



UM ESTUDO DA AÇÃO DO VENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS

Tharcio Castro Santos¹

tharciocsantos@gmail.com

Lineu José Pedroso²

lineu@unb.br

(1) Aluno de graduação, (2) Prof. orientador

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Grupo de Dinâmica e Fluido-Estrutura (GDFE). Caixa Postal 04492, Campus Darcy Ribeiro, CEP 70919-970, Brasília-DF

Resumo. Com o crescimento da população e a redução dos espaços físicos, a verticalização das cidades tem surgido como um processo contínuo e cheio de inovações. Edifícios cada vez mais altos e esbeltos são construídos nas grandes cidades. Em consequência, estas construções têm se tornado mais suscetíveis as solicitações dinâmicas, tais como ventos, sismos, impactos, entre outros, sendo então necessário estudos das mesmas nessas edificações. Este trabalho trata dos efeitos dinâmicos em edifícios altos devido à ação dos ventos, que provocam deslocamentos e vibrações ao longo da estrutura. Com o auxílio do software ANSYS, através do método dos elementos finitos, foram confeccionados modelos numéricos para análise da ação do vento, e encontrados os deslocamentos num edifício-padrão, tipo Torre Mono “Leg”. Posteriormente foi introduzida uma carga horizontal simulando a ação de ventos e encontrada a resposta dinâmica em excitação forçada. Por fim, os resultados obtidos são comparados com os valores recomendados por norma e/ou por meio de soluções analíticas para o caso de ações estáticas e dinâmicas.

Palavras-chave: Ações dinâmicas, Vento, Edifícios altos, Elementos finitos, Análise dinâmica.

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço técnico e as necessidades ditadas pelo crescimento dos grandes centros urbanos, a construção civil vem se desenvolvendo de forma surpreendente nos últimos tempos. Porém, devido à pouca disponibilidade de espaços horizontais, o uso de grandes edificações se torna a solução mais viável para o crescimento. Esse processo de verticalização dos centros urbanos deve ser estudado de forma a garantir a segurança das edificações frente a ações dinâmicas, como o carregamento horizontal oriundo da ação de ventos.

Conforme Blessmann (2001), *“O vento passou a ser considerado um fator relevante conforme as construções foram adquirindo mais esbeltez, e as estruturas promovendo cada vez mais uma menor quantidade de material”*. Assim, como parte do projeto estrutural de edificações, o estudo do vento deve ser feito de forma a mitigar eventuais problemas causados pelas oscilações e deslocamentos horizontais nos prédios.

No Brasil, tem-se como norma a NBR 6123 (Forças devidas ao vento em edificações) de 1988. Ela apresenta métodos que devem ser usados para o estudo do vento em edificações. As metodologias utilizam-se da carga estática como uma equivalente à carga dinâmica real, assim podem ser obtidos os efeitos por três maneiras: Forças Estáticas Devidas ao Vento, Modelo Dinâmico Simplificado e Modelo Dinâmico Discreto.

Portanto, para uma análise estrutural devido à pressão do vento, podem ser utilizados diversos tipos de modelagem da ação do vento. E, para o estudo da problemática oriunda da ação dos ventos num edifício alto, que é uma questão complexa, torna-se necessário uma abordagem progressiva do problema, a partir de modelos estruturais mais simples e aproximados.

Assim, este trabalho, em edifício alto simplificado, foi inspirado no edifício Burj Khalifa (Fig. 1(a)), onde um modelo escalonado de seção variável foi adotado. Os esforços do vento são calculados por meio dos dois modelos dinâmicos da norma brasileira de vento. E eles atuam apenas na área de exposição da edificação, sem ser levado em consideração os detalhes das fachadas, sacadas ou demais aberturas do edifício real (Fig. 1(b)).

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS APROXIMADOS PARA A AÇÃO DOS VENTOS

O vento é a expressão utilizada para designar os movimentos do ar relativos à superfície terrestre. Ele é provocado essencialmente por forças geradas através de diferenças de pressões na atmosfera e através do movimento de rotação da terra (Oliveira, 2014). Assim, pode ser caracterizado como um fenômeno natural instável no tempo, que apresenta variações aleatórias em torno de um valor médio de velocidades, conhecidas como rajadas ou turbulências. Portanto, apresenta uma ocorrência sequencial de frequência e intensidade de curta duração. O fato de apresentar eventos irregulares das flutuações dificulta o seu estudo de forma determinística, tendo que ser utilizadas metodologias de probabilidade e de médias estatísticas (Chávez, 2006).

2.1 Norma Brasileira NBR 6123/1988

A norma apresenta três métodos para análise de edifícios sob ação de solicitações de vento. Neste artigo serão utilizados somente os métodos dinâmicos, que são explicados a seguir:

Método Contínuo Simplificado

As flutuações da velocidade podem induzir em estruturas de edifícios altos e esbeltos, oscilações importantes na direção da velocidade média, nomeadas como resposta flutuante (Almeida e Vidoto, 2013). Assim, o procedimento de cálculo considera somente a contribuição do primeiro modo de vibração para o cálculo da resposta flutuante. Neste caso a frequência fundamental do edifício, o correspondente modo de vibração e o amortecimento modal são obtidos de forma aproximada em função da altura h da edificação e das características do seu sistema estrutural (Chávez, 2006).

A velocidade de projeto $\bar{V}_p$ é calculada por meio da velocidade básica V_0 por meio da equação 1:

$$\bar{V}_p = 0,69 * V_0 * S_1 * S_3 \quad (1)$$

Onde S_1 e S_3 são fatores que dependem da topografia do terreno e do grau de segurança requerido na edificação. Tanto a velocidade básica (V_0) quanto os fatores S_1 e S_3 são encontrados em tabelas e figuras da NBR 6123, não reproduzidas aqui neste texto.

Com isso, a resposta dinâmica pode ser calculada considerando a variação da pressão do vento em relação à altura z . Para isso, utilizam-se as eq. 2 e 3 apresentadas logo abaixo:

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

$$\bar{q}_0 = 0,613 * \bar{V}_p^2 \quad (3)$$

Onde,

$\left(\frac{z}{z_r} \right)^{2p}$ é a resposta média;

$\left(\frac{h}{z_r} \right)^p * \left(\frac{z}{h} \right)^\gamma * \frac{1+2\gamma}{1+\gamma+p} \xi$ é a amplitude máxima da resposta flutuante;

$\bar{q}_0$ é a pressão dinâmica; e

Z_r é a altura de referência (10m).

O coeficiente b e expoente p dependem da categoria de rugosidade do terreno e são encontrados na tabela 20 da NBR 6123. Os parâmetros γ e ζ (razão de amortecimento crítico) são encontrados na tabela 19 da mesma norma. Por último, o coeficiente de amplificação dinâmica ξ é encontrado por meio dos gráficos das Figuras 14 a 18 da norma. Ele é determinado em função das dimensões da edificação, da razão de amortecimento crítico ζ e da frequência da estrutura.

A pressão $q(z)$ é uma função contínua da altura z sobre o terreno. A força estática equivalente, que engloba as ações estáticas e dinâmicas do vento por unidade de altura é obtida eq. 4:

$$F = q_z * l_1 * C_a \quad (4)$$

Onde: “ l_1 ” é a largura ou o diâmetro da estrutura e “ C_a ” é o coeficiente de arrasto.

Método Discreto

Conforme explicitado no texto da norma NBR 6123/88, para edificações com propriedades geométricas variáveis com a altura devem ser feitas as suas representações, para efeito de cálculo, por meio de um modelo discreto.

Para esse método, é necessário que sejam determinadas a frequência natural F_j (Hz) e a forma modal X_j , correspondente ao modo j , para $j = 1, 2, \dots, n$, sendo n o número de modos que serão utilizados para a solução (NBR 6123/88).

Determinação das contribuições modais

Conforme Blessmann (2005, *apud* Almeida e Vidoto, 2013), em um dado instante a ação do vento na direção da velocidade média em cada parte da estrutura é composta de duas parcelas: uma ação média e uma flutuante.

Segundo a NBR 6123/88 para cada modo de vibração n , com componentes $(x_i)_j = x_i$, a força total devida ao vento na direção da coordenada i é dada pela eq. 5:

$$X_i = \bar{X}_i + \hat{X}_i \quad (5)$$

Onde $\bar{X}_i$ é a força média expressa pela equação 6:

$$\bar{X}_i = q_0 * b^2 * C_{ai} * \left(\frac{z_i}{z_r}\right)^{2p} * A_i \quad (6)$$

Sendo $q_0 = 0,613 \bar{V}_p^2$ (com q_0 em N/m², e V_p em m/s)

A componente flutuante é representada por $\hat{X}_i$, expressa pela eq. 7:

$$\hat{X}_i = F_H * \Psi_i * x_i \quad (7)$$

Sendo os parâmetros utilizados tendo valores definidos pelas eq. 8, 9 e 10:

$$F_H = \bar{q}_0 * b^2 * A_0 * \left(\frac{\sum_{i=1}^n \beta_i x_i}{\sum_{i=1}^n \Psi_i x_i^2}\right) \xi \quad (8)$$

$$\Psi_i = m_i / m_0 \quad (9)$$

$$\beta_i = C_{ai} * \frac{A_i}{A_0} * \left(\frac{z_i}{z_r}\right)^p \quad (10)$$

No qual m_0 e A_0 representam uma massa e uma área arbitrárias de referência. “ ξ ” é o coeficiente de amplificação dinâmica, apresentado nas figuras 14 a 18 no anexo “A” para as cinco categorias de terreno da norma NBR 6123/88, conforme explicitado anteriormente.

3. METODOLOGIA E ASPECTOS COMPUTACIONAIS

Para o estudo das vibrações livres e forçadas e modos de vibração da estrutura foi utilizado o programa ANSYS. Esse programa se baseia no método dos elementos finitos (MEF) para seus cálculos, fato que permite resultados mais precisos. Foram feitas as

simulações da estrutura do edifício como uma viga engastada no solo e a estrutura foi discretizada com elemento de viga BIM 188, para estudo de vibrações livres (frequências naturais e modos de vibração) e deslocamentos da estrutura para o método discreto.

Depois, foram aplicadas na estrutura as cargas dinâmicas obtidas por meio de duas metodologias recomendados na norma brasileira de ventos (NBR 6123). Assim chegou-se aos deslocamentos da estrutura para cada tipo de solicitação, podendo-se fazer uma análise comparativa.

A tipologia da estrutura utilizada foi inspirada no Burj Khalifa, mas com dimensões bem menores, por uma questão de simplicidade. As seções adotadas foram retangulares e para a avaliação das pressões do vento foi considerada apenas a área total de exposição ao mesmo. Desprezaram-se, portanto, as aberturas, sacadas, detalhes de revestimento das fachadas, etc.

Assim, a estrutura utilizada foi concebida como uma viga de inércia variável ao longo de sua altura. Na base a seção é de 12x20m e no topo a seção é de 8x16m, ou seja, diminuindo sua seção em 1 metro a cada 30 metros de altura. A estrutura final possui uma altura de 150 metros, altura máxima a ser utilizada para o método contínuo simplificado de acordo com a norma NBR 6123. A Fig. 1 apresenta uma imagem da edificação que serviu de inspiração (Burj Khalifa) e o modelo simplificado utilizado para o cálculo das pressões do vento.

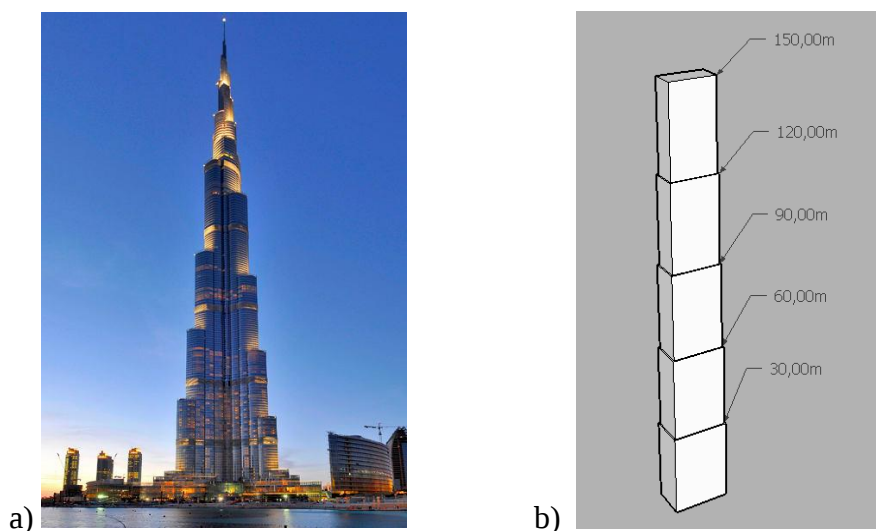


Figura 1. a) Burj Khalifa – Estrutura de base que serviu de inspiração a esse estudo (Fonte: Charles Crowell - Bloomberg), b) Viga com inércia variável (SketchUp).

4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Com as equações apresentadas neste texto e com as tabelas da NBR6123/88, foi possível se calcular as forças do vento para a edificação estudada. As forças são apresentadas abaixo na Fig. 2 a). A partir dessas forças introduzidas no modelo numérico do ANSYS, foram obtidos os deslocamentos na estrutura que são apresentados logo na Fig. 2 b):

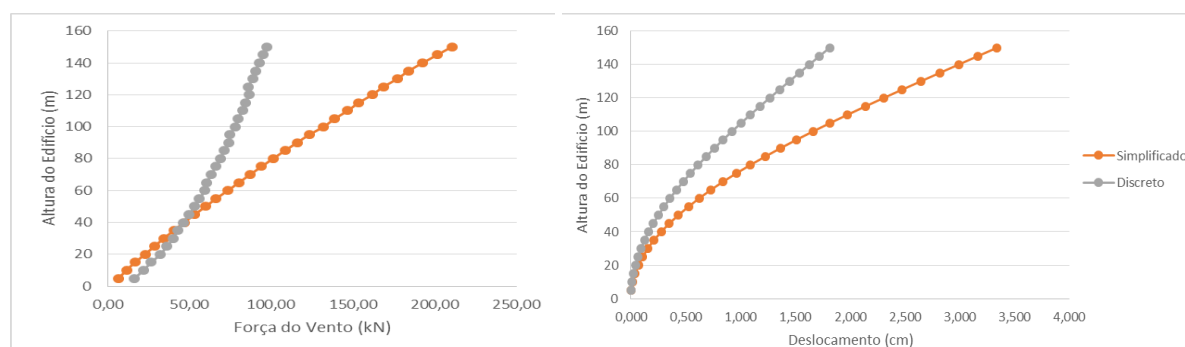


Figura 2. a) Força do vento para métodos diferentes, b) Deslocamento da estrutura para métodos diferentes

Pode-se observar que mesmo se utilizando uma estrutura semelhante para os dois métodos, os deslocamentos obtidos no método simplificado são maiores do que aqueles do método discreto. Observa-se que os deslocamentos seguem a evolução das forças do vento, havendo, como esperado, os maiores deslocamentos nos andares mais altos, com o máximo no topo do mesmo. Até uma altura de 20 metros os dois modelos apresentam um bom acordo, mas a partir desta cota os deslocamentos devido ao modelo simplificado são bem maiores.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, D. e Vidoto, T. *Análise comparativa dos métodos estático e dinâmicos da ação do vento em edifícios esbeltos de concreto armado segundo a NBR 6123/1988*. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Curitiba.

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

Blessmann, J. 1989. *Ação do Vento em Edifícios*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS.

_____. 2005. *Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS.

_____. 1995. *O vento na Engenharia Estrutural*. 1. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS.

Chávez, E. S. 2006. *Análise estrutural de edifício alto submetido às pressões flutuantes induzidas pela ação do vento*. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte.

Oliveira, B. D. C. 2014. *Efeito do Vento como Ação Dinâmica em Edifícios Altos*. Dissertação de Mestrado – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto/Portugal.

Pedroso, J., 2000. Publicação Didática (Parte I) – Introdução a Dinâmica de Estruturas. Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia / Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

Santos, T. C. 2017. *Um estudo de ações dinâmicas do vento em edifícios altos*. Monografia de Projeto Final 1 de graduação. Universidade de Brasília, Brasília-DF.