



EFEITO DO USO DE MODELOS BIODINÂMICOS SOBRE O COMPORTAMENTO DINÂMICO DE PISOS MISTOS (AÇO-CONCRETO) SUBMETIDOS A AÇÕES HUMANAS RÍTMICAS

Cássio Marques Rodrigues Gaspar

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. *Um aumento crescente dos problemas estruturais associados à vibração excessiva de pisos de edificações de estruturas mistas (aço-concreto) devido a atividades humanas rítmicas tem sido relatado por diversos pesquisadores nos últimos anos. Nesse sentido, a representação da atividade humana não é uma tarefa simples. A partir de ensaios experimentais, vários pesquisadores propõem o uso de formulações matemáticas representativas das ações dinâmicas humanas atuando como uma força sobre a estrutura. Por outro lado, recentes investigações têm demonstrado que a interação ser humano-estrutura através de um modelo biodinâmico (massa-mola-amortecedor) apresenta resultados mais realísticos de acordo com a prática de projeto. Nesse sentido, este trabalho de pesquisa desenvolve um estudo comparativo com base em ambas as formulações no que diz respeito ao conforto humano dos ocupantes. Para tal, o modelo estrutural estudado baseia-se em um piso de edificação mista (aço-concreto) correntemente submetidos a atividades humanas rítmicas. São empregadas técnicas usuais de modelagem, via método dos elementos finitos (MEF), por meio da utilização do programa ANSYS.*

Palavras-chave: *Pisos mistos, Modelos biodinâmicos, Conforto humano*

1 INTRODUÇÃO

Engenheiros civis são constantemente desafiados a projetar estruturas que atendam a vários fatores, de forma simultânea, relacionados à segurança estrutural, à economia e ao conforto humano de seus usuários. Nas duas últimas décadas tem-se percebido um aumento significativo de sistemas estruturais esbeltos, flexíveis e com baixo amortecimento estrutural inerente. Tal fato é frequentemente atribuído ao avanço tecnológico no campo dos materiais, proporcionando materiais mais resistentes para a aplicação em obras civis assim como o uso de vãos maiores e seções transversais menores no dimensionamento de estruturas na fase de projeto. Logo, uma consequência direta desta tendência está relacionada ao aumento de vibrações indesejadas ao conforto humano (Jones et al., 2011; ISO10137, 2007).

Pode-se dizer que entre os diversos tipos de carregamentos atuantes sobre pisos de edificações, a parcela correspondente a atividades humanas constitui uma grande parte destes. Tais atividades, portanto, comportam-se frequentemente como carregamentos dinâmicos, por exemplo, relacionados ao caminhar humano, dança e ginástica aeróbica. Tendo em vista que estes carregamentos dinâmicos apresentam intrinsecamente uma força variável no tempo, é natural que surjam vibrações nos sistemas estruturais sobre os quais eles estão aplicados, isto é, deslocamentos, velocidades e acelerações variáveis no tempo.

Nota-se que há uma combinação de fatores que conduzem os sistemas estruturais a vibrações excessivas do ponto de vista humano. Além do baixo amortecimento estrutural inerente, as frequências naturais de pisos de edificações são, na maioria das vezes, encontradas na faixa de 4 a 8 Hz, justamente na mesma região dos harmônicos das atividades humanas. Consequentemente, esta combinação propicia a ocorrência do fenômeno de ressonância, ocorrendo, portanto, a amplificação das vibrações. Além disso, os seres humanos apresentam mais sensibilidade às vibrações na faixa de frequência mencionada (Bachmann et al., 1995; Murray et al., 2003; Smith et al., 2009, Gaspar, 2013). Ressalta-se que na maioria desses casos trata-se de um problema predominantemente relacionado ao estado limite de serviço e pouco relacionado ao estado limite último do sistema estrutural (Murray et al., 2003). Tal particularidade resulta em menor atenção dada ao conforto humano dos usuários na prática corrente de projeto principalmente no Brasil.

Por outro lado, diversos autores têm investigado a representação de atividades humanas rítmicas, por intermédio de funções matemáticas, de forma a melhor avaliar ainda na fase de projeto o nível de vibrações em que o sistema estrutural está submetido assim como ao conforto humano dos usuários (Bachmann et al., 1995; Murray et al., 2003; Faisca, 2003; Smith et al., 2009). Tais funções matemáticas tem se mostrado mais ou menos conservadoras em relação ao custo final do projeto (Cappellini, 2015; Gaspar, 2015). Paralelamente, recentes estudos têm demonstrado de uma forma mais realista o contato da atividade humana nos sistemas estruturais através do estudo da interação ser humano-estrutura, um campo que envolve a interdisciplinaridade com a área da biomecânica (Jones et al, 2011; Cappellini, 2015).

2 MODELAGEM DO CARREGAMENTO DINÂMICO HUMANO

As vibrações induzidas por atividades humanas – tal como o caminhar, corrida, saltos e ginástica aeróbica – consistem em um problema complexo em relação a sua representação matemática. Isto porque as ações dinâmicas geradas durante essas atividades estão diretamente relacionadas às características próprias de cada indivíduo como a idade, o peso, a habilidade física, o tipo de calçado e ainda a forma como cada indivíduo realiza tal atividade.

Além disso, a própria natureza das atividades humanas praticadas apresentam diferenças entre si no que diz respeito ao tempo de contato entre os pés e o solo. Portanto, todos esses aspectos não contribuem para uma fácil representação matemática ou física desse fenômeno (Bachmann et al., 1995; Murray et al., 2003; Jones et al., 2011; Cappellini, 2015).

Apesar disso, no que diz respeito às atividades humanas rítmicas, diversos pesquisadores representaram matematicamente este carregamento através de uma série de Fourier, com base em testes experimentais, considerando uma parte estática (devido ao peso individual) e outra parte devido à carga dinâmica variando no tempo (Bachmann et al., 1995; Murray et al., 2003; Ellis e Ji, 2004). Para tanto, a função semisseno é comumente utilizada por estes autores para a modelagem da atividade rítmica. Por outro lado, salienta-se que a função matemática desenvolvida por Faisca (2003) foi mais bem representada pela função Hanning com base em seus dados experimentais. Até a presente data, boa parte desses trabalhos está contida em diversas normas e guias de projeto estrangeiros de modo que os engenheiros projetistas possam avaliar o nível de vibrações de seus modelos estruturais na fase de projeto (Bachmann et al., 1995; AISC, 2003; SCI, 2009).

Embora a metodologia desenvolvida por estes trabalhos seja semelhante, eles diferem principalmente entre si no valor de seus coeficientes dinâmicos e no fator de defasagem (falta de sincronismo) entre os praticantes das atividades rítmicas. Evidentemente, tais diferenças geram respostas mais ou menos conservadoras em relação ao conforto humano. É importante ressaltar que as normas brasileiras NBR6118 (2014) e 8800 (2008) abordam o assunto de maneira simplificada, recomendando-se valores de frequências naturais e deslocamentos estáticos mínimos de modo que a ressonância seja evitada. Para uma avaliação precisa, a NBR 8800 considera a consulta ao Guia Prático do AISC (2003) e do SCI (2009). As Eqs. (1) a (6) apresentam as funções matemáticas dos modelos propostos pelo AISC (2003), SCI (2009) e Faisca (2003), respectivamente. As Figs. 1 e 2 apresentam um exemplo dessas funções no domínio do tempo e da frequência, respectivamente, considerando uma frequência de passo igual a 2,12 Hz, o peso de uma pessoa de 800N e uma distribuição de 20 pessoas.

$$F(t) = P + P \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i \cos(2\pi f_p t + \phi_i) \right] \quad (1)$$

Onde:

$F(t)$: representação matemática para o carregamento no tempo (N);

P : peso da pessoa (N);

n : número de harmônicos considerados para representar a atividade humana;

α_i : coeficiente dinâmico do i -ésimo harmônico da frequência da força;

i : número do i -ésimo harmônico da frequência da força;

f_p : frequência do passo da atividade humana (Hz);

t : tempo em (s);

ϕ_i : ângulo de fase entre o i -ésimo e o primeiro harmônico.

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

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

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

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

Onde:

F : representação matemática do carregamento no tempo em (N);
 G : peso de uma pessoa (N);
 $r_{n,v}$: coeficiente de Fourier (n) induzida por v pessoas;
 n : número de termos de Fourier;
 v : número de pessoas;
 f_p : frequência do carregamento;
 t : tempo em (s);
 ϕ_n : diferença de fase.

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

$$F(t) = 0 \quad \text{Para } T_c \leq t \leq T$$
(6)

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).

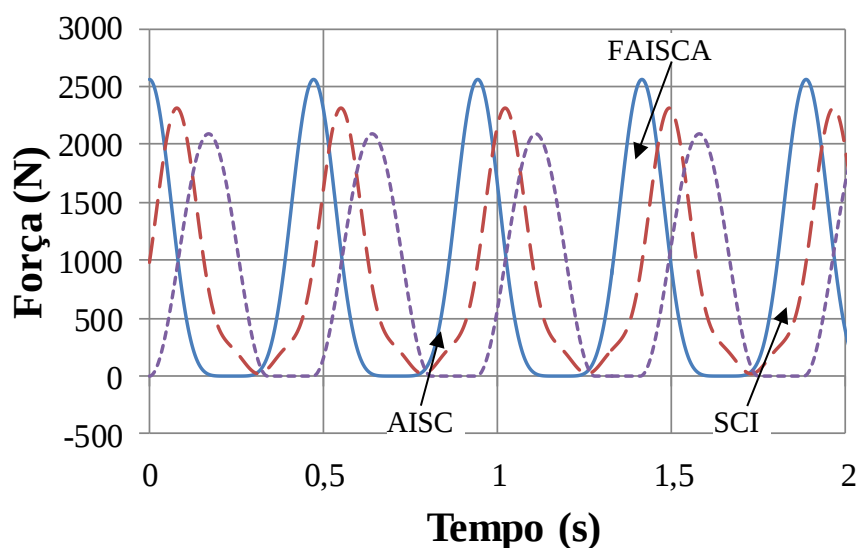


Figura 1. Funções dinâmicas no domínio do tempo

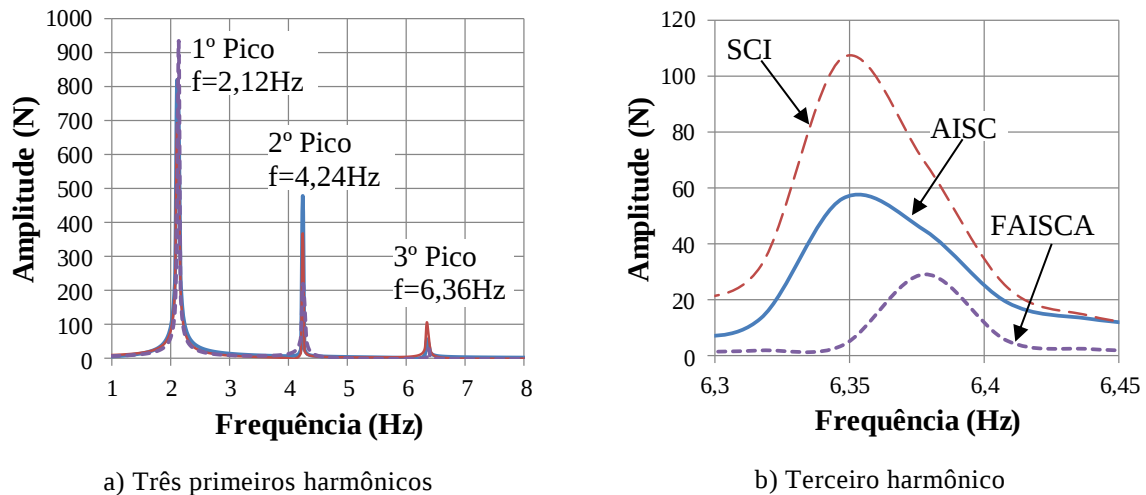


Figura 2. Funções dinâmicas no domínio da frequência

3 EFEITO DA INTERAÇÃO SER HUMANO-ESTRUTURA

Cappellini (2015) cita que a abordagem determinística da representação humana atuando como uma força dinâmica externa sobre os sistemas estruturais é uma hipótese muito simplista e que não reflete o real comportamento dinâmico entre o homem e a estrutura. Nesse sentido, tem-se notado que, em sua maior parte, estas forças externas tendem a superestimar as vibrações obtidas na fase de projeto, podendo tornar os projetos mais onerosos. Geralmente, estas forças são aplicadas em relação a uma estrutura “vazia” ou com baixo amortecimento estrutural uma vez que o amortecimento individual inerente do indivíduo é desconsiderado.

A interação dinâmica entre o ser humano e sistemas estruturais é definida, segundo Jones et al. (2011), como o fenômeno pelo o qual a combinação de ambas as características dinâmicas – relacionadas à rigidez, massa e amortecimento do homem e da estrutura – sobre a qual ele se encontra resulta em um conjunto particular de novas propriedades dinâmicas. Diversos pesquisadores têm representado dinamicamente o corpo humano através de sistemas do tipo massa-mola-amortecedor com poucos graus de liberdade de tal modo que o corpo biodinâmico seja suficientemente bem representado para o uso em problemas de engenharia. Alternativamente, o amortecimento do conjunto “ser humano-estrutura” pode ser considerado indiretamente através de um amortecimento equivalente (AISC, 2003).

Sachse (2004) propôs a um modelo de interação ser humano-estrutura com dois graus de liberdade similarmente a um TMD (*tuned mass damper*) para prever o comportamento dinâmico do sistema. Entretanto, o estudo possui algumas limitações segundo Cappellini (2015): as propriedades do corpo humano variam com a frequência natural da estrutura vazia, o efeito do comportamento multimodal com frequências naturais próximas pode não ser considerado assim como aquele da distribuição espacial das pessoas sobre cada nó da estrutura.

O modelo mais recente de interação biodinâmica ser humano-estrutura é preconizado pelo guia de projeto Join Working Group (JWG, 2008) com base no trabalho desenvolvido por Pavic e Reynolds (2008) e Dougill et al. (2006). Ressalta-se que, até o presente momento, é o único guia de projeto que recomenda a modelagem do efeito biodinâmico em detrimento dos modelos de carregamento atuando somente como uma força externa à estrutura. Pavic e Reynolds (2008) estudaram a interação de pessoas ativas e passivas numa arquibancada e

propuseram um modelo representativo de 3 graus de liberdade, como apresentado na Fig. 3. Nota-se o aparecimento de uma força interna, $P(t)$, composta de um oposto de forças, associada ao grau de liberdade relativo às pessoas ativas (aquelas que praticam a atividade rítmica). Os autores fazem distinção entre essa força e aquela aplicada diretamente sobre a estrutura, conforme os modelos de carregamento associados à aplicação de uma força externa pura.

É interessante notar que a função matemática da força, $P(t)$, é semelhante a Eq. (1), exceto pela parcela do peso estático – a qual é considerada igual a zero – e os valores dos coeficientes dinâmicos empregados. Além disso, os autores demonstraram uma boa acurácia entre o modelo proposto e dados experimentais em arquibancadas com multidões reais. Entretanto, a principal limitação deste modelo está relacionada às pessoas ativas, onde é somente considerado o efeito de pessoas balançando (*bobbing or bouncing*) sem perda de contato com a estrutura. Salienta-se que na Fig. 3, m_i , k_i e c_i correspondem a massa, rigidez e amortecimento dos graus de liberdade apresentados. A frequência natural (f_n) e o amortecimento crítico (ξ) sugeridos para a modelagem das pessoas ativas e passivas correspondem a 2,3 Hz, 5 Hz, 25% e 40%, respectivamente (JWG, 2008).

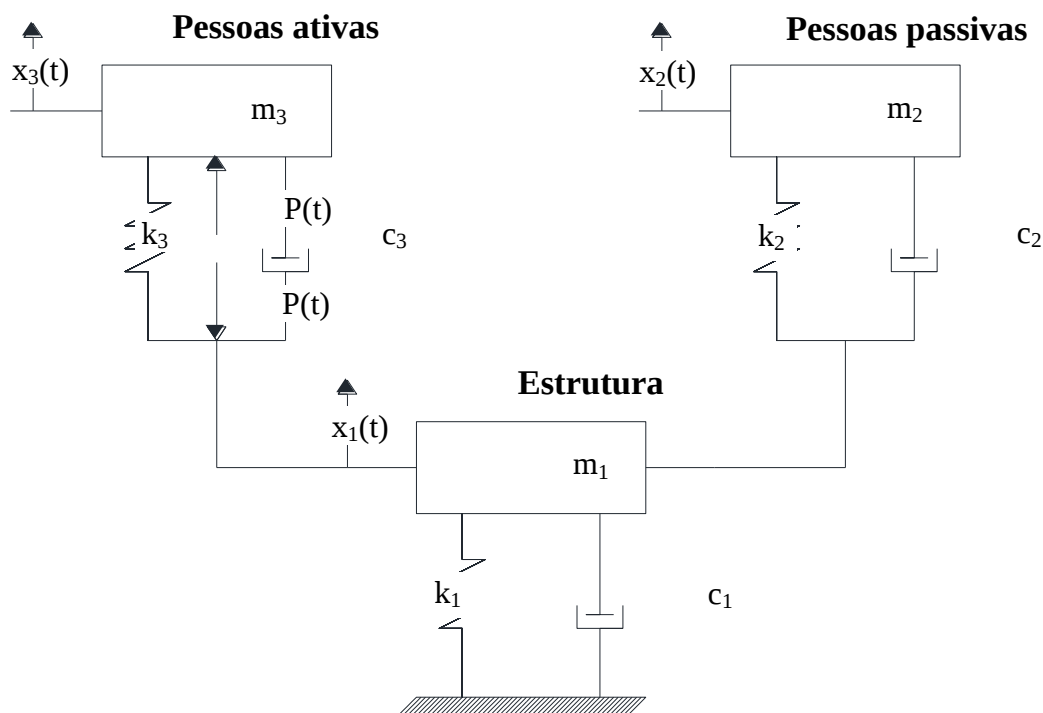


Figura 3. Interação ser humano-estrutura com 3 graus de liberdade (Pavic e Reynolds, 2008)

4 MODELO NUMÉRICO DO PISO MISTO (AÇO-CONCRETO)

O sistema estrutural investigado diz respeito a um piso misto (aço-concreto) composto por pilares metálicos, vigas metálicas e laje de concreto armado. Como pode ser observado na Fig. 4, o piso possui dimensões totais (eixo a eixo de colunas) de 10 x 10 m, área de 100 m² e colunas com altura de 4 m. Estes perfis metálicos são constituídos por um aço com tensão de escoamento de 345 MPa e módulo de elasticidade (E) de 205 GPa. A laje de concreto armado possui espessura de 10 cm, resistência característica à compressão (f_{ck}) de 30 MPa e módulo de elasticidade secante (E_{cs}) de 26 MPa.

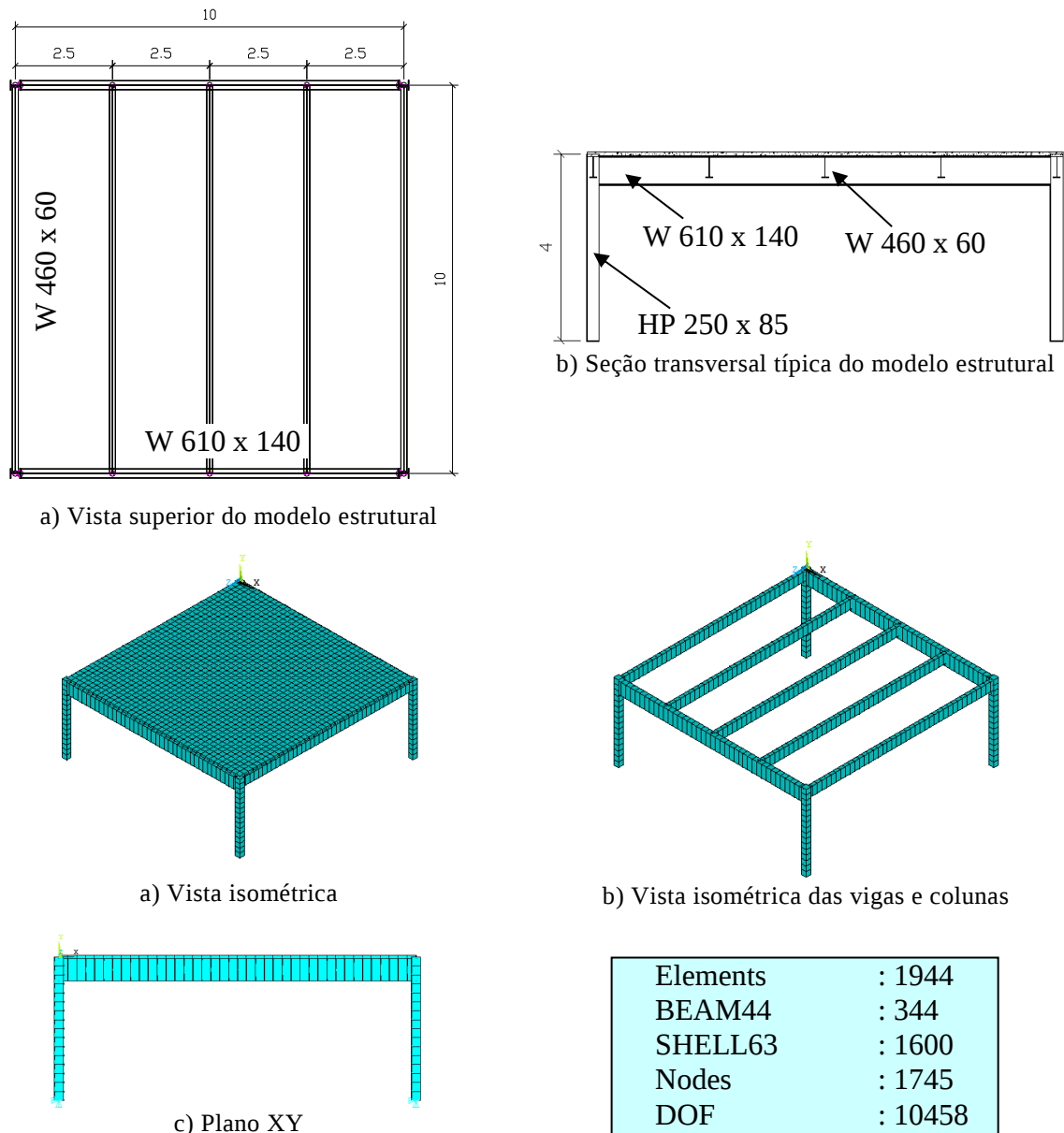


Figura 4. Modelo em elementos finitos do piso misto (aço-concreto)

O modelo numérico desenvolvido para a análise dinâmica do piso considera técnicas usuais de discretização, com base no emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF), por meio da utilização do programa ANSYS (ANSYS, 2007). Neste modelo computacional, as vigas e colunas são representadas por elementos tridimensionais de viga do tipo “BEAM44”, onde os efeitos de flexão e torção são considerados. A laje de concreto armado foi representada por elementos de casca do tipo “SHELL63”. Além disso, considera-se que ambos os materiais (aço e concreto) tenham um comportamento elástico. O modelo computacional é ilustrado na Fig. 4. A interação total entre a laje de concreto e as vigas metálicas foi considerada e, portanto, impedindo a ocorrência de qualquer deslizamento relativo entre ambos os elementos. As ligações viga-viga foram modeladas como conexões flexíveis e ligações viga-coluna foram consideradas como conexões rígidas. No que diz respeito à modelagem do sistema do corpo humano foram utilizados elementos de mola-amortecedor (COMBIN14) associados a elementos de massa (MASS21) com o objetivo de formarem um conjunto massa-mola-amortecedor.

5 ESTUDO DE CASOS

A partir do exposto nas seções 2 e 3, este trabalho tem a intenção de comparar, numericamente, as diferenças entre os dois tipos de representação das atividades humanas rítmicas na resposta dinâmica do piso misto (aço-concreto) investigado, através dos modelos de carregamento de força externa pura (força “dura”) – aplicados diretamente sobre o sistema estrutural – e também através da interação biodinâmica ser-humano estrutura. Para tanto, considera-se um caso corrente de projeto para a avaliação do conforto humano em um piso de academia submetido a atividades de ginástica aeróbica. Desse modo, são definidas as seguintes estratégias para este trabalho:

- Simulação da atividade aeróbica a partir dos modelos de carregamento do tipo força “dura” considerando o amortecimento da estrutura vazia (caso mais desfavorável);
- Simulação da atividade aeróbica a partir dos modelos de carregamento do tipo força “dura” considerando indiretamente o amortecimento da estrutura cheia;
- Simulação da atividade aeróbica a partir de um modelo biodinâmico das pessoas ativas através de um sistema massa-mola-amortecedor (interação ser humano-estrutura).

Neste estudo, consideraram-se vinte pessoas praticando atividade aeróbica sobre o modelo investigado [Fig. (5)] com uma taxa de distribuição igual a 0,25 pessoas/m² (Bachmann et al., 1995). Além disso, o peso de cada indivíduo foi considerado igual a 800 N. O amortecimento da estrutura vazia adotado é igual a 1% e foi escolhido com base na faixa extrema de 0,5 a 8,0% para vigas mistas com interação total (ISO10137, 2007). Em relação ao amortecimento indireto do conjunto “ser humano-estrutura” foi considerado um amortecimento estrutural equivalente igual a 6% (AISC, 2003).

No que diz respeito à simulação biodinâmica da interação ser-humano estrutura, deve-se enfatizar que o modelo atual do JWG (2008) não contempla a perda de contato com o solo relativo às pessoas ativas, o que não se aplica ao caso investigado neste trabalho (ginástica aeróbica). Não obstante, pretende-se, aqui, apresentar uma possível alternativa para este caso, levando-se em consideração a metodologia de interação biodinâmica proposta pelo JWG (2008). Portanto, tem-se a intenção de combinar a força “dura” com as propriedades do corpo humano indicadas pelo JWG (2008) de modo a simular a interação ser-humano estrutura. A Fig. 6 ilustra essa alternativa. A principal diferença entre a alternativa proposta reside no fato de que para o modelo do JWG (2008) um par de forças opostas é aplicado tanto na massa da pessoa ativa quanto na estrutura enquanto que neste trabalho somente uma força é aplicada sobre a massa da pessoa.

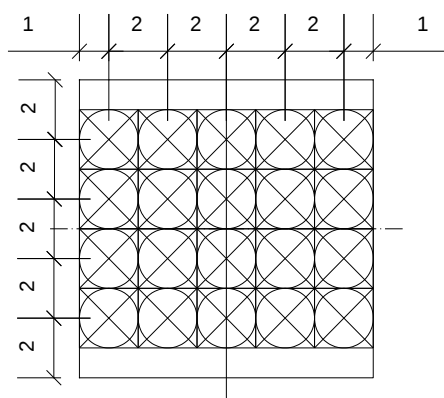


Figura 5. Vinte pessoas praticando atividade aeróbica sobre o piso misto investigado. Dimensões em (m)

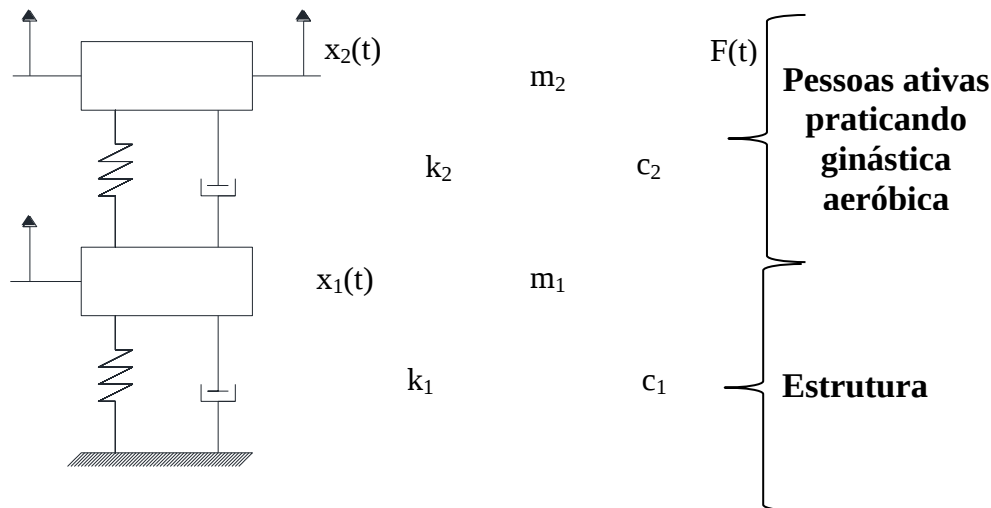


Figura 6. Alternativa para aplicação no modelo numérico investigado (estrutura e pessoas ativas)

De acordo com a Fig. 6, propõe-se simular a interação ser-humano estrutura para ginástica aeróbica. Para tanto, a frequência natural (f_n) e o amortecimento crítico (ξ) do corpo humano para pessoas ativas foram tomados iguais a 2,3 Hz e 25%, respectivamente (JWG, 2008). A massa adotada do corpo é de 80 kg. Considera-se a força dinâmica, $F(t)$, aplicada no grau de liberdade relativo ao corpo humano. Esta força dinâmica será aplicada com base nos modelos de carregamento propostos pelo AISC (2003) [Eq. (1)] e SCI (2009) [Eq. (2-5)], considerando somente a parcela devido à carga dinâmica (variando no tempo). A Tabela 1 apresenta os coeficientes dinâmicos das funções matemáticas correspondentes à força externa pura (força “dura”). É importante ressaltar que o modelo proposto na Fig. 6 foi implementado no modelo numérico do piso-misto com base no método dos elementos finitos (ANSYS, 2007) representando cada pessoa, individualmente, por um sistema massa-mola-amortecedor acoplado aos nós do piso.

A partir da comparação da Tabela 1 com a Fig. 2 (Seção 2) pode-se perceber que os coeficientes dinâmicos das funções AISC (2003) e SCI (2009) são mais energéticos que aqueles da função Faisca (2003). É importante lembrar que a falta de sincronismo entre os participantes da atividade rítmica e em função do número de pessoas não é levada em consideração para o modelo de carregamento do AISC (2003). Por outro lado, esta defasagem é contabilizada através das Eqs. (3), (4) e (5) para o modelo do SCI (2009) e do coeficiente de defasagem probabilístico (CD) para o modelo de carregamento da Faisca (2003). Ressalta-se que os valores dos coeficientes da função SCI foram obtidos considerando 20 pessoas praticando atividade aeróbica [Eqs. (3-5)].

Tabela 1. Valores médios dos coeficientes dinâmicos (Fourier) para vários modelos de carregamento

Modelo Carregamento	de	Coeficiente de Fourier		
		1º harmônico	2º harmônico	3º harmônico
AISC (2003)		1,50	0,60	0,10
SCI (2009)		1,26	0,46	0,17
FAISCA (2003)		1,32	0,29	0,05
JWG (2008)*		0,375	0,095	0,026

*Multidão altamente ativa. Não aplicável para perda de contato com o solo.

6 FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO

As frequências naturais e os modos de vibração do piso misto (aço-concreto) com sem pessoas e com 20 pessoas foram determinados com a ajuda de métodos numéricos de extração (análise modal) através do programa ANSYS (2007). Os autovalores (frequências naturais) encontram-se descritos na Tabela 2, enquanto os dois primeiros modos para ambos os casos são mostrados na Fig. 7.

Tabela 2. Frequências naturais do piso misto (aço-concreto) investigado (vazio e cheio)

Frequências (Hz)	Frequências naturais do piso misto (aço-concreto)	
	Estrutura sem pessoas	Estrutura com 20 pessoas
f_{01}	6,36	6,39
f_{02}	9,78	9,80
f_{03}	12,56	12,58
f_{04}	13,62	13,63
f_{05}	18,32	18,33
f_{06}	21,72	21,72

No que diz respeito à Tabela 2, pode ser visto que a primeira frequência natural do piso tanto vazio quanto cheio ($f_{01}=6,36\text{Hz}$ e $f_{01}=6,39\text{Hz}$, respectivamente) encontra-se na faixa de frequência da atividade aeróbica correspondente ao terceiro harmônico. Em outras palavras, o terceiro harmônico da força dinâmica pode igualar-se a frequência natural fundamental do piso e, portanto, conduzi-lo a um estado de ressonância. Consequentemente, tal situação pode resultar em vibrações indesejáveis e incômodas aos seres humanos (Bachmann et al., 1995).

Com o objetivo de se evitar tais vibrações indesejadas, a frequência fundamental piso deveria ser em torno de 9,2 Hz para aeróbica, considerando o sistema estrutural como um piso leve (Murray et al., 2003), ou no mínimo igual a 8,4 Hz de acordo com o SCI (2009). Nota-se que houve um ligeiro aumento de 0,47% na frequência fundamental do piso cheio em comparação com o vazio. Segundo Cappellini (2015), apesar de existir uma tendência de uma diminuição das frequências naturais da estrutura devido à presença de pessoas, por outro lado, alguns casos apresentaram um aumento ou até mesmo um modo adicional.

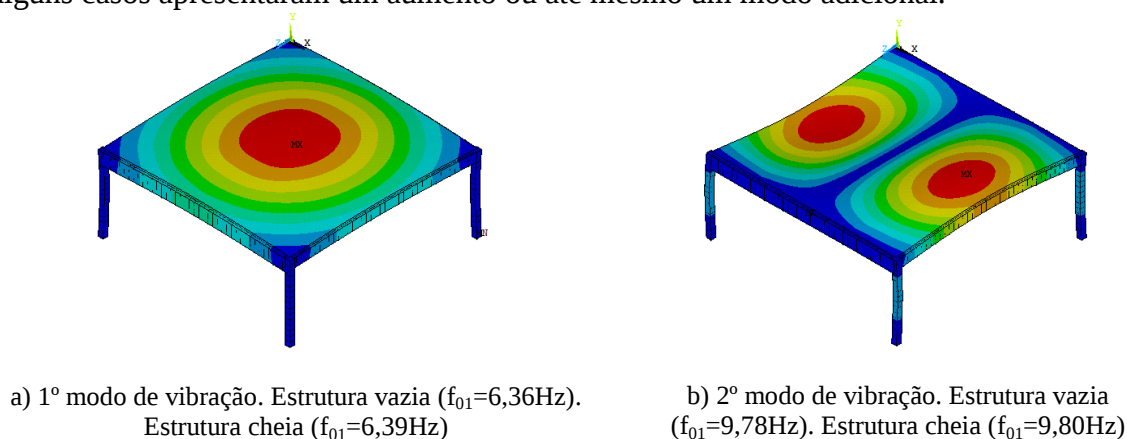


Figura 7. Modos de vibração do modelo estrutural investigado

7 ANÁLISE DO CONFORTO HUMANO

Em relação ao critério de análise do conforto humano, é importante notar que, até o presente conhecimento dos autores, não há um consenso no que diz respeito aos critérios de aceitação (valores limites) para atividades humanas rítmicas (Smith et al. 2009). Vários pesquisadores (Bachmann et al., 1995; Murray et al., 2003; Ellis e Littler, 2004; Smith et al. 2009; Setareh, 2012) têm estabelecido limites de conforto em função dos métodos de avaliação das acelerações.

Portanto, considerando estes aspectos, as acelerações do piso misto neste trabalho foram avaliadas com base nas acelerações de pico no regime permanente (steady-state), a_p , acelerações filtradas RMS, $a_{w,rms}$, e valores de dose de vibração, VDV. A Tabela 3 apresenta os valores limites RMS e VDV. O limite referente para as acelerações de pico (a_p) é igual a $0,5 \text{ m/s}^2$ (5%g), associado a atividades aeróbicas (Murray et al., 2003).

Tabela 3. Critérios de conforto humano para atividades humanas rítmicas

AISC (2003)	SCI (2009)	Ellis e Littler (2004)	Setareh (2012)	Reação das Pessoas
a_p (m/s^2)	$a_{w,rms}$ (m/s^2)	VDV ($\text{m/s}^{1.75}$)	VDV ($\text{m/s}^{1.75}$)	
0,5	< 0,35	< 0,66	< 0,50	Limite aceitável: pessoas passivas
	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	Provável condição de pânico

A partir da verificação das frequências naturais e modos de vibração do piso misto, todos os casos investigados foram sintonizados com uma frequência de passo de tal modo que o terceiro harmônico da atividade rítmica entre em ressonância com o modo fundamental do piso, tanto para a estrutura considerada vazia quanto cheia. O tempo total em que a atividade aeróbica foi realizada é igual a 10s para todos os casos de carregamento. Este tempo foi suficiente para que as atividades entrassem em regime permanente. As Tabelas 4, 5 e 6 exibem os valores da resposta dinâmica do piso misto (aço-concreto) investigado.

Tabela 4. Resposta dinâmica do piso misto. Modelos do tipo força “dura”. Amortecimento de 1%

Modelos de Carregamento	Resposta Dinâmica do Piso – Amortecimento estrutural ($\xi = 1\%$)			
	Reação das Pessoas	Aceleração (m/s^2)		VDV ($\text{m/s}^{1.75}$)
		a_p	$a_{w,rms}$	
AISC (2003)	Inaceitável/ Pânico	5,039	3,094	6,277
SCI (2009)	Pânico	8,377	5,273	10,850
Faisca (2003)	Perturbador/ Inaceitável	2,013	1,118	2,337

Tabela 5. Resposta dinâmica do piso misto. Modelos do tipo força “dura”. Amortecimento de 6%

Modelos de Carregamento	Resposta Dinâmica do Piso – Amortecimento estrutural ($\xi = 6\%$)			
	Reação das Pessoas	Aceleração (m/s^2)		VDV ($m/s^{1.75}$)
		a_p	$a_{w,rms}$	
AISC (2003)	Perturbador	1,255	0,747	1,683
SCI (2009)	Perturbador	1,733	1,099	2,226
Faisca (2003)	Aceitável/ Perturbador	0,603	0,318	0,692

Tabela 6. Resposta dinâmica do piso misto. Interação biodinâmica ser humano-estrutura

Modelos de Carregamento	Resposta Dinâmica do Piso – Interação ser humano-estrutura			
	Reação das Pessoas	Aceleração (m/s^2)		VDV ($m/s^{1.75}$)
		a_p	$a_{w,rms}$	
AISC (2003)	Perturbador	1,243	0,537	1,178
SCI (2009)	Perturbador	1,625	0,847	1,747
JWG (2008)	Aceitável	0,297	0,134	0,286

Tabela 7. Comparação entre o caso mais desfavorável (força dura, $e=1\%$) e os demais casos

Modelos de Carregamento	Redução em relação ao caso mais desfavorável (%)					
	Amortecimento estrutural ($\xi = 6\%$)			Interação ser humano-estrutura		
	Aceleração		VDV	Aceleração		VDV
	a_p	$a_{w,rms}$		a_p	$a_{w,rms}$	
AISC (2003)	-75	-76	-73	-75	-83	-81
SCI (2009)	-79	-79	-79	-81	-84	-84
Faisca (2003)	-70	-72	-70	–	–	–

Tabela 8. Comparação entre o caso com amortecimento estrutural equivalente de 6% e a interação biodinâmica ser humano-estrutura

Modelos de Carregamento	Redução em relação ao amortecimento estrutural (ξ =6%)		
	Interação ser humano-estrutura		
	Aceleração		VDV
	a _p	a _{w,rms}	
AISC (2003)	-1	-28	-30
SCI (2009)	-6	-23	-22

A partir da comparação entre as Tabelas 4, 5 e 6 pode-se perceber que os modelos de carregamento do tipo força “dura” considerando o amortecimento da estrutura vazia ($\xi = 1\%$) apresentaram os maiores valores de acelerações de pico no regime permanente (steady-state), a_p , acelerações filtradas RMS, $a_{w,rms}$, e valores de dose de vibração, VDV. Tais valores ultrapassaram os limites de conforto humano de acordo com a Tabela 3. Por outro lado, quando o amortecimento devido à presença de pessoas é levado em consideração indiretamente a partir de um amortecimento estrutural equivalente de 6% (AISC, 2003), há uma redução máxima na resposta dinâmica do piso de aproximadamente 76%, 79% e 72% para dos modelos de carregamento do AISC (2003), SCI (2009) e Faisca (2003), respectivamente (ver Tabela 7).

Contudo, tais valores ainda se encontram em níveis perturbadores ao conforto humano dos usuários, exceto pelo critério de avaliação da aceleração RMS, a qual se encontra em um nível aceitável. Em relação ao modelo biodinâmico das pessoas ativas (praticando ginástica aeróbica) através de um sistema massa-mola-amortecedor (interação ser humano-estrutura), houve uma redução máxima na resposta dinâmica do piso de aproximadamente 83% e 84% para dos modelos de carregamento do AISC (2003) e SCI (2009). No entanto, as vibrações obtidas são, ainda, perturbadoras ao conforto humano. Ressalta-se que os coeficientes dinâmicos do modelo de carregamento do JWG (2008), conforme anteriormente mencionado, não se aplica à representação da ginástica aeróbica (na qual ocorre perda de contato com o solo) e foram, não obstante, simulados para efeito de comparação; uma vez que o Join Work Group (JWG, 2008) é atualmente o único guia de projeto a preconizar o uso de modelos biodinâmicos em detrimento dos modelos de força “dura”.

No que diz respeito à comparação direta entre o caso de consideração do amortecimento estrutural equivalente de 6% e a modelagem da interação biodinâmica ser humano-estrutura, nota-se uma ligeira redução de 1% e 6% nas acelerações de pico em regime permanente para as funções de carregamento do AISC (2003) e SCI (2009), respectivamente, quando este modelo biodinâmico foi considerado (ver Tabela 8). Por outro lado, é perceptível uma maior sensibilidade deste modelo em relação às acelerações RMS e VDV, ocorrendo uma redução de 28% e 30%, respectivamente, para a função de carregamento AISC (2003), e de 23% e 22%, respectivamente, para a função de carregamento SCI (2009). Portanto, pode-se inferir que o modelo biodinâmico apresenta uma maior sensibilidade ao amortecimento das vibrações no regime transiente, uma vez que estas são contabilizadas nas acelerações RMS e VDV.

As Fig. 8, 9 e 10 apresentam a resposta dinâmica do piso misto investigado no domínio do tempo e da frequência para os três casos investigados. É possível perceber que, de uma maneira geral, as funções de carregamento do AISC (2003) e do SCI (2009) apresentaram valores mais energéticos em relação ao terceiro harmônico do que em relação ao modelo proposto por Faisca (2003), o que pode ser igualmente visto na Tabela 1 e Fig. 2. Portanto, as funções de carregamento do AISC (2003) e do SCI (2009) podem gerar valores de projeto mais conservadores e onerosos.

Nesse sentido, o uso da função Faisca (2003) tem se mostrado mais realista e adequado com a prática de projeto no caso de optar-se exclusivamente pelo emprego da força “dura”. Além disso, deve-se salientar que a consideração da influência do amortecimento das pessoas mostra-se ser mais coerente conforme demonstrado através da comparação de um modelo com um amortecimento estrutural equivalente e outro mais refinado, pela consideração da modelagem biodinâmica ser humano-estrutura. É interessante notar, na Fig. 10, houve um pequeno aumento da participação do primeiro harmônico na resposta dinâmica do piso, mostrando a influência da modelagem do corpo humano através do sistema massa-mola-amortecedor com uma frequência natural igual a 2,3 Hz.

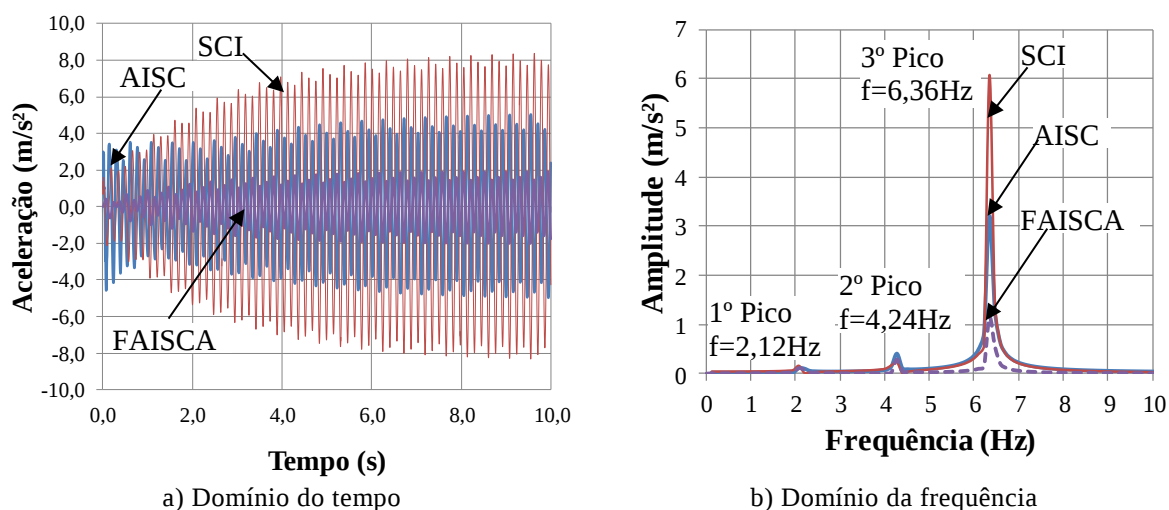


Figura 8. Resposta dinâmica do piso misto investigado. Força “dura”. Amortecimento estrutural de 1%

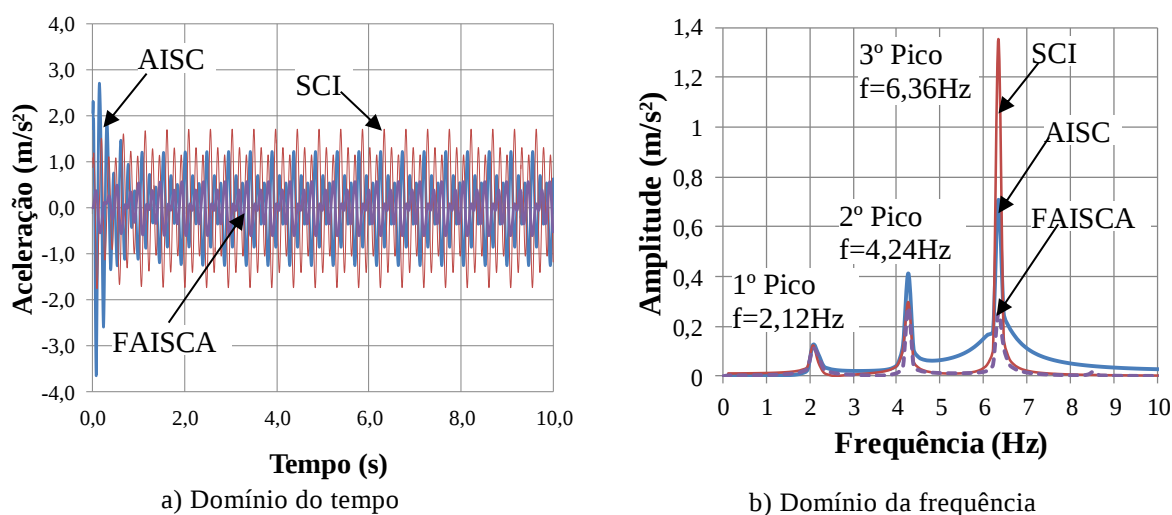


Figura 9. Resposta dinâmica do piso misto investigado. Força “dura”. Amortecimento estrutural de 6%

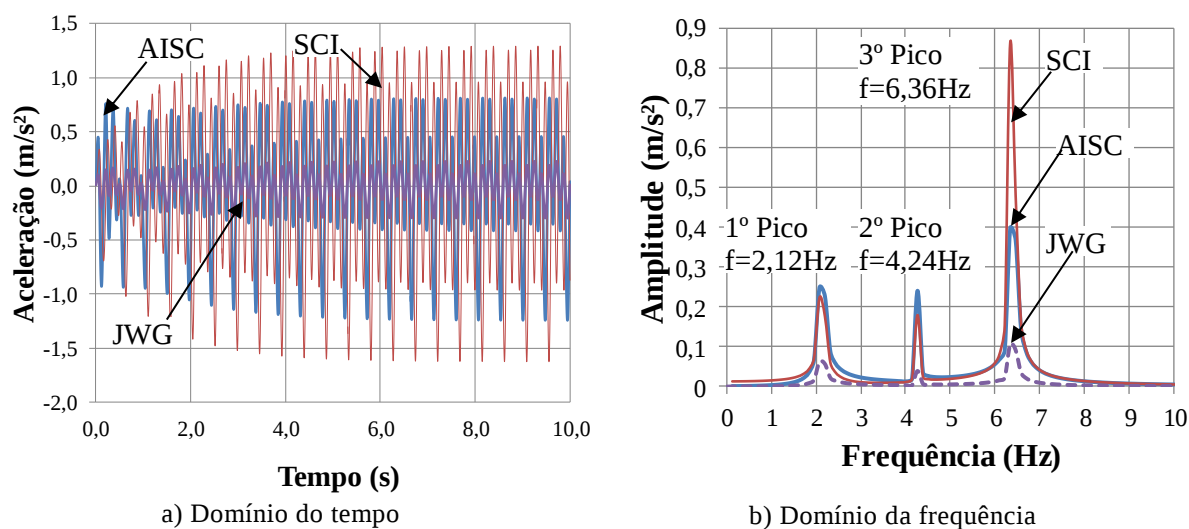


Figura 10. Resposta dinâmica do piso misto investigado. Interação biodinâmica ser humano-estrutura

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O problema de vibrações excessivas devido às atividades humanas rítmicas sobre pisos mistos (aço-concreto) tem sido relatado por diversos autores nos últimos anos. Portanto, este trabalho analisou numericamente um piso misto típico de academia com dimensões de 10m por 10m através do programa ANSYS. A análise modal realizada indicou que a frequência fundamental do piso é igual a 6,36Hz. Este valor de frequência está na faixa de atividades aeróbicas e, logo, podem conduzir a estrutura para um estado de ressonância.

Com o objetivo de mensurar as vibrações do piso e uma vez que a representação matemática de atividades humanas rítmicas não é uma tarefa simples, foram investigados três estudos de casos. Desse modo, a simulação da atividade aeróbica foi realizada a partir de três modelos carregamento, com base em recomendações de projeto, atuando como uma força externa à estrutura. Estes modelos de carregamento foram aplicados considerando o amortecimento da estrutura vazia (caso mais desfavorável) e a partir de um amortecimento estrutural equivalente considerando a presença das pessoas. Em seguida, realizou-se a modelagem biodinâmica das pessoas através de um sistema massa-mola-amortecedor (interação ser humano-estrutura).

Observou-se que na maioria dos casos o limite de conforto humano foi ultrapassado de modo que os usuários do piso possam estar sujeitos a vibrações excessivas e incômodas de acordo com normas e recomendações de projeto. Por outro lado, quando o efeito do amortecimento das pessoas foi levado em consideração, notou-se uma redução máxima de 79% e 84% das acelerações para os casos de amortecimento estrutural equivalente e interação ser humano-estrutura, respectivamente, em relação ao caso mais desfavorável.

Verificou-se que alguns modelos representativos da atividade humana rítmica como força externa são mais conservadores do que outros, podendo gerar projetos mais onerosos. Além disso, deve-se salientar que a consideração da influência do amortecimento das pessoas em ambos os casos investigados apresentou uma convergência de resultados de tal maneira que a contabilização desse efeito torna-se mais coerente com a prática corrente de projeto conforme demonstrado através da comparação de um modelo com um amortecimento estrutural equivalente e outro mais refinado, através da modelagem biodinâmica ser humano-estrutura.

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.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118, 2014. *Projeto de estruturas de concreto: Procedimento*. Rio de Janeiro. 238 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800, 2008. *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro. 237 p.

- 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.
- Cappellini A.M.C., 2015. *An innovative approach to evaluate people's effects on the dynamic behaviour of structures*. PhD Thesis, Politecnico di Milano, Department Of Mechanical Engineering, Doctoral Programme In Mechanical Engineering, Milano, Italy, pp. 1-189.
- Dougill, J. W., Wright, J. R., Parkhouse, J. G., & Harrison, R. E., 2006. "Human structure interaction during rhythmic bobbing", *The Structural Engineer*, vol. November 2006, n. 22, pp. 32-39.
- Ellis, B. R., Ji, T., 2004. *BRE Digest 426, Response of Structures Subject to Dynamic Crowd Loads*, ISBN 1 86081 1744.
- 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*, vol. 157, iss. SB4, pp. 235-241.
- Faisca R.G., 2003. *Caracterização de Cargas Dinâmicas Geradas por Atividades Humanas*, 230p. Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- 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*, vol. 2, n.1, pp. 429-437.
- Gaspar C.M.R., 2013. *Análise dinâmica e controle de vibrações de pisos de edificações submetidos a atividades humanas rítmicas*. Dissertação de mestrado, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.
- International Standard Organization, ISO 10137, 2007. Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations.
- 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 C.A; Reynolds P., Pavic A., 2011. Vibration serviceability of stadia structures subjected to dynamic crowd loads: A literature review, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 330, n. 8, pp. 1531-1566.
- 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.
- Pavic A., Reynolds, P. Experimental verification of novel 3DOF model for grandstand crowd-structure dynamic interaction, *26th International Modal Analysis Conference (IMAC XXVI)*, 2008.
- Sachse R., Pavic A., Reynolds P., 2004. Parametric study of modal properties of damped two-degree-of-freedom crowd-structure dynamic systems, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 274, iss. (3–5), pp. 461–480.
- Setareh, M., 2012. "Evaluation and assessment of vibrations owing to human activity", in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*, vol. 165, iss. SB5, pp. 219–231.
- Smith A.L., Hicks S.J, Devine P.J., 2009. "Design of floors for vibrations: A new approach", SCI Publication P354, Ascot.