



AVALIAÇÃO DO CONFORTO HUMANO DE PISOS DE EDIFICAÇÕES SUBMETIDOS À GINÁSTICA AERÓBICA COM BASE NA UTILIZAÇÃO DE MODELOS BIODINÂMICOS

Fernanda Fernandes Campista

fernandafcampa@yahoo.com.br

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

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

José Guilherme Santos da Silva

jgss@uerj.br

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

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

Resumo. O objetivo deste trabalho diz respeito ao desenvolvimento de uma metodologia de análise para avaliação do conforto humano de pisos de edificações, através do emprego de modelos biodinâmicos para a simulação das ações humanas rítmicas (ginástica aeróbica) que atuam sobre um piso misto (aço-concreto) com dimensões de 10m x 10m e uma área total de 100m². A investigação considera o efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura, através do emprego de modelos biodinâmicos (sistemas do tipo massa-mola-amortecedor) acoplados ao sistema estrutural. As características dinâmicas dos indivíduos (massa, amortecimento e rigidez) são obtidas com base na realização de testes experimentais; e, ainda, considerando-se a resolução de um problema de otimização, mediante a utilização de algoritmos genéticos (AG), via uso do programa MATLAB. A modelagem numérica da estrutura foi realizada a partir do uso do programa computacional ANSYS, via emprego do método dos elementos finitos (MEF). Os resultados alcançados ao longo deste estudo possibilitam a obtenção de conclusões mais realistas acerca do emprego dos modelos biodinâmicos e análise da resposta estrutural dinâmica do sistema, objetivando a avaliação dos estados limites de serviço, a partir da classificação dos níveis de conforto humano do piso misto investigado.

Palavras-chave: Pisos mistos, Modelos biodinâmicos, Análise dinâmica de estruturas.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, problemas relacionados à vibração excessiva de pisos de edificações destinadas à prática de atividades humanas rítmicas (aeróbica), tem ocorrido com maior frequência. Tal fato pode estar associado a uma combinação de fatores, tais como o emprego de novos materiais no processo construtivo, adaptação de sistemas estruturais projetadas inicialmente para outros fins, elevados níveis de esbeltes e uso de grandes vãos. Esta combinação de fatores, usuais na prática corrente de projeto, resulta em estruturas mais flexíveis e esbeltas, consequentemente levando a baixas frequências naturais dos sistemas de pisos. Além disso, observa-se a concepção de estruturas com baixos níveis de amortecimento estrutural (Campista, 2015; Campista et al., 2015; Gaspar, 2013; Gaspar, 2015); e, também, a relativa proximidade entre a frequência das forças induzidas pelo ser humano e as frequências naturais dos pisos, podendo levar o sistema a um estado de ressonância ocasionando mal-estar e desconforto nos usuários (Jones et al., 2011).

As ações humanas rítmicas têm sido representadas através de modelos de força-dura por diversos autores e guias de projeto, desconsiderando as propriedades dinâmicas do ser humano (Murray et al., 2003; ISO 10137,2007; Faisca,2003) e até mesmo superestimando a possibilidade de ocorrência de vibrações das estruturas (Cappellini, 2015). Entretanto, segundo alguns pesquisadores (Matsumoto &Griffin, 2003; Sachse et al., 2003; Da Silva,2016; Shahabpoor,2015), o corpo humano atua como um sistema mecânico com vários graus de liberdade, que possui características dinâmicas definidas (massa, amortecimento e rigidez) (Gaspar, 2016). Deste modo, o uso de modelos biodinâmicos pode ser encarado como uma alternativa eficiente, mais realista e até mesmo econômica, sob o ponto de vista de projeto, para simular o efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura (Jones et al., 2011; Cappellini, 2015; Van Nimmen,2015; Toso et al.,2016; Campista, 2015; Gaspar, 2015).

Assim sendo, considerando-se a relevância do problema em questão, neste trabalho de pesquisa as ações dinâmicas humanas rítmicas (ginástica aeróbica) atuantes sobre pisos de edificações são estudadas de maneiras distintas: inicialmente, considera-se o emprego de uma formulação matemática, baseadas em testes experimentais (Faisca, 2003), mediante a utilização do modelo tradicional de “força dura” e a segunda estratégia de modelagem considera o desenvolvimento de modelos biodinâmicos, cujos parâmetros associados a massa, amortecimento e rigidez das pessoas são obtidos através da realização de testes experimentais de indivíduos praticando atividades humanas rítmicas sob re uma plataforma rígida. Cabe ressaltar, ainda, que os parâmetros representativos das pessoas (massa, rigidez e amortecimento) e efetivamente utilizados para a modelagem dos sistemas biodinâmicos, são determinados mediante o emprego de algoritmos genéticos, via utilização do programa MATLAB.

Desta maneira, esta investigação tem como objetivo avaliar o comportamento estrutural dinâmico de uma piso misto (aço-concreto), medindo 10m x 10m, com área total de 100m², quando submetido a prática de ginástica aeróbica, através da simulação numérica das ações dinâmicas humanas via modelo de “força dura” e sistemas biodinâmicos. Para tal, a resposta dinâmica do modelo estrutural (acelerações de pico) é obtida, via Método dos Elementos Finitos (MEF), com base no emprego do programa ANSYS (2007), tendo em mente uma análise acerca do conforto humano dos usuários do piso, mediante comparações de natureza qualitativas e quantitativas associadas a resposta estrutural dinâmica do piso em estudo, a partir da análise da resposta fornecida pelas diferentes estratégias de solução desenvolvidas ao longo da pesquisa.

2 MODELAGEM DE SISTEMAS BIODINÂMICOS

A implementação do modelo biodinâmico, visando representar o ser humano de maneira mais realista é relevante para o entendimento do comportamento estrutural, visto que diversos estudos apontam para a modificação do comportamento dinâmico estrutural (amortecimento e frequência natural) em virtude da adição do modelo biodinâmico dos indivíduos (Sim et al., 1996; Littler, 1996; Barker e Mackenzie, 2008).

De acordo com diversos pesquisadores, o ser humano pode ser representado por modelos biodinâmicos, constituídos por sistemas do tipo “massa-mola-amortecedor” com diversos graus de liberdade. 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). Entretanto, trabalhos de pesquisa desenvolvidos (Silva, 2016; Shahabpoor, 2015), simulam a interação ser humano-estrutura através de modelos com um grau de liberdade (1GL), como apresentado na Fig.1.

Em relação ao modelo biodinâmico com um grau de liberdade (Fig.1), pode-se dizer que o sistema é basicamente constituído pela massa (m), amortecimento (c) e rigidez do indivíduo (k), sendo submetido a uma força $F(t)$ produzida pelo ser humano ao atuar sobre a estrutura. Esta situação pode ser descrita matematicamente pela Eq. (1).

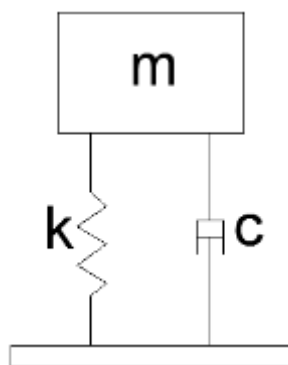


Figura 1. Modelo biodinâmico com 1GL (S1GL)

$$F_p(t) = k_p \cdot x_p(t) + c_p \cdot v_p(t) + m_p \cdot a_p(t) \quad (1)$$

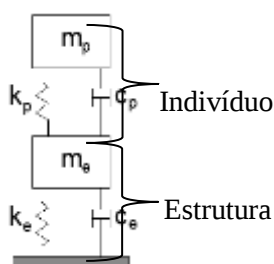
Onde:

- $F_p(t)$: força produzida pelo indivíduo i (N);
- K_p : rigidez do indivíduo i (N/m);
- m_p : massa do indivíduo i (kg);
- c_p : amortecimento do indivíduo i (Ns/m);
- $x_p(t)$: deslocamento do indivíduo i ao longo do tempo (m);
- $v_p(t)$: velocidade do indivíduo i ao longo do tempo (m/s);
- $a_p(t)$: aceleração do indivíduo i ao longo do tempo (m/s²).

Neste trabalho de pesquisa foram desenvolvidos seis modelos biodinâmicos com dois graus de liberdade (S2GL), conforme ilustrados pelas Figs. 2 e 3, objetivando simular numericamente o efeito da interação dinâmica ser humano-estrutura (Fig. 4), tendo em mente a geração de um modelo matemático que represente de forma mais fidedigna as ações dinâmicas humanas rítmicas sobre uma estrutura, de acordo com a realidade de projeto.

Em relação aos seis modelos biodinâmicos (Figs. 2 e 3), os parâmetros relacionados ao grau da liberdade da estrutura (m_e , c_e e k_e) foram determinados a partir da obtenção da massa modal do sistema estrutural. De outra forma, os parâmetros relacionados ao grau de liberdade do indivíduo (m_p , c_p e k_p) foram obtidos através da solução de um problema tradicional de otimização, com base no emprego da equação do equilíbrio dinâmico [Eq.(1)], mediante a utilização de algoritmos genéticos (AG).

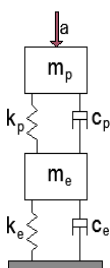
Cabe ressaltar que para a obtenção dos valores de aceleração, velocidade e deslocamento das pessoas, ao longo do tempo, foi realizada uma série de 32 testes experimentais, nos quais a prática de atividades humanas rítmicas foi simulada em laboratório. Na sequência do estudo, as Figs. 2 a 4 apresentam a representação matemática desenvolvida neste estudo, via modelagem numérica dos sistemas biodinâmicos; e, bem como dos experimentos realizados no âmbito desta investigação.



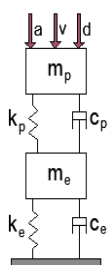
Modelo BG: modelo biodinâmico genérico



Modelo 1A: modelo biodinâmico com a ação dinâmica aplicada sobre a estrutura

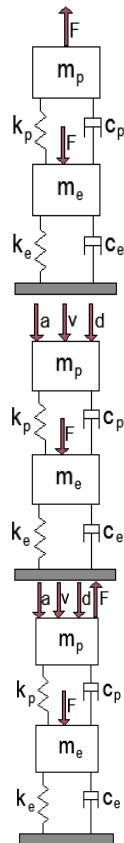


Modelo 1B: modelo biodinâmico com a aceleração experimental aplicada sobre o indivíduo

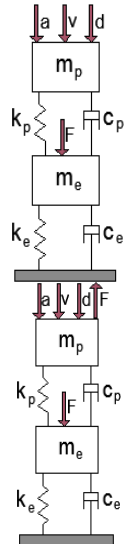


Modelo 1C: modelo biodinâmico com a aceleração, velocidade e deslocamento obtidos experimentalmente aplicados sobre o indivíduo

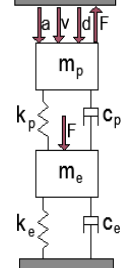
Figura 2. Descrição dos modelos biodinâmicos desenvolvidos neste trabalho de pesquisa: Modelo BG; Modelo 1A; Modelo 1B e Modelo 1C



Modelo 1D: modelo biodinâmico com forças aplicadas sobre o indivíduo e estrutura, em sentidos contrários



Modelo 1E: modelo biodinâmico com a aceleração, velocidade e deslocamento obtidos experimentalmente aplicados sobre o indivíduo, com a ação dinâmica aplicada sobre a estrutura



Modelo 1F: modelo biodinâmico com a aceleração, velocidade e deslocamento obtidos experimentalmente aplicados sobre o indivíduo, além de forças aplicadas sobre o indivíduo e estrutura, em sentidos contrários

Figura 3. Descrição dos modelos biodinâmicos desenvolvidos neste trabalho de pesquisa: Modelo 1D; Modelo 1E e Modelo 1F

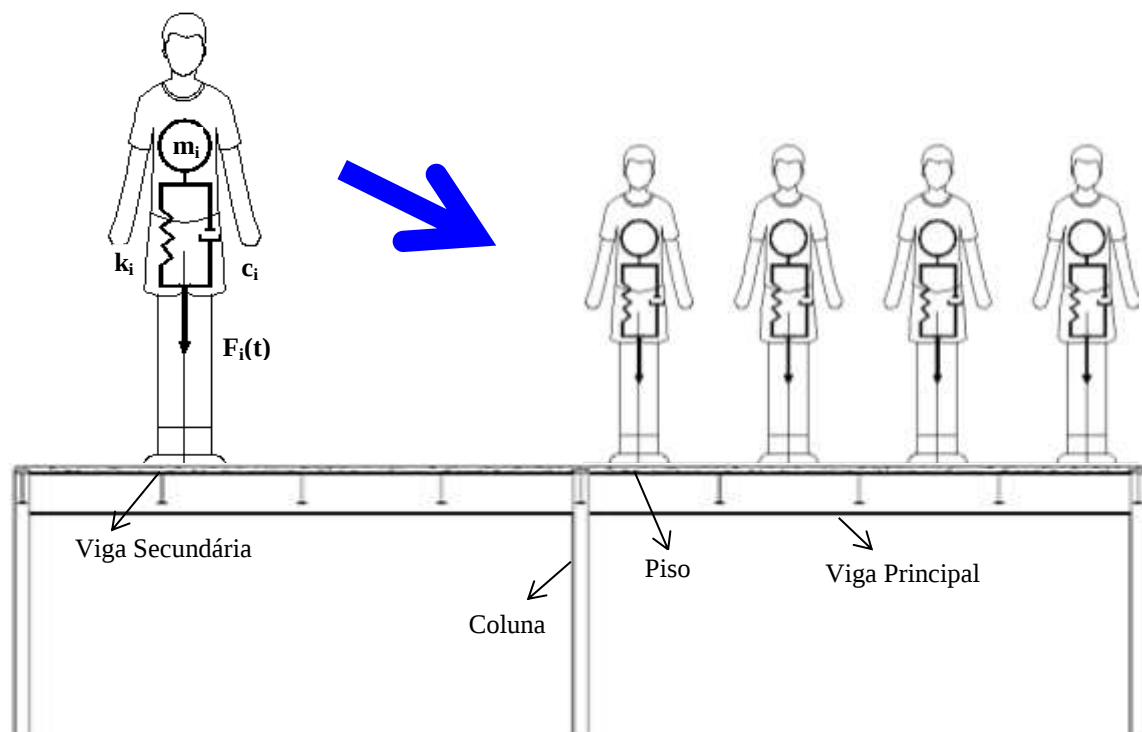


Figura 4. Representação genérica das pessoas modeladas como sistemas biodinâmicos com 1GL

3 TESTES EXPERIMENTAIS DESENVOLVIDOS

Cabe ressaltar que os dados obtidos durante a prática da atividade rítmica, foram registrados pelo sistema de aquisição de dados ADS-2002, fabricado pela LYNX Tecnologia Eletrônica LTDA, utilizando-se dois diferentes tipos de acelerômetros, os resistivos Kyowa e os capacitivos Dytran. Um metrônomo foi utilizado para controlar o salto das pessoas sobre a estrutura (Fig. 5a). O metrônomo foi conectado a uma caixa acústica para produzir pulsos sonoros de duração regular, de maneira a estimular e coordenar o salto do ser humano. A unidade deste dispositivo é o “bpm” (batidas por minuto), e cada “batida” sonora equivale ao contato do ser humano sobre a estrutura. Nestes ensaios experimentais foram utilizadas placas com acelerômetros acopladas ao centro de massa do ser humano (Fig. 5b) envolvido nos referidos testes.

Em relação aos testes experimentais foram utilizadas 32 pessoas praticando atividades humanas rítmicas (saltos à vontade) na frequência de 2,20Hz. Nesta investigação foram adotados, inicialmente, apenas os dados relativos ao ser humano que apresentou maior sincronismo nos experimentos realizados com a frequência de 2,20Hz, o qual possui massa de 79,8kg. As Figs. 6a e 6b ilustram os testes experimentais desenvolvidos, onde a Fig. 6a exibe a plataforma empregada e os acelerômetros, além do sistema de aquisição de dados e a Fig. 6b apresenta uma pessoa saltando sobre a referida plataforma. Destaca-se que as acelerações foram coletadas experimentalmente e a velocidade e o deslocamento foram obtidos via integração do sinal experimental da aceleração. Cabe ressaltar que filtros do tipo “passa-alta” e “passa-baixa” foram utilizados para a filtragem (limpeza) dos sinais das acelerações, velocidades e deslocamentos [$0,5 \text{ Hz} < f_s < 10 \text{ Hz}$; f_s : frequência do sinal].

4 OTIMIZAÇÃO VIA EMPREGO DE ALGORITMOS GENÉTICOS

No que concerne à determinação das características dinâmicas das pessoas com base no emprego dos algoritmos genéticos (AG), via uso do programa MATLAB, faz-se necessária à solução da equação de equilíbrio dinâmico [Eq. (1)]. De maneira geral, os algoritmos genéticos (AG) consistem no uso da teoria clássica da evolução natural, que consiste basicamente na seleção de “indivíduos” de uma determinada população, de forma aleatória, escolhidos como “pais”, de maneira a gerarem “filhos” para uma próxima “geração”.

No que tange a utilização dos AGs, no âmbito deste trabalho de pesquisa, foram considerados limites inferiores e limites superiores exclusivamente para a definição das características dinâmicas humanas de amortecimento (c) e rigidez (k) das pessoas, tendo em mente que o valor da massa do indivíduo escolhido para o presente estudo ($m=79,8\text{kg}$) foi obtido em laboratório [peso da pessoa]. Para tal, foram empregadas as Eqs. (2) e (3) para o cálculo destas grandezas [c e k]. Os valores de aceleração, velocidade e deslocamento necessários para a solução matemática da Eq. (1) foram obtidos a partir dos testes experimentais realizados em laboratório.

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

$$c_i = 4\pi m_i \xi f_i \quad (3)$$

Onde:

- k_i : rigidez do indivíduo i (N/m);
 m_i : massa do indivíduo i (kg);
 c_i : amortecimento do indivíduo i (Ns/m);
 f_i : frequência do indivíduo i (Hz);
 ξ : taxa de amortecimento igual a 0,25.



a) Metrônomo conectado a uma caixa acústica



b) Placa com acelerômetro acoplado ao indivíduo

Figura 5. Testes experimentais: metrônomo e acelerômetros acoplados



a) Plataforma utilizada para realização dos testes



b) Indivíduo saltando livremente sobre a plataforma

Figura 6. Testes experimentais: plataforma e indivíduo saltando

Deste modo, após a resolução do problema de otimização, via utilização do programa MATLAB, foram obtidos os valores de 35,16kg, 466,65Ns/m e 22.259,01N/m, respectivamente, para os valores de massa (m_p), amortecimento (c_p) e rigidez do indivíduo (k_p). Esses valores de massa, rigidez e amortecimento encontrados foram posteriormente implementados na equação de equilíbrio dinâmico [Eq.(1)], em conjunto com os valores de aceleração, velocidade e deslocamento obtidos nos testes experimentais e desta forma foi possível encontrar o espectro da força dinâmica produzida pelas pessoas, no domínio do tempo e da frequência, conforme ilustrado pelas Figs. 7 e 8.

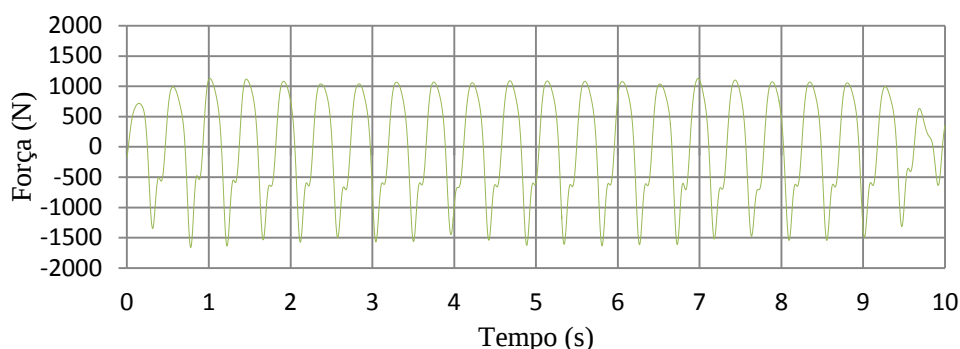


Figura 7. Força no domínio do tempo: método dos algoritmos genéticos

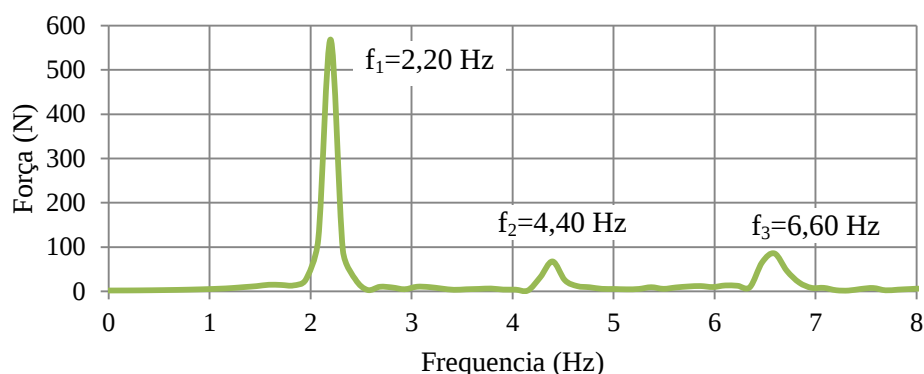


Figura 8. Força no domínio da frequência: método dos algoritmos genéticos

Com base na análise do espectro (Fig. 8), pode-se verificar que os três picos de frequência encontram-se bem definidos, diferenciando-se apenas pela amplitude das respostas. Observa-se que a maior transferência de energia do sistema ocorre no 1º pico da resposta, associada a frequência de 2,20Hz.

5 MODELOS TRADICIONAIS DE FORÇA DURA

Este modelo de carregamento foi desenvolvido por Faisca (2003) com base na realização de uma série de testes experimentais. Os resultados dos testes permitiram concluir que a função matemática que melhor se adapta às ações dinâmicas oriundas de atividades humanas de saltos à vontade e ginástica aeróbica é a chamada “Função Hanning”. A representação matemática do tipo de carregamento dinâmico, denominado de “Modelo 1G”, é expressa matematicamente pela Eq.(4). Neste estudo considera-se a modelagem das ações humanas rítmicas, via emprego do modelo de força dura [Eq. (4) e Fig. 9], Modelo 1G, com base na frequência de excitação de 2,20 Hz [frequência do indivíduo: 2,20Hz]; e os parâmetros apresentados na Tabela 1 são utilizados para a definição da ação dinâmica (Faisca, 2003), como mostrado nas Figs. 9, 10 e 11.

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

$$F(t) = 0 \quad \text{Para } T_c \leq t \leq T$$
(4)

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).

Tabela 1. Parâmetros da função Hanning (Faisca, 2003)

Parâmetros	Valor
CD	1,00
k_p	3,07
P	798 N
T_c	0,32

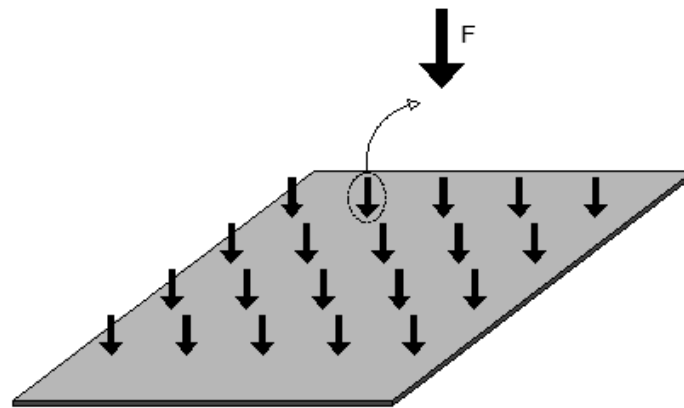


Figura 9. Modelo 1G. Força dura

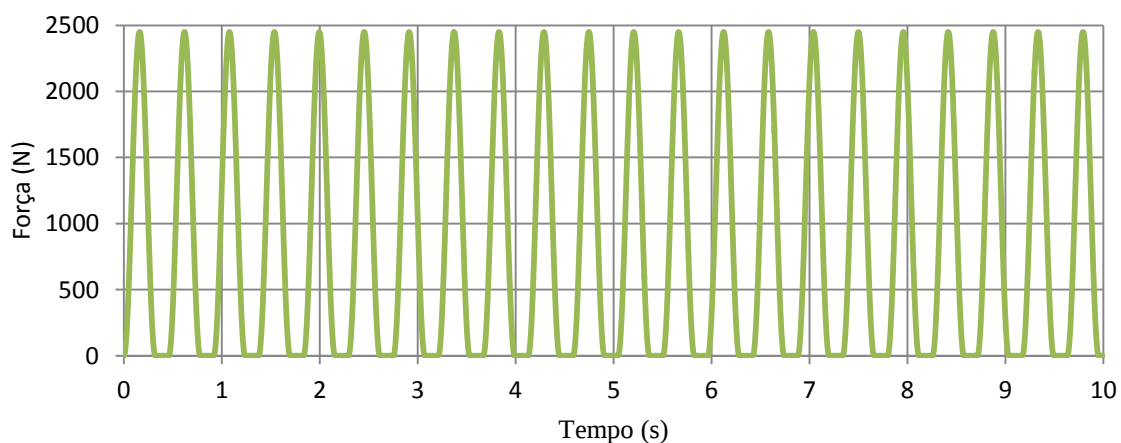


Figura 10. Sinal da força no domínio do tempo: Modelo 1G

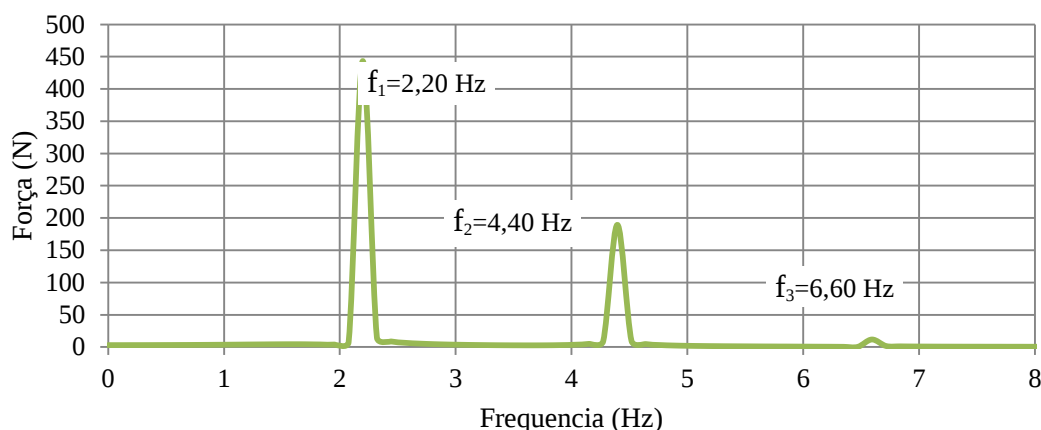


Figura 11. Sinal da força no domínio da frequência: Modelo 1G

Analisando-se os resultados apresentados na Fig. 11, são observados três picos de frequência bem definidos, diferenciando-se pela amplitude das respostas no domínio da frequência. Cabe ressaltar que as maiores amplitudes de resposta ocorrem em relação as frequências de 2,20Hz, 4,40Hz e 6,60Hz, respectivamente, associadas ao 1º, 2º e 3º picos de resposta. Além disso, pode-se verificar que a maior transferência de energia do sistema ocorre em relação a frequência de 2,20Hz.

6 CORRELAÇÃO ENTRE OS MODELOS MATEMÁTICOS

A relação entre as forças produzidas pelo indivíduo com base no emprego dos modelos biodinâmicos [Eq.(1)] e função Hanning [Eq.(4)] é representada pelo coeficiente de correlação de Pearson (CCP). Este coeficiente indica o grau de correlação entre dois conjuntos de dados obtidos, como apresentado pela Eq.(5).

Neste trabalho de pesquisa foram considerados os dados das amostras referentes às forças dinâmicas no domínio da frequência. Em seguida, a Fig.12 ilustra a comparação entre os espectros de frequência das forças produzidas pelo ser humano, indicando o índice de correlação obtido (CCP). Novamente, cabe destacar que filtros do tipo “passa-alta” e “passa-baixa” foram utilizados para a filtragem (limpeza) dos sinais das forças [$0,5 \text{ Hz} < f_s < 10 \text{ Hz}$; f_s : frequência do sinal].

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum (x_i - \bar{x})^2) \cdot (\sum (y_i - \bar{y})^2)}} \quad (5)$$

Onde:

r :	coeficiente de correlação de Pearson;
x_i :	força do modelo biodinâmico (N);
y_i :	força do modelo de força dura (N);
$\bar{x}$	média dos valores de x_i (N);
$\bar{y}$	média dos valores de y_i (N).

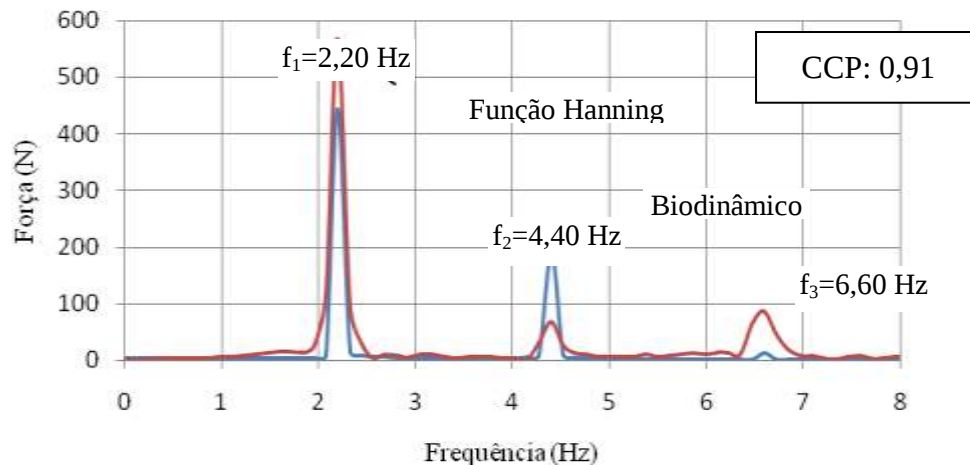


Figura 12. Comparação entre os espectros da força do Modelo Biodinâmico e Força Dura

Com base na análise espectral apresentada na Fig. 12, pode-se verificar com clareza que existe uma boa aproximação entre a função oriunda da modelagem biodinâmica e a função matemática proposta por Faisca (Faisca, 2003), utilizando o modelo de força dura. Além disso, observa-se, também, uma boa correlação entre as funções, no que tange ao 1º pico de transferência de energia ($f = 2,20$ Hz).

7 MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO

O sistema estrutural investigado neste estudo é referente a um piso misto (aço-concreto) composto por uma laje de concreto, vigas e pilares metálicos. O piso possui dimensões de 10m x 10m, com área total de 100 m², conforme ilustrado pelas Figs. 13 e 14. A laje de concreto possui espessura de 10cm e os pilares apresentam altura igual a 4m. As vigas e colunas de aço utilizadas neste estudo são representadas por perfis do tipo “W” soldado, com tensão de escoamento (σ_y) de 345MPa. A laje de concreto possui resistência característica à compressão (f_{ck}) de 30MPa e módulo de elasticidade secante (E_{cs}) de 26×10^3 MPa.

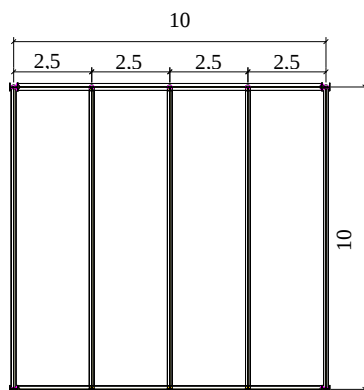


Figura 13. Vista superior do piso misto

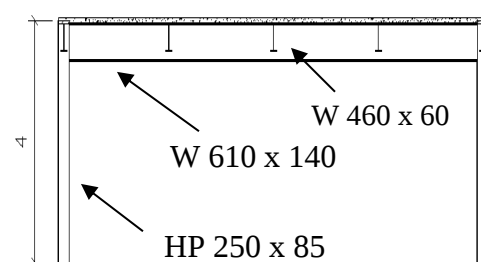


Figura 14. Seção genérica do modelo estrutural

Cabe destacar que, inicialmente, o carregamento dinâmico foi aplicado sobre o centro do piso misto (aço-concreto) investigado, considerando-se apenas uma pessoa saltando sobre a laje de concreto, com peso do indivíduo igual a 798N [$m = 79,8$ kg e $f = 2,20$ Hz]. Tal análise foi desenvolvida, objetivando especificamente a comparação de resultados fornecidos com

base no emprego das estratégias de modelagem desenvolvidas: modelagem via sistemas biodinâmicos e modelo tradicional de força dura. Desta maneira, a resposta estrutural dinâmica do modelo foi obtida no centro laje de concreto (Fig. 15). Neste estudo, o amortecimento estrutural adotado foi igual a 1% e foi escolhido com base na faixa extrema de 0,5% a 8,0% para vigas mistas com interação total de acordo com a norma ISO10137 (2007).

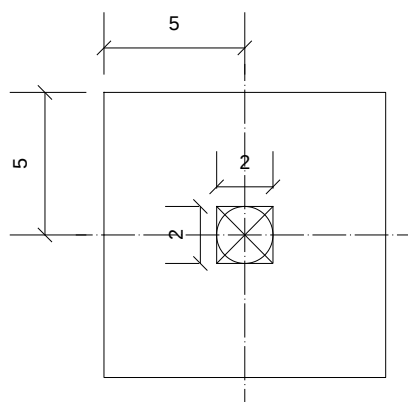


Figura 15. Posicionamento de 1 indivíduo saltando sobre o piso: $m = 79,8\text{kg}$ e $f = 2,20\text{Hz}$

8 MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

A modelagem numérica foi realizada utilizando-se o programa ANSYS (2010), com base no emprego do Método dos Elementos Finitos. As vigas foram representadas pelo elemento BEAM44, no qual os efeitos de flexão e de torção são considerados. A laje de concreto armado foi representada pelo elemento de casca (SHELL63), como apresentado na Fig. 16. Considera-se, ainda, que os materiais aço e concreto apresentam um comportamento linear-elástico, e que as seções estruturais permanecem planas no estado deformado. A interação completa entre laje de concreto e as vigas metálicas foi considerada na análise, ou seja, são acoplados os nós entre viga e coluna para impedir a ocorrência de qualquer deslizamento.

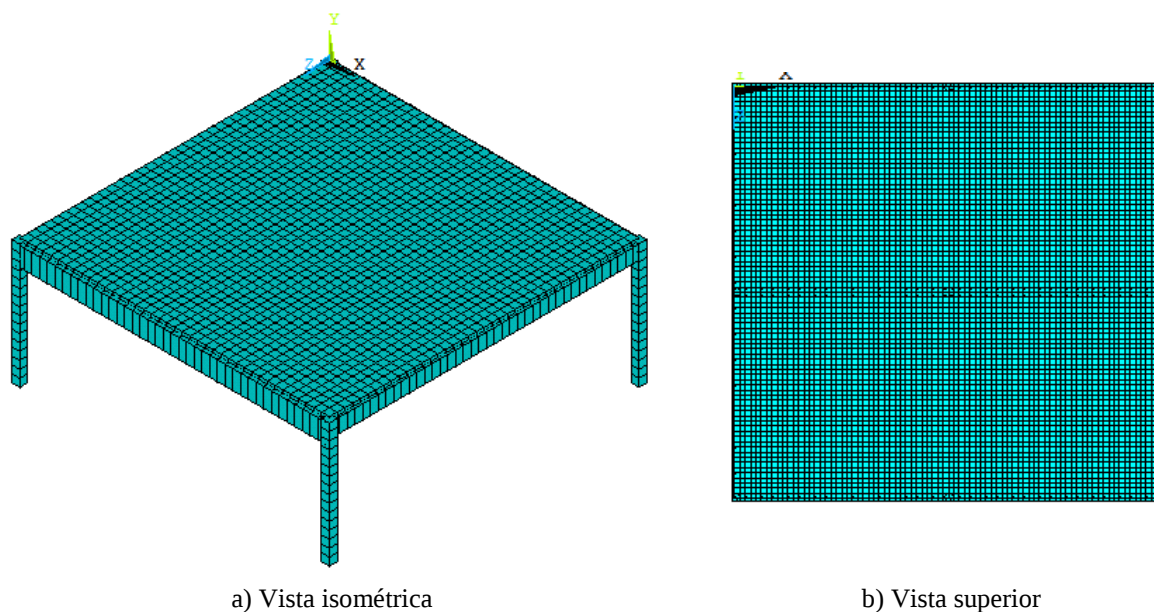


Figura 16. Modelo em elementos finitos

9 FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO

Com base na realização da análise modal numérica, Tabela 2, verificou-se que a frequência natural fundamental do piso misto ($f_{01} = 6,36\text{Hz}$), encontra-se na mesma faixa da frequência de excitação correspondente ao terceiro harmônico das atividades humanas rítmicas (ginástica aeróbica), variando de 5,66 a 8,57Hz e de 4,5 a 8,4Hz, segundo Faisca (2003) e Elis e Ji (2004), respectivamente. Deste modo, a estrutura apresenta uma maior suscetibilidade ao fenômeno da ressonância, tendo em mente a proximidade entre as faixas das frequências naturais do sistema e as frequências da excitação, o que pode vir a ocasionar vibrações excessivas e desconforto humano.

Com o propósito de evitar a ocorrência de vibrações excessivas, a frequência fundamental do piso deveria ser no mínimo igual a 9,2Hz, levando em consideração a atividade aeróbica praticada sobre ele, segundo Murray (2003). A Fig. 17 ilustra alguns dos modos de vibração que podem ser excitados pelo posicionamento do carregamento dinâmico (Fig. 15).

Tabela 2. Frequências naturais do modelo estrutural investigado

Modos de vibração	Frequências naturais (Hz)
f_{01}	6,36
f_{02}	9,78
f_{03}	12,56
f_{04}	13,62
f_{05}	18,32
f_{06}	21,72

Pode-se notar que a análise modal pode avaliar a ocorrência de vibrações excessivas nos sistemas estruturais, e visando evitá-las, é recomendável atender os valores mínimos das normas e recomendações de projeto ($f_{\min} = 8\text{Hz}$) (NBR-6118, 2007) e ($f_{\min} = 9,2\text{Hz}$) (Murray et al., 2003). Neste sentido, observa-se que a estrutura se encontra suscetível a estas vibrações por estar com sua frequência fundamental ($f_{01} = 6,36\text{Hz}$) abaixo do recomendável.

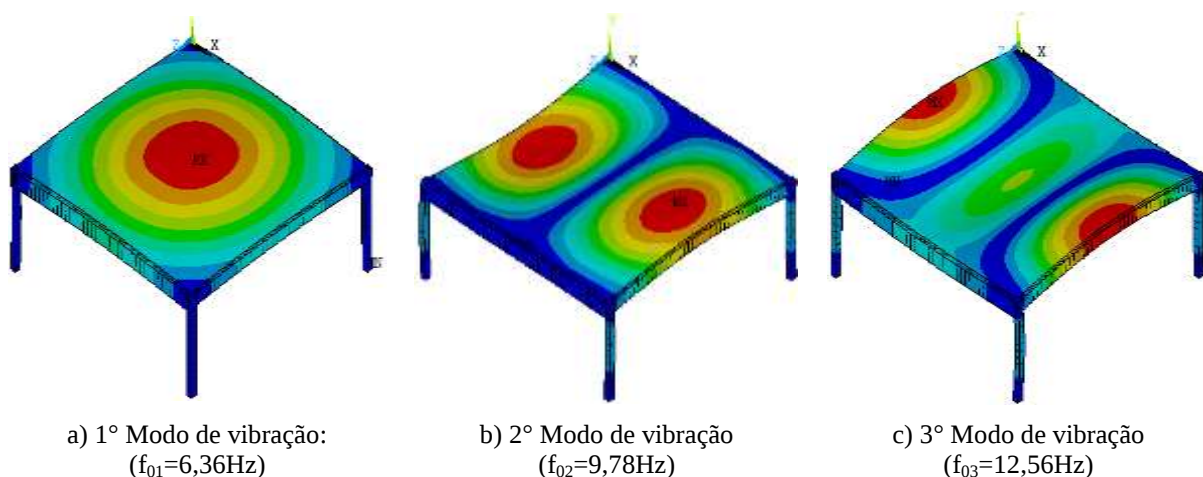


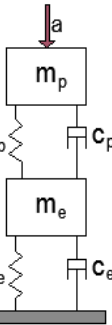
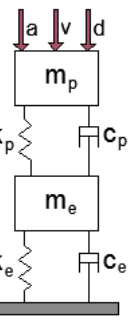
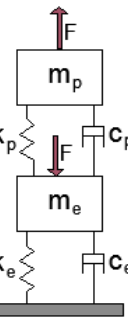
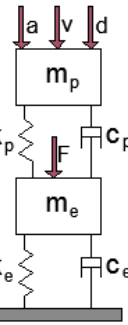
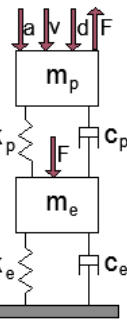
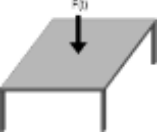
Figura 17. Modos de vibração do modelo estrutural investigado

10 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA E QUALITATIVA DOS MODELOS

Neste trabalho de pesquisa foram avaliados os níveis de conforto humano do piso misto (aço-concreto), em termos dos valores das acelerações de pico no regime permanente (steady-state). O limite referente para as acelerações de pico (a_p) é igual a $0,5 \text{ m/s}^2$ (5%g), associado às atividades aeróbicas (Murray et al., 2003).

Com a finalidade de analisar os níveis de conforto humano da estrutura, realizou-se um estudo paramétrico, de modo que os modelos biodinâmicos (modelos 1A ao 1F) e força dura (modelo 1G) se aproximassem do 3º harmônico da frequência de excitação (ginástica aeróbica), com o intuito de provocar a ressonância com a 1ª frequência natural da estrutura. Deste modo, o nível de conforto humano pode ser investigado mediante a consideração da situação mais desfavorável de projeto, avaliando a seção estrutural localizada no centro da laje de concreto (Fig. 15), com base no emprego dos sete modelos matemáticos desenvolvidos nesta investigação: seis modelos biodinâmicos (Figs. 2, 3 e 4) e modelo de força dura (Faisca, 2003), Figs. 9, 10 e 11. Em seguida, o valor máximo da aceleração calculada a partir do uso de cada modelo matemático distinto é apresentado na Tabela 3, analisado e comparado, de maneira a investigar os resultados qualitativamente e quantitativamente.

Tabela 3. Resposta estrutural dinâmica do sistema [1 indivíduo]: aceleração de pico (m/s^2)

	1A (Fig. 2)	1B (Fig. 2)	1C (Fig. 2)	1D (Fig. 3)	1E (Fig. 3)	1F (Fig. 3)	1G (Fig. 9)
Modelos							
$a_p \text{ (m/s}^2\text{)}$	0,029	0,085	0,086	0,049	0,083	0,076	0,080

A partir dos resultados apresentados na Tabela 3, pode-se verificar que os valores de acelerações encontrados nos modelos 1B, 1C e 1E, utilizando a modelagem biodinâmica, apresentam valores bastante próximos aos obtidos pela função Hanning. (modelo 1G). O maior valor de aceleração encontrado corresponde ao modelo 1C, sendo igual a $0,086 \text{ m/s}^2$, enquanto que o modelo 1D apresentou o menor valor de aceleração encontrado na análise, da ordem de $0,049 \text{ m/s}^2$.

Considerando-se os resultados apresentados na Tabela 3, pode-se concluir que o modelo biodinâmico 1E aproxima-se mais, em termos qualitativos e quantitativos, do modelo de força dura (modelo 1G), desenvolvido por Faisca (2003). Em seguida, as Figs. 18 e 19 ilustram graficamente a aceleração no domínio do tempo e no domínio da frequência dos modelos 1E e 1G, respectivamente.

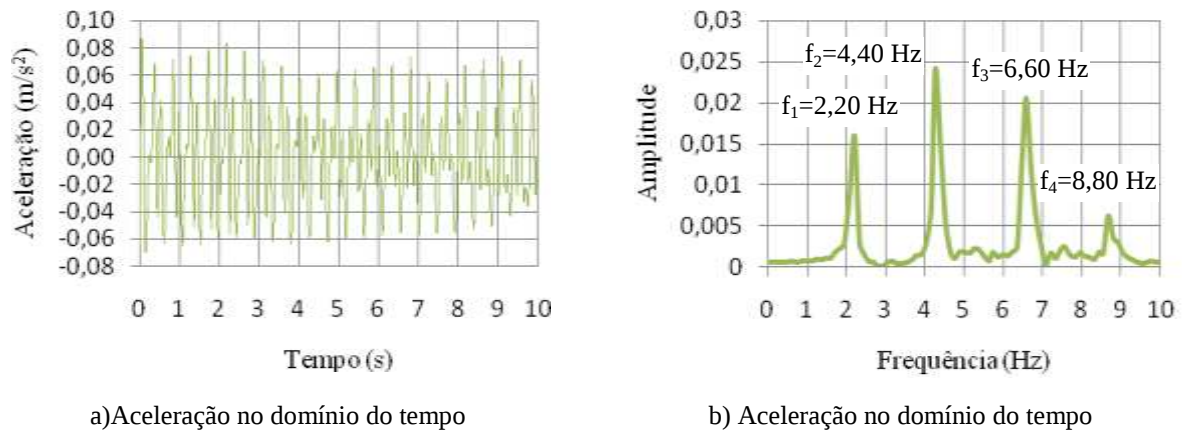


Figura 18. Aceleração da seção central do piso misto (aço-concreto): Modelo 1E

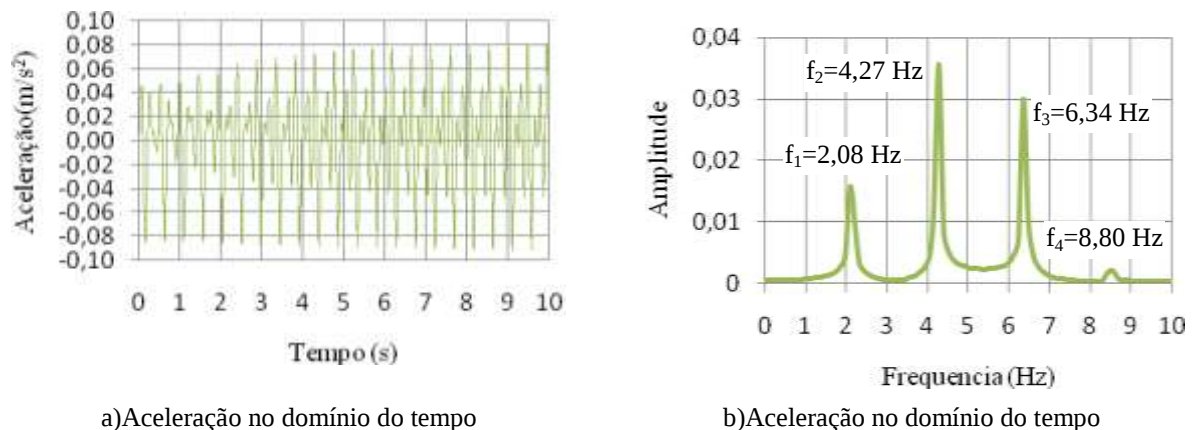


Figura 19. Aceleração da seção central do piso misto (aço-concreto): Modelo 1G

11 CONFORTO HUMANO: CARREGAMENTO COM 20 INDIVÍDUOS

Na sequência da investigação, foi realizada uma nova análise dinâmica considerando-se agora um carregamento correspondente a 20 pessoas praticando ginástica aeróbica sobre o modelo estrutural em estudo, com o intuito de dar sequência à análise do comportamento do modelo biodinâmico 1E (Fig. 3). Novamente, a resposta estrutural dinâmica é obtida sobre a seção central da laje de concreto do piso investigado. As Figs. 20 e 21, respectivamente, ilustram a representação da modelagem biodinâmica e do modelo de força dura, além do posicionamento dos 20 indivíduos praticando ginástica aeróbica sobre o piso misto.

Em relação ao modelo biodinâmico utilizado nesta análise (modelo 1E: Fig. 3), são consideradas as mesmas características dinâmicas utilizadas na análise dinâmica anterior (aceleração, velocidade e deslocamento do indivíduo). Em relação aos valores da força dura, altera-se apenas o coeficiente de defasagem (CD) da função Hanning utilizada anteriormente (Tabela 1), para o valor de 0,95, porque este parâmetro varia conforme o número de pessoas presentes sobre a estrutura. A resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto) é apresentada na Tabela 4 e Figs. 22 e 23.

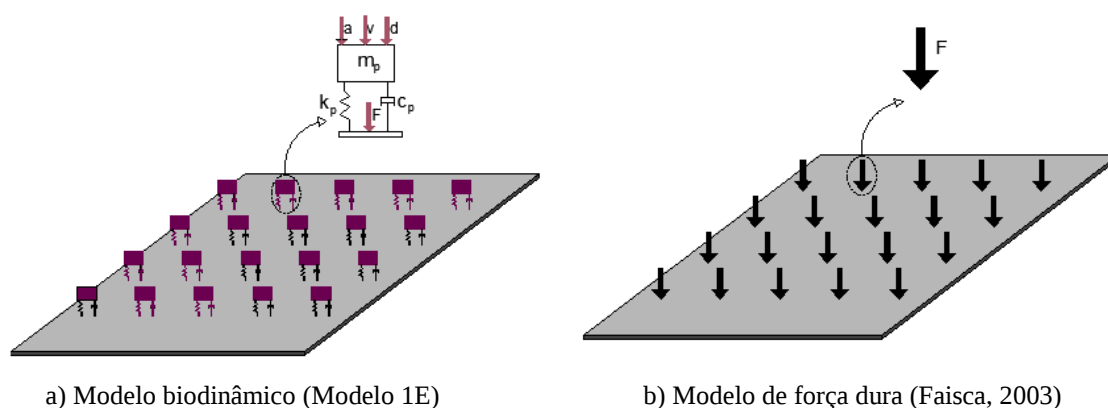


Figura 20. Modelagem do carregamento dinâmico humano

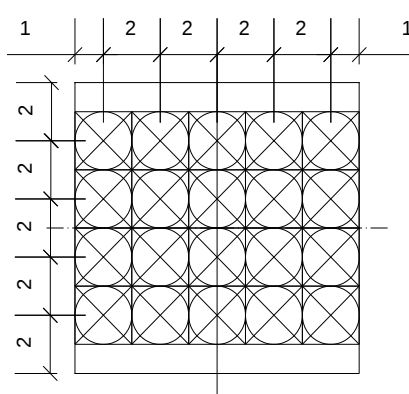
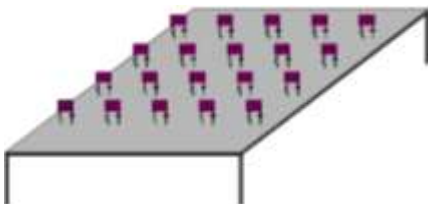
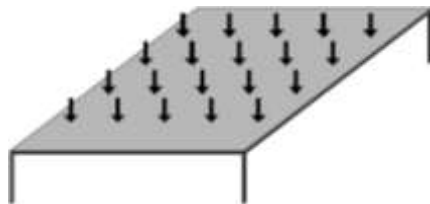
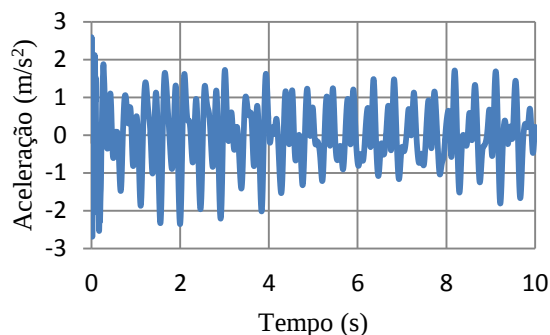


Figura 21. Posicionamento dos 20 indivíduos saltando sobre o piso: $m = 79,8\text{kg}$ e $f = 2,20\text{Hz}$

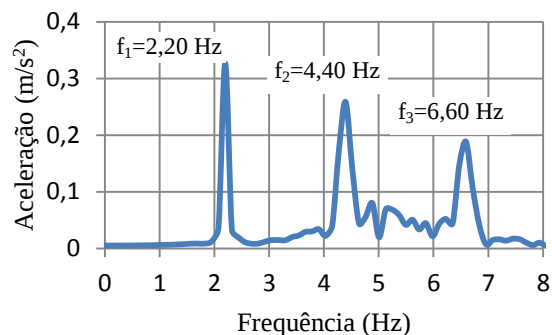
Tabela 4. Resposta estrutural dinâmica do sistema [20 indivíduos]: aceleração de pico (m/s^2)

	Modelo Biotinâmico 1E	Força Dura: Modelo 1G
Modelos		
a_p (m/s^2)	1,4	1,1

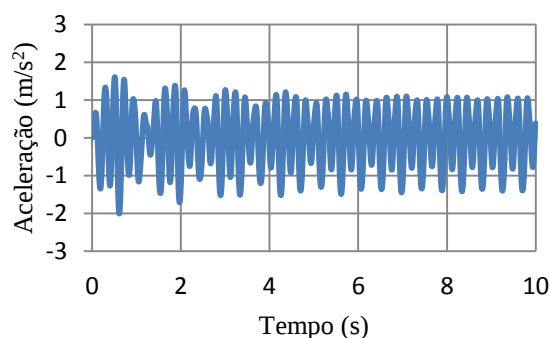
Observando-se os resultados apresentados pela Tabela 4, pode-se verificar que a resposta dinâmica ultrapassa o limite recomendado pelo critério de conforto humano [$a_p = 1,4 \text{ m/s}^2 > a_{lim} = 0,5 \text{ m/s}^2$]; e, conseqüentemente, estes valores de aceleração de pico representam um indicativo de vibrações desconfortáveis às pessoas. Verifica-se, também, que os dois modelos matemáticos forneceram valores de aceleração muito próximos. Em seguida, as Figs. 22 e 23 apresentam as acelerações no domínio do tempo e frequência dos modelos investigados.



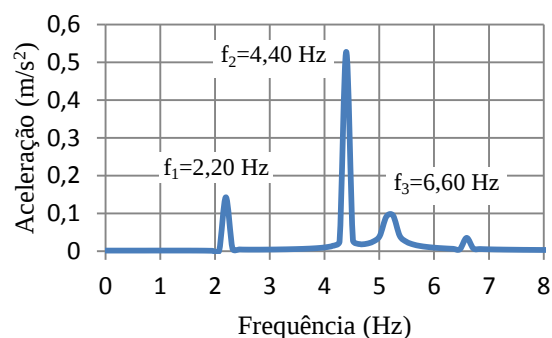
a) Aceleração no domínio do tempo



b) Aceleração no domínio da frequência

Figura 22. Aceleração do nó central no modelo biodinâmico

a) Aceleração no domínio do tempo



b) Aceleração no domínio da frequência

Figura 23. Aceleração do nó central no modelo de força dura

Convém chamar a atenção do leitor para o fato de que a modelagem dos sistemas biodinâmicos tende a fornecer valores de aceleração de pico mais realistas do que aqueles fornecidos pelos modelos de força dura, pois leva em consideração o efeito da interação dinâmica ser humano-estrutura, além de levar em conta o efeito do amortecimento das pessoas, que atua favoravelmente para atenuar a resposta dinâmica do piso. Por outro lado, as análises aqui realizadas levam em conta as características dinâmicas de apenas um indivíduo [$m = 79,8\text{kg}$ e $f = 2,20\text{Hz}$], e por esta razão o efeito do amortecimento das pessoas não contribuiu de maneira mais efetiva para atenuar a resposta dinâmica do sistema, conforme fica evidenciado pelos resultados apresentados na Tabela 4 e Figs. 22 e 23.

12 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho investigou a resposta estrutural dinâmica de um piso misto (aço-concreto), quando submetido às ações humanas rítmicas (ginástica aeróbica). Para tal foram desenvolvidos seis modelos biodinâmicos com dois graus de liberdade (S2GL) com características distintas em relação à aplicação das ações dinâmicas sobre o piso. Os parâmetros associados à massa, amortecimento e rigidez dos indivíduos, simulados pelos sistemas biodinâmicos, foram obtidos via resolução de um problema de otimização, mediante o emprego dos algoritmos genéticos (AG).

Em relação à análise dinâmica da estrutura, inicialmente, foi verificado que a frequência fundamental do piso em estudo ($f_{01} = 6,36$ Hz), se encontra na mesma faixa de frequência do 3º harmônico da excitação dinâmica humana rítmica [ginástica aeróbica]. Deste modo, o sistema estrutural torna-se suscetível a ressonância e existe uma grande probabilidade da ocorrência de problemas de vibrações excessivas e desconforto humano.

Em relação à modelagem numérica acerca do efeito da interação dinâmica ser humano-estrutura foram estudados, implementados e desenvolvidos sistemas biodinâmicos com dois graus de liberdade (S2GL), com características distintas, visando simular e estudar o efeito da interação indivíduo-estrutura de maneira mais realista.

Com base nos testes experimentais realizados em laboratório e utilizando-se paralelamente a função Hanning, foram determinadas as características dinâmicas dos indivíduos, com base no emprego de algoritmos genéticos (AGs), por meio da utilização do programa MATLAB. Foi verificado que as ações dinâmicas (forças dinâmicas) oriundas do processo de otimização, desenvolvido para identificação das características dinâmicas das pessoas, via uso dos AGs, apresentaram uma boa correlação, na ordem de 0,91 [CCP = 0,91].

Pode-se verificar que a resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto) analisado neste trabalho de pesquisa ultrapassou o limite recomendado pelo critério de conforto humano [$a_p = 1,4 \text{ m/s}^2 > a_{lim} = 0,5 \text{ m/s}^2$]; e, conseqüentemente, estes valores de aceleração representam um indicativo de vibrações desconfortáveis às pessoas. Verifica-se, também, que os dois modelos matemáticos [sistemas biodinâmicos e força dura] forneceram valores de aceleração de pico (acelerações máximas) muito próximos.

Finalmente, os autores deste trabalho de pesquisa entendem que se faz necessário a realização uma nova campanha de testes experimentais que consigam adquirir diretamente o sinal de força dinâmica oriunda das pessoas, no domínio do tempo e da frequência, mediante o emprego de células de carga nos referidos testes. Tal fato certamente trará uma maior confiabilidade ao processo numérico de otimização, mediante o emprego dos AGs, como também irá fornecer os valores das características dinâmicas dos indivíduos [massa, amortecimento e rigidez], de maneira mais eficiente.

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):InstitutfürBaustatik 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.

Cappellini, A.M.C, 2015. *An innovative approach to evaluate people's effects on the dynamic behaviour of structures activities*. PhD Thesis, Department Of Mechanical Engineering, Politecnico di Milano.

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.

Jones CA, Pavic A, Reynolds P, Harrison RE. (2011) *Vibration serviceability of stadia structures subjected to dynamic crowd loads: A literature review*. *Journal of Sound and Vibration*, pages 1531–1566.

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.

Toso, M.A., Gomes, H.M., Da Silva, F.T., Pimentel, R.L., 2016. "Experimentally fitted biodynamic models for pedestrian-structure interaction in walking situations". *Mech. Syst. Signal Process*, pp. 590-606.

Van Nimmen, K., 2015. *Numerical and experimental study of human-induced vibrations of footbridges*. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, KU Leuven.