

DYNAMIC ANALYSIS OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE FLOORS CONSIDERING THE EFFECT OF THE BIODYNAMIC MODELS

Fernanda Fernandes Campista

fernandafcampista@yahoo.com.br

Civil Engineering Postgraduate Programme, PGECIV/FEN/UERJ

São Francisco Xavier St., N° 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brazil

José Guilherme Santos da Silva

jgss@uerj.br

Structural Engineering Department, State University of Rio de Janeiro, UERJ

São Francisco Xavier St., N° 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brazil

Abstract. The main objective of this research work is to investigate the dynamic structural behaviour of steel-concrete composite floors when subjected to human rhythmic activities, considering the effect of the people-structure dynamic interaction, based on the use of biodynamic models representative of the people. The investigated structural model was based on a real steel-concrete composite floor spanning 40m by 40m with a total area of 1600m². The structure represents a typical interior floor of a commercial building used for gym purposes, and designed according to the usual ULS and SLS Eurocode provisions. The composite floor is supported by steel columns and is currently submitted to human aerobic rhythmic loads. The floor is made from composite beams and a 100mm thick concrete slab and the columns height is equal to 4m. The human comfort evaluation methods used in the investigation indicated that the steel-concrete composite floor presented excessive vibrations. This way, the presented results show the relevance of the dynamic analysis when the structural design of floors is considered, and also the influence of the people-structure dynamic interaction effect on the assessment of the human comfort of this type of structure.

Keywords: Steel-concrete composite floors, Dynamic structural analysis, Biodynamic models.

1 Introdução

Atualmente, as estruturas aliam-se tanto a multifuncionalidade das edificações, como prédios residenciais com áreas comerciais, lazer e prática de atividades físicas, quanto tendências arquitetônicas e construtivas pela ampliação de espaços ao projetar estruturas com materiais mais leves e vãos livres maiores. Tais fatos somados as exigências do mercado conduzem a sistemas estruturais complexos. Neste sentido, observa-se o desenvolvimento de projetos com sistemas estruturais cada vez mais flexíveis e esbeltos, resultando em baixos valores de amortecimento estrutural e frequências naturais, nos quais se aproximam a faixa de frequências associadas às atividades humanas como andar, correr, saltar e dançar. Assim, as construções destinadas a residências, escritórios e academias tornam-se mais suscetíveis a problemas de vibrações excessivas, que geram desde o desconforto humano até mesmo o comprometimento da estrutura. Algumas estruturas estudadas apresentaram vibrações excessivas devido à ação humana, como as observadas em estádios de futebol [1-2], passarelas [3] e edificação [4].

Vários estudos avaliaram o comportamento dinâmico de sistemas de pisos submetidos a atividades rítmicas humanas. Sachse et al [5] consideraram a influência da ocupação humana nas propriedades modais da estrutura, de tal modo que conclui-se que a ocupação humana atua como um sistema SDOF e que, além disso, pode aumentar o amortecimento estrutural e alterar a frequência natural da estrutura. Uma contribuição significativa para esse campo foi feita no Brasil por Faisca [6], com base em experimentos realizados com um grupo de voluntários atuando em uma plataforma de concreto. Esses testes permitiram o desenvolvimento de uma função matemática chamada função Hanning, na qual representam as cargas induzidas por atividades humanas.

Varela e Batista [7] investigaram uma estrutura de piso misto submetido a várias cargas humanas dinâmicas, especialmente aquelas produzidas pela caminhada de pessoas, conseqüentemente conclui-se que para qualquer carga humana dinâmica aplicada, o sistema de controle passivo proporcionou reduções significativas nas amplitudes de vibração, melhorando o desempenho dinâmico da estrutura e o conforto do usuário.

Salyards e Hua [8] consideram que os ocupantes representam um comportamento dinâmico do sistema mola-amortecedor que interage com a estrutura com base em um fenômeno conhecido como interação humano-estrutura. O entendimento dessa interação é fundamental para a capacidade de manutenção da vibração, pois deixar de considerar seus efeitos pode resultar em uma superestimação da resposta dinâmica e, como resultado, em um projeto estrutural mais caro.

He et al [9] investigaram a interação homem-estrutura em uma passarela. Segundo este estudo, a frequência natural fundamental da estrutura aumentou significativamente devido à presença humana, da ordem de 15% quando a estrutura foi ocupada por indivíduos em pé com joelhos retos. Além disso, a taxa de amortecimento estrutural aumentou de 0,42% para 1,44% para os joelhos retos.

Shahabpoor et al. [10] estudaram as propriedades dinâmicas do sistema combinado de estrutura humana, isto é, taxa de amortecimento da estrutura ocupada, frequência natural e massa modal, com base em um conjunto de registros de função de resposta em frequência, medidos em uma estrutura de teste em escala real, ocupada por vários números de pedestres em movimento em diferentes cenários de caminhada. Os resultados demonstraram que a frequência natural do sistema de estrutura humana em movimento articular era maior que a da estrutura vazia, enquanto era menor quando as mesmas pessoas estavam paradas. A taxa de amortecimento do sistema conjunto humano-estrutura era consideravelmente mais alta que a da estrutura vazia, tanto para as pessoas que andavam quanto para as que estavam em pé, e era mais proeminente para grupos maiores.

Diversos pesquisadores [6] [11] representam matematicamente o carregamento humano, com base em testes experimentais. Entretanto, recentes estudos têm considerado, de forma mais realista, a interação ser humano-estrutura, através de modelos biodinâmicos [12], deste modo, envolvendo a interdisciplinaridade com a área da biomecânica.

Neste trabalho, as atividades humanas rítmicas são representadas por sistemas biodinâmicos, realizando saltos sincronizados semelhantes aos executados numa aula aeróbica (jump) sobre um piso misto (aço-concreto) investigado. Os parâmetros associados à massa, amortecimento e rigidez das pessoas, referentes ao modelo biodinâmico, são obtidos através do emprego de algoritmos genéticos,

via utilização do programa MATLAB [13], com base nos dados extraídos nos testes experimentais de indivíduos praticando atividades humanas rítmicas sobre uma plataforma rígida de MDF.

Nesse sentido, este trabalho de pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento estrutural dinâmico de um piso misto (aço-concreto), medindo 40m x 40m, com área total de 1600m², quando submetido à prática de ginástica aeróbica, através da simulação numérica das ações dinâmicas humanas via sistemas biodinâmicos, e posteriormente realizar uma análise comparativa da resposta dinâmica com base na modelagem biodinâmica [12] em relação aos modelos de força dura [6][14]. 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 [15], tendo em mente uma análise do conforto humano dos usuários do piso, mediante comparações de natureza qualitativas e quantitativas associadas à 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 dos Sistemas Biodinâmicos

A modelagem biodinâmica tem o objetivo de representar o ser humano de maneira mais realista, visto que diversos estudos apontam para a modificação do comportamento dinâmico estrutural (amortecimento e frequência natural) em virtude da presença dos indivíduos [10] [16] [17]. Desta maneira, as características dinâmicas do ser humano influenciam no comportamento estrutural, de tal modo que a simples consideração que o ser humano atua como uma massa acoplada à estrutura é algo bem questionável e ultrapassado.

Desta maneira, o sistema biodinâmico utilizado é basicamente constituído por massa (m_i), amortecimento (c_i) e rigidez do indivíduo (k_i) com um grau de liberdade (1GL). A escolha deste modelo encontra-se alinhada aos modelos propostos por Shahabpoor et al [10] e Campista [12].

O sistema biodinâmico encontra-se submetido à aceleração ($a_i(t)$), velocidade ($v_i(t)$) e deslocamento ($x_i(t)$) no domínio do tempo, atuando sobre a massa do sistema do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (1GL), obtidas durante os testes experimentais realizados em laboratório. Além disso, a força ($F_i(t)$) no domínio do tempo, também determinada experimentalmente nos testes realizados em laboratório, foi aplicada diretamente sobre o sistema estrutural. A Fig.1 ilustra a representação genérica acerca da modelagem dos sistemas biodinâmicos.

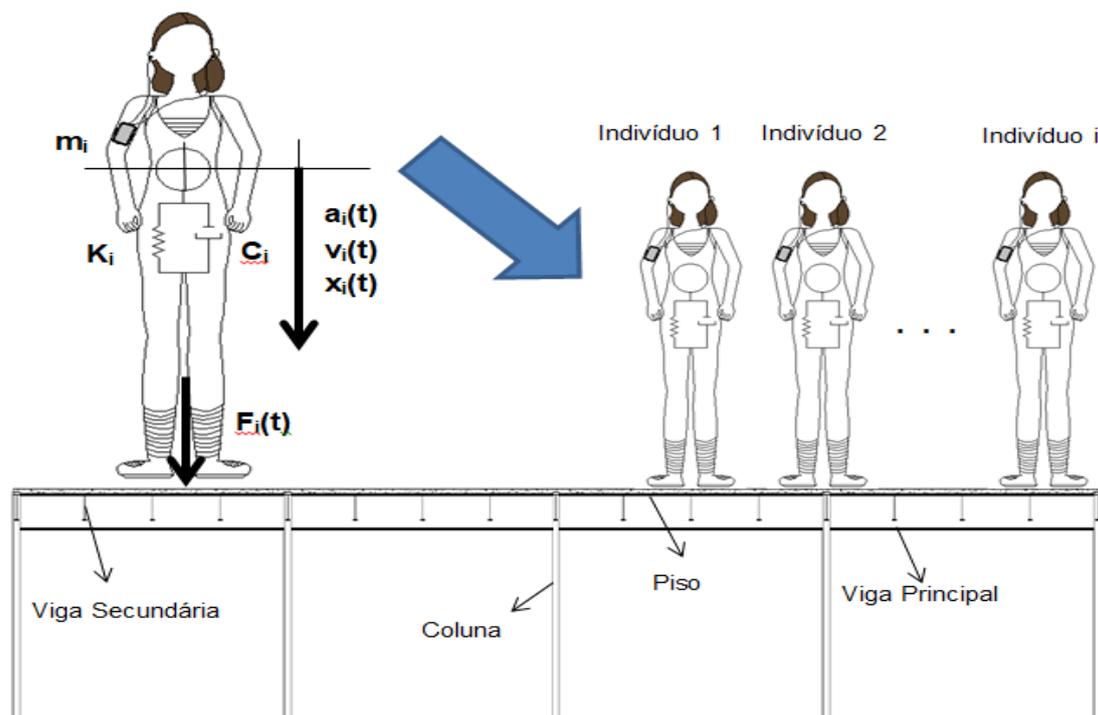


Figura 1. Representação genérica das pessoas modeladas como sistemas biodinâmicos com 1GL

A determinação das características dinâmicas (rigidez e amortecimento), presentes no modelo biodinâmico ilustrado na Fig.1, é baseada no processo de otimização da equação do equilíbrio dinâmico, como apresentado na Eq.(1), com base no emprego dos algoritmos genéticos (AG), via uso do programa MATLAB [13]. Inicialmente, a massa do indivíduo foi determinada no processo de pesagem realizado durante os ensaios experimentais. Mediante a realização de testes experimentais, obteve-se a força experimental e a aceleração do ser humano; e, por conseguinte, através da derivação da aceleração foram determinadas a velocidade e o deslocamento. A partir disto, foi possível obter as características dinâmicas do ser humano, através do processo de otimização.

$$F_i(t) = k_i \cdot x_i(t) + c_i \cdot v_i(t) + m_i \cdot a_i(t) \quad (1)$$

Onde $F_i(t)$: força produzida pelo indivíduo i (N); k_i : rigidez do indivíduo i (N/m); m_i : massa do indivíduo i (kg); c_i : amortecimento do indivíduo i (Ns/m); $x_i(t)$: deslocamento do indivíduo i ao longo do tempo (m); $v_i(t)$: velocidade do indivíduo i ao longo do tempo (m/s); $a_i(t)$: aceleração do indivíduo i ao longo do tempo (m/s²)

Com base nos valores obtidos experimentalmente (aceleração, velocidade e deslocamento do indivíduo), e além das características dinâmicas da pessoa (massa, rigidez e amortecimento), determinou-se a força otimizada (Eq. (1)). Deste modo, verificou-se a correlação entre a força experimental e otimizada, através do coeficiente de correlação de Pearson (CCP). Este coeficiente indica o grau de correlação entre dois conjuntos de dados obtidos, como apresentado pela Eq.(2), com o intuito de avaliar a eficácia do processo de otimização mencionado anteriormente, realizado para os 100 testes experimentais executados. Na sequência, a Fig.2 apresenta uma análise comparativa entre as forças experimental e otimizada de uma pessoa escolhida aleatoriamente dentre 100 pessoas.

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

Onde r : coeficiente de correlação de Pearson; x_i : força do modelo biodinâmico (N); y : 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).

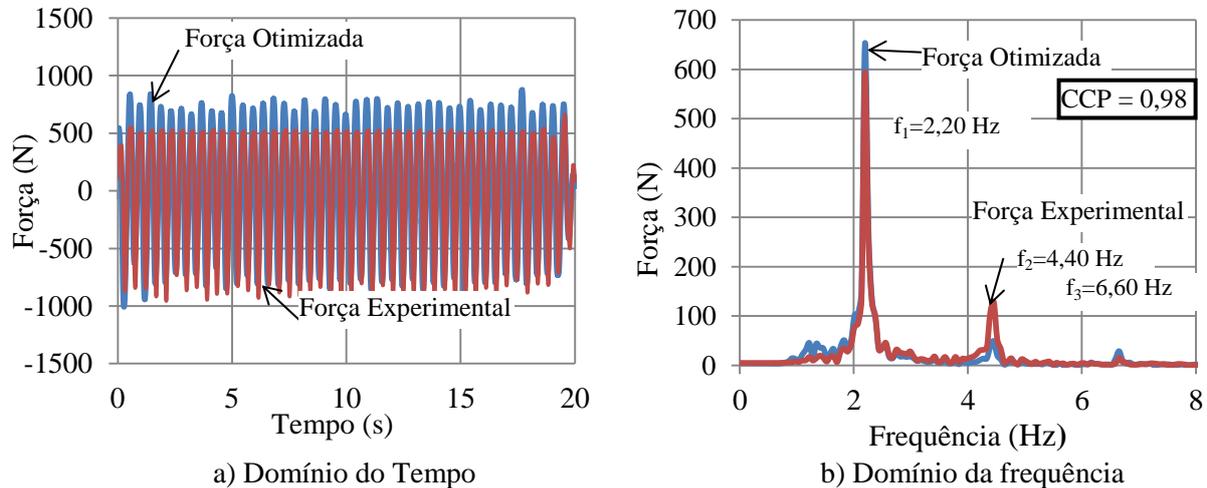


Figura 2. Parâmetros biodinâmicos otimizados. Pessoa saltando sob a frequência de 2,20 Hz

Conforme observado na Fig. 2, é possível verificar uma correlação satisfatória entre a força experimental e a força otimizada, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, o que demonstra que a força otimizada encontrada se ajusta a força obtida nos ensaios experimentais realizados.

3 Testes Experimentais Realizados

Os ensaios experimentais foram realizados por 100 (cem) pessoas, de forma individual, sobre uma plataforma rígida de MDF. Cada pessoa saltou sob uma frequência de excitação de 2,20 Hz, mediante de estímulos provenientes de um metrônomo (Fig. 3). Durante os ensaios, as medições da aceleração no centro de massa de cada pessoa foram realizadas mediante o uso do acelerômetro capacitivo Dytran, enquanto as medições da força exercida pelos participantes sobre a plataforma de MDF foram realizadas através de três células de carga. As medições foram registradas pelo sistema de aquisição de dados ADS-2002, fabricado pela LYNX Tecnologia Eletrônica LTDA. A Fig.3 ilustra a execução dos ensaios experimentais, enquanto as Figs. 4 e 5 apresentam os equipamentos utilizados durante os testes experimentais realizados.



a) Pessoa 1

b) Pessoa 2

Figura 3. Execução dos saltos durante os ensaios experimentais

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 forças, acelerações, velocidades e deslocamentos [$1\text{Hz} < f_s < 8\text{ Hz}$; f_s : frequência do sinal]. As respostas obtidas por meio do acelerômetro acoplado ao corpo, bem como as células de cargas conectadas a plataforma de MDF, via monitoração experimental, são apresentadas nas Figuras 6 a 8.

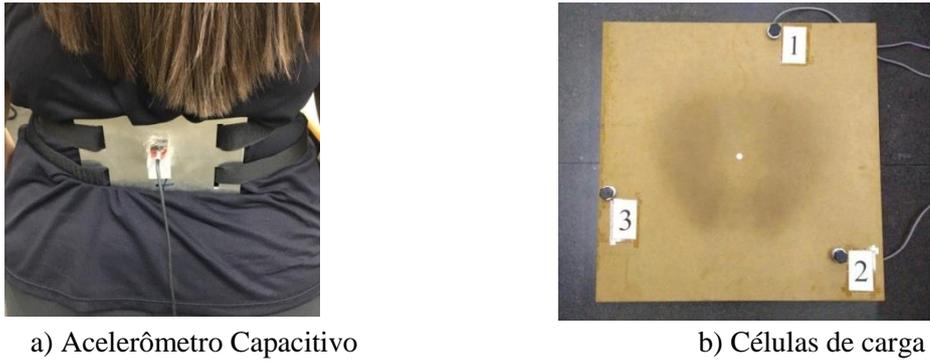


Figura 4. Posicionamento dos transdutores de aceleração e força

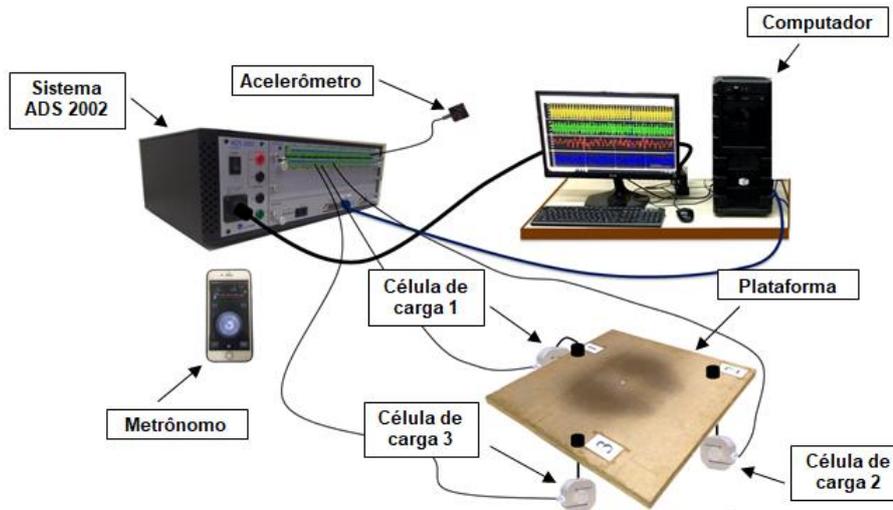


Figura 5. Equipamentos utilizados nos testes experimentais

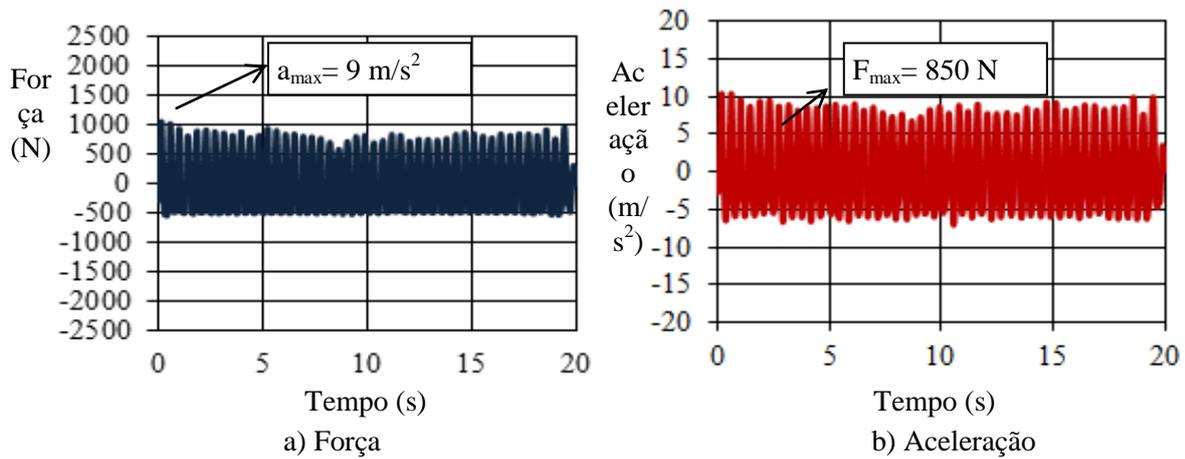


Figura 6. Domínio do tempo. Pessoa com 50,2 kg

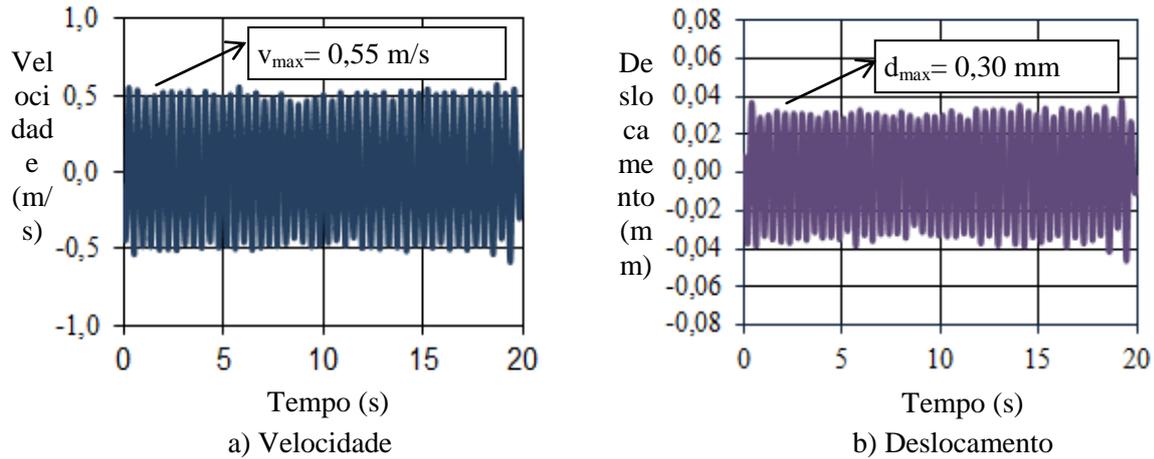


Figura 7. Domínio do tempo. Pessoa com 50,2 kg

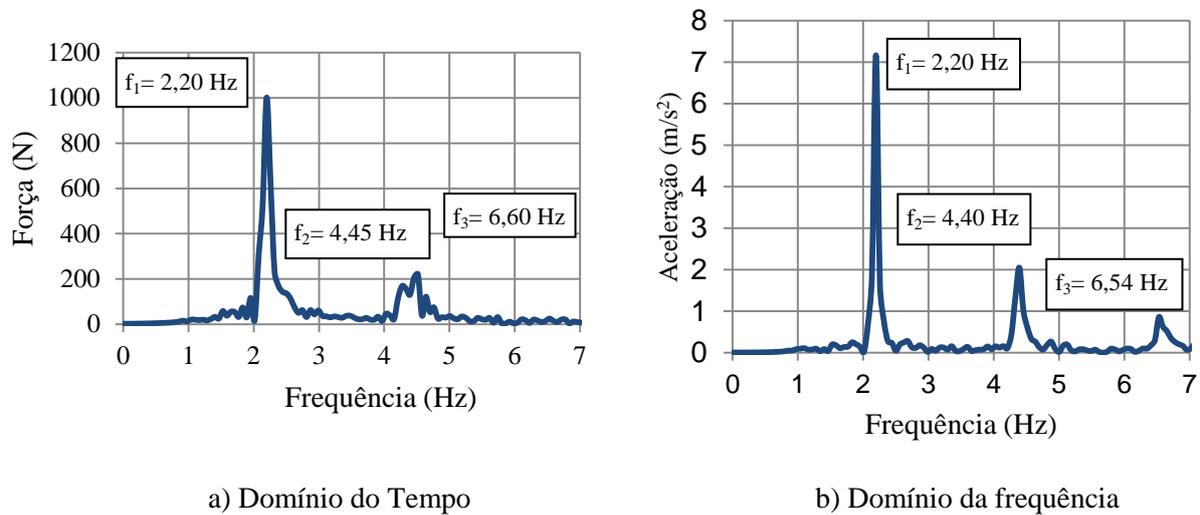


Figura 8. Domínio da frequência. Pessoa com 50,2 kg

4 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 40m x 40m, com área total de 1600 m², conforme ilustrado na Fig.9. A laje de concreto possui espessura de 10 cm 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 de 345 MPa. A laje de concreto possui resistência característica à compressão de 30 MPa e módulo de elasticidade secante (E_{cs}) de $26 \times 10^3 \text{ MPa}$.

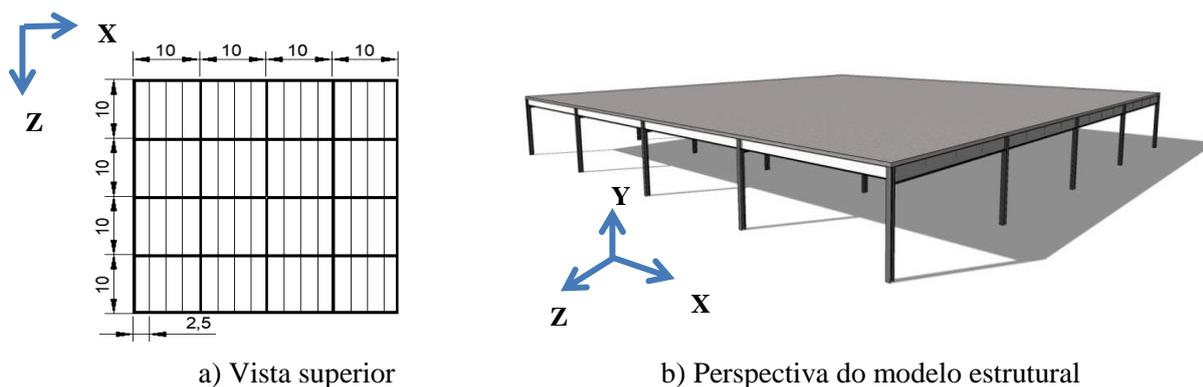


Figura 9. Modelo estrutural do piso misto (aço-concreto)

5 Modelo em Elementos Finitos

A modelagem numérica foi realizada utilizando-se o programa ANSYS [2], com base no emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF). O piso misto investigado é constituído por vigas, pilares e laje, de tal forma que as vigas e as colunas de aço dos modelos são simuladas por elementos finitos de viga tridimensionais BEAM44, enquanto a laje de concreto é simulada por meio de elementos finitos de casca SHELL63. As ligações viga-viga e viga-coluna foram modeladas pelo emprego do elemento COMBIN7 e COMBIN39, respectivamente. Finalmente, utilizou-se o elemento COMBIN40 simular as características dinâmicas do ser humano presentes no piso misto. A Fig.10 apresenta o modelo estrutural em elementos finitos.

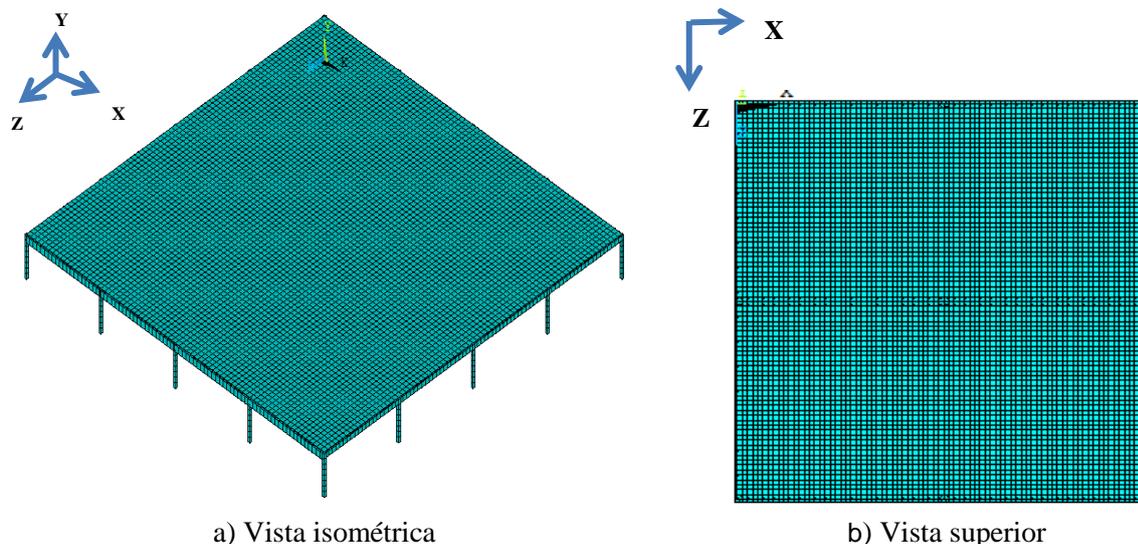


Figura 10. Modelo em elementos finitos

6 Frequências e Modos de Vibração

6.1 Piso misto (aço-concreto) vazio

As frequências e modos de vibração do piso misto vazio, foram determinados com base no emprego do programa computacional ANSYS [15]. As seis primeiras frequências naturais e seus respectivos valores de massa modal, rigidez modal e amortecimento modal, associado a cada modo de vibração, estão apresentados na Tabela 1. A Fig.11 apresenta os três primeiros modos de vibração do

modelo estrutural associado as suas respectivas frequências naturais.

Tabela 1. Características modais do piso misto investigado (aço-concreto)

Modo de vibração	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/m)	Amortecimento modal (Ns/m)	Frequência (Hz)	Fenômeno físico
f_{01}	118843	$1,72 \times 10^8$	$1,36 \times 10^8$	6,06	Flexão da laje em x
f_{02}	90966	$1,45 \times 10^8$	$1,09 \times 10^8$	6,36	Flexão da laje em x
f_{03}	72828	$1,19 \times 10^8$	$0,88 \times 10^8$	6,43	Flexão da laje em x
f_{04}	52442	$0,92 \times 10^8$	$0,66 \times 10^8$	6,65	Flexão da laje em x
f_{05}	65495	$1,24 \times 10^8$	$0,85 \times 10^8$	6,91	Flexão da laje em z
f_{06}	60044	$1,18 \times 10^8$	$0,80 \times 10^8$	7,05	Flexão da laje em z

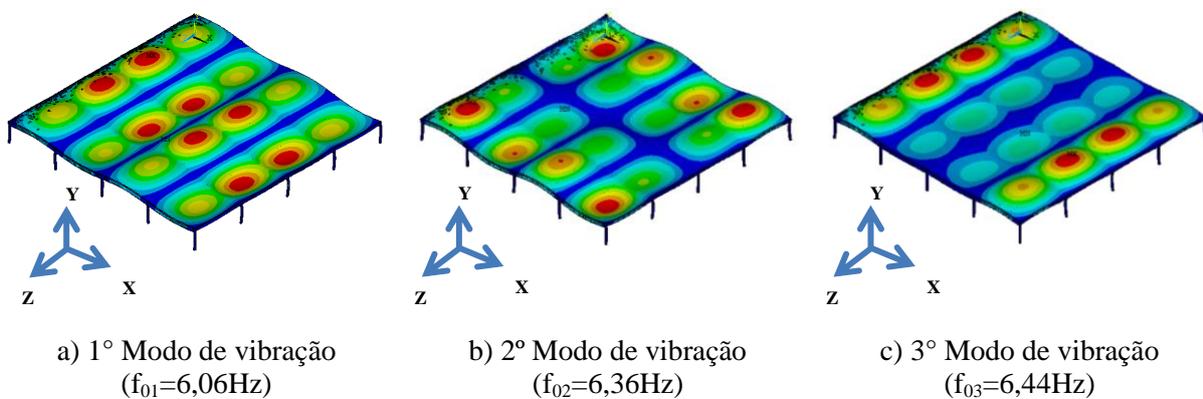


Figura 11. Modo de vibração do piso misto investigado

Com base na realização da análise modal numérica, Tabela 1, 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 [6] e Elis e Ji [11], 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.

Segundo as normas de critérios de projeto destinadas a atividades rítmicas praticadas sobre pisos, observa-se que a frequência fundamental do piso ($f_{01}=6,06\text{ Hz}$) está abaixo do valor mínimo recomendado pela NBR 8800 [18] (8 Hz) e NBR 6118 [19] (9,6 Hz). Esta situação remete a uma grande probabilidade de problemas relacionados a vibrações excessivas.

6.2 Piso misto (aço-concreto) ocupado

Conforme estudos desenvolvidos por diversos autores [10] [17] [20], observa-se que a presença do ser humano modifica as características dinâmicas do sistema estrutural, tais como massa, amortecimento, rigidez e frequência natural. Neste sentido, foram realizadas análises modais considerando a ocupação do piso misto sob duas situações de carregamento, a primeira é caracterizada por 16 pessoas sobre o piso misto, enquanto a segunda considera 128 pessoas, ambas as situações as pessoas encontram-se paradas e em pé, sendo posicionadas nos quatro painéis centrais (Fig.12). A Tabela 2 apresenta os valores das características dinâmicas do piso misto, no que diz respeito à avaliação da frequência fundamental da estrutura ocupada por pessoas paradas e em pé sobre a região delimitada pela Fig.12.



Figura 12. Posicionamento das pessoas sobre piso misto investigado

Tabela 2. Características modais do modelo estrutural ocupada: Frequência fundamental

Pessoas	Frequência (Hz)	Taxa de amortecimento (ξ (%))	Amortecimento modal(Ns/m)
0	6,060	1,2	$1,09 \times 10^7$
16	6,048	2,1	$1,86 \times 10^7$
128	5,933	13,2	$8,71 \times 10^7$

Com base nos resultados fornecidos pela Tabela 2, é possível verificar a modificação das características dinâmicas do piso misto, devido à ocupação do piso em estudo. Neste sentido, verificou-se uma redução pouco expressiva da frequência natural, da ordem de 3%, de modo que a frequência natural diminui conforme se aumentava a ocupação do piso misto (presença das pessoas), além do aumento do amortecimento de 1,2% (estrutura vazia) para 13,2% (estrutura ocupada por 128 pessoas). Tais valores demonstram a influência da presença humana sobre o sistema estrutural investigado, corroborando as conclusões apresentadas por alguns trabalhos de pesquisa [10] [17] [20].

As situações de carregamento foram definidas de modo a investigar a influência da variação do número de pessoas sobre a resposta estrutural. Deste modo, considerou-se 2 (duas) situações de carregamento, sendo simuladas 16 e 128 pessoas, conforme a ilustração apresentada na Fig.13.

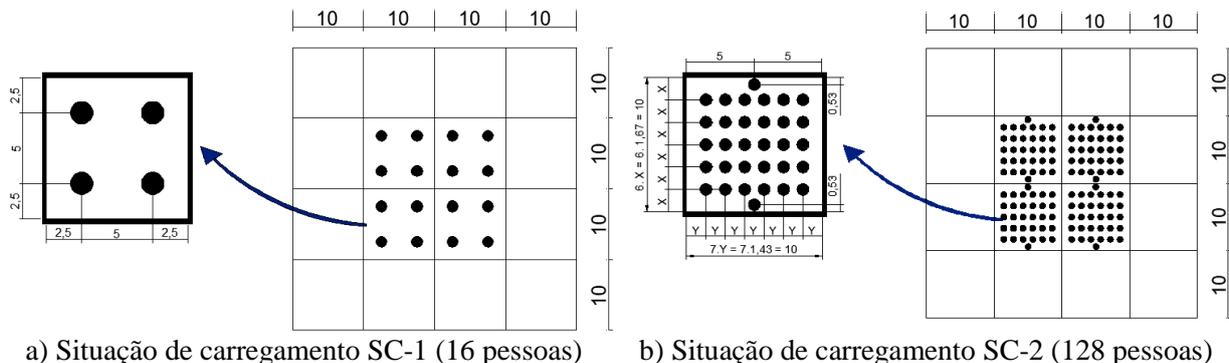


Figura 13. Situações de carregamento

6.3 Seções estruturais utilizadas para obtenção das respostas dinâmicas

As respostas dinâmicas do piso misto (aço-concreto) para as situações apresentadas pela Fig.13, foram determinadas nos pontos com as maiores amplitudes modais identificadas no 1º modo de vibração, associado à frequência fundamental da estrutura ($f_{01}=6,60$ Hz). Deste modo, 8 (oito) pontos de leitura foram definidos para a obtenção da resposta dinâmica, sendo ilustradas na Fig.14.

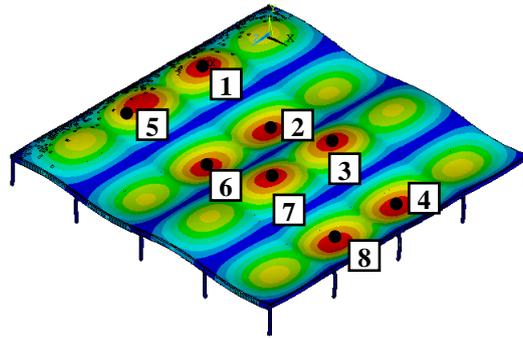


Figura 14. Posicionamento dos pontos avaliados para as respostas estruturais

6.4 Resposta dinâmica estrutural com base na aplicação dos sistemas biodinâmicos

As respostas dinâmicas do piso misto são apresentadas para 2 (duas) situações de carregamento investigadas (Fig.13) nos respectivos pontos de leitura de maior amplitude de resposta. As Figs. 15 e 16 apresentam as acelerações no domínio do tempo e frequência.

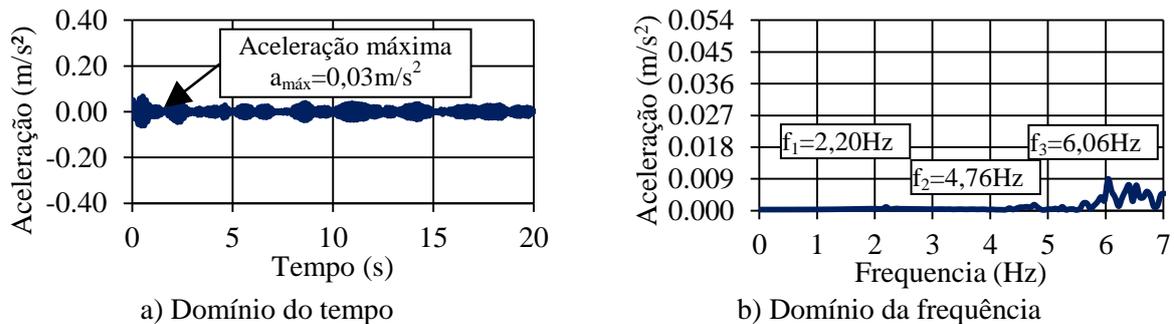


Figura 15. Aceleração no domínio do tempo: SC-1 (16 pessoas; ponto de análise 7)

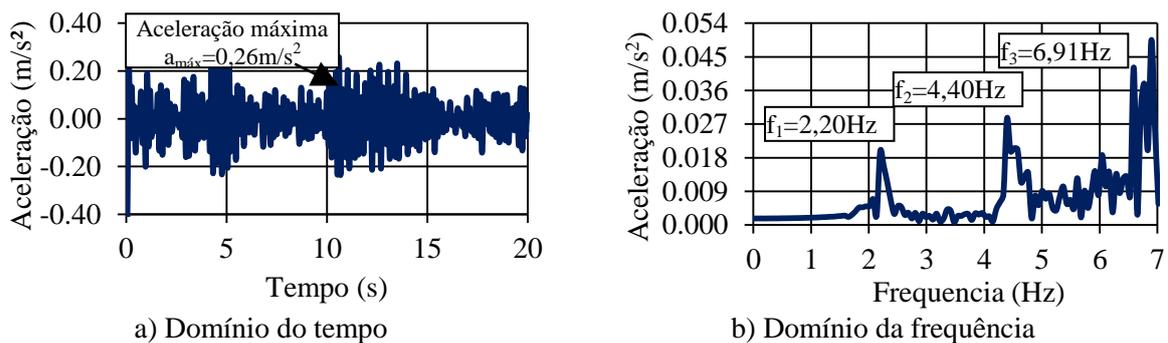


Figura 16. Aceleração no domínio do tempo: SC-2 (128 pessoas; ponto de análise 2)

Verificou-se que os valores das acelerações da estrutura, no domínio do tempo, aumentam à medida que ocorre um aumento na taxa de ocupação sobre o piso misto, demonstrando que o piso misto (aço-concreto) investigado apresenta um comportamento dinâmico esperado. Portanto, a aceleração da estrutura aumenta conforme o número de pessoas sobre a estrutura aumenta devido o efeito do sincronismo da atividade humana rítmica. Em relação à aceleração no domínio da frequência, constatou-se que as maiores transferências de energia do sistema foram verificadas no terceiro harmônico, nas frequências de 6,06 Hz, e 6,91Hz, referentes às frequências naturais da estrutura (Tabela 1), para as situações de carregamento SC-1e SC-2, respectivamente. Desta maneira, foram mobilizar modos de vibração, associados às frequências naturais da estrutura, portanto, a

modelagem dos sistemas biodinâmicos torna-se relevante, pois mobiliza modos de vibração próximos a faixa de ressonância da estrutura.

6.5 Análise dos resultados: sistemas biodinâmicos versus modelos de “força-dura”

As respostas dinâmicas obtidas, a partir da utilização da modelagem biodinâmica para uma análise comparativa, foram confrontadas com os resultados obtidos por dois diferentes modelos de carregamento dinâmico provenientes de funções matemáticas (modelos de "força dura"), o primeiro modelo foi desenvolvido por Faisca [6] e o segundo modelo foi proposto pelo SCI [14].

Na sequência, as Eqs. (3) e (4) representam a função matemática do carregamento dinâmico proveniente do modelo desenvolvido por Faisca [6] e SCI [14], respectivamente. As Tabelas 3 e 4 apresentam os parâmetros utilizados para os modelos de força-dura. Deste modo, realizou-se uma análise comparativa entre os três modelos através das Figs. 17 e 18.

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 m/s² (5% g), associado às atividades aeróbicas [21].

$$F(t) = CD \left\{ K_p P \left[0,5 \quad 0,5 \cos \left(\frac{2\pi}{T_c} t \right) \right] \right\} \quad \text{Para } t \leq T_c \quad (3)$$

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

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

$$F(t) = G \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} r_{n,v} \text{sen}(2n\pi f_p t + \phi_n) \right\} \quad (4)$$

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

Tabela 3. Parâmetros da função Hanning (Faisca [6])

Casos	Número de pessoas	P(N)	CD	T(s)	Tc (s)	Kp	P(N)	f_p (Hz)
SC-1	16	726	0.93	0.4545	0.34	2.78	726	2.20
SC-2	128		0.84					

Tabela 4. Parâmetros da Função matemática desenvolvida pelo SCI [14]

Casos	Número de pessoas (v)	G(N)	$R_{1,v}$	$R_{2,v}$	$R_{3,v}$	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	f_p (Hz)
SC-1	16	726	1.282	0.483	0.186	$\pi/6$	$-\pi/6$	$\pi/2$	2.20
SC-2	128		1.081	0.293	0.097				

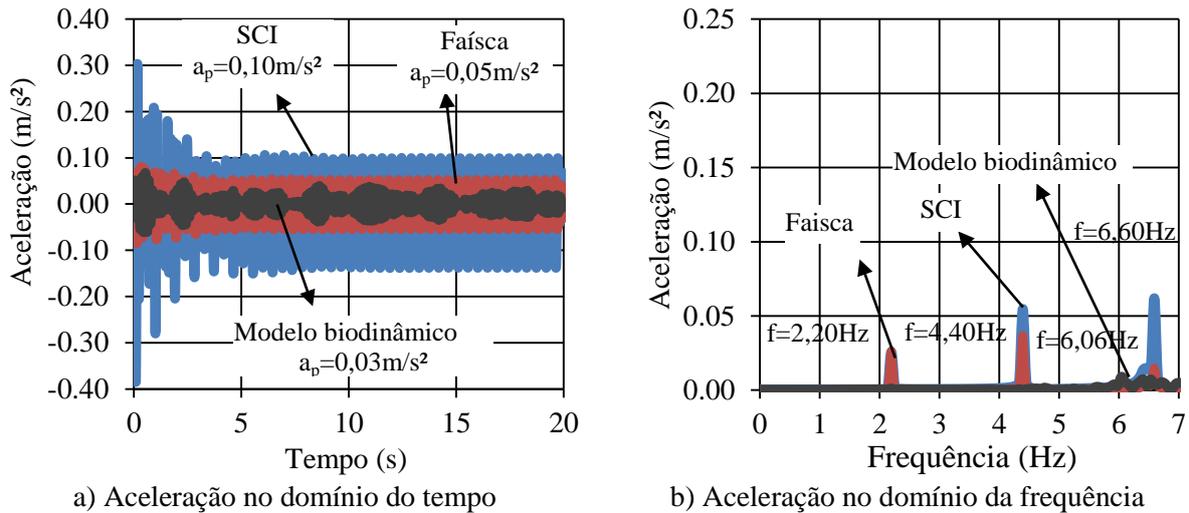


Figura 17. Comparativo da aceleração: SC-1 (ponto de análise 7)

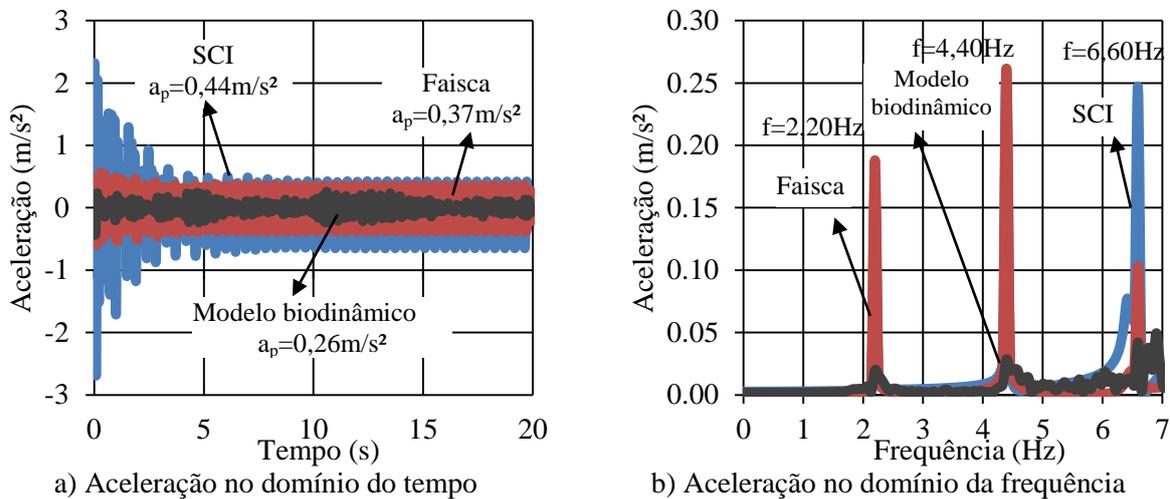


Figura 18. Comparativo da aceleração: SC-2 (ponto de análise 2)

Verificou-se influência dos seres humanos sobre a resposta estrutural, de tal modo que nota-se que o aumento da taxa de ocupação (presença humana) resulta no aumento dos valores de acelerações e deslocamentos do piso misto.

Além disso, é possível observar que a aceleração de pico calculada mediante o emprego dos sistemas biodinâmicos (efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura), corresponde a cerca de 70% do valor de aceleração máxima obtida, via emprego do modelo de carregamento proposto por Faísca [6], e da ordem de 60% do valor de pico obtido a partir do uso do modelo proposto pelo SCI [14].

Nas Figs 18 e 19, observa-se que os picos onde ocorrem as maiores transferências de energia do sistema nos modelos de carregamento correspondem aos três harmônicos da excitação dinâmica humana ($f_1=2,20\text{Hz}$; $f_2=4,40\text{Hz}$ e $f_3=6,60\text{Hz}$), com exceção para a modelagem biodinâmica no terceiro harmônico. Nesse aspecto, a situação de carregamento SC-1 apresentar o valor de 6,06 Hz no terceiro harmônico, associadas às frequências naturais do piso misto estudado.

Com base na Fig.19a, referente à situação SC-2 (128 pessoas), considerando o maior carregamento dinâmico estudado, é possível verificar que o piso misto investigado respeita o limite de conforto humano recomendado por Murray et al [21], tanto para a modelagem biodinâmica quanto para os modelos de força dura [6] [14].

7 Considerações Finais

Este trabalho investiga o comportamento estrutural dinâmico de um piso misto (aço-concreto), submetido às atividades aeróbicas. Para tal, sistemas biodinâmicos foram propostos para representar a modelagem das ações humanas rítmicas, considerando a interação indivíduo-estrutura através de sistemas do tipo massa-mola-amortecedor (SIGL), acoplados ao sistema estrutural, com base nos resultados obtidos nos ensaios experimentais. As características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos foram determinadas através do processo numérico de otimização, via Algoritmos Genéticos (AG), com base nos valores de força e aceleração obtidas através da realização dos testes experimentais.

A frequência fundamental do piso misto ($f_{01}=6,06\text{Hz}$) encontra-se abaixo do valor estabelecido pela norma brasileira NBR 6118 [19]. Deste modo, verificou-se a suscetibilidade do piso misto (aço-concreto) a problemas relacionados a vibrações excessivas.

Considerando-se a utilização de modelos biodinâmicos para representar os indivíduos parados e em pé sobre a laje de concreto, destaca-se que o valor da frequência fundamental do piso misto diminui na medida em que cresce a ocupação do piso misto (presença das pessoas), na ordem de 3%, para a situação limite em que 128 pessoas encontram-se sobre a laje de concreto. Por outro lado, a taxa de amortecimento estrutural do sistema aumentou de 1,2% (piso descarregado) para 13,2% (piso carregado: 128 pessoas), demonstrando a importância do efeito do amortecimento das pessoas para avaliações de conforto humano.

Em relação à análise transiente realizada através da modelagem biodinâmica, o valor máximo de aceleração foi obtido quando a laje de concreto foi $0,26\text{ m/s}^2$, ocupada por 128 pessoas (SC-2). Neste contexto, o valor mínimo foi encontrado para a situação de carregamento com 16 pessoas (situação de carregamento SC-1). Deste modo, verificou-se que o piso misto (aço-concreto) estudado apresenta um comportamento esperado, pois os valores das acelerações da estrutura aumentam à medida que ocorre um aumento na taxa de ocupação sobre o piso misto. Além disso, o máximo valor de aceleração encontrado ($a_p=0,26\text{ m/s}^2$), respeita o limite de conforto humano recomendado por Murray et al [21].

A resposta estrutural dinâmica do piso misto, mediante o emprego da modelagem dos sistemas biodinâmicos representativos das pessoas, foi calculada e comparada com aquela fornecida com base no uso de modelos matemáticos tradicionais de força dura [6] [14]. Consequentemente, observou-se que os sistemas biodinâmicos fornecem valores de aceleração de pico menos conservativos, tendo em mente o efeito do amortecimento inerente à presença das pessoas sobre o piso misto (aço-concreto).

A resposta estrutural dinâmico do piso misto, com base na realização de testes experimentais para obtenção dos parâmetros dos sistemas biodinâmicos, apresenta uma tendência importante para uma representação mais realista acerca da ação dinâmica humana rítmica evidentemente, com benefícios significativos para estudos de conforto humano, em função de uma redução dos valores da aceleração. A modelagem biodinâmica considera inerente às pessoas e que a modelagem biodinâmica incorpora, naturalmente, as diferenças de fase entre as pessoas, consequentemente influenciando na redução dos valores de aceleração e também sobre a avaliação dos estudos do conforto humano. Nesse aspecto, verifica-se que a consideração das ações dinâmicas humanas através de modelos de carregamento que não incorporam o efeito da interação dinâmica indivíduos-estrutura [6] [14], portanto fornecem valores de acelerações de pico conservativos, em níveis mais elevados em termos quantitativos, o que pode levar a concepção de projetos estruturais antieconômicos.

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

[1] J. Rodrigues and P. Almeida. Modeling of action induced by crowds on brazilian football stadium. Conference: IMAC XXIV—Conference & Exposition on Structural Dynamics, 2006.

- [2] S. Nhleko; M. Williams ; A. blakeborough. Vibration perception and comfort levels for an audience occupying a grandstand with perceivable motion. 27th International Modal Analysis Conference (IMAC XXVII),2009.
- [3] J.G.S da Silva ; P. D. S Vellasco; S. de Andrade,.; L. de Lima, L.; F.Figueiredo. Vibration analysis of footbridges due to vertical human loads. *Computers & Structures*, 85, 1693-1703,2007.
- [4] Avaliado em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2019/02/21/predio-eevacuado-no-abc-apos-50-funcionarios-pularem-ao-mesmo-tempo-durante-palestramotivacional.html>. Acessado 18 de março de 2019.
- [5] M. Setareh. Evaluation and assessment of vibrations owing to human activity. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures and Buildings* 165 (5): 219-231,2002.
- [6] R.G. Faisca. Caracterização de Cargas Dinâmicas Geradas por Atividades Humanas,. Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [7] W.Varela ; R. C. Battista. Control of vibrations induced by people walking on large span composite floor decks. *Engineering Structures* 33 (9): 2485-2494,2011.
- [8] K. A. Salyards and Y. Hua. Assessment of dynamic properties of a crowd model for human-structure interaction modelling. *Engineering Structures* 89: 103-110,2015.
- [9] W. He. Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Standing People on Dynamic Properties of a Beam-Like Bridge. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2017, 14 p,2017.
- [10] E. Shahabpoor.. Effect of group walking traffic on dynamic properties of pedestrian structures, *J. Sound Vibration*,2017.
- [11]B.R. Ellis, T. Ji. Loads generated by jumping crowds: Numerical modeling. *Structural Engineer*, v. 82, n. 17, p. 35–40,2004.
- [12] F. F. Campista. Modelagem de sistemas biodinâmicos para avaliação do comportamento estrutural dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) de edifícios submetidos a atividades humanas rítmicas. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2019.
- [13] Matlab. Versão R2017a. MathWorks,2007.
- [14] A.L. Smith; S.J. Hicks; P.J Devine. “Design of floors for vibrations: A new approach”, *SCI Publication P354*, Ascot, 2009.
- [15] Ansys Swanson Analysis Systems, Products ANSYS Academic Research, Using FLEXlm v10.8.0.7 build 26147, Customer 00489194,2007.
- [16] Q. An, Q. Dynamic performance characteristics of an innovative Cable Supported Beam Structure–Concrete Slab Composite Floor System under human-induced loads. *Engineering Structures*, v. 117, p. 40–57,2016.
- [17] K. A. Salyards and N. C. Noss. Experimental evaluation of the influence of human-structure interaction for vibration serviceability. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, p 458-465,2014.
- [18] Nbr 8800Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, 2008.
- [19] Nbr 6118. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento,2014.
- [20] B. R Ellis and T. Ji. Human-structure interaction in vertical vibrations. *Structures and Buildings* 122, pp. 1-9,1997.
- [21] T.M. Murray, D.E. Allen., E.E. Floor Vibrations due to Human Activity”, *Steel Design Guide Series*. American Institute of Steel Construction, AISC, Chicago, USA,2003.