

EVALUATION OF THE HUMAN COMFORT OF A TALL BUILDING CONSIDERING THE WIND NON-DETERMINISTIC ACTIONS

Gabriel Bastos da Costa Santos da Silva

gabibastos96@hotmail.com

*Structural Engineering Department, State University of Rio de Janeiro, UERJ
São Francisco Xavier St., N° 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brazil*

Leonardo de Souza Bastos

lbastosjdf@hotmail.com

*Civil Engineering Postgraduate Programme, PGENIV/FEN/UERJ
São Francisco Xavier St., N° 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brazil*

José Guilherme Santos da Silva

jgss@uerj.br

*Structural Engineering Department, State University of Rio de Janeiro, UERJ
São Francisco Xavier St., N° 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brazil*

Abstract. Based on a favourable economic scenario combined with a significant technological advance in science materials and also construction processes, it must be emphasized that the Brazilian cities have shown substantial growth, regarding the construction of tall and slender buildings. This architectural trend has conducted the design of these buildings to structural solutions composed by very flexible structural systems, resulting in slender buildings with very low natural frequencies values and therefore more susceptible to excessive vibration problems. In this context, it is possible to observe the project and construction of tall buildings and a notorious example is the city of Balneário Camboriú/SC, which has several buildings exceeding 100 meters of height. Usually, in the verification and structural calculations of buildings, the loads due to the wind action are considered purely static. However, as the buildings become slender and taller, problems related to excessive vibrations tend to be present, since the wind actions have a dynamic nature. This way, the main objective of this research work is to investigate the static and dynamic structural behaviour of a slender 39-storey reinforced concrete building, with height of 140 meters and a floor plan with 29 meters wide and 9 meters deep, inspired by the real and existing building constructed at Balneário Camboriú/SC. The numerical modelling of the investigated building is carried out based on the use of the Finite Element Method (FEM) utilising the ANSYS computational program. The investigation considers all the usual loads used in building projects and also the effect of the wind non-deterministic actions, defined based on the spectral density of the dynamic excitation. The conclusions reached along this study deal with the critical evaluation of the non-deterministic dynamic structural response of the investigated building and the assessment of the human comfort.

Keywords: Buildings, Dynamic structural analysis, Human comfort assessment.

1 Introdução

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 [1].

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 [1].

Dentro deste tema de pesquisa, diversos 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 [1-4].

Em seu trabalho de pesquisa, Barile [2] desenvolveu estudos com base no emprego de métodos distintos para a avaliação do conforto humano de edifícios. Dentro deste contexto, 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, 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 [2].

Barboza [3], em sua tese de doutorado, 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.

Segundo Brasil & Silva [4], 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” [5].

Deste modo, este trabalho de pesquisa tem por objetivo a investigação da resposta estrutural dinâmica de um edifício alto de 40 andares, de concreto armado. A modelagem numérica do edifício em estudo é realizada com base no Método dos Elementos Finitos (MEF), via emprego do programa computacional ANSYS [6]. A análise considera, ainda, além das cargas usuais de projeto, o efeito da ação dinâmica não determinística das cargas de vento sobre o edifício, definida com base na densidade espectral da excitação. Tendo em mente a análise da resposta estrutural dinâmica do edifício, as conclusões obtidas apontam para o fato de que o edifício investigado é bastante esbelto, não atende aos requisitos básicos para conforto humano, e certamente vibrações excessivas podem vir a ocorrer.

2 Modelo Estrutural em Estudo

Assim sendo, para dar início ao trabalho de pesquisa foi selecionado um modelo estrutural correspondente a um edifício alto de 40 pavimentos, real, existente, construído na cidade de Balneário Camboriú/SC [1].

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.

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.

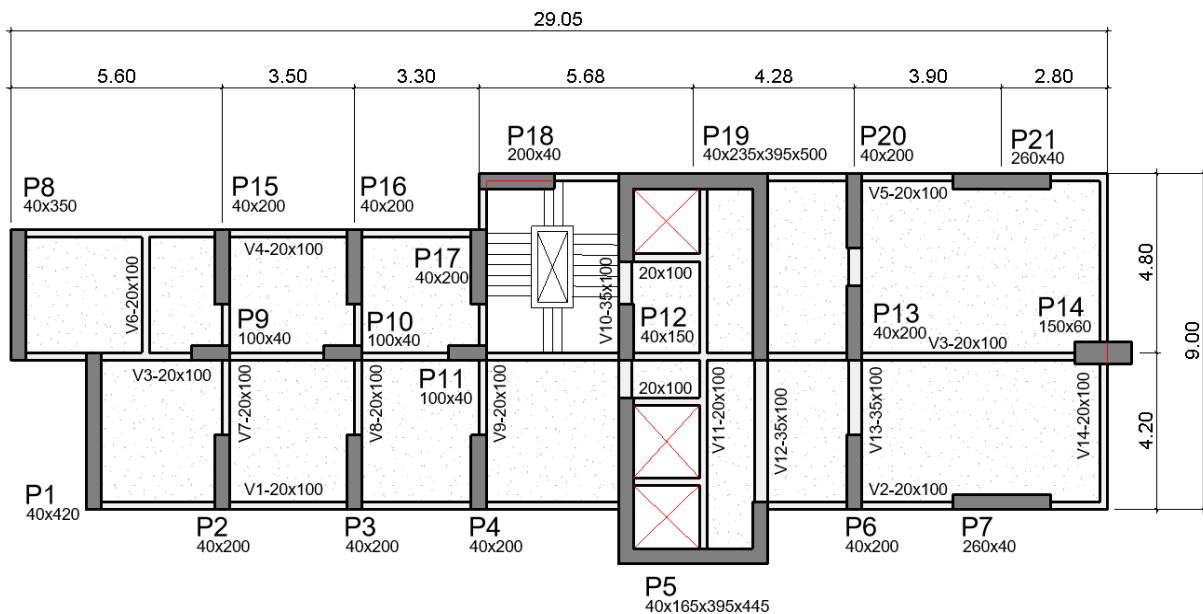


Figura 1. Projeto estrutural do pavimento tipo do edifício (H = 140 m).

3 Modelagem em Elementos Finitos

O modelo estrutural foi investigado utilizando o programa computacional ANSYS [6], 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 [6], 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.

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 [6], 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 [1].

O modelo numérico desenvolvido apresenta 160919 nós, 180000 elementos e 913626 graus de liberdade, tendo seus elementos constituídos por elementos finitos de casca SHELL63 [6] para simulação das lajes de concreto armado e por meio de elementos finitos de viga tridimensionais do tipo BEAM44 [6] 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.

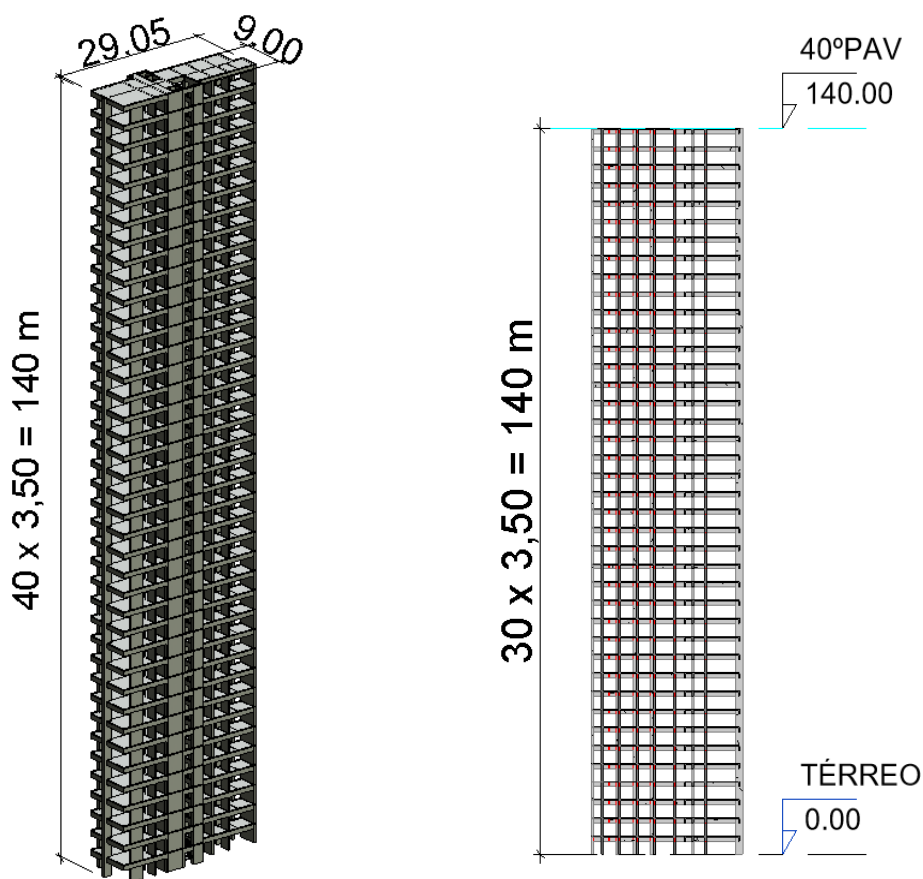
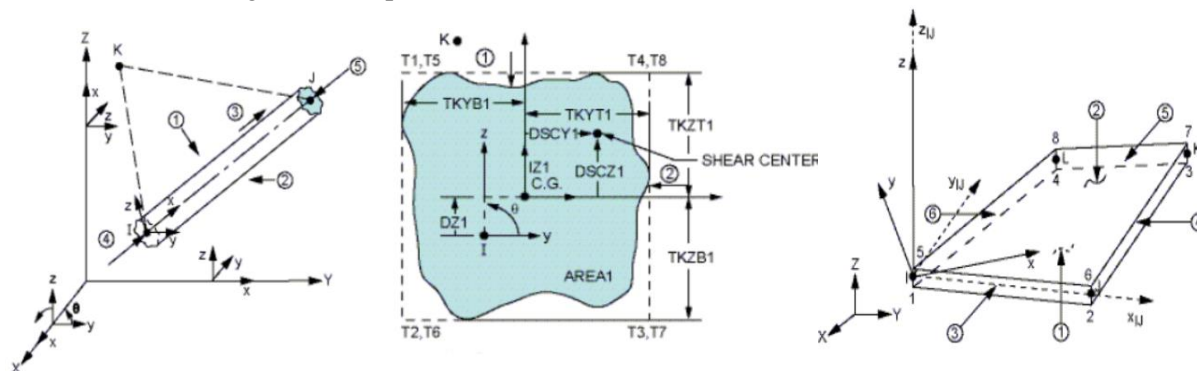


Figura 2. Perspectiva e corte da estrutura do edifício (H = 140 m).



a) Elemento finito tridimensional BEAM44

b) Elemento finito SHELL63

Figura 3. Elemento finito BEAM44 e SHELL63 (ANSYS, 2009).

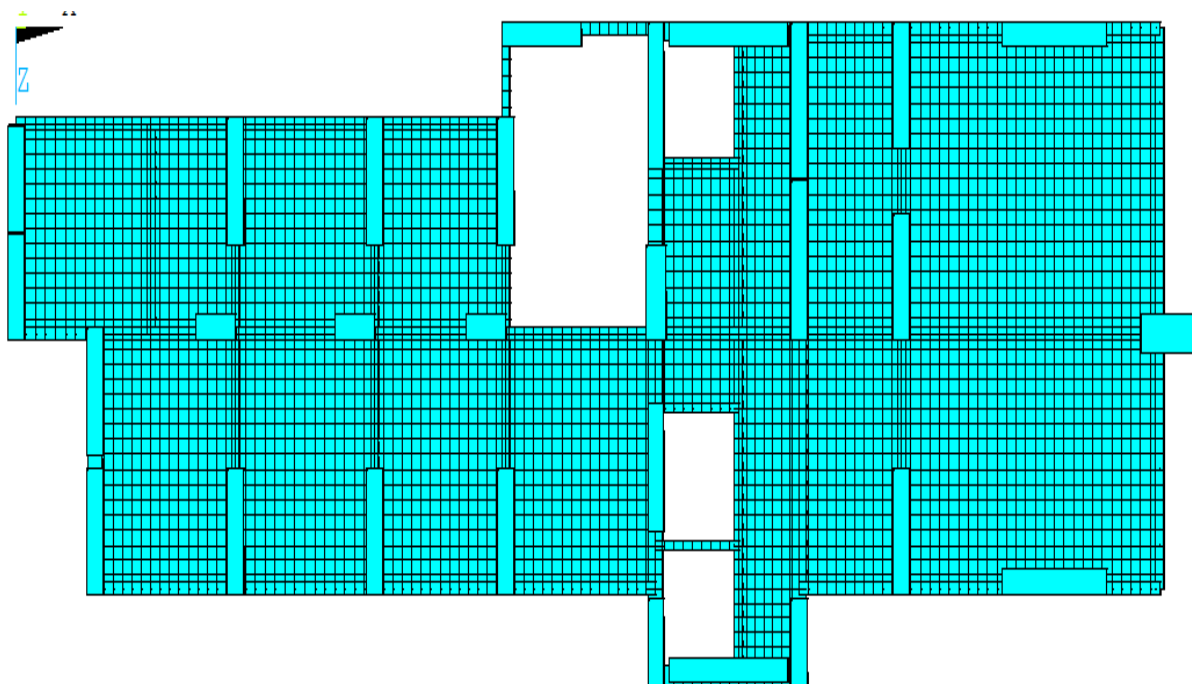


Figura 4. Pavimento tipo em elementos finitos (H = 140 m).

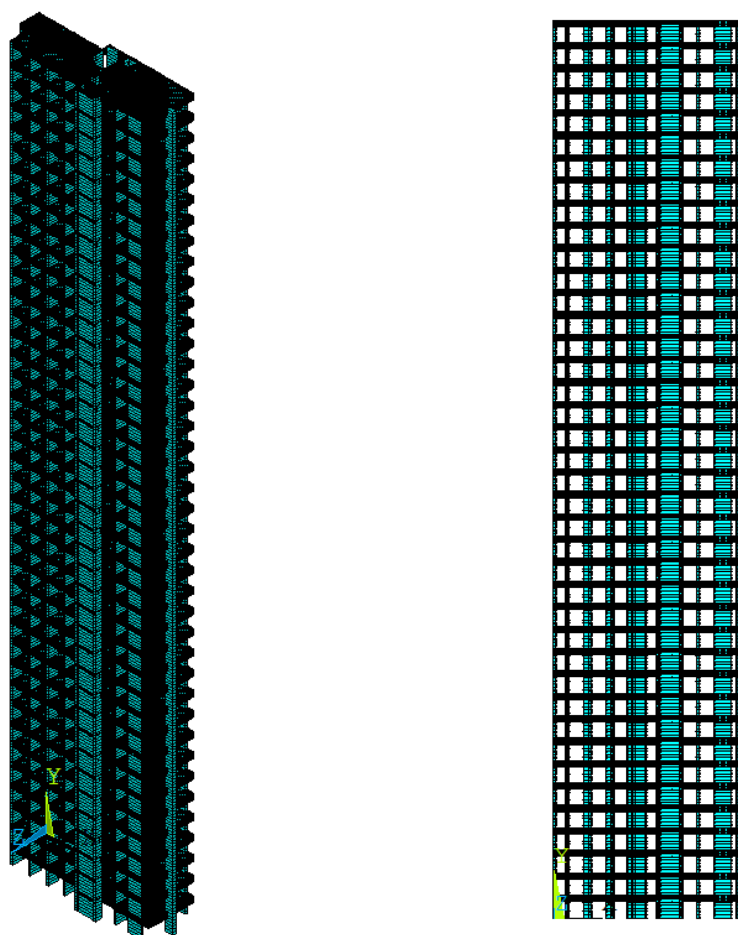


Figura 5. Perspectiva e corte do modelo em elementos finitos (H = 140m).

4 Análise Modal: 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 [6].

Os quatro primeiros modos de vibração da edificação são ilustrados na Figura 6. Verifica-se que o valor da frequência fundamental do edifício analisado é igual a 0,29 Hz ($f_{01} = 0,29$ Hz). Tal fato é relevante, pois de acordo com a NBR 6123 [7], 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.

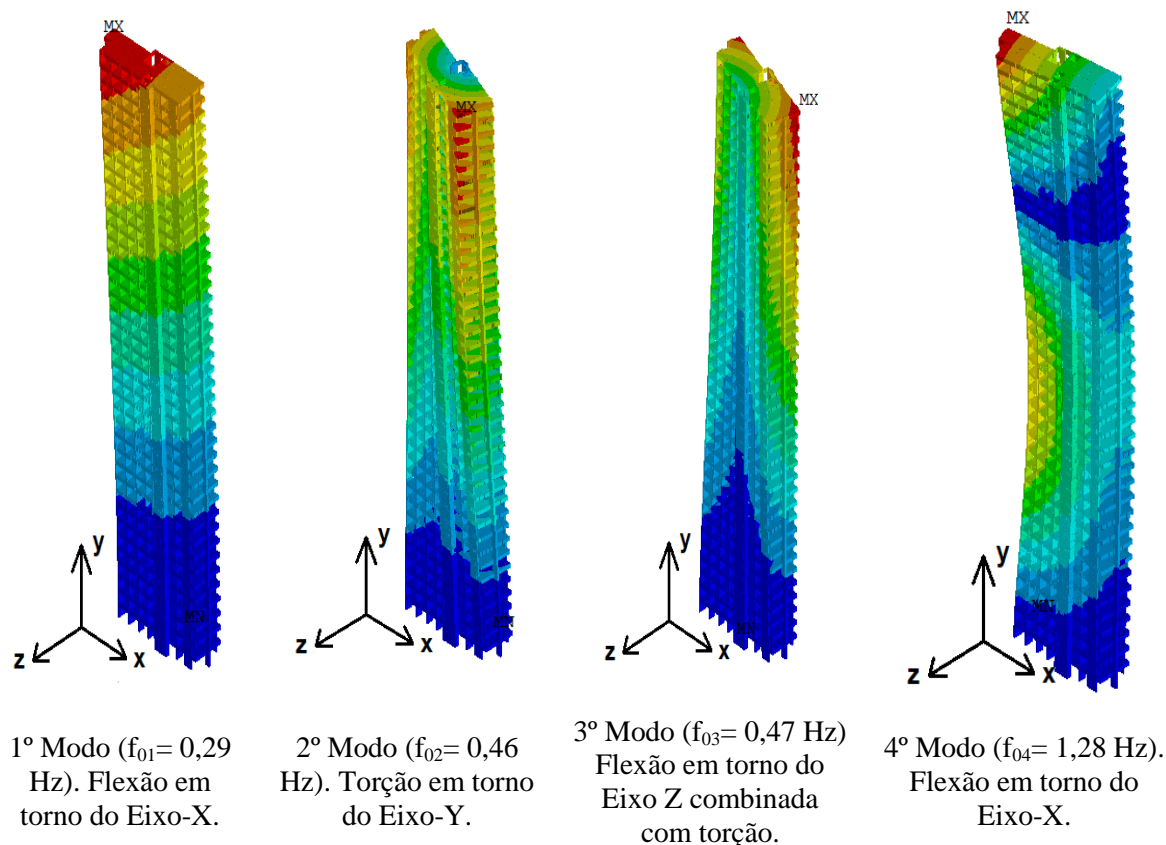


Figura 6. Modos de vibração do Modelo 140 m (1° ao 4° modo).

5 Modelagem do Amortecimento Estrutural

O amortecimento estrutural é 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 de vibração na ressonância e o tempo de persistência da vibração depois de cessada a excitação. Objetivando avaliar o amortecimento de uma estrutura, seria necessário realizar ensaios experimentais na edificação, o que exige elevados custos. Desta forma, o amortecimento estrutural é normalmente obtido pela matriz de amortecimento de Rayleigh [8], 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 [8].

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

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

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

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

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

$$\beta = \frac{2(\zeta_2\omega_{02} - \zeta_1\omega_{01})}{\omega_{02}^2 - \omega_{01}^2} \quad (4)$$

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. No presente estudo adotou-se uma taxa de amortecimento estrutural de 2,0% [1,2] 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 140 m	f_{01} (Hz)	f_{04} (Hz)	α (Massa)	β (Rigidez)
	0,291	1,277	0,0591160	0,0041938

6 Modelo Não Determinístico do Vento: Método da Representação Espectral

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 ao desconforto dos usuários [1,2]. 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 [4].

Neste trabalho será utilizado o Método da Representação Espectral (MRE) [1,2], 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 [4].

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 [1,2]. 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 em um número finito de funções harmônicas proporcional à frequência de ressonância da estrutura com ângulos de fase determinados aleatoriamente [1,2].

Com base na metodologia de análise desenvolvida [1,2], 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.

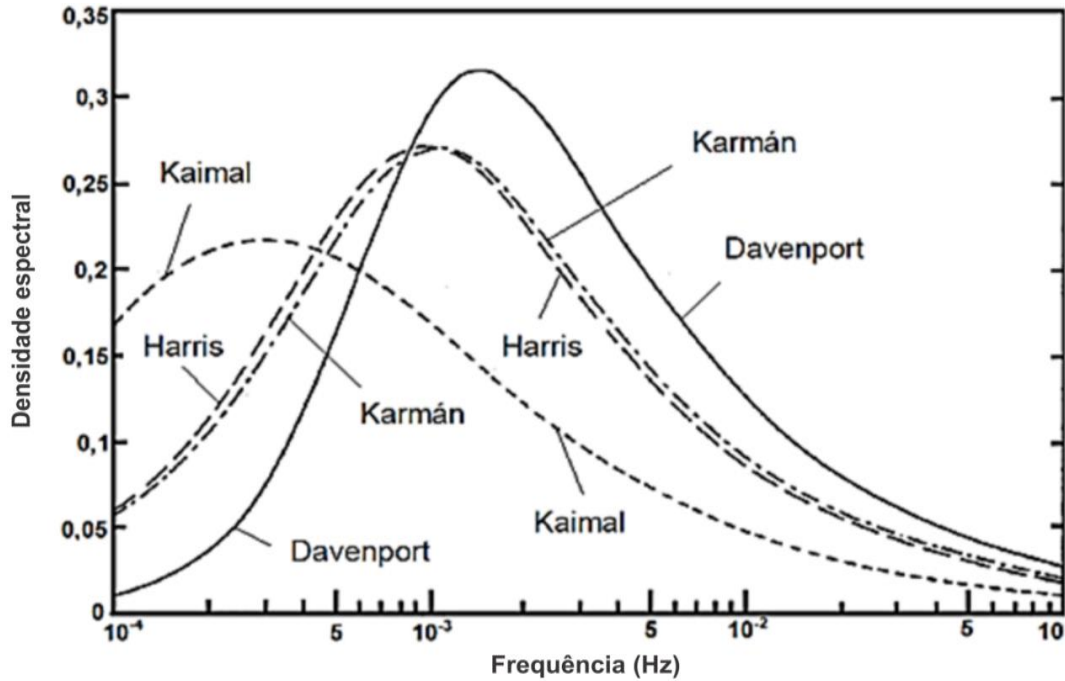


Figura 7. Espectro de potência do vento

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

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

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

Ressalta-se que 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. 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 dada pela Eq. (9).

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

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

7 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, a velocidade básica do vento de acordo com a NBR 6123 [7] 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	
Coeficiente de Arrasto 0°	1,58	
Coeficiente 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

Com base nos parâmetros descritos na Tabela 2 e utilizando-se a metodologia de análise desenvolvida para geração das cargas dinâmicas não determinísticas devidas ao vento, utilizando-se a representação espectral (MRE) [1,2], foram geradas 30 séries de carregamento dinâmico aplicado de acordo com a direção Z (Vento 0°) e, em seguida, sobre a direção X (Vento 90°). As cargas dinâmicas foram aplicadas separadamente em cada fachada do modelo estrutural investigado. As direções de aplicação das cargas de vento são ilustradas na Figura 8.

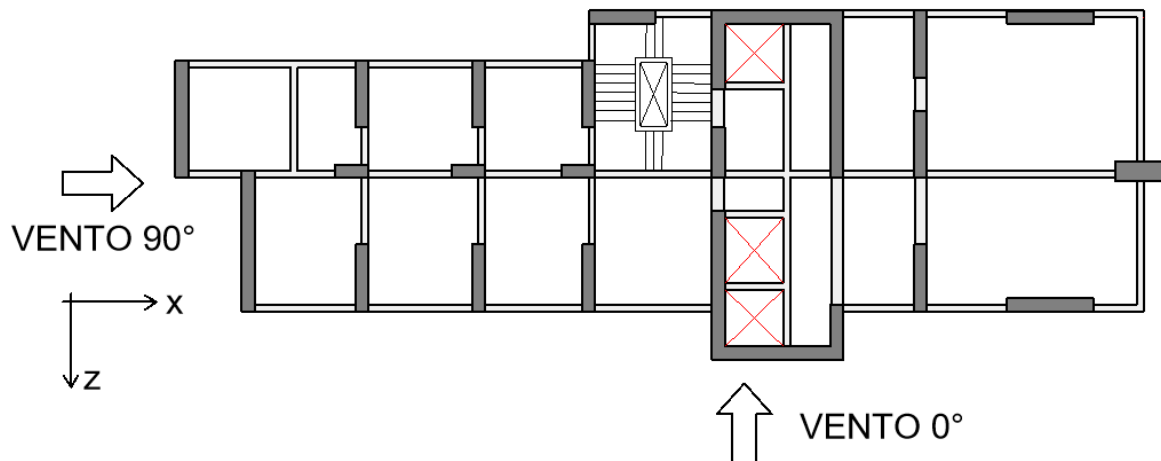


Figura 8. Direções de atuação das cargas dinâmicas de vento.

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

Os resultados associados aos valores dos deslocamentos translacionais horizontais (U_x e U_z) e 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.

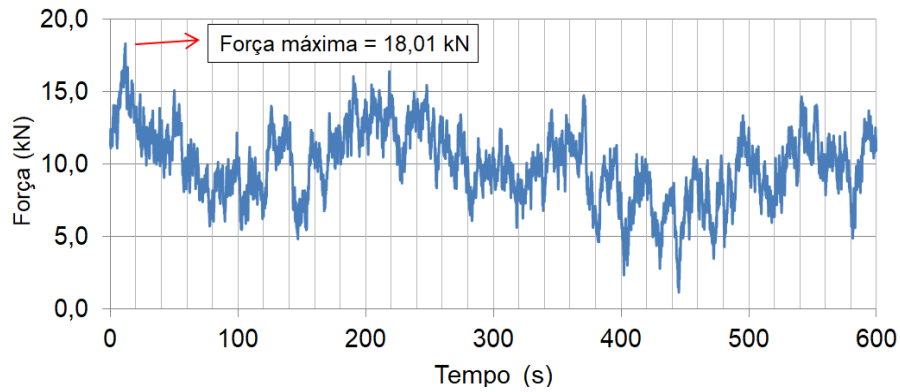


Figura 9. Força no domínio do tempo aplicado ao P5 z=140m Série 01.

Tabela 3. Acelerações e deslocamentos longitudinais: Vento 0° e Vento 90°.

Séries de Carregamento (Ação do Vento)	VENTO 0°			VENTO 90°		
	U _z (m)	a _z (m/s ²)		U _z (m)	a _z (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 [7], 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 [7], 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 ($a_{lim}=0,10\text{m/s}^2$) [7]. Comparando-se o valor da aceleração de pico com 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 ($a_{lim}=0,10\text{m/s}^2$) [7]. Em seguida, as Figuras 11 e 12 ilustram exemplos genéricos acerca do comportamento estrutural dinâmico global a aceleração do topo da edificação, no domínio do tempo.

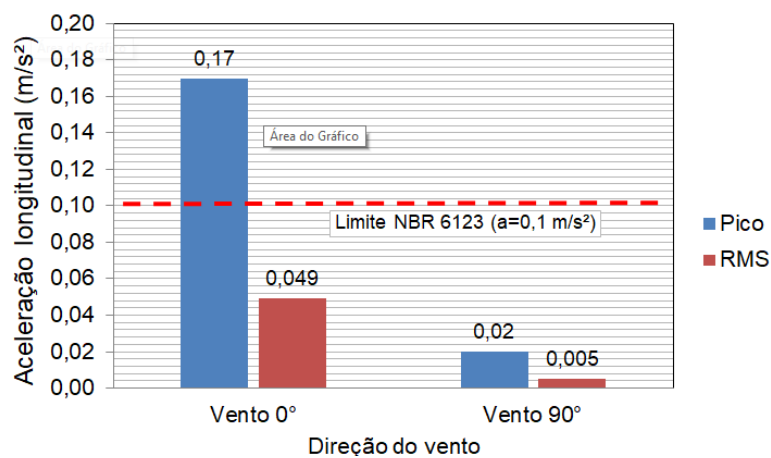


Figura 10. Acelerações longitudinais (H = Modelo 140 m).

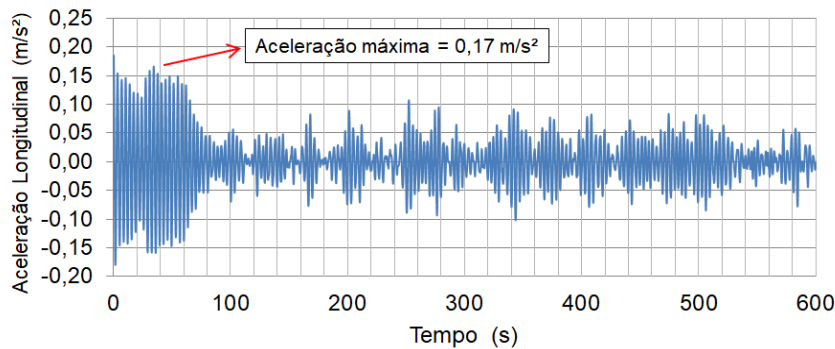


Figura 11. Acelerações longitudinais no domínio do tempo: Vento 0° - Série 05.

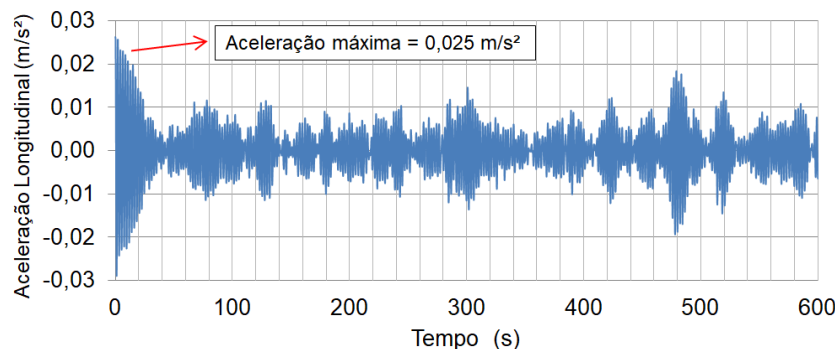


Figura 12. Acelerações longitudinais no domínio do tempo: Vento 90° - Série 08.

8 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 [1].

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 [7], edificações com valores de frequências naturais inferiores a 1 Hz podem apresentar problemas inerentes a vibrações excessivas.

Em seguida, 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 m/s² ($a_p = 0,17$ m/s²), superior ao limite normativo da NBR 6123 [7], igual à $a_{lim}=0,10$ m/s², o que caracteriza o não atendimento ao limite de conforto humano do edifício investigado, com referência a recomendação proposta pela referida norma de projeto [7]. 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 tão significativos. Nesta situação, o valor da aceleração máxima (aceleração de pico) é igual a 0,02m/s² ($a_p = 0,02$ m/s²), valor inferior ao limite proposto pela NBR 6123 [7], igual à $a_{lim}=0,10$ m/s².

O tema de pesquisa referente à avaliação do conforto humano tem sido bastante estudado por diversos autores em todo o mundo e existem muitas referências quanto aos limites e às metodologias de avaliação que devem ser adotados por engenheiros para diferentes tipos de estruturas. Portanto, 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 dos usuários da edificação.

Diante dos resultados alcançados com base no desenvolvimento desta investigação, os autores propõem à continuidade da pesquisa uma investigação mais aprofundada acerca da regularidade estatística (tratamento estatístico da resposta dinâmica), a começar pelo aumento do número de carregamentos dinâmicos não determinísticos aplicados sobre as edificações, de forma a permitir um melhor entendimento da metodologia de análise desenvolvida neste trabalho.

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

- [1] Bastos, L. de S. *Estudo do comportamento dinâmico não determinístico e avaliação do conforto humano de edifícios altos*. Tese de Doutorado (Em desenvolvimento). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGE CIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2019.
- [2] 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, PGE CIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2019.

- [3] 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.
- [4] Brasil, Reyolando & Silva, Marcelo. *Introdução à dinâmica das estruturas para engenharia civil*. 1ª edição. Editora Blucher, São Paulo, 2013.
- [5] Franco, M., Medeiros, S. R. P. O método do “vento sintético” - Novas considerações. *Revista TQS News*. N^o 33, pp. 38-46, 2011.
- [6] ANSYS Swanson Analysis Systems Inc. Theory Reference (R.12.1), 2010.
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações, Rio de Janeiro, 1988.
- [8] Clough, R.W., Penzien, J. *Dynamics of Structures*. McGraw-Hill, Inc., 634 páginas, 2003.