



AVALIAÇÃO DO CONFORTO HUMANO DE PISOS MISTOS (AÇO-CONCRETO) DE EDIFICAÇÕES COM BASE NO EMPREGO DE MODELOS BIODINÂMICOS

Fernanda Fernandes Campista

Cássio Marques Rodrigues Gaspar

fernandafcampista@yahoo.com.br

cgaspac@yahoo.com.br

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

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. *O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para análise dinâmica de pisos submetidos a atividades humanas rítmicas, com base na modelagem numérica e testes experimentais. O foco desta pesquisa é estudar o efeito da interação dinâmica entre pessoas e estrutura, representado por modelos biodinâmicos (sistemas massa-mola-amortecedor acoplado a estrutura) com poucos graus de liberdade. Deste modo, este trabalho investiga o comportamento dinâmico da estrutura com base nas formulações matemáticas, sob o ponto de vista do conforto humano. O modelo estrutural é composto por três andares com dimensões de 20m x 20m, área total de 1200m² (3 x 400m²) e um pé-direito de 4m, utilizado para aulas de ginástica aeróbica. A modelagem da estrutura foi realizada pelo programa ANSYS, baseado no método dos elementos finitos (MEF). Com o intuito de avaliar as funções matemáticas empregadas, foram obtidas experimentalmente as acelerações associadas a 32 indivíduos praticando atividades rítmicas, de modo a introduzi-las no modelo numérico desenvolvido. Deste modo, a resposta estrutural dinâmica do modelo estrutural é avaliada em termos das acelerações de pico, RMS e VDV, de acordo com critérios de conforto humano.*

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

INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, problemas relacionados à vibração excessiva de estruturas estão ocorrendo com maior frequência em espaços destinados à prática de atividades humanas rítmicas. Tal fato pode ser associado a uma combinação de fatores, tais como a influência dos avanços tecnológicos no campo dos materiais e a adaptação de estruturas projetadas inicialmente para outros fins. Estes avanços tecnológicos se relacionam com a utilização de materiais com menor peso e maior resistência, resultando em estruturas mais flexíveis e esbeltas, levando assim a baixas frequências naturais dos pisos mistos. Além disso, observa-se a concepção de estruturas com baixo amortecimento estrutural, que está relacionado com o tipo de materiais, construção, a presença de elementos não estruturais, idade e qualidade de construção (Campista, 2015; Campista *et al.*, 2015; Gaspar, 2013; Gaspar, 2015).

A utilização de sistemas estruturais mistos (aço-concreto) para a prática de atividades humanas rítmicas (aeróbica), como ginásios, consiste em um problema complexo. 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. Consequentemente, pode ocorrer o fenômeno da ressonância, ocasionando mal-estar e desconforto dos usuários (Campista, 2015; Campista *et al.*, 2015; Gaspar, 2013; Gaspar, 2015).

Considerando-se a relevância do problema em questão, nesta investigação as ações dinâmicas humanas são estudadas de maneiras distintas: a primeira considera o emprego de duas formulações matemáticas, baseadas em testes experimentais (Faisca, 2003; SCI, 2009); a segunda consiste na realização de testes experimentais com base no emprego de 32 indivíduos praticando atividades humanas rítmicas (Gaspar, 2016) e por fim, a terceira é caracterizada por um modelo biodinâmico baseado nos testes experimentais mencionados acima, totalizando quatro modelagens das ações humanas rítmicas.

Em seguida, as acelerações do corpo humano, determinadas com base na realização dos testes experimentais, serão utilizadas para a simulação numérica de modelos biodinâmicos acoplados ao sistema estrutural investigado, de maneira a representar a interação dinâmica ser humano-estrutura de forma mais realista, pois o ser humano não atua simplesmente como uma massa inerte, mas sim como um sistema mecânico que possui características dinâmicas definidas (massa, amortecimento e rigidez) (Gaspar, 2016).

Assim sendo, este trabalho de pesquisa objetiva avaliar o comportamento dinâmico de uma edificação de três pavimentos, medindo 20mx20m, com área total de 3x400m², sendo que o 2º andar do edifício é utilizado como um espaço para a prática de ginástica aeróbica. As respostas dinâmicas do modelo estrutural são obtidas em termos dos valores das acelerações de pico, acelerações RMS e valores de dose de vibração VDV, determinados com base na aplicação dos quatro modelos de carregamento representativos das atividades humanas rítmicas, visando uma análise do conforto humano dos usuários.

1 MODELAGEM DAS ATIVIDADES RÍTMICAS

1.1 MODELOS DE FORÇA DURA

Neste trabalho de pesquisa, inicialmente, as ações humanas rítmicas são representadas por duas formulações matemáticas distintas propostas por Faisca (2003) e Ellis e Ji (2004) apud SCI (2009), de acordo com as Eqs. (1) a (5) e Figs. 1 e 2. Além disso, no âmbito desta investigação, a partir da realização de testes experimentais com base no emprego de 32

indivíduos praticando atividades humanas rítmicas são considerados, também, modelos matemáticos que aplicam a força dinâmica experimental diretamente sobre a estrutura (modelo de força dura) (Gaspar, 2016). Outro modelo de carregamento dinâmico, no qual sistemas biodinâmicos representativos das pessoas, associados a sistemas do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL), acoplados sobre o piso também são efetivamente utilizados nas análises, conforme ilustrado nas Figs. 1 a 3 (Campista, 2015; Gaspar, 2016). Desta maneira, os modelos de carregamento I a III (MC-I, MC-II e MC-III) representam, respectivamente, os modelos de carregamento dinâmicos desenvolvidos por Faisca (2003) [Eq. (1)]; Ellis e Ji (2004) apud SCI (2009) [Eqs. (2) a (5)] e o modelo de força dura experimental (Campista 2015; Gaspar 2016).

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

$$F(t) = 0 \quad \text{Para } T_c \leq t \leq T$$

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

$$F(t) = G \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} r_{n,v} \sin(2n\pi f_p t + \varphi_n) \right\} \quad (2)$$

$$r_{1,v} = 1,61v^{-0,082} \quad (3)$$

$$r_{2,v} = 0,94v^{-0,24} \quad (4)$$

$$r_{3,v} = 0,44v^{-0,31} \quad (5)$$

Onde, $F(t)$: representação matemática do carregamento no tempo em (N); t : tempo (s); f_p : frequência da atividade (Hz); v : número de pessoas; $r_{n,v}$: Fourier coeficiente de Fourier induzido por v pessoas; G : peso do indivíduo (N); φ_n : diferença de fase. A diferença de fase adotada para os três primeiros harmônicos, considerando-se saltos normais realizados pela multidão, é igual a $\pi/6$, $-\pi/6$ e $\pi/2$, respectivamente.

$$F_i(t) = m_i a_i(t) \quad (6)$$

Onde, $F_i(t)$: representação matemática do carregamento no tempo em (N); m_i : massa do indivíduo i ; $a_i(t)$: aceleração do indivíduo i no tempo. Os valores de i variam de 1 a 32, referente à ação dinâmica de 32 pessoas atuando sobre a estrutura.

1.2 MODELOS BIODINÂMICOS

O modelo de carregamento dinâmico IV (MC-IV) se refere à modelagem da interação dinâmica do sistema ser humano-piso, conforme ilustrado na Fig. 3. Para tal, considera-se o indivíduo como sendo um sistema do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade dinâmico (S1GL), praticando atividades aeróbicas sobre o modelo estrutural. Deste modo, a força dinâmica aplicada é definida a partir dos valores das massas (m_i) e acelerações (a_i) das pessoas, obtidas a partir dos testes experimentais desenvolvidos por Gaspar (2016), de acordo com a Eq. (6), sendo aplicada sobre a massa do modelo biodinâmico (Fig. 3).

A implementação do modelo biodinâmico é algo extremamente relevante para o entendimento do comportamento estrutural, visto que diversos estudos (Sim et al.,1996; Littler,1996; Barker e Mackenzie, 2008) apontam para a modificação do comportamento dinâmico da estrutura (amortecimento e frequência) em virtude da adição da massa dos indivíduos. Esses modelos biodinâmicos podem representar uma pessoa parada, em pé ou sentada (ISO 5982, 1981; Matsumoto & Griffin, 2003; Sachse et al., 2003), pessoas pulando (Nhleko et al., 2008) e pessoas correndo (Ferris et al., 1998; Nigg & Liu, 1999). Deste modo, em relação à implementação dos modelos bionômicos faz-se necessário determinar as características dinâmicas das pessoas (rigidez e amortecimento), através do emprego das Eqs. (7) e (8) e de acordo com a Fig. 3.

$$k_i = 4\pi^2 f_i^2 m_i \quad (7)$$

$$c_i = 4m_i\pi\xi f_i \quad (8)$$

Onde, K_i : rigidez do indivíduo i ; m_i : massa do indivíduo i ; c_i : amortecimento do indivíduo i ; f_i : frequência do indivíduo i (2,18Hz); ξ : taxa de amortecimento. Os valores de i variam de 1 a 32, referente à ação dinâmica de 32 pessoas atuando ritmicamente sobre a estrutura. O amortecimento dos indivíduos (c_i) é calculado com base na utilização de uma taxa de amotecimento (ξ) igual a 0,25, extraído no trabalho desenvolvido por Duggil (2008). Na sequência do texto, as Figs. 1 e 2 ilustram exemplos da força no domínio do tempo e frequência, respectivamente, em relação a uma pessoa praticando atividade aeróbica numa frequência de 2,18Hz. Considerou-se que o peso de um indivíduo é 800 N.

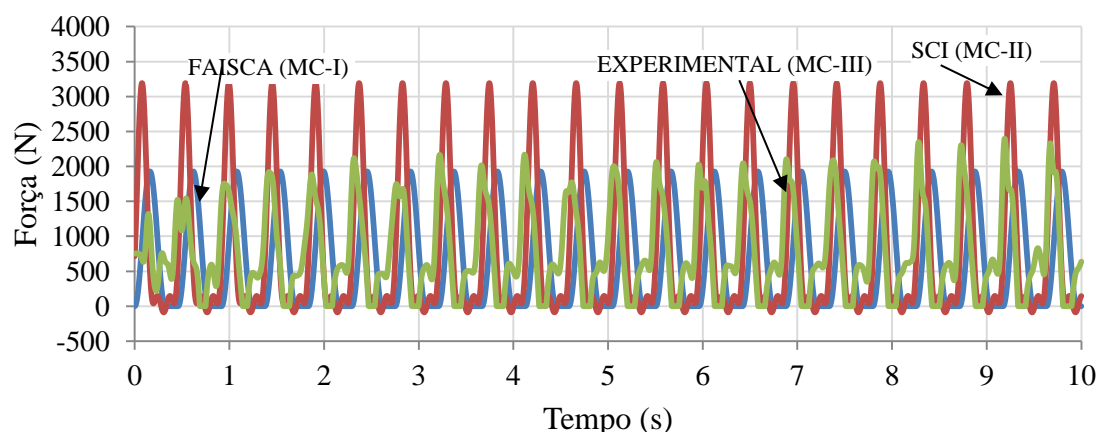
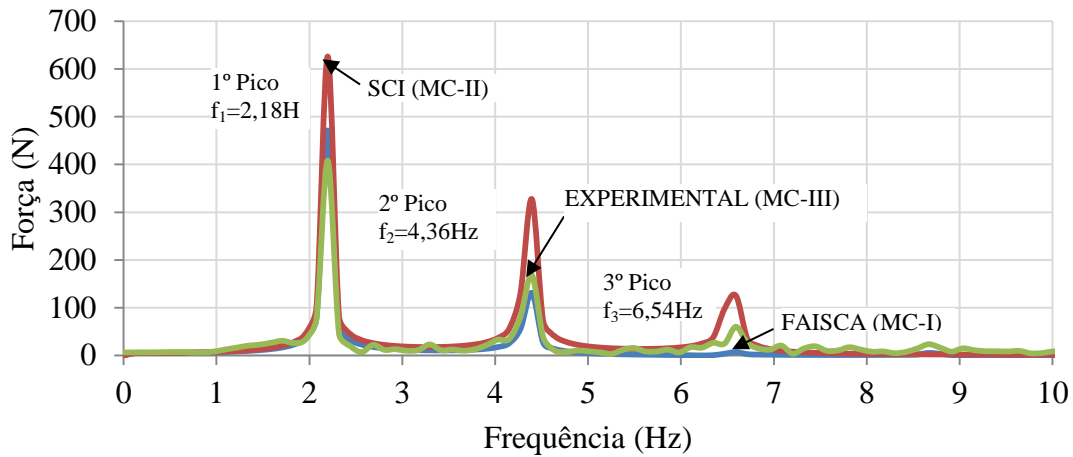
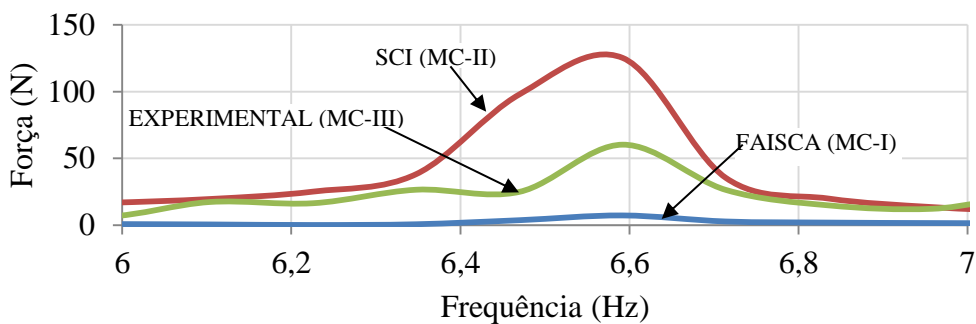


Figura 1. Sinais da força no domínio do tempo



a) Espectro de frequência dos três primeiros harmônicos da atividade aeróbica



b) Espectro de frequência dos três primeiros harmônicos da atividade aeróbica

Figura 2. Sinais da força no domínio da frequência

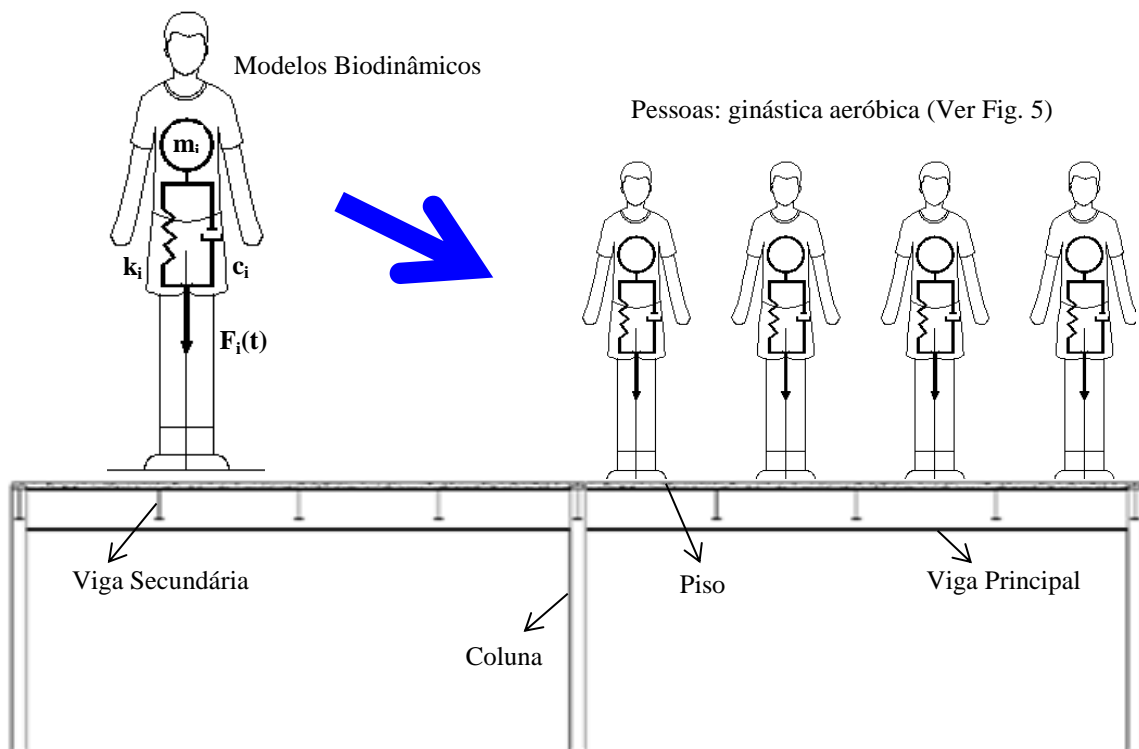
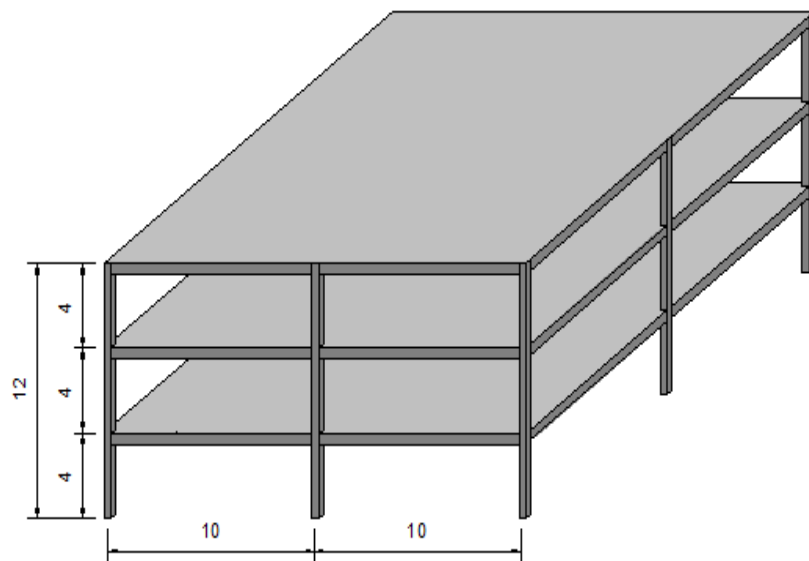


Figura 3. Representação genérica das pessoas modeladas como sistemas biodinâmicos com 1GL

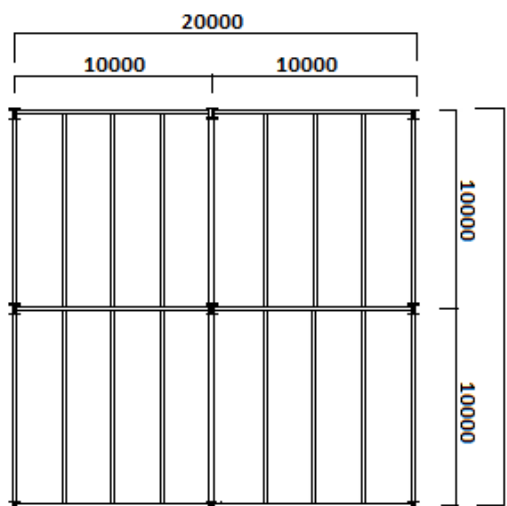
2 MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO

2.1 Descrição do modelo estrutural

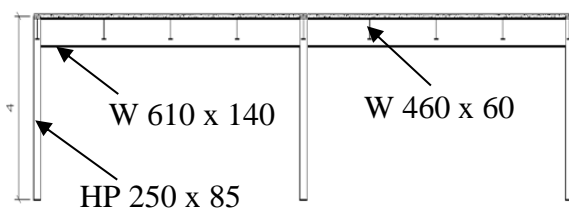
O sistema estrutural investigado é um piso misto composto por uma laje de concreto, vigas e pilares metálicos. Conforme a Fig. 4, o piso possui dimensão de 20mx20m, uma área de 3x400 m² com um total de 12 baias de 10mx10m. A laje de concreto possui espessura de 10 cm e os pilares tem altura igual a 4m. A seção de aço utilizada foi de perfil w soldado, com tensão de escoamento de 345 MPa, enquanto a laje de concreto possui uma resistência característica à compressão (fck) de 30 MPa e módulo de elasticidade secante (Ecs) de 26x10³ MPa.



a) Vista em perspectiva da estrutura



a) Vista superior do piso



b) Seção transversal do painel

Figura 4. Modelo estrutural investigado. Dimensão em (mm)

2.2 Distribuição do carregamento dinâmico

O carregamento dinâmico é distribuído uniformemente na metade do 2º andar da edificação mista investigada, conforme a ilustração da Fig. 5. Ao longo do estudo foram utilizados na análise dinâmica do sistema estrutural os quatro modelos de carregamento descritos anteriormente (MC-I a MC-IV), considerando-se a ação vertical de trinta e duas pessoas praticando ginástica aeróbica.

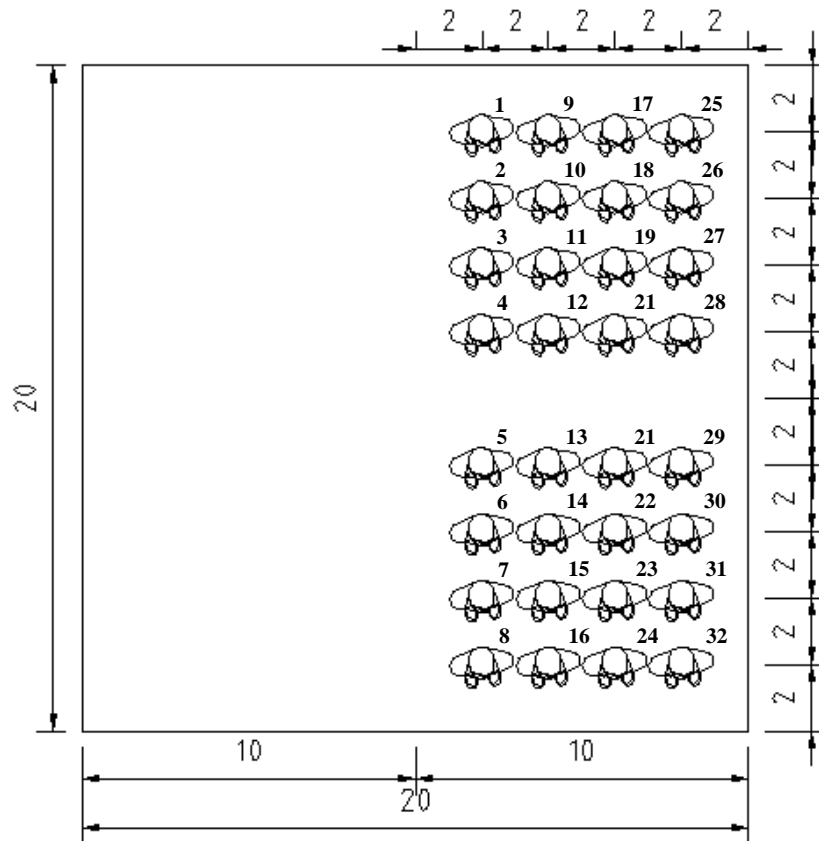


Figura 5. Trinta e duas pessoas praticando atividades aeróbicas no 2º andar do piso misto.
Dimensão em metros

Considera-se que o peso do indivíduo é 800N. Neste estudo, o amortecimento estrutural é igual a $\xi = 1\%$ ($\xi = 0,01$), de acordo com a ISO10137 (2007). A resposta dinâmica do modelo foi obtida no centro de cada um dos nós dos 12 painéis, enumerados de A até L, referente aos três andares de laje de concreto de acordo com a Fig. 6.

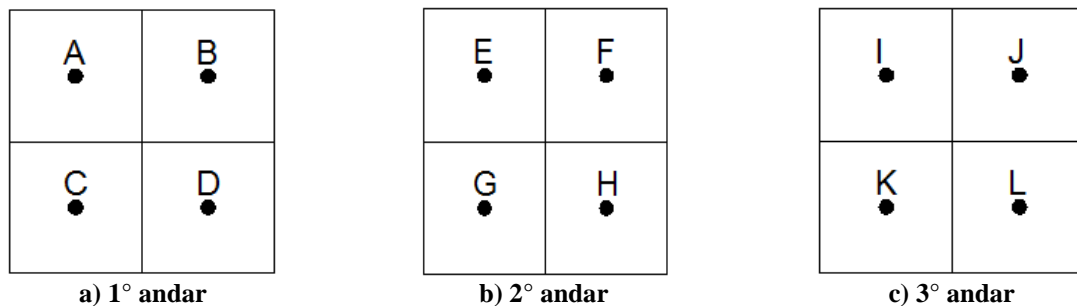


Figura 6. Nós analisados na resposta dinâmica

3 MODELO ESTRUTURAL EM ELEMENTOS FINITOS

A modelagem numérica da edificação é feita com base no emprego de técnicas usuais de modelagem, via método dos elementos finitos (MEF), por meio do uso do programa ANSYS (2010), como ilustrado na Fig. 7. As vigas de aço foram representadas com base no emprego do elemento BEAM44, e a laje de concreto armado foi simulada pelo elemento de casca SHELL63. O elemento de viga BEAM44 (ANSYS, 2009) é 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. O elemento finito de casca SHELL63 (ANSYS, 2009) é definido por quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó, sendo três de translação e três de rotação nas direções X, Y e Z. O modelo numérico em elementos finitos considera que os materiais (aço e concreto) possuem um comportamento elástico e que as seções permanecem planas no estado deformado. Considera-se, ainda, a interação completa entre laje de concreto e as vigas metálicas com o intuito de impedir a ocorrência de qualquer deslizamento. As ligações estruturais viga-viga e viga-coluna foram consideradas como sendo conexões do tipo flexíveis e rígidas, respectivamente.

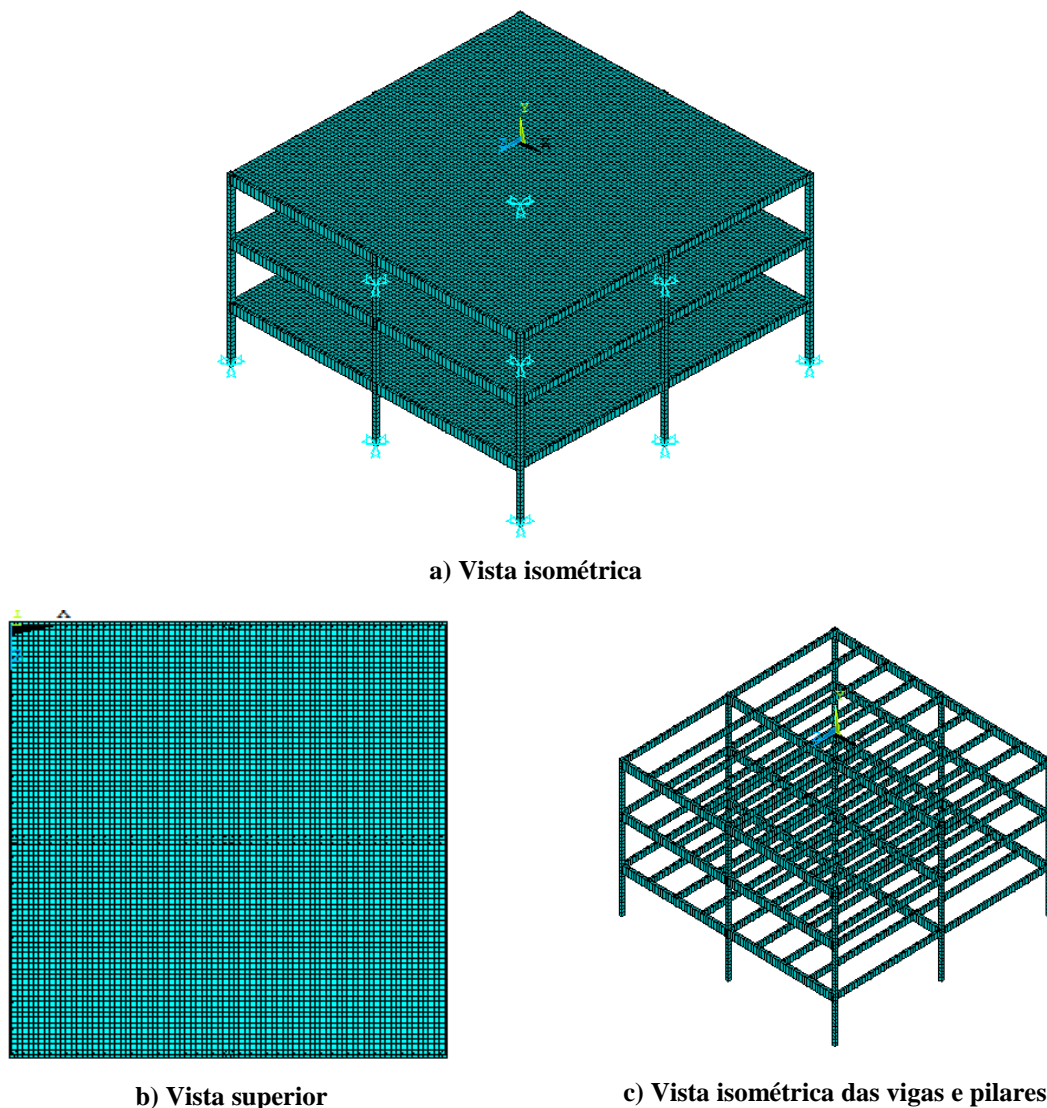


Figura 7. Modelo em elementos finitos

4 ANÁLISE DINÂMICA

4.1 Frequências naturais e Modos de Vibração

A Tabela 2 apresenta os valores das frequências naturais do edifício em estudo. Verifica-se uma variação de 6,2 Hz a 7,6 Hz nos valores destas frequências, de modo que as mesmas se encontram na mesma faixa de frequência de excitação do terceiro harmônico associado às atividades aeróbicas: 5,66 Hz - 8,57 Hz (Faisca 2003) e 4,5 Hz - 8,4 Hz (SCI 2009), de acordo com a Tabela 3. Além disso, a frequência fundamental da estrutura ($f_{01} = 6,29$ Hz) não atende aos valores mínimos recomendados por normas e recomendações de projeto ($f_{\min} = 8$ Hz) (NBR-6118 2007) e ($f_{\min} = 9,2$ Hz) (Murray et al 2003).

Consequentemente, a estrutura investigada apresenta uma maior suscetibilidade para ocorrência do fenômeno físico da ressonância, indicando claramente a possibilidade do surgimento de vibrações excessivas e desconforto humano. Em seguida, as Figs. 8 e 9 apresentam ilustrativamente alguns dos modos de vibração que podem vir a ser excitados pela ação do carregamento dinâmico humano rítmico.

Tabela 2. Frequências naturais do modelo estrutural investigado

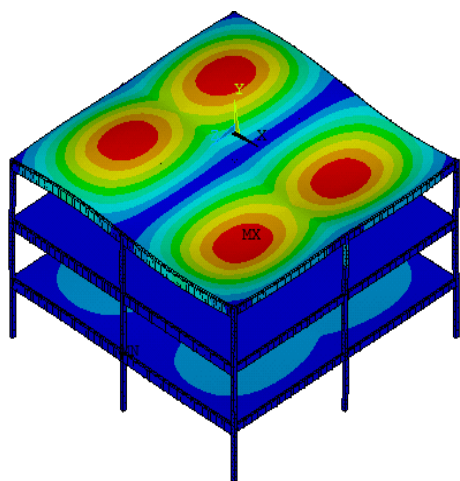
Modos de vibração	Frequências naturais (Hz)	Modos de vibração	Frequências naturais (Hz)
f_{01}	6,29	f_{09}	7,33
f_{02}	6,54	f_{10}	7,34
f_{03}	6,56	f_{11}	7,52
f_{04}	6,60	f_{12}	7,59
f_{05}	6,98	f_{13}	9,30
f_{06}	7,10	f_{14}	9,48
f_{07}	7,27	f_{15}	9,54
f_{08}	7,29	f_{16}	10,04

Tabela 3. Faixa de frequência de excitação (aeróbicas) relativa ao terceiro harmônico da atividade

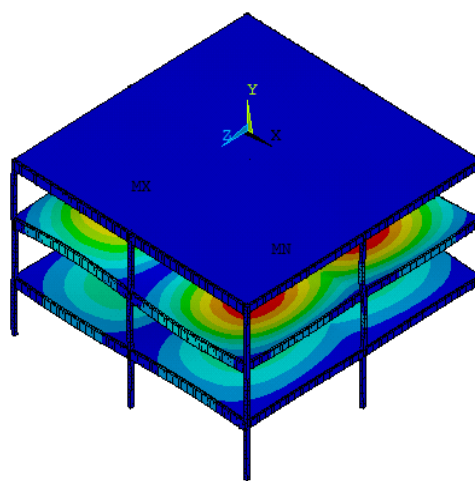
Modelo de carregamento	Faixas de frequência da excitação correspondente ao 3º harmônico (Hz)
FAISCA (2003)	5,66 - 8,57
SCI (2009)	4,5 - 8,4
AISC (2003)	6,0 - 8,25

Tabela 4. Frequência fundamental mínima recomendada segundo normas e guias de projeto

Norma/Critério de projeto	Atividade praticada	Frequência natural mínima (Hz)
NBR 8800	Ginástica aeróbica	8
NBR 6118	Academias de Ginástica	8
Guia AISC	Ginástica aeróbica para pisos	9,2

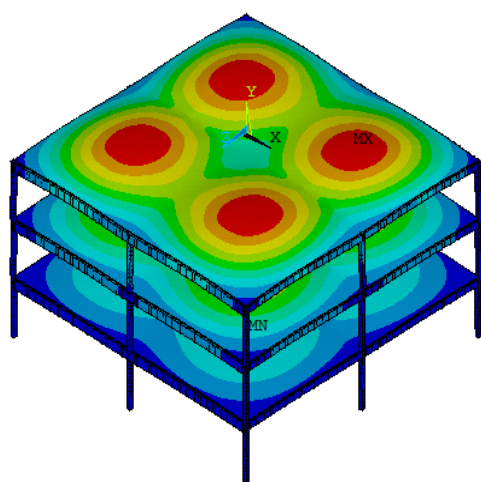


a) 1° Modo de vibração ($f_{01}=6,29\text{Hz}$)

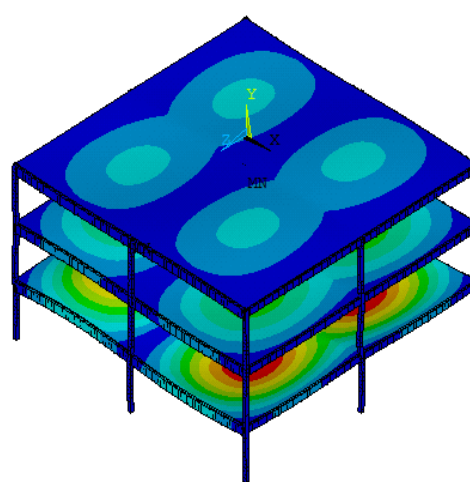


b) 2° Modo de vibração ($f_{02}=6,54\text{Hz}$)

Figura 8. Modos de vibração do modelo estrutural investigado



a) 3° Modo de vibração ($f_{03}=6,56\text{Hz}$)



b) 4° Modo de vibração ($f_{04}=6,60\text{Hz}$)

Figura 9. Modos de vibração do modelo estrutural investigado

5 ANÁLISE 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. A Tabela 5 apresenta os valores limites recomendados por diversos autores (Ellis e Littler 2004; Murray et al. 2003; SCI 2009; Setareh 2012).

Tabela 5. Critérios de conforto humano para atividades humanas rítmicas

SCI (2009)	Ellis e Littler (2004)	Setareh (2012)	Reação das pessoas
$a_{w,rms}$ (m/s ²)	VDV (m/s ^{1,75})	VDV (m/s ^{1,75})	
< 0,35	< 0,66	< 0,50	Limite aceitável
0,35 – 1,27	0,66 – 2,38	0,50 – 3,50	Perturbador
1,27 – 2,47	2,38 – 4,64	3,50 – 6,90	Inaceitável
> 2,47	> 4,64	> 6,90	Pânico

Valor Limite da aceleração de pico (a_p) = 0,5 m/s²

Com a finalidade de analisar os níveis de conforto humano da estrutura, realizou-se um estudo paramétrico, de modo que os modelos de carregamento I ao IV foram sintonizados com o 3º harmônico da frequência de excitação (ginástica aeróbica), com o intuito de provocar a ressonância com a 2º frequência natural da estrutura ($f_{02}=6,54\text{Hz}$). Deste modo, o nível de conforto humano pode ser investigado mediante a consideração da situação mais desfavorável de projeto, com base no emprego dos quatro modelos de carregamento dinâmicos analisados [MC-I a MC-IV: Eqs. (1) a (8)].

Cabe ressaltar que as forças dinâmicas geradas com base no uso dos modelos de carregamento I a III (MC-I a MC-III) são aplicadas nos pontos ilustrados na Fig. 5, diretamente sobre a estrutura investigada. Por outro lado, com relação ao modelo de carregamento IV (MC-IV), a força dinâmica atua sobre a massa dos sistemas biodinâmicos (ver Fig. 3) sobre os mesmos pontos mencionados anteriormente (ver Fig. 5).

A resposta estrutural dinâmica do edifício misto (aço-concreto) [deslocamentos, acelerações de pico, acelerações RMS e VDV], para os nós representados na Fig. 6, encontra-se apresentada nas Tabelas 6 a 9. Observa-se que os valores escritos em negrito representam os resultados que ultrapassaram os limites recomendados pelos critérios de conforto humano apresentados na Tabela 5.

Na sequência do estudo, observando-se os resultados apresentados pelas Tabelas 6 a 9, com base na análise da resposta estrutural dinâmica da edificação, obtida a partir do emprego dos modelos de carregamento dinâmico I a IV (MC-I a MC-IV), no intuito de simular a atividade humana rítmica (aeróbica) realizada por trinta e duas pessoas, verifica-se que os maiores valores da resposta (acelerações de pico, RMS e VDV) ocorrem sobre os nós G e H (Fig. 6), localizados na área do piso onde se pratica a atividade humana rítmica.

Com referência a comparação quantitativa entre os resultados fornecidos a partir da aplicação dos modelos de carregamento dinâmico (MC-I a MC-IV), cabe destacar que os valores mais elevados para a resposta (aceleração de pico, RMS e VDV), foram obtidos a partir do emprego do MC-III (SCI 2009). De outra forma, as menores amplitudes de resposta foram geradas mediante o uso do MC-IV (Modelos biodinâmicos: $c_i \neq 0$), como ilustrado pelas Tabelas 6 a 9 e Figs. 10 a 12.

Cabe ressaltar que o modelo MC-IV produz respostas dinâmicas de valores inferiores àquelas alcançadas com base no uso dos modelos de força dura (MC-I, MC-II e MC-III). Tal situação pode ser explicada pelo fato de que a presença dos trinta e dois indivíduos sobre o modelo estrutural contribui para um aumento do amortecimento do sistema, ocasionando diferenças nos valores das acelerações de pico, RMS e VDV. Outro ponto relevante a ser destacado diz respeito à transmissibilidade das vibrações do 2º pavimento para os outros andares do edifício, o que pode ser evidenciado quando a resposta dinâmica é avaliada a partir do emprego dos modelos MC-II e MC-III, como mostrado nas Tabelas 6 a 9 e Figs. 10 a 12.

Tabela 6. Resposta dinâmica do sistema estrutural. Deslocamento (mm)

Modelo de carregamento	1º andar				2º andar				3º andar			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
I	0,18	0,18	0,10	0,10	0,22	0,22	1,87	1,87	0,18	0,18	0,19	0,19
II	0,85	0,85	0,53	0,53	1,14	1,14	3,35	3,35	0,76	0,76	0,80	0,80
III	0,26	0,30	0,25	0,27	0,54	0,55	1,48	1,14	0,45	0,38	0,34	0,34
IV	0,52	3,73	3,32	5,51	0,52	3,59	4,07	4,33	0,58	3,74	3,40	5,56

Tabela 7. Resposta dinâmica do sistema estrutural. Aceleração de pico (m/s²)

Modelo de carregamento	1º andar				2º andar				3º andar			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
I	0,25	0,25	0,15	0,15	0,38	0,38	0,88	0,88	0,24	0,24	0,24	0,24
II	1,38	1,38	0,88	0,88	1,96	1,96	3,82	3,82	1,22	1,22	1,27	1,27
III	0,59	0,51	0,58	0,51	1,17	1,16	2,11	1,93	0,76	0,70	0,64	0,61
IV	0,12	0,73	0,64	1,07	0,12	0,70	0,77	0,82	0,14	0,72	0,65	1,06

Tabela 8. Resposta dinâmica do sistema estrutural. Aceleração RMS (m/s²)

Modelo de carregamento	1º andar				2º andar				3º andar			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
I	0,14	0,14	0,10	0,10	0,24	0,24	0,49	0,49	0,15	0,15	0,14	0,14
II	0,79	0,79	0,54	0,54	1,32	1,32	2,38	2,38	0,81	0,81	0,80	0,80
III	0,22	0,23	0,23	0,23	0,49	0,49	1,01	0,78	0,32	0,31	0,26	0,26
IV	0,03	0,23	0,21	0,32	0,04	0,22	0,23	0,24	0,04	0,23	0,22	0,33

Tabela 9. Resposta dinâmica do sistema estrutural. Aceleração VDV ($m/s^{1.75}$)

Modelo de carregamento	1° andar				2° andar				3° andar			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
I	0,31	0,31	0,20	0,20	0,50	0,50	1,04	1,04	0,30	0,30	0,30	0,30
II	1,74	1,74	1,14	1,14	2,73	2,73	4,98	4,98	1,67	1,67	1,68	1,68
III	0,49	0,51	0,51	0,51	1,12	1,09	2,32	1,77	0,73	0,71	0,60	0,61
IV	0,08	0,50	0,47	0,75	0,08	0,49	0,51	0,53	0,10	0,50	0,48	0,76

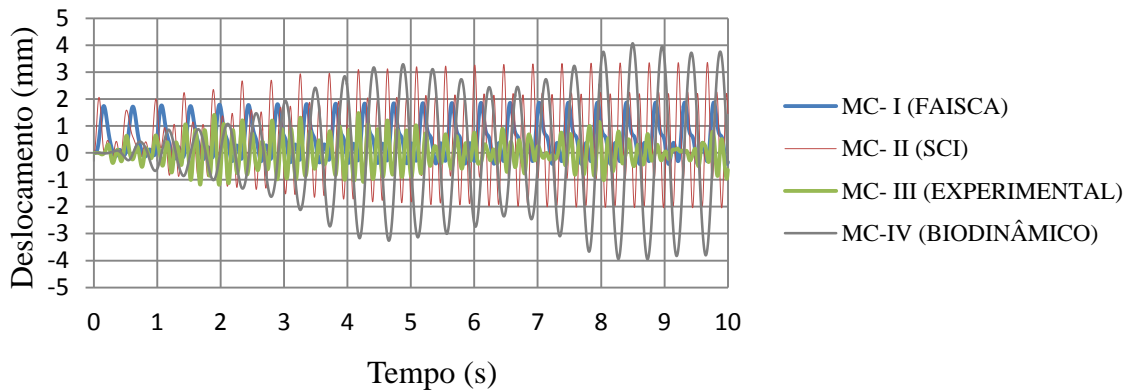


Figura 10. Deslocamento do nó G no domínio do tempo

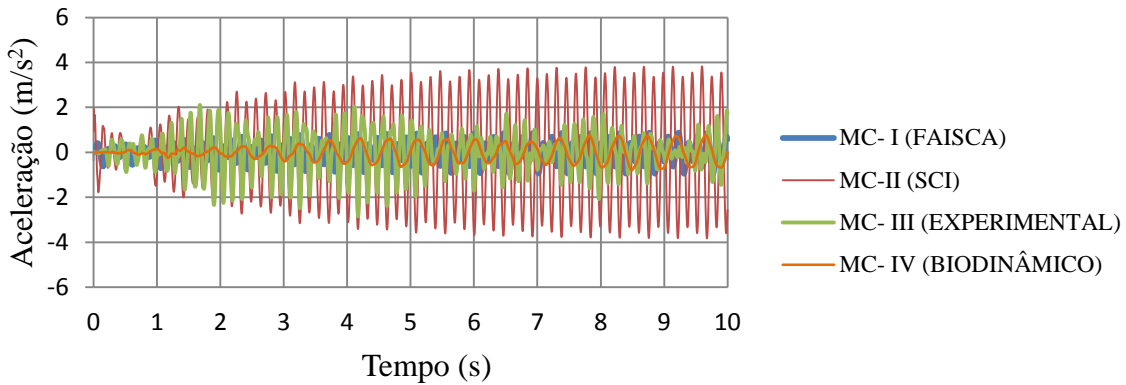


Figura 11. Aceleração do nó G no domínio do tempo

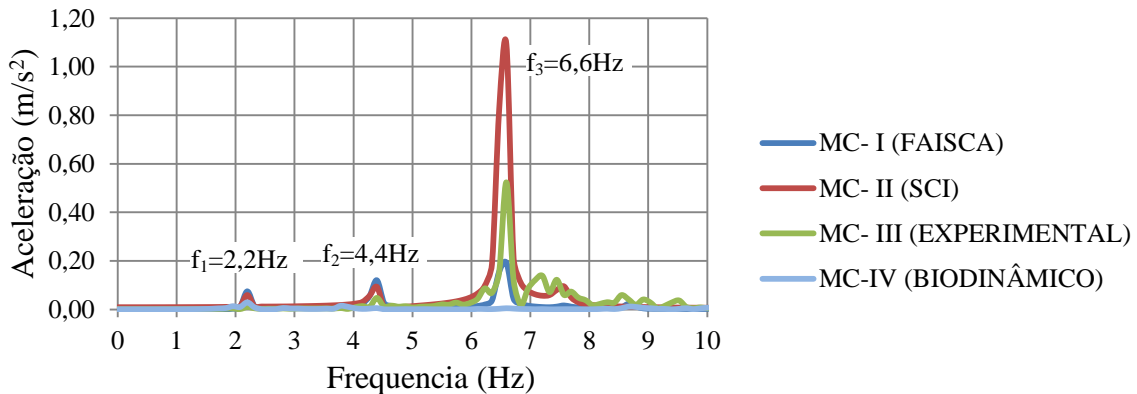


Figura 12. Aceleração do nó G no domínio da frequência.

Observando-se os resultados apresentados nas Tabelas 6 a 9 foram encontrados os valores máximos de $3,82 \text{ m/s}^2$ para as acelerações de pico, $2,38 \text{ m/s}^2$ para as acelerações RMS e $4,98 \text{ m/s}^{1,75}$ para os valores de dose de vibração VDV, no que tange ao modelo de carregamento II (MC-II) (SCI, 2009), sendo que tais valores representam um indicativo de vibrações desconfortáveis às pessoas. De outra maneira, verifica-se que o modelo de carregamento IV (MC-IV), referente ao modelo biodinâmico com amortecimento calculado pela Eq. (8), atua no sentido de atenuar o movimento de vibração da estrutura; e, portanto a resposta estrutural dinâmica gerada por este modelo apresentou os menores valores dentre todos os modelos de carregamento. Neste caso, os valores máximos da resposta (nó G) foram da ordem de $0,77 \text{ m/s}^2$; $0,23 \text{ m/s}^2$ e $0,51 \text{ m/s}^{1,75}$ para as acelerações de pico, RMS e VDV, respectivamente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de pesquisa investigou a resposta estrutural dinâmica de um edifício misto (aço-concreto) composto por três pavimentos, submetido a aulas de ginástica aeróbica realizada por trinta e dois indivíduos localizados no 2º andar da edificação. O sistema estrutural misto foi modelado com base no emprego do programa ANSYS e a resposta estrutural dinâmica do modelo foi obtida em termos dos valores das acelerações de pico, RMS e VDV, com base no emprego de quatro modelos de carregamento dinâmicos distintos.

Inicialmente, foi verificado que os valores das frequências naturais da estrutura (6,2 Hz a 7,6 Hz), se encontram na mesma faixa de frequência do 3º harmônico das atividades aeróbicas. Deste modo, a estrutura torna-se suscetível a ressonância e existe uma boa chance da ocorrência de problemas de vibrações excessivas e desconforto humano.

Ao longo das análises, foi constatado que o caso mais desfavorável em relação aos valores da resposta dinâmica ocorre sobre os nós G e H, associados ao pavimento do edifício onde foram realizadas as atividades rítmicas. Nesta situação foram encontrados os valores máximos de $3,82 \text{ m/s}^2$ para as acelerações de pico, $2,38 \text{ m/s}^2$ para as acelerações RMS e $4,98 \text{ m/s}^{1,75}$ para os valores de dose de vibração VDV, no que tange ao modelo de carregamento MC-II (modelo de força dura), sendo que tais valores representam um indicativo de vibrações desconfortáveis às pessoas.

Por outro lado, foi observado que o modelo de carregamento MC-IV (modelo biodinâmico), atua no sentido de atenuar o movimento de vibração da estrutura; e, portanto a resposta estrutural dinâmica gerada por este modelo apresentou os menores valores dentre todos os demais modelos de carregamento estudados. Neste caso, os valores máximos da resposta (nó G) foram da ordem de $0,77 \text{ m/s}^2$; $0,23 \text{ m/s}^2$ e $0,51 \text{ m/s}^{1,75}$ para as acelerações de pico, RMS e VDV, respectivamente.

A análise da resposta estrutural dinâmica revela, também, que a transmissibilidade das vibrações provenientes do 2º andar para o 1º e 3º pavimentos da edificação é um fato importante para ser considerado no projeto final da edificação. Neste sentido, também é recomendável afastar as frequências naturais da estrutura das frequências das atividades rítmicas com a finalidade de reduzir as vibrações e garantir o conforto humano dos usuários.

Convém chamar a atenção do leitor para o fato de que os autores ressaltam a importância de um estudo mais aprofundado sobre a avaliação do amortecimento dos indivíduos (c_i), pelo fato de que esta grandeza apresenta influencia significativa sobre os valores da resposta dinâmica da estrutura. Finalmente, de acordo com os resultados alcançados nesta investigação, faz-se necessário dar continuidade à pesquisa sobre a influência do

amortecimento das pessoas sobre a resposta dinâmica, mediante o desenvolvimento de testes experimentais e modelagem numérica. O aprofundamento dos estudos sobre os modelos biodinâmicos também é importante, no que tange ao estudo da interação entre as propriedades dinâmicas das pessoas (massa e rigidez) e o sistema estrutural.

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., 2010. 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.

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

Barker, C. Mackenzie., D., 2008, Calibration of the UK national annex, footbridges 2008, Proceedings of the International Conference, Porto, Portugal.

Campista, F.F., 2015. *Análise de vibrações e estudo de conforto humano sobre pisos mistos (aço-concreto) submetidos a ações humanas rítmicas*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

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.

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* 157(SB4): 235-241.

Faisca R.G., 2003. *Caracterização de Cargas Dinâmicas Geradas por Atividades Humanas*, 230f. Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Ferris, D. P., Louie, M. Farley, C. T., 1998. “*Running in the real world: adjusting leg stiffness for different surfaces*”. Proc. R. Soc. London B 265, pp. 989-994.

Gaspar, C.M.R., 2013, “Dynamic Analysis and Vibration Control of Buildings' Floors when Submitted to Human Rhythmic Activities.”, MSc Dissertation (In Portuguese), Civil Engineering Post-graduate Programme, PGECIV, State University of Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brazil.

Gaspar C.M.R. and 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.

Gaspar, C.M. 2016. *The use of biodynamic models for vibration serviceability analysis of steel-concrete composite floors when subjected to human rhythmic activities*. PhD Thesis

Civil Engineering Post-graduate Programme, PGECIV. State University of Rio de Janeiro, UERJ. Rio de Janeiro/RJ, Brazil [In Portuguese. In development].

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

ISO 5982, 1981. International Organization for Standardization. *Bases for Design of Structures - Vibration and Shock-Mechanical driving point impedance of the human body*.

Joint Working Group IStructE/DCLG/DCMS, 2008. Dynamic Performance Requirements for Permanent Grandstands: Recommendations for Management Design and Assessment, Institution of Structural Engineers, London.

Jones CA, Pavic A, Reynolds P, Harrison RE. (2011) Verification of equivalent mass-spring-damper models for crowd-structure vibration response prediction, *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 38, pages 1122-1135.

Littler, J. D., 1996, Measuring the dynamic response of temporary grandstands, EURO DYN'96, pp. 907-913, ISBN 9054108134.

Matsumoto, Y., Griffin, M. J., 2003. "Mathematical models for the apparent masses of standing subjects exposed to vertical whole-body vibration", *Journal of Sound and Vibration*, 260 pp. 431-451.

Murray T.M., Allen D.E., Ungar E.E., 2003. *Floor Vibrations due to Human Activity*", *Steel Design Guide Series*. American Institute of Steel Construction, AISC, Chicago, USA.

Nhleko, S., Zingoni, A., Moyo, P., 2008. "A variable mass model for describing load impulses due to periodic jumping". *Engineering Structures*, 30, pp. 1760-1769.

Nigg, B. M., Liu, W., 1999. "The effect of muscle stiffness and damping on simulated impact force peaks during running". *Journal of Biomechanics*, 32, pp. 849-856.

Sachse, R., Pavic, A., Reynolds, P., 2003. "Human-Structure Dynamic Interaction in Civil Engineering Dynamics: A Literature Review". *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 35, No. 1, pp. 3-18.

Setareh, M., 2012. "Evaluation and assessment of vibrations owing to human activity", in Proceedings of the Institution of Civil Engineers – *Structures and Buildings* 165(SB5): 219–231.

Sim J., Blakeborough, A., Williams, M., 2006, Modelling effects of passive crowds on grandstand vibration, *Structures & Buildings*, v. 159, pp. 261-272.

Smith A.L., Hicks S.J, Devine P.J., 2009. "Design of floors for vibrations: A new approach", SCI Publication P354, Ascot.