



ANÁLISE DINÂMICA NÃO DETERMINÍSTICA DE EDIFÍCIOS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDOS A CARGAS DE VENTO

Nondeterministic Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Buildings when Subjected to Wind Loads

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

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

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

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

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

Resumo: Este trabalho de pesquisa apresenta como objetivo principal a investigação do comportamento estrutural estático e dinâmico de um edifício alto de trinta andares, de concreto armado, no qual o sistema de lajes de piso apresenta grandes vãos e apoia-se diretamente sobre os pilares. O efeito da interação solo-estrutura é considerado ao longo do estudo com base na modelagem numérica dos conjuntos de blocos e estacas de fundação. A modelagem numérica do edifício em estudo é realizada com base no emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF), via utilização do programa computacional ANSYS. A investigação considera todas as cargas usuais utilizadas no projeto de edifícios; e, ainda, o efeito da ação dinâmica não determinística das cargas de vento, definida com base na densidade espectral da excitação. Tendo em mente a análise da resposta estrutural estática e dinâmica do edifício investigado, as conclusões alcançadas apontam para diferenças relevantes sobre o projeto, em relação à análise da resposta dinâmica e avaliação do conforto humano do sistema estrutural, quando o efeito da interação solo-estrutura é considerado no estudo.

Palavras chaves: Edifícios altos; Dinâmica estrutural; Interação solo-estrutura.

Abstract: This research work aims to investigate the static and dynamic structural behaviour of a thirty-storey reinforced concrete building, based on a structural system which the concrete floors presents large spans and is supported only by the columns. The soil-structure interaction effect was considered in this study based on the modelling of the foundation system (blocks and piles). The building proposed computational model, adopted the usual mesh refinement techniques present in Finite Element Method (FEM) simulations implemented in the ANSYS computational program. The investigation takes to account all the usual loads related to the current design of buildings, and also the nondeterministic dynamic wind actions, based on the use of a proper power spectral density function. Having in mind the static and dynamic structural analysis of the investigated building, the conclusions have shown relevant differences on the design, when the dynamic response and the human comfort assessment of the structural system was investigated and the soil-structure interaction effect was considered along the study.

Keywords: Tall buildings; Structural dynamics; Soil-structure interaction.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas foi notável a verticalização urbana no Brasil, onde, inclusive em médias cidades, foi possível observar a construção de edifícios com considerável altura. Paralelamente a esse processo de verticalização, o avanço tecnológico dos materiais, principalmente do concreto e do aço, permitiu uma significativa diminuição das seções dos elementos estruturais.

Dentro deste processo, uma técnica construtiva muito utilizada no projeto de edifícios diz respeito aos sistemas estruturais compostos por lajes com grandes vãos, sem vigas, e apoiadas diretamente sobre os pilares. Esta técnica, aplicada em projetos de edifícios altos, pode vir a ocasionar alguns problemas, tais como a diminuição da rigidez estrutural global da edificação e, também, a possibilidade de ocorrência de vibrações excessivas.

Igualmente, importante aspecto se diz respeito à interação solo-estrutura. A prática corrente dos escritórios de cálculo estrutural normalmente desconsidera essa influência na obtenção dos esforços dos elementos estruturais e das cargas transmitidas ao terreno através das fundações, sendo o cálculo baseado na hipótese de apoios indeslocáveis.

Dessa consideração decorre que os recalques são estimados isoladamente para cada elemento de fundação, a partir da hipótese de que esse elemento possa se deslocar de forma independente dos demais, ou seja, essa metodologia estabelece uma independência fictícia entre o solo de fundação e a estrutura, desprezando os efeitos provocados na estrutura, em razão da deformação do solo (Borges, 2009).

Por fim, nas verificações e cálculos estruturais de edifícios, usualmente, as cargas devido à ação do vento são consideradas puramente estáticas, porém, conforme os edifícios se tornam mais arrojados, esbeltos e altos, podem surgir problemas relacionados a vibrações excessivas, pois a ação do vento tem como natureza um caráter dinâmico, sendo importante, nestes casos, realizar verificações mais sofisticadas e precisas, com base nas características dinâmicas da estrutura, além de ser importante um adequado tratamento probabilístico dos resultados obtidos (Bastos, 2018).

Deste modo, este trabalho de pesquisa tem por objetivo principal a investigação da resposta estrutural dinâmica de um edifício alto de 30 andares, de concreto armado, no qual o sistema de lajes apresenta grandes vãos e apoia-se diretamente sobre os pilares. O efeito da interação solo-estrutura é considerado ao longo do estudo com base na modelagem numérica efetiva dos conjuntos de blocos e estacas de fundação. A modelagem numérica do edifício em estudo é realizada com base no método dos elementos finitos (MEF), via emprego do programa computacional ANSYS (2009).

As análises consideram além das cargas usuais de projeto, o efeito da ação dinâmica não determinística do vento sobre o edifício, definida com base na densidade espectral da excitação. Tendo em mente a análise da resposta estática e dinâmica do edifício investigado, as conclusões alcançadas apontam para diferenças relevantes sobre o projeto, em relação à análise da resposta dinâmica e avaliação do conforto humano do sistema estrutural, quando o efeito da interação solo-estrutura é considerado no estudo.

2 MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO

O edifício investigado nesta pesquisa possui dimensões em planta de 21,50 m por 17,30 m, apresenta 30 pavimentos, com pé-direito de 3,0 m, altura total 90 m, conforme ilustrado na Fig. 1. A estrutura, toda em concreto armado, é constituída por lajes maciças com espessura igual a 18 cm, vigas com seções 30x60 cm e pilares com seções 30x80 cm em sua maioria. O modelo não apresenta vigas dividindo os vãos internos das lajes, mas mesmo assim, as vigas de periferia conseguem, juntamente com os pilares, formar alguns pórticos que ajudam no contraventamento da estrutura (Bastos, 2015).

O concreto estrutural utilizado possui resistência à compressão (f_{ck}) igual 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. Cargas permanentes (1,0 kN/m²) e acidentais (1,5 kN/m²) usuais de projeto foram adicionadas às lajes de todos os pavimentos. O peso total de alvenaria foi distribuído uniformemente sobre as lajes (2,8 kN/m²).

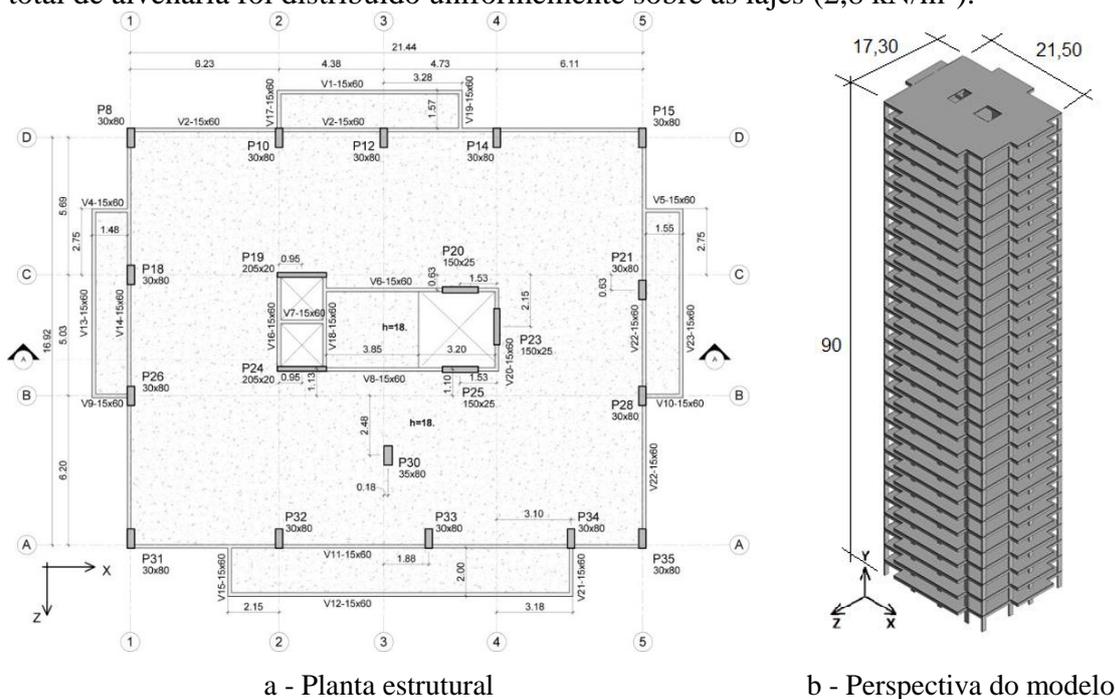


Figura 1. Modelo Estrutural Investigado

Em relação à fundação do modelo estrutural duas situações distintas foram estudadas. A primeira, considerando o modelo apoiado sobre apoios rígidos (hipótese dos apoios indeslocáveis), sem considerar a interação solo-estrutura. A segunda, considerando o modelo apoiado em blocos sobre estacas, em uma situação de solo com perfil geotécnico previamente conhecido (Fig. 2), examinando neste caso a interação solo-estrutura.

Objetivando-se determinar as dimensões dos blocos e das estacas é realizada previamente uma análise estática onde são obtidas as reações de apoio dos pilares sobre a fundação e, de posse destes valores, é possível determinar a geometria dos blocos e das estacas, conforme ilustrado nas Figs. 2 e 3.

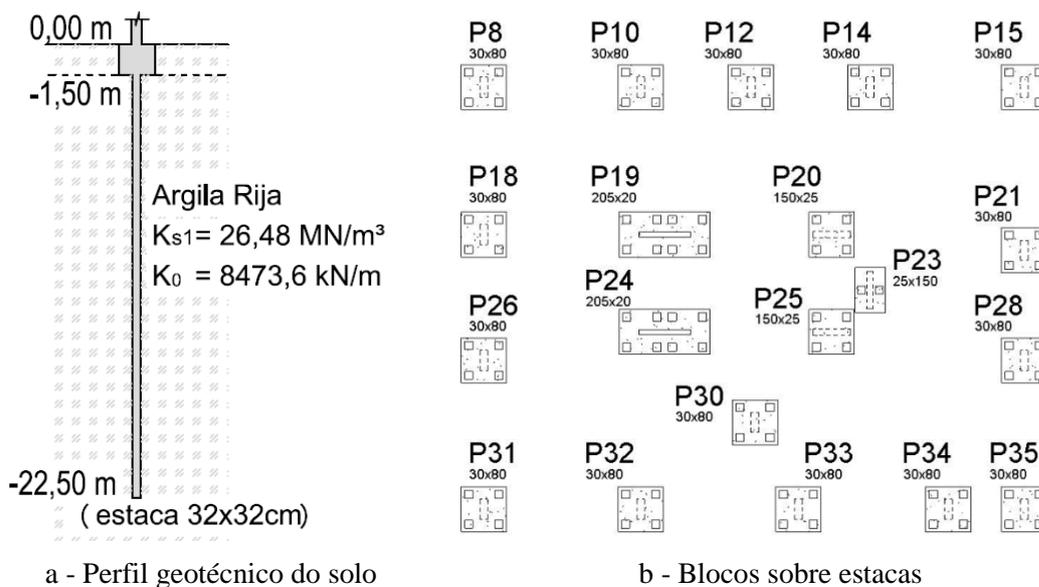


Figura 2. Perfil geotécnico e Fundação

No que tange ao estudo de colunas semienterradas, a metodologia usual para a formulação do problema da interação solo-estrutura recorre ao conceito do coeficiente de reação originalmente proposto por Winkler (1867). Segundo Terzaghi (1955) coeficiente de reação horizontal (k_h) para estacas em solos coesivos (argilas), independe da profundidade da estaca.

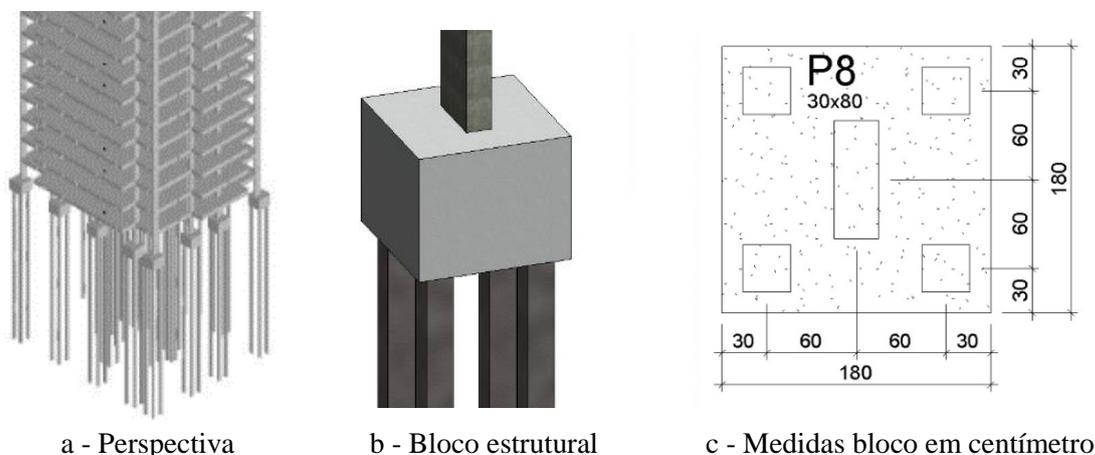


Figura 3. Perfil geotécnico e Fundação

3 MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

O modelo estrutural foi investigado utilizando o programa computacional ANSYS (2009), através do método dos elementos finitos (MEF). 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, 2009), 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. A grande vantagem deste elemento é a 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. Essa excentricidade é considerada na modelagem, pois afeta diretamente os valores das frequências naturais da estrutura.

As lajes em concreto são simuladas por meio de elementos finitos de casca. Para tal simulação foi usado o elemento de casca finito SHELL63 (ANSYS, 2009), que é definido por quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó, sendo três de translação e três de rotação nas direções X, Y e Z.

O presente modelo numérico apresenta um grau de refinamento apropriado, de forma a permitir uma boa representação do comportamento dinâmico da estrutura investigada, o mesmo, sem considerar a modelagem dos blocos sobre estacas, apresenta 232552 nós, 245880 elementos e 1395246 graus de liberdade. A Tabela 1 apresenta as características dos modelos investigados neste trabalho. (Bastos, 2015)

As condições de contorno consideradas na opção de apoio rígidos, sem a consideração da interação solo-estrutura, restringem os nós da base, de modo que os mesmos estejam impedidos de se deslocarem translacionalmente, na horizontal e na vertical.

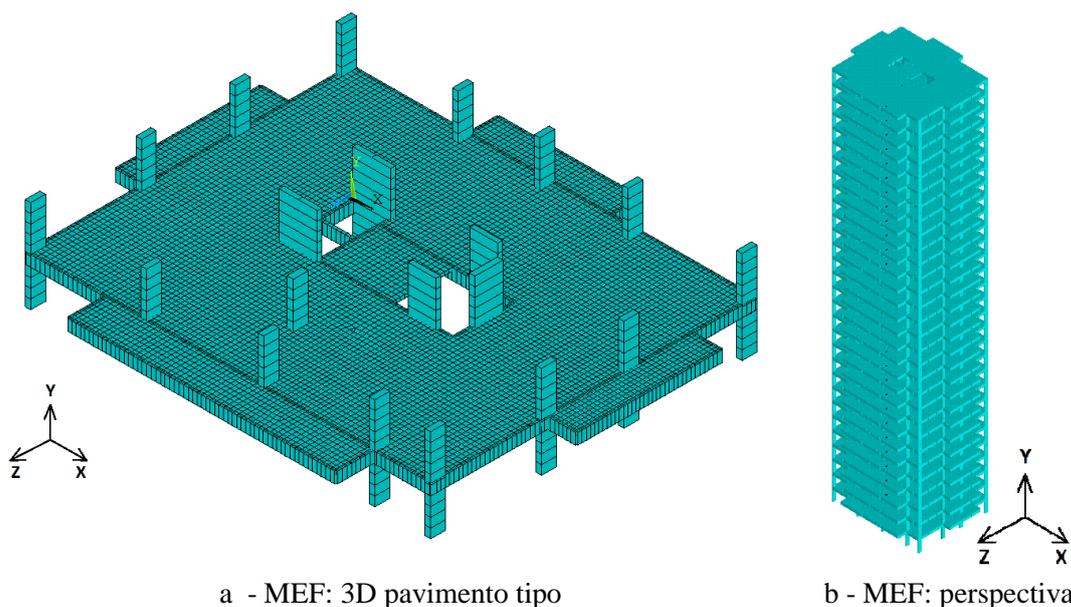
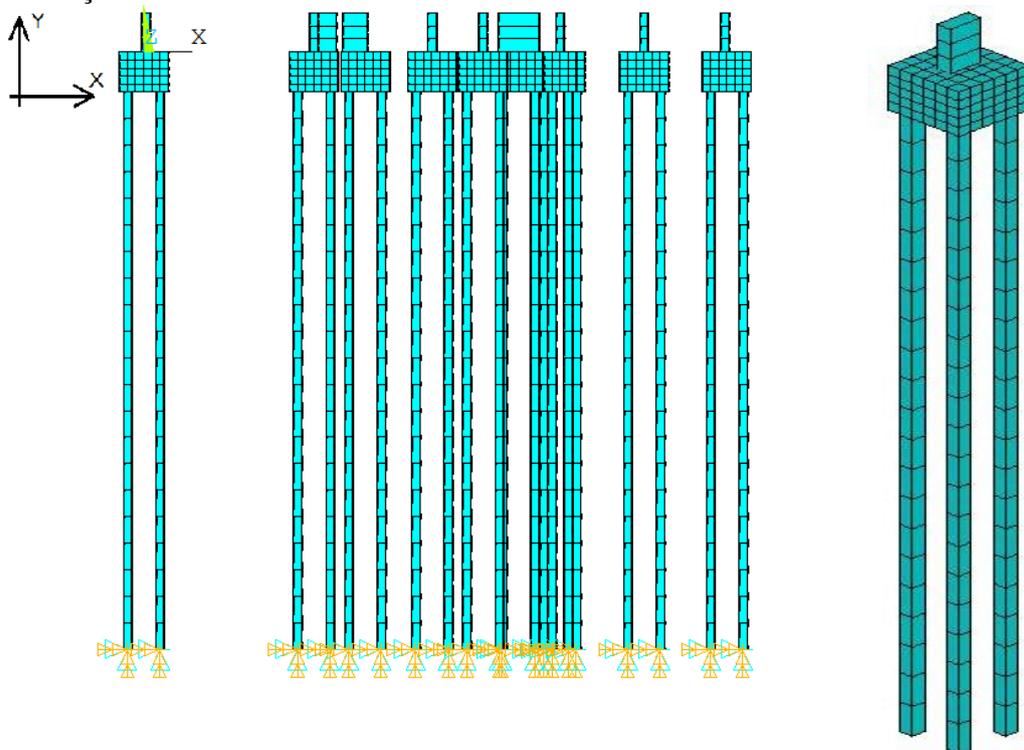


Figura 4. Modelo em elementos finitos da estrutura investigada

Em relação à modelagem da fundação, os blocos foram simulados no ANSYS (2009) utilizando o modelo sólido SOLID45, conforme Fig. 5. Este, possui 8 nós com três graus de liberdade por nó, permitindo apenas as translações em relação aos três eixos, x, y e z.

As estacas, por sua vez, são modeladas através do elemento BEAM44, o mesmo utilizado para as vigas e pilares. Para simular a resistência horizontal do solo imposta nas estacas (efeito de molas), o elemento BEAM44 possui, em sua formulação, a propriedade de rigidez de fundação, na qual é informada a rigidez horizontal k_0 , calculado para a estaca e solo em questão, considerando desta forma o efeito da interação do solo-estrutura.



a - MEF: Fundação estrutural

b - MEF: Perspectiva

Figura 5. Vistas da fundação em elementos finitos (MEF)

Tabela 1: Número de nós, elementos e graus de liberdade do MEF da edificação

MEF (Características)	Apoios rígidos	Blocos sobre estacas	FEM (Modificações)	
Nós	232552	240812	8260	+ 3,55 %
Elementos	245880	251588	5708	+ 2,32 %
Graus de Liberdade	1395246	1425042	29796	+ 2,13 %

4 FREQUENCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO

As frequências naturais (autovalores) e os modos de vibração (autovetores) da estrutura investigada no presente trabalho de pesquisa foram obtidos com a ajuda de métodos numéricos de extração (análise modal), a partir de uma análise de vibração livre empregando-se o programa computacional ANSYS (2009). Os quatro primeiros modos de vibração da edificação são mostrados nas Figs. 6 e 7.

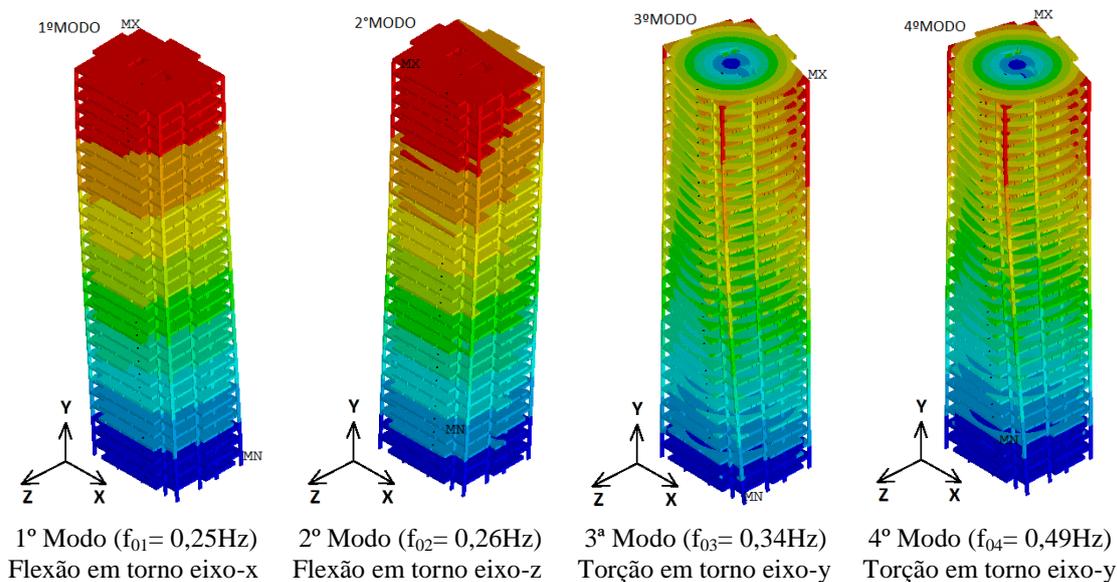


Figura 6. Modos de vibração do modelo estrutural sobre apoios rígidos

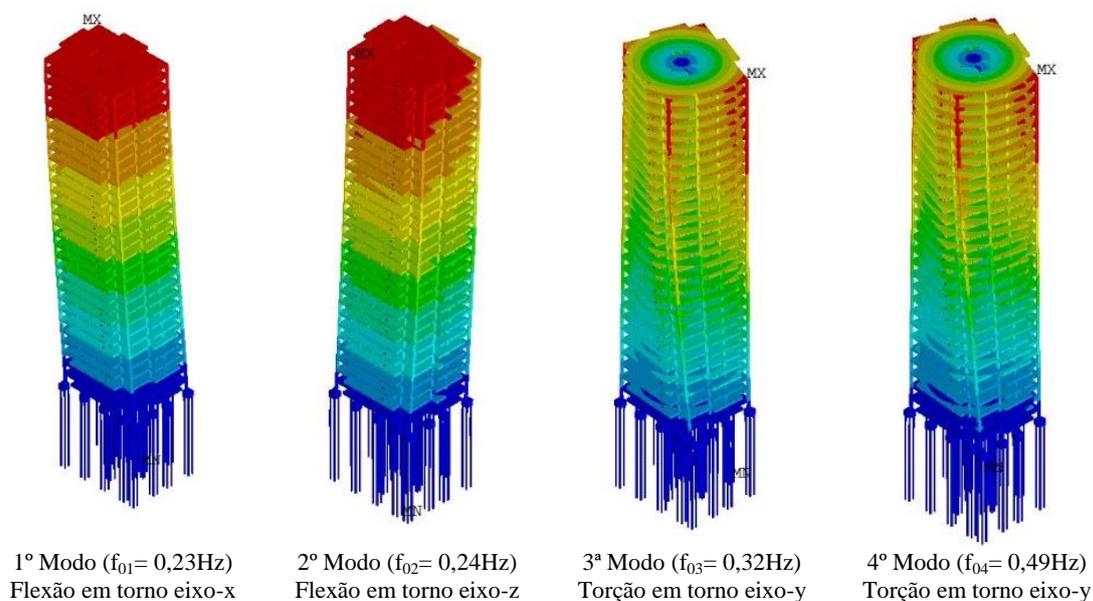


Figura 7. Modos de vibração do modelo estrutural com fundação blocos sobre estacas

O efeito da interação solo-estrutura não promoveu, nos modelos investigados particularmente neste estudo, grandes alterações qualitativas nos modos de vibração dos edifícios, porém, alterou significativamente, quantitativamente, os valores das frequências naturais. É possível verificar que a perda de rigidez das estruturas quando se considera a interação solo-estrutura, gera também uma proporcional diminuição das frequências naturais.

5 MODELAGEM NÃO DETERMINÍSTICA DO VENTO

As propriedades do vento são instáveis, apresentam variação aleatória, e sua consideração de forma determinística torna-se inadequada. Todavia, pode-se levantar a hipótese de que para 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 (MORAIS, 2014; OBATA, 2009). Deste modo, pressupõe-se a divisão do carregamento de vento em uma parcela flutuante e outra parcela média. A porção flutuante do vento é decomposta num número finito de funções harmônicas, com ângulos de fase determinados aleatoriamente. A amplitude de cada harmônico é obtida com base no emprego de uma função do espectro de potência do vento. De acordo com os espectros de potência existentes na literatura técnica, adota-se neste trabalho o espectro de Kaimal (Fig. 1) devido à consideração da altura da edificação.

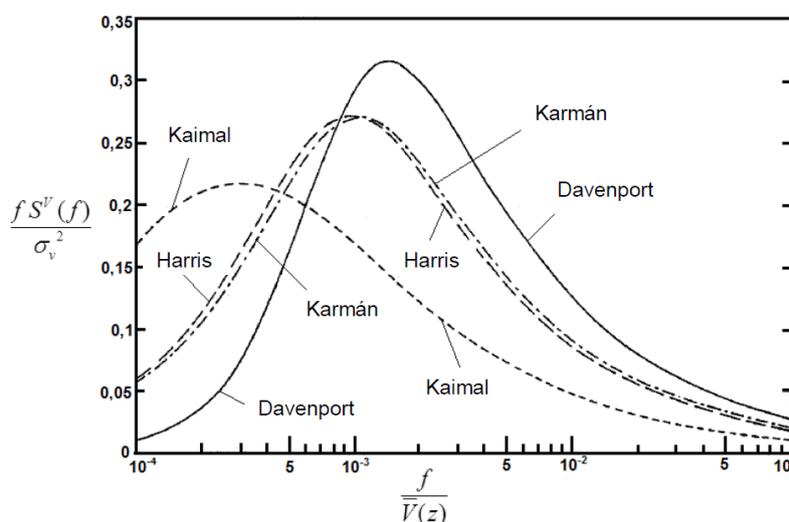


Figura 8. Espectros de potência do vento.

O espectro potência de Kaimal, apresentado na Fig.8, pode ser determinado pelas Equações (1) e (2), sendo (f) a frequência em Hz, ($S^V(f,z)$) a densidade espectral da componente longitudinal da turbulência na frequência (f), (x) a frequência adimensional e (Vz) a velocidade média na cota (z). A velocidade de fricção (u^*), dada em m/s e determinada pela Equação (3), com (k) sendo a constante de Karmán.

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

$$x(f, z) = \frac{fz}{V_s} \quad (2)$$

$$u_* = \frac{k\bar{V}_z}{\ln(z/z_0)} \quad (3)$$

A parcela flutuante da velocidade é simulada com base em um processo aleatório estacionário com média zero, obtida a partir da sobreposição de ondas harmônicas, Equação (4), onde (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 $[0-2\pi]$. Para a composição das séries randômicas são utilizados 81 harmônicos em faixa de frequência de 0,01-4,01Hz, de acordo com as frequências naturais do edifício.

$$v(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2S^V(f_i)\Delta f} \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (4)$$

Os resultados são obtidos considerando o vento atuando na estrutura durante um intervalo total de 10 minutos (600 segundos). Na Fig. 9 é apresentado a variação da força do vento em dois pontos da estrutura com cotas diferentes, sendo possível evidenciar o caráter aleatório da ação do vento.

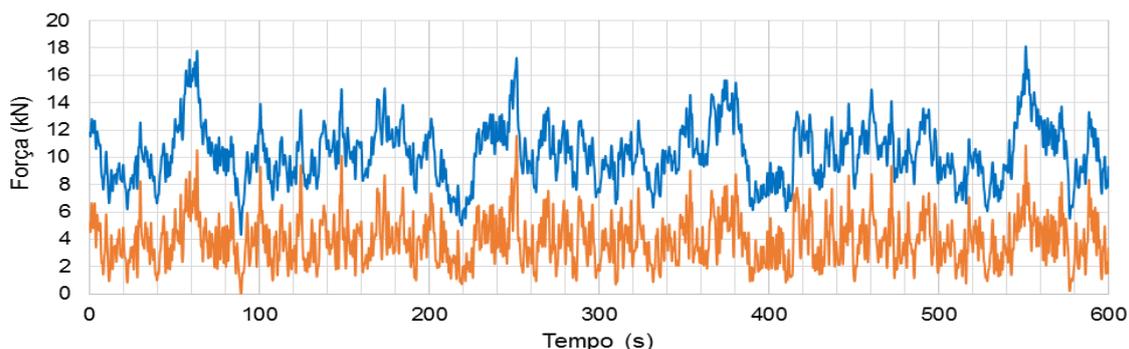


Figura 9. Força no domínio do tempo (série 01)

6 RESPOSTA ESTRUTURAL DINÂMICA DO EDIFÍCIO

Com base na utilização do programa de elementos finitos ANSYS (2010), foram realizadas análises dinâmicas de vibração forçada sobre o modelo estrutural investigado. Além das cargas verticais usuais de projeto, a ação do vento (não determinístico) foi aplicada sobre a maior fachada da edificação. A velocidade básica do vento foi determinada considerando um tempo de recorrência igual a 10 anos. Os resultados das

análises dinâmicas para os deslocamentos translacionais horizontais máximos são obtidos nos nós do topo do edifício ($h = 90$ m) e, para as acelerações máximas, nos nós do penúltimo pavimento ($h = 87$ m). A ação não determinística do vento exige um tratamento estatístico adequado dos resultados. Assim, considerando-se uma distribuição normal, é possível obter a média (m), desvio padrão (σ) e valores característicos das respostas com um grau de confiabilidade de 95% ($U_{z_{95\%}}$), através da Eq. (5) (Morettin, 2010).

$$U_{z_{95\%}} = 1,65 \sigma + m \quad (5)$$

Neste trabalho foram geradas 30 séries históricas de vento para cada uma das duas situações em estudo, a primeira considerando o modelo estrutural sobre apoios rígidos, e a segunda com o modelo estrutural apoiado em blocos sobre estacas, considerando a interação solo estrutura, como apresentado na Tabela 1. No que se diz respeito à convergência dos resultados numéricos, a Fig. 10 ilustra os deslocamentos característicos no topo da edificação, para o modelo sobre apoios rígidos, calculados gradativamente ao longo dos resultados parciais de cada série, apontando a importância de aplicar um número adequado de séries para obtermos um resultado consistente.

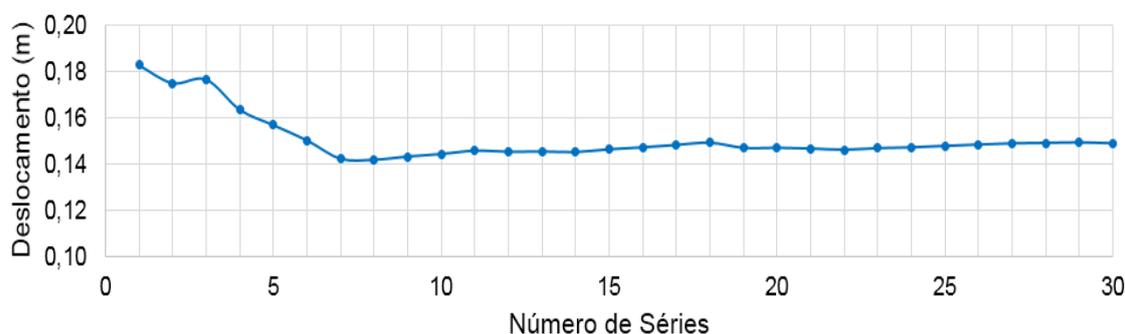


Figura 10. Convergência dos deslocamentos característicos

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 1, verifica-se que os valores máximos médios dos deslocamentos na direção z (aplicação da carga de vento) são da ordem de 0,19 m quando o modelo estrutural é considerado sobre apoios rígidos, e da ordem de 0,23 m quando a interação solo-estrutura é considerada, um aumento de 21%. Em se tratando das acelerações, quando o modelo é considerado sobre apoios rígidos, a aceleração característica é da ordem de 0,38 m/s^2 . Levando-se em consideração a interação solo-estrutura a aceleração característica obtida é da ordem de 0,39 m/s^2 , um aumento de 2,1 % em relação ao modelo sobre apoios rígidos.

Em seguida, a Fig.11 ilustra os deslocamentos máximos encontrados no topo do edifício (cota=90m) para cada série de vento. Quando a estrutura é considerada sobre apoios rígidos somente em 7 séries de carregamento o deslocamento máximo ultrapassou o limite $H/500$ (0,18m). Porém, quando o mesmo modelo estrutural é investigado considerando interação solo estrutura em 28 séries de carregamento o limite $H/500$ foi ultrapassado. Isso evidencia que os deslocamentos horizontais no topo do modelo são influenciados diretamente pelo tipo de apoio utilizado no modelo estrutural.

Tabela 1. Edifício investigado: deslocamentos e acelerações

Série de Carregamento	Deslocamento (m)		Aceleração (m/s ²)	
	Apoios Rígidos	Blocos sobre estacas	Apoios Rígidos	Blocos sobre estacas
1	0,183	0,218	0,379	0,343
2	0,178	0,198	0,300	0,374
3	0,180	0,230	0,365	0,386
4	0,165	0,189	0,328	0,307
5	0,160	0,227	0,367	0,353
6	0,154	0,171	0,314	0,322
7	0,145	0,193	0,319	0,310
8	0,156	0,238	0,316	0,383
9	0,164	0,184	0,327	0,354
10	0,182	0,211	0,348	0,314
11	0,171	0,183	0,333	0,308
12	0,157	0,191	0,322	0,319
13	0,189	0,188	0,390	0,320
14	0,195	0,189	0,344	0,348
15	0,178	0,195	0,360	0,375
16	0,187	0,208	0,302	0,334
17	0,180	0,232	0,307	0,364
18	0,181	0,188	0,351	0,304
19	0,149	0,179	0,312	0,316
20	0,163	0,238	0,295	0,339
21	0,159	0,196	0,340	0,333
22	0,157	0,190	0,274	0,301
23	0,182	0,212	0,374	0,304
24	0,167	0,192	0,284	0,291
25	0,176	0,223	0,353	0,390
26	0,177	0,212	0,359	0,329
27	0,174	0,181	0,326	0,326
28	0,166	0,211	0,296	0,335
29	0,166	0,210	0,297	0,290
30	0,158	0,223	0,347	0,407
Média	0,170	0,203	0,331	0,336
Desvio Padrão	0,013	0,019	0,030	0,032
Uz95%	0,191	0,234	0,380	0,388

Em referência ao conforto humano da edificação, a Fig.12 ilustra as acelerações obtidas em cada série de carregamento de vento. Todos os resultados obtidos, considerando um tempo de recorrência de 10 anos, ultrapassaram o limite proposto pela NBR 6123 ($a=0,1 \text{ m/s}^2$). De acordo com a classificação das acelerações propostas por Bachmann & Hirsch (1995), as mesmas se tornam incômodas para os usuários do edifício a partir de $0,147 \text{ m/s}^2$ e “muito incômodas” a partir de $0,49 \text{ m/s}^2$. Dentro deste critério, os resultados não atingiram o patamar “muito incomodo”.

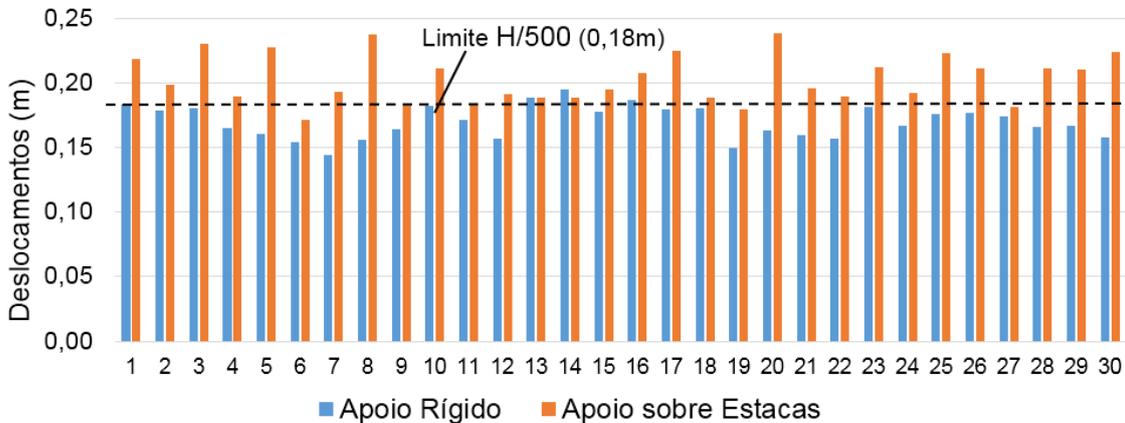


Figura 11. Resposta dinâmica da estrutura em termos de deslocamentos

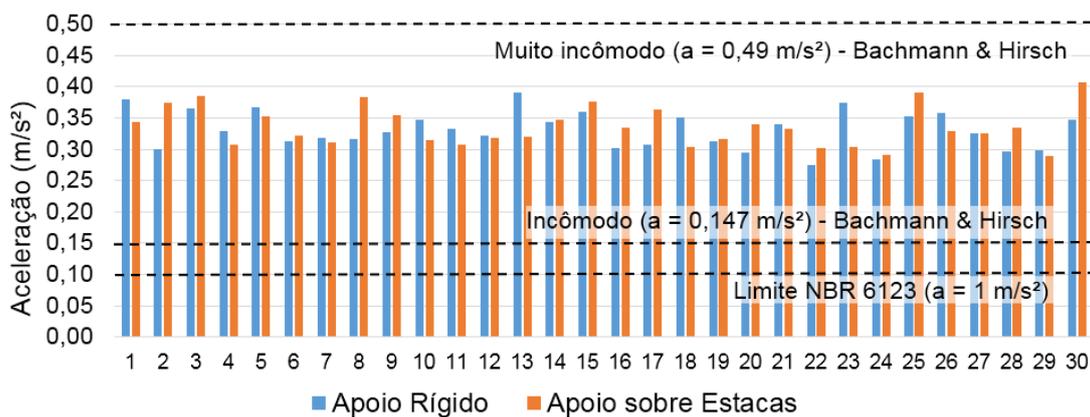


Figura 12. Resposta dinâmica da estrutura em termos de acelerações

O comportamento dinâmico da edificação, ao longo do tempo, quando a estrutura é submetida ao carregamento de vento não determinístico, pode ser observado com maior clareza a partir da Fig. 13, que apresenta o deslocamento do topo da estrutura ao longo de 10 minutos (série 19), quando a estrutura é considerada sobre apoios rígidos.

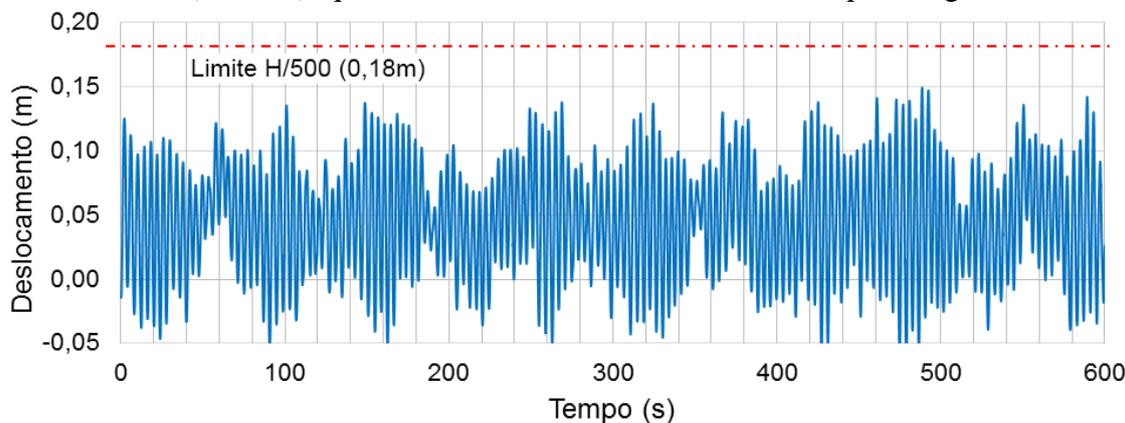


Figura 13. Deslocamento horizontal no topo do edifício. Apoio Rígido (Série 19)

A Fig.14 apresenta os deslocamentos no domínio da frequência, obtido através da Transformada de Fourier. É possível verificar que o principal pico de transferência de energia (maior amplitude de deslocamento) está associado à ressonância com o valor da frequência natural da estrutura (0,25 Hz), relacionada ao 1º modo de vibração, flexão em torno do eixo-X (ver Fig.6).

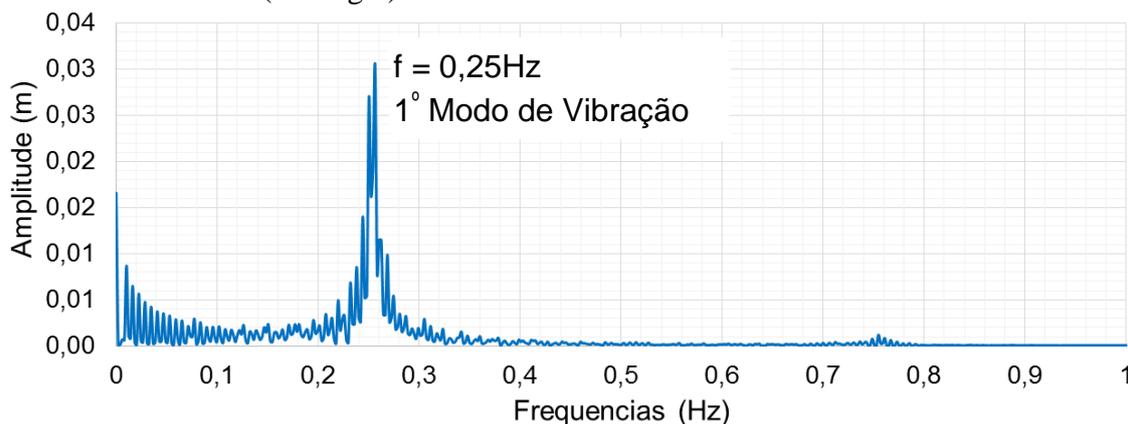


Figura 14. Deslocamentos no domínio da frequência. Apoio Rígido (Série 19)

Com intuito de comparar o comportamento da estrutura quando é alterado o tipo de consideração da fundação, a Fig.15 ilustra no mesmo gráfico os resultados obtidos para apoio rígido e para apoios sobre estacas. É possível observar uma amplitude maior dos deslocamentos quanto à interação solo-estrutura é avaliada.

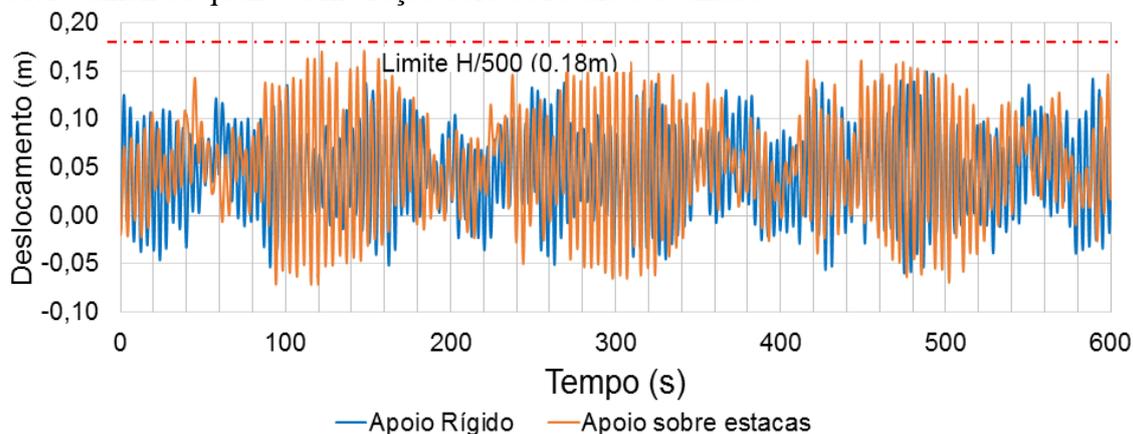


Figura 15. Deslocamento horizontal no topo. Apoio Rígido x Apoio sobre Estacas

O efeito da interação solo-estrutura, relacionadas às acelerações, podem ser observadas na Fig. 16, onde os resultados obtidos em ambas as considerações, estrutura sobre apoio rígido e a mesma sobre estacas, são plotados no mesmo gráfico. Desta forma, é possível constatar que a interação solo-estrutura provoca uma amplificação no resultados, evidenciando a importância desta consideração nas avaliações do conforto humano das edificações.

Os resultados apresentados até aqui foram obtidos em séries históricas de vento, onde a velocidade básica do vento é calculada para um tempo de recorrência de 10 anos.

As análises foram assim realizadas com objetivo de avaliar a estrutura de acordo com o limite de $0,1 \text{ m/s}^2$. A NBR 6123 considera admissível que este limite seja excedido, em média, uma vez a cada dez anos. Porém, a mesma NBR 6123, indica que a verificação do conforto deve ser efetuada para velocidades do vento com maior probabilidade de ocorrência que a velocidade do projeto estrutural, a ser definida pelo projetista.

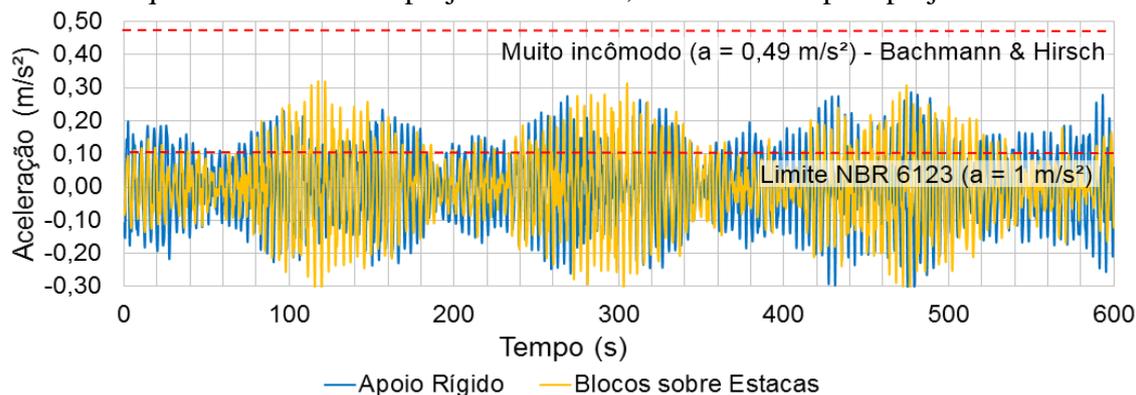


Figura 16. Acelerações no domínio do tempo. Apoio Rígido x Apoio sobre Estacas

Portanto, com o propósito de analisar a estrutura para um vento mais periódico, foi também realizado uma análise da estrutura com o vento calculado para 1 ano de recorrência. Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 17, onde é possível perceber que as acelerações ao longo dos 10 minutos de análise ficaram dentro do limite normativo estabelecido ($a=0,1 \text{ m/s}^2$).

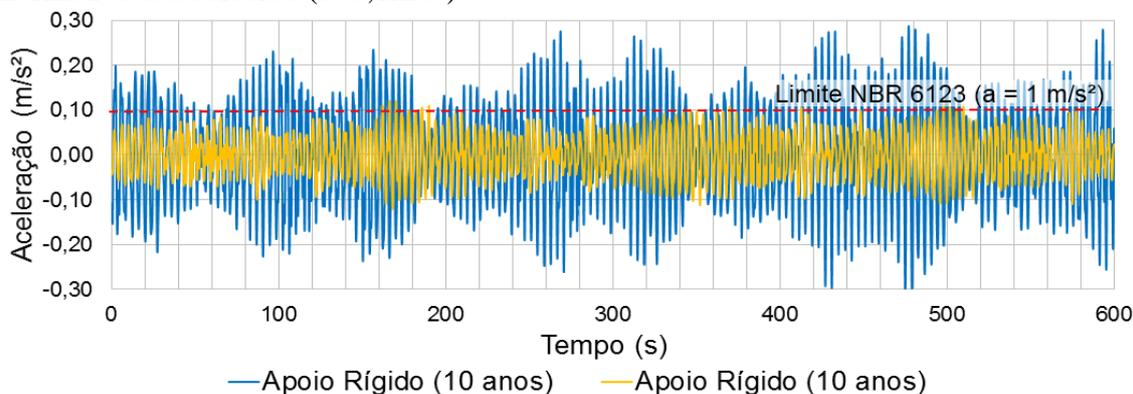


Figura 17. Acelerações no domínio do tempo. 10 anos x 1 ano

7 CONCLUSÕES

Este trabalho de pesquisa investigou a resposta estrutural dinâmica de um edifício de concreto armado de 30 andares, quando submetido às ações dinâmicas do vento não determinístico. O efeito da interação solo-estrutura foi considerado na análise, baseado na modelagem numérica completa do sistema de estacas e fundação. O modelo tridimensional de elementos finitos do edifício investigado foi desenvolvido, baseado no uso do programa computacional ANSYS [3].



Os resultados das análises evidenciam a relevância da consideração do efeito da interação solo-estrutura, indicando que a consideração deste efeito causou mudanças sobre a rigidez estrutural global do edifício e, conseqüentemente, os valores de frequências naturais foram modificados. Além disto, houve um aumento nos valores dos deslocamentos translacionais horizontais e acelerações máximas, devido às ações do vento. Desta forma, é possível concluir que o tipo de solo influenciou o comportamento dinâmico global do edifício. Tal conclusão é importante, pois quando os efeitos de ressonância relacionados às ações do vento sobre edifícios altos são considerados, essas diferenças podem ser significativas e merecem atenção do projetista estrutural.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- ANSYS Swanson Analysis Systems Inc. Theory Reference (R.12.1) (2009).
- Bastos, L. de S., 2015. *Estudo do comportamento estrutural e análise de conforto humano de edifícios de concreto armado*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.
- Bastos, L.S. 2018. *Análise dinâmica não determinística de edifícios submetidos a ações do vento considerando o efeito da interação solo-estrutura*. Tese de doutoramento (em desenvolvimento). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PGECIV). Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Rio de Janeiro / RJ, Brasil.
- Barboza, R. R., 2016. *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.
- Borges, A. C. L. 2009. *Metodologia para avaliação do comportamento estrutural de edifícios altos em concreto armado com consideração da interação solo-estrutura*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife.
- Morais, V. C., 2014. *Análise dinâmica não determinística de edifícios mistos (aço-concreto) submetidos à ação de cargas de vento*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.
- NBR 6123: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *Forças devidas ao vento em edificações* (ABNT), Rio de Janeiro/RJ, Brasil (1988).
- Terzaghi, K. 1955 *Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction*. Géotechnique, London, v. 4, n. 4, pp. 297-326.