

INTRODUÇÃO À DINÂMICA DAS ESTRUTURAS

CARLOS EDUARDO NIGRO MAZILLI | JOÃO CYRILINOPE | MIGUEL LUZ SUCALEM | SERGIO OTTI

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, sec. VIII



Dinâmica das Estruturas

Great Hanshin Earthquake, Kobe, Japão, 1995



Dinâmica das Estruturas

Turbina de Itaipu, Brasil/Paraguai



Dinâmica das Estruturas

InterMoor Açú, São João da Barra, Brasil



Dinâmica das Estruturas

Estação de Metrô, Londres, Inglaterra



Dinâmica das Estruturas

Aeroporto Dulles, Washington, Estados Unidos



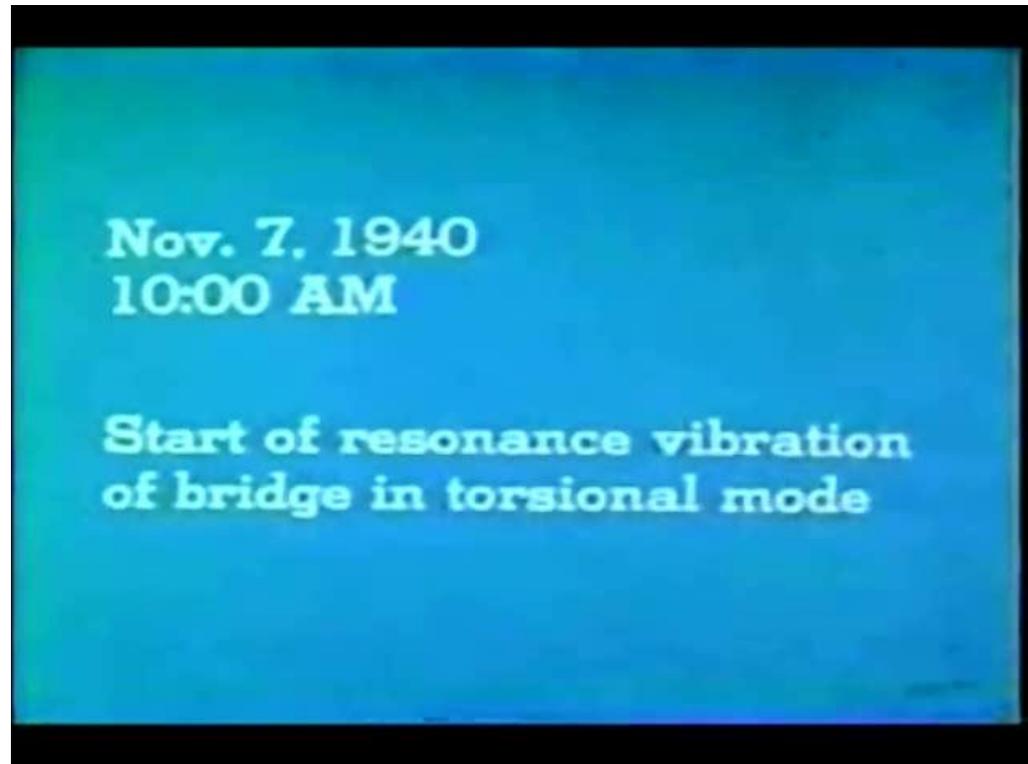
Dinâmica das Estruturas

Asa e superfícies de controle do avião BEM-RJ145



Dinâmica das Estruturas

Colapso da Ponte de Tacoma Narrows, Estados Unidos da América



Dinâmica das Estruturas

Millenium Bridge, Londres, Reino Unido



opening_day_high.wmv



Dinâmica das Estruturas

Forth Rail Bridge, Escócia



Dinâmica das Estruturas

Ponte da variante de Alcácer do Sal, Portugal



Dinâmica das Estruturas

Ponte da variante de Alcácer do Sal, Portugal

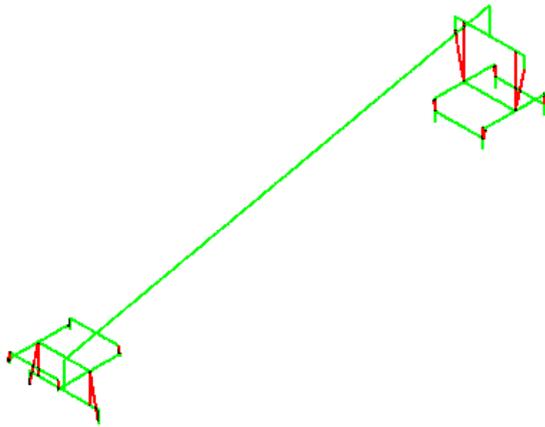
Frequências naturais (Hz)

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

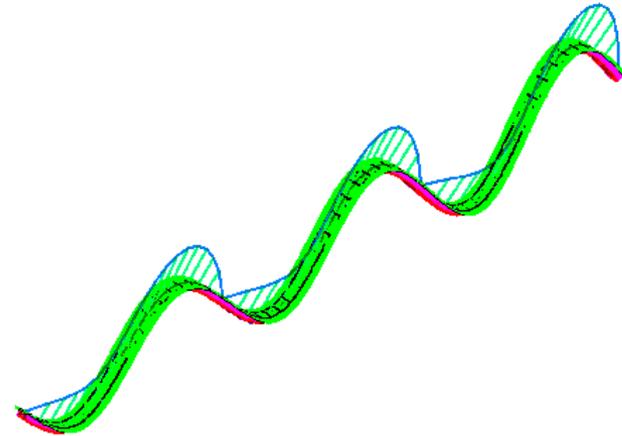


Dinâmica das Estruturas

Ponte da variante de Alcácer do Sal, Portugal



3º Modo de vibração – Modo de *pitch*
 $f = 0,89$ Hz

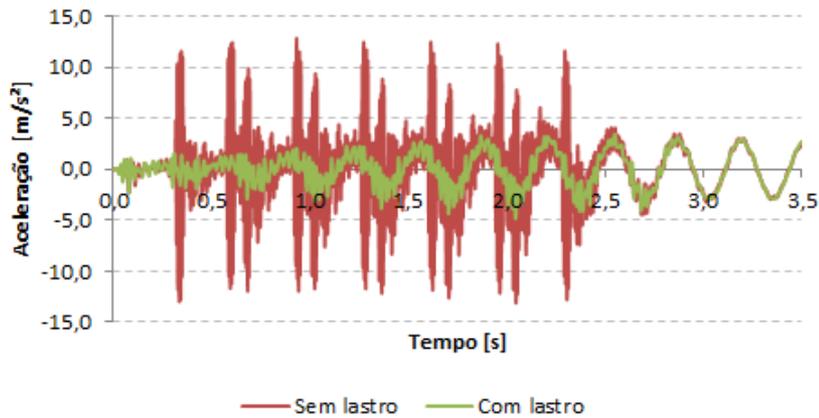


4º Modo de vibração – Modo de flexão no plano vertical
 $f = 0,92$ Hz

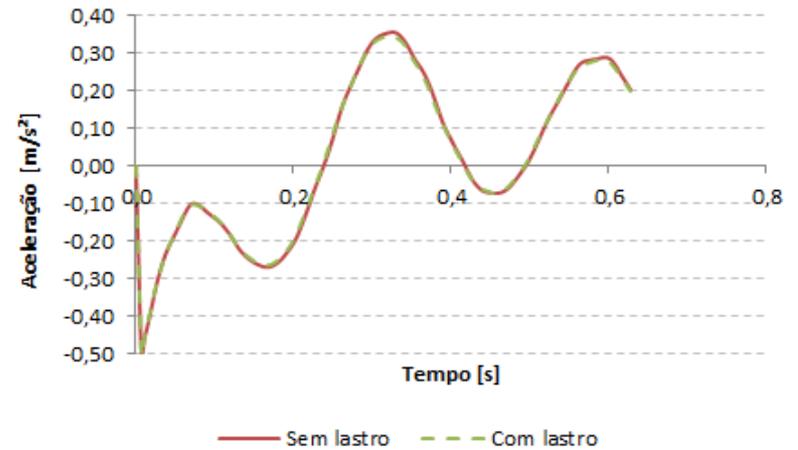
Dinâmica das Estruturas

Ponte da variante de Alcácer do Sal, Portugal

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



Aceleração no vagão - V=264km/h



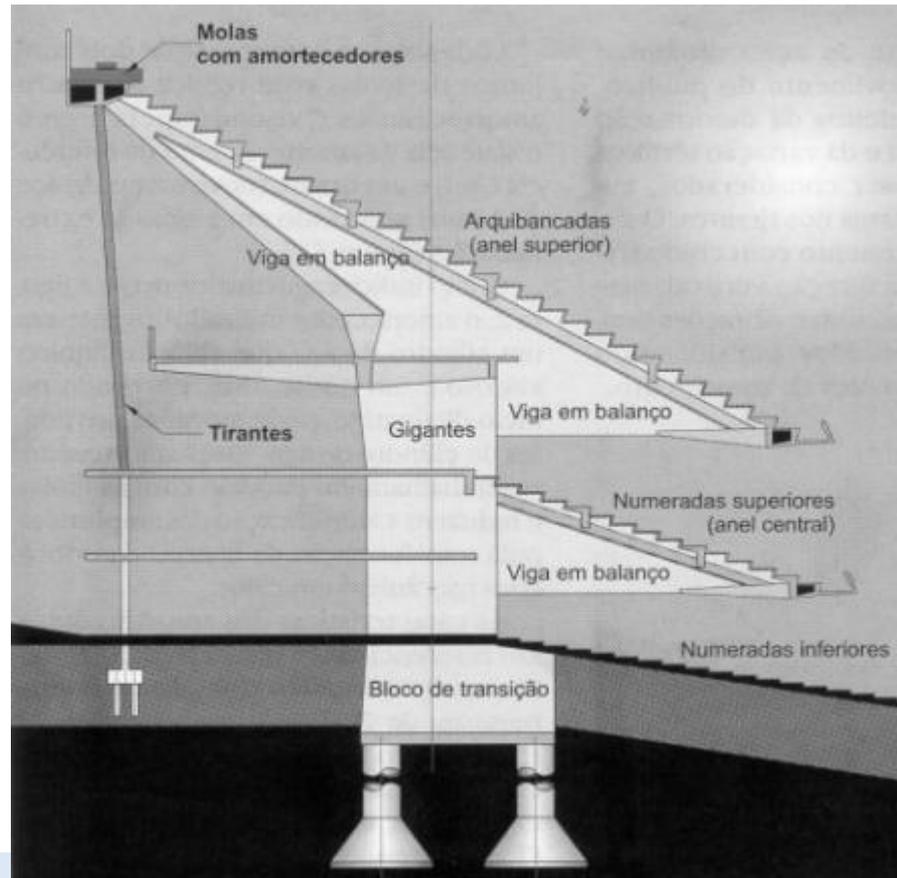
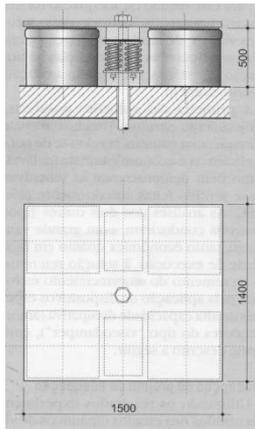
Dinâmica das Estruturas

Estádio do Morumbi, São Paulo, Brasil



Dinâmica das Estruturas

Estádio do Morumbi, São Paulo, Brasil



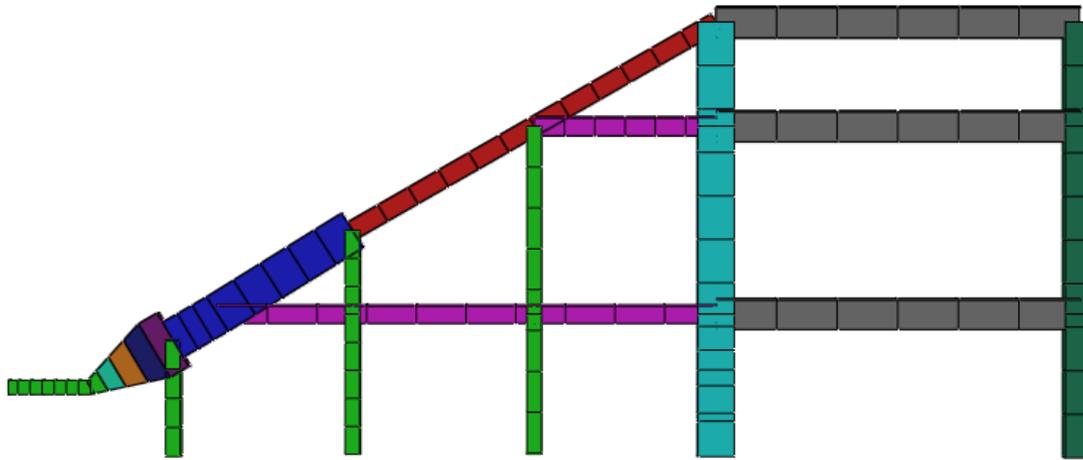
Dinâmica das Estruturas

Arena Corinthians, São Paulo, Brasil



Dinâmica das Estruturas

Vibração de arquibancada de estádio devido ao carregamento de público

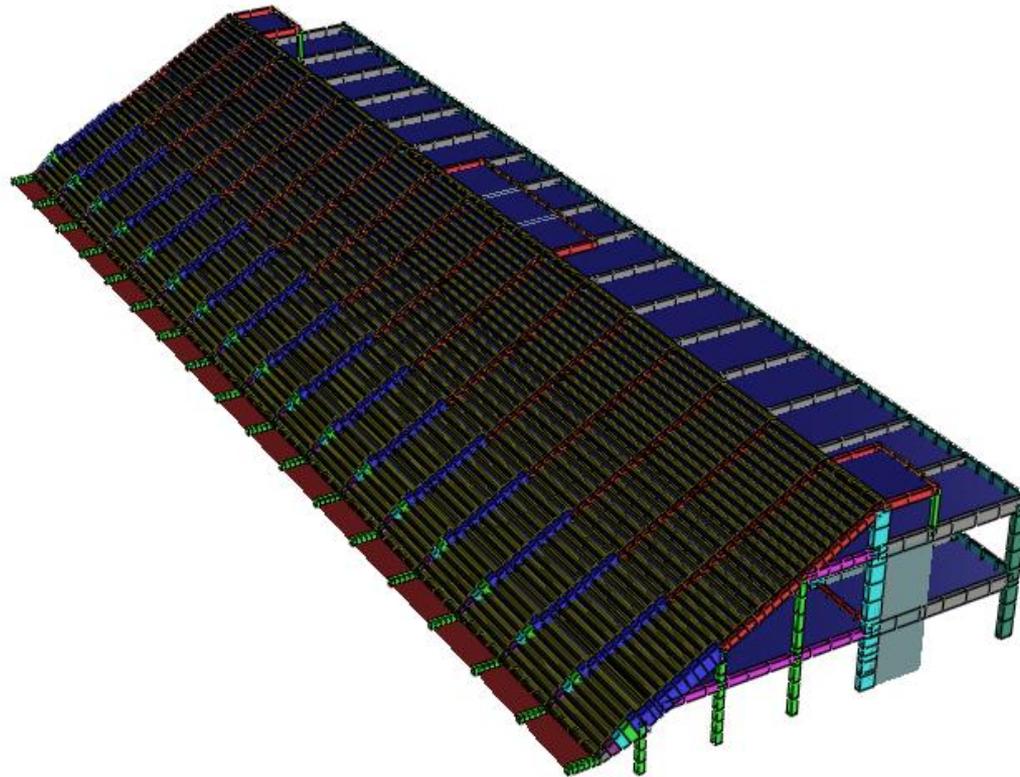


Modelo 2D

Tese de mestrado, École des Ponts ParisTech, Zoe Champion com supervisão de Carlos E.N.Mazzilli

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

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

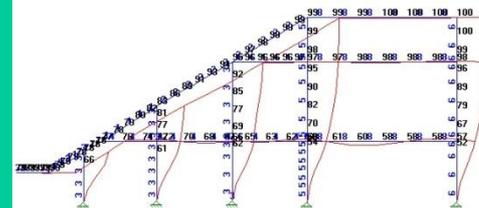
First Mode

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

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

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

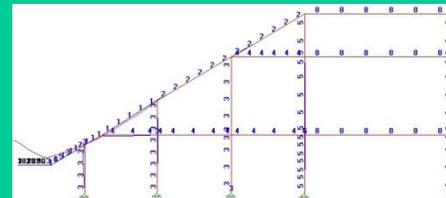
Second Mode

$$\omega_2 = 38,1 \text{ rd. s}^{-1}$$

Oscillation of the cantilever =>
disturbing to the audience.

$$\frac{\omega_2}{3} = 12,7 \in [10; 16]$$

⇒ $\frac{\omega_2}{3}$ chosen to be the forced
frequency ω .



Dinâmica das Estruturas

Vibração de arquibancada de estádio devido ao carregamento de público

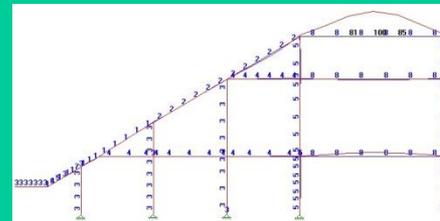
$$p(t) = 2000[1 + 0,25 \cos(\omega t) + 0,063 \cos(2\omega t) + 0,018 \cos(3\omega t)] N \cdot m^{-2}$$

Third Mode

$$\omega_3 = 46,2 \text{ rd. s}^{-1}$$

Oscillation of the rear of the structure =>
not disturbing to the audience.

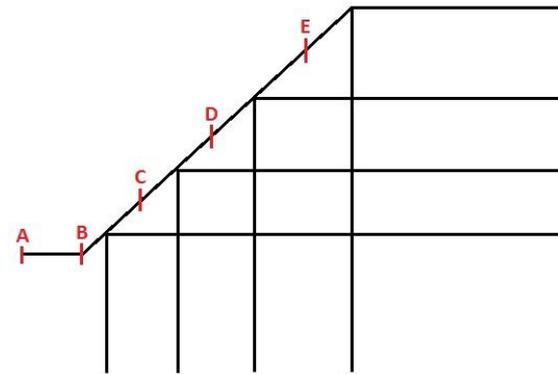
⇒ Not an interesting forced frequency



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	$g(t)$	$5,0 \cdot 10^{-3}$



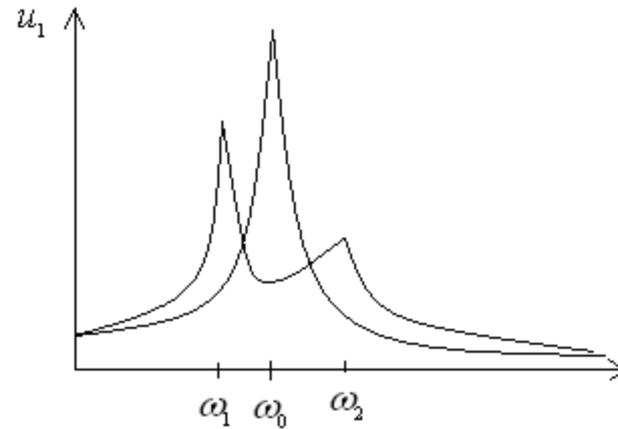
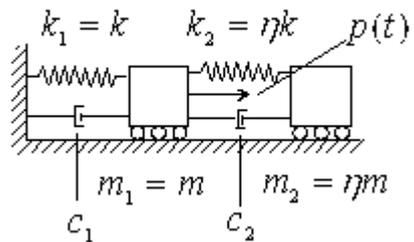
The five points that I observed the acceleration

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

$$g(t) = 1500([1 + 0,25 \cos(4,2t) + 0,063 \cos(8,5t) + 0,018 \cos(12,7t)] N \cdot m^{-1}$$

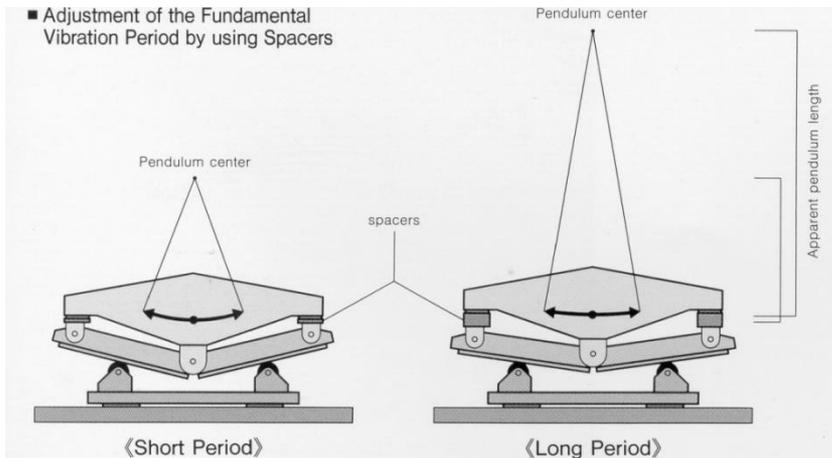
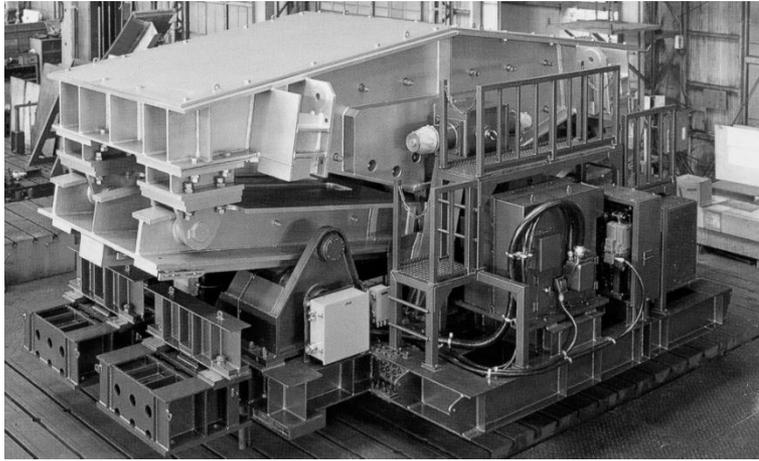
Dinâmica das Estruturas

Mitigação por Tuned-Mass Damper (TMD)



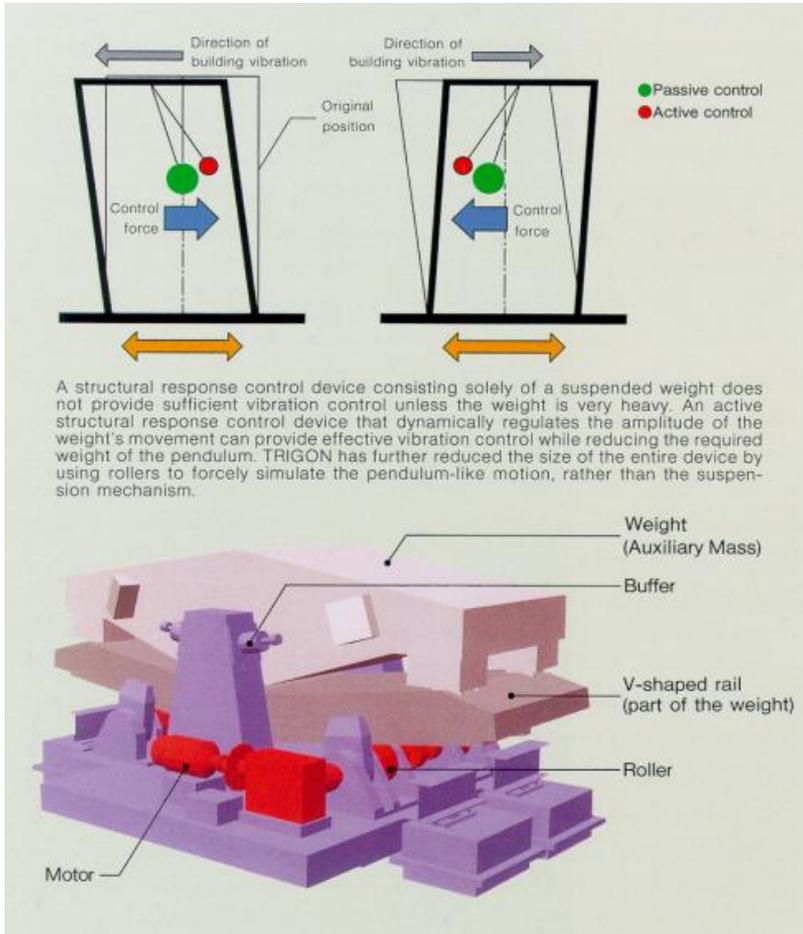
Dinâmica das Estruturas

Shinjuku Park Tower, Tóquio, Japão



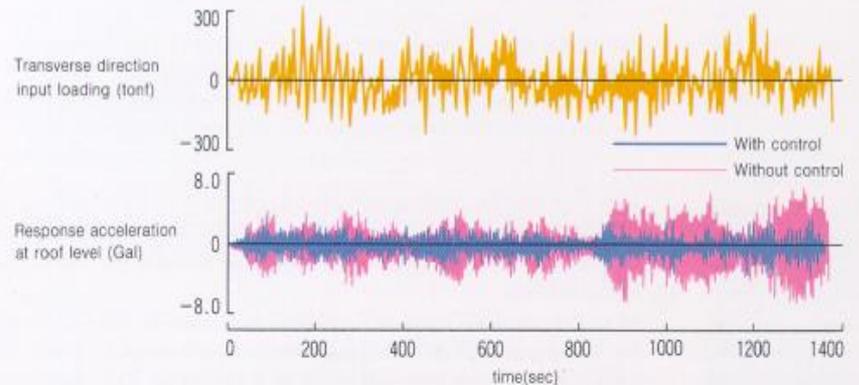
Dinâmica das Estruturas

Edifício alto, Tóquio, Japão

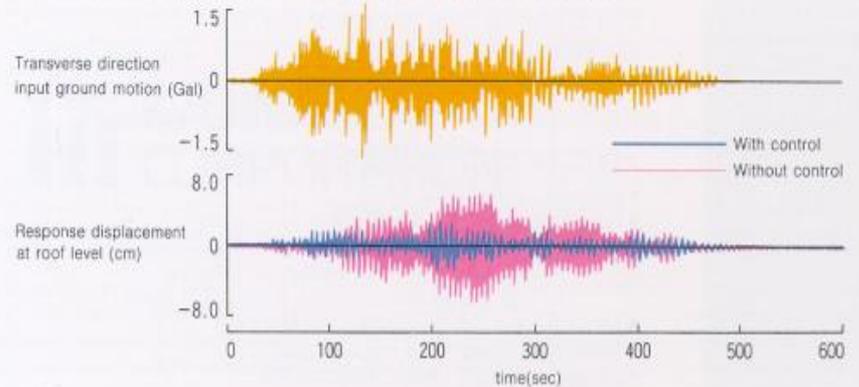


Control Effect Prediction (Shinjuku Park Tower)

Control effect during strong winds

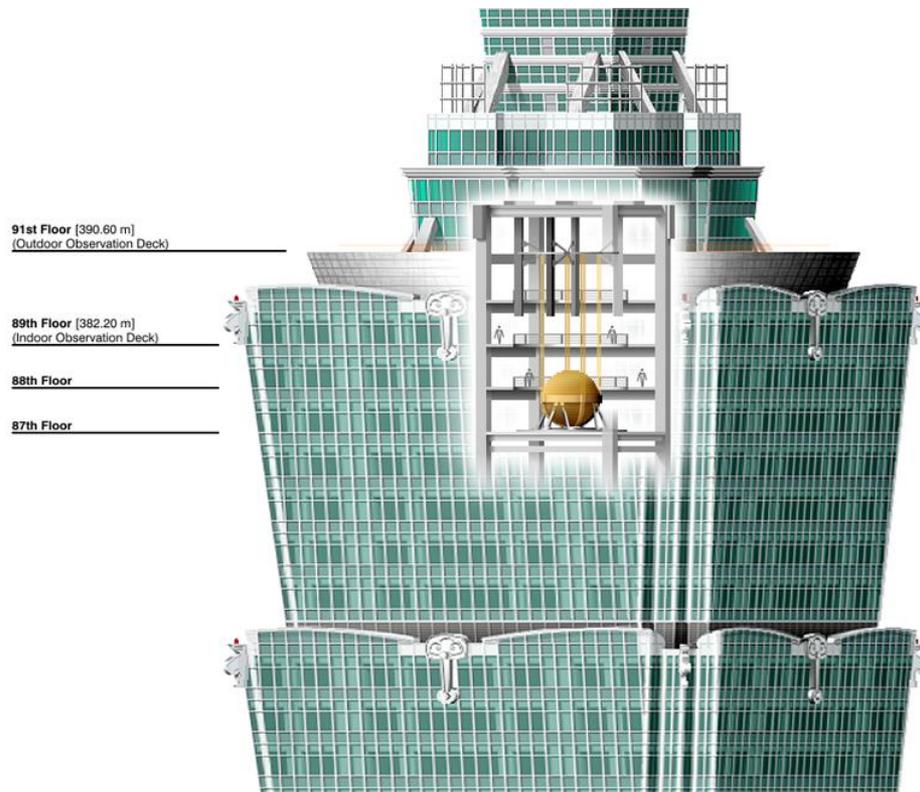


Control effect during earthquakes (Nihon-kai chubu earthquake, 1963)



Dinâmica das Estruturas

Taipei 101, Taipei



Dinâmica das Estruturas

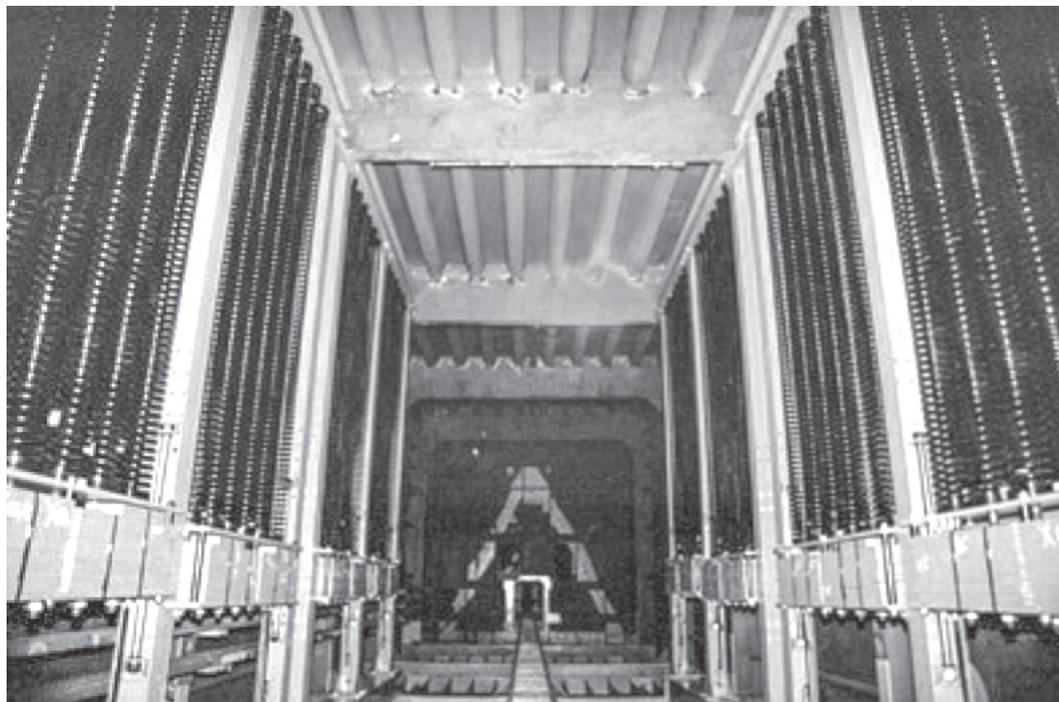
Ponte Rio-Niterói, Brasil



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



Vibração Ponte Rio Niteroi.htm

Dinâmica das Estruturas

Ponte Akashi-Kaikyo, Kobe, Japão



Dinâmica das Estruturas

Ponte Akashi-Kaikyo, Kobe, Japão



Dinâmica das Estruturas

Ponte da Normandia



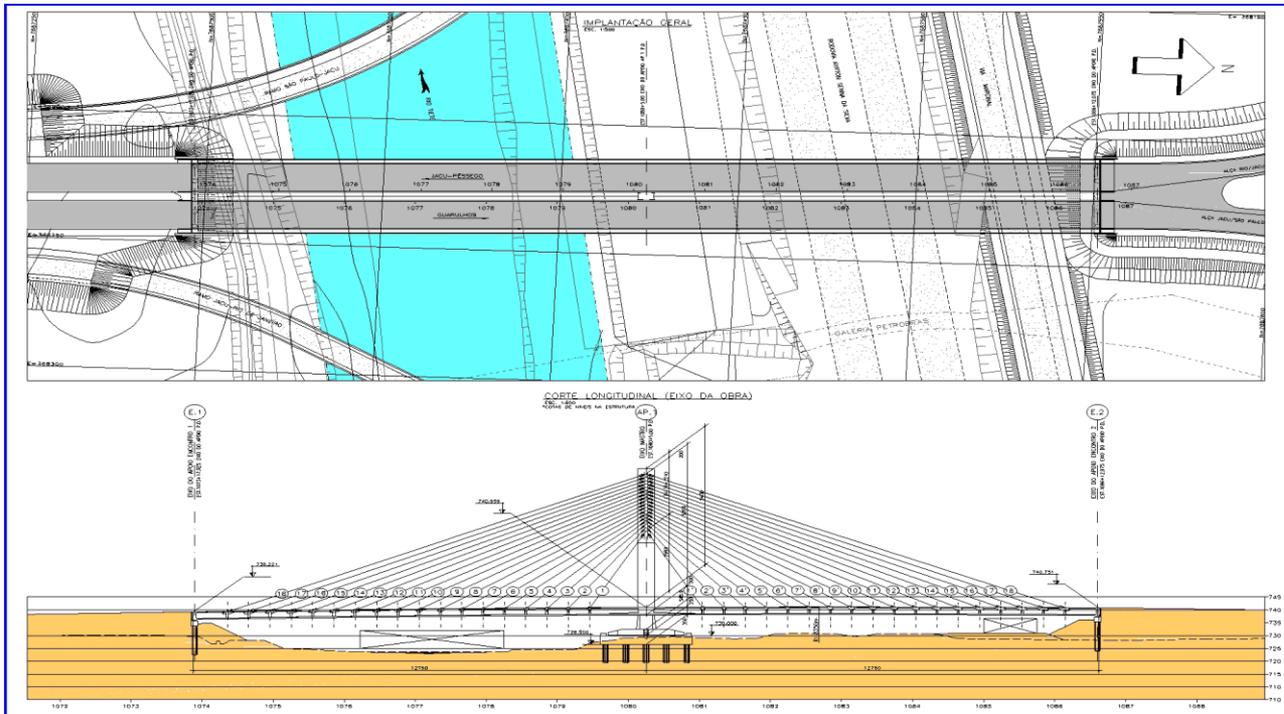
Dinâmica das Estruturas

Ponte Octávio Frias de Oliveira, São Paulo, Brasil



Dinâmica das Estruturas

Anteprojeto da Ponte Jacu-Pêssego

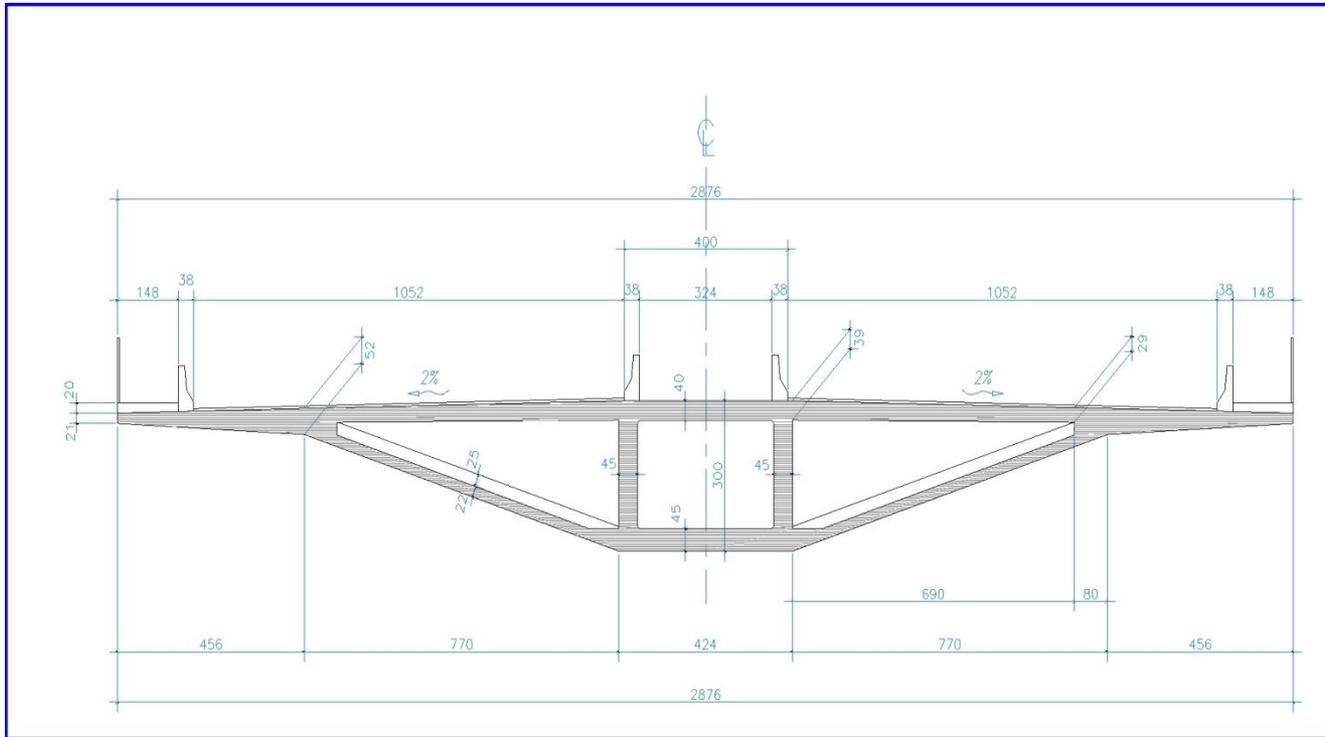


Implantação final

Relatório técnico de Daniel Lepkinson, Miguel L. Bucalem e Carlos E.N. Mazzilli

Dinâmica das Estruturas

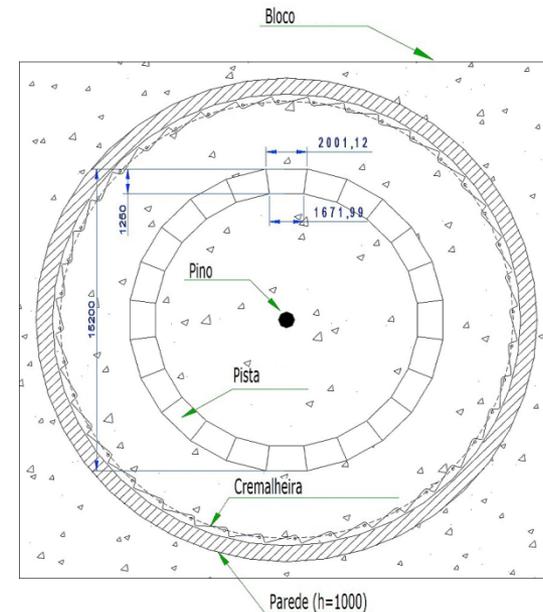
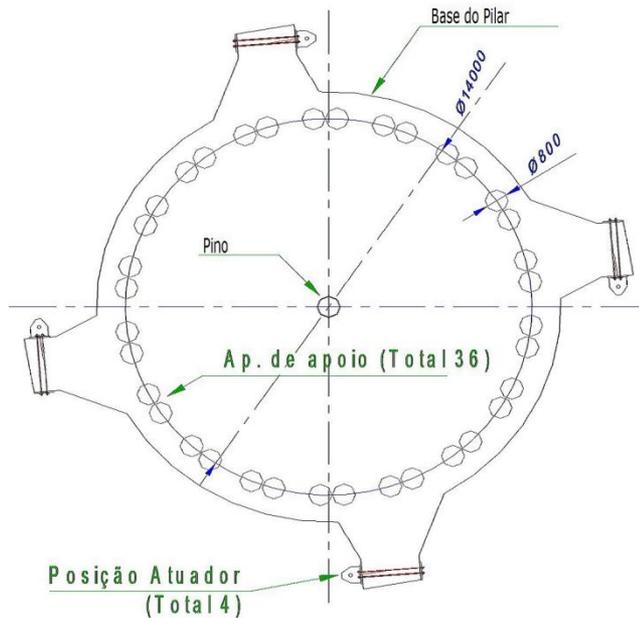
Anteprojeto da Ponte Jacu-Pêssego



Seção transversal

Dinâmica das Estruturas

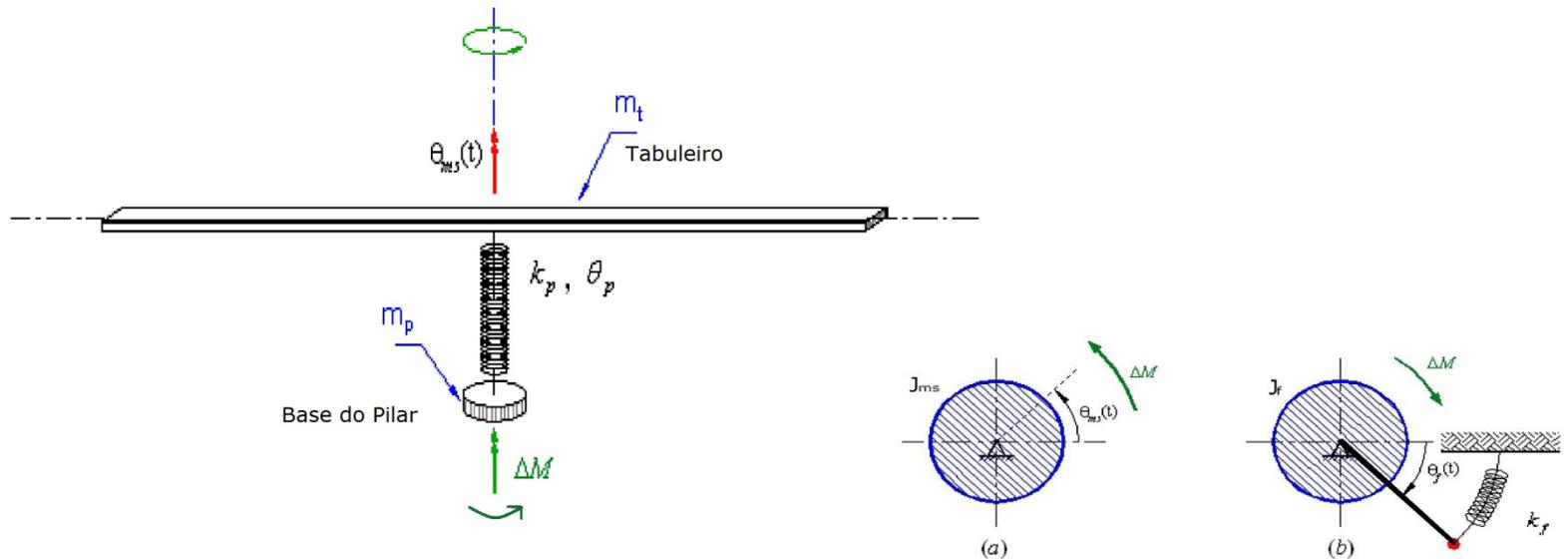
Anteprojeto da Ponte Jacu-Pêssego



Sistema de posicionamento e face superior do bloco de fundação

Dinâmica das Estruturas

Anteprojeto da Ponte Jacu-Pêssego



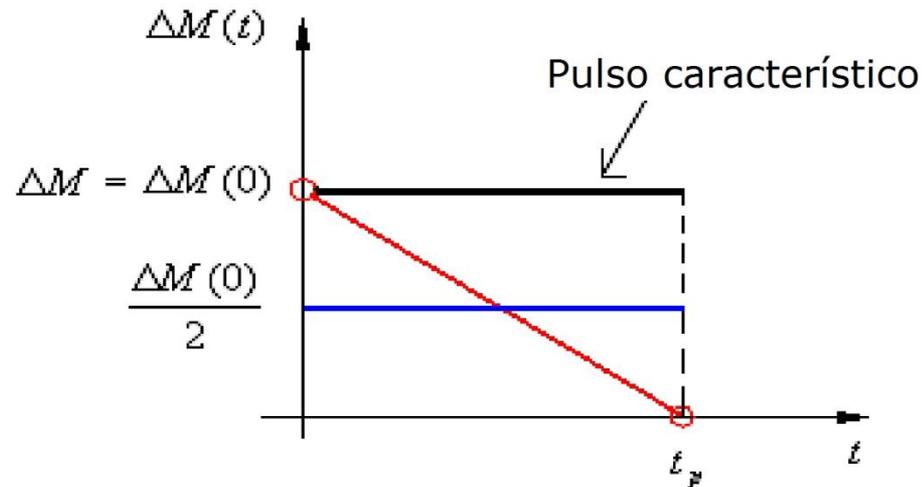
Modelo de baixa hierarquia para meso/superestrutura (a) e fundação (b)

Dinâmica das Estruturas

Anteprojeto da Ponte Jacu-Pêssego

$$\Delta M_0 = 52000 \text{ kNm}$$

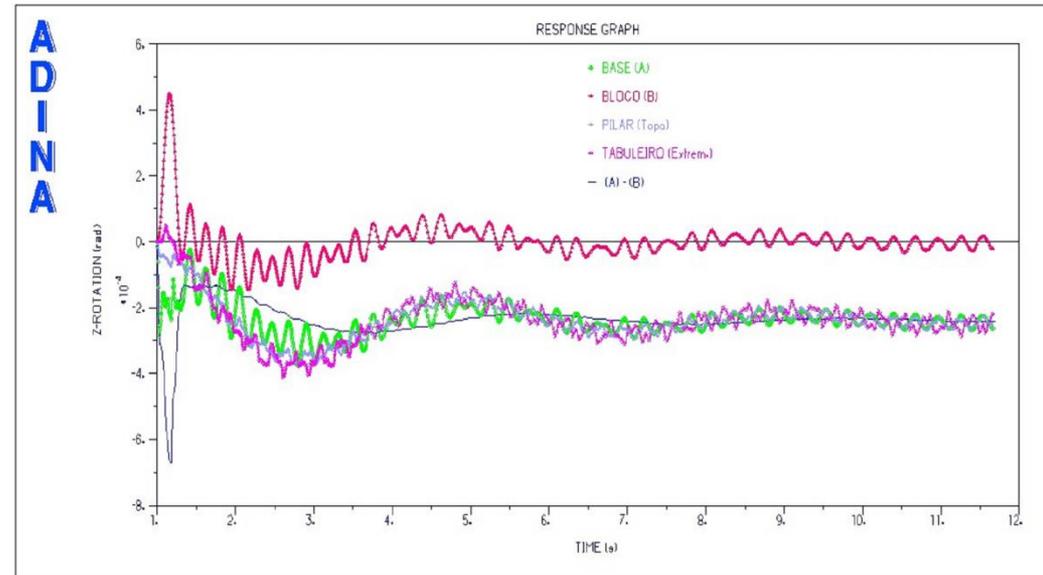
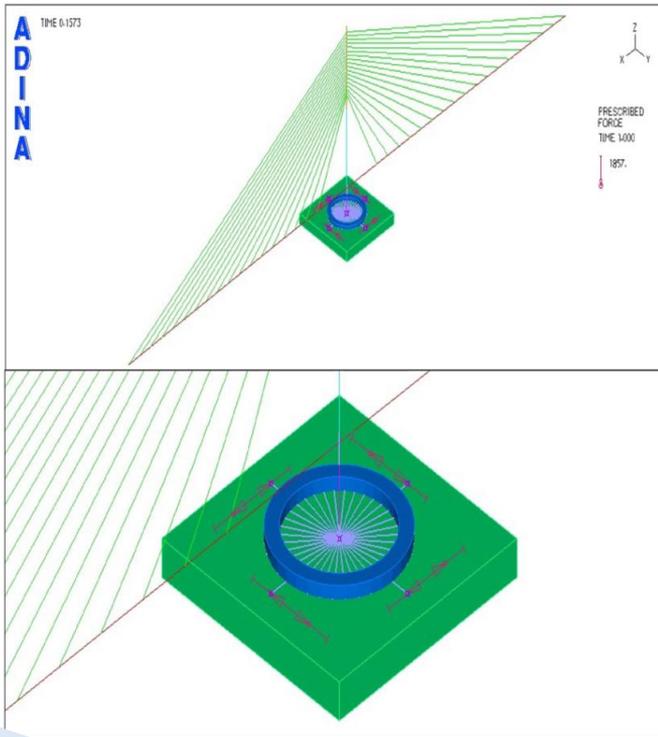
$$t_p = 1,813 \text{ ms}$$



Carregamento impulsivo de curta duração

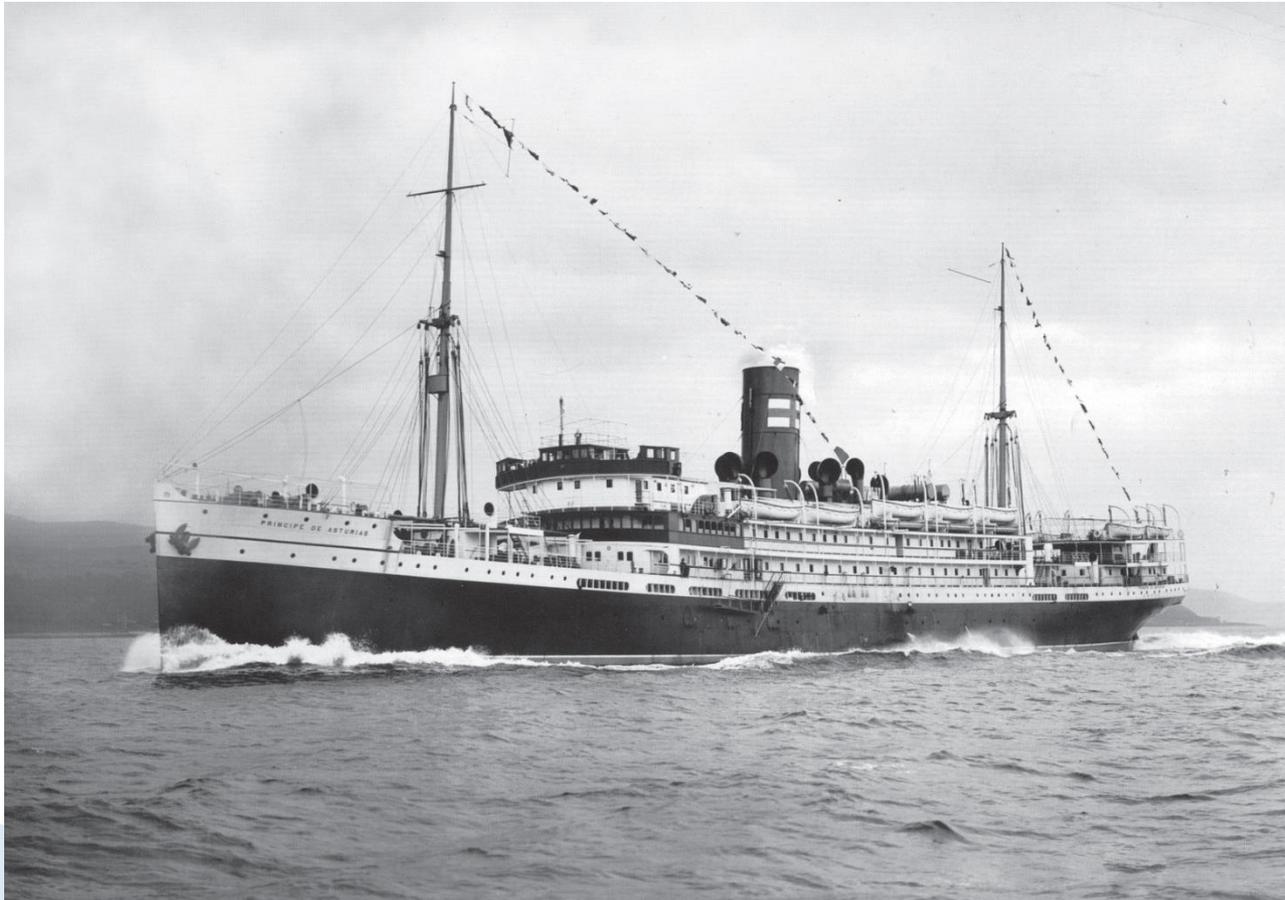
Dinâmica das Estruturas

Anteprojeto da Ponte Jacu-Pêssego



Dinâmica das Estruturas

Transatlântico Príncipe de Asturias



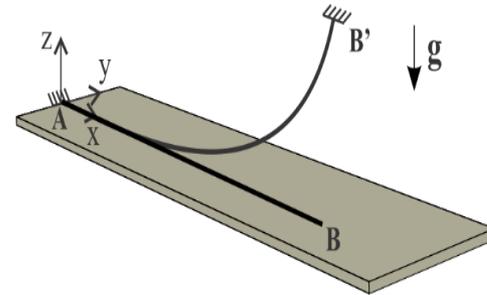
Dinâmica das Estruturas

Plataforma P-51, Bacia de Campos, Brasil

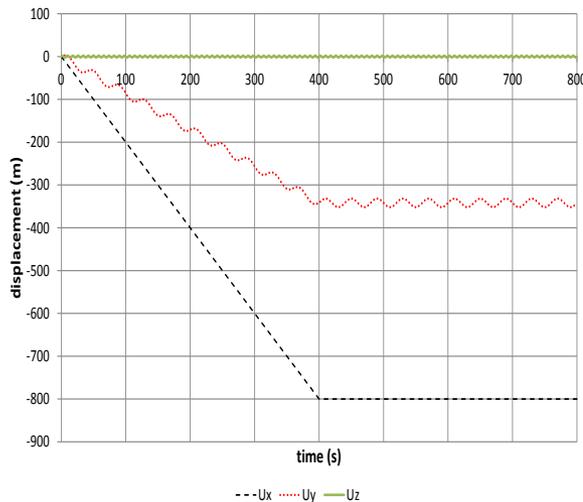


Dinâmica das Estruturas

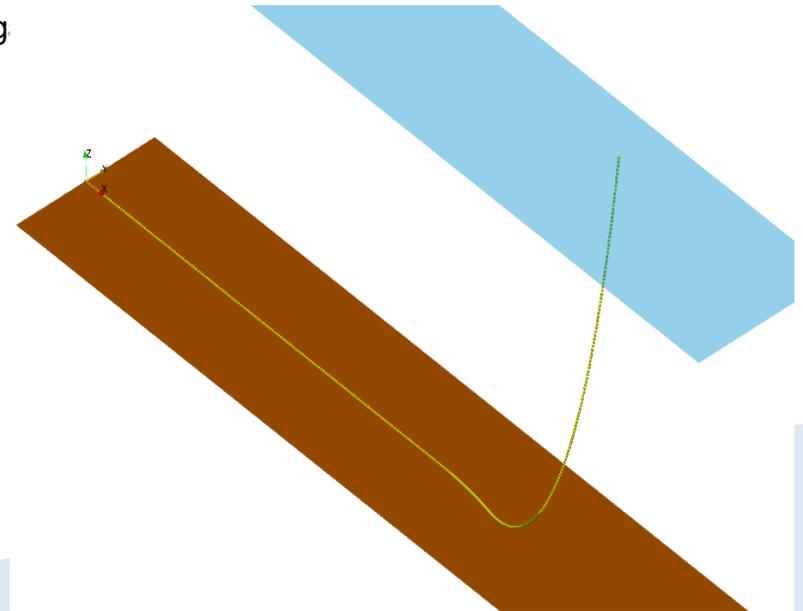
Sistemas estruturais oceânicos: *risers* em catenária



- Análise dividida em estática + dinâmica
- É possível avaliar esforços solicitantes em pontos críticos da estrutura (ex.: topo e ponto de contato com o solo)
- É possível estimar o dano estrutural acumulado (ex.: fadig)



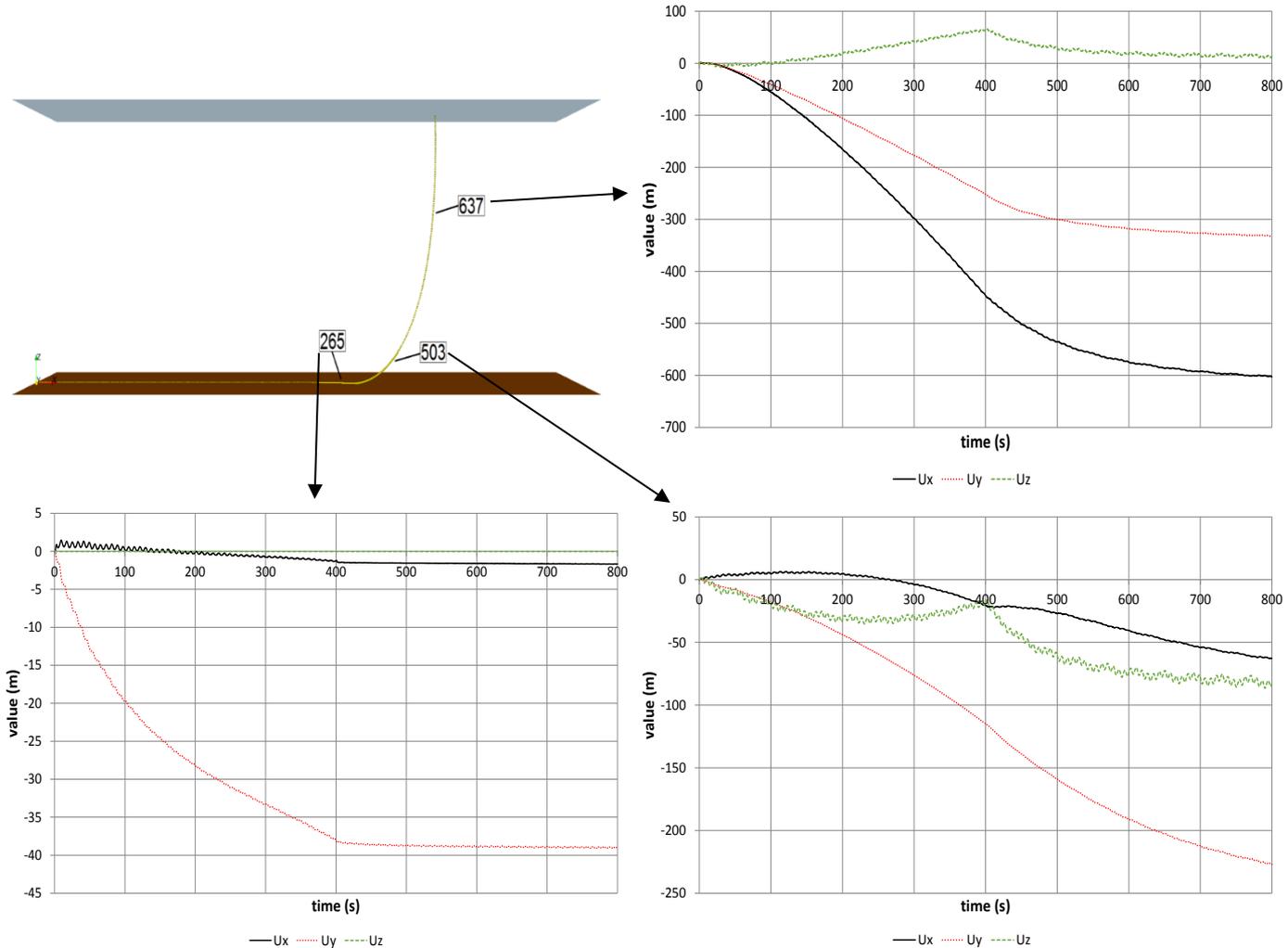
Movimento da plataforma (topo)



A. Gay Neto. "Dynamics of Offshore Risers using a Geometrically-exact Beam Model with Hydrodynamic Loads and Contact with the Seabed". Eng. Structures, V. 125 438-454, 2016.

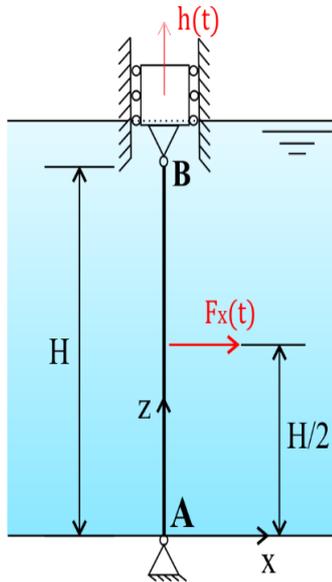
Dinâmica das Estruturas

Séries temporais de deslocamentos de alguns pontos do *riser*

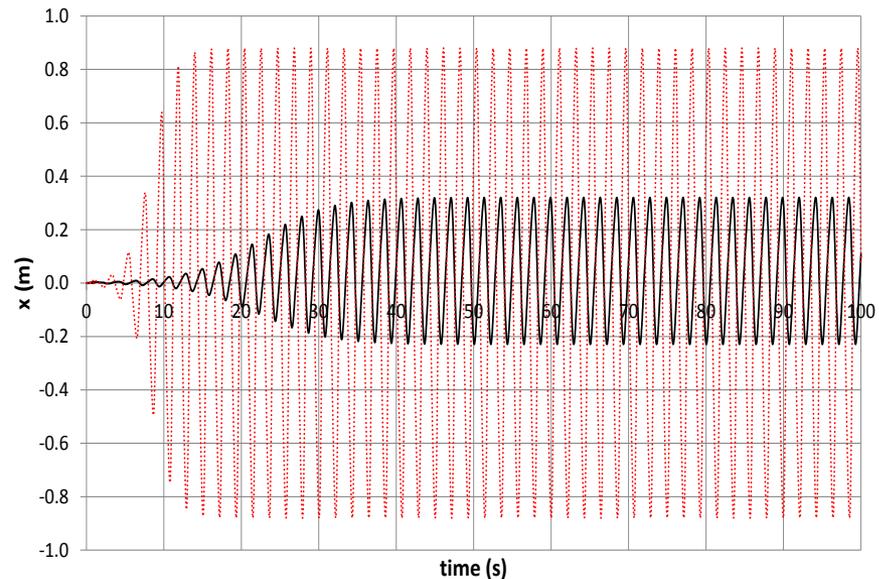


Dinâmica das Estruturas

Sistemas estruturais oceânicos: TLP's com excitação paramétrica



- $h(t)$ descreve o movimento do topo (plataforma)
- Queremos avaliar a amplitude de movimento dos tendões, de acordo com a frequência de excitação do topo
- 1:1 – excitação com frequência igual à primeira freq. natural
- 2:1 – excitação com frequência dobrada em relação ao 1:1

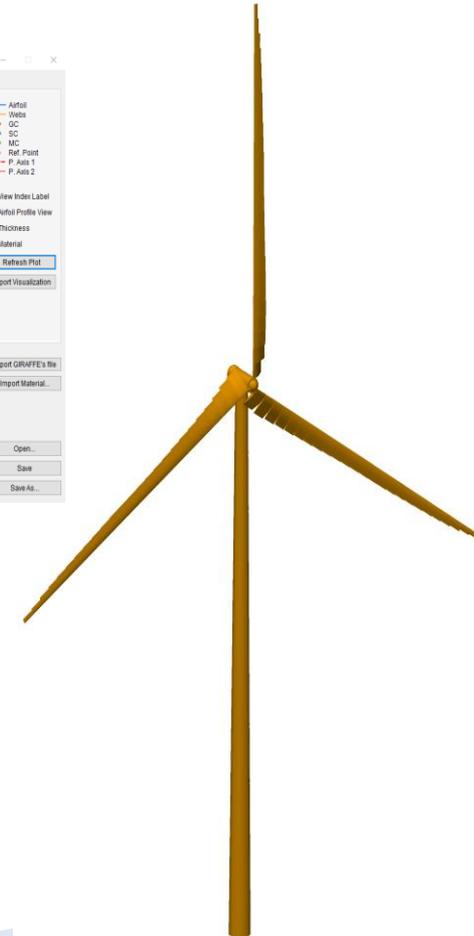
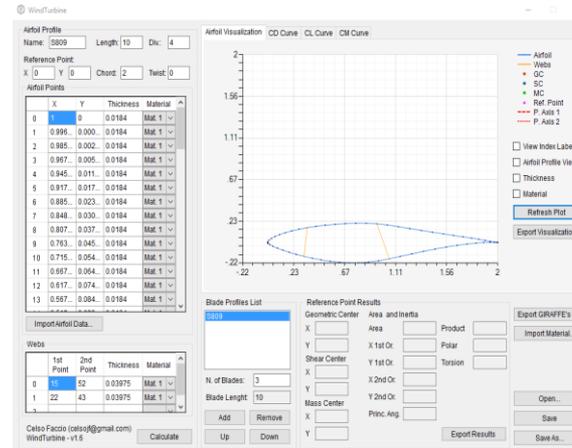
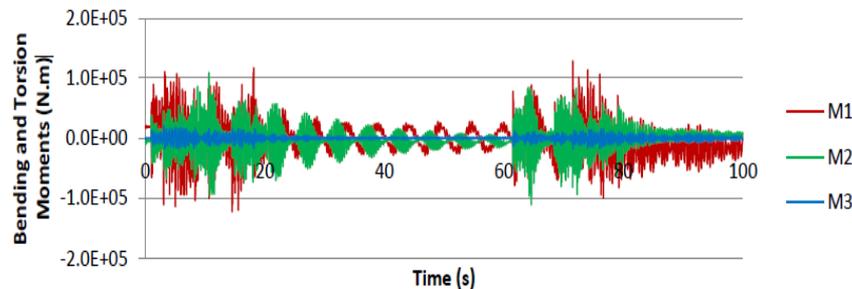


— 1:1 2:1

Dinâmica das Estruturas

Turbinas eólicas

- É possível montar um modelo estrutural completo de turbina eólica
- Em particular, podemos comparar respostas com modelos de vigas e cascas: diferentes efeitos



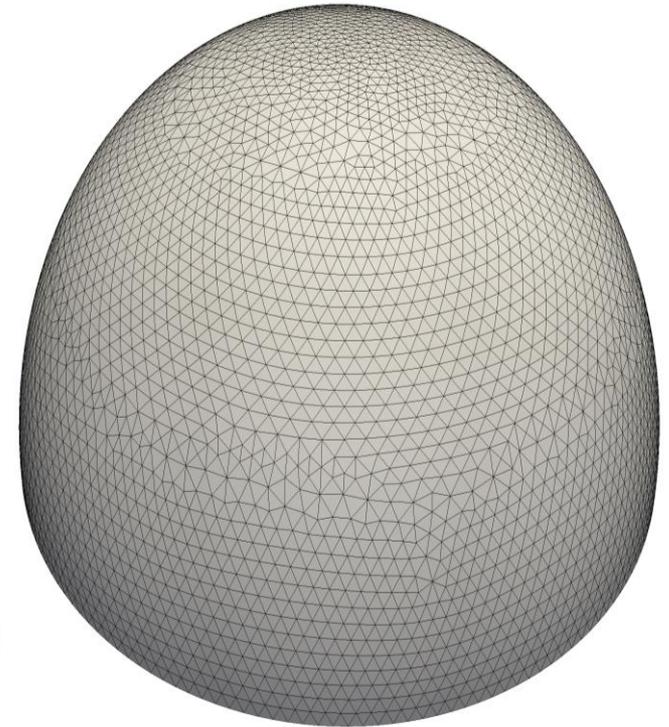
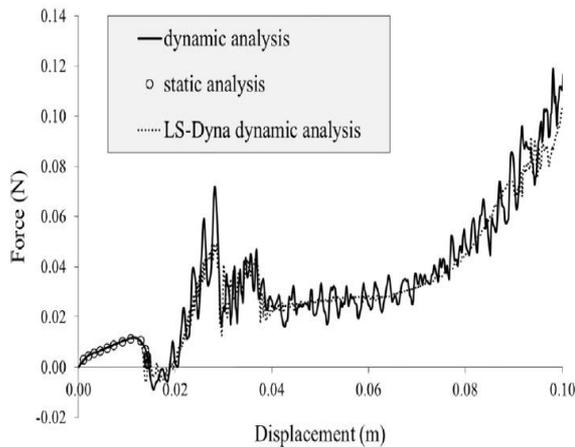
Exemplo de resultado: série temporal de momentos fletor e de torção em uma seção transversal de interesse

Faccio junior, C. J. ; Gay Neto, A.. Dynamics of wind turbine blades using a geometrically-exact beam formulation. In: european congress on computational methods in applied sciences and engineering (ECCOMAS 2016), 2016.

Dinâmica das Estruturas

Cascas sob instabilidade estrutural

- Domo esférico com uma dobra (*crease*)
- Força aplicada no topo
- Estrutura sofre instabilidade (*snap through*)

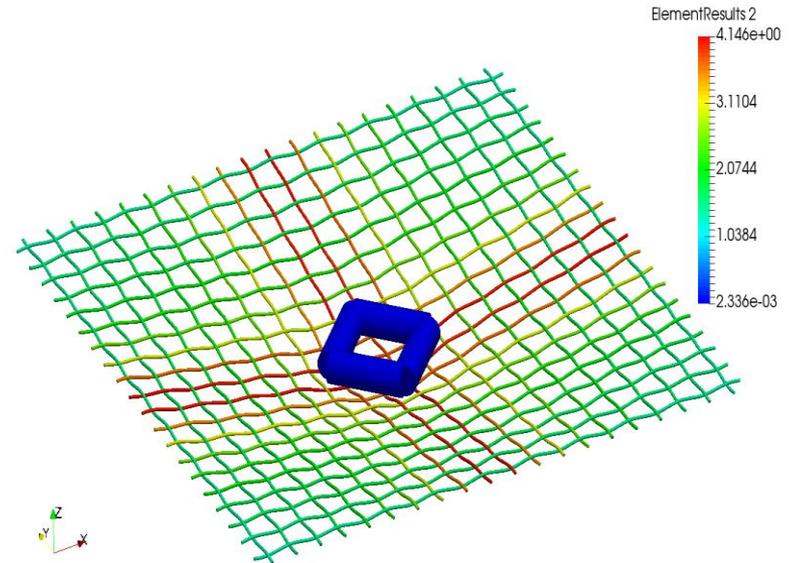
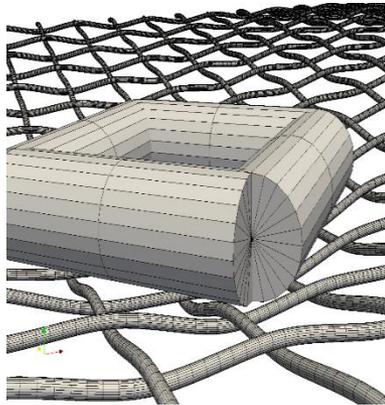


N.S.N. Ota, L. Wilson, A. Gay Neto, S. Pellegrino & P.M.Pimenta. Nonlinear dynamic analysis of creased shells. Finite Elements in Analysis and Design V. 121, 64-74, 2016.

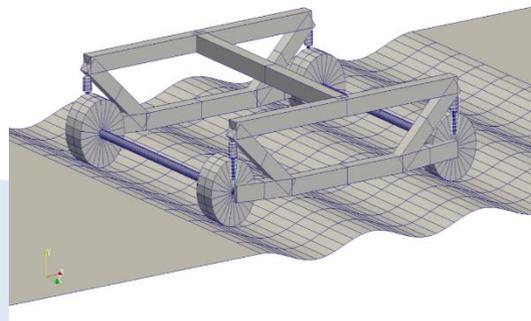
Dinâmica das Estruturas

Sistemas envolvendo contato: análise estrutural

- Tecidos (cama elástica)



- Dinâmica veicular: esforços na estrutura de um veículo em função do tempo
 - impactos

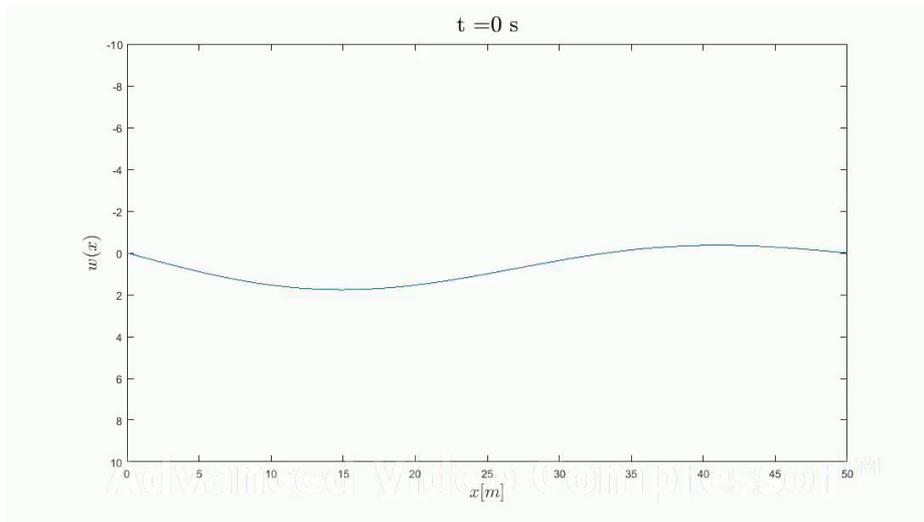


A. Gay Neto, P.M. Pimenta & P. Wriggers. "A master-surface to master-surface formulation for beam to beam contact. Part I: frictionless interaction". *Comp. Methods in App. Mech. Eng.* V. 303, 400-429, 2016.

Dinâmica das Estruturas

Modelos de ordem reduzida

- Representação da dinâmica de um meio contínuo (ou discretizado via EF) por meio de poucos graus de liberdade.
- **Exemplo de aplicação: Modelos simplificados de pontes, com vistas ao posterior projeto de um TMD (tuned mass damper)**

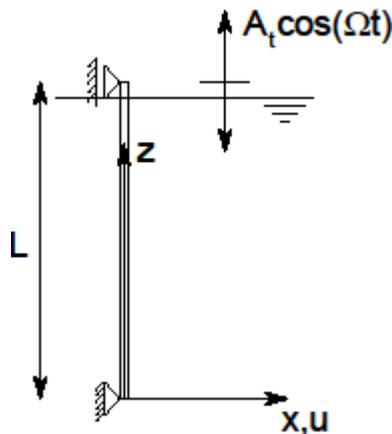


Vídeo obtido pela aluna Bianca Teixeira como parte de suas atividades de IC (Relatório FAPESP, janeiro de 2017)

Dinâmica das Estruturas

Problemas de excitação paramétrica

- Rigidez dependente do tempo (por exemplo, $k(t) = \bar{k} + \Delta k \cos \Omega t$)
- Encontrada em *risers* e outras estruturas esbeltas utilizadas em engenharia oceânica



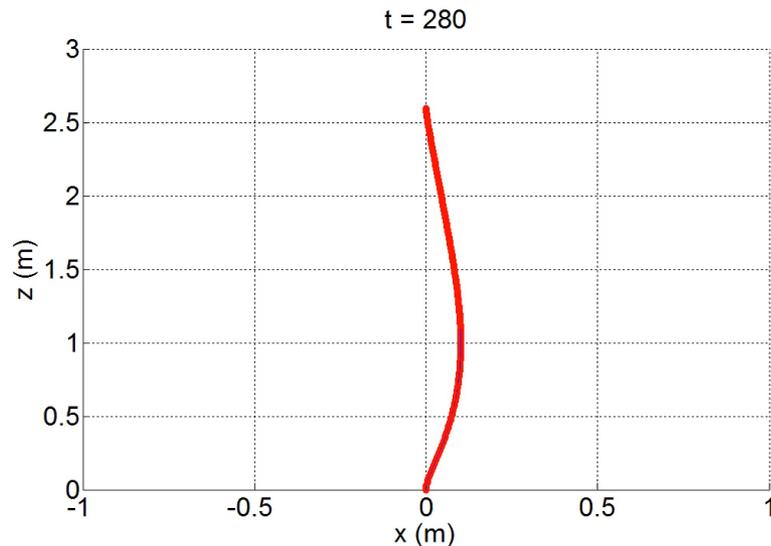
- O topo do riser é conectado a uma unidade flutuante que, por ação das ondas, possui movimento no plano vertical. Este movimento leva à modulação da rigidez geométrica.
- Dependendo da combinação de parâmetros \bar{k} e Δk , a configuração vertical perde estabilidade, dando origem a um comportamento oscilatório $u(z, t)$

Franzini, G. R., Santos, C. C. P.,
Mazzilli, C. E. N., Pesce, C. P.
Parametric excitation of an
immersed, vertical and
slender beam using reduced-
order models: influence
of hydrodynamic coefficients.
Journal of Marine Science and
Offshore Technology, 2016

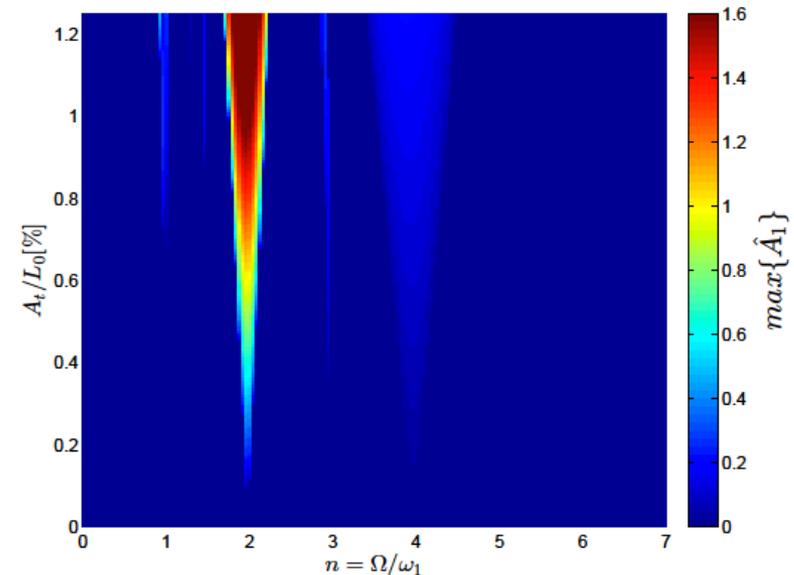
Dinâmica das Estruturas

Problemas de excitação paramétrica

- Abordagens. Modelos de alta hierarquia (MEF) ou modelos de ordem reduzida (representação do sistema por meio de poucos graus de liberdade. **Abordagens complementares**)



Franzini, G.R.; Gay Neto, A. Numerical investigations on parametric excitation of a vertical beam under prescribed axial displacements. In: The 22nd International Congress on Sound and Vibration, 2015, Firenze. Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration, 2015.

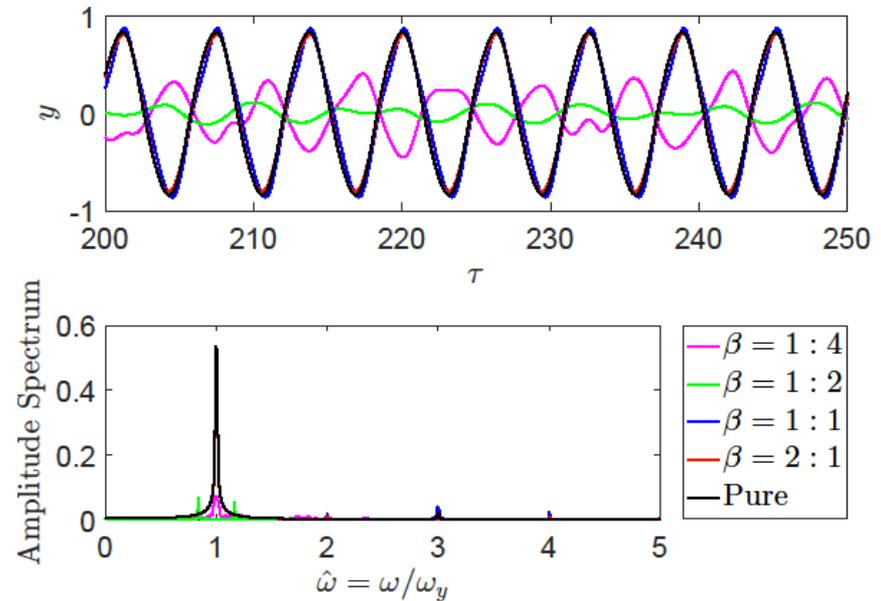
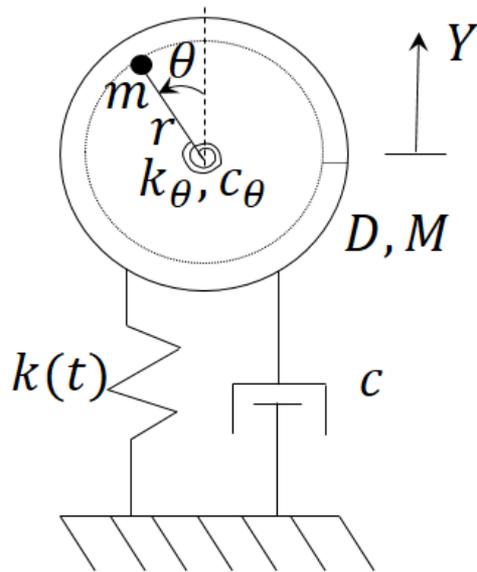


Franzini, G. R., Mazzilli, C. E. N., Non-linear reduced-order model for parametric excitation analysis of an immersed vertical slender rod. International Journal of Non-Linear Mechanics, v80, 2016

Dinâmica das Estruturas

Supressão passiva de vibrações causadas por instabilidade paramétrica

- Foco de pesquisa corrente: Mitigar as oscilações utilizando absorvedores não-lineares de energia

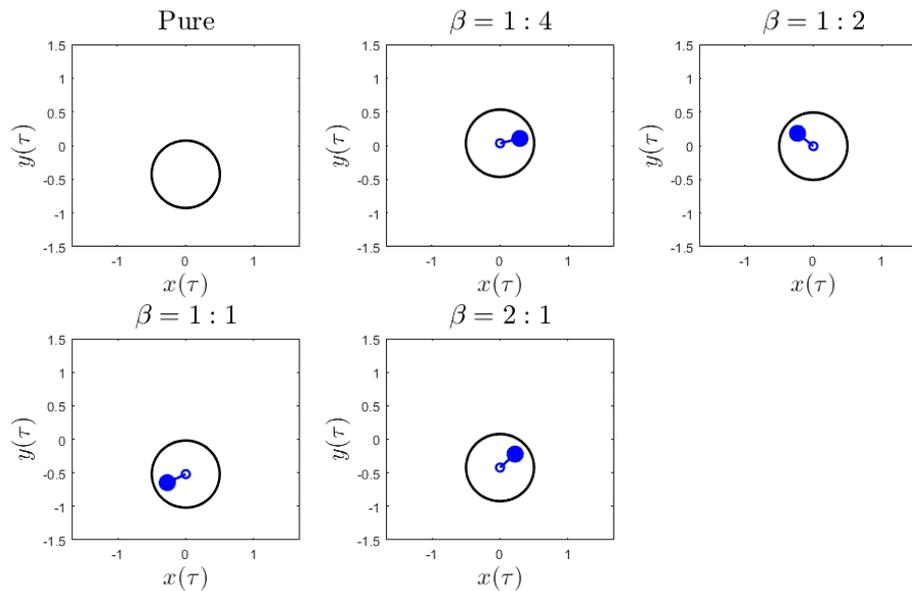


Franzini, G.R.; Sato, B. S. and Campedelli, G.
R. Numerical analysis of a non-linear energy sink
(NES) for the parametric excitation of a submerged
cylinder. In: The 9th European Conference on
Nonlinear Dynamics, ENOC2017, Budapest. (aceito)

Dinâmica das Estruturas

Supressão passiva de vibrações causadas por instabilidade paramétrica

- Foco de pesquisa corrente: Mitigar as oscilações utilizando absorvedores não-lineares de energia



Franzini, G.R.; Sato, B. S. and Campedelli, G.
R. Numerical analysis of a non-linear energy sink
(NES) for the parametric excitation of a submerged
cylinder. In: The 9th European Conference on
Nonlinear Dynamics, ENOC2017, Budapest. (aceito)

Dinâmica das Estruturas

Vibrações induzidas pelo escoamento

- Usualmente, problemas de interação fluido-estrutura levam a vibrações auto-excitadas
- **Vibrações induzidas pela emissão de vórtices (VIV)**

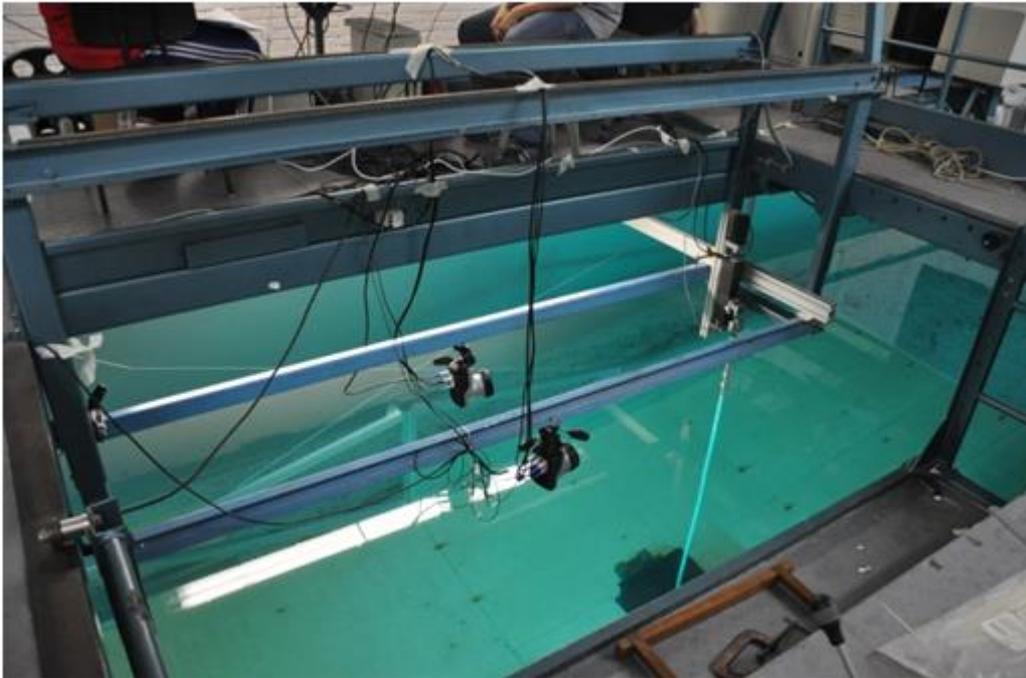


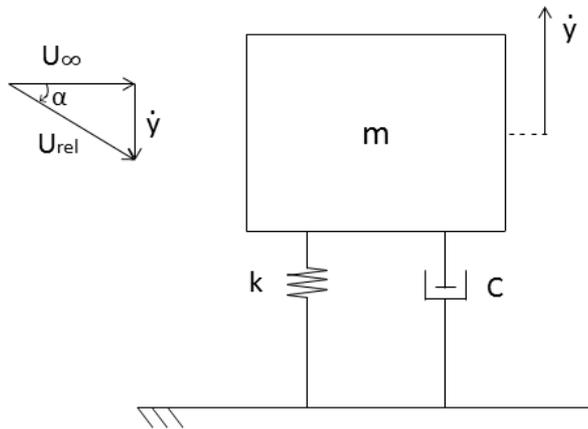
Foto retirada de um experimento de VIV com um cilindro flexível vertical – Tanque de reboque do IPT.

Projeto contratado pela Petrobras junto ao grupo de pesquisa da Poli para estudo de diversos aspectos do VIV

Dinâmica das Estruturas

Vibrações induzidas pelo escoamento

- Usualmente, problemas de interação fluido-estrutura levam a vibrações auto-excitadas
- **Galloping e flutter**
- **Fenômenos não ressoantes. Galloping envolve um grau de liberdade, flutter dois graus de liberdade (sendo um deles torção)**



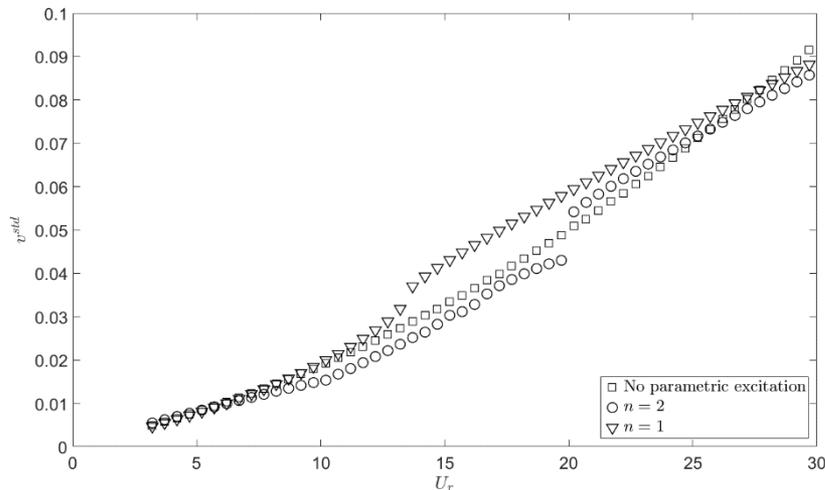
- A equação de movimento pode ser escrita como um problema homogêneo
- Amortecimento total: soma da parcela estrutura com a Aerodinâmica

AEROELASTICIDADE

Dinâmica das Estruturas

Aproveitamento de energia a partir de vibrações

- Usualmente, deseja-se mitigar vibrações estruturais. No entanto, existem situações onde as estruturas são projetadas para oscilar de sorte a aproveitar parte da energia cinética em energia elétrica:
- **Formas de conversão: Piezoelétrica e eletromagnética (entre outras)**



Franzini, G.R.; Santos, R. C. S. and Pesce, C. P. Piezoelectric energy harvesting from combined transverse galloping and parametric instability phenomena. Submetido para apreciação ao Journal of Marine Sciences and Applications

Coleta de energia a partir da vibração de pórticos: tema do projeto de formatura (2017) dos alunos de Eng. Civil Guilherme Rizkallah, Julia Rizkallah, Pamella Conte, Rafael Vilarinho

Coleta de energia a partir do VIV: tema do projeto de formatura (2017) do aluno de Eng. Mecânica Lucas Bunzel