



MODELAGEM NUMÉRICA E AVALIAÇÃO DA RESPOSTA ESTRUTURAL DINÂMICA NÃO DETERMINÍSTICA DE EDIFÍCIOS CONSIDERANDO O EFEITO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

Leonardo de Souza Bastos

lbastosjdf@hotmail.com

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV/FEN/UERJ

Rua São Francisco Xavier, Nº 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

José Guilherme Santos da Silva

jgss@uerj.br

Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ

Rua São Francisco Xavier, Nº 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

Resumo. Atualmente, 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. Deste modo, este trabalho de pesquisa tem por objetivo a investigação da resposta estrutural estática e 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 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, via emprego do programa computacional ANSYS. 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 estática e dinâmica do edifício, as conclusões alcançadas apontam para diferenças relevantes em relação à estabilidade global da edificação e a resposta dinâmica do modelo, quando o efeito da interação solo-estrutura é considerado no estudo.

Palavras-chave: Edifícios altos, Interação solo-estrutura, Análise dinâmica de estruturas.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, 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.

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

Diversos pesquisadores vêm investigando esses aspectos, tanto na consideração da ação dinâmica do vento, sua análise não determinística, quanto nas questões do conforto humano e da interação solo-estrutura.

Segundo Brasil & Silva (2013), as excitações como as decorrentes de ventos, ondas do mar, sismos e outras desse gênero são, naturalmente, aleatórias. No nível atual do conhecimento, sua descrição só pode ser realizada no sentido estatístico, por meio de valores médios, desvios desses valores e distribuições de probabilidade. O autor salienta que atualmente existem modelos capazes de realizar a análise estocástica de estruturas de comportamento linear sob esforços de vento de maneira bastante satisfatória. Uma rotina para análise estocástica da resposta dinâmica das estruturas é denominada “vento sintético” (Franco, 2011). Esse método pode ser encarado como algoritmo de simulação tipo Monte Carlo.

Barbosa (2016), em sua tese de doutorado, investigou o comportamento dinâmico, a avaliação do conforto humano e, ainda, o estudo de estratégias para o controle de vibrações excessivas de edifícios altos, 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.

Em relação à interação solo-estrutura, a prática corrente dos escritórios de cálculo estrutural normalmente desconsidera essa influência na obtenção dos esforços dos elementos estruturais das cargas transmitidas ao terreno através das fundações, portanto o cálculo é 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).

Alguns pesquisadores relatam a ocorrência de danos estruturais importantes, como o esmagamento de pilares, ocasionado pela redistribuição de esforços provenientes da deformação do solo.

Em virtude da real dependência existente, discute-se a modelagem numérica desse problema. A estrutura e os elementos de fundação têm solução, porém, quanto ao solo, esse constitui o elemento mais complexo devido à variabilidade de características em que é encontrado na natureza, como heterogeneidade, anisotropia e comportamento não linear entre força e deslocamento, além dos efeitos da variação da quantidade de água presente em sua constituição. Portanto, o conhecimento da resposta do solo quando submetido a forças externas constitui um fator de fundamental importância na análise de problemas de interação solo-estrutura. Essa avaliação da resposta do solo é feita da mesma forma que a estrutura, com base nas relações tensão-deformação, que constituem a descrição matemática das propriedades mecânicas dos materiais (Borges, 2009).

Mendes (2015) descreve que a consideração do maciço de solo na elaboração do projeto estrutural de um edifício em concreto armado é algo relevante, considerando-se o fato de que toda estrutura se apoia sobre o mesmo. Desta forma, em seu trabalho de pesquisa, é apresentado o comparativo entre dois modelos estruturais. No primeiro, é desprezada a presença do solo e considera-se a estrutura sobre apoios indeslocáveis. No segundo, o maciço de solo é parte integrante do modelo estrutural. Através da análise estrutural pode-se comprovar que quando há interação solo-estrutura o modelo apresenta maiores deslocamentos horizontais, maior grau de instabilidade e uma migração dos carregamentos verticais que atuam nos pilares centrais para os pilares de periferia.

Portanto, é interessante estudar e investigar quais os resultados quando se considera a interação solo-estrutura na modelagem estrutural. Tal consideração pode vir a influenciar a rigidez global da estrutura e alterar também suas frequências naturais, levando a resultados diferentes, tanto na consideração estática (deslocamentos horizontais), quanto na questão do conforto humano em relação a vibrações excessivas.

Deste modo, este trabalho de pesquisa tem por objetivo a investigação da resposta estrutural estática e 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 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, via emprego do programa computacional ANSYS. 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 estática e dinâmica do edifício, as conclusões alcançadas apontam para diferenças relevantes em relação à estabilidade global da edificação e a resposta dinâmica do modelo, quando o efeito da interação solo-estrutura é considerado no estudo.

A motivação principal para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa surgiu da necessidade de contribuir com atitudes e recomendações de projeto que possam auxiliar os engenheiros e projetistas de estruturas, no que diz respeito ao desenvolvimento de análises e verificações de conforto humano sobre modelos de edifícios altos de concreto armado, principalmente com estruturas com poucas vigas, considerando o vento de forma não determinística e a interação solo-estrutura, associados à modelagem mais próxima da realidade.

2 MODELO ESTRUTURAL

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 nas Fig. 1 e Fig. 2. 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).

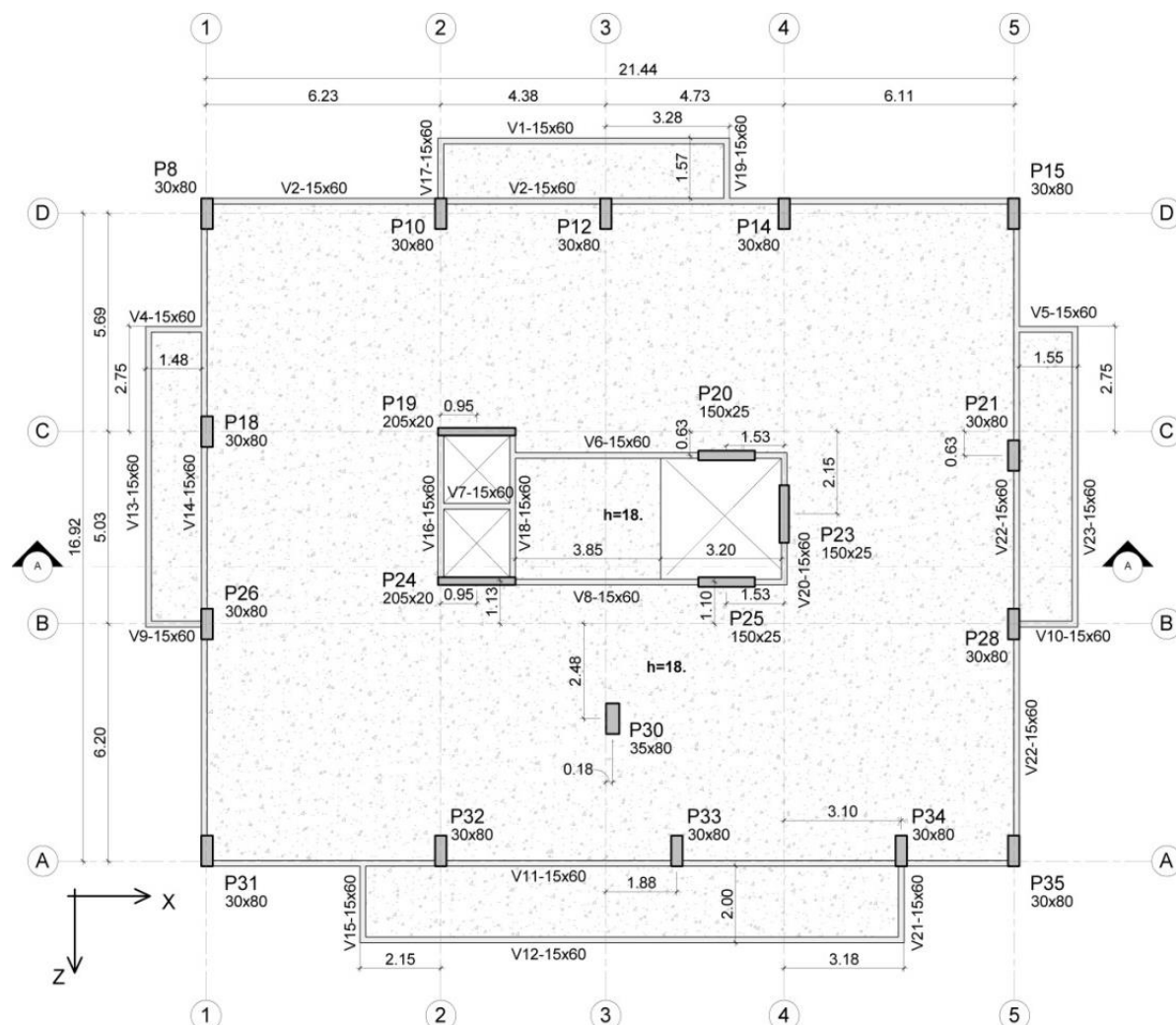


Figura 1. Planta estrutural - Unidades em metro

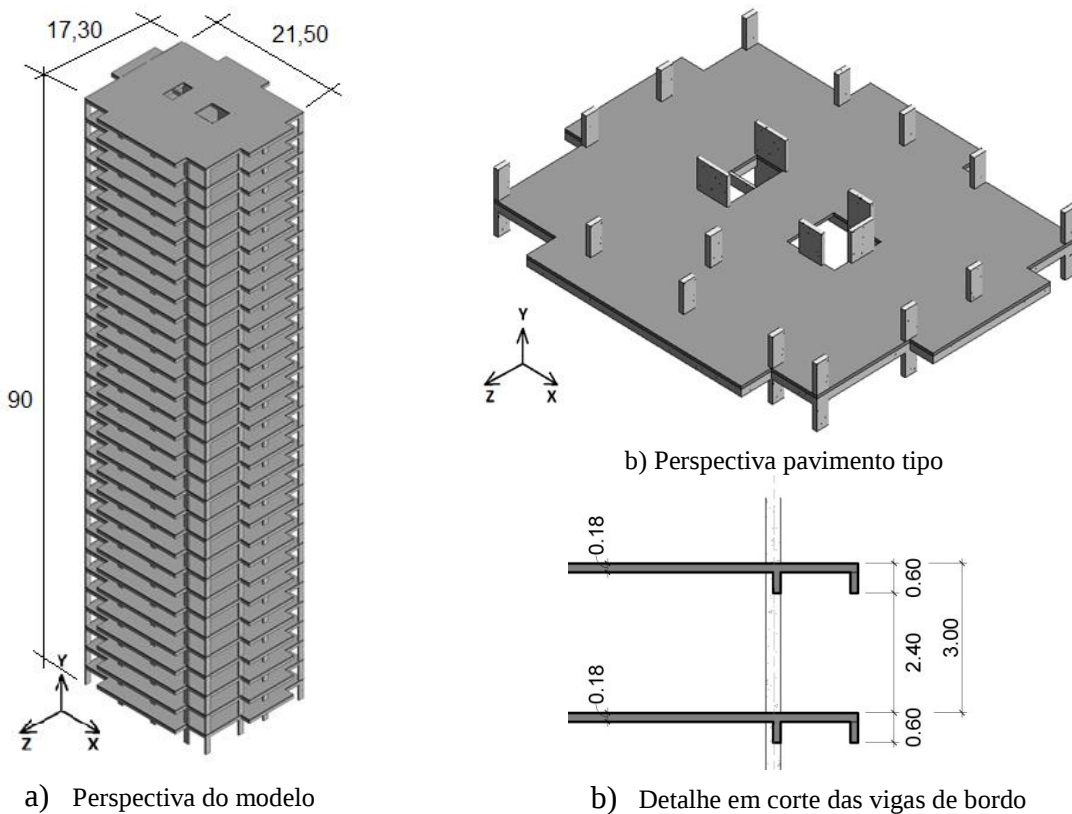


Figura 2. Modelo estrutural do edifício

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. 3), examinando neste caso a interação solo-estrutura.

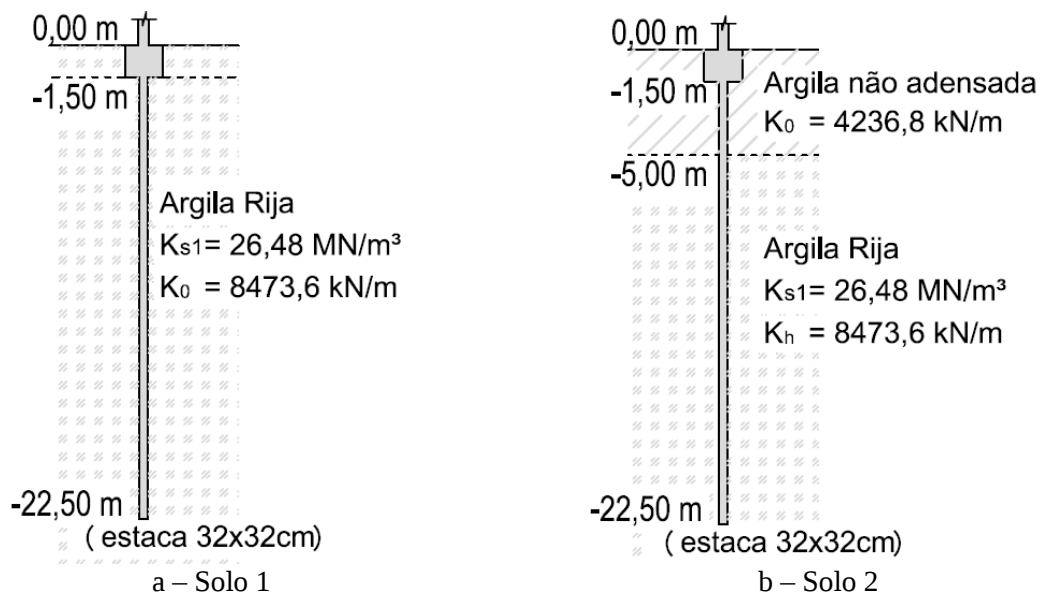


Figura 3. Perfil geotécnico do solo

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.

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 na Fig. 4.

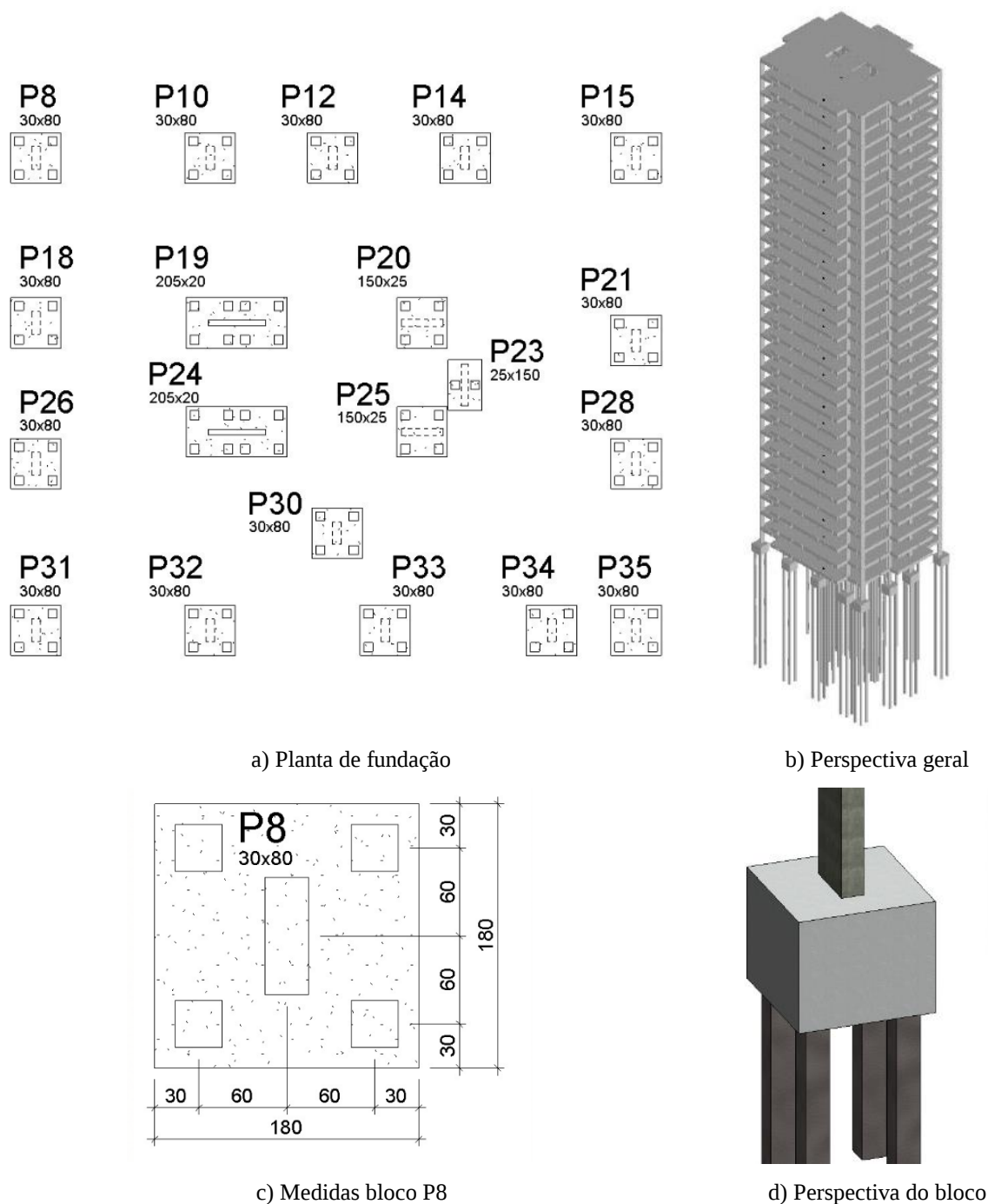


Figura 4. Modelo estrutural da fundação

3 MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS

O modelo estrutural foi investigado utilizando o programa computacional ANSYS (2009), empregando técnicas usuais de discretização, através do método dos elementos finitos.

Na 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, 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, conforme mostrado na Fig. 5. 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, conforme ilustrado também na Fig. 5.

A completa interação entre laje e vigas foi considerada na análise, ou seja, são acoplados os nós para impedir a ocorrência de qualquer deslizamento. Considera-se que o material concreto possui um comportamento elástico, permanecendo plano no estado deformado.

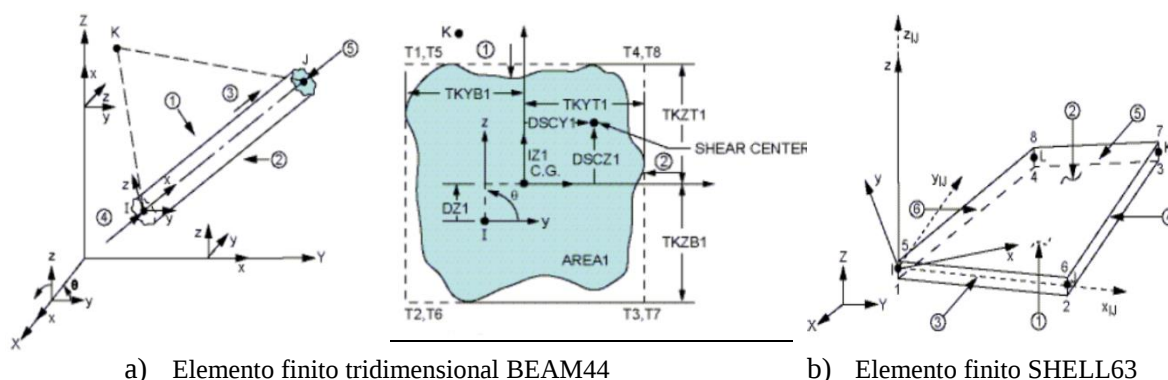


Figura 5. Elemento finito BEAM44 e SHELL63 (ANSYS, 2009)

O presente modelo numérico apresenta um grau de refinamento apropriado, de forma a permitir uma boa representação do comportamento dinâmico da estrutura investigada, conforme ilustrado na Fig. 6, o mesmo, sem considerar a modelagem dos blocos sobre estacas, apresenta 232552 nós, 245880 elementos e 1395246 graus de liberdade. (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.

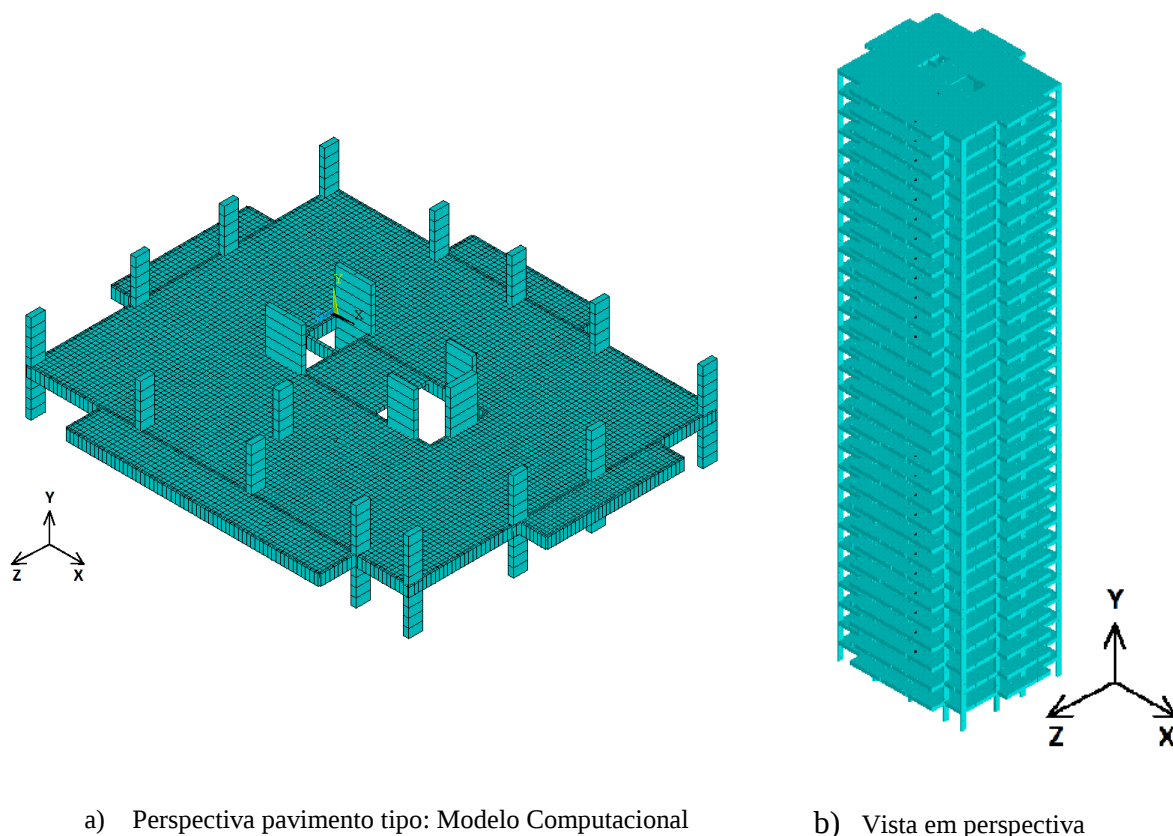


Figura 6. Modelo em elementos finitos (Bastos, 2015)

Em relação à modelagem da fundação, os blocos foram simulados no ANSYS (2009) através do modelo sólido SOLID45, conforme Fig. 7. Este modelo possui 8 nós com três graus de liberdade por nó, permitindo apenas as translações em relação aos três eixos, x, y e z.

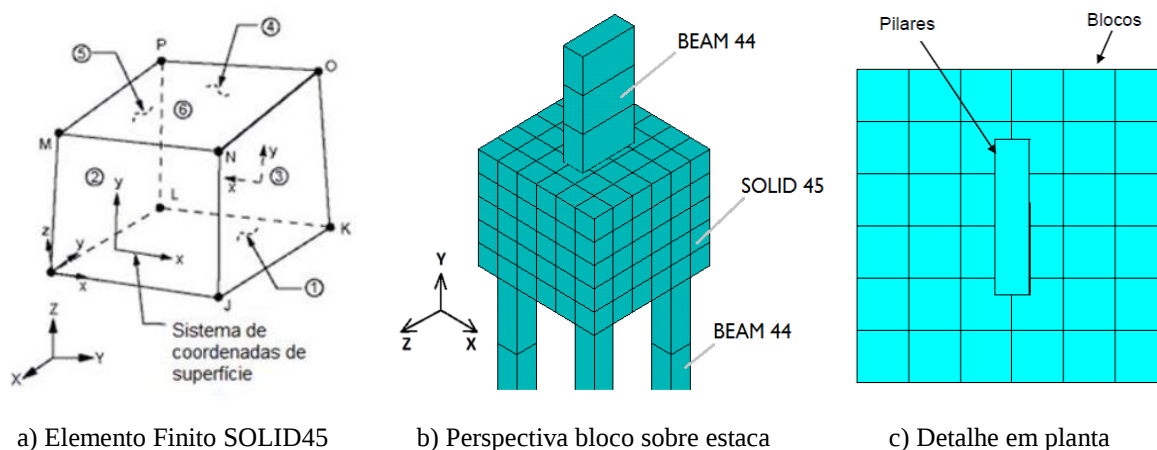


Figura 7 – Modelo numérico fundação blocos sobre estacas

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 suas configurações, a propriedade de rigidez de fundação (“foundation stiffnesses”), na qual é informada a rigidez horizontal k_0 calculado para a estaca e solo em questão.

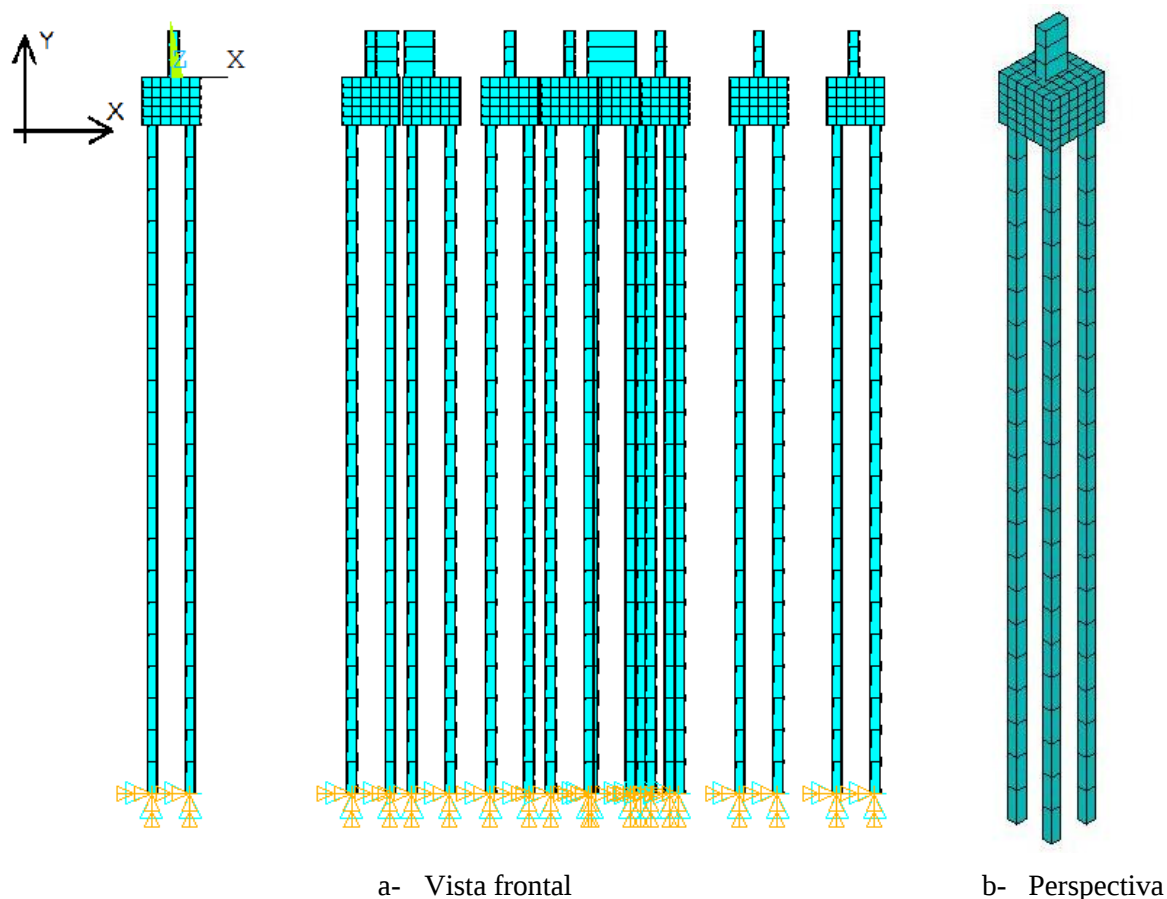


Figura 8 – Vistas do modelo numérico da fundação

Na Tabela 1, segue o número de nós, elementos e graus de liberdade para o Modelo B, quando este é modelado sobre apoios rígidos, e quando o mesmo é modelado com blocos sobre estacas. Podemos verificar o aumento no grau de refinamento do modelo utilizado nas análises considerando a interação solo-estrutura, com 8.260 números de nós a mais, resultando em 29.796 equações adicionais à solução do problema.

Tabela 1 - Números de nós, elementos e graus de liberdade.

	Apoio Rígido	Blocos sobre estacas	Acréscimo	
Nós	232552	240812	8260	+ 3,55 %
Elementos	245880	251588	5708	+ 2,32 %
Graus de liberdade	1395246	1425042	29796	+ 2,13 %

4 ANÁLISE ESTÁTICA

A seguir, tendo por finalidade apurar, de forma objetiva, qual o impacto que a interação solo-estrutura provoca sobre as edificações, é determinada a rigidez global das estruturas, considerando, inicialmente, os apoios rígidos e, posteriormente, utilizando a modelagem com os blocos sobre as estacas interagindo com o solo (modelagem mais refinada).

A rigidez global é calculada como o inverso do deslocamento obtido devido a uma carga unitária aplicada no topo da edificação, para cada direção em separado. É um excelente parâmetro para comparar duas estruturas similares.

Na Fig. 9 são apresentados os resultados obtidos para a rigidez global, nas direções paralelas ao eixo z (k_z) e ao eixo x (k_x), separadamente para as três análises realizadas: apoio rígido, fundação sobre solo 1 e fundação sobre solo 2.

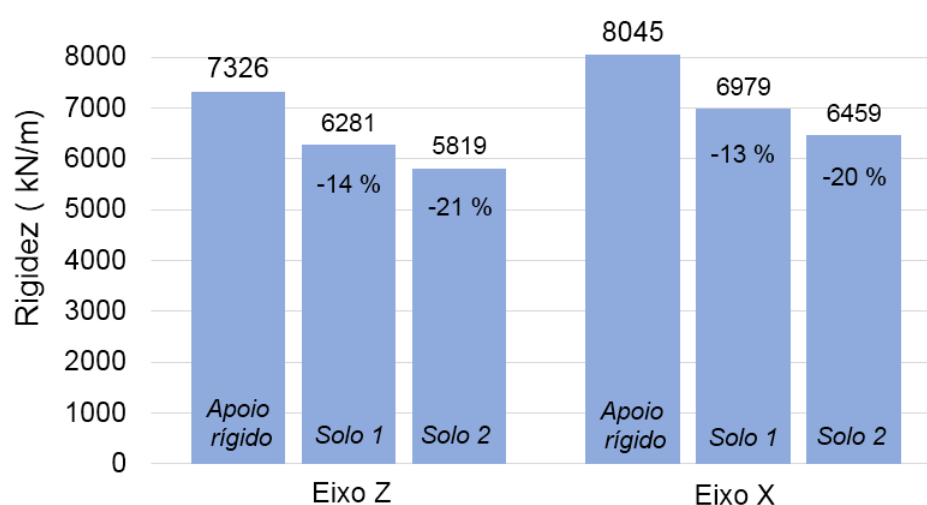


Figura 9 – Valores da rigidez estrutural

É possível verificar que a rigidez tem uma perda considerável, em ambas as direções, devido à consideração da interação solo-estrutura. Na direção Z, referente ao vento frontal, a rigidez k_z do Modelo B é 14% inferior ao valor calculado quando a estrutura é considerada sobre apoios rígidos.

Seguindo a investigação, os modelos estruturais em estudo são testados para uma análise estática, em que duas combinações de carregamento são utilizadas (Tabela 13), a fim de se comparar os resultados considerando as orientações da atual NBR-6118.

Tabela 2 – Combinações de cargas estáticas

Combinação 1 ELS	1,0 Cargas Permanentes + 1,0 Cargas Acidentais + 1,0 Vento S3=1,0 (tempo de recorrência 50 anos, 63% de probabilidade) p= 0,125 ; b= 0,85 rajada de 3 s
Combinação 2 ELS	1,0 Cargas Permanentes + 0,3 Cargas Acidentais + 0,3 Vento S3=1,0 (tempo de recorrência 50 anos, 63% de probabilidade) p=0,125; b=0,85 rajada de 3 s

Na Fig. 10 a seguir, é apresentada a estrutura deformada para a combinação de cargas estáticas, com a ação do vento aplicado na fachada frontal da edificação, considerando a modelagem com a fundação (interação solo-estrutura).

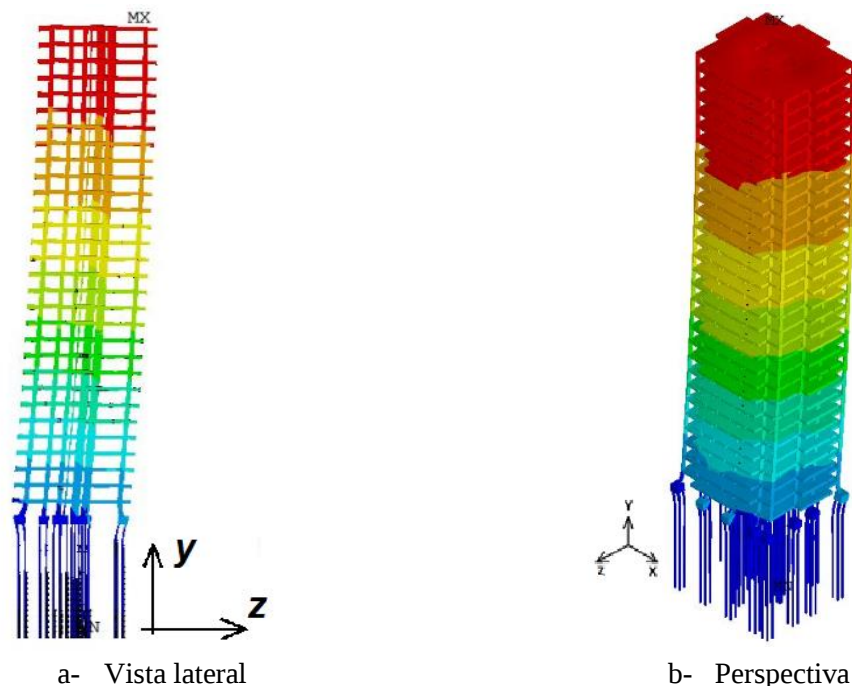


Figura 10 – Deformada da estrutura para análise estática.

Podemos observar que as os blocos, juntamente com as estacas, se deslocam translacionalmente, em resposta as cargas impostas pelo vento, consequentemente, ocasionando um aumento do deslocamento final no topo da edificação.

Na Fig. 11 são apresentados os resultados associados aos valores dos deslocamentos translacionais horizontais no topo da edificação obtidos mediante análises estáticas. Independentemente da combinação de cargas a serem adotadas, as modelagens mais próximas da realidade, considerando os blocos sobre as estacas sob o efeito do solo, fornecem valores superiores, no que tange aos deslocamentos horizontais. Além disso, é possível verificar que o tipo de perfil geotécnico do solo adotado influencia substancialmente nos resultados.

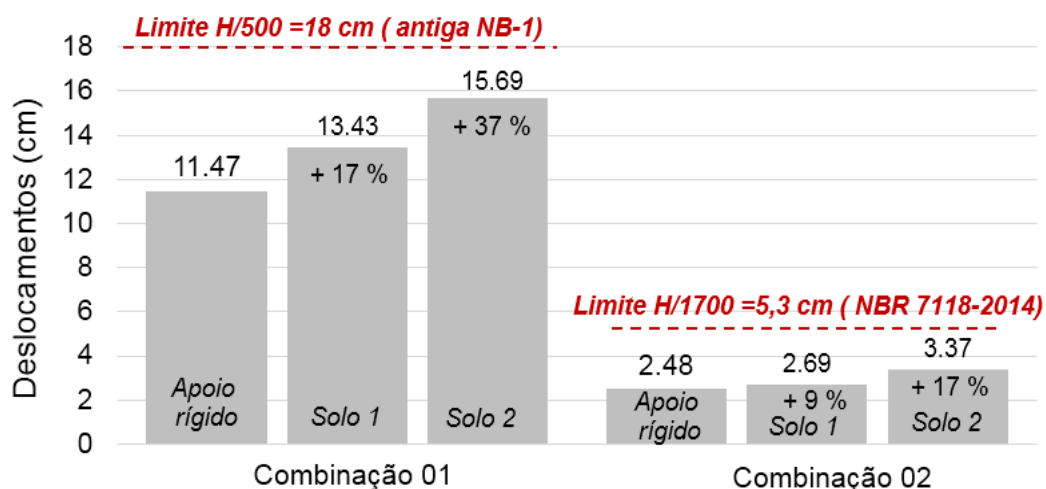


Figura 11 - Deslocamentos no topo do edifício - Combinação 01

5 ANÁLISE MODAL

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. 12 e 13.

É possível observar que a frequência fundamental da estrutura, considerando os apoios rígidos, é igual a 0,25 Hz. Este fato é relevante, pois de acordo com a NBR 6123 (ABNT, 1988), edificações com frequências menores que 1 Hz, em particular aquelas fracamente amortecidas, podem apresentar importante resposta flutuante na direção do vento médio.

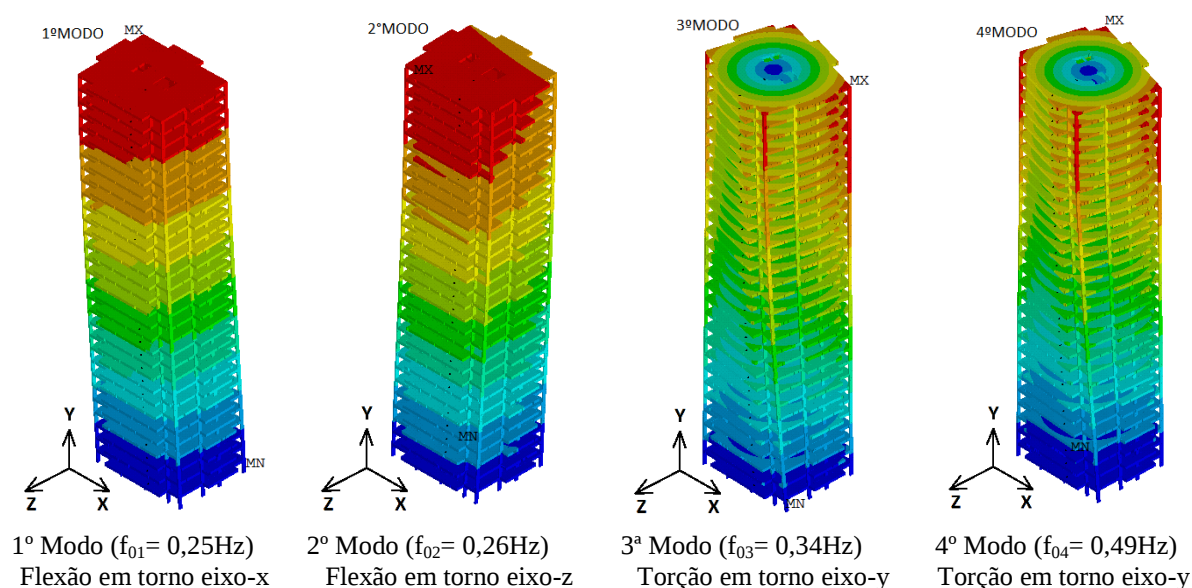


Figura 12. Modelos de vibração do modelo sobre apoios rígidos

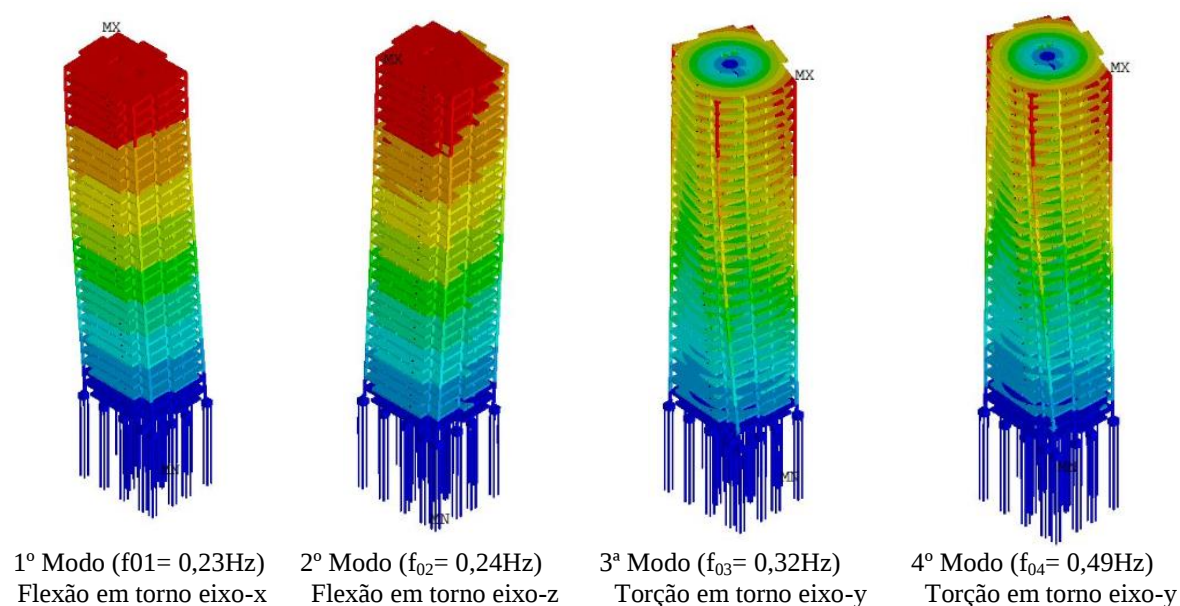


Figura 13. Modelos de vibração do modelo com fundação blocos sobre estacas (Solo 1)

Tabela 3 – Frequências naturais

Apoio Rígido (Hz)	Solo 1			Solo 2	
		Hz	Variação	Hz	Variação
f_{01}	0,25	0,23	-8%	0,21	-16 %
f_{02}	0,26	0,24	-8 %	0,22	-15 %
f_{03}	0,34	0,32	-6 %	0,28	-18 %
f_{04}	0,49	0,49	0%	0,49	0%
f_{05}	0,76	0,73	-4 %	0,65	-4 %
f_{06}	0,81	0,75	-7 %	0,67	-17 %
f_{07}	1,01	0,98	-3 %	0,87	-14 %
f_{08}	1,42	1,38	-3 %	1,26	-11 %
f_{09}	1,44	1,39	-3 %	1,27	-12 %
f_{10}	1,74	1,69	- 3 %	1,54	-11 %

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. Na Tabela 3 são apresentados os valores das frequências naturais obtidas considerando-se os apoios rígidos e com a estrutura modelada com fundação sobre o solo 1 e solo 2. Deste modo, é possível verificar que a perda de rigidez das estruturas quando se considera a interação solo-estrutura, já demonstrada anteriormente, gera também uma proporcional diminuição das frequências naturais. Cabe ressaltar que somente para o quarto modo de vibração não houve alteração do valor da frequência, isto por ser este modo relacionado à torção pura da estrutura, não sendo afetado substancialmente pela consideração do efeito da interação solo-estrutura.

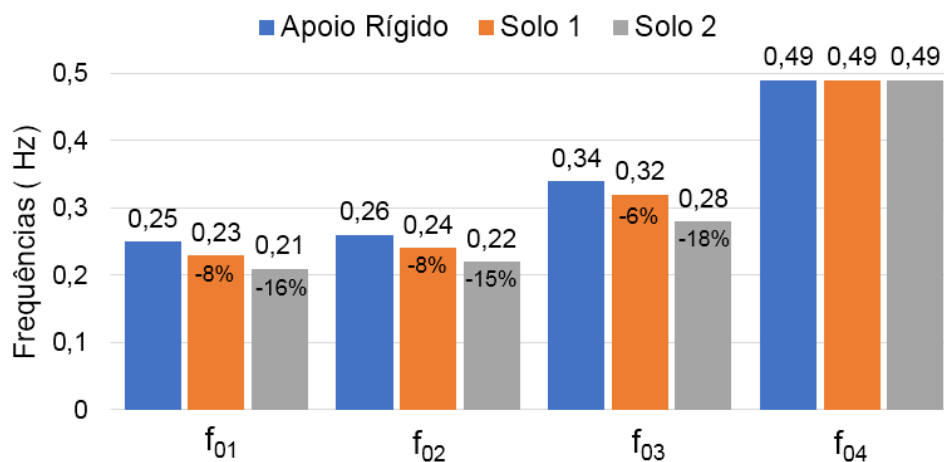


Figura 14 - Comparativo entre frequências - (1º ao 4º modos)

Observando os resultados obtidos para os dois modelos é possível estabelecer que o tipo de solo influencia na rigidez global da edificação e, conseqüentemente, altera os valores das frequências naturais das estruturas em estudo. Essa questão é de extrema importância, pois no que tange aos efeitos de ressonância das estruturas junto ao vento, essas diferenças são significativas e merecem atenção dos projetistas.

6 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.

A fim de avaliar de forma adequada 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, chamado matriz de (C), que tem uma contribuição na matriz de rigidez (K) e uma contribuição na matriz de massa (M), conforme a Eq. (1) (Morais, 2014).

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

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).

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

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

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

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

Assim sendo, conhecendo-se os valores de (f_{01}), (f_{02}), e (ξ_1) (ξ_2), é possível determinar o valor dos parâmetros (α) e (β) que definem a razão de amortecimento da estrutura. Neste estudo foi adotada uma taxa de amortecimento estrutural de 1,0% para o edifício investigado, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros α e β utilizados na análise de vibração forçada

Modelo	f_{01} (Hz)	f_{02} (Hz)	α (Massa)	β (Rigidez)
Apoio Rígido	0,256	0,758	0,003139	0,02405
Solo 1	0,230	0,732	0,003308	0,02199
Solo 2	0,212	0,651	0,003697	0,01995

7 MODELO NÃO DETERMINÍSTICO DO VENTO

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. Assim, é de fundamental importância considerar esses efeitos nos projetos estruturais de tais edificações.

As propriedades do vento são instáveis e variam aleatoriamente, 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 (Brasil & Silva, 2013)

Neste trabalho será utilizado o método do “vento sintético” (Franco, 2011), que consiste na geração de um número razoavelmente grande de séries de carregamento 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. (Brasil & Silva, 2013)

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. O processo do vento sintético pressupõe a divisão do carregamento de vento em uma parcela flutuante e em uma parcela média. Esta última é aplicada estaticamente à estrutura. Por sua vez, a porção 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 (Obata, 2009).

Originalmente, o método do vento sintético adotava onze componentes harmônicas, sendo um deles ressonante com a estrutura e os demais, múltiplos e submúltiplos deste harmônico de ressonância. Franco (2011) apresenta novas considerações para o método do vento sintético, uma delas refere-se à adoção de diferentes quantidades de harmônicos.

Para este presente estudo, são utilizados 81 componentes harmônicos, numa faixa de frequência de 0,01 a 4,01 Hz, o que 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. Entre os espectros de potência existentes, como indicado na Fig. 15, foi adotado neste estudo o espectro de Kaimal devido à consideração da altura (z), que é multiplicado pela frequência adimensional (f) formando a frequência. Assim, o espectro de potência pode ser determinado pelas Eqs. (5) e (6), sendo (f) a frequência em Hz, ($S_v(f)$) a densidade espectral da componente longitudinal da turbulência na frequência (f), (x) a frequência adimensional e (V_z) a velocidade média na cota (z). A velocidade de fricção (u^*), dada em m/s e determinada pela Eq. (7), com (k) sendo a constante de Karmán (Morais, 2014).

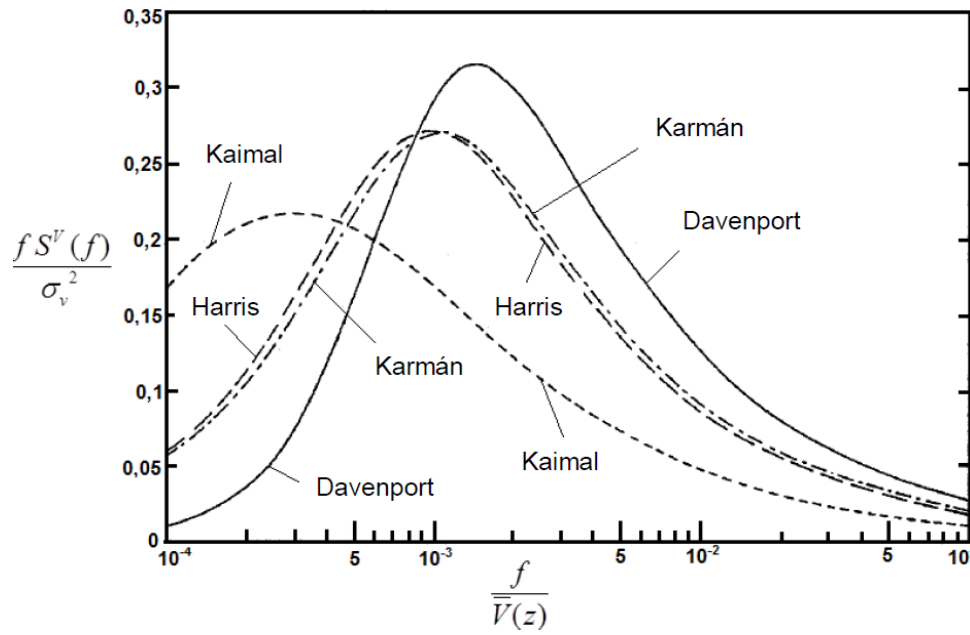


Figura 15. Espectro de potência do vento

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

$$x(f, z) = \frac{f z}{V_z} \quad (6)$$

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

Considerando-se uma única função harmônica, a porção flutuante do vento pode ser representada de maneira simplificada pela Eq. (8), sendo V_0 a velocidade básica do vento, em m/s.

$$v(t) = v_0 \cos(2\pi f t) \quad (8)$$

Sendo a porção flutuante da velocidade do vento inserida num processo aleatório estacionário com média igual a zero e obtida pela sobreposição de ondas harmônicas pode ser expressa pela Eq. (9), onde (N) corresponde ao número de divisões do espectro de potência, (f_i) é 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. (10).

$$v(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2S^V(f_i)\Delta f} \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (9)$$

$$a_i = \sqrt{2S^V(f_i)\Delta f} \quad (10)$$

8 ANÁLISE DINÂMICA

A partir do programa em elementos finitos ANSYS, foram realizadas análises dinâmicas nos modelos estruturais investigados em que o vento foi simulado considerando cargas não determinísticas que agem no sentido negativo do eixo global z, com base no método do vento sintético. Inicialmente, neste trabalho de pesquisa são apresentados somente os resultados obtidos através da aplicação de uma única série de carregamento dinâmico.

Os resultados são obtidos considerando o vento atuando na estrutura durante um intervalo total de 10 minutos (600 segundos). Entretanto, na Fig. 16, é apresentado a força horizontal, no domínio do tempo, aplicada ao pilar P32, na cota $z=90\text{m}$, obtida na primeira série de carregamento, porém, destacando apenas 150 segundos. Desta forma, é possível evidenciar o caráter aleatório da ação do vento.

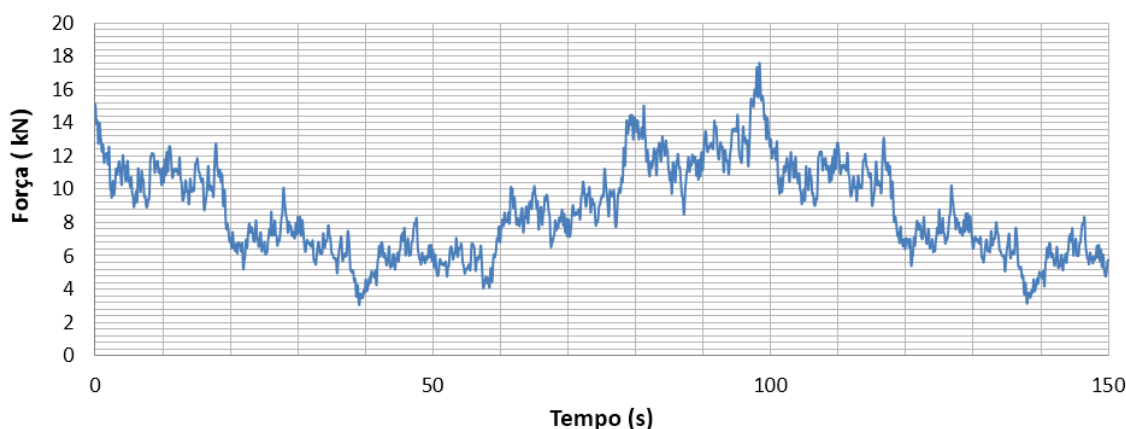


Figura 16 - Força no domínio do tempo para um intervalo de 150 segundos.

Com o objetivo de apresentar as frequências em que o vento é aplicado na estrutura, na Fig. 17, é apresentado o carregamento no domínio da frequência, para o mesmo carregamento obtido para o P32 na série 01. O pico de transferência de energia observado na resposta dinâmica do sistema em estudo, associado ao valor de frequência natural de $0,26\text{Hz}$, como ilustrado na Figura 17, diz respeito à ressonância existente entre o harmônico ressonante da excitação dinâmica (quinto harmônico) correspondente à ação do vento (vento frontal) e o 1º modo de vibração da estrutura (flexão em relação ao eixo-x).

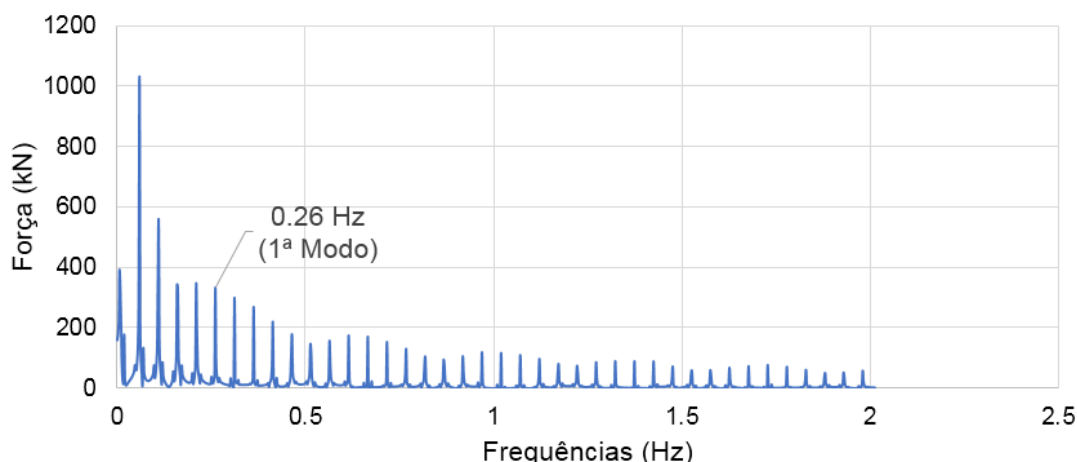


Figura 17 – Carregamento no domínio da frequência.

Os máximos deslocamentos horizontais obtidos no topo de cada modelo estrutural, após a análise dinâmica com carregamento de vento não determinístico, podem ser observados na Fig. 18. Tanto na fase transiente, quanto na fase permanente, os deslocamentos dos modelos mais realistas, isto é, com a consideração da interação solo-estrutura foram superiores ao resultado obtido quando o modelo é simulado simplesmente sobre apoios rígidos.

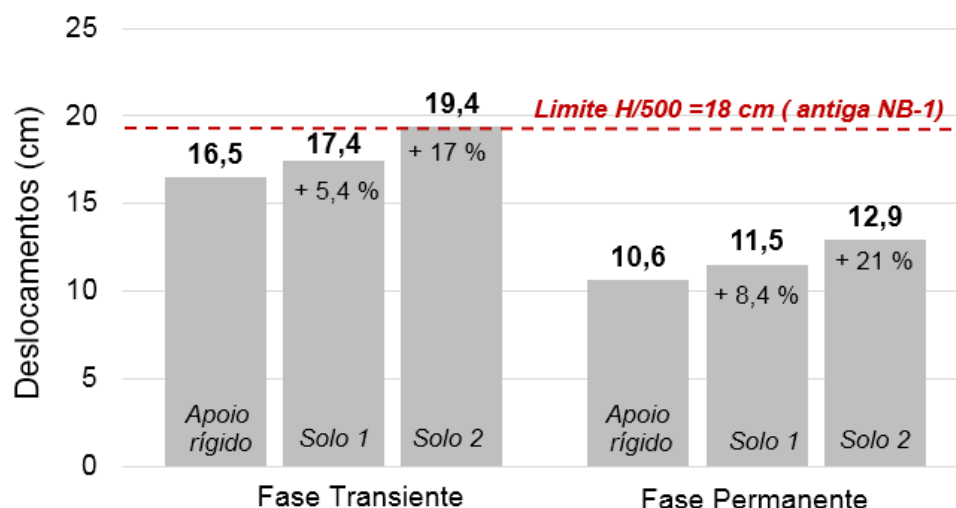


Figura 18 – Resposta dinâmica da estrutura – deslocamentos máximos.

Na Fig. 19 é apresentado os deslocamentos obtidos ao longo do tempo, considerando o modelo sobre apoio rígido e o mesmo sobre a fundação blocos sobre estacas, considerando o perfil geotécnico solo 1. É possível constatar que a consideração interação solo-estrutura expressou valores de deslocamentos no decorrer do tempo superiores aos deslocamentos obtidos considerando-se os apoios rígidos.

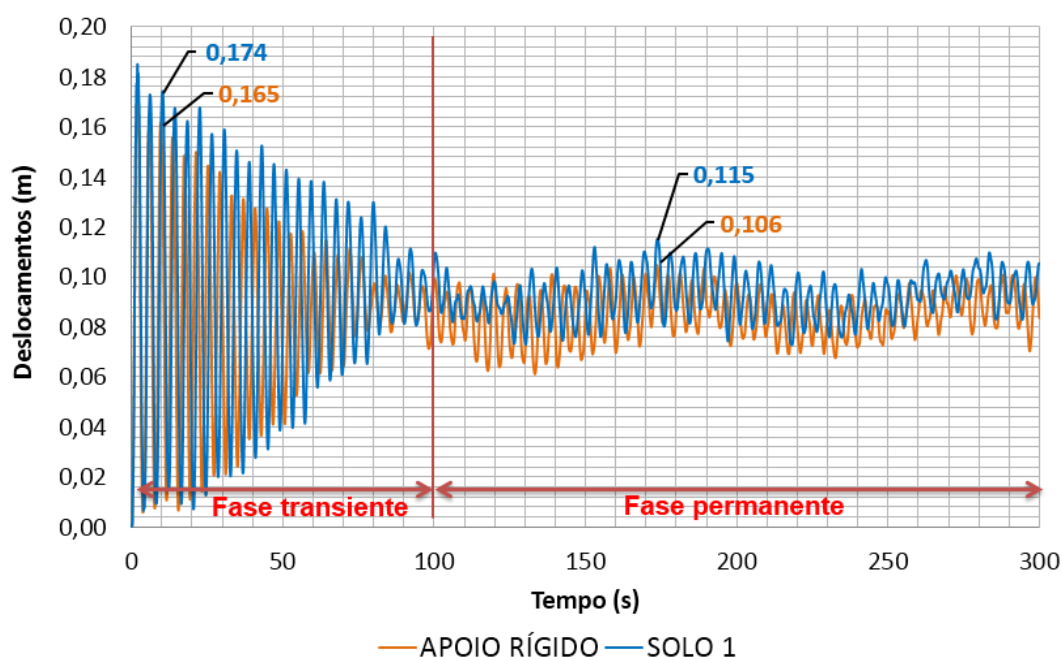


Figura 19 – Deslocamento horizontal no topo da edificação no domínio do tempo.

Com a intenção de verificar quais as frequências que transmitem maiores amplitudes na resposta dos deslocamentos é apresentada a Fig.20, onde é possível observar que participação do harmônico da série de carregamento não determinístico, coincidente com a 1ª frequência natural dos modelos estruturais, fornece as maiores intensidades de deslocamentos.

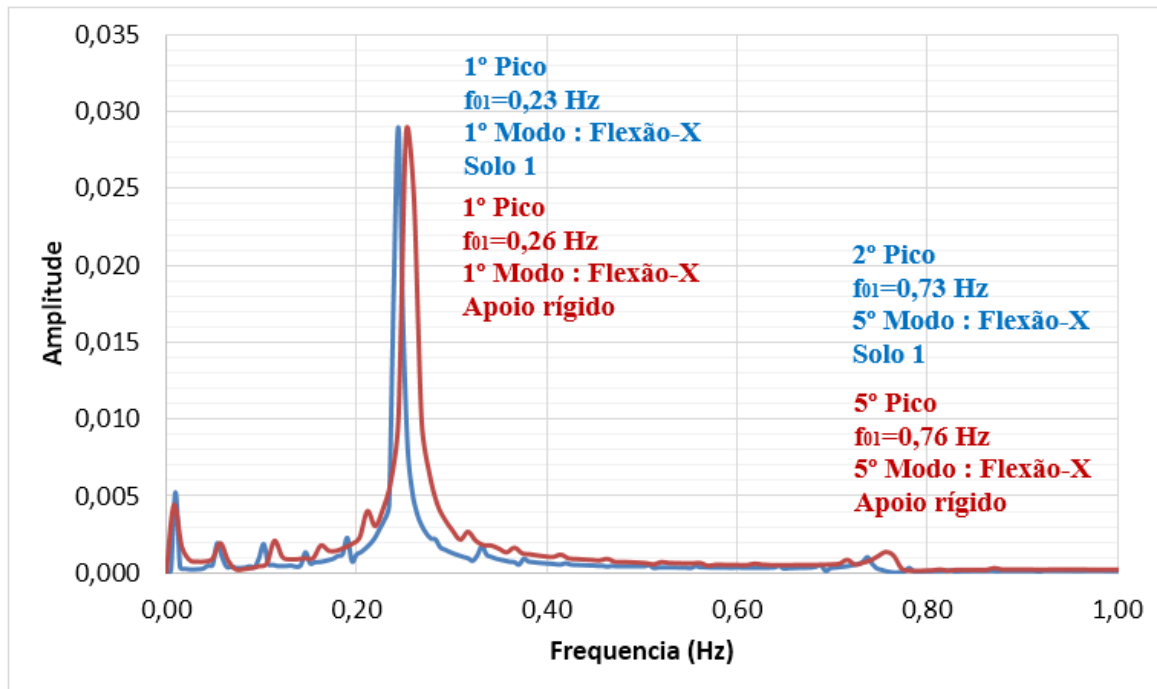


Figura 20 – Deslocamentos no domínio da frequência.

Na Fig. 21 é apresentada a resposta da aceleração no domínio do tempo, para o modelo estrutural, considerando a interação solo-estrutura, com perfil geotécnico solo 1.

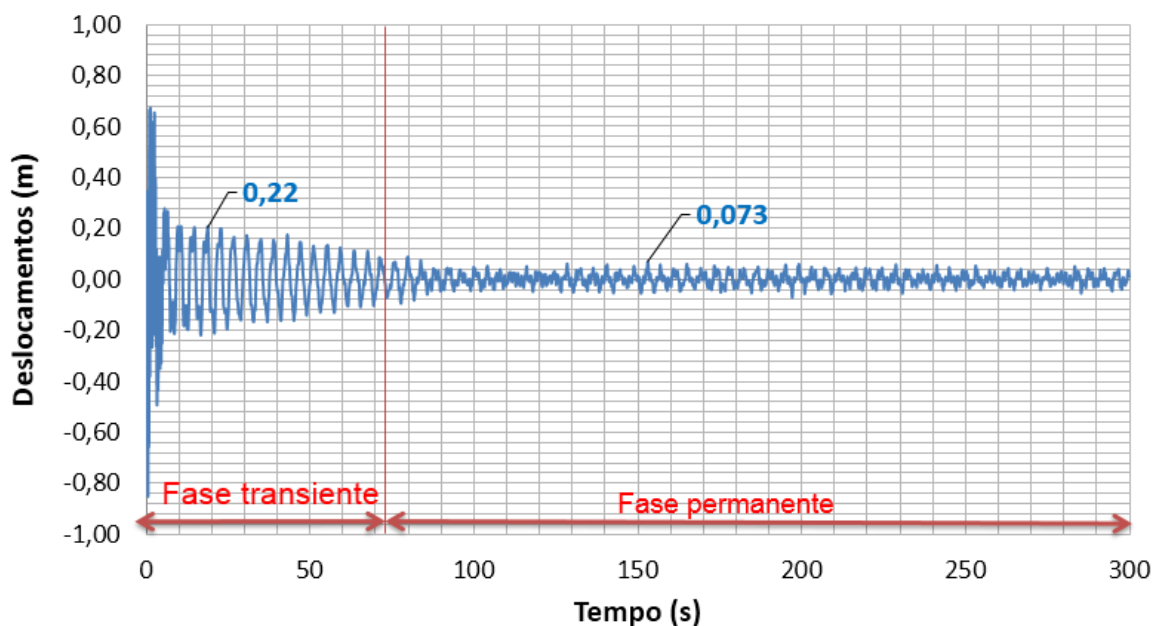


Figura 21 – Resposta dinâmica da estrutura – acelerações no domínio do tempo – solo 1.

Em seguida, na Fig. 21, são apresentados os picos de acelerações para cada simulação, obtidos através da análise dinâmica considerando o vento não determinístico.

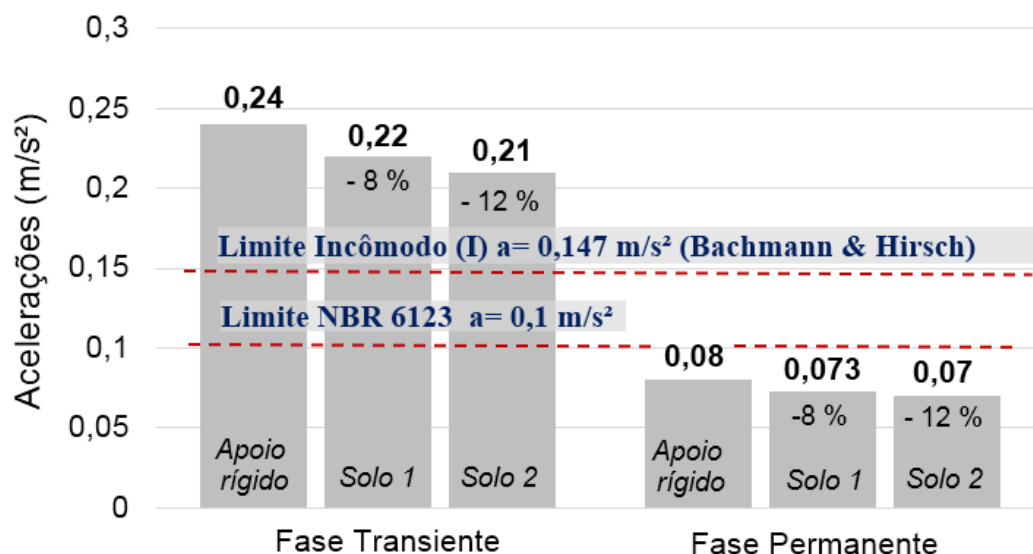


Figura 22 – Resposta dinâmica da estrutura – acelerações máximas.

Da mesma forma como apresentado em relação aos deslocamentos, na Fig. 23 apresenta-se as acelerações do domínio da frequência onde é possível observar que a participação do harmônico da série de carregamento não determinístico, coincidente com a 1ª frequência natural dos modelos estruturais, fornece também as maiores intensidades de acelerações.

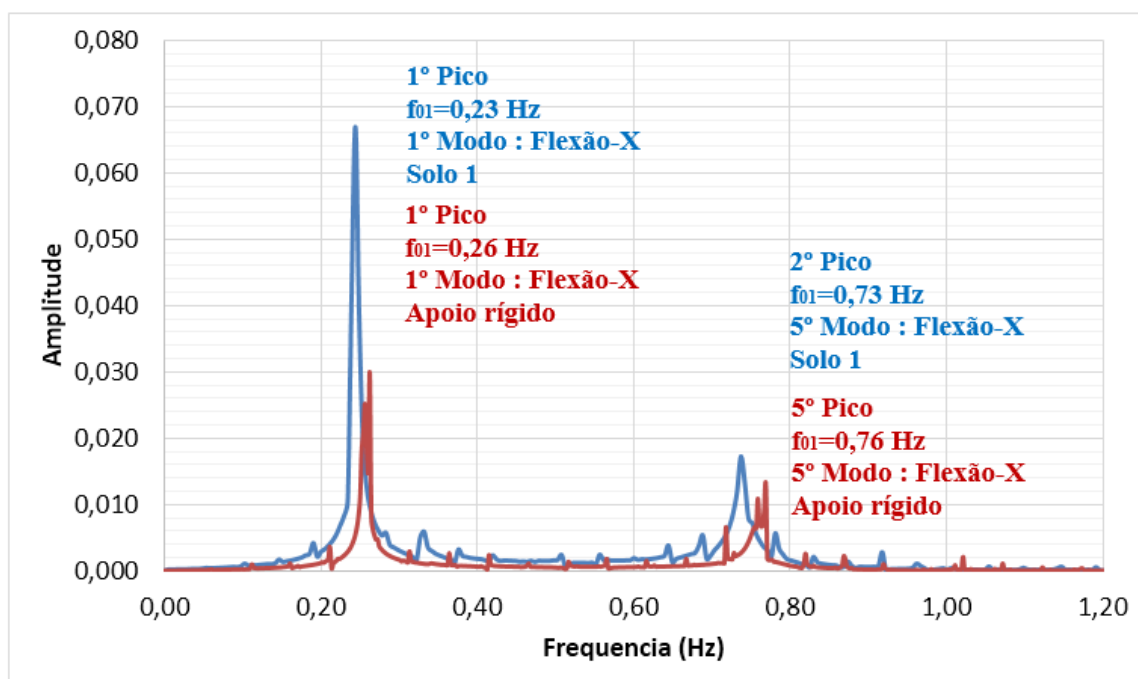


Figura 23 – Acelerações no domínio da frequência.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de pesquisa teve como objetivo principal mostrar comparativos entre os resultados obtidos através da consideração usual da estrutura sobre apoios rígidos e com a estrutura modelada mais próxima da realidade, considerando a interação solo-estrutura. Resultados obtidos tanto em análises estáticas, quanto também em análises dinâmicas.

A interação solo-estrutura é pouco utilizada por engenheiros calculistas. É prática usual nos escritórios de engenharia civil adotarem as estruturas sobre apoios indeslocáveis, o que não representa, em muitos casos, a real natureza do problema. Alguns pesquisadores relatam a ocorrência de danos estruturais importantes, como o esmagamento de pilares, ocasionado pela redistribuição de esforços provenientes da deformação do solo.

Os dados apresentados evidenciaram a importância que a consideração da fundação sobre apoios elásticos provoca. Foi possível verificar que consideração interação solo-estrutura provocou perda de rigidez global nos modelos estudados em ambas as direções e, conseqüentemente, houve um aumento nos deslocamentos horizontais devidos à ação do vento, através de análises estáticas.

Observando os resultados obtidos para os modelos é possível estabelecer que o tipo de solo também influencie na rigidez global da edificação e, conseqüentemente, altera os valores das frequências naturais das estruturas em estudo. Essa questão é de extrema importância, pois no que tange aos efeitos de ressonância das estruturas junto ao vento, essas diferenças são significativas e merecem atenção dos projetistas.

O tema referente à avaliação do conforto humano é 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 simuladas sobre apoios rígidos fornecem rigidezes maiores que as reais e, portanto, os projetistas estruturais devem ser alertados, pois tal fato pode vir a alterar substancialmente o conforto humano dos usuários.

No que diz respeito à continuidade da pesquisa os autores propõem 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 de pesquisa.

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., 2009. Theory Reference (R.12.1).

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

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014. NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, Rio de Janeiro.

- Brasil, Reyolando & Silva, Marcelo., 2013. *Introdução à dinâmica das estruturas para engenharia civil*. 1ª edição. Editora Blucher, São Paulo.
- Franco, M., Medeiros, S. R. P., 2011. O método do “vento sintético” - Novas considerações. *Revista TQS News*. n 33, pp. 38–46.
- 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.
- Mendes, R. 2015. *Interação solo-estrutura e sua influência na análise estrutural de edifícios em concreto armado*. Revista Especialize On-line IPOG - Goiânia - Edição nº 10, Vol. 01.
- Bachmann, H., Hirsch, G., 1995. *Vibration problems in structures: practical guidelines*. Birkhäuser. Berlim.
- 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.
- Blessmann, J., 2001. *Acidentes causados pelo vento*. 4ª edição. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Brasil, Reyolando & Silva, Marcelo., 2013. *Introdução à dinâmica das estruturas para engenharia civil*. 1ª edição. Editora Blucher, São Paulo.
- DAVENPORT, A.G. *Buffeting of Structures by Gusts*. Symposium N.16, Wind Effects on Buildings and Structures, Teddington/ England, v.01, Paper 09, 357-391, 1963.
- DAVENPORT, A. G. *How can we simplify and generalize wind loads?* Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Ontario, v. 54-55, p. 657-669, fev. 1995.
- 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.