

ANÁLISE DO CONFORTO HUMANO PERANTE AS VIBRAÇÕES DE ESTÁDIOS DE FUTEBOL

Kely Camoli Berezoski¹; Elisabeth Penner²; Amacin Rodrigues Moreira³

Resumo

A análise das vibrações de estádios de futebol, em geral, é de grande importância, pois influencia diretamente no conforto das pessoas nas arquibancadas. Neste estudo, foram avaliadas as frequências naturais de vibração das estruturas dos dois estádios e comparadas com as frequências ocasionadas pelos movimentos dos torcedores nas arquibancadas. Pelo emprego dos fundamentos da teoria da dinâmica estrutural e com o auxílio do programa SAP2000, que utiliza o método dos elementos finitos como base, a estrutura dos estádios foi modelada computacionalmente. Os resultados dos valores das frequências naturais e dos modos de vibração das estruturas foram comparados com os níveis de percepção e conforto humano perante as vibrações. Observou-se que as frequências de vibração das estruturas encontram-se em intervalos considerados críticos para o conforto humano, sendo necessário a realização de estudos mais detalhados.

PALAVRAS-CHAVE: Frequência natural de vibração; Conforto humano; Método dos Elementos Finitos.

Abstract

The analysis of the vibrations in soccer fields is, in general, of great importance due to its direct influence on the comfort of the people on the bleachers. In this study, the natural vibration frequencies of Curitiba's main stadiums were evaluated and compared to frequencies caused by the movement of the cheerers on the bleachers. By applying the fundamentals of the structural dynamics and with assistance of programs that use the Finite Element Method as basis, the structure of the stadiums was modeled in a computer. The results of the natural frequency values and vibration modes were compared to the levels of human perception and comfort exposed to such vibrations to analyze whether or not the vibrations found on these stadiums are prejudicial to people.

KEY-WORDS: *Natural frequency. Human comfort. Finite Element Method.*

Introdução

No Brasil, grande parte das estruturas é dimensionada apenas com a preocupação de seu comportamento frente a cargas estáticas. Porém, existem estruturas que estão submetidas a forças aplicadas subitamente ou a forças com grande variação de amplitude, conforme ALMEIDA (1990). Entre as construções submetidas a vibrações ocasionadas por agentes externos estão os estádios de futebol, os quais podem receber um grande número de espectadores durante partidas e demais eventos. O efeito do movimento das pessoas nas arquibancadas não pode ser determinado pela estática. Com as movimentações das pessoas,

¹ Engenheira Civil pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. E-mail: kelycb@yahoo.com.br.

² Professora Doutora da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. E-mail: epenner@utfpr.edu.br.

³ Professor Mestre da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Email: amacinrm@utfpr.edu.br.

ocorre a vibração da estrutura e, dependendo da frequência dessa vibração, torna-se perceptível aos espectadores.

Existem limites de aceitabilidade das vibrações sentidas pelo corpo humano, acima dos quais surge um desconforto para as pessoas. Estes limites são apresentados na ISO 2631: Guia para a Avaliação da Exposição Humana às Vibrações de Corpo Inteiro, bem como em alguns estudos relacionados a determinar índices de conforto humano ligados às frequências de vibração.

Sendo assim, o objetivo deste estudo é realizar a análise das frequências naturais de vibração das estruturas dos dois principais estádios de futebol de Curitiba, o Estádio Major Antônio Couto Pereira e o Estádio Joaquim Américo Guimarães, por meio de modelagem numérica, visando verificar as condições de segurança e bem-estar das pessoas.

1 Análise estrutura dinâmica

De acordo com CREDE (1972), as respostas dinâmicas envolvem o tempo como parâmetro adicional às coordenadas espaciais do problema estático correspondente. Este fato gera equações diferenciais parciais. Para facilitar a análise, é comum dividir a estrutura em vários elementos, transformando o problema em uma busca de soluções conjuntas de diversas equações diferenciais ordinárias, normalmente em número equivalente ao dos graus de liberdade empregados.

As propriedades dinâmicas a serem analisadas nos estudos de comportamentos dinâmicos de estruturas são essenciais para a realização de análises e obtenções de conclusões sobre a estrutura. Elas são basicamente a frequência natural de vibração da estrutura, juntamente com os modos de vibração e o amortecimento.

Se um impulso é provocado em uma estrutura, o sistema adquire energia e esta é dissipada por meio de movimentos vibratórios. Esses movimentos são medidos pelas frequências. A frequência natural de uma estrutura é a propriedade modal mais importante da estrutura, pois representa a taxa de oscilação livre, após a força que provocou a vibração parar de atuar na estrutura. A frequência natural depende apenas da geometria, da massa e da rigidez da estrutura. Dessa forma, alterações nessas propriedades alteram a frequência natural, que pode ser chamada de frequência de ressonância.

Os modos de vibração são as possíveis formas de vibração de uma estrutura e estão diretamente ligados às frequências naturais. Ou seja, para cada frequência natural há um modo de vibração correspondente. O primeiro modo de vibração equivale à frequência natural, cujo

valor dentre todas as frequências é o menor. Esta frequência é chamada de frequência fundamental e é a mais problemática na construção civil, pois se assemelha às frequências de variáveis e forças que agem nas estruturas, podendo causar o fenômeno da ressonância e o desconforto humano.

Segundo CREDE (1972), amortecimento é a dissipação de energia de um sistema vibratório. Esta dissipação está relacionada com os movimentos dos componentes do sistema. Com o amortecimento, a amplitude de vibração decresce continuamente até que o sistema pare. Nas aplicações de vibrações em estruturas, segundo ALVES FILHO (2005), o amortecimento presente é pequeno e, neste caso, as frequências naturais da estrutura e seus modos de vibração praticamente independem do amortecimento. Vale ressaltar que a resposta da estrutura sob ação de um carregamento é fortemente influenciada pelo amortecimento, mas no caso de vibrações livres, costuma desconsiderá-lo, a fim de facilitar os cálculos.

De acordo com FERNANDES (2000), um corpo está em vibração quando descreve um movimento oscilatório em torno de um ponto de referência. Este movimento pode consistir em um simples componente ocorrendo em uma única frequência, ou muitos componentes ocorrendo em diversas frequências, simultaneamente.

2 Equacionamentos importantes

Algumas equações são de fundamental importância no estudo das frequências naturais de vibrações das estruturas. Entre elas está a equação do movimento de um sistema.

Para definir a equação do movimento, segundo ALVES FILHO (2005), pode-se considerar uma estrutura composta por apenas um elemento finito de mola de constante k , massa, m , considerada como concentrada na extremidade oposta ao ponto de fixação e, de amortecedor c , que representa o amortecimento presente. A força externa aplicada, $F(t)$, varia com o tempo, sendo assim, o deslocamento da estrutura, $u(t)$, também varia com o tempo.

Aplicando-se a 2ª Lei de Newton é possível determinar a equação do movimento de qualquer sistema dinâmico. Através do Diagrama de Corpo Livre, caracteriza-se a condição dinâmica do sistema. Assim, tem-se:

$$\{\text{RESULTANTE DAS FORÇAS}\} = [\text{MASSA}] \cdot [\text{ACELERAÇÃO}]$$

Neste caso existem três forças atuantes, que são dadas por:

$F(t)$ – força externa aplicada ao corpo que varia com o tempo;

F_{elast} – força elástica que a mola aplica no corpo, proporcional à deformação da mola (ku) e;

F_{amort} – força de amortecimento que o amortecedor aplica no corpo, proporcional à velocidade (cv).

Da Cinemática, a velocidade de uma partícula é dada pela derivada primeira da posição em relação ao tempo e, a aceleração é dada pela derivada segunda da posição em relação ao tempo. Assim,

$$v = \dot{u} = \frac{du}{dt} \text{ e } a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2u}{dt^2} = \ddot{u} \quad (01),(02)$$

Desta forma, respeitando os sentidos de cada força e reagrupando os termos, tem-se:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F(t) \quad (03)$$

O entendimento do que ocorre com um grau de liberdade permite compreender o que ocorre com toda a estrutura. O exemplo citado anteriormente, aparentemente muito simples, é o espelho do que ocorre com o movimento de um dos nós de uma estrutura. A mola representa a rigidez da estrutura no nó, em certa direção. O amortecedor é a forma que contabiliza a perda de energia no movimento vibratório do nó. E, a massa caracteriza as propriedades de inércia no nó, devido à estrutura possuir massa.

A equação (03) é uma equação diferencial que para ser resolvida é necessário efetuar sua integração, descobrindo-se assim, como o deslocamento u varia com o tempo.

Para estruturas reais, existem diversos nós e diversos deslocamentos a serem determinados. Assim, milhares de equações são necessárias para representar o comportamento dinâmico dos graus de liberdade da estrutura. Com auxílio de programas computacionais estas equações podem ser resolvidas em tempo hábil. Para facilitar o armazenamento e processamento das equações utilizam-se matrizes.

Desta forma, a equação (03) pode ser representada em sua forma matricial conforme a equação (04).

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F(t)\} \quad (04)$$

Os termos da equação (04) são, da esquerda para a direita, matriz de massa da estrutura, matriz das acelerações nodais, matriz de amortecimento da estrutura, matriz das velocidades nodais, matriz de rigidez da estrutura, matriz dos deslocamentos nodais e, matriz das forças nodais variáveis com o tempo, respectivamente.

Outra equação muito importante na análise das vibrações é a equação da frequência do sistema, que pode ser obtida relacionando-se o Movimento Harmônico Simples, a Segunda Lei de Newton e o Movimento Circular e Uniforme. Por meio dessa relação, obtém-se a equação (05), ligada à frequência de oscilação do sistema corpo-mola.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{e} \quad \omega^2 = \frac{k}{m} \quad (05), (06)$$

onde,

ω é a velocidade angular instantânea do sistema no MCU (dado pelo deslocamento angular em função tempo), que no MHS, é chamada de pulsação do movimento ou frequência circular do MHS.

Para uma estrutura discretizada com n graus de liberdade, cada grau de liberdade apresenta um movimento de vibração livre que caracteriza um MHS. Em cada modo de vibração o movimento é dado por $U=U_0 \text{ sen } \omega t$. Cada grau pode apresentar uma amplitude diferente na sua vibração livre. Para representar todos os deslocamentos ligados aos n graus de liberdade e suas amplitudes, pode-se escrever:

$$\{U(t)\} = \{U_0\} \text{ sen } \omega t \quad (07)$$

onde, $\{U(t)\}$ é a matriz-coluna de todos os componentes de deslocamentos associados aos n graus de liberdade no instante t e, $\{U_0\}$ é a matriz-coluna das amplitudes de oscilação dos n graus de liberdade. Relacionando a equação (04) com a (07), considerando vibração livre não amortecida, ou seja, com $[C]=0$ e $\{F(t)\}=0$, e calculando a derivada segunda de $\{U(t)\}$, tem-se, simplificando:

$$([K] - \omega^2 [M])\{U_0\} = 0 \quad (08)$$

Esta é a equação de equilíbrio dinâmico de um sistema vibrando harmonicamente. Ela é fundamental no cálculo das frequências naturais da estrutura. Cada modo de vibração apresenta uma frequência própria e um perfil característico. Cada frequência ligada ao seu modo de vibração é representada por ω e o perfil de cada modo é representado por $\{U_0\}$. Assim, para cada conjunto de $\{U_0\}$ e ω que satisfaçam a equação (08), tem-se um modo de vibração característico, com sua respectiva frequência natural. Apenas alguns valores satisfazem esta equação, tendo a solução trivial, que ocorre quando $\{U_0\}=0$, e neste caso, não há vibração livre e, soluções não-triviais, que surgem a partir de $[K] - \omega^2 [M] = \{0\}$. As frequências naturais da estrutura serão os valores aos quais esta equação é verificada. A solução da equação é possível quando o determinante da mesma é nulo. Considerando esta situação, a incógnita do sistema será ω^2 . Dessa forma, é possível definir quais as frequências naturais de um sistema com vários graus de liberdade.

$$\det([K] - \omega^2 [M]) = 0 \quad (09)$$

A equação (09) é conhecida como equação de frequência do sistema. O grau dessa equação depende das dimensões das matrizes, ou seja, do número de graus de liberdade da estrutura, que gerarão diversas raízes, possibilitando a obtenção das diversas frequências naturais do sistema. As n raízes da equação matricial são os quadrados das frequências dos n modos de vibração possíveis.

3 Conforto humano em relação às vibrações

Ao realizar diversas atividades, o ser humano acaba por provocar vibrações nas estruturas ou no meio ao qual ele está inserido. O CEB-209 (1991) estabelece modelos representativos de algumas das atividades humanas, as quais são consideradas como atividades padronizadas. Segundo RODRIGUES (1998), pode-se observar em partidas de futebol, realizadas nos estádios brasileiros, que os principais movimentos dos torcedores são pular aleatoriamente ou ordenadamente na direção vertical, bater palmas, levantar rapidamente ou de forma sincronizada. Assim, estas atividades, de acordo com o CEB-209 (1991), apresentam frequências naturais que variam de 0,6 Hz a 3,0 Hz.

As vibrações das estruturas podem gerar um desconforto no corpo humano ou até mesmo uma sensação de insegurança. A intensidade da percepção do homem às vibrações está intimamente ligada às amplitudes de deslocamentos, às velocidades e acelerações, à frequência de vibração, ao amortecimento da estrutura e à duração da exposição a tal vibração. Não há normas nacionais que definam os estados limites de utilização por vibrações excessivas, nem os níveis de percepção e desconforto humano. Na literatura em geral, existem diversos trabalhos e estudos que apresentam vários níveis de percepção e desconforto das pessoas perante as vibrações. Há, neste ramo, a ISO 2631: Guia para a Avaliação da Exposição Humana às Vibrações de Corpo Inteiro, cujo objetivo é fornecer um guia com os níveis aceitáveis de exposição humana à vibração de corpo inteiro, facilitando a avaliação e comparação de dados. Ela relaciona as frequências naturais de vibração com a aceleração da vibração e o tempo de exposição humana a tal vibração.

4 Modelagem numérica dos estádios analisados

Como objetos de estudo, os estádios foram modelados no programa SAP2000, a fim de se obter os valores das frequências naturais de vibração e seus respectivos modos de vibração. Para a modelagem, considerou-se um setor de cada estádio.

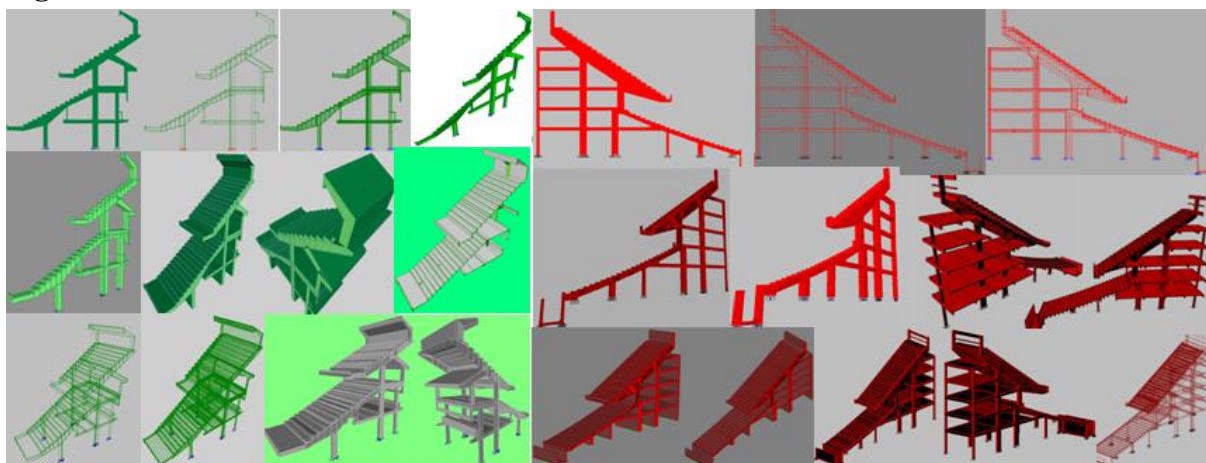
Vários modelos foram criados, primeiramente considerando o corte da região analisada, que é a área de maior concentração de torcedores nos estádios e também está sujeita a maiores efeitos da vibração. Após, variou-se a espessura deste corte, obtendo-se os diferentes valores de frequências e modos de vibração. Além de modelos em duas dimensões, variando apenas a espessura da estrutura, resolveu-se modelar estruturas tridimensionais, para comparar com os valores obtidos e verificar a aceitabilidade dos modelos. Os modelos cujas espessuras são constantes em toda seção modelada serviram apenas para se ter uma idéia inicial dos resultados fornecidos. A seguir são apresentados os estádios Major Antonio Couto Pereira e o estádio Joaquim Américo Guimarães, também denominado Arena da Baixada. Para ambas as estruturas foi considerada a configuração da estrutura no ano desse estudo, antes de reformas arquitetônicas que ambos estádios sofreram.

Os elementos utilizados foram do tipo casca. Os modelos de casca servem para representar estruturas de pequenas espessuras. A característica da casca é ser um elemento com uma das dimensões muito maior do que as outras duas.

Discretizações intermediárias foram realizadas, até chegar ao limite do programa. Os modelos discretizados apresentados referem-se à última discretização realizada em cada tipo de modelo.

Na figura 1 são apresentados os diversos modelos do estádio Couto Pereira e da Arena da Baixada, modelados no SAP2000.

Figura 1 - Modelos criados no SAP2000 - Couto Pereira e Arena da Baixada



Fonte: Os Autores.

5 Resultados obtidos na modelagem numérica

Para cada modelo anteriormente apresentado, selecionou-se a primeira frequência, cujo modo de vibração apresentado estava no sentido longitudinal da estrutura, ou seja, quando a

estrutura vibrava na vertical, fato que ocorre nos estádios com o movimento vertical da torcida. Os valores obtidos nos modelos do Estádio Major Antonio Couto Pereira podem ser visualizados na tabela 1 e, os valores obtidos nos modelos do Estádio Joaquim Américo Guimarães se encontram na tabela 2.

Tabela 1 - Resultados das modelagens do estádio Major Antônio Couto Pereira

Modelo	Sem discretizar		Com discretização		Variação entre as frequências (%)
	Modo de vibração	Frequência natural de vibração (Hz)	Modo de vibração	Frequência natural de vibração (Hz)	
Corte com espessura 0,30m	7º	6,13	5º	4,49	26,72
Corte com espessura 1,00m	3º	6,13	2º	4,49	26,72
Corte com espessura 6,50m	1º	6,13	1º	4,49	26,72
Corte variando espessuras	5º	3,78	4º	2,69	28,86
Tridimensional	2º	3,65	3º	2,68	26,53

Fonte: Os autores.

Tabela 2 - Resultados das modelagens do estádio Joaquim Américo Guimarães

Modelo	Sem discretizar		Com discretização		Variação entre as frequências (%)
	Modo de vibração	Frequência natural de vibração (Hz)	Modo de vibração	Frequência natural de vibração (Hz)	
Corte com espessura 0,40m	8º	5,08	6º	3,54	30,18
Corte com espessura 1,00m	4º	5,08	3º	3,54	30,18
Corte com espessura 7,60m	1º	5,08	1º	3,54	30,18
Corte variando espessuras	4º	3,72	4º	2,32	37,67
Tridimensional sem neoprene	3º	3,83	3º	2,70	29,45
Tridimensional com neoprene	3º	3,83	3º	2,69	29,70

Fonte: Os autores.

Observa-se que a aceitabilidade do modelo em corte é baixa quando se dimensiona toda a estrutura com uma mesma espessura, independente de qual seja. Porém, ao modificar as espessuras dos elementos, adequando-as às dimensões reais da estrutura, o modelo em corte torna-se tão confiável quanto o modelo tridimensional. Além disso, é facilmente notada a influência da discretização da estrutura que acaba por refinar os resultados, tendendo a uma resposta mais confiável e mais próxima da realidade. Isto ocorre porque o método dos elementos finitos transforma uma estrutura real, com infinitos elementos, em um modelo com finitos elementos. Então, quanto maior o número de elementos finitos do modelo, maior será sua aproximação com a estrutura real.

Na definição dos valores a serem utilizados nas análises, optou-se por considerar as frequências dos cortes variando sua espessura, pois estes apresentaram valores muito próximos do modelo tridimensional. Além disso, o modelo tridimensional da Arena da Baixada não sofreu discretização suficiente, ficando restrito à capacidade do programa. Como

o modelo em corte do estádio Couto Pereira, variando suas espessuras, apresentou resultado muito próximo do tridimensional, com uma diferença de 0,23%, optou-se por considerar o valor do corte variando suas espessuras para a Arena da Baixada também, mesmo este não chegando próximo ao valor do modelo tridimensional pouco discretizado.

Os valores considerados para a análise do conforto humano se encontram na tabela 3. Determinou-se um intervalo considerado crítico, a fim de análise, em função dos valores apresentados anteriormente.

Tabela 3 - Valores selecionados para análise do conforto humano

Valores finais para comparação		
Estádio	Frequência crítica (Hz)	intervalo considerado crítico
Couto Pereira	2,69	2,00 a 4,00
Arena da Baixada	2,32	2,00 a 4,00

Fonte: Os autores.

6 Análise de resultados

Com os valores das frequências naturais na situação de projeto selecionados, partiu-se para a comparação destes com as bandas de frequências que geram desconforto humano, bem como a comparação com as frequências causadas por atividades humanas.

Observa-se que as frequências naturais de vibração obtidas pela modelagem dos estádios (2,69 Hz e 2,32 Hz) encontram-se dentro do intervalo das frequências causadas pelos movimentos dos torcedores nas arquibancadas (0,60 Hz a 3,00 Hz). Assim, a probabilidade de ocorrer o fenômeno de ressonância quando os torcedores estão se movimentando nos estádios é grande. Isto causa o aumento considerável da amplitude das vibrações, alavancando no aumento da percepção das vibrações por parte dos presentes nos estádios.

Para chegar a resultados mais precisos com relação às amplitudes resultantes da proximidade entre as frequências naturais das estruturas e as frequências resultantes dos movimentos dos torcedores, pode-se carregar o modelo simulando a movimentação da torcida. Assim, as conclusões são obtidas com maior exatidão, verificando qual seria, efetivamente, a influência dessa movimentação com relação ao conforto dos usuários.

Com relação aos limites de percepção humana às vibrações, existem diversos estudos que foram considerados. Dessa forma, efetuou-se a comparação entre os valores obtidos na modelagem dos estádios e os apresentados nos estudos. Esta comparação é visualizada na tabela 4.

Tabela 4 - Verificação do conforto humano nos estádios analisados

Descrição do estudo	Frequências críticas (Hz)	Estádio			
		Couto Pereira		Arena da Baixada	
		Frequência crítica: 2,69 (Hz)	intervalo considerado crítico: 2,00 a 4,00 (Hz)	Frequência crítica: 2,32 (Hz)	intervalo considerado crítico: 2,00 a 4,00 (Hz)
sistema tórax-abdomen	3 a 6	ok	desconforto	ok	desconforto
influência direta nas pessoas	a partir de 4	ok	ok	ok	ok
situações semelhantes às que ocorrem em estádios de futebol	1,6 a 8	desconforto	desconforto	desconforto	desconforto
pessoas exercendo a atividade (24h)	15,9	ok	ok	ok	ok
pessoas ao redor (24h)	7,7	ok	ok	ok	ok
pessoas exercendo a atividade (2,5h)	79,5	ok	ok	ok	ok
pessoas ao redor (2,5h)	38,5	ok	ok	ok	ok

Fonte: Os Autores.

Os valores obtidos nos modelos estão entre os limites de desconforto das atividades que ocorrem em estádios de futebol, além do desconforto tórax-abdomen que pode ocorrer.

Com relação aos demais índices não há maiores preocupações, pois as frequências de vibração dos estádios estão fora desses intervalos.

Em função das respostas dos modelos estarem inseridas dentro de limites de desconforto humano, tornam-se necessárias análises mais criteriosas, verificando a relação entre as frequências naturais das estruturas, juntamente com as acelerações causadas pelas atividades humanas nos estádios e os deslocamentos da estrutura, provenientes dessas atividades. Pois, os limites de desconforto estão ligados não somente às frequências, mas sim a combinação das frequências com outras variáveis, tais como aceleração, deslocamento e velocidade.

Caso as frequências naturais das estruturas fossem superiores à, aproximadamente, 8Hz, não seria necessária a realização de outros estudos e verificações de conforto. Como exemplo, para passarelas, segundo o DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (2005), valores de frequências naturais superiores a 5Hz indicam que a estrutura está verificada quanto ao critério de vibração. Já para valores inferiores a 5Hz

precisa-se realizar análises mais detalhadas quanto a isso, excitando a estrutura ou realizando análises experimentais.

7 Comparação utilizando a iso 2631 como parâmetro

Com base nos limites de percepção humana às vibrações da ISO 2631, observa-se que para um tempo de exposição de 2,5h, frequências cuja aceleração é inferior a $0,71\text{m/s}^2$, não são prejudiciais ao corpo humano. Para acelerações entre $0,25$ e $0,35\text{ m/s}^2$, se considerado um período de 24h, frequências abaixo de 20 Hz tornam-se prejudiciais para o corpo humano. Para um período de 8h, considerando o mesmo intervalo de aceleração, frequências entre 3,15 e 8Hz são prejudiciais. Como o tempo de exposição neste caso não será superior a 2,5h, os limites de conforto humano perante as vibrações são atendidos.

Tabela 5- Valores limites de frequência obtidos na ISO 2631 em função do tempo de exposição e da aceleração

Limite de exposição	Estádio			
	Modelo do Estádio Couto Pereira		Modelo do Estádio Arena da Baixada	
	Frequência: 2,69 (Hz) aceleração: 0,30 (m/s^2)	intervalo considerado: 2,00 a 4,00 (Hz) e 0,35 a 0,25 (m/s^2)	Frequência: 2,32 (Hz) aceleração: 0,33 (m/s^2)	intervalo considerado: 2,00 a 4,00 (Hz) e 0,35 a 0,25 (m/s^2)
à fadiga	sem limite	sem limite	sem limite	sem limite
à saúde	sem limite	sem limite	sem limite	sem limite
à segurança	<2,27 ou > 10,51	<1,65 ou >12,30	<1,86 ou >11,59	<1,65 ou >12,30

Fonte: Os Autores.

Os valores descritos anteriormente servem para a verificação perante a fadiga, ou seja, a eficiência de trabalho, que caracteriza situações em que exigem um bom desempenho da pessoa. Para as outras duas verificações possíveis com a ISO 2631, deve-se modificar o tempo de exposição. Na verificação relacionada à saúde, isto é, o limite de exposição acima do qual pode ocorrer o comprometimento da saúde, deve-se multiplicar por dois a aceleração encontrada no gráfico. Já, para a questão da segurança, ou seja, para o limite de conforto, que é o mais importante para a análise em questão, o limite de aceleração deve ser dividido por 3,15. Os limites de exposição humana para os modelos estão na tabela 5, que fornece os valores limites das frequências, verificando se a frequência dos modelos está compatível com a ISO 2631.

Conforme observado, nenhum dos estádios atendeu ao critério da segurança da ISO 2631, ou seja, com o movimento da torcida, gera-se uma sensação de desconforto para os presentes nos estádios. Em contrapartida, não houve problemas quanto à questão de saúde ou da realização de alguma atividade.

8 Conclusões

Com este estudo, pode-se chegar a resultados consideráveis a respeito da influência das vibrações às pessoas presentes nos dois estádios de futebol analisados. Observou-se que as frequências naturais dos estádios modelados encontram-se dentro de limites considerados de desconforto perante os usuários dos estádios. Com frequências de 2,32 Hz para o Estádio da Arena da Baixada e 2,69 Hz para o Estádio Couto Pereira, não foi possível atender a todos os limites de exposição humana às vibrações presentes na ISO 2631. Assim, não são verificados os chamados estados limites de solicitação referentes à análise de vibrações, também previstas na NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO..., 2003).

Além disso, as frequências naturais das estruturas estão dentro do intervalo das frequências causadas pela movimentação da torcida nas arquibancadas, fato este que propicia a ocorrência do fenômeno da ressonância. Por isso, recomenda-se efetuar estudos mais aprofundados, considerando a excitação dos torcedores e a análise de fadiga da estrutura.

No decorrer dos estudos foram realizadas algumas aproximações e analogias com relação aos limites de conforto humano. Isto ocorreu em função da ausência de estudos e normas mais detalhadas relacionadas com estádios de futebol.

A comparação dos resultados encontrados com os resultados apresentados em outros estudos em estádios de futebol, como os efetuados por RODRIGUES (1998) e STOLOVAS (2007), foi satisfatória. Respeitou-se a mesma ordem de grandeza das frequências naturais das estruturas dos outros estádios.

Uma questão interessante, que gerou dúvidas ao longo da modelagem, foi a confiabilidade do modelo em corte variando a espessura dos elementos estruturais. Esta se verificou positiva, uma vez que apenas a variação das espessuras dos diferentes elementos das estruturas proporcionou um valor muito próximo do modelo tridimensional, sobretudo para o Estádio Couto Pereira, que sofreu maior discretização.

Por outro lado, a simples representação em corte geral, sem variação das espessuras dos elementos estruturais, não apresentou bons resultados. Estes modelos não representaram as

frequências mais próximas do real. Deveu-se isto a relação da rigidez-massa que se tornou constante para todas as espessuras estudadas, sendo muito diferente da estrutura real.

Pelos resultados e observações de outros estudos, verificados neste estudo, as arquibancadas de estádios de futebol devem sempre receber análises mais detalhadas referente ao seu comportamento dinâmico, já na fase de projeto.

Referências

ALMEIDA, Márcio T. de. **Vibrações mecânicas para engenheiros**. 2ª. Ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1990.

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE/análise dinâmica**. São Paulo: Érica, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto e execução de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2003.

BEREZOSKI, Kely Camoli **Avaliação Do Conforto Humano Perante As Vibrações Naturais Das Estruturas De Estádios De Futebol**. Trabalho de Conclusão de Curso de graduação do Curso de Engenharia de Produção Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Curitiba, 2009.

CEB-209: Comité Euro-International du Béton. **Vibration problems in structures – practical guidelines**. Boletim de informação, n. 209. Suíça, 1991.

CREDE, Charles E. **Choque e vibração nos projetos de engenharia**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1972.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **IP-DE-C00/004 – Projeto de Passarela para Pedestres**. São Paulo, 2005.

FERNANDES, João C. **Segurança nas vibrações sobre o corpo humano**. Disponível em: <http://wwwp.feb.unesp.br/jcandido/vib/Apostila.doc>. Acesso em: 30 set. 2008.

MULTIPLUS, Softwares para Engenharia Arquitetura e Construção. **SAP 2000 versão 11**. Disponível em: http://www.multipius.com/Softwares/ElemFinitos/SAP2000/sap2000_elem_finitos.htm#eltosfinitos. Acesso em: 22 nov. 2008.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL PARA PADRONIZAÇÃO. **ISO 2631**: Guia para a Avaliação da Exposição Humana às Vibrações de Corpo Inteiro. Traduzido por FERNANDES, João C. e FERNANDES, Marly R. M. 2ª. Ed., 1978.

RODRIGUES, José F. S. **Investigação dos carregamentos de estádios de futebol**. Dissertação de mestrado em engenharia civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

STOLOVAS, S. **Dinâmica Aplicada em Estrutura de Concreto (para Engenheiros Estruturais)**. Manual do Curso de Dinâmica da Empresa TQS Informática, 2007.