

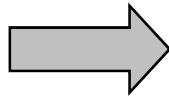
Análise dinâmica de estruturas

Prof. Dr. Claudius Barbosa

ANÁLISE DINÂMICA

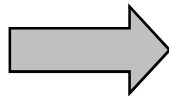


Análise
estática

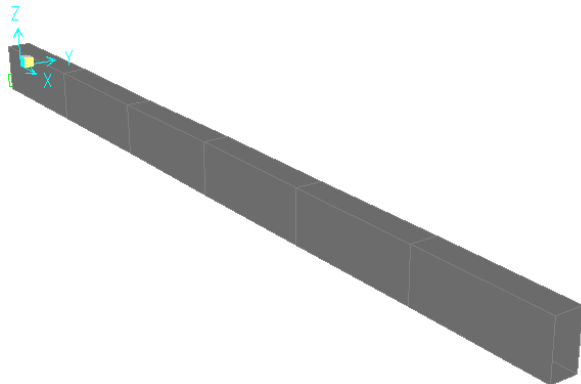


- carregamento imposto à estrutura lentamente
- os efeitos dinâmicos não são induzidos

Ensaio
dinâmico



- comportamento da estrutura sob cargas dinâmicas
- obtenção de características elástico-dissipativas



$$A = 20 \times 40 \text{ cm}^2$$

$$L = 8,64 \text{ m (engaste)}$$

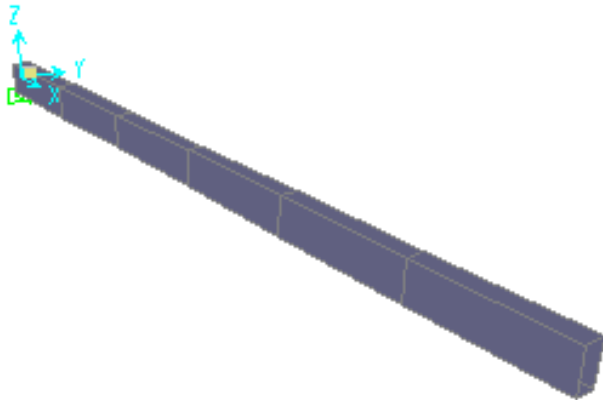
$$E = 25 \text{ GPa}$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

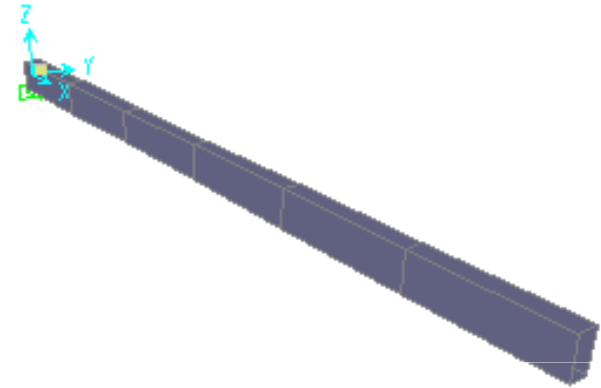
ANÁLISE DINÂMICA



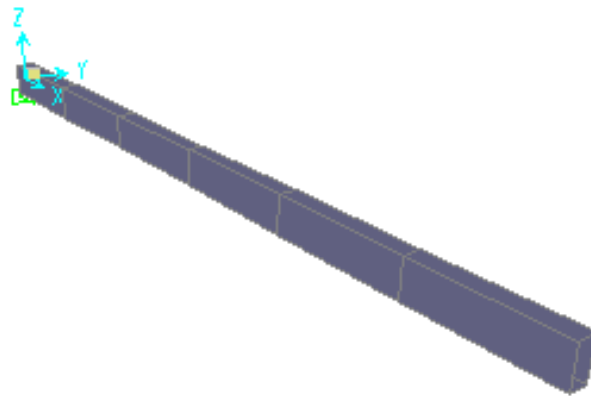
$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$



$$f_{n1} = 0,38 \text{ Hz}$$



$$f_{n2} = 0,76 \text{ Hz}$$



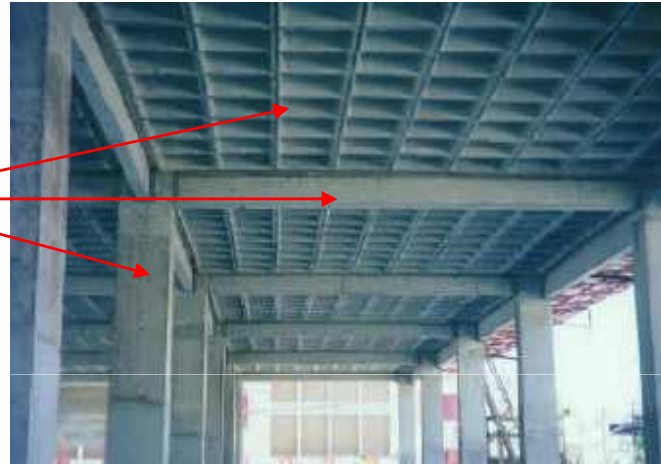
$$f_n = 33 \text{ Hz}$$

ANÁLISE DINÂMICA



CARGA DINÂMICA E PARÂMETROS

- Velocidade
- Deslocamento
- Aceleração

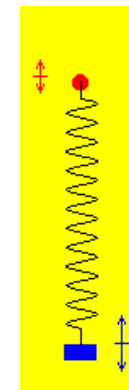


Forças de inércia e amortecimento

- Vibração livre



- Vibração forçada



APLICAÇÕES



- Acompanhamento da obra
- Concessões rodoviárias
- Infra-estrutura de escoamento de cargas
- Alteração do trem-tipo dos veículos
- Aumento do número de vias
- Ocorrência de danos
- Limites de vibrações para operações
- Fadiga da estrutura e ligações

- Análise dos níveis de vibrações e ruídos secundários
- Projeto de via permanente
- Instrumentação de via permanente
- Projeto de sistemas de atenuação



23.3 Estado-limite de vibrações excessivas

A análise das vibrações pode ser feita em regime linear no caso das estruturas usuais.

Para assegurar comportamento satisfatório das estruturas sujeitas a vibrações, deve-se afastar o máximo possível a frequência própria da estrutura (f) da frequência crítica (f_{crit}), que depende da destinação da respectiva edificação. A condição abaixo deve ser satisfeita:

$$f > 1,2 f_{crit}$$

Quando a ação crítica é originada por uma máquina, a frequência crítica passa a ser a da operação da máquina. Nesse caso, pode não ser suficiente afastar as duas frequências, própria e crítica. Principalmente quando a máquina é ligada, durante o seu processo de aceleração, é usualmente necessário aumentar a massa ou o amortecimento da estrutura para absorver parte da energia envolvida.

Tabela 23.1 – Frequência crítica para vibrações verticais para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas

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



23.5 Estado-limite último de fadiga

23.5.1 Ações cíclicas

A fadiga é um fenômeno associado a ações dinâmicas repetidas, que pode ser entendido como um processo de modificações progressivas e permanentes da estrutura interna de um material submetido a oscilação de tensões decorrentes dessas ações.

Não são tratadas nesta Norma as ações de fadiga de alta intensidade, capazes de provocar danos com menos de 20 000 repetições.

As ações de fadiga de média e baixa intensidade e número de repetições até 2 000 000 de ciclos são consideradas nas disposições estabelecidas nesta Seção. Para a consideração do espectro de ações, admite-se que podem ser excluídas aquelas de veículos com carga total até 30 kN, para o caso de pontes rodoviárias.

ESTÁDIOS



BARBOSA, C.S., CARRAZEDO, R., JULIANI, M.A.C., BECOCCI, L. Análise estrutural e previewal das vibrações das arquibancadas do Estádio Olímpico João Havelange – Rio de Janeiro In: 50o. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2008, Salvador.



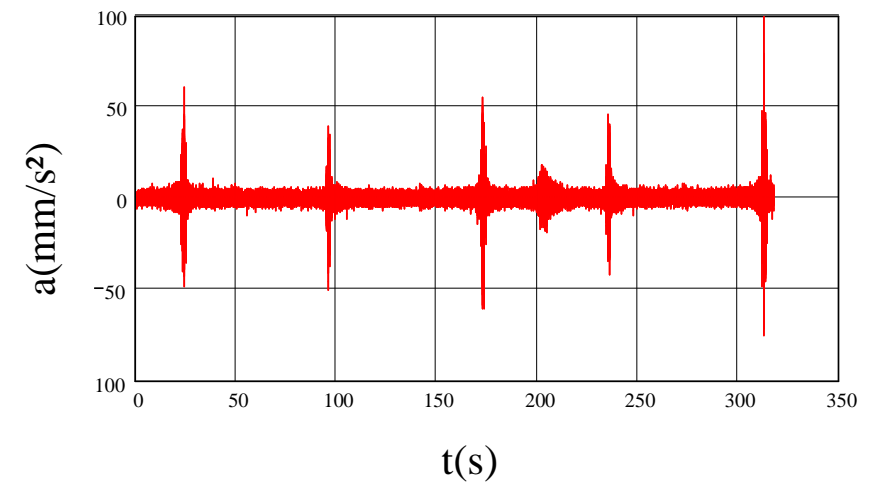
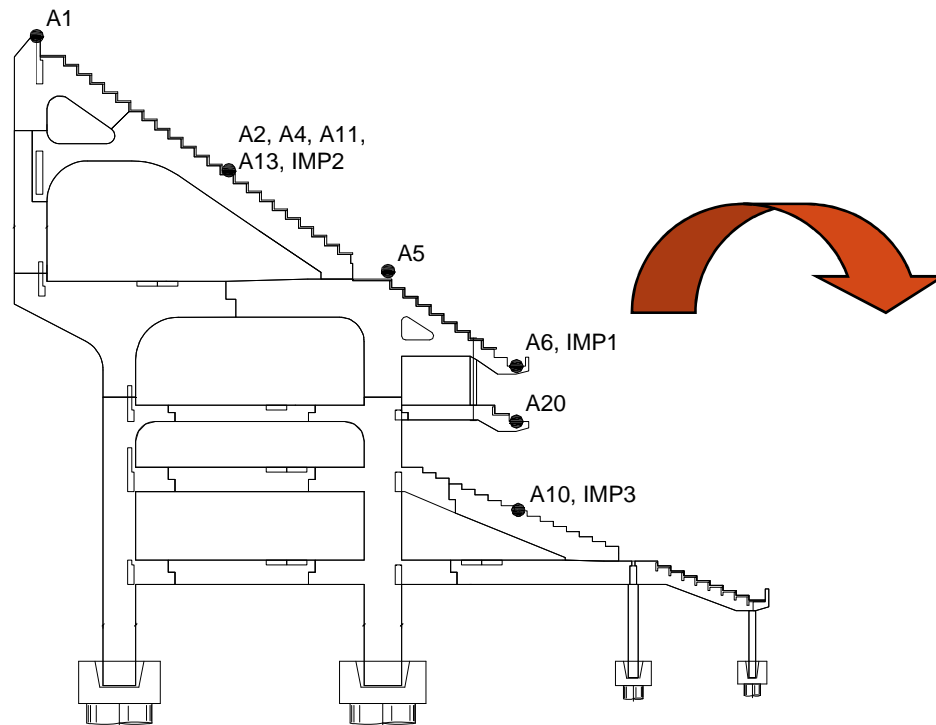
ESTÁDIO OLÍMPICO JOÃO HAVELANGE

- Construção entre 2003 e 2007
- Jogos Pan-americanos - Rio 2007
- Capacidade: 47.000 pessoas



ESTÁDIO OLÍMPICO JOÃO HAVELANGE - ENGENHÃO

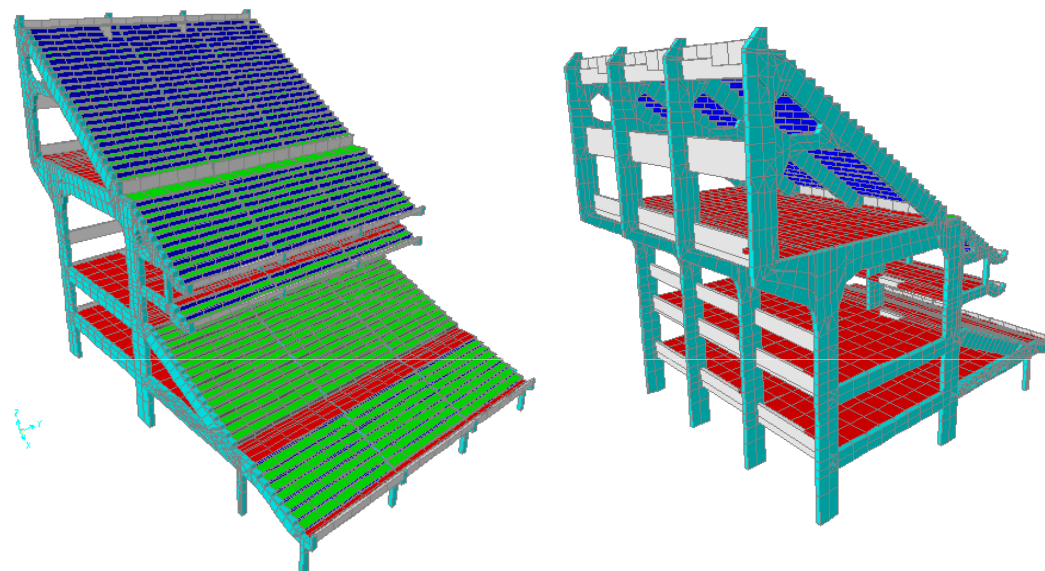
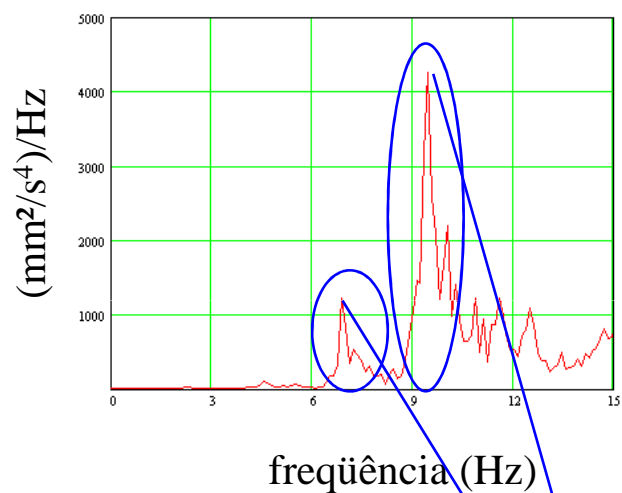
- Avaliação previsional dos níveis de vibração nas arquibancadas
- Monitoração dinâmica (impacto e público)
- Determinação das propriedades dinâmicas: f_n e modos de vibração
- Elaboração de modelo numérico em elementos finitos



ESTÁDIOS



ESTÁDIO OLÍMPICO JOÃO HAVELANGE - ENGENHÃO

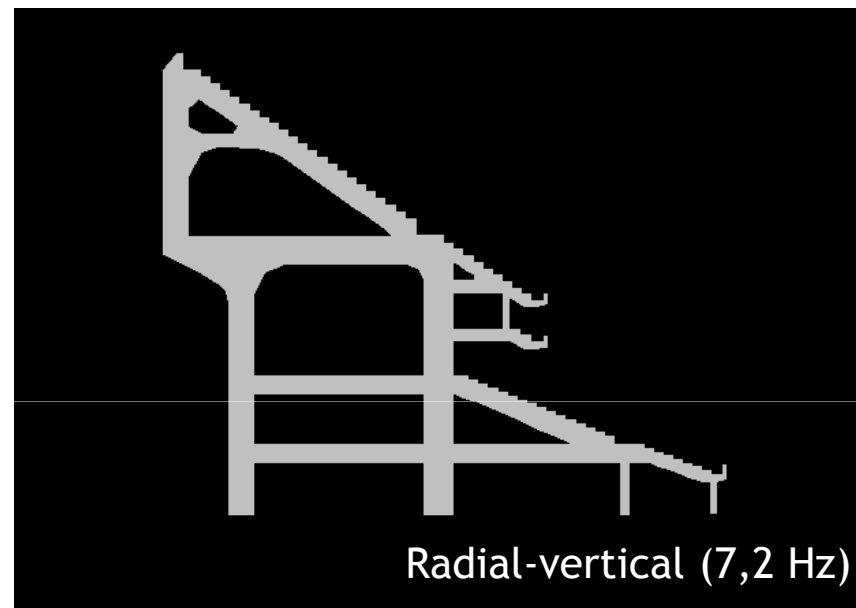
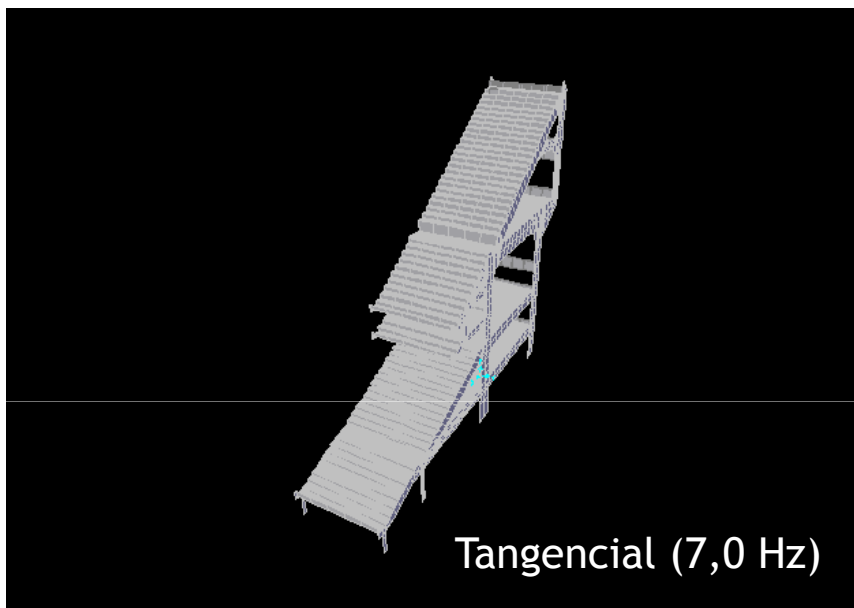


Modo de vibração	Frequência		Deformada
	Experimental	Teórica	
1	6,9 Hz	7,0 Hz	Tangencial
2	7,3 Hz	7,2 Hz	Radial-vertical
3	9,5 Hz	9,9 Hz	Radial-vertical
4	10,3 Hz	10,5 Hz	Radial-vertical

ESTÁDIOS



ESTÁDIO OLÍMPICO JOÃO HAVELANGE - ENGENHÃO



Modo de vibração	Frequência		Deformada
	Experimental	Teórica	
1	6,9 Hz	7,0 Hz	Tangencial
2	7,3 Hz	7,2 Hz	Radial-vertical
3	9,5 Hz	9,9 Hz	Radial-vertical
4	10,3 Hz	10,5 Hz	Radial-vertical

ESTÁDIOS



ESTÁDIO OLÍMPICO JOÃO HAVELANGE - ENGENHÃO

Carregamentos estáticos e dinâmicos

$$F_p = G + \sum_{i=1}^n G \alpha_i \text{sen}(2\pi f_p t - \varphi_i)$$

Número de harmônicos

Carregamento estático

Amplitude da força

Freqüência de atividade

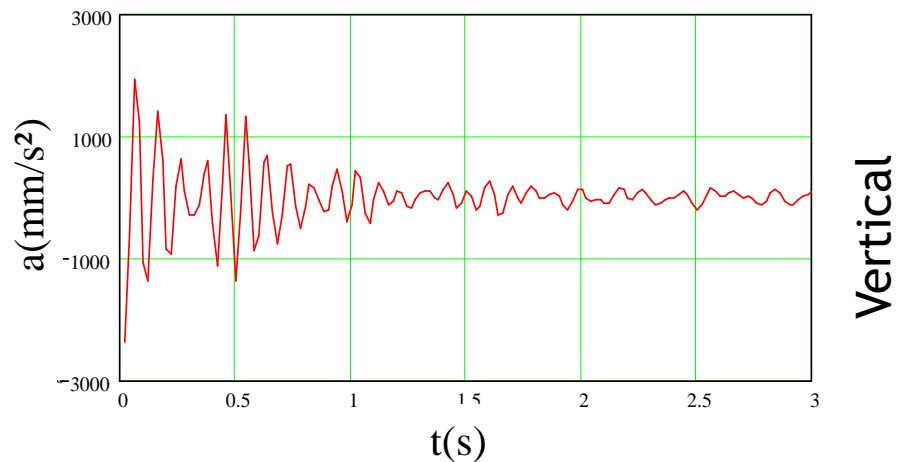
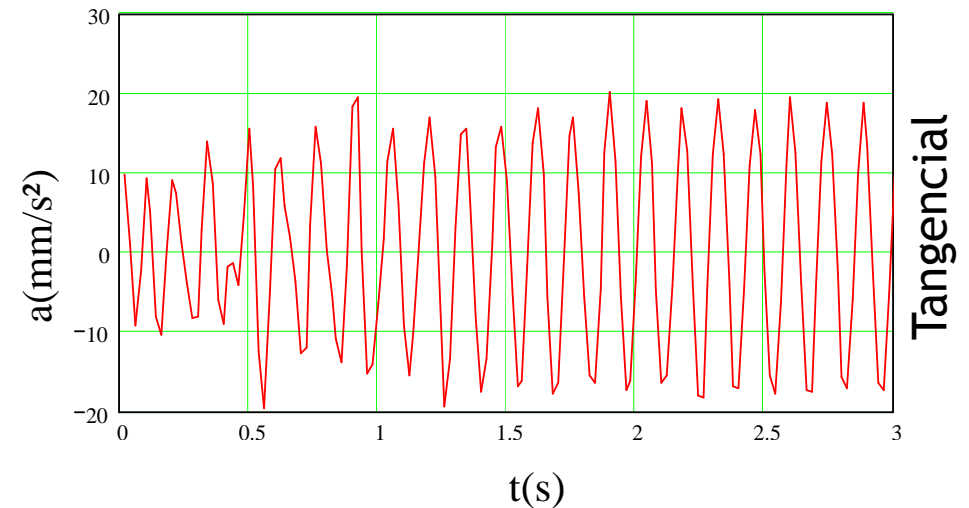
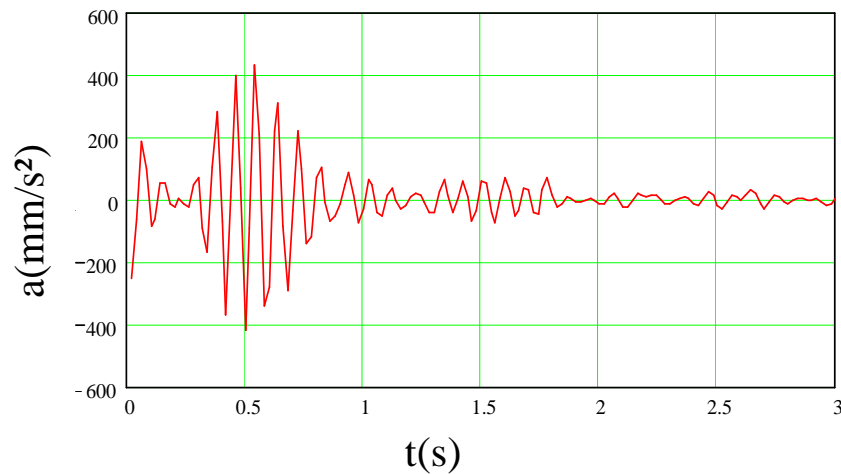
Diferença de fase

$G \alpha_i$ → Coeficientes de Fourier
(Bachmann et al. (1995))

ESTÁDIOS



ESTÁDIO OLÍMPICO JOÃO HAVELANGE - ENGENHÃO



Valor de Referência:

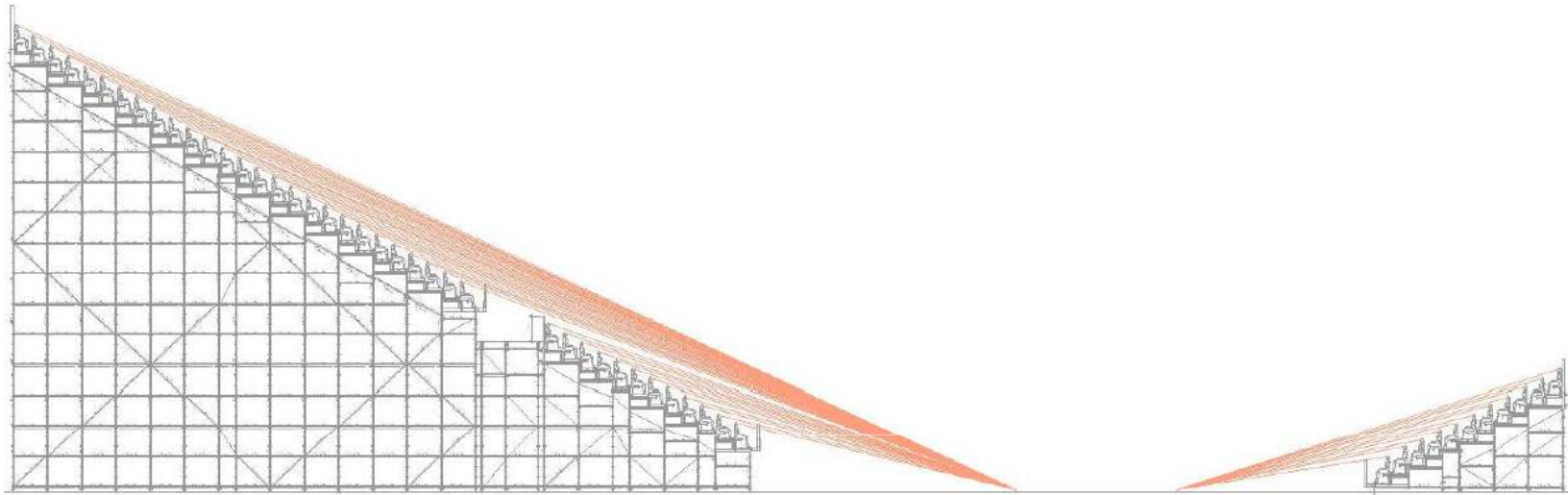
3000 mm/s²

Dickie e Tomlinson (1988) - Demountable grandstands. Structural Engineering Review.

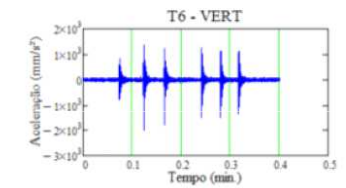
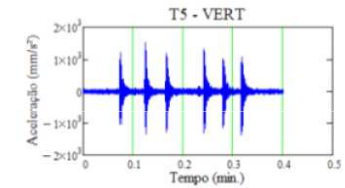
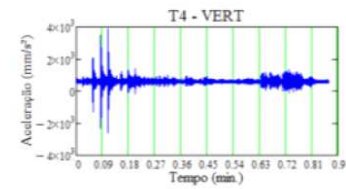
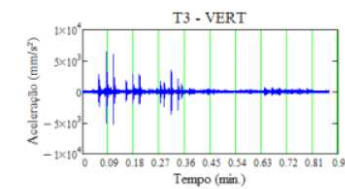
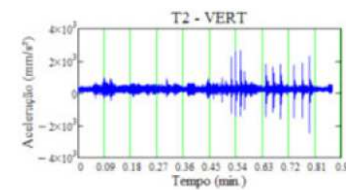
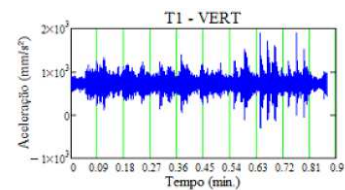
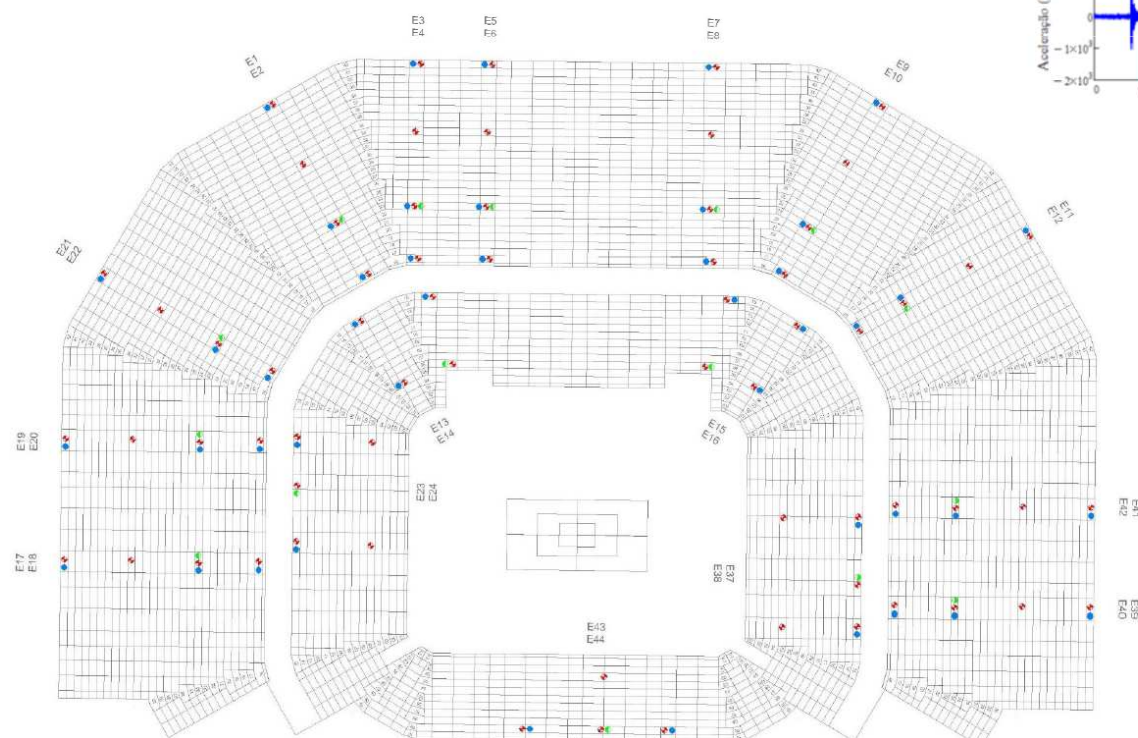
ARENAS



ARENAS



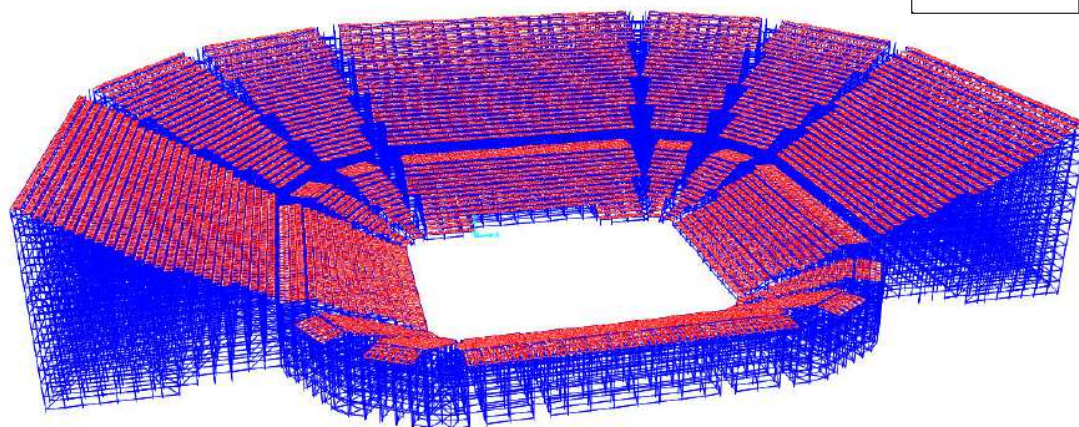
ARENAS



ARENAS



Frequência (Hz)		Modos de vibração	
Teórica	Experimental		
3,32	3,28	Movimento transversal	
3,87	3,94	Movimento longitudinal	
12,11	12,42	Movimento vertical da arquibancada superior	



ARENAS



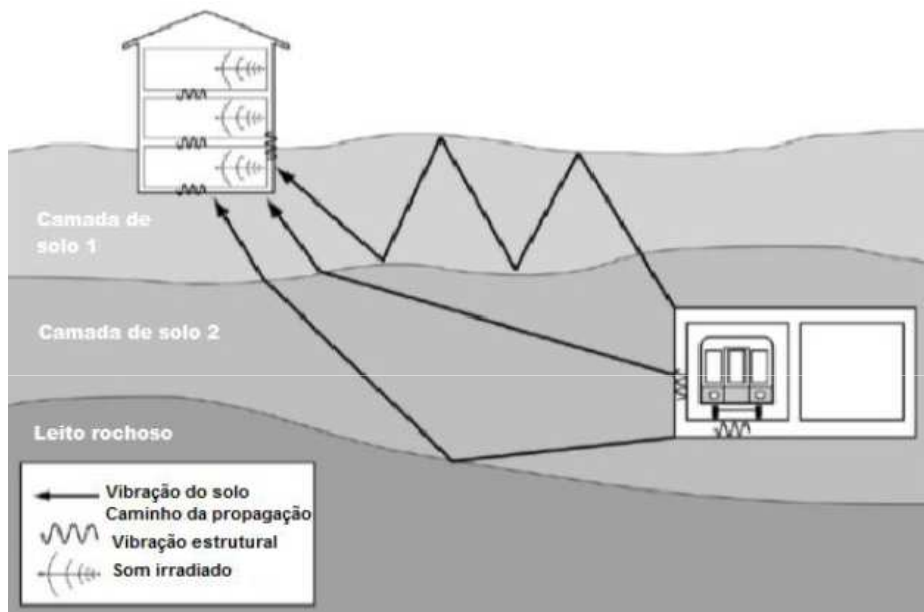
Tabela 14 – Níveis de vibração máximo nas arquibancadas móveis da Arena Copacabana.

Atividade	f _p (Hz)	Aceleração (mm/s ²)			Velocidade (mm/s)		
		Radial	Lateral	Vertical	Radial	Lateral	Vertical
<i>Hand Clapping</i>	1,3	30,0	0,4	42,9	0,8	0,0	1,1
	1,4	7,7	0,2	16,8	0,3	0,0	0,8
	1,5	62,7	0,9	92,0	1,4	0,0	2,1
	1,6	14,1	0,4	46,1	0,7	0,0	2,0
	1,7	155,8	2,0	210,8	3,3	0,0	4,6
	1,8	38,5	0,7	100,6	1,5	0,0	3,8
	1,9	298,4	3,5	353,2	6,2	0,1	7,9
	2,0	100,9	1,1	200,4	3,4	0,0	6,6
	2,1	565,0	6,1	567,1	12,3	0,1	11,7
	2,2	186,3	2,4	401,9	5,9	0,1	11,4
	2,3	1063,3	10,0	832,7	22,1	0,2	19,6
	2,4	783,6	8,0	887,7	18,1	0,2	21,6

Tabela 15 – Deslocamento máximo.

Componente	Deslocamento (mm)		
	Radial	Lateral	Vertical
Estática	0,43	0,01	1,96
Dinâmica (RMS)	0,53	0,00	0,56

PROJETO METROVIÁRIO

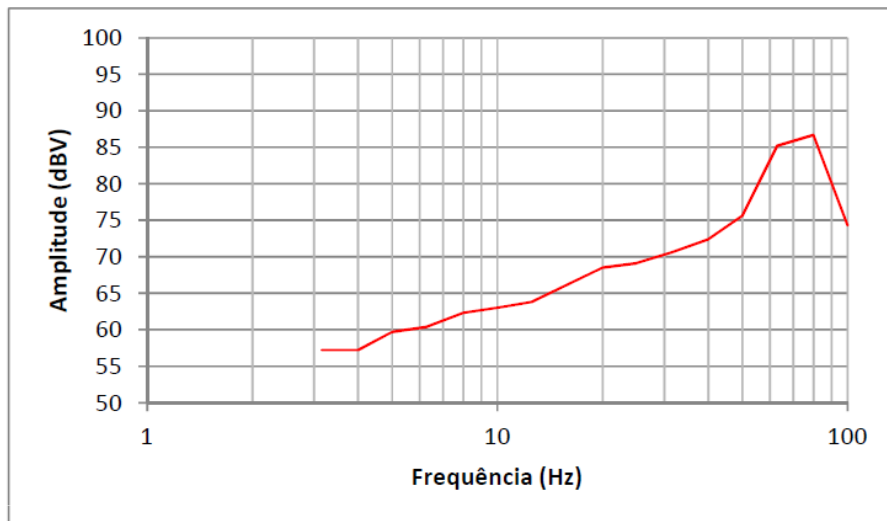


Federal Transit Administration (2006)



Resposta humana e estrutural	Nível de Velocidade*	Fontes típicas (50 pés a partir de fonte)
limiar, menor dano estético construções frágeis	100	Som produzido pela explosão de construções
Dificuldade com tarefas, como leitura em monitores	90	Tratores e outros equipamentos de construção pesados
Incômodo residencial, eventos infrequentes (por exemplo, trens urbanos)	80	Trens urbanos, com intervalos entre trens maiores
incômodo residencial, eventos frequentes (por exemplo, metrô)	70	Metrôs, com intervalos maiores
Limite para vibração equipamentos sensíveis	60	Trens urbanos, típicos
Limite aproximado para a percepção humana de vibração	50	Ônibus ou caminhões pesados
		Metrô típico
		Ônibus ou caminhões típicos
		Vibração típica de fundo

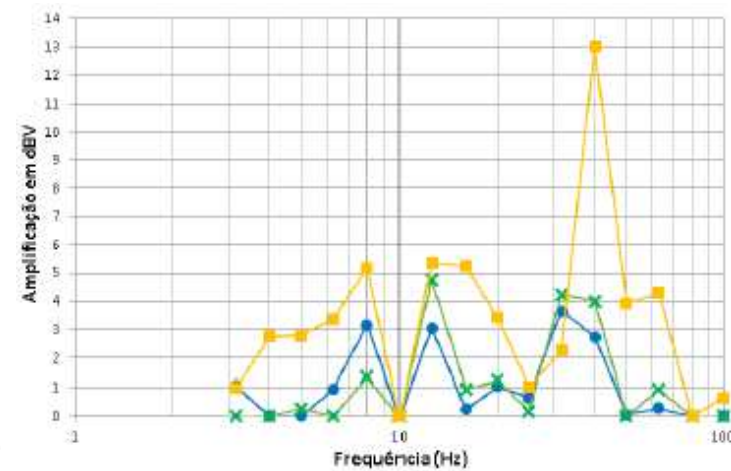
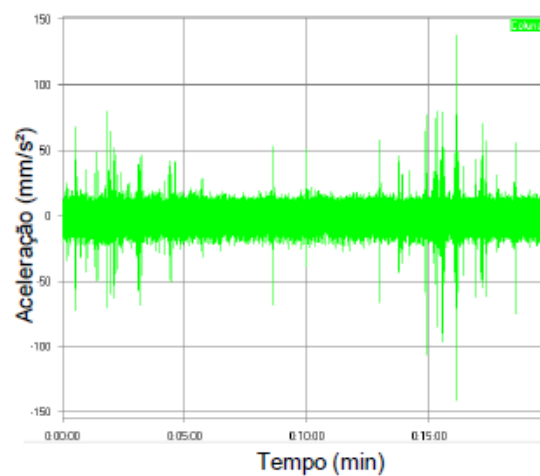
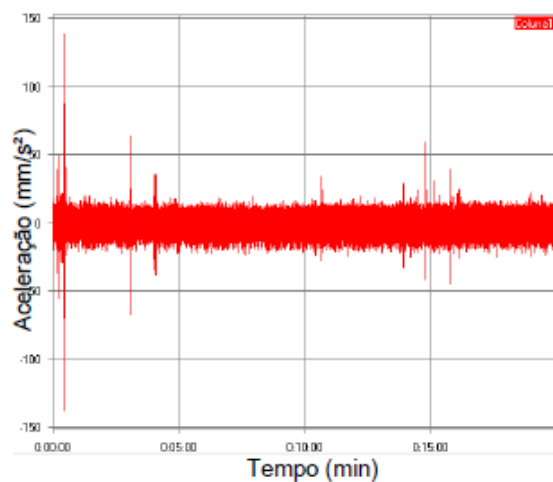
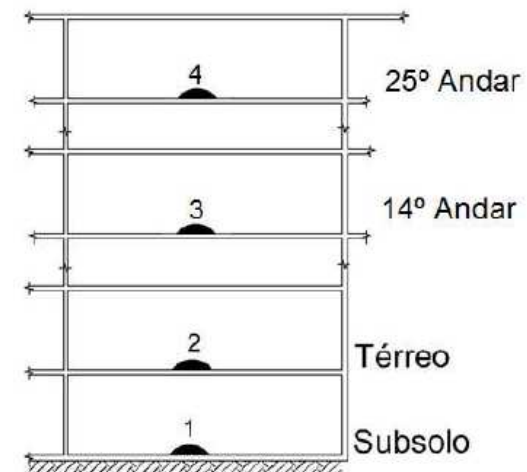
PROJETO METROVIÁRIO



Espectro de vibração do trem: Carvalho (2015)



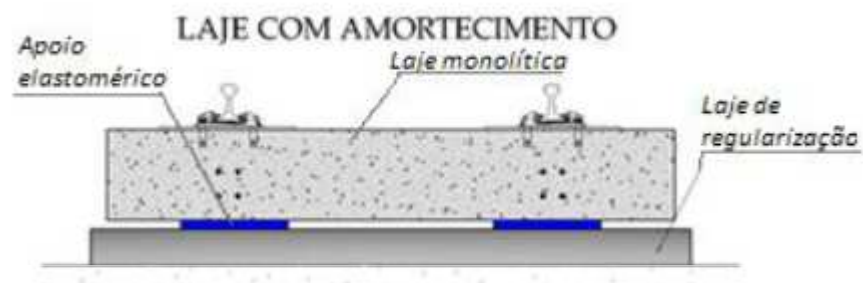
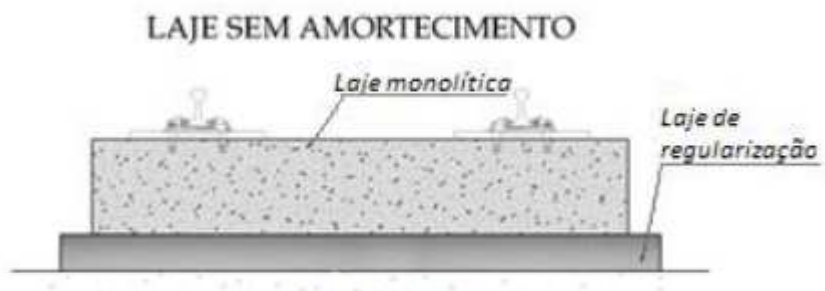
PROJETO METROVIÁRIO



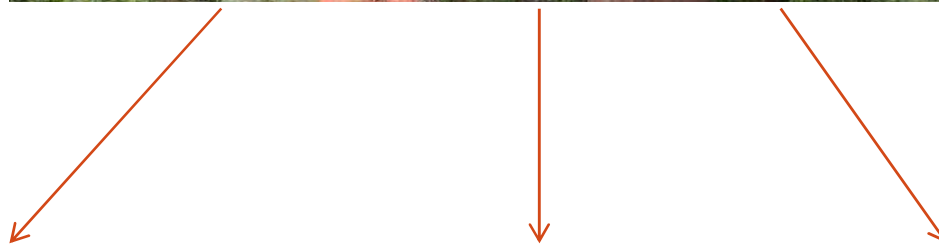
PROJETO METROVIÁRIO



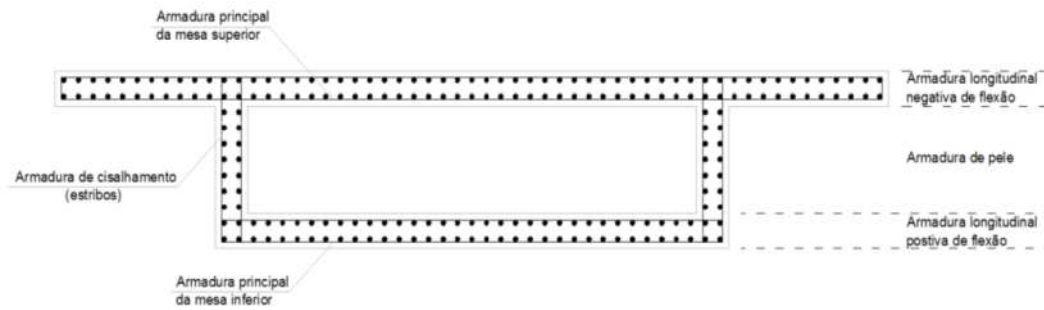
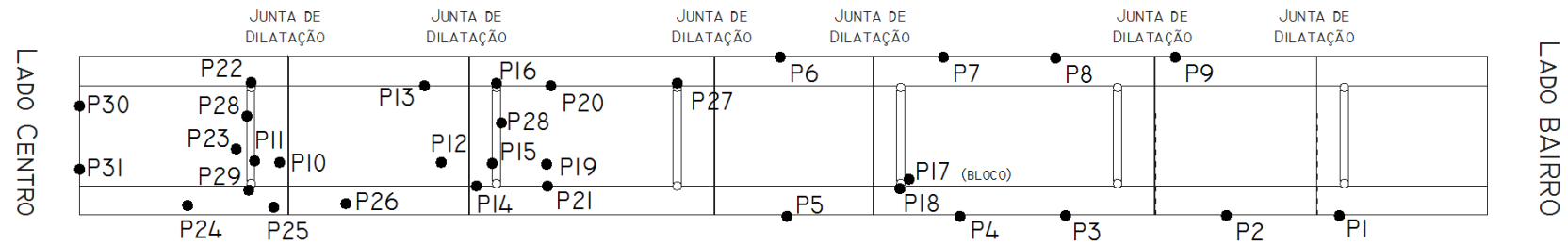
Seções com sistema de atenuação:
Carvalho (2015)



PONTE DE CONCRETO



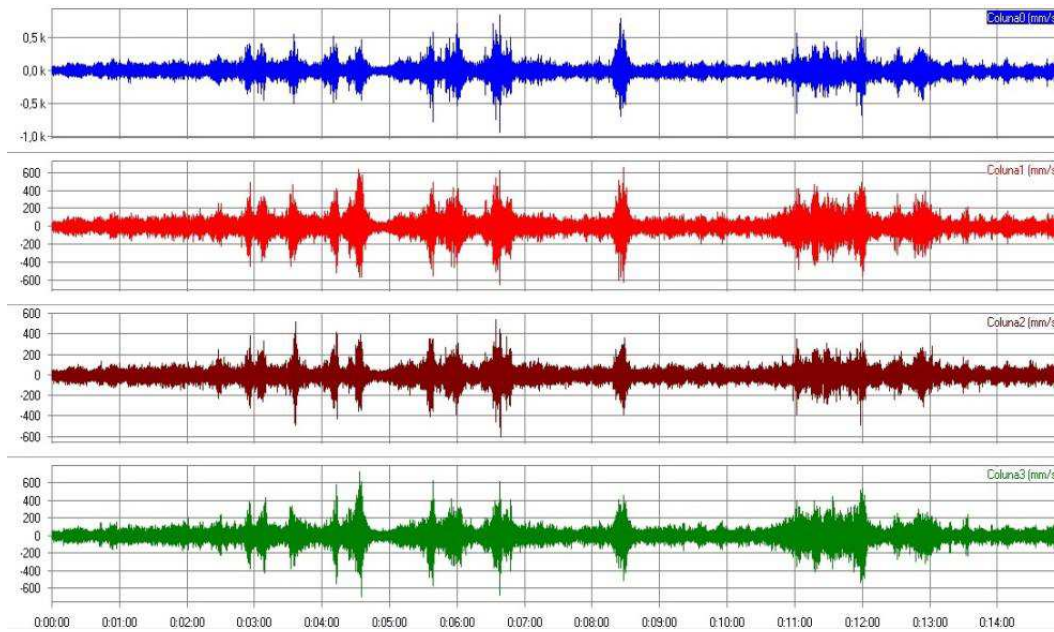
PONTE DE CONCRETO



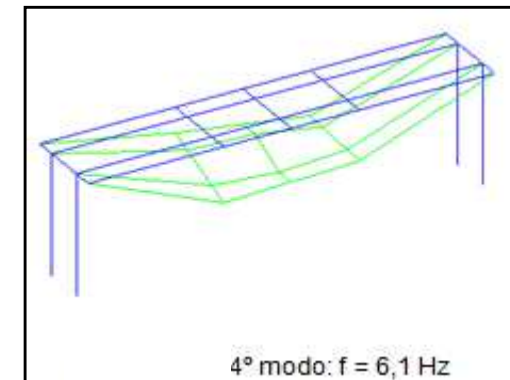
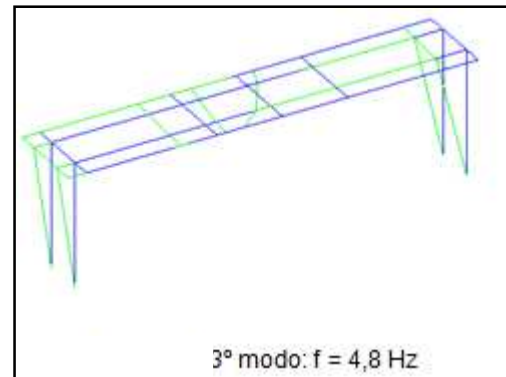
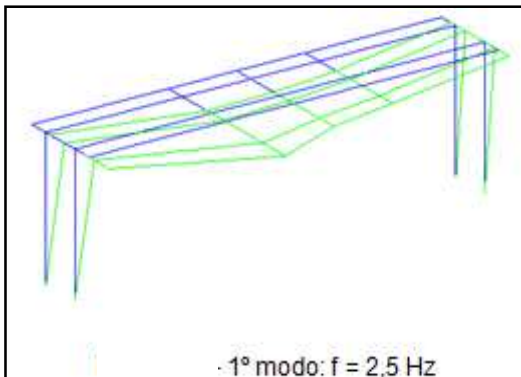
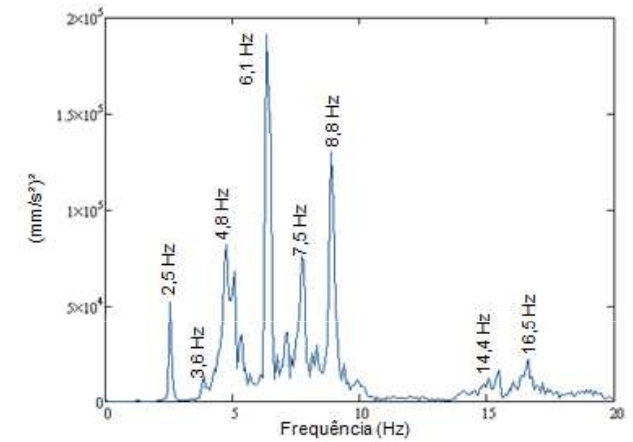
PONTE DE CONCRETO



a x t



a x f



PASSARELA



(a)

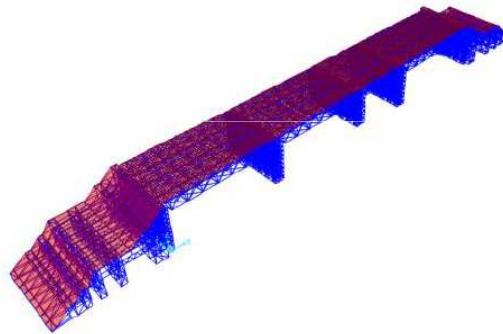
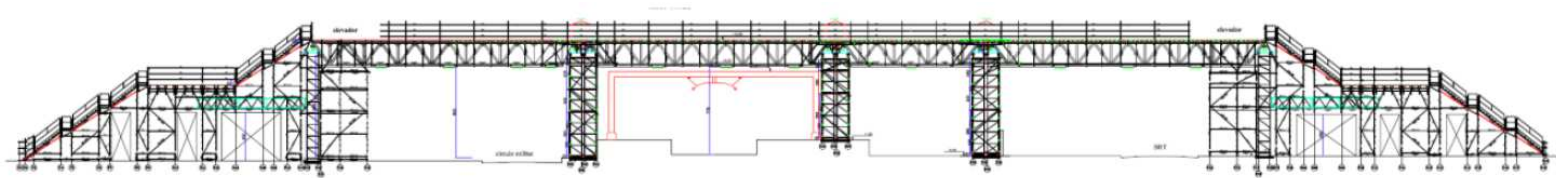


(b)

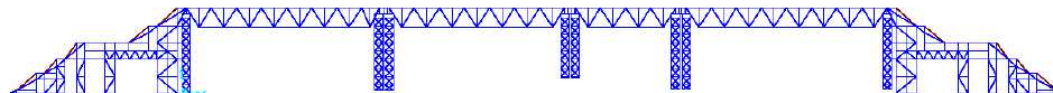


(c)

PASSARELA



(a)







(b)

PASSARELA



Tabela 2 – Frequências naturais e modos de vibração – modelo numérico da Passarela.

Frequência (Hz)		Modos de vibração	
Teórica	Experimental		
1,56	1,64	Movimento transversal	
1,90	1,89	Movimento longitudinal	
6,48	5,94	Movimento vertical (flexão)	
6,57	6,83	Movimento vertical (torção)	

PASSARELA



$$F = G + \sum_{i=1}^n G \cdot \alpha_i \cdot \text{sen}(2\pi f_p t - \phi_i)$$

Onde:

G = peso das pessoas (valor médio adotado = 80 kgf/pessoa);

f_p = frequência da atividade;

α_i = coeficiente de Fourier do i -ésimo harmônico;

i = número do i -ésimo harmônico;

ϕ_i = ângulo de fase entre o i -ésimo e o primeiro harmônico;

t = tempo de sincronia da atividade.

Tabela 21 – Coeficiente de Fourier utilizados na análise de vibrações.

Atividade sincronizada	f_p (Hz)	α_1	α_2	α_3	ϕ_2	ϕ_3
<i>Walking</i>	1,6	0,3	0,1	0,1	$\pi/2$	$\pi/2$
	1,7	0,3	0,1	0,1	$\pi/2$	$\pi/2$
	1,8	0,4	0,1	0,1	$\pi/2$	$\pi/2$
	1,9	0,4	0,1	0,1	$\pi/2$	$\pi/2$
	2,0	0,4	0,1	0,1	$\pi/2$	$\pi/2$
	2,1	0,4	0,1	0,1	$\pi/2$	$\pi/2$
	2,2	0,5	0,1	0,1	$\pi/2$	$\pi/2$
	2,3	0,5	0,1	0,1	$\pi/2$	$\pi/2$
	2,4	0,5	0,1	0,1	$\pi/2$	$\pi/2$



Tabela 22 – Níveis de vibração máximo na Passarela do Complexo Deodoro.

	f_p (Hz)	Aceleração (mm/s ²)			Velocidade (mm/s)		
		Radial	Lateral	Vertical	Radial	Lateral	Vertical
Atividade	1,6	137,0	355,8	1113,1	5,0	31,1	40,8
	1,7	216,5	620,0	1282,0	7,3	59,5	41,6
	1,8	191,0	600,8	1308,3	6,7	53,6	40,7
	1,9	228,0	768,6	1051,3	8,1	68,8	31,0
	2,0	255,9	688,6	1202,1	7,1	52,1	35,8
	2,1	278,6	737,6	1370,1	8,3	57,2	36,9
	2,2	225,9	630,1	1067,1	6,1	42,3	27,5
	2,3	198,3	713,9	1012,7	6,7	58,3	33,5
	2,4	169,0	484,8	1383,5	6,5	29,9	45,4

Observa-se que os valores máximos de aceleração não ultrapassam 2500 mm/s² assegurando o conforto dos usuários e o nível de velocidade máximo é da ordem de 70 mm/s.