



ANÁLISE DINÂMICA E ESTUDO DE CONFORTO HUMANO DAS ARQUIBANCADAS DO ESTÁDIO NACIONAL DE BRASÍLIA

Danielle Fernandes Campista

danicampista@yahoo.com.br

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV/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

Abstract. *Ao longo dos anos, inúmeros estádios de futebol no Brasil têm sido projetados para suportar as cargas acidentais como sendo estática. Com base na mudança do comportamento do público em jogos de futebol, através da ação de torcidas organizadas e, com o emprego desses estádios para shows e eventos musicais, estas estruturas passaram a sofrer um maior impacto oriundo da natureza dinâmica das ações solicitantes. Assim sendo, alguns destes estádios passaram a apresentar problemas de vibrações excessivas e tornou-se necessária a consideração efetiva das cargas dinâmicas nos projetos estruturais. Este trabalho de pesquisa objetiva o estudo do comportamento dinâmico e avaliação do desempenho do sistema estrutural 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 e foram utilizadas técnicas de discretização por meio do método dos elementos finitos. Os resultados alcançados ao longo deste estudo são confrontados com aqueles fornecidos por normas e recomendações de projeto. Os resultados revelam a importância da análise dinâmica para o projeto de estádios de futebol, no que tange a obtenção de dados relevantes para o conforto humano e segurança dos usuários deste tipo de estrutura.*

Keywords: *Estádios de futebol, Análise de conforto humano, Atividades humanas rítmicas.*

1. INTRODUÇÃO

A forte tendência em se projetar estruturas cada vez mais esbeltas e flexíveis faz com que ocorra uma redução nos valores das frequências naturais dos modelos estruturais o que pode gerar sistemas mais suscetíveis aos carregamentos dinâmicos, pois estes valores de frequências podem ficar cada vez mais próximos das frequências de excitação. 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, os quais podem causar desconforto humano, além de pôr em risco a segurança da estrutura (Campista, 2015); (Faisca, 2003).

Assim sendo, 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). 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 trabalho de pesquisa serão realizadas análises numéricas, obtendo-se inicialmente as frequências naturais e os modos de vibração do sistema estrutural investigado, objetivando caracterizar o comportamento dinâmico das arquibancadas do estádio, para em seguida analisar-se a resposta dinâmica forçada das arquibancadas, contemplando 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), no sentido de proceder 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 edificações.

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.

Neste trabalho estuda-se a resposta dinâmica das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília quando submetido a ações dinâmicas de torcida, estudando assim a atividade onde existe perda de contato com a estrutura. Os dois modelos de carregamento utilizados no presente trabalho foram elaborados por Faisca (2003) e Ellis e Ji (2004), sendo que ambos foram desenvolvidos baseados em testes experimentais.

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 do modelo de carregamento dinâmico MC-I é expressa pela Eq. (1).

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

$$F(t) = 0 \quad \text{Para } T_c \leq t \leq T$$
(1)

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).

A Fig. 1 facilita o entendimento da função matemática utilizada, pois ilustra os dois intervalos de tempo significativos da referida função. Ressalta-se que a força dinâmica normalizada (FDN) é representada na ordenada da referida Fig. 1.

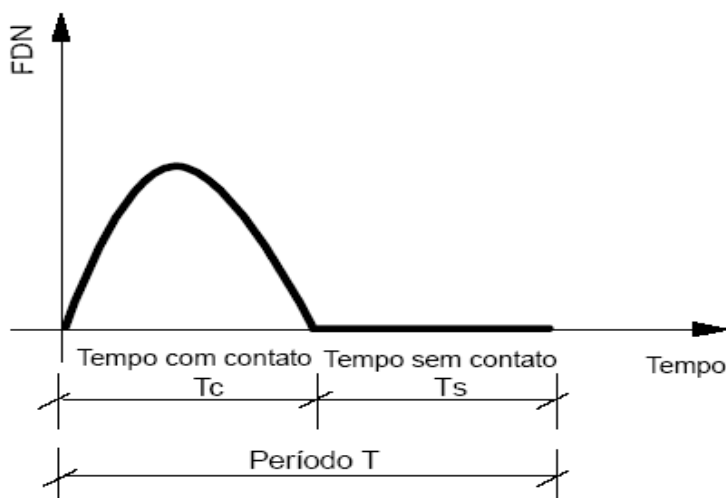


Figura 1. Representação genérica da função de carregamento dinâmico

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. 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.

A Fig. 2 representa o gráfico do parâmetro CD (coeficiente de defasagem) para três atividades estudadas por Faisca (2003) extrapoladas para um grande número de pessoas. 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 e a Fig. 3 apresenta os sinais da força dinâmica correspondente a atividade humana rítmica (torcida), no domínio do tempo e da frequência, com base no uso de uma frequência de excitação igual a 2,5 Hz, para 64 pessoas

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	$0,37 \pm 0,03$	$0,33 \pm 0,09$	$2,41 \pm 0,51$

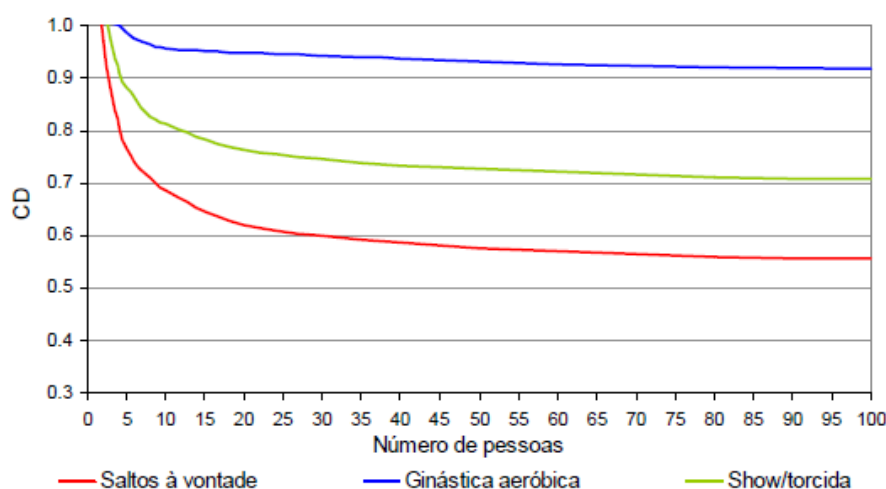


Figura 2. Coeficientes de defasagem para as atividades (Faisca, 2003)

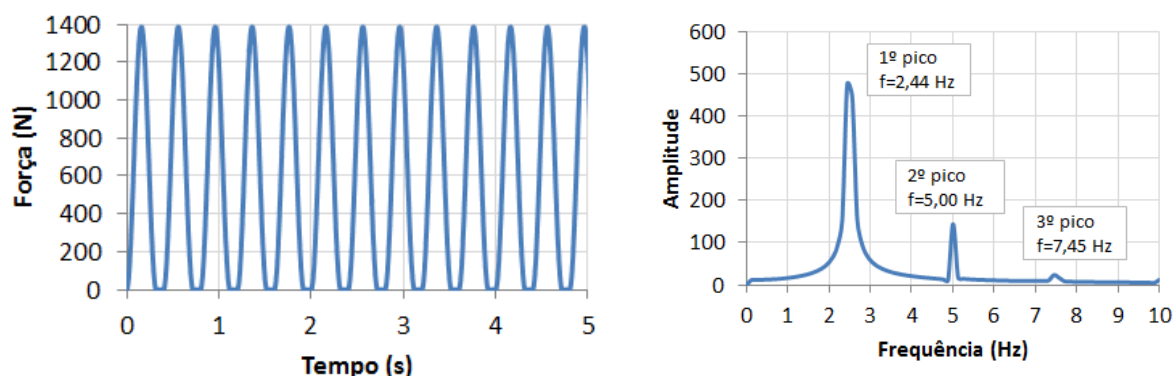


Figura 3. Sinais de força no tempo e espectro de frequência para atividade de torcida ($T=0,40s$, $T_c=0,32s$, $K_p=2,41$ e $CD=0,72$)

2.2 Modelo de carregamento II (MC-II)

Este modelo de carregamento foi desenvolvido por Ellis e Ji (2004) 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, a faixa de frequência da atividade rítmica praticada, o efeito dinâmico de 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 modelo de carregamento dinâmico MC-II é apresentada na Eq. (2).

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

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 de carregamento dinâmico 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. Os três primeiros coeficientes de Fourier foram determinados, sendo que estes coeficientes dependem do número de pessoas (v) que pratica a atividade humana rítmica. Deste modo, as Eqs. (3) a (5) expressam o cálculo destes coeficientes de Fourier e a Fig. 4 apresenta os sinais da força dinâmica correspondente à atividade humana rítmica (torcida), no domínio do tempo e da frequência, com base no uso de uma frequência de excitação igual a 2,5 Hz, para 64 pessoas.

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

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

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

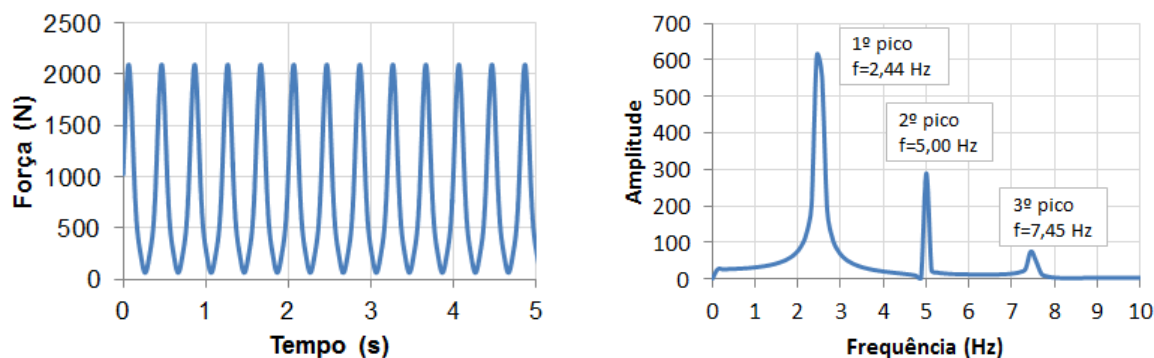


Figura 4. Sinais de força no tempo e espectro de frequência para atividade humana rítmica ($v=64$, $r_{1,v}=1,14$, $r_{2,v}=0,35$, $r_{3,v}=0,12$)

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 e, ainda, a Fig. 7 apresenta o detalhe do setor das arquibancadas estudadas neste trabalho de pesquisa (Lima, 2013).

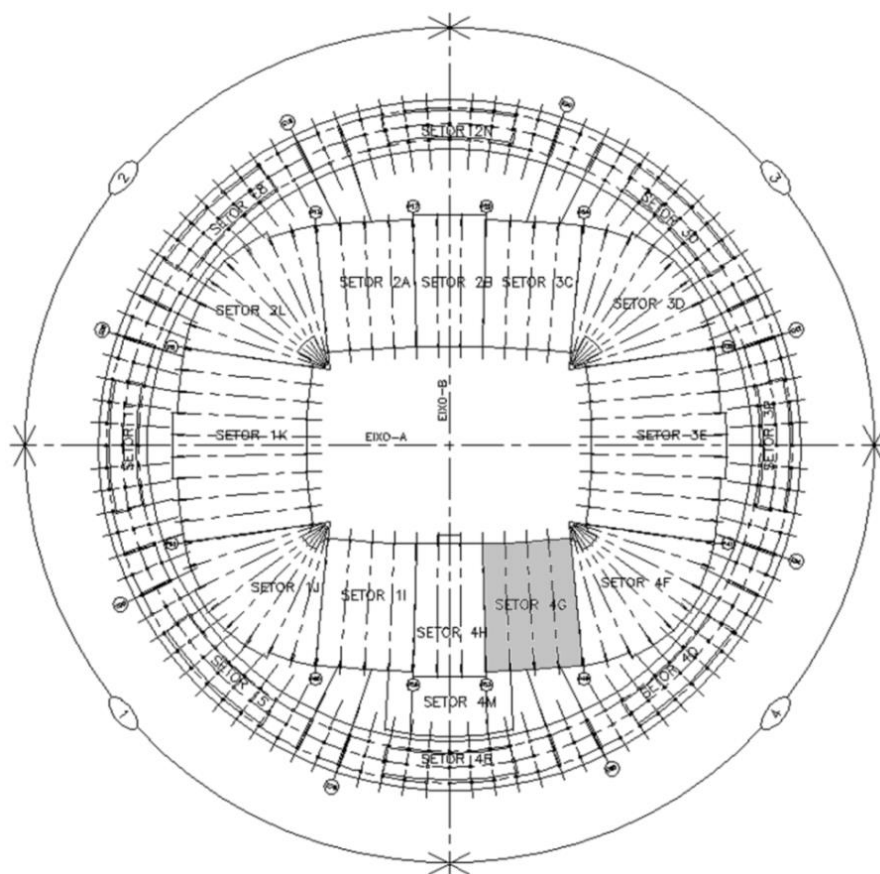


Figura 5. Planta do Estádio (Lima, 2013)

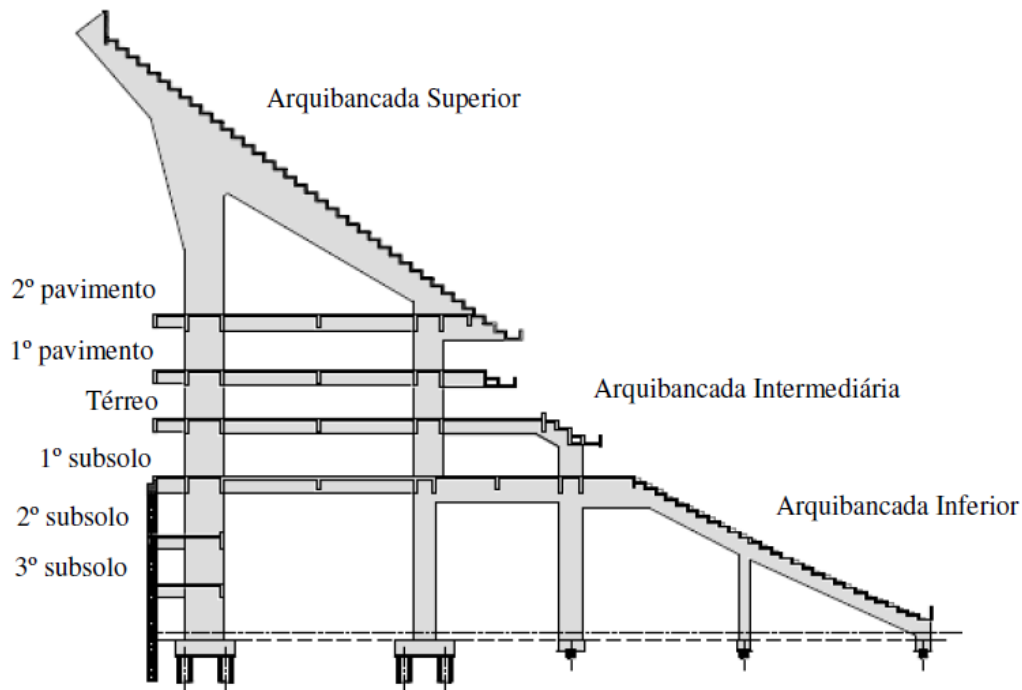


Figura 6. Corte do Estádio (Lima, 2013)



Figura 7. Detalhe do setor da arquibancada analisado neste trabalho (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. A Fig. 7 apresenta o detalhe do setor da arquibancada estudado neste trabalho.

Ao longo do presente estudo, foram desenvolvidas cinco diferentes situações de carregamentos dinâmico, descritas na Tabela 2, simulando a ação das pessoas sobre as arquibancadas em um jogo de futebol, com o objetivo de se verificar a influência do número de pessoas sobre a resposta dinâmica do sistema estrutural estudado.

Tabela 2. Situações de carregamento investigadas

Situações de Carregamento (SC)	Carregamentos Dinâmicos sobre as Arquibancadas
SC-I	100% de ocupação nas arquibancadas
SC-II	Somente arquibancada superior cheia
SC-III	75% de ocupação nas arquibancadas
SC-IV	50% de ocupação nas arquibancadas
SC-V	25% de ocupação das arquibancadas

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).

4. MODELAGEM NUMERICA EM ELEMENTOS FINITOS

No que tange a modelagem em elementos finitos das arquibancadas de um dos setores do Estádio Nacional de Brasília, como ilustrado na Fig. 7, 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.

Nesta investigação, para representar os pórticos, as lajes e os degraus foram utilizados elementos finitos de casca SHELL63 ANSYS (2007). No que diz respeito à simulação numérica das vigas internas foi utilizado o elemento tridimensional BEAM44 ANSYS (2007). 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 Fig. 8 e 9 apresentam o modelo em elementos finitos das arquibancadas investigadas neste trabalho de pesquisa.

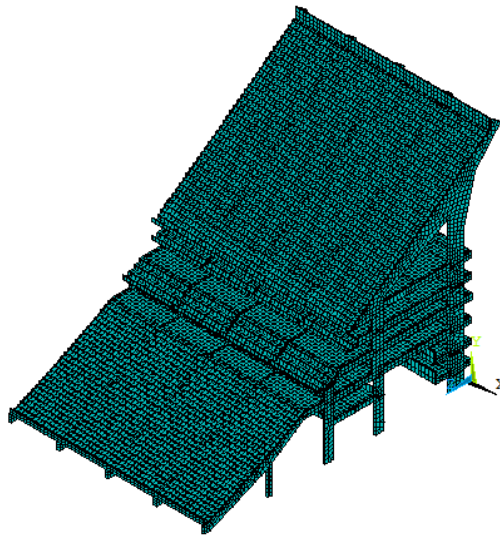
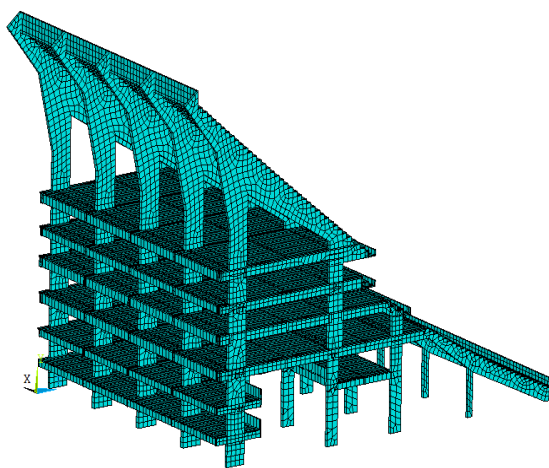
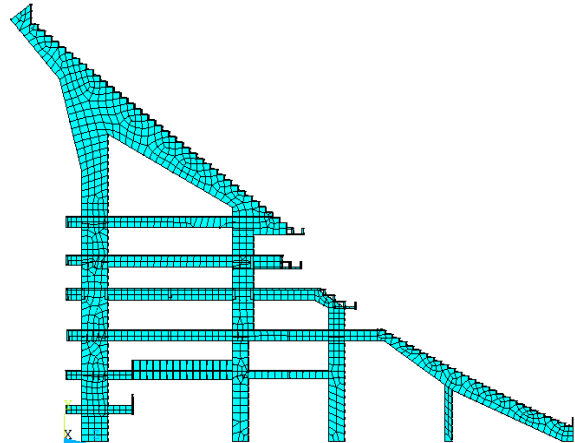


Figura 8. Vista isométrica do modelo em elementos finitos



a) Vista isométrica



b) Vista lateral direita

Figura 9. Vistas do modelo em elementos finitos

5. FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO

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 3 apresenta os valores das 14 primeiras frequências naturais e as Figs. 10 a 13 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

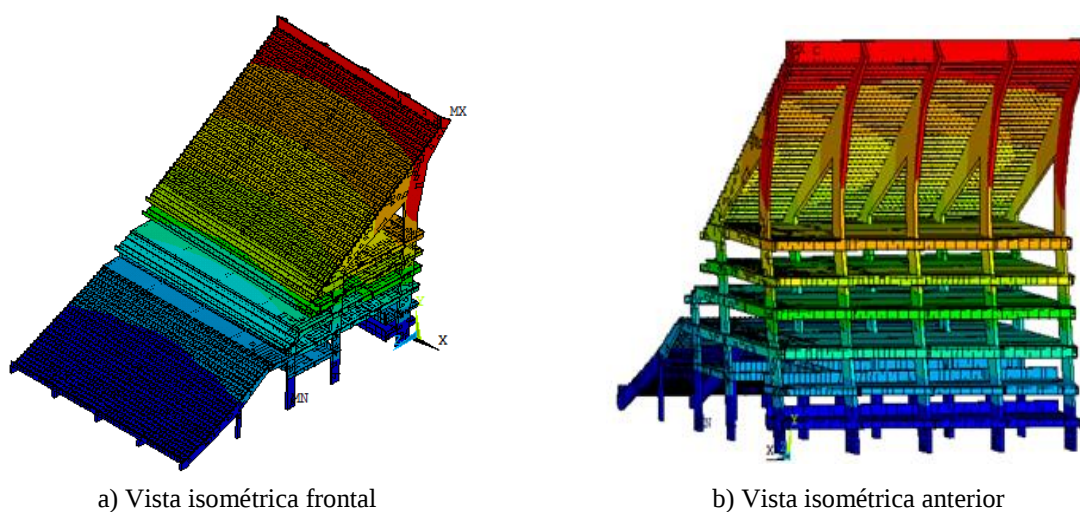


Figura 10. 1º Modo de vibração ($f_{01}=0,96$ Hz)

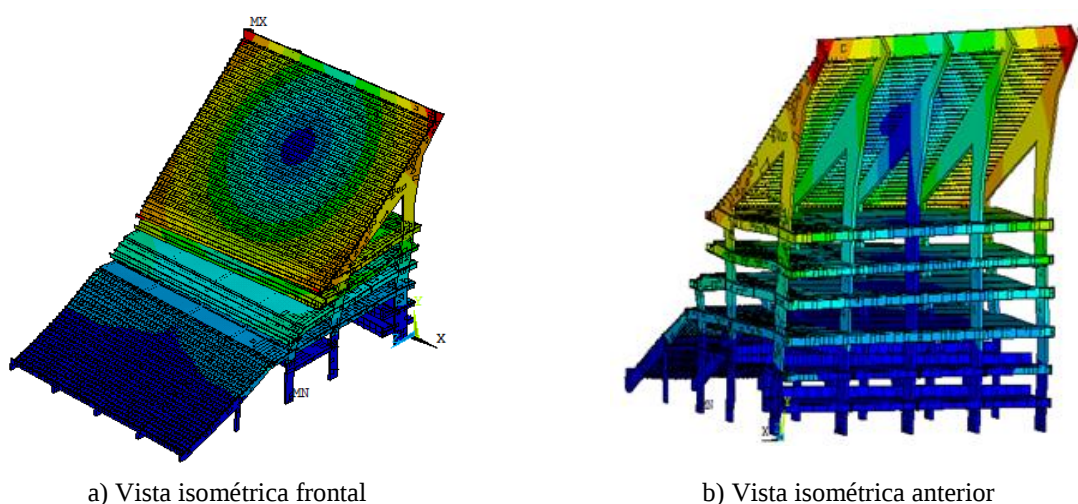


Figura 11. 3º Modo de vibração ($f_{03}=2,45$ Hz)

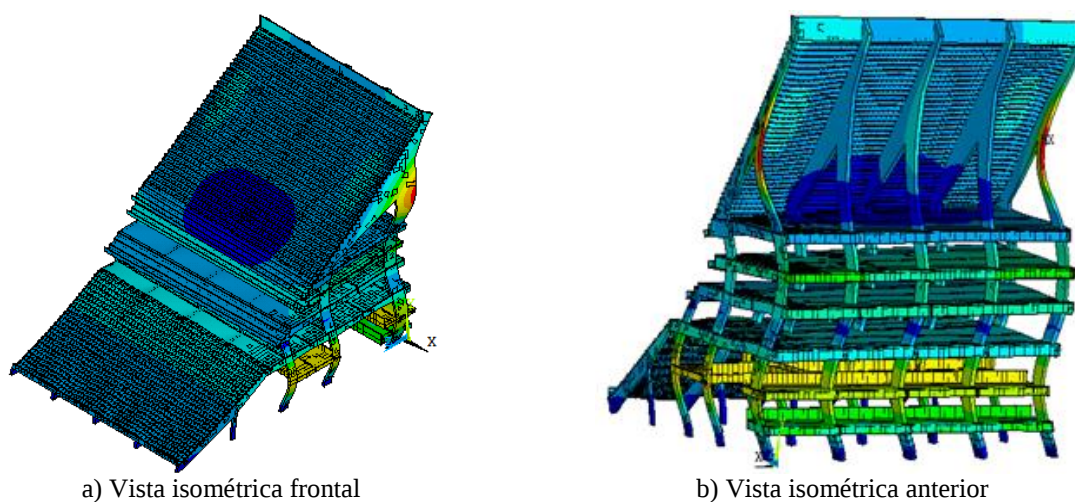


Figura 12. 5º Modo de vibração ($f_{05}=5,09$ Hz)

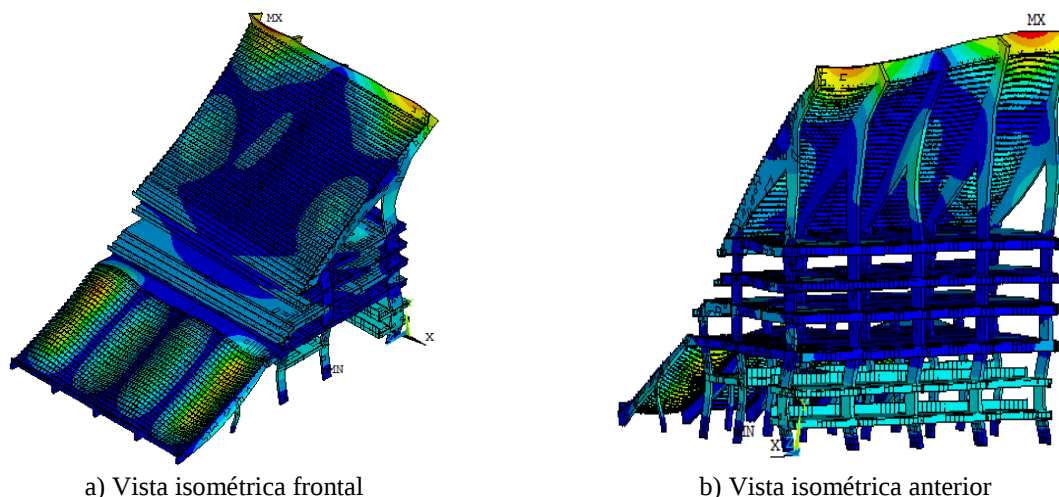


Figura 13. 14º Modo de vibração ($f_{14}=7,60$ Hz)

6. CRITÉRIOS DE CONFORTO HUMANO UTILIZADOS

Ao longo do estudo, no que diz respeito aos valores das acelerações de pico serão utilizados os limites estabelecidos por Murray et al. (2003), CEB 209 (1991) e Bachmann e Ammann (1987). O limite utilizado por Murray et al. (2003) é igual a $0,5\text{m/s}^2$ (5%), o valor limite aceitável de aceleração considerado por Bachmann e Ammann (1987) encontra-se 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 4.

Tabela 4. 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 *rms*, serão considerados neste estudo os limites estabelecidos pela ISO 2631/1 (1997) e por Smith et al. (2009). A Tabela 5 apresenta, na sequência, os limites da norma ISO 2631/1 (1997) e a Tabela 6 exhibe os limites utilizados por Smith et al. (2009).

Tabela 5. Limites de aceleração (ISO 2631/1, 1997)

Limites de aceleração em <i>rms</i> (m/s^2)	Reação humana
< 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 6. 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

Finalmente, para avaliação dos valores de doses de vibração (VDV), os limites considerados neste estudo serão aqueles estabelecidos por Setareh (2012) e Ellis e Littler (2004), mostrados na Tabela 7.

Tabela 7. 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. AVALIAÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA DA ESTRUTURA

A análise de vibração forçada tem por objetivo avaliar o comportamento estrutural dinâmico das arquibancadas (vibração forçada), no que concerne ao conforto humano oriundo das ações dinâmicas provenientes das atividades da torcida, a partir dos resultados obtidos em termos dos valores dos deslocamentos e acelerações máximas, acelerações *rms* e VDV (Campista, 2015).

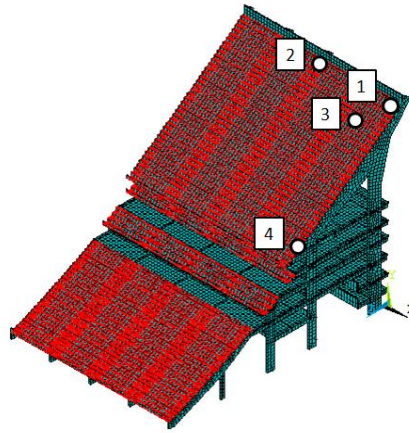
Para a análise dinâmica deste trabalho foi adotada a frequência de excitação de 2,50Hz como frequência característica do carregamento dinâmico humano, baseado em investigações realizadas anteriormente (Lima, 2013). Essas investigações mostraram que a frequência de excitação de 2,50Hz foi a que provocou as maiores amplitudes na 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).

No que tange a escolha dos pontos das arquibancadas (setor 4G: Figs. 5 a 7), para obtenção da resposta dinâmica, foram escolhidos as seções do modelo estrutural onde ocorrem as maiores amplitudes modais de vibração. Deste modo, os pontos de análise da resposta dinâmica são os seguintes: o ponto 1 encontra-se na extremidade do último degrau da arquibancada superior, o ponto 2 está localizado no centro do último degrau da arquibancada superior, o ponto 3 corresponde ao meio do primeiro vão (entre as vigas), na altura do pilar, e o ponto 4 que diz respeito a extremidade do primeiro degrau da arquibancada superior.

Na sequência do texto, as Tabelas 8 a 12 ilustram a localização dos pontos de análise, para avaliação dos valores das acelerações e posterior estudo dos níveis de conforto humano do sistema estrutural, e, também, exibem os resultados (acelerações) associados as cinco situações de carregamento dinâmico investigados neste trabalho de pesquisa, com base no emprego dos modelos de carregamento dinâmico I e II (MC-I e MC-II), Eqs. (1) a (5).

Tabela 8. Acelerações obtidas na situação SC-I

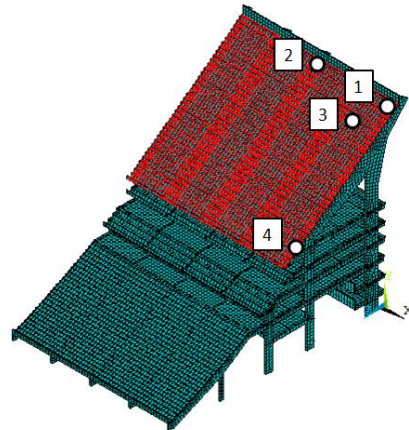
Situação
estudada e
posicionamento
dos pontos de
análise



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 9. Acelerações obtidas na situação SC-II

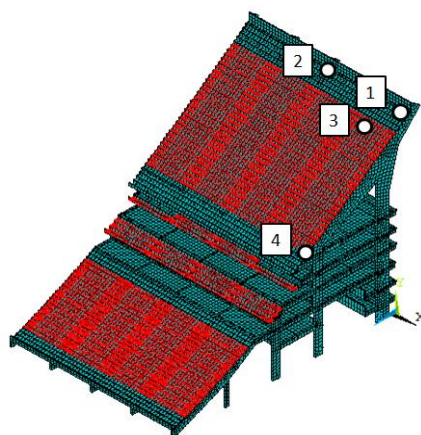
Situação
estudada e
posicionamento
dos pontos de
análise



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	0,13	0,08	0,15	0,16	0,11	0,30
2	0,17	0,11	0,21	0,24	0,13	0,32
3	0,34	0,21	0,41	0,57	0,28	0,74
4	0,17	0,09	0,19	0,25	0,13	0,36

Tabela 10. Acelerações obtidas na situação SC-III

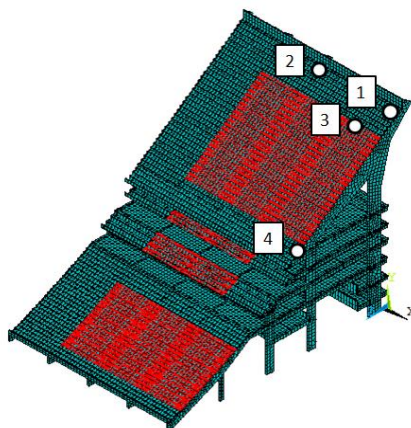
Situação
estudada e
posicionamento
dos pontos de
análise



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	0,13	0,08	0,16	0,17	0,15	0,31
2	0,15	0,10	0,19	0,21	0,17	0,38
3	0,29	0,18	0,35	0,52	0,25	0,60
4	0,12	0,06	0,12	0,18	0,11	0,30

Tabela 11. Acelerações obtidas na situação SC-IV

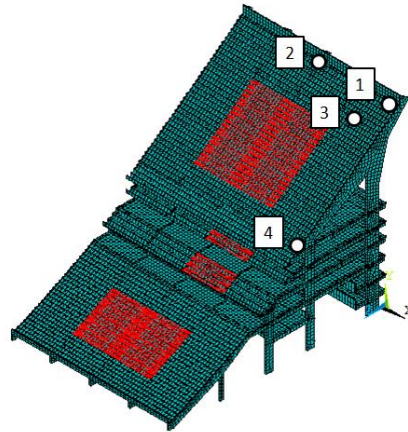
Situação
estudada e
posicionamento
dos pontos de
análise



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	0,22	0,12	0,24	0,31	0,22	0,44
2	0,066	0,043	0,084	0,089	0,085	0,191
3	0,28	0,16	0,33	0,53	0,25	0,57
4	0,13	0,05	0,11	0,18	0,09	0,24

Tabela 12. Acelerações obtidas na situação SC-V

Situação
estudada e
posicionamento
dos pontos de
análise



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	0,150	0,094	0,179	0,260	0,202	0,396
2	0,039	0,019	0,039	0,068	0,054	0,157
3	0,140	0,080	0,160	0,260	0,171	0,342
4	0,038	0,017	0,035	0,079	0,039	0,118

A partir da análise dos resultados apresentados nas Tabelas 8 a 12, pode-se verificar que os valores de acelerações encontrados no modelo de carregamento MC-I proposto por (Faisca, 2003) não ultrapassam os limites estabelecidos pelas normas e recomendações de projeto consideradas no estudo em nenhuma das situações de carregamento analisadas neste estudo (SC-I a SC-V).

Por outro lado, cabe ressaltar que quando o modelo de carregamento MC-II proposto por (Ellis e Ji, 2004) é considerado na avaliação dos resultados, alguns valores das acelerações de pico e VDV encontram-se acima dos limites especificados pelas normas e recomendações de projeto utilizadas na análise, em quatro das cinco situações de carregamento estudadas, Tabelas 8 a 12.

Analisando-se os valores das acelerações de pico obtidos com base no emprego do MC-II, de acordo com o CEB 209 (1991), os valores das acelerações associados às situações de carregamento SC-I e SC-II, 0,62m/s² e 0,57m/s², respectivamente, se encontram dentro da faixa considerada intolerável por esta recomendação de projeto CEB 209 (1991). De outra forma, os valores das acelerações referentes às situações de carregamento SC-III e SC-IV, 0,52m/s² e 0,53m/s², respectivamente, se encontram na faixa considerada desconfortável por esta recomendação de projeto CEB 209 (1991), como apresentado nas Tabelas 8 a 12.

Com relação ao limite estabelecido por Murray et al. (2003), igual a 0,5m/s² (5%), alguns valores de acelerações encontrados nas quatro primeiras situações de carregamento se encontram acima deste limite, Tabelas 8 a 12. Com relação ao limite considerado aceitável por Bachmann e Ammann (1987), que se encontra na faixa de 5%-10%g (0,5m/s² - 1,0m/s²), em nenhuma situação este limite foi ultrapassado. Ressalta-se que todos estes valores foram encontrados com base no emprego do MC-II (Ellis e Ji, 2004), Tabelas 8 a 12.

Em nenhuma das situações de carregamento estudadas, os resultados referentes às acelerações *rms* encontrados com base no emprego do MC-II (Ellis e Ji, 2004) ultrapassaram os limites estabelecidos como aceitáveis pela ISO 2631/1 (1997) e por Smith et al. (2009), Tabelas 8 a 12.

Levando-se em consideração os limites estabelecidos para as acelerações em valores de doses de vibração (VDV), os valores encontrados nas quatro primeiras situações de carregamento se encontram acima do limite aceitável por Setareh (2012), que é de $0,50\text{m/s}^2$, entrando assim na faixa de aceleração considerada perturbadora. De outra maneira, para o limite estabelecido por Ellis e Littler (2004), que é de $0,60\text{m/s}^2$, somente nas situações SC-I e SC-II esse limite é ultrapassado, também entrando na faixa de aceleração considerada perturbadora. Como apresentado nas Tabelas 8 a 12.

O valor de aceleração de pico mais elevado foi encontrado na situação de carregamento SC-I, onde 100% das arquibancadas se encontram ocupadas, no modelo de carregamento proposto por Ellis e Ji, 2004 (MC-II). Este valor encontrado foi da ordem de $0,62\text{m/s}^2$. A resposta dinâmica da arquibancada investigada referente a situação de carregamento mais desfavorável (SC-I), para os dois modelos de carregamento estudados (MC-I e MC-II) é mostrada, nos domínios do tempo e da frequência, nas Figs. 14 e 15.

Observando-se as Figs. 14 e 15 percebe-se a transferência de energia do sistema, no domínio da frequência, no que tange aos múltiplos dos harmônicos da frequência de excitação de 2,50 Hz. 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.

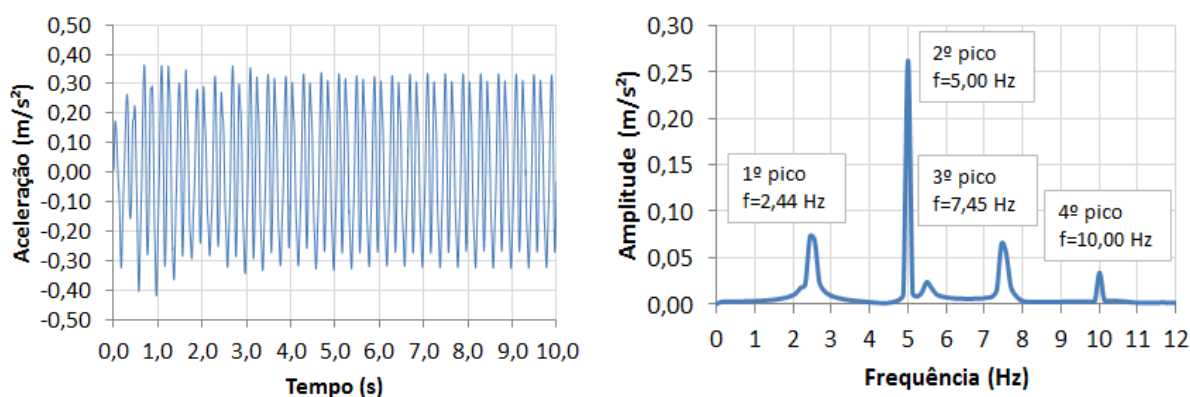


Figura 14. Aceleração no domínio do tempo e da frequência: SC-I / MC-I

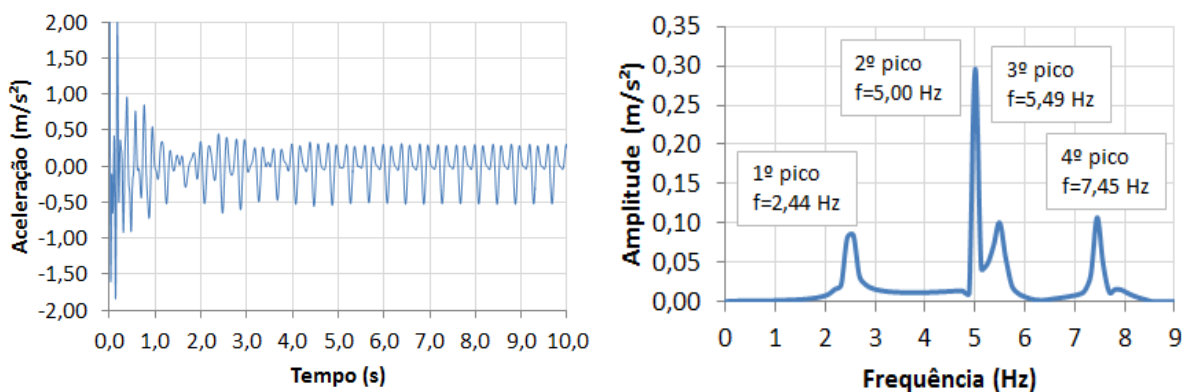


Figura 15. Aceleração no domínio do tempo e da frequência: SC-I / MC-II

As Tabelas 13 e 14 apresentam um resumo dos valores máximos de aceleração obtidos, ressaltando que todos os valores expostos a seguir violaram os limites das normas e recomendações de projeto, no que diz respeito aos critérios de conforto humano. Cabe ressaltar que na Tabela 13 se encontram os valores em VDV e na Tabela 14 são apresentados os valores de pico (valores máximos) encontrados para as acelerações.

Tabela 13. Valores em VDV que não atendem os limites normativos

Situações de carregamento	VDV ($\text{m/s}^{1,75}$)	Limite aceitável (Ellis e Littler, 2004) ($\text{m/s}^{1,75}$)	Limite aceitável (Setareh, 2012) ($\text{m/s}^{1,75}$)
SC-I: Ponto 3	0,77		
SC-II: Ponto 3	0,74		
SC-III: Ponto 3	0,60	0,60	0,50
SC-IV: Ponto 3	0,57		

Tabela 14. Valores das acelerações de pico que não atendem os limites normativos

Situações de carregamento	Acelerações de pico a_p (m/s^2)	Limites normativos (m/s^2)		
		Murray et al. (2003)	Bachmann e Ammann (1987)	CEB 209 (1991)
SC-I: Ponto 3	0,62			
SC-II: Ponto 3	0,57			
SC-III: Ponto 3	0,52	0,50	0,50 - 1,00	0,55
SC-IV: Ponto 3	0,53			

Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 8 a 14, 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 $f_{13} = 7,34\text{Hz}$) correspondentes a três modos de vibração distintos da estrutura em relação aos harmônicos da excitação dinâmica [MC-I (Faisca, 2003) e MC-II (Ellis e Ji, 2004)].

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 da resposta dinâmica da estrutura foi adotada a frequência de 2,50Hz como frequência característica do carregamento baseado em investigações realizadas anteriormente por (Lima, 2013). Este valor de frequência se encontra em ressonância com o terceiro modo de vibração da estrutura. Para uma melhor verificação dos resultados obtidos a partir desta análise, foram obtidos os valores das acelerações máximas (acelerações de pico), além das acelerações em *rms* e valores VDV (valores de doses de vibração) e foram estudadas cinco diferentes situações de carregamento (100% de ocupação nas arquibancadas; somente arquibancada superior cheia; 75% de ocupação nas arquibancadas; 50% de ocupação nas arquibancadas; e 25% de ocupação nas arquibancadas).

No que diz respeito ao pior caso de carregamento analisado neste trabalho de pesquisa (situação SC-I, que corresponde a 100% de ocupação das arquibancadas) foram obtidos os valores de 0,36 m/s²; 0,23m/s² e 0,44m/s^{1,75} para o MC-I (aceleração de pico, aceleração *rms* e VDV, respectivamente) e de 0,62 m/s²; 0,30 m/s² e 0,77m/s^{1,75} para o MC-II (aceleração de pico, aceleração *rms* e VDV, respectivamente). Cabe ressaltar que os resultados encontrados no modelo de carregamento I (MC-I) não ultrapassam os limites estabelecidos pelas normas e recomendações de projeto, enquanto que com relação aos resultados encontrados no modelo de carregamento II (MC-II), a aceleração de pico e os valores em VDV ultrapassam os limites estabelecidos pelos guias de projeto.

Comparando-se os resultados fornecidos com base no emprego dos dois modelos de carregamento dinâmico utilizados nesta investigação, em todas as situações de projeto estudadas, os valores obtidos no modelo de carregamento (MC-II) proposto por Ellis e Ji (2004) sempre foram superiores aos valores obtidos utilizando o modelo de carregamento (MC-I) proposto por Faisca (2003). Tal fato pode ser explicado em função de que os parâmetros utilizados no modelo proposto por Ellis e Ji (2004) para a definição dos harmônicos da excitação possuem uma transferência de energia (amplitudes) na resposta dinâmica do sistema muito superiores àqueles apresentados no modelo de carregamento proposto por Faisca (2003).

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, PGE CIV, 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.

Ellis, B.R.; Littler, J.D., 2004. Response of cantilever grandstands to crowd loads, Part I: Serviceability evaluation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings*, 157 SB4 pp. 235-241.

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

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

Ji T.; Ellis, B.R., 2004. Loads generated by jumping crowds: numerical modelling. *The Structural Engineer*, v.7, pp. 35-40.

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., 1997. Steel Design Guide Series 11: Floor Vibrations due to Human Activity. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction.

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.