

Estádio Nacional de Brasília: análise dinâmica por meio do método dos elementos finitos

GUSTAVO V. FIUZA LIMA - ENGENHEIRO (fiuzagustavo@hotmail.com); **LEONARDO J. GUIMARÃES RABELO** - ENGENHEIRO (leotdz@yahoo.com.br); **SUZANA MOREIRA AVILA** - PROFESSOR - ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3181-685X> (avilas@unb.br); **GRACIELA DOZ** - PROFESSOR - ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6428-4012> (graciela@unb.br) - UNB

RESUMO

NOS ÚLTIMOS ANOS, TEM-SE NOTADO A OCORRÊNCIA CRESCENTE DE VIBRAÇÕES EXCESSIVAS EM ESTRUTURAS CIVIS PROVOCADAS, EM PARTE, PELO USO DE NOVOS MATERIAIS E PELA LEVEZA E FLEXIBILIDADE QUE CARACTERIZA ALGUMAS DESSAS ESTRUTURAS. MUITAS DAS ARENAS DE FUTEBOL BRASILEIRAS APRESENTARAM PROBLEMAS DE VIBRAÇÃO EXCESSIVA, NECESSITANDO DE MONITORAMENTO E ATÉ INTERVENÇÃO. PARA A COPA DO MUNDO REALIZADA NO BRASIL (2014), ESSES ESTÁDIOS PASSARAM POR MUDANÇAS ESTRUTURAIS E ALGUNS FORAM DEMOLIDOS PARA A CONSTRUÇÃO DE NOVAS ARENAS, TORNANDO-SE NECESSÁRIA UMA ANÁLISE CRITERIOSA DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DESSAS NOVAS ESTRUTURAS. ESTE TRABALHO Foca NO ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO ESTÁDIO NACIONAL DE BRASÍLIA POR MEIO DA ANÁLISE NUMÉRICA DE DIFERENTES CENÁRIOS DE CARGAS DINÂMICAS GERADAS POR ATIVIDADES HUMANAS EM ARQUIBANCADAS, COMO SALTOS E MOVIMENTOS LATERAIS SINCRONIZADOS. ÀS RESPOSTAS DINÂMICAS DO ESTÁDIO SÃO COMPARADAS COM AS SUGERIDAS COMO LIMITES POR NORMAS INTERNACIONAIS. UMA VEZ QUE SE VERIFICA ALGUNS RESULTADOS EXCEDEM OS LIMITES NORMATIVOS, É PROPOSTO UM SISTEMA DE CONTROLE ESTRUTURAL BASEADO EM AMORTECEDORES DE MASSA SINTONIZADOS PARA REDUZIR A RESPOSTA DINÂMICA.

PALAVRAS-CHAVE: DINÂMICA ESTRUTURAL, VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR PESSOAS, CONTROLE DE VIBRAÇÕES, ESTRUTURAS DE ESTÁDIOS.

1. INTRODUÇÃO

Em maior ou menor grau, estruturas podem ser solicitadas por cargas dinâmicas. Esse fenômeno torna-se cada vez mais atual, uma vez que, em geral, as estruturas estão se tornando mais leves e mais flexíveis devido aos novos padrões arquitetônicos ou ainda pelo desenvolvimento de materiais mais resistentes. Quando se trata de vibrações induzidas pelo homem, à medida que essas estruturas ficam mais flexíveis, suas frequências naturais ficam mais baixas e podem se aproximar da fre-

quência de excitação, o que pode levar a vibrações excessivas e até à ressonância.

A Copa do Mundo FIFA de 2014 foi realizada no Brasil e muitos estádios foram remodelados ou demolidos, dando lugar a arenas novas. Nesse contexto, o novo Estádio Nacional de Brasília foi construído (Figura 1). Este estádio substituiu o anterior demolido que havia sido projetado nos anos 70. Naquela época, as cargas dinâmicas e as vibrações induzidas pelas multidões eram muito negligenciadas.

Houve registro de um grande número de reclamações sobre vibrações excessivas feita pelo público que assistiu aos jogos nesses antigos estádios. Alguns deles precisaram ser monitorados e necessitaram de recuperação estrutural, como os estádios Maracanã, Morumbi e Olímpico.

Todo o exposto sugere que esses tipos de estruturas precisam ser analisados dinamicamente, pois multidões saltando nas arquibancadas podem induzir vibrações excessivas nessas estruturas levando



FIGURA 1
ESTÁDIO NACIONAL DE BRASÍLIA

FONTE: <https://www.cultuga.com.br/estadios-que-receberao-jogos-de-portugal-na-copa-do-mundo/> EM 10/3/2022

a um problema de conforto em um primeiro momento e, posteriormente, a um problema estrutural.

Uma alternativa para reduzir vibrações excessivas em estruturas civis é o controle estrutural (Saeed *et al*, 2015). Dispositivos externos são adicionados ao sistema estrutural de forma a fornecer amortecimento ou proporcionar uma transferência de energia mecânica. Um dos dispositivos de controle estrutural mais conhecidos é o amortecedor de massa sintonizado (AMS), que consiste em uma massa auxiliar que, quando sintonizada de forma adequada, transfere a energia da estrutura principal para o amortecedor, fazendo com que esta vibre fora de fase, reduzindo assim a amplitude de resposta da estrutura principal.

Neste trabalho foi realizado um estudo numérico de uma arquibancada do Estádio Nacional de Brasília, para avaliar seu desempenho dinâmico e conforto, comparando os níveis de vibração obtidos com os limites recomendados das normas internacionais. É apresentada uma proposta de controle estrutural utilizando amortecedores de massa sintonizados.

2. FERRAMENTAS E MÉTODOS

2.1 Estrutura do Estádio

O estádio foi projetado como um conjunto de pórticos de quatro colunas conectados por vigas inclinadas, que sustentam os degraus das arquibancadas. As arquibancadas são separadas em três níveis: inferior, intermediário e superior (Figura 2). Radialmente a estrutura está dividida em 12 setores independentes, 3 de cada lado, um atrás de cada gol e um em cada canto, conforme mostra a Figura 3. Todos os setores são formados pela estrutura de pórticos mostrada na Figura 2, repetidas paralelamente entre si nos setores laterais e atrás dos gols e distribuídos radialmente nos cantos.

Sobre as arquibancadas, há lajes de concreto apoiadas em vigas

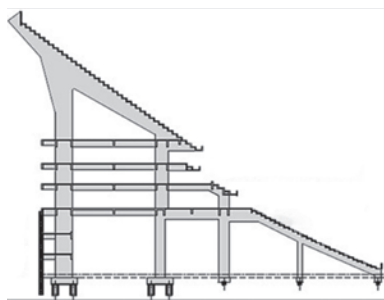


FIGURA 2
PÓRTICOS QUE SUSTENTAM AS ARQUIBANCADAS

transversais que formam seis pavimentos internos. Ao redor das arquibancadas existe uma estrutura independente formada por três fileiras circulares de colunas que sustentam

a cobertura do estádio. A cobertura do estádio tem uma coroa externa de concreto e uma estrutura interna em treliça de aço coberta por uma membrana especial que protege as arquibancadas e parcialmente o campo.

2.2 Modelo numérico

Para definir o modelo numérico, foi selecionado um pórtico de largura intermediária, dos quatro diferentes tipos de setores. Elementos finitos de casca foram usados para modelar lajes, degraus, paredes, pilares e vigas principais, e elementos finitos de barra para a simulação das vigas internas.

Os elementos de casca utilizados possuem 4 nós cada e seis graus de liberdade em cada nó. Os elementos de barra são elementos de dois



FIGURA 3
VISTA SUPERIOR DO ESTÁDIO

FONTE: <https://www.redecol.com.br/2013/06/veja-os-mapas-explicativos-e-de-acesso/html/> EM 25/1/2023

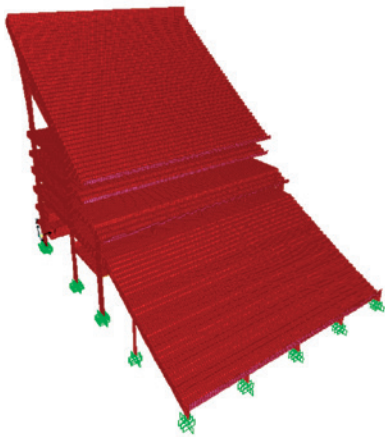


FIGURA 4

DISCRETIZAÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS DE UM SETOR INTERMEDIÁRIO DO ESTÁDIO NACIONAL DE BRÁSILIA (SAP2000)

nós com seis graus de liberdade em cada nó.

O material considerado foi o concreto armado, com módulo de elasticidade de 30 GPa. Em cada suporte de coluna, as restrições foram aplicadas em todas as seis direções, incluindo deslocamentos e rotações. O setor modelado possui 5 fileiras de colunas, portanto são 4 vãos de degraus de arquibancadas e lajes

TABELA 1

FREQUÊNCIAS DE PULO DE TORCIDAS

Clube de futebol	Música da torcida	f_s (Hz)
Flamengo	"Festa na favela"	2,7
	"Saí do chão"	2,4
Boca Juniors Argentina	"Boca mi buen amigo"	2,4
	"Y dale Boca"	2,4
	"Vamos xeneizes"	1,9
Chivas México	"Chivas de mi vida"	1,7
	"Te alentaré de corazon"	1,8
Pumas Mexico	"Olele, olalá"	2,4

internas. A discretização em elementos finitos obtida no SAP2000 é mostrada na Figura 4.

Para o amortecimento estrutural, algumas normas sugerem valores que variam de 1% a 3% do valor crítico de amortecimento (ζ) para estruturas de concreto armado. Desta forma, o valor de 2% de ζ é adotado. Importante ressaltar que o amortecimento crítico depende da massa e da rigidez da estrutura e serve de referência para saber se a estrutura apresentará oscilações quando vibrando livremente (amortecimentos inferiores ao crítico).

2.3 Modelo de carregamento

O modelo matemático considerado para simular a ação de torcidas pulando é descrito na Equação (1), proposta por Faísca (2003) para um único indivíduo em movimento.

$$\begin{aligned}
 &F(t) = CD\{k_p G[0,5 - \\
 [1] &0,5 \cos \frac{2\pi}{t_c} t]\}, \text{ para } t_c < t \leq T_p \\
 &F(t) = 0, \text{ para } t_c < t \leq T_p
 \end{aligned}$$

Na qual:

$F(t)$ = carga modelada;

CD = coeficiente de defasagem;

k_p = fator de impacto dinâmico;

G = peso de uma pessoa;

t_c = tempo de duração do contato com o solo;

T_p = período do ritmo.

Para definir a frequência adequada do pulo, foram consultados estudos prévios realizados por Faísca, (2003) que estabelece va-

TABELA 2

TEMPO DE CONTATO OBTIDO EXPERIMENTALMENTE

F_s (Hz)	T_p (s)	t_c (s)	t_c/T_p
2,00	0,50	0,36	0,72
2,27	0,44	0,33	0,75
2,50	0,40	0,32	0,80
2,70	0,37	0,33	0,89

FONTE: FAÍSCA (2003)

lores em torno de 2,5Hz. Com esse valor como referência inicial, foram analisados alguns vídeos de torcedores durante partidas de futebol, para tipificar suas frequências de salto. Como resultado desta pesquisa, algumas das músicas das torcidas mais populares na América Latina e suas frequências de salto são mostradas na Tabela 1.

Ao analisar os dados apresentados na Tabela 1, percebe-se que as músicas das torcidas brasileiras induzem movimentos que se caracterizam por frequências de salto mais altas, em torno de 2,4 e 2,7Hz. Já as músicas das torcidas argentinas e mexicanas levam a uma frequência de salto entre 1,7Hz e 2,4Hz.

Desta forma, para simular as possíveis variações dos pulos dos torcedores, foi realizado um estudo com 15 frequências de carga (F_s) variando de 2,10Hz a 2,80Hz. Neste estudo, o tempo de contato (t_c) entre o torcedor e as arquibancadas é calculado de acordo com Lima

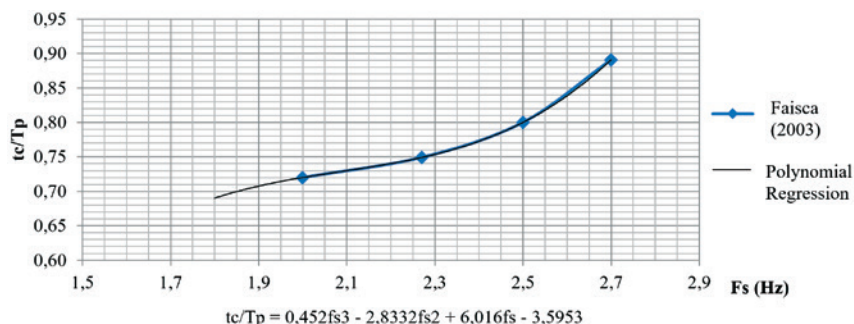


FIGURA 5

RELAÇÃO ENTRE O TEMPO DE CONTATO E O PERÍODO, EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA

TABELA 3

PARÂMETROS USADOS NA DEFINIÇÃO DAS CARGAS DINÂMICAS

f_s (Hz)	T_p (s)	t_c/T_p	t_c (s)	$CD.k_p$
2,10	0,476	0,730	0,348	2,15
2,15	0,465	0,735	0,342	2,14
2,20	0,455	0,740	0,336	2,12
2,25	0,444	0,746	0,332	2,11
2,30	0,435	0,753	0,328	2,09
2,35	0,426	0,762	0,324	2,06
2,40	0,417	0,772	0,322	2,03
2,45	0,408	0,785	0,320	2,00
2,50	0,400	0,800	0,320	1,96
2,55	0,392	0,817	0,321	1,92
2,60	0,385	0,838	0,322	1,87
2,65	0,377	0,863	0,325	1,82
2,70	0,370	0,891	0,330	1,76
2,75	0,364	0,923	0,336	1,70
2,80	0,357	0,960	0,343	1,64

(2013). Em seu trabalho, o autor apresenta a curva de variação da taxa dada pelo tempo de contato e o período da função (t_p) em função da frequência característica, conforme mostra a Figura 5. Para obter a curva, o autor utilizou os dados obtidos experimentalmente por Faisca (2003) apresentados de forma resumida na Tabela 2.

Para a simulação da magnitude dada pelo produto do fator de impacto dinâmico (k_p) e o coeficiente de defasagem (CD), foi adotada a formulação proposta por Sim (2006).

$$[2] \quad CD.k_p = \frac{\pi}{\left(2 \cdot \frac{t_c}{T_p}\right)}$$

A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados na definição das cargas que atuam na estrutura.

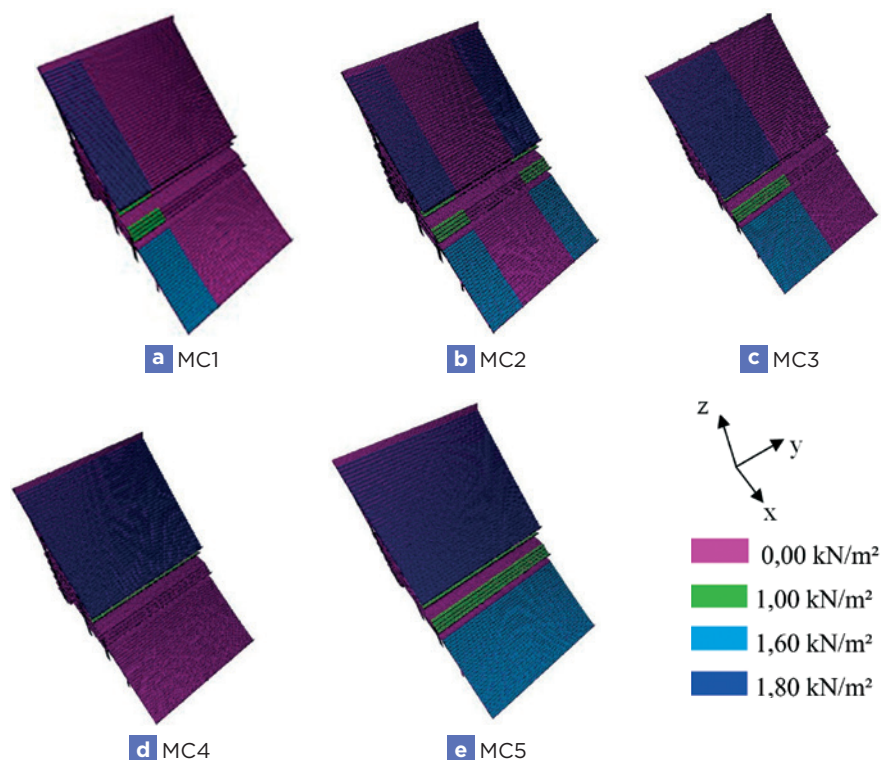
A consideração de G é feita da seguinte forma: para as arquibancadas inferiores, adota-se o valor médio de 1,6kN/m² considerando o peso médio de todos igual a 800N, o total de assentos no estádio e a área total das arquibancadas. Para as arquibancadas superiores, assume-se conservadoramente a possibilidade de haver uma ocupação maior que o número de lugares disponíveis, sendo adotada a carga de 1,8kN/m².

Para as intermediárias, utiliza-se 1kN/m², por se tratar de uma área de camarotes e salas de imprensa com menor ocupação pelo público.

Em relação à ocupação das arquibancadas são considerados cinco cenários distintos (Figura 6). O primeiro modelo de carregamento, denominado MC1, considera que apenas um lado, que representa 25% da área das arquibancadas, é ocupado pelo público. O segundo modelo de carregamento, denominado MC2, considera que os dois lados das arquibancadas são ocupados pelo público, representando 50% da carga da estrutura. O terceiro modelo de carregamento, MC3, considera a metade da área ocupada pelos torcedores, mas em um dos lados. O quarto modelo de carregamento, MC4, considera que apenas as arquibancadas superior e intermediária são ocupadas pelo público, enquanto para o quinto modelo, MC5, a estrutura é considerada totalmente carregada.

2.4 Limites estabelecidos pelos códigos

Existem alguns códigos internacionais que tratam das vibrações,

**FIGURA 6**

OCUPAÇÃO DAS ARQUIBANCADAS

TABELA 4PERCEÇÃO HUMANA ASSOCIADA
A VIBRAÇÕES VERTICAIS

Descrição	Intervalo de frequência 1-10 Hz Acelerações de pico (m/s ²)
Apenas perceptível	0,034
Claramente perceptível	0,10
Desconfortável	0,55
Intolerável	1,80

FONTE: CEB (1991)

considerando o conforto humano. Entre eles, o código CEB (1991) foi escolhido para verificar as respostas dinâmicas deste trabalho em termos de aceleração de pico.

No Anexo I do CEB (1991), o código aborda as respostas humanas às vibrações focando a atenção na sensibilidade humana a elas. Nesse sentido, lista alguns parâmetros que influenciam essa sensibilidade e a perceptibilidade das vibrações. Em seguida, associa essa percepção humana às faixas de aceleração e velocidade, conforme Tabela 4.

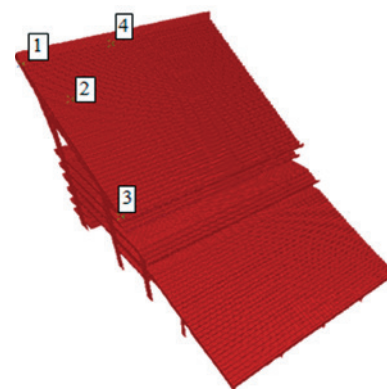
3. RESULTADOS

A Tabela 5 mostra as 8 primeiras frequências naturais e as descrições dos modos de maior interesse. Os primeiros modos de vibração têm frequências naturais baixas, entre 1Hz e 3Hz, próximas às frequências das atividades humanas.

Para verificar em quais pontos e para quais tipos de carregamento a arquibancada apresenta acelerações excessivas, a estrutura foi submetida a 75 condições de carregamento considerando as cinco diferentes distribuições de audiência nas arquibancadas explicadas anteriormente, e quinze frequências de excitação variando de 2,10Hz a 2,80Hz em passos de 0,05Hz para cada tipo de distribuição. Os pontos de leitura são mostrados na Figura 7.

A resposta de aceleração mais alta ocorre no ponto 2 quando a frequência de excitação é de 2,55Hz e para o MC5 (Figuras 8, 9 e 10).

Para o projeto do sistema de controle de vibrações, foram realizados

**FIGURA 7**

PONTOS DE ACELERAÇÃO CONSIDERADOS

estudos com 16 configurações diferentes de amortecedores de massa sintonizados (AMS), a fim de reduzir as acelerações nas arquibancadas a níveis aceitáveis e considerando uma massa que não leve a grandes aumentos nos esforços estruturais. Assim, são utilizados AMSs com massas próximas a 4t, 2t, 1t e 0,5t, sintonizados em frequências escolhidas, levando em consideração o pico observado no espectro de acelerações (segundo harmônico do carregamento - $f_{2h} = 5,10\text{Hz}$, quinta frequência natural - $f_5 = 4,95\text{Hz}$, sexta frequência natural - $f_6 = 5,07\text{ Hz}$ e sétima frequência natural - $f_7 = 5,12\text{ Hz}$).

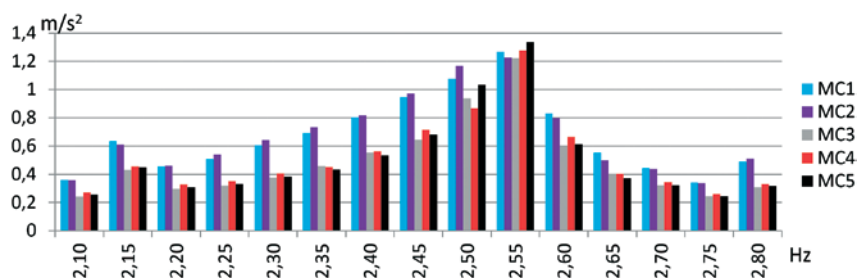
Os dispositivos são inseridos nos pontos de deslocamento vertical máximo dos modos com os quais estão sintonizados. Os estudos apresentam resultados positivos apenas nos casos em que o AMS se situa no ponto crítico, não mostrando eficácia quando se analisa a quinta frequência natural. Os estudos mostram que somente a consideração de dispositivos com massa próxima ou superior a 1 t podem reduzir as acelerações a valores aceitáveis. Os parâmetros mais adequados de cada AMS podem ser verificados na Tabela 6.

Uma vez que as arquibancadas são simétricas, optou-se pela instalação de dois AMS, um de cada lado da estrutura, ao invés de apenas um concentrando toda a massa. A modelagem deste dispositivo no software SAP2000 é feita através do elemento *link* que ligará um de seus nós à estrutura e o outro à massa do AMS. Conforme o manual, a massa

TABELA 5

DESCRIÇÃO DOS MODOS DE VIBRAÇÃO

Modo	Frequência (Hz)	Descrição
1	1.02	Flexão na direção tangente
2	2.27	Flexão na direção radial
3	2.48	Torsão no plano "xy"
4	2.78	Flexão na direção tangente
5	4.95	Flexão na direção tangente
6	5.07	Flexão na arquibancada superior
7	5.12	Flexão na arquibancada superior
8	5.48	Flexão na arquibancada superior na direção radial

**FIGURA 8**

ACELERAÇÕES VERTICAIS MÁXIMAS — PONTO 2

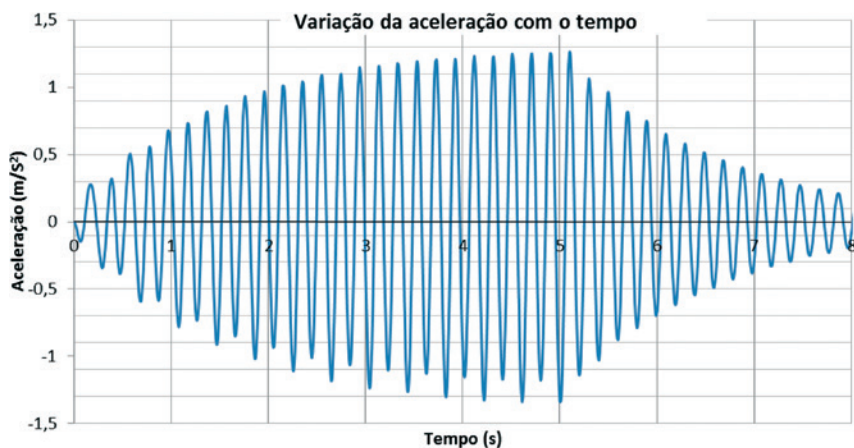


FIGURA 9
HISTÓRICO DE ACELERAÇÕES — PONTO 2 — MC5

do amortecedor deverá atuar apenas no sentido em que houver movimento (translação e/ou rotação), levando em conta o sistema global de coordenadas. Já, o amortecimento e a rigidez da mola deverão ser inseridos nas propriedades do *link* que fará a ligação da massa à estrutura, levando em conta os deslocamentos que poderão ocorrer, porém, utilizando o sistema local de coordenadas. A localização dos amortecedores pode ser vista na Figura 11.

O espectro de acelerações mostrando os picos de transferência de energia para a estrutura principal

com a inserção dos dispositivos de controle pode ser visto na Figura 12, enquanto a comparação das respostas em termos de acelerações verticais para as arquibancadas com controle e sem controle está apresentada na Figura 13. Os valores de pico de aceleração e o limite aceitável para as duas situações encontram-se na Tabela 7.

A estrutura é também verificada para os demais casos de carga estudados, levando em consideração a frequência de carga de 2,55 Hz, que apresenta as maiores taxas de vibração. Os resultados obtidos

para os modelos com e sem a inserção dos dispositivos de controle e a redução da aceleração obtida podem ser verificados na Tabela 8. Para as acelerações de pico, o limite de 1.000 m/s² foi considerado aceitável, com base nos valores apresentados anteriormente.

Para todos os modelos e verificações realizadas, a redução alcançada é suficiente para que as vibrações da estrutura estejam dentro de níveis aceitáveis.

4. CONCLUSÕES

Em geral, as arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília não apresentam problemas consideráveis de vibração excessiva, porém, em pontos específicos e para determinadas frequências de carga as pessoas podem sentir algum desconforto.

A análise modal das arquibancadas mostra que os modos de vibração possuem frequências relativamente baixas, o que a princípio pode ser bastante preocupante. Para efeito de comparação, a frequência

TABELA 6
PARÂMETROS OTIMIZADOS PARA CADA AMS

M (kN*s ² /m)	μ (%)	m (kN*s ² /m)	α _{otimizado} (%)	f (Hz)	k (kN/m)	ε (%)	c (kN*s/m)
8247,910	0,0125	1,031	1,000	5,069	1045,803	0,559	0,367

TABELA 7
COMPARAÇÃO DAS ACELERAÇÕES ESTRUTURAIS SEM E COM DISPOSITIVOS DE CONTROLE

Acelerações verticais máximas (m/s ²)			
Sem AMS	Com AMS	Limite	Red. (%)
1,336	0,836	1,000	37,407

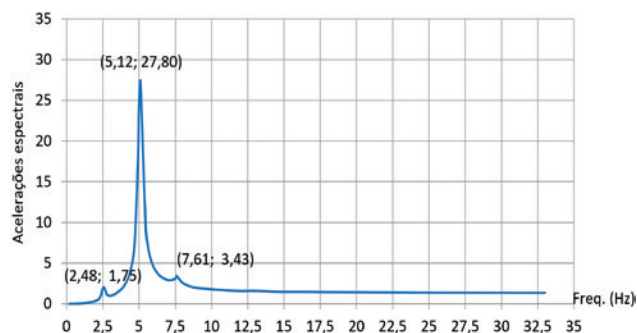


FIGURA 10
ESPECTRO DE ACELERAÇÕES — PONTO 2 — MC5

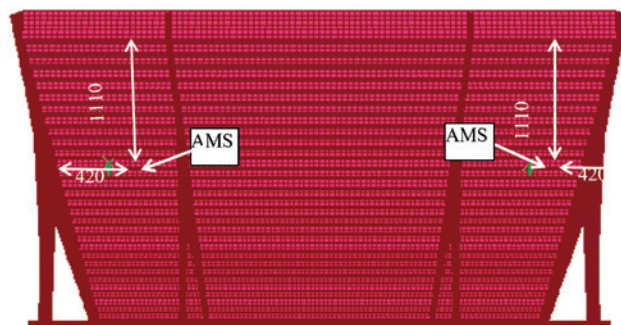


FIGURA 11
LOCALIZAÇÃO DOS AMS — MEDIDAS EM CM

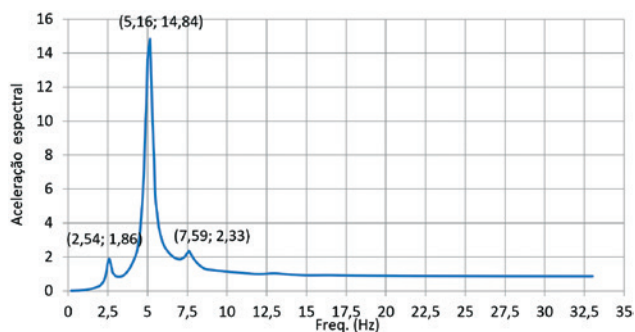


FIGURA 12

ESPECTRO DAS ACELERAÇÕES VERTICAIS NO PONTO 2 DA ESTRUTURA COM AMS

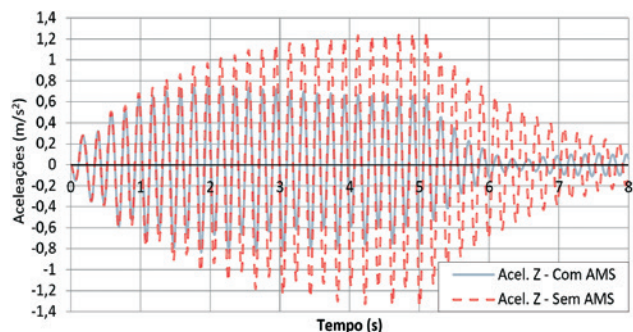


FIGURA 13

SOBREPOSIÇÃO DOS HISTÓRICOS DE ACELERAÇÕES VERTICAIS COM E SEM CONTROLE

fundamental encontrada, $f_1 = 1,02\text{Hz}$, é muito inferior à proposta pela NBR-6118/2014, que sugere um valor mínimo de 9,6 Hz. O critério de aumento da frequência fundamental pode ser uma boa solução. Em situações específicas, porém, nem sempre é o melhor, principalmente em estruturas grandes e complexas.

Além disso, pode-se verificar que a maioria dos modos de vibração apresenta deslocamentos no plano horizontal que não seriam excitados na maioria das situações. No entanto, quando o público balança o corpo lateralmente, equilibra o corpo, ou mesmo se está situado de forma desequilibrada, a estrutura também é carregada na direção tangencial e é excitada nos modos que possuem deslocamentos nessa direção.

A aplicação de diferentes frequências de carga apresenta outra situação a ser avaliada. Conforme comentado anteriormente, estruturas complexas como esta podem apresentar diferentes tipos de modos de vibração, com frequências naturais

TABELA 8

COMPARAÇÃO DAS ACELERAÇÕES MÁXIMAS PARA OS MODELOS ESTUDADOS

Modelo	a-peak (m/s ²)		Redução (%)	Aceitabilidade
	Sem AMS	Com AMS		
MC1	1,269	0,700	44,838	Sim
MC2	1,229	0,718	41,579	Sim
MC3	1,222	0,784	35,843	Sim
MC4	1,275	0,870	31,765	Sim
MC5	1,336	0,836	37,407	Sim

na mesma faixa da carga ou seus harmônicos próximos e podem ser facilmente excitadas. Desta forma, é importante avaliar as situações reais que resultem nas maiores taxas de vibração. Neste trabalho, isso aconteceu ao considerar o carregamento com frequência intermediária associada entre o sexto e sétimo modos de vibração, que é o que acarreta as maiores taxas de vibração.

A distribuição do público nas arquibancadas é outra questão importante a ser analisada. Os estudos mostram que os resultados podem apresentar va-

riações consideráveis nas acelerações para os cinco modelos estudados.

Embora as arquibancadas do estádio não apresentem vibrações excessivas, o público que as frequenta deve sentir conforto onde quer que esteja. Conforme mostrado, um dos pontos analisados apresenta acelerações acima do aceitável para determinadas situações de carga. Os estudos mostram que a instalação de dois AMSs com massa relativamente baixa, cerca de uma tonelada cada, é suficiente para resolver o problema de forma satisfatória. ☹

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CEB. Vibration Problems in Structures. Practical Guidelines. Bulletin d'Information N 209. Comité European du Béton, Switzerland, 1991.
 [2] FAISCA R. G. Caracterização de Cargas Dinâmicas geradas por Atividades Humanas. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2003.
 [3] LIMA, G. V. F., Análise Dinâmica via Método dos Elementos Finitos do Estádio Nacional de Brasília. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, Brasil, 2013.
 [4] SAAED T.E. et al. A state-of-the-art review of structural control systems. Journal of Vibration and Control. Volume 21, 919-937, 2015.
 [5] SIM J. H. H., Human-Structure Interaction in Cantilever Grandstands. Doctor's degree Thesis. University of Oxford, England, 2006.