



## **MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DINÂMICO E AVALIAÇÃO DE CONFORTO HUMANO DE EDIFÍCIOS SUBMETIDOS À AÇÃO HUMANA RÍTMICA SOBRE OS PISOS**

**Jefferson Viana Aguiar**

jefferson.docm@gmail.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**

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

**Resumo:** Este trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento dinâmico dos pisos de um edifício misto (aço-concreto) sob a ação de cargas provenientes das atividades humanas rítmicas, com subsequente avaliação do conforto humano. Esse tipo de avaliação se tornou necessário devido a vibrações excessivas decorrentes da concepção de sistemas estruturais cada vez mais esbeltos, implicando em baixos níveis de amortecimento e frequências naturais cada vez mais baixas, de tal forma que as faixas de frequência das excitações associadas às atividades humanas rítmicas possam causar o efeito de ressonância na estrutura. O modelo estrutural investigado baseia-se em um edifício misto (aço-concreto) de vinte andares, no qual três pisos foram escolhidos para serem submetidos a atividades humanas rítmicas. A modelagem numérica edifício investigado foi realizada com base no emprego do programa ANSYS e foram utilizadas técnicas de discretização por meio do método dos elementos finitos (MEF). As cargas aplicadas sobre os pisos, oriundas basicamente de atividades aeróbicas e saltos coordenados, são simuladas através de três modelos de carregamentos dinâmicos distintos. A resposta estrutural dinâmica dos pisos investigados foi obtida em termos dos valores dos deslocamentos e acelerações máximas (acelerações de pico), e comparada com os limites recomendados por critérios e normas de projeto. Os resultados obtidos indicam que a resposta dinâmica dos pisos viola os critérios de projeto relativos ao conforto humano e apontam para níveis de vibrações excessivas para os casos de carregamentos dinâmicos investigados, implicando na não indicação do edifício para atividades humanas rítmicas.

**Palavras-chave:** Edifícios mistos, Atividades humanas rítmicas, Conforto humano.

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, com o advento de materiais mais leves e de alta resistência, o aumento do conhecimento das propriedades dos materiais, o aprimoramento dos processos de projeto estrutural devido ao uso de computadores e softwares cada vez mais poderosos e a modernização de técnicas construtivas, tornou-se possível a execução de projetos arrojados com estruturas mais esbeltas e a utilização de grandes vãos livres. Tal fato faz com que os pisos tenham baixas frequências naturais de vibração. Além disso, observa-se a concepção de estruturas com baixo amortecimento estrutural, que está relacionado com os tipos de materiais empregados, construção, a presença de elementos não estruturais, idade e qualidade de construção (Campista, 2015; Campista et al., 2015; Gaspar e da Silva, 2015; Aguiar, 2017).

Assim, tendo em vista a multifuncionalidade que o mercado tem exigido das edificações atualmente, no qual se tem construções destinadas a residências, escritórios e academias e, às vezes, tudo junto em um mesmo edifício. Aliam-se a isto vãos maiores, baixo amortecimento e alta flexibilidade, que tem deixado os pisos mais susceptíveis a vibrações excessivas oriundas, principalmente, de atividades humanas, tais como: caminhada, saltos, dança, ginástica rítmica, entre outras, gerando perturbações ao usuário no que tange ao conforto humano. Isto pode ser explicado pelo fato destas atividades apresentarem um dos seus harmônicos de frequências próximas a frequência natural da maioria das estruturas, de 4 a 8 Hz (Campista, 2015; Campista et al., 2015; Gaspar e da Silva, 2015; Aguiar, 2017).

Vários autores têm estudado sobre vibrações de pisos quando submetidos a atividades rítmicas, a começar pelo trabalho de Costa-Neves et al. (2014) que aferiram, utilizando-se de dois modelos de carregamento dinâmico para excitação humana rítmica, o comportamento dos pisos um edifício misto (aço-concreto) de três pavimentos, com os vãos das lajes variando de 4 a 10 metros. Os resultados obtidos, no que tange acelerações de pico e deslocamentos, foram avaliados e comparados conforme diversas normas e critérios de projeto. Os vãos onde eram realizadas as atividades e, inclusive, os vão adjacentes, apresentaram valores que ultrapassavam os valores recomendados pelas normas.

Gaspar e da Silva (2015) analisaram um piso misto (aço-concreto) submetido a atividades humanas rítmicas. O modelo estrutural tratava-se de um piso misto de 10 x 10 m de pavimento único. Os autores também realizaram uma vasta pesquisa sobre os modelos de carregamentos dinâmicos, sendo estudados quatro modelos. Foram observados altos níveis de vibração no piso devido a atividades rítmicas, superando as recomendações de norma. Como principal contribuição, os autores apontaram que o modelo proposto por Faisca (2003) foi considerado o mais econômico do ponto de vista de projeto.

Campista (2015), em sua dissertação, avaliou o comportamento dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) sob a ação de cargas provenientes da prática de ginástica aeróbica, sob o ponto de vista do conforto humano. O modelo estrutural investigado baseou-se em um piso misto (aço-concreto), que possui dimensões totais de 40 m x 40 m (eixo a eixo de colunas), totalizando uma área de 1.600 m<sup>2</sup>, submetido a aulas de ginástica aeróbica. A autora abordou os principais aspectos sob a ótica da vibração de pisos e conforto humano das diversas normas e guias de projetos nacionais e internacionais. Em seu estudo, a autora utilizou dois modelos de carregamentos para simular as pessoas praticando atividades aeróbicas, um proposto por Faisca (2003) e o outro por Ellis e Ji (2004) apud Smith et al. (2009). A autora também variou o número e o posicionamento das pessoas no piso. Por fim, a autora concluiu que o modelo proposto por Faisca (2003) é mais racional e econômico; entretanto, em seu estudo, os dois ultrapassaram os limites de aceleração recomendados e indicaram com clareza níveis de vibrações extremamente desconfortáveis.

Gaspar et al. (2016) avaliaram um piso misto (aço-concreto) de 40 m x 40 m submetido à atividade aeróbica, considerando o modelo de carregamento proposto por Faisca (2003). Além disso, para tentar mitigar as vibrações em excesso apresentadas pelo modelo estrutural, o autor propôs a utilização de 16 atenuadores dinâmicos sintonizados (ADS), os quais apresentaram, no pior caso estudado em seu trabalho, uma redução de 68 %, que foi considerada, pelo autor, como satisfatória no que tange ao conforto humano de acordo com as normas vigentes.

Da Silva et al. (2016) investigou o comportamento dinâmico dos pisos de 20 m x 20 m de um edifício de três pavimentos quando submetidos a atividades humanas rítmicas (aeróbica). Para tal, foram utilizados dois modelos de carregamentos e feito um estudo paramétrico destes dois modelos. Diversos critérios de avaliação do conforto humano foram considerados, como aceleração de pico, acelerações filtradas RMS e valores de dose de vibração (VDV). Níveis incômodos de vibração foram encontrados na investigação para os dois modelos de carregamentos, sendo observada, inclusive, a transmissão de tais níveis de vibração para os pavimentos superiores e inferiores.

Assim sendo, o objetivo central deste trabalho de pesquisa é o estudo do comportamento estrutural dinâmico e a avaliação do conforto humano dos pisos de um edifício misto (aço-concreto), composto por 20 pavimentos, quando submetido à ação de cargas provenientes de atividades humanas rítmicas (saltos à vontade e ginástica aeróbica) sobre os pisos, onde são comparados os modelos de carregamento adotados e a modelagem do edifício como um todo com a modelagem de apenas um pavimento isolado.

As conclusões alcançadas ao longo da investigação versam acerca dos níveis de conforto humano do modelo estrutural investigado em relação à vibração dos pisos de edifício. A motivação para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa diz respeito à consideração dos efeitos dinâmicos sobre o projeto de sistemas estruturais de edifícios, pois é uma questão relevante e não deve ser negligenciada. Pode-se citar também que níveis de vibrações excessivas são oriundos da concepção de sistemas estruturais cada vez mais flexíveis e esbeltos, implicando baixos níveis de amortecimento estrutural e frequências naturais cada vez mais baixas, de tal maneira que as faixas de frequência das excitações associadas às atividades humanas rítmicas podem vir a causar o efeito de ressonância, podendo gerar altos níveis de desconforto humano.

## 2 MODELAGEM DAS ATIVIDADES HUMANAS RÍTMICAS

Neste trabalho foram utilizados três modelos de carregamento distintos para a modelagem de atividades humanas rítmicas, sendo um acadêmico (Faisca, 2003) e dois de guias de projeto (Smith et al., 2009; e Murray et al., 2016), considerando dois tipos de atividade: aeróbica e saltos. Cabe ressaltar que os três modelos de carregamento consideram os efeitos de multidão na elaboração de seus parâmetros. A representação matemática do modelo de carregamento dinâmico I (MC-I) proposto por Faisca (2003), utilizando-se da função *Hanning*, é descrita a seguir:

$$F(t) = CD \left\{ K_p P \left[ 0,5 - 0,5 \cos \left( \frac{2\pi}{T_c} t \right) \right] \right\} \quad \text{para } t \leq T_c \quad (1)$$

$$F(t) = 0. \quad \text{para } T_c < t \leq T.$$

Onde:  $F(t)$ : representação matemática do carregamento no tempo ( $N$ );  $CD$ : coeficiente de defasagem;  $K_p$ : coeficiente de impacto;  $P$ : peso da pessoa ( $N$ );  $T$ : período da atividade ( $s$ );  $T_c$ : período de contato da atividade ( $s$ ); e  $t$ : tempo ( $s$ ).

Estão representados, conforme observado na Tabela 1, os valores médios e desvios-padrão dos parâmetros  $T$ ,  $T_c$  e  $K_p$ , referentes à atividade de salto à vontade, de ginástica aeróbica e de torcida.

**Tabela 1. Parâmetros para representação de atividades rítmicas (FAISCA, 2003)**

| Atividade          | $f_p$ (Hz) | $T$ (s)         | $T_c$ (s)       | $K_p$           |
|--------------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Saltos à vontade   | 1,70-3,45  | $0,44 \pm 0,15$ | $0,32 \pm 0,09$ | $3,17 \pm 0,58$ |
| Ginástica aeróbica | 1,89-2,86  | $0,44 \pm 0,09$ | $0,34 \pm 0,09$ | $2,78 \pm 0,60$ |
| Show/torcida       | 2,50-2,94  | $0,37 \pm 0,03$ | $0,33 \pm 0,09$ | $2,41 \pm 0,51$ |

O modelo de carregamento dinâmico II (MC-II) proposto de acordo com o guia de projeto do *The Steel Construction Institute* (SCI) é baseado no trabalho de Ellis e Ji (2004) apud Smith et al. (2009), os quais realizaram um estudo experimental de carregamentos gerados por multidões em atividades humanas rítmicas. Seu modelo matemático, primeiramente para excitações considerando-se apenas pequenos grupos, é descrito na Eq. 2, de acordo com Smith et al. (2009), e seus parâmetros estão apresentados na Tabela 2. O parâmetro  $\alpha_c$  é a relação entre o período de contato da atividade e o período total.

$$F(t) = q \left[ 1 + \sum_{h=1}^H \alpha_h \sin(2\pi h f_p t + \phi_h) \right]. \quad (2)$$

Onde:  $F(t)$ : função do carregamento dinâmico (N);  $q$ : peso de uma pessoa (N);  $\alpha_h$ : coeficiente de Fourier associado ao  $h^{\text{ésimo}}$  termo;  $H$ : número de termos de Fourier;  $\phi_h$ : diferença de fase associada ao  $h^{\text{ésimo}}$  termo;  $f_p$ : frequência do passo da atividade (Hz); e  $t$ : tempo (s).

**Tabela 2. Valores dos coeficientes de Fourier e diferença de fase para individuais**

| $\alpha_c$ | Tipo de atividade | Símbolo    | $h$      |           |          |           |           |          |
|------------|-------------------|------------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|
|            |                   |            | 1        | 2         | 3        | 4         | 5         | 6        |
| 2/3        | Baixo impacto     | $\alpha_h$ | 9/7      | 9/55      | 2/15     | 9/247     | 9/391     | 2/63     |
|            |                   | $\phi_h$   | $-\pi/6$ | $-5\pi/6$ | $-\pi/2$ | $-\pi/6$  | $-5\pi/6$ | $-\pi/2$ |
| 1/2        | Alto impacto      | $\alpha_h$ | $\pi/2$  | 2/3       | 0        | 2/15      | 0         | 2/35     |
|            |                   | $\phi_h$   | 0        | $-\pi/2$  | 0        | $-\pi/2$  | 0         | $-\pi/2$ |
| 1/3        | Saltos normais    | $\alpha_h$ | 9/5      | 9/7       | 2/3      | 9/55      | 9/91      | 2/15     |
|            |                   | $\phi_h$   | $\pi/6$  | $-\pi/6$  | $-\pi/2$ | $-5\pi/6$ | $-\pi/6$  | $-\pi/2$ |

Conforme a realização dos testes experimentais, os três primeiros coeficientes de Fourier ( $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$ ) em função do número ( $p$ ) de pessoas foram obtidos, os quais estão apresentados nas Eq. 3, 4 e 5. Segundo o Smith et al. (2009), este parâmetros devem ser considerados para grandes grupos realizando atividades rítmicas e, quando houver essa consideração, deve-se utilizar a diferença de fase para o caso de saltos normais.

$$\alpha_1 = 1,61p^{-0,082}. \quad (3)$$

$$\alpha_2 = 0,94p^{-0,24}. \quad (4)$$

$$\alpha_3 = 0,44p^{-0,31}. \quad (5)$$

O modelo de carregamento dinâmico III (MC-III), apresentado pelo guia de projeto do *American Institute of Steel Construction* (Murray et al., 2016), em sua segunda versão, é descrito conforme Eq. 6 e se aproxima do proposto na Eq. 2, porém com inversão de sinal no

ângulo de fase e a eliminação do termo constante que, segundo o guia, representa a força estática e não é usado na previsão da resposta estrutural vibracional.

$$F(t) = \sum_{h=1}^H Q \alpha_h \sin(2\pi h f_p t - \phi_h). \quad (6)$$

Onde:  $F(t)$ : função do carregamento dinâmico (N);  $Q$ : peso de uma pessoas (N);  $\alpha_h$ : coeficiente de Fourier do  $h^{\text{ésimo}}$  termo;  $H$ : número de termos de Fourier;  $\phi_h$ : diferença de fase para o  $h^{\text{ésimo}}$  termo;  $f_p$ : frequência da atividade (Hz); e  $t$ : tempo (s).

### 3 SISTEMA ESTRUTURAL INVESTIGADO

O sistema estrutural, conforme descrito na Fig. 1, trata de um exemplo típico de um edifício comercial misto (aço-concreto) com vinte pavimentos, pé-direito de 3,30 metros, com núcleo interno. A estrutura do edifício é constituída por perfis laminados do padrão europeu, com as dimensões e as propriedades geométricas conforme descritas na Tabela 4, ressaltando-se a redução da rigidez dos pilares a partir do 11º pavimento, sendo utilizado o perfil HE450A a partir deste pavimento. As lajes maciças são de concreto armado na espessura de 15 cm.

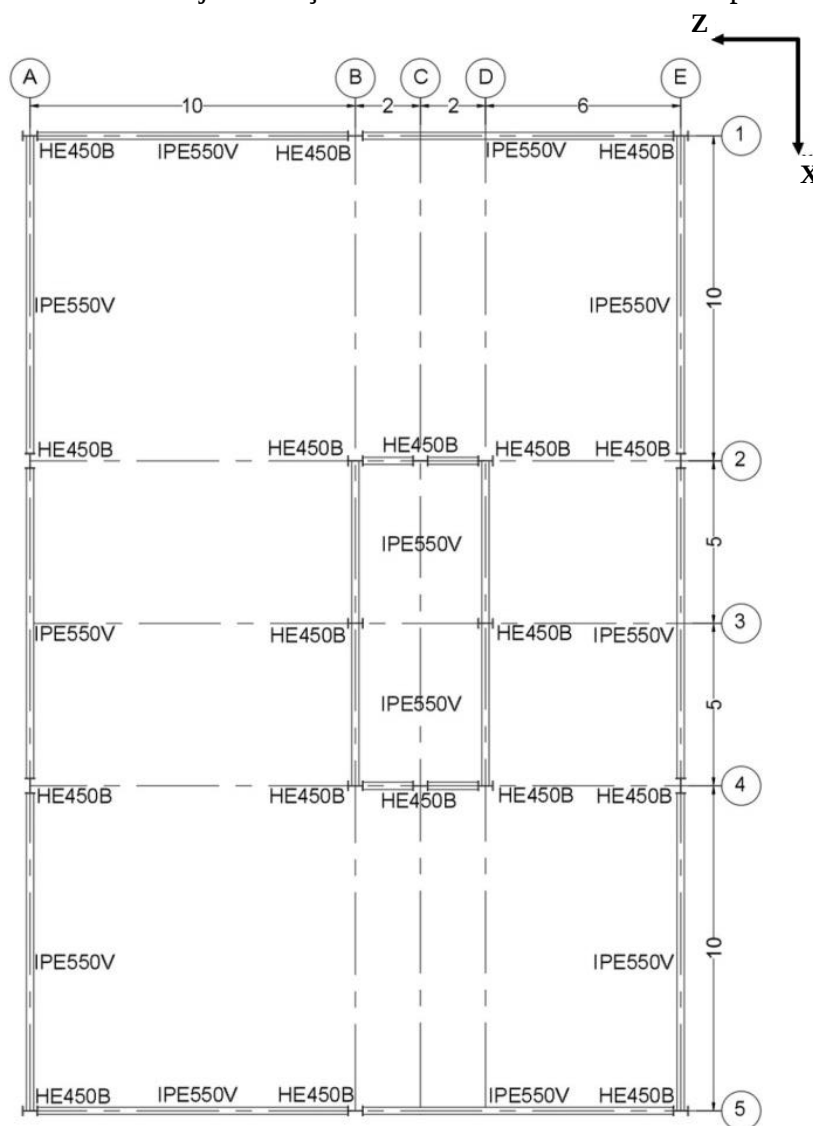


Figura 1. Planta 1º ao 10º pavimento (cotas em metros) (Assis, 2001)

Este sistema estrutural foi analisado anteriormente por Assis (2001), Barboza (2012), Filho (2012) e Moraes (2014), no que tange às ligações estruturais viga-coluna e aos efeitos horizontais das cargas de vento. Contudo, o foco principal desta investigação diz respeito à resposta estrutural dinâmica dos pisos do edifício misto (aço-concreto) quando submetidos às atividades humanas rítmicas (saltos e atividades aeróbicas).

Em relação às características físicas dos materiais empregados, o concreto possui resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) igual a 30 MPa, módulo de elasticidade ( $E_c$ ) de 26,8 GPa, coeficiente de Poisson ( $\nu_c$ ) igual a 0,2 e peso específico ( $\gamma_c$ ) de 25 kN/m<sup>3</sup>; e o aço tem resistência característica de escoamento ( $f_y$ ) de 250 MPa, módulo de elasticidade ( $E_s$ ) de 205 GPa, coeficiente de Poisson ( $\nu_s$ ) igual a 0,3 e peso específico ( $\gamma_s$ ) de 77,01 kN/m<sup>3</sup> (ASSIS, 2001).

Entre os modelos desenvolvidos pelos autores há sutis diferenças, portanto se optou por examinar o modelo de Moraes (2014) com o contraventamento em duplo X (Fig. 2) por ser o mais recente e conter elementos mais próximos da realidade de projeto.

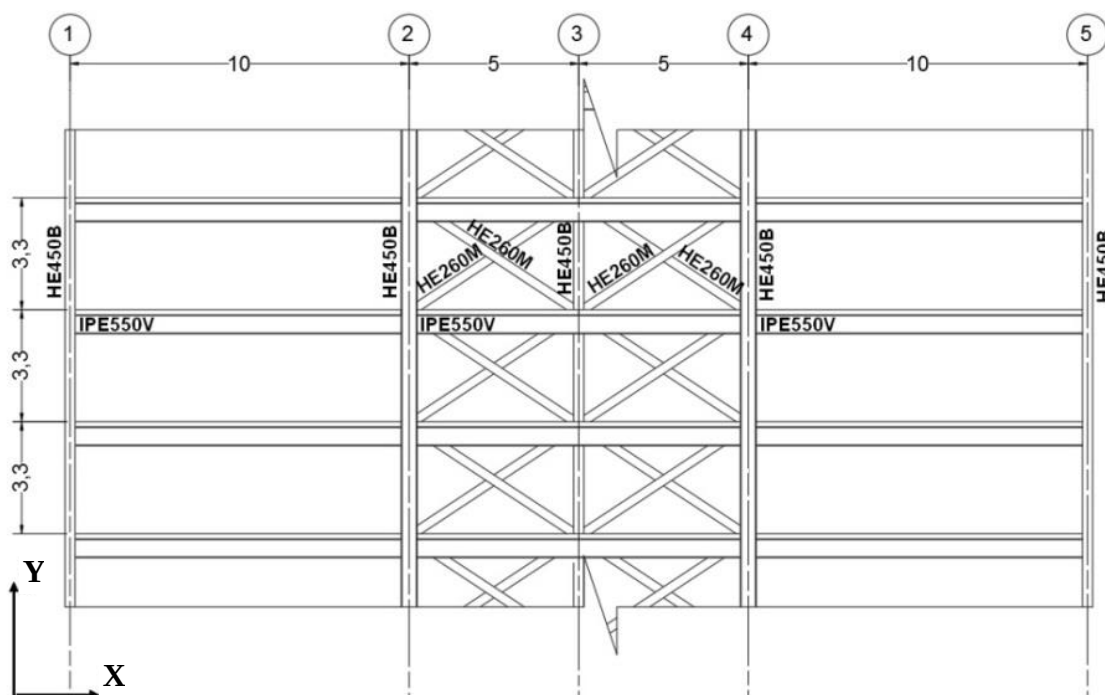


Figura 2. Vista lateral (plano YX) do edifício com núcleo contraventado (contraventamento tipo “XX”) [cotas em metros] (Aguiar, 2014)

Importante ressaltar que o projeto estrutural da edificação mista (aço-concreto) investigada foi desenvolvido originalmente por Assis (2001). Em seu estudo, o autor procedeu a todos os cálculos e verificações necessárias de projeto, associadas aos estados limites de utilização e estados limites últimos, de acordo com a norma NBR 8.800 (1986).

## 4 MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS

As técnicas usuais de discretização foram utilizadas no sistema estrutural estudado, modelado através do método dos elementos finitos, empregando o programa computacional ANSYS (2009).

Na modelagem numérica, as vigas e as colunas em aço 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: translações e rotações em  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , conforme mostrado na Fig. 3. Uma das vantagens 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.

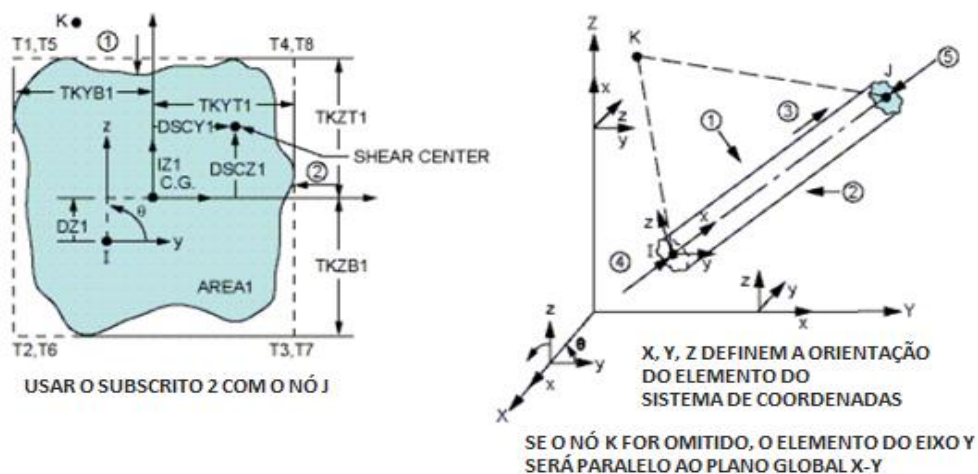


Figura 3. Elemento finito de viga *BEAM44* (ANSYS, 2009)

As lajes em concreto armado são simuladas por meio de elementos finitos de casca. Para tal simulação foi usado o elemento de casca finito *SHELL63* (ANSYS, 2009), que é baseado na teoria de placa fina e é definido por quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó, sendo três de translação e três nós de rotação nas direções  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , conforme apresentado na Fig. 4.

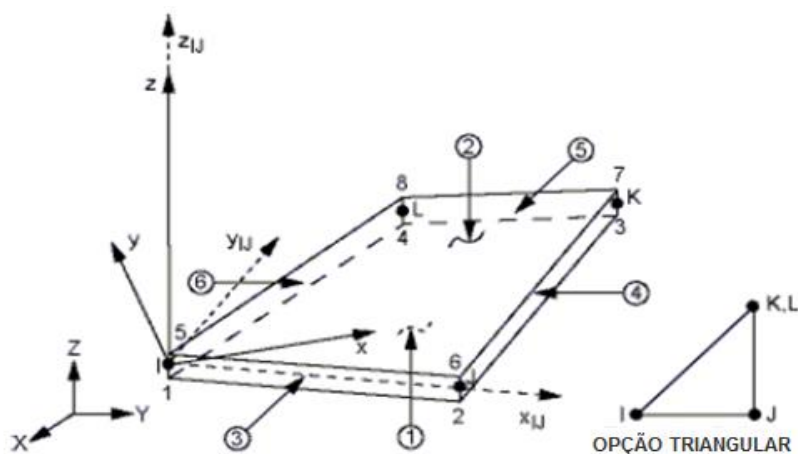


Figura 4. Elemento finito de casca *SHELL63* (ANSYS, 2009)

Com relação à modelagem das diagonais de contraventamento, recorreu-se ao elemento de treliça, o qual, no programa, denomina-se de *LINK8* (ANSYS, 2009). Este elemento possui somente rigidez axial, conforme pode ser observado na Fig. 5.

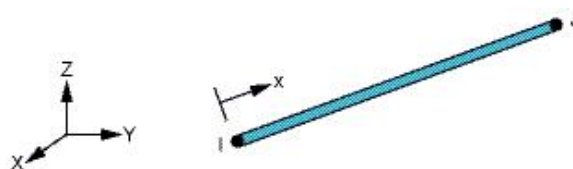


Figura 5. Elemento de treliça *LINK8* (ANSYS, 2009)

Consideram-se, de modo a simplificar a modelagem do edifício, as seguintes hipóteses: a estrutura trabalha no regime linear elástico (linearidade física); não são levados em conta os efeitos da geometria deformada (linearidade geométrica); os materiais (aço-concreto) apresentam isotropia; e as seções transversais permanecem planas após as solicitações de carregamento (hipótese de Bernoulli).

As condições de contorno consideradas nesta análise restringem os nós da base, de modo que os mesmos estejam impedidos de se deslocarem translacionalmente, na horizontal e na vertical, enquanto a rotação permanece sem restrições nos três eixos *X*, *Y* e *Z*, configurando, deste modo, em apoios do 2º gênero.

O presente modelo numérico-computacional apresenta um grau de refinamento apropriado, de forma a permitir uma boa representação do comportamento dinâmico da estrutura investigada, conforme ilustrado na Fig. 6 (Aguilar, 2017). Ressalta-se que as vigas, colunas e as barras de contraventamento possuem discretização de 0,50 metros em todo o modelo numérico. Esta discretização é a mesma utilizada na modelagem deste edifício nos modelos numérico-computacionais de Filho (2012) e Moraes (2014).

Quanto ao amortecimento do edifício, convencionou-se adotar uma taxa de amortecimento estrutural para a estrutura de 1,0 % ( $\xi = 1,0\%$ ). Uma taxa de amortecimento da ordem de 1 %, segundo Smith et al. (2009), é considerada adequada para diversos sistemas estruturais sem acabamento, no qual poucos elementos não estruturais contribuem para o amortecimento.

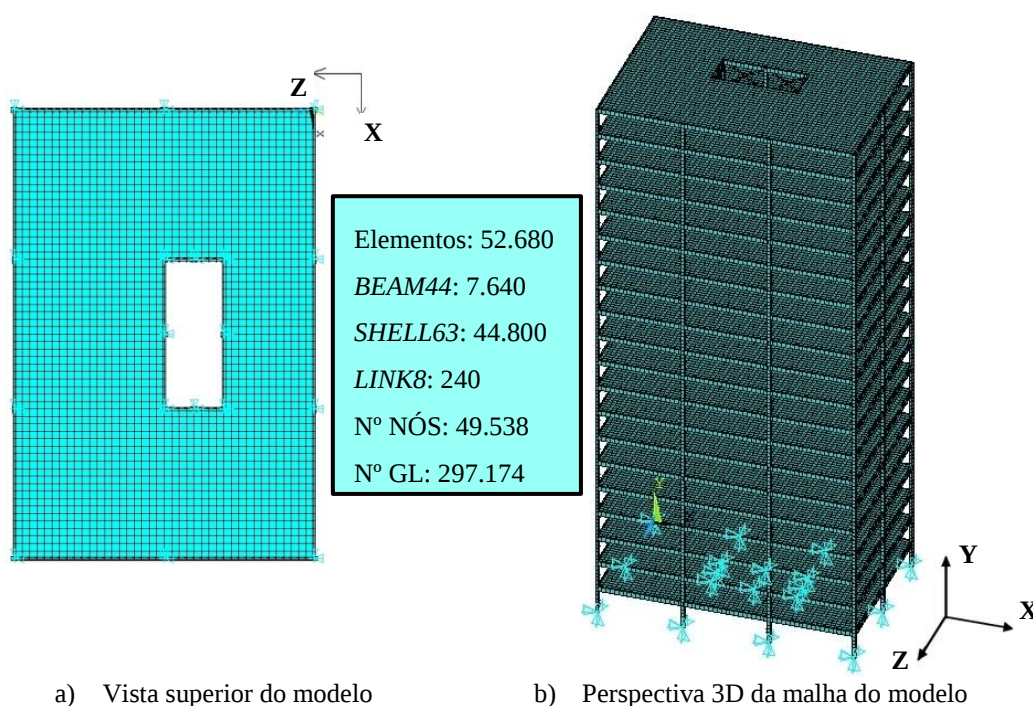


Figura 6. Modelo em elementos finitos (Aguilar, 2017)

## 5 ANÁLISE DINÂMICA

A partir do programa em elementos finitos ANSYS (2009), são realizadas análises dinâmicas no modelo estrutural investigado em que os três modelos de carregamento dinâmico, considerando os dois tipos de atividades estudadas neste trabalho (aeróbica e saltos), são aplicados na posição mais desfavorável em três pavimentos do edifício. Os resultados fornecidos pelas análises são comparados com os parâmetros de conforto humano definidos por diversos autores.

### 4.1 Análise Modal: autovalores e autovetores

Este capítulo objetiva estudar o comportamento dinâmico do sistema estrutural, através da análise de vibração livre. Tal análise é realizada pelo emprego do programa computacional ANSYS (2007), onde são obtidas as frequências naturais (autovalores) e seus respectivos modos de vibração (autovetores). Segundo Avelino (2008), esta análise constitui uma indicação de como esta responderá ao carregamento atuante sobre a mesma.

Inicialmente, averigua-se o pavimento tipo em questão e, para isso, isolou-se um pavimento tipo (vigas e lajes). Assim, na posição das colunas de aço, foram restringidos os deslocamentos translacionais, sendo, desta forma, aplicados apoios do 2º gênero. Então, obtiveram-se as frequências naturais, e os modos de vibração, sendo ilustrados os quatro primeiros na Fig. 7. Todos os modos obtidos nesta análise dizem respeito ao efeito de flexão de laje.

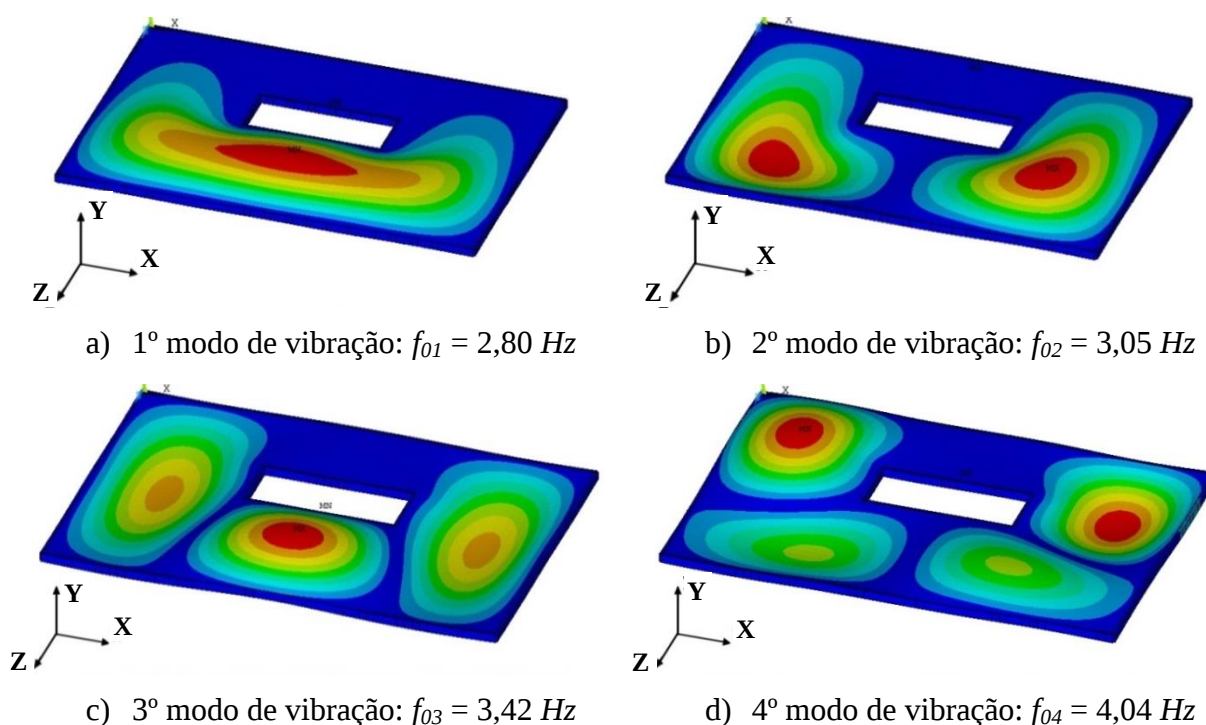


Figura 7. Modos de vibração de flexão de lajes do pavimento isolado: 1º ao 4º

É realizada a mesma análise numérica utilizada no modelo do pavimento isolado para o sistema estrutural do edifício como um todo, e os resultados obtidos são comparados com os resultados do modelo do pavimento isolado, conforme Tabela 3, que relaciona os modos de vibrações similares dos dois modelos e compara as frequências naturais. Em geral, um modo de vibração específico do pavimento isolado surge no último pavimento do edifício (modo de

início) e se dissipa nos primeiros pavimentos (modo de fim).

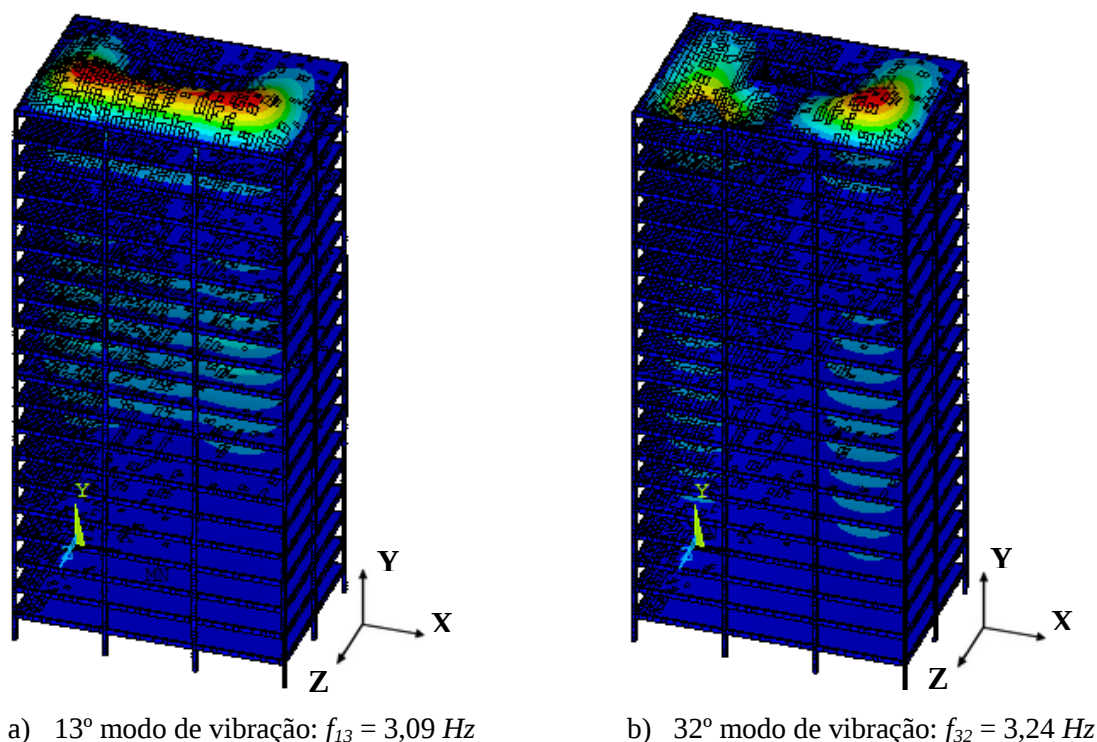
**Tabela 3. Modos e frequências naturais do pavimento isolado x do edifício global**

| Pavimento isolado |                 | Edifício global       |                 | Diferença    |
|-------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|--------------|
| Modos             | Frequência (Hz) | Modos correspondentes | Frequência (Hz) |              |
| 1                 | 2,80            | 13 ao 31              | 3,09-3,24       | 10,31-15,39% |
| 2                 | 3,05            | 32 ao 52              | 3,24-3,37       | 6,38-10,59%  |
| 3                 | 3,42            | 56 ao 74              | 3,77-3,92       | 10,22-14,55% |
| 4                 | 4,04            | 76 ao 95              | 4,24-4,38       | 4,96-8,56%   |
| 5                 | 4,35            | 97 ao 115             | 4,52-4,64       | 3,95-6,67%   |
| 6                 | 5,69            | 124 ao 140            | 5,94-6,11       | 4,36-7,29%   |
| 7                 | 6,61            | 145 ao 167            | 6,83-7,11       | 3,30-7,56%   |
| 8*                | 7,05            | 190 ao 218            | 7,74-8,39       | 9,73-18,94%  |
| 9*                | 7,07            | 168 ao 188            | 7,13-7,40       | 0,91-4,72%   |
| 10                | 8,04            | 203 ao 230            | 8,30-8,45       | 3,17-5,11%   |

\*Ocorreu inversão nas posições nos correspondentes dos modos 8 e 9 da placa na análise do Prédio Global.

Visando melhor exemplificação, quatro modos de vibração do sistema estrutural de melhor visualização, nas lajes superiores, do edifício global, com ênfase nos modos de vibração com efeito de flexão de laje, são apresentados observados nas Figs. 8 e 9.

É possível constatar que, quando observado modo por modo de vibração do sistema estrutural do edifício global, modos específicos de vibração de laje, similares entre si, surgem primeiramente nos últimos pavimentos do modelo numérico do edifício, desencadeiam-se para pavimentos intermediários e, finalmente, dissipam-se nos pavimentos iniciais.



**Figura 8. Modos de vibração de flexão de lajes do edifício global: 13º e 32º**

Vale ressaltar que as frequências naturais do sistema estrutural do pavimento isolado, devido à ausência de rigidez à rotação nas posições das colunas de aço, quando comparados com as frequências do sistema estrutural do edifício global, apresentaram valores inferiores, mais especificamente entre 0,91 e 18,94 %. Observa-se também a inversão entre os 8º e 9º modos de vibração do modelo, quando comparado aos modos de vibração do edifício global, conforme Tabela 3.

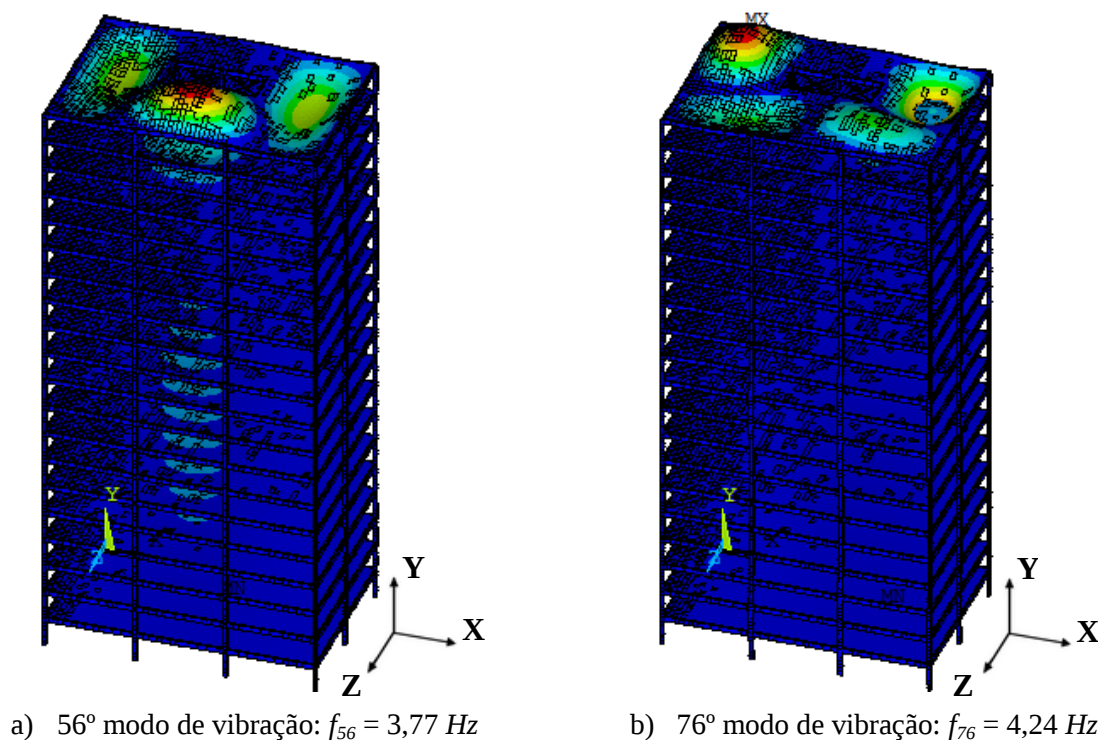


Figura 9. Modos de vibração do edifício global: 56º e 76º

Buscou-se desenvolver um gráfico no qual fosse possível observar o avanço de tais modos de vibração do edifício global quando comparados com os modos do modelo do pavimento isolado, conforme a Fig. 10 elenca.

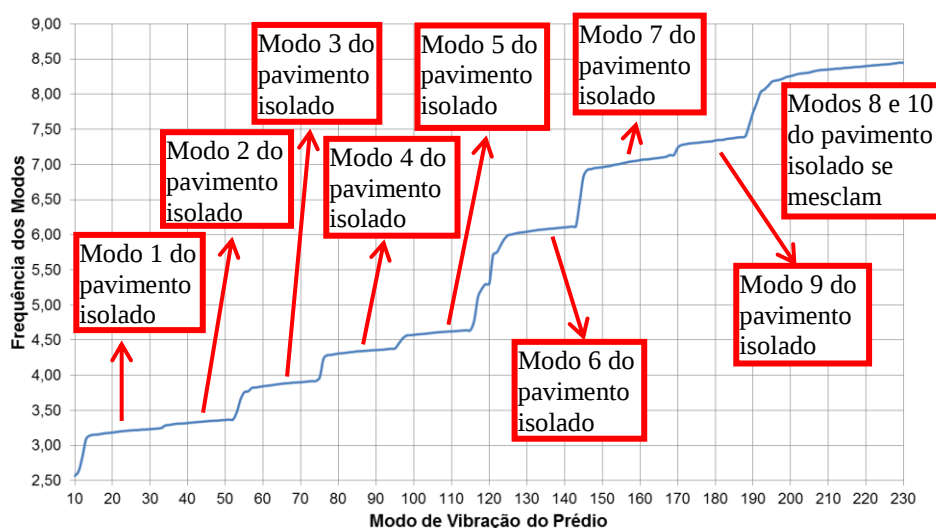


Figura 10. Modos de vibração x frequências naturais do edifício global



Figura 11. Distribuição das pessoas no pavimento tipo (Aguiar, 2017)

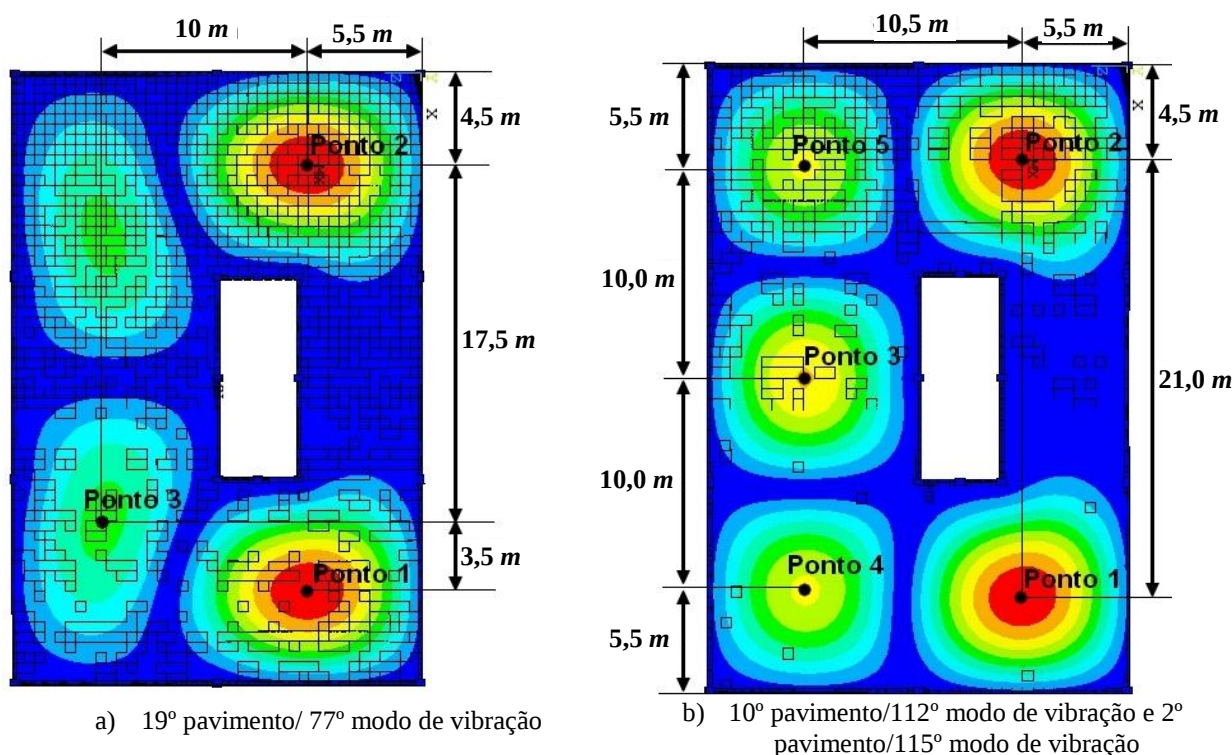


Figura 12. Pontos de coleta das respostas (Aguiar, 2017)

### 4.3 Avaliação do conforto humano

O nível de conforto humano dos pisos da edificação mista (aço-concreto) foi avaliado na fase permanente da resposta (*steady-state*), em termos dos valores das acelerações de pico ( $a_p$ ), acelerações filtradas *RMS*, ( $a_{w,RMS}$ ) e dos valores de dose de vibração, *VDV*, que são extraídas das respostas dinâmicas de cada ponto avaliado nos três pisos estudados, conforme ilustrado na resposta dinâmica do ponto 1 do 19º pavimento quando submetido à aeróbica do MC-I (Fig.13).

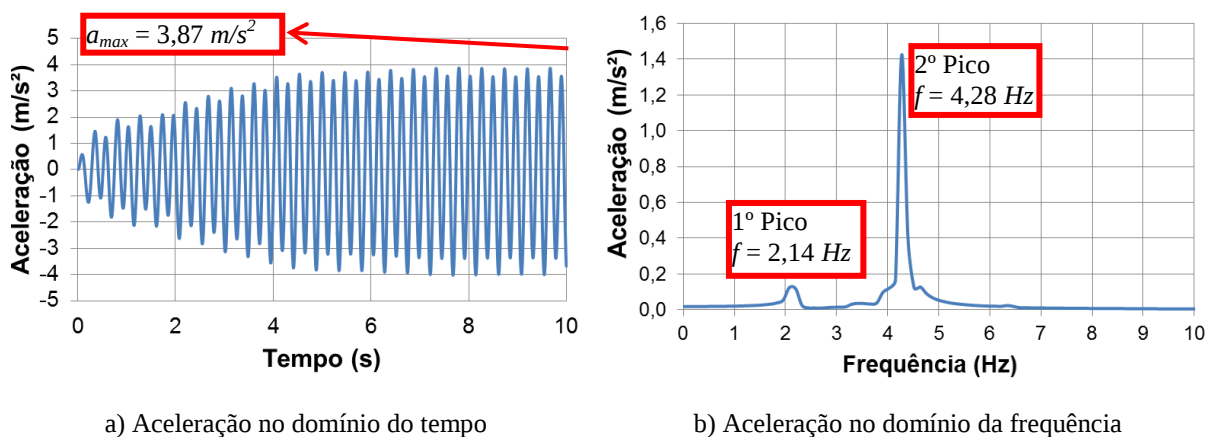


Figura 13. Resposta dinâmica do piso do 19º pavimento: MC-I (aeróbica)

Vários pesquisadores (Bachmann et al., 1995; Murray et al., 2016; Ellis & Littler, 2004; Smith et al., 2009; Setareh, 2012) têm estabelecido limites de conforto em função dos métodos de avaliação das acelerações, conforme aponta Tabela 4. Os resultados dos deslocamentos e acelerações obtidos para o 10º pavimento, para fins de exemplificação, estão

apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7. Os valores em negrito das acelerações indicam que estas estão acima dos limites estabelecidos.

**Tabela 4. Critérios de conforto humano para atividades humanas rítmicas**

| AISC (2016)       | SCI (2009)              | Ellis e Littler (2004) | Setareh (2012) | Reação das pessoas |
|-------------------|-------------------------|------------------------|----------------|--------------------|
| $a_p$ ( $m/s^2$ ) | $a_{w,RMS}$ ( $m/s^2$ ) | $VDV$ ( $m/s^{1,75}$ ) |                |                    |
|                   | <0,35                   | <0,66                  | <0,50          | Aceitável          |
|                   | 0,35-1,27               | 0,66-2,38              | 0,50-3,50      | Perturbação        |
| 0,5               | 1,27-2,47               | 2,38-4,64              | 3,50-6,90      | Inaceitável        |
|                   | >2,47                   | >4,64                  | >6,90          | Pânico             |

**Tabela 5. Valores dos deslocamentos translacionais máximos no 10º pavimento**

| Deslocamentos translacionais verticais (mm) |          |                    |                    |        |        |       |        |
|---------------------------------------------|----------|--------------------|--------------------|--------|--------|-------|--------|
| Pontos                                      | Aeróbica |                    |                    |        | Saltos |       |        |
|                                             | MC-I     | MC-II <sup>A</sup> | MC-II <sup>B</sup> | MC-III | MC-I   | MC-II | MC-III |
| 1                                           | 5,65     | 4,26               | 10,55              | 9,72   | 4,85   | 7,86  | 7,39   |
| 2                                           | 2,58     | 1,64               | 6,19               | 5,54   | 2,44   | 4,27  | 4,23   |
| 3                                           | 2,23     | 1,37               | 5,37               | 4,88   | 2,11   | 3,78  | 3,75   |
| 4                                           | 1,97     | 1,21               | 4,75               | 4,31   | 1,87   | 3,34  | 3,32   |
| 5                                           | 1,91     | 1,18               | 4,61               | 4,18   | 1,81   | 3,24  | 3,21   |

<sup>A</sup> Baixo impacto

<sup>B</sup> Alto impacto

**Tabela 6. Acelerações referentes ao 10º pavimento: atividade aeróbica**

| Pontos | Modelo de carregamento I |               |             | Modelo de carregamento II: baixo impacto |               |             | Modelo de carregamento II: alto impacto |               |             | Modelo de carregamento III |               |             |
|--------|--------------------------|---------------|-------------|------------------------------------------|---------------|-------------|-----------------------------------------|---------------|-------------|----------------------------|---------------|-------------|
|        | $a_p^A$                  | $a_{w,RMS}^B$ | $VDV^C$     | $a_p^A$                                  | $a_{w,RMS}^B$ | $VDV^C$     | $a_p^A$                                 | $a_{w,RMS}^B$ | $VDV^C$     | $a_p^A$                    | $a_{w,RMS}^B$ | $VDV^C$     |
| 1      | <b>3,31</b>              | <b>1,86</b>   | <b>3,84</b> | <b>2,26</b>                              | <b>1,13</b>   | <b>2,36</b> | <b>7,39</b>                             | <b>4,51</b>   | <b>9,23</b> | <b>6,27</b>                | <b>3,15</b>   | <b>6,48</b> |
| 2      | <b>2,17</b>              | <b>1,39</b>   | <b>2,84</b> | <b>1,36</b>                              | <b>0,84</b>   | <b>1,72</b> | <b>5,23</b>                             | <b>3,39</b>   | <b>7,09</b> | <b>4,70</b>                | <b>2,35</b>   | <b>4,82</b> |
| 3      | <b>1,88</b>              | <b>1,18</b>   | <b>2,43</b> | <b>1,21</b>                              | <b>0,71</b>   | <b>1,47</b> | <b>4,50</b>                             | <b>2,88</b>   | <b>6,03</b> | <b>4,07</b>                | <b>2,01</b>   | <b>4,14</b> |
| 4      | <b>1,66</b>              | <b>1,04</b>   | <b>2,15</b> | <b>1,07</b>                              | <b>0,63</b>   | <b>1,30</b> | <b>3,98</b>                             | <b>2,54</b>   | <b>5,33</b> | <b>3,60</b>                | <b>1,77</b>   | <b>3,66</b> |
| 5      | <b>1,61</b>              | <b>1,01</b>   | <b>2,08</b> | <b>1,04</b>                              | <b>0,61</b>   | <b>1,26</b> | <b>3,85</b>                             | <b>2,47</b>   | <b>5,17</b> | <b>3,48</b>                | <b>1,72</b>   | <b>3,55</b> |

<sup>A</sup> Aceleração de pico ( $m/s^2$ )

<sup>B</sup> Aceleração filtrada RMS ( $m/s^2$ )

<sup>C</sup> Valores de dose de vibração ( $m/s^{1,75}$ )

**Tabela 7. Acelerações referentes ao 10º pavimento: saltos**

| Pontos | Modelo de carregamento I |               |             | Modelo de carregamento II |               |             | Modelo de carregamento III |               |             |
|--------|--------------------------|---------------|-------------|---------------------------|---------------|-------------|----------------------------|---------------|-------------|
|        | $a_p^A$                  | $a_{w,RMS}^B$ | $VDV^C$     | $a_p^A$                   | $a_{w,RMS}^B$ | $VDV^C$     | $a_p^A$                    | $a_{w,RMS}^B$ | $VDV^C$     |
| 1      | <b>3,07</b>              | <b>1,77</b>   | <b>3,63</b> | <b>5,05</b>               | <b>3,15</b>   | <b>6,48</b> | <b>5,13</b>                | <b>3,03</b>   | <b>6,24</b> |
| 2      | <b>2,06</b>              | <b>1,32</b>   | <b>2,70</b> | <b>3,66</b>               | <b>2,35</b>   | <b>4,82</b> | <b>3,57</b>                | <b>2,36</b>   | <b>4,65</b> |
| 3      | <b>1,78</b>              | <b>1,12</b>   | <b>2,31</b> | <b>3,22</b>               | <b>2,01</b>   | <b>4,14</b> | <b>3,15</b>                | <b>1,91</b>   | <b>3,99</b> |
| 4      | <b>1,58</b>              | <b>0,99</b>   | <b>2,04</b> | <b>2,85</b>               | <b>1,77</b>   | <b>3,66</b> | <b>2,78</b>                | <b>1,69</b>   | <b>3,53</b> |
| 5      | <b>1,53</b>              | <b>0,96</b>   | <b>1,98</b> | <b>2,76</b>               | <b>1,72</b>   | <b>3,55</b> | <b>2,70</b>                | <b>1,64</b>   | <b>3,42</b> |

<sup>A</sup> Aceleração de pico ( $m/s^2$ )

<sup>B</sup> Aceleração filtrada RMS ( $m/s^2$ )

<sup>C</sup> Valores de dose de vibração ( $m/s^{1,75}$ )

Analisando as tabelas acima, mais especificamente para os casos de atividade aeróbica, verifica-se que o modelo de carregamento II (MC-II) apresenta maiores valores de

acelerações de pico, acelerações filtradas  $RMS$  ( $a_{w,RMS}$ ) e valores de dose de vibração (VDV). Tais valores estão próximos aos obtidos quando utilizado o modelo de carregamento III (MC-III), porém bem maiores que os obtidos utilizando o modelo de carregamento I (MC-I). Em relação ao caso de saltos, observa-se um cenário semelhante ao caso de atividade aeróbica, porém com as acelerações do MC-II pouco superiores às acelerações do MC-III.

Escolhe-se o MC-I; porém considera-se o tipo de atividade que se apresenta mais desfavorável para este modelo: ginástica aeróbica, para ilustrar a propagação das vibrações no pavimento do edifício no qual está sendo realizadas as atividades humanas rítmicas, inclusive nos pavimentos superior e inferior, conforme Figs. 14, 15 e 16, onde o piso foi dividido em seis painéis (A, B, C, D, E e F). Ressalta-se que o carregamento se encontra no painel F.

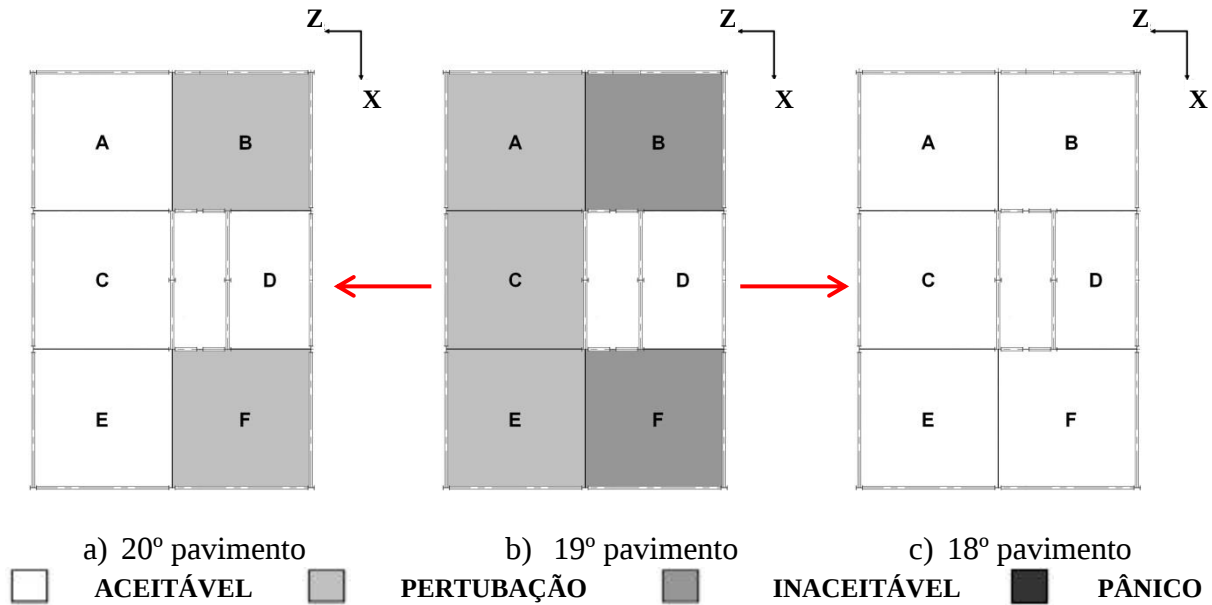


Figura 14. Percepção da vibração no 19° pavimento e pavimentos vizinhos devido ao MC-I: aeróbica

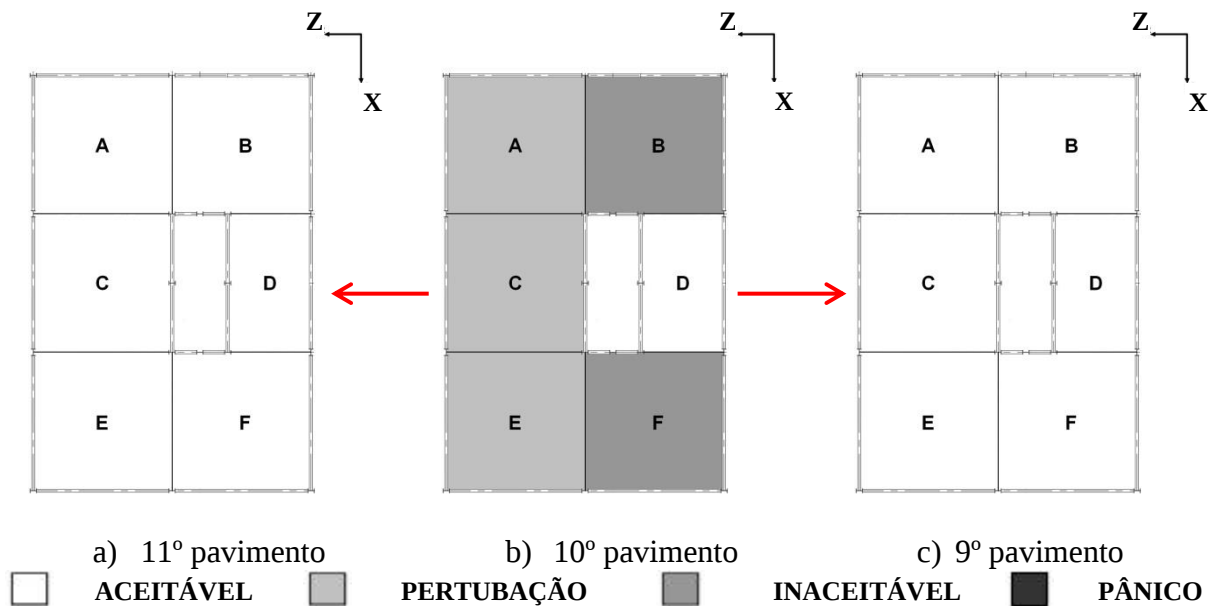


Figura 15. Percepção da vibração no 10° pavimento e pavimentos vizinhos devido ao MC-I: aeróbica

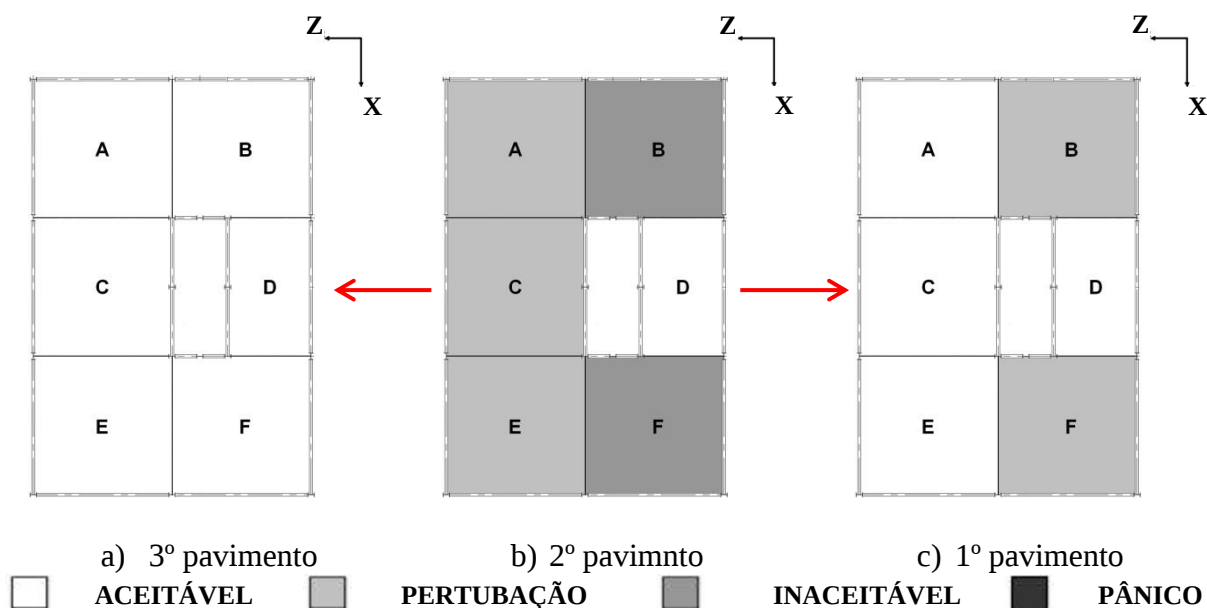


Figura 16. Percepção da vibração no 2º pavimento e pavimentos vizinhos devido ao MC-I: aeróbica

Nos três pavimentos analisados, conforme Figs. 14, 15 e 16, fica nítido que as atividades rítmicas das pessoas fazem com que níveis elevados de vibrações, conforme o critério das acelerações filtradas (*RMS*), propaguem-se no pavimento que estão sendo realizadas as atividades. Também é possível observar a transferência de vibrações para os pavimentos distintos dos quais recebem as solicitações dinâmicas. Tal transferência de vibrações, em alguns casos, como observado na Fig. 14-a) e na Fig. 16-c), ultrapassaram o limite tolerado de aceleração filtrada de  $0,35 \text{ m/s}^2$  em alguns painéis.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inicialmente, fez-se a opção para avaliação dos valores das frequências naturais e modos de vibração do pavimento tipo isolado, objetivando investigar possíveis alterações relevantes, qualitativas e quantitativas, em relação à resposta estrutural dinâmica do sistema estrutural completo. Cabe ressaltar que as formas modais, de maneira geral, são similares quando as colunas de aço são efetivamente consideradas no modelo numérico. No que tange aos valores das frequências naturais foram observadas diferenças máximas da ordem de 18 % entre os valores fornecidos com base no uso do modelo numérico que considera a rigidez real das colunas de aço em relação ao modelo estrutural do pavimento tipo isolado.

De acordo com os resultados obtidos ao longo do estudo, do ponto de vista das frequências naturais, foi constatada a suscetibilidade dos pisos a problemas relacionados a vibrações excessivas, visto que os valores das frequências naturais das lajes do edifício misto (aço-concreto), com base na modelagem completa do sistema estrutural lajes-vigas-colunas de aço, são da ordem de 3 Hz, representando valores abaixo do mínimo recomendado pela NBR 6118 (2014) ( $f = 8,0 \text{ Hz}$ ) e guia prático do AISC (Murray et al., 2003) ( $f = 9,2 \text{ Hz}$ ).

Em relação aos modelos de carregamento, considerando-se a avaliação qualitativa e quantitativa da resposta estrutural dinâmica das lajes do edifício em estudo, no entendimento do autor, o modelo de carregamento dinâmico MC-I, conforme igualmente observado por Gaspar e Da Silva (2015), Campista (2015) e Da Silva et al. (2016), apresenta os menores valores de acelerações, quando comparado com os modelos de carregamento dinâmico

dinâmicos MC-II e MC-III, para todos os tipos de atividade, excetuando-se o caso do MC-II: aeróbica de baixo impacto.

Em se tratando de conforto humano, a avaliação quantitativa da resposta estrutural dinâmica desenvolvida ao longo de todo o trabalho de pesquisa indica, com clareza, níveis de vibrações extremamente desconfortáveis aos praticantes das atividades (aeróbica e saltos) sobre os pisos analisados. Tal situação além de inviabilizar os pisos mistos (aço-concreto) investigados para a utilização, por exemplo, de uma academia de ginástica, também transmite níveis de vibrações elevadas para outros pavimentos distintos daqueles onde as cargas dinâmicas são aplicadas.

Para trabalhos futuros, poder-se-iam realizar estudos experimentais em lajes de edifícios para comparar os resultados obtidos com base na metodologia de análise desenvolvida neste estudo, e realizar a implementação de um sistema de controle de vibrações ou propor soluções de projeto, como adição de vigas cruzando os pisos ou aumento da espessura da laje, para redução dos valores dos deslocamentos e acelerações.

## 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. Os autores também agradecem à UNESA.

## REFERÊNCIAS

Aguiar, J. V., 2017. *Modelagem do comportamento estrutural dinâmico e avaliação dos critérios de projeto para conforto humano de edifícios submetidos a ações humanas rítmicas sobre os pisos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ANSYS Swanson Analysis Systems Inc., 2009. Theory Reference (versão 12.1).

Assis, V. M. de, 2001. *Análise de edifícios de pavimentos múltiplos com estrutura metálica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1986. NBR 8800: Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios. Rio de Janeiro.

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

Avelino, A. F., 2008. Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE: Análise Dinâmica. Ed Érica.

Bachmann, H. & Ammann, W., 1987. Vibrations in structures induced by man and machines, IABSE Structural Engineering Document 3E, *International Association for Bridges and Structural Engineering*, ISBN 3-85748-052-X.

Bachmann, H. & Hirsch, G., 1995. *Vibration problems in structures: practical guidelines*. Birkhäuser. Berlim.

Barboza, R. R., 2012. *Modelagem do comportamento dinâmico de edifícios mistos (aço-concreto) submetidos à ação do vento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

- Campista, F. F., 2015. *Análise de vibrações e estudo de conforto humano sobre pisos mistos (aço-concreto) submetidos a ações humanas rítmicas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Campista, F.F., Gaspar, C.M.R., Santos da Silva, J.G., 2015. Modelagem das ações humanas rítmicas e estudo do conforto humano sobre edifícios mistos (aço-concreto). *XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE 2015)*, pp. 1-16, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.
- Costa-Neves, L. F., Silva, J. G. S. da, Lima, L. R. O., Jordão, S., 2014. Multi-storey, multi-bay buildings with composite steel-deck floors under human-induced loads: the human comfort issue. *Journal of constructional steel research*, v.136, p. 34–46.
- Da Silva, J. G. S., Sieira, A. C. C. F., Campista, F. F., Gaspar C. M. R., 2016. Human comfort evaluation of a steel-concrete composite building subjected to aerobics. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, v. 10, p. 1259-69.
- Ellis, B. R. & Littler, J. D., 2004. Response of cantilever grandstands to crowd loads. Part I: Serviceability evaluation, in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, p. 235-241.
- Faisca, R. G., 2003. *Caracterização de cargas dinâmicas geradas por atividades humanas*. Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Filho, G. S., 2012. *Estudo do comportamento dinâmico de edifícios mistos (aço-concreto) submetidos à ação não determinística do vento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Gaspar, C. M. R. & Silva, J. G. S. da, Costa-Neves, L. F., 2016. Multimode vibration control of building steel–concrete composite floors submitted to human rhythmic activities. *Journal of Computers and Structures*, v. 165, p. 107 – 122.
- Gaspar C.M.R. & Silva J.G.S. da, 2015. Influence of the human rhythmic activities modelling on the composite floors dynamic response. *Journal of Civil Engineering and Architecture Research*, 2, 429-438.
- 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.
- Murray, T. M., Allen, D. E., & Ungar, E. E., 2003. Steel design guide series 11: Floor vibrations due to human activity. 2nd printing. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction.
- Murray, T. M., Allen, D. E., Ungar, E. E., & Davis, D. B., 2016. Steel design guide series 11: Vibrations of steel-framed structural systems due to human activity. 2nd Edition. 1st Printing. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction.
- Setareh, M., 2012. Evaluation and assessment of vibrations owing to human activity. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*; v.165; p. 219–231.
- Smith A.L., Hicks S.J., & Devine P.J., 2009. “Design of floors for vibrations: A new approach”, SCI Publication P354, Ascot.