

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DINÂMICO NÃO DETERMINÍSTICO DE EDIFÍCIOS ALTOS CONSIDERANDO-SE O EFEITO DA AÇÃO TRANSVERSAL DO VENTO E A MODELAGEM DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

Leonardo de Souza Bastos, DSc.

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - PGECIV

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

José Guilherme Santos da Silva, DSc.

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - PGECIV

Departamento de Estruturas e Fundações - ESTR

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Avaliadores: José Guilherme Santos da Silva, DSc. (Orientador)

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Maria Fernanda Figueiredo de Oliveira, DSc.

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Francisco José da Cunha Pires Soeiro, PhD.

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Gilvan Lunz Debona, DSc.

Universidade Federal Rural d Rio de Janeiro - UFRRJ

RESUMO

O setor da construção civil tem se modernizado diariamente considerando-se o avanço significativo dos projetos arquitetônicos, e os engenheiros civis devem estar aptos para vencer novos desafios. A construção de edifícios altos é um exemplo deste progresso, em que inúmeras estruturas de alturas elevadas podem ser observadas em várias partes do mundo. As grandes cidades brasileiras têm apresentado um crescimento substancial em relação ao projeto e construção de edifícios altos e esbeltos, e esta tendência arquitetônica tem produzido estruturas flexíveis, com frequências naturais baixas e mais suscetíveis a vibrações excessivas oriundas das ações do vento. Portanto, torna-se necessário que a análise estrutural destes edifícios seja realizada considerando-se as ações dinâmicas não determinísticas do vento, mediante a correta definição de suas propriedades. Deste modo, este trabalho de pesquisa objetiva investigar o comportamento estrutural dinâmico e avaliar o conforto humano de um edifício em concreto armado com altura de 140 m, utilizando-se o Método da Representação Espectral (MRE) para caracterizar as ações do vento. Os resultados deste trabalho de pesquisa indicam que os valores das acelerações de pico sobre uma das fachadas do edifício foram superiores ao limite estabelecido pela NBR-6123, violando os critérios de conforto humano.

Palavras-chave: Edifícios altos; Ação não determinística do vento; Conforto humano.

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil se transforma diariamente e tendo em mente um avanço significativo dos projetos arquitetônicos, os engenheiros de projeto devem estar aptos tecnicamente para vencer novos desafios. Dentro deste contexto, a construção de edifícios altos é um exemplo muito claro deste progresso, em que inúmeras estruturas, imponentes, de alturas bastante elevadas, podem ser observadas em várias partes do mundo.

A engenharia estrutural do Brasil já convive com este novo patamar de edifícios altos. Atualmente, não é raro despontarem prédios com altura acima de 100 metros nas principais regiões brasileiras. O número de edifícios altos vem crescendo exponencialmente no país e cidades tais como Recife/PE, Goiânia/GO, João Pessoa/PB, Salvador/BA e Belém/PA, atualmente, possuem inúmeros edifícios com mais de 120 metros de altura (BASTOS, 2020).

Atualmente, uma técnica construtiva largamente empregada no projeto e construção de edifícios altos diz respeito ao uso de sistemas estruturais compostos por lajes com grandes vãos, sem o emprego de vigas, apoiadas diretamente sobre os pilares. Esta técnica construtiva, aplicada sobre projetos de edifícios altos, pode vir a ser problemática, pois tende a gerar uma diminuição da rigidez estrutural global da edificação e à possibilidade de ocorrência de vibrações excessivas (BASTOS, 2020).

Conforme os edifícios se tornam mais arrojados, esbeltos e altos, os seus sistemas estruturais passam a apresentar frequências naturais com valores muito baixos, sendo importante, nestes casos, realizar verificações mais sofisticadas e precisas para a análise estrutural da edificação. Usualmente, nas verificações e cálculos estruturais de edifícios, as cargas devido à ação do vento são consideradas puramente estáticas, porém, tal consideração pode ser discutível, pois a ação do vento tem como natureza um caráter dinâmico. Assim sendo, a análise dinâmica de edifícios altos, considerando-se o vento representado da maneira mais realística possível, se faz necessária. Para tal, as verificações de projeto devem considerar a ação do vento modelada de forma não determinística, além de ser importante um adequado tratamento probabilístico dos resultados obtidos (BASTOS, 2020).

Dentro do contexto deste tema de pesquisa, inúmeros pesquisadores têm investigado esses aspectos, tanto na consideração da ação dinâmica não determinística das ações de vento, quanto nas questões relativas a avaliações mais realista acerca do conforto humano de edifícios altos (ALGABA, 2016; BASTOS, 2020; BARILE, 2019; BARBOZA, 2016; BRASIL et al., 2013; SANTOS, 2018).

De acordo com (BRASIL et al., 2013), as excitações relativas ao vento, ondas do mar, sismos e outras deste gênero são, naturalmente, aleatórias. Neste caso, a descrição destas excitações só pode ser realizada estatisticamente, por meio de valores médios, desvios desses valores e distribuições de probabilidade. Os autores salientam que, atualmente, existem modelos matemáticos capazes de realizar a análise estocástica de estruturas com comportamento tipicamente linear, de maneira satisfatória, quando submetidas a esforços decorrentes da ação do vento. Uma rotina para análise estocástica da resposta dinâmica de estruturas comumente utilizada é denominada de “vento sintético” (FRANCO, 2011).

Em sua investigação, ALGABA (2016) comparou os resultados alcançados com a utilização do método discreto da NBR-6123 (ABNT, 1988) e do método pelo Eurocode 1-4/2005 com resultados obtidos experimentalmente para os modelos de edifício padrão da CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council) e do projeto International HFBB Comparison Project. Os resultados oriundos da NBR-6123 (1988) ficaram em média 50% menores do que os resultados experimentais. ALGABA (2016) apresentou uma revisão dos ábacos utilizados da NBR-6123 (1988) para o cálculo do fator de amplificação dinâmica.

Em seu trabalho de pesquisa no doutorado, BARBOZA (BARBOZA, 2016) investigou o comportamento estrutural dinâmico e procedeu a avaliação do conforto humano de edifícios altos; e, ainda, desenvolveu estratégias para o controle de vibrações excessivas de edifícios, quando submetidos à ação não determinística do vento, com base na consideração do efeito proveniente da interação solo-estrutura. Os resultados obtidos ao longo das análises numéricas realizadas sobre as edificações em estudo, em termos dos valores dos deslocamentos e acelerações de pico, foram comparados com os valores limites estabelecidos por normas técnicas e recomendações de projeto, atestando problemas de vibrações excessivas nas edificações investigadas no estudo.

CHAVEZ (2006) e SANTOS (2018) em seus respectivos trabalhos de pesquisa compararam o Método da representação Espectral (MRE) com o método discreto proposto pela NBR-6123 (ABNT, 1988). CHÁVEZ (2006) realizou a comparação utilizando um modelo numérico de um edifício em concreto armado com altura de 102 metros. Os resultados de deslocamento foram próximos com a utilização de ambos os métodos, enquanto para as acelerações a norma apresentou resultados significativamente maiores do que o MRE. SANTOS (2018) comparou o resultado de dois modelos de edifícios em concreto armado com alturas totais de 103 e 65 metros. Os resultados permitiram concluir que os deslocamentos e as acelerações foram menores com a utilização do método da norma.

Em seu trabalho de pesquisa, BARILE (BARILE, 2019) desenvolveu estudos com base no emprego de métodos distintos para a avaliação do conforto humano de edifícios. Destacam-se os métodos normativos que geralmente são baseados no Método do Fator de Rajada de Davenport, os Métodos Assistidos por Base de Dados, que consideram os dados obtidos em ensaios realizados em túneis de vento, considerando-se geometrias padronizadas para o cálculo das respostas, e o Método da Representação Espectral (MRE), utilizado para gerar o carregamento de vento considerando suas características dinâmicas. O estudo alerta para o fato de que a consideração da aceleração transversal para a avaliação do conforto humano de edifícios deve ser levada em conta nas análises, devido ao fato de que na maioria dos casos esta apresentou valor superior ao valor da aceleração longitudinal.

Mais recentemente, MIRANDA (2019) obteve a resposta dinâmica de um edifício em aço de cinco andares construído em laboratório foi com base em monitoração experimental dinâmica e análises numéricas. Para validar a resposta dinâmica, os resultados numéricos e experimentais foram correlacionados e apresentados em termos de parâmetros modais, funções no domínio do tempo e funções de resposta em frequência. Uma análise de vibração forçada foi realizada e a resposta dinâmica do edifício, quando submetida a cargas de impacto, foi comparada com a resposta estrutural real do modelo do edifício em aço. Com base na boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, as conclusões enfatizaram a relevância da monitoração experimental dinâmica, a fim de caracterizar e ajustar o modelo em elementos finitos desenvolvido do edifício.

Deste modo, esta investigação tem por objetivo a análise da resposta estrutural dinâmica não determinística e estudo do conforto humano de um edifício alto de concreto armado, composto por 40 andares e com altura de 140 m. A modelagem numérica do edifício é realizada com base no emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF), via utilização do programa ANSYS (ANSYS, 2010). A análise estrutural considera as cargas usuais de projeto e os efeitos da ação dinâmica não determinística do vento sobre as fachadas do edifício, definidas via Método da Representação Espectral (MRE), tendo em mente a densidade espectral da excitação, utilizando-se o espectro de potência de Kaimal (BASTOS, 2020).

Considerando-se análise dos resultados alcançados neste estudo, referentes à resposta estrutural dinâmica não determinística do edifício, em termos dos valores dos deslocamentos translacionais horizontais máximos e acelerações de pico, as conclusões obtidas apontam para o fato de que o edifício de concreto armado investigado é bastante esbelto, não atende aos requisitos básicos para conforto humano, e certamente vibrações excessivas poderão vir a ocorrer causando desconforto para os usuários da edificação.

2. OBJETIVOS

Este trabalho de pesquisa tem como objetivo a avaliação do comportamento estrutural dinâmico não determinístico de edifícios altos, quando submetidos às ações do vento ao longo do tempo. Neste contexto, considera-se o desenvolvimento de uma formulação matemática com base na consideração da densidade espectral da excitação de maneira a considerar as propriedades não determinísticas das cargas de vento atuantes sobre as fachadas dos edifícios. Além disso, objetiva-se o desenvolvimento de um estudo para avaliar nos níveis de vibração excessiva e de conforto humano de edifícios altos.

3. JUSTIFICATIVA

Nas últimas décadas, as grandes cidades brasileiras têm apresentado um crescimento relevante e substancial em relação ao projeto e construção de edifícios altos e esbeltos de concreto armado, aço; e, também, de sistemas estruturais mistos (aço-concreto). Esta tendência arquitetônica bastante comum atualmente tem produzido sistemas estruturais flexíveis, com valores de frequências naturais muito baixas; e, portanto, muito mais suscetíveis a problemas de vibração excessivas, oriundas das ações dinâmicas do vento.

De acordo com este contexto atual, torna-se necessário que a análise estrutural sobre o projeto destes edifícios seja realizada de forma mais precisa, considerando-se as ações dinâmicas do vento, de maneira mais realista, com base na correta definição de suas propriedades não determinísticas, mediante o desenvolvimento de formulações matemáticas que considerem a densidade espectral da excitação.

4. METODOLOGIA DE ANÁLISE

4.1 Modelo Estrutural Investigado

Assim sendo, para dar início ao trabalho de pesquisa foi selecionado um modelo estrutural de concreto armado correspondente a um edifício alto de 40 pavimentos, real, existente, construído na cidade de Balneário Camboriú/SC (BASTOS, 2020).

O edifício em questão possui pé-direito de 3,5 m, totalizando 140 m de altura. A edificação possui dimensões de 29,05 metros de comprimento por 9,0 metros de largura (em planta). As vigas apresentam seções de 20x100 cm, a laje possui 15 cm de espessura e os

pilares possuem seções variáveis que podem ser observadas na planta estrutural (Figura 1). O concreto utilizado no modelo possui resistência à compressão (f_{ck}) igual a 45 MPa, módulo de elasticidade (E_{cs}) igual a 34 GPa, coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,2 e peso específico (γ_c) de 25 kN/m³. Em seguida, a Figura 1 apresenta a planta de forma do pavimento tipo do edifício investigado e a Figura 2 apresenta uma perspectiva e um corte longitudinal do modelo estrutural, sendo possível observar detalhes relativos, por exemplo, a altura da edificação frente às medidas globais em planta.

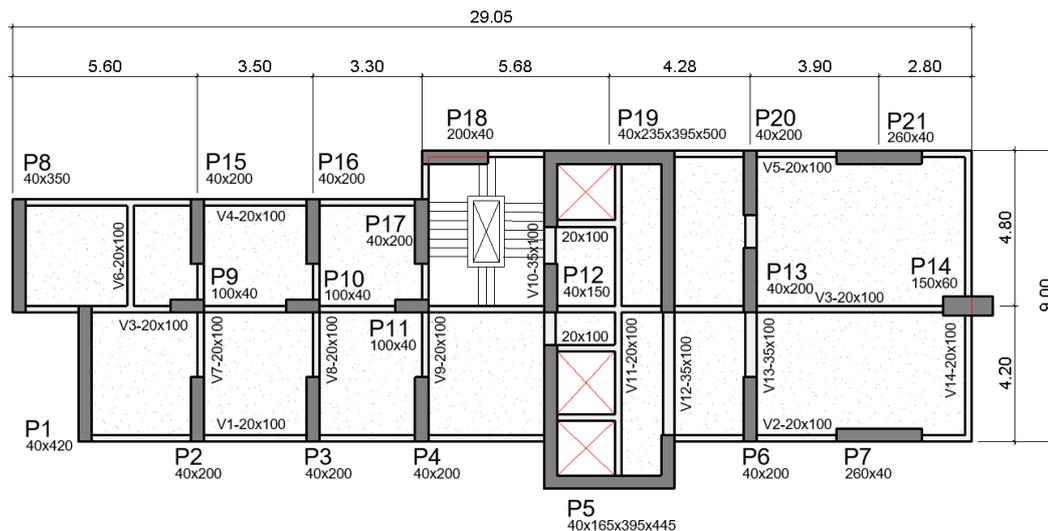


Figura 1. Projeto estrutural do pavimento tipo do edifício (H = 140 m).

4.2 Modelagem Numérica em Elementos Finitos

O modelo estrutural foi investigado utilizando o programa computacional ANSYS (ANSYS, 2010), empregando-se técnicas usuais de discretização, com base no emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF).

Em relação à modelagem numérica, as vigas e as colunas em concreto armado são representadas por elementos finitos tridimensionais, onde são considerados os efeitos de flexão e de torção. Para tal, usa-se o elemento finito BEAM44 (ANSYS, 2010), correspondente a um elemento uniaxial composto por dois nós e cada nó com seis graus de liberdade: translação em X, Y e Z e rotações em X, Y e Z, conforme mostrado na Figura 3. A grande vantagem deste elemento diz respeito à possibilidade de permitir que seus nós sejam distanciados do eixo do centroide das vigas, visto que a laje e a viga não estão posicionadas no mesmo eixo. Esta excentricidade é considerada na modelagem, pois afeta diretamente os valores das frequências naturais da estrutura.

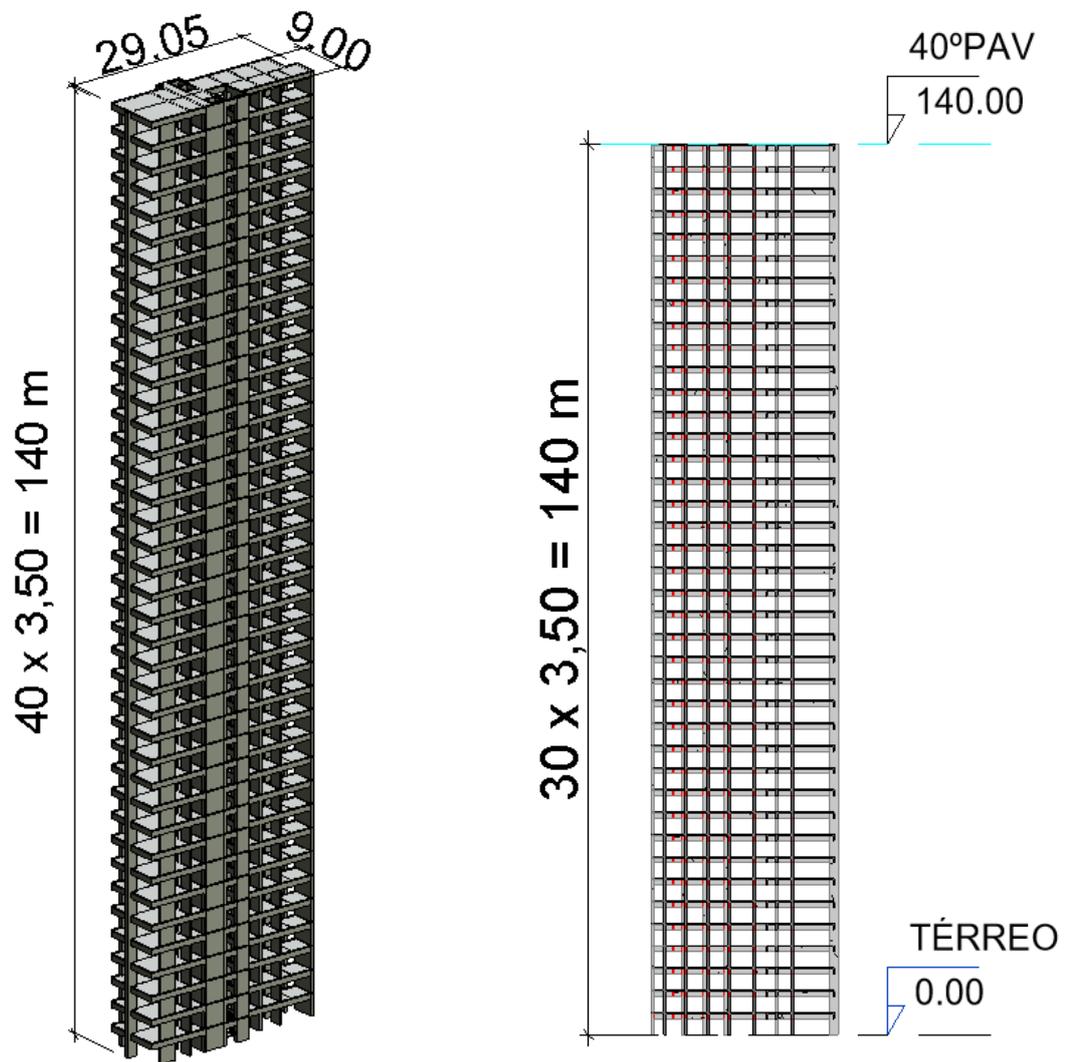
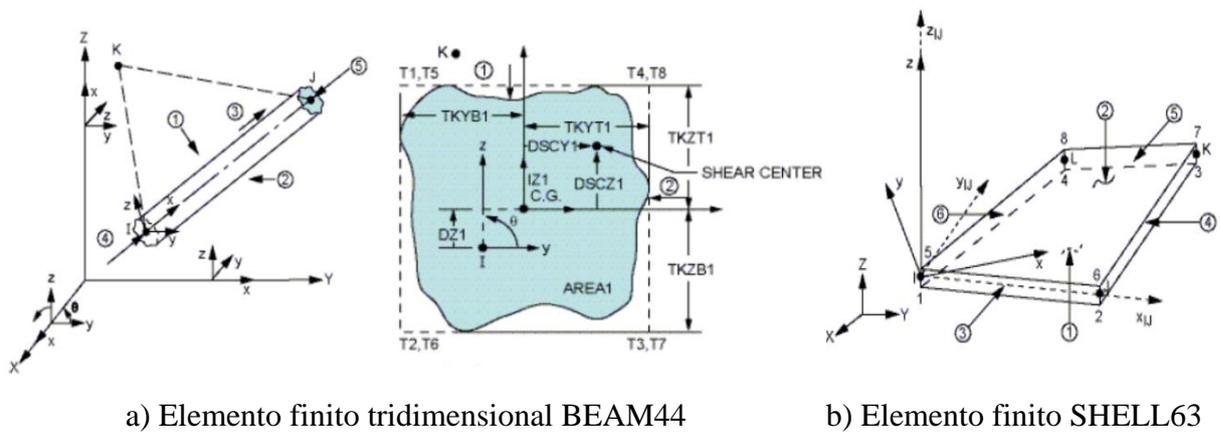


Figura 2. Perspectiva e corte da estrutura do edifício (H = 140 m).



a) Elemento finito tridimensional BEAM44

b) Elemento finito SHELL63

Figura 3. Elementos finitos BEAM44 e SHELL63 (ANSYS, 2010).

As lajes em concreto do edifício são simuladas por meio de elementos finitos de casca. Para tal simulação foi usado o elemento de casca finito SHELL63 (ANSYS, 2010), o qual é definido por quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó, sendo três de translação e três nós de rotação nas direções X, Y e Z, conforme ilustrado também na Figura 3.

A interação completa entre as lajes e as vigas de concreto foi considerada na análise, ou seja, são acoplados os nós do modelo numérico para impedir a ocorrência de qualquer deslizamento. Considera-se que o material concreto possui um comportamento linear, elástico, permanecendo plano no estado deformado. Destaca-se, ainda, que os apoios da edificação foram considerados como sendo rígidos, representados a partir da restrição dos deslocamentos translacionais em relação às direções X, Y e Z e rotações livres em torno dos referidos eixos (BASTOS, 2020).

O modelo numérico desenvolvido apresenta 160919 nós, 180000 elementos e 913626 graus de liberdade, tendo seus elementos constituídos por elementos finitos de casca SHELL63 (ANSYS, 2010) para simulação das lajes de concreto armado e por meio de elementos finitos de viga tridimensionais do tipo BEAM44 (ANSYS, 2010) para simulação das vigas e dos pilares. Em seguida, as Figuras 4 e 5 apresentam maiores detalhes acerca do modelo em elementos finitos desenvolvido para o edifício em estudo.

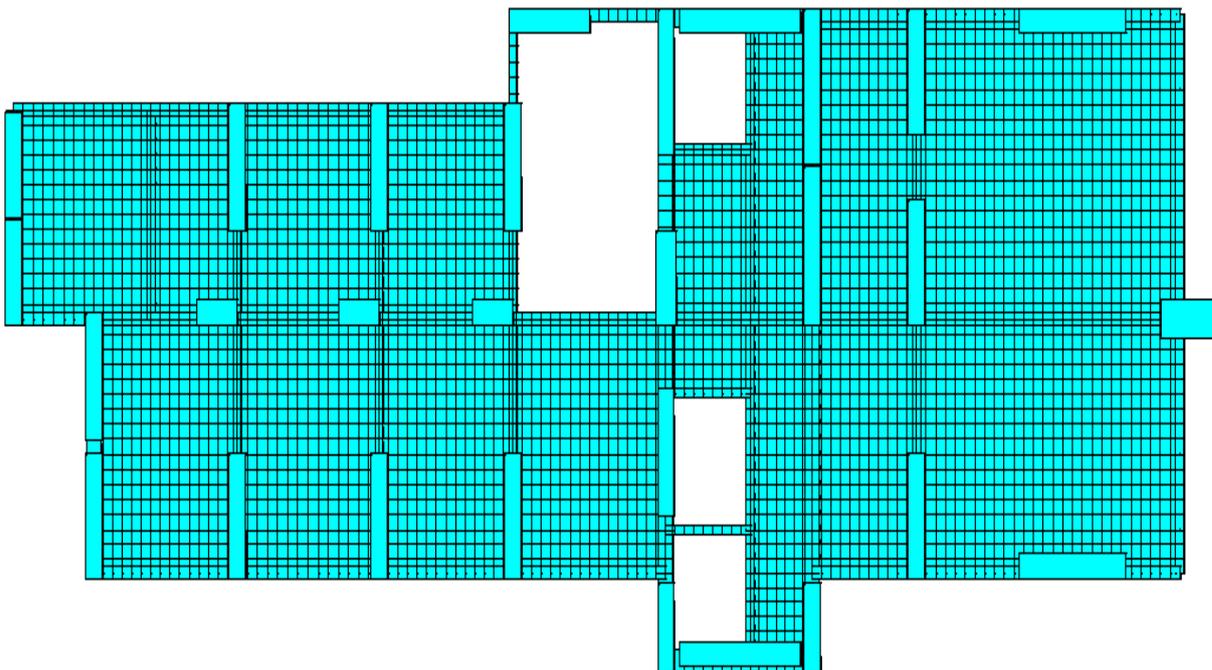


Figura 4. Pavimento tipo em elementos finitos (H = 140 m).

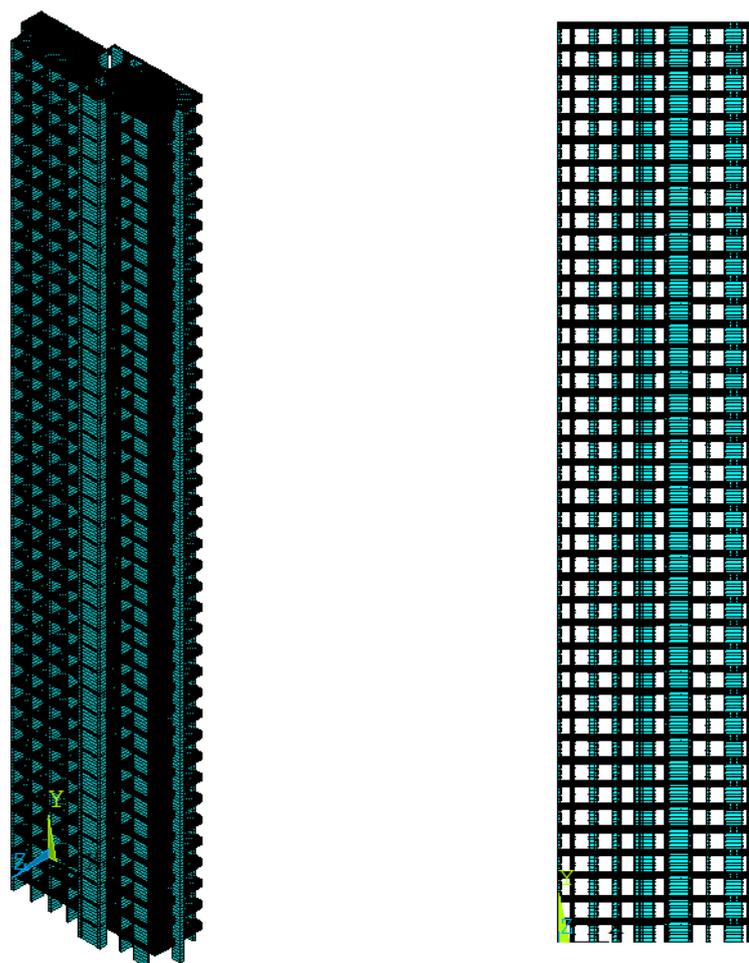


Figura 5. Perspectiva e corte do modelo em elementos finitos ($H = 140\text{m}$).

4.3 Análise Modal do Edifício: Frequências Naturais e Modos de Vibração

As frequências naturais (autovalores) e os modos de vibração (autovetores) da estrutura investigada neste trabalho de pesquisa foram obtidos com base no emprego de métodos numéricos de extração (análise modal), a partir de uma análise de vibração livre empregando-se o programa computacional ANSYS (ANSYS, 2010).

Os quatro primeiros modos de vibração do edifício investigado neste estudo são ilustrados na Figura 6. Deste modo, verifica-se que o valor da frequência fundamental da estrutura é igual a 0,29 Hz ($f_{01} = 0,29\text{ Hz}$). Tal fato é bastante relevante, pois de acordo com a norma brasileira de projeto NBR-6123 (ABNT, 1988), edificações com valores de frequências naturais inferiores a 1 Hz, em particular aquelas fracamente amortecidas, podem apresentar resposta flutuante relevante na direção do vento médio, com indicativo de ocorrência de vibrações excessivas.

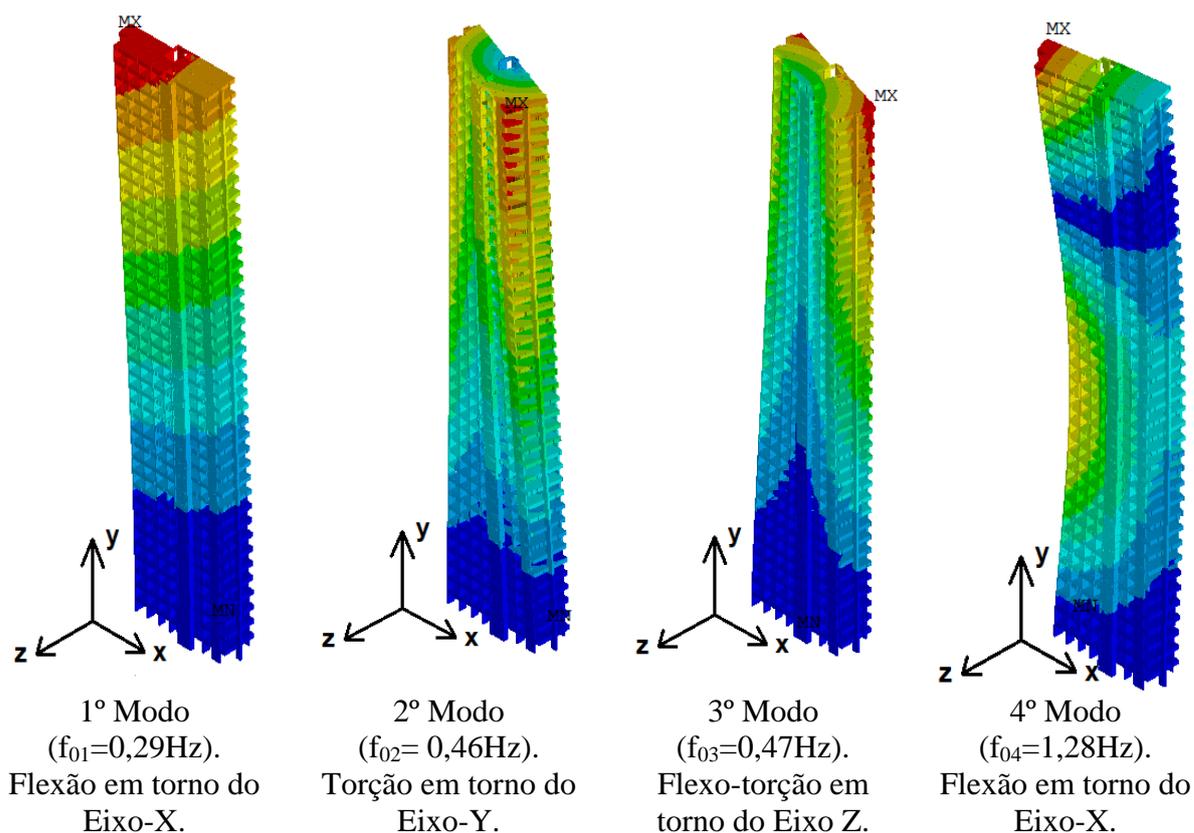


Figura 6. Modos de vibração do Modelo 140 m (1° ao 4° modo).

4.4 Modelagem Matemática do Amortecimento Estrutural

O amortecimento estrutural representa o resultado da dissipação de energia mecânica causada por fricção devido ao movimento relativo entre componentes da estrutura, principalmente nas articulações. O comportamento da energia de dissipação depende do sistema mecânico em particular e, portanto, é extremamente difícil desenvolver um modelo analítico generalizado. Uma grande proporção da energia mecânica dissipada em edifícios, pontes, e muitas outras estruturas de engenharia civil ocorrem através do mecanismo de amortecimento estrutural.

O amortecimento determina a amplitude e o tempo de permanência da vibração depois de cessada a excitação dinâmica. Objetivando avaliar o amortecimento de uma estrutura, seria necessário realizar ensaios experimentais na edificação, o que exige custos elevados. Desta forma, o amortecimento estrutural é normalmente obtido pela matriz de amortecimento de Rayleigh (CLOUGH & PENZIEN, 2003), denominada de (C), que é calculada a partir da contribuição na matriz de rigidez (K) e da contribuição na matriz de massa (M), conforme a Eq. (1), proposta por Clough & Penzien (CLOUGH & PENZIEN, 2003).

$$c = \alpha M + \beta K \quad (1)$$

A Eq. (1) pode ser reescrita em termos da taxa de amortecimento (ξ_i) e da frequência natural circular (ω_{0i}), associada ao modo de vibração (i), de acordo com a Eq. (2).

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2\omega_{0i}} + \frac{\beta\omega_{0i}}{2} \quad (2)$$

Desta maneira, isolando-se os termos α e β na Eq. 8, têm-se as Eqs. (3) e (4):

$$\alpha = 2\xi_i\omega_{0i} - \beta\omega_{0i}^2 \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_2\omega_{02} - \xi_1\omega_{01})}{\omega_{02}^2 - \omega_{01}^2} \quad (4)$$

Objetivando realizar a análise de vibração forçada (ação dinâmica do vento), e conhecendo-se os valores de (f_{01}) e (f_{04}), relacionados à flexão em torno do eixo-X (frequências naturais de interesse), torna-se possível determinar o valor dos parâmetros (α) e (β) que definem a razão de amortecimento da estrutura. Nesta investigação foi adotada uma taxa de amortecimento estrutural de 2% (BASTOS, 2020) e os valores obtidos de (α) e (β) são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros α e β utilizados na análise de vibração forçada da edificação.

Modelo H = 140 m	f_{01} (Hz)	f_{04} (Hz)	α (Massa)	β (Rigidez)
	0,291	1,277	0,0591160	0,0041938

4.5 Modelo Não Determinístico: Método da Representação Espectral (MRE)

As edificações altas, por serem tratadas de estruturas em sua maioria flexíveis, estão sujeitas a problemas de vibração excessiva quando submetidas à ação do vento, podendo levar o desconforto dos usuários (BASTOS, 2020). Assim sendo, é de fundamental importância considerar esses efeitos nos projetos estruturais. As propriedades do vento são instáveis e randômicas, sua consideração de forma determinística torna-se, portanto, inadequada. Todavia,

pode-se levantar a hipótese de que o vento possui características estacionárias. Avanços recentes em técnicas computacionais têm tornado possível a geração de históricos e dados de vento com as mesmas características estatísticas próximas das do vento real.

Neste trabalho será utilizado o Método da Representação Espectral (MRE) (BASTOS, 2020; BARILE, 2019), que consiste na geração de um número razoavelmente grande de séries de carregamento dinâmico compostas pela superposição de componentes harmônicos de fases aleatoriamente escolhidas, configurando um tipo de simulação numérica similar aos métodos do tipo Monte Carlo. Destaca-se que o método de Monte Carlo constitui uma alternativa que utiliza a atual potência computacional para solução de problemas de difícil formulação, em razão de sua eficiência depender pouco do modelo de resposta e dos dados estatísticos e mais do número de simulações.

No que tange a geração dos históricos de carregamento admite-se que o fluxo de vento é unidirecional, estacionário e homogêneo. Isso implica que a direção do fluxo principal é constante no tempo e no espaço, e que as características estatísticas do vento não se alteram durante o período no qual a simulação é realizada (BASTOS, 2020; BARILE, 2019). A metodologia de análise pressupõe a divisão do carregamento de vento em uma parcela flutuante e outra média. Esta última é aplicada estaticamente sobre a estrutura. A parcela flutuante do vento é decomposta num número finito de funções harmônicas proporcional à frequência de ressonância da estrutura com ângulos de fase determinados aleatoriamente (BASTOS, 2020; BARILE, 2019).

Com base na metodologia de análise desenvolvida (BASTOS, 2020; BARILE, 2019), foram utilizados 81 componentes harmônicos, com referência a uma faixa de frequência de 0,01 a 4,01 Hz de interesse para a avaliação do conforto humano do edifício. Esta faixa de frequência corresponde aos vinte primeiros modos de vibração da estrutura investigada.

A amplitude de cada harmônico é obtida como uma função do espectro de potência do vento. De acordo com os espectros de potência existentes, Figura 7, adotou-se neste estudo o espectro de Kaimal devido à consideração da altura da estrutura na formulação. Assim sendo, o espectro potência pode ser determinado pelas Eqs. (5) e (6), sendo (f) a frequência em Hz, $S(f,z)$ representa a densidade espectral da componente longitudinal da turbulência na frequência (f), (X) corresponde à frequência adimensional e (V_z) a velocidade média na cota considerada (z). A velocidade de fricção (u^*), dada em m/s é calculada pela Eq. (7), com (k) sendo a constante de Karmán.

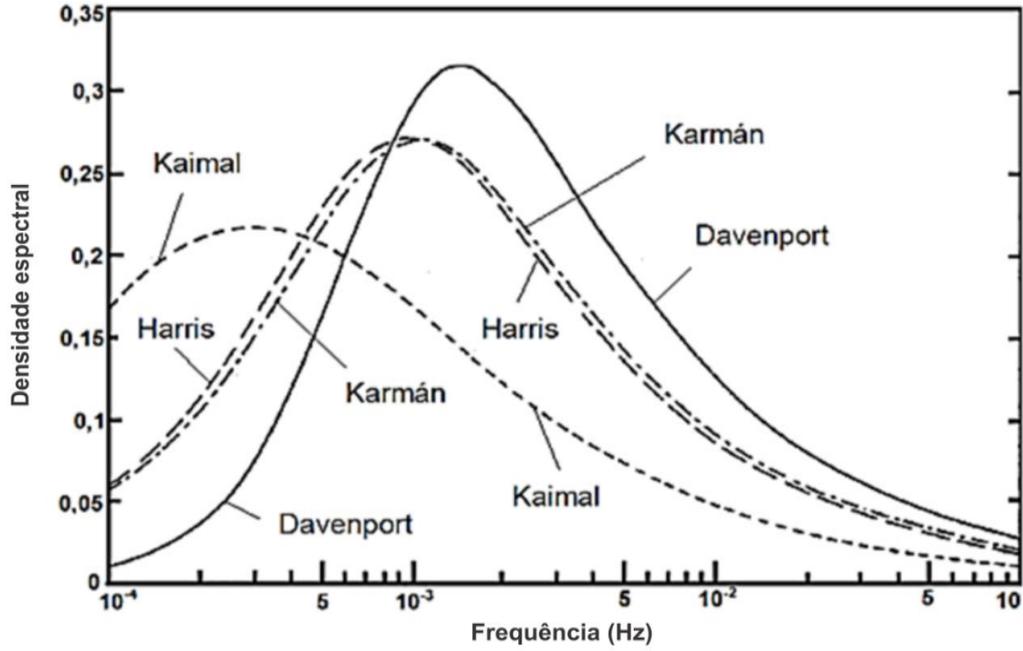


Figura 7. Espectro de potência do vento.

$$\frac{f S(f, z)}{u_*^2} = \frac{200 X}{(1 + 50 X)^{5/3}} \quad (5)$$

$$X(f, z) = \frac{f z}{V(z)} \quad (6)$$

$$u_* = \frac{k \bar{V}_z}{\ln(z/z_0)} \quad (7)$$

A parcela flutuante da velocidade do vento é representada com base em um processo aleatório estacionário com média igual a zero e obtida pela sobreposição de ondas harmônicas, de acordo com a Eq. (8). O caráter não determinístico do sinal é determinado através da utilização de ângulos de fase gerados randomicamente, com distribuição uniforme. Cabe ressaltar que na Eq. (8), N corresponde ao número de divisões do espectro de potência, f_i representa a frequência em Hz, Δf é o incremento de frequência e θ_i é o ângulo de fase aleatório entre 0 e 2π . A amplitude da função temporal (a_i) é calculada via Eq. (9).

$$v(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2S^V(f_i)\Delta f} \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (8)$$

$$a_i = \sqrt{2S^V(f_i)\Delta f} \quad (9)$$

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em relação às características das cargas de vento atuantes sobre o edifício em estudo, faz-se importante destacar que a estrutura foi inspirada em um projeto real existente na cidade Balneário Camboriú/SC. Assim sendo, o valor para a velocidade básica do vento de acordo com a NBR-6123 (ABNT, 1988) é igual a 45m/s e os parâmetros normativos para geração dos carregamentos do vento são descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros para geração do carregamento de vento.

Velocidade básica do vento	45 m/s	Isopletras - Santa Catarina
Categoria do terreno	II	(região costeira)
Classe	C	(uma das dimensões > 90 m)
Fator S_1	1,0	(terreno plano)
Duração da análise	10 minutos	
Tempo de recorrência	10 anos	
Fator Fr	0,69	
Coefficiente de Arrasto 0°	1,58	
Coefficiente de Arrasto 90°	1,0	
Parâmetro p	0,15	
Parâmetro b	1,0	
Z_0 (m) - rugosidade	0,07	
S_3	0,78	63% para 10 anos

Cabe ressaltar que para a análise e discussão dos resultados apresentados ao longo desta investigação, tendo em mente a limitação do número de páginas do artigo, o caráter não determinístico associado ao efeito de vórtices (ação transversal das cargas de vento); e, bem como, o efeito da modelagem das fundações (interação solo-estrutura) não serão abordados. Por outro lado, o desenvolvimento da formulação matemática, metodologia de análise e resultados alcançados, considerando-se todos os efeitos mencionados anteriormente, podem ser acessados através da consulta do trabalho de pesquisa de BASTOS (BASTOS, 2020).

Assim sendo, com base nos parâmetros descritos na Tabela 2 e utilizando-se a metodologia de análise desenvolvida para geração das cargas dinâmicas não determinísticas do vento utilizando-se a representação espectral (MRE) (BASTOS, 2020; BARILE, 2019), foram geradas 30 séries de carregamento aplicado de acordo com a direção Z (Vento 0°) e, em seguida, sobre a direção X (Vento 90°). As cargas dinâmicas não determinísticas foram

aplicadas separadamente sobre cada fachada do modelo estrutural investigado. As direções de aplicação das cargas de vento são ilustradas na Figura 8.

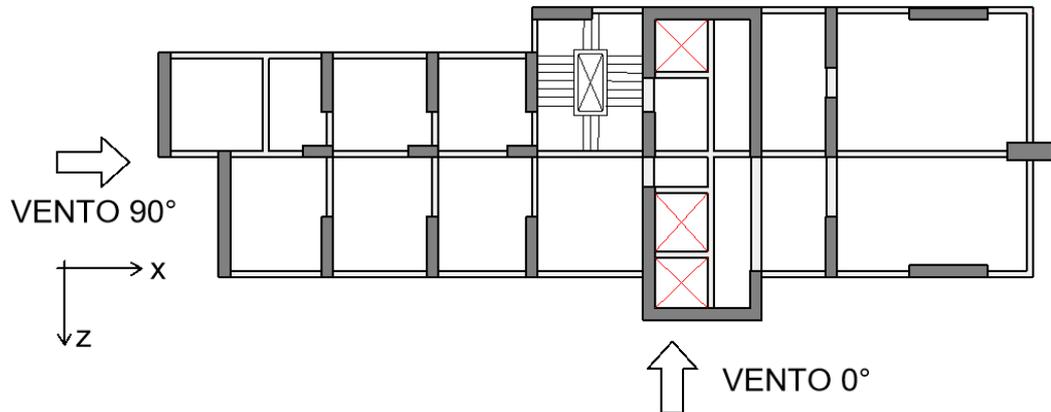


Figura 8. Direções de atuação das cargas dinâmicas de vento.

Observando-se a Figura 9 é possível verificar um exemplo genérico de carregamento de vento não determinístico aplicado ao pilar P5, no topo do modelo estrutural ($Z = 140\text{m}$). Esta função temporal de carregamento dinâmico não determinístico foi obtida com base na geração da primeira série de carregamento da análise realizada neste estudo, considerando-se a atuação das cargas de vento na direção 0° (Figura 8).

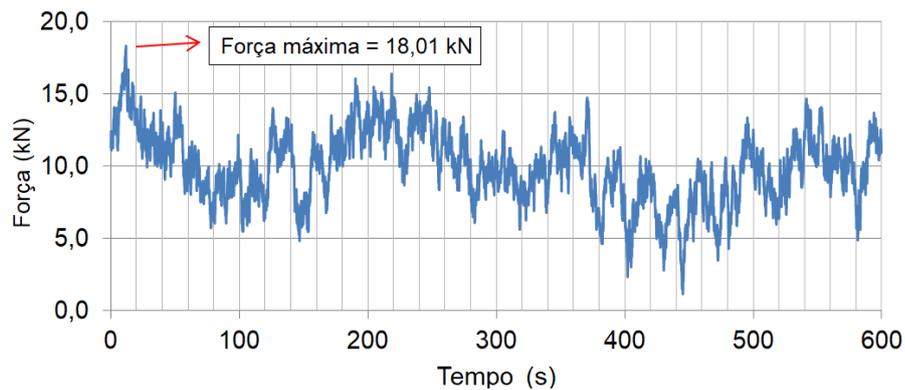


Figura 9. Força dinâmica não determinística aplicada ao pilar P5 ($Z=140\text{m}$. Série 01).

Os resultados associados aos valores dos deslocamentos translacionais horizontais (U_X e U_Z), acelerações longitudinais de pico e RMS (a_X e a_Z), obtidos com base no emprego das 30 séries de carregamento dinâmico de vento, onde considera-se a ação do vento atuando a 0° e a 90° em relação ao modelo estrutural (Figura 8), são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Deslocamentos horizontais e acelerações de pico: Vento 0° e Vento 90°.

Séries de Carregamento (Ação do Vento)	VENTO 0°			VENTO 90°		
	U _Z (m)		a _Z (m/s ²)	U _X (m)		a _X (m/s ²)
	PICO	RMS	PICO	PICO	RMS	PICO
1	0,160	0,042	0,148	0,013	0,004	0,013
2	0,169	0,046	0,152	0,013	0,005	0,019
3	0,182	0,045	0,121	0,013	0,004	0,016
4	0,163	0,044	0,156	0,013	0,005	0,015
5	0,153	0,041	0,166	0,013	0,005	0,016
6	0,167	0,044	0,139	0,013	0,005	0,014
7	0,176	0,048	0,154	0,013	0,005	0,019
8	0,165	0,040	0,128	0,013	0,005	0,019
9	0,189	0,048	0,182	0,014	0,005	0,012
10	0,164	0,046	0,154	0,013	0,005	0,017
11	0,164	0,047	0,155	0,013	0,005	0,016
12	0,160	0,043	0,133	0,013	0,005	0,016
13	0,182	0,044	0,148	0,014	0,005	0,016
14	0,172	0,045	0,114	0,014	0,005	0,020
15	0,161	0,040	0,140	0,013	0,005	0,017
16	0,172	0,049	0,141	0,013	0,004	0,015
17	0,170	0,042	0,131	0,014	0,005	0,015
18	0,162	0,041	0,149	0,013	0,005	0,015
19	0,171	0,046	0,162	0,013	0,005	0,018
20	0,176	0,045	0,151	0,014	0,005	0,021
21	0,162	0,042	0,122	0,013	0,005	0,015
22	0,168	0,047	0,150	0,014	0,005	0,017
23	0,163	0,038	0,125	0,013	0,005	0,015
24	0,194	0,041	0,119	0,014	0,005	0,017
25	0,171	0,052	0,152	0,014	0,005	0,018
26	0,168	0,044	0,148	0,014	0,005	0,017
27	0,164	0,046	0,142	0,013	0,005	0,015
28	0,163	0,038	0,118	0,013	0,004	0,015
29	0,170	0,045	0,139	0,012	0,005	0,015
30	0,164	0,045	0,164	0,013	0,005	0,017
Média	0,169	0,044	0,143	0,013	0,005	0,016
Desvio padrão	0,009	0,003	0,016	0,001	0,000	0,002
Valor característico (95%)	0,183	0,049	0,170	0,014	0,005	0,020

Cabe ressaltar o valor característico significativo encontrado para a aceleração de pico, igual a $0,17 \text{ m/s}^2$ ($a_p = 0,17 \text{ m/s}^2$: Vento 0° : Figura 8 e Tabela 3), superior ao limite normativo da NBR-6123 (ABNT, 1988), igual à $a_{lim}=0,10\text{m/s}^2$. Todavia, em relação à direção perpendicular (Vento 90° : Figura 8 e Tabela 3), o edifício investigado apresenta rigidez estrutural elevada e os valores das acelerações não são tão significativos. Neste caso, a aceleração de pico é igual a $0,02\text{m/s}^2$ ($a_p = 0,02 \text{ m/s}^2$: Vento 90° : Figura 8 e Tabela 3), valor inferior ao limite proposto pela NBR-6123 (ABNT, 1988), igual à $a_{lim}=0,10\text{m/s}^2$.

Os resultados característicos associados às duas direções de carregamento de vento aplicadas sobre a edificação são resumidos na Figura 10. O valor da aceleração longitudinal na direção Z (Vento 0° : Figura 8) é igual a $0,17\text{m/s}^2$, sendo cerca de 70% superior ao valor limite normativo recomendado pela NBR-6123 ($a_{lim}=0,10\text{m/s}^2$) (ABNT, 1988). Comparando-se o valor da aceleração de pico com o valor RMS na direção Z, o fator de pico é igual a 3,47. No que concerne à direção X (Vento 90° : Figura 8) a aceleração de pico característica é igual a $0,02\text{m/s}^2$, isto é, apenas 20% do valor limite ($a_{lim}=0,10\text{m/s}^2$) (ABNT, 1988). Em seguida, as Figuras 11 e 12 ilustram exemplos genéricos acerca do comportamento estrutural dinâmico não determinístico global, além das acelerações de pico do topo da edificação obtidas no domínio do tempo.

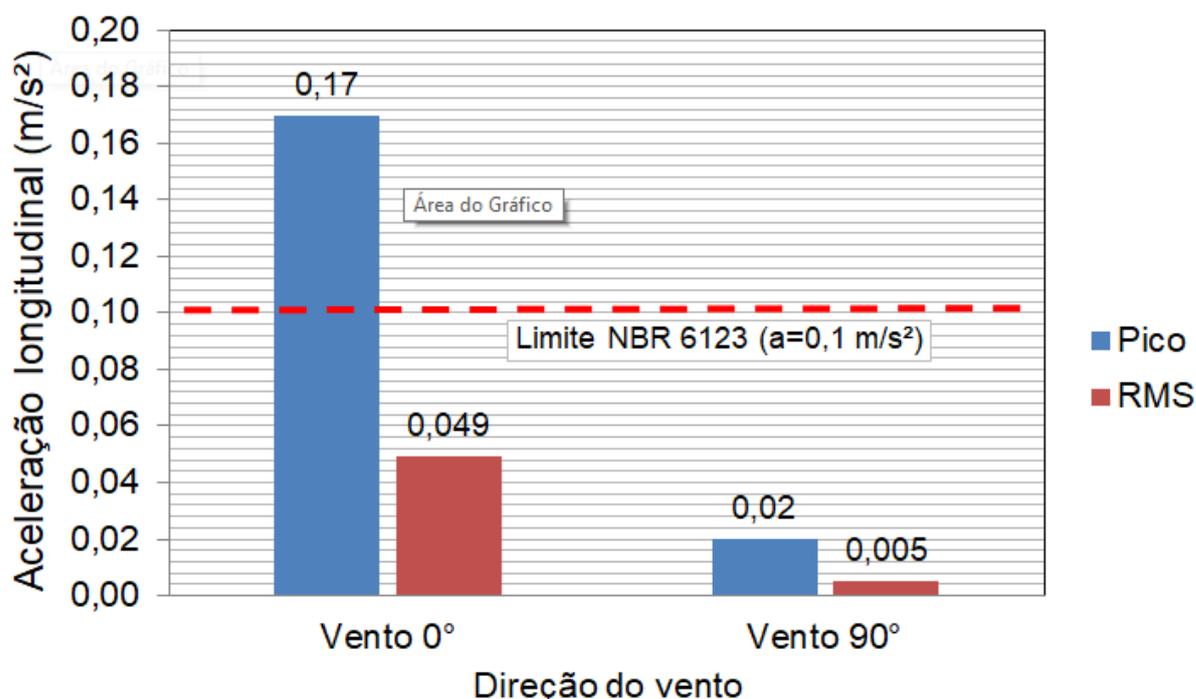


Figura 10. Acelerações máximas longitudinais (H = Modelo 140 m).

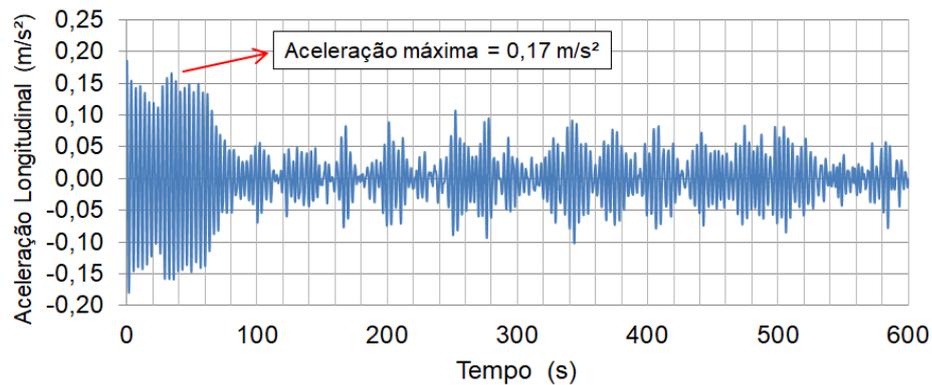


Figura 11. Acelerações longitudinais no domínio do tempo: Vento 0° (Série 05).

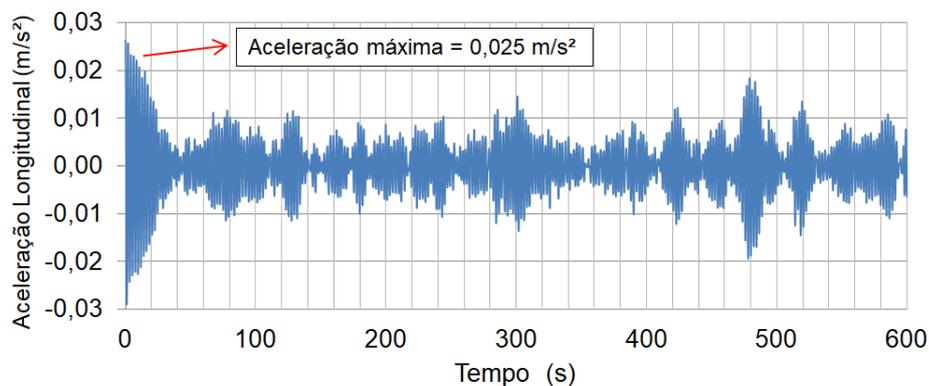


Figura 12. Acelerações longitudinais no domínio do tempo: Vento 90° (Série 08).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de pesquisa teve como objetivo principal o estudo do comportamento estrutural dinâmico e avaliação do conforto humano de edifícios altos. Para tal, as análises dinâmicas foram realizadas com base na seleção de um modelo estrutural inspirado no projeto de um edifício alto de concreto armado, com 40 pavimentos e altura total de 140 m, real, existente, construído na cidade de Balneário Camboriú/SC (BASTOS, 2020).

Inicialmente, as frequências naturais e os modos de vibração da edificação foram determinados com base na análise modal. Deste modo, foi possível calcular o valor da frequência fundamental do edifício analisado como sendo igual a 0,29 Hz ($f_{01} = 0,29$ Hz). Tal fato é bastante relevante, pois de acordo com a NBR-6123 (ABNT, 1988), edificações com valores de frequências naturais inferiores a 1 Hz podem apresentar problemas inerentes a vibrações excessivas.

Os valores das acelerações de pico (acelerações máximas) foram calculados no topo da estrutura ($H = 140$ m), em relação a duas direções distintas de atuação das cargas de vento, mediante análise dinâmica de vibração forçada, com base no emprego do Método da Representação espectral (MRE) para geração das séries não determinísticas de vento.

Ao longo das análises dinâmicas, o valor característico calculado para a aceleração de pico para atuação do Vento 0° (direção Z) foi igual a $0,17 \text{ m/s}^2$ ($a_p = 0,17 \text{ m/s}^2$), superior ao limite normativo da NBR-6123 (ABNT, 1988), igual a $a_{lim}=0,10\text{m/s}^2$, o que caracteriza o não atendimento ao limite de conforto humano do edifício, com referência a recomendação proposta pela norma. De outro modo, em relação à direção de atuação do Vento 90° (direção X), o edifício investigado apresenta rigidez estrutural elevada e os valores das acelerações não são significativos. Nesta situação, o valor da aceleração máxima é igual a $0,02\text{m/s}^2$ ($a_p = 0,02 \text{ m/s}^2$), inferior ao limite proposto pela NBR-6123 (ABNT, 1988), igual a $a_{lim}=0,10\text{m/s}^2$.

O tema de pesquisa referente à avaliação do conforto humano tem sido bastante estudado por diversos autores e existem muitas referências quanto aos limites e às metodologias de avaliação que devem ser adotados por engenheiros para diferentes tipos de estruturas. Assim sendo, deve-se chamar a atenção para o fato que edificações consideradas esbeltas e de grande altura possuem frequências consideradas muito baixas; e, portanto, quando o nível amortecimento destas estruturas é pequeno os projetistas estruturais devem ser alertados, pois tal fato pode vir a prejudicar substancialmente o conforto humano do edifício.

Com base nos resultados alcançados ao longo do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, os autores propõem a continuidade desta investigação, mediante um estudo mais aprofundado acerca da formulação matemática das cargas de vento não determinísticas, da metodologia de análise desenvolvida, além do tratamento estatístico da resposta dinâmica.

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

ALGABA. F. G. Avaliação de métodos teóricos para estimativa do comportamento de edifícios altos sob ação de vento turbulento. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2016.

ANSYS. Swanson Analysis Systems, Inc., P. O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065. Products ANSYS Academic Research, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR-6123: Forças devidas ao vento em edificações, Rio de Janeiro, 1988.

BARBOZA, R. R. Estudo do comportamento estrutural estático e dinâmico não linear e não determinístico de edifícios altos com base na consideração do efeito da interação solo-estrutura. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2016.

BARILE, A. Avaliação da resposta estrutural dinâmica de edifícios submetidos à ação do vento com base na comparação entre metodologias distintas para estimativa das acelerações. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2019.

BASTOS, L. de S. Avaliação do comportamento estrutural dinâmico não determinístico de edifícios altos considerando-se o efeito da ação transversal do vento e a modelagem da interação solo-estrutura. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2020.

BRASIL, REYOLANDO & SILVA, Marcelo. Introdução à dinâmica das estruturas para engenharia civil. 1ª edição. Editora Blucher, São Paulo, 2013.

CHÁVEZ. E. S. Análise estrutural de edifício alto submetido às pressões flutuantes induzidas pela ação do vento. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte/MG, Brasil, 2006.

CLOUGH, R.W., PENZIEN, J. Dynamics of Structures. McGraw-Hill, Inc., 634 páginas, 2003.

FRANCO, M., MEDEIROS, S. R. P. O método do “vento sintético” - Novas considerações. Revista TQS News. N^o 33, pp. 38-46, 2011.

MIRANDA, L. F. de. Avaliação da resposta estrutural dinâmica de edifícios em aço com base em monitoração experimental e modelagem numérica. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2019.

SANTOS. V. H. Comparação do método discreto da NBR-6123 e do método do vento sintético para edificações em concreto armado de múltiplos pavimentos. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba/PR, Brasil, 2018.