



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de  
maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

## Análise Dinâmica da Estrutura de um Estádio de Futebol

Débora Cardoso dos Santos<sup>1</sup>, Sergio Hampshire C. Santos<sup>2</sup>, Rodrigo G. Martins<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Eng. Civil / Casagrande Engenharia/ PPE/UFRJ / [deborac\\_santos@poli.ufrj.br](mailto:deborac_santos@poli.ufrj.br)

<sup>2</sup>Professor Associado (D.Sc.)/ UFRJ/ Departamento de Estruturas/[sergiohampshire@poli.ufrj.br](mailto:sergiohampshire@poli.ufrj.br)

<sup>3</sup>Professor Substituto (M.Sc.)/ UFRJ/ Departamento de Estruturas/ FORCONSULT Projetos e Consultoria em Engenharia / [rodrigo.martins@forconsult.com.br](mailto:rodrigo.martins@forconsult.com.br)

### Resumo

O trabalho apresentado tem como principal objetivo a análise dinâmica de um estádio de futebol através da elaboração de um modelo numérico tridimensional de elementos finitos baseado no projeto de reforma do Estádio Jornalista Mário Filho, através do software SAP2000. Foram realizadas duas análises para conhecer o comportamento da estrutura. A primeira em vibrações livres e não amortecidas, onde serão obtidas as frequências naturais da estrutura e estas comparadas aos limites recomendados na norma brasileira NBR 6118 (2007). A segunda análise é em vibração forçada e amortecida, com aplicação de uma carga harmônica e tem o objetivo de simular a ação dos espectadores durante um espetáculo. Os resultados obtidos foram comparados a recomendações normativas nacionais e internacionais.

### Palavras-chave

Análise Dinâmica; Vibração Livre; Vibração Forçada e Amortecida; Carga Harmônica.

### Introdução

Este trabalho tem como objetivo realizar a análise dinâmica da estrutura de um estádio de futebol, baseada no projeto da reforma do Estádio Jornalista Mário Filho, elaborado pela Casagrande Engenharia e Consultoria. Para a realização dessa análise foi utilizado o software SAP2000 para modelar a estrutura do estádio. O estudo do comportamento dinâmico foi feito em duas situações. Primeiro, foram analisadas as frequências naturais da estrutura e estas comparadas com as recomendações da norma brasileira NBR 6118 (2007). A segunda situação foi a aplicação de uma carga harmônica simulando a excitação gerada na estrutura por espectadores. Os resultados são comparados com critérios normativos de aceitação.

O Estádio Jornalista Mário Filho, mais conhecido como Maracanã, é localizado na zona norte da cidade do Rio de Janeiro. O Maracanã sofreu várias reformas, a terceira para receber a Copa do Mundo de 2014. Como o Maracanã foi tombado em 2000 pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), a arquitetura original do estádio teve que



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:

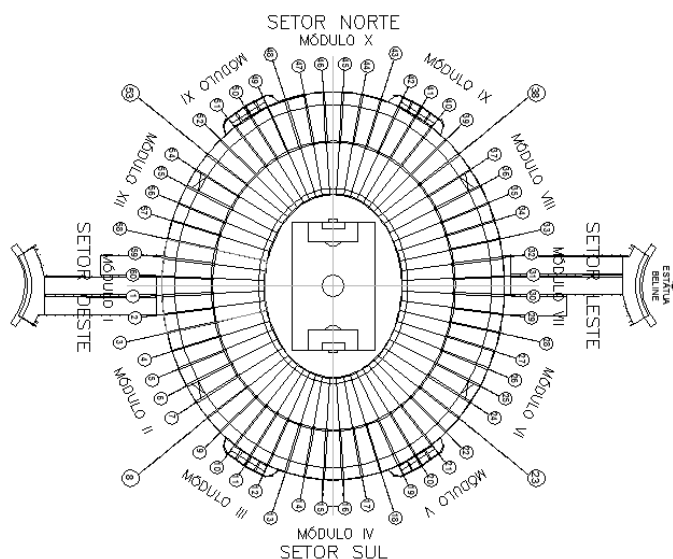


ser preservada, sobretudo sua fachada. Esta terceira e ampla reforma ocorreu principalmente na cobertura e na arquibancada do estádio.

Aproximadamente 80% da arquibancada original em concreto armado foi demolida. A antiga arquibancada, antes formada por dois anéis, foi substituída por um único anel em estrutura metálica e pré-moldados. A nova estrutura metálica da arquibancada é fixada na base de concreto armado do contraforte, que foi adotado como um sistema de amortecimento.

No projeto de reforma da arquibancada, a superestrutura do anel do estádio foi dividida em quatro setores: Norte, Sul, Leste e Oeste, e está constituída de 60 quadros transversais, localizados em 60 eixos radiais numerados de 1 a 60. Esses quadros são contraventados pelas vigas circunferenciais, lajes dos diversos pavimentos e pelos degraus da arquibancada.

Cada um dos setores foi subdividido em três módulos isolados, separados por juntas de dilatação, dispostas nos eixos de final 3 e 8, ou seja, eixos 3, 8, 13, 18, 23, 28, 33, 38, 43, 48, 53 e 58. Os módulos, cada um formado de cinco vãos entre quadros transversais, foram numerados em algarismos romanos de I a XII, distribuídos conforme indicado na Figura 1.



**Figura 1 – Planta Chave – Divisão do estádio em setores e módulos, [5]**

Os novos pilares do anel do estádio são suportados por blocos de fundação com 1, 3 e 4 estacas do tipo raiz de diâmetros de 31 cm e 41 cm. Pelas características geotécnicas do subsolo, as estacas têm comprimentos aproximados de 12 m e 15 m, respectivamente.

Na base da arquibancada foram construídos contrafortes, estruturas em concreto armado preenchidas com rejeitos da demolição do estádio e do solo retirado para realizar as



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



fundações. Os contrafortes foram adotados como solução para as solicitações dinâmicas como um sistema inibidor de movimento e com objetivo também de reutilizar materiais disponíveis na obra. O mecanismo compensa a carga vertical atuante quando o Maracanã estiver lotado.

A estrutura metálica é constituída por pórticos principais e uma estrutura secundária. Os pórticos principais, que coincidem com os eixos radiais, se apoiam sobre os pilares e também estão fixados na base de concreto armado dos contrafortes.

Na arquibancada existem perfis e vigas com conectores metálicos soldados, chamadas de “vigas-jacaré”, que recebem os pré-moldados, solidarizando as vigas metálicas com o concreto. Foram adotadas lajes em “steel deck” sobre os perfis da arquibancada servindo de fôrmas para a laje de concreto armado. Na

Figura 2 apresentam-se os contrafortes durante sua execução, o detalhe da ligação da estrutura metálica no contraforte, as “vigas-jacaré”, degraus em pré-moldados e as lajes em “steel deck”.



**Figura 2 – Contrafortes durante a construção, detalhe da ligação da estrutura metálica no contraforte, as “vigas-jacaré” e degraus em pré-moldados e as lajes em “steel deck”**

## Estudo de caso

Para a análise modal de uma estrutura típica da arquibancada foi escolhido o módulo VI desta arquibancada. Este módulo pertence ao setor Leste e está compreendido entre os eixos



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

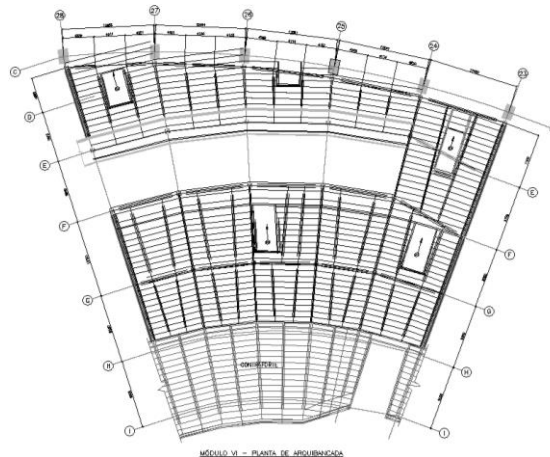
21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

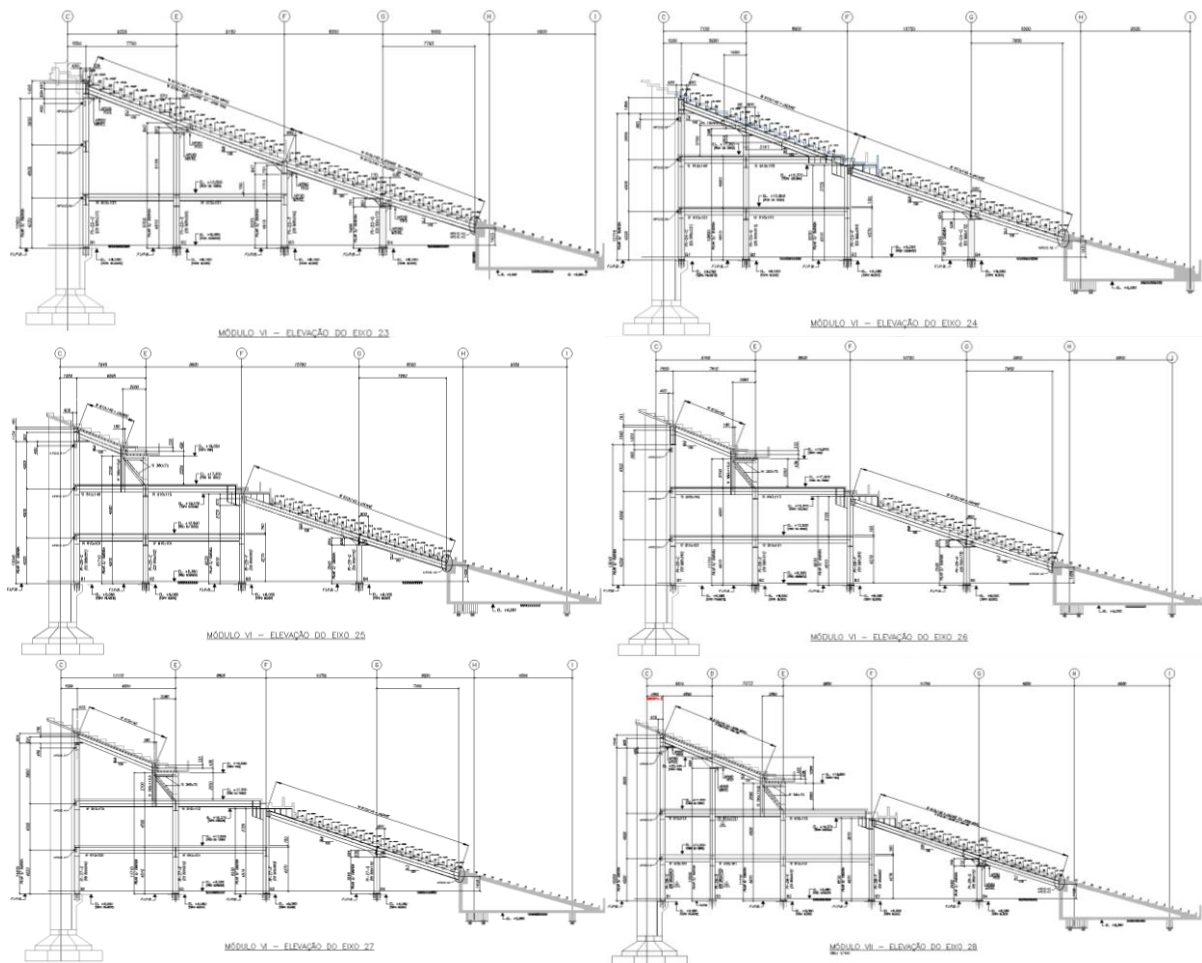
Realização:



de junta de dilatação 23 e 28. A Figura 3 mostra a planta da estrutura metálica da arquivancada do módulo VI.



**Figura 3 – Planta de Arquivancada do Módulo VI**



**Figura 4 – Elevações dos Eixos 23, 24, 25, 26, 27 e 28**



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

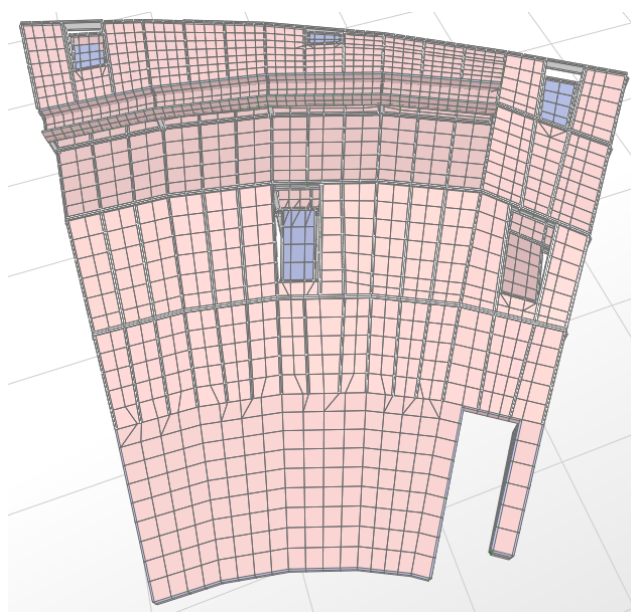
COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:

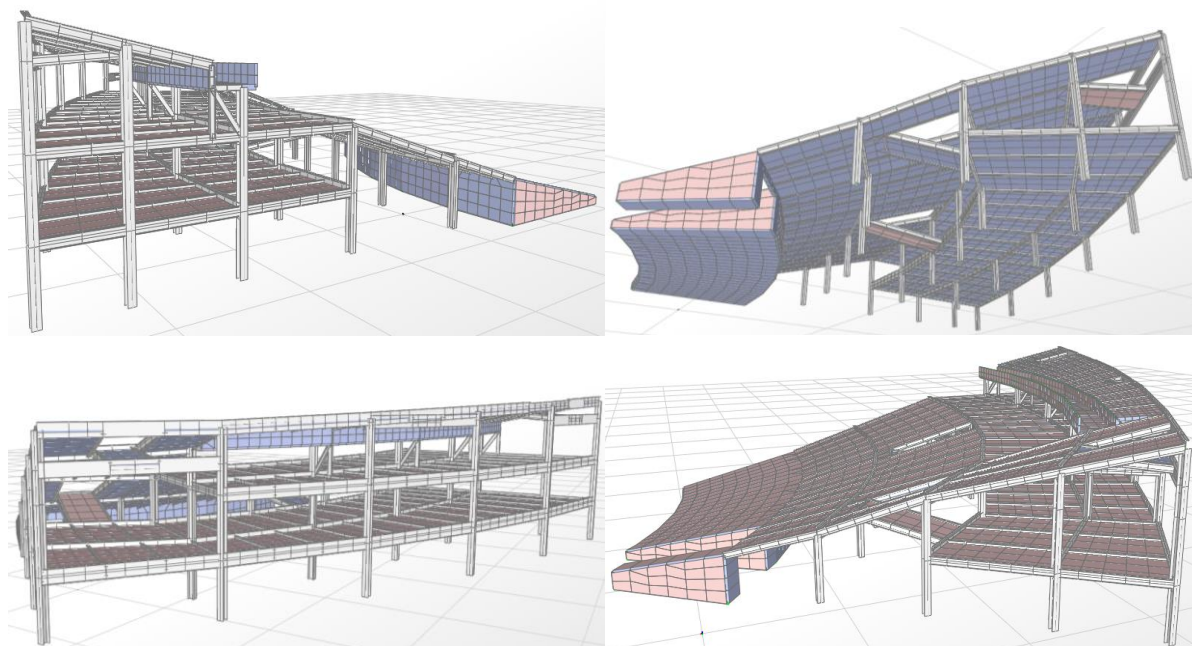


Na Figura 4 são apresentadas as elevações dos eixos radiais do módulo VI. O modelo em elementos finitos do Módulo VI, foi elaborado no programa SAP2000. A arribancada foi modelada com base nos dados disponibilizados pela Casagrande Engenharia e Consultoria.

Na Figura 5 e na Figura 6 apresentam-se diversas perspectivas gráficas do modelo de elementos finitos desenvolvido para representar a arribancada.



**Figura 5 – Perspectiva superior do modelo em elementos finitos**



**Figura 6 – Perspectivas diversas do modelo em elementos finitos**



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



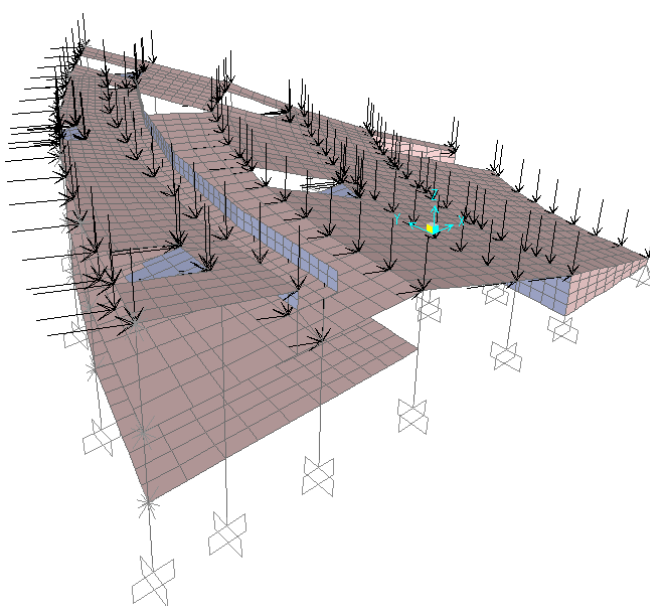
Foram utilizados elementos tipo FRAME para modelar as vigas e os pilares e elementos tipo SHELL para modelar as paredes e as lajes de concreto. Onde existem blocos de fundação com 3 ou 4 estacas, os apoios na base foram considerados como rígidos para todos os deslocamentos e rotações. Onde os blocos de fundação possuem somente 1 estaca, os apoios na base foram considerados rígidos para os deslocamentos e livre para todas as rotações.

Para simular as ligações metálicas das vigas nos pilares foram restringidos ambos os deslocamentos horizontais, conforme o tipo de ligação. A ordem de grandeza de dimensão dos elementos de placa é em torno de 1,5m. As massas referentes aos espectadores foram adicionadas à massa da arquibancada.

Como os estádios de futebol possuem hoje em dia caráter multiuso, no modelo foi aplicado um carregamento “TORCIDA”, com o objetivo de simular a ação dos espectadores pulando sobre a arquibancada durante um evento. Isso pode ser a simulação do evento de uma partida de futebol, assim como de um espetáculo musical.

O carregamento possui uma componente vertical e uma componente horizontal no sentido do gramado. A carga adotada na componente vertical foi de 1 kN/m<sup>2</sup>, referente a 1 pessoa de 100 quilos ocupando um espaço de 1 m<sup>2</sup>. E para a componente horizontal foi considerado uma carga igual a 10% da componente vertical, isto é, 0,1 kN/m<sup>2</sup>.

Como apresentado na Figura 7, o carregamento “TORCIDA” foi aplicado em alguns nós da estrutura. As cargas nos nós foram avaliadas em função da área de influência de cada nó.



**Figura 7 – Carregamento “TORCIDA” aplicado nos nós**



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Para simular a ação dos espectadores pulando, foi aplicada no modelo uma carga do tipo “Time History”, onde o carregamento nodal está vinculado a uma função harmônica.

A função harmônica senoidal adotada possui frequência ( $f$ ) igual a 3,5 Hz, de acordo com as recomendações da tabela G.1 de BACKMANN *et al.* (1991) para ação do tipo “jumping”. Foi considerado um amortecimento constante igual a 0,02.

## Resultados Obtidos

As frequências naturais da estrutura foram obtidas pela análise modal através do “software” SAP2000. A Tabela 1 apresenta os 15 primeiros modos de vibração e seus períodos e frequências naturais correspondentes. Devido à rigidez no plano horizontal podemos perceber que os primeiros e principais modos de vibração encontrados na estrutura são verticais. Na Figura 8 apresentam-se os 6 primeiros modos de vibração. Configuram-se modos localizados na estrutura.

**Tabela 1 – Modos de vibração, períodos e frequências**

| Modo de Vibração | Período (segundos) | Frequência (Hertz) |
|------------------|--------------------|--------------------|
| 1                | 0,1500             | 6,67               |
| 2                | 0,1461             | 6,84               |
| 3                | 0,1394             | 7,18               |
| 4                | 0,1382             | 7,23               |
| 5                | 0,1355             | 7,38               |
| 6                | 0,1325             | 7,55               |
| 7                | 0,1260             | 7,94               |
| 8                | 0,1244             | 8,04               |
| 9                | 0,1234             | 8,11               |
| 10               | 0,1222             | 8,18               |
| 11               | 0,1198             | 8,35               |
| 12               | 0,1182             | 8,46               |
| 13               | 0,1164             | 8,59               |
| 14               | 0,1122             | 8,91               |
| 15               | 0,1114             | 8,98               |



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:

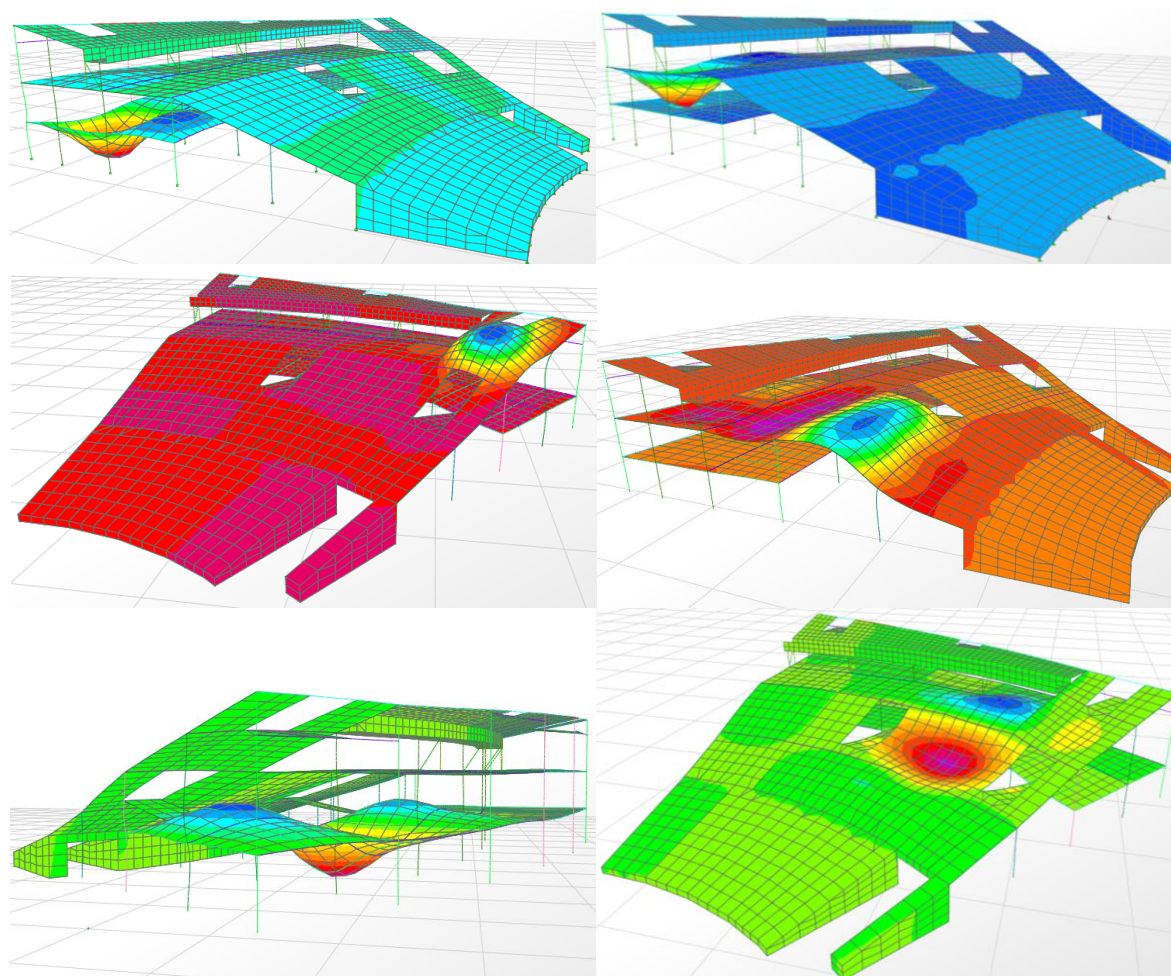


Foi considerado como critério para a definição do número de modos necessário para a análise, se atingir 90% da massa efetiva total nas três direções. Com isso foi necessário extrair 475 modos de vibração. Para a direção mais crítica no modelo em análise, que é na direção vertical, eixo Z, a razão de 0,9 da massa efetiva foi obtida somente no 325º modo de vibração.

Nas direções horizontais, eixo X e eixo Y, estas razões da massa efetiva foram obtidas, respectivamente, no 475º e 415º modos de vibração.

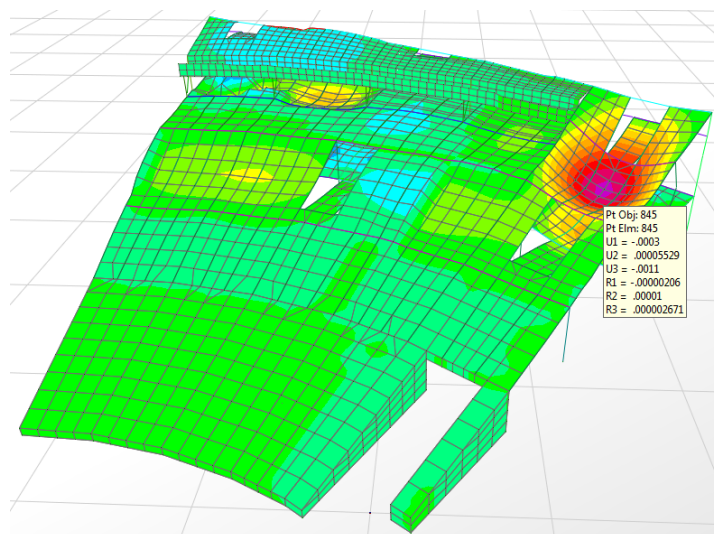
Como os principais modos de vibração são verticais, foi analisado o nó com maior deslocamento vertical devido ao carregamento “TORCIDA” no modelo de elementos finitos.

Na Figura 8 é possível observar que o ponto de maior deslocamento vertical, eixo U3 ou UZ, é o nó 845 e está situado na parte superior da arquibancada.



**Figura 8 – Modo 1 ao Modo 6: Modos verticais**

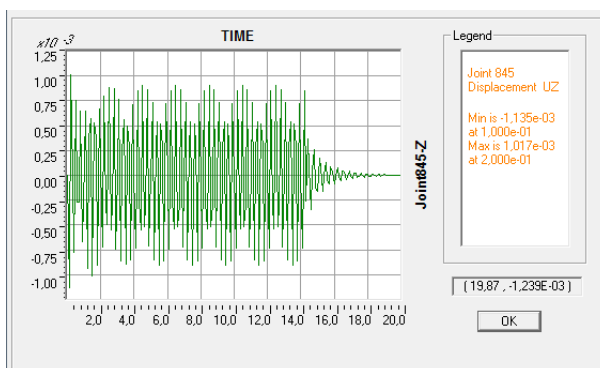




**Figura 8 – Envoltória da deformada do carregamento TORCIDA na direção UZ**

O deslocamento absoluto máximo obtido foi de  $1,135 \times 10^{-3}m$ . Na Figura 9 está apresentado o gráfico da variação deste deslocamento vertical ao longo do tempo. É considerado o valor  $d = 0,75 \times 10^{-3}m$  como representativo do deslocamento efetivo, considerando o seguinte critério definido por BACKMANN *et al.*:

$$d_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T d^2(t) dt} \quad (1)$$



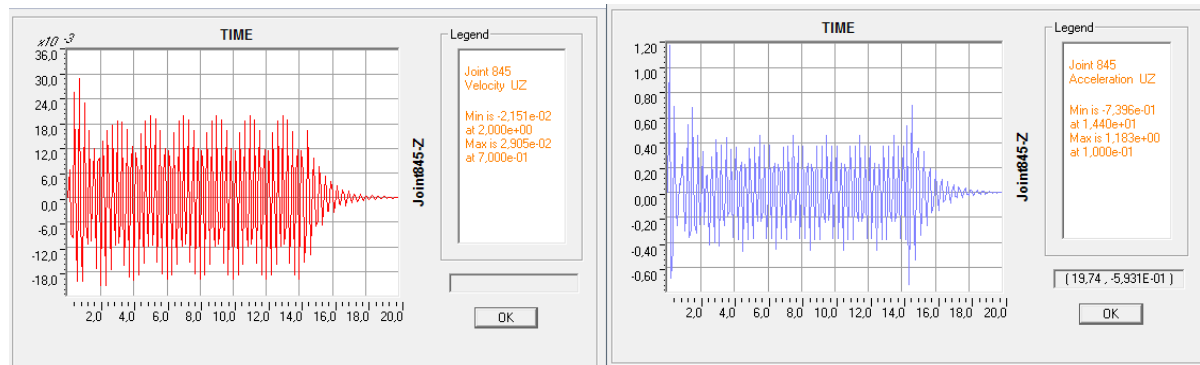
**Figura 9 – Deslocamento Vertical (m) x Tempo (s)**

Considerando o deslocamento no nó 845 igual a  $d = 0,75 \times 10^{-3}m$ , a velocidade vertical e a aceleração vertical apresentam os seguintes valores:

- Velocidade vertical:  $v = \omega \times d = 16,5 \times 10^{-3}m/s$
- Aceleração vertical:  $a = \omega \times v = 0,363 m/s^2$



Na Figura 10 estão apresentados, respectivamente, o gráfico da variação de velocidade vertical no tempo e o gráfico da variação da aceleração vertical no tempo. Nestes gráficos é possível perceber que os valores considerados para a velocidade ( $v = 16,5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ) e a aceleração vertical ( $a = 0,363 \text{ m/s}^2$ ) estão dentro da faixa de valores esperados.



**Figura 10 – Gráficos: Velocidade Vertical (m/s) x Tempo (s) e Aceleração Vertical (m/s<sup>2</sup>) x Tempo (s)**

## Conclusões

Quanto às frequências naturais, a norma NBR 6118 (2007) não dá parâmetros de limitação. Apenas como indicativo, encontra-se nessa Norma a frequência crítica de 7,0 Hz para salas de dança, valor este atendido, já que a primeira frequência obtida é de 6,67 Hz.

Quanto à simulação da torcida, de acordo com BACKMANN *et al.* (2007), item 1.1.5, é recomendado para a aceleração um limite de 0,5 m/s<sup>2</sup>. A aceleração vertical máxima obtida no modelo da arquibancada é em torno de 0,363 m/s<sup>2</sup>, atendendo, portanto o limite recomendado.

Segundo a tabela I.1 da mesma referência, relativa aos critérios de percepção humana de movimento, a aceleração em torno de 0,363 m/s<sup>2</sup> está entre “claramente perceptível” e “perturbador/desagradável”, o que é considerado aceitável para a estrutura em questão.

## Referências

- LIMA, SILVIO S. E SANTOS, SERGIO HAMPSHIRE C. Análise Dinâmica das Estruturas. Rio de Janeiro, Editora Ciência Moderna LTDA, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2007 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, 2007.
- BACHMANN, HUGO et al. CEB Bulletin d'Information N° 209 - Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines. 1991.
- CASAGRANDE ENGENHARIA & CONSULTORIA. Informações diversas em memórias de cálculo, desenhos e fotografias do projeto de reforma do Estádio Jornalista Mário Filho.