



EMPREGO DE MODELOS BIODINÂMICOS PARA O ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DINÂMICO DAS ARQUIBANCADAS DO ESTÁDIO NACIONAL DE BRASÍLIA

Danielle Fernandes Campista

danicampista@yahoo.com.br

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

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

José Guilherme Santos da Silva

jgss@uerj.br

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

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

Resumo. *Este trabalho de pesquisa tem como objetivo principal o estudo do comportamento dinâmico e avaliação do desempenho do sistema estrutural das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília, no que diz respeito à avaliação do conforto humano. Deste modo, para a modelagem numérica da estrutura foram utilizadas técnicas de discretização, por meio do método dos elementos finitos, via utilização do programa ANSYS. Para a modelagem das ações dinâmicas representativas das torcidas, atuantes sobre as arquibancadas de concreto armado, foram utilizados modelos biodinâmicos acoplados ao sistema estrutural (sistemas do tipo massa-mola-amortecedor: S1GL), para a simulação do contato existente entre as pessoas e a estrutura. As características dinâmicas das pessoas (massa, amortecimento e rigidez) foram obtidas com base na realização de testes experimentais; e, ainda, considerando a resolução de um problema de otimização, mediante a utilização de algoritmos genéticos, via uso do programa MATLAB. Os resultados alcançados ao longo deste estudo são comparados com os valores fornecidos por normas e recomendações de projeto e revelam a importância da análise dinâmica em projetos de estádios de futebol, no que diz respeito ao estudo do conforto humano e a segurança dos usuários deste tipo de estrutura.*

Palavras-chave: *Estádios de futebol, Modelos biodinâmicos, Análise dinâmica de estruturas.*

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas estruturais vêm apresentando nos últimos anos uma redução nos valores das frequências naturais, como consequência da tendência em se projetar estruturas cada vez mais esbeltas e flexíveis. Esse fato pode gerar sistemas mais suscetíveis aos carregamentos dinâmicos, visto que os valores das frequências naturais podem ficar cada vez mais próximos dos valores das frequências de excitação do carregamento dinâmico. Diante deste cenário, torna-se muito importante a verificação do comportamento dinâmico das estruturas, bem como a descrição das cargas dinâmicas que atuam sobre elas. Estas cargas dinâmicas podem vir a produzir níveis de vibrações excessivas, que podem causar desconforto humano, além de colocar em risco a segurança da estrutura (Campista, 2015; Faisca, 2003).

Este trabalho de pesquisa tem como objetivo principal o estudo do comportamento dinâmico e avaliação do desempenho do sistema estrutural das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília quando submetidas a ações dinâmicas humanas (torcidas). Para a modelagem das ações dinâmicas representativas das torcidas foram utilizados modelos biodinâmicos acoplados ao sistema estrutural, calibrados com base em resultados obtidos mediante a realização de testes experimentais, que simulam o contato entre as pessoas e a estrutura. As características dinâmicas das pessoas (massa, rigidez e amortecimento) foram determinadas com base nos resultados de testes experimentais realizados, a partir da resolução de um problema de otimização, via uso do programa MATLAB, utilizando dois diferentes métodos. Desta maneira, pretende-se verificar se o sistema estrutural das arquibancadas atende às condições de conforto dos usuários, visto que vibrações excessivas na estrutura podem gerar desconforto humano.

Diversos autores têm investigado a representação da ação dinâmica humana por intermédio de funções matemáticas, com o objetivo de realizar uma melhor avaliação ainda na fase de projeto do nível de vibrações em que as estruturas estão submetidas, além de avaliar o nível de conforto humano dos usuários (Bachmann et al., 1995; Murray et al., 2003; Ellis et al., 2004; ISO10137, 2007; Smith et al., 2009). Estas funções matemáticas têm se mostrado um pouco conservadoras em relação ao custo final do projeto (Cappellini, 2015; Gaspar, 2015). Além deste fato, estudos recentes têm apresentado de uma maneira mais realista o contato da atividade humana nos sistemas estruturais através do estudo da interação ser humano-estrutura, através da modelagem biodinâmica, onde a determinação das características dinâmicas das pessoas é levada em consideração. Estes modelos biodinâmicos têm se mostrado como uma maneira mais econômica de se considerar as ações dinâmicas humanas (Joint Working Group, 2008; Jones et al., 2011; Da Silva et al., 2013; Cappellini, 2015; Van Nimmen, 2015; Shahabpoor et al., 2016; Toso et al., 2016).

Ao longo do presente estudo foram realizadas análises numéricas, obtendo-se inicialmente as frequências naturais e os modos de vibração do sistema estrutural investigado, para em seguida analisar-se a resposta dinâmica forçada das arquibancadas, realizando uma análise crítica acerca dos valores das acelerações máximas (acelerações de pico). Os valores destas acelerações são comparados com os valores limites propostos por inúmeras normas e recomendações de projeto, com o objetivo de proceder a uma avaliação mais realista no que diz respeito ao problema de vibrações sobre modelos de arquibancadas em estádios de futebol.

2 MODELAGEM DO CARREGAMENTO DINÂMICO HUMANO

Ao se projetar um sistema estrutural no qual suas frequências naturais, especialmente a frequência fundamental, estejam próximas das frequências das excitações dinâmicas mais comuns, tais como aquelas referentes às atividades humanas do caminhar, pular, saltar e dançar, certamente o sistema irá apresentar problemas referentes a vibrações excessivas. As cargas dinâmicas podem produzir elevados níveis de vibração, os quais podem tanto comprometer a segurança estrutural como causar alteração na sensação de conforto dos ocupantes dessas estruturas.

De modo geral é bastante complexo modelar as cargas dinâmicas induzidas por seres humanos, quando estes executam uma determinada atividade rítmica, pois as peculiaridades dos carregamentos gerados envolvem aspectos individuais que são bastante distintos. Os carregamentos dinâmicos são carregamentos em que a magnitude, direção e posição podem variar ao longo do tempo. Consequentemente, as respostas da estrutura, em termos de deslocamento, velocidade e aceleração também irão variar ao longo do tempo.

Diversos pesquisadores têm representado dinamicamente o corpo humano através de sistemas do tipo massa-mola-amortecedor com poucos graus de liberdade de tal modo que o corpo biodinâmico seja suficientemente bem representado para o uso em problemas de engenharia (Gaspar, 2015). A interação dinâmica entre o ser humano e sistemas estruturais é definida, segundo Jones et al. (2011), como o fenômeno pelo o qual a combinação de ambas as características dinâmicas – relacionadas à rigidez, massa e amortecimento do homem e da estrutura – sobre a qual ele se encontra resulta em um conjunto particular de novas propriedades dinâmicas.

2.1 Modelo de Força Dura

Este modelo de carregamento foi desenvolvido por Faisca (2003) com base na realização de uma série de testes experimentais. Os resultados destes testes permitiram concluir que a função matemática que melhor se adapta às ações dinâmicas oriundas de atividades humanas de saltos à vontade e ginástica aeróbica é a chamada Função Hanning. A representação matemática deste tipo de carregamento dinâmico é expressa pela Eq.(1).

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

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

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 coeficiente de impacto (K_p), é um coeficiente de majoração da carga, que considera o impacto do salto sobre a estrutura. Enquanto que o parâmetro CD é um coeficiente de ponderação das ações dinâmicas definidas em função da atividade realizada e do número de pessoas que atuam sobre a estrutura. Na Tabela 1 são apresentados os valores dos parâmetros obtidos experimentalmente por Faisca (2003) para representar a atividade de salto à vontade, ginástica aeróbica e torcida. A Figura 1 ilustra a função de carregamento no domínio do tempo e da frequência, considerando um indivíduo com massa de 79,8kg e adotando para os parâmetros CD, K_p e t_c os seguintes valores: CD=1, $K_p=3,27$ e $t_c=0,32$.

Tabela 1. Parâmetros utilizados na função de carregamento (Faisca, 2003)

Atividades	T (s)	T_c (s)	K_p
Saltos à vontade	$0,44 \pm 0,15$	$0,32 \pm 0,09$	$3,17 \pm 0,58$
Ginástica aeróbica	$0,44 \pm 0,09$	$0,34 \pm 0,09$	$2,78 \pm 0,60$
Show/Torcida	$0,37 \pm 0,03$	$0,33 \pm 0,09$	$2,41 \pm 0,51$

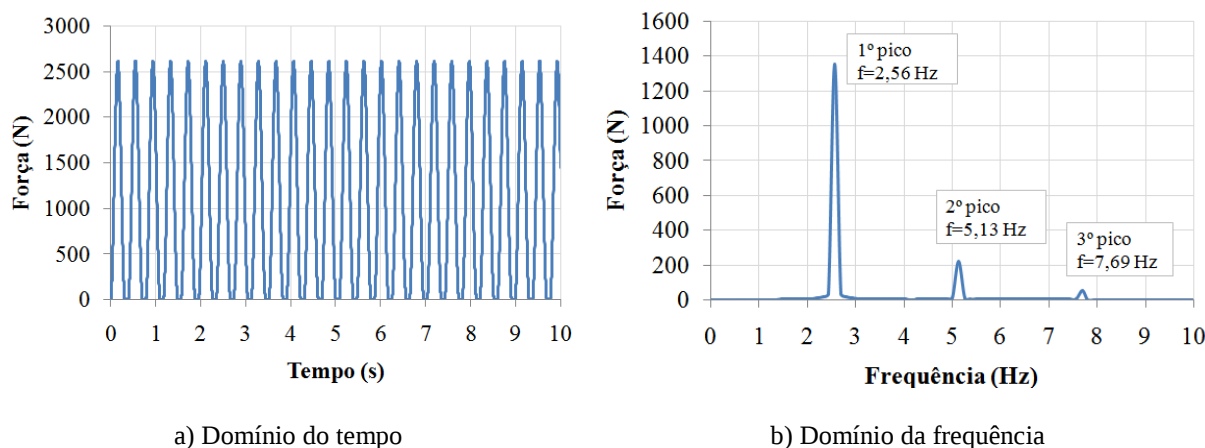


Figura 1. Funções de carregamento no domínio do tempo e da frequência

2.2 Modelagem Biodinâmica

A modelagem biodinâmica do carregamento representa uma forma mais realista de modelagem do carregamento, em relação à “força dura”, que é a maneira mais usual utilizada para a análise dinâmica de estruturas. Para a aplicação da modelagem biodinâmica neste trabalho, a interação ser humano-estrutura considera o emprego de sistemas do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL).

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

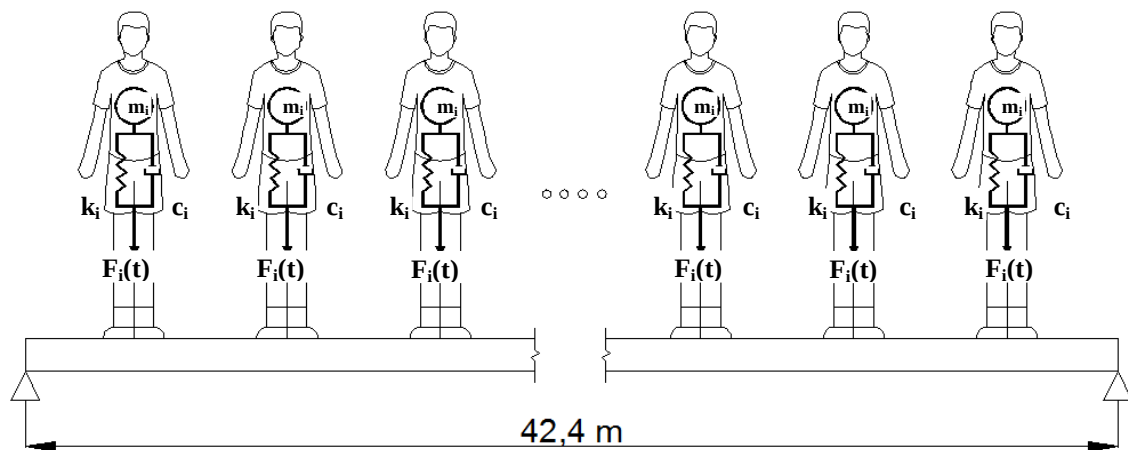


Figura 2. Representação genérica das pessoas modeladas como sistemas biodinâmicos com 1GL

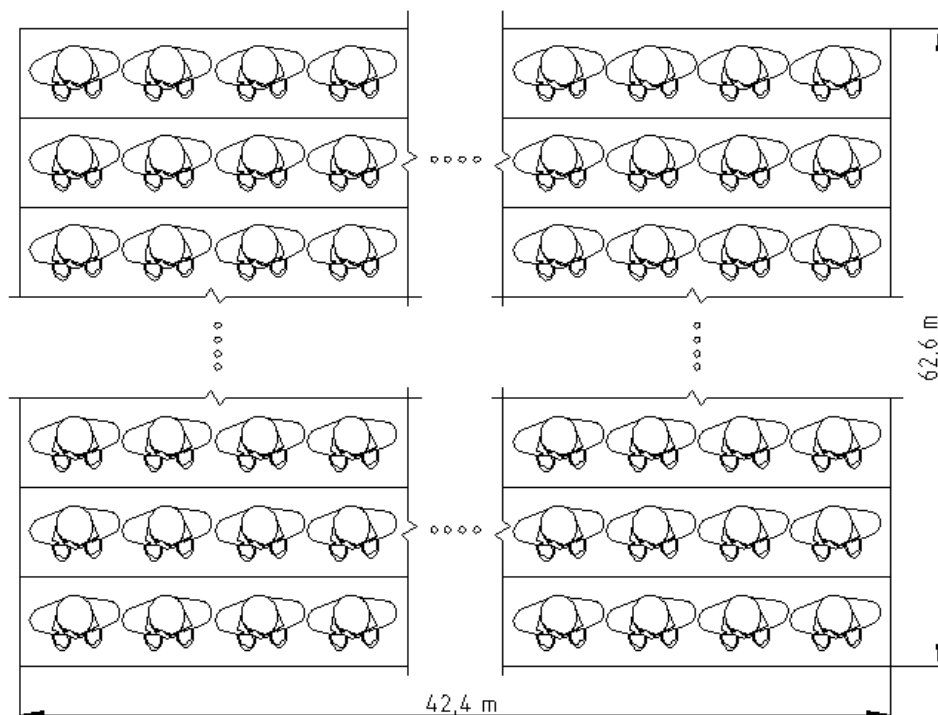


Figura 3. Vista superior da das pessoas modeladas como sistemas biodinâmicos com 1GL

Cabe ressaltar que os dados obtidos durante a prática da atividade rítmica, foram registrados pelo sistema de aquisição de dados ADS-2002, fabricado pela LYNX Tecnologia Eletrônica LTDA, utilizando-se dois diferentes tipos de acelerômetros, os resistivos Kyowa e os capacitivos Dytran. Um metrônomo foi utilizado para controlar o salto das pessoas sobre a estrutura (Fig. 4a). O metrônomo foi conectado a uma caixa acústica para produzir pulsos sonoros de duração regular, de maneira a estimular e coordenar o salto do ser humano. A unidade deste dispositivo é o “bpm” (batidas por minuto), e cada “batida” sonora equivale ao contato do ser humano sobre a estrutura. Nestes ensaios experimentais foram utilizadas placas com acelerômetros acopladas ao centro de massa do ser humano (Fig.4b) envolvido nos testes.

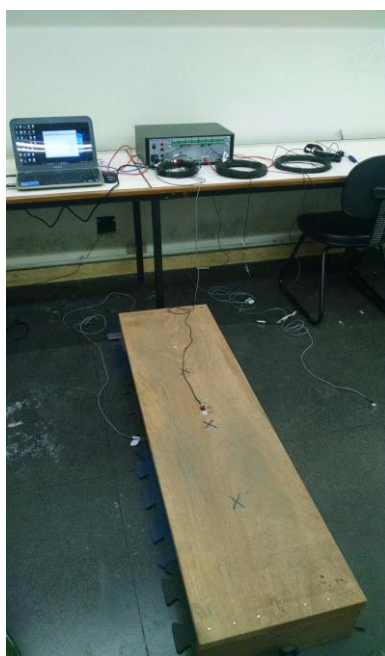
Em relação aos testes experimentais foram utilizadas 32 pessoas praticando atividade humana rítmica (saltos à vontade) na frequência de 2,56Hz. Nesta investigação foram adotados, inicialmente, apenas os dados relativos ao ser humano que apresentou maior sincronismo nos experimentos realizados com a frequência de 2,56Hz, o qual possui massa de 79,8kg. As Figuras 4c e 4d ilustram os testes experimentais desenvolvidos, onde a Fig.4c exibe a plataforma empregada e os acelerômetros, além do sistema de aquisição de dados e a Fig.4d apresenta uma pessoa saltando sobre a referida plataforma. Em seguida, a Figura 5 apresenta os gráficos de aceleração (Figs. 5a e 5b), velocidade (Figs. 5c e 5d) e deslocamento (Figs. 5e e 5f) no domínio do tempo e da frequência. Destaca-se que as acelerações foram coletadas experimentalmente e a velocidade e o deslocamento foram obtidos via integração do sinal experimental da aceleração. Cabe ressaltar que filtros do tipo “*passa-alta*” e “*passa-baixa*” foram utilizados para a filtragem (limpeza) dos sinais das acelerações, velocidades e deslocamentos [$0,5 \text{ Hz} < f_s < 10 \text{ Hz}$; f_s : frequência do sinal].



a) Metrônomo conectado a uma caixa acústica



b) Placa com acelerômetro acoplado ao indivíduo

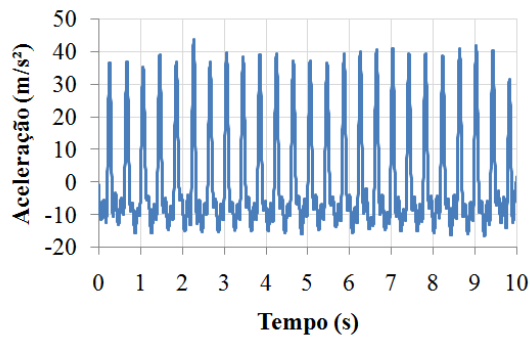


c) Plataforma para realização dos testes experimentais

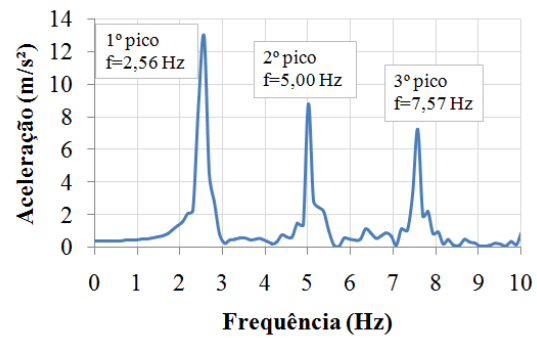


d) Pessoa saltando sobre a plataforma

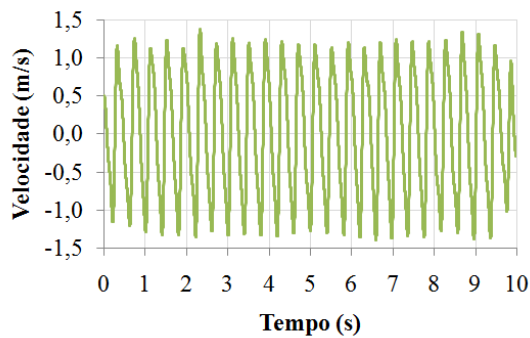
Figura 4. Testes experimentais



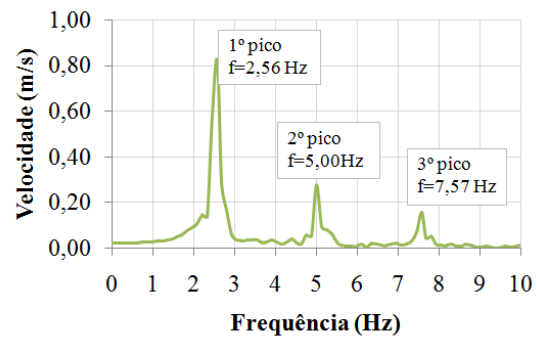
a) Aceleração no domínio do tempo



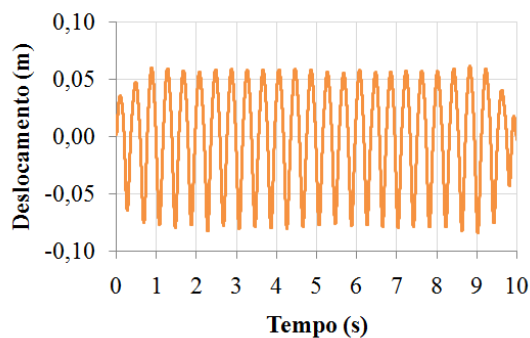
b) Aceleração no domínio da frequência



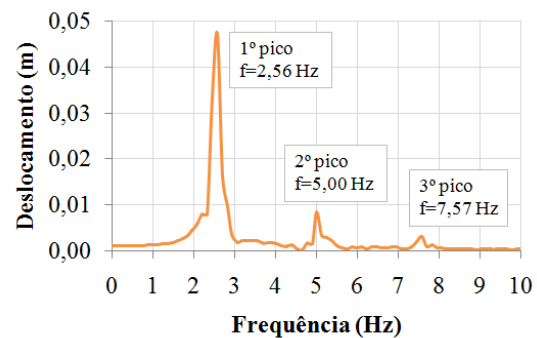
c) Velocidade no domínio do tempo



d) Velocidade no domínio da frequência



e) Deslocamento no domínio do tempo



f) Deslocamento no domínio da frequência

Figura 5. Aceleração, velocidade e deslocamento: domínio do tempo e domínio da frequência

As características dinâmicas humanas (massa, rigidez e amortecimento) podem sofrer variações em função do tipo da atividade humana rítmica praticada, do tempo que as pessoas permanecem em contato com a estrutura durante a prática da atividade, da quantidade de pessoas que estão praticando a atividade, além do tipo de estrutura onde a atividade está sendo praticada. Assim sendo, neste trabalho de pesquisa, a determinação das características dinâmicas das pessoas foi realizada a partir da resolução de um problema tradicional de otimização, via uso do programa MATLAB. Para tal, foram desenvolvidas duas metodologias de análise distintas: o primeiro método consiste em solucionar o sistema de equações de aceleração e a segunda metodologia de análise tem como base o emprego dos algoritmos genéticos (AG).

2.2.1 Método I: Equação de Aceleração

Este método utilizado para a obtenção das características dinâmicas das pessoas é o método que utiliza a função “*fsolve*” do programa MATLAB. Este método consiste em resolver um sistema de equações onde os parâmetros de entrada estão associados aos valores dos três primeiros picos do espectro de acelerações, os valores dos três primeiros picos do espectro da força e os valores das frequências angulares correspondentes (Da Silva, 2011). O sistema de equações tem como parâmetros de saída a massa, rigidez e amortecimento do ser humano (Modelo Biodinâmico: S1GL), correspondente à atividade humana rítmica. O referido sistema de equações [Eq. (3)] é obtido com base na manipulação da equação de aceleração [Eq.(2)].

$$A(\omega) = \frac{\omega^2 \cdot P_{GRO}(\omega)}{|k - \omega^2 \cdot m + j \cdot \omega \cdot c|} \quad (2)$$

$$A_i - \frac{\omega_i^2 \cdot P_i}{|k - \omega_i^2 \cdot m + j \cdot \omega_i \cdot c|} = 0 \quad (3)$$

Onde:

$A(\omega)$	:	amplitude da aceleração da resposta dinâmica do S1GL (m/s ²);
ω	:	frequência angular (rad/s);
P_{GRO}	:	amplitude da força (N);
k	:	rigidez (N/m);
m	:	massa (kg);
c	:	coeficiente de amortecimento (Ns/m);
A_i	:	amplitude da aceleração correspondente ao harmônico i (m/s ²);
ω_i	:	frequência angular correspondente ao harmônico i (rad/s);
P_i	:	amplitude da força correspondente ao harmônico i (N).

Destaca-se que o espectro de acelerações utilizado para dar respaldo a esta primeira metodologia de análise foi obtido com base no desenvolvimento dos testes experimentais realizados em laboratório. De outra maneira, cabe ressaltar que para o espectro da força dinâmica (excitação dinâmica) foi adotada a função matemática desenvolvida por Faisca (2003) [(Eq.(1)].

2.2.2 Método II: Algoritmo Genético

Este processo de otimização também é resolvido utilizando o programa MATLAB. Deste modo, para a determinação das características dinâmicas das pessoas com base no uso dos algoritmos genéticos (AG), faz-se necessária a solução da equação de equilíbrio dinâmico [Eq.(4)]. Resumidamente, os algoritmos genéticos consistem no uso da teoria clássica da evolução natural, que consiste basicamente na seleção de “indivíduos” de uma determinada população, de forma aleatória, escolhidos como “pais”, de maneira a gerarem “filhos” para uma próxima “geração”.

No que tange a utilização dos AGs, no âmbito deste trabalho de pesquisa, foram considerados limites inferiores e limites superiores exclusivamente para a definição das

características dinâmicas humanas de amortecimento (c) e rigidez (k) das pessoas, tendo em mente que o valor da massa do indivíduo escolhido para o presente estudo ($m=79,8\text{kg}$) foi obtido em laboratório [peso da pessoa]. Para tal, foram empregadas as Eqs. (5) e (6) para o cálculo destas grandezas [c e k]. Os valores de aceleração, velocidade e deslocamento necessários para a solução da Eq. (4) foram obtidos a partir dos testes experimentais realizados em laboratório.

$$F_i(t) = k_i \cdot x_i(t) + c_i \cdot v_i(t) + m_i \cdot a_i(t) \quad (4)$$

$$k_i = 4\pi^2 f_i^2 m_i \quad (5)$$

$$c_i = 4\pi m_i \xi f_i \quad (6)$$

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^2);
f_i	:	frequência do indivíduo i (Hz);
ξ	:	taxa de amortecimento igual a 0,25.

2.2.3 Comparação entre os valores obtidos

A Tabela 2 relaciona os parâmetros obtidos ao longo da análise para as características dinâmicas humanas, após os processos de otimização realizados mediante emprego do programa MATLAB, utilizando-se as duas metodologias de análise descritas nos itens 2.2.1 [Aceleração] e 2.2.2 [Algoritmo Genético].

Tabela 2. Valores obtidos para as características dinâmicas das pessoas

Características dinâmicas	Método I	Método II	Δ (%)
m (massa)	58,05 kg	29,43 kg	49,30
k (rigidez)	16.093 N/m	29.537 N/m	45,50
c (amortecimento)	361,84 Ns/m	369,37 Ns/m	2,04

Observa-se através dos resultados presentes na Tabela 2 que as diferenças entre os valores dos parâmetros obtidos pelos dois métodos são significativas. Esses valores de massa, rigidez e amortecimento encontrados nestes dois métodos (Métodos I e II), Tabela 2, foram posteriormente implementados na equação de equilíbrio dinâmico [Eq.(4)], em conjunto com os valores de aceleração, velocidade e deslocamento obtidos nos testes experimentais e assim foi possível encontrar o espectro da força produzida pelas pessoas, no domínio do tempo e da frequência.

Objetivando verificar a validade dos parâmetros determinados, os espectros obtidos mediante a utilização das duas metodologias de análise foram comparados com a função matemática do modelo matemático desenvolvido anteriormente por (Faisca, 2003) (Função Hanning), com base na utilização do coeficiente de correlação de Pearson (CCP), conforme ilustrado a seguir nas Figs. 6 e 7. Novamente, cabe destacar que filtros do tipo “passa-alta” e “passa-baixa” foram utilizados para a filtragem (limpeza) dos sinais das forças [$0,5 \text{ Hz} < f_s < 10 \text{ Hz}$; f_s : frequência do sinal].

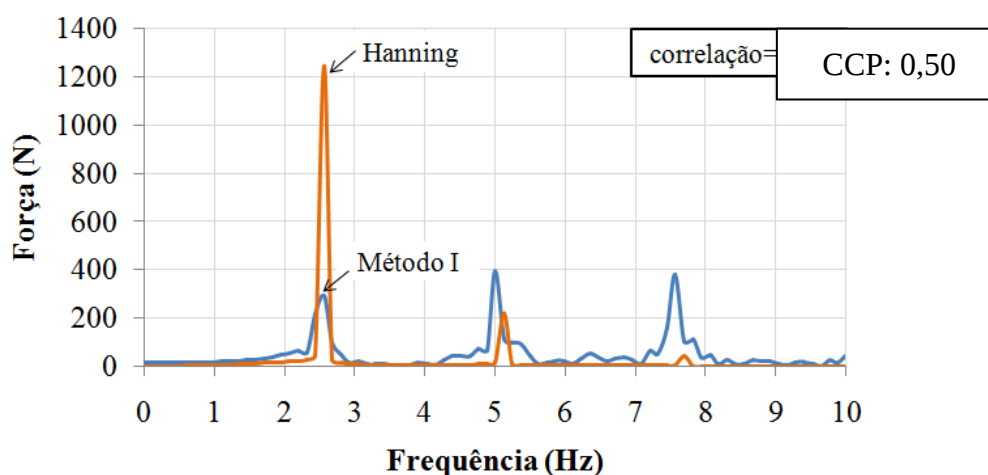


Figura 6. Comparação entre os espectros da função do método I e a função Hanning

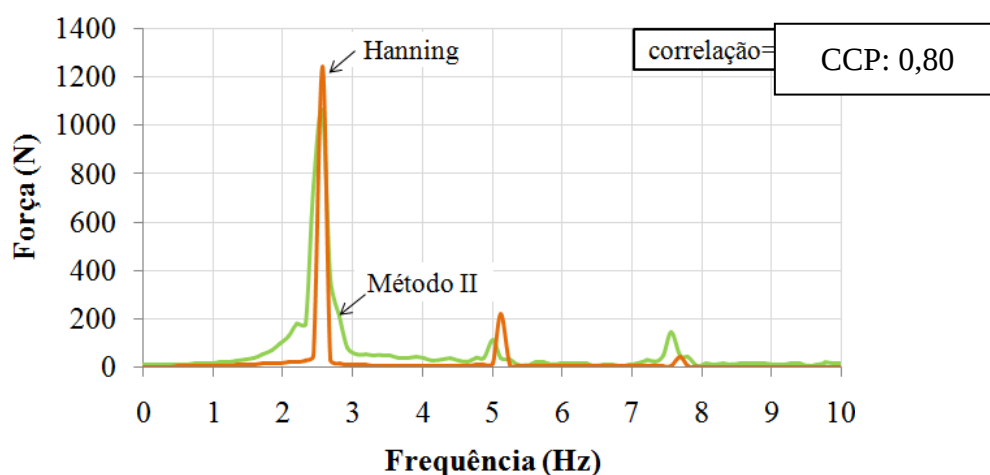


Figura 7. Comparação entre os espectros da função do método II e a função Hanning

Com base na análise dos espectros (Figs. 6 e 7), pode-se verificar que existe uma razoável aproximação entre a função oriunda do Método II [Algoritmo Genético] e a função matemática proposta por Faisca (Faisca, 2003). De outra maneira, tal situação não ocorre quando a comparação é realizada com o Método I [Aceleração]. Tal fato pode ter ocorrido por esta comparação estar sendo realizada entre funções provenientes de resultados experimentais [Métodos I e II] e outra função de carregamento dinâmico distinta, proveniente de outra metodologia de análise com base em formulação matemática proposta por Faisca (Faisca, 2003) [Função Hanning].

3 MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO

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 (Lima, 2013). A Fig. 8 apresenta a planta baixa global do Estádio, com o setor 4G em destaque, a Fig. 9 ilustra o corte radial da estrutura da arquibancada do estádio.

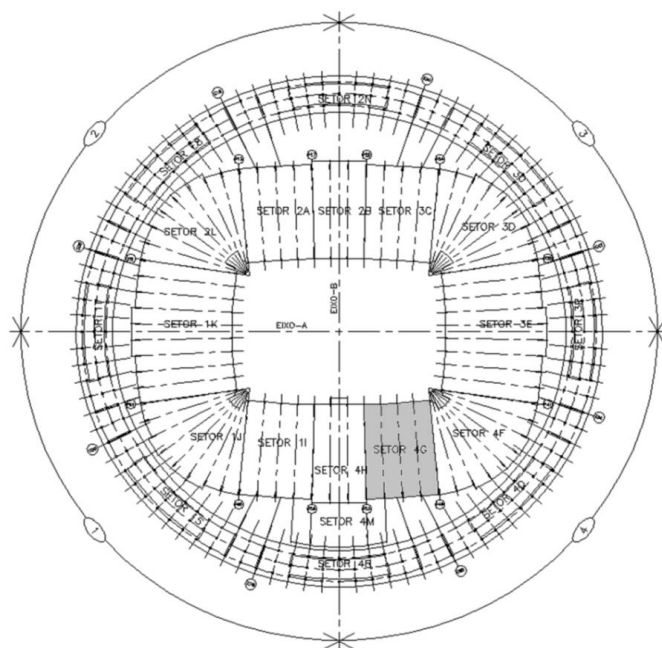


Figura 8. Planta do Estádio (Lima, 2013)

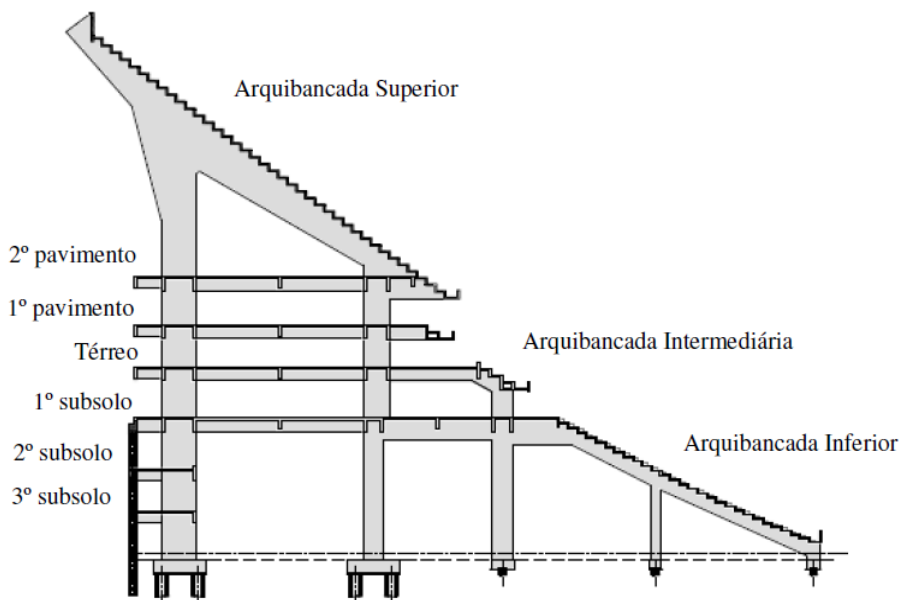


Figura 9. Corte do Estádio (Lima, 2013)

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.

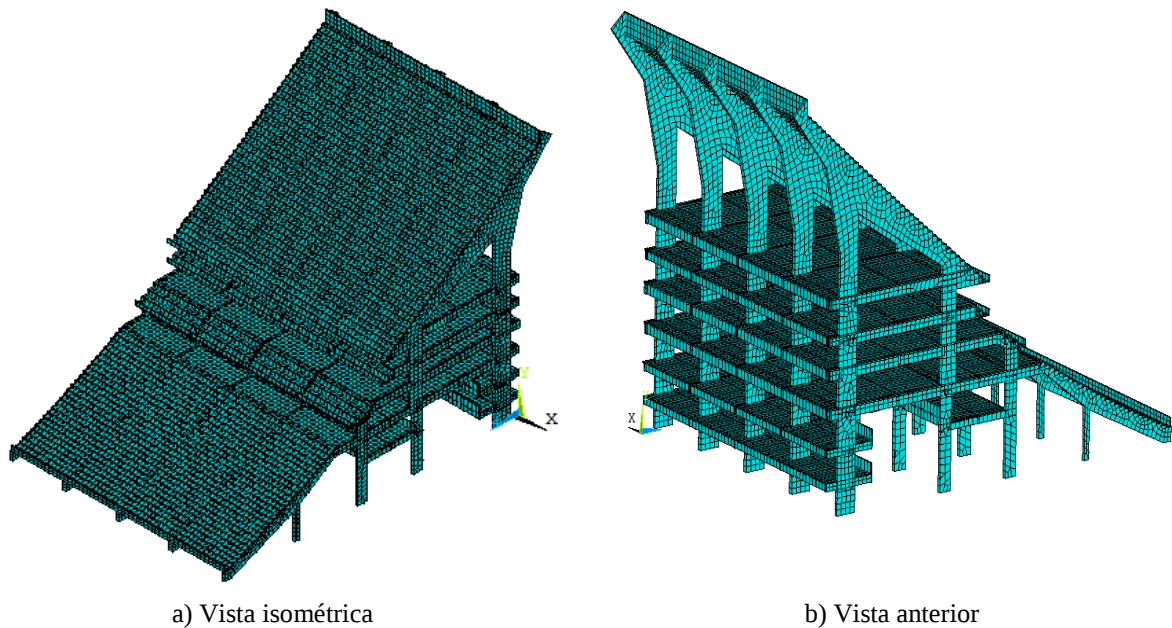
No que diz respeito às características físicas dos materiais empregados no modelo estrutural em estudo, o concreto possui módulo de elasticidade longitudinal secante (E_{cs}) de 30GPa, coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,2 e densidade (γ_c) de 25kN/m³. O intervalo de integração (Δt) utilizado nas análises 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 como sendo igual a 1% (Campista, 2015), conforme valores fornecidos pela ISO 10137 (2007) e pelo SCI (2009).

4 MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS

Para a modelagem numérica-computacional das arquibancadas de um dos setores do Estádio Nacional de Brasília, foram empregadas técnicas básicas de discretização, mediante o uso do programa computacional ANSYS (2007). O programa ANSYS (2007) 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 ANSYS (2007). Enquanto que para as vigas internas foi utilizado o elemento tridimensional BEAM44 ANSYS (2007). O elemento finito SHELL63 ANSYS (2007) é um elemento de casca, definido por quatro nós e considera efeitos de membrana e/ou de flexão, este elemento possui seis graus de liberdade por nó, sendo três translações e três rotações associadas às direções x, y e z. O elemento BEAM44 ANSYS (2007) é um elemento uniaxial, tridimensional, composto por dois nós, possuindo seis graus de liberdade por nó, sendo três translações e três rotações associadas às direções x, y e z, este elemento permite a utilização de diferentes geometrias nas extremidades opostas da barra.

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 30.712 nós, 54.275 elementos finitos de casca SHELL63 ANSYS (2007), 2.218 elementos finitos de viga BEAM44 ANSYS (2007) e possui 329.514 graus de liberdade. A Fig. 10 apresenta o modelo em elementos finitos das arquibancadas investigadas neste trabalho de pesquisa.



a) Vista isométrica

b) Vista anterior

Figura 10. Vistas do modelo em elementos finitos: isométrica e anterior

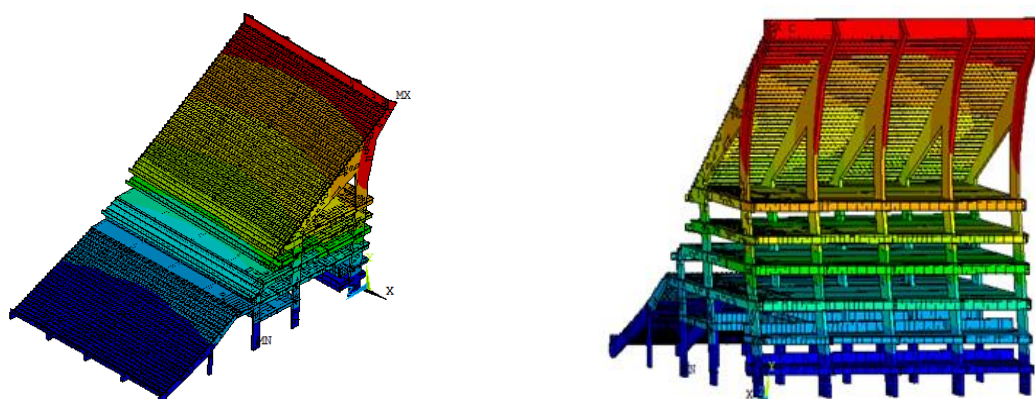
5 FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO

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 (2007).

Uma análise modal foi realizada para o cálculo das frequências naturais (autovalores) e respectivos modos de vibração (autovetores) do sistema, de modo a verificar o comportamento dinâmico da estrutura (vibração livre). Em seguida, a Tabela 3 apresenta os valores das 14 primeiras frequências naturais e as Figs. 11 a 14 apresentam os modos de vibração mais significativos para avaliação do efeito das ações dinâmicas (vibração forçada).

Tabela 3. Frequências Naturais do modelo estrutural

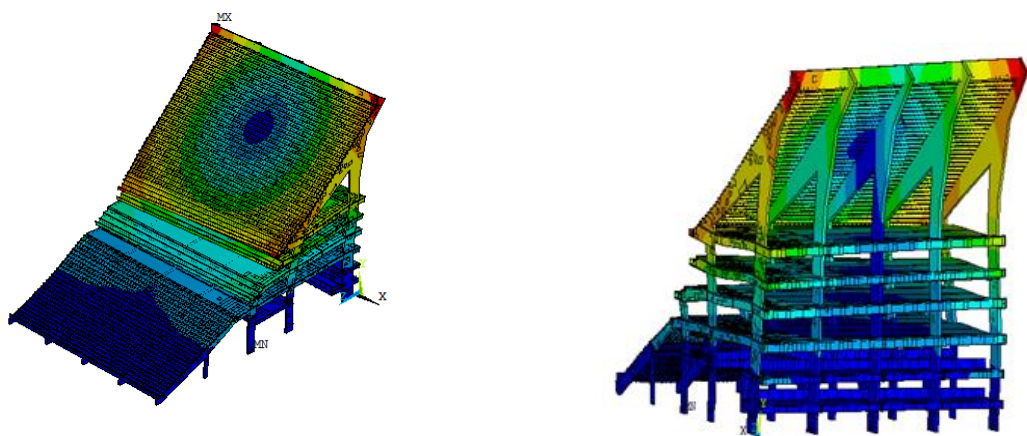
Frequências f_{0i} (Hz)	Frequências da estrutura investigada	Frequências f_{0i} (Hz)	Frequências da estrutura investigada
f_{01}	0,96	f_{08}	5,69
f_{02}	2,27	f_{09}	5,73
f_{03}	2,45	f_{10}	6,88
f_{04}	2,81	f_{11}	7,00
f_{05}	5,09	f_{12}	7,18
f_{06}	5,50	f_{13}	7,34
f_{07}	5,55	f_{14}	7,60



a) Vista isométrica frontal

b) Vista isométrica anterior

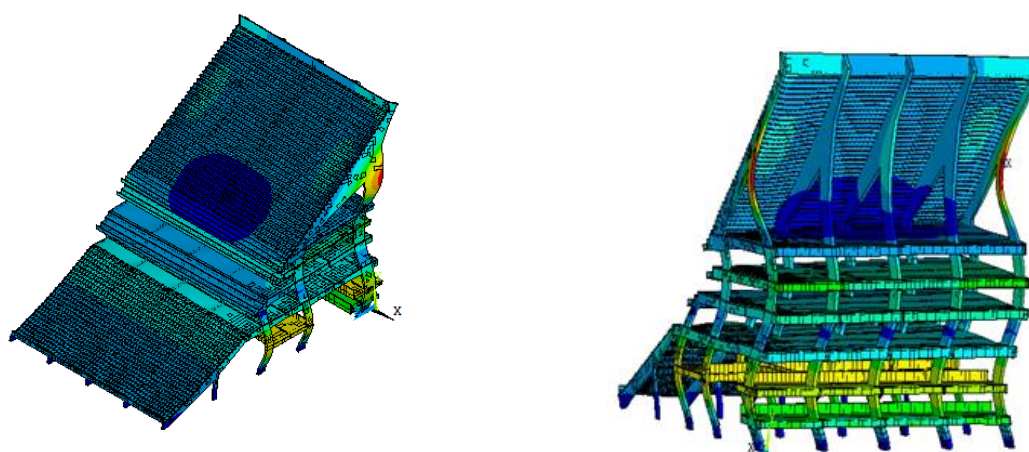
Figura 11. 1º Modo de vibração ($f_{01}=0,96$ Hz)



a) Vista isométrica frontal

b) Vista isométrica anterior

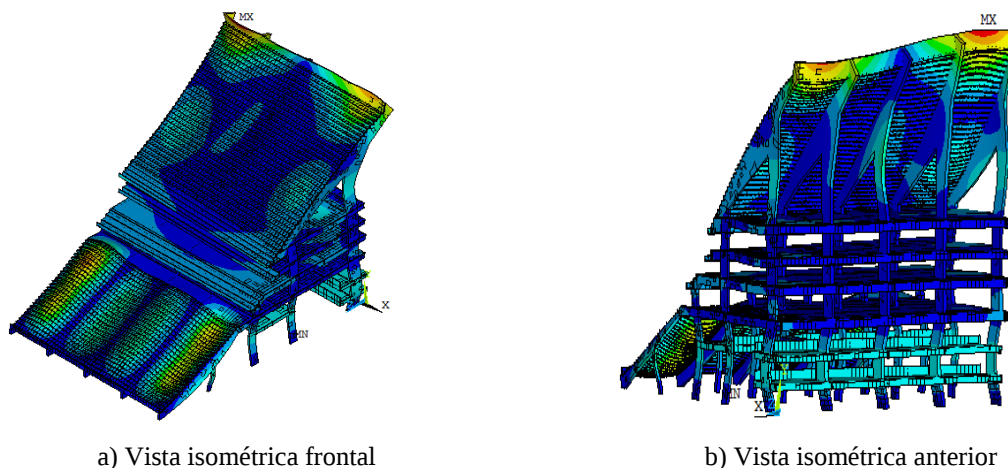
Figura 12. 3º Modo de vibração ($f_{03}=2,45$ Hz)



a) Vista isométrica frontal

b) Vista isométrica anterior

Figura 13. 5º Modo de vibração ($f_{05}=5,09$ Hz)



a) Vista isométrica frontal

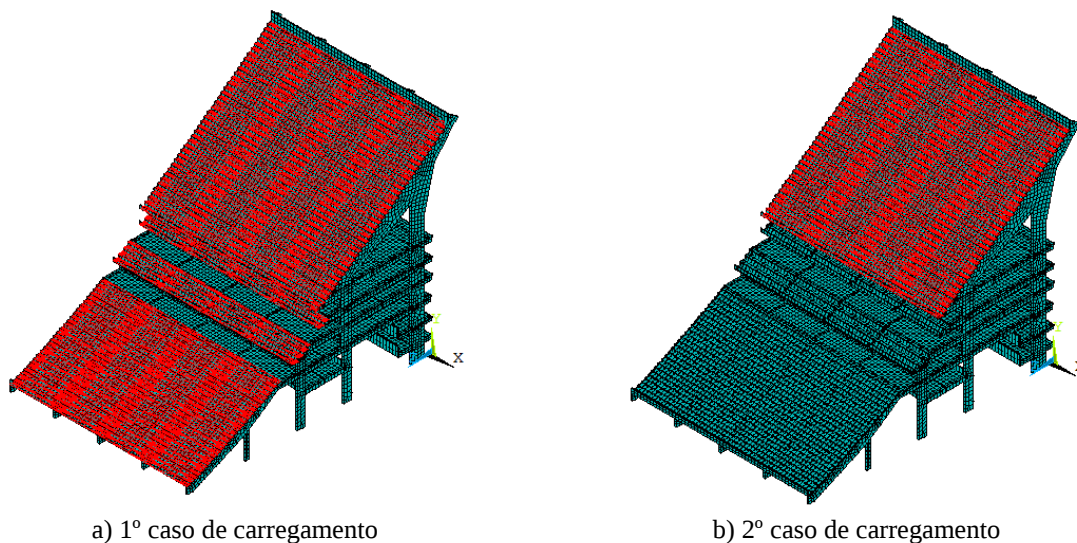
b) Vista isométrica anterior

Figura 14. 14º Modo de vibração ($f_{14}=7,60$ Hz)

6 ANÁLISE DA RESPOSTA DINÂMICA DA ESTRUTURA

No que se refere à análise dinâmica da estrutura foi adotada a frequência de 2,56Hz como frequência característica do carregamento, por ser um valor próximo ao valor da frequência relacionada ao terceiro modo de vibração do modelo estrutural investigado. Foram estudados dois diferentes casos de carregamento, o primeiro caso com 100% de ocupação em todas as arquibancadas (superior, inferior e camarote) e o segundo caso de carregamento com 100% de ocupação somente na arquibancada superior, como apresentado na Fig. 15.

Em relação à escolha dos pontos de leitura da resposta estrutural dinâmica das arquibancadas, foram escolhidos os pontos com maiores amplitudes modais. O ponto 1 se encontra na extremidade do último degrau da arquibancada superior, o ponto 2 se encontra no centro do último degrau da arquibancada superior, o ponto 3 se encontra no meio do primeiro vão (entre as vigas), na altura do pilar, e o ponto 4 se encontra na extremidade do primeiro degrau da arquibancada superior, como ilustrado pela Fig. 16.



a) 1º caso de carregamento

b) 2º caso de carregamento

Figura 15. Casos de carregamento estudados

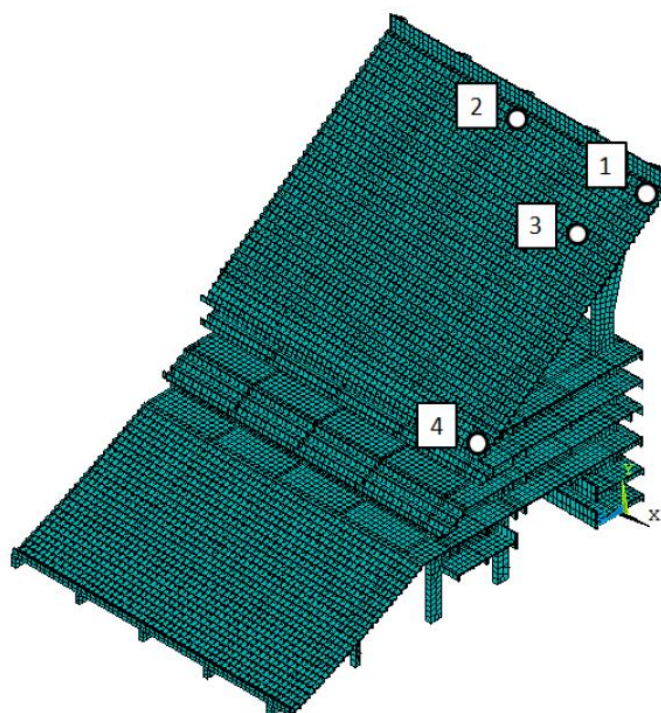


Figura 16. Posicionamento dos pontos de análise

Com relação aos critérios de avaliação do conforto humano, existem divergências entre os autores quanto aos valores limites de aceitação para atividades humanas rítmicas. Alguns pesquisadores têm estabelecido limites para os valores aceitáveis com relação ao conforto humano. Neste estudo será utilizado o limite estabelecido pelo Murray et al. (2003), que é igual a $0,5\text{m/s}^2$ (5%g). A Tabela 4 exibe os resultados (acelerações) associados às duas situações de carregamento dinâmico investigadas neste trabalho de pesquisa, com base no emprego dos modelos biodinâmicos. Em seguida, as Figs. 17 e 18 apresentam a resposta estrutural dinâmica (acelerações), de modo genérico, no que tange ao primeiro caso de carregamento, no domínio do tempo e da frequência.

Tabela 4. Acelerações obtidas nos dois casos de carregamento

Pontos de análise	Acelerações (m/s^2)					
	1º caso de carregamento			2º caso de carregamento		
	Método I	Método II	Diferenças Δ (%)	Método I	Método II	Diferenças Δ (%)
1	0,27	0,38	28,95	0,17	0,22	22,73
2	0,42	0,55	23,64	0,36	0,50	28,00
3	1,06	1,14	7,02	1,05	1,10	4,55
4	0,32	0,39	17,95	0,26	0,35	25,71

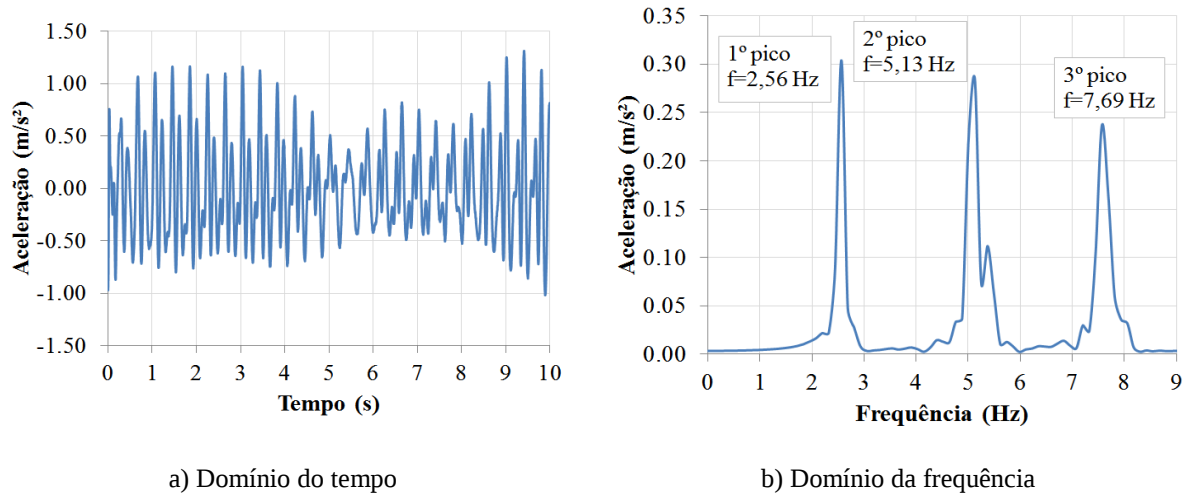


Figura 17. Resposta dinâmica. 1º caso de carregamento. Método I

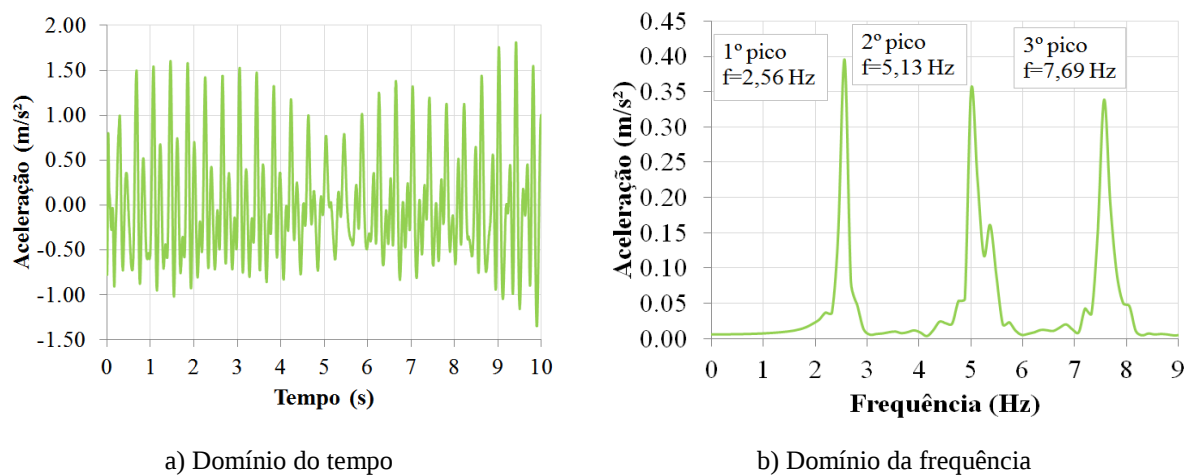


Figura 18. Resposta dinâmica. 1º caso de carregamento. Método II

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4 e, também, Figs. 17 e 18, verifica-se que os valores de acelerações encontrados nos dois casos de carregamento investigados, utilizando-se o Método II [Algoritmo Genético] apresentam valores superiores quando comparados com os valores obtidos quando se utiliza o Método I [Acelerância]. A maior diferença numérica obtida entre os valores [Acelerância versus Algoritmo Genético], encontrados na análise do 1º caso de carregamento (Fig. 15a) ocorre na seção estrutural 1 ($\Delta=28,95\%$), enquanto que para o 2º caso de carregamento (Fig. 15b) tal diferença máxima ocorre no ponto de análise 2 ($\Delta=28\%$).

O valor máximo de aceleração encontrado para o 1º caso de carregamento (Fig. 15a: 100% de ocupação de todas as arquibancadas) foi de $1,06\text{m/s}^2$ [Método I: Acelerância] e de $1,14\text{m/s}^2$ [Método II: Algoritmo Genético], enquanto que o valor máximo de aceleração obtido para o 2º caso de carregamento (Fig. 15b: 100% de ocupação somente na arquibancada superior) foi da ordem de $1,05\text{m/s}^2$ [Método I: Acelerância] e de $1,10\text{m/s}^2$ [Método II: Algoritmo Genético]. Cabe ressaltar que estes valores máximos de aceleração encontrados ao longo das análises ultrapassam o limite recomendado em relação a aceitabilidade de conforto humano [$a_{lim} = 0,5\text{m/s}^2$].

Verifica-se ainda, que para o 1º caso de carregamento (Fig. 15a), o primeiro harmônico do carregamento dinâmico se apresenta mais energético do que os outros harmônicos, portanto é nesse primeiro harmônico que ocorre a maior transferência de energia do sistema. Todavia, em relação ao 2º caso de carregamento (Fig. 15b), quando se utiliza o Método I, o segundo harmônico que se apresenta mais energético e quando se utiliza o Método II é o primeiro harmônico que se apresenta mais energético.

Percebe-se, ainda, a partir da análise das Figs. 17 e 18 e Tabela 4, que a transferência de energia do sistema, no domínio da frequência, no que tange aos múltiplos dos harmônicos da frequência de excitação. Estes picos de ressonância entre os harmônicos da frequência da excitação e as frequências naturais do sistema são os responsáveis pelos valores elevados de acelerações em determinadas situações de carregamento dinâmico, violando os critérios de conforto humano.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de pesquisa investigou o comportamento estrutural das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília quando submetidas a ações dinâmicas humanas (torcida). A análise dinâmica foi desenvolvida através de modelagem numérica-computacional, via método dos elementos finitos, obtendo-se primeiramente os valores das frequências naturais de vibração e posteriormente obtendo-se os valores das acelerações do sistema estrutural através da utilização da modelagem biodinâmica, onde a interação ser humano-estrutura foi modelada numericamente mediante o emprego de sistemas do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL).

Verifica-se com relação à análise das frequências naturais da estrutura, que o valor da frequência fundamental da estrutura ($f_{01}=0,96\text{Hz}$) encontra-se abaixo do valor estabelecido pela norma brasileira NBR 6118 ($f_n > 1,2f_{\text{crítica}}$), que para este tipo de estrutura deve ser no mínimo igual a 9,60Hz (ABNT, 2007). Com relação ao guia prático de projeto do AISC (Murray et al., 2003), a frequência mínima a ser considerada para eventos esportivos deve ser de 6,40Hz, portanto a frequência fundamental do sistema também está abaixo desse valor mínimo recomendado. Percebe-se então que a análise modal realizada na arquibancada revela um indício de que a estrutura possa apresentar problemas relacionados a vibrações excessivas.

A obtenção das características dinâmicas humanas neste trabalho de pesquisa foi realizada a partir de dois diferentes métodos, que tiveram como base a solução de equações através de processos de otimização realizados no programa MATLAB. O Método I se baseou na utilização da função “*fsolve*” do MATLAB para a solução da equação da aceleração, enquanto que o Método II, que também foi realizado no MATLAB, se baseou na solução da equação de equilíbrio dinâmico através da utilização de algoritmos genéticos (AG).

A partir dos resultados encontrados neste trabalho de pesquisa, pode-se verificar que os valores de aceleração encontrados para os dois casos de carregamento, utilizando o Método II apresentam valores maiores quando comparados com os valores obtidos quando se utiliza o Método I. A maior diferença entre os valores encontrados para o 1º caso de carregamento ocorre no ponto de análise 1 ($\Delta=28,95\%$), enquanto que para o 2º caso de carregamento acontece no ponto de análise 2 ($\Delta=28\%$).

Analisando-se os resultados encontrados de forma quantitativa, constata-se que os maiores valores de aceleração encontrados para o 1º caso de carregamento (100% de ocupação de todas as arquibancadas) foram de 1,06m/s² (Método I) e de 1,14m/s² (Método II), enquanto que os maiores valores encontrados para o 2º caso de carregamento (100% de ocupação somente na arquibancada superior) foram de 1,05m/s² (Método I) e de 1,10m/s² (Método II). Todos esses valores ultrapassam o limite recomendado de 0,5m/s².

A partir dos resultados encontrados ao longo deste estudo, ressalta-se a necessidade de um estudo mais aprofundado a respeito da determinação das características dinâmicas das pessoas, tendo em vista que as duas metodologias de análise desenvolvidas [Método I: Aceleração e Método II Algoritmo Genético], utilizadas para a determinação das características dinâmicas dos indivíduos necessitam de parâmetros de entrada que afetam diretamente a solução do problema de otimização; e, portanto, afetam diretamente os valores máximos das acelerações. A realização de mais testes experimentais, com base no emprego de células de carga para a medição da ação dinâmica produzida pelo indivíduo consiste no próximo passo da pesquisa, visando uma melhor calibração dos resultados.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

ANSYS Swanson Analysis Systems, Inc., 2007. 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, UsingFLEXlm v10.8.0.7 build 26147, Customer 00489194.

Associação brasileira de normas técnicas, 2007. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro. 221 p.

Bachmann, H., Ammann. W.J., Deischl, F., Eisenmann, J., Floegl, J., Hirsch, G.H., et al., 1995. Vibration problems in structures - practical guidelines, Birkhäuser, Basel (Switzerland); Institut für Baustatik und Konstruktion.

Campista, D.F., 2015. *Análise dinâmica e estudo de conforto humano das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGEIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

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

Da Silva, F.T., 2011. *Vibrações de passarelas de pedestres na direção vertical considerando modelos biodinâmicos de pessoas caminhando*. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba, UFPB, João Pessoa/PB, Brasil.

Da Silva, F.T., Brito, H.M.B.F., Pimentel, R.L., 2013. Modeling of crowd load in vertical direction using biodynamic model for pedestrians crossing footbridges, *Can. J. Civ. Eng.* 40 1196–1204.

Ellis, B. R.; Ji, T., 2004. The response of structures to dynamic crowd loads. *Digest*, 426.

Faisca, R. G., 2003. *Caracterização de Cargas Dinâmicas Geradas por Atividades Humanas*, 230f. Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, BRASIL.

Gaspar C.M.R. and Silva J.G.S. da., 2015. Influence of the human rhythmic activities modelling on the composite floors dynamic response. *Journal of Civil Engineering and Architecture Research*, 2, 429-438.

International Standard Organization, 2007.ISO 10137.Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations.

Joint Working Group IStructE/DCLG/DCMS, 2008. Dynamic Performance Requirements for Permanent Grandstands Subject to Crowd Action:Recommendations for Management Design and Assessment, Institution of Structural Engineers, London.

Jones C.A; Reynolds P.; Pavic A., 2011. Vibration serviceability of stadia structures subjected to dynamic crowd loads: A literature review, *Journal of Sound and Vibration*, v 330, n 8, p 1531-1566, April 11.

Lima, G. V. F., 2013. *Análise Dinâmica via Método dos Elementos Finitos do Estádio Nacional de Brasília*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

Murray, T.M.; Allen, D.E.; Ungar, E.E., 2003. Steel Design Guide Series 11: Floor Vibrations due to Human Activity. 2nd printing. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction.

Shahabpoor, E., Pavic, A., Racic, V., Zivanovic, S., Macdonald, J., 2016.Effect of group walking traffic on dynamic properties of pedestrian structures, *J. Sound Vib.*

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

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

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