



EFEITO DA INTERAÇÃO DINÂMICA SER HUMANO-ESTRUTURA SOBRE O CONFORTO HUMANO DE PISOS

Cássio Marques Rodrigues Gaspar

José Guilherme Santos da Silva

cgaspac@yahoo.com.br

jgss@uerj.br

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

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

Elsa Caetano

Carlos Moutinho

ecaetano@fe.up.pt

moutinho@fe.up.pt

CONSTRUCT(ViBest), Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Portugal

Resumo. *A atual tendência de projeto de pisos de edifícios tem sido relacionada ao conforto humano dos ocupantes. Ao longo das últimas duas décadas, a questão da vibração excessiva sobre pisos de edificações tem sido relatada com base no desenvolvimento de vários estudos. Estes sistemas estruturais são propensos a vibrações desagradáveis devido ao seu baixo amortecimento inerente, bem como devido às suas frequências naturais, que podem ser facilmente excitadas por forças externas humanas, como o caminhar e atividades rítmicas. Pesquisas recentes têm demonstrado que o corpo humano passivo (parado) sobre a estrutura se comporta de forma semelhante a um atenuador passivo sintonizado em frequência (TMD: Tuned Mass Damper). Isto significa dizer que a interação ser humano-estrutura pode atuar em benefício dos ocupantes, pois reduz o efeito negativo de vibrações excessivas. Neste sentido, este trabalho de pesquisa pretende investigar experimentalmente a interação ser humano-estrutura sobre um piso montado em laboratório. O estudo foi realizado considerando um indivíduo em pé e com joelhos fletidos. Além disso, foram encontradas as propriedades dinâmicas do corpo humano passivo (parado) através de técnicas de ajuste de curva e otimização. Com base nos resultados experimentais, deve-se ressaltar que a interação dinâmica ser humano-estrutura pode melhorar a questão relacionada ao conforto humano em função do considerável amortecimento adicionado ao sistema estrutural.*

Palavras-chave: *Interação ser humano-estrutura, Conforto humano, Análise de vibrações.*

CILAMCE 2017

Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering
P.O. Faria, R.H. Lopez, L.F.F. Miguel, W.J.S. Gomes, M. Noronha (Editores), ABMEC, Florianópolis, SC,
Brazil, November 5-8, 2017.

1 INTRODUÇÃO

Diversos pesquisadores têm destacado, ao longo das últimas duas décadas, um aumento significativo de sistemas estruturais esbeltos, flexíveis e com baixo amortecimento estrutural inerente. Este fato é frequentemente atribuído ao avanço tecnológico no campo dos materiais, através do qual proporciona-se o desenvolvimento de materiais cada vez mais resistentes para a aplicação em obras civis. Portanto, isto permite a concepção de elementos estruturais com vãos maiores e seções transversais menores. Uma consequência direta desta tendência está relacionada ao desconforto dos ocupantes devido a vibrações excessivas (Bachmann et al., 1995; Jones et al., 2011; Chen et al. 2016).

No tocante aos pisos de edificações, suas frequências naturais são encontradas, na maioria das vezes, na faixa de 4 a 8 Hz, podendo até mesmo, em alguns casos, situarem-se entre 2 a 3 Hz (An et al., 2016; Zhou et al., 2016). Paralelamente, a ação humana através do caminhar e de atividades rítmicas (saltos, dança, ginástica aeróbica...) geram forças dinâmicas sobre os sistemas estruturais na mesma faixa de frequência. Por conseguinte, esta combinação aumenta consideravelmente a ocorrência da amplificação de vibrações devido à ressonância, tendo como resultado o aumento do desconforto humano.

Um importante estudo foi apresentado por Lee et al. (2014) em relação a um fenômeno de ressonância global ocorrido num edifício em aço de 39 andares. Os ocupantes nos últimos andares relataram vibrações desconfortáveis durante 10 minutos. Os testes experimentais e o correspondente modelo numérico revelaram que os pisos apresentam um modo de vibração global igual a 2,7 Hz e fator de amortecimento de 0,3%, o qual foi facilmente excitado pela prática de atividade rítmica devido à localização de uma academia no décimo segundo andar.

No que diz respeito à fase de projeto, deve-se destacar o grande desafio enfrentado pelos projetistas a fim de prever a resposta dinâmica do sistema estrutural submetido ao carregamento humano. Com base em normas, guias de projeto e autores, diversas funções matemáticas representativas da força humana podem ser empregadas em modelos analíticos ou numéricos (Bachmann et al., 1995; Faisca, 2003; ISO, 2007; SCI, 2009; Caetano et al. 2011; AISC, 2016). Entretanto, a escolha de uma função em detrimento de outra pode resultar em níveis de vibrações relativos ao conforto humano mais ou menos conservadores, podendo gerar projetos mais onerosos (Cappellini, 2015; Gaspar, 2015).

Cabe ressaltar que estas funções foram desenvolvidas com base em estudos experimentais através do uso de plataformas de força e não levam em consideração as propriedades dinâmicas do corpo (massa, rigidez e amortecimento). Por outro lado, recentes trabalhos têm demonstrado o efeito benéfico das propriedades dinâmicas do corpo humano sobre os sistemas estruturais, através do emprego de modelos biodinâmicos. Desse modo, estes modelos têm representado de forma mais realista o efeito da interação ser humano-estrutura (Jones et al., 2011; Busca et al. 2014; Salyards e Hua, 2015; Gaspar, 2017).

Deste modo, este trabalho investiga experimentalmente a interação ser humano-estrutura sobre um piso em vibração montado em laboratório. O estudo foi realizado considerando-se a variação postural de um indivíduo. Além disso, as propriedades dinâmicas do corpo humano passivo (parado) foram obtidas através de técnicas de ajuste de curva e otimização. Com base nos resultados experimentais obtidos, ressalta-se que a consideração da interação dinâmica ser humano-estrutura contribui favoravelmente para uma avaliação mais realista e menos conservativa do conforto humano, tendo em mente o amortecimento adicionado ao sistema.

2 ESTUDO DA INTERAÇÃO SER HUMANO-ESTRUTURA

No que tange à modelagem da interação ser humano-estrutura propriamente dita, vários modelos foram propostos para facilitar a determinação da resposta dinâmica da estrutura sujeita ao carregamento dinâmico humano. Inicialmente, e por muito tempo aceitável, a maneira mais simples de considerar a presença das pessoas sobre a estrutura era por meio de massas concentradas adicionais. Essa consideração fazia com que a frequência natural do sistema fosse reduzida. Entretanto, a presença do amortecimento não era considerada. Alguns autores observaram essa limitação e sugeriram um sistema dinâmico com amortecimento (Jones et al., 2011; Cappellini, 2015).

Nesse sentido, a interação dinâmica entre o ser humano e sistemas estruturais é definida como o fenômeno pelo 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 (Jones et al., 2011). 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.

Em relação aos efeitos das pessoas sobre os sistemas estruturais tem-se observado que elas podem se comportar, em geral, de modo passivo (parado sobre a estrutura) ou ativo (caminhada, dança, saltos...). A influência de pessoas atuando passivamente tem sido amplamente estudada nas últimas décadas, notando-se que elas podem alterar de maneira significativa as frequências naturais e o fator de amortecimento das estruturas que elas ocupam (Cappellini, 2015).

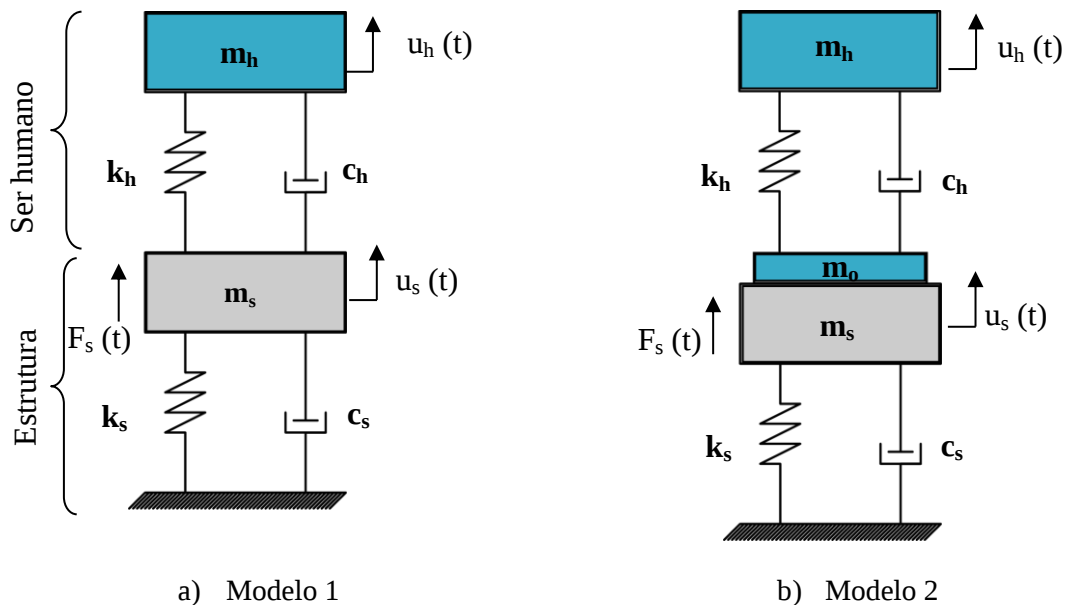


Figura 1. Modelos biodinâmicos da interação ser humano passivo-estrutura

A Fig. 1 apresenta dois exemplos de modelos de interação ser humano passivo-estrutura comumente empregados pela literatura (Sachse, 2004; Nimmen, 2015; Wang et al., 2014).

Onde “ m_s ”, “ k_s ” e “ c_s ” é a massa, rigidez e amortecimento da estrutura, enquanto que “ m_h ”, “ k_h ” e “ c_h ” corresponde a massa, rigidez e amortecimento do ser humano. “ $F_s(t)$ ” é a força dinâmica aplicada sobre a estrutura; as variáveis “ u_s ” e “ u_h ” representam o deslocamento da estrutura e do ser humano, respectivamente. A principal diferença entre o modelo 1 e 2 consiste no fato de que uma massa rígida (m_0) é incorporada na base do modelo 2. Esta massa (m_0) pode ser usada como uma variável “dummy” de modo que a soma de “ m_0 ” mais “ m_h ” corresponde à massa estática do indivíduo (Nimmen, 2015).

O trabalho de Wang et al. (2014) destaca que várias investigações têm representado a interação ser humano-estrutura através da analogia de um atenuador sintonizado em frequência (TMD – *tuned mass damper*) acoplado à estrutura. De acordo com a teoria clássica de atenuadores dinâmicos sintonizados, é notório o aparecimento de duas frequências de ressonância a partir da instalação de um TMD (Bachmann et al., 1995).

Entretanto, tem-se verificado comumente que as funções de resposta em frequência apresentam somente um pico de ressonância na presença humana. Isto porque o ser humano se comporta como um TMD superamortecido. Nesse sentido, Wang et al. (2014) realizaram um estudo paramétrico teórico compreendendo 5000 casos a fim de avaliar as condições necessárias para o surgimento – ou não – de dois picos de ressonância. Posteriormente, foram realizados ensaios experimentais, em laboratório, de modo a verificar o estudo teórico desenvolvido.

As Eqs. (1) e (2) apresentam a Função de Resposta em Frequência (FRF) analítica da aceleração (ou inertância) – considerando dois graus de liberdade – para o modelo 1, enquanto que as Eqs. (3) e (4) correspondem ao modelo 2. Salienta-se que esta aceleração relaciona, no domínio da frequência (ω), a resposta dinâmica da estrutura (aceleração – “ $\ddot{u}_s(\omega)$ ”) com a força externa aplicada, “ $F_s(\omega)$ ” sobre a mesma. Comparando-se as Eqs. (2) e (4), nota-se que a única diferença entre elas está no denominador da Eq. (4), onde a massa (m_0) é somada no grau de liberdade relativo à massa da estrutura (m_s). Ressalta-se que estas Eqs. (1-4) serão aplicadas na Seção 4 deste trabalho.

$$\frac{\ddot{u}_s(\omega)}{F_s(\omega)} = H_{\text{mod1}}(\omega) \quad \frac{[m/s^2]}{[N]} \quad (1)$$

$$H_{\text{mod1}}(\omega) = \frac{-\omega^2(-m_h\omega^2 + ic_h\omega + k_h)}{[-m_s\omega^2 + (k_s + k_h) + i(c_s + c_h)\omega](-m_h\omega^2 + ic_h\omega + k_h) - (k_h + ic_h\omega)^2} \quad (2)$$

$$\frac{\ddot{u}_s(\omega)}{F_s(\omega)} = H_{\text{mod2}}(\omega) \quad \frac{[m/s^2]}{[N]} \quad (3)$$

$$H_{\text{mod2}}(\omega) = \frac{-\omega^2(-m_h\omega^2 + ic_h\omega + k_h)}{[-(m_s + m_0)\omega^2 + (k_s + k_h) + i(c_s + c_h)\omega](-m_h\omega^2 + ic_h\omega + k_h) - (k_h + ic_h\omega)^2} \quad (4)$$

3 DESCRIÇÃO DO ENSAIO EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Vibração e Monitorização Estrutural (ViBEST) localizado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O sistema estrutural estudado trata-se de uma laje de concreto armado de pequeno porte, apoiada sobre molas e um pórtico metálico, de modo que pudesse representar os eventos de atividades humanas executados sobre um pavimento flexível em vibração, conforme apresentada na Fig.2. A descrição pormenorizada deste sistema estrutural encontra-se em Gaspar (2017).

O ensaio em pavimento flexível tem como principal objetivo compreender o problema da interação ser humano-estrutura. A denominação “flexível” quer dizer que as frequências naturais do sistema estrutural podem interagir tanto com a frequência da força externa quanto a frequência natural do corpo humano. Diversos autores têm estudado este comportamento seja em estruturas laboratoriais, seja em estruturas reais, tais como pavimentos, passarelas e arquibancadas.

A vantagem da escolha deste sistema estrutural reside principalmente no maior controle das condições de contorno da estrutura. Dessa forma, torna-se possível controlar as frequências naturais da estrutura simplesmente adicionando ou retirando as molas de apoio. O modelo estrutural possui dimensões em planta de 2,62m x 1,54 m (Fig. 3), com uma espessura da laje de concreto armado igual a 204 mm e apoiada sobre vinte e quatro molas.

Em relação ao ensaio propriamente dito, três situações distintas foram analisadas: (i) estrutura vazia (condição inicial); (ii) um indivíduo em pé sobre a laje e (iii) com joelhos fletidos; totalizando três testes experimentais. A fim de obter-se a resposta dinâmica de cada situação, a laje foi excitada através de um excitador dinâmico (*shaker*) (Fig.2b). Para isto, gerou-se um sinal de varrimento (*swept-sine*) com largura de banda de frequência de 0 a 10 Hz. Ressalta-se que o acelerômetro foi posicionado no centro da laje. Três células de carga foram colocadas na base do *shaker* a fim de medir-se a força gerada sobre a estrutura. A duração dos ensaios variou entre 90 a 160 s. A Fig. 4 exibe as características do ensaio de interação ser humano passivo-estrutura.

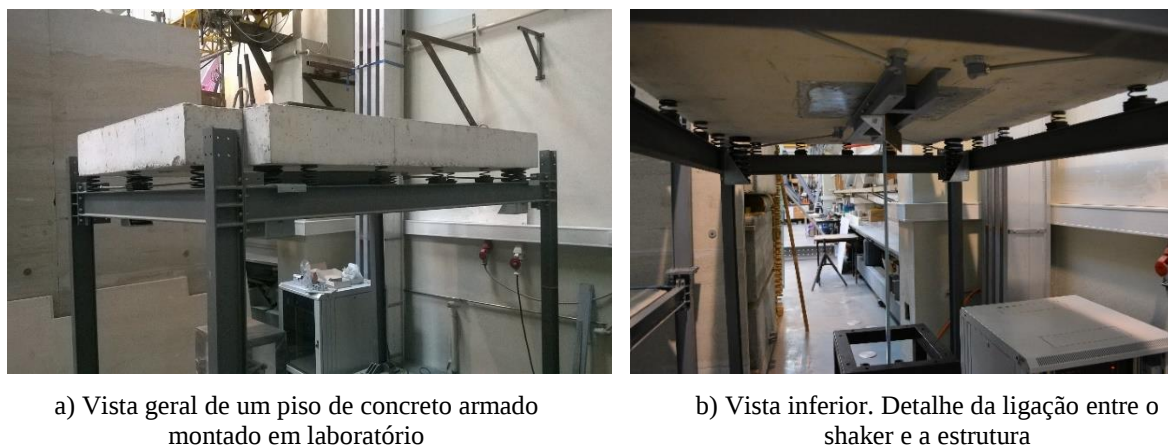


Figura 2. Laje de concreto armado apoiada sobre molas e pórtico metálico

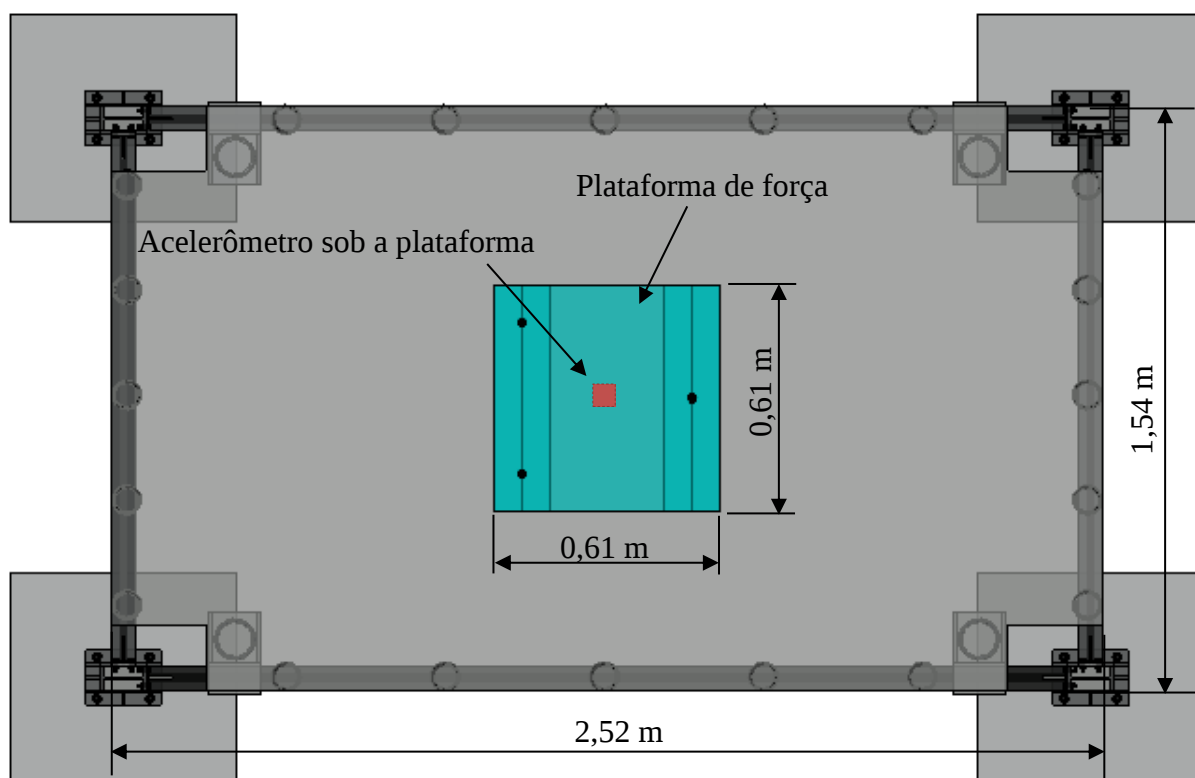


Figura 3. Modelo estrutural do piso flexível. Vista superior



a) Indivíduo em pé



b) Indivíduo com joelhos flexionados

Figura 4. Ensaio de interação ser humano passivo-estrutura

4 AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO SER HUMANO-ESTRUTURA

O participante em questão se trata de uma pessoa do sexo masculino, com massa estática de 66,8 kg e altura de 1,82 m. Em relação ao processamento dos sinais de aceleração da laje e força na base do *shaker*, eles foram adquiridos com uma taxa de amostragem de 500 Hz. Além disso, empregou-se um filtro passa-baixa Butterworth de quinta ordem com frequência de corte igual a 15 Hz. As funções de resposta em frequência (FRF) das acelerações experimentais apresentadas neste trabalho foram obtidas com base na teoria de processamento de sinais (Caetano, 1992; Brandt, 2011).

A Fig. 5 apresenta a aceleração experimental para os três casos investigados. O piso vazio apresentou uma frequência natural fundamental de 3,845 Hz, correspondente ao modo vibração na direção vertical. Cabe ressaltar que este sistema estrutural (laje apoiada sobre molas) se comporta, do ponto de vista dinâmico, como movimento de corpo rígido. O modo de flexão da laje é superior a 100Hz e não faz parte da banda de frequência de interesse deste estudo.

Ainda de posse da Fig. 5, é interessante notar uma expressiva redução na magnitude da aceleração (de 0,14 m/s²/N para 0,03 m/s²/N) quando o indivíduo está em pé sobre a laje. Além disso, houve uma redução em cerca de 2,4% da frequência da estrutura vazia (3,845 Hz) em comparação com o indivíduo em pé (3,754 Hz). Por outro lado, no caso em que o indivíduo encontra-se com joelhos fletidos, houve uma redução de 0,14 m/s²/N para 0,05 m/s²/N na magnitude da aceleração, enquanto que não existiu variação em relação a frequência natural do sistema estrutural. A Fig. 5b exibe o gráfico da aceleração expresso em decibéis (dB). Vale a pena salientar que a magnitude expressa na escala logarítmica (dB) facilita a visualização e comparação das acelerações dos três casos investigados.

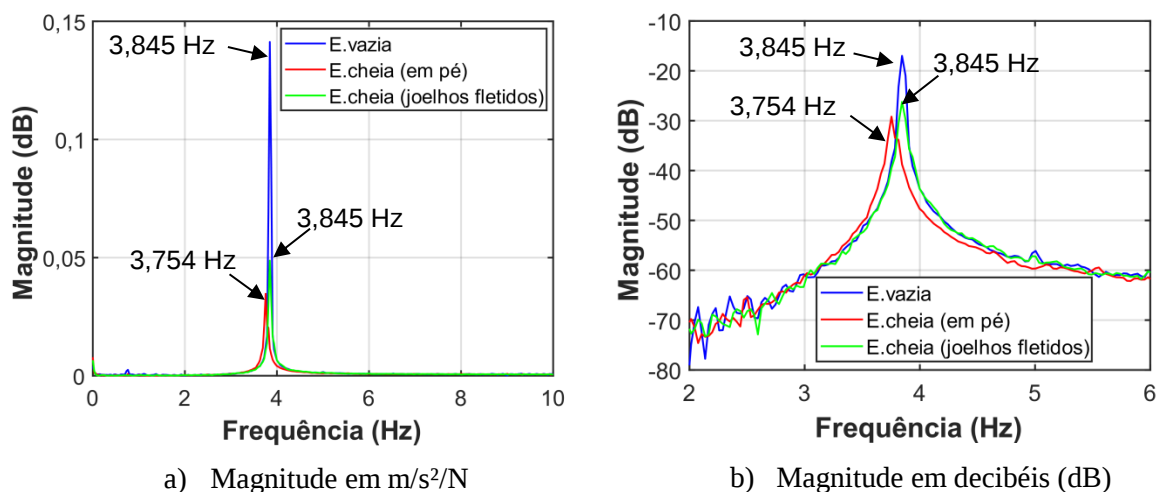


Figura 5. Aceleração experimental dos casos investigados

Com base nas acelerações experimentais obtidas, torna-se possível realizar a identificação dos parâmetros modais do sistema estrutural (massa, rigidez e amortecimento) para as três situações de estudo. Para este fim, técnicas de ajuste de curva (*curve-fitting*) são comumente utilizadas.

Nesta etapa, empregou-se o método das Frações Racionais Polinomiais (*Rational Fraction Polynomial* – RFP) de acordo com Richardson e Formenti (1982) via Matlab (Matlab, 2017). Ademais, alternativamente, utilizou-se a função “fmincon” através do algoritmo “Interior Point”, baseado em métodos de gradiente, disponível em Matlab, cuja finalidade é encontrar o mínimo local da função objetivo sujeita a restrições. Por outro lado, pode-se empregar o algoritmo “GlobalSearch” (Ugray et al., 2007; Matlab, 2017) concomitantemente ao “Interior Point” de modo a procurar-se o mínimo global do problema de otimização. Para isto, o “GlobalSearch” utiliza o método “scatter-search” para gerar um conjunto de pontos iniciais dentro do limite de contorno especificado (superior e inferior).

A Eq. (5) apresenta a função objetivo do problema de otimização, que representa a soma da diferença quadrática entre os valores discretos da aceleração experimental (H_{exp_i}) e a simulada (H_{sim_i}), para $i=1,2,3...n$; onde “n” é o número total de amostras do vetor considerando a banda de frequência de interesse. Desse modo, a expressão analítica da aceleração para a estrutura, “ H_{estr} ” [Eq. (6)], considerando um grau de liberdade, representa a aceleração a ser simulada ou ajustada. Onde “ ω ” é o vetor de frequência angular; “ m_s ”, “ k_s ” e “ c_s ” são as variáveis do problema. As Eqs. (7) e (8) correspondem à frequência natural (f_s) e ao fator de amortecimento da estrutura, respectivamente.

$$erro = \sum_{i=1}^n \left(|H_{exp_i}| - |H_{sim_i}| \right)^2 \quad (5)$$

$$H_{estr}(\omega) = \frac{-\omega^2}{-m_s \omega^2 + i c_s \omega + k_s} \quad (6)$$

$$f_s = \frac{\sqrt{\frac{k_s}{m_s}}}{2\pi} \quad [Hz] \quad (7)$$

$$\xi_s = \frac{c_s}{2\omega_s m_s} \quad (8)$$

A Fig. 6a, 6b e 6c apresenta a comparação entre a aceleração experimental (linha azul) e simulada (linha vermelha) para a estrutura vazia, cheia (em pé) e cheia (joelhos fletidos), respectivamente. Através da magnitude em dB, nota-se um excelente ajuste de curva para os três casos investigados. Ressalta-se que a Fig. 6 mostra o melhor ajuste dos parâmetros considerando a aplicação individual do método RFP e a função “fmincon (Matlab)”.

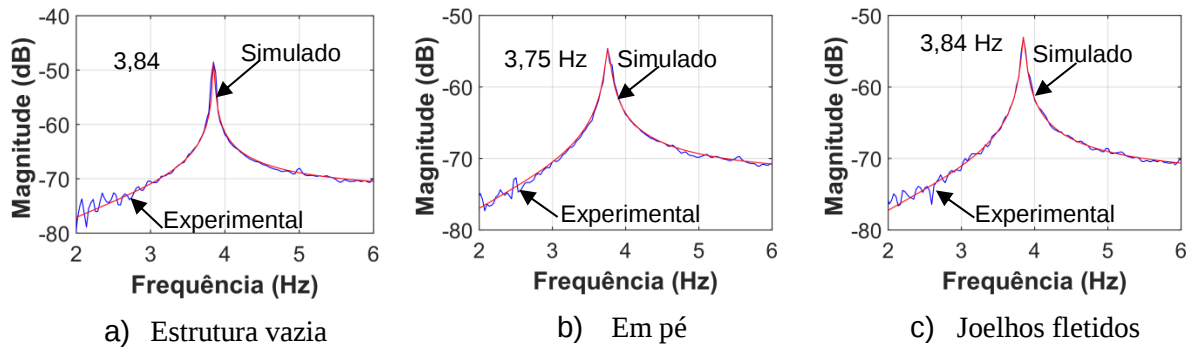


Figura 6. Acelerância (dB) experimental e simulada dos casos investigados

A Tabela 1 exibe os parâmetros modais calculados relativos a massa, amortecimento, rigidez, frequência natural e fator de amortecimento para os casos estudados. Como esperado, os valores obtidos para a massa modal da estrutura cheia com o ser humano em pé (2013,30 kg) e com joelhos fletidos (1962,00 kg) são maiores do que para a estrutura vazia (1943,60 kg). Em relação as frequências naturais obtidas de 3,845 Hz (estrutura vazia); 3,755 Hz (em pé) e 3,855 Hz (joelhos fletidos) correspondem àquelas experimentais, apresentando uma redução de 2,3% para o segundo caso. É interessante observar o aumento de amortecimento conferido pela presença do ser humano sobre a estrutura, com uma relação de quatro vezes (0,72%/0,18%) e de cerca de duas vezes e meia maior (0,48%/0,18%) quando o indivíduo está em pé e com joelhos fletidos, respectivamente.

Tabela 1. Caracterização dinâmica do sistema estrutural investigado

Casos	Parâmetros modais identificados				
	m_s (kg)	c_s (N.s/m)	k_s (N/m)	f_s (Hz)	ξ_s (%)
Estrutura vazia	1943,60	169,04	1134381,97	3,845	0,18
Estrutura cheia (em pé)	2013,30	679,74	1120713,23	3,755	0,72
Estrutura cheia (joelhos fletidos)	1962,00	456,92	1150906,14	3,855	0,48

5 ANÁLISE DOS PARÂMETROS BIODINÂMICOS DO CORPO

Uma vez obtidos os parâmetros modais conforme apresentados na Tabela 1, é importante conhecer os parâmetros biodinâmicos do corpo humano que interagem com a estrutura. Portanto, pode-se utilizar a mesma metodologia apresentada na Seção 3: otimizar a função objetivo [Eq. (5)] que representa a soma da diferença quadrática entre os valores discretos da acelerância experimental ($H_{exp,i}$) e a simulada ($H_{sim,i}$). Por outro lado, nesta etapa, a acelerância simulada presente na Eq. (5) corresponde às Eqs. (2) e (4) para o modelo 1 e modelo 2 de interação ser humano passivo-estrutura, respectivamente. Desta maneira, conhecendo-se as propriedades modais da estrutura vazia (fixas) correspondentes ao grau de liberdade da estrutura, as variáveis do corpo humano “ m_h ”, “ k_h ” e “ c_h ” (modelo 1); e “ m_h ”, “ m_0 ”, “ k_h ” e “ c_h ” (modelo 2) podem ser obtidas. Salienta-se que a acelerância experimental corresponde, separadamente, àquela da estrutura cheia (em pé e com joelhos fletidos).

Com objetivo de verificar se o método de otimização tem influência sobre os parâmetros estimados, aplicou-se a função “fmincon” através do algoritmo “Interior Point”, considerando tanto o método de geração de pontos iniciais através do algoritmo “GlobalSearch” quanto o “MultiStart (Matlab, 2017)”. Este último considera um conjunto de pontos iniciais fornecidos

explicitamente pelo usuário de modo que o mínimo global possa ser buscado dentro dos limites de contorno especificados.

No que diz respeito às restrições do problema de otimização, segundo Nimmen (2015), a frequência natural do corpo pode variar entre 2 Hz a 7,5 Hz; e o fator de amortecimento entre 20% a 60%; em função da postura. Entretanto, no presente trabalho, atribui-se o limite inferior de frequência igual a 1 Hz. Em relação ao “MultiStart”, ressalta-se que foram gerados 432 pontos iniciais com a finalidade de explorar ao máximo o espaço definido entre os limites de contorno de acordo com as restrições. No que diz respeito aos valores iniciais de massa, foram atribuídos valores iguais a 100%, 85%, 38% (Matsumoto e Griffin, 2003; Wang et al., 2014; Nimmen, 2015) e 10% da massa estática. O modelo 2 apresenta uma restrição adicional da massa “ m_0 ” para que a soma entre “ m_0 ” e “ m_h ” corresponda à massa estática do indivíduo (Nimmen, 2015).

A Fig. 7 apresenta um exemplo do ajuste de curva entre aceleração experimental e a simulada para o modelo 1 considerando a pessoa em pé. Observa-se um excelente ajuste para ambos os métodos de otimização. O mesmo foi obtido para os demais casos avaliados com base nos mesmos métodos: modelo 2 com pessoa em pé; e modelos 1 e 2 considerando a pessoa com joelhos fletidos.

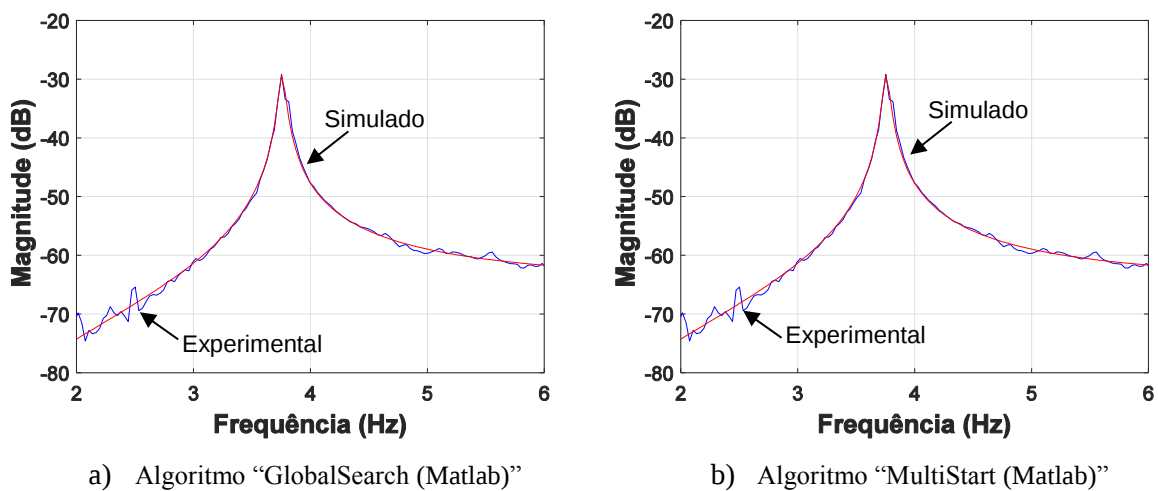


Figura 7. Métodos de otimização dos parâmetros biodinâmicos. Aceleração. Em pé. Modelo 1

Este ajuste pode ser quantificado através da avaliação da discrepância (ΔH) da aceleração experimental e simulada, com base na Eq. (9), para $i=1,2,3,...n$; onde “ n ” é o número total de amostras do vetor considerando a banda de frequência de interesse.

$$\Delta H = \frac{\sum_{i=1}^n (|H_{\text{exp}_i}| - |H_{\text{sim}_i}|)^2}{\sum_{i=1}^n (|H_{\text{exp}_i}|)^2} \quad (9)$$

Observando-se as Tabela 2 e 3, percebe-se que para os modelos 1 e 2, pessoa em pé, os parâmetros biodinâmicos do corpo relativos a frequência natural (f_h) e ao fator de amortecimento (ξ_h) foram da ordem de 6 Hz e 40%, respectivamente, para ambos os algoritmos de otimização empregados. Destaca-se que estes valores estão em consonância com a literatura, apresentando valores de 5 Hz e 40%; e de $5,7 \pm 0,56$ Hz e $0,44 \pm 0,07$ %; segundo o guia de projeto Joint Working Group (JWG, 2008) e com base no trabalho de Nimmen (2015), respectivamente. Em relação à massa modal (m_h), o modelo 1 tende para o valor de massa estática em torno de 66 kg enquanto que uma parcela em torno de 10 % a 15% vai para a massa (m_0). Enfatiza-se que a discrepância entre a aceleração experimental e simulada está abaixo de 4,5%.

Tabela 2. Otimização dos parâmetros biodinâmicos. E. cheia (em pé). Modelo 1

Algoritmo (Matlab)	Parâmetros biodinâmicos otimizados do modelo 1 – em pé					
	m_h (kg)	c_h (N.s/m)	k_h (N/m)	f_h (Hz)	ξ_h (%)	ΔH (%)
GlobalSearch	66,80	2165,93	93682,73	5,96	43,29	3,17
MultiStart	65,50	1981,90	90380,23	5,91	40,73	3,17

Tabela 3. Otimização dos parâmetros biodinâmicos. E. cheia (em pé). Modelo 2

Algoritmo (Matlab)	Parâmetros biodinâmicos otimizados do modelo 1 – em pé						
	m_h (kg)	m_0 (kg)	c_h (N.s/m)	k_h (N/m)	f_h (Hz)	ξ_h (%)	ΔH (%)
GlobalSearch	57,70	9,10	1611,71	74456,27	5,72	38,88	4,34
MultiStart	60,75	6,05	1782,12	80688,62	5,80	40,25	3,67

Tabela 4. Otimização dos parâmetros biodinâmicos. E. cheia (joelhos fletidos). Modelo 1

Algoritmo (Matlab)	Parâmetros biodinâmicos otimizados do modelo 1 – joelhos fletidos					
	m_h (kg)	c_h (N.s/m)	k_h (N/m)	f_h (Hz)	ξ_h (%)	ΔH (%)
GlobalSearch	8,06	70,67	3246,06	3,19	21,84	1,49
MultiStart	7,09	59,92	3040,72	3,30	20,41	1,49

Tabela 5. Otimização dos parâmetros biodinâmicos. E. cheia (joelhos fletidos). Modelo 2

Algoritmo (Matlab)	Parâmetros biodinâmicos otimizados do modelo 1 – joelhos fletidos						
	m_h (kg)	m_0 (kg)	c_h (N.s/m)	k_h (N/m)	f (Hz)	ξ_h (%)	ΔH (%)
GlobalSearch	59,98	6,82	232,23	5485,89	1,52	20,24	2,11
MultiStart	64,80	2,00	253,62	4103,88	1,27	24,59	1,59

As Tabelas 4 e 5 apresentam os parâmetros biodinâmicos do corpo para os modelos 1 e 2, respectivamente, considerando a pessoa com joelhos fletidos sobre a estrutura. Para o modelo 1, a frequência natural (f_h) e o fator de amortecimento (ξ_h) foram da ordem de 3 Hz e de 20 %, respectivamente. Em relação ao modelo 2, encontraram-se valores abaixo de 2 Hz (1,52 Hz e 1,27 Hz) para a frequência natural (f_h) e de 20 % a 25% de amortecimento.

Os valores de frequência e amortecimento sugeridos pelo Joint Working Group (JWG, 2008) são de 2,5 Hz e 25%; e de $3,25 \pm 0,32$ Hz e $0,30 \pm 0,05$ % segundo trabalho de Nimmen (2015). Portanto, os valores encontrados situam-se dentro da faixa de literatura para a postura de joelhos fletidos, exceto pela frequência natural abaixo de 2 Hz quando o modelo 2 é considerado. Não obstante, isto pode ser explicado pelo fato do indivíduo ter flexionado muito mais os joelhos em comparação com o termo frequentemente mencionado na literatura: joelhos ligeiramente flexionados.

Embora valores de discrepância apresentados nas Tabelas 4 e 5 situam-se entre 1,5 % a 2%, ou seja, apresentam um excelente ajuste de curvas, a massa modal (m_h) foi o parâmetro que mais sofreu variação em função do modelo escolhido para a postura de joelhos fletidos. Vale a pena lembrar que a postura estacionária de joelhos fletidos pode ser considerada como uma aproximação de pessoas ativas (dançando ou balançando) de acordo com Salyards e Hua (2015) e Nimmen (2015).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de pesquisa teve como principal objetivo investigar experimentalmente a influência da interação ser humano-estrutura sobre um piso montado em laboratório, levando-se em conta o efeito da variação postural: em pé e joelhos fletidos. Desse modo, verificou-se que o corpo humano pôde contribuir benéficamente para o amortecimento global estrutural, podendo aumentá-lo em torno de duas vezes e meia (joelhos fletidos) e quatro vezes (em pé).

Além disso, investigaram-se dois modelos analíticos de interação ser humano-estrutura apresentados na literatura. Com base em técnicas de otimização, os parâmetros biodinâmicos do corpo humano correspondentes à frequência natural (f_h) e ao fator de amortecimento (ξ_h) foram da ordem de 6 Hz e 40% para o indivíduo em pé; e de 1,5 Hz a 3 Hz e 20 a 25% para a posição com joelhos fletidos. Destaca-se o excelente ajuste de curvas obtido, abaixo de 4,5%, quando as funções de resposta em frequência (FRFs) experimentais e simuladas foram comparadas.

Portanto, a consideração do efeito da interação ser humano-estrutura apresenta ser uma alternativa mais condizente com a prática real de projeto para a avaliação do conforto humano em detrimento de modelos que não levam em consideração as propriedades dinâmicas do corpo humano (massa, rigidez e amortecimento). Desse modo, pretende-se evitar a superestimação de vibrações na fase de projeto, e consequentemente, o aumento do custo de projeto associado a fim de atender os critérios de conforto humano de acordo com normas e guias de projeto.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho de pesquisa agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do Brasil, CAPES, CNPq e FAPERJ; assim todo apoio fornecido pelo Projeto Europeu POCI-01-0145-FEDER-007457-CONSTRUCT, pelo FEDER através do COMPETE2020 - POCI e FCT. Ademais, os autores agradecem ao aluno de doutoramento, Sérgio Pereira, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), por gentilmente ter participado dos testes experimentais no âmbito desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- An, Q. et al., 2016. Dynamic performance characteristics of an innovative Cable Supported Beam Structure–Concrete Slab Composite Floor System under human-induced loads. *Engineering Structures*, v. 117, p. 40–57.
- 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.
- Brandt, A., 2011. Noise and vibration analysis signal analysis: signal analysis and experimental procedures. John Wiley & Sons.
- Busca, G. et al., 2014. Quantification of changes in modal parameters due to the presence of passive people on a slender structure. *Journal of Sound and Vibration*, v. 333, n. 21, p. 5641–5652.
- Caetano, E., 1992. *Identificação experimental de parâmetros dinâmicos em sistemas estruturais*. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Caetano, E.; Cunha, Á.; Moutinho, C., 2011. Vandal Loads and Induced Vibrations on a Footbridge. *J. Bridge Eng.*, v. 16(3), n. June, p. 375–382.
- 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.
- Chen, J.; Li, G.; Racic, V., 2016. Acceleration response spectrum for predicting floor vibration due to occupants jumping. *Engineering Structures*, v. 112, p. 71–80.
- Faisca, R.G., 2003. *Caracterização de Cargas Dinâmicas Geradas por Atividades Humanas*, 230f. Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- 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.R., 2017. *Efeito da interação humana em pisos de edificações submetidos a atividades humanas rítmicas*. Tese de doutorado, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil. *Em desenvolvimento*.
- 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*, v 330, n 8, p 1531-1566, April 11.
- Lee, K. et al., 2014. Global vertical resonance phenomenon between steel building and human rhythmic excitations. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 92, p. 164–174.

MATLAB. Versão R2017a. MathWorks, 2017.

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*, v. 260, n. 3, p. 431–451.

Murray T.M. et al., 2016. Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity: AISC DG11 Second Edition. American Institute of Steel Construction, AISC, Chicago, USA.

Nimmen, K. V., 2015. Numerical and Experimental Study of Human-induced Vibrations of Footbridges. Ph.D Dissertation, K. U. Leuven, Belgium.

Richardson M., Formenti, D., 1982. Parameter estimation from frequency response measurements using rational fraction polynomials, *Proc. Int. Modal Anal. Conf*, 167-182.

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* 274 (3–5), 461–480.

Salyards, K. A.; Hua, Y., 2015. Assessment of dynamic properties of a crowd model for human-structure interaction modeling. *Engineering Structures*, v. 89, p. 103–110.

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

Ugray et al., 2007. Scatter Search and Local NLP Solvers: A Multistart Framework for Global Optimization. *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 19, No. 3, pp. 328–340.

WANG, D. et al., 2014. Presence of Resonance Frequencies in a Heavily Damped Two-Degree-of-Freedom System. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 140, n. 2, p. 406–417.

ZHOU, X. et al., 2016. Vibration serviceability of pre-stressed concrete floor system under human activity. *Structure and Infrastructure Engineering*, v. 2479, n. December, p. 1–11.