



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

## ANÁLISE DINÂMICA DA ESTRUTURA DE UM ESTÁDIO DE FUTEBOL

Débora Cardoso dos Santos

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores:

Sergio Hampshire de Carvalho Santos

Rodrigo Guimarães Martins

Rio de Janeiro

Agosto de 2013

# ANÁLISE DINÂMICA DA ESTRUTURA DE UM ESTÁDIO DE FUTEBOL

Débora Cardoso dos Santos

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

---

Prof. Sergio Hampshire de Carvalho Santos, D. Sc.

---

Prof. Silvio de Souza Lima, D. Sc.

---

Prof. Bruno Martins Jacovazzo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

AGOSTO DE 2013

Santos, Débora Cardoso dos

Análise Dinâmica da Estrutura de um Estádio de Futebol / Débora Cardoso dos Santos. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2013.

XII, 46 p.: Il.; 29,7 cm.

Orientadores: Sergio Hampshire de Carvalho Santos e Rodrigo Guimarães Martins

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 45

1. Análise Dinâmica. 2. Vibração Livre 3. Vibração Forçada e Amortecida 4. Carga Harmônica. I. Santos, Sergio Hampshire de Carvalho, et al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço especialmente aos meus pais José e Ana por todo amor e incentivo durante todos esses anos, tornando possível a conclusão de mais uma etapa da minha vida.

À minha irmã Carolina pela paciência e pelas palavras de apoio.

Ao professor e orientador Sergio Hampshire de Carvalho Santos e ao Co-orientador Rodrigo Guimarães Martins pela atenção, paciência e disponibilidade na realização do projeto final.

À todos os professores que contribuíram para a minha formação.

À todos da Casagrande Engenharia e Consultoria que me apoiaram e me ajudaram disponibilizando informações para a realização do projeto final.

E a todos os amigos e colegas que fiz durante a graduação.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

## ANÁLISE DINÂMICA DA ESTRUTURA DE UM ESTÁDIO DE FUTEBOL

Débora Cardoso dos Santos

Agosto/2013

Orientadores: Sergio Hampshire de Carvalho Santos, Rodrigo Guimarães Martins

Curso: Engenharia Civil

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. Serão realizadas duas análises para conhecer o comportamento da estrutura. A primeira em vibração livre e não amortecida, onde serão obtidas as frequências naturais da estrutura e estas comparadas às recomendações da norma brasileira NBR 6118 (2007). A segunda análise será em vibração forçada e amortecida, com aplicação de uma carga harmônica, com o objetivo de simular a ação dos espectadores durante um espetáculo. Os resultados obtidos serão comparados às recomendações normativas.

*Palavras-chave:* Análise Dinâmica. Vibração Livre. Vibração Forçada e Amortecida. Carga harmônica.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

## DYNAMIC ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF A FOOTBALL STADIUM

Débora Cardoso dos Santos

August/2013

Advisors: Sergio Hampshire de Carvalho Santos, Rodrigo Guimarães Martins

Course: Civil Engineering

The presented work has as main objective the dynamic analysis of a football stadium by developing a numerical model of three-dimensional finite elements based on the project of Jornalista Mário Filho Stadium, through the software SAP2000. Two analyzes will be developed to understand the behavior of the structure. The first one is a undamped free vibration analysis, in which the natural frequencies of the structure will be obtained and compared with the recommendations of the NBR 6118 (2007). The second one will be a damped forced vibration analysis with application of a harmonic load in order to simulate the action of spectators during a show. The results will be compared to the normative recommendations.

Keywords: Dynamic Analysis. Free Vibration. Damped and Forced Vibration. Harmonic load.

## ÍNDICE

---

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1.	MOTIVAÇÃO .....	1
1.2.	OBJETIVO .....	1
1.3.	ESCOPO.....	2
<b>2.</b>	<b>MÉTODO DE ANÁLISE</b> .....	<b>3</b>
2.1.	SISTEMA DE UM GRAU DE LIBERDADE.....	3
2.2.	SISTEMA DE MÚLTIPLOS GRAUS DE LIBERDADE .....	3
2.2.1.	ANÁLISE MODAL .....	4
2.2.1.1.	FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO.....	4
2.2.1.2.	ORTOGONALIDADE DOS MODOS DE VIBRAÇÃO .....	5
2.2.1.3.	NORMALIZAÇÃO DOS MODOS DE VIBRAÇÃO .....	6
2.2.1.4.	RESPOSTA EM VIBRAÇÃO LIVRE NÃO AMORTECIDA.....	7
2.2.1.5.	RESPOSTA EM VIBRAÇÃO FORÇADA E AMORTECIDA.....	7
<b>3.</b>	<b>DESCRIÇÃO DO ESTÁDIO JORNALISTA MÁRIO FILHO</b> .....	<b>9</b>
3.1.	HISTÓRICO .....	9
3.2.	ESTRUTURA ATUAL.....	12
3.3.	ESTRUTURA DA ARQUIBANCADA .....	14
<b>4.</b>	<b>MODELO DE CÁLCULO</b> .....	<b>21</b>
4.1.	ESTRUTURA ORIGINAL .....	21
4.2.	DESCRIÇÃO DO MODELO .....	28
4.3.	CARGA DINÂMICA.....	32
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>34</b>
5.1.	FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO.....	34
5.2.	SIMULAÇÃO DE TORCIDA .....	40
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>43</b>

6.1.	FREQUÊNCIAS NATURAIS .....	43
6.2.	SIMULAÇÃO “TORCIDA” .....	43
7.	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>45</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1 – Diagrama de corpo livre [1] .....	3
Figura 2 – Maracanã ainda em construção durante a Copa do Mundo de 1950, [17] ...	9
Figura 3 – Vista superior do Maracanã em 2007, [16].....	10
Figura 4 – Formatação do Maracanã ao longo das reformas, [14] .....	11
Figura 5 – Vista interna do Estádio Jornalista Mário Filho durante a reforma.....	12
Figura 6 – Vista superior do Estádio Jornalista Mário Filho atual, [13] .....	13
Figura 7 – Vista interna do Estádio Jornalista Mário Filho atual, [5] .....	13
Figura 8 – Planta Chave – Divisão do estádio em setores e módulos, [5].....	14
Figura 9 – Planta Geral – Blocos de Fundação e Contrafortes, [5].....	16
Figura 10 – Elevação do Eixo 15 – Exemplo de configuração dos setores Norte e Sul, [5] .....	17
Figura 11 – Elevação do Eixo 30 – Exemplo de configuração do setor Leste, [5] .....	17
Figura 12 – Elevação do Eixo 01 – Exemplo de configuração do setor Oeste, [5].....	18
Figura 13 – Contrafortes durante a construção, [5] .....	18
Figura 14 – Ligação da estrutura metálica no contraforte, [6].....	19
Figura 15 – Vigas-jacaré e degraus em pré-moldados, [13].....	20
Figura 16 – Lajes em “steel deck”, [6] .....	20
Figura 17 – Planta de Arquibancada do Módulo VI, [5] .....	21
Figura 18 – Elevação do Eixo 23, [5] .....	22
Figura 19 – Elevação do Eixo 24, [5] .....	22
Figura 20 – Elevação do Eixo 25, [5] .....	23
Figura 21 – Elevação do Eixo 26, [5] .....	23
Figura 22 – Elevação do Eixo 27, [5] .....	24
Figura 23 – Elevação do Eixo 28, [5] .....	24
Figura 24 – Planta de Locação dos Blocos, [5] .....	25
Figura 25 – Planta do 1º Pavimento, [5].....	26

Figura 26 – Planta do 2º Pavimento, [5].....	26
Figura 27 – Planta do Túnel de Acesso do 2º Pavimento, [5].....	27
Figura 28 – Perspectiva Superior.....	29
Figura 29 – Perspectiva Inferior .....	30
Figura 30 – Perspectiva Lateral - 1 .....	30
Figura 31 – Perspectiva Lateral – 2 .....	31
Figura 32 – Perspectiva Lateral - 3 .....	31
Figura 33 – Carregamento “TORCIDA” aplicado nos nós .....	32
Figura 34 – Tipos representativos de atividades e sua aplicação para diferentes atividades reais e tipos de estruturas, [3].....	33
Figura 35 – Modo 1 : Modo vertical na laje do nível 1 .....	35
Figura 36 – Modo 2 : Modo vertical na laje do nível 2 .....	35
Figura 37 – Modo 3 : Modo vertical na arquibancada.....	36
Figura 38 – Modo 4 : Modo vertical na arquibancada.....	36
Figura 39 – Modo 5 : Modo vertical na laje do nível 1 .....	37
Figura 40 – Modo 6 : Modo vertical na arquibancada.....	37
Figura 41 – Envoltória da deformada do carregamento TORCIDA na direção UZ .....	40
Figura 42 – Deslocamento Vertical (m) x Tempo (s) .....	41
Figura 43 – Velocidade Vertical (m/s) x Tempo (s) .....	42
Figura 44 – Aceleração Vertical (m/s <sup>2</sup> ) x Tempo (s) .....	42
Figura 45 – Frequência crítica para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas [2] .....	43
Figura 46 – Indicação dos limiares de capacidade de percepção humanos para vibrações harmônicas verticais, [3] .....	44

## ÍNDICE DE TABELAS

---

Tabela 1 – Distribuição dos Módulos .....	15
Tabela 2 – Modos de vibração, períodos e frequências .....	34
Tabela 3 – Razão das massas modais efetivas dos principais modos de vibração .....	38

# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1. MOTIVAÇÃO**

Grande parte dos engenheiros civis, no Brasil, não teve o estudo dos efeitos dinâmicos das cargas em obras de engenharia civil abordados durante sua formação. Devido ao progresso dos estudos e pesquisas nessa área, hoje se sabe que esse conhecimento é cada vez mais necessário, não sendo possível avaliar esses efeitos sem conhecer a resposta dinâmica dessas construções.

## **1.2. OBJETIVO**

Este trabalho tem como objetivo realizar a análise dinâmica de uma estrutura de um estádio de futebol, baseado no projeto da reforma do Estádio Jornalista Mário Filho, o Maracanã, 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 foram comparadas com as recomendações da norma brasileira NBR 6118 (2007). A segunda situação analisada foi para o uso de uma carga harmônica a fim de simular a excitação gerada na estrutura por espectadores durante um espetáculo, comparando os resultados com critérios normativos de aceitação.

### **1.3. ESCOPO**

O trabalho está dividido nos seguintes capítulos:

CAPÍTULO 2 – apresenta os conceitos para a análise de um sistema de múltiplos graus de liberdade;

CAPÍTULO 3 – apresenta a descrição histórica e da atual estrutura do Estádio Jornalista Mário Filho;

CAPÍTULO 4 – apresenta do modelo de cálculo: a estrutura original, o modelo de elementos finitos e da carga harmônica adotada;

CAPÍTULO 5 – apresenta os resultados obtidos através do software SAP2000;

CAPÍTULO 6 – apresenta as conclusões;

CAPÍTULO 7 – apresenta as referências bibliográficas.

## 2. MÉTODO DE ANÁLISE

### 2.1. SISTEMA DE UM GRAU DE LIBERDADE

O equilíbrio dinâmico de um sistema, conforme estabelecido pelo Princípio de d'Alembert, pode ser obtido quando adicionada às forças externas uma força fictícia, nomeada força de inércia. Essa força de inércia possui sentido contrário ao do movimento e a massa do sistema é sua constante de proporcionalidade.

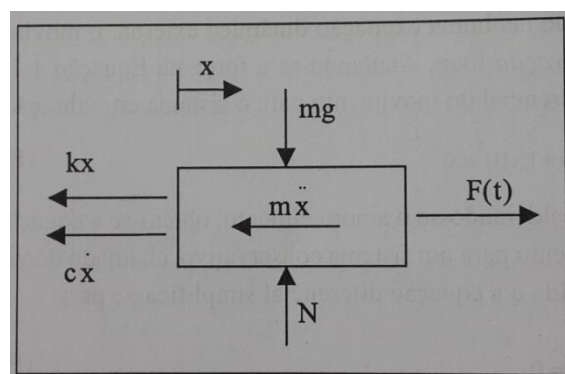


Figura 1 – Diagrama de corpo livre [1]

Desenvolvendo a equação de equilíbrio na direção  $x$  de acordo como diagrama de corpo livre apresentado na Figura 1, é deduzida a seguinte equação diferencial do movimento:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (1)$$

Onde  $m$  representa a massa,  $c$  o coeficiente de amortecimento e  $k$  a rigidez.

### 2.2. SISTEMA DE MÚLTIPLOS GRAUS DE LIBERDADE

Na maior parte dos casos na engenharia de estruturas, o modelo matemático que melhor representa o comportamento dinâmico de uma estrutura complexa corresponde um sistema de múltiplos graus de liberdade. O sistema de um grau de

liberdade é fundamental para o entendimento da dinâmica, porém sua aplicação é limitada.

### 2.2.1. Análise Modal

Para um sistema estrutural com N graus de liberdade o sistema de equações que define o equilíbrio dinâmico é análogo à equação (1), que é a equação de movimento para sistema de um grau de liberdade. Em forma matricial é apresentada como:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (2)$$

Onde  $M$ ,  $C$  e  $K$  são, respectivamente, as matrizes de ordem N de massa, de amortecimento e de rigidez da estrutura. E  $x, \dot{x}, \ddot{x}$  e  $f(t)$  são, respectivamente, os vetores de deslocamentos, velocidades, acelerações e forças aplicadas.

#### 2.2.1.1. Frequências Naturais e Modos de Vibração

A determinação das frequências naturais é desenvolvida com base na análise do movimento em vibração livre e sem amortecimento. A vibração livre poderá acontecer pela imposição de condições iniciais ao sistema, sem aplicação de forças. Pode-se observar a equação de equilíbrio dinâmico particularizada:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (3)$$

Admitindo que o movimento da estrutura por vibração livre do sistema segundo um dos seus modos de vibração é do tipo harmônico, este pode ser representado pela equação:

$$\{x(t)\} = \{\phi_j\} q_j(t) \quad (4)$$

Onde:

$\{\phi_j\}$  é um vetor constante que representa uma deformada modal;

$q_j(t)$  é uma função harmônica na forma  $q_j(t) = [A_j \cos(\omega_{n_j}t) + B_j \sin(\omega_{n_j}t)]$ ;

$\omega_{n_j}$  é uma frequência circular de vibração;

$A_j$  e  $B_j$  são constantes de integração determinadas a partir das condições iniciais do movimento.

Substituindo a equação (4) na equação (3), obtém-se:

$$\left( -\omega_{n_j}^2 [M] \{\Phi_j\} + [K] \{\Phi_j\} \right) q_j(t) = \{0\} \quad (5)$$

Na equação (5)  $q_j(t) = \{0\}$  significa a não existência de movimento, o que não é de interesse para análise dinâmica. Logo, para que a essa igualdade seja atendida, o termo entre os parênteses tem que se nulo:

$$\left( [K] - \omega_{n_j}^2 [M] \right) \{\Phi_j\} = \{0\} \quad (6)$$

Para se obter as respostas requeridas é necessária uma solução não trivial, já que  $\{\Phi_j\} = \{0\}$  implica na ausência de movimento.

$$\det \left[ [K] - \omega_{n_j}^2 [M] \right] = 0 \quad (7)$$

Logo, a determinação das frequências e dos modos de vibração resultam em um problema tradicional de determinação de autovalores e autovetores, em que os autovalores representam as N frequências circulares e os autovetores representam os N modos de vibração naturais. Assim, cada frequência circular corresponde a um modo de vibração natural.

#### 2.2.1.2. Ortogonalidade dos Modos de Vibração

“Os modos de vibração apresentam uma propriedade muito importante para a solução de problemas de dinâmica. Esta propriedade, chamada de ortogonalidade dos



modos de vibração, é a base do método da superposição modal, um dos mais utilizados métodos de solução de problemas dinâmicos”, [1].

As condições de ortogonalidade para dois modos de vibração  $\{\phi_i\}$  e  $\{\phi_j\}$  são:

$$\{\phi_j\}^T [M] \{\phi_i\} = 0 \quad (8)$$

$$\{\phi_j\}^T [K] \{\phi_i\} = 0 \quad (9)$$

As equações (8) e (9) indicam que os modos de vibração  $\{\phi_i\}$  e  $\{\phi_j\}$  são ortogonais entre si, com relação as matrizes de massa e rigidez, respectivamente.

### 2.2.1.3. Normalização dos Modos de Vibração

“Os modos de vibração representam apenas a configuração da estrutura, quando esta vibra com determinada frequência. Assim, o valor absoluto das componentes que constituem o vetor modo de vibração não tem qualquer significado, sendo somente importante a relação entre eles”, [4].

A normalização se dá atribuindo um determinado valor a uma das componentes do vetor escolhida como referência, determinando os valores relativos das demais componentes. Existem vários critérios que podem ser adotados para a normalização dos autovetores, como por exemplo, em relação à matriz de massa.

Essa normalização é definida pela seguinte forma:

$$\{\phi_j\} = \frac{\{\bar{\phi}_j\}}{\sqrt{\{\bar{\phi}_j\}^T [M] \{\bar{\phi}_j\}}} \quad (10)$$

Onde:

$\{\bar{\phi}_j\}$  é o autovetor antes da normalização;

T significa transposição;

#### 2.2.1.4. Resposta em Vibração Livre Não Amortecida

Podem-se obter os deslocamentos do sistema através da combinação linear dos modos de vibração, se a estrutura possuir comportamento linear. A equação (11) apresenta o vetor deslocamento  $\{x(t)\}$  expresso através desta combinação:

$$\{x(t)\} = [\Phi] \{q(t)\} \quad (11)$$

Onde  $[\Phi]$  é a matriz modal normalizada.

As funções escalares  $q_j(t)$  são chamadas de coordenadas modais. Com as equações (12) e (13) abaixo, podemos obter os valores das funções escalares e suas derivadas primeiras no início do movimento.

$$\{q(0)\} = [\Phi]^T [M] \{x(0)\} \quad (12)$$

$$\{\dot{q}(0)\} = [\Phi]^T [M] \{\dot{x}(0)\} \quad (13)$$

Determinados os valores de  $\{q(0)\}$  e  $\{\dot{q}(0)\}$ , os deslocamentos, velocidades e acelerações podem ser obtidos através da equação (11).

#### 2.2.1.5. Resposta em Vibração Forçada e Amortecida

Na análise da resposta dinâmica de um sistema de vários graus de liberdade em regime forçado e amortecido, pode-se considerar a equação (14) expressando a equação modal de ordem  $j$ .

$$\ddot{q}_j(t) + 2\xi_j \omega_{n_j} \dot{q}_j(t) + \omega_{n_j}^2 q_j(t) = \{\Phi_j\}^T \{f(t)\} \quad (14)$$

Como a equação (14) representa o movimento de um sistema de um grau de liberdade, podemos utilizar os métodos de resolução para este sistema de um grau de liberdade. Através da equação (15) podemos obter os deslocamentos, velocidades e acelerações:

$$x(t) = e^{-\xi\omega_n t} [A \cos(\omega_D t) + B \sin(\omega_D t)] + \frac{F_0}{k\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \sin(\omega t - \phi) \quad (15)$$

Onde:

$\xi$  é o fator de amortecimento;

$\omega_n$  é a frequência circular natural

$A$  e  $B$  são constantes determinadas a partir das condições iniciais;

$\omega_D$  é a frequência circular amortecida;

$F_0$  representa a amplitude da força;

$\omega$  é a frequência circular da excitação;

$r$  é a relação entre  $\omega$  e  $\omega_n$ ;

$\phi$  é o ângulo fase.

Toda esta conceituação teórica será aplicada nas análises dinâmicas realizadas com o programa SAP2000, a serem apresentadas em seguida.

### 3. DESCRIÇÃO DO ESTÁDIO JORNALISTA MÁRIO FILHO

#### 3.1. HISTÓRICO

O Estádio Jornalista Mário Filho, mais conhecido como Maracanã, é um estádio de futebol localizado no bairro do Maracanã, na zona norte da cidade do Rio de Janeiro, no estado do Rio de Janeiro.

A construção de um estádio na época foi incentivada pela Copa do Mundo de Futebol de 1950, que foi sediada no Brasil. Em 1947 a prefeitura do Estado do Rio de Janeiro abriu concorrência para as obras, tendo projeto arquitetônico vencedor o apresentado por Miguel Feldman, Waldir Ramos, Raphael Galvão, Oscar Valdetaro, Orlando Azevedo, Pedro Paulo Bernardes Bastos e Antônio Dias Carneiro.

As obras do estádio iniciaram-se em 2 de agosto de 1948, data do lançamento da pedra fundamental. Apesar de ter sido inaugurado e utilizado em 1950, para a Copa do Mundo de Futebol, as obras só ficaram completas em 1965.

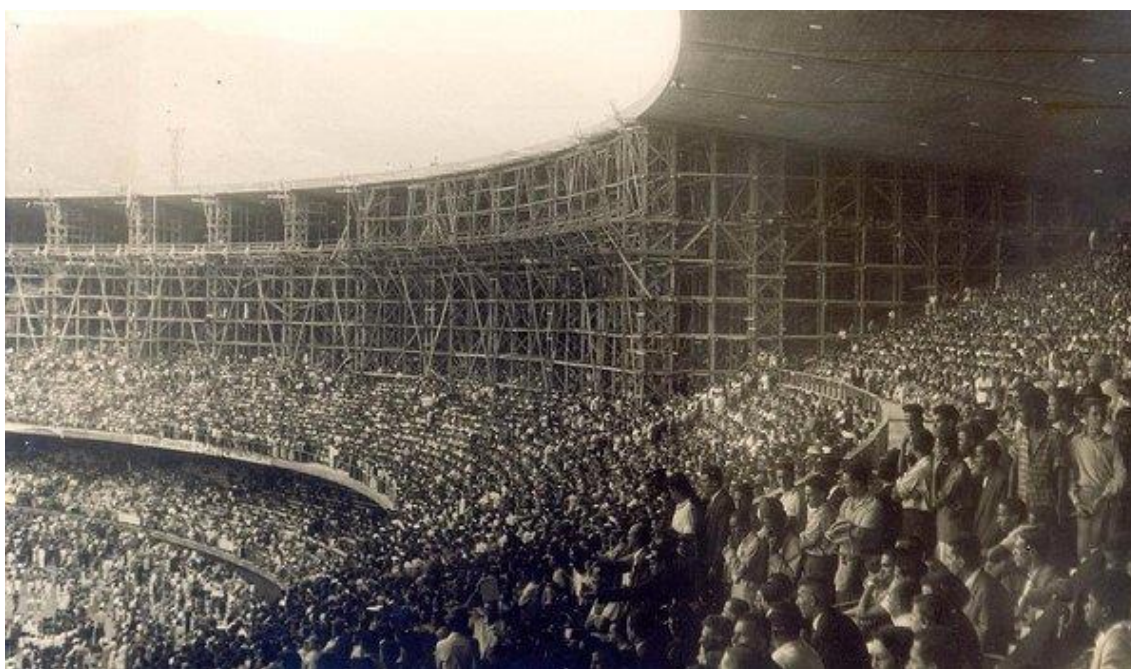


Figura 2 – Maracanã ainda em construção durante a Copa do Mundo de 1950, [17]

Do final da sua construção em 1965 até 1999 só foram realizadas obras de manutenção no Maracanã. Em 1999 foi realizada a primeira ampla reforma devido à realização do Mundial de Clubes da FIFA no Brasil. Essa ampla reforma se deu na recuperação das estruturas das rampas de acesso e das marquises, além da criação de cabines para a imprensa, de camarotes no anel superior e da instalação de assentos individuais na arquibancada, a dividindo em setores, perdendo na ocasião o “status” de maior estádio do mundo em capacidade.

A segunda grande reforma no estádio Jornalista Mário Filho ocorreu devido à realização dos Jogos Pan Americanos de 2007. O Maracanã ficou fechado para obras entre abril de 2005 a janeiro de 2006. Apesar do estádio de ter sido aberto no começo de 2006 as obras só foram concluídas em dezembro do mesmo ano, sendo reinaugurado em 2007. Foram criadas novas rampas de entrada, os acessos às arquibancadas superiores foram ampliados, o gramado foi rebaixado em 1,60m e houve a implantação de cadeiras no lugar da antiga "geral", unindo a arquibancada inferior.



Figura 3 – Vista superior do Maracanã em 2007, [16]

Em setembro de 2010, o Maracanã fechou os portões mais uma vez para uma nova intervenção devido à conquista do Brasil em sediar a Copa do Mundo de Futebol de 2014. A terceira grande reforma terminou em junho de 2013. As obras dessa última reforma incluíram uma nova cobertura, reforma das rampas de acesso e criação de novas rampas, restauração das colunas de sustentação e uma nova arquibancada foi construída no formato de arena.

Desde a sua construção, o Estádio Jornalista Mário Filho foi palco de grandes momentos do futebol brasileiro e mundial. Ao longo de sua história, o estádio passou a assumir um caráter multiuso ao receber outros eventos como espetáculos e partidas de outras modalidades de esporte. Hoje o Maracanã possui capacidade de aproximadamente 79 mil espectadores.

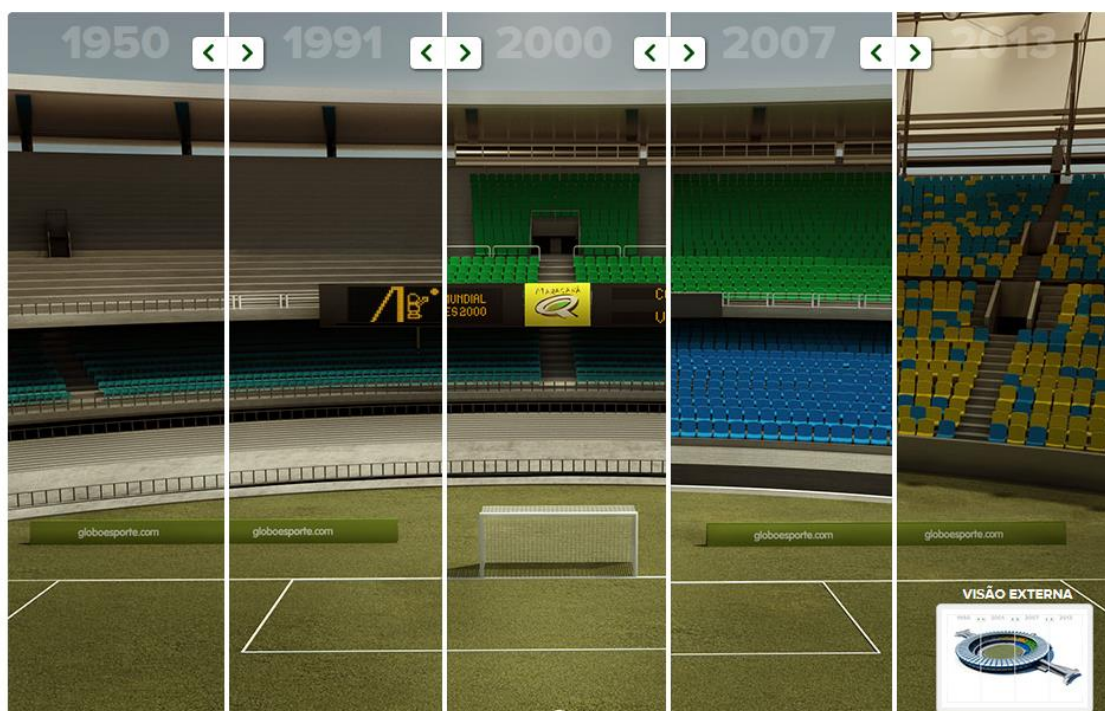


Figura 4 – Formatação do Maracanã ao longo das reformas, [14]

### 3.2. ESTRUTURA ATUAL

O Estádio Jornalista Mário Filho sofreu a terceira ampla reforma, para receber a Copa do Mundo de 2014, cumprindo as exigências da FIFA. Como o Maracanã foi tombado em 2000 pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), a arquitetura original do estádio teve que ser preservada, sobretudo sua fachada. A ampla reforma ocorreu principalmente na cobertura e na arquibancada do estádio.

A cobertura original em concreto armado teve que ser removida face seu péssimo estado de conservação e foi substituída por uma nova estrutura formada por membranas de fibra de vidro e teflon de alta tecnologia (PTFE) e cabos de aço tensionados. A nova estrutura da cobertura tem 68,40m de vão livre cobrindo cerca de 95% dos assentos.

Aproximadamente 80% da arquibancada original em concreto armado foram demolidos. A antiga arquibancada que antes era 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.

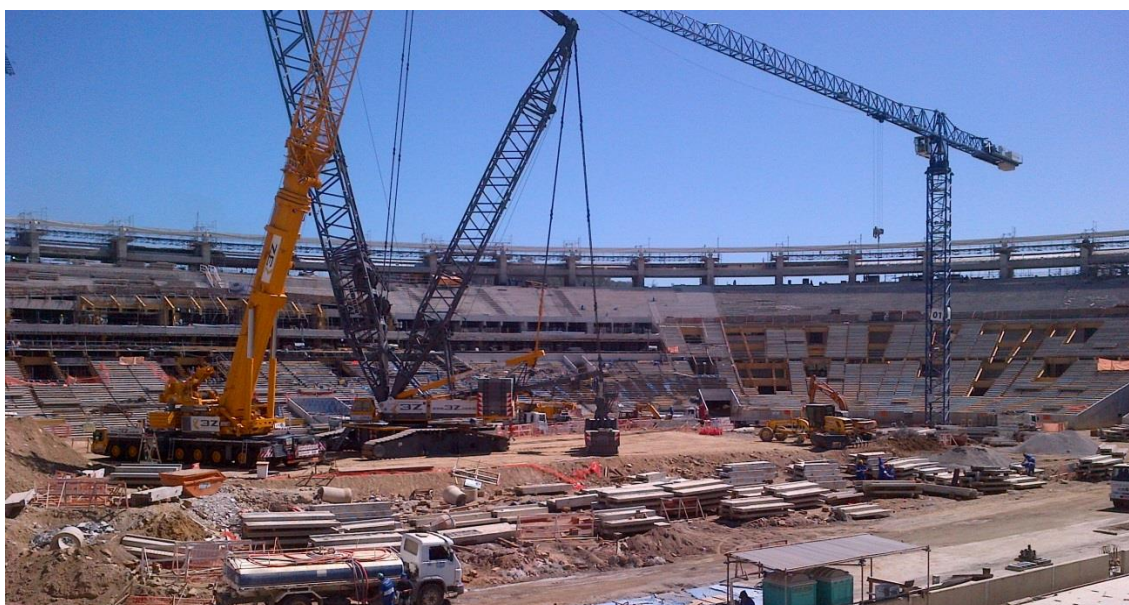


Figura 5 – Vista interna do Estádio Jornalista Mário Filho durante a reforma

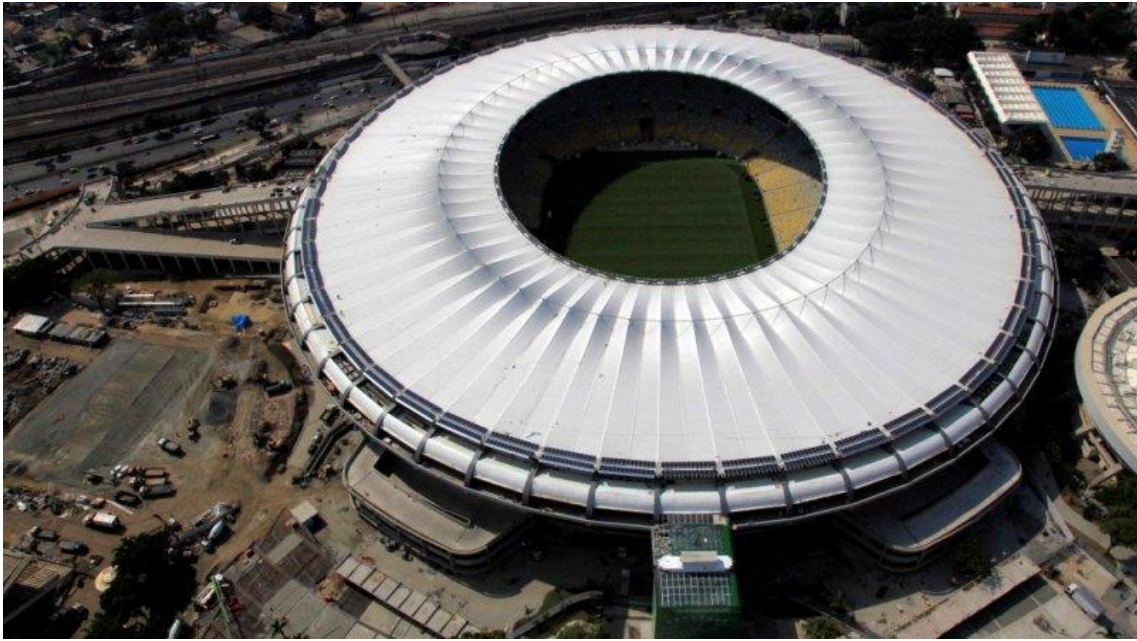


Figura 6 – Vista superior do Estádio Jornalista Mário Filho atual, [13]



Figura 7 – Vista interna do Estádio Jornalista Mário Filho atual, [5]



### 3.3. ESTRUTURA DA ARQUIBANCADA

No projeto de reforma, a superestrutura do anel do estádio foi dividida em quatro setores: Norte, Sul, Leste e Oeste. Os setores Norte e Sul são estruturas similares, formadas pelo pavimento térreo, o 1º pavimento, o 2º pavimento, o 5º pavimento e a arquibancada. Os setores Leste e Oeste são estruturas bastante semelhantes, que estão formadas pelo pavimento térreo, o 1º pavimento, o 2º pavimento, o 3º pavimento, o 4º pavimento, o 5º pavimento e a arquibancada. Deve ser ressaltado que o 4º pavimento somente existe no setor Oeste.

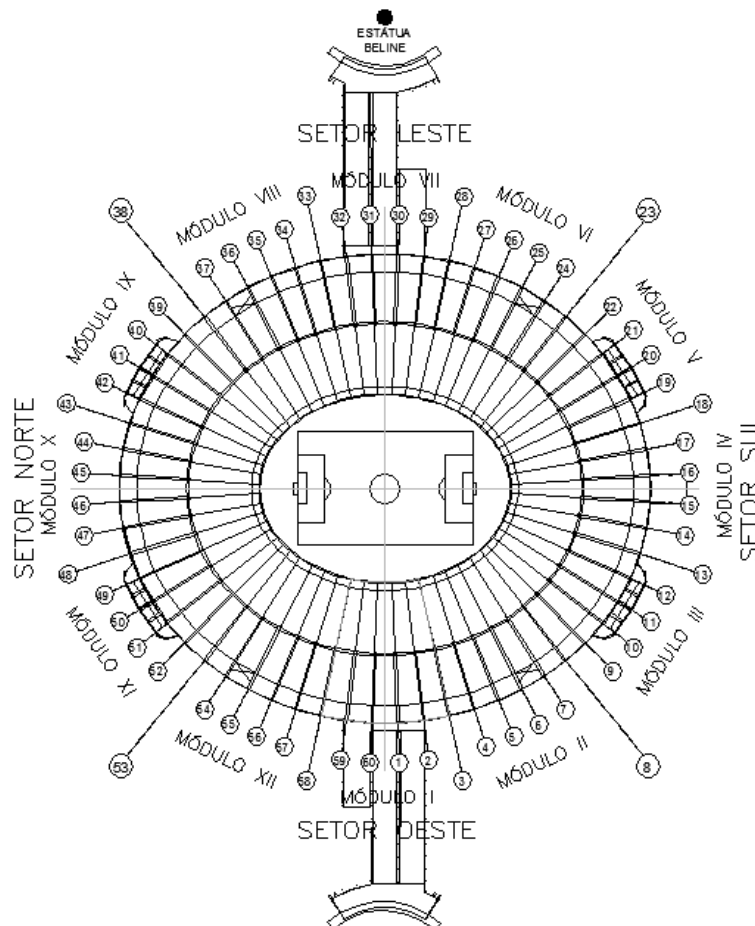


Figura 8 – Planta Chave – Divisão do estádio em setores e módulos, [5]

Considerando a sua concepção original, datada de 1948, a estrutura do anel do estádio está constituída de 60 quadros transversais, localizados nos 60 eixos radiais numerados de 1 a 60. Esses quadros são contraventados pelas vigas circunferenciais e as lajes dos diversos pavimentos, assim como pelos degraus da arquibancada.

Cada um dos setores Norte, Sul, Leste e Oeste foram subdivididos em três módulos isolados, que estão separados por juntas de dilatação, sempre dispostas nos eixos de final 3 e 8, ou seja, nos eixos 3, 8, 13, 18, 23, 28, 33, 38, 43, 48, 53 e 58. Da Figura 10 a Figura 12 pode ser observados as elevações como exemplo de configuração de cada setor. Os módulos, cada um formado de cinco vãos entre quadros transversais, foram numerados em algarismo romano de I a XII e estão distribuídos conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição dos Módulos

<b>Setor</b>	<b>Módulo</b>
Norte	IX, X e XI
Sul	III, IV e V
Leste	VI, VII e VIII
Oeste	XII, I e II

Na direção radial foram projetadas duas juntas de dilatação, localizadas nas linhas C e G, que ainda subdividem cada módulo nos seguintes trechos: trecho entre as linhas A e C, trecho entre as linhas C e G e trecho entre as linhas G e I.

Os trechos entre as linhas A e C são formados pela estrutura existente, que foi preservada na demolição para ser reintegrada à edificação do estádio reformado. Como exceção existe apenas o 5º pavimento e a arquibancada dos módulos dos setores Leste e Oeste, que são constituídos de estruturas novas.

Os demais trechos, ou seja, entre as linhas C e G e entre as linhas G e I são formados por estruturas novas.

Os novos pilares do anel do estádio estão suportados por blocos de fundação com 1, 3 e 4 estacas do tipo raiz, com diâmetros de 31 cm e 41 cm. Pelas características geológico-geotécnicas do subsolo, as estacas tem comprimentos aproximados de 12 m e 15 m, respectivamente. Na Figura 9 está apresentada a planta geral dos blocos de fundações e dos contrafortes.

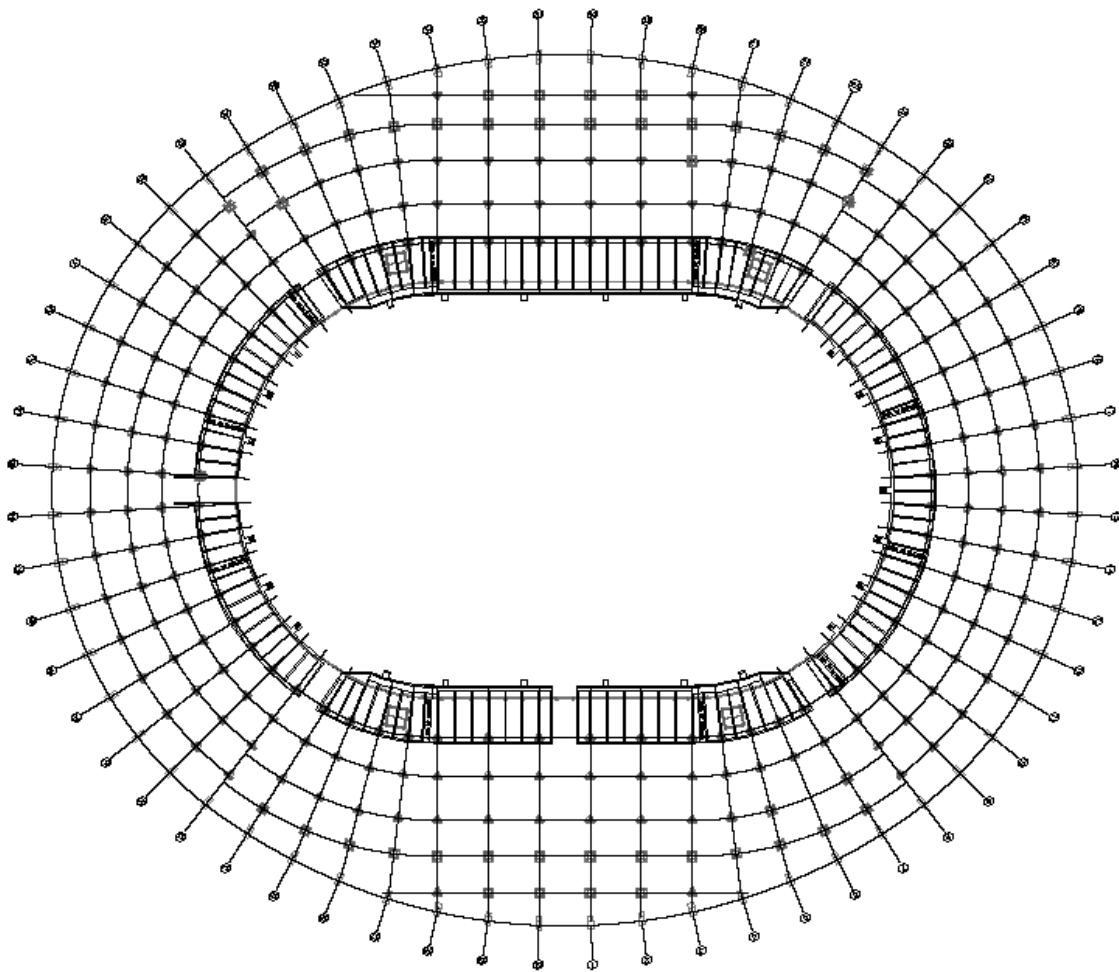


Figura 9 – Planta Geral – Blocos de Fundação e Contrafortes, [5]

Da Figura 10 a Figura 12 são apresentadas exemplos das elevações dos setores Norte e Sul, Leste e Oeste, respectivamente.

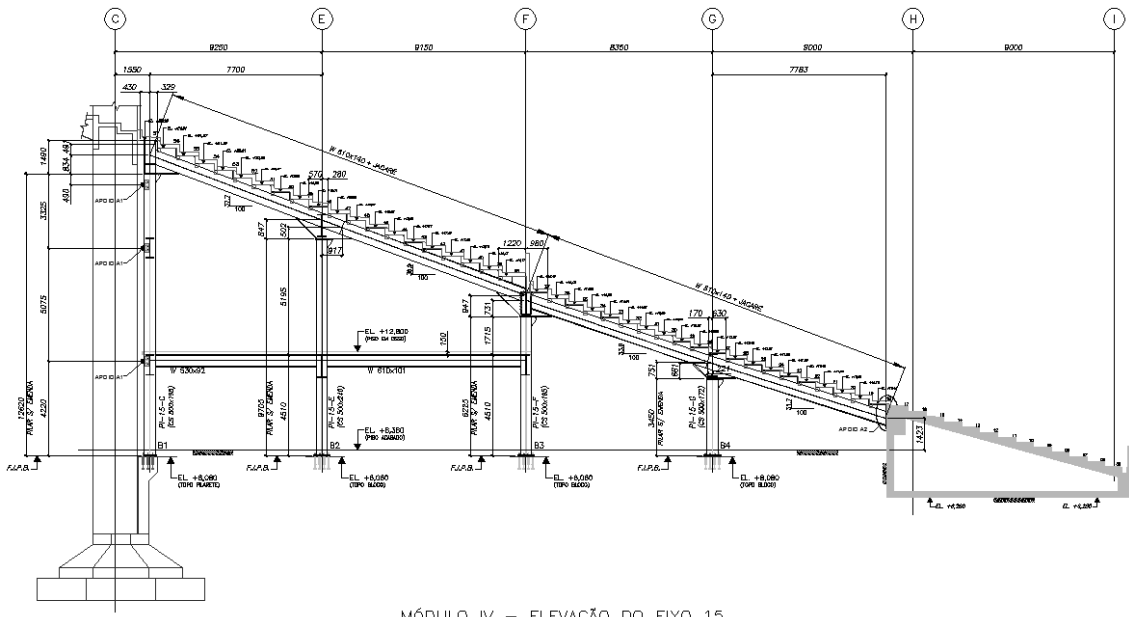


Figura 10 – Elevação do Eixo 15 – Exemplo de configuração dos setores Norte e Sul,

[5]

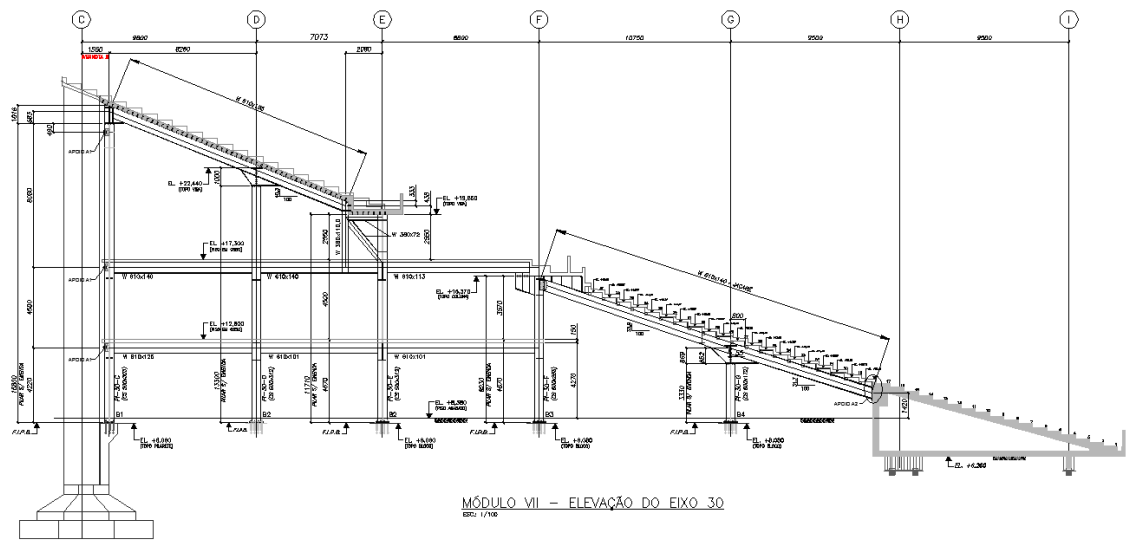


Figura 11 – Elevação do Eixo 30 – Exemplo de configuração do setor Leste, [5]

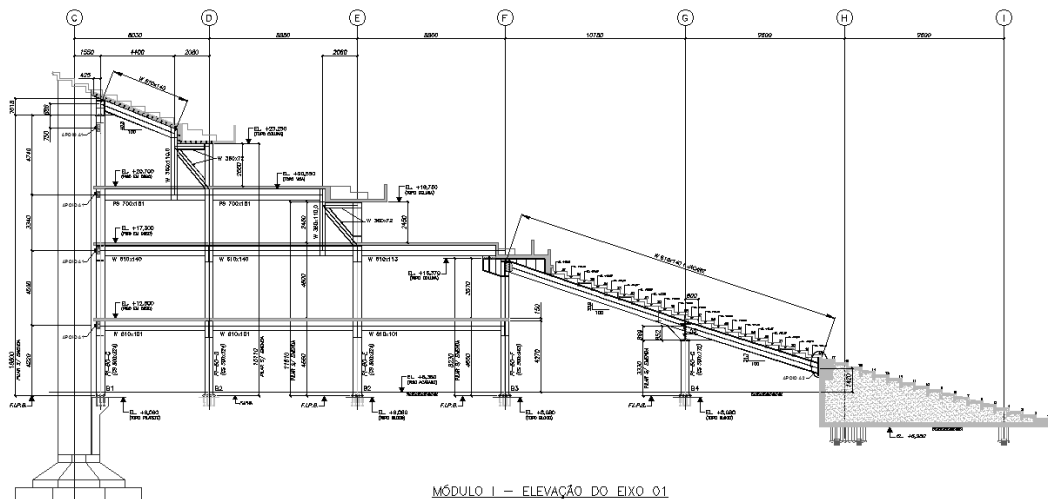


Figura 12 – Elevação do Eixo 01 – Exemplo de configuração do setor Oeste, [5]

No trecho entre os eixos H e I foram construídos contrafortes, que são estruturas em concreto armado preenchidas com rejeitos da demolição do estádio e do solo retirado para realizar as 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 que deve ser gerada quando o Maracanã estiver lotado. A Figura 13 apresenta os contrafortes durante sua execução.



Figura 13 – Contrafortes durante a construção, [5]

Entre os eixos C e H 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 de “steel deck” sobre os perfis da arquibancada servindo de fôrma para a laje de concreto armado.



Figura 14 – Ligação da estrutura metálica no contraforte, [6]



Figura 15 – Vigas-jacaré e degraus em pré-moldados, [13]



Figura 16 – Lajes em “steel deck”, [6]

## 4. MODELO DE CÁLCULO

### 4.1. ESTRUTURA ORIGINAL

Para o estudo da análise modal de uma estrutura típica da arquibancada foi escolhido, no projeto original do Maracanã, o módulo VI desta arquibancada, para ser utilizada para a elaboração do modelo de elementos finitos que será apresentado no item 4.2. Devido à similaridade arquitetônica dos módulos não existiu nenhuma razão particular para a escolha do Módulo VI para a análise.

Este módulo pertence ao setor Leste e está compreendido entre os eixos de junta de dilatação 23 e 28, e os eixos radiais C e I. A Figura 17 mostra a planta da estrutura metálica da arquibancada do módulo VI.

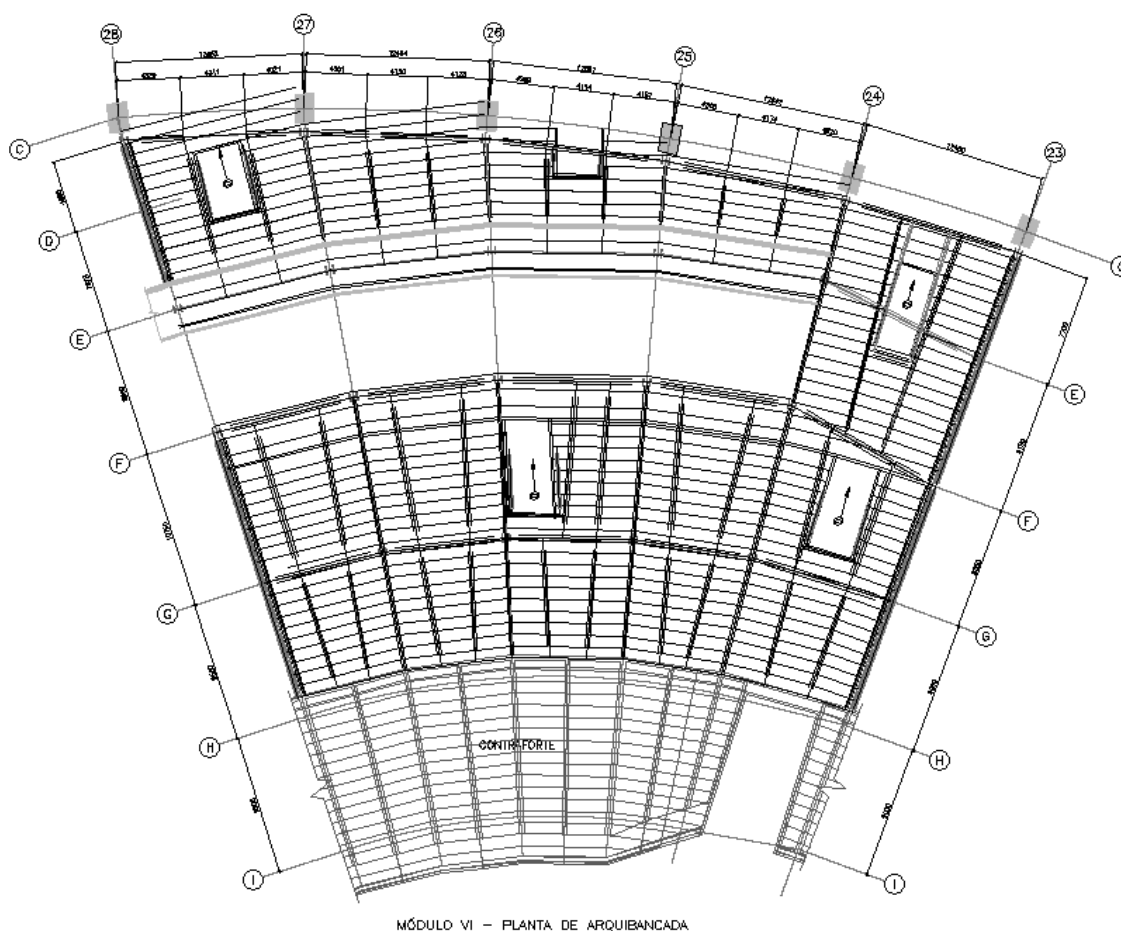


Figura 17 – Planta de Arquibancada do Módulo VI, [5]





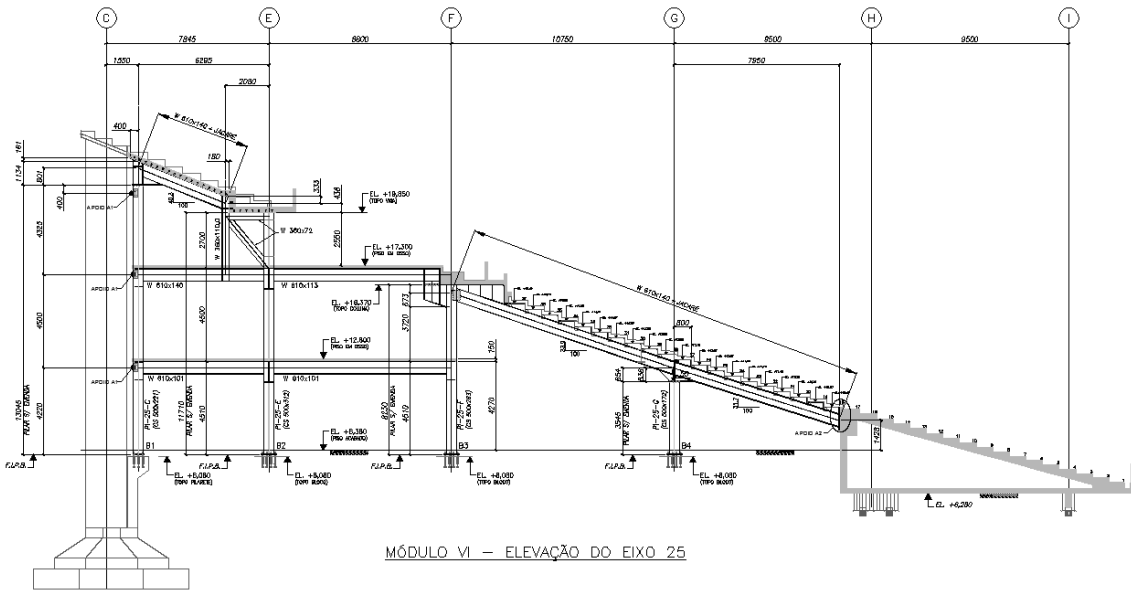


Figura 20 – Elevação do Eixo 25, [5]

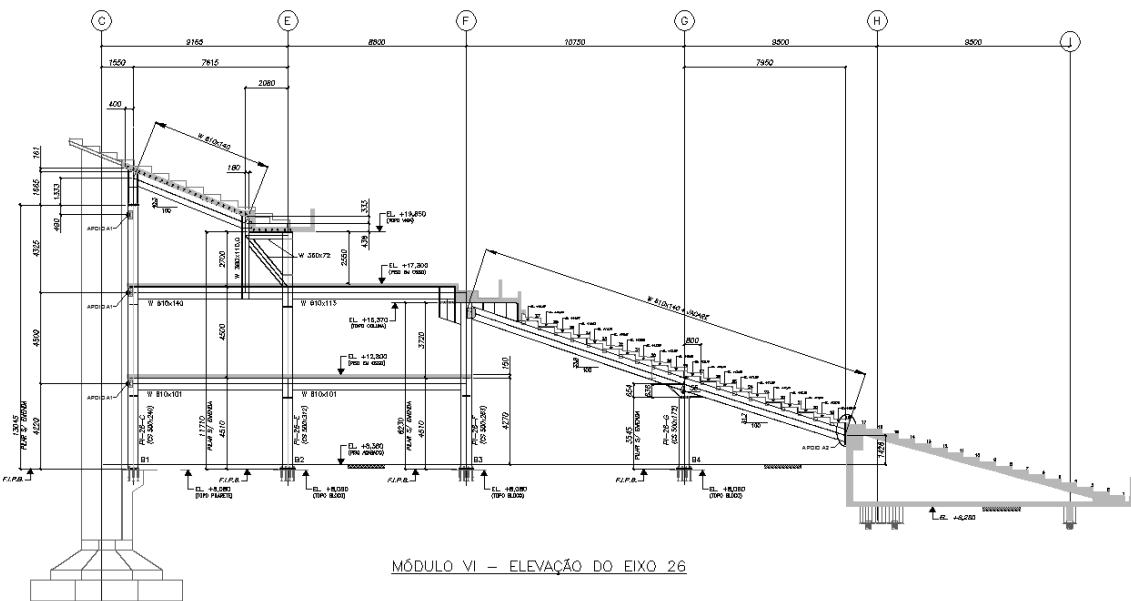
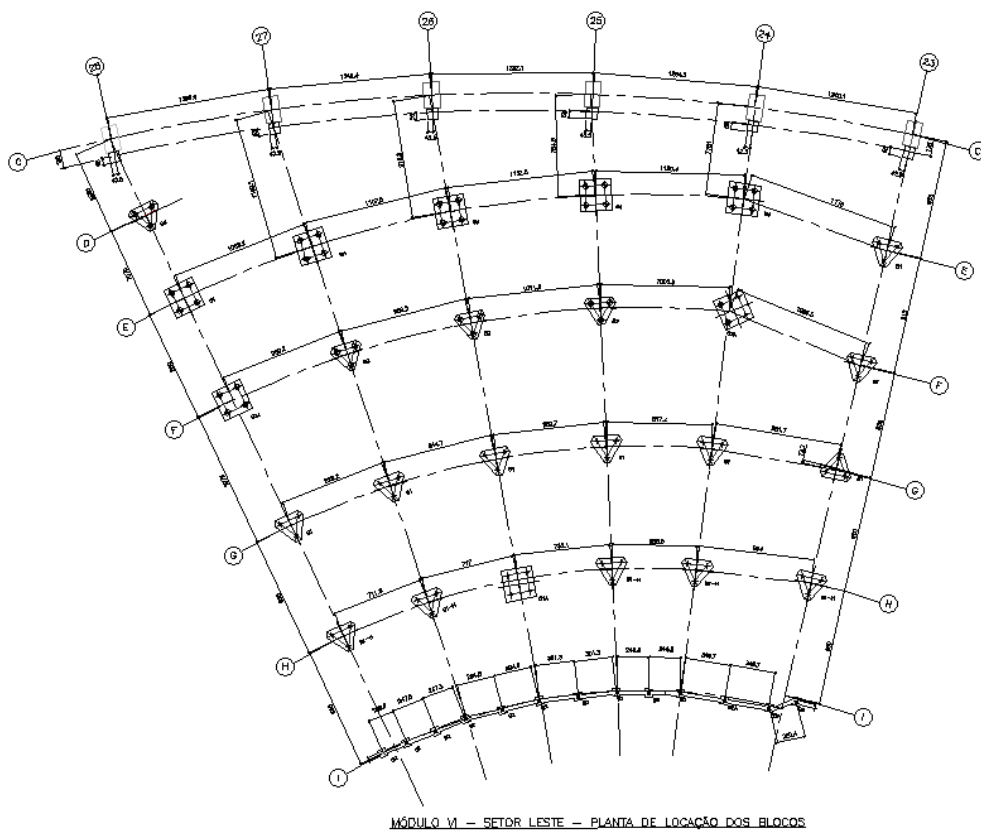


Figura 21 – Elevação do Eixo 26, [5]



A infraestrutura do módulo VI é composta por sapatas e blocos de fundações, que estão dispostos como apresentado na Figura 24. No eixo radial C sobre as sapatas da estrutura original, nascem pilaretes de concreto que funcionam como espera para os pilares metálicos. Entre os eixos radiais D e H foram adotados dois tipo de blocos de fundações, com 3 ou 4 estacas do tipo raiz, variando seu diâmetro entre 31cm e 41cm. Ao longo do eixo radial I existem blocos de fundações com 1 estaca do tipo raiz, ligados por uma cinta.



MÓDULO VI - SETOR LESTE - PLANTA DE LOCAÇÃO DOS BLOCOS

Figura 24 – Planta de Localização dos Blocos, [5]

Da Figura 25 a Figura 27 são apresentadas a planta do 1º pavimento, a planta do 2º pavimento e a planta do túnel de acesso do 2º pavimento, respectivamente.

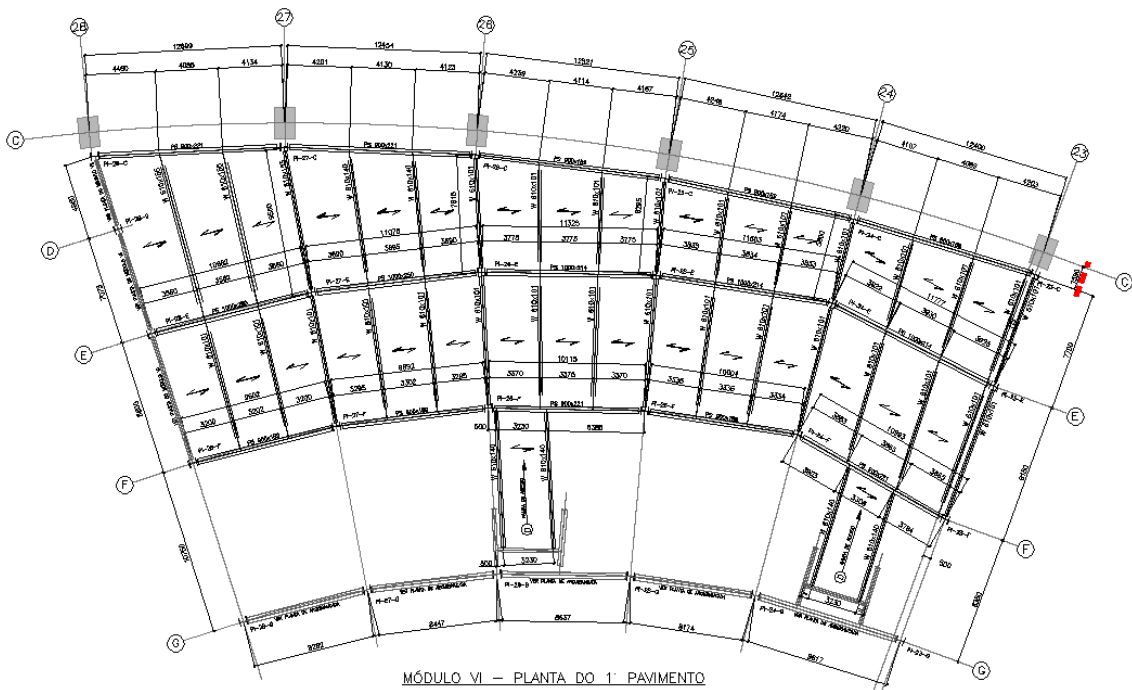


Figura 25 – Planta do 1º Pavimento, [5]

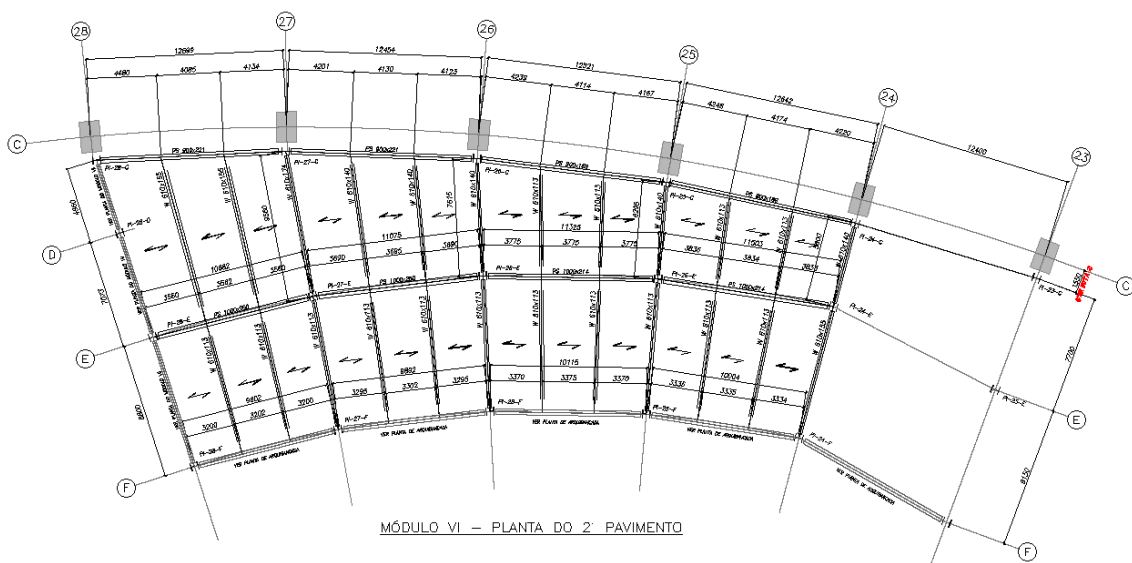


Figura 26 – Planta do 2º Pavimento, [5]

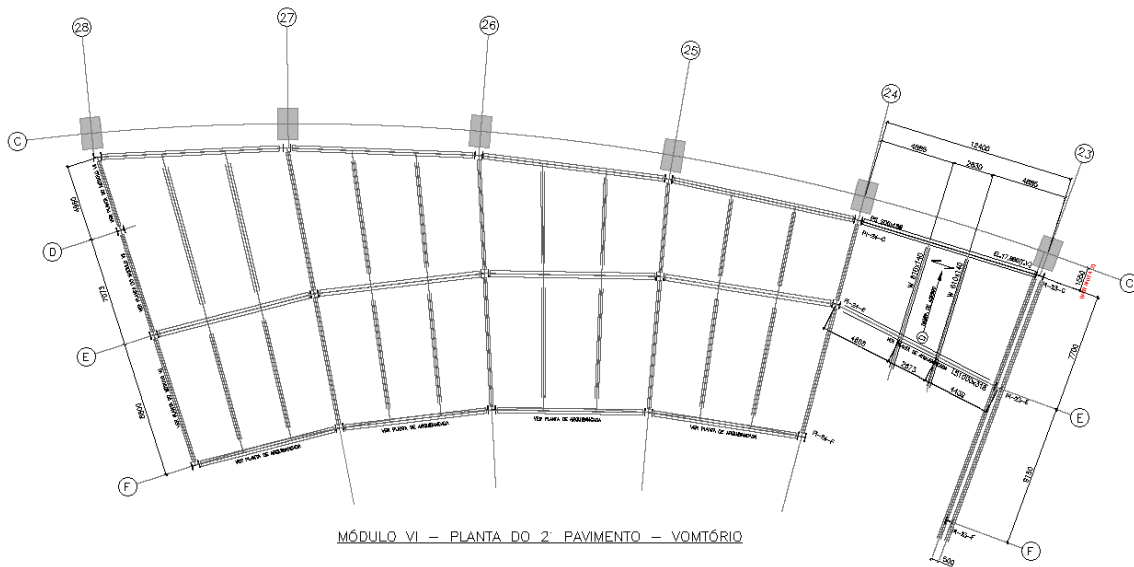


Figura 27 – Planta do Túnel de Acesso do 2º Pavimento, [5]

## 4.2. DESCRIÇÃO DO MODELO

Com o objetivo de realizar a análise modal da arquibancada, existente no módulo VI do Estádio Jornalista Mário Filho, foi elaborado um modelo de elementos finitos, tendo-se, para tal, recorrido ao programa SAP2000. A arquibancada foi modelada com base nos dados definidos no projeto estrutural, elaborado e disponibilizado pela Casagrande Engenharia e Consultoria [5].

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.

Para simular o funcionamento dos blocos de fundação consideraram-se restrições dos graus de liberdade nos correspondentes nós do modelo. Onde existem blocos de fundação com 3 ou 4 estacas, os apoios na base foram considerados como rígidos para todos os deslocamentos e todas as rotações. Onde os blocos de fundação possuem somente 1 estaca, os apoios na base foram considerados rígidos para todos os deslocamentos e livre para todas as rotações.

Para simular o funcionamento das ligações metálicas das vigas nos pilares foram restringidos ambos os deslocamentos horizontais, consoante o tipo de ligação.

O modelo de elementos finitos desenvolvido tem um total de 2893 nós, 1117 elementos de barra, 2775 elementos de placa, 43 restrições dos nós de apoio e 17100 graus de liberdade. A ordem de grandeza de dimensão dos elementos de placa é em torno de 1,5m.

As massas referentes aos espectadores foram adicionadas na massa da arquibancada.

Da Figura 28 à Figura 32 apresentam-se diversas perspectivas gráficas do modelo de elementos finitos desenvolvido para representar a arquibancada.

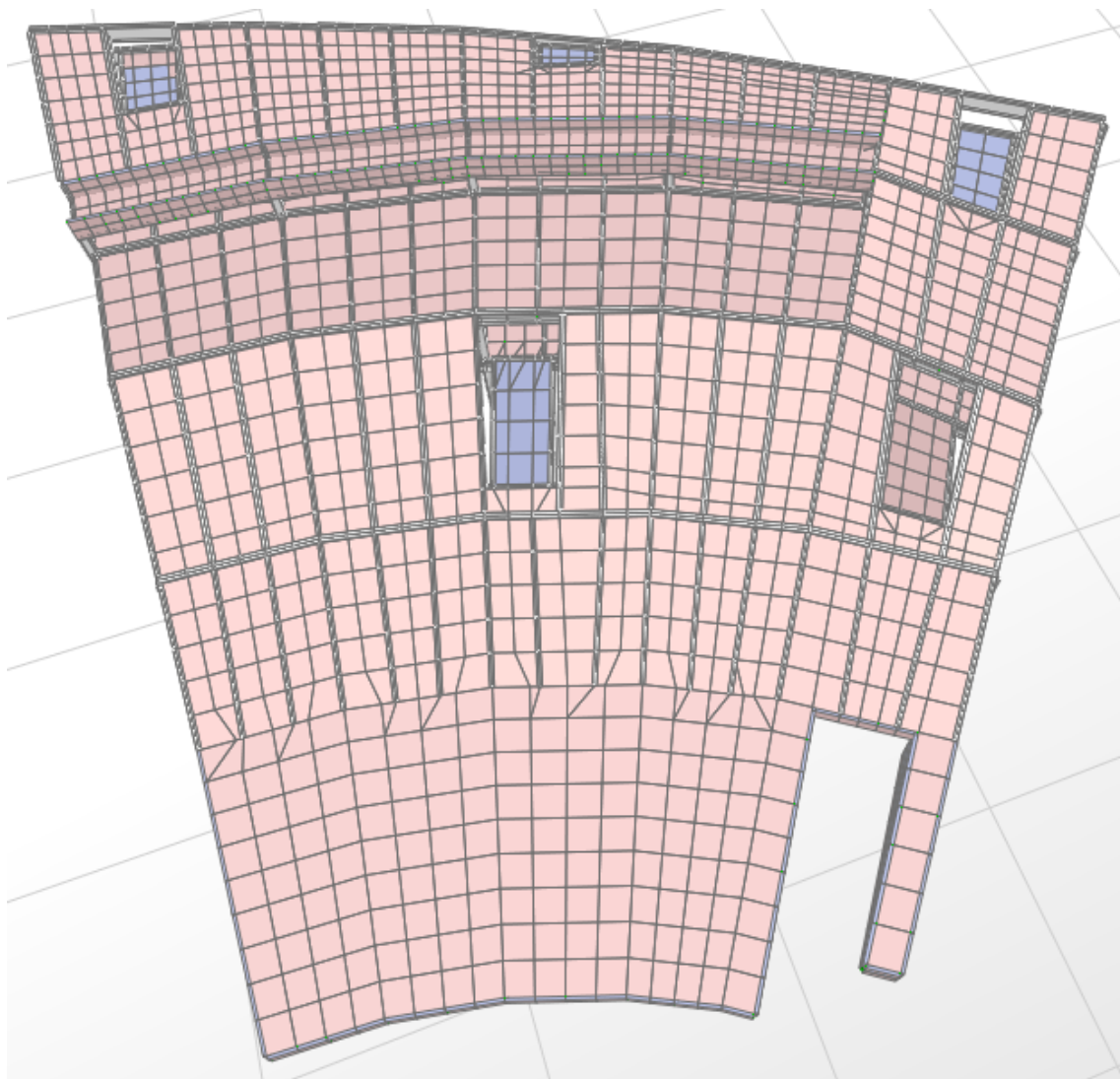


Figura 28 – Perspectiva Superior



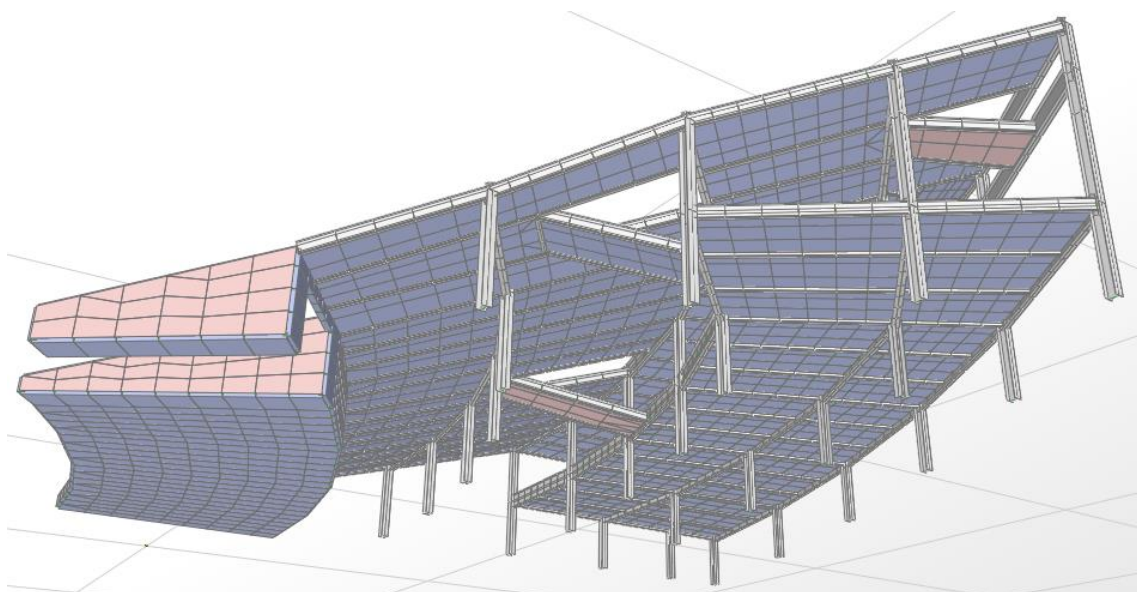


Figura 29 – Perspectiva Inferior

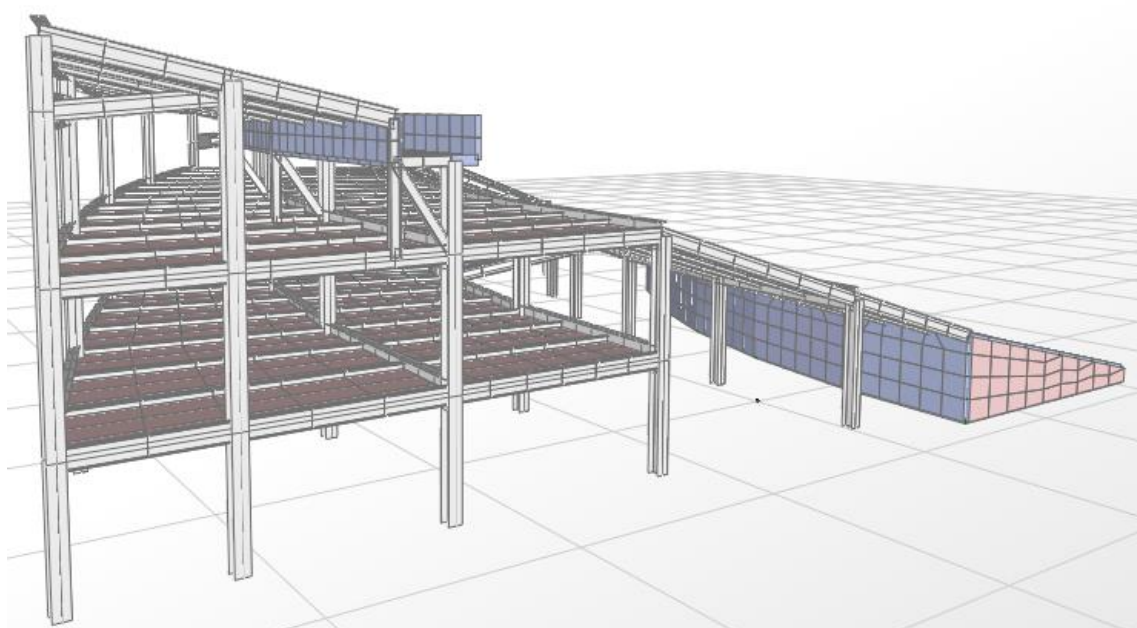


Figura 30 – Perspectiva Lateral - 1

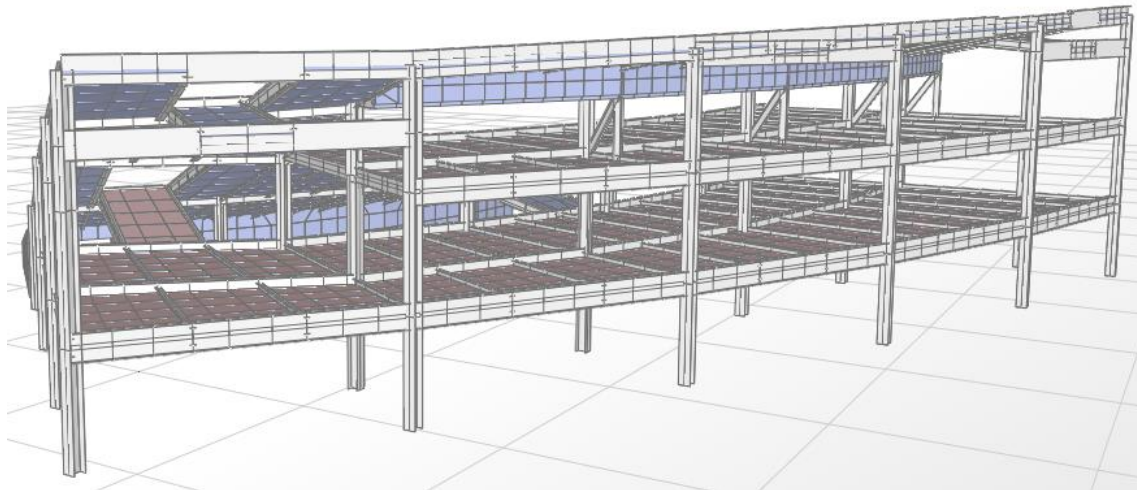


Figura 31 – Perspectiva Lateral – 2

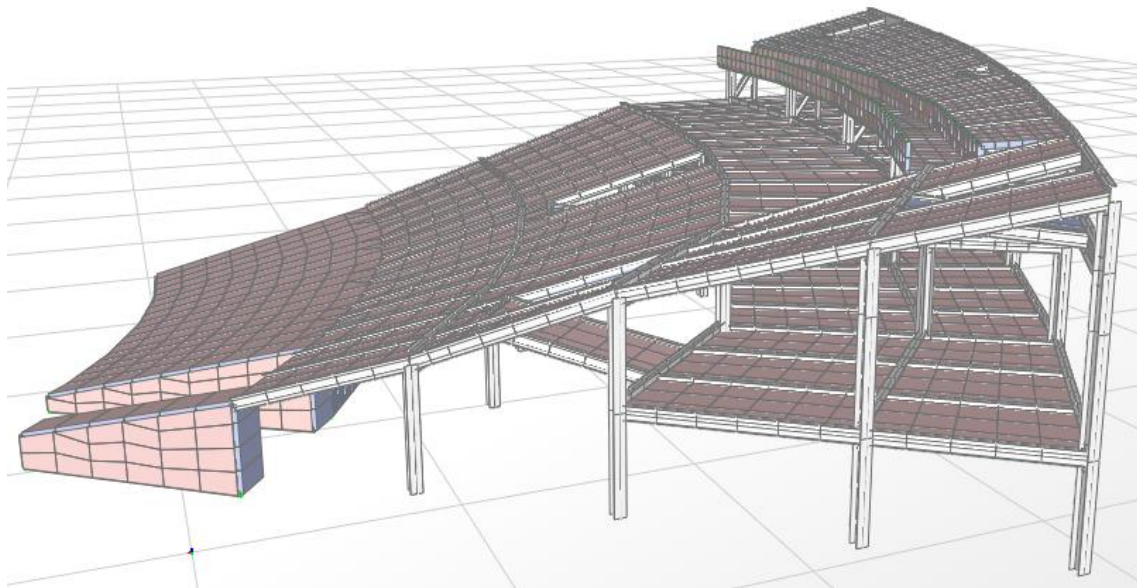


Figura 32 – Perspectiva Lateral - 3

### 4.3. CARGA DINÂMICA

Como os estádios de futebol hoje em dia possuem 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. Pode ser esse evento uma partida de futebol como 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 carga da componente vertical, isto é, 0,1kN/m<sup>2</sup>.

Como apresentado na Figura 33, 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.

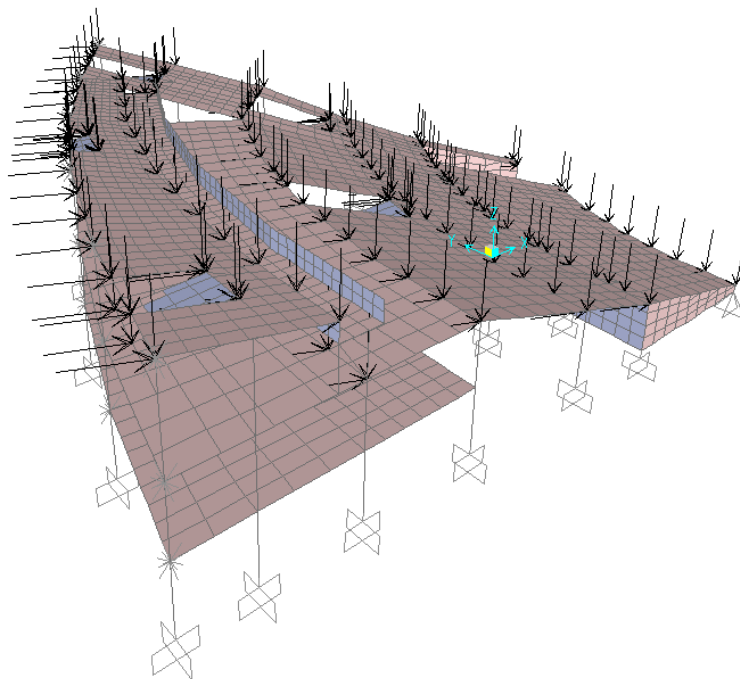


Figura 33 – Carregamento “TORCIDA” aplicado nos nós

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 Hertz e período (T) igual a 0,2857 segundos, de acordo com as recomendações da tabela G.1 de BACKMANN *et al.* [3], para ação do tipo “jumping”, como podemos ver na Figura 34. Foi considerado um amortecimento constante igual a 0,02.

Representative types of activity			Range of applicability		
Designation	Definition	Design activity rate [Hz]	Actual activities	Activity rate [Hz]	Structure type
“walking”	walking with continuous ground contact	1.6 to 2.4	<ul style="list-style-type: none"> <li>slow walking (ambling)</li> <li>normal walking</li> <li>fast, brisk walking</li> </ul>	~ 1.7 ~ 2.0 ~ 2.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>pedestrian structures (pedestrian bridges, stairs, piers, etc.)</li> <li>office buildings, etc.</li> </ul>
“running”	running with discontinuous ground contact	2.0 to 3.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>slow running (jog)</li> <li>normal running</li> <li>fast running (sprint)</li> </ul>	~ 2.1 ~ 2.5 > 3.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>pedestrian bridges on jogging tracks, etc.</li> </ul>
“jumping”	normal to high rhythmical jumping on the spot with simultaneous ground contact of both feet	1.8 to 3.4	<ul style="list-style-type: none"> <li>fitness training with jumping, skipping and running to rhythmical music</li> <li>jazz dance training</li> </ul>	~ 1.5 to 3.4 ~ 1.8 to 3.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>gymnasia, sport halls</li> <li>gymnastic training rooms</li> </ul>
“dancing”	approximately equivalent to “brisk walking”	1.5 to 3.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>social events with classical and modern dancing (e.g. English Waltz, Rumba etc.)</li> </ul>	~ 1.5 to 3.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>dance halls</li> <li>concert halls and other community halls without fixed seating</li> </ul>
“hand clapping with body bouncing while standing”	rhythmical hand clapping in front of one’s chest or above the head while bouncing vertically by forward and backward knee movement of about 50 mm	1.5 to 3.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>pop concerts with enthusiastic audience</li> </ul>	~ 1.5 to 3.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>concert halls and spectator galleries with and without fixed seating and “hard” pop concerts</li> </ul>
“hand clapping”	rhythmical hand clapping in front of one’s chest	1.5 to 3.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>classical concerts, “soft” pop concerts</li> </ul>	~ 1.5 to 3.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>concert halls with fixed seating (no “hard” pop concerts)</li> </ul>
“lateral body swaying”	rhythmical lateral body swaying while being seated or standing	0.4 to 0.7	<ul style="list-style-type: none"> <li>concerts, social events</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>spectator galleries</li> </ul>

Table G.1: Representative types of activities and their applicability to different actual activities and types of structures

Figura 34 – Tipos representativos de atividades e sua aplicação para diferentes atividades reais e tipos de estruturas, [3]

## 5. RESULTADOS

### 5.1. FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO

As frequências naturais da estrutura foram obtidas pela análise modal através do “software” SAP2000. A Tabela 2 apresenta os 15 primeiros modos de vibração e seus períodos e frequências naturais correspondentes.

Tabela 2 – 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

Devido à rigidez no plano horizontal podemos perceber que os primeiros e principais modos de vibração encontrados na estrutura são verticais. Da Figura 35 à Figura 40 apresentam-se os 6 primeiros modos de vibração. Configuram-se modos localizados na estrutura.

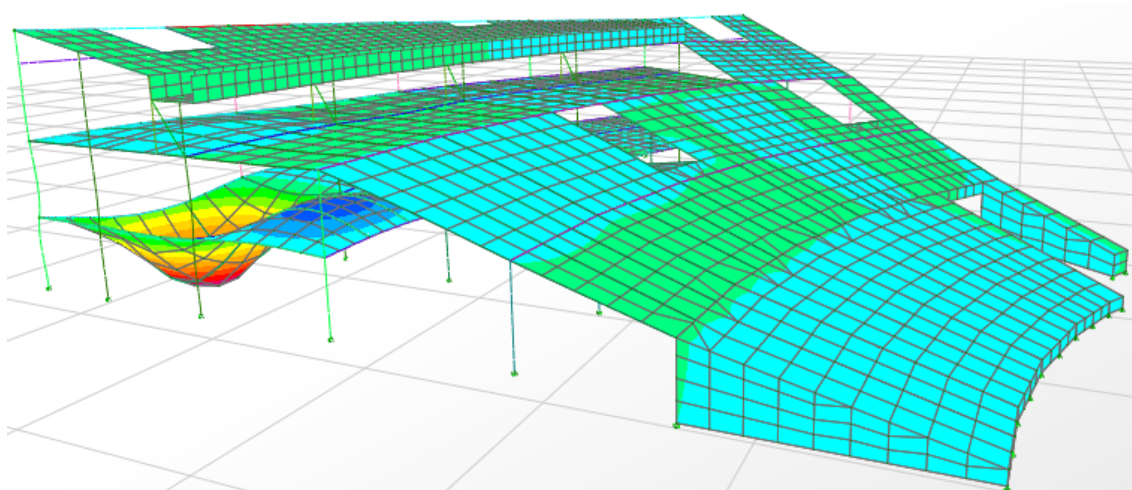


Figura 35 – Modo 1 : Modo vertical na laje do nível 1

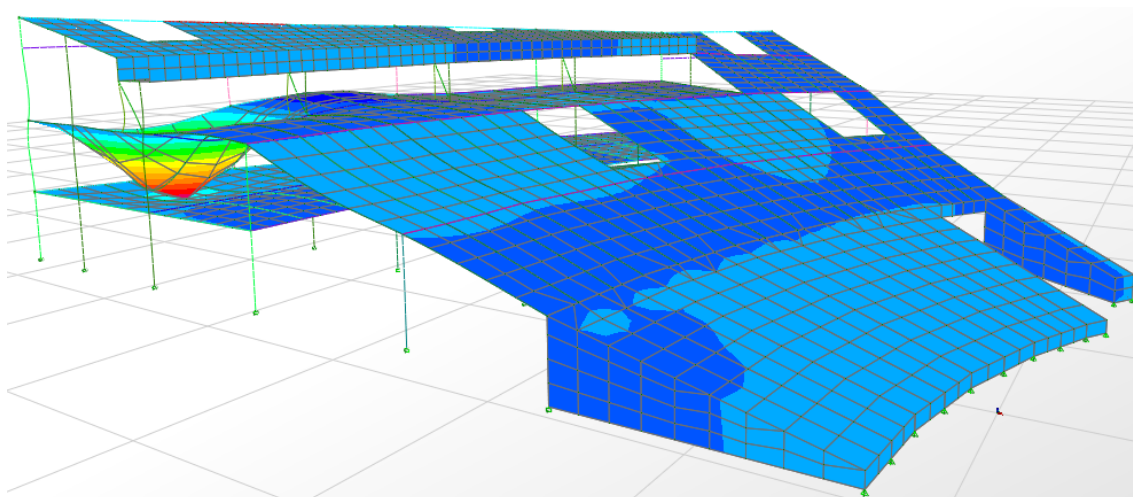


Figura 36 – Modo 2 : Modo vertical na laje do nível 2

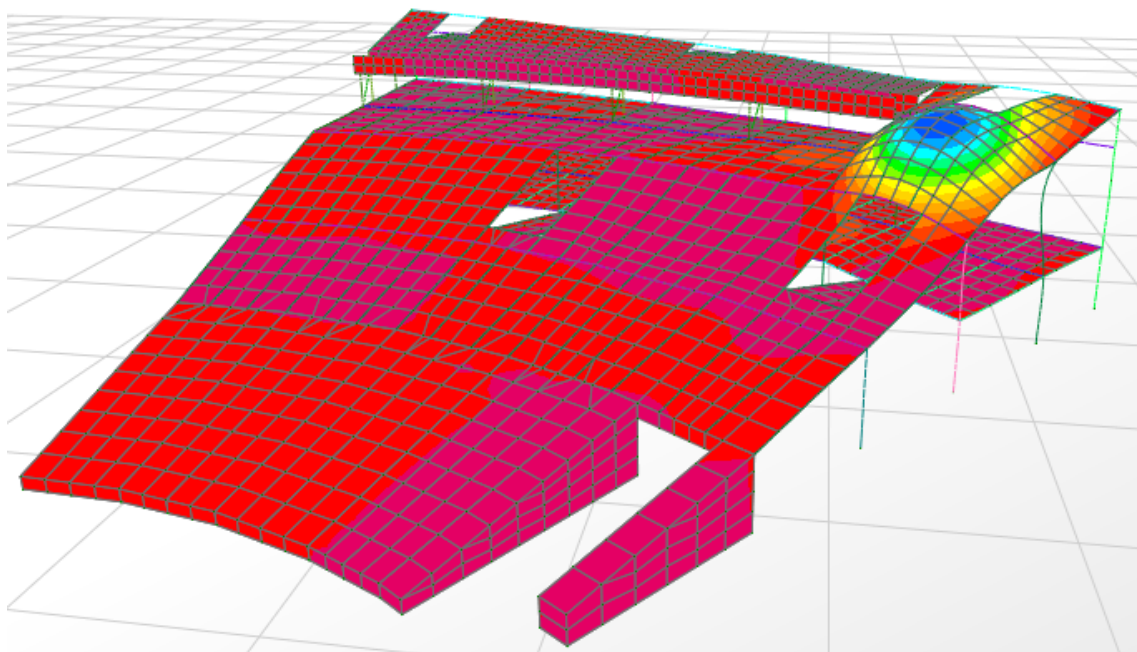


Figura 37 – Modo 3 : Modo vertical na arquibancada

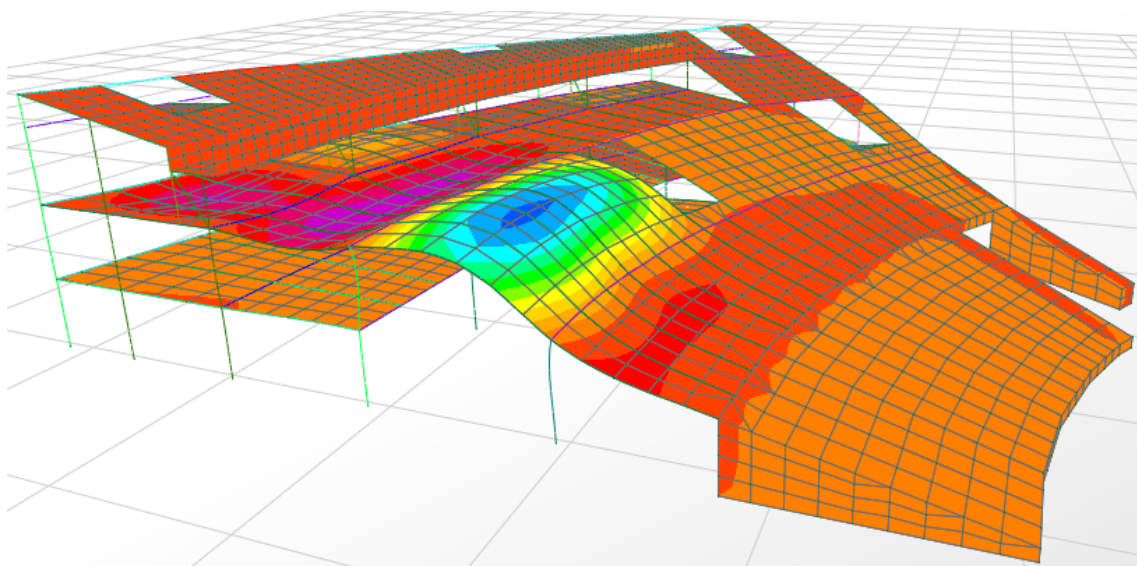


Figura 38 – Modo 4 : Modo vertical na arquibancada

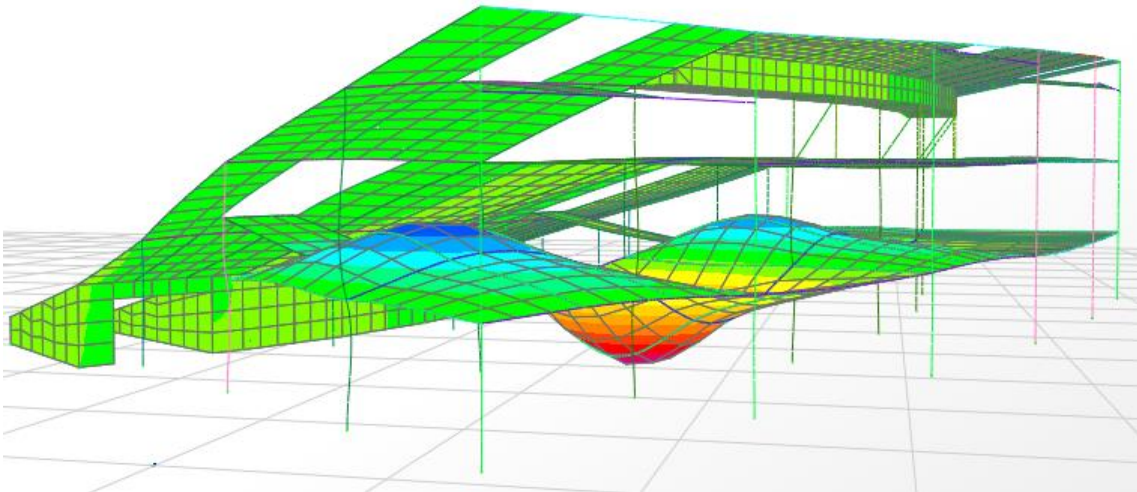


Figura 39 – Modo 5 : Modo vertical na laje do nível 1

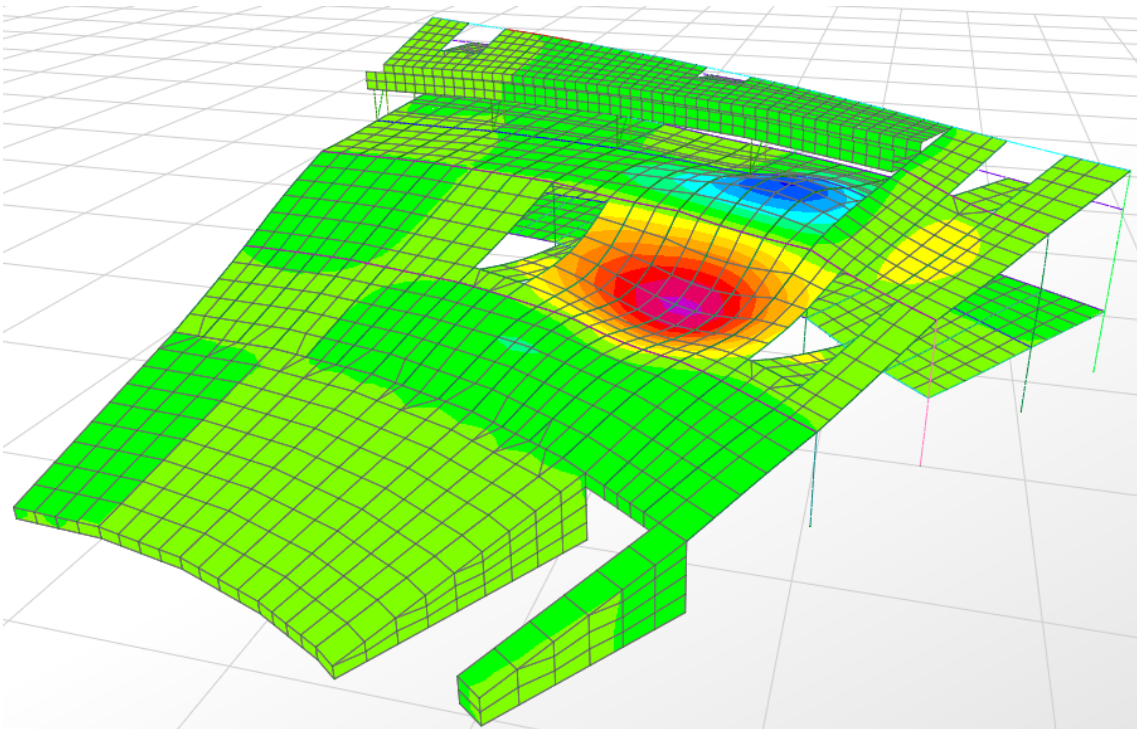


Figura 40 – Modo 6 : Modo vertical na arquibancada



Foi considerado como critério para a definição do número de modos necessário para a análise, 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 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 modo de vibração. Na Tabela 3 estão apresentadas as massas modais efetivas de alguns modos de vibração.

Tabela 3 – Razão das massas modais efetivas dos principais modos de vibração

Modos de Vibração	Valores Modais			Valores Acumulados		
	UX	UY	UZ	UX	UY	UZ
1	5,65E-06	3,67E-07	4,34E-03	0,000	0,000	0,004
2	1,23E-04	1,06E-05	1,80E-02	0,000	0,000	0,022
3	2,37E-03	6,39E-04	3,30E-02	0,002	0,001	0,056
4	2,85E-03	5,56E-06	7,54E-03	0,005	0,001	0,063
5	6,32E-05	3,91E-05	2,25E-03	0,005	0,001	0,065
41	6,54E-04	2,09E-05	4,91E-04	0,022	0,004	0,488
42	7,54E-03	3,78E-04	4,80E-02	0,029	0,005	0,537
116	1,40E-02	6,25E-04	1,50E-02	0,184	0,440	0,648
117	4,20E-02	1,03E-03	5,80E-02	0,226	0,441	0,706
225	1,20E-02	9,03E-04	3,22E-04	0,761	0,715	0,869
226	9,31E-04	6,56E-04	4,57E-05	0,762	0,716	0,870
227	3,19E-03	1,50E-03	1,16E-03	0,765	0,718	0,871
323	1,15E-04	3,07E-04	1,78E-04	0,825	0,768	0,896
324	4,11E-04	9,64E-06	8,73E-05	0,825	0,768	0,897
325	9,33E-05	2,12E-05	3,00E-03	0,825	0,768	0,900

326	1,06E-04	9,53E-06	2,31E-04	0,826	0,768	0,900
412	6,19E-04	3,12E-04	2,90E-04	0,864	0,899	0,923
413	8,65E-04	2,39E-04	5,95E-04	0,865	0,899	0,924
414	4,80E-03	4,36E-06	5,94E-05	0,870	0,899	0,924
415	1,55E-03	4,15E-04	3,00E-04	0,871	0,900	0,924
416	2,66E-04	2,51E-04	6,32E-05	0,871	0,900	0,924
417	6,45E-04	4,14E-05	1,31E-04	0,872	0,900	0,925
470	2,16E-04	1,16E-05	1,27E-05	0,898	0,909	0,933
471	5,45E-06	1,20E-03	2,07E-04	0,898	0,910	0,934
472	1,02E-04	1,61E-06	6,13E-06	0,899	0,910	0,934
473	6,93E-04	3,80E-04	3,69E-05	0,899	0,910	0,934
474	1,78E-04	2,82E-05	1,28E-05	0,899	0,910	0,934
475	4,15E-04	3,48E-04	6,73E-05	0,900	0,911	0,934

## 5.2. SIMULAÇÃO DE TORCIDA

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

Na Figura 41 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.

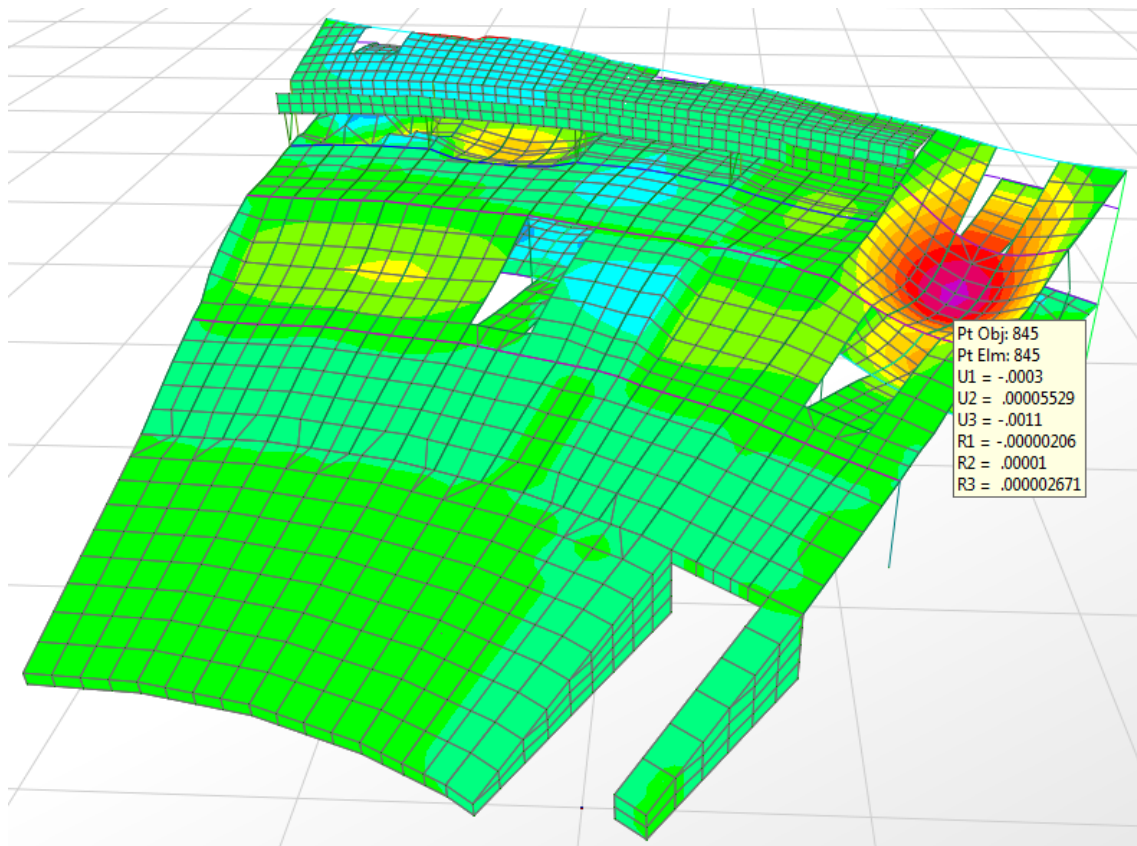


Figura 41 – Envoltória da deformada do carregamento TORCIDA na direção UZ

O deslocamento absoluto máximo obtido é de  $1,135 \times 10^{-3}m$ . Na Figura 42 está apresentado o gráfico da variação do 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 no CEB209:

$$d_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T d^2(t) dt} \quad (16)$$

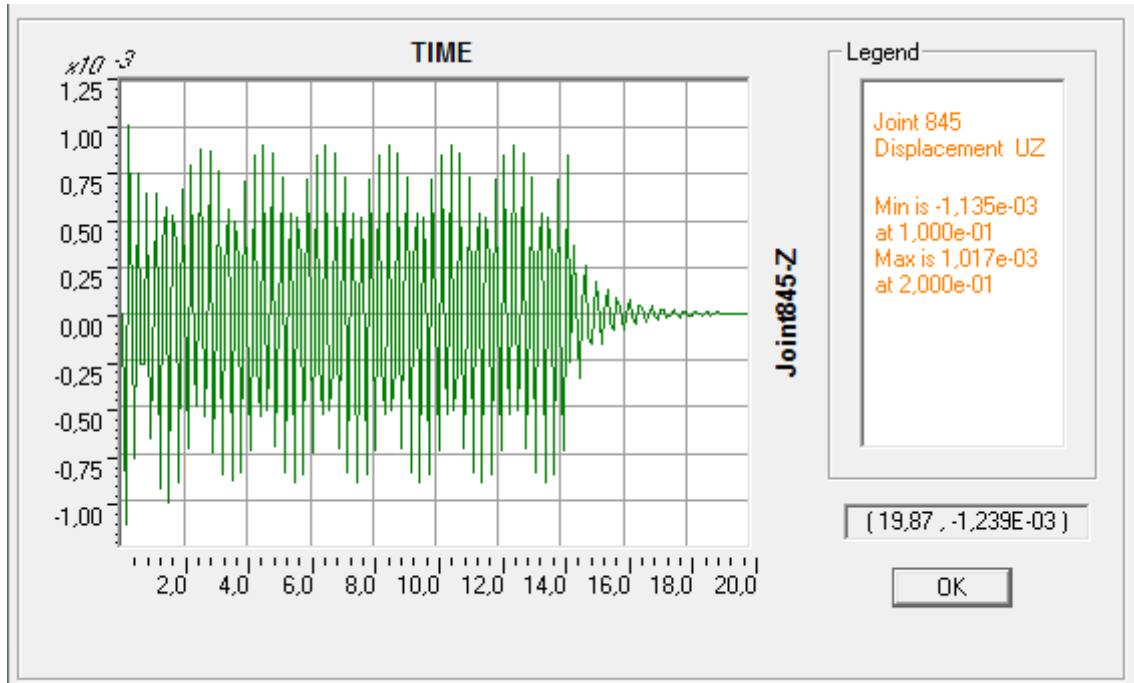


Figura 42 – Deslocamento Vertical (m) x Tempo (s)

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

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

Nas Figura 43 e Figura 44 estão apresentados, respectivamente, o gráfico da variação de velocidade vertical no tempo e o gráfico da variação da aceleração vertical no tempo. Nos gráficos abaixo é possível perceber que os valores considerados para a velocidade vertical ( $v = 16,5 \times 10^{-3} m/s$ ) e a aceleração vertical ( $a = 0,363 m/s^2$ ) estão dentro da faixa de valores esperados.

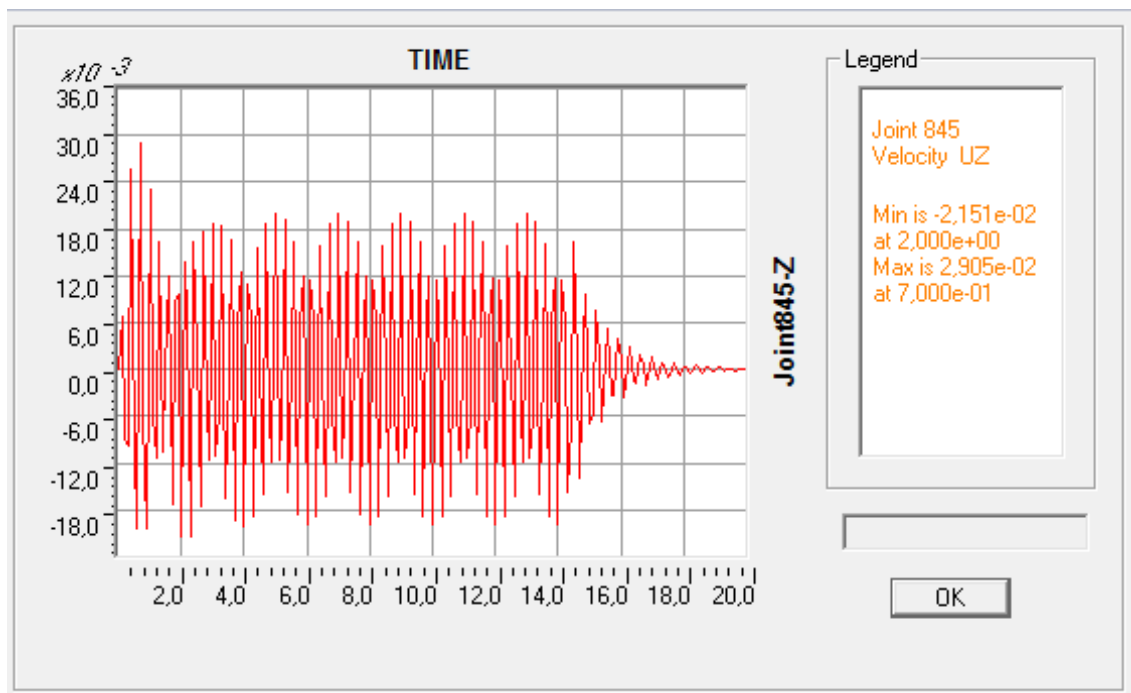


Figura 43 – Velocidade Vertical (m/s) x Tempo (s)

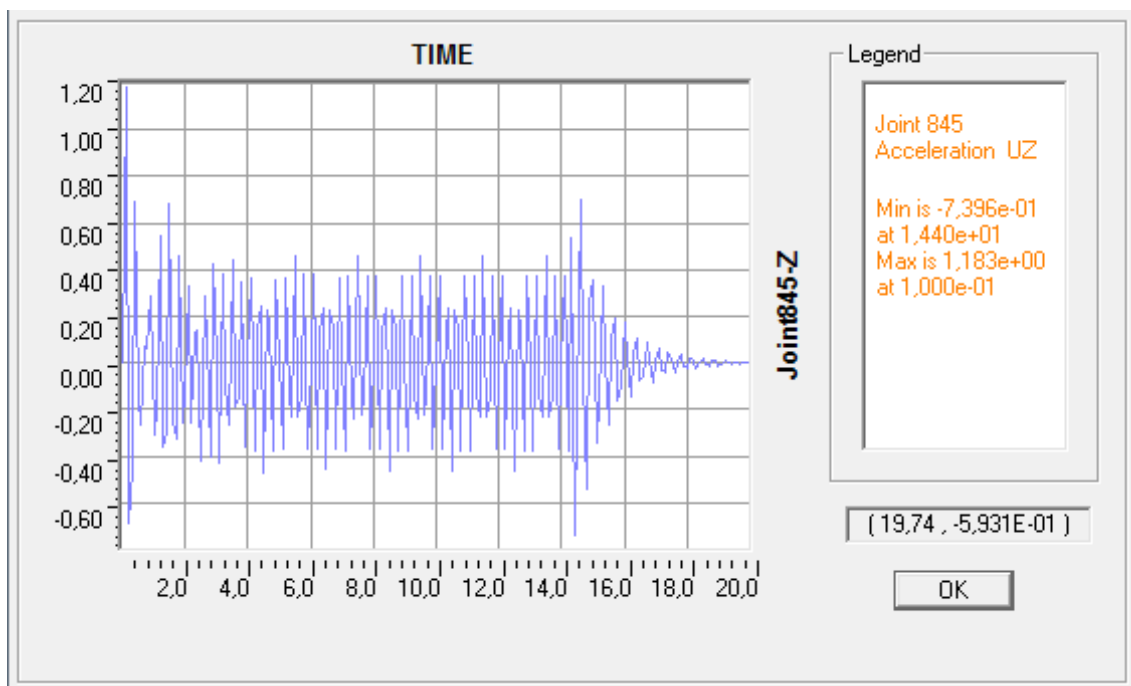


Figura 44 – Aceleração Vertical (m/s<sup>2</sup>) x Tempo (s)

## 6. CONCLUSÕES

### 6.1. FREQUÊNCIAS NATURAIS

A norma NBR 6118 (2007) não dá parâmetros para limitar os resultados da análise dinâmica da estrutura. A primeira frequência obtida, que é de 6,67 Hertz, é confortável com o limite da norma NBR 6118 (2007) de 7,0 Hertz para salas de dança. Na Figura 45 estão apresentadas as frequências críticas recomendadas pela norma NBR 6118 (2007) para alguns casos especiais.

Caso	$f_{crit}$ Hz
Ginásio de esportes	8,0
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7,0
Escritórios	3,0 a 4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,4
Passarelas de pedestres ou ciclistas	1,6 a 4,5

Figura 45 – Frequência crítica para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas [2]

### 6.2. SIMULAÇÃO “TORCIDA”

De acordo com BACKMANN *et al.*[3], no item 1.1.5, é recomendado para a aceleração um limite máximo 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>, sendo essa aceleração confortável com 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”. A Figura 46 reproduz esta tabela, onde estão indicados dos limiares de percepção humana para vibrações harmônicas verticais.

Description	Frequency range 1 to 10 Hz Peak acceleration [mm/s <sup>2</sup> ]	Frequency range 10 to 100 Hz Peak velocity [mm/s]
just perceptible	34	0.5
clearly perceptible	100	1.3
disturbing/unpleasant	550	6.8
intolerable	1800	13.8

*Table 1.1: An indication of human perceptibility thresholds for vertical harmonic vibrations (person standing). Data combined from various authorities. There is scatter by a factor of up to about 2 on the values given*

Figura 46 – Indicação dos limiares de capacidade de percepção humanos para vibrações harmônicas verticais, [3]

Na região do nó 845, onde a aceleração pode causar algum desconforto, poderia ser sugerida uma alteração na estrutura original, de forma a aumentar a rigidez nesta região.

Observando a Figura 41, vemos que existe uma região localizada de baixa rigidez, nó 845. Uma melhoria no comportamento dinâmico poderia ser conseguida, com um enrijecimento no entorno da abertura.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LIMA, Silvio S. e SANTOS, Sergio Hampshire C **Análise Dinâmica das Estruturas**. Rio de Janeiro, Editora Ciência Moderna LTDA, 2008.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 6118:2007 – Projeto de estruturas de concreto-Procedimento**, 2007.
- [3] BACHMANN, Hugo, AMMANN, Walter J., DEISCHL, Florian, EISENMANN, Josef, FLOEGL, Ingomar, HIRSCH, Gerhard H., KLEIN, Günter K., LANDE, Göran J., MAHREHOLTZ, Oskar, NATKE, Hans G., NUSSBAUMER, Hans, PRETLOVE, Anthony J., RAINER, Johann H., SAEMANN, Ernst-Ulrich, STEINBEISSER, Lorenz **CEB Bulletin d'Information N° 209 - Vibration Problems In Structure: Practical Guidelines**. 1991.
- [4] Disponível em: <[www.civil.ist.utl.pt/~luisg/textos\\_didaticos.htm](http://www.civil.ist.utl.pt/~luisg/textos_didaticos.htm)>, Acesso em: Julho 2013.
- [5] CASAGRANDE ENGENHARIA & CONSULTORIA. Informações diversas em memória de cálculo, desenhos e fotografias do projeto de reforma do Estádio Jornalista Mário Filho.
- [6] Disponível em: <[www.piniweb.com.br/construcao/arquitetura/arquibancadas-do-maracana-tera-sistema-de-amortecimento-para-suportar-quase-265108-1.asp](http://www.piniweb.com.br/construcao/arquitetura/arquibancadas-do-maracana-tera-sistema-de-amortecimento-para-suportar-quase-265108-1.asp)>, Acesso em: Junho 2013.
- [7] Disponível em: <[www.odebrechtarenas.com.br/estadio/maracana#section-sobre-a-obra](http://www.odebrechtarenas.com.br/estadio/maracana#section-sobre-a-obra)>, Acesso em: Junho 2013.
- [8] Disponível em: <[www.cimentoitambe.com.br/maracana-estadio-sessenta-agora-e-so-fachada](http://www.cimentoitambe.com.br/maracana-estadio-sessenta-agora-e-so-fachada)>, Acesso em: Junho 2013.
- [9] Disponível em: <[www.cbca-acobrasil.org.br/copa2014/noticias-ver.php?cod\\_noticia=857](http://www.cbca-acobrasil.org.br/copa2014/noticias-ver.php?cod_noticia=857)>, Acesso em: Junho 2013.
- [10] Disponível em: <[www.cimentoitambe.com.br/novo-maracana-tem-amortecimento-inedito-no-mundo](http://www.cimentoitambe.com.br/novo-maracana-tem-amortecimento-inedito-no-mundo)>, Acesso em: Junho 2013.
- [11] Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Maracan%C3%A3>>, Acesso em: Junho 2013.
- [12] Disponível em: <[www.maracanaonline.com.br/como-visitar](http://www.maracanaonline.com.br/como-visitar)>, Acesso em: Junho 2013.



[13] Disponível em: < [www.maracanario2014.com.br/historia-do-maracana](http://www.maracanario2014.com.br/historia-do-maracana)>, Acesso em: Junho 2013.

[14] Disponível em: < <http://globoesporte.globo.com/futebol/especial-maracana/6-o-novo-maracana.html>>, Acesso em: Junho 2013.

[15] Disponível em: < <http://veja.abril.com.br/noticia/esporte/maracana-um-colosso-improvisado>>, Acesso em: Junho 2013.

[16] Disponível em: < [www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/estadio-do-maracana/estadio-do-maracana.php](http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/estadio-do-maracana/estadio-do-maracana.php)>, Acesso em: Junho 2013.

[17] Disponível em: <<http://rioquemoranomar.blogspot.com.br/2013/06/maracana.html>>, Acesso em: Junho 2013.