



MODELAGEM DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL E ANÁLISE DE CONFORTO HUMANO DE EDIFÍCIOS ALTOS

Leonardo de Souza Bastos

lbastosjdf@hotmail.com

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

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

José Guilherme Santos da Silva

jpgss@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

Francisco José da Cunha Pires Soeiro

soeiro@uerj.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ

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

Resumo. *Os projetos de edifícios necessitam cada vez mais de sistemas estruturais simples, que facilitem a construção, reduzindo os custos e promovendo maior flexibilidade de utilização para os espaços planejados. Com essa finalidade, estruturas com poucas vigas vêm sendo muito utilizadas. Porém, o sistema estrutural com poucas vigas pode ocasionar dois tipos de problemas: diminuição do sistema de contraventamento da edificação e vibrações excessivas. Portanto, é fundamental a verificação da estabilidade global da estrutura, como também, o desenvolvimento de estudos acerca do conforto humano. Assim sendo, neste trabalho de pesquisa foram investigados quatro modelos estruturais de edifícios altos, com base no estudo da variação entre o número de pavimentos e a quantidade de vigas existentes em cada modelo, objetivando-se verificar quais os efeitos que tais variações podem vir a gerar sobre o conforto humano. A modelagem numérica dos edifícios foi realizada através do emprego do programa ANSYS e para tal foram utilizadas técnicas básicas de discretização por meio do método dos elementos finitos. As conclusões alcançadas ao longo do estudo versam acerca dos níveis de conforto humano de cada edificação investigada.*

Palavras-chave: *Edifícios altos, Dinâmica estrutural, Análise de conforto humano*

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, os projetos de edifícios altos necessitam cada vez mais de sistemas estruturais simples, que agilizem sua montagem, reduzindo os custos e promovendo maior flexibilidade de utilização para os espaços construídos. Com essa finalidade, estruturas com poucas vigas vêm sendo muito utilizadas (Bastos, 2015). Entretanto, esse tipo de sistema estrutural pode vir a ocasionar vibrações excessivas e é de fundamental relevância, nesses casos, o desenvolvimento de um estudo minucioso acerca do conforto humano da edificação.

Cabe destacar que as vigas em conjunto com os pilares, compõem os sistemas de contraventamento dos edifícios e, portanto, a eliminação dessas vigas reduz consideravelmente os níveis de rigidez estrutural. Por esta razão, tal eliminação deve ser feita com cautela e precisão, principalmente, em edifícios altos e esbeltos (Bastos, 2015). Por outro lado, além da preocupação em relação aos sistemas de contraventamento, as questões associadas à estabilidade estrutural e ao conforto humano devem ser igualmente verificadas.

O estudo da resposta estrutural dinâmica de edifícios apresentou significativos avanços nos últimos anos devido ao grande desenvolvimento da tecnologia computacional, permitindo resolver problemas dinâmicos com a ajuda de análises numéricas refinadas. Assim sendo, neste trabalho de pesquisa foram investigados quatro modelos estruturais de edifícios altos, com base no estudo da variação entre o número de pavimentos e a quantidade de vigas existentes em cada modelo, objetivando-se verificar quais os efeitos que tais variações podem vir a gerar sobre o conforto humano dos sistemas estruturais. A modelagem numérica dos edifícios em estudo foi realizada através do emprego do programa ANSYS (ANSYS, 2007), com base no uso de técnicas básicas de discretização, via método dos elementos finitos.

As conclusões alcançadas ao longo da investigação versam acerca dos níveis de conforto humano de cada modelo estrutural investigado (Bastos, 2015). 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.

2 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DO CONFORTO HUMANO

2.1 Critério de avaliação segundo a NBR 6123 (1988)

De acordo com a norma brasileira de vento NBR 6123 (1988), no vento natural, a velocidade do vento apresenta flutuações em torno da velocidade média, designadas por rajadas. Admite-se que a velocidade média mantém-se constante durante um intervalo de tempo de 10 minutos ou mais, produzindo nas edificações efeitos puramente estáticos, designados como resposta média. De outro modo, as flutuações da velocidade podem induzir, em estruturas muito flexíveis, especialmente em edificações altas e esbeltas, oscilações importantes na direção da velocidade média, designadas como resposta flutuante. A resposta dinâmica total é dada pela superposição das respostas média e flutuante.

Segundo a norma de projeto NBR 6123 (1988), no caso de edificações destinadas à ocupação humana, as oscilações induzidas pelas forças flutuantes oriundas da ação do vento podem vir a provocar desconforto nos ocupantes. Deste modo é estabelecido que a amplitude máxima da aceleração num determinado nível da edificação pode ser calculada, simplificada, com base no emprego da Eq. (1).

$$a_j = 4 \pi^2 f_j^2 u_j \quad (1)$$

Na Eq. (1) a variável f_j representa a frequência natural de vibração da estrutura, correspondente ao modo de vibração j e a grandeza u_j diz respeito ao deslocamento na cota z devido à ação da parcela flutuante da ação do vento no modo de vibração j .

Os deslocamentos u_j flutuantes podem ser calculados, de acordo com o método simplificado apresentado pela NBR 6123 (1988), através de uma pressão de vento flutuante $q(z)_{fl}$, utilizando a Eq. (2).

$$q(z)_{fl} = \overline{q_0} \cdot b^2 \left[\left(\frac{h}{z_r} \right)^p \left(\frac{z}{h} \right)^\gamma \frac{1+2\gamma}{1+\gamma+p} \xi \right] \quad (2)$$

Na Eq. (2), q_0 corresponde à pressão dinâmica; p e b são parâmetros dependentes da rugosidade do terreno, determinados para um intervalo de tempo de 10 minutos; ξ é o coeficiente de amplificação dinâmica; z representa a cota sobre o terreno; z_r diz respeito à altura de referência igual a 10 metros e h corresponde à altura total da edificação.

Em seguida, a velocidade de projeto, correspondente à velocidade média sobre 10 min a 10 metros de altura sobre o solo, é obtida pela Eq. (3), na qual V_0 representa a velocidade básica de projeto; S_1 é o fator topográfico e S_3 é o fator estatístico.

$$\overline{V_p} = 0,69 V_0 S_1 S_3 \quad (3)$$

Dando sequência à formulação, a pressão dinâmica q_0 é obtida pela Eq. (4) e a força estática equivalente F_{fl} , a qual deve ser aplicada sobre a estrutura, é obtida a partir da pressão flutuante $q(z)_{fl}$, por meio do emprego da Eq. (5). Cabe ressaltar que nas Eqs. (4) e (5), C_a diz respeito ao coeficiente de arrasto e A_e representa a área frontal efetiva sobre o qual o vento atua nos edifícios.

$$\overline{q_0} = 0,613 \overline{V_p}^2 \quad (4)$$

$$F_{fl} = C_a q(z)_{fl} A_e \quad (5)$$

Essas forças equivalentes são aplicadas na estrutura e assim determinados os deslocamentos flutuantes u_j . De posse dos valores desses deslocamentos é determinada a amplitude da aceleração. De acordo com a NBR 6123 (1988), como indicação geral, a aceleração máxima encontrada pela Eq. (1) não deve superar $0,1 \text{ m/s}^2$. Considera-se admissível que amplitude máxima de aceleração seja excedida, em média, uma vez a cada dez anos. Por isso para verificação utilizando este critério o ideal é utilizar o fator S_3 para um período de recorrência igual a 10 anos.

2.2 Critério de Avaliação segundo Bachmann et al. (1995)

Bachmann et al. (1995), demonstrou, através de inúmeros estudos e pesquisas, que o nível de tolerância das pessoas aos efeitos das vibrações induzidas pela ação do vento em edifícios, pode ser considerado em função de valores limites associados às acelerações de pico (acelerações máximas), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Valores limites de aceleração de acordo com Bachmann et al. (1995)

Percepção humana	Valores limites de aceleração	em m/s^2
Imperceptível (IMP)	$a < 0,005g$	$a < 0,049$
Perceptível (P)	$0,005g < a < 0,015g$	$0,049 < a < 0,147$
Incômodo (I)	$0,015g < a < 0,05g$	$0,147 < a < 0,49$
Muito Incômodo (MI)	$0,05g < a < 0,15g$	$0,49 < a < 1,47$
Intolerável (INT)	$0,15g < a$	$1,47 < a$

2.3 Critérios de Avaliação segundo a ISO 2631-1 (1997)

Atualmente, a norma ISO 2631-1 (1997), que substituiu a norma ISO 2631-1 (1985), não apresenta os critérios expostos anteriormente, além de não apresentar limites de exposição à vibração, definindo apenas um método para avaliação de exposição à vibração de corpo inteiro. No anexo C da norma ISO 2631-1 (1997) explica-se que o conforto devido a vibrações depende de muitos fatores, tal como a expectativa dos ocupantes e as atividades que estes estarão fazendo no momento (por exemplo, ler, dormir, comer, escrever), além de vários outros fatores, tais como barulho acústico e temperatura. Portanto, não é definido um limite, e sim, apresentadas indicações aproximadas de valores que podem provocar algum tipo de reação, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2. Critérios de avaliação do conforto segundo a ISO 2631-1 (1997)

Valores limites de aceleração	Percepção humana
menor que $0,315 \text{ m/s}^2$	Confortável
$0,315 \text{ m/s}^2$ até $0,63 \text{ m/s}^2$	Pouco confortável
$0,5 \text{ m/s}^2$ até 1 m/s^2	Quase desconfortável
$0,8 \text{ m/s}^2$ até $1,6 \text{ m/s}^2$	Desconfortável
$1,25 \text{ m/s}^2$ até $2,5 \text{ m/s}^2$	Muito desconfortável
Maior que $2,5 \text{ m/s}^2$	Extremamente desconfortável

2.4 Critérios de Avaliação segundo a ISO 10137 (2007)

Atualmente, as normas europeias indicam como referência de avaliações do conforto humano a ISO 10137 (2007), cujo Anexo D traz orientações para a resposta humana a movimentos em edifícios provocados pelo vento. De modo a manter dentro de limites aceitáveis as condições de vida diária relativas à resposta humana às acelerações horizontais dos edifícios provocadas pela ação do vento com retornos de 1 ano, é necessário aplicar critérios de avaliação.

A orientação fornecida neste anexo refere-se a um escritório comercial e a uma ocupação residencial. O tempo de recorrência proposto é de 1 ano, sendo que outros tempos de recorrência podem ser tomados, considerando casos mais graves como tempestades e furacões, sendo necessário, portanto, utilizar fatores de multiplicação.

Basicamente, o critério apresentado se dá por avaliação do pico de aceleração para a primeira frequência natural. São apresentados ábacos em que aparecem as curvas de aceitabilidade para escritórios e residências. O nível de aceitabilidade para residências é dois terços do nível de aceitação para escritórios. A curva resultante para residência é próximo do nível de 90% de probabilidade de percepção. As curvas foram obtidas através de dados para muitos edifícios reais. Os valores das acelerações de pico, para um período de retorno de 1 ano, não devem exceder as curvas de avaliação apresentada na Fig.1.

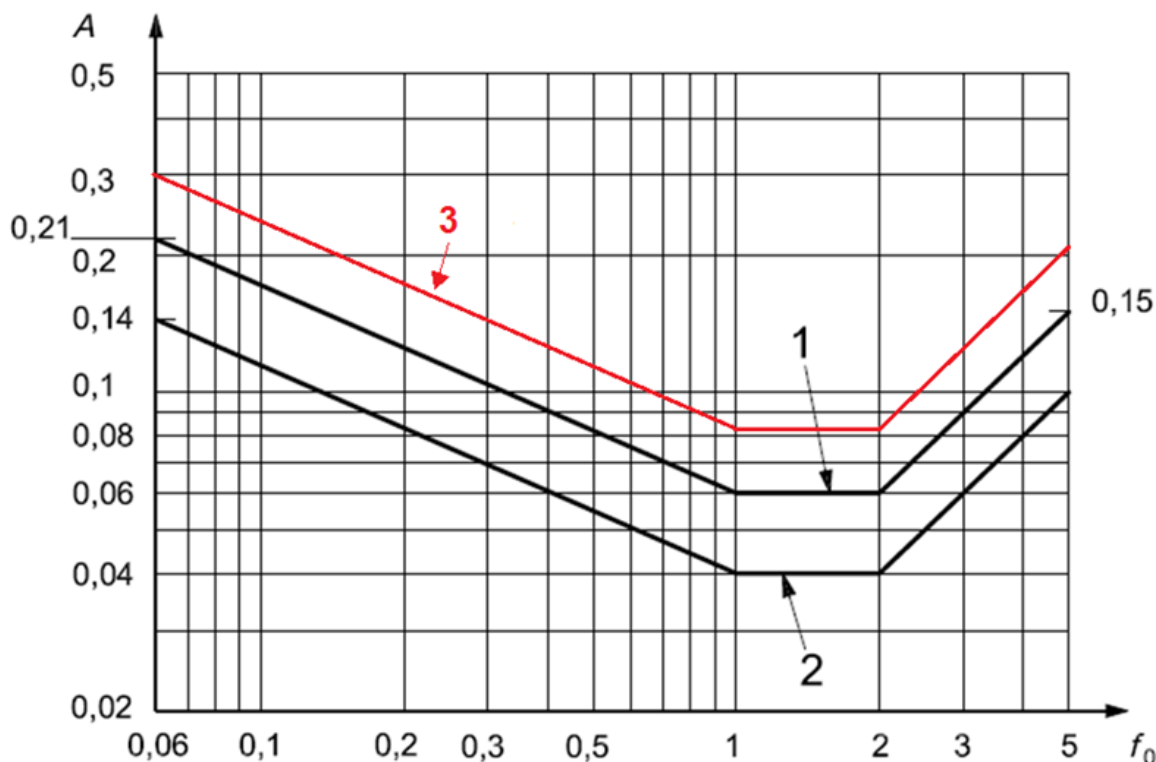


Figura 1. Curvas de avaliação para vibrações em edifícios em direções horizontais, ISO 10137 (2007)

Na Fig.1, a ordenada do gráfico (A) representa o pico de aceleração em m/s^2 e a abscissa da figura (f_0), está associada à frequência fundamental da estrutura dada em Hz. A curva 1 diz respeito a escritórios, considerando-se para um tempo de recorrência igual a um ano e a curva 2 representa o limite para residências, considerando-se um tempo de recorrência igual a um ano. Finalmente, a curva 3 corresponde ao limite para residências, utilizando um tempo de recorrência igual a dez anos.

3 MODELOS ESTRUTURAIS INVESTIGADOS

As edificações em estudo neste trabalho de pesquisa correspondem a prédios residenciais cuja estrutura é constituída por pilares, vigas e lajes em concreto armado (Bastos, 2015). O concreto estrutural utilizado nos modelos 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/m^3 . Em relação às variações nos modelos estruturais foram estudadas quatro situações de projeto distintas, variando-se, primeiramente, o número de pavimentos e, posteriormente, retirando-se as vigas de periferia e as vigas das varandas dos modelos (Bastos, 2015).

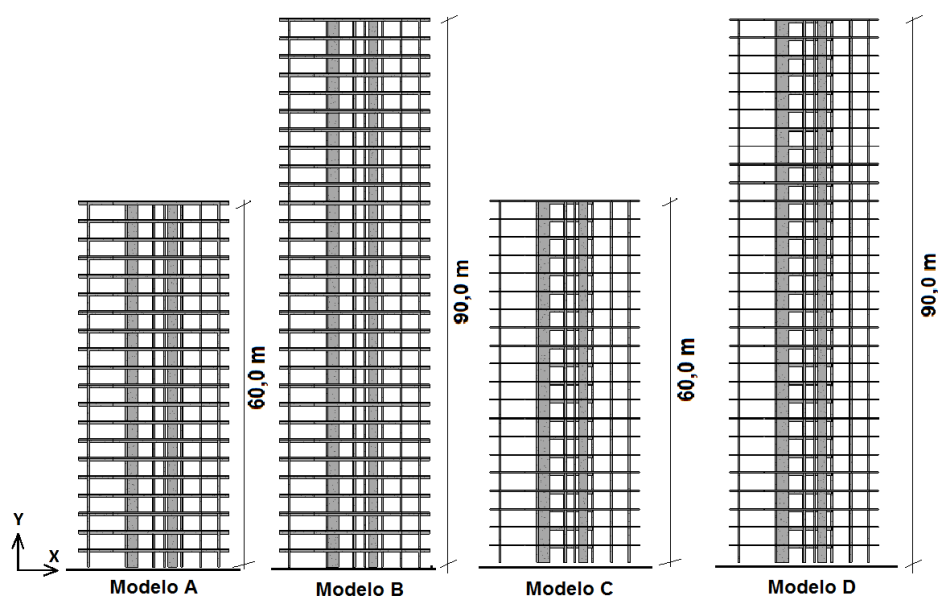


Figura 2. Modelos estruturais investigados. Dimensão em (m)

Os Modelos Estruturais A e B, apesar de não possuírem vigas dividindo os vãos internos das lajes, conseguem, com as vigas de periferia, formar alguns pórticos, formados por vigas e colunas, que ajudam no contraventamento da estrutura. Nos Modelos C e D, a ausência destas vigas de periferia, provoca uma situação em que o sistema de contraventamento fica a cargo basicamente dos pilares.

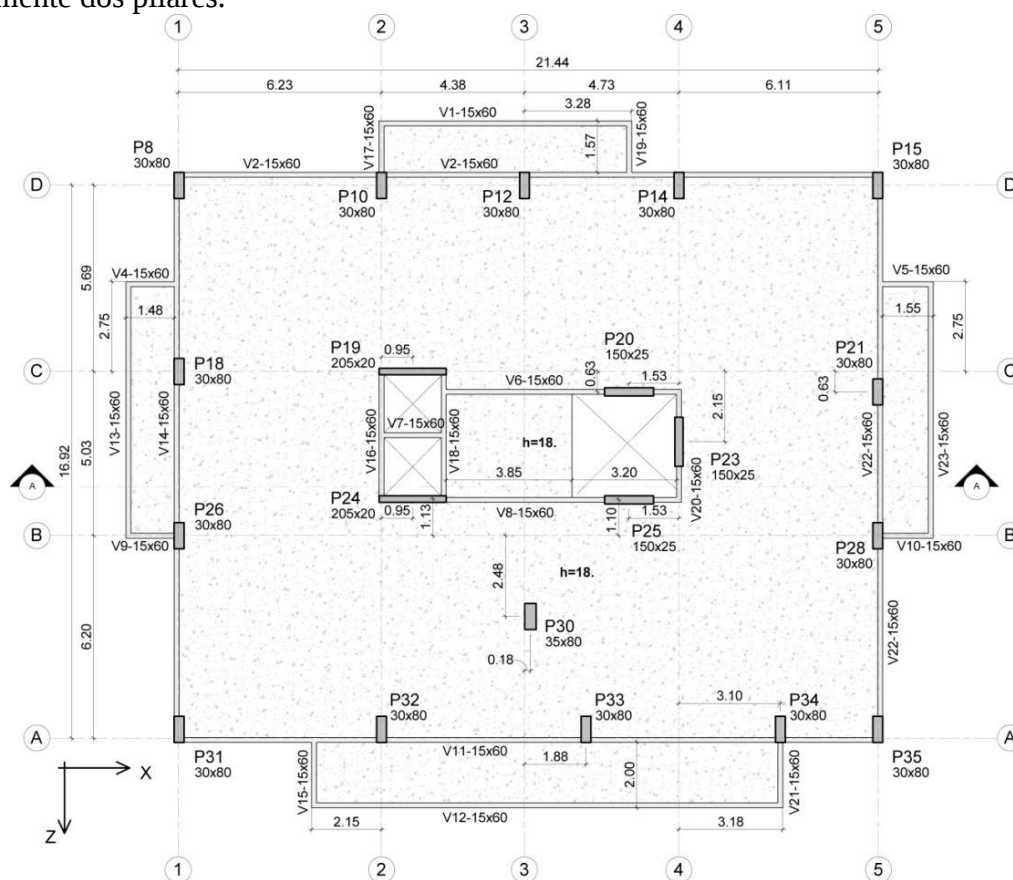


Figura 3. Planta estrutural - Modelos A e B - Unidades em metro

Tabela 3. Características dos modelos estruturais

Modelos	Número de pavimentos	Pé direito (m)	Altura total (m)	Estrutura
Modelo A	20	3	60	Com vigas
Modelo B	30	3	90	Com vigas
Modelo C	20	3	60	Sem vigas de periferia e vigas nas varandas
Modelo D	30	3	90	Sem vigas de periferia e vigas nas varandas

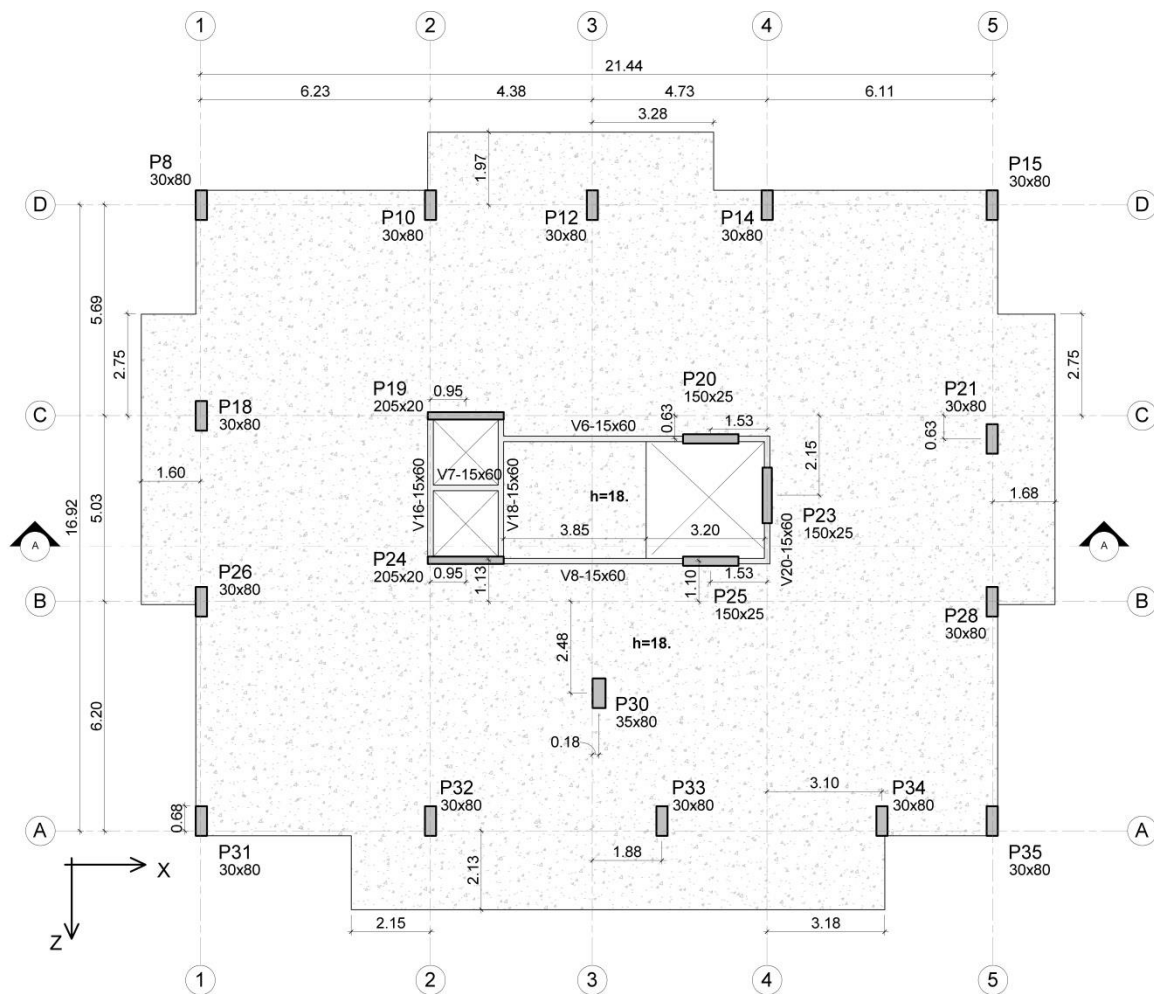


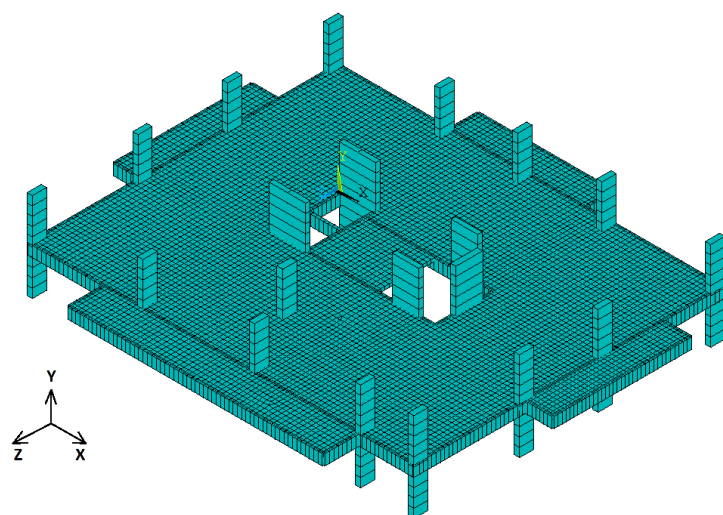
Figura 4. Planta estrutural - Modelos C e D - Unidades em metro

4 MODELOS EM ELEMENTOS FINITOS

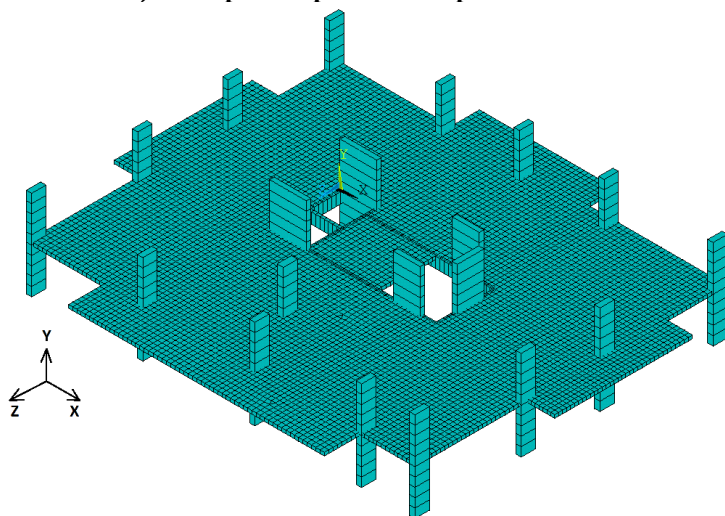
Na modelagem numérica, as vigas e colunas em concreto armado são representadas por elementos finitos tridimensionais, onde são considerados os efeitos de flexão e de torção. Para tal, usa-se o elemento finito BEAM44 (ANSYS, 2007). A grande vantagem deste elemento é

a possibilidade de permitir que seus nós sejam distanciados do eixo do centróide 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, 2007).

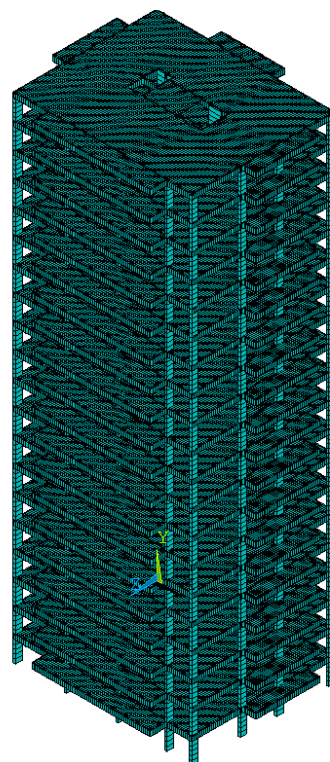
A completa interação entre laje e vigas foi considerada na análise, ou seja, são acoplados os nós para impedir a ocorrência de qualquer deslizamento. Considera-se que o material concreto possui um comportamento elástico, permanecendo plano no estado deformado.



a) Perspectiva pavimento tipo: Modelos A e B



b) Perspectiva pavimento tipo: Modelos A e B



c) Vista em perspectiva Modelo A

Modelos A e C

Nós : 155042

Elementos : 163920

Graus de liberdade : 930186

Modelos B e D

Nós : 232552

Elementos : 245880

Graus de liberdade : 1395246

Figura 5. Modelos em elementos finitos

5 ANÁLISE MODAL: AUTOVALORES E AUTOVETORES

As frequências naturais (autovalores) e os modos de vibração (autovetores) dos modelos estruturais investigados foram determinados com a ajuda de métodos numéricos de extração (análise modal), de acordo com a Tabela 4. A partir da análise modal realizada é possível verificar que o valor da frequência fundamental entre cada modelo diminui, conforme o

modelo se torne menos rígido. Por exemplo, o Modelo A apresenta $f_{01}=0,40$ Hz, enquanto o Modelo C, que apresenta a mesma altura, porém sem as vigas de periferia, sendo, por isso, menos rígido, apresenta $f_{01}=0,27$ Hz, ou seja, 32,5% menor, Tabela 4. Da mesma forma, o Modelo B apresenta $f_{01}=0,25$ Hz, enquanto o Modelo D, que apresenta a mesma altura, porém sem as vigas de periferia, sendo, por isso, menos rígido globalmente, apresenta $f_{01}=0,17$ Hz, ou seja, 32% menor, Tabela 4.

Tabela 4. Frequências naturais dos modelos estruturais investigados

Modos de vibração	Modelo A: 20 andares com vigas	Modelo B: 30 andares com vigas	Modelo C: 20 andares sem vigas	Modelo D: 30 andares sem vigas
f_{01}	0,40 Hz	0,25 Hz	0,27 Hz	0,17 Hz
f_{02}	0,41 Hz	0,26 Hz	0,28 Hz	0,19 Hz
f_{03}	0,49 Hz	0,34 Hz	0,34 Hz	0,21 Hz
f_{04}	0,51 Hz	0,49 Hz	0,49 Hz	0,49 Hz
f_{05}	1,17 Hz	0,76 Hz	0,82 Hz	0,52 Hz
f_{06}	1,24 Hz	0,81 Hz	0,88 Hz	0,58 Hz
f_{07}	1,51 Hz	1,01 Hz	1,06 Hz	0,67 Hz
f_{08}	2,20 Hz	1,42 Hz	1,51 Hz	0,96 Hz
f_{09}	2,23 Hz	1,44 Hz	1,67 Hz	1,04 Hz
f_{10}	2,63 Hz	1,74 Hz	1,94 Hz	1,23 Hz

Na sequência do estudo, são apresentados os três primeiros modos de vibração dos modelos, Figs. 6 a 9. Pode-se verificar que para os Modelos A e B, que diferem somente em sua altura, os modos de vibração para as duas estruturas são idênticos para os três primeiros modos, divergindo apenas nos valores das frequências. O modelo B, que possui altura superior (10 pavimentos a mais) perde rigidez e, com isso, as frequências naturais diminuem. As frequências do modelo B são em média 36 % menores que as frequências do modelo A, Tabela 4 e Figs. 6 a 9. O modelo C, que possui a mesma altura do modelo A, porém sem as vigas de periferia, perdeu rigidez e, por isso, os valores das suas frequências naturais diminuíram em relação às frequências do modelo A. Os modos de vibração do modelo C não são idênticos aos do modelo A, já que seus dois primeiros modos apresentam flexão combinada com torção, mostrando que as vigas de periferia têm grande importância na rigidez à torção da estrutura, Tabela 4 e Figs. 6 a 9. Finalmente, o modelo D foi o que apresentou os valores das frequências naturais mais baixas ao longo da análise, em função de ser o menos rígido entre os quatro modelos estruturais estudados, Tabela 4 e Figs. 6 a 9.

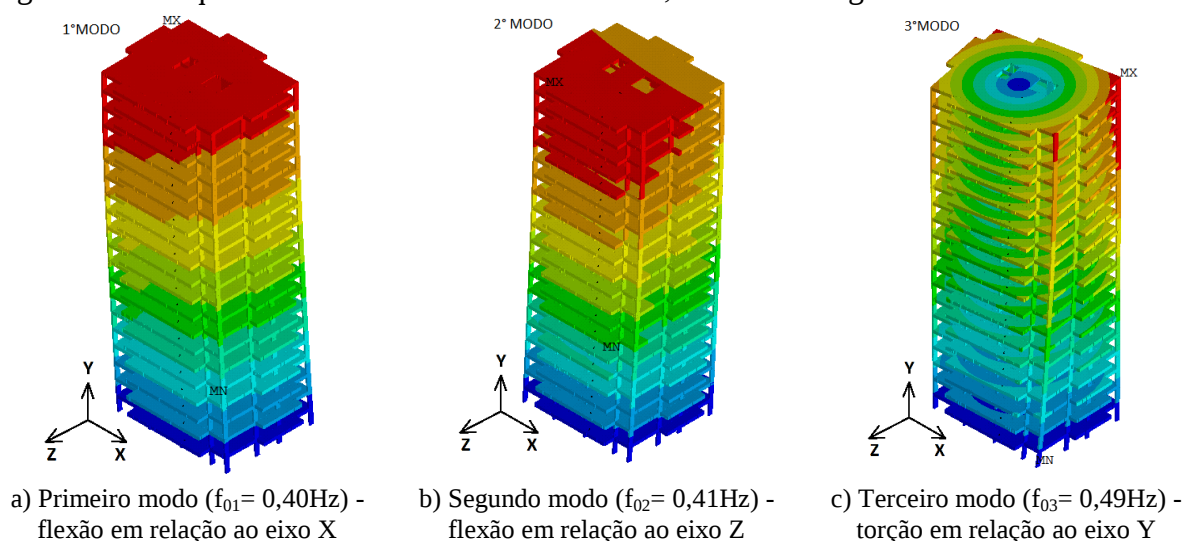


Figura 6. Modos de vibração da estrutura: Modelo A

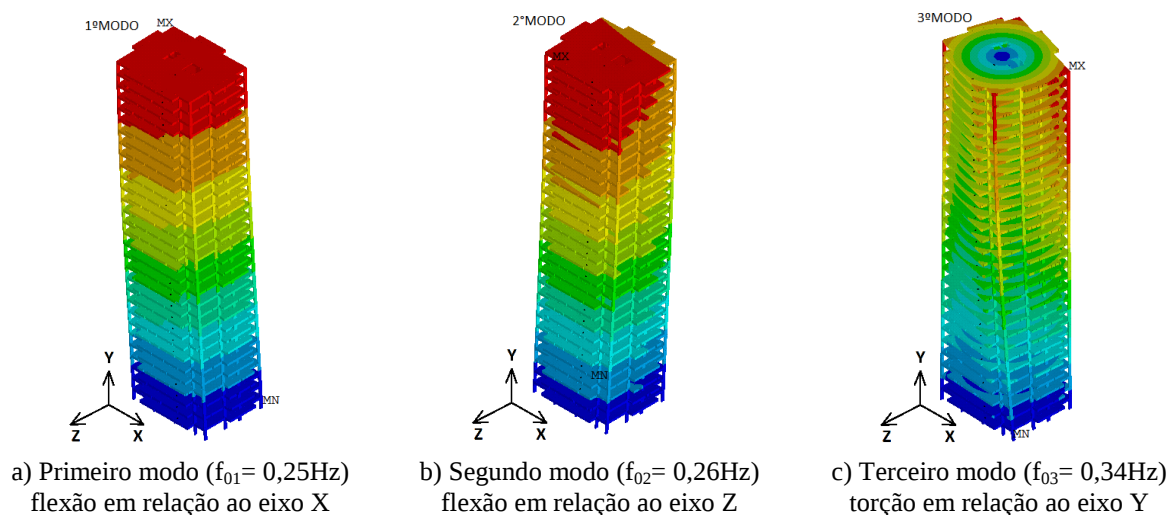


Figura 7. Modos de vibração da estrutura: Modelo B

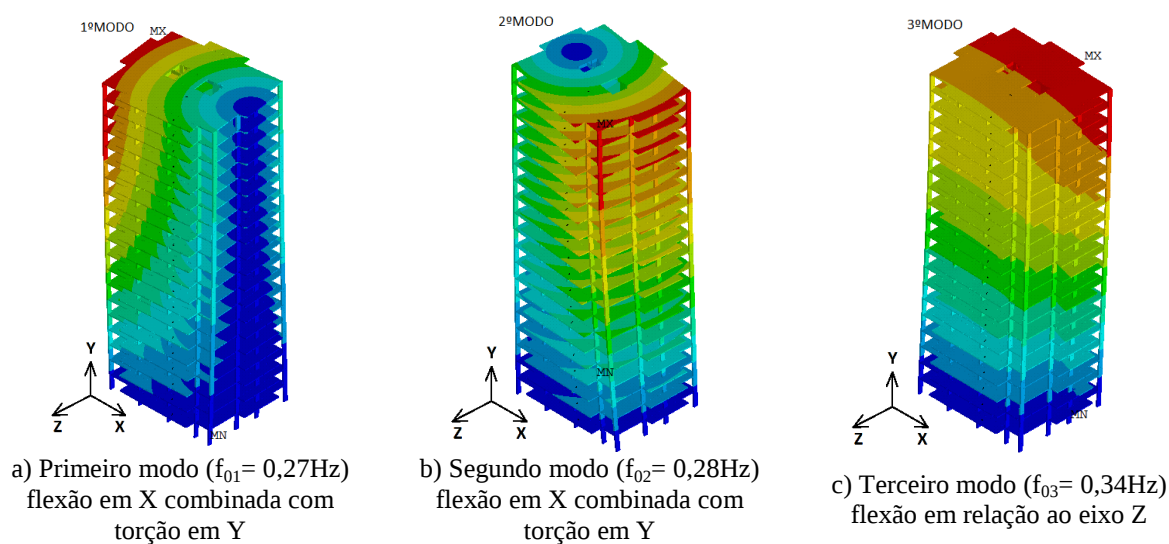


Figura 8. Modos de vibração da estrutura: Modelo C

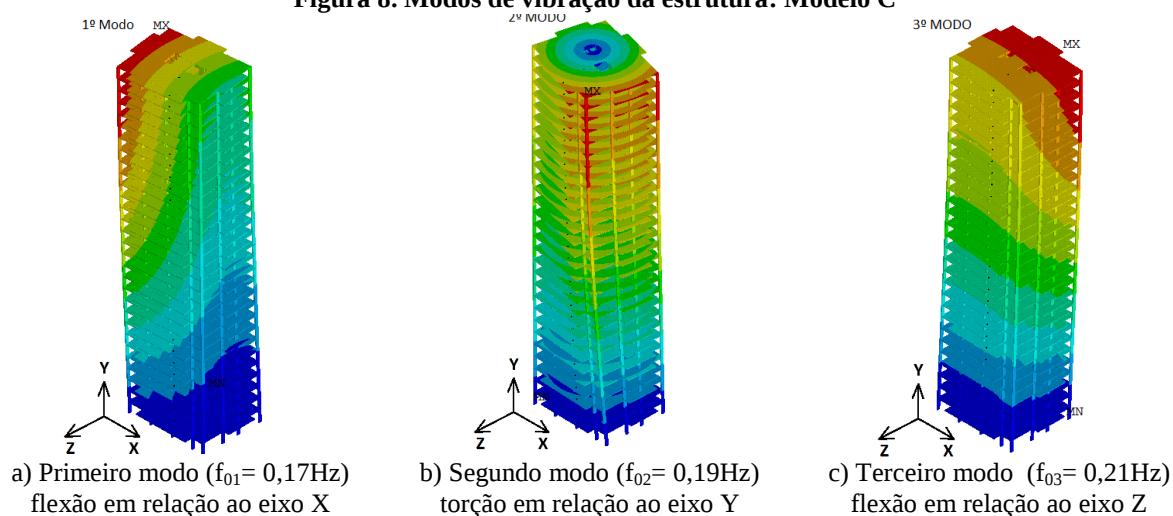


Figura 9. Modos de vibração da estrutura: Modelo D

Além das frequências naturais e modos de vibração determinadas através do ANSYS (2007), na Tabela 5 a seguir são apresentadas expressões analíticas que estimam a frequência fundamental de um edifício, a fim de compararmos os resultados manuais com os resultados numéricos. Nas duas equações analíticas apresentadas, as frequências dependem apenas da altura da edificação, não se levando em consideração o tipo de estrutura nem a rigidez.

Tabela 5. Frequências naturais para o 1º modo de vibração

Expressão Matemática utilizada por Normas ou Recomendações de Projeto		Valor da Frequência Fundamental			
		Modelo A	Modelo B	Modelo C	Modelo D
NBR 6123 (1988)	$f_1 = \frac{1}{0,05 + 0,015h}$	1,05 Hz	0,71 Hz	1,05 Hz	0,71 Hz
Bachmann et al. (1995)	$f_1(\text{Hz}) = 0,4 \left(\frac{100}{h} \right)^{1,6}$	0,90 Hz	0,47 Hz	0,90 Hz	0,47 Hz
ANSYS (2007)	Modelo Numérico	0,40 Hz	0,25 Hz	0,27 Hz	0,17 Hz

Considerando-se os quatro modelos de edifícios em estudo, os valores das frequências obtidas numericamente através do programa ANSYS (2007) apresentaram valores bem abaixo daqueles encontrados analiticamente, mostrando a discrepância entre o processo numérico mais refinado, via Método dos Elementos Finitos (MEF), e os métodos analíticos simplificados de projeto.

6 AVALIAÇÃO DO CONFORTO HUMANO

6.1 Frequência fundamental analítica obtida via NBR 6123 (1988)

Neste item apresenta-se a avaliação do conforto humano dos edifícios, utilizando-se a frequência fundamental de cada modelo estrutural investigado, com base no emprego da metodologia proposta na NBR 6123 (1988), de acordo com as Tabelas 6 a 9 e Fig. 10.

Tabela 6. Avaliação do conforto humano: f_{01} NBR 6123 (1988); Modelo A

PISO	z (m)	f_{01} (Hz)	u_{FL} (cm)	a_p (m/s ²)	NBR 6123 (1988)	Bachmann et al. (1995)	ISO 2631-1 (1997)	ISO 1037 (2007)
15º	45	1,05	0,76	0,3328	Não aceitável	Incômodo	Pouco confortável	Não aceitável
16º	48	1,05	0,79	0,3423	Não aceitável	Incômodo	Pouco confortável	Não aceitável
17º	51	1,05	0,80	0,3487	Não aceitável	Incômodo	Pouco confortável	Não aceitável
18º	54	1,05	0,81	0,3520	Não aceitável	Incômodo	Pouco confortável	Não aceitável
19º	57	1,05	0,81	0,3522	Não aceitável	Incômodo	Pouco confortável	Não aceitável
20º	60	1,05	0,80	0,3470	Não aceitável	Incômodo	Pouco confortável	Não aceitável

Tabela 7. Avaliação do conforto humano: f_{01} NBR 6123 (1988); Modelo B

PISO	z (m)	f_{01} (Hz)	u_{FL} (cm)	a_p (m/s ²)	NBR 6123 (1988)	Bachmann et al. (1995)	ISO 2631-1 (1997)	ISO 1037 (2007)
25°	75	0,71	2,38	0,4745	Não aceitável	Incômodo	Pouco confortável	Não aceitável
26°	78	0,71	2,41	0,4799	Não aceitável	Incômodo	Pouco confortável	Não aceitável
27°	81	0,71	2,43	0,4835	Não aceitável	Incômodo	Pouco confortável	Não aceitável
28°	84	0,71	2,44	0,4853	Não aceitável	Incômodo	Pouco confortável	Não aceitável
29°	87	0,71	2,44	0,4855	Não aceitável	Incômodo	Pouco confortável	Não aceitável
30°	90	0,71	2,43	0,4827	Não aceitável	Incômodo	Pouco confortável	Não aceitável

Tabela 8. Avaliação do conforto humano: f_{01} NBR 6123 (1988); Modelo C

PISO	z (m)	f_{01} (Hz)	u_{FL} (cm)	a_p (m/s ²)	NBR 6123 (1988)	Bachmann et al. (1995)	ISO 2631-1 (1997)	ISO 1037 (2007)
15°	45	1,05	2,45	1,0667	Não aceitável	Muito incômodo	Desconfortável	Não aceitável
16°	48	1,05	2,55	1,1116	Não aceitável	Muito incômodo	Desconfortável	Não aceitável
17°	51	1,05	2,64	1,1492	Não aceitável	Muito incômodo	Desconfortável	Não aceitável
18°	54	1,05	2,71	1,1797	Não aceitável	Muito incômodo	Desconfortável	Não aceitável
19°	57	1,05	2,77	1,2035	Não aceitável	Muito incômodo	Desconfortável	Não aceitável
20°	60	1,05	2,80	1,2202	Não aceitável	Muito incômodo	Desconfortável	Não aceitável

Tabela 9. Avaliação do conforto humano: f_{01} NBR 6123 (1988); Modelo D

PISO	z (m)	f_{01} (Hz)	u_{FL} (cm)	a_p (m/s ²)	NBR 6123 (1988)	Bachmann et al. (1995)	ISO 2631-1 (1997)	ISO 1037 (2007)
25°	75	0,71	7,08	1,4098	Não aceitável	Muito incômodo	Desconfortável	Não aceitável
26°	78	0,71	7,20	1,4339	Não aceitável	Muito incômodo	Desconfortável	Não aceitável
27°	81	0,71	7,30	1,4536	Não aceitável	Muito incômodo	Desconfortável	Não aceitável
28°	84	0,71	7,38	1,4690	Não aceitável	Muito incômodo	Desconfortável	Não aceitável
29°	87	0,71	7,44	1,4808	Não aceitável	Intolerável	Desconfortável	Não aceitável
30°	90	0,71	7,48	1,4885	Não aceitável	Intolerável	Desconfortável	Não aceitável

Ao utilizar o valor das frequências fundamentais de cada edifício investigado neste trabalho de pesquisa, obtidas através da equação proposta na NBR 6123 (1988), os quatro modelos apresentaram índices desfavoráveis em relação ao conforto humano. Pode-se observar que os valores das acelerações máximas, mesmo em pavimentos inferiores, foram superiores ao limite estabelecido pela NBR 6123 [0,1m/s²] nos quatro modelos investigados, de acordo com as Tabelas 6 a 9 e Fig. 10.

Nos Modelos C e D, foram encontrados valores das acelerações de pico que superaram o limite de “Muito incômodo” [0,49m/s²], proposto por Bachmann et al. (1995), e em particular o Modelo D, apresentou valores das acelerações máximas no 29° e 30° pavimentos que superaram o limite “Intolerável” [1,47m/s²]. Isso demonstra a importância da presença das vigas de periferia nos Modelos A e B, que apresentaram acelerações significativamente inferiores as acelerações obtidas nos Modelos C e D, que não possuem as vigas periféricas.

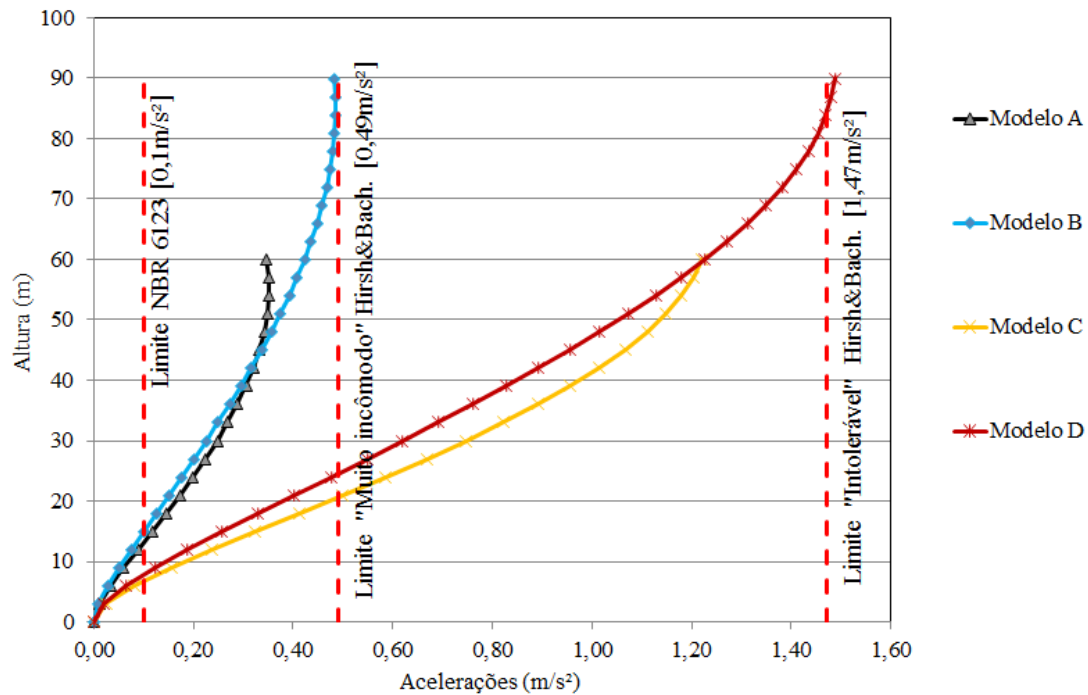


Figura 10. Variação das acelerações de pico: frequências calculadas via NBR 6123 (1988)

6.2 Frequência fundamental analítica obtida via Bachmann et al. (1995)

Neste item do trabalho são analisadas as questões do conforto humano utilizando-se a frequência fundamental de cada modelo investigado, calculada via equação analítica proposta por Bachmann et al. (1995), conforme apresentado nas Tabelas 10 a 13 e Fig. 11.

Tabela 10. Avaliação do conforto humano; f_{01} Bachmann et al. (1995): Modelo A

PISO	z (m)	f_{01} (Hz)	u_{FL} (cm)	a_p (m/s²)	NBR 6123 (1988)	Bachmann et al. (1995)	ISO 2631-1 (1997)	ISO 1037 (2007)
15°	45	0,90	0,76	0,2445	Não aceitável	Incômodo	Confortável	Não aceitável
16°	48	0,90	0,79	0,2515	Não aceitável	Incômodo	Confortável	Não aceitável
17°	51	0,90	0,80	0,2562	Não aceitável	Incômodo	Confortável	Não aceitável
18°	54	0,90	0,81	0,2586	Não aceitável	Incômodo	Confortável	Não aceitável
19°	57	0,90	0,81	0,2587	Não aceitável	Incômodo	Confortável	Não aceitável
20°	60	0,90	0,80	0,2550	Não aceitável	Incômodo	Confortável	Não aceitável

Tabela 11. Avaliação do conforto humano; f_{01} Bachmann et al. (1995): Modelo B

PISO	z (m)	f_{01} (Hz)	u_{FL} (cm)	a_p (m/s²)	NBR 6123 (1988)	Bachmann et al. (1995)	ISO 2631-1 (1997)	ISO 1037 (2007)
25°	75	0,47	2,38	0,2079	Não aceitável	Incômodo	Confortável	Não aceitável
26°	78	0,47	2,41	0,2103	Não aceitável	Incômodo	Confortável	Não aceitável
27°	81	0,47	2,43	0,2119	Não aceitável	Incômodo	Confortável	Não aceitável
28°	84	0,47	2,44	0,2127	Não aceitável	Incômodo	Confortável	Não aceitável
29°	87	0,47	2,44	0,2128	Não aceitável	Incômodo	Confortável	Não aceitável
30°	90	0,47	2,43	0,2115	Não aceitável	Incômodo	Confortável	Não aceitável

Tabela 12. Avaliação do conforto humano; f_{01} Bachmann et al. (1995): Modelo C

PISO	z (m)	f_{01} (Hz)	u_{FL} (cm)	a_p (m/s ²)	NBR 6123 (1988)	Bachmann et al. (1995)	ISO 2631-1 (1997)	ISO 1037 (2007)
15°	45	0,90	2,45	0,7837	Não aceitável	Muito incômodo	Quase desconfortável	Não aceitável
16°	48	0,90	2,55	0,8167	Não aceitável	Muito incômodo	Quase desconfortável	Não aceitável
17°	51	0,90	2,64	0,8443	Não aceitável	Muito incômodo	Quase desconfortável	Não aceitável
18°	54	0,90	2,71	0,8667	Não aceitável	Muito incômodo	Quase desconfortável	Não aceitável
19°	57	0,90	2,77	0,8842	Não aceitável	Muito incômodo	Quase desconfortável	Não aceitável
20°	60	0,90	2,80	0,8965	Não aceitável	Muito incômodo	Quase desconfortável	Não aceitável

Tabela 13. Avaliação do conforto humano; f_{01} Bachmann et al. (1995): Modelo D

PISO	z (m)	f_{01} (Hz)	u_{FL} (cm)	a_p (m/s ²)	NBR 6123 (1988)	Bachmann et al. (1995)	ISO 2631-1 (1997)	ISO 1037 (2007)
25°	75	0,47	7,08	0,6178	Não aceitável	Muito incômodo	Pouco confortável	Não aceitável
26°	78	0,47	7,20	0,6283	Não aceitável	Muito incômodo	Pouco confortável	Não aceitável
27°	81	0,47	7,30	0,6370	Não aceitável	Muito incômodo	Quase desconfortável	Não aceitável
28°	84	0,47	7,38	0,6437	Não aceitável	Muito incômodo	Quase desconfortável	Não aceitável
29°	87	0,47	7,44	0,6489	Não aceitável	Muito incômodo	Quase desconfortável	Não aceitável
30°	90	0,47	7,48	0,6523	Não aceitável	Muito incômodo	Quase desconfortável	Não aceitável

Os valores das frequências fundamentais dos edifícios obtidas de acordo com a equação proposta por Bachmann et al. (1995), quando comparadas com aquelas obtidas de acordo com NBR 6123 (1988), são, para os Modelos A e C, 14,3% inferiores, e, para os Modelos B e D, 33,8% inferiores. Isso gerou valores de acelerações máximas para os Modelos A e B, 26,53% inferiores, e para os Modelos B e D, 56,2% inferiores. Nenhum dos quatro Modelos estudados obtiveram valores de acelerações próximas ao limite “Intolerável” [1,47m/s²], de acordo com as Tabelas 10 a 13 e Fig. 11.

Porém, mesmo assim, os quatro modelos estruturais apresentaram índices de conforto humano desfavoráveis, inclusive em pavimentos inferiores, Tabelas 10 a 13 e Fig. 11. Cabe ressaltar, também, que os valores das acelerações máximas obtidas nos Modelos A e C foram superiores aos encontrados nos Modelos B e D, considerando os mesmos pavimentos, conforme apresentado nas Tabelas 10 a 13 e Fig. 11.

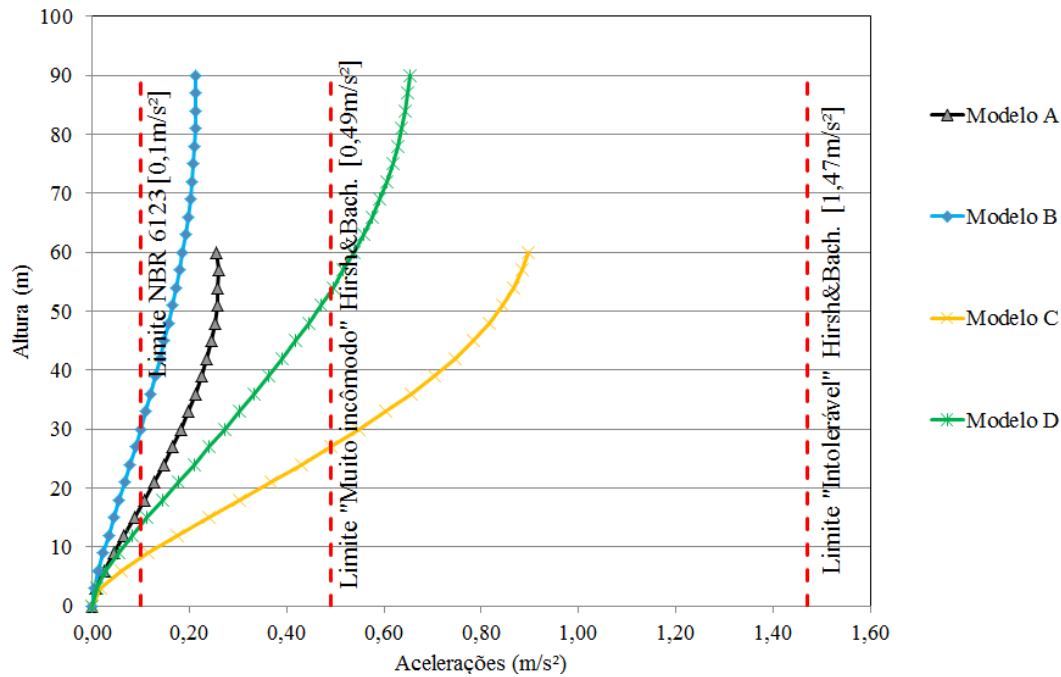


Figura 11. Variação das acelerações de pico: frequências calculadas via Bachmann et al. (1995)

6.3 Frequência fundamental numérica obtida via ANSYS (2007)

Neste item são avaliados os níveis de conforto humano dos edifícios investigados, utilizando-se a frequência fundamental obtida numericamente, via análise modal, por meio do emprego do programa ANSYS (ANSYS, 2007), de acordo com as Tabelas 14 a 17 e Fig. 12.

Tabela 14. Avaliação do conforto humano; f_{01} ANSYS (2007): Modelo A

PISO	z (m)	f_{01} (Hz)	u_{FL} (cm)	a_p (m/s ²)	NBR 6123 (1988)	Bachmann et al. (1995)	ISO 2631-1 (1997)	ISO 1037 (2007)
15°	45	0,40	0,76	0,0483	Aceitável	Imperceptível	Confortável	Aceitável
16°	48	0,40	0,79	0,0497	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável
17°	51	0,40	0,80	0,0506	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável
18°	54	0,40	0,81	0,0511	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável
19°	57	0,40	0,81	0,0511	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável
20°	60	0,40	0,80	0,0504	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável

Tabela 15. Avaliação do conforto humano; f_{01} ANSYS (2007): Modelo B.

PISO	z (m)	f_{01} (Hz)	u_{FL} (cm)	a_p (m/s ²)	NBR 6123 (1988)	Bachmann et al. (1995)	ISO 2631-1 (1997)	ISO 1037 (2007)
25°	75	0,25	2,38	0,0588	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável
26°	78	0,25	2,41	0,0595	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável
27°	81	0,25	2,43	0,0600	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável
28°	84	0,25	2,44	0,0602	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável
29°	87	0,25	2,44	0,0602	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável
30°	90	0,25	2,43	0,0598	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável

Tabela 16. Avaliação do conforto humano; f_{01} ANSYS (2007): Modelo C

PISO	z (m)	f_{01} (Hz)	u_{FL} (cm)	a_p (m/s ²)	NBR 6123 (1988)	Bachmann et al. (1995)	ISO 2631-1 (1997)	ISO 1037 (2007)
15°	45	0,27	2,45	0,0705	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável
16°	48	0,27	2,55	0,0735	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável
17°	51	0,27	2,64	0,0760	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável
18°	54	0,27	2,71	0,0780	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável
19°	57	0,27	2,77	0,0796	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável
20°	60	0,27	2,80	0,0807	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável

Tabela 17. Avaliação do conforto humano; f_{01} ANSYS (2007): Modelo D

PISO	z (m)	f_{01} (Hz)	u_{FL} (cm)	a_p (m/s ²)	NBR 6123 (1988)	Bachmann et al. (1995)	ISO 2631-1 (1997)	ISO 1037 (2007)
25°	75	0,17	7,08	0,0808	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável
26°	78	0,17	7,20	0,0822	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável
27°	81	0,17	7,30	0,0833	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável
28°	84	0,17	7,38	0,0842	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável
29°	87	0,17	7,44	0,0849	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável
30°	90	0,17	7,48	0,0853	Aceitável	Perceptível	Confortável	Aceitável

O valor da frequência fundamental para cada modelo de edificação investigada, calculada através dos modelos numéricos computacionais utilizando o programa computacional ANSYS (ANSYS, 2007), apresentou os menores valores. Para o Modelo A, considerando a frequência fundamental numérica $f_{01}=0,40$ Hz, é 38% do valor obtido através da equação proposta pela NBR 6123 (1988). Para o modelo B, é de 35%, para o modelo C, é de 25% e para o modelo D, é de 23%. Por isso, como se percebe, adotando esses valores para as frequências fundamentais de cada edifício investigado, os valores das acelerações máximas encontrados são inferiores aos limites estabelecidos no que concerne ao conforto humano para os quatro modelos estruturais em estudo, conforme apresentado nas Tabelas 14 a 17 e Fig. 12.

Comparando-se os Modelos A e C, considerando apenas as frequências numéricas computacionais, o Modelo A apresentou aceleração na resposta flutuante no 20° pavimento igual a $0,0504$ m/s², enquanto que o Modelo C, apresentou $0,0807$ m/s², sendo, portanto, 60% superior. Comparando os Modelos B e C, o Modelo B apresentou, na resposta flutuante, no 30° pavimento, aceleração igual a $0,0598$ m/s², enquanto que o Modelo D apresentou $0,0853$ m/s², sendo, assim, 42,6% superior. Tal fato mostra que, mesmo considerando as frequências naturais obtidas numericamente, via Método dos Elementos Finitos (MEF) (ANSYS, 2007), em que os modelos menos rígidos obtiveram valores de frequências inferiores, os valores das acelerações máximas nos modelos menos rígidos são significativamente superiores.

Cabe ressaltar, ainda, que considerando-se os valores numéricos das frequências naturais dos edifícios investigados e o limite de conforto humano da NBR 6123 (1988), todos os modelos estruturais atendem aos critérios de conforto humano. Tomando-se como base, também, outras normas e recomendações de projeto [ISO 2631-1 (1997); ISO 1037 (2007)], o conforto humano também é atendido (Bastos, 2015).

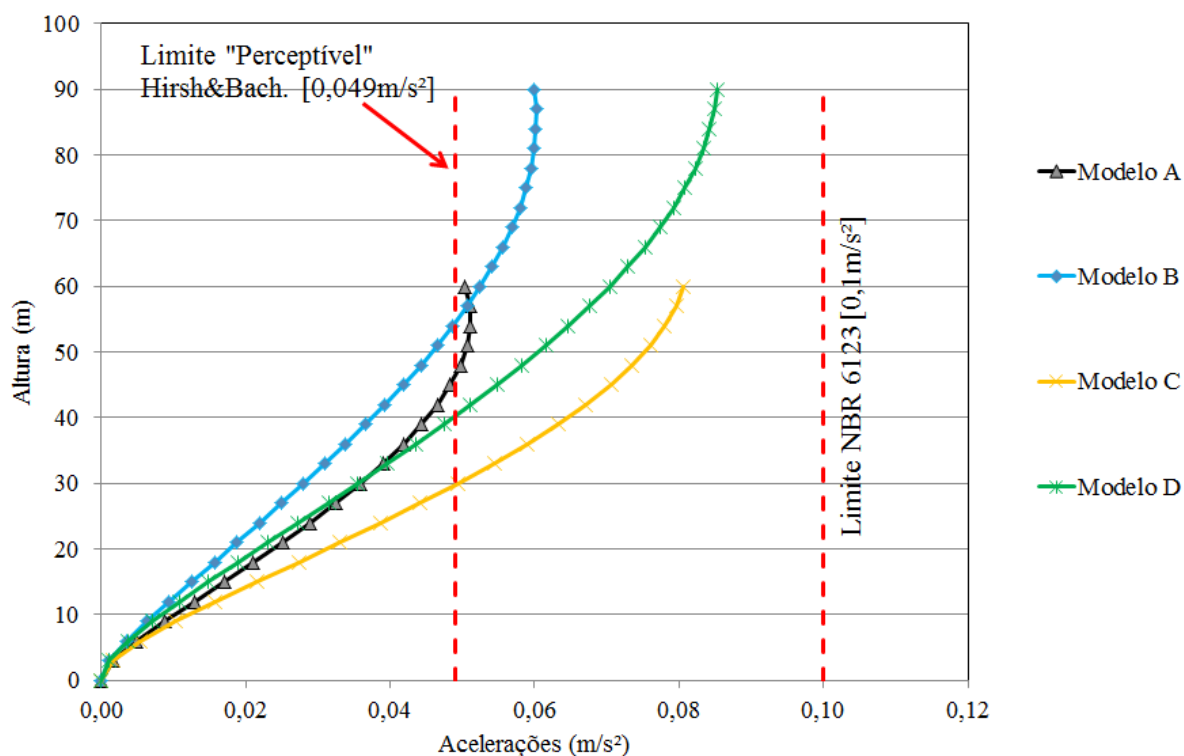


Figura 12. Variação das acelerações de pico: frequências numéricas calculadas via ANSYS (2007)

Finalmente, no que tange a variação dos valores das acelerações devido à resposta dinâmica flutuante para os quatro modelos estruturais em estudo, calculados em função das frequências naturais numéricas, apesar destes valores atingirem o limite de “perceptível” Bachmann et al. (1995), os mesmos não atingem o valor limite estabelecido pela NBR 6123 (1988) ($a_{lim} = 0,10 m/s^2$), como ilustrado na Fig.12.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de pesquisa investigou o comportamento de quatro modelos estruturais de edifícios altos de concreto armado, com base no estudo da variação entre o número de pavimentos e a quantidade de vigas existentes em cada modelo, objetivando-se verificar quais os efeitos que estas variações podem vir a gerar sobre os níveis de conforto humano.

No que diz respeito à análise de autovalores (frequências naturais) e de autovetores (modos de vibração), foi observado que os modelos de edifícios analisados apresentaram a 1ª frequência natural (frequência fundamental) inferiores a 0,4Hz ($f_{01} < 0,4Hz$). Com relação aos Modelos A e C, que possuem a mesma altura ($H = 60m$), o Modelo Estrutural C apresentou uma frequência fundamental ($f_{01C} = 0,27Hz$) com um valor da ordem de 67% da frequência fundamental do Modelo A ($f_{01A} = 0,40Hz$), evidenciando que o valor da frequência fundamental destes modelos analisados está intimamente ligado à rigidez estrutural, devido à eliminação das vigas de periferia no Modelo C. Tal fato ocorre exatamente da mesma maneira em relação aos Modelos B e D ($H = 90m$: $f_{01D} = 0,17Hz < f_{01B} = 0,25Hz \Rightarrow 68\%$). Por outro lado, no que tange a análise dos modos de vibração, foi possível verificar que os quatro modelos estruturais em estudo apresentam, basicamente, o primeiro modo de vibração com preponderância dos efeitos de flexão em torno do eixo global X.

O valor da frequência fundamental de cada modelo estrutural também foi calculado com base no emprego de soluções analíticas simplificadas de projeto, onde foi possível verificar uma diferença significativa entre os valores destas frequências obtidos entre as soluções analíticas e a modelagem mais refinada, via Método dos Elementos Finitos (MEF). Por exemplo, o Modelo A apresentou uma frequência fundamental numérica igual a 0,40Hz ($f_{01A}=0,40\text{Hz}$), enquanto que o valor fornecido pela expressão simplificada proposta pela norma NBR 6123 (1988) é igual a 1,05 Hz ($f_{01}=1,05\text{Hz}$), portanto 162% superior. Esta conclusão é bastante relevante e influencia as análises de conforto humano dos edifícios analisados. Especial atenção deve ser dada por parte dos projetistas de estruturas ao utilizar expressões simplificadas de projeto para o cálculo de frequências naturais, que podem conduzir a resultados bastante distintos e não condizentes com a realidade prática de projeto.

Finalmente, deve-se chamar a atenção para o fato de que quando os valores numéricos das frequências naturais dos edifícios, obtidos via modelagem mais refinada em elementos finitos, são considerados para a avaliação do conforto humano, todos os modelos estruturais atendem aos critérios de conforto humano. Cabe ressaltar que os projetistas estruturais devem ser alertados, também, no que diz respeito a alterações significativas da rigidez global dos edifícios, pois tal fato pode vir a alterar substancialmente o conforto humano dos usuários.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho de pesquisa agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país: CAPES, CNPq e FAPERJ.

REFERÊNCIAS

ANSYS Swanson Analysis Systems, Inc., 2007. P. O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065. Release 11.0, SP1 UP20070830, ANSYS, Inc. is a UL registered ISO 9001:2000 Company. Products ANSYS Academic Research, Using FLEXlm v10.8.0.7 build 26147, Customer 00489194.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

Bachmann, H., W.J Ammann, F. Deischl, J. Eisenmann, J. Floegl, G.H. Hirsch, et al.,1995. “*Vibration problems in structures - practical guidelines*”, Basel (Switzerland): Institut für Baustatik und Konstruktion, Birkhäuser.

Bastos, L. de S. *Estudo do comportamento estrutural e análise de conforto humano de edifícios de concreto armado*, 2015. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Faculdade de Engenharia, FEN, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

Chavez, E. S. *Análise estrutural de edifício alto submetido às pressões flutuantes induzidas pela ação do vento*, 2006. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte/MG, Brasil.

Gruhn, S. *Avaliação do conforto humano em sistemas estruturais submetidos a vibrações resultantes da ação do vento*, 2007. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo/RS, Brasil.

International Organization for Standardization, 2007. ISO 10137: Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations, Switzerland.

International Organization for Standardization, 1997. ISO 2631-1: Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements, Switzerland.