



LABORATÓRIO
DE AERODINÂMICA
DAS CONSTRUÇÕES



Seminário sobre Boas Práticas para Projetos de Edifícios Altos

Resposta Estrutural de Edifícios Altos frente à Ação Dinâmica do Vento

*Marcelo M. Rocha e
Acir M. Loredou-Souza*

Introdução

Ação dinâmica do vento em edifícios altos

1. Turbulência Atmosférica:

Forças médias + flutuantes atuando principalmente na direção do vento.

→ Capítulo 9 da NBR6123(1988).

2. Desprendimento de Vórtices Alternados:

Forças flutuantes atuando principalmente na direção transversal à direção do vento.

→ Futuro Capítulo 10 da NBR6123.

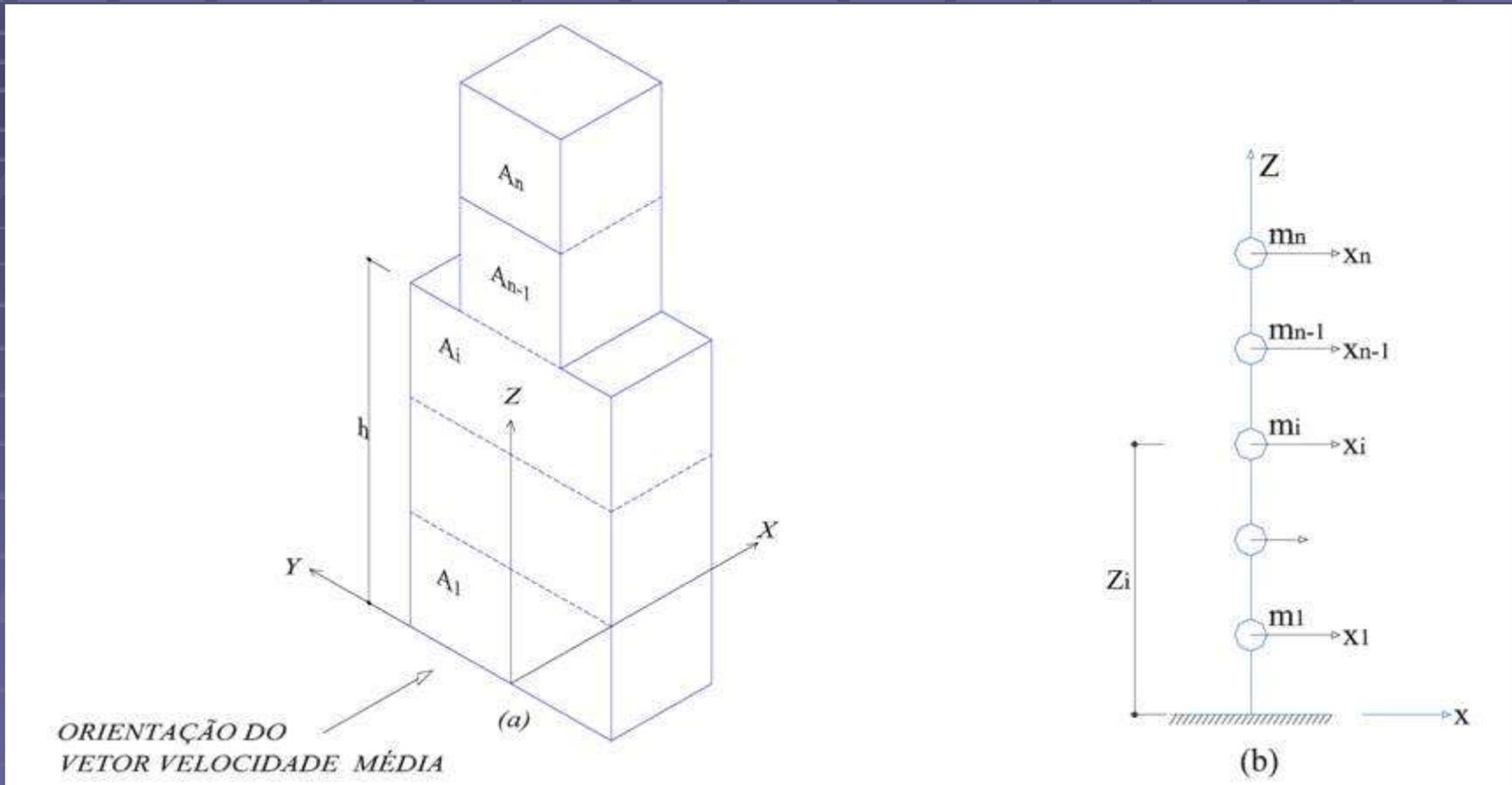
3. Martelamento:

Forças decorrentes da presença adversa de outras edificações à barlavento.

→ Apenas com um Túnel de Vento (vizinhança).

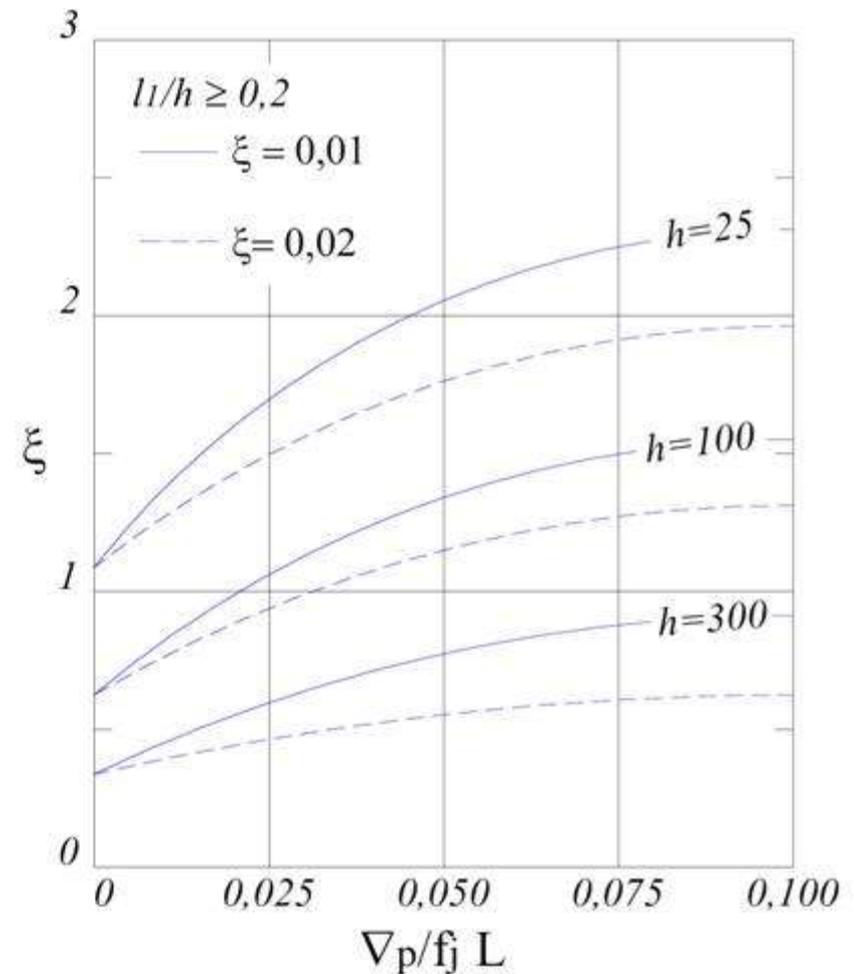
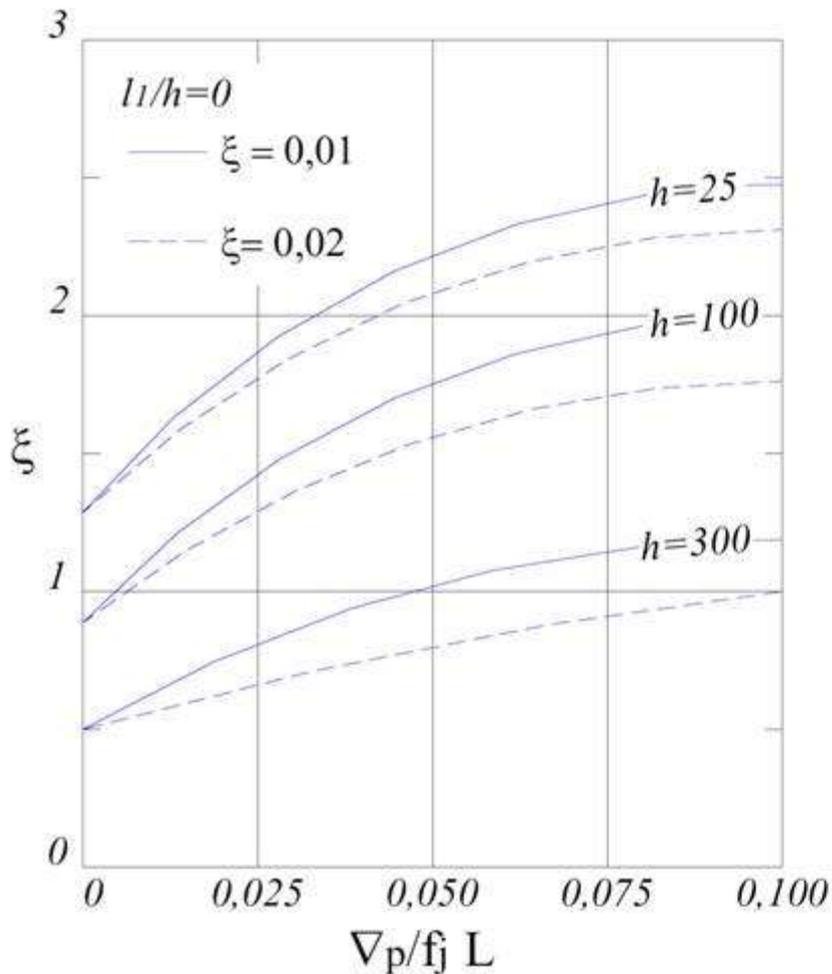
Histórico - 1988

Capítulo 9 é incluído na NBR6123 (pressões médias)



Trabalho de Riera & Galindez (1979), formulado no domínio da frequência, utilizando modelagem estatística do campo de velocidades do vento.

O método do Capítulo 9 da NBR6123 utiliza curvas de amplificação dinâmica, calibradas para formas modais lineares ($\phi = z/H$), em translação simples (sem torção).



Histórico - final da década de 90

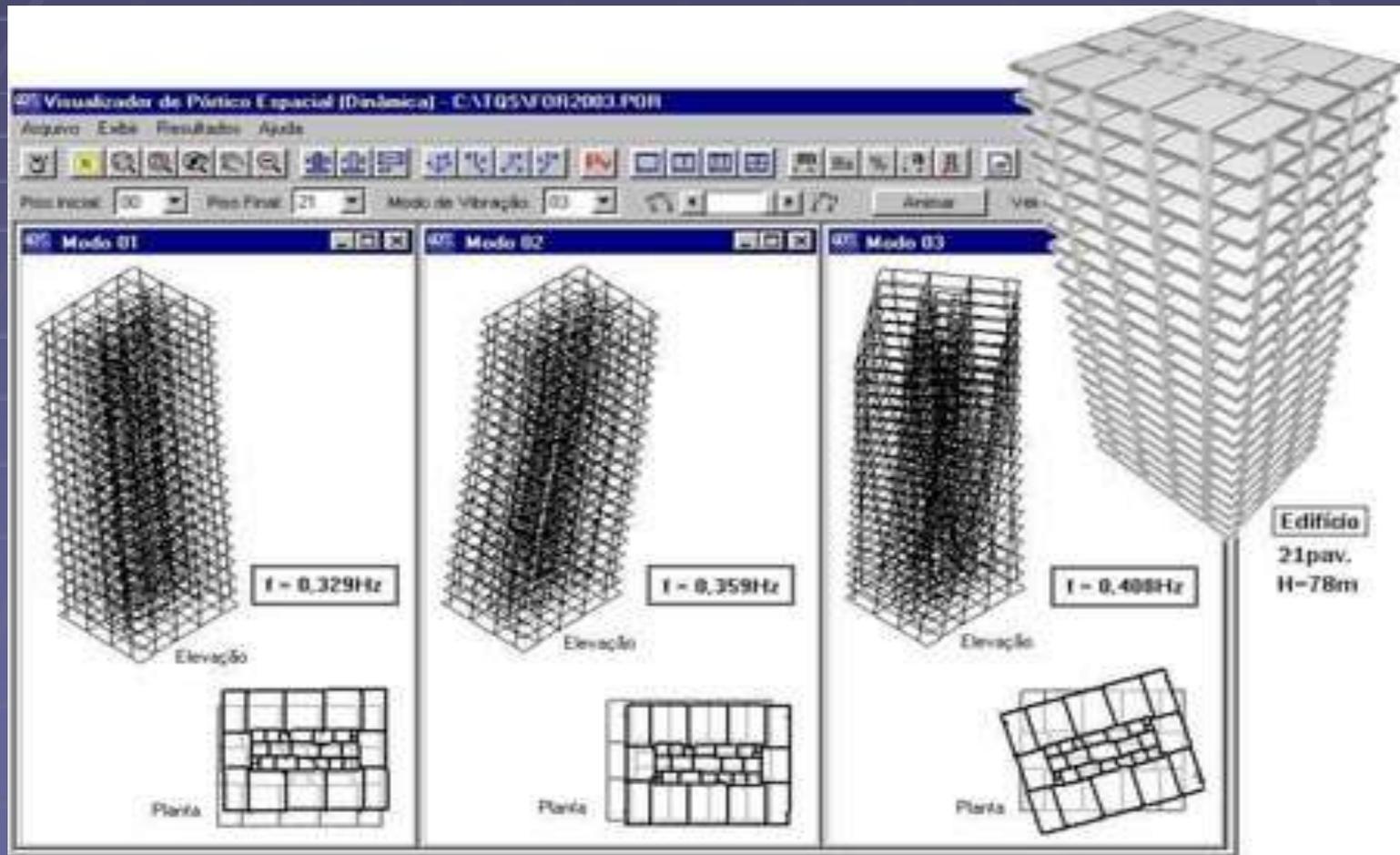
Medição de pressões flutuantes em Túnel de Vento



Sistema de medição eletrônica de pressões, com 32 canais, para o primeiro estudo utilizando registros simultâneos (POD).

Histórico - em 2002

O TQSV9 disponibiliza módulo de análise de propriedades dinâmicas de edifícios e inclui uma verificação conforme o Capítulo 9 da NBR6123 (Implementação: Eng. Sérgio Pinheiro).



Histórico - em 2005

O TQSV12 disponibiliza módulo de entrada automática de dados de pressões aerodinâmicas (médias), conforme formato tabular utilizado pelo LAC/UFRGS (Implementação: Engs. A. Belk e A. Knijnik).

Carga de tabelas vindas de túnel de vento

Arquivos com as tabelas do túnel de vento

Forças Fx Forças_X.txt Procurar

Forças Fy Forças_X.txt Procurar

Momentos Mz

Interpretação de Sistema global Inverter o sinal Ler pisos de c

É possível carreg ensaio de túnel d esforços Fx, Fy e devem ser format

Exemplo

Confirmação de carga de tabela de esforços de vento

Tabela carregada: Forças Fx

	0.0°	15.0°	30.0°	45.0°	60.0°	75.0°	90.0°	105.0°	120.0°	135.0°	150.0°	165.0°	180.0°	195.0°	210.0°	225.0°	240.0°
Piso 18	-9.3	-11.8	-9	-4.9	-2.1	5.5	15.5	14.4	21.2	23	21.2	18.6	17	11.7	6.6	1.8	-1.4
Piso 17	-16.4	-19.8	-14.9	-8.4	-4.1	6.7	19.5	19.1	28.3	30.9	30	28.6	24.2	17.6	10	2.9	-1.2
Piso 16	-13.7	-15.6	-11.6	-6.9	-3.9	2.7	8.7	9.8	14.7	16.4	17.9	19.9	14.6	11.7	6.8	2.1	0.3
Piso 15	-17	-17.2	-11.7	-6.2	-2.7	3.7	9.2	9.9	14	15.7	18.2	21.7	17.3	13.9	8.3	3.2	0.5
Piso 14	-20.4	-18.6	-11.6	-5.5	-1.4	4.6	9.7	9.9	13	14.7	18.3	23.5	20.1	16.2	9.9	4.3	0.8
Piso 13	-23.2	-21.4	-13.8	-7.4	-2.9	3.6	8	9	11.4	13.9	18.7	25	23.2	19.6	12.9	5.2	0.2
Piso 12	-22.8	-21.3	-14.1	-8.3	-3.9	2.2	5.3	7	8.5	11.2	16.6	23.1	23.2	20.3	14.1	5.4	-0.4
Piso 11	-19.4	-18.1	-12	-7	-3.3	1.9	4.5	6	7.2	9.6	14.1	19.7	19.7	17.3	12	4.6	-0.3
Piso 10	-20.5	-19	-13	-7.8	-3.9	1.6	3.9	6.3	7.1	9.6	13.7	19.6	20.3	18	13.1	5.2	-0.6
Piso 9	-21.8	-20.1	-14.1	-8.7	-4.5	1.2	3.2	6.7	7	9.6	13.3	19.5	20.9	19	14.5	5.9	-1.1
Piso 8	-21.8	-20.1	-14.1	-8.7	-4.5	1.2	3.2	6.7	7	9.6	13.3	19.5	20.9	19	14.5	5.9	-1.1
Piso 7	-21.7	-20.5	-14.4	-8.9	-4.5	1.5	3.4	6.8	6.6	8.8	12.6	19.7	21.5	19.8	15.9	7.6	-0.1
Piso 6	-21.7	-21	-14.8	-9.2	-4.5	1.9	3.8	6.8	6.2	8	11.7	19.9	22.2	20.7	17.6	9.7	1
Piso 5	-21.7	-21	-14.8	-9.2	-4.5	1.9	3.8	6.8	6.2	8	11.7	19.9	22.2	20.7	17.6	9.7	1
Piso 4	-20.8	-20.2	-13.9	-8.4	-3.9	2.7	4.6	7.3	7.3	9.3	12.3	19.7	22	20.1	17.7	10.6	2.2
Piso 3	-19.8	-19.3	-12.8	-7.5	-3.2	3.6	5.6	8	8.6	10.7	12.9	19.5	21.7	19.4	17.8	11.7	3.7
Piso 2	-19.8	-19.3	-12.8	-7.5	-3.2	3.6	5.6	8	8.6	10.7	12.9	19.5	21.7	19.4	17.8	11.7	3.7
Piso 1	-42.6	-43.1	-31.7	-20.5	-10.2	5.2	9	12.3	17.9	20.9	24.6	37.9	45.2	39.8	36.9	19.8	3.6

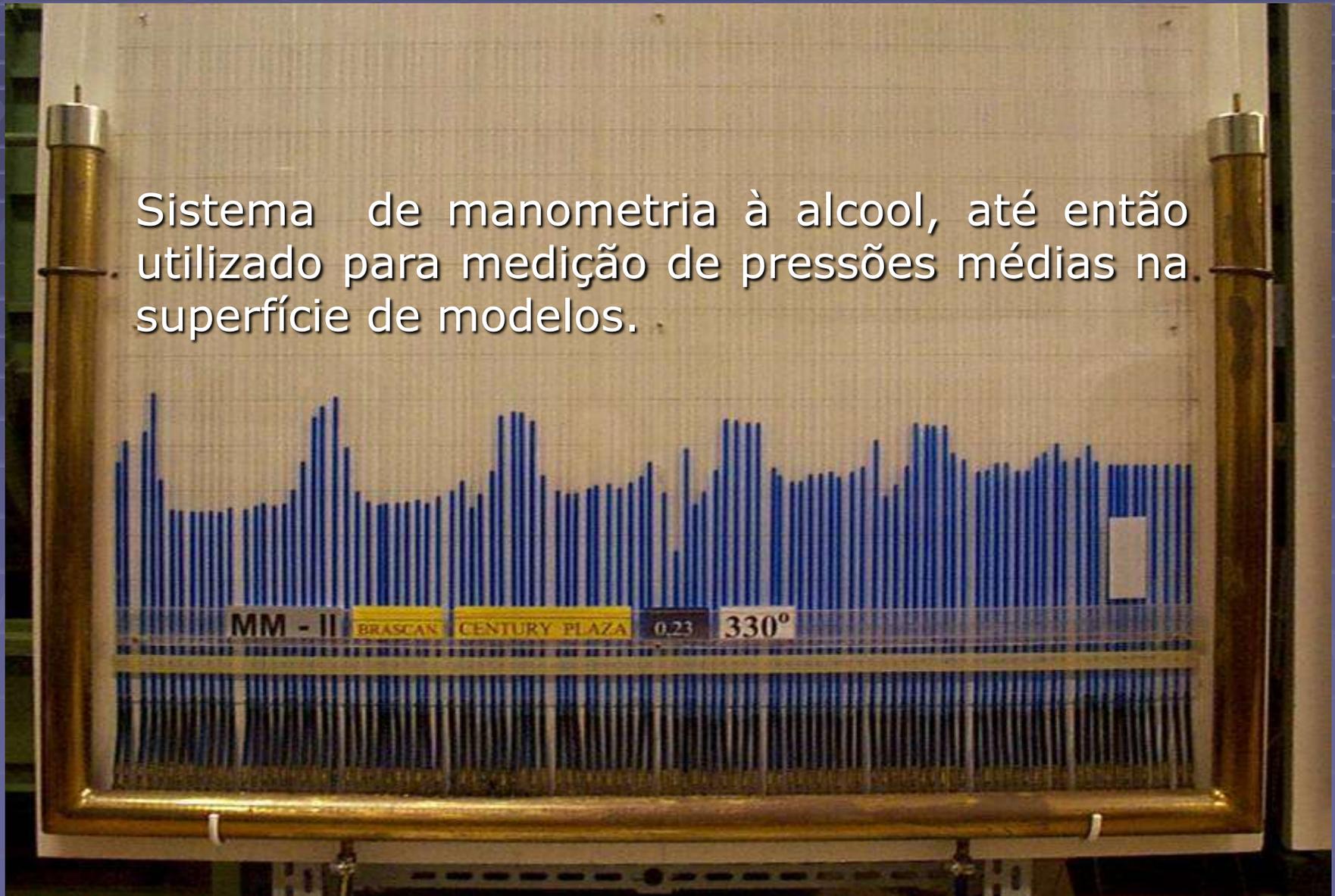
Confirme os dados carregados e aperte OK para copiar esta tabela para os dados do edifício.

OK Cancelar

Histórico - até 2006

Medição de pressões médias em Túnel de Vento

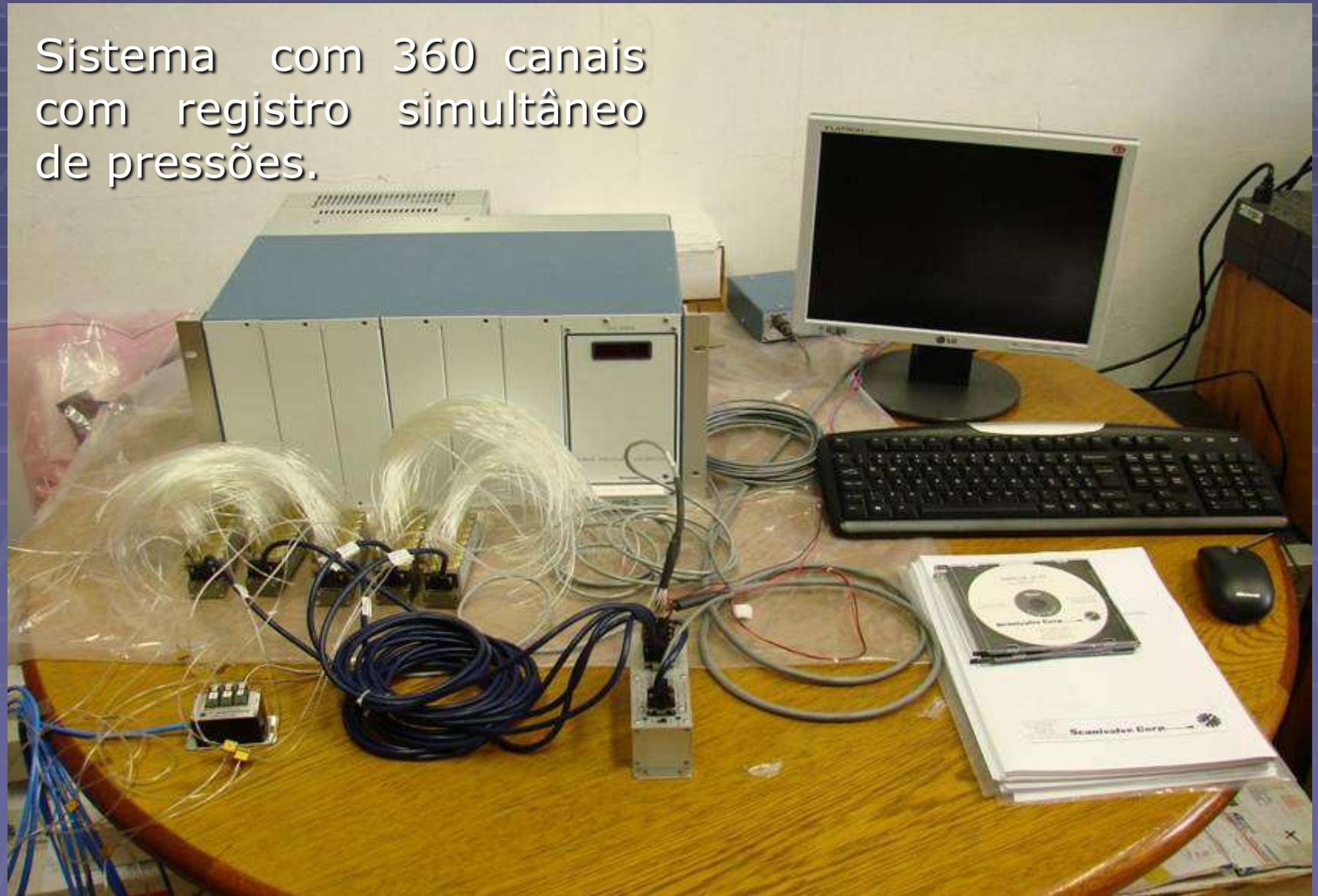
Sistema de manometria à álcool, até então utilizado para medição de pressões médias na superfície de modelos.



Histórico - a partir de 2006

O LAC adota exclusivamente medição eletrônica.

Sistema com 360 canais
com registro simultâneo
de pressões.



A disponibilidade de registros eletrônicos simultâneos permite a implementação do

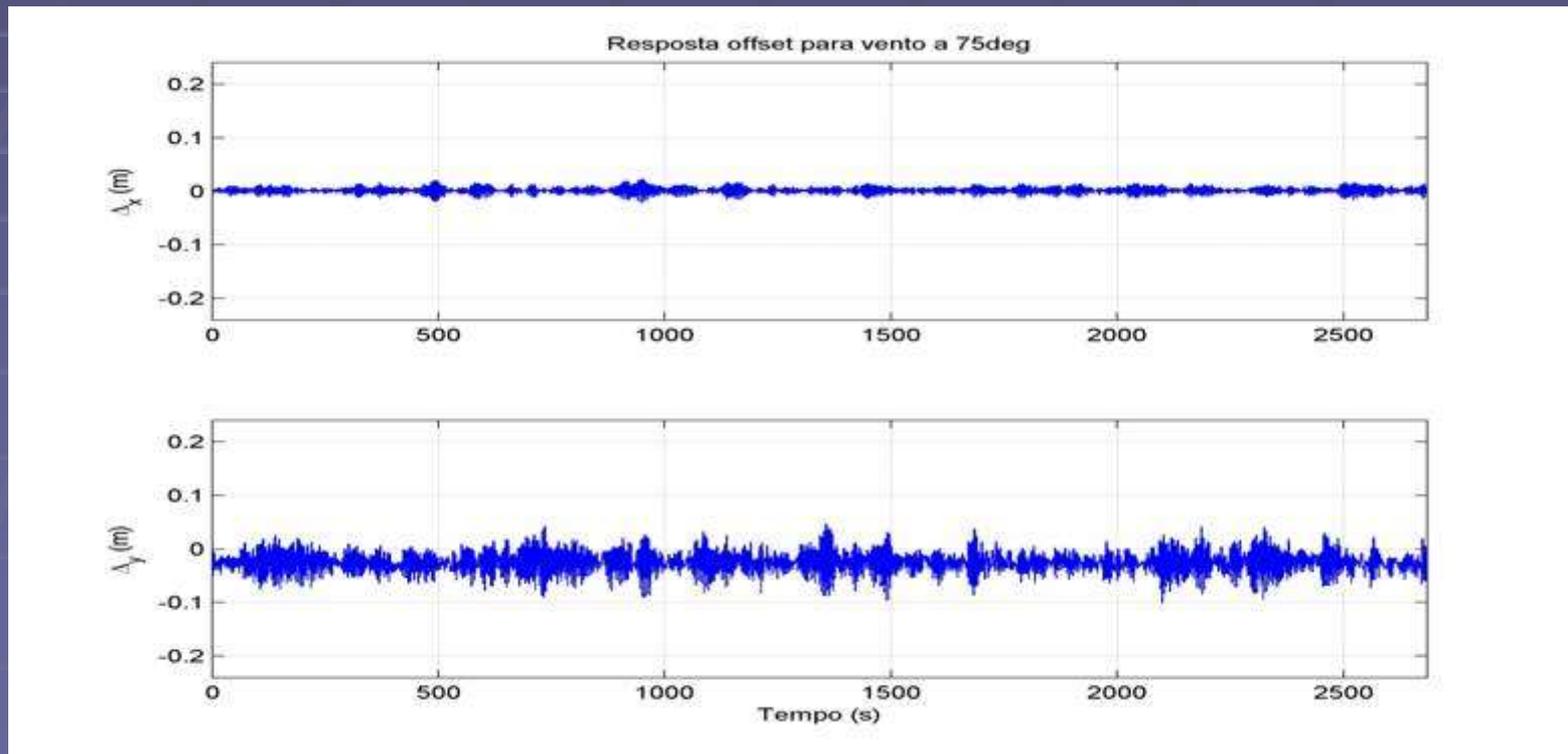
Método HFPI

para análise da resposta dinâmica de estruturas.



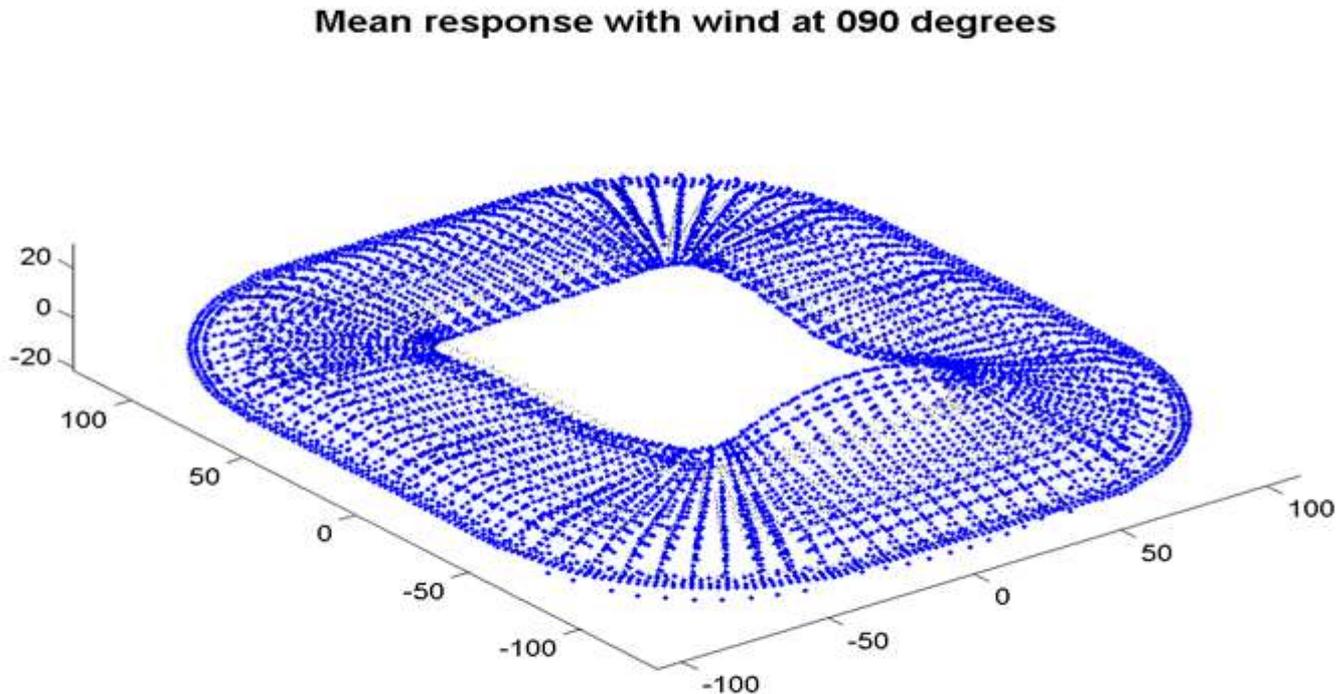
Integração de pressões em alta frequência (*high frequency pressure integration* – HFPI)

- Utiliza-se um modelo rígido.
- Despreza-se efeitos de iteração fluido-estrutura.
- Determinação da resposta dinâmica, através da solução teórica das equações de equilíbrio para cargas dinâmicas obtidas experimentalmente.



Outras aplicações do HFPI

Dada a disponibilidade de propriedades dinâmicas, tais como fornecidas por diversos softwares (SAP, STRAP, Autodesk ROBOT, etc.)



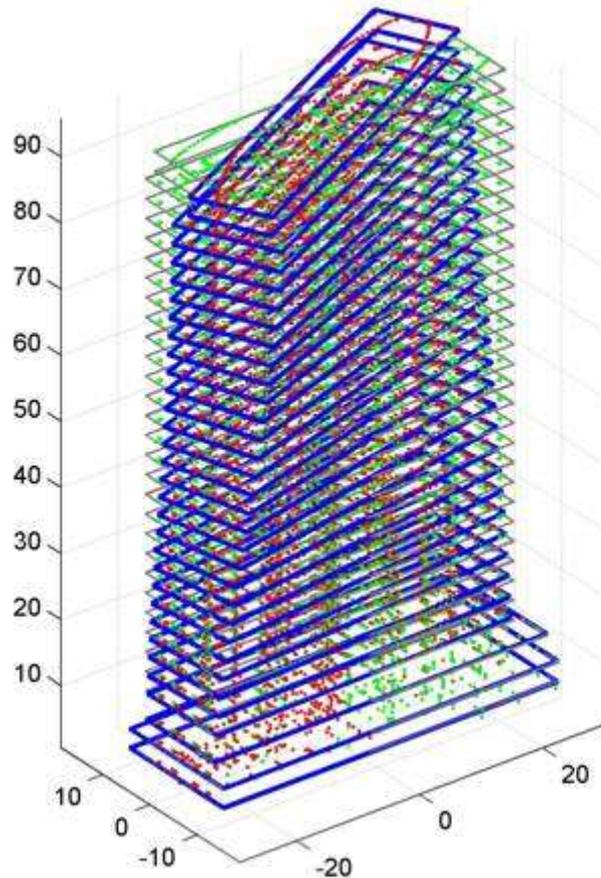
Exemplo: Cobertura de Estádio (2011)



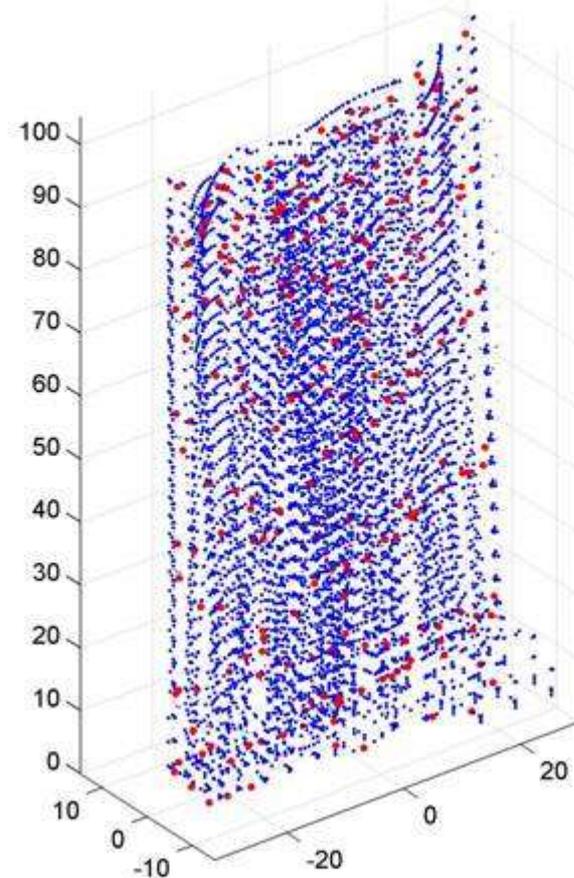
Histórico - em julho de 2011

O TQSV16 disponibiliza módulo de saída tabular de dados estruturais - coordenadas, massas, modos e frequências (Implementação: Eng. Alio Kimura)

Modal shape 3 : $f_k = 0.245\text{Hz}$



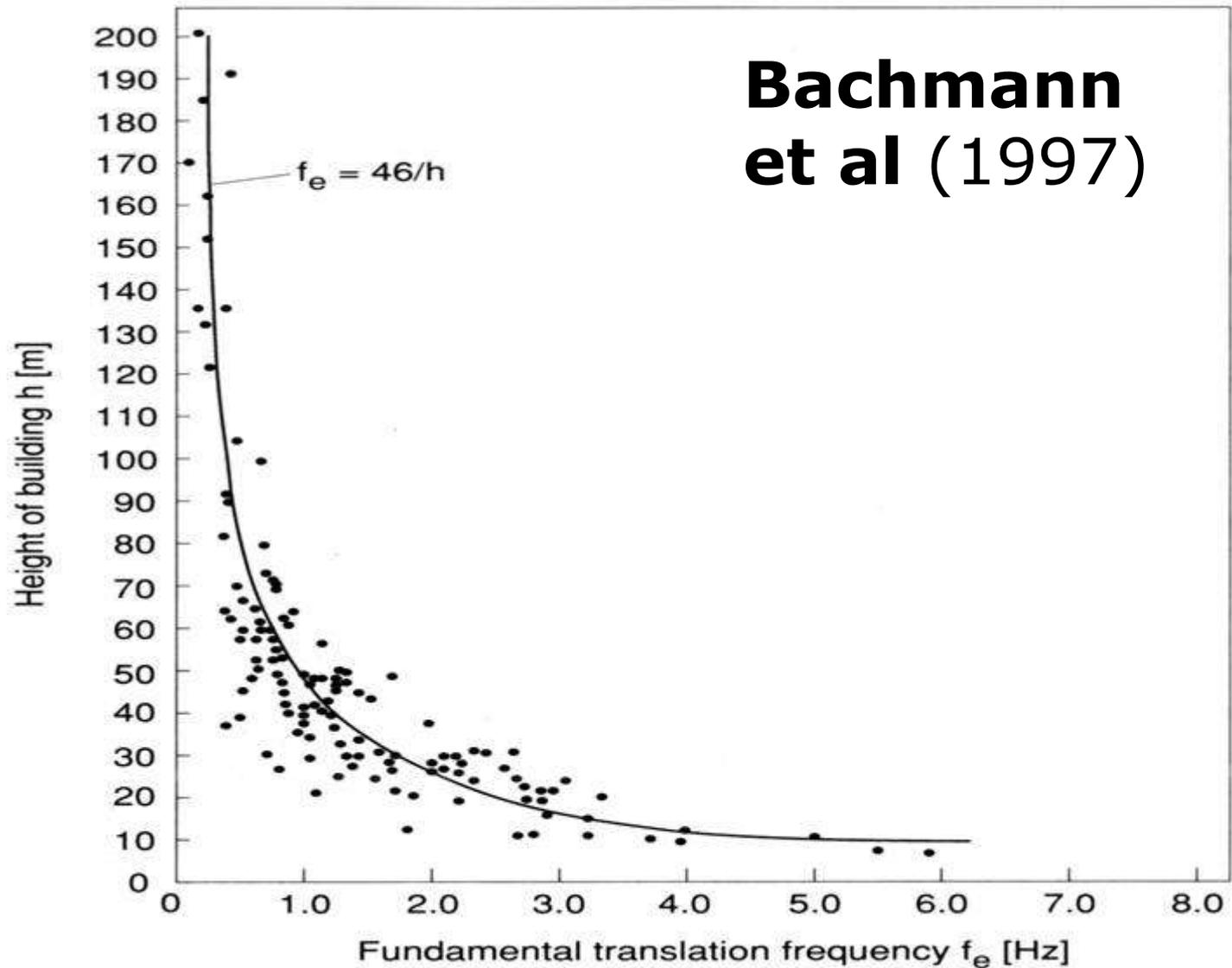
Modal shape 3 : $f_k = 0.245\text{Hz}$



Histórico - atualmente

- A evolução de ferramentas, tanto para análise estrutural como para medições experimentais, propiciou ao LAC/UFRGS a oportunidade de analisar diversos edifícios altos através da metodologia HFPI.
- Essa experiência chamou a atenção para o que parece ser uma tendência na prática de projeto estrutural, na qual as frequências naturais de vibração livre estão surpreendentemente baixas.
- Frequência natural baixa → rigidez baixa!
- Observam-se muitos modos abaixo de 1Hz (propensão à ressonância com o vento) incluindo modos de torção!

O que é normal, em termos de frequência fundamental? Modo fundamental de translação:



Exemplo de estimativa: $H = 100\text{m}$ (o que seria considerado "normal" ...)

- NBR6123 (concreto aperticado sem cortina):

$$f_1 = (0,05 + 0,015H)^{-1} = \mathbf{0,65\text{Hz}}$$

- Goel & Choppra:

$$f_1 = (0.073H^{3/4})^{-1} = \mathbf{0,43\text{Hz}}$$

- Bachmann:

$$f_1 = 46/H = \mathbf{0,46\text{Hz}}$$

E o que está se verificando na prática corrente de projeto de edifício altos?

	Frequências Naturais (Hz)											
	Altura (m)	46/H =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Edifício 1	91	0.51	0.20	0.25	0.30	0.67	1.07	-	-	-		-
Edifício 2	91	0.51	0.18	0.24	0.28	0.62	1.01	-	-	-		-
Edifício 3	96	0.48	0.24	0.30	0.31	1.13	-	-	-	-		-
Edifício 4	129	0.36	0.14	0.18	0.23	0.43	0.49	0.53	0.67	0.78	0.86	0.90
Edifício 5	133	0.35	0.21	0.22	0.24	0.53	0.57	0.70	1.00	-	-	-
Edifício 6	85	0.54	0.34	0.41	0.48	1.43	-	-	-	-	-	-
Edifício 7	86	0.53	0.18	0.32	0.33	0.79	1.10	-	-	-	-	-
Edifício 8	95	0.48	0.22	0.23	0.25	0.70	0.78	0.82	1.37	-	-	-

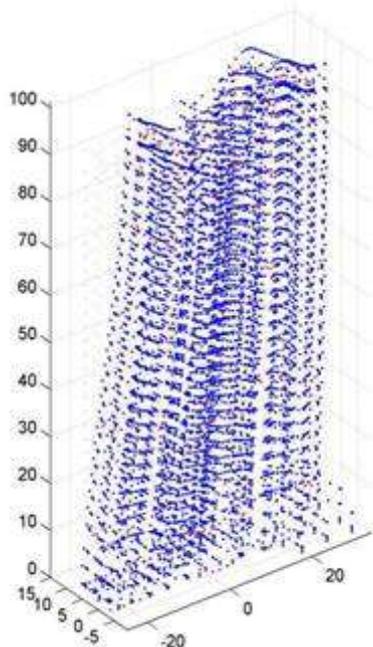
Em amarelo: torção predominante.

Nenhum desses edifícios pode ser analisado através do Capítulo 9 da NBR6123, pois o resultado seria não-conservador!

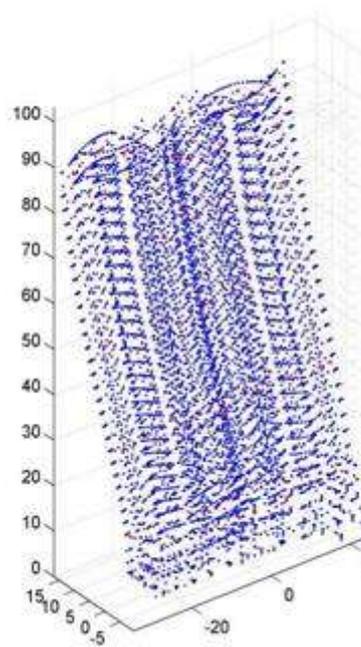
O que mudou???

- Quando o Capítulo 9 da NBR6123(1988) foi introduzido, edifícios raramente apresentavam um segundo modo abaixo de 1Hz para cada direção horizontal.
- As estruturas atuais apresentam muitos modos abaixo de 1Hz, cujas respostas modais precisam ser superpostas para o cálculo da resposta estrutural completa.
- Modos de torção estão presentes nos projetos atuais, muitas vezes como modo fundamental, o que implica que as maiores acelerações estarão fora do centro de rigidez do pavimento.

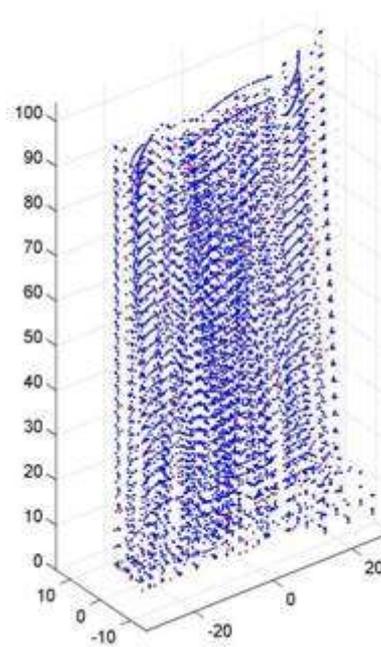
Modal shape 1 : $f_k = 0.2007\text{Hz}$



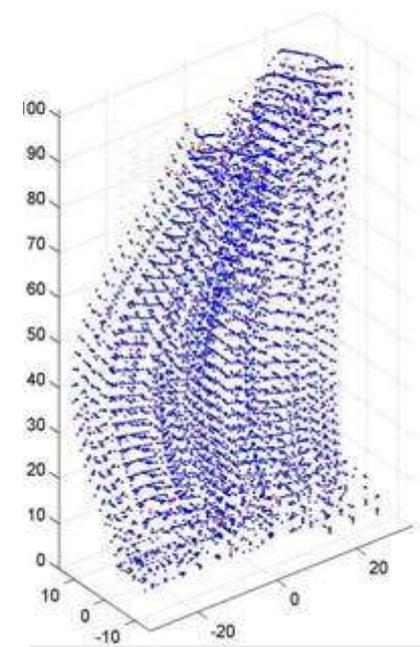
Modal shape 2 : $f_k = 0.2028\text{Hz}$



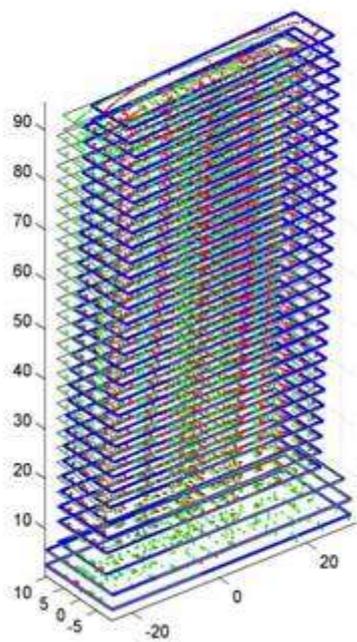
Modal shape 3 : $f_k = 0.2215\text{Hz}$



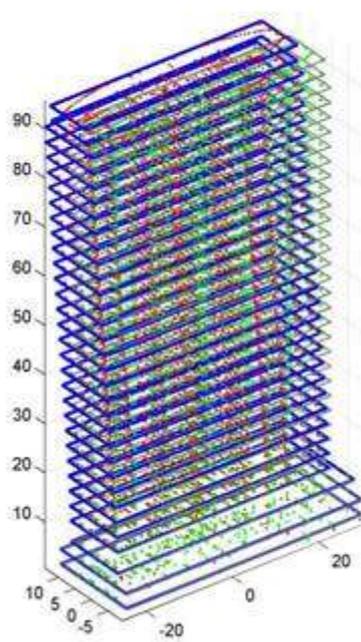
Modal shape 4 : $f_k = 0.6226\text{Hz}$



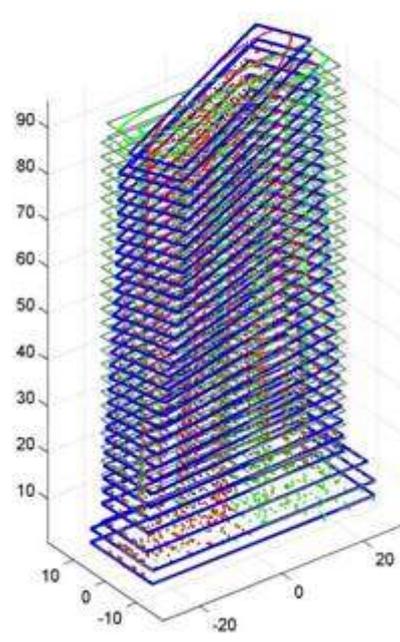
Modal shape 1 : $f_k = 0.2007\text{Hz}$



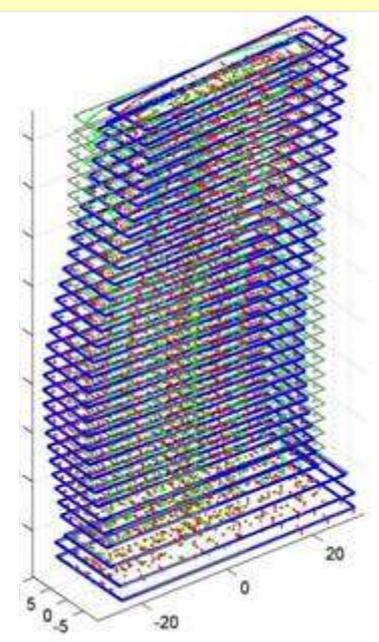
Modal shape 2 : $f_k = 0.2028\text{Hz}$



Modal shape 3 : $f_k = 0.2215\text{Hz}$



Modal shape 4 : $f_k = 0.6226\text{Hz}$

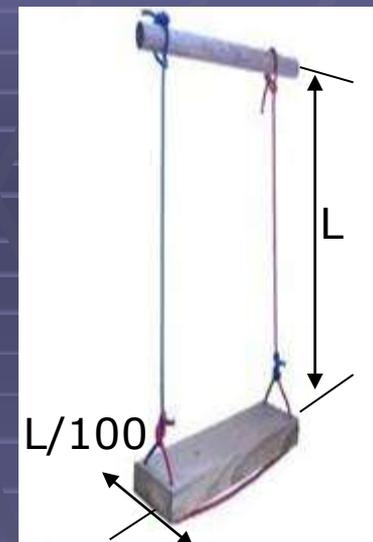
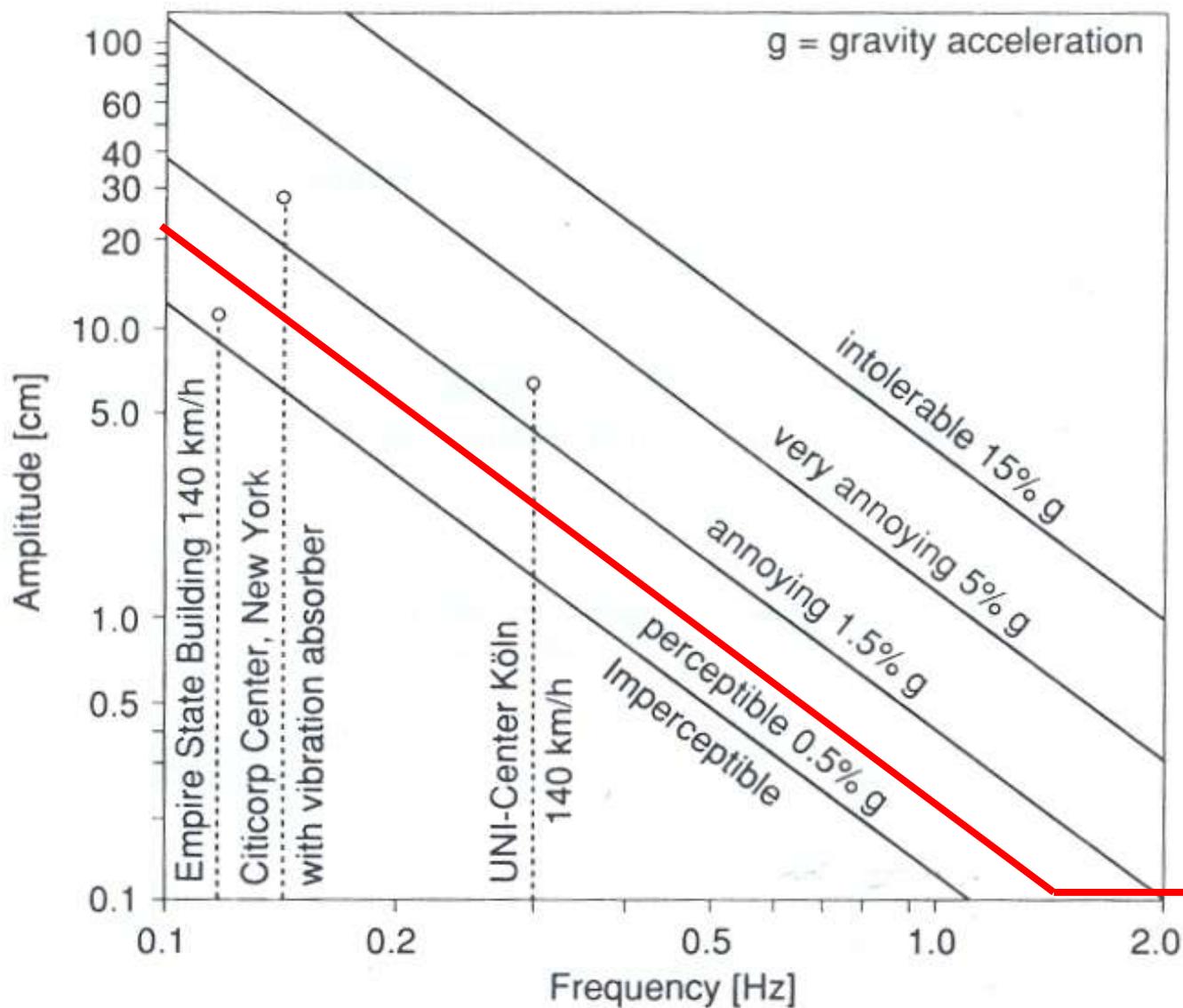


Consequentemente...

- O Capítulo 9 não pode ser aplicado nesses casos, pois as curvas de amplificação se restringem a formas modais aproximadamente lineares (retas), em translação.
- O critério de combinação modal da norma (SRSS – raiz da soma dos quadrados) não é aplicável a alta densidade modal, devendo ser usado o CQC – combinação quadrática completa.
- A abordagem mais precisa e confiável até o presente, é a utilização de registros experimentais (séries temporais) obtidas em túnel de vento.

→ **HFPI.**

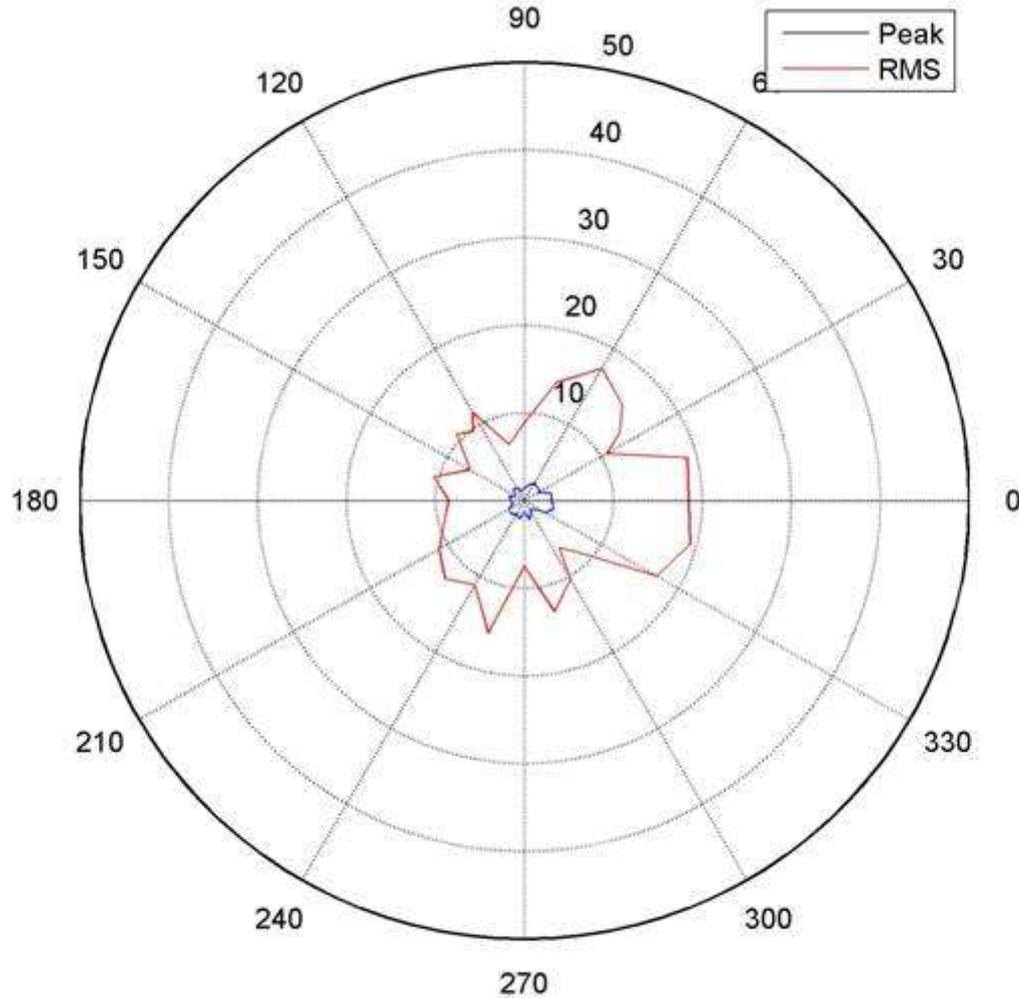
Implicações para a "Boa Prática"



NBR6123:
 $a_{\max} \leq 10mG$

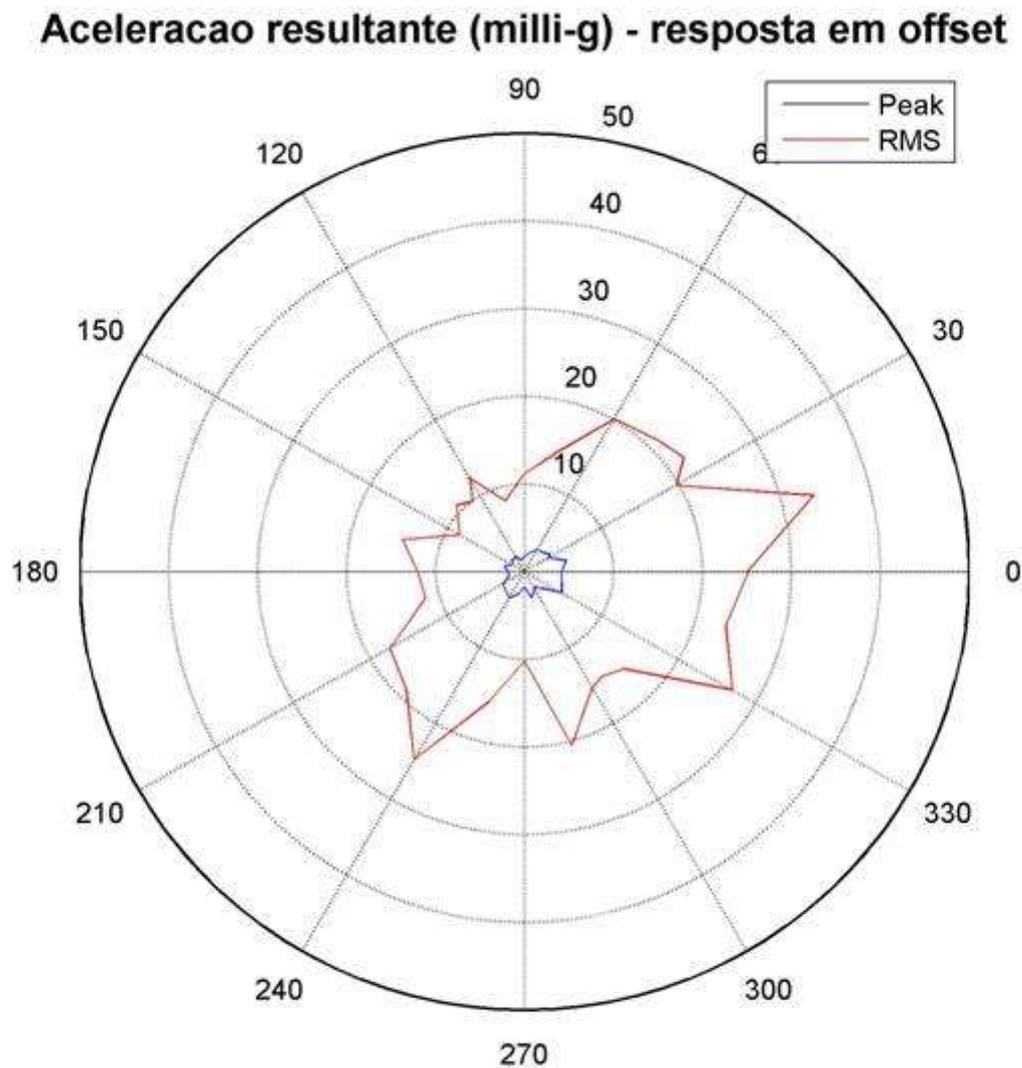
Exemplo de resultado ($S_3 = 0.54$, vento anual)

Aceleracao resultante (milli-g) - resposta no centro



No centro de rigidez

Exemplo de resultado ($S_3 = 0.54$, vento anual)



No ponto de offset

Comentários e questionamentos finais

- Edifícios altos estão excessivamente flexíveis?
- Calibração de modelos estruturais através de medições de frequências naturais in situ. (influência de elementos não estruturais?)
- O Capítulo 9 da NBR6123 requer atualização com relação a critérios de combinação e esclarecimentos em suas limitações.
- O Capítulo 10 (vórtices) deve ser incluído.
- Análise de formas e frequências naturais como prática natural para julgamento da qualidade do projeto. (evitar modos espúrios!)
- Influência do efeito ressonante no ELU?