



AVALIAÇÃO DA RESPOSTA ESTRUTURAL DINÂMICA DAS ARQUIBANCADAS DO ESTÁDIO NACIONAL DE BRASÍLIA COM BASE NO EMPREGO DE MODELOS BIODINÂMICOS

Danielle Fernandes Campista

danicampista@yahoo.com.br

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGE CIV/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. *No Brasil, inúmeros estádios de futebol têm sido projetados para suportar as cargas acidentais (provenientes das pessoas) de maneira puramente estática. Com a mudança do comportamento do público em jogos de futebol, através da ação de torcidas organizadas; além da utilização desses estádios para shows e eventos musicais, estas estruturas têm sido submetidas a cargas essencialmente dinâmicas. Assim sendo, alguns desses estádios passaram a apresentar problemas de vibrações excessivas e a consideração efetiva das cargas dinâmicas nos projetos estruturais passou a ser relevante. Desta maneira, este trabalho de pesquisa objetiva o estudo da resposta estrutural dinâmica das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília, no que diz respeito ao conforto humano. A modelagem numérica da estrutura investigada foi realizada através do emprego do programa ANSYS. Para a modelagem das ações dinâmicas foram utilizadas funções matemáticas provenientes de testes experimentais, além do emprego de modelos biodinâmicos, para a simulação do contato entre as pessoas e as arquibancadas. Os resultados obtidos neste estudo são comparados com os valores fornecidos por normas e recomendações de projeto. A análise dos resultados evidencia a importância da análise dinâmica, no que diz respeito ao estudo do conforto humano e a segurança dos usuários deste tipo de estrutura.*

Palavras-chave: *Estádios de futebol, Dinâmica estrutural, Modelos biodinâmicos.*

1. INTRODUÇÃO

A tendência em se projetar estruturas mais esbeltas e flexíveis faz com que ocorra uma redução nos valores das frequências naturais dos modelos estruturais podendo gerar sistemas mais suscetíveis aos carregamentos dinâmicos, pois estes valores de frequências podem ficar cada vez mais próximos das frequências de excitação do carregamento dinâmico. Devido a este motivo, 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 estrutural dinâmico das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília quando submetidas a ações dinâmicas humanas (torcida). O presente estudo será respaldado pelo emprego de dois modelos matemáticos distintos, representativos do carregamento dinâmico, elaborados com base em extensas campanhas experimentais (Faisca, 2003); Ellis e Ji (2004), além do emprego da modelagem biodinâmica, que simula o contato entre as pessoas e as arquibancadas. Desta maneira, pretende-se verificar, mediante o desenvolvimento de um extenso estudo paramétrico, se o sistema estrutural das arquibancadas atende às condições de conforto dos usuários, visto que vibrações excessivas na estrutura podem gerar desconforto humano.

Ao longo deste estudo serão realizadas análises numéricas, obtendo-se inicialmente as frequências naturais e os modos de vibração do sistema estrutural investigado, com o objetivo de caracterizar o comportamento dinâmico das arquibancadas do estádio, para em seguida analisar-se a resposta dinâmica forçada das arquibancadas, realizando uma análise crítica acerca dos valores das acelerações máximas (acelerações de pico), acelerações em rms e valores de doses de vibração (VDV). Os valores destas acelerações são comparados com os valores limites propostos por inúmeras normas e recomendações de projeto CEB 209 (1991); ISO 2631/1 (1997); Ellis e Littler (2004); Smith et al. (2009); Setareh (2012), 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.

A partir dos resultados alcançados nesta investigação, pretende-se alertar os projetistas desse tipo de estrutura para os valores elevados de acelerações encontrados, de acordo com os modelos de carregamento dinâmico utilizados nesta investigação (Faisca, 2003); Ellis e Ji (2004), o que pode representar um indício de que os critérios de projeto utilizados atualmente merecem ser estudados detalhadamente e revistos.

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. Conseqüentemente, as respostas da estrutura, em termos de deslocamento, velocidade e aceleração também irão variar ao longo do tempo.

2.1 Modelo de carregamento I (MC-I)

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 as 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).

Destaca-se que 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. Este coeficiente leva em conta os efeitos de multidão, ou seja, o grau de sincronismo entre as pessoas que atuam sobre a estrutura. Deste modo, a definição deste parâmetro considera possíveis defasagens e variações de ritmo que levariam a redução da intensidade do carregamento. Na Tabela 1 são apresentados os valores dos demais parâmetros obtidos experimentalmente por Faisca (2003) para representar a atividade de salto à vontade, ginástica aeróbica e torcida.

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

Atividades	T (s)	T _c (s)	K _p
Saltos à vontade	0,44 ± 0,15	0,32 ± 0,09	3,17 ± 0,58
Ginástica aeróbica	0,44 ± 0,09	0,34 ± 0,09	2,78 ± 0,60
Show/Torcida	0,37 ± 0,03	0,33 ± 0,09	2,41 ± 0,51

2.2 Modelo de carregamento II (MC-II)

Este modelo de carregamento foi desenvolvido por Ellis e Ji (2004) apud SCI (2009) levando em consideração a carga de multidão existente em estruturas durante a prática de atividades humanas rítmicas. Segundo Ellis e Ji (2004), para a definição dessa carga de multidão, alguns fatores devem ser levados em consideração, entre eles, a densidade da multidão, a área ocupada pela multidão, à faixa de frequência da atividade rítmica praticada, o efeito dinâmico da multidão e a interação homem-estrutura.

Para a determinação da função matemática representativa do carregamento produzido por atividades humanas rítmicas foram elaborados testes experimentais com diferentes grupos compostos por até sessenta e quatro pessoas. Os valores dos coeficientes de Fourier também foram determinados experimentalmente. A representação matemática do carregamento está expressa na Eq.(2).

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

Onde:

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

Para este modelo é necessário considerar a distribuição espacial das pessoas. Existe uma variação nos valores dos coeficientes de Fourier, em função dos diferentes estilos de salto e coordenação das pessoas. Apenas os três primeiros coeficientes de Fourier foram determinados, sendo que estes coeficientes dependem do número de pessoas (v) que pratica a atividade humana rítmica. As Eqs. (3), (4) e (5) expressam o cálculo destes coeficientes.

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

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

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

2.3 Modelo de carregamento III (MC-III)

Foram realizados testes experimentais no Laboratório de Computação da UERJ, com 32 pessoas pulando sobre uma plataforma de madeira, com frequência de excitação controlada por um metrônomo e um aparelho de som (Gaspar, 2016). Com base na realização destes testes experimentais foram obtidas as acelerações oriundas das pessoas, ao longo do tempo. O valor da força dinâmica exercida por cada pessoa foi obtido multiplicando-se sua respectiva massa pela aceleração obtida experimentalmente. Esta força dinâmica experimental foi aplicada diretamente sobre a estrutura analisada. Deste modo, a Eq.(6) representa a formulação utilizada para o cálculo da força experimental neste modelo de carregamento.

$$F_i(t) = m_i a_i(t) \quad (6)$$

Onde:

- $F_i(t)$: representação matemática do carregamento no tempo em (N);
 m_i : massa do indivíduo i ;
 $a_i(t)$: aceleração do indivíduo i no tempo.

2.4 Modelo de carregamento IV (MC-IV)

A interação dinâmica entre o ser humano e sistemas estruturais é definida, segundo Jones et al. (2011), como o fenômeno pelo qual a combinação de ambas as características dinâmicas - relacionadas à rigidez, massa e amortecimento do homem e da estrutura - sobre a qual ele se encontra resulta em um conjunto particular de novas propriedades dinâmicas. 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; Gaspar, 2016). Em seguida, as Figs. 1 e 2 apresentam uma representação genérica da modelagem realizada com base no emprego dos modelos biodinâmicos.

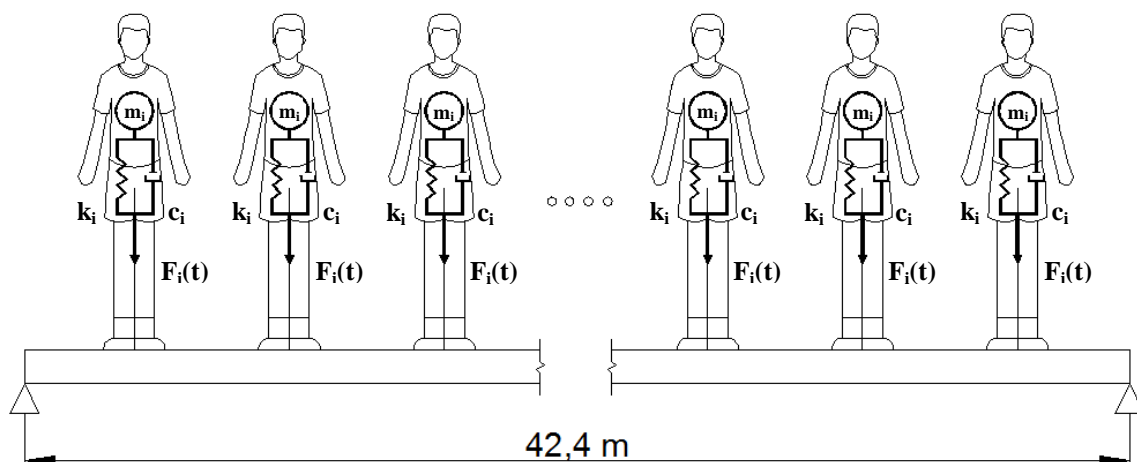


Figura 1. Representação genérica das pessoas modeladas como sistemas biodinâmicos com 1GL

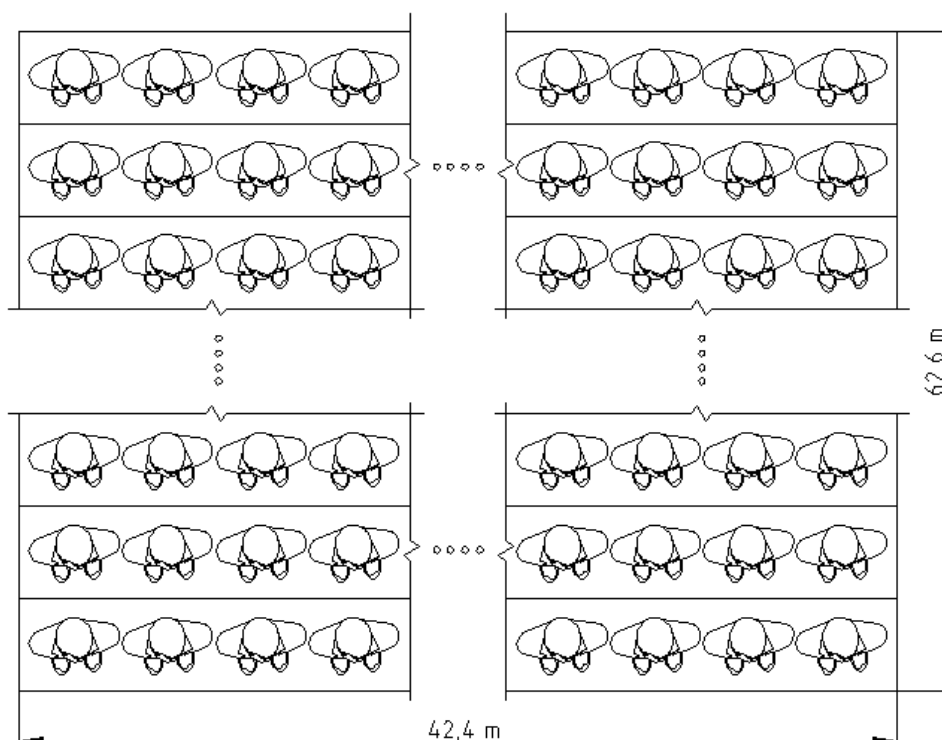


Figura 2. Vista superior da representação genérica das pessoas modeladas como sistemas biodinâmicos com 1GL

A modelagem biodinâmica 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 do modelo biodinâmico, a interação dinâmica ser humano-estrutura é simulada com base no uso de sistemas do tipo massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL), onde a força é aplicada diretamente sobre a massa desse sistema. O valor dessa força dinâmica é calculado da mesma forma que no modelo de carregamento MC-III [Eq. (6)]. As características dinâmicas das pessoas foram obtidas a partir do emprego de formulações básicas provenientes da dinâmica estrutural, sendo apresentadas pelas Eqs. (7) e (8).

$$k_i = 4\pi^2 f_i^2 m_i \quad (7)$$

$$c_i = 4m_i \pi \xi f_i \quad (8)$$

Onde:

- k_i : rigidez do indivíduo i ;
- m_i : massa do indivíduo i ;
- c_i : massa do indivíduo i ;
- f_i : frequência do indivíduo i ;
- ξ : taxa de amortecimento, considerada igual a 0,25 (JWG, 2008).

2.5 Comparação entre os modelos de carregamento

As Figs. 3 e 4 apresentam as funções de carregamento utilizadas neste estudo no domínio do tempo e da frequência, respectivamente, para uma frequência de excitação igual a 2,53Hz, com o objetivo de realizar uma comparação entre o comportamento dinâmico dos modelos de carregamento.

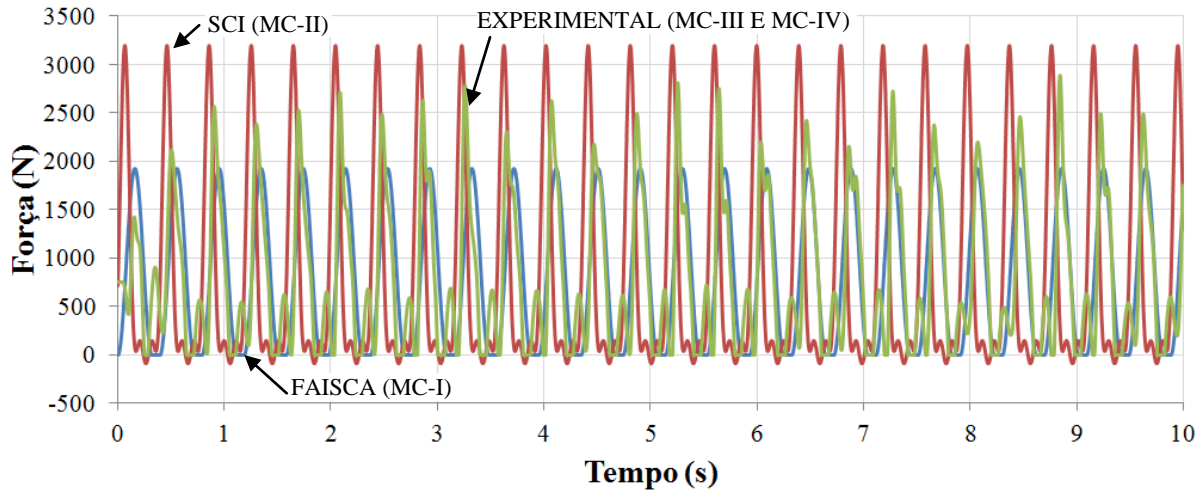


Figura 3 Funções de carregamento. Domínio do tempo

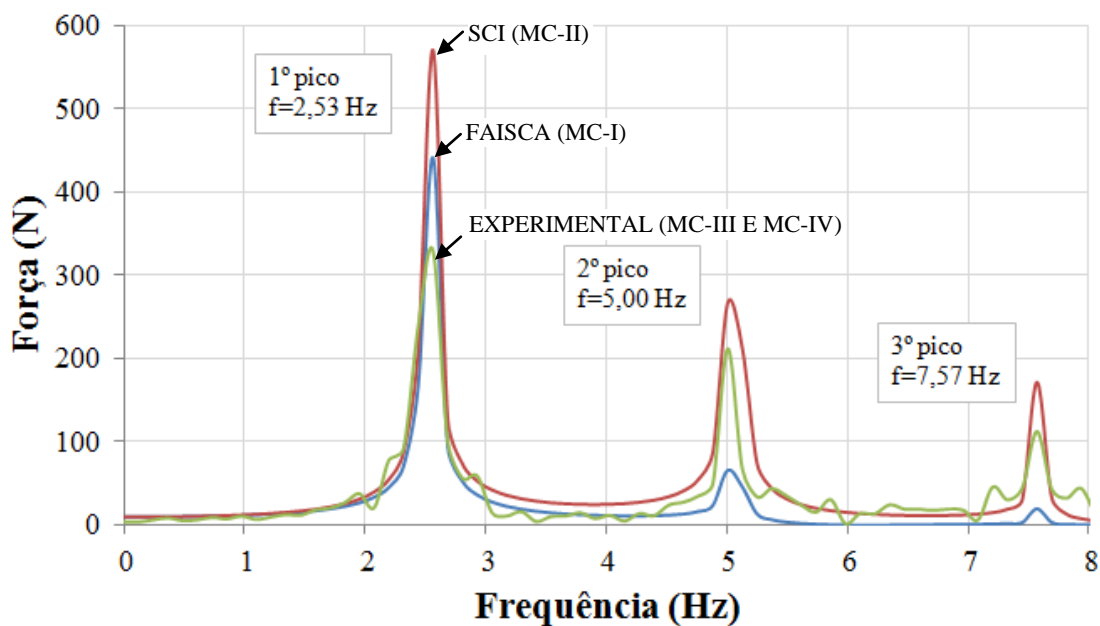


Figura 4. Funções de carregamento. Domínio da frequência

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. 5 apresenta a planta baixa global do Estádio, com o setor 4G em destaque, a Fig. 6 ilustra o corte radial da estrutura da arquibancada do estádio.

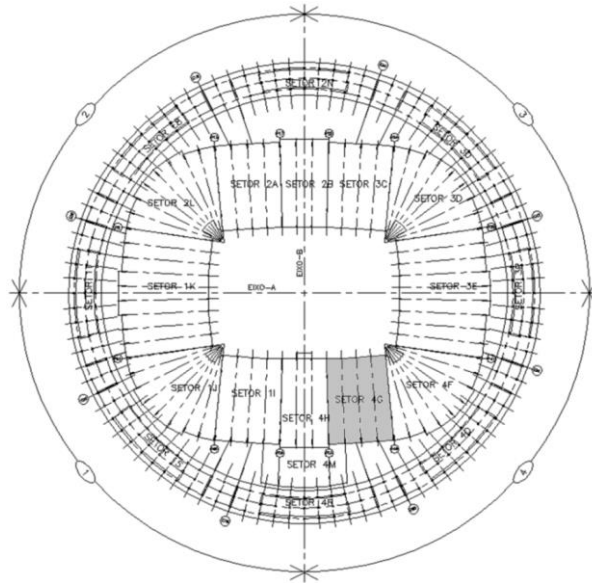


Figura 5. Planta do Estádio (Lima, 2013)

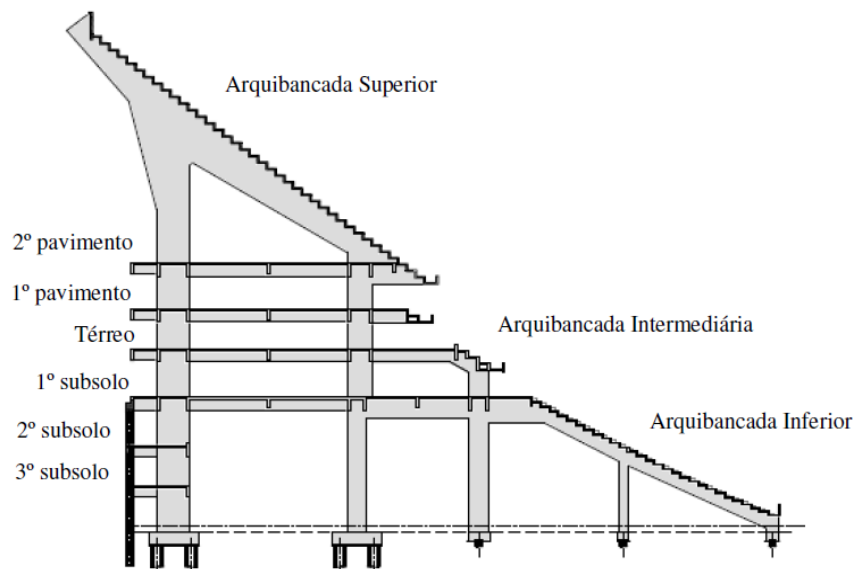


Figura 6. Corte do Estádio (Lima, 2013)

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.

A partir destas 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. As Figs. 7 e 8 apresentam o modelo em elementos finitos das arquibancadas investigadas neste trabalho de pesquisa.

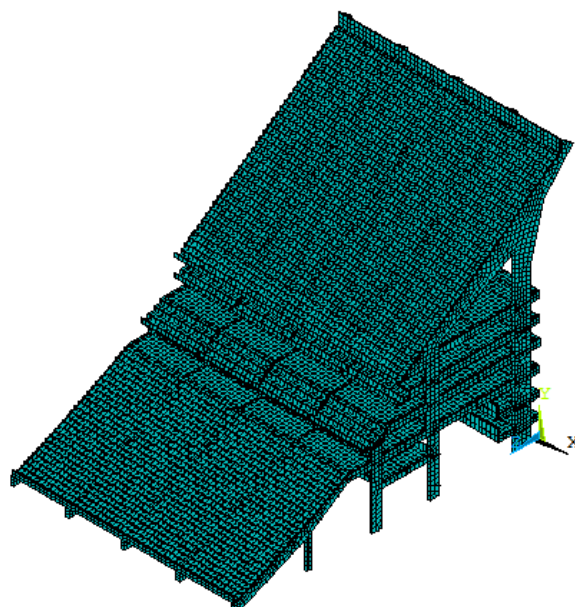
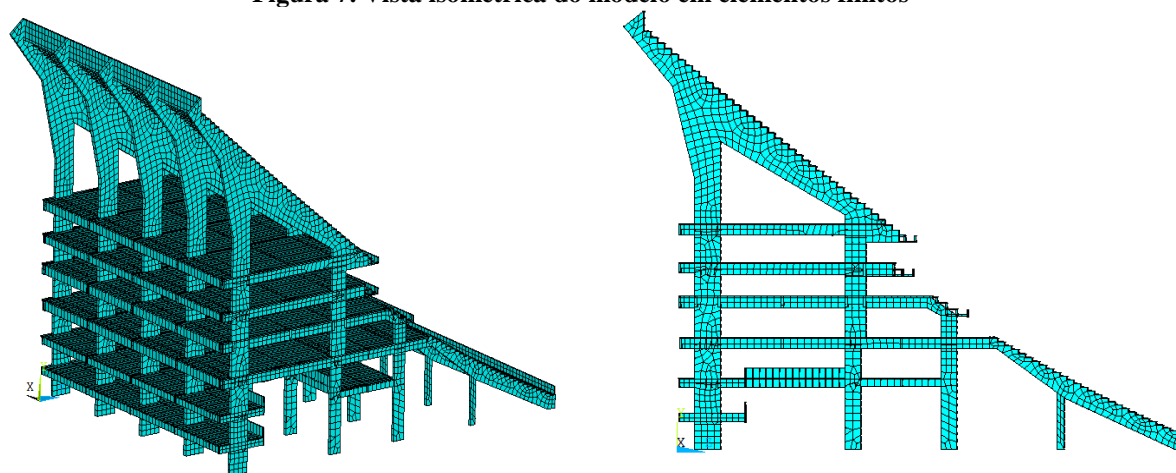


Figura 7. Vista isométrica do modelo em elementos finitos



a) Vista isométrica

b) Vista lateral direita

Figura 8. Vistas do modelo em elementos finitos

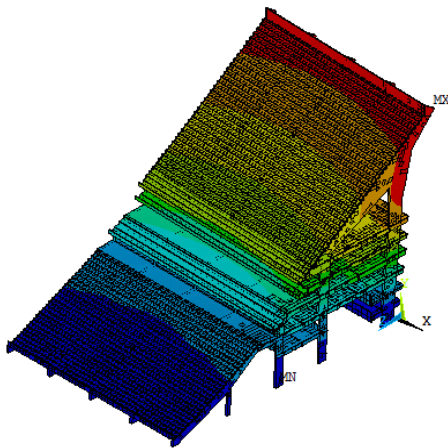
5. FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO

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).

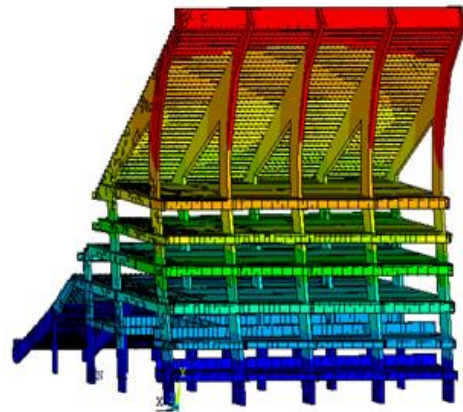
Inicialmente foi realizada uma análise modal para o cálculo das frequências naturais (autovalores) e respectivos modos de vibração (autovetores) do sistema, de modo a verificar o comportamento dinâmico da estrutura (vibração livre). Em seguida, a Tabela 2 apresenta os valores das 14 primeiras frequências naturais e as Figs. 9 a 12 apresentam os modos de vibração mais significativos para avaliação do efeito das ações dinâmicas (vibração forçada).

Tabela 2. Frequências Naturais do modelo estrutural

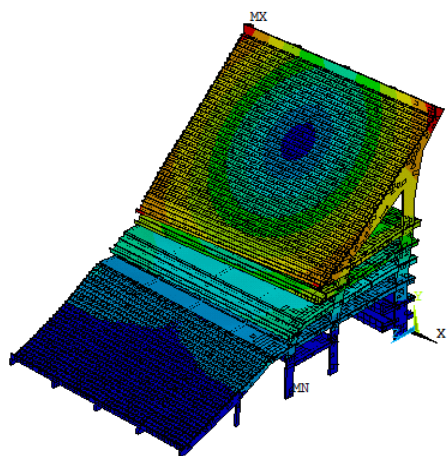
Frequências f_{0i} (Hz)	Frequências da estrutura investigada	Frequências f_{0i} (Hz)	Frequências da estrutura investigada
f_{01}	0,96	f_{08}	5,69
f_{02}	2,27	f_{09}	5,73
f_{03}	2,45	f_{10}	6,88
f_{04}	2,81	f_{11}	7,00
f_{05}	5,09	f_{12}	7,18
f_{06}	5,50	f_{13}	7,34
f_{07}	5,55	f_{14}	7,60



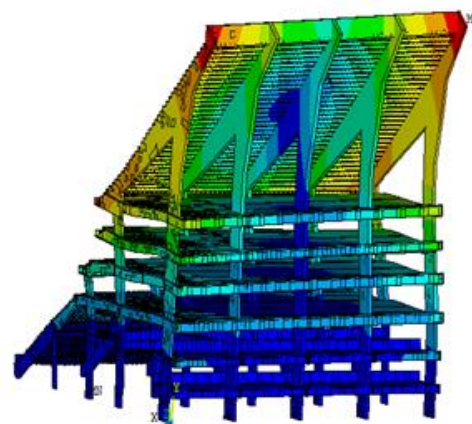
a) Vista isométrica frontal



b) Vista isométrica anterior

Figura 9. 1º Modo de vibração ($f_{01}=0,96$ Hz)

a) Vista isométrica frontal



b) Vista isométrica anterior

Figura 10. 3º Modo de vibração ($f_{03}=2,45$ Hz)

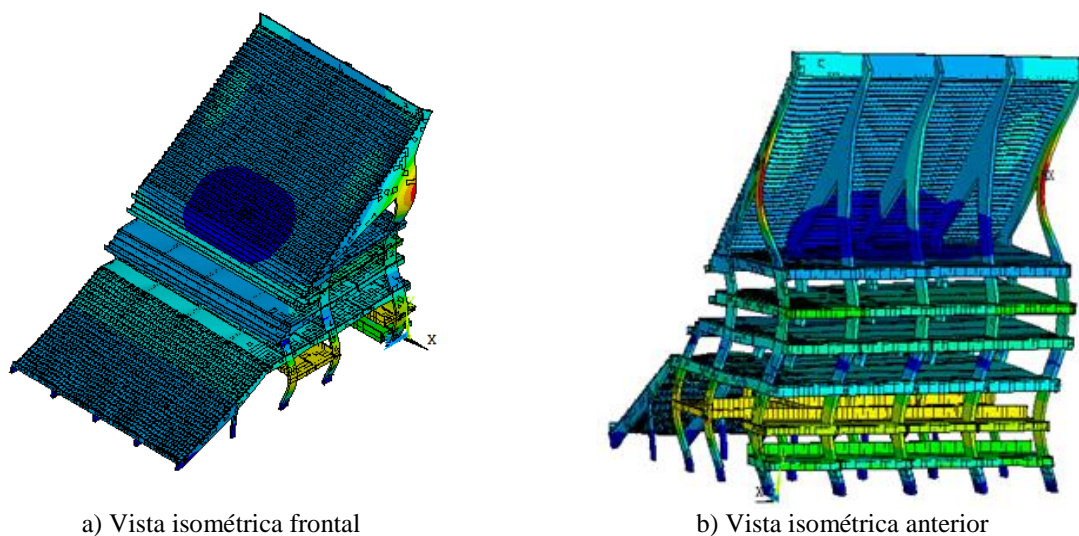


Figura 11. 5º Modo de vibração ($f_{05}=5,09$ Hz)

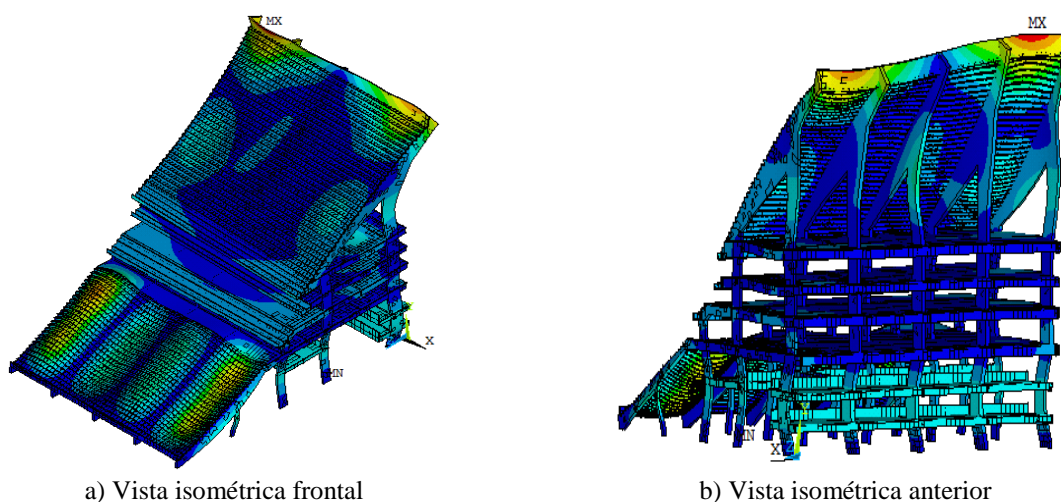


Figura 12. 14º Modo de vibração ($f_{14}=7,60$ Hz)

6. CRITÉRIOS DE CONFORTO HUMANO UTILIZADOS

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, para as acelerações de pico serão utilizados os limites estabelecidos pelo Murray et al. (2003), CEB 209 (1991) e Bachmann e Ammann (1987). O limite utilizado pelo Murray et al. (2003) é igual a $0,5\text{m/s}^2$ (5%g). O valor limite aceitável de aceleração considerado por Bachmann e Ammann (1987) está na faixa de 5%-10%g ($0,5\text{m/s}^2$ - $1,0\text{m/s}^2$). E os limites estabelecidos pelo CEB 209 (1991) estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3. Limites de aceleração (CEB 209, 1991)

Descrição da vibração	Aceleração máxima (m/s ²)
Apenas Perceptível	0,034
Claramente Perceptível	0,10
Desconfortável	0,55
Intolerável	1,80

Com relação aos limites utilizados para as acelerações em *rms*, serão considerados neste trabalho os limites estabelecidos pela ISO 2631/1 (1997) e por Smith et al. (2009). A Tabela 4 apresenta os limites da ISO 2631/1 (1997) e na Tabela 5 estão descritos os limites utilizados por Smith et al. (2009). E para as acelerações em valores de doses de vibração (VDV), os limites considerados serão os estabelecidos por Setareh (2012) e Ellis e Littler (2004), presentes na Tabela 6.

Tabela 4. Limites de aceleração (ISO 2631/1, 1997)

Limites de aceleração em <i>rms</i> (m/s ²)	Reação
< 0,315	Não desconfortável
0,315 – 0,63	Um pouco desconfortável
0,5 – 1,0	Bastante desconfortável
0,8 – 1,6	Desconfortável
1,25 – 2,5	Muito desconfortável
> 2,0	Extremamente desconfortável

Tabela 5. Limites de aceleração em *rms* (Smith et al., 2009)

Limites de aceleração em <i>rms</i> (m/s ²)	Reação
< 0,35	Limite aceitável
0,35 – 1,27	Perturbador
1,27 – 2,47	Inaceitável
> 2,47	Provável condição de pânico

Tabela 6. Limites de aceleração em VDV [Setareh (2012); Ellis e Littler (2004)]

Ellis & Littler (2004)	Setareh (2012)	Reação das pessoas
VDV (m/s ^{1,75})	VDV (m/s ^{1,75})	
< 0,66	< 0,50	Limite aceitável
0,66 - 2,38	0,50 - 3,50	Perturbador
2,38 - 4,64	3,50 - 6,90	Inaceitável
> 4,64	> 6,90	Provável condição de pânico

7. ANÁLISE DA RESPOSTA DINÂMICA DA ESTRUTURA

A análise de vibração forçada procura avaliar o comportamento dinâmico da arquibancada, no que concerne ao conforto humano oriundo de ações dinâmicas provenientes de ações humanas relativas à prática da atividade da torcida, a partir dos resultados obtidos em termos dos deslocamentos e acelerações máximas, acelerações rms e acelerações em VDV (Campista, 2015).

Para a análise dinâmica deste trabalho foi adotada a frequência de 2,50Hz como frequência característica do carregamento, para os modelos de carregamento I e II (MC-I e MC-II), baseado em investigações realizadas anteriormente, que mostraram que nessa frequência foi onde se obteve as maiores amplitudes da resposta dinâmica (Lima, 2013). Esse valor adotado para a frequência da excitação se encontra em ressonância com o terceiro modo de vibração do modelo estrutural investigado (Campista, 2015). Para os modelos de carregamento III e IV (MC-III e MC-IV) foram utilizados os resultados fornecidos pelos testes experimentais realizados com frequência característica do carregamento de 2,53Hz.

Para a escolha dos pontos de leitura da resposta dinâmica 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. O caso de carregamento estudado corresponde à situação onde todas as arquibancadas estão 100% ocupadas. Na Fig. 13 pode-se observar o posicionamento dos pontos de análise, além da visualização do caso de carregamento estudado.

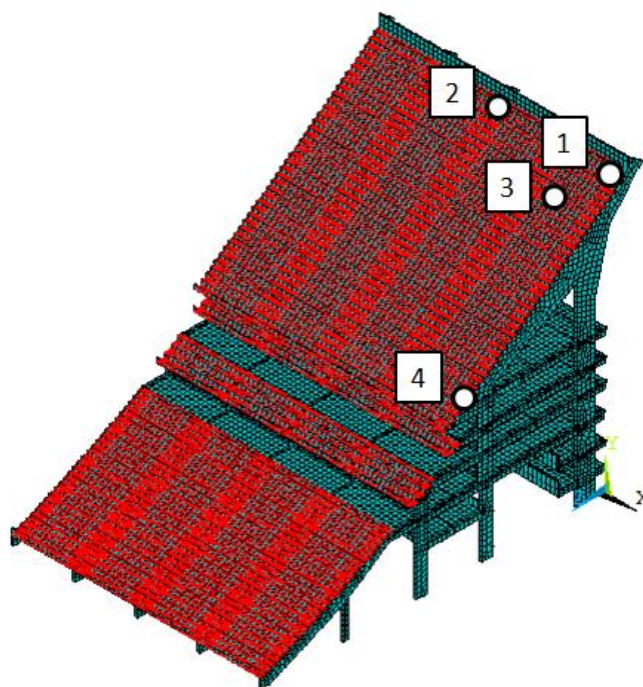


Figura 13. Ocupação das arquibancadas e posicionamento dos pontos de análise

As Tabelas 7 e 8 exibem os resultados (acelerações) associados à situação de carregamento dinâmico investigada neste trabalho de pesquisa, com base no emprego dos quatro modelos de carregamento dinâmico I a IV (MC-I a MC-IV).

Tabela 7. Acelerações obtidas nos modelos de carregamento MC-I e MC-II

Ponto de análise	MC-I			MC-II		
	Acelerações (m/s ²)		VDV (m/s ^{1,75})	Acelerações (m/s ²)		VDV (m/s ^{1,75})
	a _p (pico)	a _{w,rms} (rms)		a _p (pico)	a _{w,rms} (rms)	
1	0,16	0,10	0,20	0,25	0,15	0,38
2	0,21	0,13	0,27	0,33	0,18	0,47
3	0,36	0,23	0,44	0,62	0,30	0,77
4	0,21	0,12	0,25	0,24	0,18	0,48

Tabela 8. Acelerações obtidas nos modelos de carregamento MC-III e MC-IV

Ponto de análise	MC-III			MC-IV		
	Acelerações (m/s ²)		VDV (m/s ^{1,75})	Acelerações (m/s ²)		VDV (m/s ^{1,75})
	a _p (pico)	a _{w,rms} (rms)		a _p (pico)	a _{w,rms} (rms)	
1	1,39	0,49	1,16	0,35	0,11	0,21
2	0,84	0,29	0,71	0,29	0,10	0,20
3	1,89	0,59	1,34	1,57	0,51	1,08
4	1,48	0,45	1,05	0,93	0,30	0,75

Pode-se verificar a partir da análise dos resultados apresentados nas Tabelas 7 e 8, que os valores de acelerações encontrados no modelo de carregamento MC-I (Faisca) não ultrapassam os limites estabelecidos pelas normas e recomendações de projeto. No modelo de carregamento MC-II, o valor da aceleração de pico no ponto 3 ($a_p = 0,62\text{m/s}^2$) ultrapassa o limite estabelecido pelo AISC. Além disso, neste mesmo ponto, o valor da aceleração em valores de doses de vibração ($\text{VDV} = 0,77\text{m/s}^{1,75}$) se encontra acima do limite aceitável proposto por Setareh (2012), que é de $0,50\text{m/s}^{1,75}$ e por Ellis e Littler (2004), da ordem de $0,60\text{m/s}^{1,75}$, entrando assim na faixa de aceleração considerada perturbadora.

O modelo de carregamento que obteve os resultados mais críticos do ponto de vista do conforto humano foi o modelo MC-III (Força dura), onde todas as acelerações de pico e acelerações em valores de doses de vibração (VDV) ultrapassaram os limites das normas e recomendações de projeto. E três dos quatro valores de aceleração rms encontrados também ultrapassam os limites de normas e recomendações de projeto. Pode-se verificar ainda que no modelo biodinâmico (MC-IV), os valores das acelerações de pico e em valores de doses de vibração (VDV), nos pontos 3 e 4 e o valor da aceleração rms no ponto 3, ficaram acima dos limites estabelecidos pelas normas e recomendações de projeto, se localizando em uma faixa considerada perturbadora do ponto de vista do conforto humano.

Verifica-se que o ponto 3, localizado no meio do primeiro vão entre as vigas da arquibancada superior, na altura do pilar, é o ponto mais crítico da arquibancada, fornecendo valores de aceleração elevados na resposta dinâmica da estrutura. Cabe ressaltar que este ponto crítico situa-se em uma região da arquibancada onde o fenômeno físico da ressonância

ocorre entre as frequências naturais de vibração ($f_{03} = 2,45\text{Hz}$; $f_{05} = 5,09\text{Hz}$ e $f_{14} = 7,60\text{Hz}$) correspondentes a três modos de vibração distintos da estrutura em relação aos harmônicos da excitação dinâmica. Em seguida, as Figs. 14 e 15 apresentam uma comparação da resposta dinâmica (acelerações) obtida nos cinco diferentes modelos de carregamento, no domínio do tempo e da frequência, para a frequência de excitação estudada ao longo deste trabalho de pesquisa.

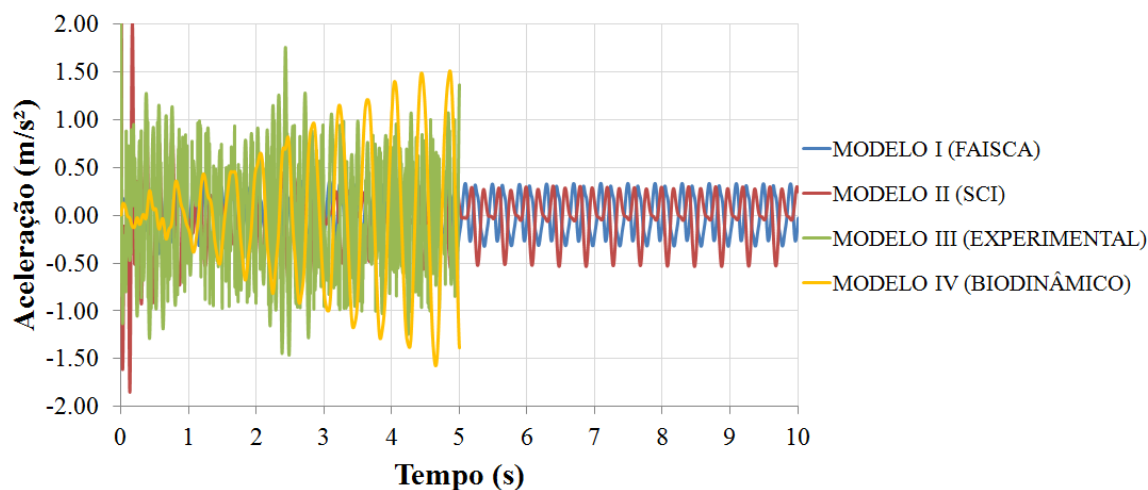


Figura 14. Resposta dinâmica no domínio do tempo. Acelerações.

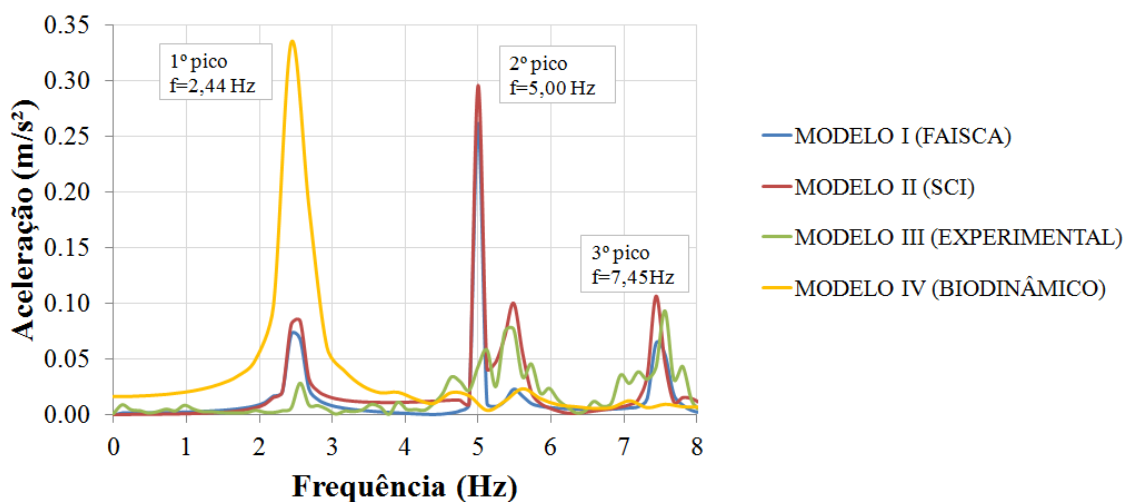


Figura 15. Resposta dinâmica no domínio da frequência. Acelerações.

Analisando-se a Fig. 14, pode-se observar que os modelos MC-III (Força dura) e MC-IV (Biodinâmico) fornecem valores significativamente maiores de aceleração quando comparados aos outros dois modelos de carregamento (MC-I e MC-II). É possível verificar na Fig. 15, que para o modelo MC-IV, o primeiro harmônico do carregamento dinâmico se apresenta mais energético do que os outros harmônicos, portanto é no primeiro harmônico que ocorre a maior transferência de energia do sistema, enquanto que para os modelos MC-I, MC-II e MC-III é o segundo harmônico do carregamento dinâmico que se apresenta mais energético do que os outros harmônicos.

Percebe-se ainda a partir da análise da Fig. 15, 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.

8. 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, de modo a obter os valores das frequências naturais de vibração e das acelerações do sistema estrutural.

Verifica-se 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 e a frequência fundamental do sistema está abaixo do valor mínimo recomendado. Portanto, a análise modal realizada na arquibancada revela um indício de que a estrutura possa apresentar problemas relacionados a vibrações excessivas.

Para a análise dinâmica deste trabalho foi adotada a frequência de 2,50Hz como frequência característica do carregamento, para os modelos de carregamento I e II (MC-I e MC-II), baseado em investigações realizadas anteriormente, que mostraram que nessa frequência foi onde se obteve as maiores amplitudes da resposta dinâmica (Lima, 2013). Esse valor adotado para a frequência da excitação se encontra em ressonância com o terceiro modo de vibração do modelo estrutural investigado (Campista, 2015). Para os modelos de carregamento III e IV (MC-III e MC-IV) foram utilizados os resultados fornecidos pelos testes experimentais realizados com frequência característica do carregamento de 2,53Hz.

Analisando-se os resultados alcançados com base no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, sob o ponto de vista de conforto humano, destaca-se que os valores das acelerações de pico obtidos com base no emprego do modelo de carregamento MC-I (Faisca, 2003) não ultrapassam os limites estabelecidos pelas normas e recomendações de projeto.

De outra forma, quando o modelo de carregamento MC-II (SCI, 2009) é considerado na análise da resposta dinâmica do ponto 3, os valores da aceleração de pico ($a_p = 0,62\text{m/s}^2$) e valor de dose de vibração ($\text{VDV} = 0,77\text{m/s}^{1,75}$), encontram-se acima dos limites estabelecidos em normas e recomendações de projeto.

Em prosseguimento as análises, o modelo de carregamento MC-III (Força Dura) apresenta os resultados mais críticos do estudo, onde todos os valores das acelerações de pico e acelerações em valores de doses de vibração (VDV) encontrados nesta investigação ultrapassaram os limites das normas e recomendações de projeto. Cabe ressaltar que três dos quatro valores de aceleração *rms* encontrados também ultrapassam os limites de normas e recomendações de projeto.

Em relação ao emprego do modelo de carregamento dinâmico MC-IV (Modelos Biodinâmicos), as acelerações apresentam valores que ultrapassam os limites de normas e recomendações de projeto no ponto 3 [$a_p = 1,57\text{m/s}^2$; $a_{\text{rms}} = 0,51\text{m/s}^2$ e $\text{VDV} = 1,08\text{m/s}^{1,75}$] e no ponto 4 [$a_p = 0,93\text{m/s}^2$ e $\text{VDV} = 0,75\text{m/s}^{1,75}$].

Foi constatado, também, que os modelos biodinâmicos representativos da ação dos indivíduos sobre as arquibancadas atuam no sentido de amortecer o movimento de vibração da estrutura, ocasionando diferenças quantitativas importantes nos valores das acelerações quando comparados com os demais modelos de carregamento estudados neste trabalho.

A partir dos resultados encontrados ao longo deste estudo, é reforçada a relevância do desenvolvimento de investigações mais detalhadas sobre a influência do amortecimento proveniente dos indivíduos, através da utilização de testes experimentais e análises numéricas. Este fato pode ser confirmado através da análise dos resultados encontrados ao longo deste trabalho, que apontam para a relevância de estudos mais detalhados acerca da modelagem da ação dinâmica proveniente de atividades rítmicas, com modelos mais realista desta ação.

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, Using FLEXlm 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., 1987. Vibrations in structures induced by man and machines, *IABSE Structural Engineering Document 3E, International Association for Bridges and Structural Engineering*, ISBN 3-85748-052-X.

CEB-209: Comité Euro-International du Béton (CEB), 1991. Vibration problems in structures. Practical guidelines. Bulletin d'information N° 209.

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, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

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.

Gaspar, C.M. 2016. *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 [In Portuguese. In development].

International Organization for Standardization, 1997. ISO 2631-1: Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements, Switzerland.

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.

Setareh, M., 2012. Evaluation and assessment of vibrations owing to human activity. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*, v. 165, iss, SB5, pp. 219–231.

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