, conhecidas como rajadas ou turbulências, podendo ser considerado como um processo aleatório estacionário.

Para efeito de cálculo, a velocidade do vento pode ser separada em duas componentes: média e flutuante. A parcela da velocidade média é tratada de maneira estática e considera parâmetros geográficos, topográficos e aerodinâmicos. A componente flutuante representa a aleatoriedade das rajadas de vento no espaço por meios probabilísticos, baseados em hipóteses de estacionariedade e ergodicidade, o que permite simular sinais aleatórios não harmônicos por meio de uma soma de funções harmônicas de energia definida pelos espectros de potência do vento. (TROIAN, 2018)

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar a resposta dinâmica de um edifício esbelto de concreto armado, com 34 pavimentos tipo (102 m de altura), submetido a ação de um vento tipo sinótico, cujo parâmetro de velocidade de projeto é baseado na região de Porto Alegre, RS. A edificação foi discretizada em elementos de pórtico espacial e o deslocamento no topo da edificação obtido na análise dinâmica foi comparado ao deslocamento limite no topo da edificação imposto pela ABNT NBR 618:2014 como base no método estático equivalente.

2. METODOLOGIA

2.1 Modelo Matemático da Estrutura

A equação de movimento de sistema com múltiplos graus de liberdade é formulada pelo equilíbrio das forças que agem em suas massas, conforme o princípio de D'Alembert, e descrita pela Equação 1 (Clough e Penzien, 2003):

$$M\ddot{\vec{u}} + C\dot{\vec{u}} + K\vec{u} = \vec{F} \quad 1$$

Onde, M , C e K são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez da estrutura, respectivamente, \vec{F} é o vetor de forças e $\ddot{\vec{u}}, \dot{\vec{u}}, \vec{u}$ são os vetores de aceleração, velocidade e deslocamento da estrutura, nesta ordem. Neste trabalho, o edifício analisado teve as suas vigas e



pilares discretizados por elemento finito de pórtico espacial e, na matriz de amortecimento, foi considerado o amortecimento de Rayleigh, que é proporcional às matrizes de massa e rigidez dos seus dois primeiros modos de vibração (Clough e Penzien, 2003).

2.2 Campo de Velocidade do Vento

O cálculo da velocidade do vento foi dividido em duas componentes: média e flutuante. A primeira representa a parcela estática enquanto a segunda corresponde a aleatoriedade do vento. O campo de velocidades do vento em um determinado ponto $\vec{V}(x, y, z)$, a velocidade média $\vec{V}(z)$ e a velocidade de projeto \vec{V}_p do vento foram calculadas conforme as Equações, 2, 3 e 4, respectivamente, com as duas últimas seguindo as orientações da ABNT NBR 6123:1988.

$$\vec{V}(x, y, z) = \vec{V}(z) + \Delta\vec{V}(x, y, z, t) \quad 2$$

$$\vec{V}(z) = \vec{V}_p \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad 3$$

$$\vec{V}_p = 0,69V_0S_1S_3 \quad 4$$

Onde: $\Delta\vec{V}(x, y, z, t)$ é a velocidade flutuante, responsável pelas ações dinâmicas;

\vec{V}_p é a velocidade de projeto do vento, correspondente a velocidade média sobre 10 minutos e a altura de 10 m do solo;

V_0 a velocidade básica do vento correspondente a uma rajada de 3s a 10 m do solo;

p é o expoente adimensional em função da rugosidade do terreno e do intervalo de tempo;

z é a altura para a qual a velocidade é calculada na edificação;

S_1 é o fator topográfico do terreno onde a edificação se localiza;

S_3 é um fator relacionado ao tipo de uso da edificação.

A parcela da flutuante do campo de velocidades do vento $\Delta\vec{V}(x, y, z, t)$ foi considerada como um processo aleatório normal de média zero, obtida a partir da superposição de ondas harmônicas de acordo com o modelo proposto por Shinozuka e Jan (1972) e calculada conforme a Equação 5:

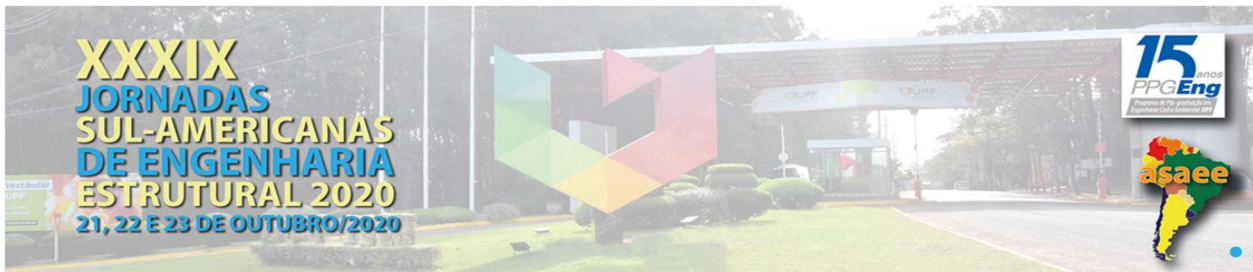
$$\Delta\vec{V}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2S_w(f_i)\Delta f_i} \cos(2\pi f_i t + \phi_i) \quad 5$$

Sendo: $S_w(f)$ densidade espectral da componente longitudinal da turbulência na frequência f , f_i a frequência do turbilhão, Δf a variação do valor das frequências, t o tempo e ϕ o ângulo de fase aleatório com distribuição uniforme dentro do intervalo $[0, 2\pi]$.

A Equação 6 representa a densidade espectral $S_w(f)$ da componente longitudinal da velocidade flutuante do vento baseada no modelo proposto por Davenport (1961), onde as variáveis n e u_0 são obtidas pelas Equações 7 e 8, respectivamente:

$$S_w(f) = \frac{4n^2 u_0^2}{f(1+n)^{\frac{4}{3}}} \quad 6$$

$$n = \frac{fL}{\vec{V}(z_{ref})} \quad 7$$



$$u_0 = \frac{0.4\vec{V}(z_{ref})}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)}$$

8

Onde, n é a frequência adimensional relacionada a hipótese de Taylor;

L é comprimento de atuação do espectro de Davenport, cujo valor é 1,200 m;

u_0 é a velocidade de fricção do vento;

$\vec{V}(z_{ref})$ é a velocidade do vento na altura de referência, que pode ser calculada com auxílio da Equação 3;

z_{ref} é a altura de referência, cujo valor é 10 m;

z_0 é a rugosidade do terreno onde a edificação está localizada conforme Blessman (2013).

2.3 Determinação da Velocidade do Vento nos Nós da Estrutura

Após o cálculo da parcela flutuante da velocidade para os pontos que formam as arestas de uma região tridimensional, deve-se quantificar o valor da força do vento, sendo então necessário conhecer o valor da velocidade da rajada do vento nos nós da estrutura, obtida por meio do processo de interpolação. Inicialmente, deve-se definir o formato da região tridimensional onde a estrutura será inserida, para então determinar as dimensões dessa região. Tendo como referência o modelo desenvolvido por Riera e Ambrosine (1992) e aplicado por Miguel *et al.* (2012), essa região tridimensional tem o seguinte formato, conforme a Figura 1:

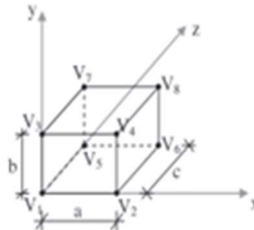


Figura 1. Região tridimensional onde a estrutura está inserida.

Fonte: Miguel *et al.* (2012)

Os comprimentos de correlação a , b e c do hexaedro apresentado na Figura 1, conforme Miguel *et al.* (2012), são descritos pelas Equações 9, 10 e 11. Observa-se que esses fatores são dependentes das dimensões da edificação em análise, em que B corresponde a base, H a altura e L a largura do edifício, respectivamente.

$$a = 1,6B + 22,1 \quad 9$$

$$b = 0,93H + 29,3 \quad 10$$

$$c = 1,6L + 22,1 \quad 11$$

Após o cálculo dos comprimentos de correlação, o último passo consistiu em interpolar a velocidade do vento para cada um dos nós da estrutura, que seguiu a Equação 12:



$$\begin{aligned}
 V(x, y, z) = & V_1 + \frac{V_2 - V_1}{a}x + \frac{V_3 - V_1}{b}y + \frac{V_5 - V_1}{c}z + \frac{V_4 - V_3 - V_2 + V_1}{ab}xy \\
 & + \frac{V_6 - V_5 - V_2 + V_1}{ac}xz + \frac{V_7 - V_5 - V_3 + V_1}{bc}yz \\
 & + \frac{V_8 - V_7 - V_6 - V_5 - V_4 + V_3 + V_2 - V_1}{abc}xyz
 \end{aligned} \tag{12}$$

Onde:

$V(x, y, z)$ é o campo de velocidade do vento em um determinado nó da estrutura;

x, y e z são as coordenadas do nó;

a, b e c são os comprimentos de correlação calculados conforme as Equações 9, 10 e 11;

V_1, V_2, \dots, V_8 são as velocidades flutuantes do vento nas arestas do hexaedro, calculadas de acordo com a Equação 5;

2.4 Cálculo da Força do Vento

De acordo com a ABNT NBR 6123:1998, a força do vento F_a pode ser calculada conforme a Equação 13:

$$F_a = C_a q A_e \tag{13}$$

Onde C_a é o coeficiente de arrasto, calculado em função das dimensões da edificação e obtido conforme as orientações da ABNT NBR 6123:1998, q é a pressão do vento e A_e é a área efetiva. No caso da área efetiva da estrutura, como a força do vento foi aplicada em sua face lateral esquerda, essa foi a área calculada para os nós intermediário e de extremidade dos pilares dessa face, obtida por meio da Equação 14:

$$A_e = \begin{cases} \frac{Lh}{2}, & \text{para os nós intermediários} \\ \frac{Lh}{4}, & \text{para os nós da extremidade} \end{cases} \tag{14}$$

Sendo L a largura da edificação e h a distância entre os pavimentos e finalmente, a pressão dinâmica do vento q é dada pela Equação 15:

$$q = 0.613 \vec{V}^2(x, y, z, t) \tag{15}$$

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Definição dos parâmetros

O modelo desenvolvido para calcular a velocidade do vento $\vec{V}(x, y, z)$ foi aplicado para um edifício de concreto armado de 102 m de altura, com 34 pavimentos tipo e altura entre eles constante igual a 3 metros, localizado em Porto Alegre/RS. A Figura 2 representa a planta baixa de um pavimento tipo dessa edificação e tem a base B igual a 11,6 m e a largura L igual 5,8 m entre os eixos dos pilares. A Tabela 1 apresenta as propriedades geométricas das seções transversais das vigas e pilares da edificação em estudo e a Tabela 2 os dados para o cálculo da



força de vento. O módulo de elasticidade do concreto foi considerado constante para todos os elementos estruturais, com $E_c = 30,7 \text{ GPa}$ e a massa total da edificação é $M_T = 1.352.222,50 \text{ kg}$ e o momento de Inércia total $I_T = 10,91 \text{ m}^4$.

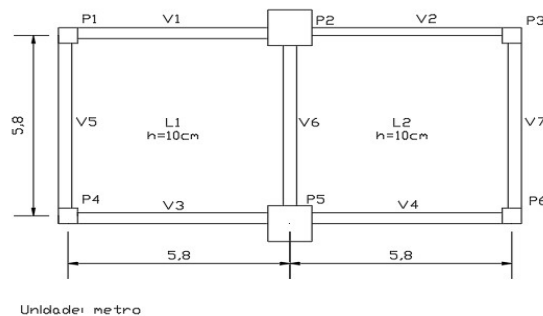


Figura 2. Planta do pavimento tipo
Fonte: Os autores

Tabela 1 - Momentos de inércia e quantidade de vigas e pilares do edifício

Elemento estrutural	Quantidade	$I_z(\text{m}^4)$	$I_z(\text{m}^4)$
Vigas (todas)	238	0,001251	0,001251
Pilares P2 e P5	68	0,1456	0,1456
Pilares P1, P3, P4 e P6	136	0,005208	0,005208

Tabela 2 – Informações para o cálculo da carga do vento

$V_0(\text{m/s})$	$q = 0,613V_0^2(\text{kN/m}^2)$	C_{ax}	$b(\text{m})$	$h(\text{m})$	$A_e = bh(\text{m}^2)$
45	1,241325	1,2	5,8	102	591,6

A edificação foi discretizada em elementos de pórtico espacial, resultando em um modelo matemático com 442 elementos, 210 nós e 1.260 graus de liberdade. Ressalta-se que a direção do vento considerada foi a mesma direção do eixo global x da estrutura, dessa forma a força do vento foi calculada apenas para os pilares da face lateral esquerda (P1 e P4) da edificação.

Antes de fazer a análise dinâmica e gerar os resultados, foi feita a análise modal da estrutura com a finalidade de verificar as suas frequências naturais. Dessa maneira, constatou-se que as três primeiras frequências naturais da estrutura valem 0,187 Hz, 0,216 Hz e 0,482 Hz, respectivamente.

3.2 Resultados dos deslocamentos

A equação de movimento do problema (Equação 1) foi resolvida no domínio do tempo aplicando o método de Newmark. A simulação da rajada de vento teve duração de 600 s e o passo de tempo utilizado na integração da equação de movimento foi de 0.1 s. Para minimizar o efeito da aleatoriedade da velocidade do vento foram realizadas 100 simulações. Os gráficos da Figura 3 representam os deslocamentos das análises estáticas e dinâmicas para o pilar P1, ao longo da altura do edifício e a Tabela 3 faz um resumo desses resultados.

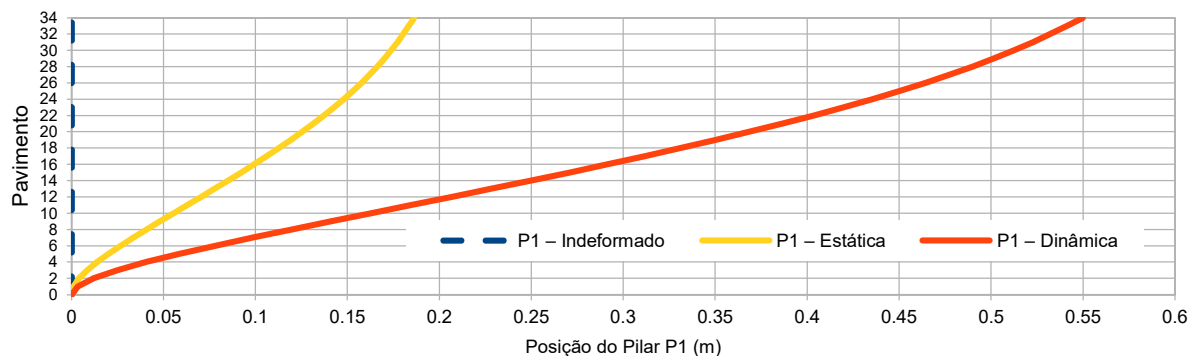


Figura 3: Deslocamentos das análises estáticas e dinâmicas para o pilar P1, ao longo da altura do edifício.

Fonte: Os autores

Tabela 3 - Resumo dos resultados das análises de deslocamento

Análise Estática (cm) – NBR 6123:1988	18,62
Estática Equivalente (cm) – NBR 6118:2014	46,50
Análise Dinâmica (cm)	55,00

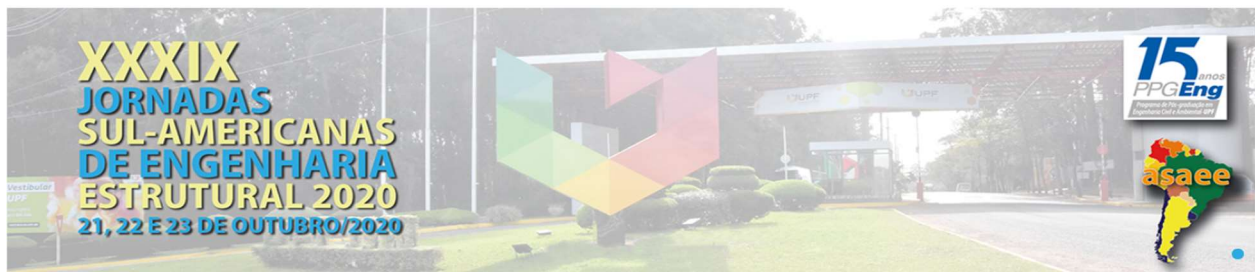
Analisando os resultados, nota-se que os nós do topo da edificação apresentaram um deslocamento máximo médio de 0,55 m na análise dinâmica. Este resultado, quando comparado com a análise estática, apresenta um fator de amplificação do deslocamento igual a 2,95. Quando comparado com a análise estática equivalente proposta pela ABNT NBR 6118:2014, tem-se que o resultado da análise dinâmica é 1,18 vezes superior.

4. CONCLUSÃO

Segundo a ABNT NBR 6118: 2014 a determinação dos deslocamentos globais limites de uma estrutura são valores práticos utilizados para a verificação em serviço do estado limite de deformações excessivas. E esses valores têm importância no intuito de garantir o conforto e a segurança dos usuários de uma edificação.

Observando os resultados, tem-se que a análise dinâmica, para este estudo, apresentou valores superiores quando comparado com a análise estática e a análise estática equivalente proposta pela NBR 6118:2014. Tal fato ressalta a importância de se entender e considerar os efeitos dinâmicos do vento para a determinação dos deslocamentos das estruturas, especialmente para edificações esbeltas.

Como solução estrutural, para os casos no qual o deslocamento horizontal da estrutura ultrapassa os valores limites definidos pela norma, torna-se necessário o enrijecimento da estrutura. Isso pode ser feito, por exemplo, com o aumento da seção dos pilares e vigas, com a criação de alguns núcleos rígidos, com o uso de contraventamentos, com o giro de alguns pilares no intuito de sua maior inércia ficar na direção de menor inércia do edifício.



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo apoio a Pesquisa e Ensino.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira De Norma Técnicas ABNT NBR 6123: Forças Devido ao Vento em Edificações, Rio de Janeiro, ANBT 1988.

Associação Brasileira De Norma Técnicas ABNT NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos, Rio de Janeiro, ANBT 2014.

Blessman, J. (2013). O Vento na Engenharia Estrutural. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

Clough, R. W. e Penzien, J. (2003). Dynamics of Structures. 3 ed, Berkley – CA: Computers & Structures.

Davenport, A. G. (1961). The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Wiley Online Library, v. 87, n. 372, p. 194–211.

Miguel, L.F.F.; Miguel, L.F.F.; Rieira, J.D.; Kaminsk Jr, J. e Menezes, R.C.R. (2012). Assessment of code recommendations through simulation of eps wind loads along a segment of a transmission line. Engineering Structures, v. 43, p. 1-11.

Riera, J.D. and Ambrosini, R.D. (1992). Analysis of structures subjected to random loading using the transfer matrix or numerical integration methods. Engineering Structures, v. 14.

Shinozuka, M. and Jan, C.M. (1972). Digital simulation of random process and its applications. Journal of Sounds and Vibration, v. 25, n. 1, p. 111-128.

Troian, S. P. (2018). Sobre a resposta estrutural dinâmica de uma torre estaiada de linha de transmissão submetida a ventos do tipo EPS. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.