



UFPB

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

BEATRIZ DE CARVALHO BESSA

A IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE ESTRUTURAL DINÂMICA

João Pessoa - PB

2019

BEATRIZ DE CARVALHO BESSA

A IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE ESTRUTURAL DINÂMICA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba, como um dos requisitos obrigatórios para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dra. Andrea Brasiliano Silva

João Pessoa - PB

2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

B557i Bessa, Beatriz de Carvalho.

A importância da análise estrutural dinâmica / Beatriz de Carvalho Bessa. - João Pessoa, 2019.

61 f. : il.

Orientação: Andrea Brasiliano Silva.

Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Análise dinâmica. 2. Carga dinâmica. 3. Análise estrutural. 4. Vibração. 5. Oscilação. I. Silva, Andrea Brasiliano. II. Título.

UFPB/BC

FOLHA DE APROVAÇÃO

BEATRIZ DE CARVALHO BESSA

A IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE ESTRUTURAL DINÂMICA

Trabalho de Conclusão de Curso em 30/09/2019 perante a seguinte Comissão Julgadora:

Andrea Brasiliano Silva

Prof^ª. Dra. Andrea Brasiliano Silva
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO

Clóvis Dias

Prof. Dr. Clóvis Dias
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO

MARILIA MARCY CABRAL DE ARAÚJO

Prof^ª. Dra. Marília Marcy Cabral de Araújo
Unidade Acadêmica de Engenharia Civil/UFCEG

APROVADO

ABSilva

Prof^ª. Andrea Brasiliano Silva
Matrícula Siape: 1549557
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por demonstrar a cada dia da minha vida o quanto eu sou afortunada e abençoada em ter pessoas que me fazem ser todo momento a melhor versão de mim.

À minha família, por nunca ter desistido de mim, por serem sempre o apoio e suporte nos momentos mais difíceis ao longo do curso, mas principalmente por comemorarem de maneira mais encorajadora possível em minhas conquistas.

Ao meu irmão Pedro e meus primos, em especial, Gabriella, Luíza, Laís, Lívia, Felipe e Caio por me manterem sempre feliz e esperançosa nos momentos mais árduos.

À minha orientadora Andrea, que muito mais que mestre, agiu como amiga ao longo do curso e da orientação deste trabalho.

Aos professores Clóvis e Marília por cederem uma parte do seu tempo e contribuir para a conclusão desta etapa da minha vida.

Aos amigos futuros engenheiros civis que ouviram minhas lamentações antes e, principalmente, depois das provas, que me levantaram nas notas baixas e comemoram os bons resultados. Agradeço, em especial, Mariana Cunha, Laíssa Félix, Mariana Duarte, Elyson Duarte, Carlos Henrique, Luiz Eduardo Lucena, Nara Brasil e todos os colegas da Planej.

Aos colegas do HUB360, por me apoiarem e me animarem durante a reta final, e, principalmente, por me fazerem não desistir, em especial Gaby, Leo e Cadu.

À minha família Guardiões do Céu e todos aqueles que fazem parte do EJC Menino Jesus de Praga, por me darem forças apenas por estar ao meu lado.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para eu estar aqui hoje.

“Pode se encontrar a felicidade mesmo nas horas mais sombrias, se a pessoa se lembrar de acender a luz.” (Harry Potter)

RESUMO

O avanço tecnológico na construção civil tem permitido empreendimentos cada vez maiores e inovadores, com materiais cada vez mais adaptáveis e de melhor controle de fabricação. Esperam-se assim, edifícios, pontes, passarelas, estádios mais seguros e resistentes. Contudo, a frequência de estruturas apresentando vibrações e danos, levando algumas delas ao desmoronamento, mantém a preocupação da eficácia dos cálculos realizados nos projetos. Assim, este trabalho vem ressaltar a importância do uso de análises matemáticas mais precisas, com considerações mais abrangentes e assertivas, por exemplo, a análise estrutural dinâmica, possibilitando soluções eficientes para as edificações, em especial as de grande porte. A influência das cargas ditas dinâmicas no comportamento das estruturas é destacada nos casos apresentados neste texto. Os casos da ponte Rio-Niterói e do estádio Maracanã foram melhor detalhados para demonstrar como a análise dinâmica ajudou no entendimento dos problemas ocorridos e permitiu propor soluções, além de proporcionar a verificação da competência das soluções propostas.

Palavras-chaves: análise dinâmica, carga dinâmica, análise estrutural, vibração, oscilação.

ABSTRACT

The technological advancement in civil construction has allowed for ever larger and innovative enterprises with increasingly adaptable materials and better manufacturing control. Thus, buildings, bridges, footbridges, and stadiums are expected to be safer and more resistant. However, the recurrence of structures with vibrations and damage, leading to the collapsing of some of them, remains a concern about the effectiveness of the design calculations. So, this work underscores the importance of using more accurate mathematical analysis, with broader and more assertive considerations, for example, dynamic structural analysis, enabling efficient solutions for buildings, especially large ones. The influence of so-called dynamic loads on the *behaviour* of structures is highlighted in the cases presented in this text. The Rio-Niterói bridge and Maracanã stadium cases were better detailed to demonstrate how the dynamic analysis helped to understand the problems that occurred and allowed us to propose solutions, as well as to verify the competence of the proposed solutions.

Keywords: dynamic analysis, dynamic load, structural analysis, vibration, oscillation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de sistema de um grau de liberdade	15
Figura 2 – Limites de aceleração conforme ISO 2631	18
Figura 3 – Ponte Rio-Niterói.....	20
Figura 4 – Estádio Maracanã	21
Figura 5 – Edifício <i>Millenium Palace</i>	22
Figura 6 – <i>Millenium Bridge</i>	23
Figura 7 – Ponte <i>Tacoma Narrows</i>	24
Figura 8 – <i>Pont de Solférino</i>	25
Figura 9 – Ponte Rio-Niterói em construção.....	26
Figura 10 – Vão central da ponte Rio-Niterói balançando	28
Figura 11 – Atenuadores dinâmicos múltiplos quase-sintonizados e quase-sincronizados	30
Figura 12 – Vista em perspectiva da viga com MADS's	30
Figura 13 – Maracanã em construção.....	32
Figura 14 – Evolução da estrutura do Maracanã.....	33
Figura 15 – Planta baixa do Maracanã com representação dos módulos.....	35
Figura 16 – Elevações dos eixos de diferentes setores.....	36
Figura 17 – Construção do contraforte	37
Figura 18 – Planta de locação dos blocos de fundação e dos contrafortes	38
Figura 19 – Distribuição dos grupos de torcidas para modelo numérico	39
Figura 20 – Planta baixa de um módulo do Maracanã	40
Figura 21 – Planta de locação dos blocos de fundações de um módulo do Maracanã	41
Figura 22 – Distribuição de carga nos nós do modelo.....	42
Figura 23 – Modos de vibração obtidos pela análise modal	43
Figura 24 – Envoltória da deformada do carregamento no eixo z	44
Figura 25 – Deslocamento vertical (m) x tempo (s)	44
Figura 26 – Velocidade vertical (m/s) x Tempo (s)	45
Figura 27 – Aceleração vertical (m/s ²) x Tempo (s).....	45
Figura 28 – Estádio Mané Garrincha.....	46
Figura 29 – Planta baixa do Mané Garrincha com representação dos setores.....	47
Figura 30 – Seção transversal da arquibancada	48

Figura 31 – Vistas do modelo numérico do estádio Mané Garrincha..... 49

LISTA DE FIGURAS

Tabela 1 – Frequência crítica de estruturas	18
Tabela 2 – Limites de aceleração conforme Bachmann <i>et al</i>	19
Tabela 3 – Limites de aceleração conforme CEB 209	19

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	9
1.1.Objetivos	11
1.1.1.Objetivo Geral	11
1.1.2.Objetivos Específicos	11
2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1.Análise estrutural.....	12
2.2.Tipos de análise estrutural.....	12
2.3.Análise estrutural dinâmica.....	13
2.3.1.Conceitos básicos	13
2.3.2.Sistema com um grau de liberdade	14
2.3.3.Sistema com dois ou mais graus de liberdade	15
2.3.4.Limites de conforto	17
3.PROBLEMAS ESTRUTURAIS DEVIDOS À AÇÃO DINÂMICA	20
3.1.Casos de edificações com problemas estruturais devidos à ação dinâmica ...	20
3.1.1.Brasil	20
3.1.2.Mundo	23
3.2.Apresentação e discussão de caso: Ponte Rio-Niterói.....	26
3.2.1.Histórico	26
3.2.2.Descrição da estrutura	28
3.2.3.Aplicação da análise estrutural.....	29
3.3.Apresentação e discussão de caso: Estádio Jornalista Mário Filho	31
3.3.1.Histórico	31
3.3.2.Descrição da estrutura	33
3.3.3.Aplicação da análise estrutural.....	38
3.4.Apresentação e discussão de caso: Estádio Nacional de Brasília	46
3.4.1.Histórico	46

3.4.2.Descrição da estrutura	47
3.4.3.Aplicação da análise estrutural.....	48
4.CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
5.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos ramos tecnológicos mais antigos do mundo e, assim como o ser humano, um dos mais mutáveis. À medida que a humanidade se desenvolveu e mudou a maneira de interagir entre seus diversos grupos e com o planeta, são claras as mudanças no progresso da arquitetura e engenharia civil.

As primeiras construções eram, em geral, casas unifamiliares pequenas de materiais simples (como madeira e barro), cuja principal função era o abrigo contra o clima e animais selvagens; durante as idades antiga e medieval, começaram a surgir edificações feitas de pedra, tornando-as mais robustas e, principalmente, mais resistentes contra os ataques inimigos. Nota-se também que o uso de pedras permitiu construções de médio e grande porte que facilitavam a comunicação entre diferentes locais, como estradas e pontes.

A partir da Revolução Industrial, teve-se o período mais variável da construção civil. A industrialização permitiu a fabricação de materiais mais adaptáveis, com maior controle de suas características e de maneira mais rápida, como o concreto e o aço. A adaptabilidade e o controle permitiram ainda o surgimento de materiais mais resistentes e duráveis, possibilitando construções de maior porte, mas, ao mesmo tempo, mais esbeltos e de menor custo.

Esse avanço tecnológico dos materiais desenvolveu-se mais rápido, contudo, do que a percepção humana de como as estruturas se comportam no meio. Assim, apesar de haver atualmente materiais de alta resistência, além de maior capacidade no controle das etapas de construção – desde a concepção e elaboração de projeto até a finalização e entrega do empreendimento – é visível como ainda há estruturas construídas nos últimos anos apresentando problemas estruturais.

Pode-se destacar, dentre os principais problemas para essas falhas acontecerem, os tipos de cargas a qual a estrutura está imposta e as considerações feitas pelos projetistas no momento de criar o modelo para analisar o comportamento da construção antes e durante o seu uso.

A influência de ações geradas pelo movimento de pessoas e automóveis, vento, terremoto e ondas, por exemplo, são mais difíceis de determinar, devido à imprevisibilidade de ocorrência, de magnitude e de posição dessas ações. Essa imprevisibilidade resulta em modelos matemáticos com diversas variáveis, dificultando a resolução manual dos cálculos.

Assim, para permitir a consideração dessas ações na análise do comportamento da estrutura, parâmetros foram determinados a partir de diversos experimentos e observações científicas, de modo a aproximar as ocorrências dessas cargas a acontecimentos mais previsíveis e constantes, portanto modelos matemáticos mais simples e de mais fácil resolução.

Além de tentar aproximar as características das cargas a comportamentos mais constantes, os parâmetros também levavam em conta a segurança da estrutura, isto é, a resistência ao movimento desta. Essa consideração fez com que os parâmetros majorassem, às vezes, bem mais que o necessário, a influência da carga, causando maior robustez das estruturas, conseqüentemente, maior rigidez e maior consumo de materiais.

Contudo, nem sempre maior rigidez significa segurança e conforto ao usuário. Isso pode ser percebido, por exemplo, em estádios de futebol. Essas construções são, em sua grande maioria, sinônimos de imponência e robustez devido a suas estruturas de elevadas dimensões e alto consumo de concreto. Ainda assim, notícias de arquibancadas tremendo e até desmoronamentos de partes dessas construções ainda são ouvidas ultimamente.

Isso ocorre devido a frequência natural da edificação, uma característica intrínseca da estrutura, e independe de quão resistente os componentes do material sejam a movimentos ou a rachaduras.

Outros exemplos de empreendimentos em que esse tipo de comportamento pode causar danos são as pontes, passarelas e arranha-céus. Essas construções, normalmente, são bem esbeltas na sua estrutura principal e possuem fundações extremamente rígidas e de grande porte. Mesmo assim, relatos de pontes e edifícios balançando ocorreram nos últimos anos.

Živanović (2005, *apud* MOREIRA, 2018) ressalta, inclusive, que desde junho de 2000, após o caso da *Millenium Bridge*, mais de 1000 artigos reportaram estudos sobre passarelas que apresentaram algum tipo de problema relacionado a movimentos da estrutura.

Em praticamente todos esses casos, pode-se concluir que os modelos matemáticos não foram totalmente eficazes nas considerações feitas quanto à ação das cargas variáveis anteriormente mencionadas.

A tendência atual no mercado da construção civil são construções mais esbeltas e compridas, com menor consumo de material, para que haja redução de

custos e melhoria na sustentabilidade do ambiente em que os empreendimentos estão inseridos, sem perder sua capacidade de resistência.

Esta tendência pode ser facilmente percebida na cidade de João Pessoa, local de realização deste trabalho. A cidade apresenta hoje um aumento considerável na construção de edifícios altos, possuindo, inclusive, o 2º prédio mais alto do Brasil na época de seu lançamento do edifício. (JOÃO..., 2018)

Portanto, a necessidade de modelos matemáticos mais assertivos (quanto às considerações das cargas variáveis) é mais evidente, de modo a tornar os parâmetros menos exagerados e mais precisos. Consequentemente, as edificações não precisarão ser superdimensionadas e ainda terão a garantia de segurança e conforto de todos os usuários.

Além de projetos mais corretos, esses modelos poderão auxiliar também na tomada de decisão das soluções a serem aplicadas em construções já existentes, sem que sejam necessárias reformas de grande porte ou até a demolição do empreendimento.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Demonstrar a importância da análise estrutural dinâmica na concepção do projeto.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Fazer um breve levantamento de casos com problemas estruturais devidos à ação da carga dinâmica;
- Explanar sobre os problemas e as soluções adotadas nos casos da ponte Rio-Niterói, do estádio Maracanã e do estádio Mané Garrincha;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Análise estrutural

Uma das fases que exige uma atenção especial do projetista durante a concepção do projeto estrutural de um empreendimento é a análise estrutural do modelo proposto. Martha (2010) define a análise estrutural como a etapa “em que é feita a idealização do comportamento da estrutura”, no qual o comportamento é representado através de diferentes parâmetros, tais como “campos de tensões, deformações e deslocamentos da estrutura”.

O autor ainda destaca, que a partir da análise estrutural, é possível “a determinação dos esforços internos e externos, e das tensões correspondentes, bem como a determinação dos deslocamentos e as correspondentes deformações”.

Ao se realizar a análise estrutural de um modelo, tem-se por objetivo conferir se as condições matemáticas definidas para este são atendidas, isto é, condições de equilíbrio, condições de compatibilidade, e condições impostas pelas leis constitutivas dos materiais. (MARTHA, 2010)

2.2. Tipos de análise estrutural

O tipo de análise estrutural aplicada ao modelo vai depender das ações atuantes na estrutura estudada e das condições consideradas no modelo matemático.

Quanto às ações atuantes, pode ser realizada a análise estrutural do tipo *estática* ou *dinâmica*. As ações estáticas são aquelas que se mantêm constantes ao longo do tempo, proporcionando a estrutura respostas estáticas. Já as ações dinâmicas, apresentam variações durante um intervalo de tempo (MENDES, 2012; DIÓGENES, 2010).

Mendes (2012) e Diógenes (2010) destacam que todas as ações possuem características dinâmicas, já que apresentam variações de grandeza, direção e sentido com o tempo. Porém, algumas dessas ações podem ter seu efeito dinâmico desprezado e ser considerado como estática.

As cargas permanentes (por exemplo, peso próprio) atuam em uma posição fixa e durante toda a vida útil da estrutura, portanto são analisadas como ações estáticas. Já as cargas acidentais (por exemplo, carga de ocupação do edifício, vento,

terremotos) também possuem posição de atuação fixa, porém não atuam o tempo todo, podendo ser analisadas tanto como estática (quando consideradas apenas os valores máximos e mínimos da carga) quanto dinâmica (considera-se a variação no tempo). Por fim, as cargas móveis não possuem posição nem tempo de atuação fixas (por exemplo, tráfego rodoviário) e, assim como as acidentais, podem ser analisadas estática ou dinamicamente (MARTHA, 2010).

2.3. Análise estrutural dinâmica

Mendes (2012) aponta que o estudo das estruturas de engenharia civil, seja no seu dimensionamento, seja monitorando o comportamento ao longo da vida útil, recorre somente a análises estáticas. Isso deve-se principalmente à dificuldade e até à impossibilidade computacional em resolver os algoritmos usados na análise dinâmica.

Contudo, a necessidade de soluções mais realistas e de baixo custo faz-se essencial o uso de análise dinâmica para acompanhar como evolui o comportamento da estrutura.

Primeiramente, deve-se entender os conceitos básicos e essenciais que possibilitam o entendimento do comportamento dinâmico de uma estrutura a ser estudada. A seguir, são apresentados características e formulações matemáticas que configuram o modelo numérico a ser utilizado na análise dinâmica.

2.3.1. Conceitos básicos

A seguir, é apresentado uma revisão de algumas definições e conceitos básicos apresentados por Martha (2010) e Clough e Penzien (2003), fundamentais para o entendimento teórico da análise estrutural dinâmica.

- Modelo numérico: também chamado modelo estrutural ou modelo matemático, representa a estrutura a ser estudada de forma matemática, ao incorporar as teorias e hipóteses consideradas para expressar o comportamento desta estrutura;
- Modelo de elementos finitos: modelo numérico, comumente utilizado para análise em programas computacionais de análise estrutural, em

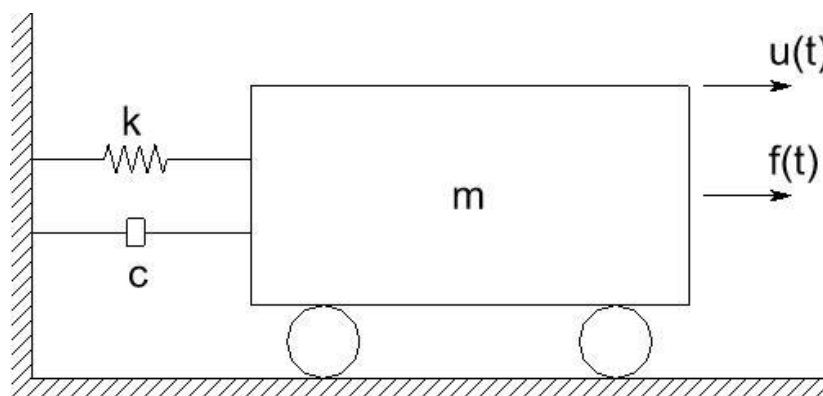
que a estrutura em dividida em elementos para facilitar o estudo do comportamento desta, especialmente em estruturas contínuas;

- Graus de liberdade: conhecido como deslocabilidades, representam os deslocamentos ou rotações livres dos nós da estrutura que ocorrem em dos eixos globais;
- Apoio: consideração feita no modelo numérico quanto à ligação da estrutura com o meio externo;
- Restrições de graus de liberdade: condições aplicadas a nós que possuem um ou mais deslocamentos (ou rotações) restringidos; essas condições são impostas pelo meio externo e ocorrem em nós com apoios;
- Amortecimento: dissipação de energia no movimento do sistema estrutural;
- Rigidez: resistência elástica ao movimento pelo sistema estrutural;
- Frequência natural: frequência de uma estrutura em vibração livre;
- Modo de vibração: forma do movimento da estrutura, isto é, representação dos deslocamentos quando a estrutura está em vibração livre;

2.3.2. Sistema com um grau de liberdade

O equilíbrio dinâmico de um sistema pode ser obtido quando se considera uma força exterior $f(t)$ oposta às forças provenientes da massa do corpo, à força elástica e à força viscosa devido ao amortecimento.

Figura 1 – Diagrama de sistema de um grau de liberdade



Fonte: Adaptado de MENDES, 2012

A equação de equilíbrio, de acordo com o diagrama de sistema de um grau de liberdade apresentado na Figura 1, resulta na seguinte equação diferencial de movimento:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = f(t) \quad (1)$$

Em que:

m : massa;

c : coeficiente de amortecimento;

k : rigidez

$u(t)$: deslocamento;

$\dot{u}(t)$: velocidade;

$\ddot{u}(t)$: aceleração;

$F(t)$: força exterior

2.3.3. Sistema com dois ou mais graus de liberdade

A grande maioria dos casos estudados na área de estruturas possui vários graus de liberdade, assim seu comportamento dinâmico é melhor representado por um sistema de múltiplos graus de liberdade. Apesar de ser de fundamental importância para entender o comportamento dinâmico, a aplicabilidade do sistema de um grau de liberdade é limitada.

I) Análise modal

O sistema de equações, que define o equilíbrio dinâmico para um sistema estrutural com N graus de liberdade, assemelha-se à equação (1), e é normalmente representada em sua forma matricial, a qual é mostrada a seguir:

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

Em que:

[M]: matriz de ordem N de massa da estrutura;

[C]: matriz de ordem N de amortecimento da estrutura;

[K]: matriz de ordem N de rigidez da estrutura;

$\{u(t)\}$: vetores de deslocamento;

$\{\dot{u}(t)\}$: vetores de velocidade;

$\{\ddot{u}(t)\}$: vetores de aceleração;

$\{f(t)\}$: vetores de força aplicada;

II) Frequência natural e modo de vibração

A análise de movimento em vibração livre e sem amortecimento é usada como referência para determinação das frequências naturais da estrutura. A vibração livre poderá ocorrer quando condições iniciais são impostas ao sistema para iniciar o movimento, porém sem forças externas sejam aplicadas. Tem-se, portanto, a seguinte equação de equilíbrio dinâmico para cálculo das frequências:

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

Admitindo-se o movimento da estrutura por vibração livre como sendo do tipo harmônico para um dos seus modos de vibração, obtém-se a equação 4 para representar o movimento:

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

Em que:

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

$$q_j(t) = [A_j \cos(\omega_{n_j} t) + B_j \sin(\omega_{n_j} t)];$$

ω_{n_j} : frequência circular de vibração;

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

Ao substituir a equação (4) na equação (3), tem-se:

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

Caso a função harmônica apresentasse resultados nulos, isto é, $q_j(t) = \{0\}$, resultaria na ausência de movimento. Assim, para permitir a análise dinâmica, o termo entre parênteses na equação anterior será nulo:

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

Se $\{\phi_j\} = \{0\}$, tem-se mais uma vez a inexistência de movimento. Portanto, para que seja possível a obtenção de respostas, deve-se calcular conforme a equação 7:

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

Portanto, as n frequências circulares e os n modos de vibração naturais serão determinados por meio da solução do problema de autovalores e autovetores definido pela equação (7), respectivamente. Logo, tem-se que para cada frequência circular é obtido um modo de vibração natural correspondente.

2.3.4. Limites de conforto

Atualmente, há diversas normas que propõem limites para as respostas dinâmicas da estrutura, de modo a garantir o conforto e segurança aos usuários.

A norma brasileira NBR 6118:2014 determina que a frequência natural da estrutural da estrutura deve superar, pelo menos, 20% do valor da frequência crítica. A frequência crítica depende do tipo de estrutura, conforme tabela a seguir.

Tabela 1 – Frequência crítica de estruturas

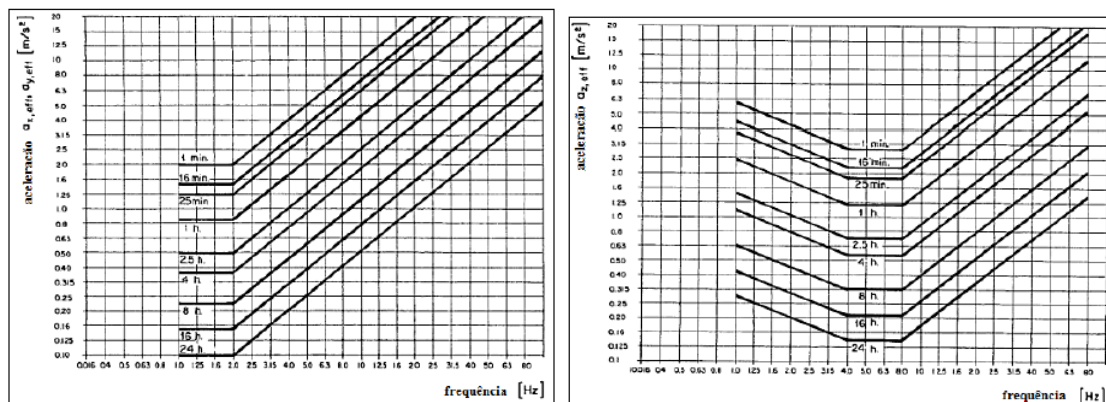
Caso	f_{crit} Hz
Ginásio de esportes e academias de ginástica	8,0
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7,0
Passarelas de pedestres ou ciclistas	4,5
Escritórios	4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,5

Fonte: NBR 6118 (2014)

Lima (2013) destaca que a norma brasileira difere da maioria das normas e pesquisadores da área ao utilizar a frequência natural, em vez de aceleração vertical, como critério de avaliação de conforto. O autor ainda observa que, devido a isso, são utilizados outros normativos, além da norma brasileira para avaliar o conforto.

A figura 2 e as tabelas 2 e 3 apresentam os limites de normas e literatura especializada, os quais são mais utilizados como referência em uma análise dinâmica.

Figura 2 – Limites de aceleração conforme ISO 2631



Fonte: Lima (2013)

Tabela 2 – Limites de aceleração conforme Bachmann *et al*

Estrutura	Níveis aceitáveis
Passarelas para pedestres	$a \leq 5\% g$
Edifícios para escritórios	$a \leq 0,5\% g$
Academias (salas de esportes)	$a \leq 5 - 10\% g$
Salas para concertos e teatros	$a \leq 1\% g$
Salas para concertos de música pop	$a \leq 5\% g$

Fonte: Lima (2013)

Tabela 3 – Limites de aceleração conforme CEB 209

Descrição da vibração	Faixa de Frequência de 1-10 Hz	Faixa de Frequência de 10-100 Hz
	Aceleração máxima (mm/s ²)	Velocidade máxima (mm/s)
Apenas Perceptível	34	0,5
Claramente Perceptível	100	1,3
Desconfortável	550	6,8
Intolerável	1800	13,8

Fonte: Lima (2013)

3. PROBLEMAS ESTRUTURAIS DEVIDOS À AÇÃO DINÂMICA

Neste tópico, serão apresentados alguns casos de edificações que tiveram problemas em algum momento de seu uso, devido à ação de cargas dinâmicas. Para cada caso, será dada uma breve descrição do empreendimento, detalhando nome, localização, data de construção e inauguração (quando disponível) e características físicas da edificação. Além disso, serão relatados os problemas aos quais a estrutura foi submetida e a solução adotada.

3.1. Casos de edificações com problemas estruturais devidos à ação dinâmica

3.1.1. Brasil

- Ponte Rio-Niterói

Figura 3 – Ponte Rio-Niterói



Fonte: Google Imagens. Disponível em: <http://revistaarea.com.br/considerado-o-pai-da-ponte-rio-niteroi-engenheiro-carlos-henrique-siqueira-ministra-palestra-em-joinville/>. Acesso em: 28 ago. 2019.

Edificação: Ponte Presidente Costa e Silva;

Localização: Rio de Janeiro/Niterói, Rio de Janeiro;

Data de construção: 23/08/1968;

Data de inauguração: 04/03/1974;

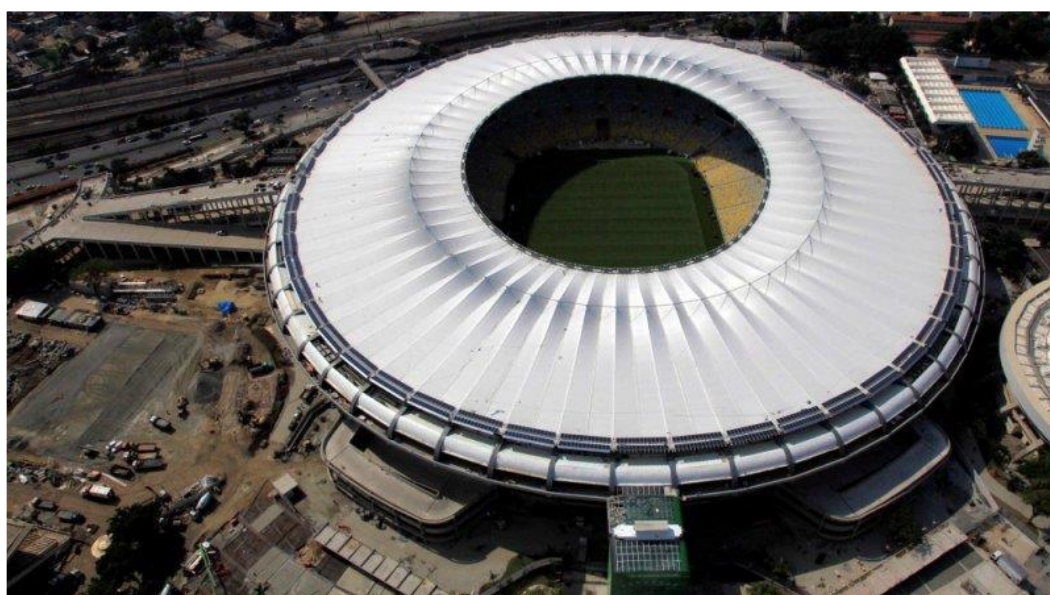
Descrição: Ponte formada por vigas pré-moldadas de concreto protendido, aduelas de concreto pré-moldado e estrutura metálica, com extensão total de 13290 metros e altura de 72 m;

Problemas relatados: Ocorrência de vibrações excessivas devido a ação do vento, causando desconforto aos usuários e preocupação quanto à segurança global da estrutura;

Solução adotada: Atenuadores dinâmicos sincronizados;

- Maracanã

Figura 4 – Estádio Maracanã



Fonte: SANTOS, 2013.

Edificação: Estádio Jornalista Mário Filho;

Localização: Rio de Janeiro, Rio de Janeiro;

Data de construção: 02/08/1948 – 1965;

Data de inauguração: 16/06/1950 (O estádio foi utilizado na Copa do Mundo de 1950; após a realização do evento, as obras continuaram);

Reformas: 1999; 04/2005 – 12/2006; 09/2010 – 06/2013;

Descrição: Estádio multiuso, com destaque para jogos de futebol, com capacidade atual de aproximadamente 79 mil espectadores, formado por um anel de estrutura metálica e pré-moldados para suporte da arquibancada,

cobertura de membranas de fibra de vidro, teflon de alta tecnologia (PTFE) e cabos de aço tensionados, e base de concreto armado do contraforte;

Problemas relatados: Vibrações devido à ação das torcidas organizadas;

Solução adotada: Amortecedores;

- *Millenium Palace*

Figura 5 – Edifício *Millenium Palace*



Fonte: Google Imagens. Disponível em: <https://www.donnadeimoveis.com.br/comprar/sc/balneario-camboriu/centro/frente-mar/4415803>. Acesso em: 28 ago. 2019.

Edificação: Millenium Palace;

Localização: Balneário Camboriú, Santa Catarina;

Data de inauguração: 09/08/2014;

Descrição: Edifício residencial de 46 andares, totalizando 177,3 metros de altura arquitetônica, com uma unidade residencial por andar;

Problemas relatados: Movimentação excessiva da água contida na piscina interna de uma das unidades residenciais, durante uma tempestade com ventos de até 90 km/h, em 23 de janeiro de 2018;

Solução adotada: A construtora divulgou que o balanço do edifício era esperado para as velocidades atingidas, e que não há riscos para a estrutura do prédio, mesmo para ventos mais fortes que o da ocorrência (conforme teste em túnel de vento solicitado pela construtora e realizado na Inglaterra) e nenhuma intervenção é necessária (PRÉDIO..., 2018);

3.1.2. Mundo

- *Millenium Bridge*

Figura 6 – *Millenium Bridge*



Fonte: Google Imagens. Disponível em: <http://www.walklondon.com/london-attractions/millennium-footbridge.htm>. Acesso em: 28 ago. 2019.

Edificação: Passarela Millennium;

Localização: Londres, Inglaterra;

Data de construção: 1998-2000;

Data de inauguração: 09/05/2000;

Reformas: 2000-2002;

Descrição: Ponte suspensa de aço;

Problemas relatados: Vibrações excessivas no dia da inauguração devido ao número de pedestres (aproximadamente 10 vezes mais que o previsto) cruzando a ponte;

Solução adotada: Controle da quantidade de pedestres como solução emergencial (TROUBLED..., 2000); implantação de amortecedores (SÉTRA, 2006);

- *Tacoma Narrows*

Figura 7 – Ponte *Tacoma Narrows*



Fonte: Google Imagens. Disponível em: <https://sites.lsa.umich.edu/ksmoore/research/tacoma-narrows-bridge/>. Acesso em: 28 ago. 2019.

Edificação: Ponte *Tacoma Narrows*;

Localização: Estreito de Tacoma, Estados Unidos

Data de construção: 23/11/1938-30/06/1940;

Data de inauguração: 01/07/1940;

Descrição: Ponte suspensa constituída por uma passarela de aço e concreto sustentada por cabos de aço e fundações e torres de concreto, com 5939 pés (1810 m) de comprimento, maior largura de vão de 2800 pés (853 m) e altura do vão central de 195 pés (59 m); (WSDOT, c2005)

Problemas relatados: Colapso da ponte em 07/11/1940 devido às oscilações do vão central, ocasionadas pela ação do vento;

Solução adotada: Após o colapso, foi realizado um estudo a partir de um modelo tridimensional da ponte. Em 1960, a estrutura foi reconstruída com a adição de treliças abertas para facilitar o fluxo do vento, com base nos estudos feitos; (HARISH, 2019)

- *Pont de Solférino*

Figura 8 – *Pont de Solférino*



Fonte: Google Imagens. Disponível em:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/63/France_Paris_Passerelle_Solferino_02.JPG.

Acesso em: 09 set. 2019.

Edificação: Passarela Léopold-Sédar-Senghor

Localização: Paris, França

Data de construção: 1997-1999

Data de inauguração: 15/12/1999

Descrição: Ponte de madeira e aço em arco, comprimento total de 140m e larguras entre 11 m e 15 m;

Problemas relatados: Vibrações verticais excessivas no dia da inauguração devido ao número de pedestres cruzando a ponte;

Solução adotada: Controle da quantidade de pedestres como solução emergencial; amortecedores (SÉTRA, 2006);

3.2. Apresentação e discussão de caso: Ponte Rio-Niterói

3.2.1. Histórico

A ponte Presidente Costa e Silva foi concebida para ligar as cidades de Rio de Janeiro e Niterói, no estado do Rio de Janeiro, sendo por isso conhecida como ponte Rio-Niterói. A construção da ponte ocorreu entre o final da década de 60 e início da década de 70 e foi considerada por muitos especialistas “um marco em nossa engenharia”, devido às características da ponte. (VELLOSO, 2013)

Figura 9 – Ponte Rio-Niterói em construção



Fonte: Google Imagens. Disponível em: <https://diariodorio.com/historia-da-construcao-da-ponte-rio-niteroi/>. Acesso em: 09 set. 2019.

A primeira vez que algum tipo de ligação entre as duas cidades fluminenses foi idealizado remete ao tempo de Brasil Império. Em 1875, Dom Pedro II pensou primeiramente na construção de um túnel sob a Baía de Guanabara, inspirado no

metrô de Londres, chegando a contratar um engenheiro inglês para a realização de um estudo de viabilidade para uma obra de tão grande porte. (CONHEÇA..., 2018)

A ideia foi esquecida por um tempo devido a impraticabilidade de uma obra com tamanha dificuldade de execução e custos elevados para as condições do Brasil no século XIX. Relatos para retomar a elaboração de um projeto surgiram na primeira metade do século XX, mas a proposta só teve andamento mesmo durante a década de 70. (VELLOSO, 2013; CONHEÇA..., 2018)

Além de evitar uma viagem de mais 120 km de estradas pela cidade fluminense de Magé ou pelo uso de balsas, a ponte Rio-Niterói pertence atualmente à rodovia BR-101, uma das maiores rodovias em extensão do país. A ponte também se destaca por ter sido a terceira maior ponte em concreto protendido na época de sua construção, sendo atualmente ainda a maior no hemisfério sul.

Para permitir a realização da obra, em 1967, o Ministério de Transportes do Brasil determinou a criação de um consórcio para o estudo de viabilidade técnica e econômica do projeto. Apesar de já ter condições tecnológicas no país para a construção da ponte, o consórcio do estudo foi formado por empresas nacionais e internacionais, assim como o consórcio responsável pela execução do projeto, para a garantia do sucesso da obra.

Após a finalização da obra, a ponte Rio-Niterói teve apenas algumas intervenções para revigoramento e manutenção e não precisou passar por nenhuma grande reforma, mantendo até hoje a sua estrutura principal intacta. Dentre as alterações realizadas na ponte, destaca-se a criação de um sistema de proteção para os pilares, reforços internos no vão central, substituição dos cabos de protensão, recuperação das juntas de dilatação e substituição do material no vão central. (VELLOSO, 2013)

Contudo, a ponte apresentava um comportamento bastante desconfortável aos seus usuários, que também colocava em dúvida o estado da segurança global da estrutura. Esse comportamento consistia de oscilações verticais excessivas causadas pelos ventos que vinham da entrada da Baía de Guanabara. (BATTISTA; PFEIL, 2005; VELLOSO, 2013;)

Figura 10 – Vão central da ponte Rio-Niterói balançando



Fonte: Adaptado do Youtube. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=S0VJ_BDXojU.

Acesso em: 10 set. 2019.

3.2.2. Descrição da estrutura

A estrutura da ponte foi pensada para ligar a Ponta do Caju, na cidade do Rio de Janeiro, à Avenida do Contorno, na cidade de Niterói, passando sobre a Baía de Guanabara, sem que interferisse no tráfego marítimo e aéreo da região. Além disso, a ponte deveria servir como um escoador do tráfego pesado dos centros urbanos das duas cidades ao interligar regiões das zonas periféricas.

O projeto considera três conjuntos formadores da estrutura da ponte:

- Superestrutura: Tabuleiro e pistas de rolamento
Vigas pré-moldadas de concreto protendido apoiadas nas travessas dos pilares formando as rampas de acesso de ambas cidades (parte terrestre). Já o vão central é formado por uma estrutura metálica, enquanto os trechos correntes são formados por aduelas (parte marítima).
- Mesoestrutura: Pilares e travessas
Pilares e travessas de concreto, com formas preparadas no local para a construção em terra e formas deslizantes na etapa sobre o mar.
- Infraestrutura: Fundações e blocos de coroamento
A parte terrestre utilizou estacas cravadas em solo resistente e capeadas por blocos de concreto; a parte marítima teve estacas metálicas para pequenas profundidades e “ilhas flutuantes” com perfuratrizes e guindastes em locais mais profundos, com blocos de coroamento em concreto.

Ao final da construção, a estrutura da ponte apresentava 13,29 km de extensão, sendo 9 km desse comprimento sobre a baía, largura de 26,2 m e ponto mais alto a 72 m de altura em relação ao nível médio do mar.

3.2.3. Aplicação da análise estrutural

Desde a inauguração da ponte Rio-Niterói, eventos de oscilações verticais no vão da ponte, ocasionadas por ventos com velocidade de valor igual ou maior a 55 km/h, causaram momentos de pânico aos usuários e preocupação a especialistas quanto à segurança global e à integridade da construção.

Após as oscilações atingirem valores de 25 cm a 60 cm de amplitude em dias de ventos entre 1997 e 2002, concluiu-se a necessidade de definir uma medida corretiva ao problema.

Uma medida usualmente adotada nesse tipo de caso é a fixação de um acessório aerodinâmico na estrutura, de modo mudar a forma da seção transversal e modificar a resultante das forças aeroelásticas atuantes. Após teste em um modelo reduzido com a implantação dessa medida, percebeu-se que o acessório pensado não apresentou diferença significativa em como o modelo respondeu.

Battista e Pfeil (2005) destacam que outros tipos de acessórios poderiam ser pensados, porém um valor considerável de massa seria adicionado à ponte. Além disso, a seção da ponte já apresentava alterações desfavoráveis, do ponto de vista aerodinâmico, devido ao tráfego de veículos altos.

Juntamente com o prejuízo aerodinâmico causado à seção, o tráfego causa excitações na estrutura equivalentes àquelas causadas pela ação do vento. Assim, é sugerido a implantação de dispositivos de controle como melhor solução para o problema.

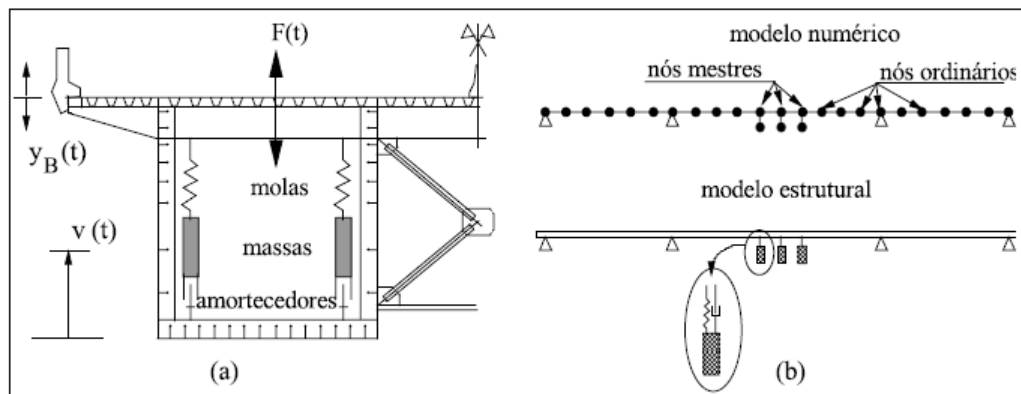
A definição do projeto dos dispositivos foi auxiliada por resultados obtidos da análise dinâmica com um modelo matemático calibrado a partir das frequências, e seus modos de oscilação associados, medidos experimentalmente.

A partir dos resultados obtidos em testes em túnel de vento com um modelo seccional, definiu-se o modelo matemático simplificado, que se assemelha a forma geral de um oscilador com um grau de liberdade.

Quanto aos dispositivos mecânicos, fez-se necessária a criação de um procedimento automático para auxiliar um sistema de “múltiplos atenuadores

dinâmicos quase-sintonizados” (MADS’s) (figuras 11 e 12). O procedimento baseia-se no conceito de subestruturas para análise dinâmica, combinada com superposição modal e técnicas de otimização, para analisar sistemas estruturais com múltiplos graus de liberdade.

Figura 11 – Atenuadores dinâmicos múltiplos quase-sintonizados e quase-sincronizados (a) vista numa seção transversal; (b) modelagem numérica da estrutura com MADS’s.



Fonte: BATTISTA; PFEIL, 2005

Figura 12 – Vista em perspectiva da viga com MADS's



Fonte: BATTISTA, PFEIL, 2005

Por conseguinte, os dados obtidos a partir do monitoramento da estrutura e os modelos matemáticos criados permitiram a concepção de um sistema de 32 atenuadores dinâmicos, instalados na ponte em setembro de 2004, que diminuem as

amplitudes das oscilações induzidas pelo vento por meio de controle passivo. O sistema de MADS's teve seu desempenho estudado através de modelo numérico na etapa inicial de projeto.

Battista e Pfeil (2005) destacam que não houve experimento que comprovasse a ação favorável dos atenuadores contra as oscilações causadas pelo vento, porém a probabilidade de sucesso é muito grande, uma vez que os modelos teóricos apontaram uma redução de 85% a 90% na amplitude das oscilações. Além disso, ao contrário das cargas devidas ao vento, a ação devido ao tráfego de veículos vem sendo medida e apresentaram redução aproximada de 75% nas oscilações verticais.

Por fim, Battista e Pfeil (2005) concluem que, apesar da robustez dos atenuadores (cada atenuador equivale a um caminhão de três eixos com carga plena), o sistema de MADS's é simples e deve atender satisfatoriamente aos requisitos de projeto para a redução de deslocamentos e tensões causados tanto pelo vento quanto pelo tráfego.

3.3. Apresentação e discussão de caso: Estádio Jornalista Mário Filho

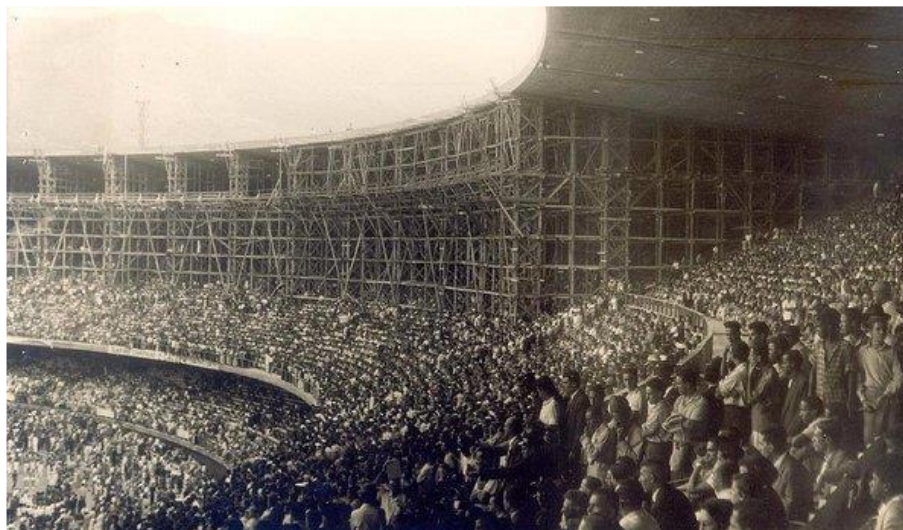
3.3.1. Histórico

O Estádio Jornalista Mário Filho, popularmente chamado de Maracanã, foi construído na cidade de Rio de Janeiro, estado do Rio de Janeiro, para utilização durante a Copa do Mundo de Futebol de 1950, sediada no Brasil. (SANTOS, 2013; O MARACANÃ, [201-?])

Apesar de sua função principal ser a realização de jogos de futebol, o estádio já recebeu diversos tipos de eventos, tais como *shows* e outros eventos esportivos, atraindo em cada um deles uma elevada quantidade de público. (O MARACANÃ, [201-?])

A construção teve início em 02 de agosto de 1948, terminando apenas em 1965. Vale lembrar que o estádio foi utilizado durante o processo de construção para a realização da Copa do Mundo de Futebol, como mostra a imagem a seguir (Figura 12).

Figura 13 – Maracanã em construção



Fonte: SANTOS, 2013.

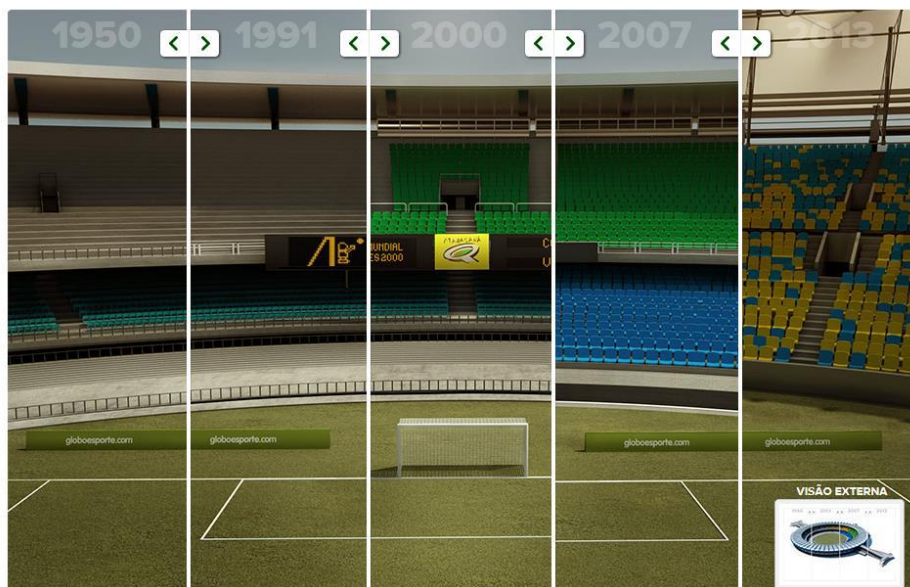
Desde sua inauguração, o Maracanã teve três grandes reformas e algumas obras de manutenção. A primeira destas ocorreu em 1999, para o Mundial de Clubes da FIFA, e pode-se destacar a recuperação de algumas estruturas e a criação de espaços de camarote e de imprensa.

A segunda reforma teve como motivo os Jogos Pan-americanos de 2007, sendo realizada entre abril de 2005 e dezembro de 2006, sendo aberto ao público desde o início de 2006, mas oficialmente reinaugurado em 2007. Essa reforma teve a criação de rampas de entrada, ampliação de acesso às arquibancadas superiores e rebaixamento do nível do gramado.

A mais recente reforma foi realizada para atender às exigências da FIFA, uma vez que o Brasil foi escolhido para sediar a Copa do Mundo de Futebol de 2014. As obras começaram em setembro de 2010 e se estenderam até junho de 2013. As principais alterações ocorridas foram a construção de uma nova cobertura, melhoramento do sistema de rampas de acesso, restauração na sustentação do estádio e a criação de uma nova arquibancada.

A seguir é apresentado uma representação das principais alterações na parte interna do estádio, destacando-se as mudanças na arquibancada, a nova cobertura e o rebaixamento do gramado (figura 14).

Figura 14 – Evolução da estrutura do Maracanã



Fonte: SANTOS, 2013.

Assim como a maioria dos estádios mais antigos do Brasil, o Maracanã foi projetado antes do surgimento das “torcidas organizadas”. Portanto, o comportamento dinâmico das torcidas não foi levado em conta no projeto, conforme explicado por Rodrigues (2003a, 2003b).

Rodrigues destaca que este comportamento é o causador da movimentação indesejada das arquibancadas não só do estádio Mário Filho, mas como de outros três estádios estudados durante a pesquisa de sua tese de doutorado.

3.3.2. Descrição da estrutura

A estrutura atual do Estádio Jornalista Mário Filho foi construída na reforma de 2010-2013, em que as principais alterações foram feitas em sua cobertura e arquibancadas, conforme citado anteriormente. Um destaque nessas alterações foi a idealização de um sistema de amortecimento na reforma da arquibancada, para combater os possíveis danos causados pela ação das torcidas organizadas, a ser explicado em breve.

Devido ao péssimo estado de conservação, optou-se pela substituição da cobertura de concreto armado original por uma estrutura constituída por membranas de fibra de vidro, teflon de alta tecnologia e cabos de aço tensionados.

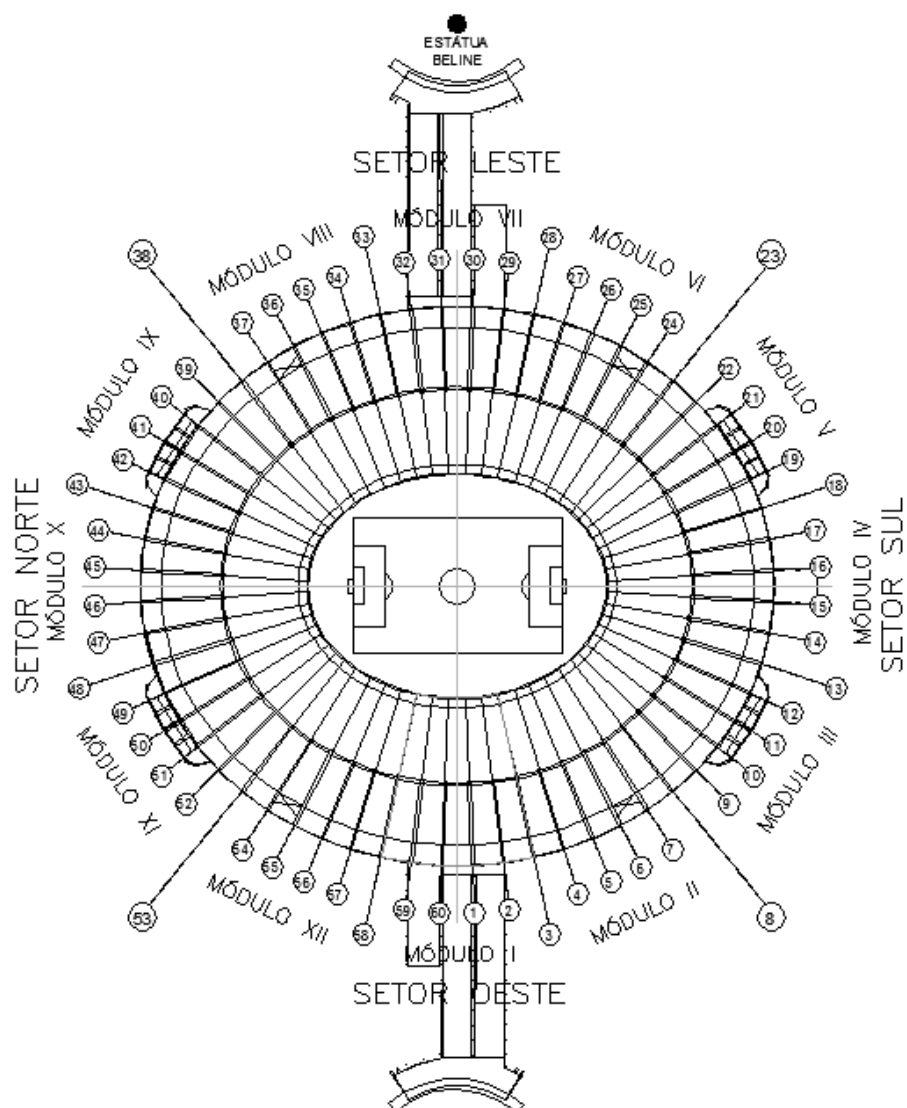
A arquibancada original era formada por dois anéis de concreto armado, no qual 80% foi demolido para construção de um único anel em estrutura metálica e pré-moldados. A estrutura metálica que forma o anel é fixada a uma base de concreto armado que constitui o contraforte, o qual serve também como o sistema de amortecimento do estádio.

A superestrutura do anel no projeto de reforma foi dividida em quatro setores, sendo os setores Norte e Sul e os setores Leste e Oeste similares entre si. Os setores Norte e Sul possuem 4 pavimentos (térreo, 1º pavimento, 2º pavimento e 5º pavimento) e arquibancada. Já os setores Leste e Oeste são formados por 5 e 6 pavimentos, respectivamente (térreo, 1º ao 3º pavimento, 5º pavimento em ambos, e 4º pavimento só no setor Oeste) e arquibancada.

Seguindo a concepção original do estádio, o novo anel é constituído por 60 quadros transversais, que formam os eixos radiais do projeto e são numerados de 1 a 60. Esses pórticos são contraventados por vigas circunferenciais, pelas lajes de alguns pavimentos e pelos degraus da arquibancada.

Os setores são divididos em três módulos cada, separados entre si por juntas de dilatação, localizados nos eixos radiais de final 3 e 8. As figuras 15 e 16 mostram essas configurações.

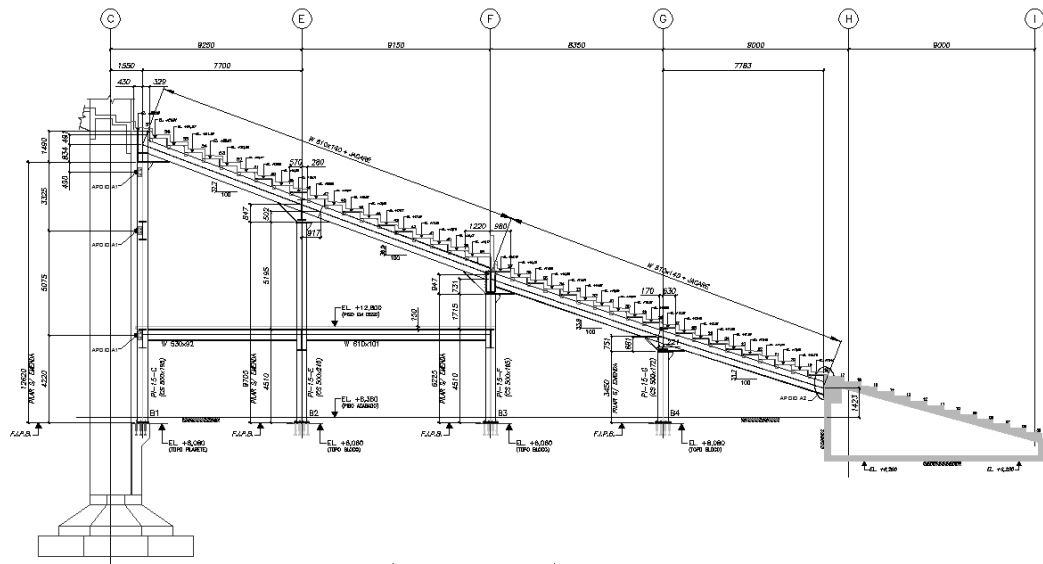
Figura 15 – Planta baixa do Maracanã com representação dos módulos



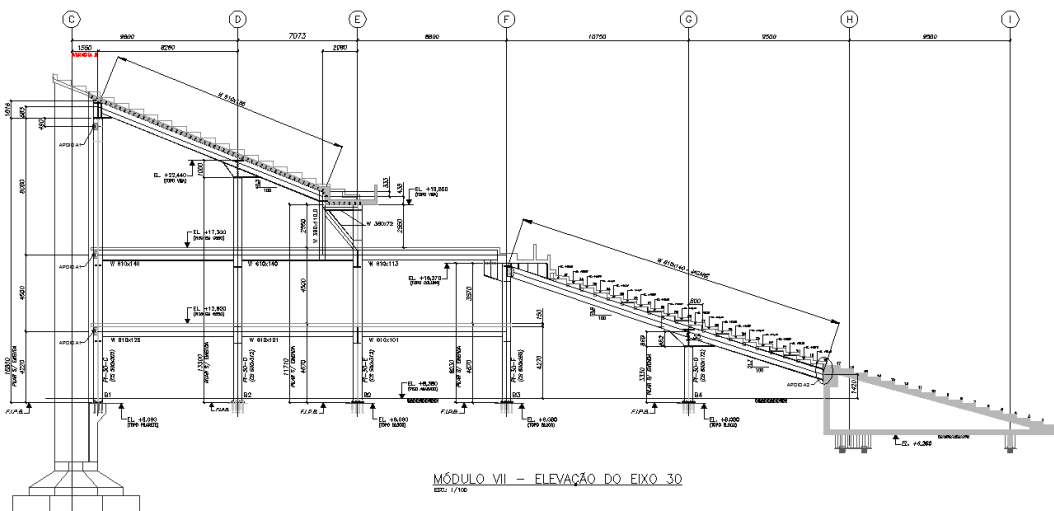
Fonte: SANTOS, 2013.

Figura 16 – Elevações dos eixos de diferentes setores

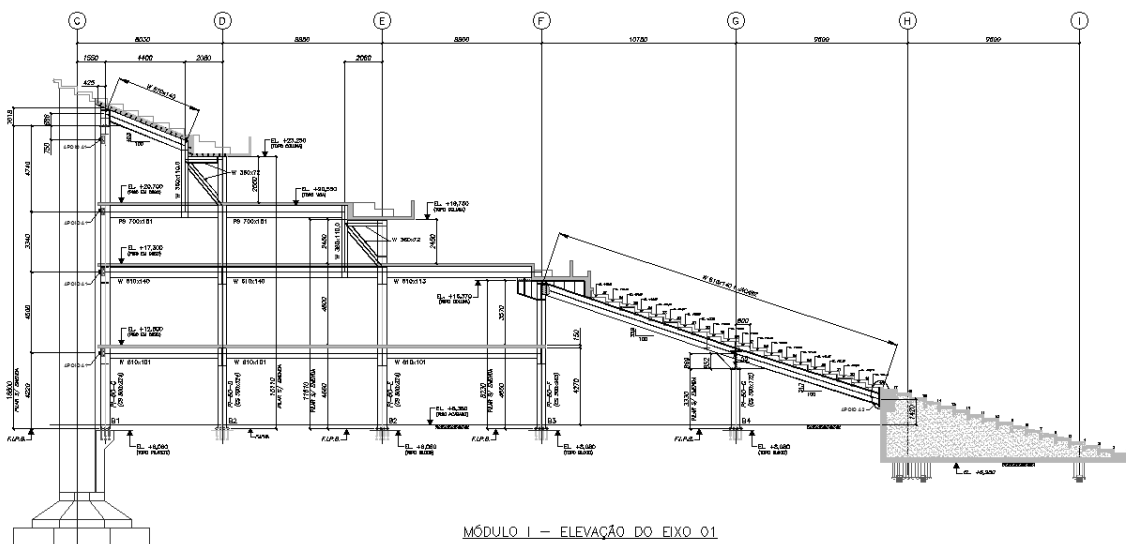
De cima para baixo: a) Setores Norte e Sul; b) Setor Leste; c) Setor Oeste



MÓDULO IV - ELEVÇÃO DO EIXO 15



MÓDULO VII - ELEVÇÃO DO EIXO 30



MÓDULO I - ELEVÇÃO DO EIXO 01

Fonte: SANTOS, 2013.

Na parte final da arquibancada, representado pelas duas últimas linhas à direita nas figuras 16a a 16c, foram construídos os contrafortes. Como já dito, o contraforte foi projetado para servir como “sistema inibidor de movimento”, ou seja, “solução para as solicitações dinâmicas” (SANTOS, 2013). A estrutura foi construída em concreto armado preenchida com os resíduos da demolição do próprio estádio, além do solo escavado na etapa de fundações (figura 17). O contraforte será usado como um mecanismo compensador da carga vertical gerada pelo público do estádio em sua lotação máxima.

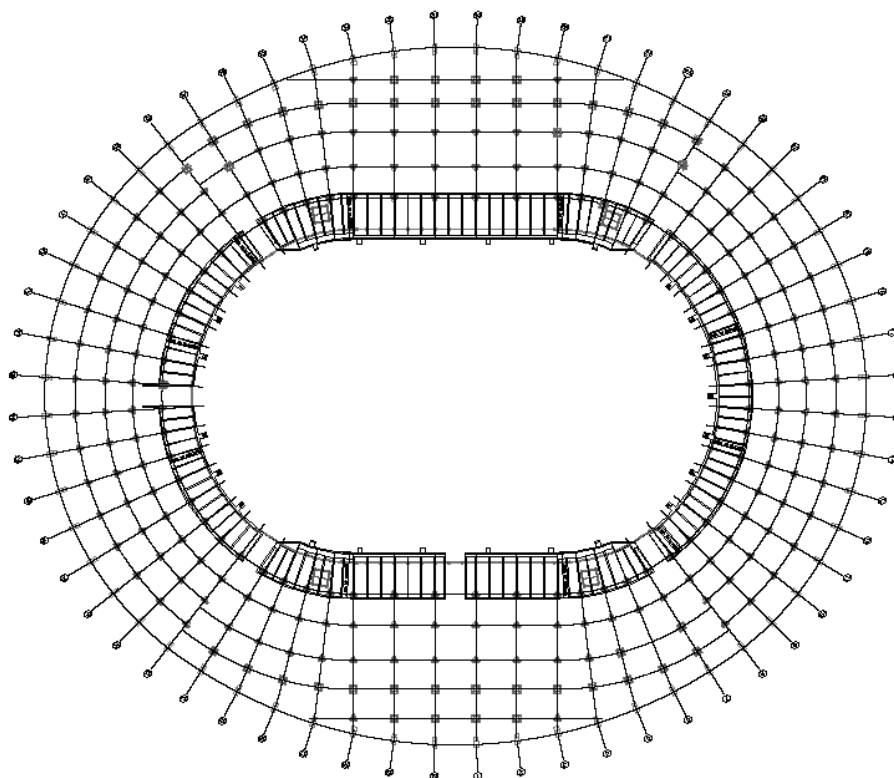
Figura 17 – Construção do contraforte



Fonte: SANTOS, 2013.

Os blocos de fundações para a sustentação dos novos pilares são formados por estacas tipo raiz, com diâmetros de 31 cm e 41 cm e comprimentos de 12 m e 15 m, agrupadas em grupos de 1, 3 ou 4 estacas por bloco. A planta geral dos blocos e dos contrafortes é apresentada a seguir (figura 18).

Figura 18 – Planta de localização dos blocos de fundação e dos contrafortes



Fonte: SANTOS, 2013.

3.3.3. Aplicação da análise estrutural

Rodrigues e Almeida (2003) e Santos (2013) realizaram análise do tipo dinâmica para a estrutura do estádio antes e depois da reforma para a Copa do Mundo de 2014, respectivamente. A seguir, será apresentado um resumo dos resultados obtidos.

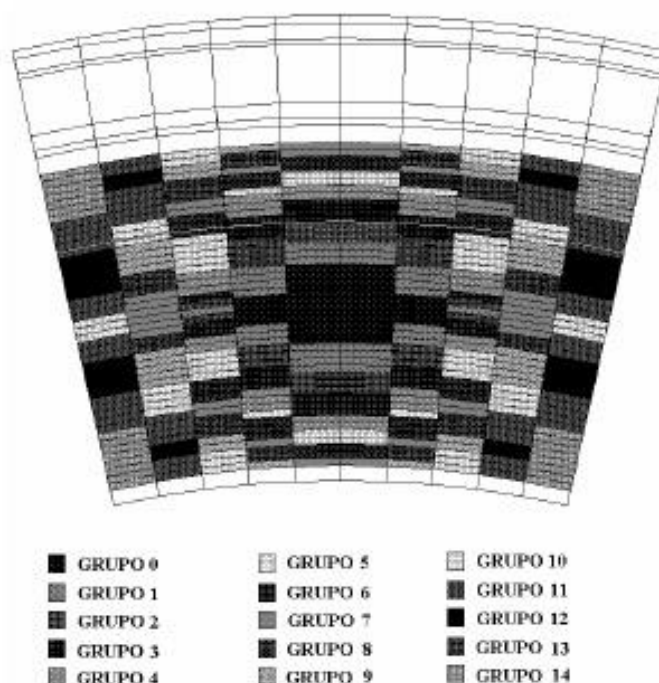
I) Análise estrutural dinâmica antes da reforma

Rodrigues e Almeida (2003) apresentam a metodologia utilizada por um dos autores na investigação do comportamento de quatro estádios de futebol brasileiros, entre estes o Maracanã. O estudo analisou as frequências naturais dos estádios durante a atuação das torcidas, obtidas experimentalmente durante as partidas e através do modelo numérico.

A partir desses resultados, pode-se definir os parâmetros para a determinação do modelo para a simulação das torcidas nas arquibancadas. Primeiramente,

estabeleceu-se a divisão da arquibancada por grupos de torcidas (figura 19), conforme o comportamento de cada uma delas. Por exemplo, o “centro da torcida” representa o grupo principal de torcedores, em que os movimentos são mais sincronizados.

Figura 19 – Distribuição dos grupos de torcidas para modelo numérico



Fonte: RODRIGUES, ANDRADE, 2003.

Os parâmetros utilizados nas funções senoidais definidas para o modelo numérico foram recalculados para um comportamento linear entre dois grupos consecutivos e assim, definir uma única função para todos os n grupos.

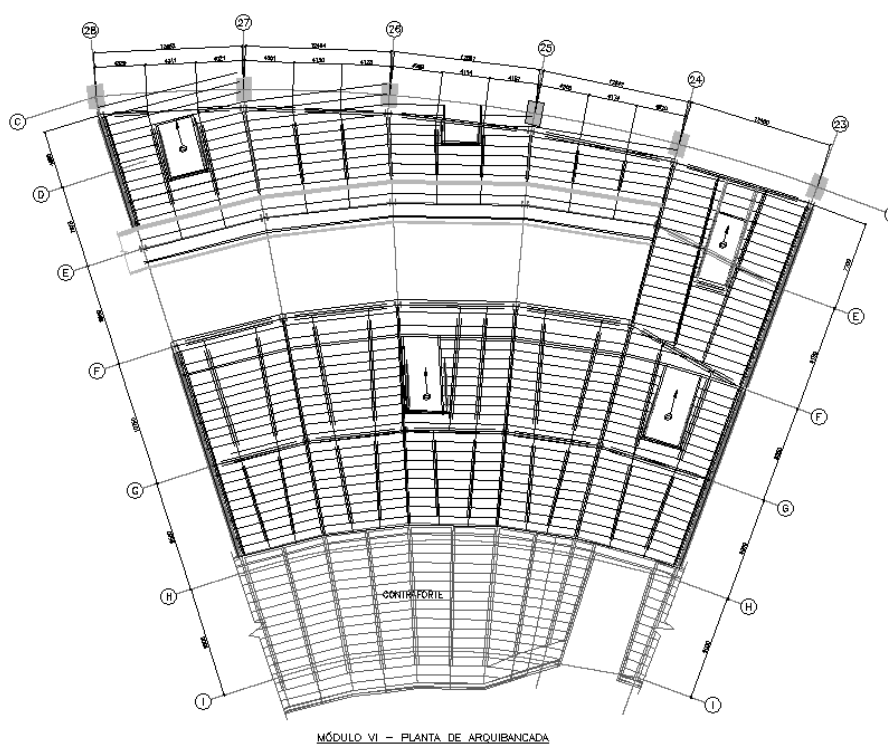
Os resultados obtidos da aplicação da análise estrutural não foram relatados por completo no artigo. Além disso, a tese feita por um dos autores, para qual foi feita a investigação, não foi disponibilizada em meios acessíveis a autora. Assim, não foi possível conferir se todos os pontos satisfizeram os limites de vibração para o conforto humano.

Contudo, conforme dito no item 3.3.1., Rodrigues (2003a, 2003b) afirma, em entrevistas, que os limites não foram atendidos.

II) Análise estrutural dinâmica depois da reforma

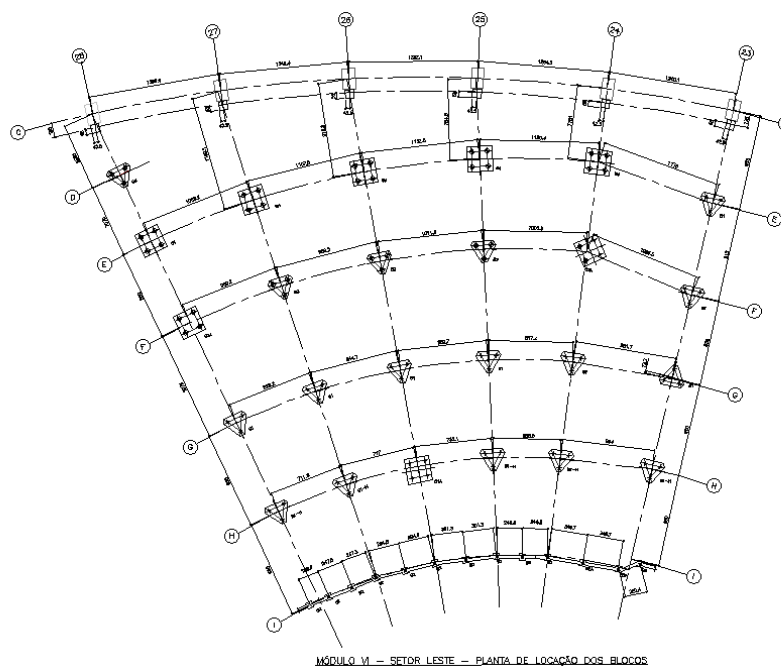
Santos (2013) realizou a análise estrutural de um dos módulos do Maracanã, escolhido aleatoriamente, considerando o projeto estrutural elaborado para a reforma, isto é, com o contraforte servindo como amortecedor. Nas figuras 20 e 21, são apresentados a planta baixa e a planta de locação dos blocos de fundação do módulo escolhido.

Figura 20 – Planta baixa de um módulo do Maracanã



Fonte: SANTOS, 2013.

Figura 21 – Planta de locação dos blocos de fundações de um módulo do Maracanã



Fonte: SANTOS, 2013.

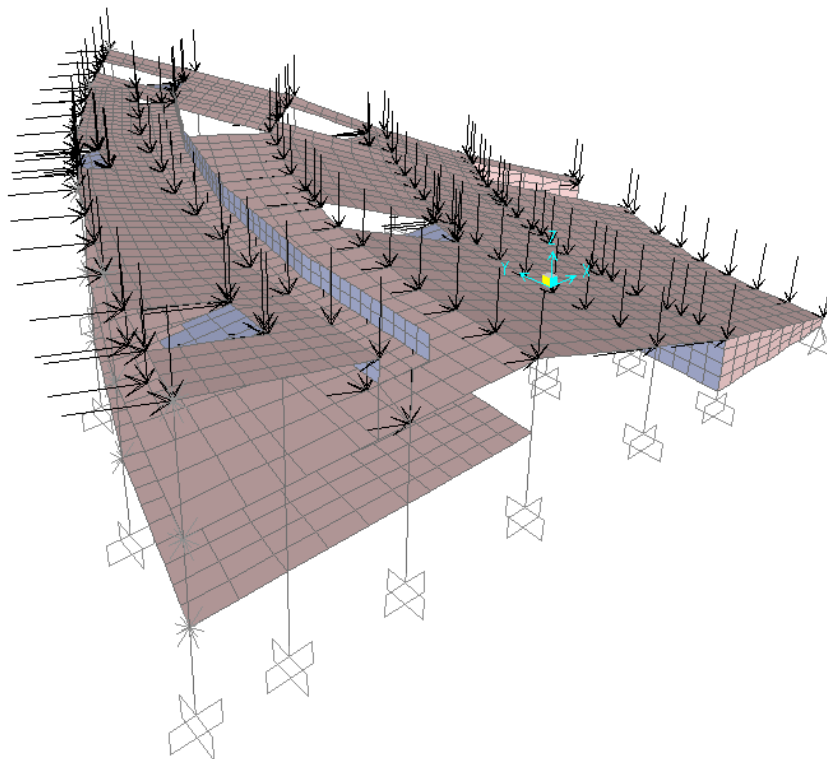
O modelo de elementos finitos foi elaborado utilizando o programa SAP2000. As vigas e os pilares foram modelados com elementos tipo *FRAME* (elemento do programa comumente utilizado para representação de vigas e pilares), e as paredes e as lajes com tipo *SHELL* (elemento do programa comumente utilizado para representação de paredes e lajes). Os nós do modelo em que se encontram os blocos de fundação foram considerados como apoios com restrições dos graus de liberdade. Os blocos que recebem carga de apenas 1 estaca foram definidos como rígido para todos deslocamentos e livre para todas as rotações; já os blocos com 3 ou 4 estacas são rígidos não só para todos os deslocamentos, mas também para todas as rotações.

O modelo final desenvolvido possui um total de 2893 nós, 1117 elementos de barra, 2775 elementos de placa, 43 restrições de nós de apoio e 17100 graus de liberdade. A massa da arquibancada e a da torcida foram consideradas conjuntamente na massa atuante.

A carga dinâmica considerada simula o movimento de pulo dos espectadores sobre a arquibancada. Adotou-se uma componente vertical e uma componente horizontal na composição do carregamento. A componente vertical atua com uma carga de 1 kN/m^2 , representando uma pessoa de 100 quilos em uma área de 1 m^2 , e a horizontal com uma carga de $0,1 \text{ kN/m}^2$ (10% da componente vertical).

Apenas alguns nós tiveram o carregamento considerado na análise, como mostrado na figura 22. Levou-se em conta a área de influência de cada nó na avaliação de carga nos nós.

Figura 22 – Distribuição de carga nos nós do modelo



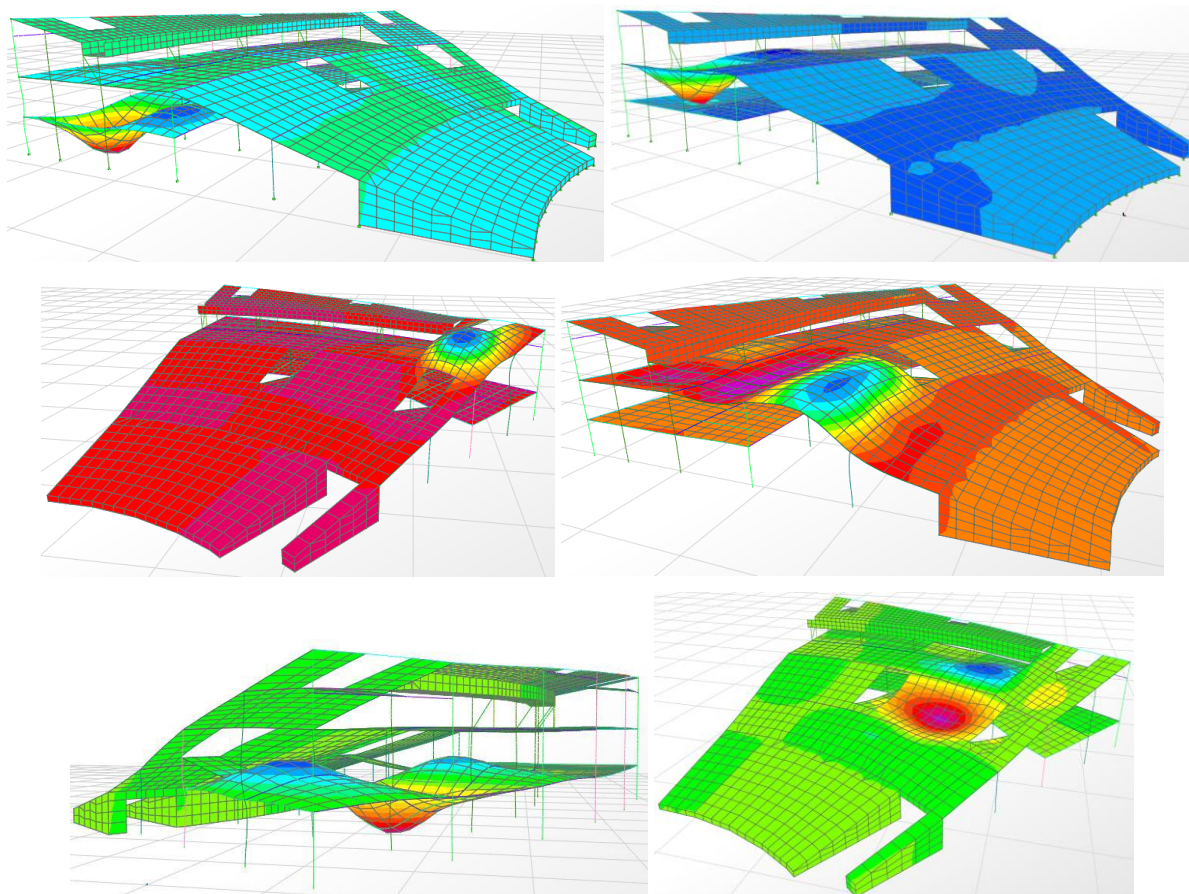
Fonte: SANTOS, 2013.

Aplicando-se uma carga do tipo “*Time History*”, em que o carregamento nodal é vinculado a uma função harmônica, para que se possa simular a ação dos espectadores pulando. Baseado em literaturas especializadas, foram adotadas frequências com valor de 3,5 Hz e período com valor de 0,2857 s, representando uma ação do tipo “*jumping*”, e amortecimento constante de 0,02 para a função harmônica senoidal considerada no modelo.

A análise modal do *software* SAP2000 obteve resultados de frequências naturais no intervalo de 6,67 Hz a 8,98 Hz para os 15 primeiros modos de vibração. Santos (2013) destacou que esses modos de vibração ocorrem no plano vertical, já que a estrutura apresenta rigidez no plano horizontal, conforme mostrado na figura 23 a seguir:

Figura 23 – Modos de vibração obtidos pela análise modal

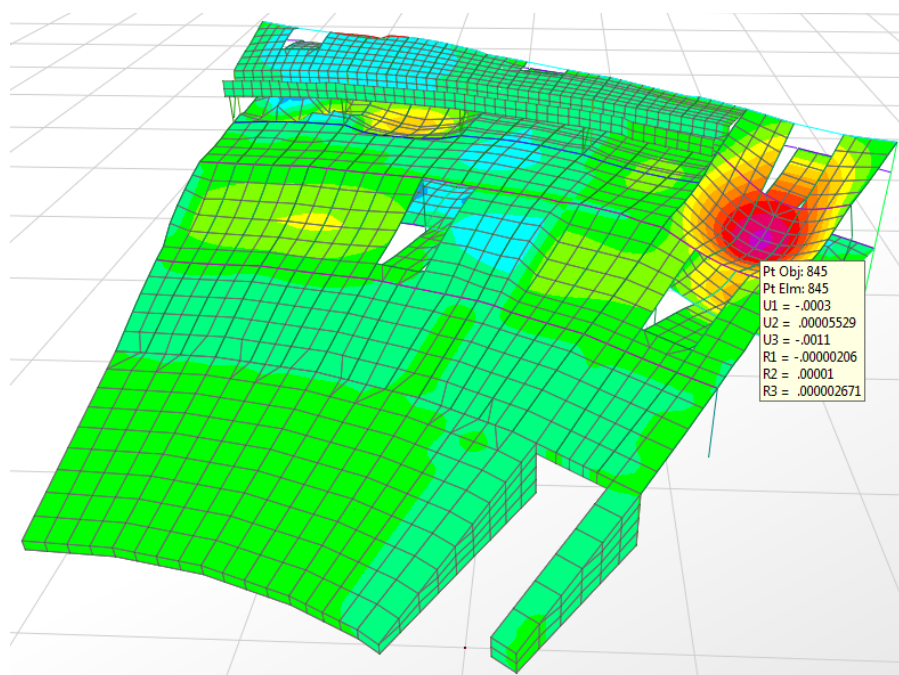
Da esquerda para direita, de cima para baixo: a) Modo 1; b) Modo 2; c) Modo 3; d) Modo 4;
e) Modo 5; 6) Modo 6



Fonte: SANTOS, 2013.

A avaliação de conformidade para os limites de conforto humano submetidos à vibração foi realizada para o nó que apresentasse o maior deslocamento vertical quando aplicado o carregamento simulando a torcida. Esse critério foi adotado devido aos principais modos de vibração terem sido verticais. O ponto encontra-se na parte superior da arquibancada, como mostrado na figura 24.

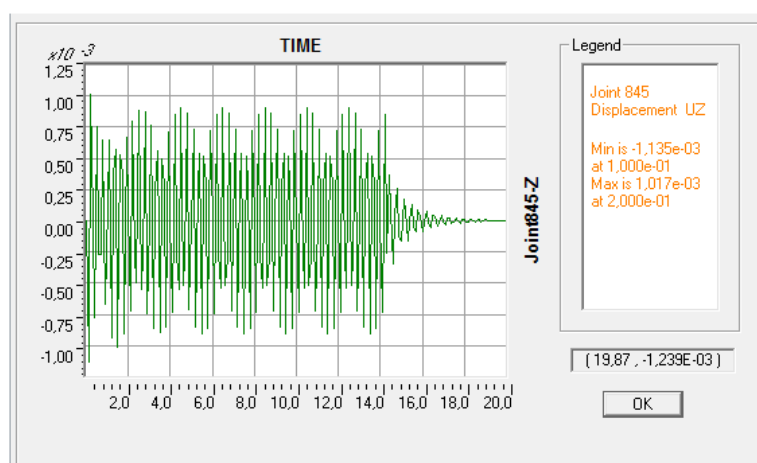
Figura 24 – Envoltória da deformada do carregamento no eixo z



Fonte: SANTOS, 2013

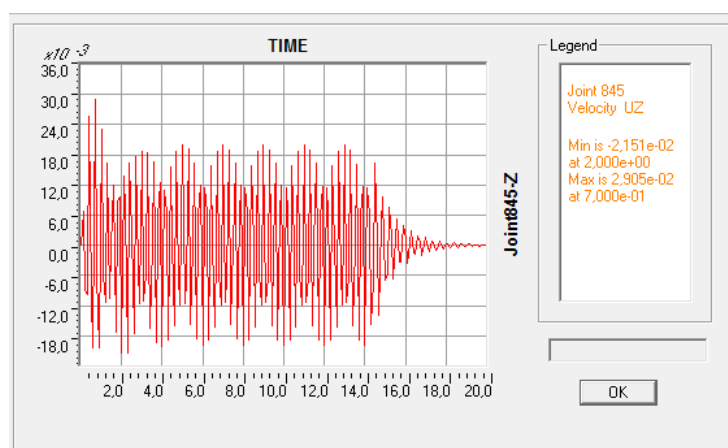
Os gráficos da variação do deslocamento, da velocidade e da aceleração são apresentados a seguir (figuras 25 a 27):

Figura 25 – Deslocamento vertical (m) x tempo (s)

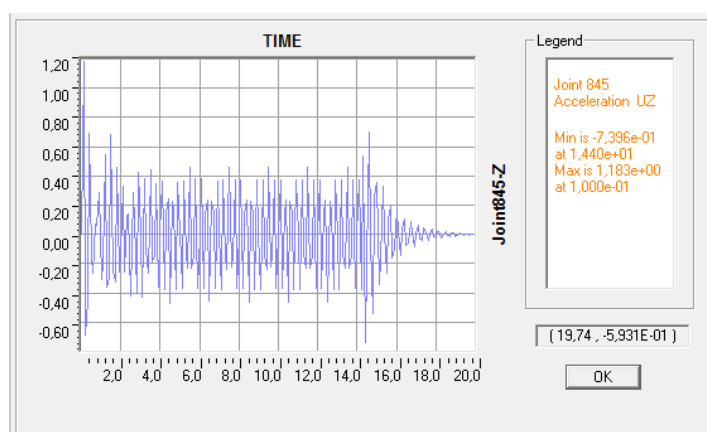


Fonte: SANTOS, 2013

Figura 26 – Velocidade vertical (m/s) x Tempo (s)



Fonte: SANTOS, 2013

Figura 27 – Aceleração vertical (m/s²) x Tempo (s)

Fonte: SANTOS, 2013

O deslocamento absoluto máximo obtido é igual a $1,135 \times 10^{-3}$ m. Para obter o valor de aceleração vertical que será comparado aos limites propostos pela literatura, foi calculado o deslocamento efetivo. Para o deslocamento efetivo calculado de valor igual a $0,75 \times 10^{-3}$ m, obteve-se velocidade vertical igual a $16,5 \times 10^{-3}$ m/s e aceleração vertical $0,363$ m/s², ambos dentro da faixa apresentada nos gráficos (figuras 27 e 28).

Santos (2013) pôde concluir a partir dos resultados aqui apresentados:

- O primeiro modo de vibração possui frequência confortável para o limite definido na NBR 6118;
- A aceleração vertical está abaixo do limite máximo recomendado, porém é classificado entre “claramente perceptível” e “perturbador/desagradável”
- No nó estudado, poderá haver algum desconforto para o usuário.
- Para evitar desconfortos, sugeriu-se o enrijecimento em torno do nó.

3.4. Apresentação e discussão de caso: Estádio Nacional de Brasília

3.4.1. Histórico

O Estádio Nacional de Brasília foi inaugurado em 10 de março de 1974, na cidade de Brasília, no Distrito Federal do Brasil. Assim como o Maracanã, sua inauguração ocorreu antes da finalização das obras. (O ESTÁDIO, c2019)

Figura 28 – Estádio Mané Garrincha



Fonte: Google Imagens. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/623873/estadio-nacional-de-brasilia-mane-garrincha-castro-mello-arquitetos>. Acesso em 05 out. 2019.

Outra semelhança em relação ao estádio do Rio de Janeiro, é a utilização do estádio para outros eventos esportivos, além de shows, apesar de que seu principal uso seja para sediar jogos de futebol. (LIMA, 2013; O ESTÁDIO, c2019)

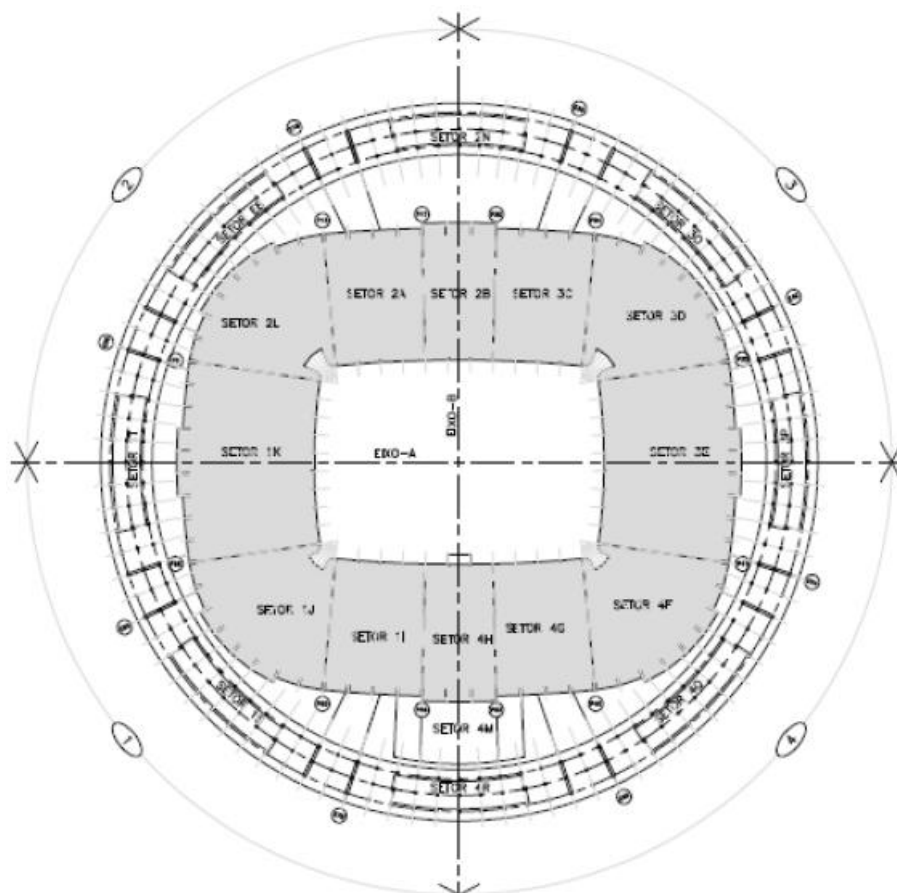
Entre os anos de 1980 e 1990, uma reforma ocorre no estádio, tornando o estádio um centro de serviços diversos para a comunidade de Brasília, porém mantendo sua função original. Em julho de 2010, o estádio é demolido para a construção de um novo estádio a ser realizado na Copa do Mundo de Futebol de 2014, conforme os padrões exigidos pela FIFA (LIMA, 2013; O ESTÁDIO, c2019)

3.4.2. Descrição da estrutura

O novo estádio Mané Garrincha, inaugurado em 2013, teve algumas diferenças em sua concepção em relação a maioria dos estádios construídos no país até os anos 1970. Em vez de construídas em forma elíptica ou circular, as arquibancadas estão dispostas de maneira praticamente retangular ao redor do campo. Outra diferença foi o aumento da inclinação das arquibancadas. Esses dois fatores foram pensados para facilitar a visualização do campo pelos torcedores.

O projeto da estrutura do estádio definiu a divisão de arquibancadas em setores, utilizando juntas de dilatação entre os setores para torná-los independentes entre si. No total, foram projetados doze setores, sendo três em cada lateral do campo, um em por trás de cada área do gol e um em cada canto do estádio, como mostrado na figura 29.

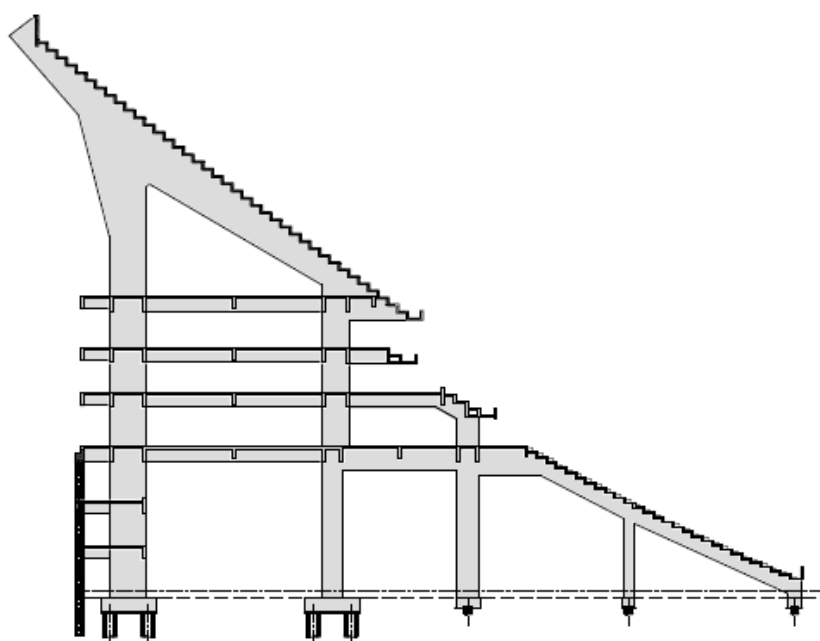
Figura 29 – Planta baixa do Mané Garrincha com representação dos setores



Fonte: LIMA, 2013.

A seção transversal da arquibancada, apresentada na figura 30, é formada por um pórtico com vigas inclinadas interligando quatro pilares. Os degraus se apoiam sobre as vigas. Por debaixo da arquibancada, os pisos internos da estrutura são formados por lajes maciças, apoiados em vigas transversais. Os pórticos são dispostos paralelamente ao longo dos setores, com exceção dos setores curvos em que estão dispostos radialmente, uma vez que os setores são curvos. A quantidade de pórticos varia conforme o tamanho do setor.

Figura 30 – Seção transversal da arquibancada



Fonte: LIMA, 2013.

O estádio ainda apresenta uma estrutura circundando a arquibancada para a sustentação da cobertura. A estrutura trata-se de três círculos concêntricos de pilares de concreto, apoiando uma coroa de concreto de armado (na parte externa à arquibancada) e uma estrutura metálica coberta por uma membrana especial (na parte interna, cobrindo a arquibancada e parte do campo).

3.4.3. Aplicação da análise estrutural

Lima (2013) realizou um estudo com análise estrutural dinâmica logo antes da finalização da reconstrução do estádio para a Copa do Mundo de Futebol de 2014.

Alguns anos mais tarde, Rabelo (2016) realizou outro estudo considerando o uso de dispositivos de controle.

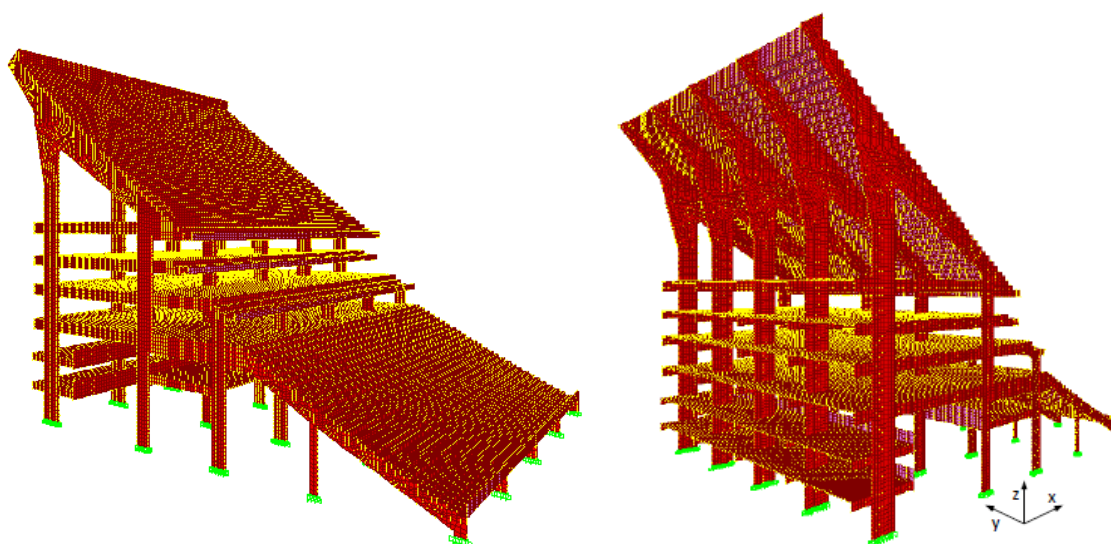
Os resultados de ambos estudos serão apresentados a seguir.

I) Análise estrutural realizada antes da finalização da reconstrução

Lima (2013) realizou seu estudo tendo como base apenas um dos setores do estádio. O setor selecionado é um dos que se encontram na lateral do campo, o qual apresenta valor de largura intermediária entre todos os setores existentes, podendo assim representar o comportamento médio dos setores.

O modelo numérico foi concebido pelo programa SAP2000. Os elementos de laje, degrau, parede e os pórticos foram modelados com elementos tipo *SHELL*, já as vigas internas com elemento tipo *FRAME*. Os apoios dos pilares foram considerados como engastes, ou seja, são restringidos nas 3 direções contra translações e rotações. O modelo final para estudo apresenta 91505 elementos *SHELL*, 3100 elementos *FRAME* e 92819 nós e é apresentado na figura 31.

Figura 31 – Vistas do modelo numérico do estádio Mané Garrincha



Fonte: LIMA, 2013.

Lima (2013) destaca que a grande quantidade de nós do modelo, portanto grande número de graus de liberdade, ocasiona muitos modos de vibração a serem encontrados. Assim, para diminuir o tempo dispensado no processamento do modelo

pelo programa, foram calculados apenas os 12 primeiros modos de vibração, uma vez que são os apresentam frequências naturais que mais se aproximam a frequência desenvolvida pela atividade da torcida.

Os modos de vibração calculados apresentaram frequências no intervalo de 1,02 Hz a 6,67 Hz. O autor observa que os cinco primeiros modos representam a movimentação da estrutura de maneira global; do sexto modo em diante, destaca-se a deformação devido à flexão da arquibancada superior juntamente com as deformações de maneira global da estrutura.

O carregamento modelado baseou-se no modelo de Bachmann *et al* (1987 *apud* Lima, 2013), uma vez que foi o mais utilizado em outros estudos usados como referência pelo autor. Os parâmetros utilizados também foram baseados nos valores adotados por essas referências e as sugeridas por normas. Contudo, deve-se destacar que, para a definição do parâmetro de frequência, o autor também pesquisou as frequências dos principais cantos de torcidas de países latinos. Com isso, Lima esperava obter parâmetros mais realistas para representar a frequência da atividade humana.

Quanto a carga dinâmica, foram considerados três valores para representar a heterogeneidade das arquibancadas. A arquibancada inferior teve carga de 1,6 kN/m², calculada a partir da capacidade máxima definida pela FIFA e a área da arquibancada; carga de 1 kN/m² na intermediária, que apresenta menor ocupação; e a superior com carga de 1,8 kN/m², considerando a maior ocupação.

Os pontos de leitura das respostas dinâmicas foram escolhidos conforme a análise das deformadas modais, escolhendo-se os nós com maiores deslocamentos em uma das três direções.

Por fim, foram considerados algumas condições de como a arquibancada seriam ocupadas. Para cada uma das situações, foram definidos alguns valores de frequência, nos quais seriam testados o modelo. Para cada frequência testada, alguns outros parâmetros foram modificados, conforme a indicação de algumas referências.

Por exemplo, a primeira situação, em que todas as arquibancadas estão ocupadas, foram definidos cinco modelos para cinco valores pré-determinados de frequência; para cada um desses modelos, teve dois submodelos, em que foram modificados outros parâmetros.

Para cada modelo, foram obtidos os valores de aceleração nas três direções para serem comparados aos limites propostos por norma e literatura. Lima (2013)

lembra que, devido ao carregamento aplicado ser essencialmente na vertical, é mais comum fazer as comparações com as acelerações verticais; inclusive a maioria das normas apresentam valores de referência apenas no eixo vertical. Contudo, o autor também verificou as acelerações horizontais, com algumas normas que também as consideram.

Os resultados encontrados por Lima (2013) mostram que alguns modelos não satisfizeram os limites de conforto na direção vertical. Já para as direções horizontais (radial e tangencial) apenas um modelo estava fora dos limites na direção radial.

O autor apresentou as seguintes conclusões a partir dos resultados do estudo:

- Apesar da NBR 6118 não ter valor de frequência crítica para arquibancada, os valores de frequência naturais calculados não atendem nenhum dos valores indicados pela norma;
- As frequências naturais do estádio para os primeiros modos de vibração são muito baixas e bem equivalentes às frequências das atividades humanas consideradas;
- Houveram casos com acelerações acima dos limites propostos pelas referências consultadas;
- A subjetividade na definição dos limites de conforto pelas diferentes normas não dá confiabilidade se as respostas do modelo realmente refletem o comportamento humano mediante ao movimento da estrutura.
- O estádio como um todo pode ter seu comportamento dinâmico considerado como aceitável.

II) Análise estrutural realizada após a finalização da reconstrução

Rabelo (2016) realizou seu estudo baseado na análise realizada por Lima (2013), apresentada no tópico anterior. O autor destaca que utilizou o mesmo modelo numérico, isto é, a mesma geometria e os mesmos parâmetros físicos, alterando apenas os modelos de carregamento, além da consideração de amortecedores de massa sintonizados (AMS), semelhantes aos usados na ponte Rio-Niterói.

Quanto ao cálculo dos modos de vibração, o autor destaca que se considerou os 20 primeiros modos de vibração na análise, uma vez que o vigésimo modo de vibração apresentou frequência próxima ao do carregamento.

Assim como observado no trabalho de Lima (2013), a movimentação da estrutura dá-se de maneira global nos cinco primeiros modos de vibração; já nos outros modos, percebe-se torção e flexão nas arquibancadas superior e inferior, além de deslocamento na parte superior dos pilares laterais. Os modos de vibração calculados apresentaram frequências no intervalo de 1,02 Hz a 7,61 Hz.

Rabelo (2016) observa que, apesar da maioria dos estudos sobre análise estrutural dinâmica basear-se nas considerações formuladas por Bachmann *et al* (1987, *apud* Rabelo, 2016), o modelo de carregamento para este estudo tomou como referência o proposto por Faísca (2003, *apud* Rabelo, 2016). Os parâmetros foram determinados de forma similar às utilizadas por Lima (2013), além de manter os mesmos valores da carga dinâmica propostos por este. Quanto ao modo de ocupação das arquibancadas, foram analisadas cinco situações diferentes. A escolha de pontos laterais usou o mesmo critério de Lima (2013), isto é, os nós com os maiores deslocamentos.

As acelerações, obtidas para os modelos das cinco situações consideradas, foram então comparadas com os limites normativos e da literatura. Todos os modelos tiveram pelo menos um ponto cuja aceleração de pico na direção vertical não oferecesse conforto ao usuário, conforme às normas. Os valores para as outras direções foram considerados aceitáveis.

A partir desses resultados, foram definidas 16 propostas de uso de amortecedores de massa sintonizados. As propostas diferem entre si pela quantidade de amortecedores, pela razão entre massas e pelas frequências às quais os dispositivos foram sincronizados. O modelo foi considerado para apenas uma situação de carregamento (arquibancada totalmente ocupada).

Pode-se notar que algumas propostas não tiveram influência significativa na redução da aceleração, contudo a maioria teve reduções consideráveis. No geral, as reduções contribuíram para a estrutura ser considerada aceitável quanto ao conforto.

A proposta com melhor resultado sugere a implantação de dois AMS idênticos localizados em lados opostos da seção, sintonizados à sexta frequência natural e com razão de massa $\mu = 0,00025$. Essa proposta foi analisada para os outros modelos de

carregamento (para todas as frequências consideradas em cada modelo). Algumas acelerações ainda tiveram seus valores acima do limite proposto por algumas normas.

As conclusões apresentadas por Rabelo (2016) para os resultados obtidos foram:

- Assim como observado por Lima (2013), os valores de frequência naturais calculados não atendem nenhum dos valores indicados pela norma brasileira;
- As soluções para que a estrutura atenda à NBR 6118 são onerosas e prejudicariam a estética; o autor sugere que a norma seja revisada, de modo a adotar critérios de análise dinâmica;
- Houveram casos com acelerações acima dos limites propostos pelas referências consultadas;
- O estádio como um todo pode ter seu comportamento dinâmico considerado como aceitável, porém é interessante a adoção de alterações em alguns pontos da arquibancada para garantir conforto para todos os usuários.
- A utilização de amortecedores de massa sincronizados é uma proposta satisfatória no controle de vibrações da arquibancada.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho tinha como objetivo demonstrar a necessidade da aplicação da análise estrutural dinâmica não só na elaboração de projetos para novas estruturas, mas também no monitoramento e revitalização das antigas.

Apesar do crescente interesse na área de dinâmica das estruturas, teses e trabalhos aplicados a estruturas reais, sejam essas estruturas já construídas, ou em fase de projeto, ainda são escassos e de difícil de acesso.

Apesar de serem conhecidas estruturas no Brasil e no mundo, apresentando vibrações ou que chegaram ao desmoronamento, foram encontrados artigos ou reportagens apenas de alguns poucos casos. E mesmo para esses casos, é mínima a quantidade de informação disponibilizada.

Quanto aos casos aqui apresentados, é perceptível uma tendência nos tipos de estruturas que apresentaram problemas devidos a cargas dinâmicas. As estruturas, de um modo geral, são de grandes comprimentos em uma de suas dimensões, isto é, esbeltos, e apresentam materiais com uma maior flexibilidade. Tem-se destaque as pontes, as passarelas, os edifícios arranha-céus e arquibancadas de estádios.

Outra particularidade também pode ser notada nos casos apresentados. A origem das cargas dinâmicas tende a ser a mesma em cada estrutura.

As passarelas apresentadas apresentaram oscilações após a travessia sincronizada de uma grande quantidade de pedestres. Já as pontes sofreram mais com a ação do vento, assim como o arranha-céu. Por fim, o movimento em pulo sincronizado é a causa mais comum nas arquibancadas de estádio.

Apesar de ter sido descrito apenas um caso neste trabalho, é importante lembrar que o terremoto é uma carga com influência na estrutura de relevância igual às demais apresentadas.

Também deve-se ressaltar a ação do tráfego de veículos, que apesar de ter sido apresentado como um fator aparentemente secundário nas oscilações que causaram pânico aos usuários da ponte Rio-Niterói, podem causar inúmeros prejuízos a estrutura.

A partir dos estudos realizados nos casos da ponte Rio-Niterói, do estádio Maracanã e o estádio Mané Garrincha, descritos neste trabalho, pode-se notar a dificuldade em se determinar as condições a serem consideradas para a obtenção

das respostas dinâmicas da estrutura, resultando na dubiedade quanto à segurança e conforto ao usuário.

Baseado nas considerações feitas acima e ao longo do trabalho, é fundamental a adoção de algumas medidas para difundir e desenvolver o estudo de dinâmica das estruturas, em especial no Brasil e em João Pessoa.

Primeiramente, é recomendável o melhoramento da abordagem do assunto no fluxograma das universidades, em especial, no nível da graduação. A importância da dinâmica se mostrará mais relevante aos alunos se abordada de maneira um pouco mais aprofundada.

Essa medida deve aumentar o número de estudos e experimentos de análise dinâmica nas construções existentes brasileiras, focando no melhoramento do comportamento e segurança durante a vida útil.

Em especial, estudos em pontes e rodovias, que representam uma parcela bem considerável da atuação da construção civil no Brasil, e em estádios de futebol, que, conforme ressaltado no trabalho, foram projetados e construídos antes do surgimento das torcidas organizadas (carga dinâmica de enorme influência na estrutura).

No caso da cidade de João Pessoa, deve-se aproveitar o desenvolvimento na construção de edifícios altos para aprofundar o entendimento da dinâmica das estruturas, em especial a ação do vento.

Dentre esses estudos, sugere-se o aprimoramento do levantamento, iniciado neste trabalho, de casos de atuação de cargas dinâmicas, para melhorar o nível de informação e referência para análise de outras estruturas.

Aplicando-se essas sugestões esperam-se profissionais mais capacitados na engenharia estrutural e, por conseguinte, estruturas mais confortáveis e seguras para a sociedade.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

BATTISTA, R.C.; PFEIL, M.S. Múltiplos atenuadores dinâmicos sincronizados para controle das oscilações induzidas pelo vento na Ponte Rio-Niterói. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**. Passo Fundo, v.2, n.1, p.73-95, jan./abr. 2005. Disponível em: <http://seer.upf.br/index.php/rsae/article/view/288/210>. Acesso em: 28 ago. 2019.

CONHEÇA a história da construção da Ponte Rio-Niterói. **ARCOS**. 2018. Disponível em: <https://arcos.eng.br/conheca-a-historia-da-construcao-da-ponte-rio-niteroi/>. Acesso em: 10 set. 2019.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. **Dynamics of structures**. 3ª ed. Berkeley: Computers & Structures, Inc., 2003. 752p.

DIOGÉNES, H. J. F. **Análise tipológica de elementos e sistemas construtivos pré-moldados de concreto do ponto de vista de sensibilidade a vibrações em serviço**. 2010. 210f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-06042010-110905/publico/2010ME_HidelbrandoJoseFarkatDiogenes.pdf. Acesso em: 28 ago. 2019.

HARISH, A. Why the Tacoma Narrows bridge collapsed: an engineering analysis. **SimScale**. 2019. Disponível em: <https://www.simscale.com/blog/2018/07/tacoma-narrows-bridge-collapse/>. Acesso em: 10 set. 2019.

JOÃO Pessoa tem 2º prédio mais alto do Brasil [...]. **Portal G1**. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/pb/paraiba/noticia/2018/09/27/joao-pessoa-tem-2o-predio-mais-alto-do-brasil-e-1o-do-nordeste-aponta-skyscraper-center.ghtml>. Acesso em: 09 set. 2019.

LIMA, G. V. F. **Análise dinâmica via método dos elementos finitos do Estádio Nacional de Brasília**. 2013. 165f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: <http://www.pecc.unb.br/wp-content/uploads/dissertacoes/M13-9A-Gustavo-Lima.pdf>. Acesso em: 02 out. 2019.

MARTHA, L. F. **Análise de estruturas**: conceitos e métodos. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. 524 p.

MENDES, P. **Dinâmica de estruturas**. 2012. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Área Departamental de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2012.

MOREIRA, D. H. F. R. **Atualização da modelagem de uma passarela de pedestres e avaliação do seu desempenho dinâmico**. 2018. 84f. Monografia (Graduação em

Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, 2018. Disponível em: <http://ct.ufpb.br/ccec/contents/documentos/tccs/2017.2/atualizacao-da-modelagem-de-uma-passarela-de-pedestres-e-avaliacao-do-seu-desempenho-dinamico.pdf>. Acesso em: 09 set. 2019.

O ESTÁDIO. **Estádio Nacional de Brasília Mané Garrincha**. Disponível em: <https://www.estadiomanegarrincha.com.br/o-estadio/>. Acesso em: 02 out. 2019.

O MARACANÃ. **Maracanã Tour**. Disponível em: <https://www.tourmaracana.com.br/maracana>. Acesso em: 04 set. 2019.

PRÉDIO balança e água de piscina transborda [...][S.l.:s.n.], 2018. 1 vídeo (11 min). Publicado pelo canal Hoje em Dia. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=OlrWzOw70Y0>. Acesso em: 28 ago. 2019.

RABELO, L. J. G. **Proposta de um Sistema de Controle de Vibrações do Estádio Nacional**. 2016. 208f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: <http://www.pecc.unb.br/wp-content/uploads/dissertacoes/M16-11A-Leonardo-Rabelo.pdf>. Acesso em: 02 out. 2019.

RODRIGUES, J. F. S. Estrutura dos estádios não é adequado ao comportamento das torcidas. [Entrevista cedida a] Olavo Soares. **Portal do Governo**, São Paulo. 2003. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/ciencia/fe2207200301.htm>. Acesso em: 10 set. 2019.

RODRIGUES, J. F. S. Vibração da torcida prejudica os estádios. [Entrevista cedida a] Marcus Vinicius Marinho. **Folha de São Paulo**, São Paulo. 2003. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/ciencia/fe2207200301.htm>. Acesso em: 10 set. 2019.

RODRIGUES, J. F. S.; ALMEIDA, P.A.O. Ações de torcidas em estádios de futebol. *In*: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 5., 2003, São Paulo, p. 1-10.

SANTOS, D. C. **Análise dinâmica da estrutura de um estádio de futebol**. 2013. 46f. Projeto (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10008194.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2019.

SÉTRA / AFCG. **Footbridges – Assesment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading** – Practical Guidelines. 2006. França. Disponível em: <http://www.projektering.nu/files/Footbridges.pdf>. Acesso em: 09 set. 2019

TROUBLED bridge over water. **BBC News**. 2000. Disponível em: http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/784927.stm. Acesso em: 28 ago. 2019.

VELLOSO, F. C. Ponte Rio-Niterói: Um marco em nossa engenharia. **Revista DaCultura**. [S.l.], n. 21, p. 16-24, maio, 2013. Disponível em: http://www.funceb.org.br/images/revista/24_9x6c.pdf. Acesso em: 28 ago. 2019.

WSDOT (Washington State Department of Transportation). **1940 Narrows Bridge: The Machine**. c2005. Disponível em: <https://www.wsdot.wa.gov/tnbhistory/machine/machine2.htm>. Acesso em: 10 set. 2019.