

INTRODUÇÃO À DINÂMICA DAS ESTRUTURAS

CARLOS EDUARDO NIGRO MAZILLI | JOÃO CYRILINO | MIGUEL LUZ SUCALEM | SERGIO STUZZO

LIÇÕES EM
MECÂNICA DAS
ESTRUTURAS:
DINÂMICA

Blucher



Dinâmica das Estruturas

- ✓ Análise dinâmica das estruturas, ou simplesmente dinâmica das estruturas, é a disciplina que trata da formulação e solução das equações de movimento dos sistemas estruturais, em presença de ações variáveis no tempo ou perturbação de seu equilíbrio estático.
- ✓ A análise dinâmica das estruturas é cada vez mais requerida em projetos de engenharia, à medida que os sistemas estruturais se tornam mais esbeltos e suscetíveis a vibrações.

Dinâmica das Estruturas

- ✓ Entretanto, até a década de 1970, a prática corrente na engenharia civil era a de evitar a qualquer custo a análise dinâmica, se preciso fosse substituindo-a por uma análise estática com carregamentos majorados pelos chamados coeficientes de impacto ou coeficientes de amplificação dinâmica.
- ✓ Se em muitas situações esse procedimento é conservador, em outras o mesmo não ocorre, sendo essencial considerar modelos que levem em conta os esforços inerciais e as demais ações variáveis no tempo.
- ✓ Na engenharia de estruturas em sentido lato e, portanto, não restrita à engenharia civil, há inúmeros exemplos de situações que requerem análises dinâmicas

Dinâmica das Estruturas

Templo de Selinunte, Sicília, Itália, destruído por terremoto no sec. VIII



Dinâmica das Estruturas

Great Hanshin Earthquake, Kobe, Japão, 1995



compressão do segundo andar devido a composição de onda incidente e onda refletida



tombamento de via elevada por efeito dominó

Dinâmica das Estruturas

Aeroporto Dulles, Washington, Estados Unidos

Projeto de Eero Saarinen

Efeito de vento sobre cobertura em estrutura de membrana



Dinâmica das Estruturas

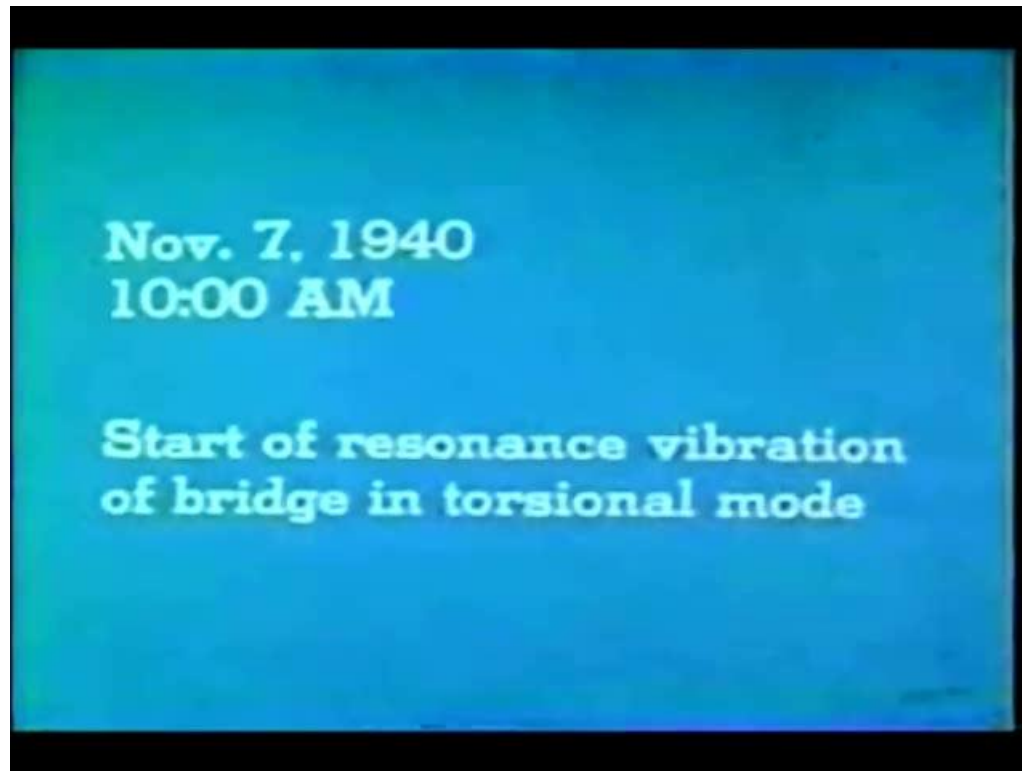
Asa e superfícies de controle do avião BEM-RJ145

Análise de estabilidade aeroelástica



Dinâmica das Estruturas

Colapso da Ponte de Tacoma Narrows, Estados Unidos da América
Instabilidade aeroelástica



Dinâmica das Estruturas

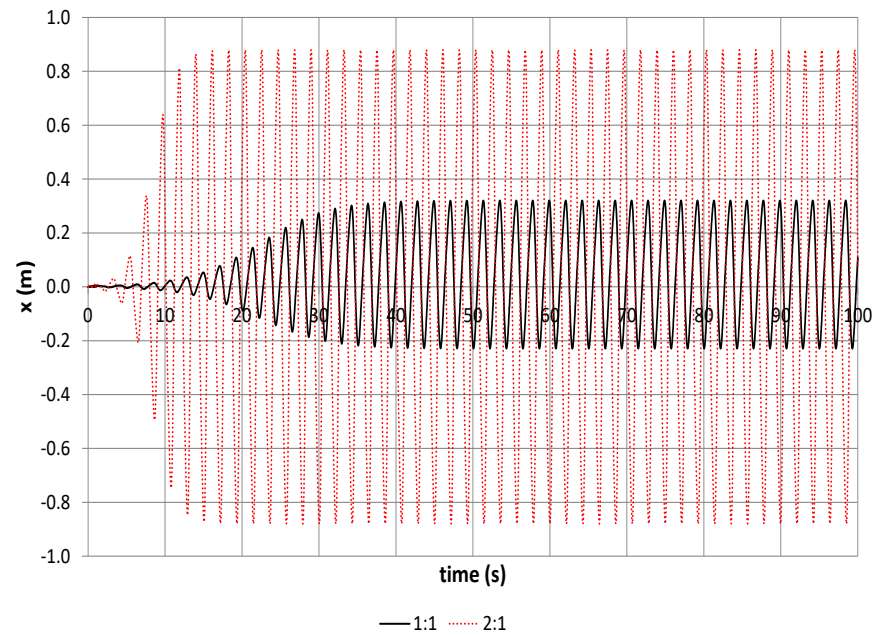
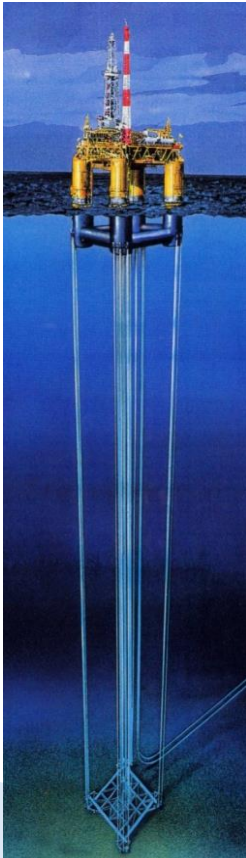
Plataforma P-51, Bacia de Campos, Brasil

Carregamentos dinâmicos de vento, ondas e correntes marítimas



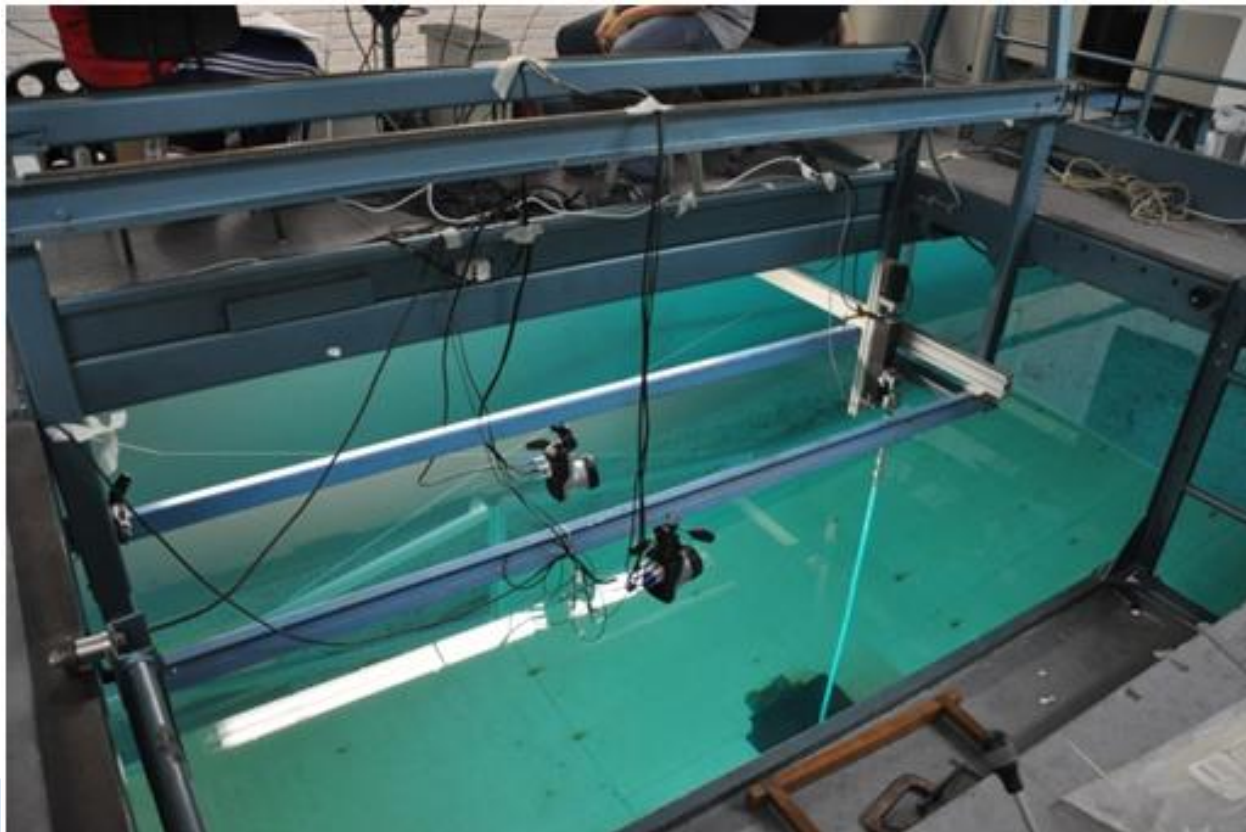
Dinâmica das Estruturas

Sistemas estruturais oceânicos: TLP's com excitação paramétrica



Dinâmica das Estruturas

Vibrações induzidas pelo escoamento (VIV) e/ou por excitação paramétrica em modelo de riser vertical:
simulação no *towing tank* do IPT
Projeto EPUSP/Petrobrás, 2013

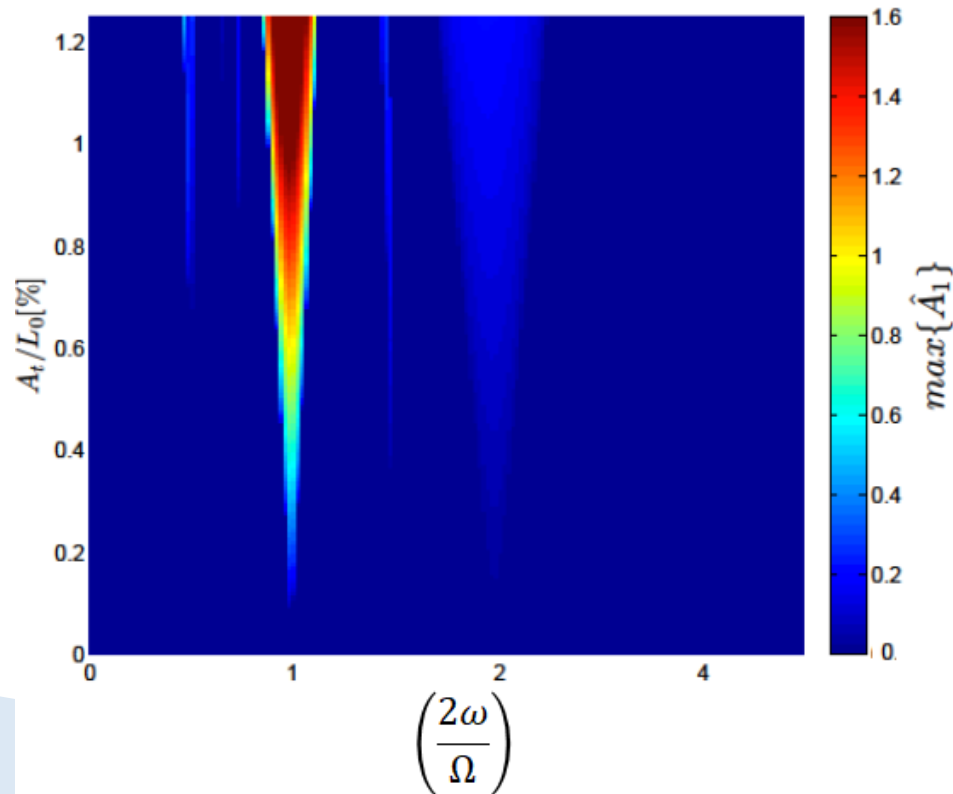


Dinâmica das Estruturas

Amplitude modal em função da frequência da excitação paramétrica no topo

Modelagem experimental para riser vertical

Projeto EPUSP/Petrobrás, 2013



Dinâmica das Estruturas

Turbina de Itaipu, Brasil/Paraguai



Massa de 2242 toneladas girando com velocidade angular de 3600 rpm (60 Hz)

Dinâmica das Estruturas

Porto InterMoor Açú, São João da Barra, Brasil



Defensas para atenuação do choque mecânico entre o navio e a estrutura de atracação

Dinâmica das Estruturas

Estação de Metrô, Londres, Inglaterra



Abrigo antiaéreo durante bombardeio na Segunda Guerra Mundial

Dinâmica das Estruturas

Millenium Bridge, Londres, Reino Unido
Vibrações auto-excitadas



opening_day_high.wmv



Dinâmica das Estruturas

Forth Rail Bridge, Escócia, concluída em 1889

Vibrações induzidas por cargas móveis em trilhos com rugosidade e imperfeições geométricas



Dinâmica das Estruturas

Ponte da variante de Alcácer do Sal, Portugal, concluída em 2010

Vibrações induzidas por cargas móveis em trilhos com rugosidade e imperfeições geométricas

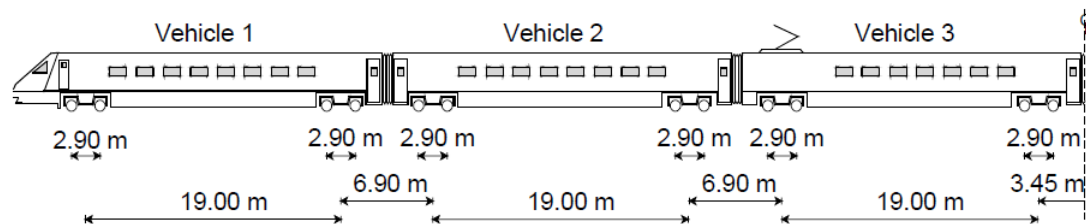


Dinâmica das Estruturas

Ponte da variante de Alcácer do Sal, Portugal



Trem Alfa Pendular $v=250\text{km/h}$

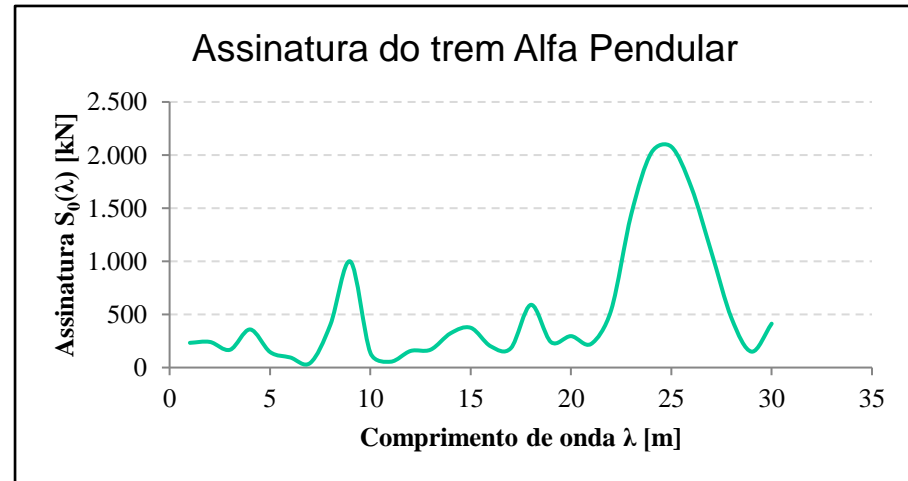


Dinâmica das Estruturas

Ponte da variante de Alcácer do Sal, Portugal
Potencial ressonância entre modos do veículo e ponte ou viaduto

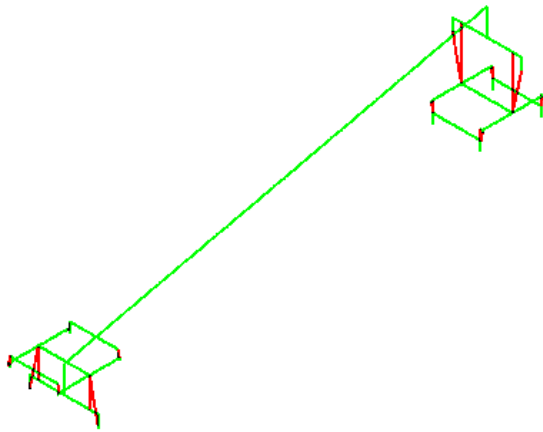
Frequências naturais (Hz)

Modo	Veículo	Viaduto	Ponte
1º Modo	0,361	1,967	0,188
2º Modo	0,707	3,078	0,250
3º Modo	0,895	3,549	0,358
4º Modo	1,625	4,605	0,920
5º Modo	2,197	5,277	0,975
6º Modo	5,344	5,292	0,992
7º Modo	5,350	5,331	1,059
8º Modo	6,891	5,416	1,082
9º Modo	6,894	6,167	1,215
10º Modo	7,081	6,192	1,267
11º Modo	7,081	7,024	1,345
12º Modo	13,580	7,222	1,477
13º Modo	13,590	7,295	1,627
14º Modo	13,870	7,357	1,643
15º Modo	13,870	7,434	1,644



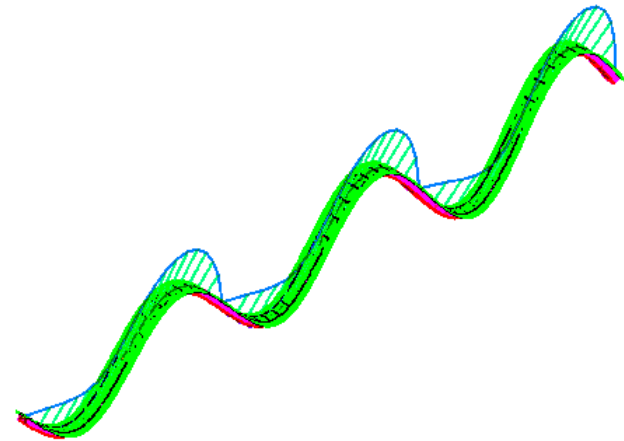
Dinâmica das Estruturas

Ponte da variante de Alcácer do Sal, Portugal



3º Modo de vibração – Modo de *pitch*

$f = 0,89 \text{ Hz}$



4º Modo de vibração – Modo de flexão no plano vertical

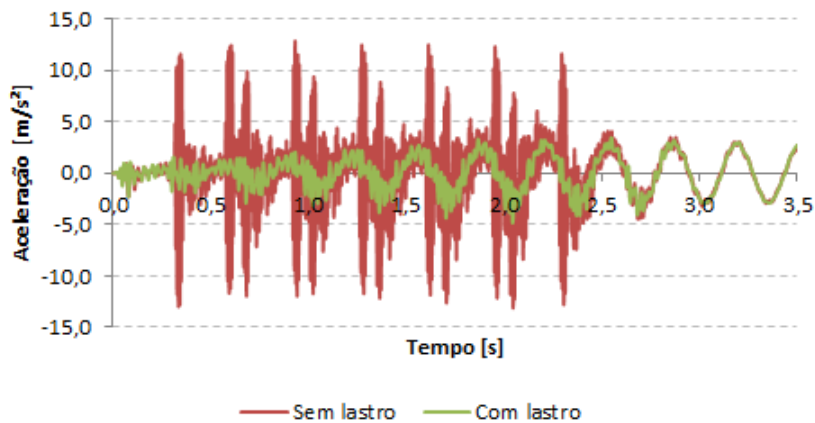
$f = 0,92 \text{ Hz}$

Dinâmica das Estruturas

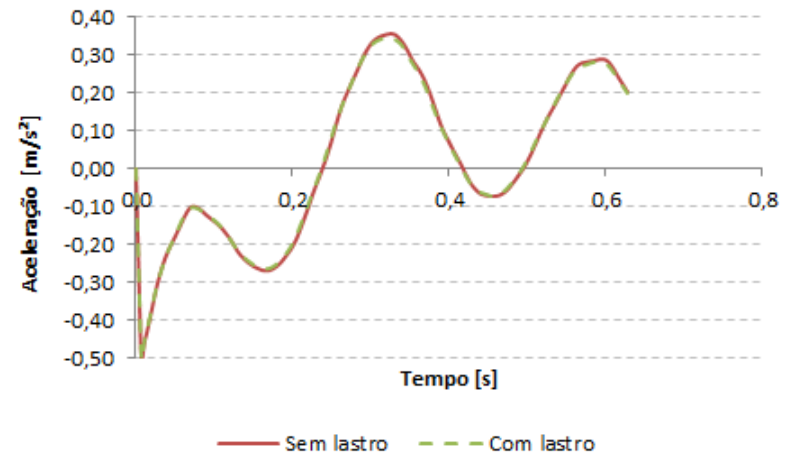
Ponte da variante de Alcácer do Sal, Portugal

Verificação de estados limites de serviço para os trilhos (esq.; acel. inferior a 5ms^{-2}) e conforto de passageiros (dir.; acel. inferior a 2.5ms^{-2})

Aceleração vertical - Trilho 1 - V=264km/h



Aceleração no vagão - V=264km/h



Dinâmica das Estruturas

Estádio do Morumbi, São Paulo, Brasil, concluído em 1970

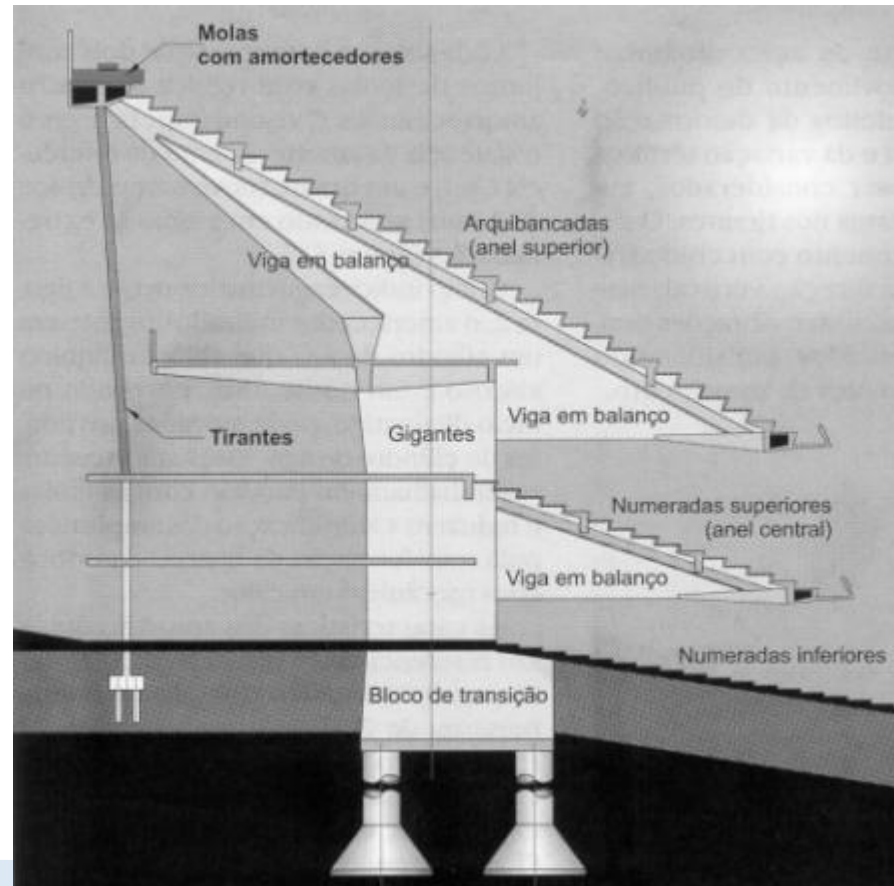
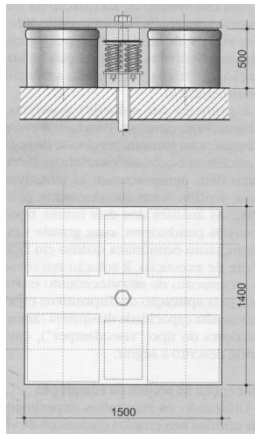
Apresentava vibrações excessivas devido à ressonância entre o carregamento do público pulando ritmadamente a 2 Hz e o modo fundamental da estrutura



Dinâmica das Estruturas

Estádio do Morumbi, São Paulo, Brasil

Mitigação das vibrações com instalação de amortecedores



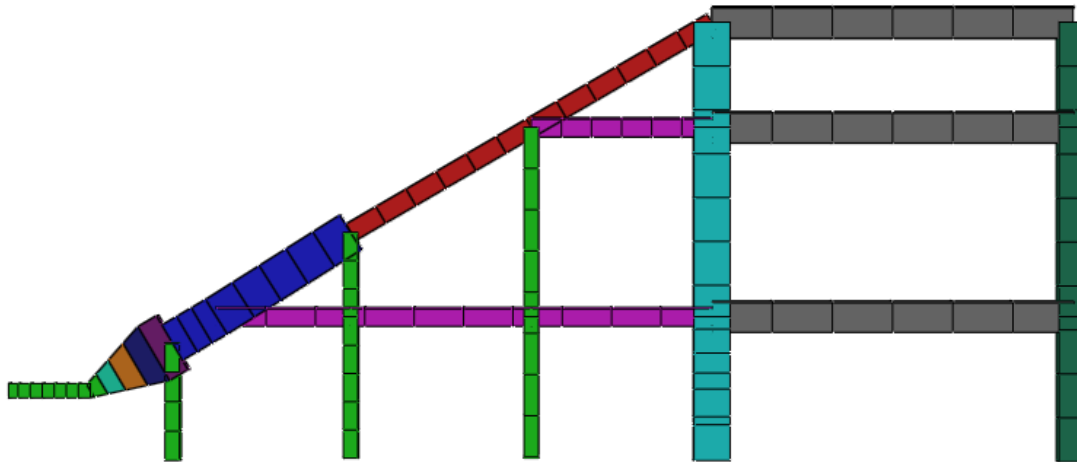
Dinâmica das Estruturas

Arena Corinthians, São Paulo, Brasil, concluído em 2014



Dinâmica das Estruturas

Vibração de arquibancada de estádio devido ao carregamento de público

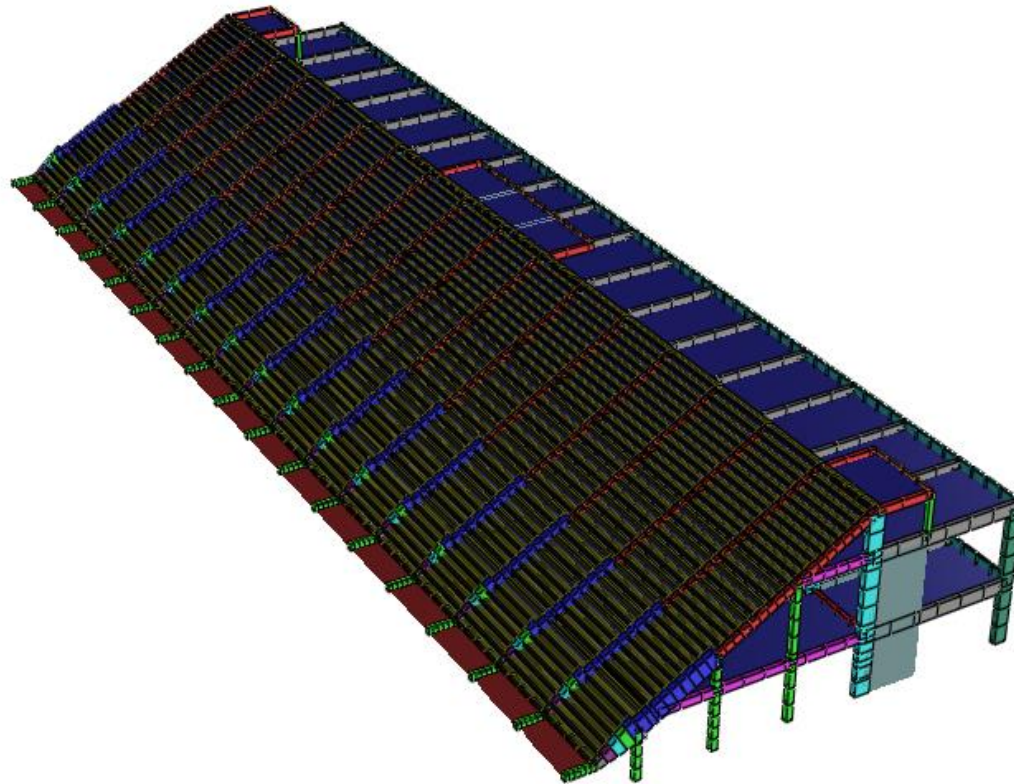


Modelo 2D

Zoe Champion, Master ENPC

Dinâmica das Estruturas

Vibração de arquibancada de estádio devido ao carregamento de público



Modelo 3D

Dinâmica das Estruturas

Vibração de arquibancada de estádio devido ao carregamento de público
Modelagem do carregamento de público

$$p(t) = 2000[1 + 0,25 \cos(\omega t) + 0,063 \cos(2\omega t) + 0,018 \cos(3\omega t)] N.m^{-2}$$

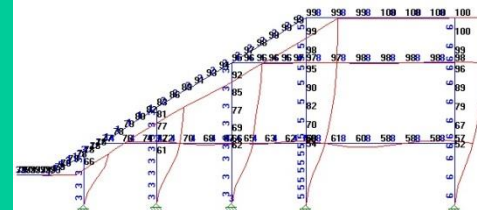
First Mode

$$\omega_1 = 15,8 \text{ rd. } s^{-1}$$

Swaying of the structure => disturbing to the audience.

$$\omega_1 \in [10; 16]$$

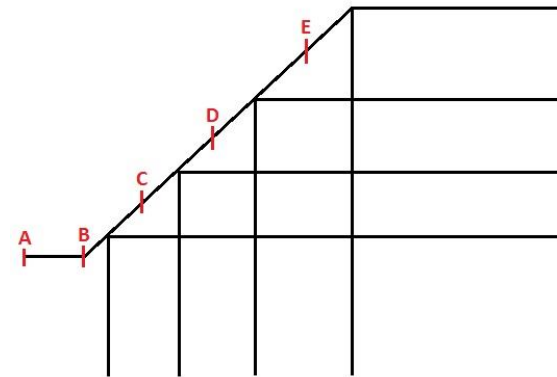
⇒ ω_1 chosen to be the forced frequency ω .



Dinâmica das Estruturas

Vibração de arquibancada de estádio devido ao carregamento de público

Point	Loading ($N \cdot m^{-1}$)	Maximum Acceleratio n ($m \cdot s^{-2}$)
A	$f(t)$	1,79
B	$f(t)$	0,49
C	$f(t)$	0,11
D	$f(t)$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
E	$f(t)$	$8,2 \cdot 10^{-3}$
A	$g(t)$	1,57
B	$g(t)$	0,43
C	$g(t)$	$9,9 \cdot 10^{-2}$
D	$g(t)$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
E	$g(t)$	$5,0 \cdot 10^{-3}$



The five points that I observed the acceleration

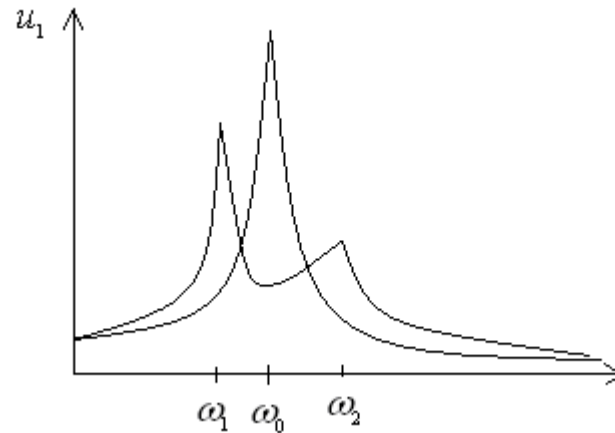
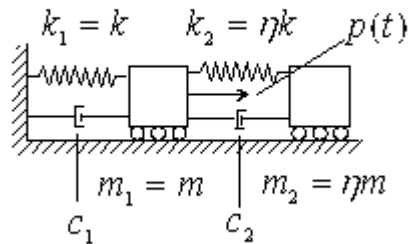
$$f(t) = 1500([1 + 0,25 \cos(15,8t) + 0,063 \cos(31,6t) + 0,018 \cos(47,4t)] N \cdot m^{-1}$$

$$g(t) = 1500([1 + 0,25 \cos(12,7t) + 0,063 \cos(25,4t) + 0,018 \cos(38,1t)] N \cdot m^{-1}$$

Dinâmica das Estruturas

Mitigação por Tuned-Mass Damper (TMD)

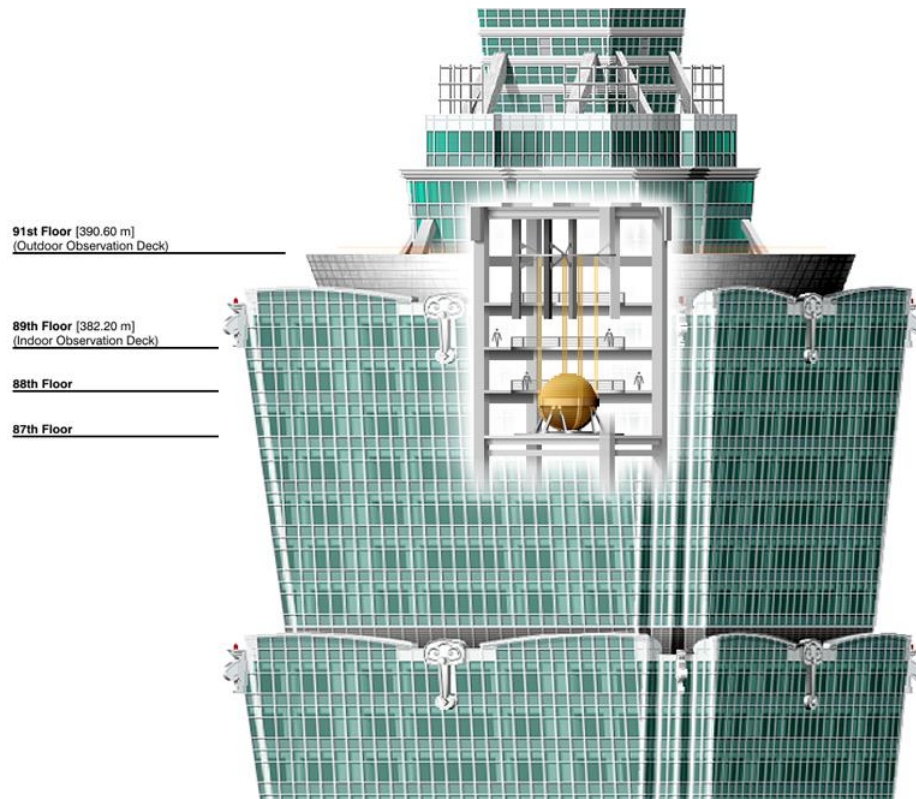
Princípio de funcionamento: “quebrar” o pico de ressonância em dois outros mais atenuados e distantes da frequência forçante



Dinâmica das Estruturas

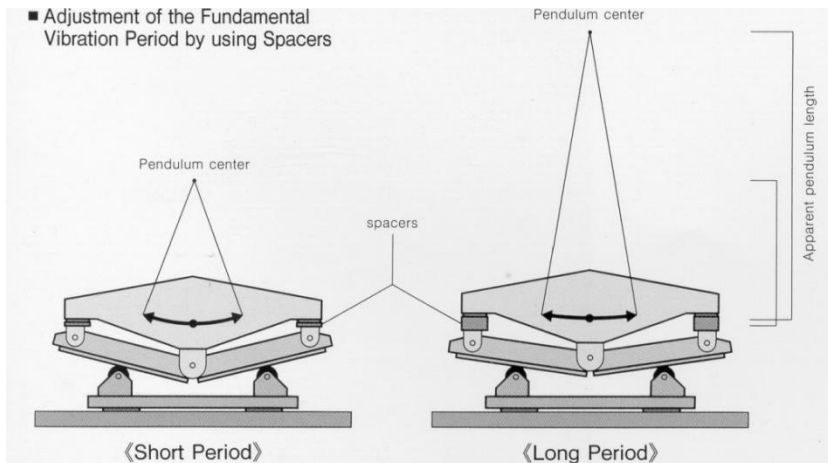
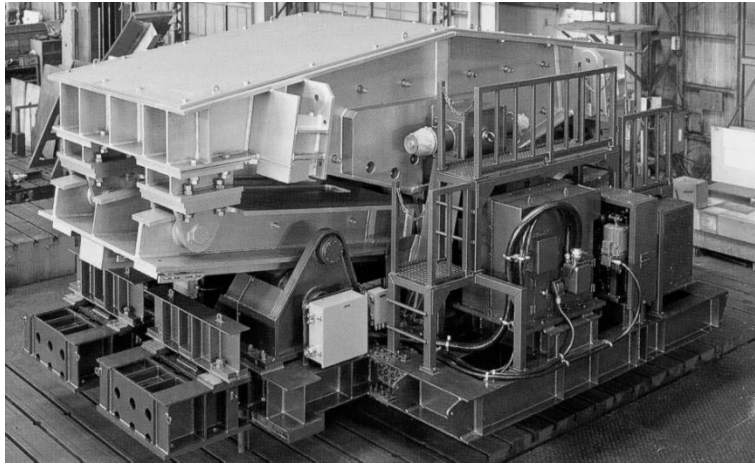
Taipei 101, Taipei

O pêndulo cônico como controlador passivo de vibrações



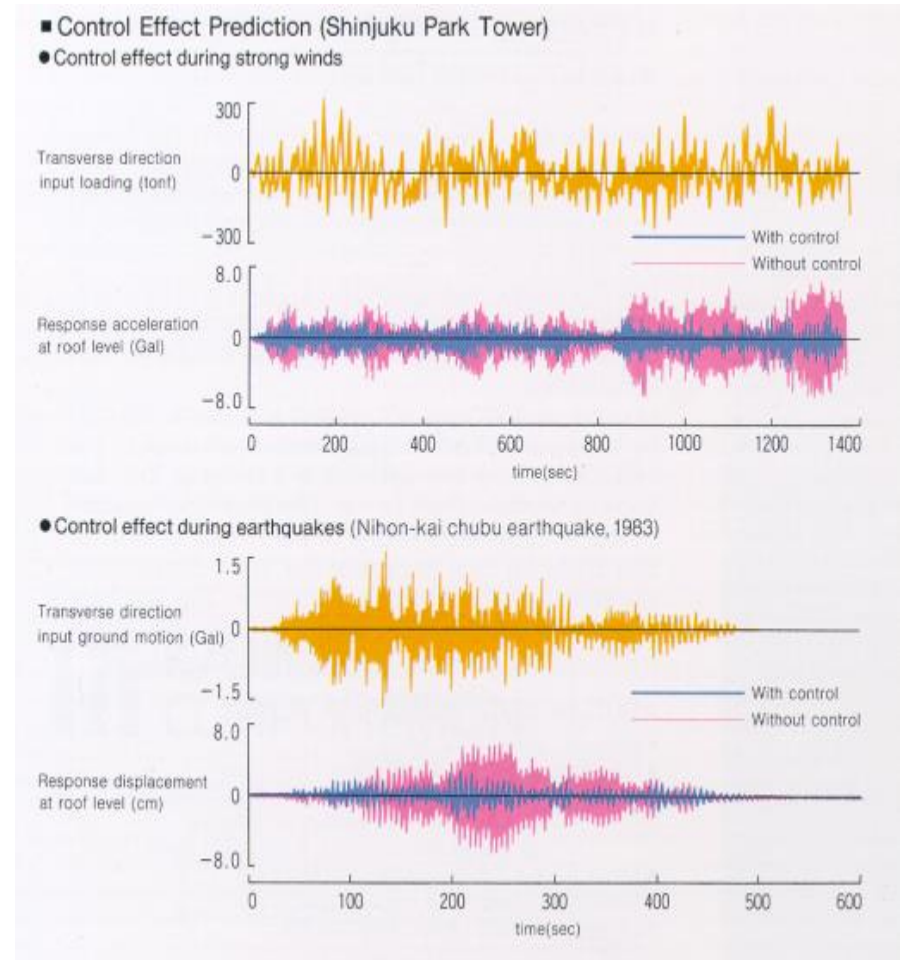
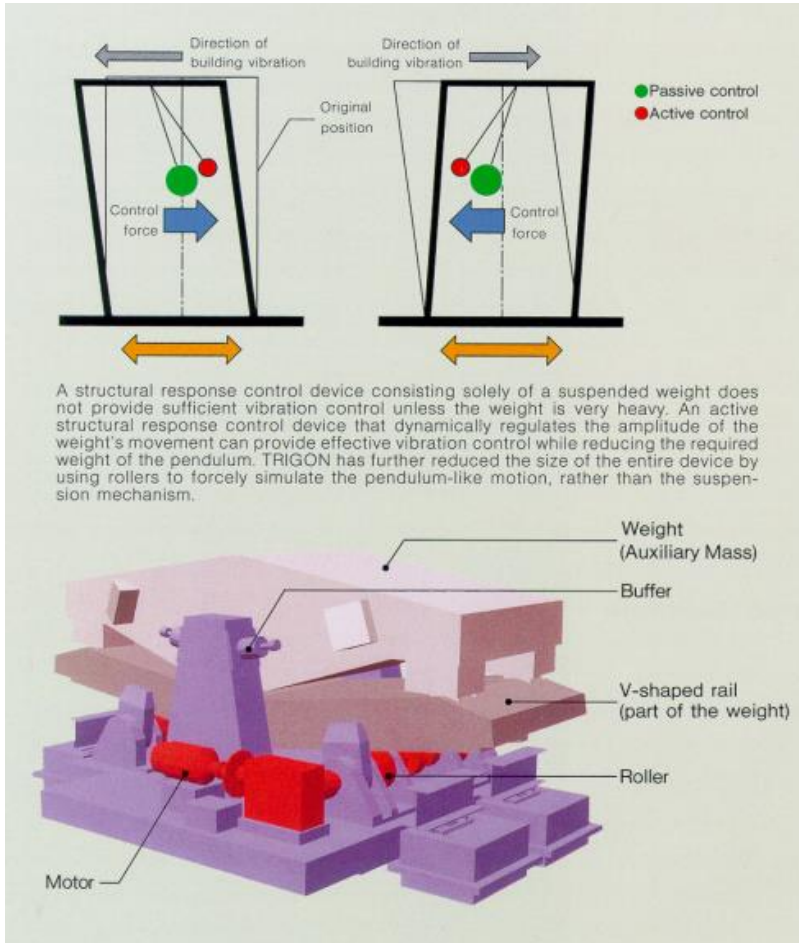
Dinâmica das Estruturas

Shinjuku Park Tower, Tóquio, Japão
Exemplo de controle ativo das vibrações



Dinâmica das Estruturas

Princípio de funcionamento do controlador ativo do Shinjuku Park Tower:
o pêndulo de “comprimento” regulável como elemento estabilizador



Dinâmica das Estruturas

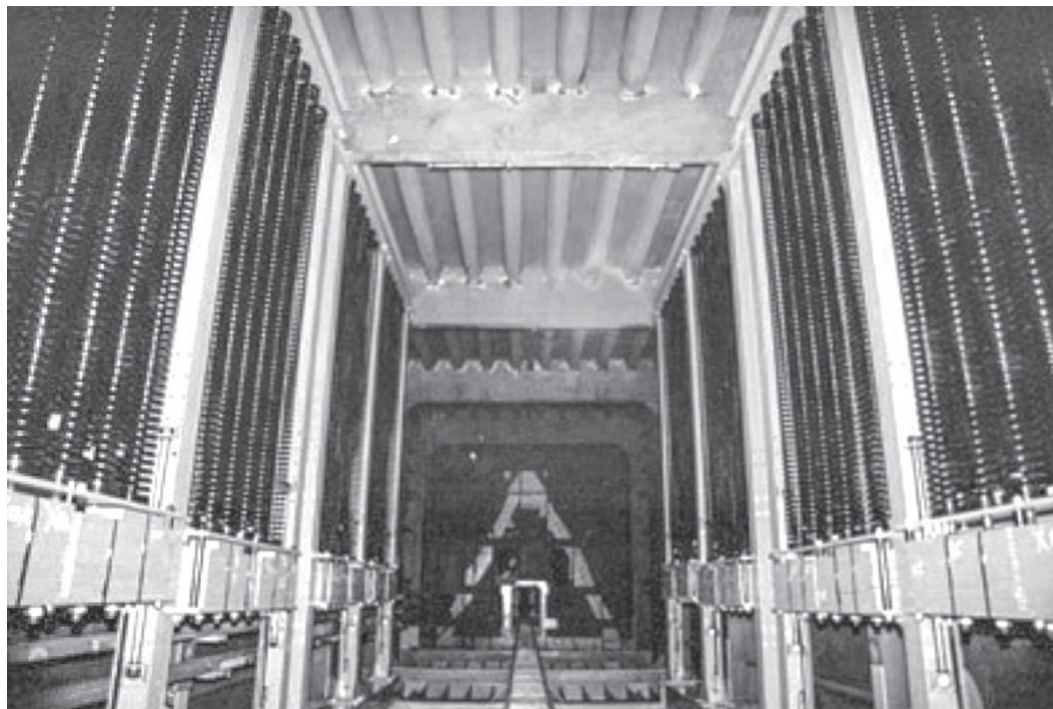
Ponte Rio-Niterói, Brasil, projeto do vão central de James Graham, concluída em 1974



By Halley Pacheco de Oliveira - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=25270029>

Dinâmica das Estruturas

TMD's da Ponte Rio-Niterói, Brasil <https://youtu.be/mOsazjJkqCc>



Projeto do Eng. Ronaldo Carvalho Battista

Dinâmica das Estruturas

Ponte Akashi-Kaikyo, Kobe, Japão, então em construção (1996)
concluída em 1998 (recorde mundial de vão livre 1991m)



Dinâmica das Estruturas

Ponte Akashi-Kaikyo, Kobe, Japão



Dinâmica das Estruturas

Ponte da Normandia, concluída em 1995, vão livre com 856m



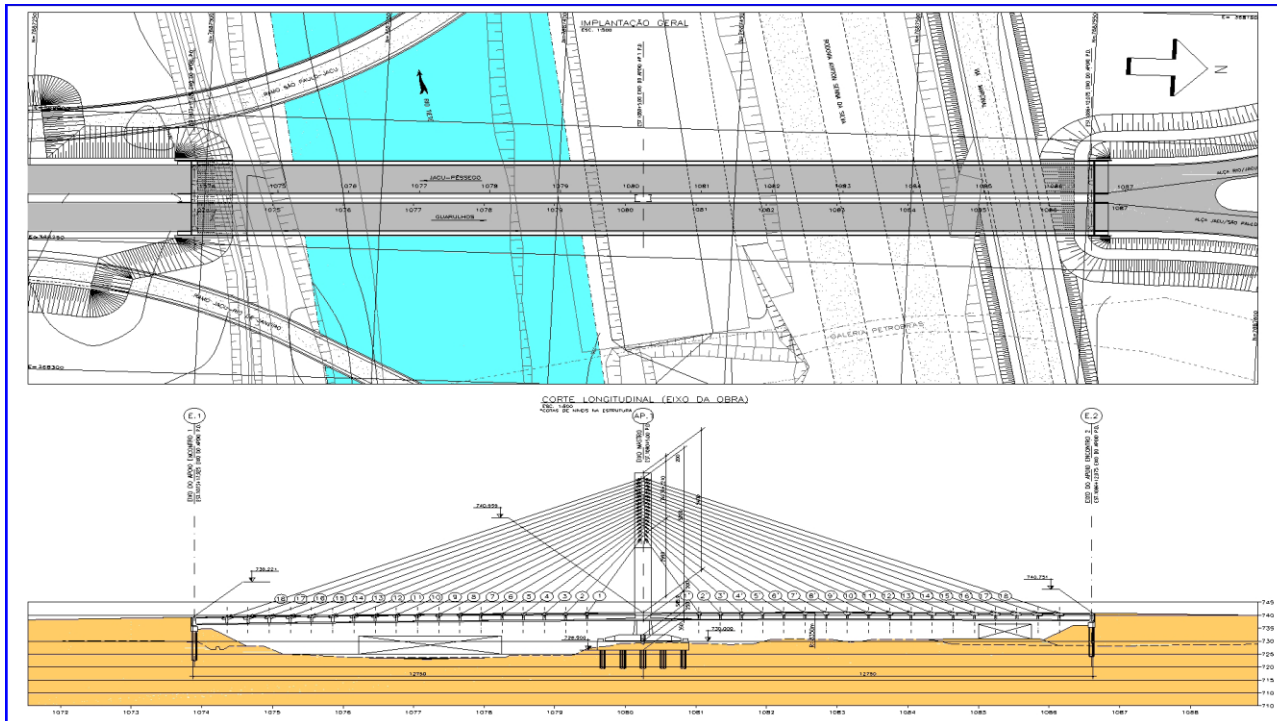
Dinâmica das Estruturas

Ponte Octávio Frias de Oliveira, São Paulo, Brasil, concluída em 2011



Dinâmica das Estruturas

Anteprojeto da Ponte Jacu-Pêssego

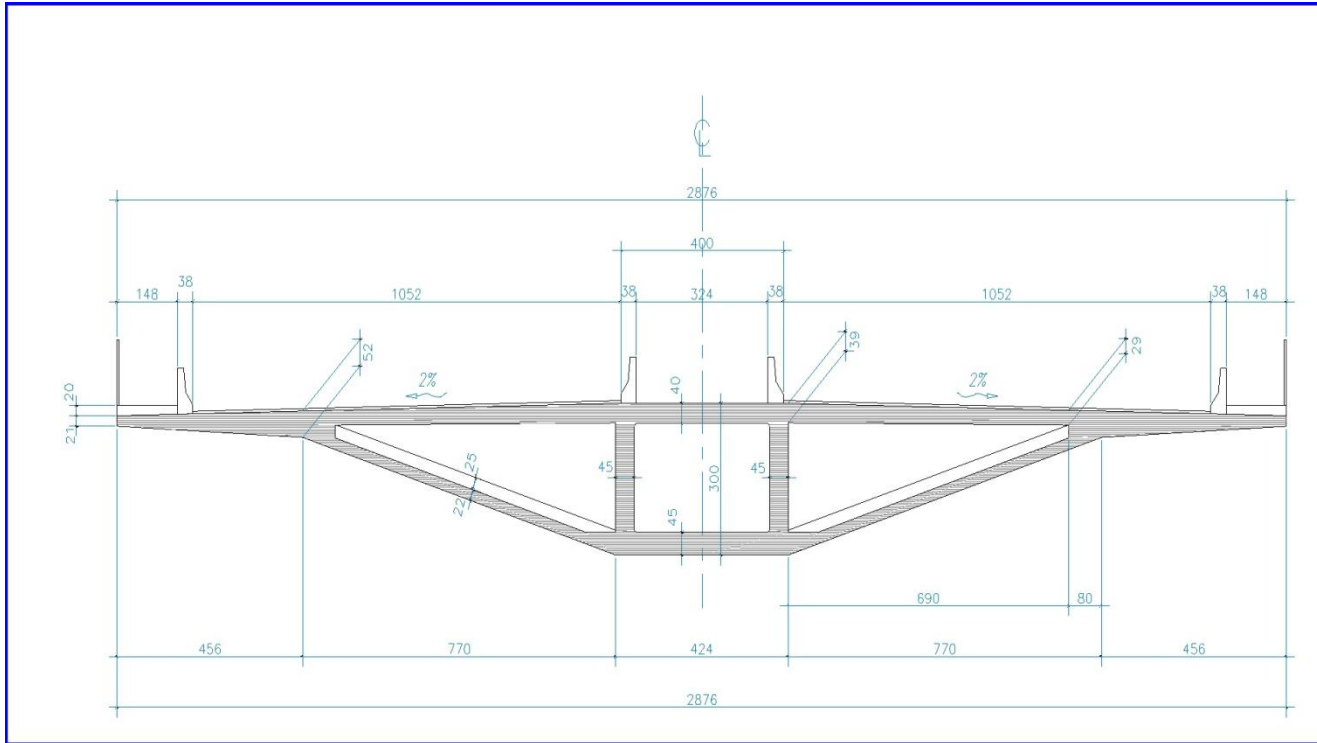


Implantação final

Relatório técnico de Daniel Lepkinson

Dinâmica das Estruturas

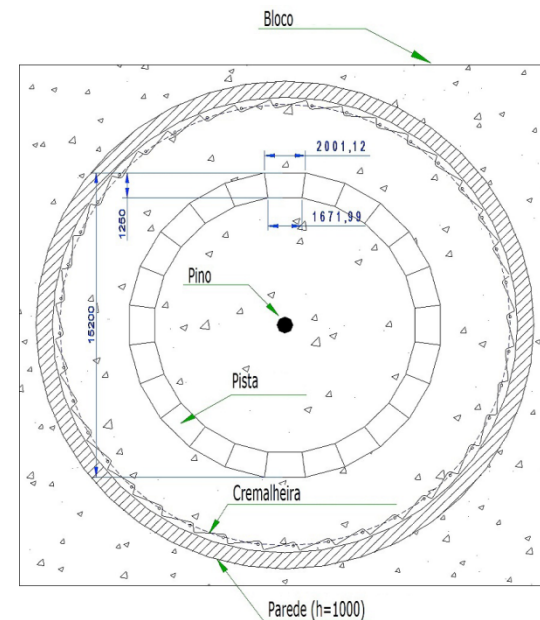
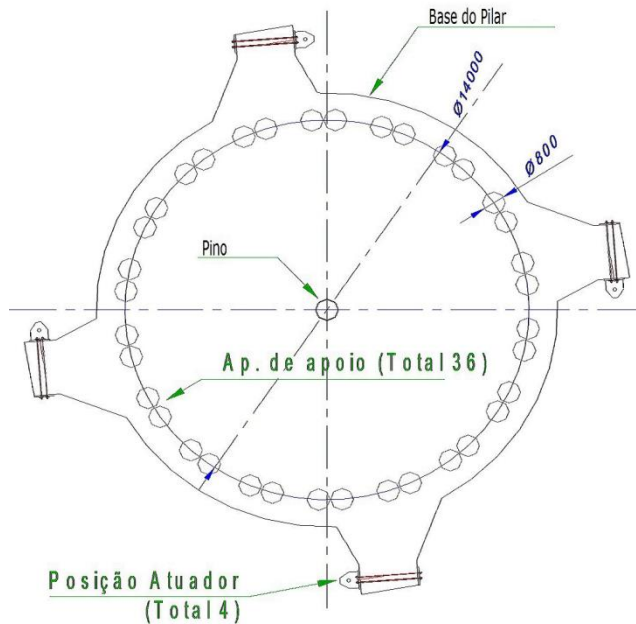
Anteprojeto da Ponte Jacu-Pêssego



Seção transversal

Dinâmica das Estruturas

Anteprojeto da Ponte Jacu-Pêssego



Sistema de posicionamento e face superior do bloco de fundação

Dinâmica das Estruturas

Anteprojeto da Ponte Jacu-Pêssego

