

## **ASSESSMENT OF THE DYNAMIC STRUCTURAL RESPONSE OF SOCCER STADIUMS GRANDSTANDS BASED ON THE USE OF BIODYNAMIC MODELS**

**Danielle Fernandes Campista**

*danicampista@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.** Over the years, many soccer stadiums in Brazil have been designed to withstand accidental loads (people loads) to be of static type (4kN/m<sup>2</sup>). However, based on the changes in the people's behaviour, especially in soccer matches, through the action of groups of fans and also with the use of these structures for music shows, these structural systems have been subjected to dynamic impacts related to the dynamic nature of the applied loads. Therefore, some of these stadiums have presented excessive vibration problems and have required an effective consideration of the dynamic loadings in the structural design. This way, this research aims to study the dynamic behaviour and evaluate the structural system performance of the Brasilia National Stadium grandstands, 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 people. It should be noted that the stadium was designed and constructed to be used at the World Cup 2014, held in Brazil. Finally, a human comfort assessment was performed on the investigated grandstands and the results are compared with those provided by design standards and international recommendations. The presented results show the relevance of the dynamic analysis in the structural design of soccer stadiums grandstands and the influence of the people-structure dynamic effect with respect to obtaining relevant data for human comfort of this type of structure.

**Keywords:** Soccer stadiums grandstands, Dynamic structural analysis, Biodynamic models.

## **1 Introdução**

Os estádios de futebol, além de serem utilizados para a realização de jogos de futebol, também têm sido utilizados frequentemente para sediar diversos eventos com apresentações musicais. Nessas situações, estímulos externos, como por exemplo, a entrada dos jogadores em campo antes do início do jogo, o acontecimento de um gol dos times que estão jogando e a entoação de uma canção em um show, resultam na prática de atividade rítmica humana com um alto grau de sincronização. Em algumas dos acontecimentos descritos acima, as vibrações oriundas do carregamento dinâmico humano podem ser elevadas, podendo causar um desconforto humano e até mesmo levar um pânico a multidão que está ocupando as arquibancadas dos estádios de futebol.

Diversos autores investigaram a representação da ação dinâmica humana por intermédio de funções matemáticas, com o objetivo de realizar uma melhor avaliação ainda dentro da fase de projeto do nível de vibrações em que as estruturas estão submetidas, além de avaliar o nível de conforto humano dos usuários. Estas funções matemáticas podem superestimar ou subestimar a resposta estrutural, sendo soluções mais ou menos conservadoras em relação ao custo final do projeto [1, 2, 3].

Estudos recentes têm apresentado de uma maneira mais realista o contato da atividade humana nos sistemas estruturais através do estudo da interação dinâmica indivíduo-estrutura, através da modelagem biodinâmica. A modelagem biodinâmica considera que as propriedades dinâmicas humanas (massa, rigidez e amortecimento) estão atuando sobre os sistemas estruturais. Essa modelagem tem se mostrado como uma maneira mais econômica de se considerar as ações dinâmicas humanas [1, 4, 5, 6, 7].

O estudo do comportamento estrutural dinâmico e avaliação do desempenho do sistema estrutural de arquibancadas de estádios de futebol quando submetidas a ações dinâmicas humanas provenientes das torcidas foi realizado através da avaliação das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília Mané Garrincha. A modelagem das ações dinâmicas representativas das torcidas foi desenvolvida com base no emprego de modelos biodinâmicos acoplados ao sistema estrutural das arquibancadas, onde o efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura considera o emprego de sistemas do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (SIGL). Este modelo foi calibrado com base em resultados obtidos mediante a realização de testes experimentais, representativos da ação rítmica da torcida. As características dinâmicas das pessoas (massa, rigidez e amortecimento) foram determinadas a partir da resolução matemática de um problema clássico de otimização, via uso do programa MATLAB [8], através do emprego dos algoritmos genéticos (AG), tomando como base os resultados de testes experimentais realizados.

Em seguida, a resposta estrutural dinâmica das arquibancadas investigadas, determinada a partir da utilização da modelagem biodinâmica do carregamento foi comparada com os resultados obtidos através do emprego de dois modelos de carregamento dinâmico, onde o carregamento é aplicado diretamente sobre a estrutura (modelos de “força-dura”) [9, 10]. A partir dessa comparação verificou-se que a modelagem biodinâmica apresenta uma tendência de fornecer valores de acelerações de pico menos conservativos do que os modelos de “força-dura”.

Com base nos valores das acelerações de pico calculados para inúmeras situações de carregamentos foi verificado que o sistema estrutural das arquibancadas atende às condições de conforto humano dos usuários. Todavia, ao se utilizar modelos tradicionais de “força-dura”, alguns valores de aceleração violam os limites de conforto humano propostos por normas de projeto.

## **2 Ensaios Experimentais**

Os ensaios experimentais foram idealizados e realizados tendo como objetivo principal a obtenção das características dinâmicas das pessoas, de acordo com a Fig. 1. Os equipamentos selecionados para a realização dos testes experimentais são os seguintes: três células de carga acopladas a uma plataforma, acelerômetro localizado no centro de gravidade das pessoas, plataforma de MDF, metrônomo, sistema de aquisição de dados ADS 2002 e um computador.

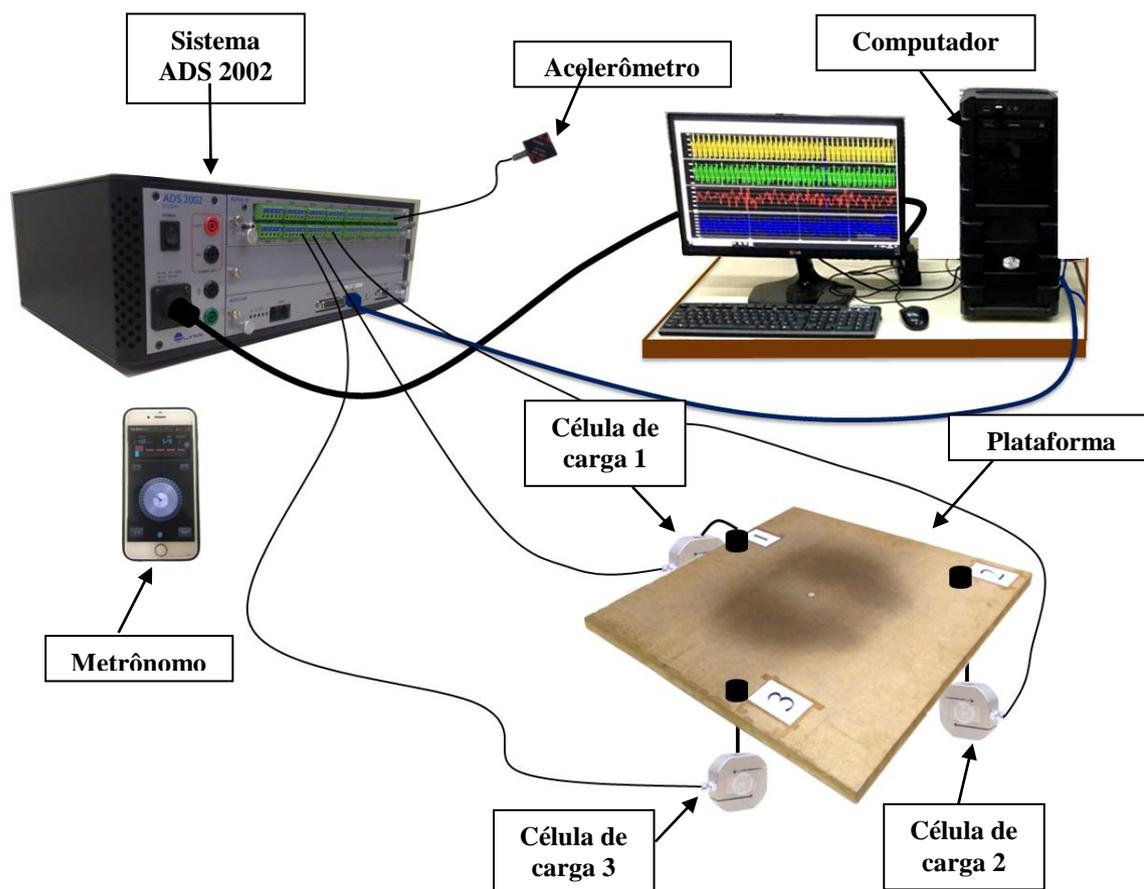


Figura 1. Conjunto de equipamentos utilizados para a realização dos ensaios

Através da utilização das três células de carga e do acelerômetro, foram obtidos os valores de força e aceleração, respectivamente, que cada pessoa exerceu sobre uma plataforma durante a realização da atividade humana rítmica. Ressalta-se que a plataforma de MDF apresenta dimensões de 600mm x 600mm x 25mm, possuindo uma massa de 6,4kg e uma área de 0,36m<sup>2</sup>.

O valor de 2,20Hz foi escolhido como o valor da frequência de excitação do carregamento humano, onde o primeiro harmônico ( $1 \times 2,20\text{Hz} = 2,20\text{Hz}$ ) apresenta um valor que contribui para forçar um movimento ressonante da arquibancada com o segundo modo de vibração vertical ( $f_{02}=2,28\text{Hz}$ ). Cabe ressaltar que um metrônomo foi utilizado para garantir que os ensaios fossem realizados na frequência de 2,20Hz, que equivale a 132bpm, onde cada “batida” sonora equivale ao contato da pessoa sobre a estrutura.

Cem pessoas foram selecionadas para a realização dos ensaios experimentais. Todas elas receberam instruções de saltar o mais próximo possível do centro de gravidade da estrutura, no ritmo da “batida” emitida pelo metrônomo, além de cada pessoa participante ter passado por um processo de pesagem com a utilização de uma balança digital.

Os dados obtidos durante a prática da atividade rítmica (torcida) foram registrados pelo sistema de aquisição de dados ADS 2002, fabricado pela LYNX Tecnologia Eletrônica LTDA. Este equipamento é constituído por uma placa controladora (driver) AC2122 VB que suporta o barramento ADS 200. Neste barramento está conectada a placa condicionadora de sinais AI2164, que possui dezesseis canais. O equipamento é acionado por computador, via conexão Ethernet, que controla a aquisição e a análise dos sinais. A Fig. 2 ilustra a execução dos ensaios realizados de um dos participantes.



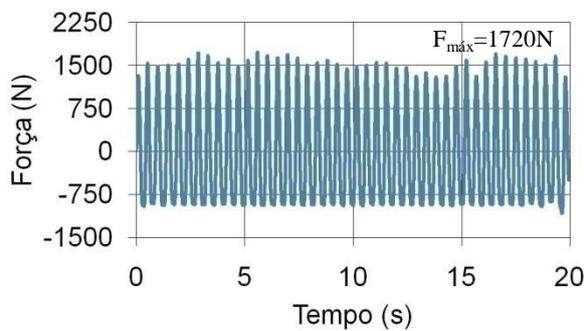
a) Pessoa realizando o salto

b) Pessoa flexionando os joelhos na aterrissagem

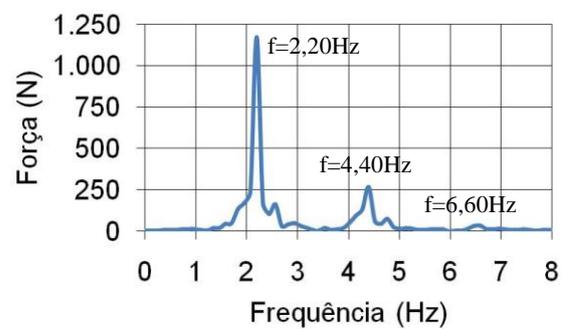
f) Pessoa parada

Figura 2. Etapas do ensaio experimental: Pessoa 94 (m=91,95kg)

Com o objetivo de exemplificar as respostas dinâmicas obtidas nos ensaios experimentais, as Figs. 3 e 4 ilustram os gráficos de força e aceleração no domínio do tempo e da frequência obtidos no ensaio realizado pela pessoa 94. Destaca-se que os valores de força e também as acelerações foram coletadas experimentalmente, enquanto a velocidade e o deslocamento foram obtidos via integração do sinal experimental da aceleração, através da utilização do programa MATLAB [8]. Cabe ressaltar que filtros do tipo “passa-alta” e “passa-baixa” foram utilizados para a filtragem dos sinais das forças, acelerações, velocidades e deslocamentos, com o objetivo de eliminar ruídos indesejados [ $0,5\text{Hz} < f_s < 8\text{Hz}$ ;  $f_s$ : frequência do sinal].

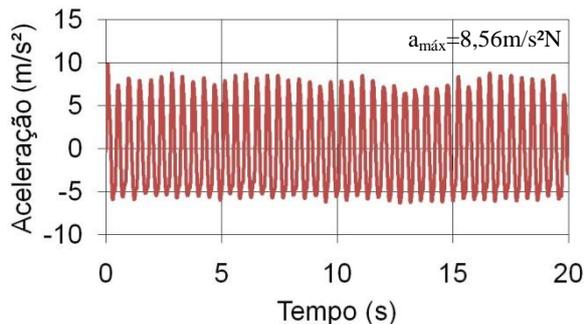


a) Domínio do tempo

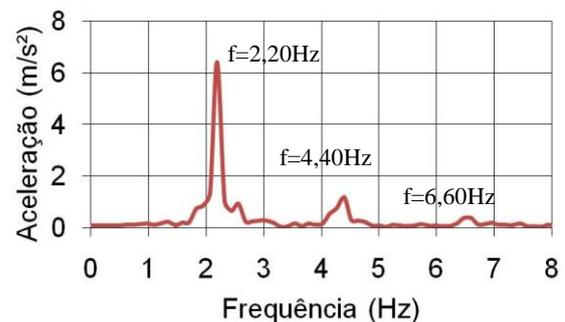


b) Domínio da frequência

Figura 3. Força: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 94 (m=91,95kg)



a) Domínio do tempo



b) Domínio da frequência

Figura 4. Aceleração: domínio do tempo e domínio da frequência - Pessoa 94 (m=91,95kg)

### 3 Modelagem dos Sistemas Biodinâmicos

O modelo biodinâmico do carregamento representa uma forma mais realista de modelagem da ação dinâmica representativa das pessoas (torcida), em relação a modelos tradicionais de carregamento dinâmico (“força dura”), que é a maneira mais usual utilizada para a análise dinâmica de sistemas estruturais. Nesse contexto, cabe ressaltar que a modelagem biodinâmica considera a interação dinâmica indivíduo-estrutura, através do emprego de sistemas do tipo massa-mola-amortecedor para representar dinamicamente o corpo humano, levando em consideração que as características dinâmicas humanas (massa, rigidez e amortecimento) estão atuando sobre os sistemas estruturais.

A modelagem biodinâmica proposta no presente trabalho considera o emprego de sistemas do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL) para simular numericamente a interação dinâmica indivíduo-estrutura. Na modelagem proposta, os valores de aceleração, velocidade e deslocamento no domínio do tempo obtidos provenientes do carregamento humano foram aplicados sobre o grau de liberdade da massa do sistema do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL), enquanto os valores de força no domínio do tempo foram aplicados diretamente sobre o sistema estrutural. É importante enfatizar que os valores da força, aceleração, velocidade e deslocamento das pessoas foram obtidos com base nos testes experimentais realizados. A Fig. 5 ilustra uma representação genérica acerca da modelagem dos sistemas biodinâmicos.

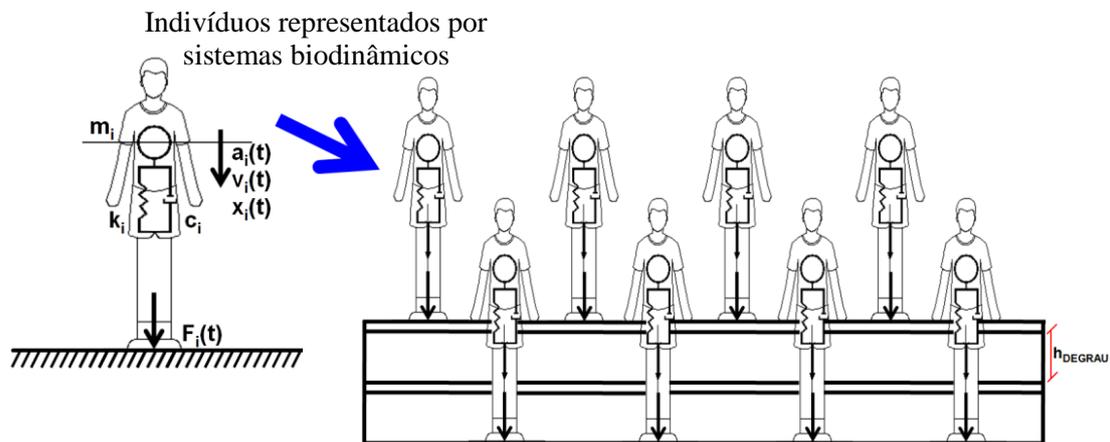


Figura 5. Representação genérica dos indivíduos representados por sistemas biodinâmicos com 1GL

Com base nos resultados provenientes dos ensaios experimentais realizados, as características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos (massa, rigidez e amortecimento) foram determinadas a partir da realização de um processo de otimização, mediante a utilização de Algoritmos Genéticos (AG). Os Algoritmos Genéticos consistem no uso da teoria clássica da evolução natural, que se baseia na seleção de “indivíduos” de uma determinada população, de forma aleatória, escolhidos como “pais”, de maneira a gerarem “filhos” para uma próxima “geração”. A solução da equação de equilíbrio dinâmico (Eq. 1) faz-se necessária para o emprego do Algoritmo Genético na determinação das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos.

No que tange a utilização dos AGs, no âmbito deste trabalho de pesquisa, foram considerados limites inferiores e limites superiores exclusivamente para a definição das características dinâmicas humanas de amortecimento ( $c$ ) e rigidez ( $k$ ) das pessoas, tendo em mente que o valor da massa do indivíduo escolhido para o presente estudo foi obtido em laboratório. Assim sendo, em seguida, foram empregadas as Eqs. (2) e (3), referentes a equações básicas da dinâmica estrutural, para o cálculo destas grandezas físicas [ $c$  e  $k$ ]. Ressalta-se que os valores de aceleração, velocidade e deslocamento necessários para a solução da Eq. (1) foram obtidos a partir dos testes experimentais realizados em laboratório.

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

$$k_i = 4\pi^2 f_i^2 m_i \tag{2}$$

$$c_i = 4\pi m_i \xi f_i \tag{3}$$

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/s<sup>2</sup>);  $f_i$ : frequência do indivíduo  $i$  (Hz);  $\xi$ : taxa de amortecimento igual a 0,25.

De modo a ilustrar os resultados obtidos durante o processo de otimização realizado mediante o uso do programa MATLAB [8], através do emprego de Algoritmos Genéticos, a Tabela 1 apresenta as características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos (massa, rigidez e amortecimento) referentes aos 15 (quinze) primeiros ensaios. Cabe ressaltar que as características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos foram obtidas para os cem ensaios realizados.

Tabela 1. Valores obtidos para as características dinâmicas das pessoas 1 a 15

Pessoa	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)
1	92,70	820,94	42812,81
2	81,95	657,02	37521,26
3	67,80	547,48	34311,23
4	103,20	731,59	56476,16
5	65,50	515,59	35513,46
6	59,40	817,83	33525,97
7	82,65	874,99	43144,89
8	51,55	752,09	27494,99
9	68,00	530,29	37479,29
10	74,90	706,37	44151,98
11	74,90	467,48	34369,59
12	57,85	542,71	30262,11
13	87,55	778,75	41178,54
14	50,20	354,52	28591,69
15	59,70	399,20	43445,33

Os valores de massa, rigidez e amortecimento determinados foram posteriormente implementados na equação de equilíbrio dinâmico (Eq.1), em conjunto com os valores de aceleração, velocidade e deslocamento, determinados a partir da realização dos testes experimentais. Desse modo, torna-se possível encontrar o espectro da força otimizada produzida por cada pessoa participante dos ensaios, no domínio do tempo e no domínio da frequência, via uso do programa MATLAB [8]. Objetivando validar os valores determinados, o espectro da força otimizada foi comparado com o espectro da força experimental dos cem ensaios realizados, tomando como base a utilização do coeficiente de correlação de Pearson. A título de exemplificação, a Fig. 6 apresenta a comparação dos espectros da pessoa 10.

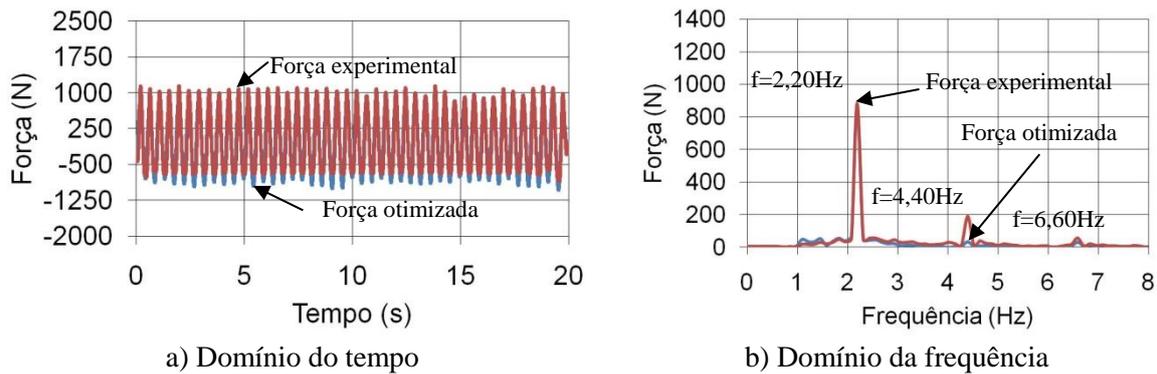


Figura 6. Espectros de força: Pessoa 10 (m=68kg)

Com base na análise dos espectros presentes na Fig. 6, pode-se verificar que existe uma correlação satisfatória entre a força obtida experimentalmente 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.

#### 4 Modelo Estrutural

O modelo estrutural investigado corresponde às arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília, composto por lajes, vigas, pilares e degraus de concreto armado. No referido estádio, existem quatro tipos de setores diferentes nas arquibancadas. O setor escolhido para ser estudado neste trabalho foi o setor 4G, uma vez que por ser um setor de largura intermediária, representa um comportamento médio dos diferentes setores existentes [11]. A Fig. 7 apresenta a planta baixa global do Estádio, com o setor 4G em destaque e o corte radial da estrutura da arquibancada do estádio.

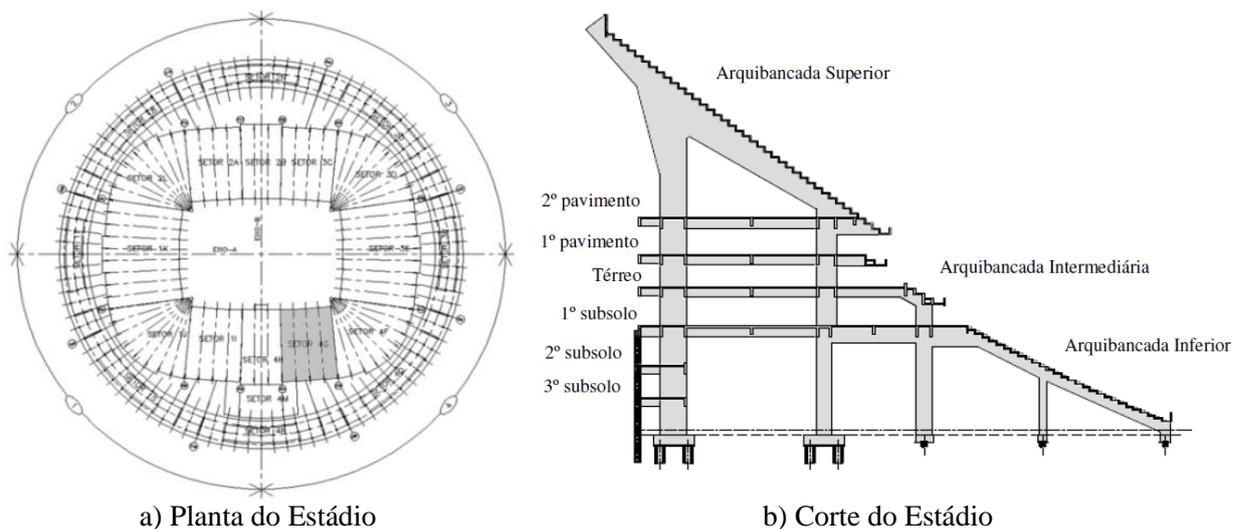


Figura 7. Vistas do Estádio [11]

O estádio de futebol em estudo consiste em uma estrutura composta por um grande pórtico, constituído por quatro linhas de pilares, onde a primeira e a segunda linha de pilares são interligadas por vigas inclinadas, que são denominadas vigas-jacaré, que tem como função apoiar os degraus da arquibancada superior na estrutura. As vigas que se apoiam sobre os pilares são denominadas vigas principais (transversais) e aquelas que se apoiam sobre vigas principais são denominadas de vigas secundárias (internas). As arquibancadas são divididas em três diferentes níveis: superior, intermediário e inferior. A altura total do estádio é de 50,59 metros, até a cobertura, e o sistema estrutural conta com mais de 288 pilares, com 36 metros de altura.

No que diz respeito às características físicas dos materiais empregados no modelo estrutural em estudo, o concreto possui módulo de elasticidade longitudinal secante ( $E_{cs}$ ) de 30GPa, coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) igual a 0,2 e densidade ( $\gamma_c$ ) de 25kN/m<sup>3</sup>. O intervalo de integração ( $\Delta t$ ) utilizado nas análises numéricas foi igual a 0,002s ( $\Delta t = 2 \times 10^{-3}$ s) e o tempo total de cada análise dinâmica (vibração forçada) foi considerado de tal forma que a resposta dinâmica das arquibancadas seja analisada na fase permanente da resposta do sistema. O amortecimento estrutural foi considerado igual a 1%.

## 5 Modelagem em Elementos Finitos

A modelagem numérico-computacional das arquibancadas de um dos setores do Estádio Nacional de Brasília foi realizada a partir do emprego de técnicas básicas de discretização, mediante o uso do programa computacional ANSYS [12]. O programa ANSYS [12] pode ser utilizado em diversas classes de problemas de análise estrutural na área de engenharia civil, pois possui uma gama bastante abrangente de elementos finitos e um módulo específico para os mais variados tipos de análises.

Para representar os pórticos, as lajes e os degraus foram utilizados elementos finitos de casca SHELL63 [12]. Enquanto que para as vigas internas foi utilizado o elemento tridimensional BEAM44 [12]. A caracterização do modelo biodinâmico representativo da ação dinâmica humana foi realizada através do emprego do elemento denominado COMBIN40 [12].

Na modelagem computacional, foram adotadas as seguintes hipóteses simplificadoras: as seções transversais permanecem planas após as solicitações de carregamento (hipótese de Bernoulli) e o material (concreto) trabalha no regime elástico-linear. Com base nestas considerações e, ainda, de acordo com os resultados fornecidos por exaustivos testes de refinamento de malha, o modelo numérico final resultou em uma estrutura com 34.873 nós, 28.005 elementos finitos de casca SHELL63 [12], 2.170 elementos finitos de viga BEAM44 [12], 4.161 elementos finitos COMBIN40 [12] e possui 333.675 graus de liberdade. A Fig. 8 apresenta o modelo em elementos finitos das arquibancadas investigadas neste trabalho de pesquisa.

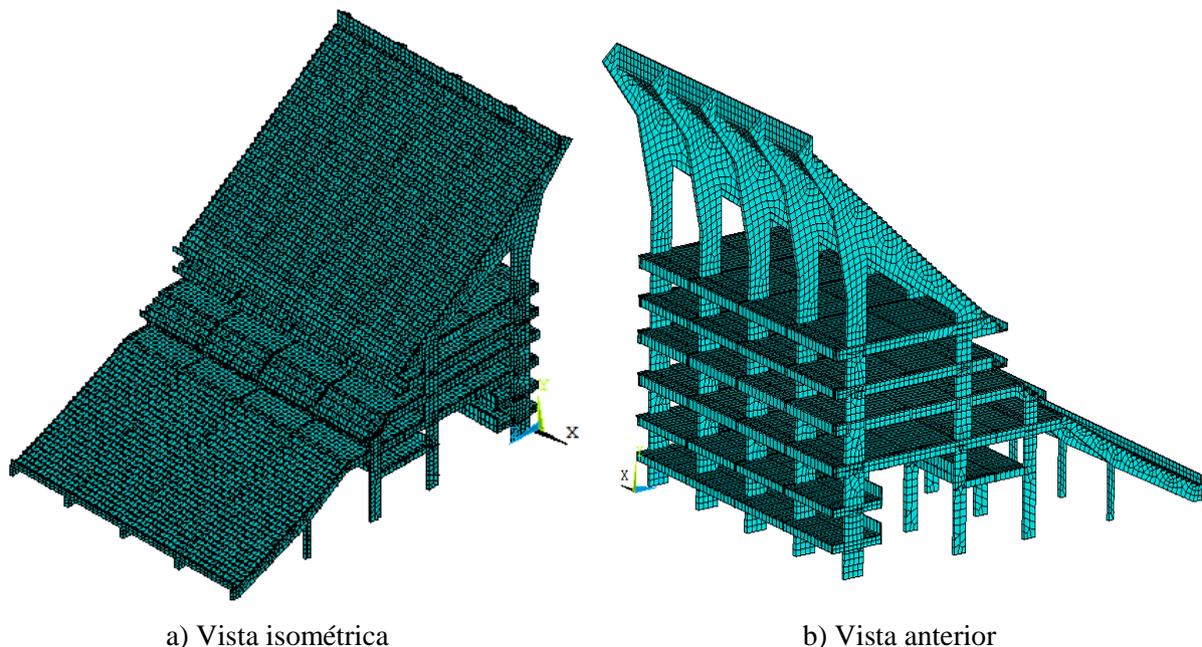


Figura 8. Vistas do modelo em elementos finitos: isométrica e anterior

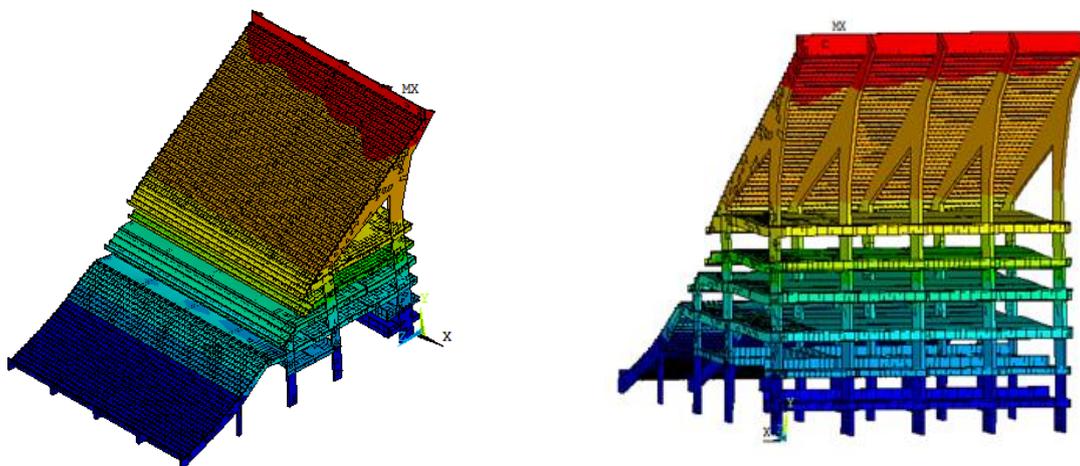
## 6 Análise Modal

A partir do conhecimento das frequências naturais (autovalores) da estrutura e seus respectivos modos de vibração (autovetores) se verifica o comportamento da estrutura face ao carregamento dinâmico; essa análise é chamada de análise modal. A análise modal reflete o comportamento dinâmico básico da estrutura e constitui uma indicação de como esta responderá ao carregamento atuante sobre a mesma. Este problema clássico de autovalores e de autovetores é resolvido numericamente mediante o emprego do programa computacional ANSYS [12].

As frequências naturais dos cinco primeiros modos de vibração para o modelo estrutural estudado foram obtidas, considerando que a estrutura não está ocupada. Também foram obtidos os valores de massa modal, rigidez modal e amortecimento modal associados a cada modo de vibração. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos, enquanto a Fig. 9 apresenta o modo de vibração mais significativo para avaliação do efeito das ações dinâmicas (vibração forçada).

Tabela 12. Frequências naturais da arquibancada vazia

Modo de vibração	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/m)	Amortecimento modal (Ns/m)	Frequência (Hz)
$f_{01}$	$24,644 \times 10^5$	$0,916 \times 10^8$	$1,793 \times 10^7$	0,9706
$f_{02}$	$23,939 \times 10^5$	$4,938 \times 10^8$	$4,103 \times 10^7$	2,2859
$f_{03}$	$1,322 \times 10^5$	$0,318 \times 10^8$	$0,245 \times 10^7$	2,4699
$f_{04}$	$28,507 \times 10^5$	$9,041 \times 10^8$	$6,058 \times 10^7$	2,8343
$f_{05}$	$7,735 \times 10^5$	$8,005 \times 10^8$	$2,969 \times 10^7$	5,1202



a) Vista isométrica frontal

b) Vista isométrica anterior

Figura 9. 2º Modo de vibração ( $f_{02}=2,28$  Hz)

Em diversos estudos observaram a influência da presença do ser humano (efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura) sobre os parâmetros dinâmicos (parâmetros modais) dos sistemas estruturais (massa, rigidez e amortecimento). Há também a modificação nos valores das frequências naturais dos sistemas estruturais, a partir da alteração sobre os parâmetros dinâmicos [1].

Assim sendo, foram obtidos os valores das frequências naturais e dos parâmetros modais referentes ao segundo modo de vibração da arquibancada investigada, que está relacionado à escolha da frequência de excitação do carregamento humano ( $f_{02}=2,28$ Hz).

A ocupação das arquibancadas foi realizada por meio da modelagem biodinâmica, em que o ser humano é representado parado e em pé. Isto é, apenas consideram-se as características dinâmicas humanas (massa, rigidez e amortecimento). A Tabela 3 ilustra os resultados obtidos.

Tabela 3. Características do modelo estrutural com carregamento: 2º modo de vibração

Número de pessoas	Frequência (Hz)	Taxa de amortecimento $\xi$ (%)	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/m)	Amortecimento modal (Ns/m)
0	2,2859	0,78	2393856,18	$4,938 \times 10^8$	$0,534 \times 10^8$
278	2,2858	1,84	2393698,24	$4,937 \times 10^8$	$1,265 \times 10^8$
556	2,2857	3,26	2393503,17	$4,936 \times 10^8$	$2,242 \times 10^8$
1112	2,2856	4,73	2392797,86	$4,934 \times 10^8$	$3,248 \times 10^8$
1668	2,2855	5,37	2392624,35	$4,933 \times 10^8$	$3,693 \times 10^8$
2223	2,2851	6,56	2392449,66	$4,932 \times 10^8$	$4,506 \times 10^8$
3021	2,2849	7,70	2392303,47	$4,930 \times 10^8$	$5,289 \times 10^8$
3677	2,2845	8,10	2392004,96	$4,928 \times 10^8$	$5,562 \times 10^8$
4161	2,2844	8,87	2391686,72	$4,927 \times 10^8$	$6,093 \times 10^8$

Com base nos resultados fornecidos pela Tabela 3, verifica-se que ocorre uma diminuição nos valores da frequência natural, da massa modal e da rigidez modal, além do aumento na taxa de amortecimento e, conseqüente, aumento no valor do amortecimento modal. Cabe ressaltar que a variação numérica obtida nos valores da frequência natural, da massa modal e da rigidez modal foi pouco expressiva e inferior a 1%. Por outro lado, a influência na taxa de amortecimento é mais significativa, da ordem de 10%.

## 7 Análise Transiente e Estudo do Conforto Humano

A frequência de 2,20Hz foi adotada como frequência característica do carregamento, por ser um valor próximo ao valor da frequência relacionada ao segundo modo de vibração do modelo estrutural investigado. Para a realização da análise dinâmica neste trabalho de pesquisa foi considerado uma situação de carregamento, caracterizada por apresentar 100% de ocupação nos três setores das arquibancadas (4161 pessoas), conforme ilustrado na Fig. 10. A avaliação da resposta dinâmica do sistema estrutural foi realizada a partir dos resultados obtidos em quatro diferentes pontos de leitura. A escolha desses pontos teve como base a análise dos modos de vibração de maneira que representassem o comportamento da região com maior amplitude modal.

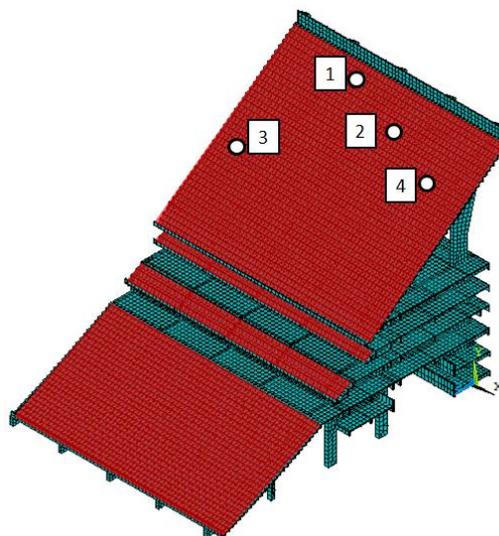


Figura 10. Caso de carregamento estudado

As respostas dinâmicas obtidas no presente trabalho, a partir da utilização da modelagem biodinâmica para o carregamento proveniente de atividade humana (torcida), 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 [9] e o segundo modelo foi proposto pelo SCI [10].

O modelo de carregamento desenvolvido por Faisca [9] possui como objetivo simular as excitações dinâmicas humanas rítmicas, através do emprego da Função Hanning, para descrever matematicamente esse tipo de carregamento. A representação matemática desse tipo de carregamento dinâmico é expressa pela Eq. (4).

$$F(t) = CD \left\{ K_p P \left[ 0.5 - 0.5 \cos \left( \frac{2\pi}{T_c} t \right) \right] \right\} \quad T_c \leq t \leq T \quad (4)$$

$$F(t) = 0 \quad t \leq T_c$$

Onde  $F(t)$ : representação matemática do carregamento no tempo em (N);  $CD$ : coeficiente de defasagem;  $K_p$ : coeficiente de impacto;  $P$ : peso da pessoa em (N);  $T$ : período da atividade em (s);  $T_c$ : período de contato da atividade em (s);  $t$ : tempo em (s). O valor de 0,32 foi adotado como o período de contato da atividade ( $T_c$ ), enquanto foi utilizado o valor de 3,24 para o coeficiente de impacto ( $K_p$ ). Para o coeficiente de defasagem ( $CD$ ), foi adotado o valor de 0,55.

O modelo presente no SCI [10] leva em consideração a carga de multidão existente em estruturas durante a prática de atividades humanas rítmicas. A representação matemática do carregamento está expressa na Eq. (5).

$$F(t) = G \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} r_{n,v} \sin(2n\pi f_p t + \phi_n) \right\} \quad (5)$$

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;  $\phi_n$ : diferença de fase;  $f_p$ : frequência do carregamento;  $t$ : tempo (s). No cálculo dos coeficientes de Fourier foi considerado um número de pessoas ( $v$ ) igual a 100 para os dois casos de carregamento estudados.

Cabe ressaltar que o peso da pessoa para os dois modelos de "força dura" [9, 10] foi calculado se considerando um valor médio de massa do ser humano de 74kg, que foi obtido a partir do cálculo da média da massa das 100 (Cem) pessoas participantes dos ensaios experimentais.

A Fig. 11 apresenta a resposta dinâmica em termos de aceleração, no domínio do tempo e da frequência, referentes ao caso de carregamento estudado, no ponto de leitura de maior amplitude da resposta. Enquanto a Tabela 4 apresenta os valores máximos das acelerações de pico determinadas no modelo biodinâmico, assim como nos modelos propostos por Faisca [9] e pelo SCI [10].

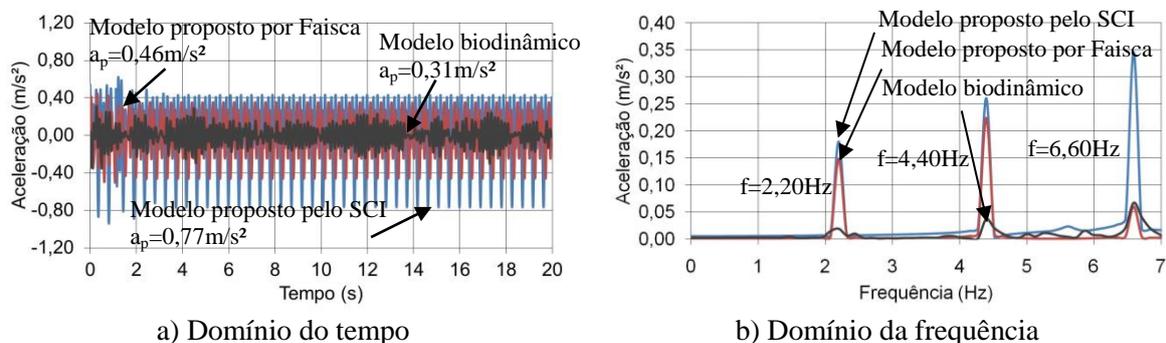


Figura 11. Comparativo da aceleração

Tabela 4. Comparativo das acelerações de pico

Ponto de leitura	Acelerações de pico (m/s <sup>2</sup> )		
	Modelo biodinâmico	Faisca (2003)	SCI (2009)
1	0,09	0,23	0,26
2	0,06	0,15	0,19
3	0,10	0,21	0,34
4	0,31	0,46	0,77

A partir dos resultados presentes na Tabela 4 e na Fig. 11, verifica-se que o valor máximo de aceleração de pico encontrado para o modelo biodinâmico foi da ordem de  $0,31\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,31\text{m/s}^2$ ). Enquanto para o modelo de carregamento proposto por Faisca [9] foi de  $0,46\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,46\text{m/s}^2$ ) e no modelo proposto pelo SCI [10] foi de  $0,77\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,77\text{m/s}^2$ ). Esses valores foram encontrados no ponto de leitura 4, que está localizado no centro do 4º vão, entre a 4º e 5º viga, no 9º degrau da arquibancada superior. O valor de  $0,31\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,31\text{m/s}^2$ ) encontrado no modelo biodinâmico corresponde a 67% do valor obtido no modelo de carregamento proposto por Faisca [9] e 40% do valor obtido no modelo proposto pelo SCI [10].

Ainda de acordo com os resultados presentes na Tabela 4 e na Fig. 11, verifica-se que o modelo biodinâmico apresenta valores de aceleração inferiores quando comparado aos valores obtidos nos modelos de carregamento de “força dura” propostos por Faisca [9] e pelo SCI [10], nos quatro pontos de leitura.

Ressalta-se que os valores de aceleração de pico obtidos nos quatro pontos de leitura quando se utiliza o modelo biodinâmico e o modelo de “força dura” proposto por Faisca [9] se encontram abaixo da faixa limite de  $0,40\text{m/s}^2$  a  $0,70\text{m/s}^2$  estabelecida por Murray [13], atendendo assim aos critérios de conforto humano. Ao se utilizar o modelo de carregamento de “força dura” proposto pelo SCI [10], o valor de aceleração de pico encontrado no ponto de leitura 4 encontra-se acima da faixa limite de  $0,40\text{m/s}^2$  a  $0,70\text{m/s}^2$  estabelecida por Murray [13], enquanto os valores de aceleração de pico encontrados nos pontos de leitura 1, 2 e 3 se encontram abaixo da faixa limite de  $0,40\text{m/s}^2$  a  $0,70\text{m/s}^2$  estabelecida por Murray [13].

Percebe-se, ainda, a partir da análise da Fig. 11, que os picos onde ocorrem as maiores transferências de energia do sistema, no domínio da frequência, correspondem principalmente aos três harmônicos da excitação dinâmica humana ( $f_{01}=2,20\text{Hz}$ ;  $f_{02}=4,40\text{Hz}$  e  $f_{03}=6,60\text{Hz}$ ). Cabe ressaltar que a ação dinâmica humana (torcida), na modelagem biodinâmica, também ativou outros modos de vibração do sistema estrutural que não representam os harmônicos da excitação, como por exemplo, a frequência de  $2,47\text{Hz}$ , que corresponde ao terceiro modo de vibração da estrutura.

Neste sentido, com base nos resultados encontrados ao longo do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, e em consonância com outros autores [14,15], a modelagem biodinâmica apresenta uma tendência a fornecer valores das respostas dinâmicas menos conservativos, uma vez que utiliza sistemas biodinâmicos para representarem a interação dinâmica indivíduos-estrutura, que levam em consideração o efeito do amortecimento relacionado à presença das pessoas sobre a estrutura, além de incorporar naturalmente as diferenças de fase entre as pessoas.

Neste contexto, a utilização de modelos de carregamento dinâmicos provenientes de funções matemáticas, que consideram a aplicação da força diretamente sobre a estrutura, não incorporando o efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura, fornece valores das respostas dinâmicas conservadores, o que pode levar a concepção de projetos estruturais antieconômicos.

## 8 Considerações Finais

Este trabalho de pesquisa realizou uma investigação acerca do comportamento estrutural dinâmico das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília Mané Garrincha, quando submetidas a ações dinâmicas rítmicas representativas das pessoas (torcida). Neste sentido, foi proposta a utilização de sistemas biodinâmicos para a modelagem das ações dinâmicas representativas das pessoas

(torcida), onde a interação dinâmica indivíduo-estrutura considera o emprego de sistemas do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (SIGL), acoplados ao sistema estrutural, tomando como base os resultados obtidos em ensaios experimentais.

Neste trabalho, avaliou-se o comportamento do sistema estrutural a partir da consideração que uma das frequências naturais da estrutura corresponde a frequência de excitação do carregamento humano. Neste contexto, o valor de 2,20Hz foi escolhido como o valor da frequência de excitação do carregamento humano, onde o primeiro harmônico ( $1 \times 2,20\text{Hz} = 2,20\text{Hz}$ ) apresenta um valor que contribui para forçar um movimento ressonante da arquibancada com o segundo modo de vibração vertical ( $f_{02}=2,28\text{Hz}$ ).

Verifica-se que a frequência fundamental da arquibancada ( $f_{01}=0,97\text{Hz}$ ) se encontra abaixo do valor estabelecido pela NBR 6118 [14] ( $f_n > 1,2f_{\text{crítica}}$ ), que para este tipo de estrutura deve ser no mínimo igual a 9,6Hz. Nesse sentido, a análise modal realizada na arquibancada revela uma possibilidade da estrutura apresentar problemas relacionados a vibrações excessivas.

Com base na avaliação do comportamento dinâmico do sistema estrutural, via emprego dos sistemas biodinâmicos, considerando-se as pessoas (torcida) representadas numericamente, em pé e paradas sobre as arquibancadas, foi observado que os valores de frequência natural, massa modal, rigidez modal e amortecimento modal são alterados devido à ocupação do sistema estrutural, em relação ao sistema sem a consideração da presença das pessoas. Os valores de frequência natural, massa modal e rigidez modal diminuíram à medida que a ocupação da arquibancada aumentou, com variações pouco expressivas e inferiores a 1%. Todavia, o valor amortecimento modal aumentou quando ocorreu um aumento de ocupação da estrutura, com variações mais significativas, da ordem de 10%, o que contribui favoravelmente para a posterior avaliação do conforto humano do sistema investigado.

O valor de aceleração de pico mais elevado obtido nesta investigação quando da utilização da modelagem biodinâmica foi da ordem de  $0,31\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,31\text{m/s}^2$ ) em comparação a aceleração máxima de  $0,46\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,46\text{m/s}^2$ ) calculada mediante o uso do modelo de carregamento proposto por Faisca [9] e de  $0,77\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,77\text{m/s}^2$ ) utilizando-se o modelo de carregamento proposto pelo SCI [10]. Esses valores foram encontrados no ponto de leitura 4. Cabe destacar que o valor de aceleração de pico igual a  $0,31\text{m/s}^2$  ( $a_p=0,31\text{m/s}^2$ ) calculado com base no uso dos modelos biodinâmicos, corresponde a 67% do valor de aceleração máxima obtida, via emprego do modelo de carregamento proposto por Faisca [9], e 40% do valor de pico obtido a partir do uso do modelo proposto pelo SCI [10].

As acelerações de pico encontradas para o caso de carregamento estudado, nos quatro pontos de leitura considerados, se encontram abaixo da faixa limite de  $0,40\text{m/s}^2$  a  $0,70\text{m/s}^2$  estabelecida por Murray [13], quando se utilizou a modelagem biodinâmica e o modelo de “força dura” proposta por Faisca [9]. Em contrapartida, o valor de aceleração de pico encontrado no ponto de leitura 4, quando se utilizou o modelo de “força dura” proposto pelo SCI [10] ( $a_p=0,77\text{m/s}^2$ ), ultrapassa a faixa limite estabelecida por Murray [13].

Conclui-se, portanto, que a modelagem biodinâmica proposta neste trabalho de pesquisa, apresenta uma clara tendência a fornecer valores de acelerações de pico menos conservativos, tendo em mente o efeito do amortecimento inerente à presença das pessoas sobre as arquibancadas, o que produz níveis menos elevados de transferência de energia para o sistema.

Neste sentido, ressalta-se que a avaliação da resposta estrutural dinâmica das arquibancadas, mediante o emprego de sistemas biodinâmicos representativos das torcidas, com base na consideração do efeito da interação dinâmica indivíduos-estrutura, apresenta uma tendência importante para uma representação mais realista acerca da ação dinâmica humana rítmica, evidentemente, com reflexos benéficos para a avaliação do conforto humano, em função de uma redução consistente dos valores das acelerações de pico (acelerações máximas), tendo em mente a consideração do amortecimento inerente às torcidas; e, ainda, pelo fato de que a modelagem biodinâmica incorpora, naturalmente, as diferenças de fase entre as pessoas, influenciando diretamente sobre os valores da resposta dinâmica do sistema (deslocamentos e acelerações máximas).

## 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] D.F. Campista. *Estudo do comportamento estrutural dinâmico e avaliação do conforto humano das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília com base no emprego de sistemas biodinâmicos*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2019.
- [2] H. Bachmann, W.J. Ammann, F. Deischl, J. Eisenmann, J. Floegl, G. H. Hirsch, et al. *Vibration problems in structures - practical guidelines*, Birkhäuser, Basel (Switzerland):Institut für Baustatik und Konstruktion, 1995.
- [3] B. R. Ellis and T. Ji. *The response of structures to dynamic crowd loads*. Digest, 426, 2004.
- [4] Joint Working Group IStructE/DCLG/DCMS. *Dynamic Performance Requirements for Permanent Grandstands Subject to Crowd Action: Recommendations for Management Design and Assessment*. Institution of Structural Engineers, London, 2008.
- [5] C. A. Jones, P. Reynolds, A. Pavic. *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, 2011.
- [6] K. Van Nimmen. *Numerical and experimental study of human-induced vibrations of footbridges*. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, KU Leuven, 2015.
- [7] E. Shahabpoor, A. Pavic, V. Racic, S. Zivanovic e J. Macdonald. *Effect of group walking traffic on dynamic properties of pedestrian structures*, J. Sound Vib, 2016.
- [8] Matlab. Versão R2017a. MathWorks, 2017.
- [9] R. Faisca. *Caracterização de Cargas Dinâmicas Geradas por Atividades Humanas*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE/Engenharia Civil: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2003.
- [10] A. L. Smith, S. J. Hicks e P. J. Devine. *Design of Floors for Vibration: A New Approach (Revised Edition)*. *The Steel Construction Institute (SCI) Publication P354*, Ascot, 2009.
- [11] G. V. F. Lima. *Análise Dinâmica via Método dos Elementos Finitos do Estádio Nacional de Brasília*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia
- [12] Ansys. Swanson Analysis Systems, Inc., P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, Version 10.0, Basic analysis procedures, Second edition, 2009.
- [13] T. M. Murray et al. *Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity: AISC DG11 Second Edition*. Chicago, USA, 2016.
- [14] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.