

HUMAN-INDUCED VIBRATIONS OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE FLOORS SUBJECTED TO HUMAN RHYTHMIC LOADS

Felipe Almeida de Sousa

Fernanda Fernandes Campista

Danielle Fernandes Campista

felipesousa@id.uff.br

fernandafcampista@yahoo.com.br

danicampista@yahoo.com.br

Civil Engineering Postgraduate Programme, PGENIV/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 increasing incidence of building vibration problems due to rhythmic activities led to need of a specific design criterion for rhythmic excitations. This was the main motivation for the development of a design methodology centred on the structural system dynamical response submitted to dynamic loads due to human rhythmic activities. This way, this paper investigated the dynamic structural behaviour of steel-concrete composite floors subjected to the human rhythmic activities, when the human comfort is considered, incorporating the effect of the people-structure dynamic interaction, based on the use of biodynamic models representative of the individuals. The dynamic loads were obtained through experimental tests with individual carrying out rhythmic activities. The proposed analysis methodology adopted the usual mesh refinement techniques present in the finite element method (FEM) simulation implemented in the ANSYS program. The investigated structural system was used based on a health club facility with an adjacent aerobics area. The floor system consists of long span joist supported by concrete block walls. The floor effective weight was estimated including people practicing aerobics and also sitting in the health club internal area. The floor effective weight was estimated to be equal to 3.6 kPa, including 0.6 kPa for people activities. The effective composite moment of inertia of the joists was selected based on its required strength, i.e.: $1.1 \times 10^6 \text{ mm}^4$. The peak acceleration values were compared to limits proposed by design codes, based on human comfort and those values were not satisfied. Such fact has indicated that these rhythmic activities could generate peak accelerations that surpass design criteria limits developed for ensuring human comfort.

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

1 Introdução

No Brasil, edificações sofrem constantemente alterações quanto à utilização das mesmas, pois embora as edificações atendam aos critérios de estados limites últimos, uma análise de estado limite de serviço é indispensável para evitar uma série de problemas relacionados à dinâmica das estruturas. Essa análise é primordial para determinar se a estrutura pode ser utilizada para aquela atividade específica sem causar desconforto humano.

De acordo com Campista [1], grande parte das estruturas apresenta uma frequência natural no intervalo de 4 a 8 Hz, um dos harmônicos relacionados às atividades humanas rítmicas provoca uma frequência de excitação dentro desse período. Em função disso, a estrutura estará suscetível ao fenômeno de ressonância, pois existe uma coincidência entre a frequência natural da estrutura e a de excitação. Em decorrência disso, problemas de vibrações excessivas podem acontecer gerando desconfortos aos usuários.

Com base na importância da prevenção de vibrações excessivas em estruturas serão empregadas diferentes metodologias para simulação do efeito de carregamento dinâmico na estrutura: a primeira consiste no modelo de carregamento Faisca [2] e SCI [3], ambas formuladas matematicamente e desenvolvidas com base em testes experimentais, e associadas ao tradicional modelo de força-dura. A segunda consiste no modelo analítico proposto pelo AISC [4] e finalmente, o terceiro, no modelo biodinâmico com um grau de liberdade proposto por Campista [1], associado aos parâmetros de massa, amortecimento e rigidez dos indivíduos.

Deste modo, este trabalho de pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento dinâmico de um piso de estrutura mista (aço-concreto), com dimensões 14 m x 22,5 m e área total de 315 m², sujeitos às ações rítmicas (ginástica aeróbica) provocadas por pessoas. A resposta estrutural dinâmica do piso é calculada em função dos valores das acelerações de pico, RMS e valores de dose de vibrações VDV, via análise dinâmica da estrutura, com base no emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF), via uso do programa ANSYS [5].

Neste estudo foram investigados três modelos de carregamento distintos: Faisca [2], SCI [3] e Campista [1]. Ressalta-se que ao avaliar as respostas dinâmicas geradas por cada modelo de carregamento analisado foi constatado que estes modelos de carregamentos de Faisca [2], SCI [3] e Campista [1], produziram respostas dinâmicas elevadas, gerando níveis de aceleração inaceitáveis para o conforto humano do piso, indicando que os critérios de conforto humano não são atendidos.

2 Modelos de carregamento

2.1 Modelo de carregamento proposto por Faisca [2]

A simulação de carregamento dinâmico proposto por Faisca [2], foi desenvolvida a partir de testes experimentais, onde o carregamento foi aplicado diretamente na estrutura (modelo de força-dura). O modelo consiste numa formulação matemática, onde os resultados indicaram que a função matemática *Hanning*, foi a mais adequada para descrever o modelo de atividades dinâmicas de salto à vontade e ginástica aeróbica, Eq. (1). A Tabela 1 apresenta os parâmetros de entrada da função *Hanning* para ações dinâmicas rítmicas. Cabe ressaltar que este trabalho foi desenvolvido baseado numa frequência de excitação de 2,20 Hz e que as ações dinâmicas do tipo aeróbicas são definidas de acordo com os parâmetros da função *Hanning*.

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

Na Eq. (1), $F(t)$ representa a ação dinâmica (N), CD o coeficiente de defasagem, K_p o coeficiente de impacto, P o peso da pessoa (N), T o período da atividade (s), T_c o período de contato (s) e t o tempo (s).

Tabela 1. Parâmetros da função Hanning Faisca [2].

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

2.2 Modelo de carregamento proposto pelo Steel Construction Institute SCI [3]

O método de simulação de carregamento proposto por Ellis e Ji [6] apud SCI [3], foi desenvolvido por meio de testes experimentais, onde se avaliou o comportamento dinâmico de atividades humanas rítmicas sobre a estrutura (modelo de força-dura) em grupos com até sessenta e quatro pessoas. Baseado nesta série de dados experimentais elaborou-se a função matemática apresentada na Eq. (2), que é empregada para simulação do carregamento humano rítmico, essa função depende dos três primeiros termos da série de Fourier, conforme mostra as Eqs. (3) a (5).

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

Sendo F a representação matemática do carregamento no tempo, G o peso de uma pessoa (N), $r_{n,v}$ os coeficientes da série de Fourier induzida por v pessoas, n o número de termos de Fourier, ϕ_n a diferença de fase, f_p a frequência do carregamento e t o tempo (s).

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

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

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

2.3 Modelo de carregamento proposto pelo American Institute of Steel Construction AISC [4]

O guia de projeto AISC [4] apresenta equações e os parâmetros necessários para a determinação dos picos de aceleração das estruturas, quando a estrutura está sujeita a ações rítmicas. A partir dos resultados analíticos é possível avaliar o nível de conforto humano para uma atividade específica. O pico de aceleração é determinado pela Eq. (6). Em casos onde há mais de um harmônico aplica-se a série de *power-rule* Allen [7], objetivando de realizar uma combinação entre os harmônicos conforme a Eq. (7).

$$\frac{a_{p,i}}{g} = \frac{1,3\alpha_i w_p/w_t}{\sqrt{\left(\left(\frac{f_n}{f_{step}}\right)^2 - 1\right)^2 + \left(\frac{2\beta f_n}{f_{step}}\right)^2}} \quad (6)$$

Sendo f_n a frequência natural, f_{step} a frequência de excitação, i o número do harmônico 1, 2 ou 3, α_i o coeficiente dinâmico, β o amortecimento, w_p o peso do par ou do indivíduo na área de contribuição da respectiva atividade e w_t o peso total do sistema.

$$\frac{a_p}{g} = \frac{\sum (1,3a_{p,i}^{1,5})^{1/1,5}}{g} \leq \frac{a_o}{g} \quad (7)$$

No que tange a este trabalho, foi investigado o modelo estrutural apresentado no exemplo 5.1 do AISC [4], com propriedades de momento de inércia da seção transformada equivale a $1.1 \times 10^6 \text{ mm}^4$, e o peso total do piso misto foi de 3,6 kPa. A análise concentra-se nas respostas fornecidas quanto à alteração na funcionalidade do piso para atividade aeróbica.

3 Modelo biodinâmico proposto por Campista [1]

O modelo de biodinâmico é composto por um sistema “massa-mola-amortecedor” e pode ser empregado para descrever a interação do homem com a estrutura e funcionando como uma alternativa aos modelos de força-dura.

O modelo biodinâmico consiste numa representação mais fidedigna do comportamento humano nas estruturas, tendo em vista que o acoplamento do modelo biodinâmico de indivíduos interfere diretamente no comportamento dinâmico estrutural, segundo: Sim et al. [8], Littler [9], Barker e Mackenzie [10] e Campista [1]. O modelo biodinâmico desenvolvido por Campista [1], consiste num sistema com um grau de liberdade (1SGL), tal qual se aplica neste trabalho. A Figura 1, apresenta a disposição genérica dos indivíduos ao longo da seção longitudinal do piso misto (aço-concreto) estudado.

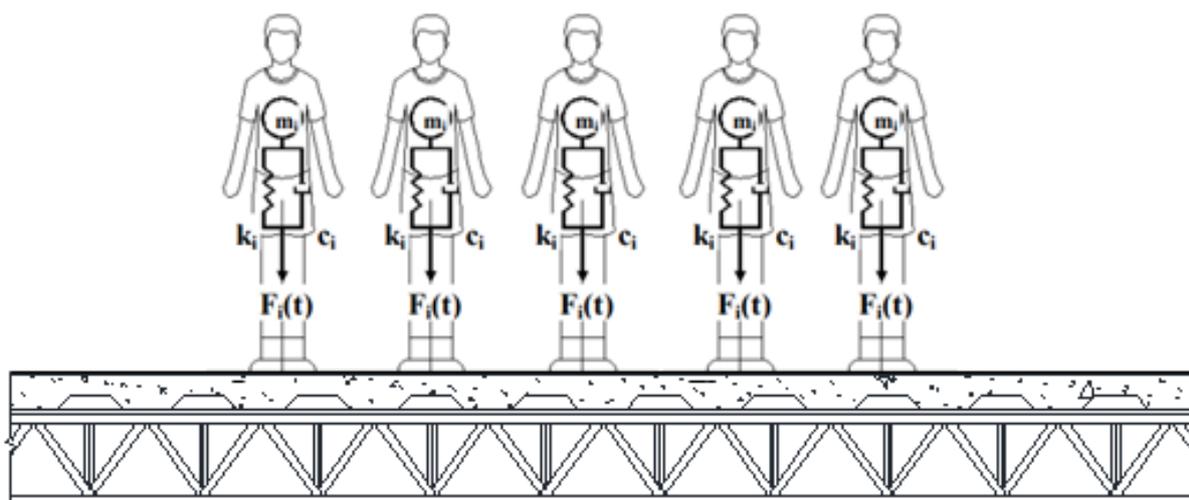


Figura 1. Modelo biodinâmico com 1GL (S1GL)

O modelo desenvolvido por Campista [1], foi baseado numa série com cem testes experimentais com indivíduos exercendo atividade humana rítmica sobre uma plataforma. As características dinâmicas dos indivíduos foram estudadas com base na resolução de um problema de otimização, por meio do método do algoritmo genérico. Com o objetivo de resolver a Eq. (8) de equilíbrio dinâmico foram utilizados os dados obtidos experimentalmente em laboratório (deslocamento, velocidade e aceleração).

$$F_i(t) = k_i x_i(t) + c_i v_i(t) + m_i a_i(t) \quad (8)$$

$$k_i = 4\pi^2 f_i^2 m_i \quad (9)$$

$$c_i = 4\pi m_i \xi f_i \quad (10)$$

Sendo $F_i(t)$ a força produzida pelo indivíduo i (N), k_i a rigidez do indivíduo i (N/m), m_i a massa do indivíduo i (kg), c_i o amortecimento do indivíduo i (Ns/m), $x_i(t)$ o deslocamento do indivíduo i ao longo do tempo (m), $v_i(t)$ a velocidade do indivíduo i ao longo do tempo (m/s), $a_i(t)$ aceleração do indivíduo i ao longo do tempo (m/s^2), f_i frequência indivíduo i (Hz) e ξ taxa de amortecimento igual a 0,25. Os dados experimentais foram validados juntamente com o modelo numérico, isso indica que o modelo biodinâmico pode ser empregado na representação do carregamento dinâmico Campista [1].

4 Modelo estrutural investigado

4.1 Descrição do modelo estrutural

O modelo estrutural investigado corresponde a um piso de estrutura mista (aço-concreto), com dimensões 14 m x 22,5 m e área total de 315 m². O piso em questão refere-se ao apresentado no exemplo 5.1 do guia de projeto AISC [4]. O piso a ser investigado será dividido em uma região destinada à academia de ginástica aeróbica e regiões adjacentes por área integrante da academia.

A estrutura metálica é composta por vigas treliçadas (joist) do tipo 30K8 apoiada diretamente nas paredes estrutural de concreto e uma chapa metálica para conter o concreto capeado. A nomenclatura 30K8, refere-se a uma classe 'K' de viga treliçada (joist), 30 é a altura em polegadas que equivale a 0,762 m. Por fim, o número 8 diz respeito às divisões das partes da viga treliçada. O carregamento por metro linear foi de 24,7 N/m ao longo dos 14 m, sobre uma laje de concreto com espessura de 52,50 mm Almeida [11].

As seções das vigas treliçadas (joist) foram obtidas com base nas tabelas de carga do SJI [12], seguindo as recomendações de projeto de uma viga (joist), resultando num perfil cujas propriedades são: área efetiva 1224 mm², inércia 176,93x10⁶mm⁴ e profundidade efetiva 736 mm, conforme esquematizado na Figura 2.

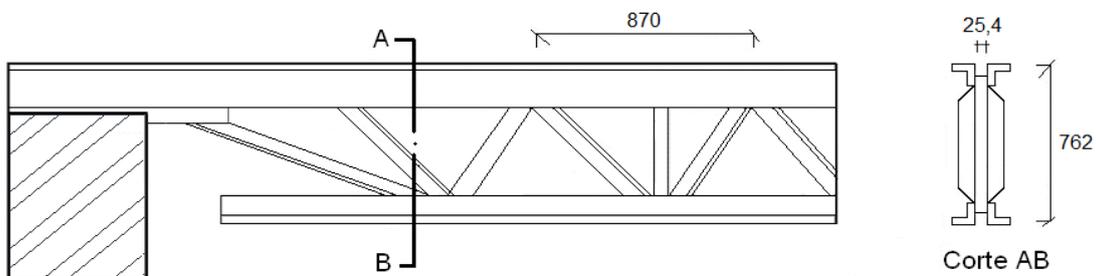


Figura 2. Esquemática e detalhamento da viga (joist) 30K8, em mm [11]

Os demais elementos que compõem a viga foram: montante e diagonal, representados pelas cantoneiras do tipo L com dimensões 12,70 x 3,18 mm. Os banzos são compostos pelas cantoneiras duplas com dimensões: 2X (50 x 3,18 mm) e 2X (38,10 x 3,18 mm) para o superior e o inferior, respectivamente, sendo o mesmo observado na Figura 3.

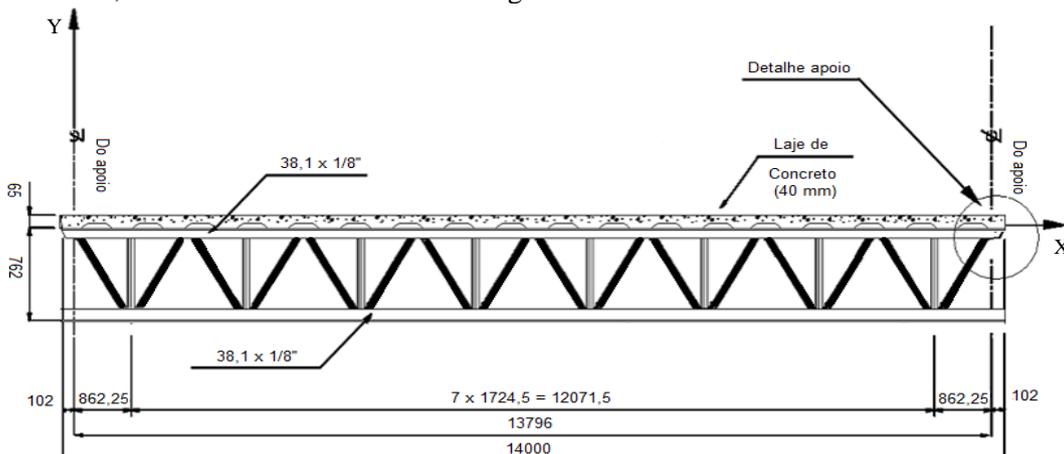


Figura 3. Corte transversal do piso misto (aço-concreto), em mm [11]

No que diz respeito às propriedades físicas empregadas no modelo estrutural para o concreto, foram: 30 MPa para a resistência característica à compressão (f_{ck}), e 26x10³ MPa para o módulo de elasticidade secante (E_{cs}). Enquanto o perfil metálico de viga teve as seguintes características: 205 GPa para o módulo de elasticidade, 345 MPa de tensão admissível e 450 MPa para o limite de resistência. O amortecimento da estrutura de 1%, conforme recomendações de projeto do SCI [3].

4.2 Distribuição do carregamento dinâmico

A simulação do modelo de carregamento dinâmico de ginástica aeróbica na estrutura baseou-se nas metodologias de Faisca [2], SCI [3] e Campista [1]. No presente trabalho foram dispostas vinte pessoas na área destinadas a academia de ginástica aeróbica, com dimensões 7,0 x 7,5m, conforme apresenta a Figura 4. O carregamento dinâmico de intensidade 798 N, referente a 79,8 kg de massa do indivíduo e uma frequência de excitação de 2,20 Hz, foi aplicado no centro de uma área ocupada por cada indivíduo, cujas dimensões são de 1,5m x 1,75m, proveniente de uma divisão uniforme da academia em vinte partes. Neste sentido, foram aplicados vinte carregamentos no piso em estudo.

Com o intuito de realizar a análise das respostas dinâmicas (deslocamento, velocidade e aceleração) do modelo em estudo foram listadas algumas seções na estrutura representadas por letras de 'A até E', conforme apresentado na Figura 4. As coordenadas dessas seções no plano XZ são: A(11,25;3,5); B(22,5;7,0); C(0,0;7,0); D(11,25;14); E(11,25; 7,0).

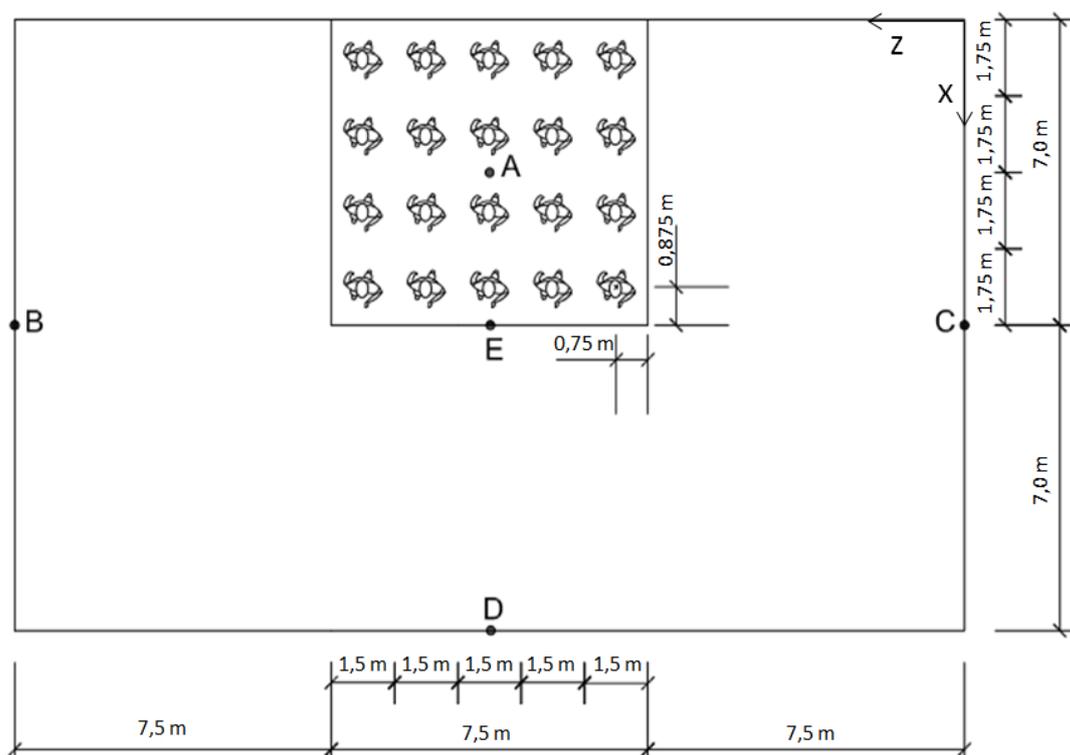


Figura 4. Disposição dos indivíduos e representação das seções

5 Modelagem numérica em elementos finitos

A modelagem numérica baseou-se no método dos elementos finitos, por meio do software ANSYS [5], onde o elemento finito beam44 foi utilizado para representar as vigas metálicas treliçadas (joists), e o elemento finito de casca shell63 para as lajes de concreto.

Os componentes de viga banzos superiores, banzos inferiores, montante e travamentos foram discretizadas da seguinte forma: cada banzo com segmento de 88 cm, ou seja, tendo quatro elementos discretizados com 21,9 cm cada; os montantes foram dispostos com comprimentos de 75,6 cm, representado por três elementos de 25 cm cada; travamento horizontal com comprimento de 125 cm, o que corresponde a cinco elementos de 25 cm cada. Na discretização da viga treliçada (joist) foram utilizados 5577 elementos Almeida [11].

A laje foi modelada com base no emprego de elementos de placa com dimensões de 0,22 x 0,25 m cada, onde os nós dos elementos estiveram em concordância com o do modelo proposto. A Figura 5 apresenta uma vista isométrica do modelo desenvolvido no ANSYS [5].

y

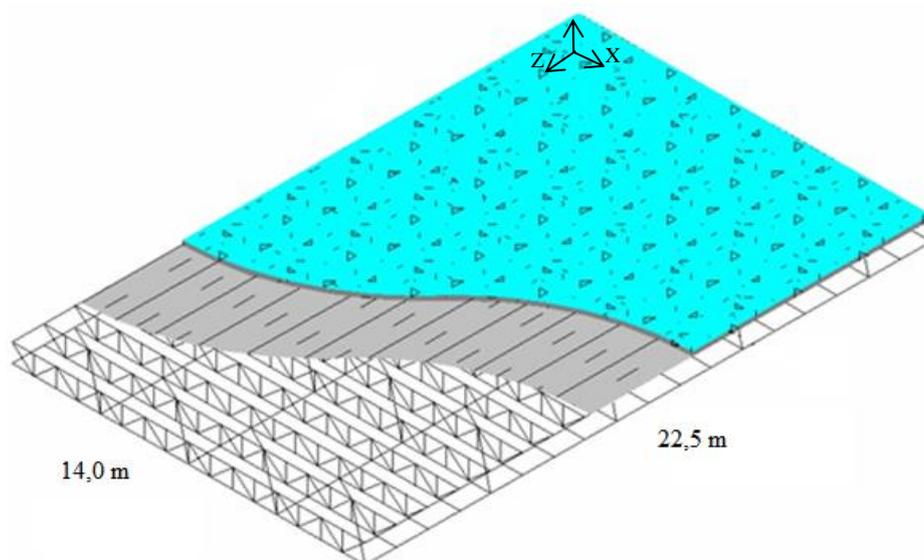


Figura 5. Modelo em elementos finitos [11]

6 Análise de autovalores e autovetores

A análise modal realizada no piso misto (aço-concreto) estudado, tem como objetivo determinar as frequências naturais (autovalores) e seus respectivos modos de vibração (autovetores). O resultado analítico da frequência fundamental proposto pelo AISC [4] é de 5,57 Hz, ao passo que o resultado numérico obtido no ANSYS [5], é de $f_{01} = 5,60$ Hz. Com isso, pode-se confirmar uma validação do modelo proposto.

A Tabela 2 apresenta as sete primeiras frequências relacionadas à flexão vertical da estrutura, observa-se que as mesmas se encontram numa faixa de frequência de 5,60 Hz até 7,73 Hz. Cabe ressaltar que a $f_{01} = 5,60$ Hz, situa-se numa faixa de frequência coincidente com a do intervalo de frequência de excitação do terceiro harmônico proposto por Faisca [2] e Elis & Ji [6], cujas faixas são de: 5,66 a 8,57 Hz e de 4,5 a 8,4 Hz, respectivamente, ou seja, a estrutura apresenta uma suscetibilidade ao fenômeno de ressonância.

Tabela 2. Frequências naturais do modelo estrutural investigado

Modos de vibração	Frequências naturais (Hz)
f_{01}	5,60
f_{02}	5,65
f_{03}	5,77
f_{04}	6,01
f_{05}	6,40
f_{06}	6,97
f_{07}	7,73

De acordo com a NBR [13] e Murray et al. [14], a mínima de frequência natural requerida para estruturas com fins aeróbicos, é na ordem de $f_{\min} = 8$ Hz e $f_{\min} = 9,2$ Hz, respectivamente. Portanto a frequência fundamental $f_{01} = 5,60$ Hz, não atende aos limites estabelecidos. Em função disso, pode-se afirmar que a estrutura apresenta vulnerabilidade a vibrações excessivas. A Figura 6 apresenta a ilustração dos quatros primeiros modos de vibração do modelo estrutural que podem vir a ser excitados quando submetidas às ações de carregamento dinâmico.

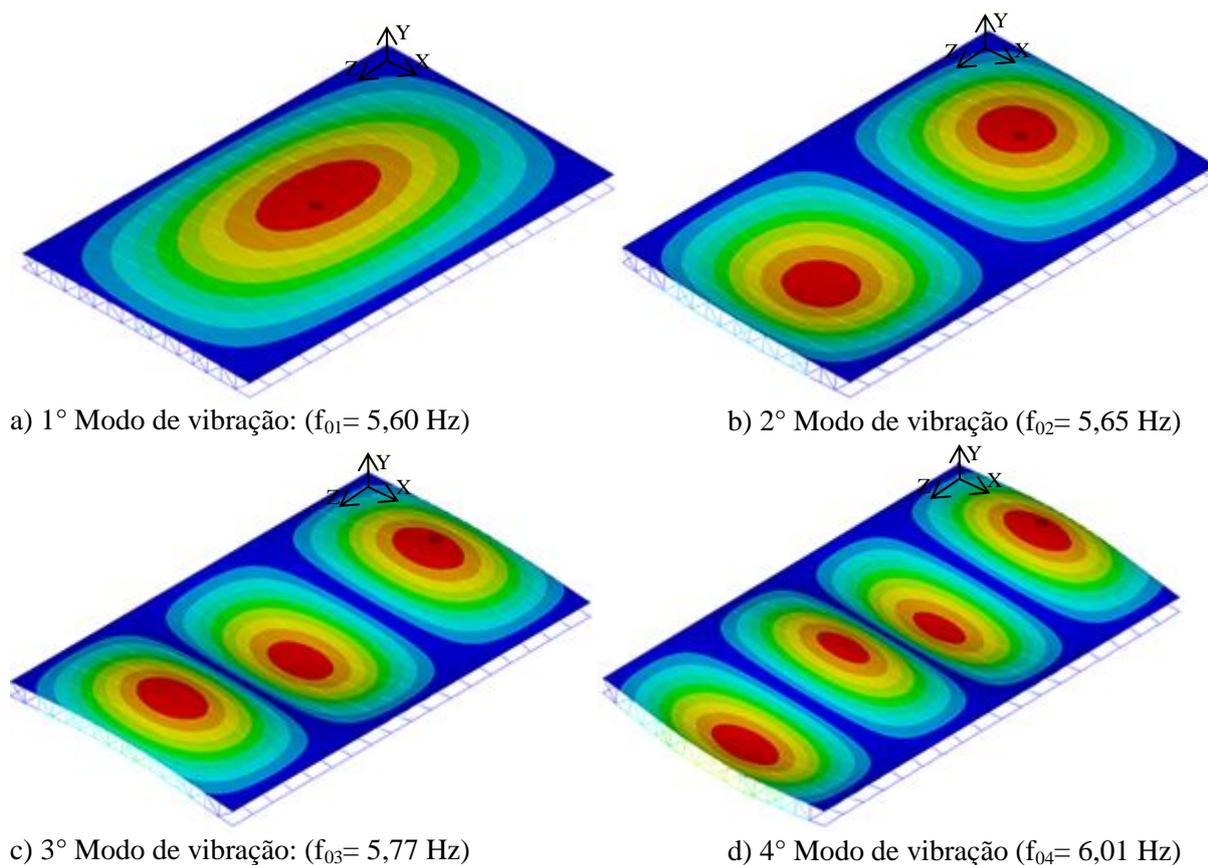


Figura 6. Modos de vibração do modelo estrutural investigado

7 Análise de vibração forçada

A solução analítica do piso misto (aço-concreto) com base nas equações propostas pelo guia de projeto AISC [4], indica que, quando a frequência de excitação equivale a 2,20 Hz, as acelerações de pico correspondem a 4,26%g [g: aceleração da gravidade]. Esse resultado encontra-se dentro do limite tolerável para aceleração de pico de 4 a 7 [%g]. De acordo com AISC [4], o piso em questão apresenta uma frequência natural de 5,57 Hz, portanto cabe ressaltar que os valores mais críticos de aceleração seriam observados quando a frequência de excitação de um dos harmônicos de atividade humana rítmica (aeróbica) aproxima-se da frequência natural da estrutura, onde tal situação é observada para o segundo harmônico de 4 a 5,5 Hz.

Os modelos de carregamento Faísca [2], SCI [3] e Campista [1], foram simulados com base na disposição de vinte pessoas, exercendo atividades aeróbicas sobre o piso conforme apresentado na Figura 4. Com o intuito de avaliar o nível de conforto humano, realizou-se o estudo paramétrico com uma frequência de excitação de 2,20 Hz, aplicada em cada modelo proposto. O intervalo de 2 a 2,75 Hz de acordo com AISC [4], corresponde à frequência de excitação do primeiro harmônico para atividades aeróbicas.

O nível de conforto humano foi verificado na etapa de resposta permanente (*steady-state*). As variáveis de resposta obtidas foram: aceleração de pico (a_p), acelerações filtradas RMS, ($a_{w,rms}$) e dos valores de dose de vibração, VDV. Esses resultados foram essenciais para classificação quanto ao nível de conforto humano sugerido por Ellis & Littler [15]; Murray et al. [14]; SCI [3]; Setareh [16], conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Critérios de conforto humano para atividades humanas rítmicas

SCI [3]	Ellis & Littler [15]	Setareh [16]	Reação das pessoas
$a_{w,rms}$ (m/s ²)	VDV (m/s ^{1,75})	VDV (m/s ^{1,75})	
< 0,35	< 0,66	< 0,50	Limite aceitável
0,35 – 1,27	0,66 – 2,38	0,50 – 3,50	Perturbador
1,27 – 2,47	2,38 – 4,64	3,50 – 6,90	Inaceitável
> 2,47	> 4,64	> 6,90	Pânico

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

A Tabela 4 a 7 apresenta os resultados das respostas dinâmicas de [deslocamentos, acelerações de pico, acelerações RMS e VDV] do piso misto (aço-concreto) para cada modelo estudado. Esses parâmetros são essenciais para a avaliação do nível de conforto humano. Em função disso, foram observadas seções na estrutura denominadas com as letras A até E, conforme apresentado na Figura 4.

Tabela 4. Deslocamento vertical máximo nas seções (mm)

Modelo de carregamento	A	B	C	D	E
BIODINÂMICO [1]	0,86	0,31	0,27	0,03	1,13
FAISCA [2]	3,19	0,15	0,15	0,11	3,78
SCI [3]	5,14	0,81	0,81	0,20	6,38

Tabela 5. Aceleração vertical de pico máxima nas seções (m/s²)

Modelo de carregamento	A	B	C	D	E
BIODINÂMICO [1]	0,55	0,55	0,46	0,03	0,65
FAISCA [2]	0,89	0,24	0,24	0,05	1,24
SCI [3]	3,25	1,27	1,26	0,19	4,87
AISC [4]	$f_{step} = 2,20$ Hz - $a_p = 4,26\%$ g				

Tabela 6. Aceleração vertical máxima RMS nas seções (m/s²)

Modelo de carregamento	A	B	C	D	E
BIODINÂMICO [1]	0,18	0,25	0,24	0,02	0,22
FAISCA [2]	0,62	0,16	0,16	0,03	0,82
SCI [3]	1,31	0,65	0,65	0,09	1,97

Tabela 7. Aceleração vertical máxima VDV nas seções (m/s^{1,75})

Modelo de carregamento	A	B	C	D	E
BIODINÂMICO [1]	0,51	0,64	0,68	0,13	0,55
FAISCA [2]	0,62	0,33	0,33	0,07	1,87
SCI [3]	2,98	1,42	1,42	0,20	4,29

Cabe ressaltar que os valores mais elevados das respostas (acelerações de pico, RMS e VDV) foram observados na seção E. Ao comparar os modelos de carregamento qualitativamente, observa-se que os valores mais elevados das respostas (aceleração de pico, RMS e VDV), foram constatados para o modelo de carregamento SCI [3], em consonância com os seguintes trabalhos de pesquisa Gaspar [17], Campista et al. [18] e Campista [19].

No geral, as respostas dinâmicas para o modelo biodinâmico foram inferiores as encontradas para os demais modelos, este fato pode estar associado ao aumento do amortecimento do sistema estrutural, decorrentes das vinte pessoas exercendo atividades aeróbicas sobre a estrutura. Em seguida, as Figuras 7 a 9 ilustram a representação gráfica das respostas dinâmicas [deslocamentos, acelerações no domínio do tempo, aceleração no domínio da frequência] para cada modelo estudado na seção mais crítica (E).

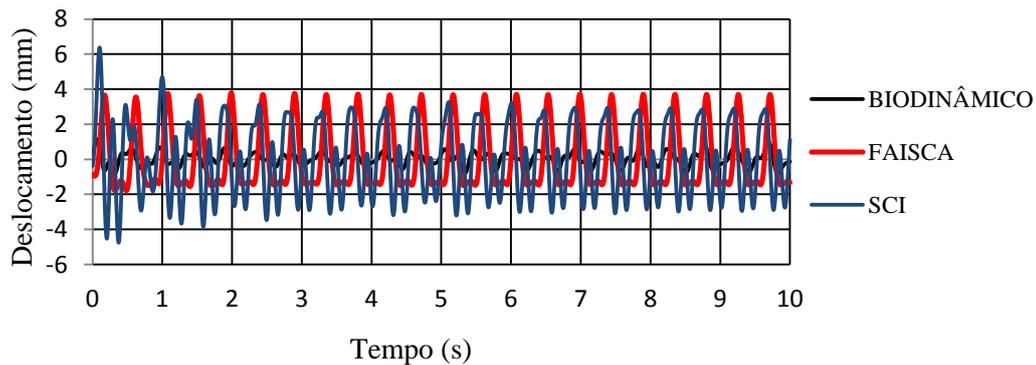


Figura 7. Deslocamento na translacional vertical no domínio do tempo: seção E

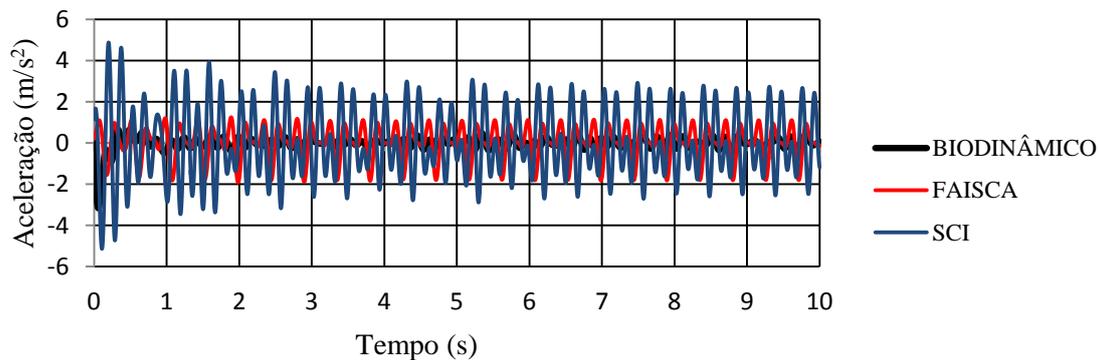


Figura 8. Aceleração vertical no domínio do tempo: seção E

Os resultados de aceleração no domínio do tempo para a seção E indicam que o modelo de carregamento biodinâmico [1] apresentou resultados inferiores aos demais modelos estudados, todavia em uma análise comparativa com os demais modelos de carregamento, pode-se afirmar que as máximas respostas aproximaram-se mais dos máximos obtidos pelo modelo proposto por Faisca [2].

Com base nos resultados apresentados na Figura 9, percebe-se a atuação do efeito de transferência de energia ao longo do sistema, no domínio da frequência, referente aos múltiplos da variável de excitação do harmônico de 2,20 Hz, cujas frequências são: 4,40 Hz e 6,60 Hz para os modelos de Faisca [2] e SCI [3]; enquanto para o modelo biodinâmico [1] são: 4,45 Hz e 6,60 Hz. Os elevados índices de aceleração estão relacionados com os picos de ressonância entre os harmônicos da frequência natural da estrutura e o de frequência de excitação de acordo com Campista [19].

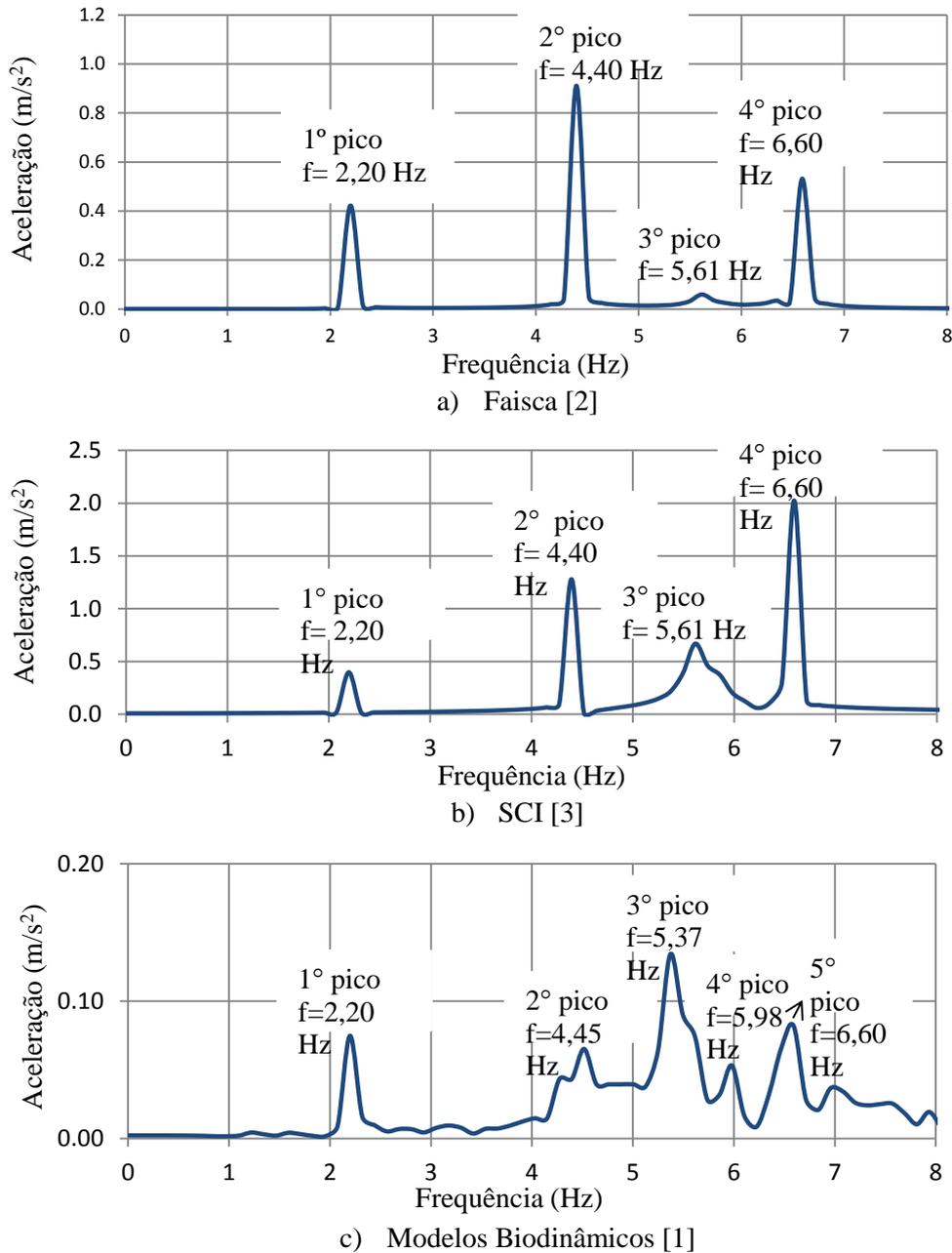


Figura 9. Aceleração no domínio da frequência: seção E

A frequência de flexão vertical do piso misto (aço-concreto) pode ser observada no 3º pico dos modelos de Faisca [2], SCI [3] e biodinâmico [1], com resultados de 5,61 Hz, 5,61 Hz e 5,37 Hz, respectivamente. Cabe ressaltar que o modelo biodinâmico [1] apresenta um pico com maior evidência para a frequência natural da estrutura, quando comparado aos picos de excitação, destacando que tal condição ocorreu de maneira inversa nos modelos de força dura estudados.

8 Considerações Finais

Este trabalho de pesquisa objetivou a avaliação do comportamento estrutural dinâmico de um piso misto (aço-concreto), com dimensões 14 m x 22,5 m e área total de 315 m², sujeitos às ações rítmicas (ginástica aeróbica) provocadas por pessoas. A resposta dinâmica do piso é calculada em função dos valores das acelerações de pico, RMS e valores de dose de vibrações VDV, via análise dinâmica da estrutura (vibração forçada).

Inicialmente, em relação à análise de vibração livre, destaca-se que o valor da frequência fundamental do modelo proposto pelo AISC [4] coincide com aquele obtido numericamente, demonstrando uma validação do modelo numérico desenvolvido para a representação do piso misto investigado. Em seguida, tendo em mente a análise de vibração forçada da estrutura, considerando-se uma frequência de excitação de 2,20 Hz, correspondendo ao primeiro harmônico do AISC [4] (ginástica aeróbica), foi obtida uma aceleração de pico da ordem de 4,26%g, visto que, essa faixa encontra-se dentro do limite tolerável equivalente ao intervalo de 4%g até 7%g. Todavia, quando as frequências de excitação assumem valores coincidentes com frequências naturais do piso analisado, as acelerações de pico apresentam valores elevados.

A frequência de excitação de 2,20 Hz simulada pelos modelos de carregamentos de Faísca [2], SCI [3] e Campista [1], gerou níveis de aceleração inaceitáveis ao conforto humano do piso, com referência à seção estrutural mais crítica (seção estrutural E). A seção estrutural E foi classificada como sendo a mais crítica do piso, pois apresenta valores bastante elevados de 4,87 m/s², 1,97 m/s² e 4,29 m/s^{1,75}, para (acelerações de pico, RMS e VDV), respectivamente, indicando que os critérios de conforto humano não são atendidos, ou seja, o sistema estrutural apresenta desconforto aos usuários.

Cabe destacar que o modelo biodinâmico com um grau de liberdade foi representado com resultados satisfatórios. Neste sentido, os autores entendem que se faz necessário um aprofundamento acerca do estudo do comportamento estrutural dinâmico de pisos mistos (aço-concreto), com base no desenvolvimento de testes experimentais visando uma melhor representação da interação dinâmica pessoa-estrutura.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho de pesquisa agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país: CAPES, CNPq e FAPERJ.

Referências

- [1] 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. PhD Thesis Civil Engineering Postgraduate Programme, PGECIV. State University of Rio de Janeiro, UERJ. Rio de Janeiro/RJ, Brazil, 2019.
- [2] R. G. Faísca. Caracterização de Cargas Dinâmicas Geradas por Atividades Humanas, 230f. Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [3] A.L. Smith, S.J Hicks and P.J. Devine, 2009. "Design of floors for vibrations: A new approach", SCI Publication P354, Ascot.
- [4] AISC/CISC Steel Design Guide Series No. 11 Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity, Chicago, Second Edition, 2016.
- [5] 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.
- [6] B. R. Ellis and T. Ji The response of structures to dynamic crowd loads. Digest, 436, 2004.
- [7] D. E. Allen. "Floor Vibrations from Aerobics," Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 771-779, 1990.
- [8] J. Sim, A. Blakeborough, M. Williams, Modelling effects of passive crowds on grandstand vibration, Structures & Buildings, v. 159, pp. 261-272, 2006.
- [9] J. D. Littler. Measuring the dynamic response of temporary grandstands, EURO DYN'96, pp. 907-913, ISBN 9054108134, 1996.
- [10] C. M. B. D.. Calibration of the UK national annex, footbridges 2008, Proceedings of the International Conference, Porto, Portugal, 2008.

- [11] R. R. Almeida. Análise de vibrações em sistemas estruturais para pisos mistos com joists submetidos a atividades humanas rítmicas. MsC Thesis Civil Engineering Post-graduate Programme, PGECIV. State University of Rio de Janeiro, UERJ. Rio de Janeiro/RJ, Brazil, 2008.
- [12] SJI, Stell Joist Institute. Standard Specifications for Open Web Steel Joists, k-Series and Load Tables (SJI-k-1.1); Standard Specifications for Longspan Steel Joists, LH-Series and Deep Longspan Steel Joists, DHL-Series and Load Tables (SJI LH/DLH-1.1); Standard Specifications for Joist Girders (SJI-JG-1.1), 2005.
- [13] NBR 6118. Associação Brasileira de Normas. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [14] T. M. Murray, D.E. Allen and E.E. Ungar. "Floor Vibrations due to Human Activity", Steel Design Guide Series. American Institute of Steel Construction, AISC, Chicago, USA, 2003.
- [15] B. R. Ellis and J. D. Littler, 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.
- [16] M. Setareh. Evaluation and assessment of vibrations owing to human activity. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings, v. 165, iss, SB5, p. 219-231, 2012.
- [17] C. M. Gaspar. 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, 2016.
- [18] F. F. Campista, C.M.R. Gaspar e J.G. Santos da Silva, 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), pp. 1-16, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.
- [19] D. F. Campista. Estudo do comportamento estrutural dinâmico e avaliação de conforto humano das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília com base no emprego de sistemas biodinâmicos. PhD Thesis Civil Engineering Post-graduate Programme, PGECIV. State University of Rio de Janeiro, UERJ. Rio de Janeiro/RJ, Brazil, 2019.