

Otimização das Estruturas de Concreto Armado Através de Ensaios em Túnel de Vento

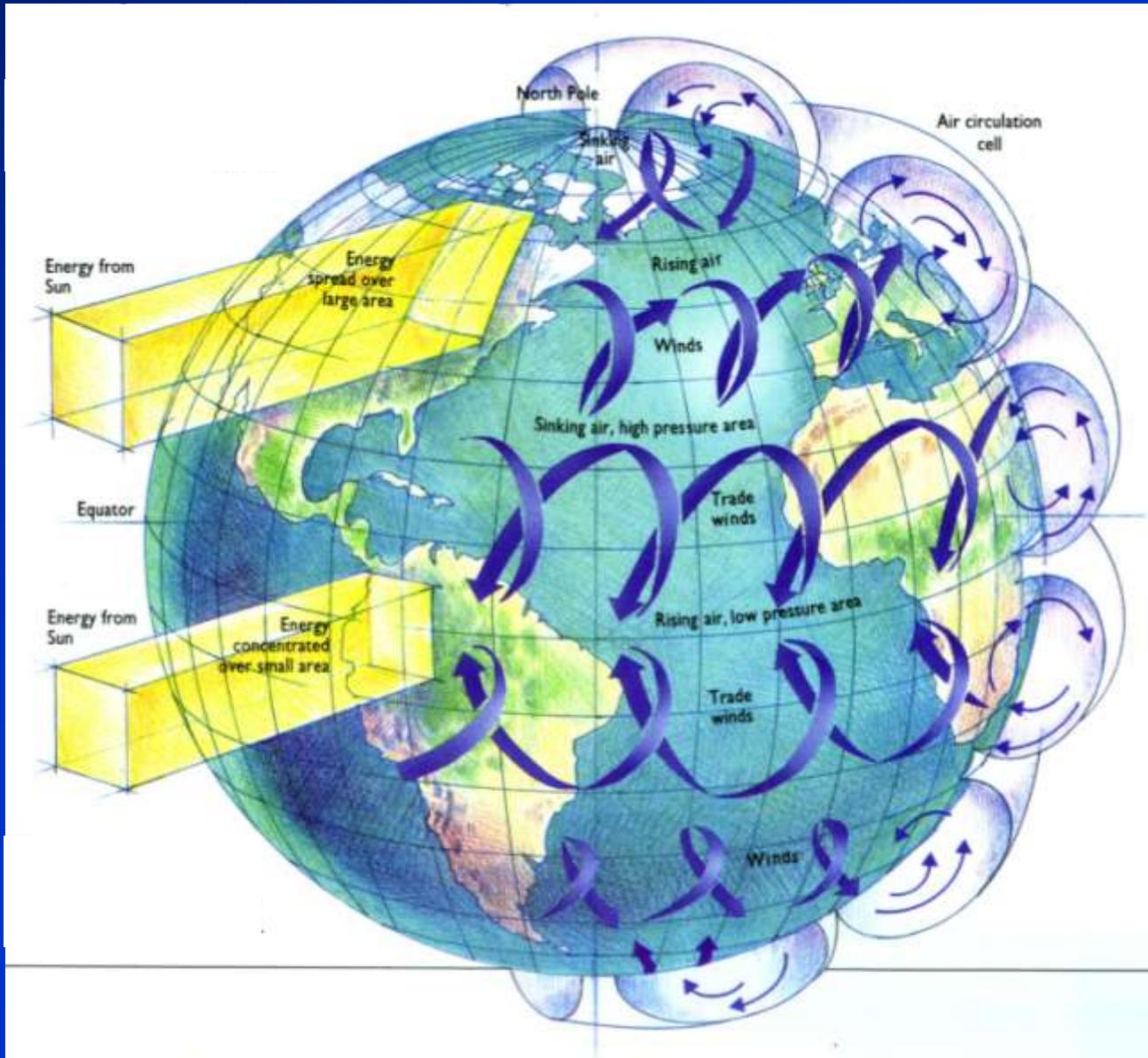


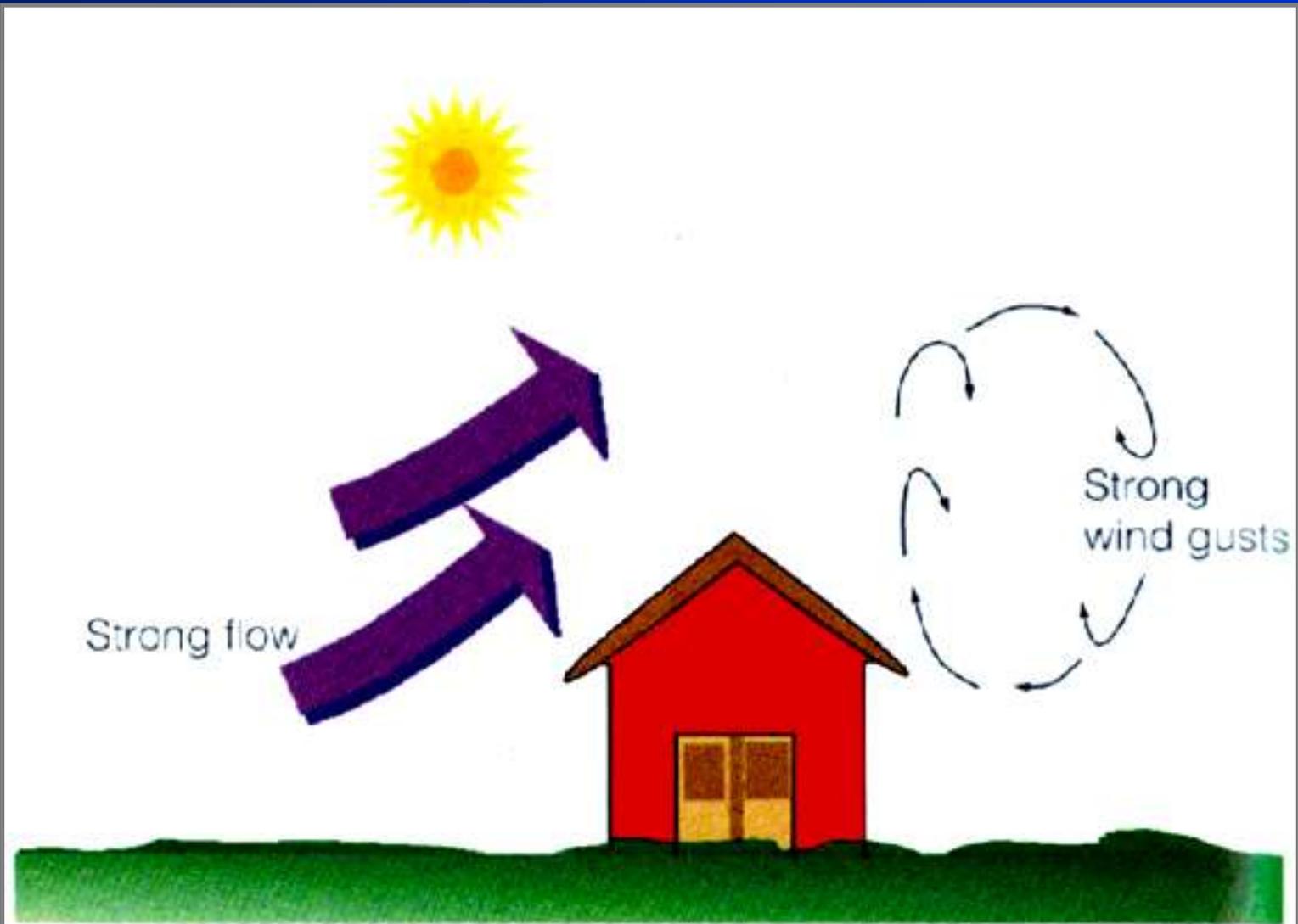
LABORATÓRIO
DE AERODINÂMICA
DAS CONSTRUÇÕES

Acir Mércio Loredou-Souza

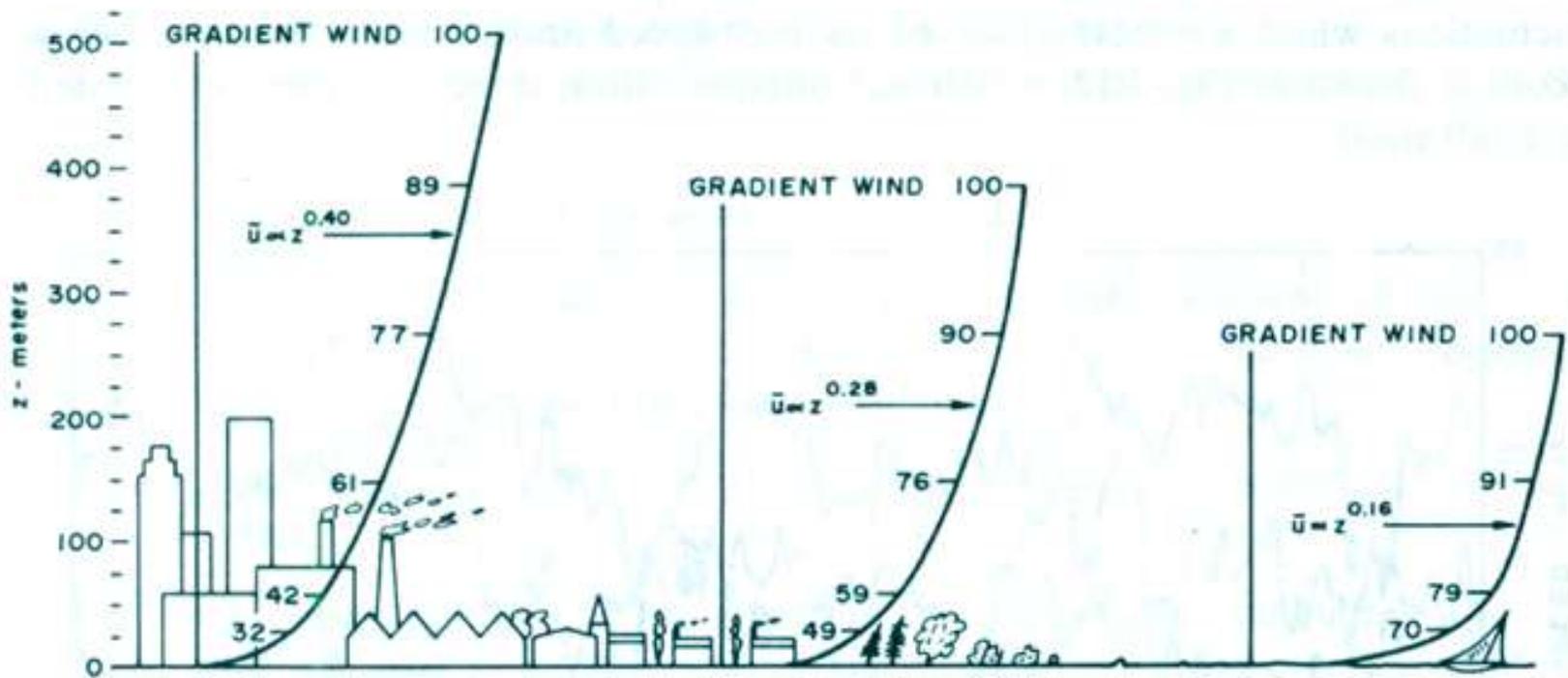


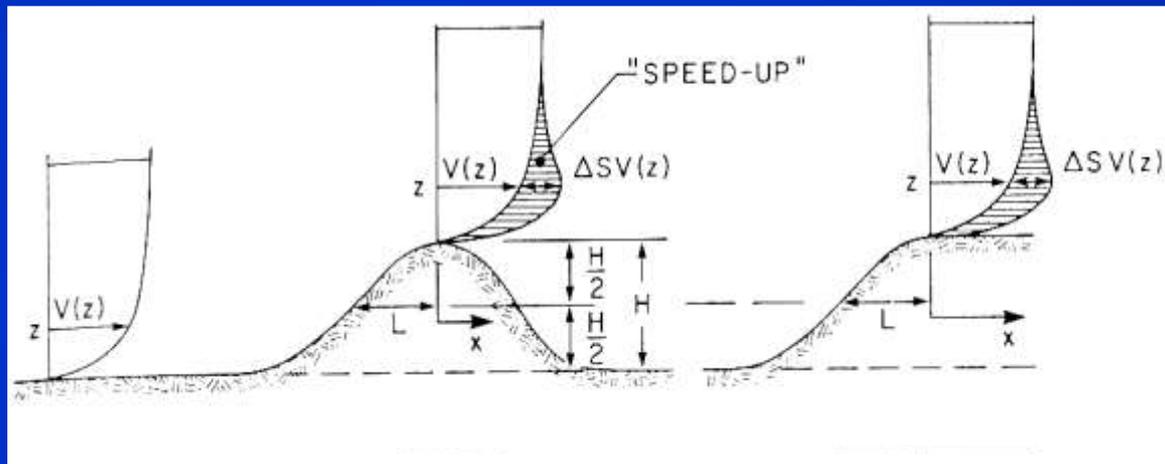
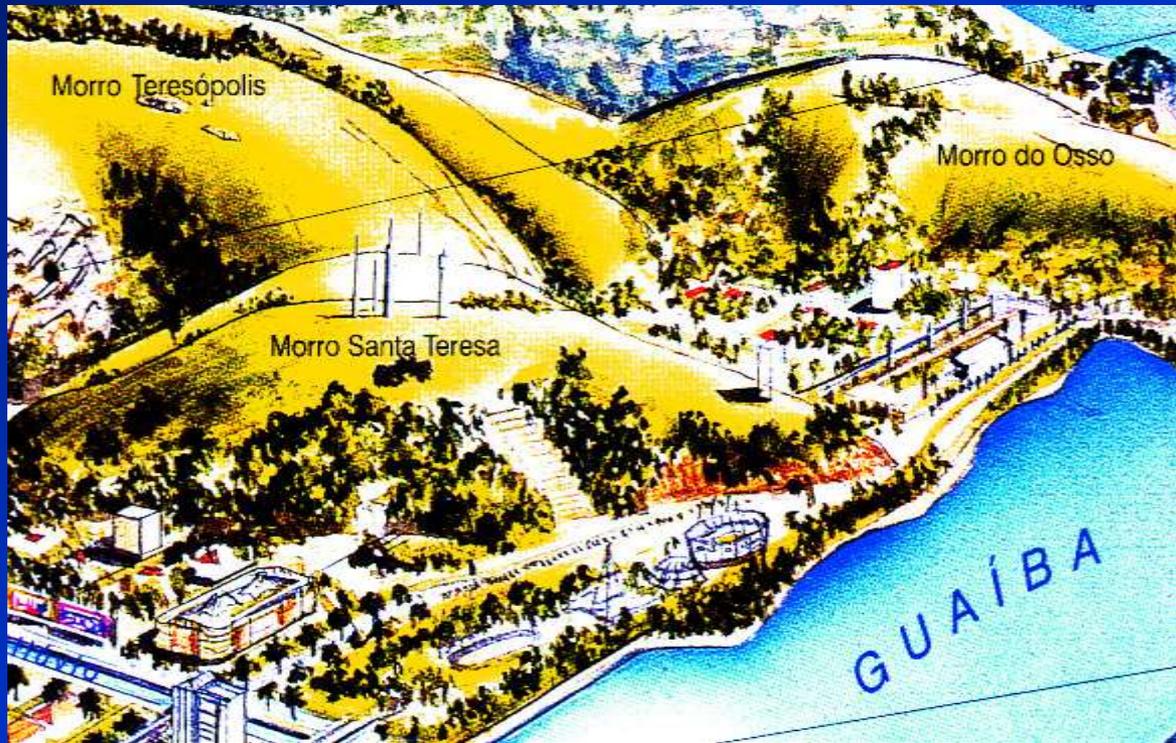
Laboratório de Aerodinâmica das Construções
Programa de Pós -Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal do Rio Grande do Sul



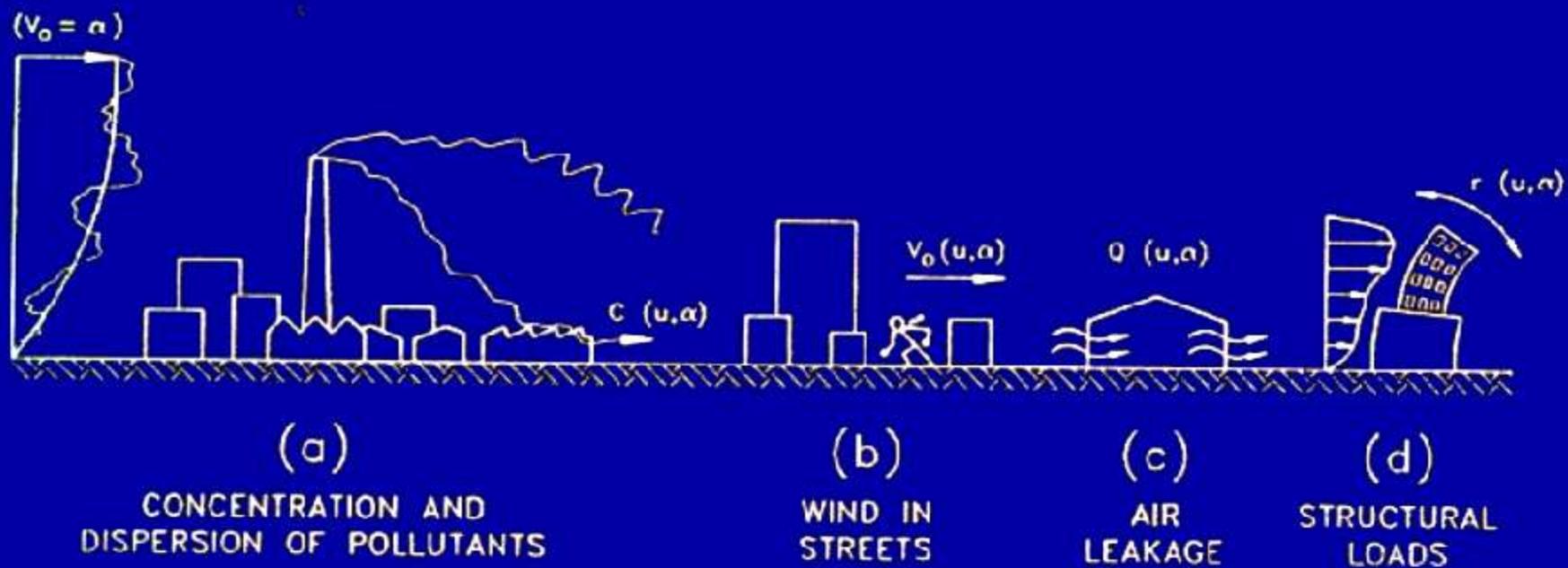


(b) Unstable air

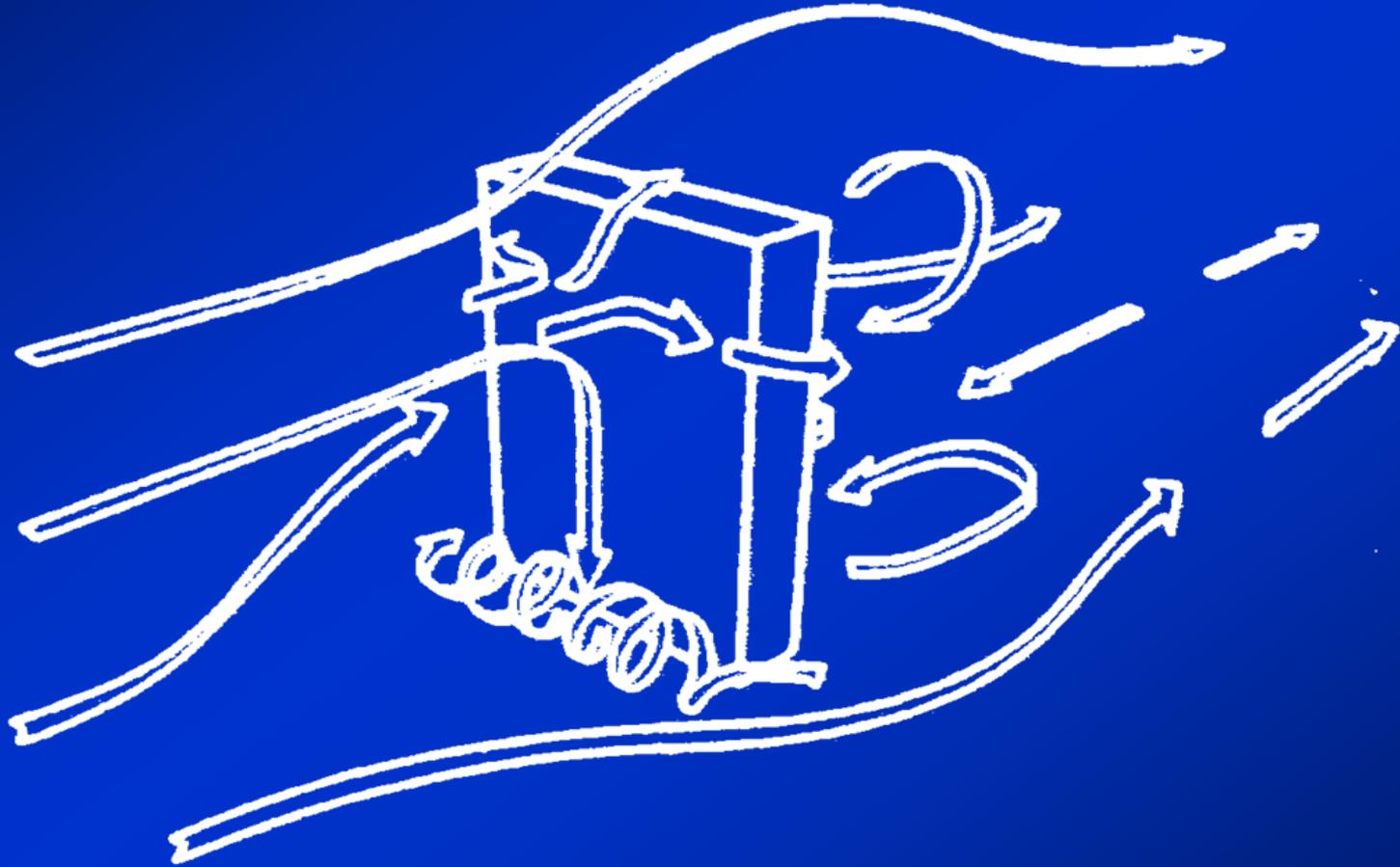




Wind Effects in Cities:



Deflexão do vento na direção vertical

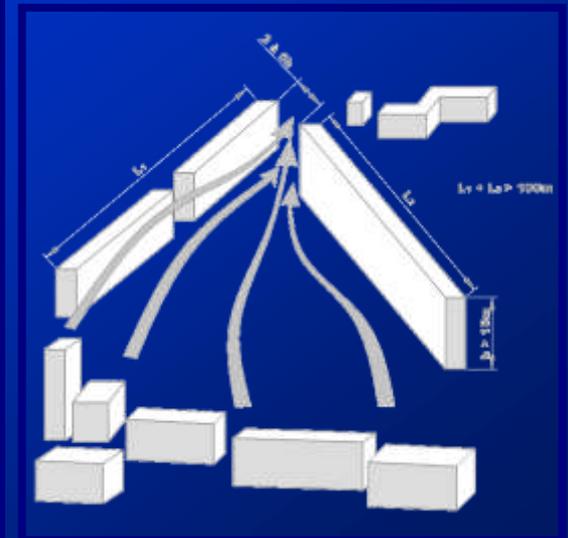
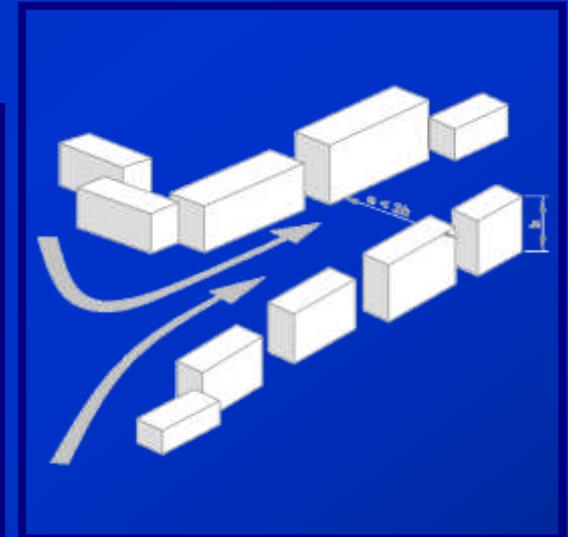
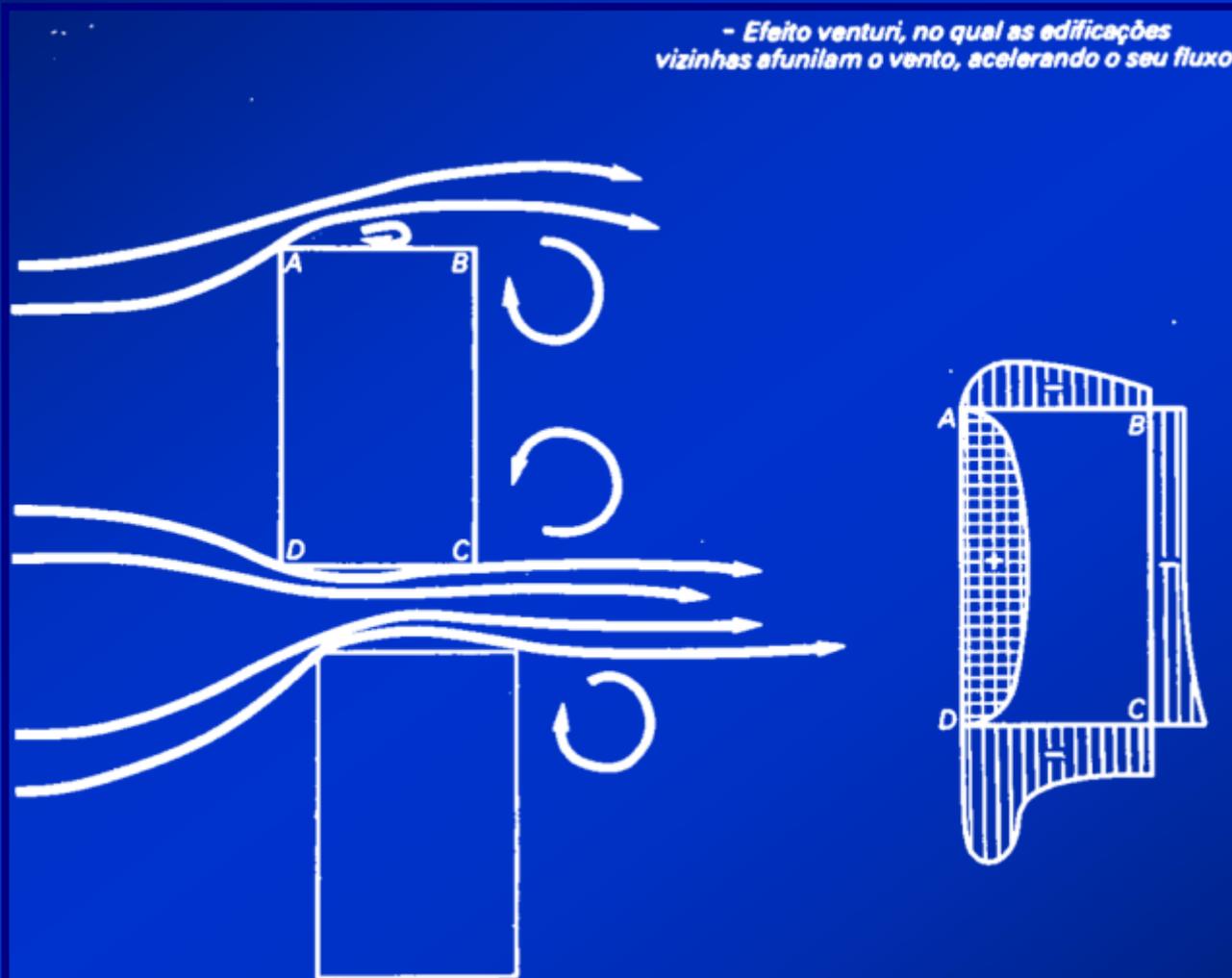


Turbulência da esteira



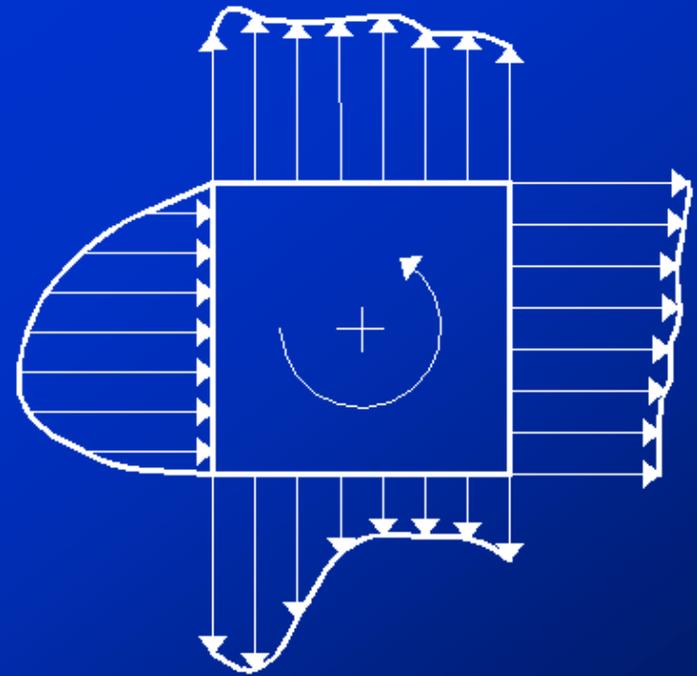
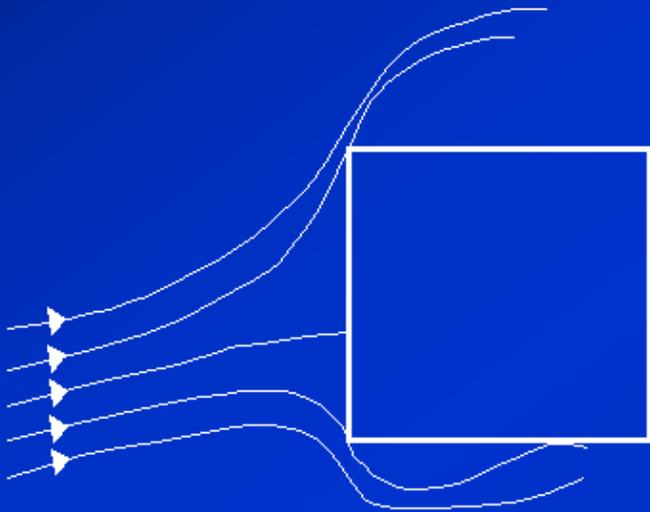
- Efeitos de vizinhança

Efeito Venturi

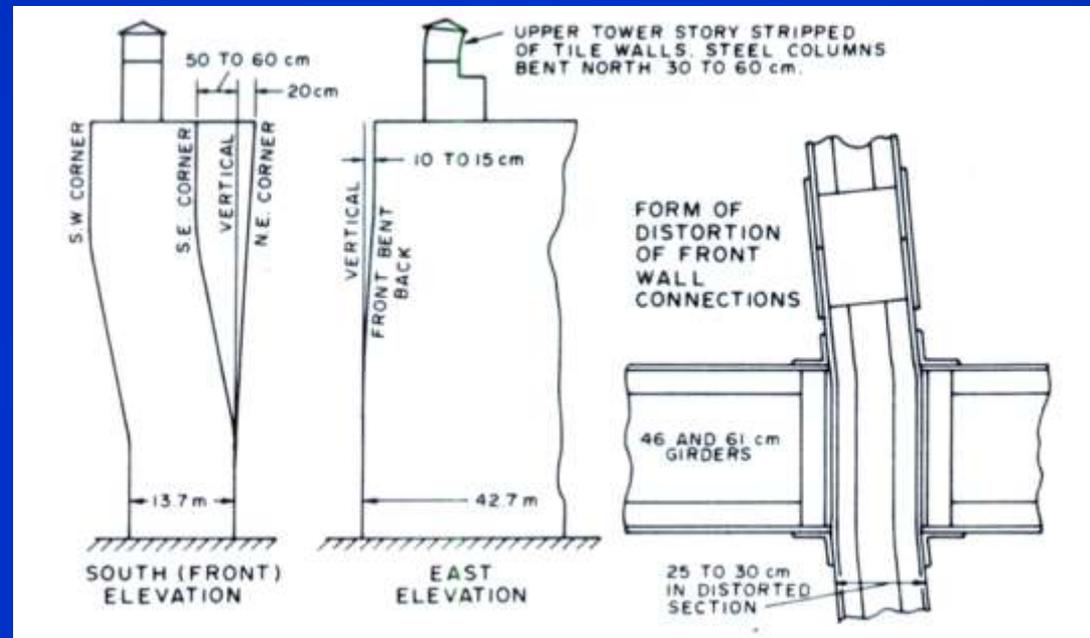


- Incidência do Vento
- Assimetria Estrutural

→ TORÇÃO



- Ed. Meyer-Kiser
Miami, E.U.A.



Edifício John Hancock, Boston



Tramandaí, RS – NOV 2009



Tramandaí, RS – NOV 2009



NBR-6123 - Brazilian Wind Code / 1988

QUASI-STEADY APPROACH

$$F = q (C_e - C_i) A$$

$$q = 0.613 V_k^2$$

$$V_k = V_o S_1 S_2 S_3$$

V_o : basic wind speed (3s, 10m heigth, open terrain, P=0.02 annual)

S_1 : topographic factor

S_2 : terrain roughness, building dimensions and heigth above terrain

S_3 : statistical factor

NBR-6123

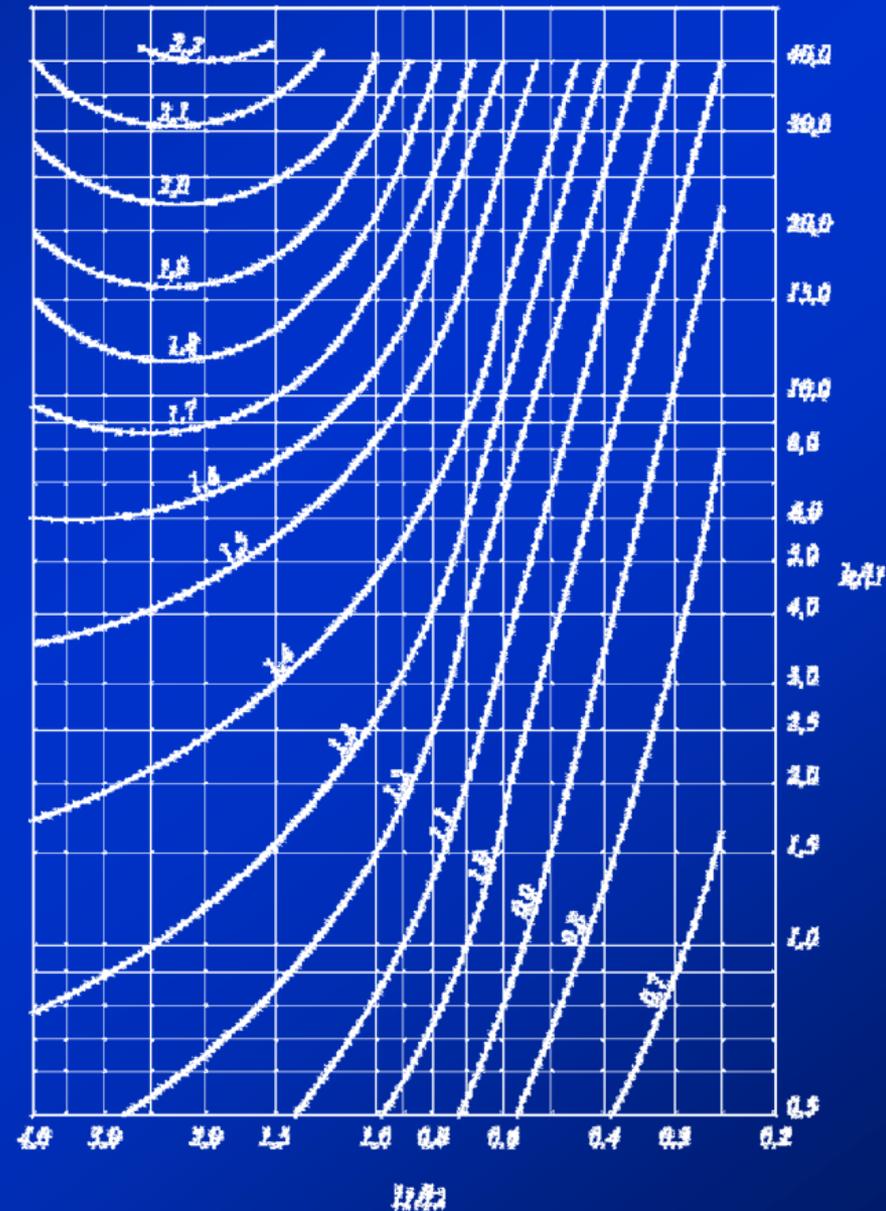
Coeficiente de arrasto C_a para edificações paralelepípedicas em vento de baixa turbulência



Fator de efeito de vizinhança:

$$FV = \frac{C \text{ na edificação com vizinhança}}{C \text{ na edificação isolada}}$$

$FV = 1,3$ (valor limite)



NBR-6123

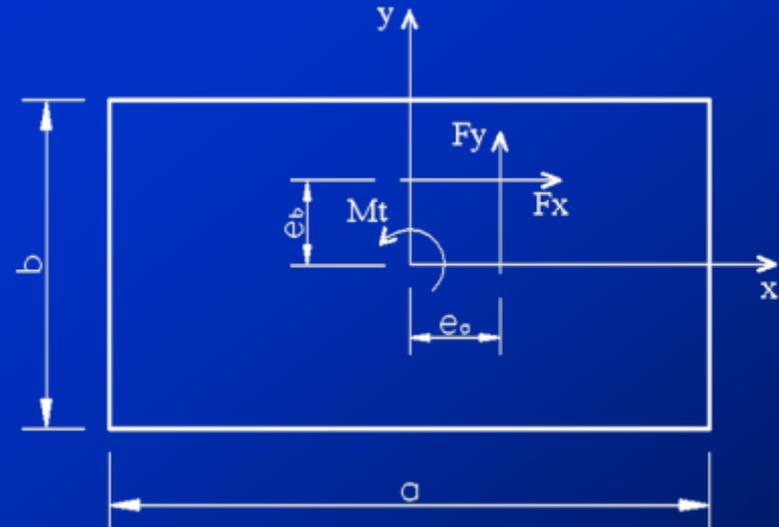
A torção é calculada considerando as seguintes excentricidades, em relação ao eixo vertical geométrico:

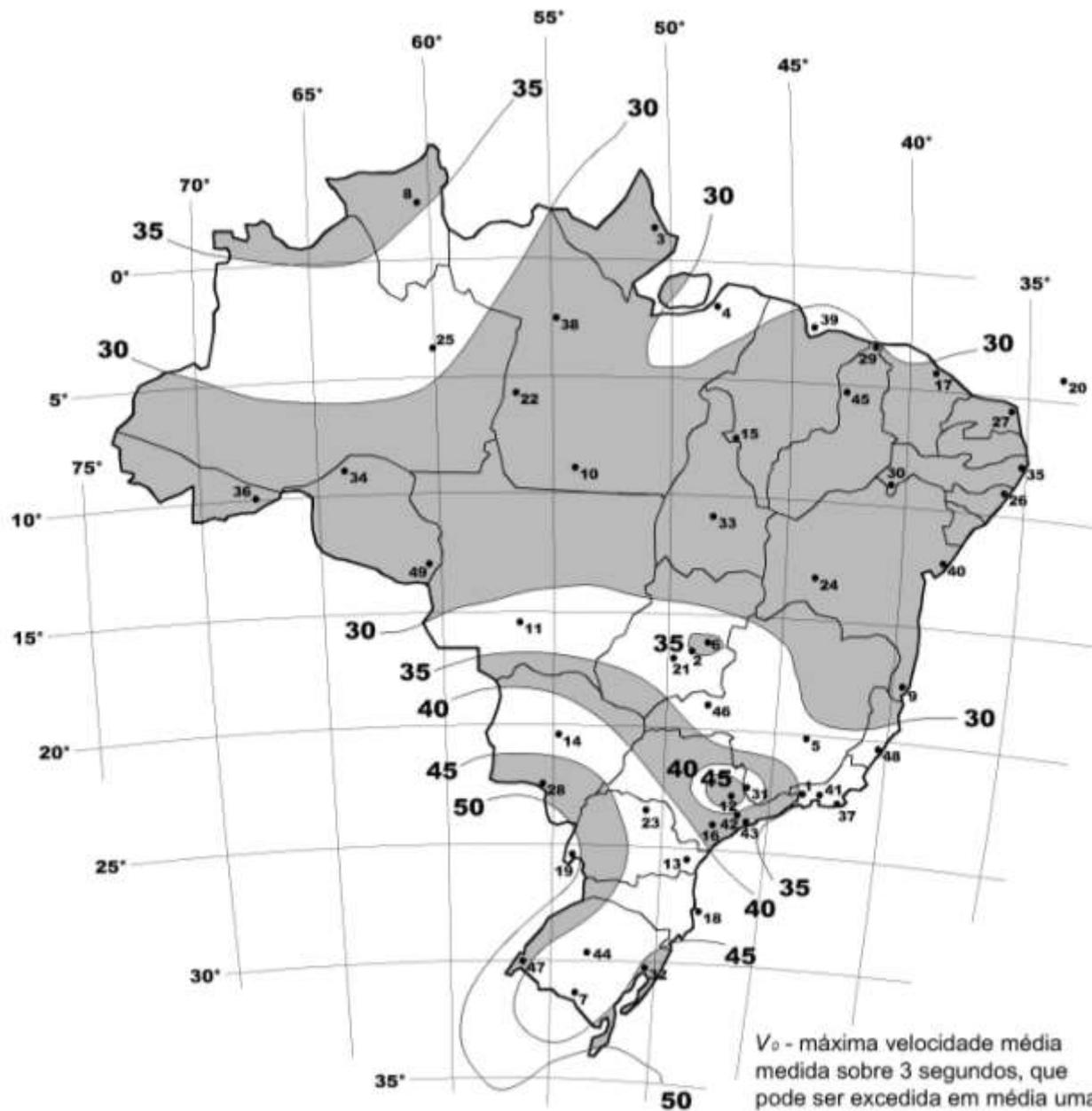
- edificação sem efeitos de vizinhança:

$$e_a=0,075 a \quad e \quad e_b=0,075 b$$

- edificações com efeito de vizinhança:

$$e_a=0,15 a \quad e \quad e_b=0,15 b$$





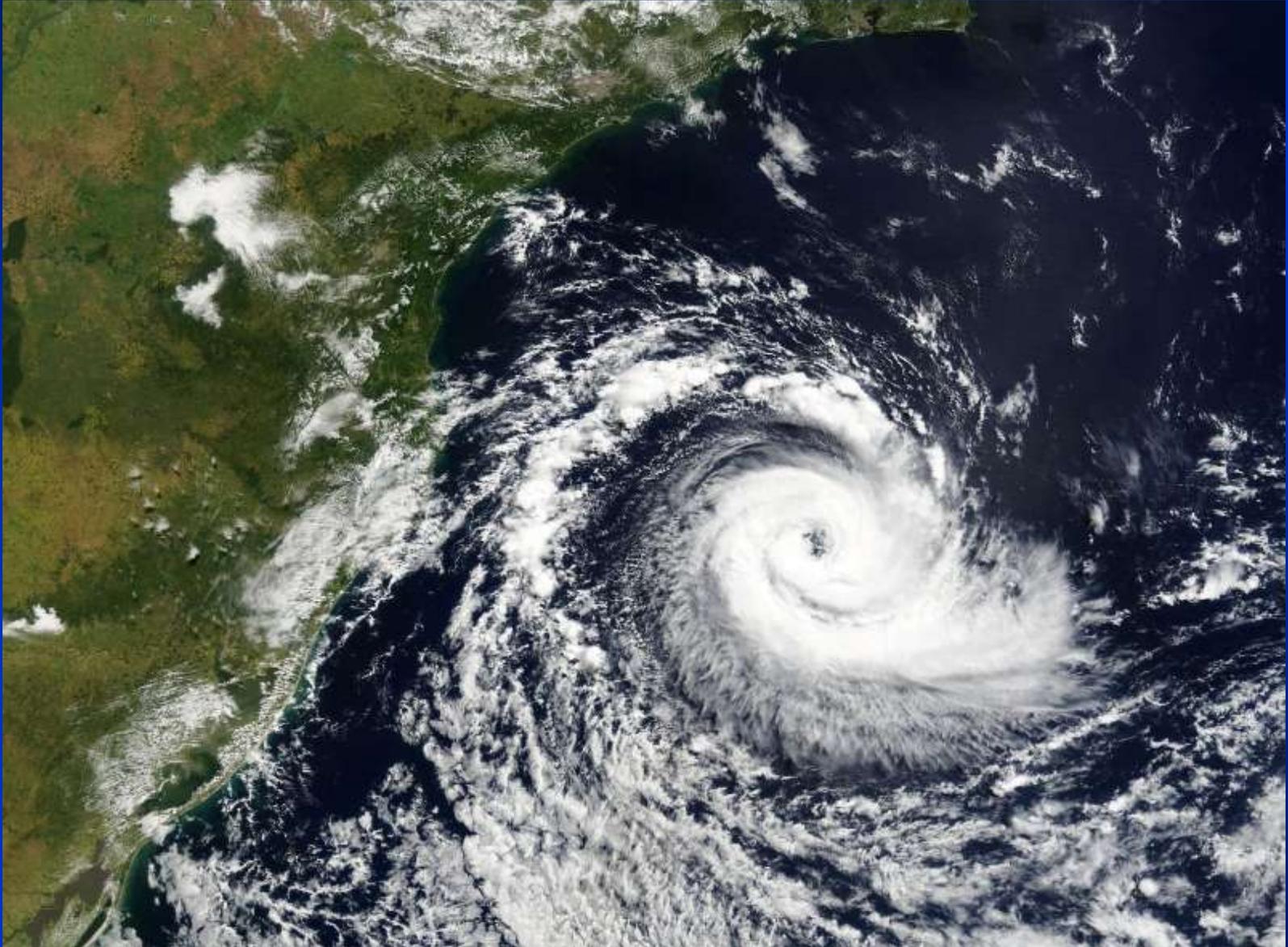
V_0 - máxima velocidade média medida sobre 3 segundos, que pode ser excedida em média uma vez em 50 anos, a 10m sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano.

EXTREME WINDS IN BRAZIL

- Extratropical cyclones (EPS Storms)
- Downbursts (TS Winds)
- Tornadoes
- Hurricanes (?)

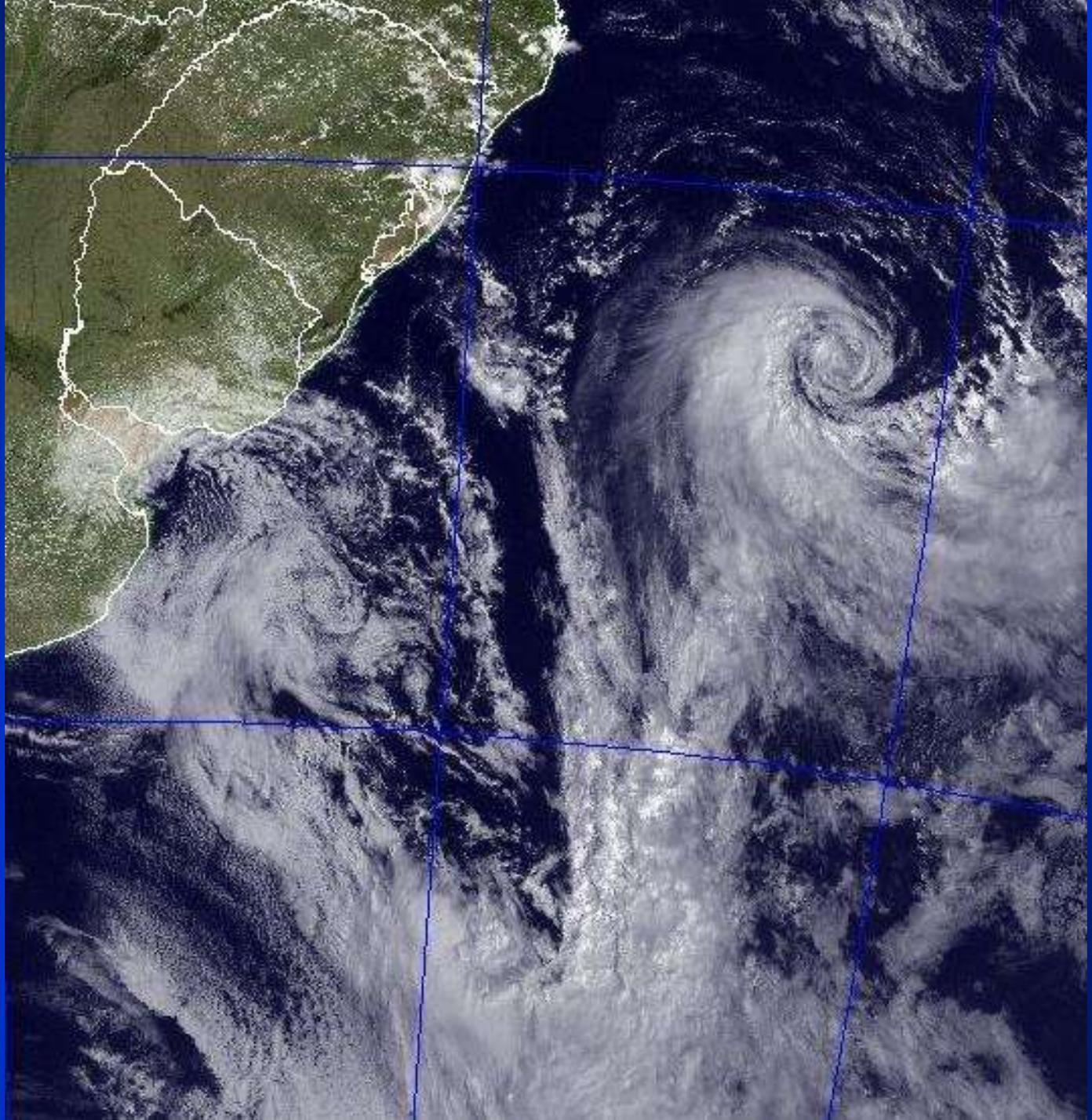
FURACÕES

Furacão Catarina - MAR2004



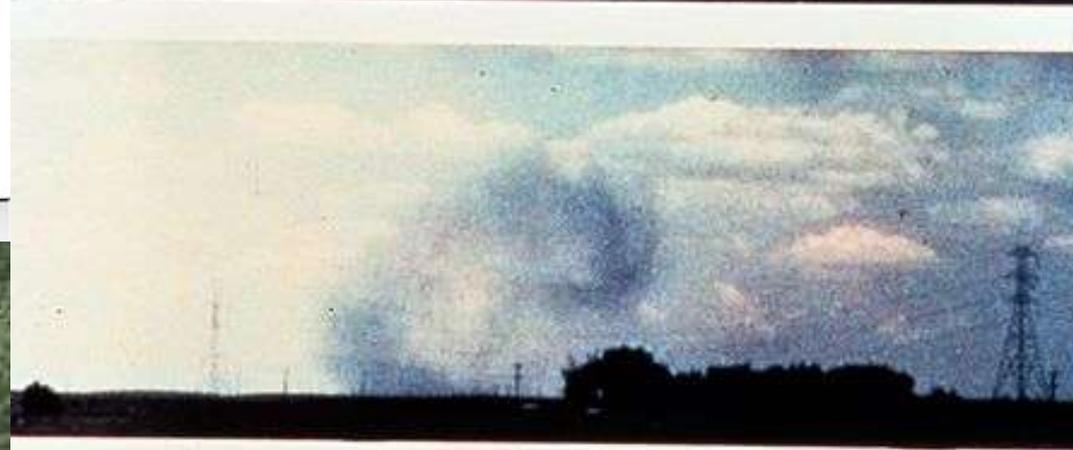
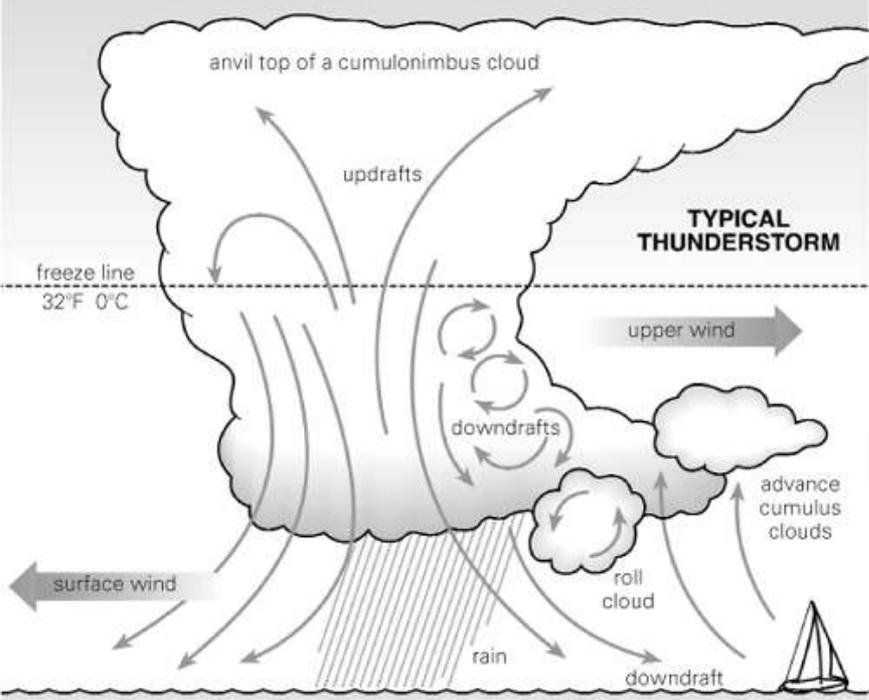
STORM ANITA

11MAR2010



**TORNADOS
&
MICRO-
EXPLOSÕES**

Micro-explosões





Downburst



(c) Copyright 1978, Michael R. Smith



0:00



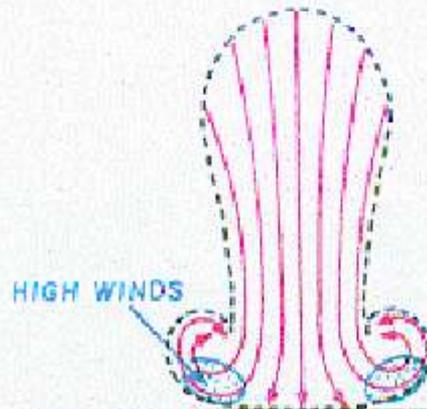
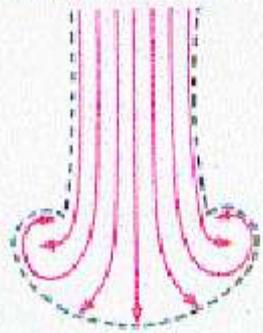
0:40



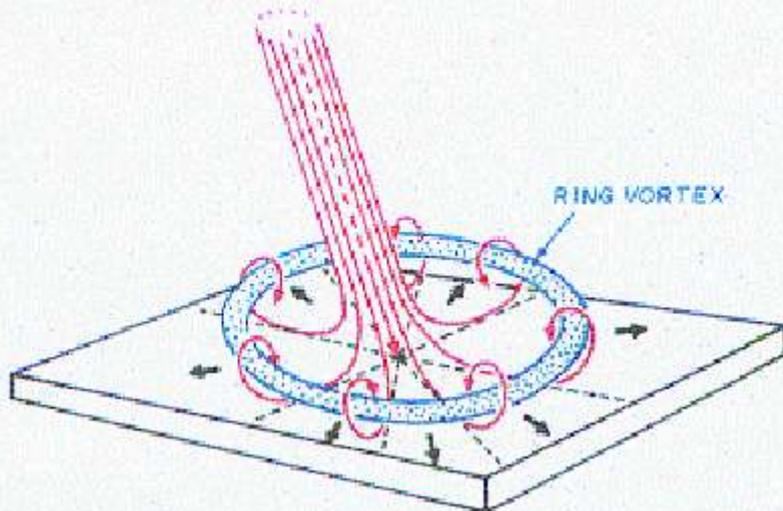
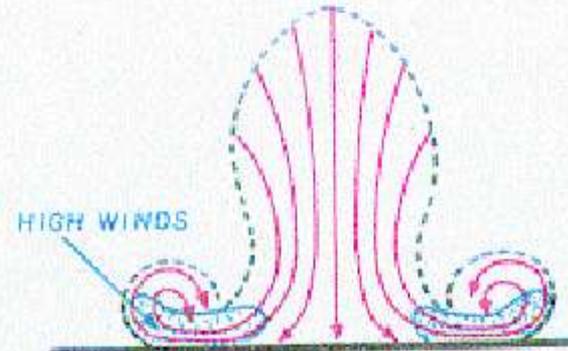
1:20

Midair Microburst

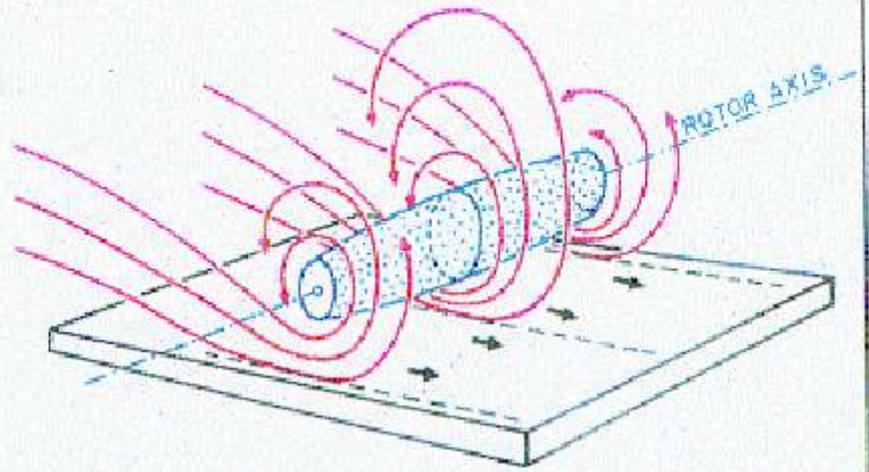
Surface Microburst



TOUCHDOWN

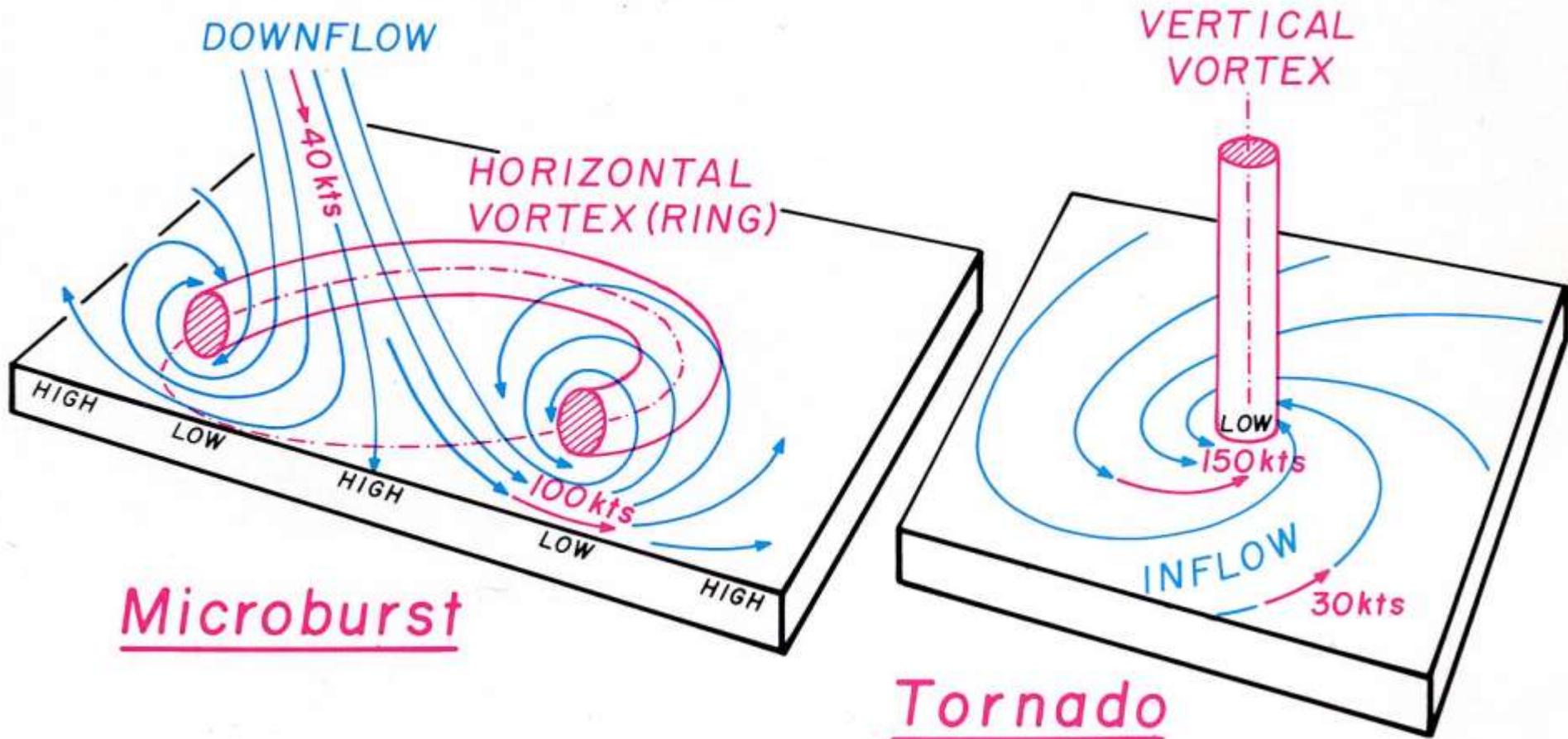


RING VORTEX



ROTOR AXIS

Downbursts & Tornadoes

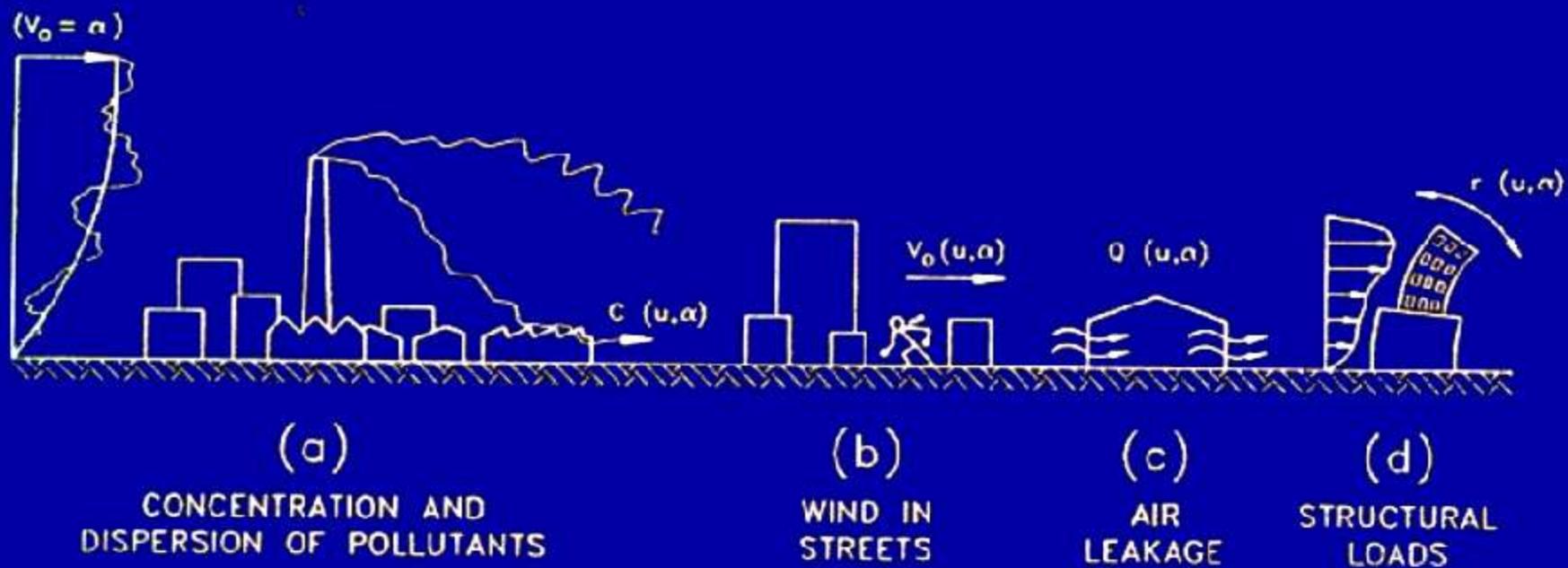


Schematic of the flow fields within downbursts and tornadoes (Fujita, 1985).

Tornado F1 - Tubarão, SC - 16FEV2008



Wind Effects in Cities:



NBR-6123 - Brazilian Wind Code / 1988

QUASI-STEADY APPROACH

$$F = q (C_e - C_i) A$$

$$q = 0.613 V_k^2$$

$$V_k = V_o S_1 S_2 S_3$$

V_o : basic wind speed (3s, 10m heigth, open terrain, P=0.02 annual)

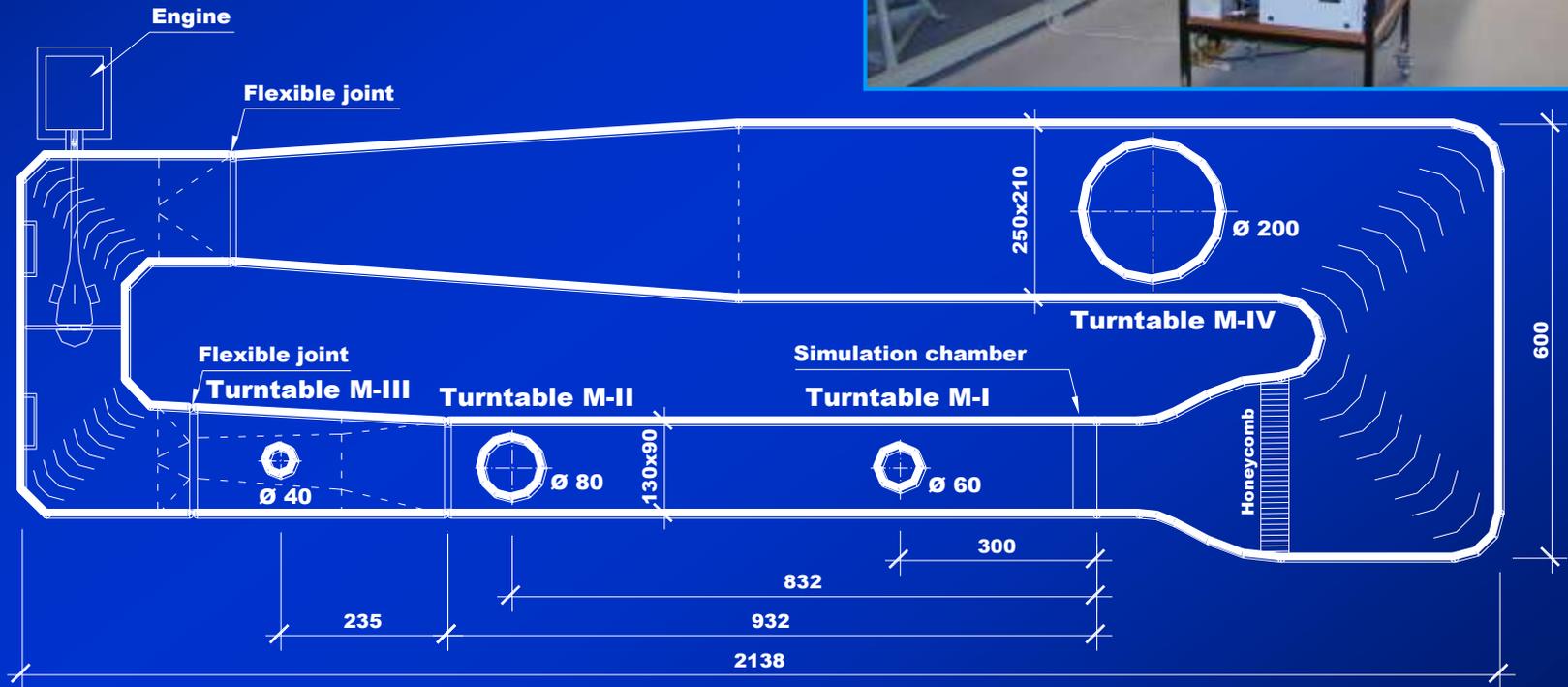
S_1 : topographic factor

S_2 : terrain roughness, building dimensions and heigth above terrain

S_3 : statistical factor

Túnel de Vento

Prof. Joaquim Blessmann



Boundary Layer Wind Tunnel Prof. Joaquim Blessmann
Dimensions in [cm]

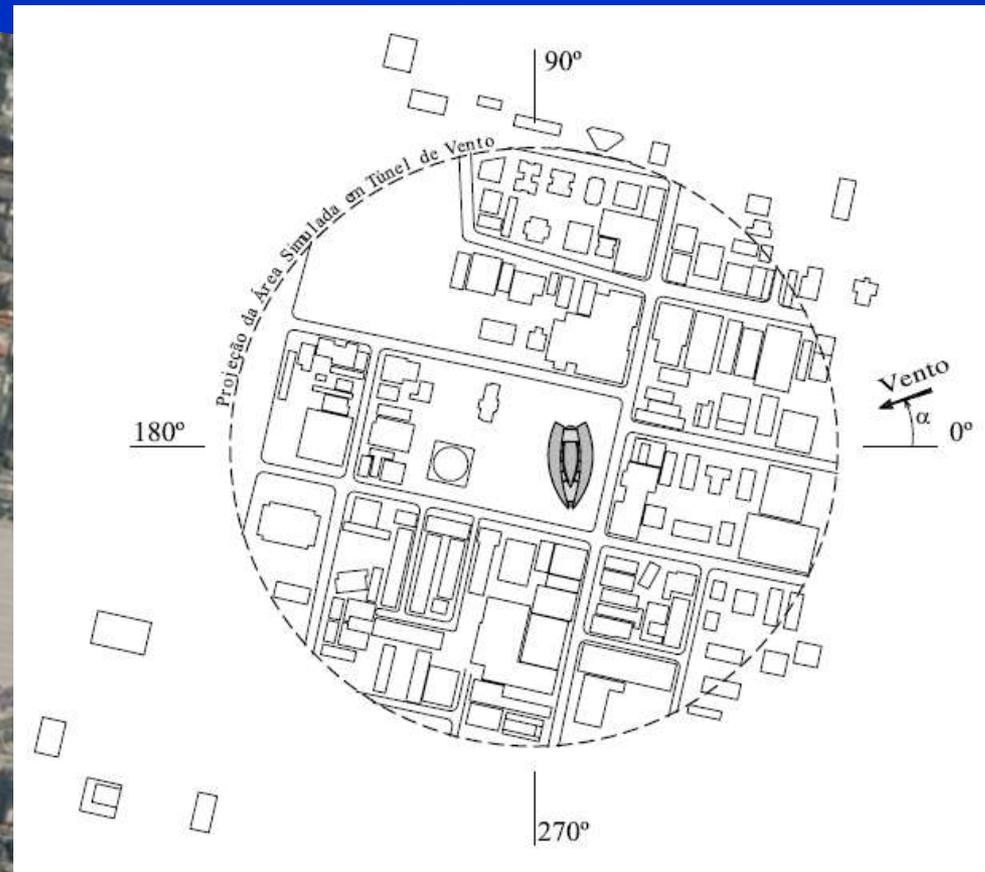
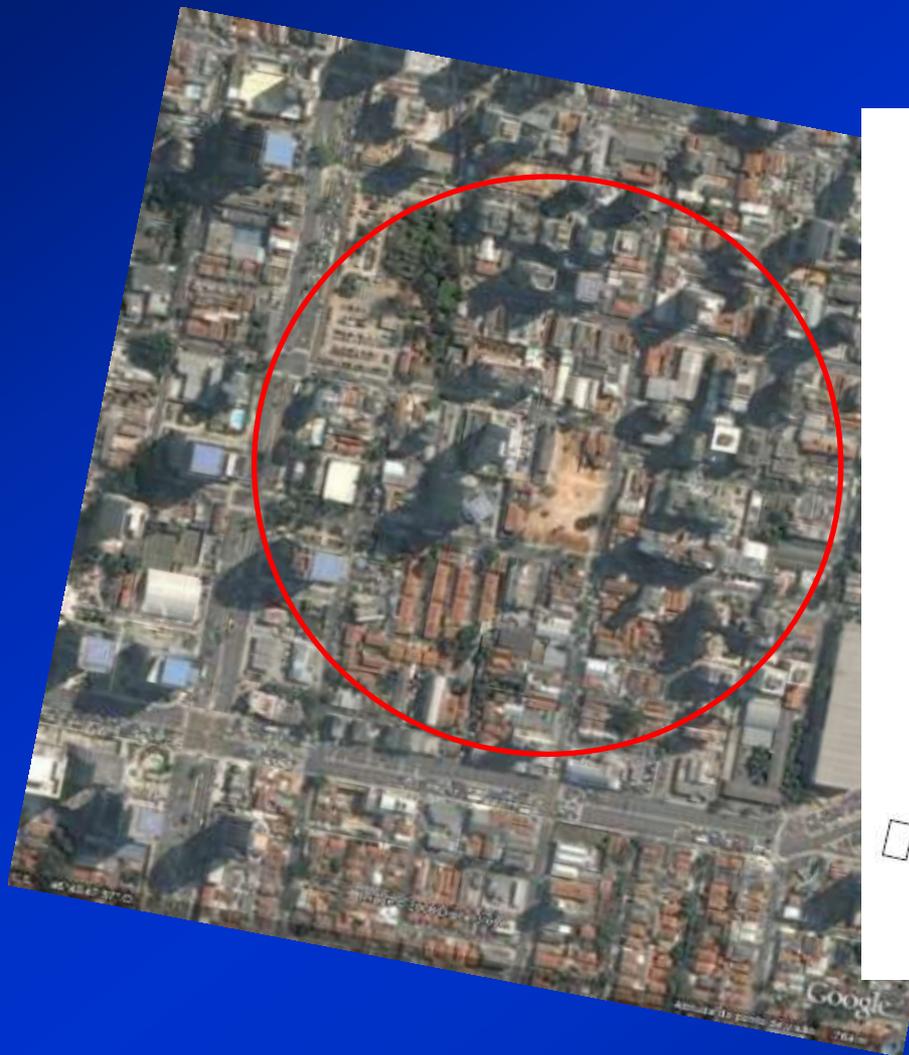
Empreendimento YUNY Leopoldo Green, São Paulo – SP

YUNY Incorporadora



Empreendimento YUNY Leopoldo Green, São Paulo – SP

Referência para o ângulo de incidência e área simulada no Túnel de Vento



Empreendimento YUNY Leopoldo Green, São Paulo – SP

1. Medida de Pressões



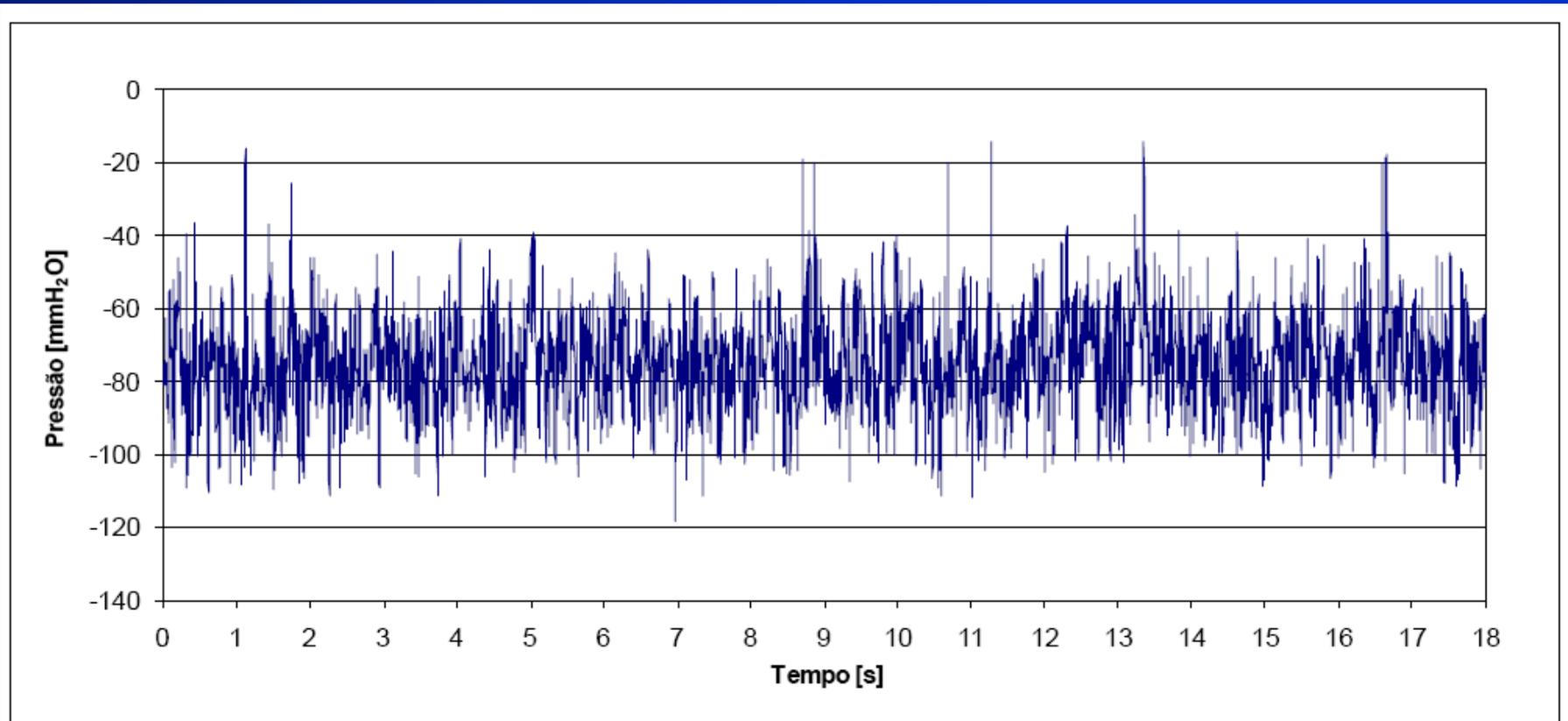
Configuração I
COM Heliponto



Configuração II
SEM Heliponto

Empreendimento YUNY Leopoldo Green, São Paulo – SP

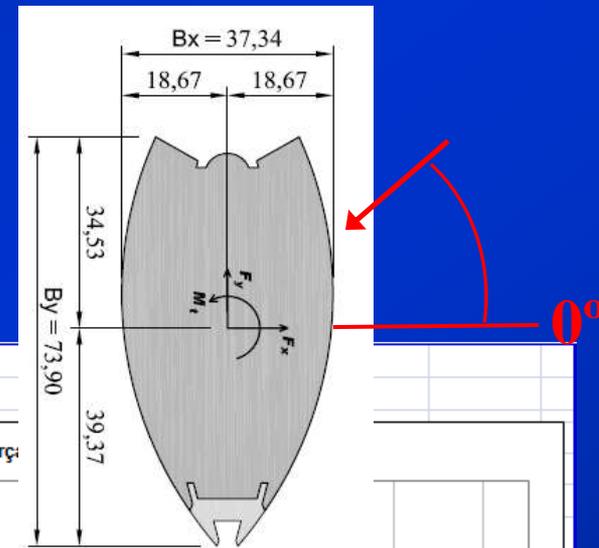
Exemplo de medida de pressões com transdutores elétricos



Registro da variação da pressão ao longo do tempo, a partir dos transdutores elétricos de pressão, para a tomada 65 e ângulo de incidência do vento de 300° (Config. I) – Empreendimento YUNY Leopoldo Green.

Empreendimento YUNY Leopoldo Green, São Paulo – SP

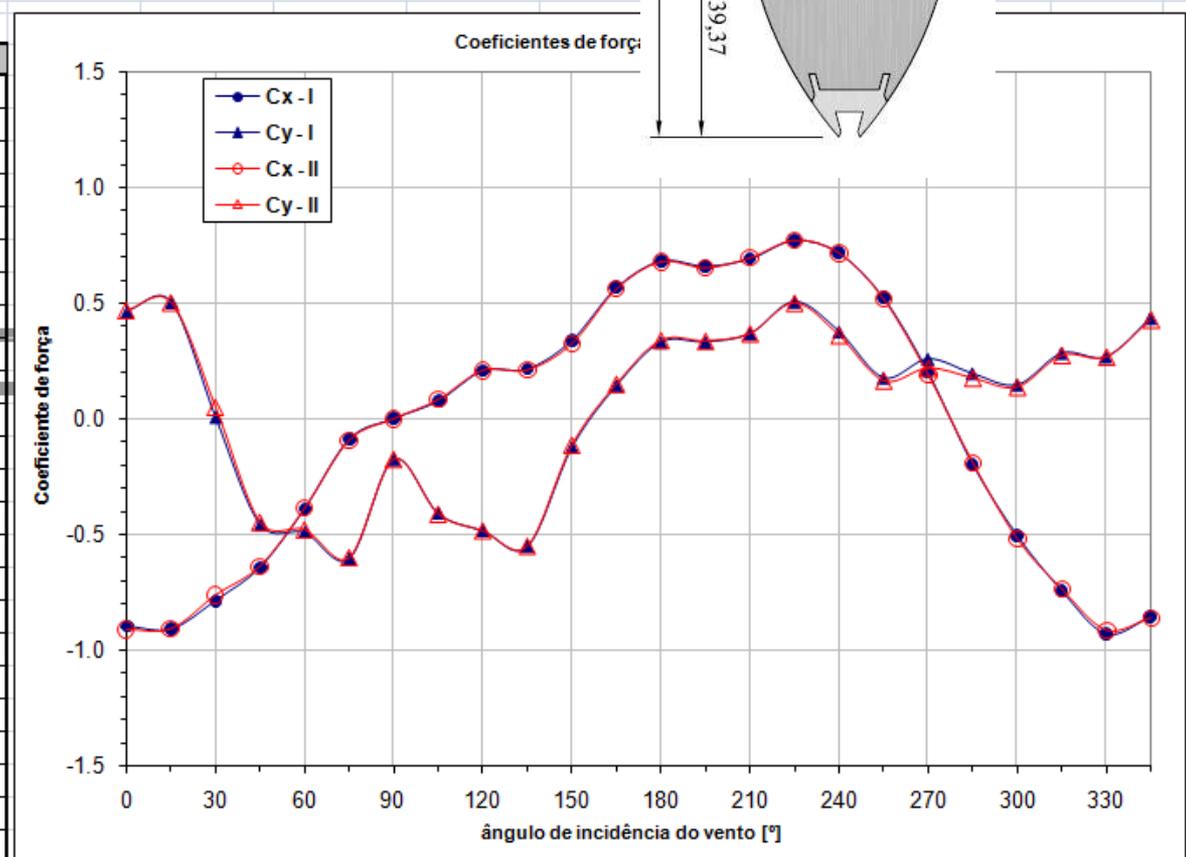
Comparação Carregamentos Globais



YUNY Leopoldo Green - Comparação de coeficientes de forças - Configuração I x Configuração II

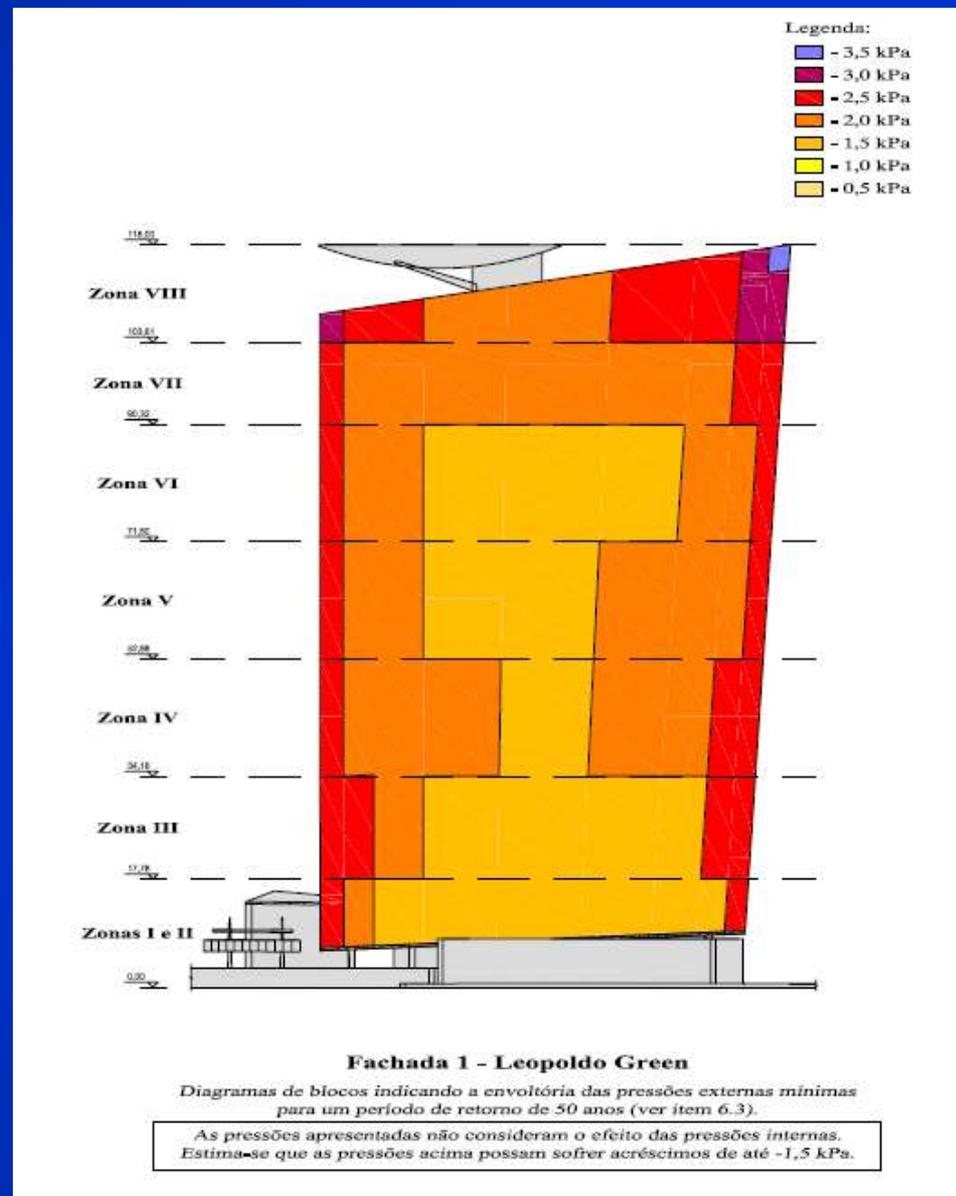
Coeficientes de força globais (Cx e Cy)

Ângulo [°]	Configuração I		Configuração II	
	Cx	Cy	Cx	Cy
0°	-0.90	0.47	-0.91	0.47
15°	-0.91	0.51	-0.91	0.51
30°	-0.79	0.01	-0.76	0.06
45°	-0.64	-0.45	-0.64	-0.44
60°	-0.39	-0.49	-0.38	-0.47
75°	-0.09	-0.60	-0.09	-0.59
90°	0.00	-0.17	0.00	-0.17
105°	0.08	-0.41	0.08	-0.41
120°	0.21	-0.48	0.21	-0.48
135°	0.22	-0.55	0.21	-0.54
150°	0.34	-0.12	0.32	-0.11
165°	0.57	0.15	0.56	0.15
180°	0.68	0.33	0.68	0.34
195°	0.66	0.34	0.65	0.34
210°	0.69	0.37	0.70	0.37
225°	0.77	0.51	0.77	0.51
240°	0.72	0.38	0.72	0.36
255°	0.52	0.18	0.52	0.17
270°	0.20	0.26	0.19	0.22
285°	-0.20	0.20	-0.19	0.18
300°	-0.50	0.15	-0.52	0.14
315°	-0.74	0.29	-0.73	0.28
330°	-0.93	0.27	-0.91	0.27
345°	-0.86	0.44	-0.86	0.43



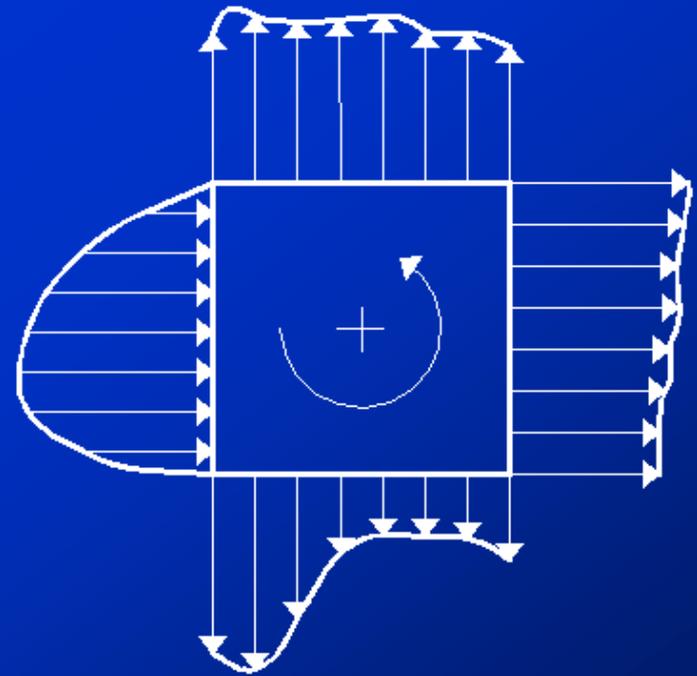
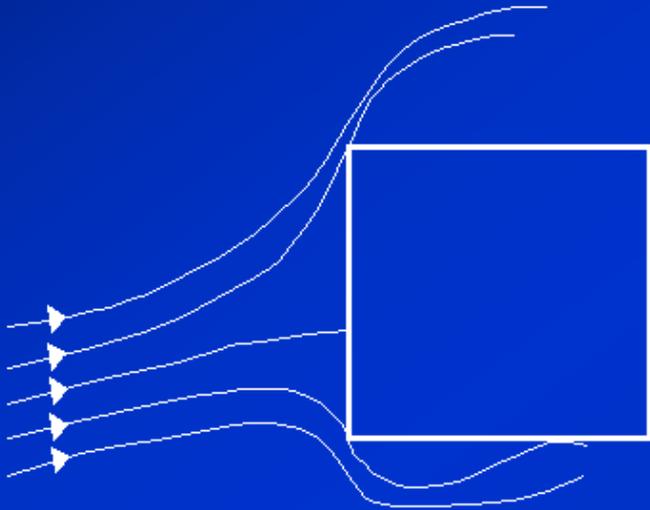
YUNY – Leopoldo Green

Diagrama de blocos para dimensionamento das fachadas



- Incidência do Vento
- Assimetria Estrutural

→ TORÇÃO



NBR-6123

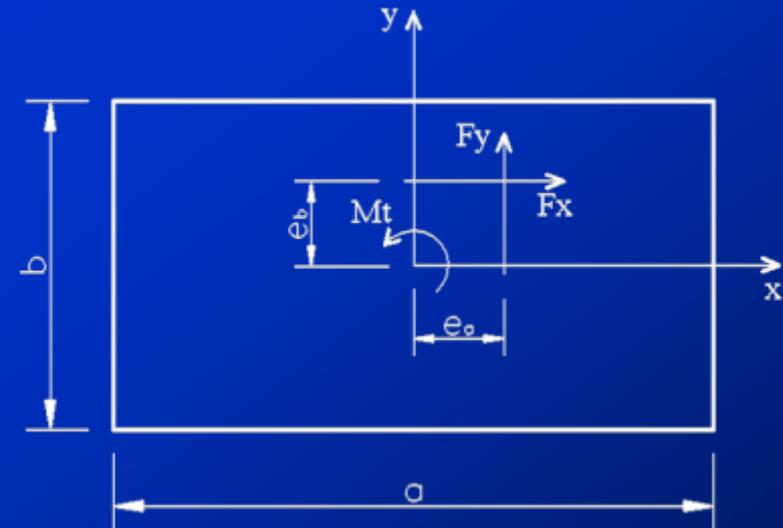
A torção é calculada considerando as seguintes excentricidades, em relação ao eixo vertical geométrico:

- edificação sem efeitos de vizinhança:

$$e_a=0,075 a \quad e \quad e_b=0,075 b$$

- edificações com efeito de vizinhança:

$$e_a=0,15 a \quad e \quad e_b=0,15 b$$

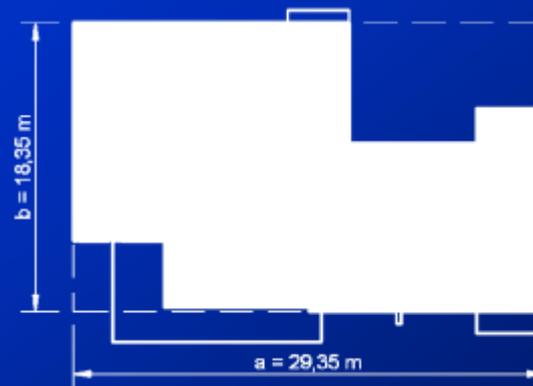


Modelos Ensaaiados

Projeto *Torre de Málaga*

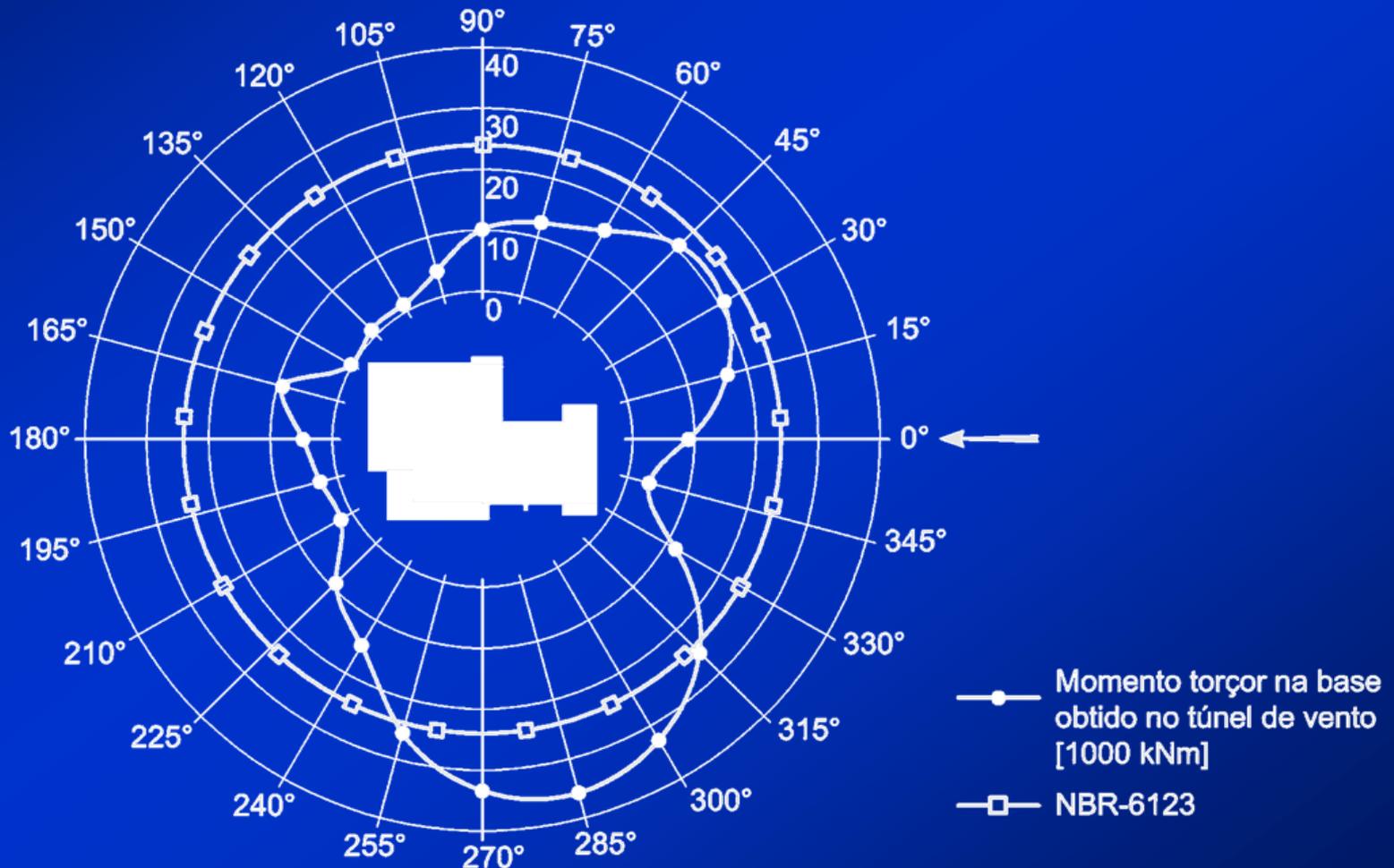


Altura: 118,0 m
Local: Londrina/PR
Projeto: VM Garcia Eng.
Contratante: GALMO Eng.



Análise dos Resultados

Projeto *Torre de Málaga*



Modelos Ensaaiados

Projeto *L'Essence Jardins*



Altura: 120,1 m

Local: São Paulo/SP

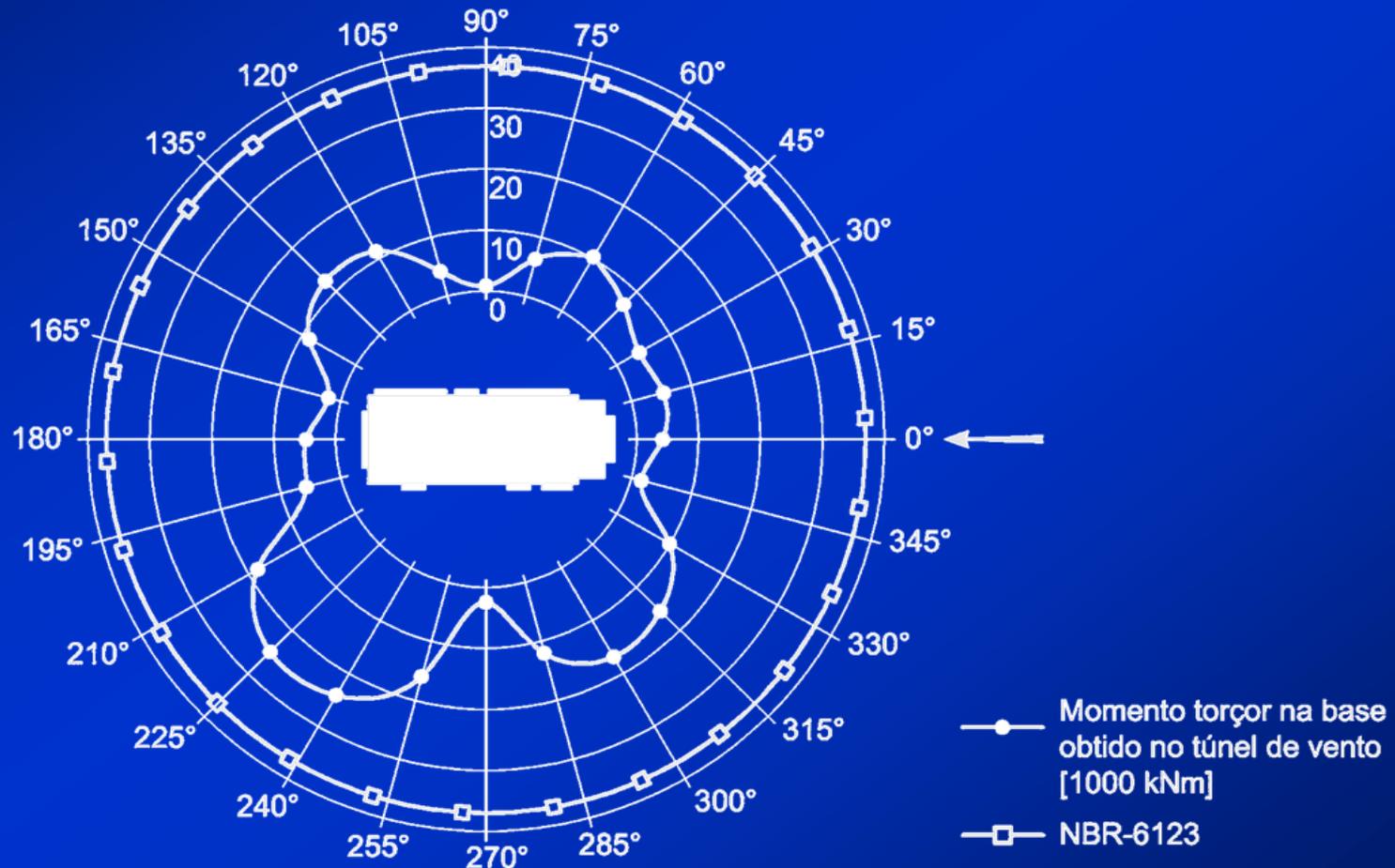
Projeto: França & Associados

Contratante: INPAR



Análise dos Resultados

Projeto *L'Essence Jardins*



Modelos Ensaaiados

Projeto *RochaVerá*



Altura: 75,0 m

Local: São Paulo/SP

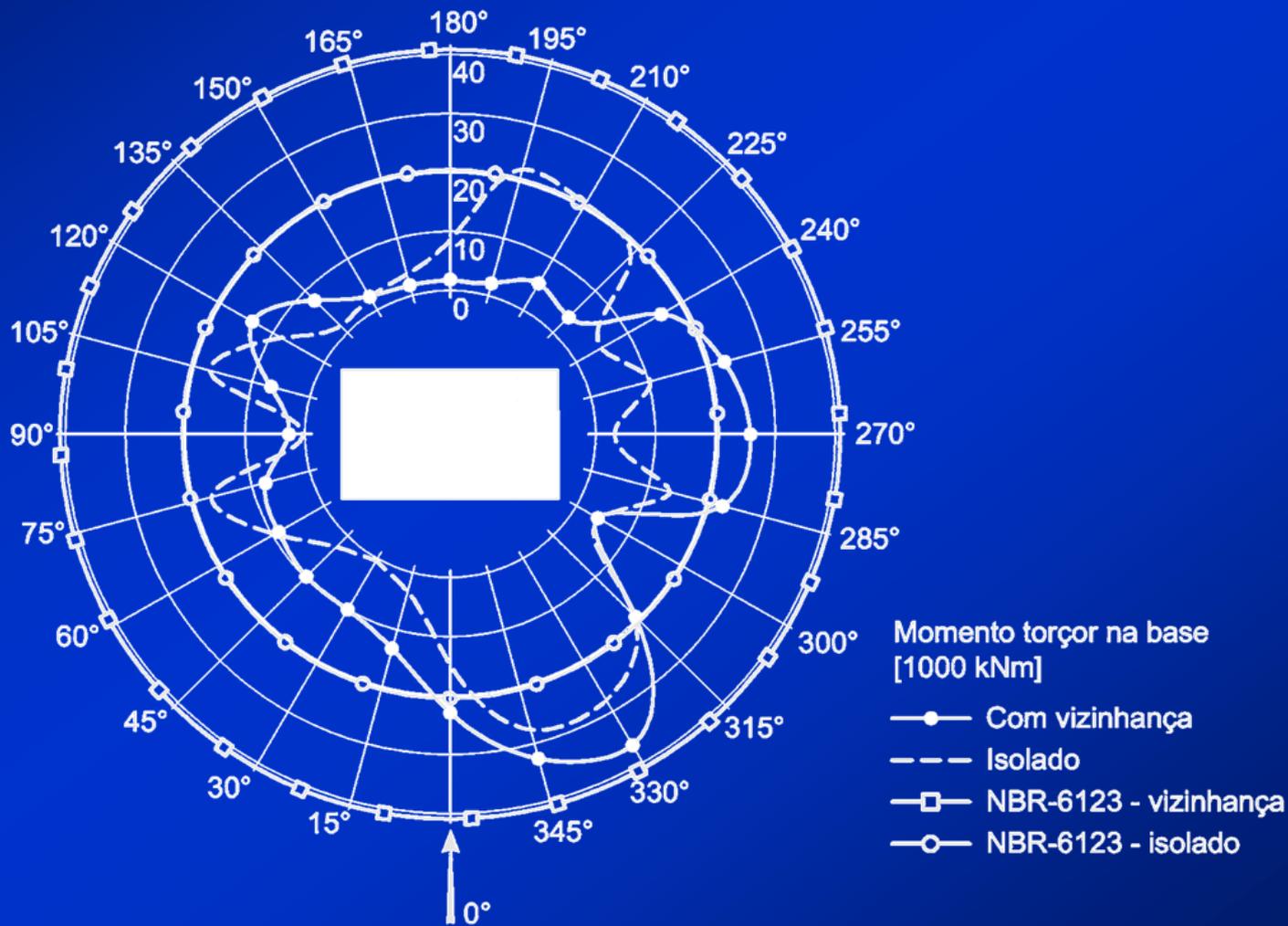
Projeto: Julio Kasoy e Mário Franco

Contratante: Tishman Speyer/Método



Análise dos Resultados

Projeto *RochaVerá*



Modelos Ensaaiados

Projeto *SP Wellness*

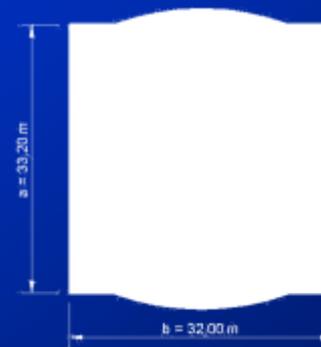


Altura: 93,5 m

Local: São Paulo/SP

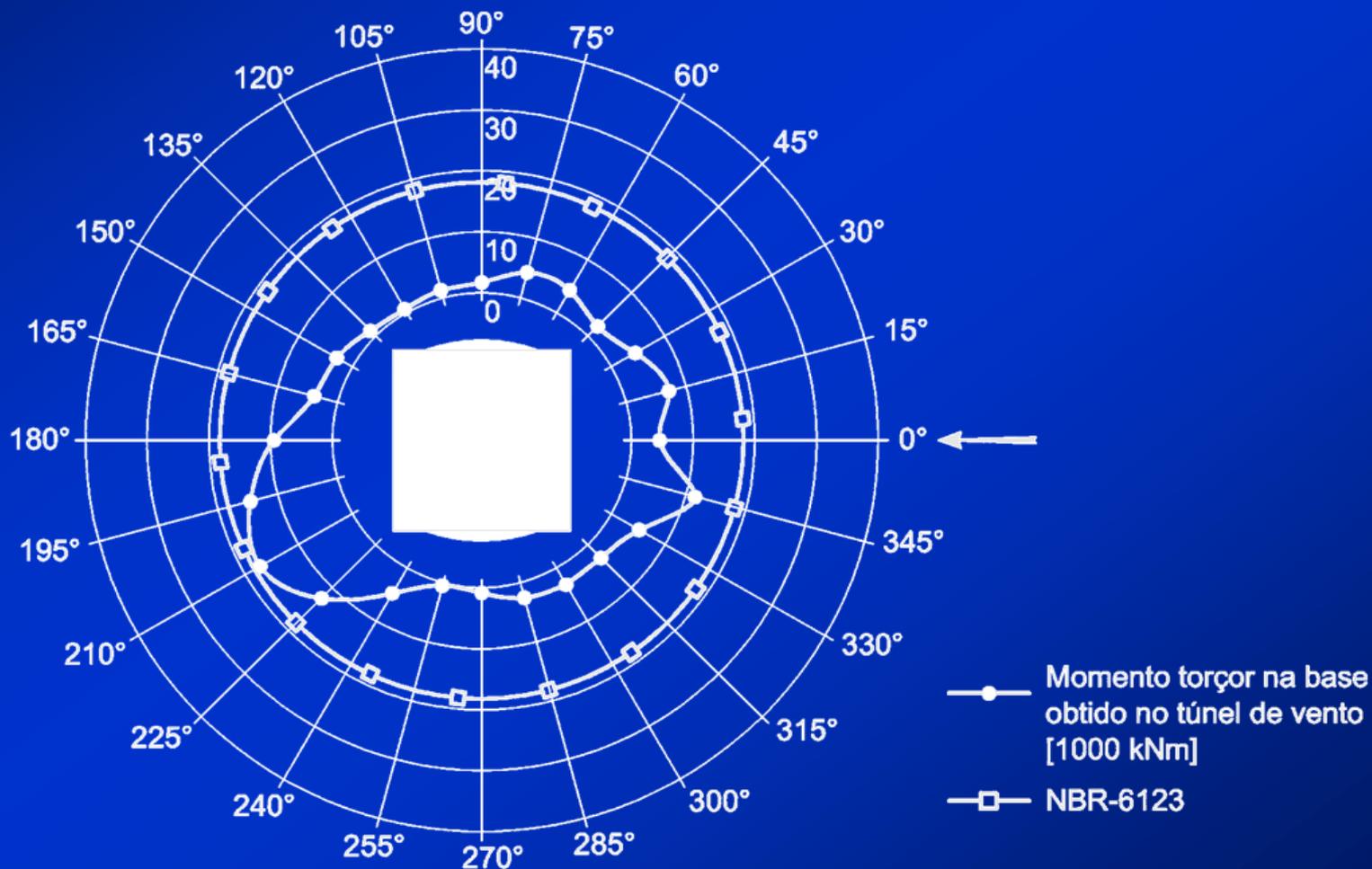
Projeto: Pasqua e Graziano

Contratante: MATEC / TAKAOKA



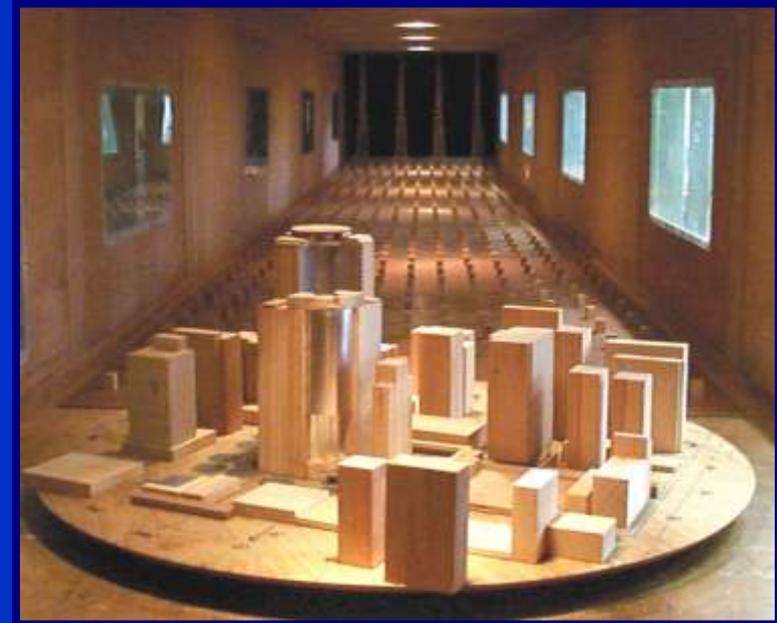
Análise dos Resultados

Projeto *SP Wellness*



Modelos Ensaaiados

Projeto *Brascan Century*

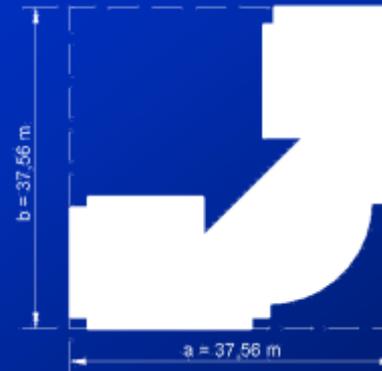


Altura: 118,6 m

Local: São Paulo/SP

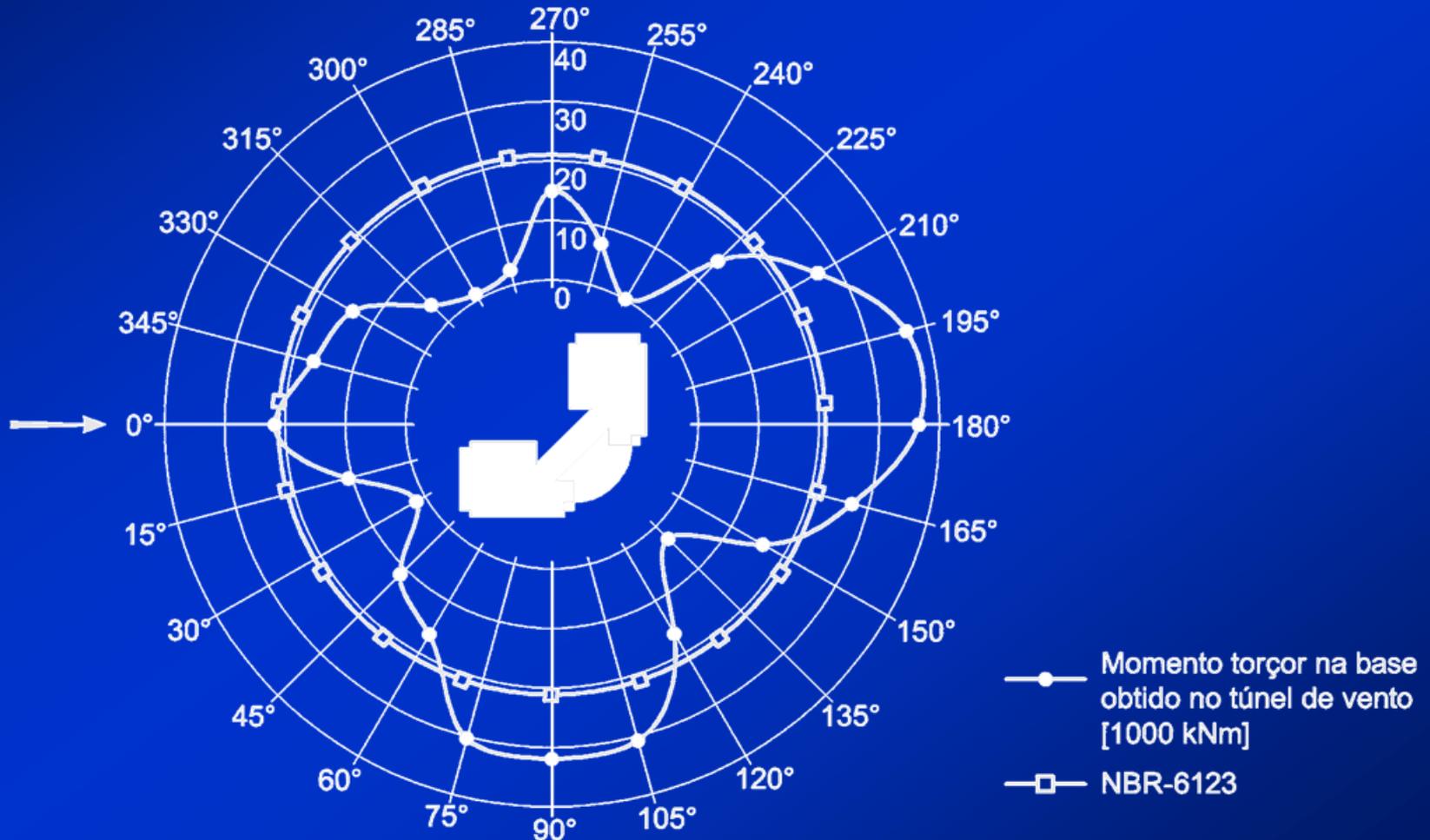
Projeto: França & Associados

Contratante: Brascan



Análise dos Resultados

Projeto *Brascan Century*

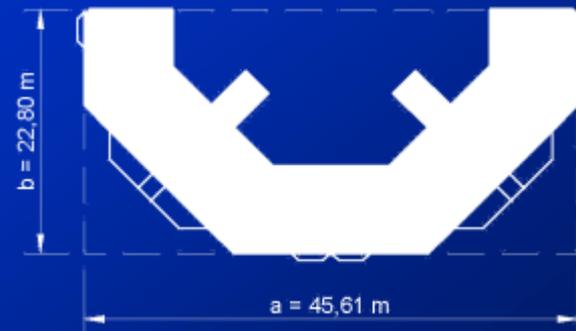


Modelos Ensaaiados

Projeto *Cyrela Classique*

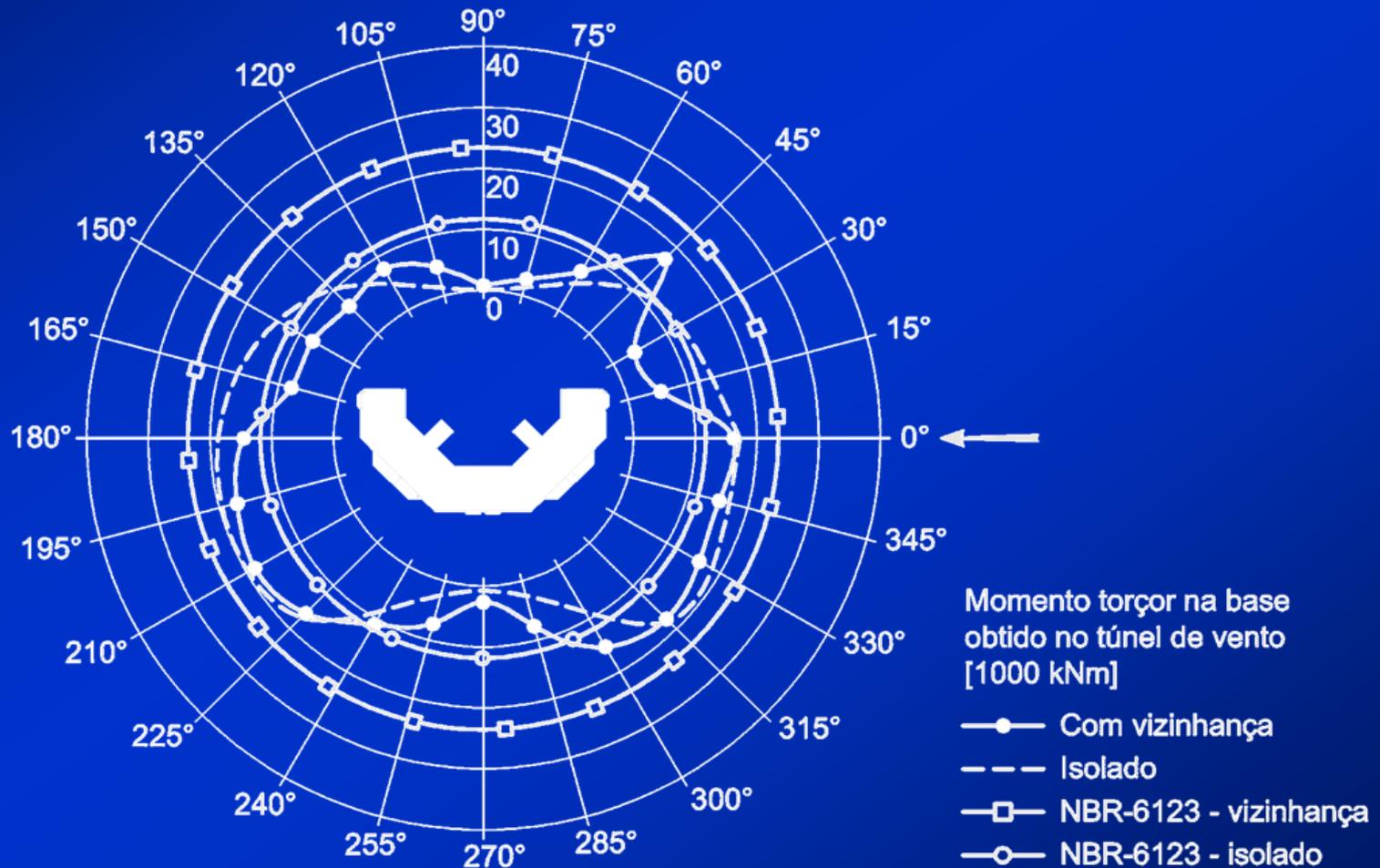


Altura: 72,5 m
Local: São Paulo/SP
Projeto: Vantec
Contratante: Cyrela



Análise dos Resultados

Projeto *Cyrela Classique*



Modelos Ensaaiados

Projeto *Gafisa-Eldorado*

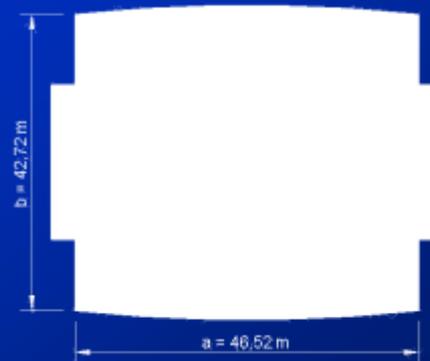


Altura: 142,5 m

Local: São Paulo/SP

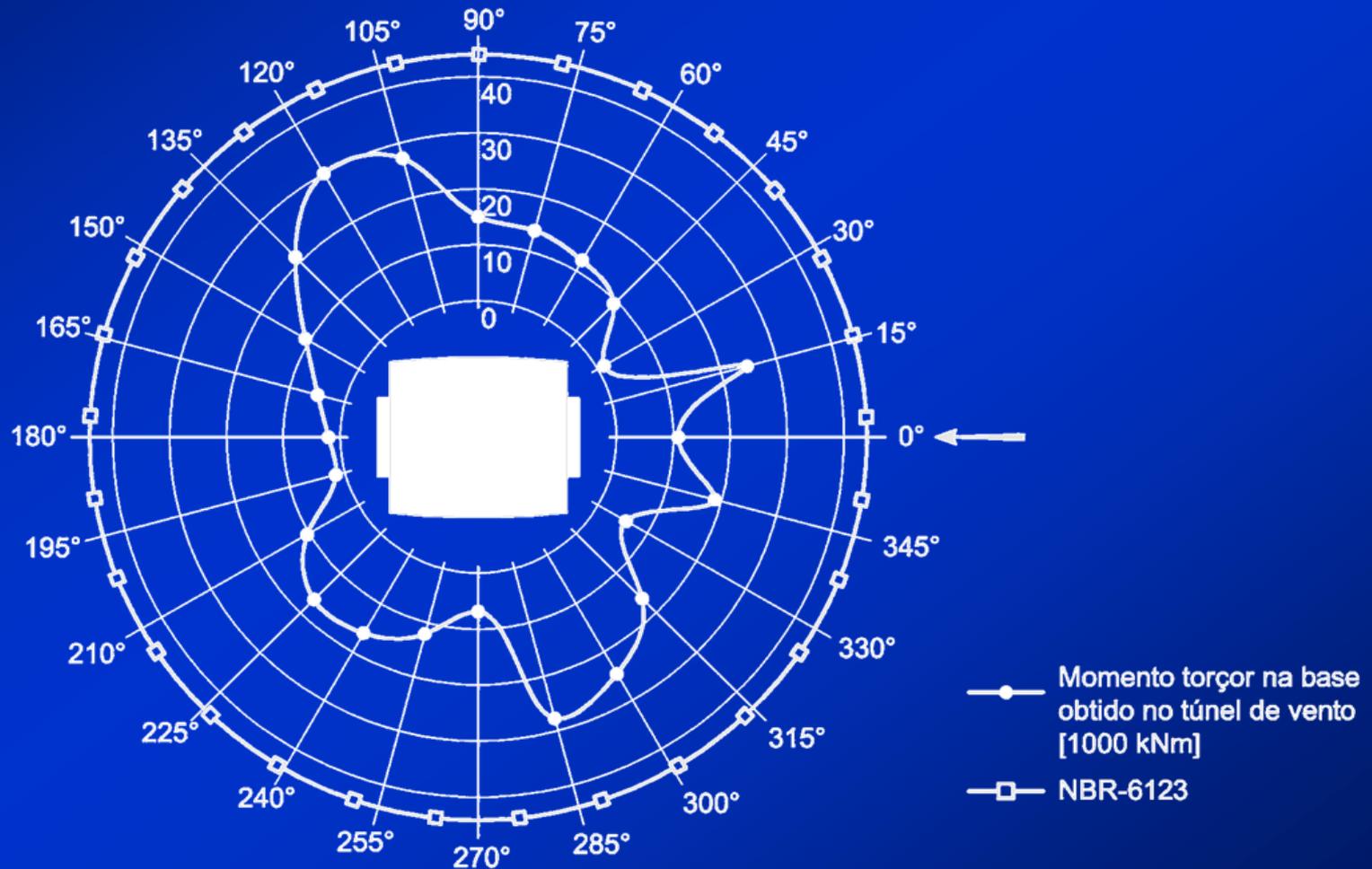
Projeto: França & Associados

Contratante: Gafisa



Análise dos Resultados

Projeto *Gafisa-Eldorado*



Modelos Ensaaiados

Projeto *e-Tower*

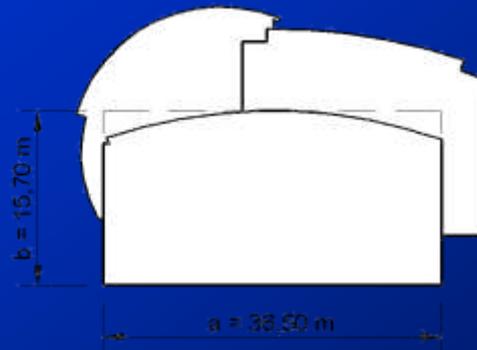


Altura: 149,5 m

Local: São Paulo/SP

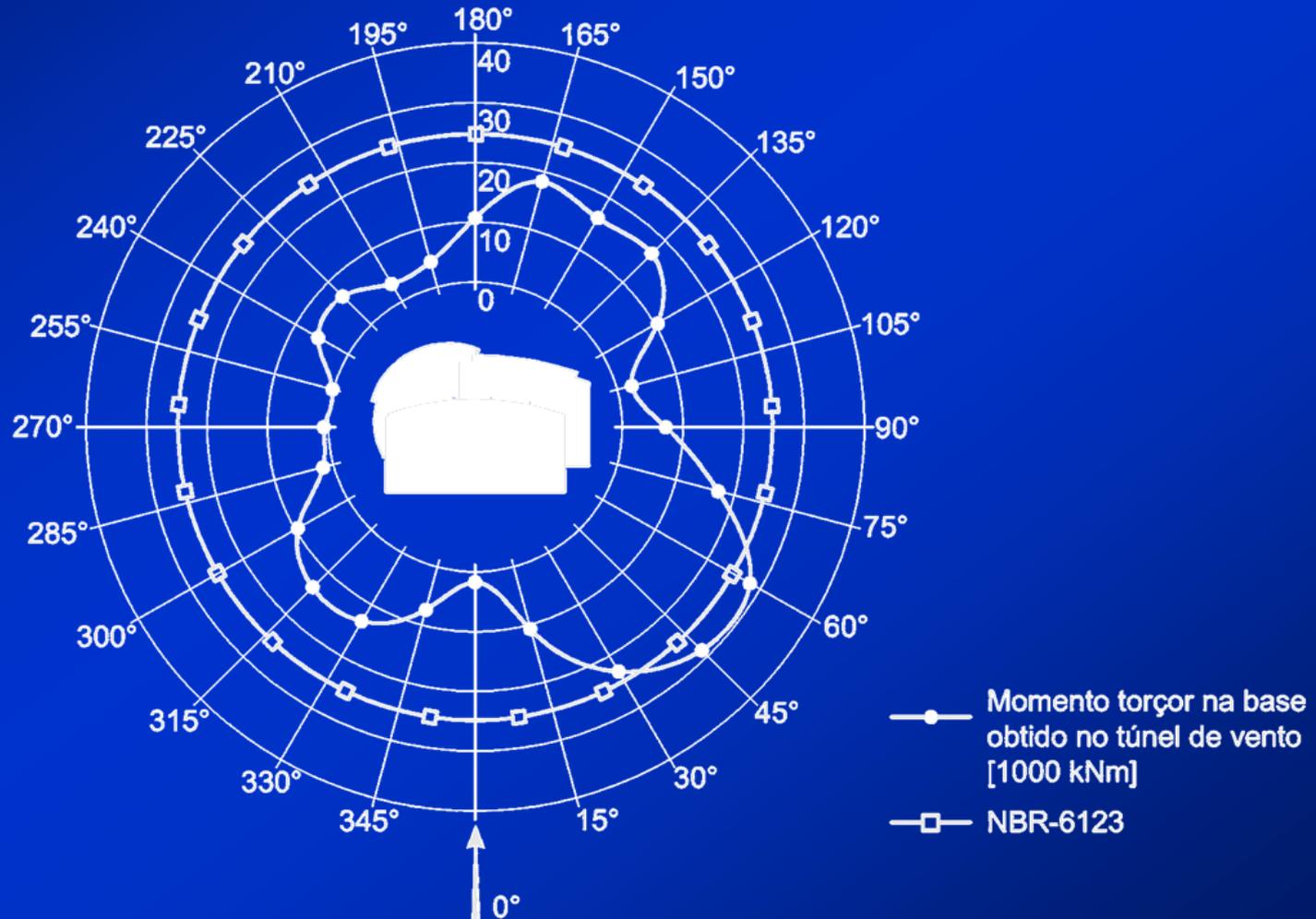
Projeto: França & Associados

Contratante: Tecnum / Munir Abud



Análise dos Resultados

Projeto *e-Tower*



Modelos Ensaaiados

Projeto *Mandarim*



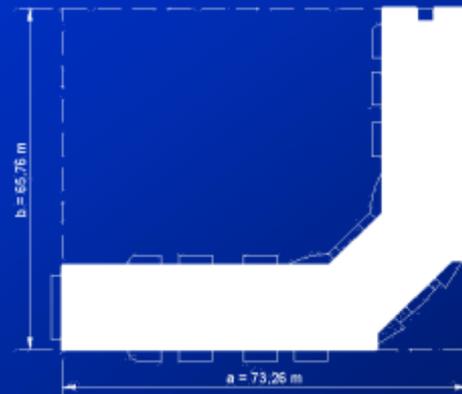
Altura: 63,5 m

Local: Rio de Janeiro/SP

Projeto: SOMA Eng.

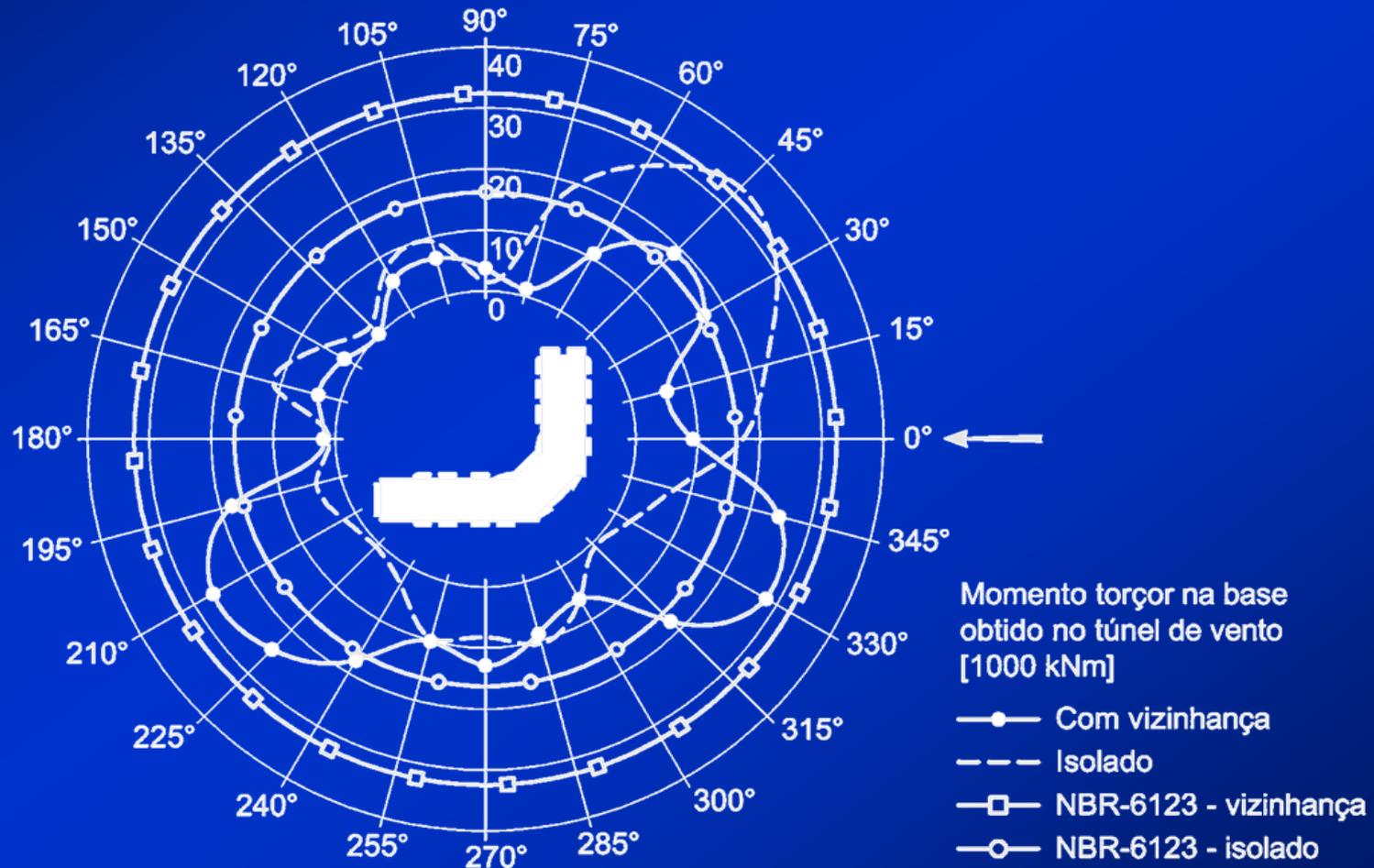
Consultoria: Anibal Knijnik

Contratante: Option



Análise dos Resultados

Projeto *Mandarim*



Modelos Ensaaiados

Projeto *Sundeck*

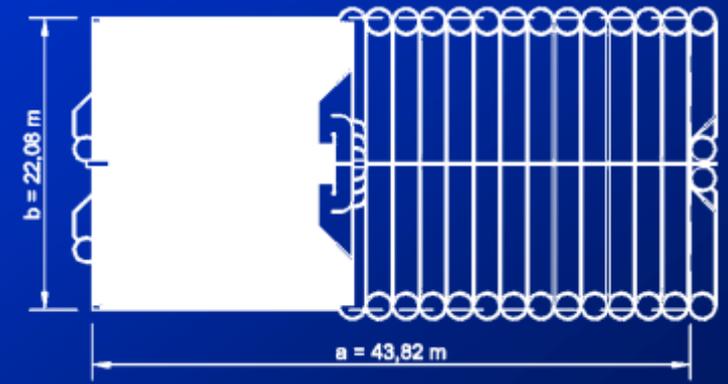


Altura: 56,5 m

Local: Rio de Janeiro/SP

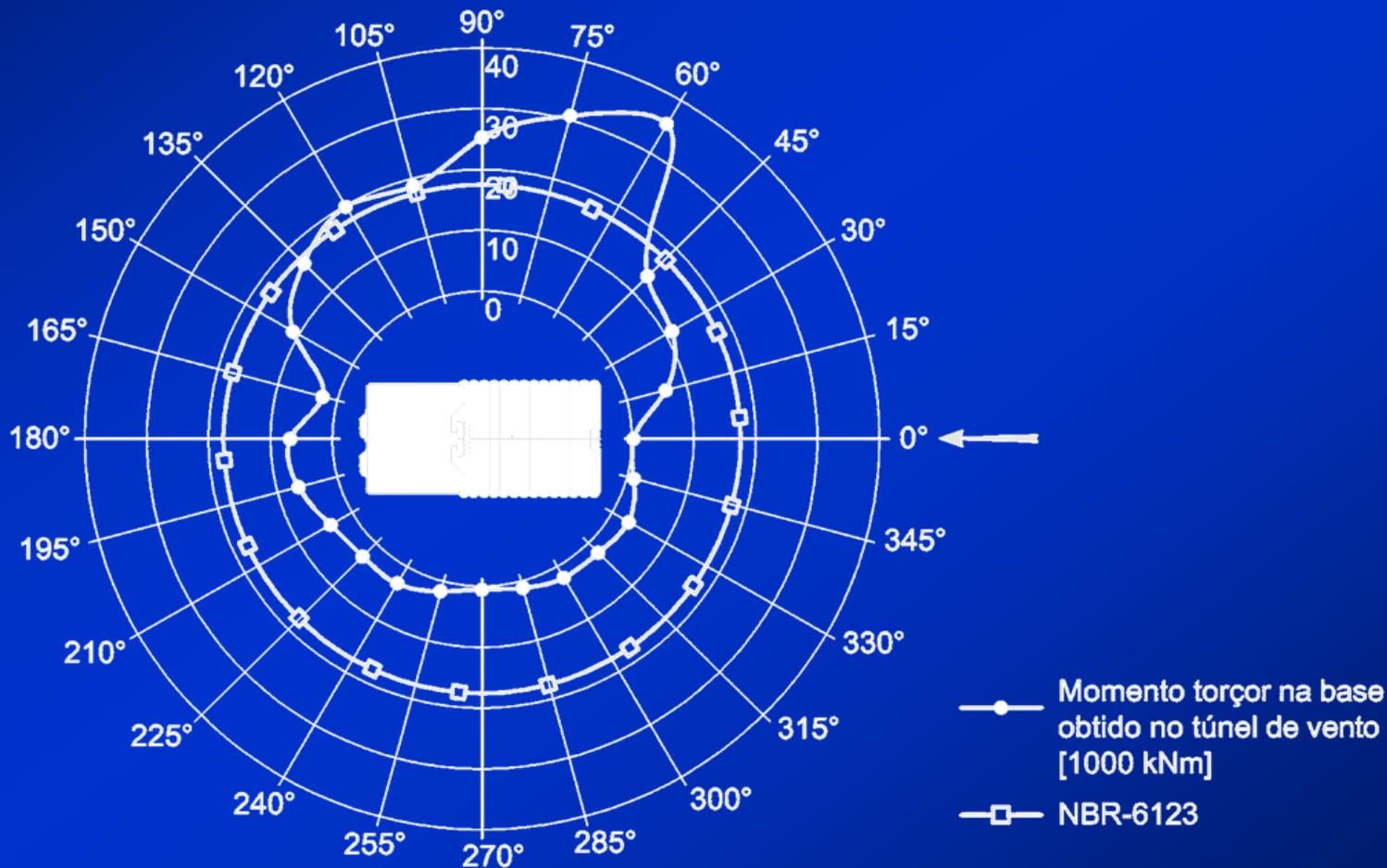
Projeto: SOMA Eng.

Contratante: Gafisa



Análise dos Resultados

Projeto *Sundeck*



Modelos Ensaaiados

Projeto *Sunset*



Altura: 93,3 m

Local: Novo Hamburgo/RS

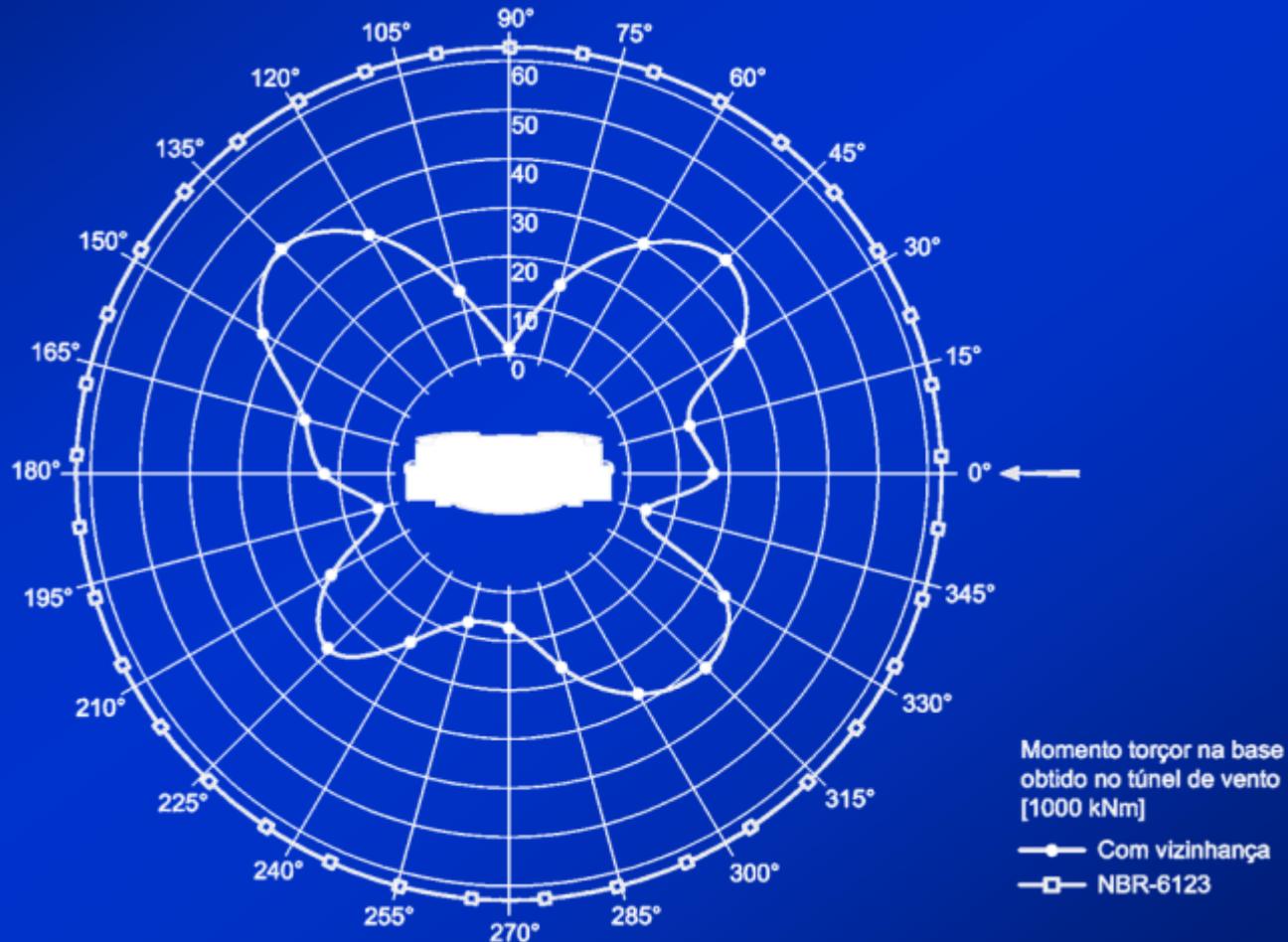
Projeto: AXIAL Eng.

Contratante: Mosmann



Análise dos Resultados

Projeto *Sunset*



Modelos Ensaaiados

Projeto *Estrela do Atlântico*

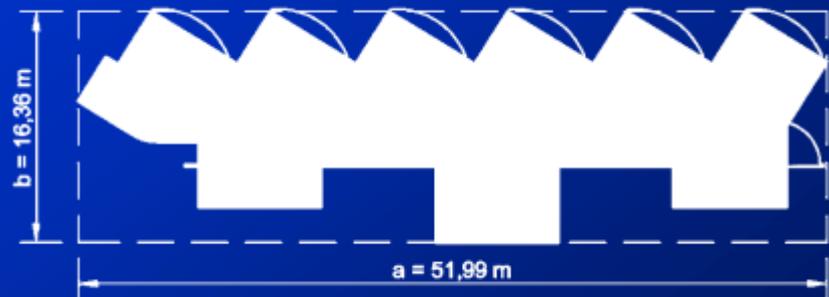


Altura: 130,24 m

Local: Natal/RN

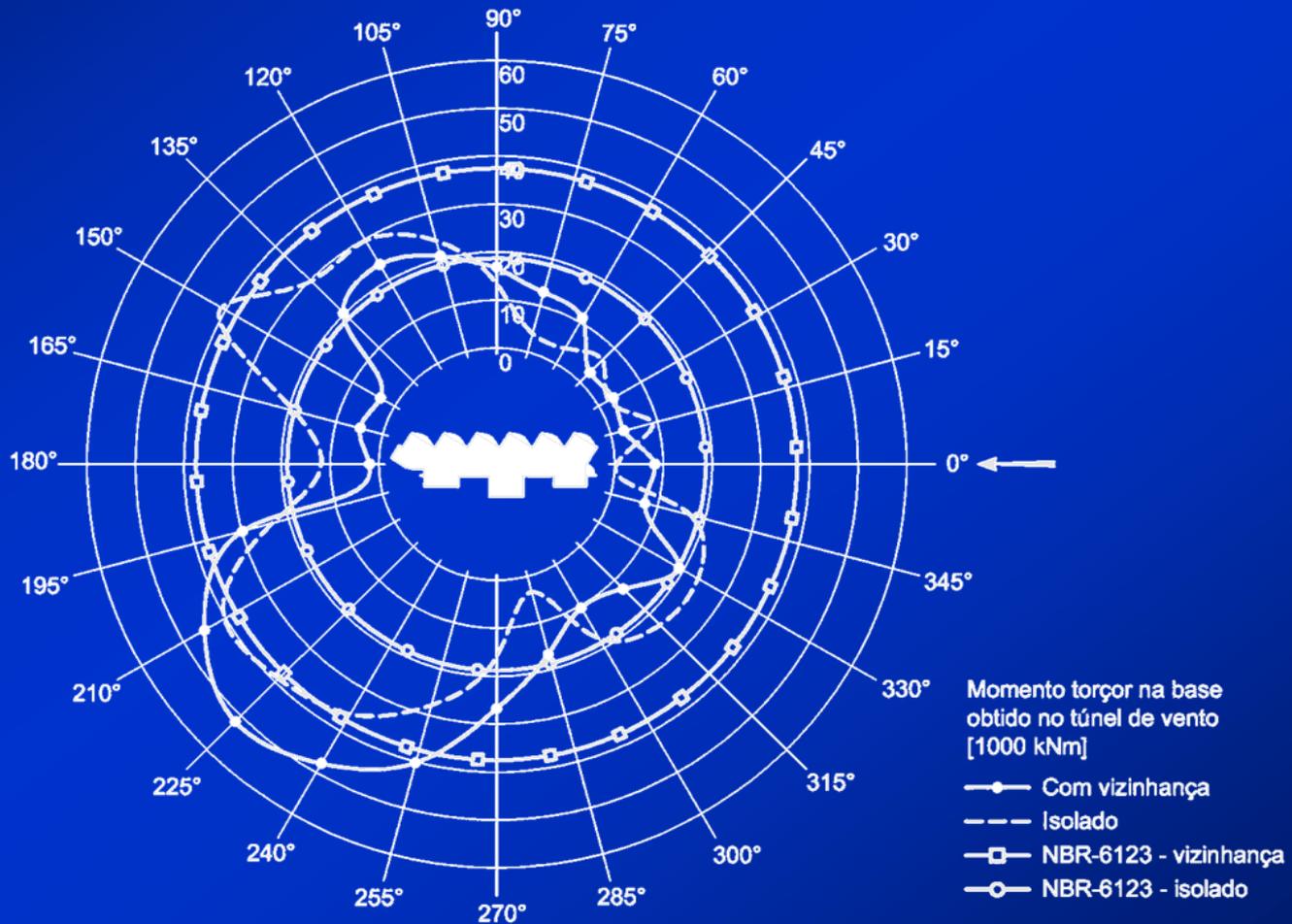
Projeto: ACGM Eng.

Contratante: J.P.G Natal



Análise dos Resultados

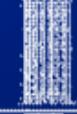
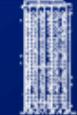
Projeto *Estrela do Atlântico*



Túnel de Vento/NBR

Modelo	Situação	a [m]	a/b	h/a	Túnel de Vento/NBR						Planta	Elevação
					$ F_y $ NBR [kN]	$ F_y $ * NBR [kN]	$ M_d $ TÚNEL [kNm]	\hat{e}_a/a	\hat{e}_a/a^*	e_a/a NBR		
1	com vizinhança	29,35	1,60	4,02	5.444	7.077	35.771	0,22	0,17	0,15		
2	com vizinhança	40,74	2,36	2,95	6.042	7.854	24.915	0,10	0,08	0,15		
3	isolado	47,60	1,34	1,56	5.715	—	27.734	0,10	—	0,075		
3	com vizinhança	47,60	1,34	1,56	—	7.430	36.479	—	0,10	0,15		
4	com vizinhança	33,20	1,04	2,82	3.647	4.741	17.150	0,14	0,11	0,15		
4	com vizinhança	33,20	1,04	2,82	3.647	4.741	9.540	0,08	0,06	0,15		
5	com vizinhança	37,56	1,00	2,89	3.743	4.866	36.503	0,26	0,20	0,15		
6	isolado	45,61	2,00	1,59	3.435	—	17.448	0,11	—	0,075		
6	com vizinhança	45,61	2,00	1,59	—	4.465	17.179	—	0,08	0,15		

Túnel de Vento/NBR

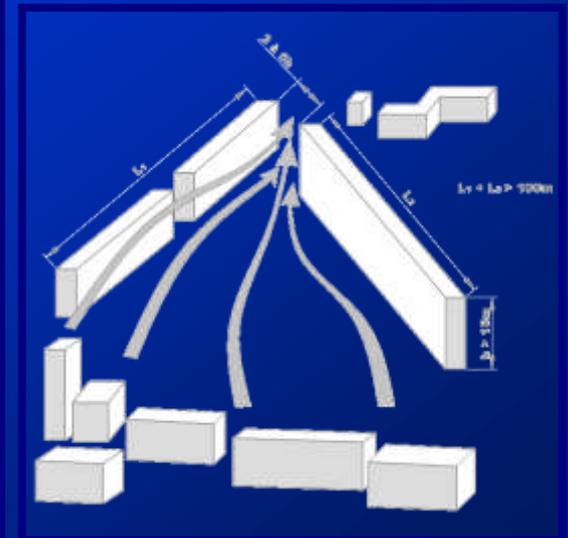
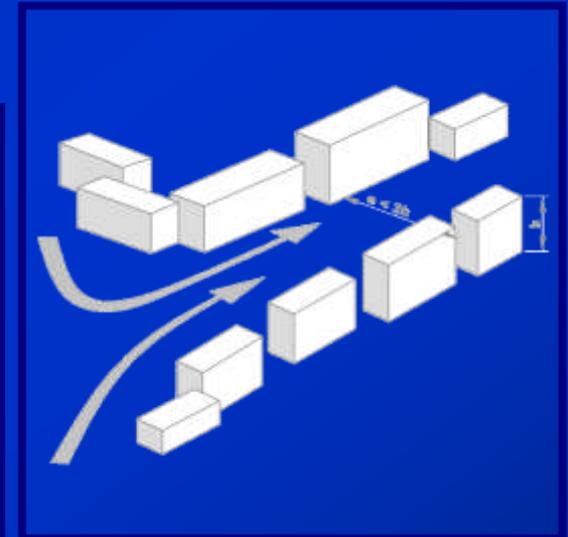
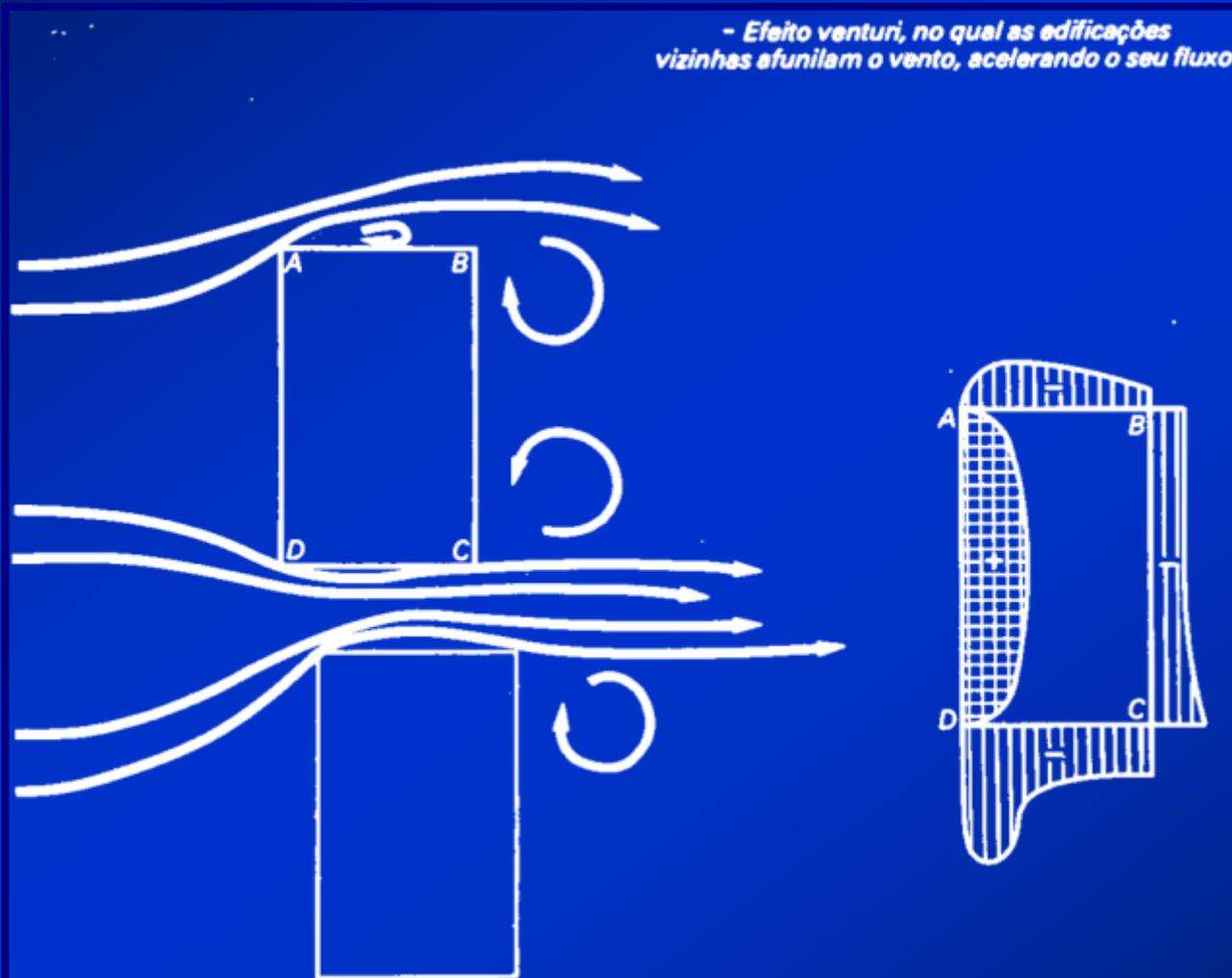
Modelo	Situação	a [m]	a/b	h/a	Túnel de Vento/NBR			\hat{e}_a/a	\hat{e}_a/a^*	e_a/a NBR	Planta	Elevação
					$ F_y $ NBR [kN]	$ F_y ^*$ NBR [kN]	$ M_d $ TÚNEL [kNm]					
7	com vizinhança	46,52	1,09	3,06	6.375	8.288	29.772	0,10	0,08	0,15		
8	isolado	36,50	2,33	4,10	9.054	11.770	30.100	0,09	0,07	0,075		
9	Conf. I (isolado)	73,26	1,11	0,87	2.949	—	33.541	0,16	—	0,075		
9	Conf. II (c/ viz.)	73,26	1,11	0,87	—	3.834	27.452	—	0,10	0,15		
10	E1 (c/ viz.)	43,82	1,99	1,29	2.667	3.467	11.960	0,10	0,08	0,15		
10	E2 (c/ viz.)	43,82	1,99	1,29	2.667	3.467	36.226	0,31	0,24	0,15		
11	com vizinhança	40,78	2,51	2,29	10.269	13.349	40.515	0,10	0,07	0,15		
12	isolado	51,99	3,18	2,51	4.805	—	41.024	0,16	—	0,075		
12	com vizinhança	51,99	3,18	2,51	—	6.247	51.680	—	0,16	0,15		

Principais Constatações

- Para os modelos isolados as excentricidades obtidas experimentalmente (túnel de vento) foram superiores às indicadas pela NBR-6123;
- Recomenda-se a adoção de um valor único de excentricidade para a NBR-6123: $e_d/a = 0,15$;
 - ✓ adequado para edificações com secção transversal retangular
 - ✓ as forças de arrasto indicadas pela NBR devem ser majoradas pelo fator de vizinhança (FV)
- A curva dos coeficientes de arrasto indicada na NBR-6123 deve ser revista;
- Formas distintas de secção transversal devem ser testadas em túnel de vento.

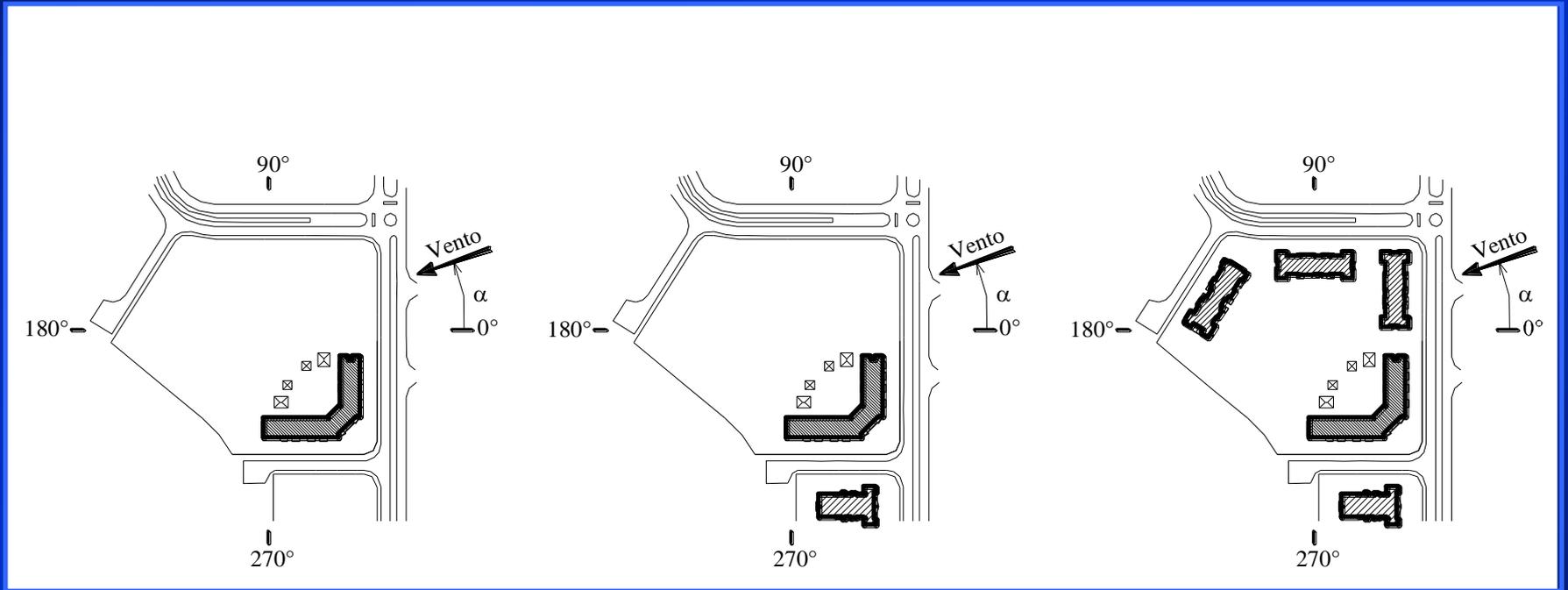
- Efeitos de vizinhança

Efeito Venturi



Edifício Mandarin, Rio de Janeiro - RJ

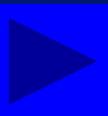
- Configurações testadas



Configuração I

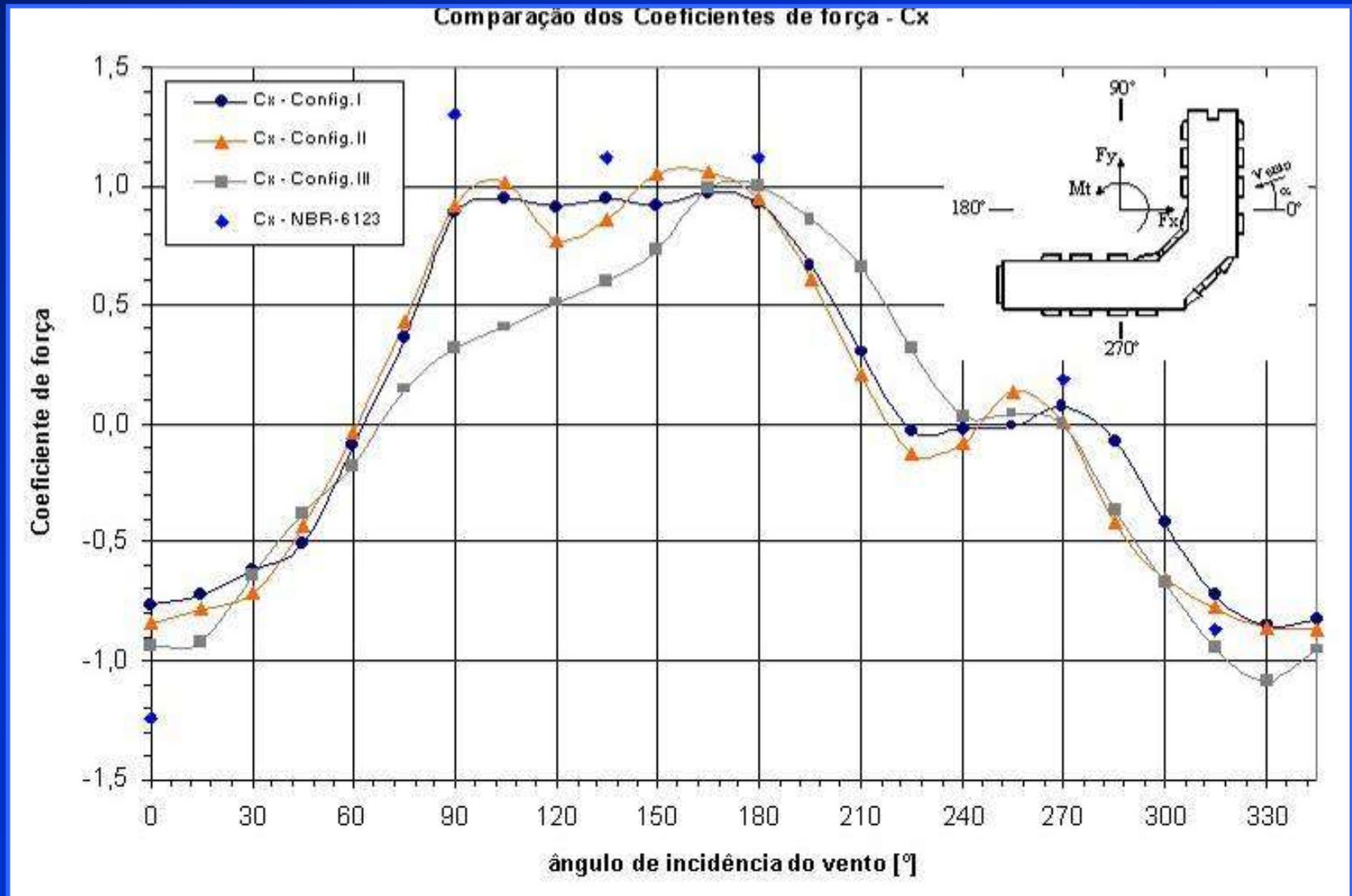
Configuração II

Configuração III



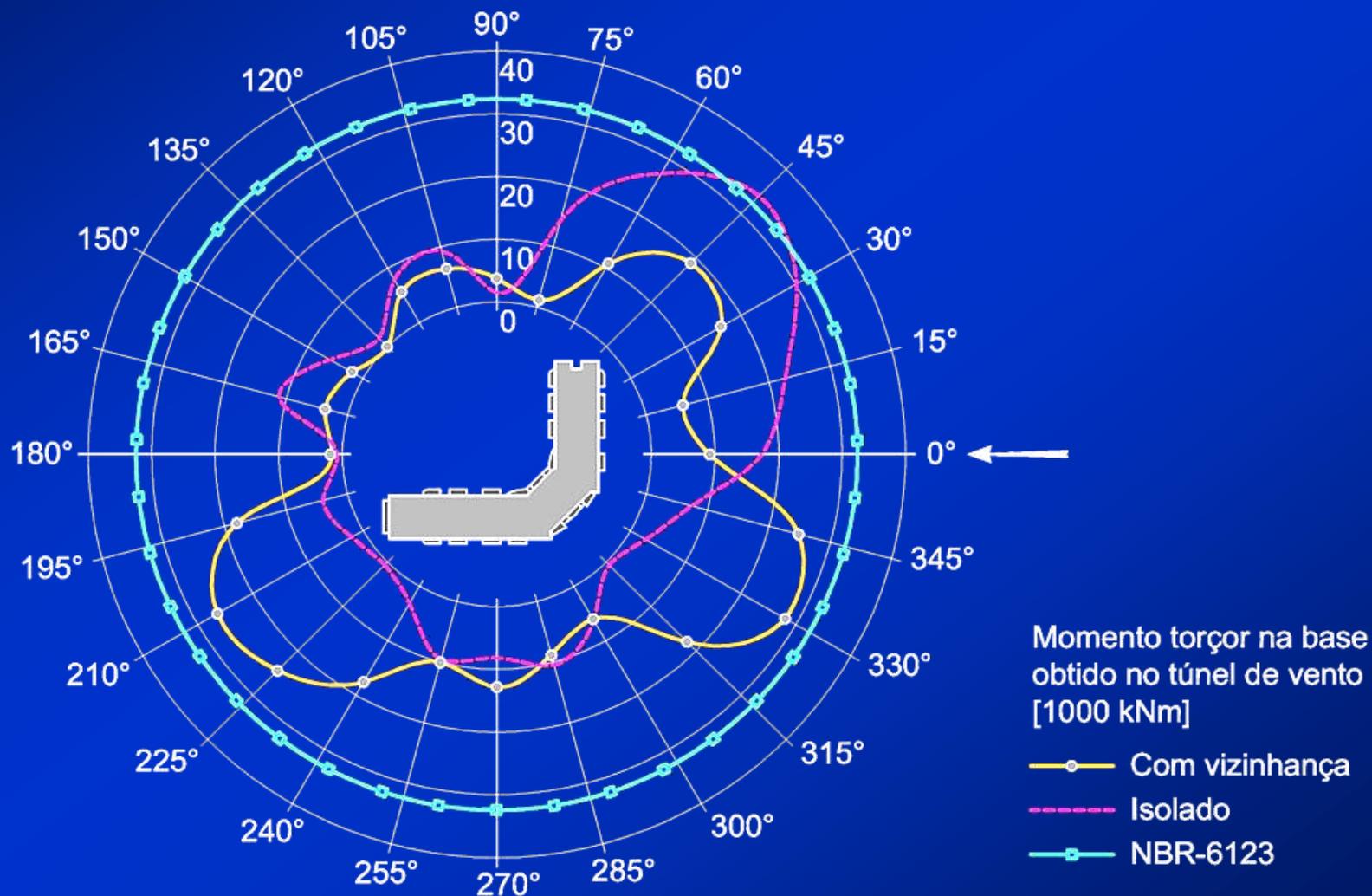
Edifício Mandarin, Rio de Janeiro - RJ

- Coeficientes de força na direção X



Edifício Mandarin, Rio de Janeiro - RJ

Análise dos Resultados

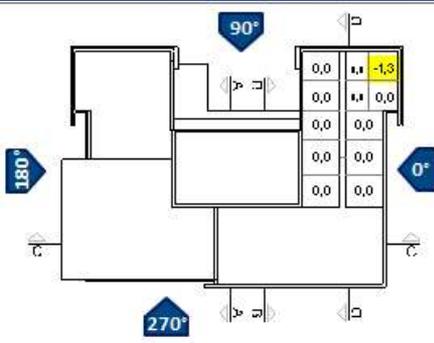


Edifício Mandarin, Rio de Janeiro - RJ



MULTIPLAN – Barra Shopping Sul / Porto Alegre

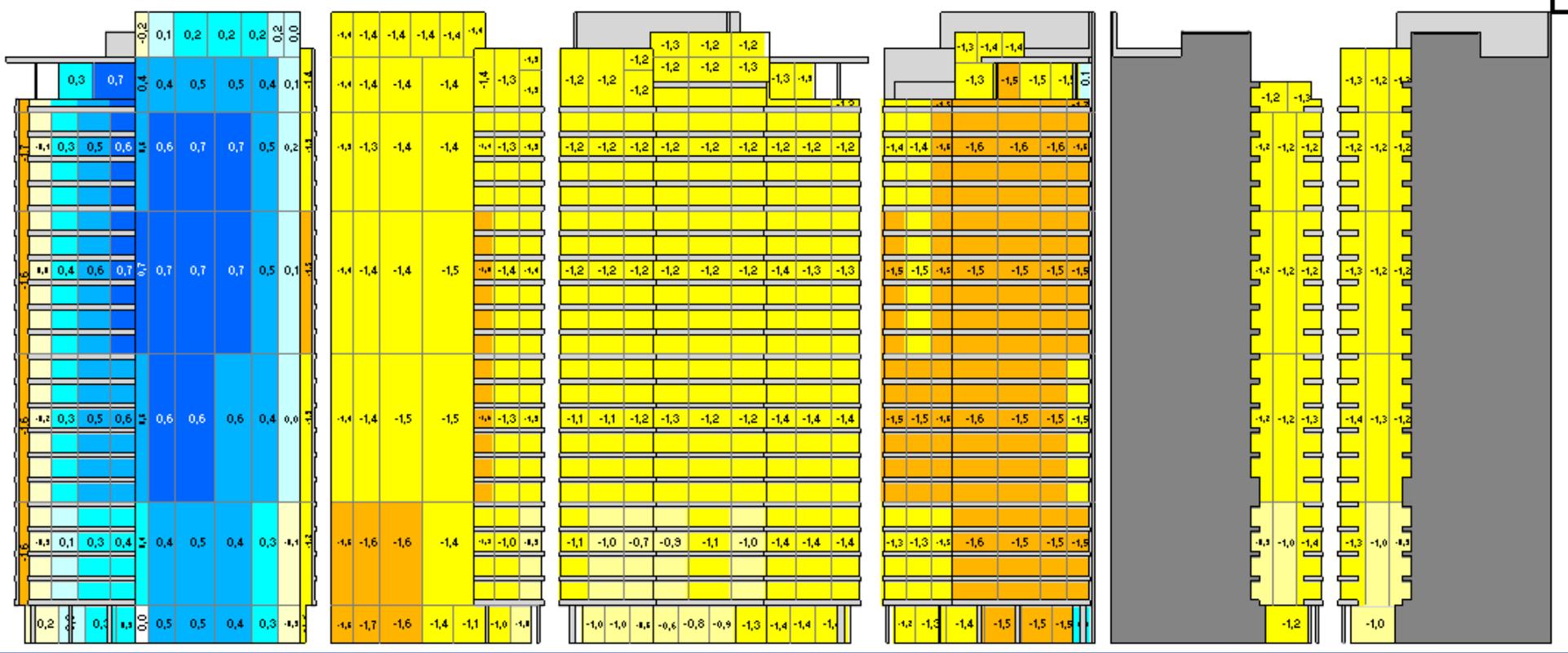


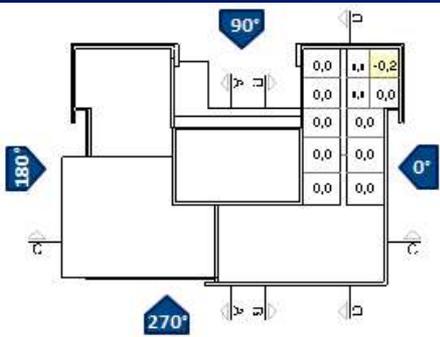


Ângulo de incidência do vento **270**

Legenda:

Dark Blue	$cp > 1,2$	Light Blue	$0,4 < cp \leq 0,6$	Dark Red	$cp < -3,5$	Orange	$-1,5 > cp \geq -2,0$
Medium Blue	$1,0 < cp \leq 1,2$	Cyan	$0,2 < cp \leq 0,4$	Dark Red	$-3,0 > cp \geq -3,5$	Yellow	$-1,0 > cp \geq -1,5$
Blue	$0,8 < cp \leq 1,0$	Light Cyan	$0,0 < cp \leq 0,2$	Red	$-2,5 > cp \geq -3,0$	Light Yellow	$-0,5 > cp \geq -1,0$
Light Blue	$0,6 < cp \leq 0,8$	White	$cp = 0,0$	Orange	$-2,0 > cp \geq -2,5$	Lightest Yellow	$0,0 > cp \geq -0,5$

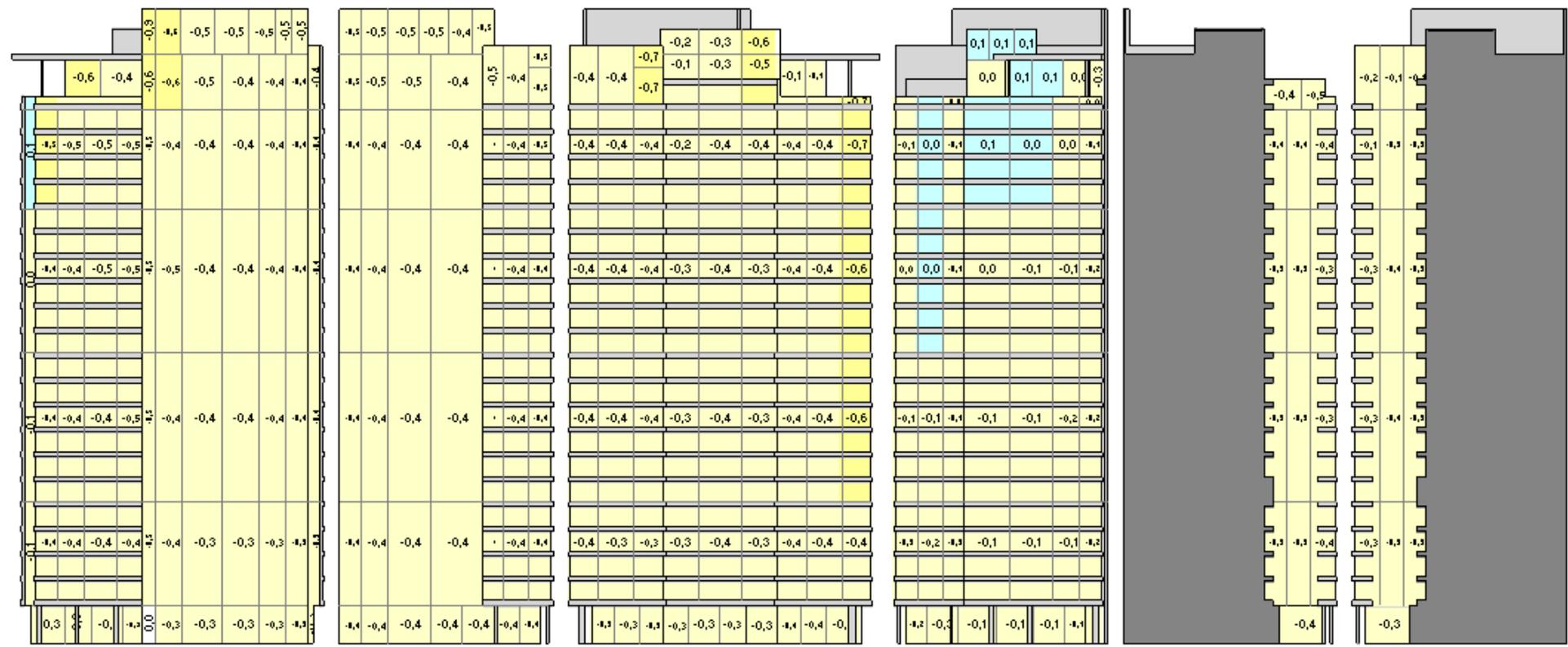


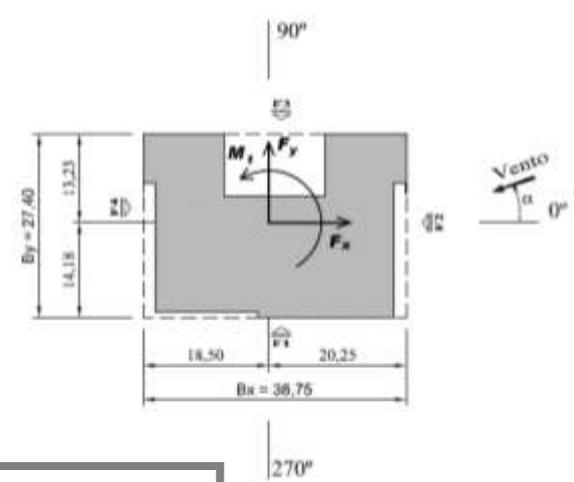


Ângulo de incidência do vento **180**

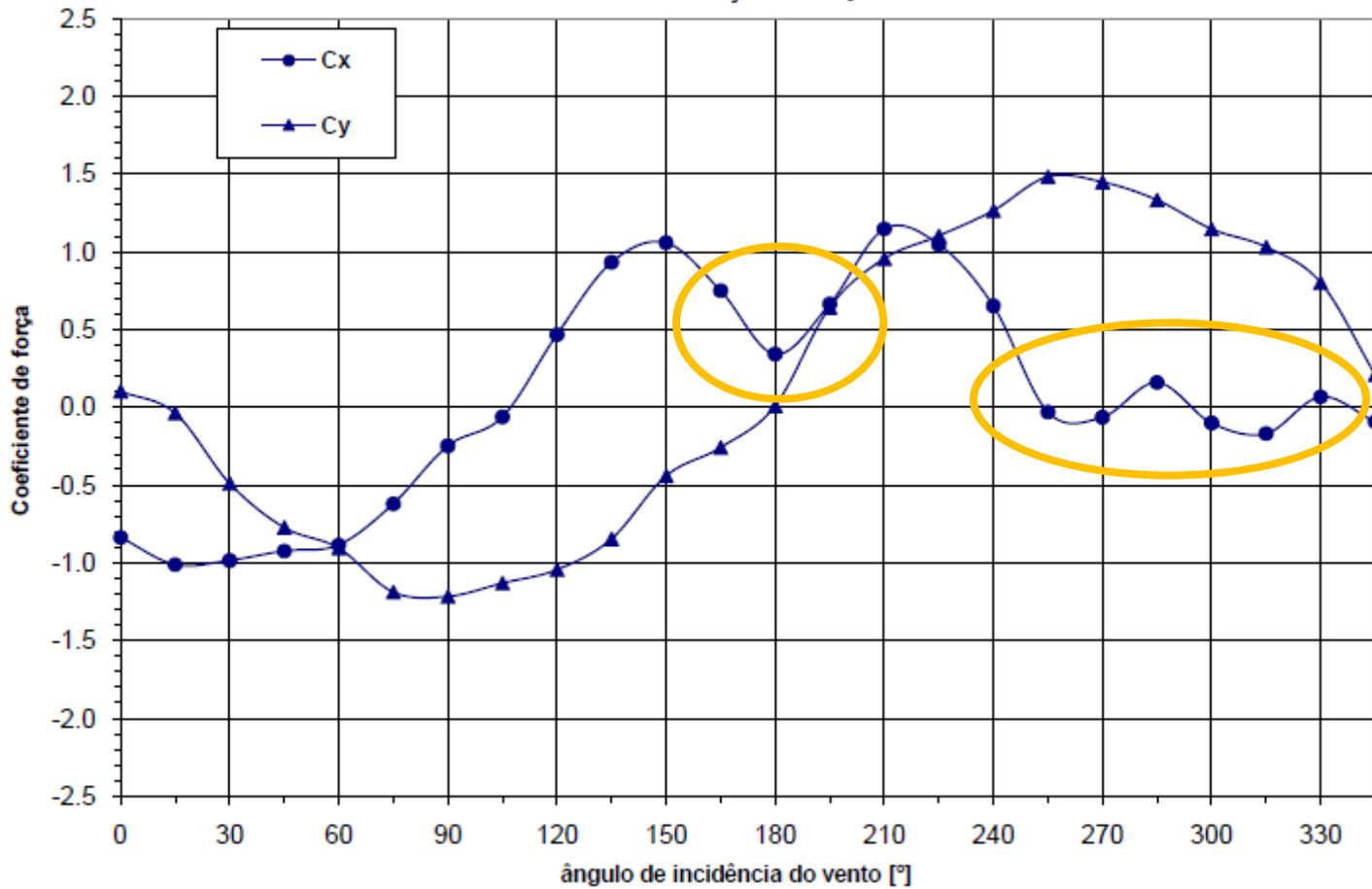
Legenda:

Dark Blue	$cp > 1,2$	Light Blue	$0,4 < cp \leq 0,6$	Dark Red	$cp < -3,5$	Orange	$-1,5 > cp \geq -2,0$
Medium Blue	$1,0 < cp \leq 1,2$	Cyan	$0,2 < cp \leq 0,4$	Red	$-3,0 > cp \geq -3,5$	Yellow	$-1,0 > cp \geq -1,5$
Light Blue	$0,8 < cp \leq 1,0$	White	$0,0 < cp \leq 0,2$	Dark Red	$-2,5 > cp \geq -3,0$	Light Yellow	$-0,5 > cp \geq -1,0$
Blue	$0,6 < cp \leq 0,8$	White	$cp = 0,0$	Orange	$-2,0 > cp \geq -2,5$	Light Yellow	$0,0 > cp \geq -0,5$





Coeficientes de força - Cx & Cy



NBR-6123 - Brazilian Wind Code

$$OLD \rightarrow F = q C A$$

$$NEW \rightarrow P = q C F_V$$

$$q = 0.613 V_k^2$$

C = Aerod Coeff

F_V = Vicinity Factor (≤ 1.3)

$$V_k = V_o S_1 S_2 S_3$$

V_o : basic wind speed (3s, 10m heigth, open terrain, 50year)

S_1 : topographic factor

S_2 : terrain roughness, building dimensions and heigth above terrain

S_3 : statistical factor

Ação dinâmica do vento em edifícios altos

1. Turbulência Atmosférica:

Forças médias + flutuantes atuando principalmente na direção do vento.
→ Capítulo 9 da NBR6123(1988).

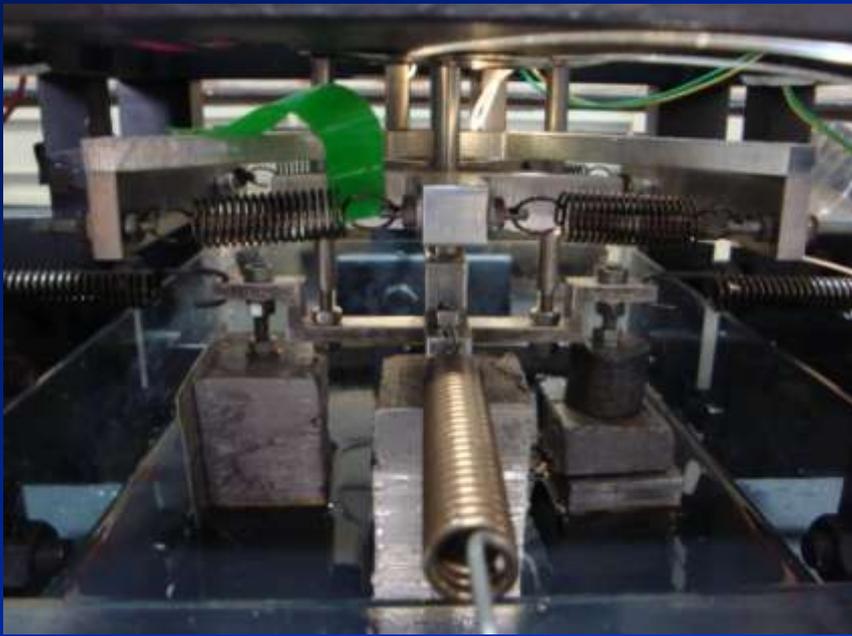
2. Desprendimento de Vórtices Alternados:

Forças flutuantes atuando principalmente na direção transversal à direção do vento.
→ Futuro Capítulo 10 da NBR6123.

3. Martelamento:

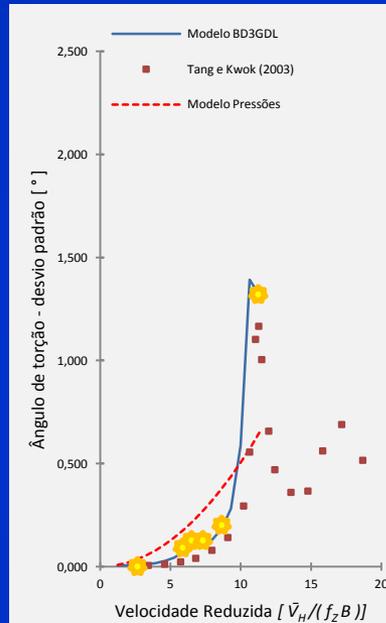
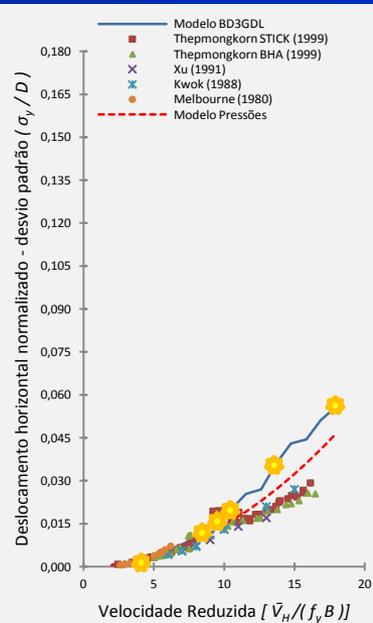
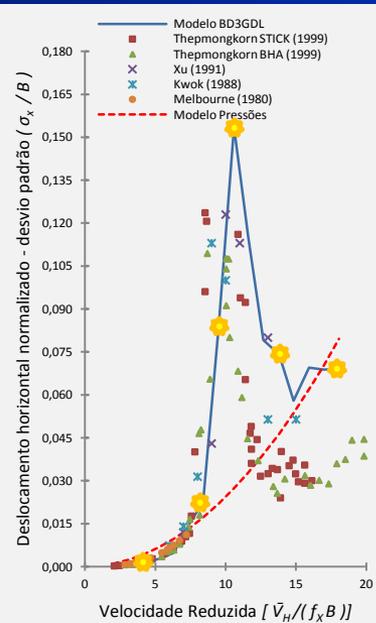
Forças decorrentes da presença adversa de outras edificações à barlavento.
→ Apenas com um Túnel de Vento (vizinhança).

DEVICE FOR DYNAMIC TESTS OF TALL BUILDING MODELS



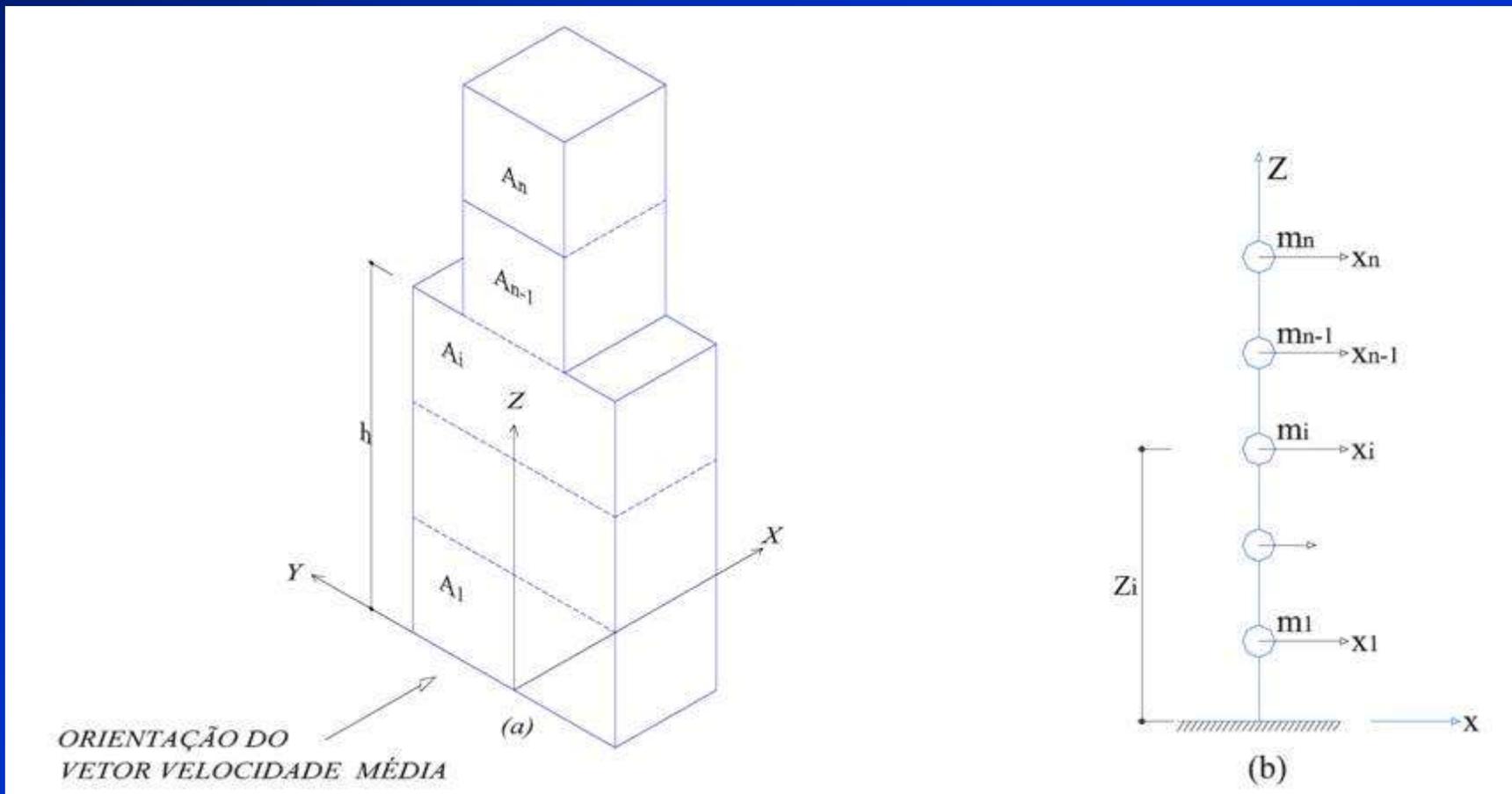
DYNAMIC TESTS - CAARC BUILDING

Wind on Larger Face



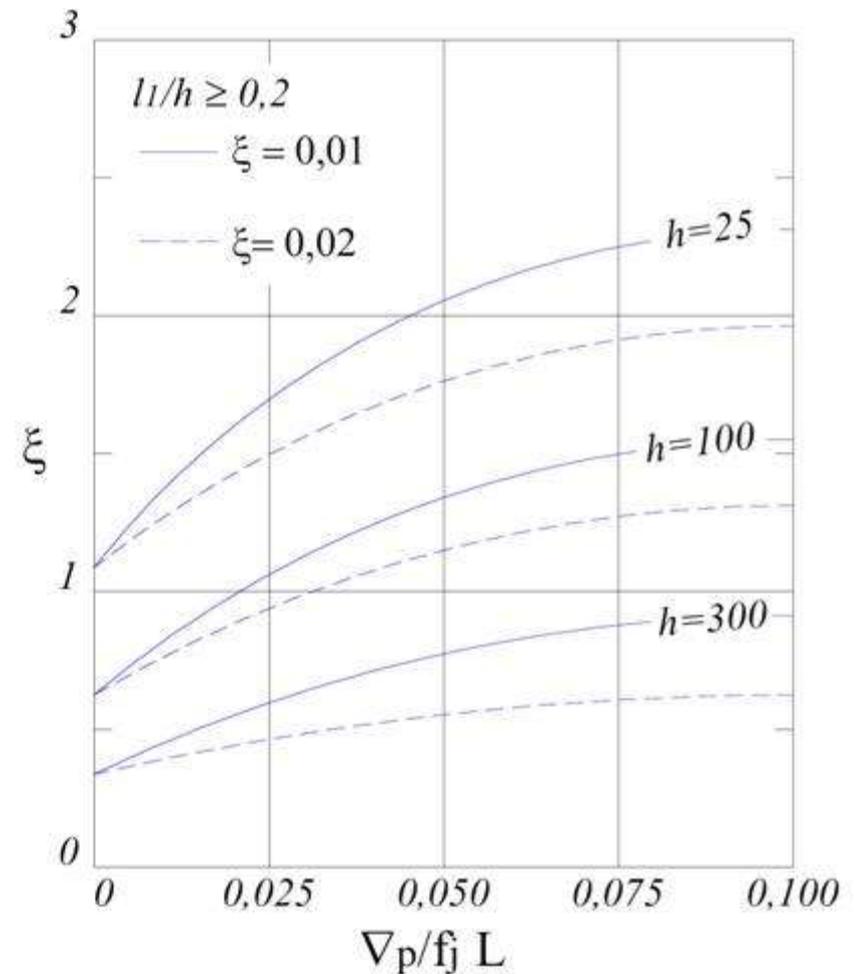
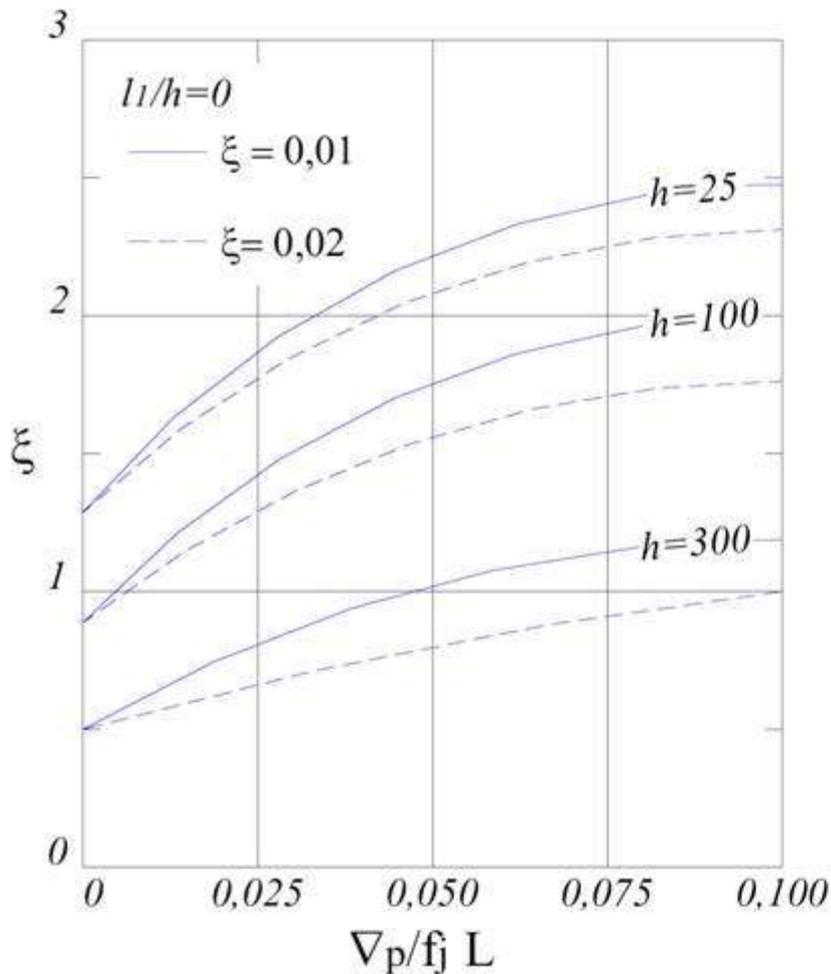
Histórico - 1988

Capítulo 9 é incluído na NBR6123 (pressões médias)



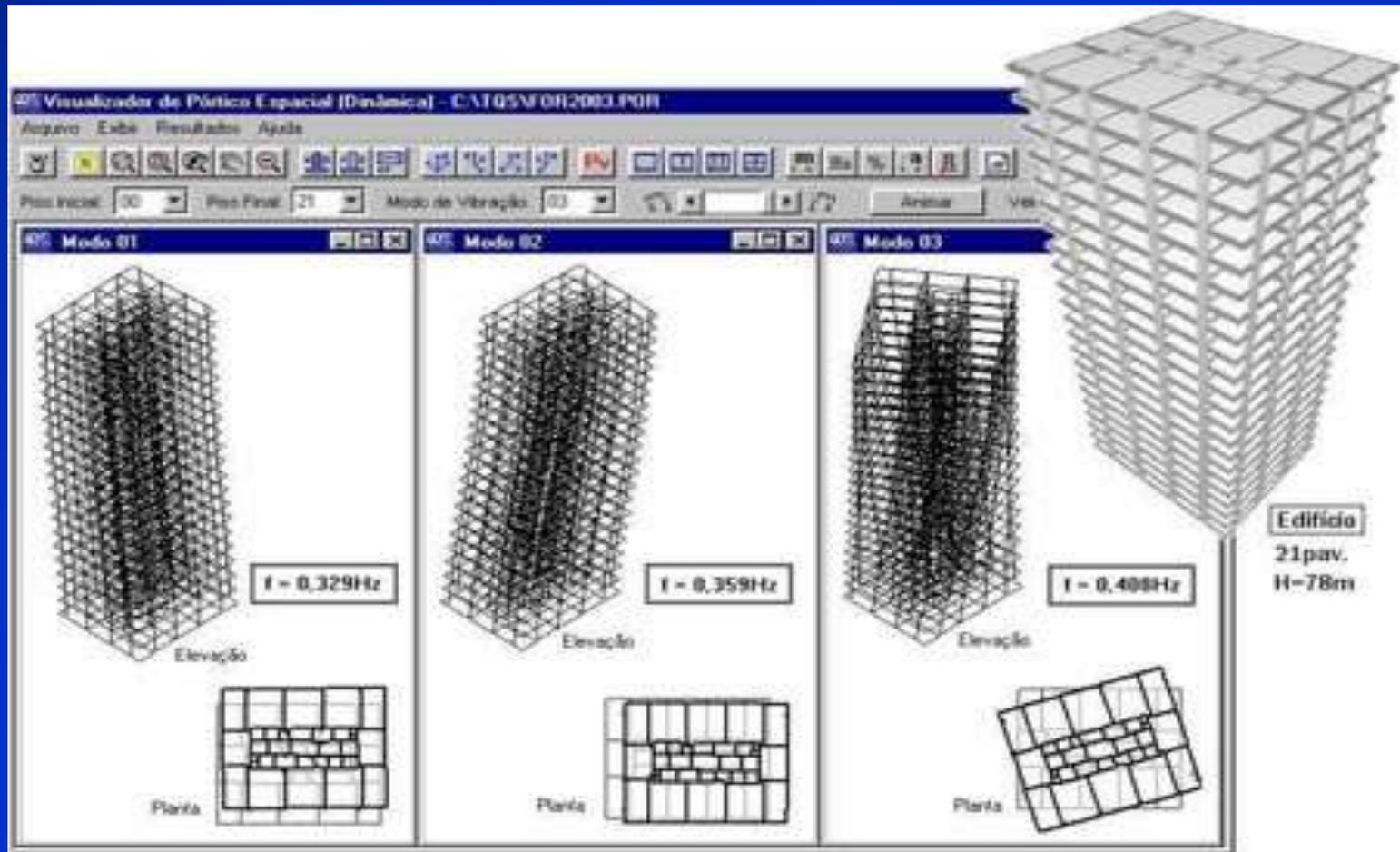
Trabalho de Riera & Galindez (1979), formulado no domínio da frequência, utilizando modelagem estatística do campo de velocidades do vento.

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 - 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

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

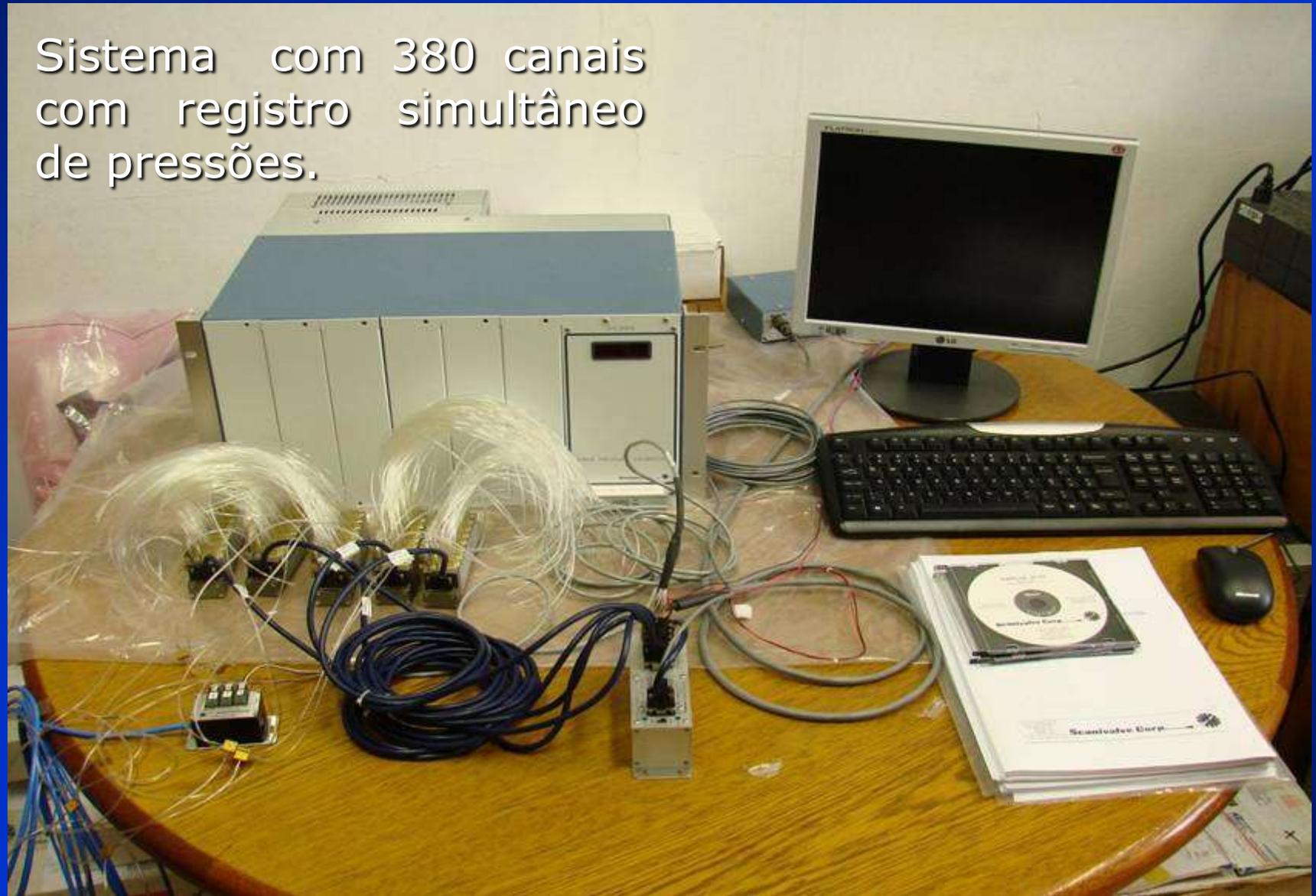
Confirme os dados carregados e aperte OK para copiar esta tabela para os dados do edifício.

OK Cancelar

Histórico - a partir de 2006

O LAC adota exclusivamente medição eletrônica.

Sistema com 380 canais
com registro simultâneo
de pressões.



A disponibilidade de registros eletrônicos simultâneos permite a implementação do

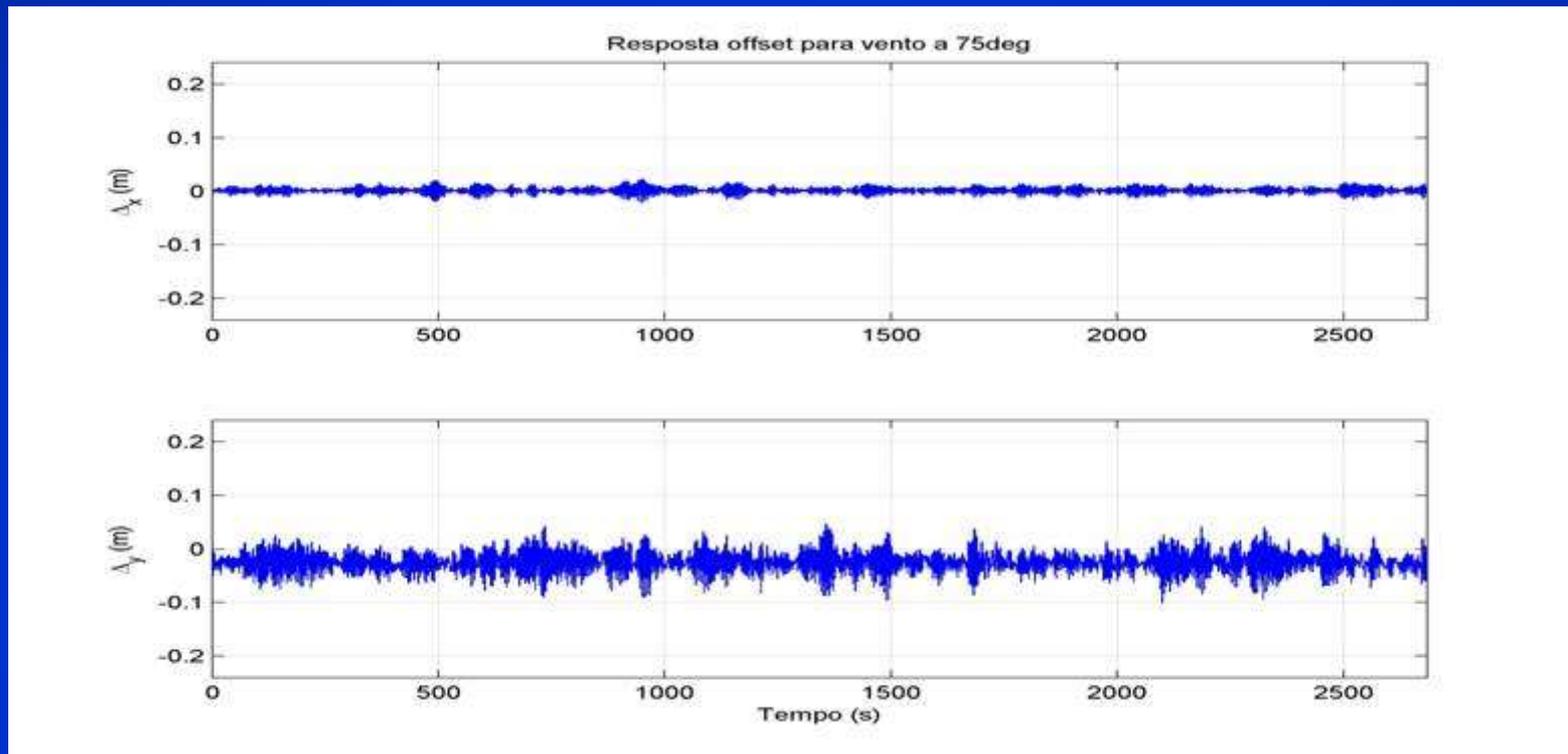
Método HFPI

para análise da resposta dinâmica de estruturas.



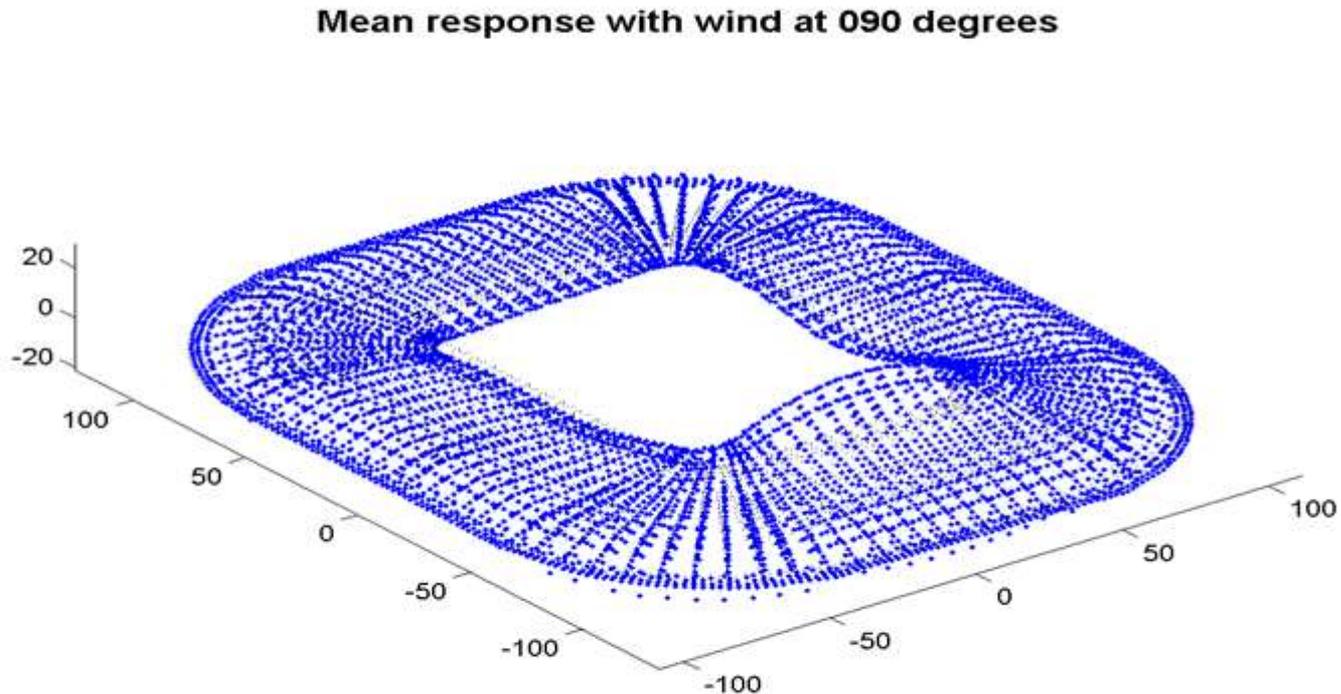
Integração de pressões em alta frequência (*high frequency pressure integration* – HFPI)

- 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.)

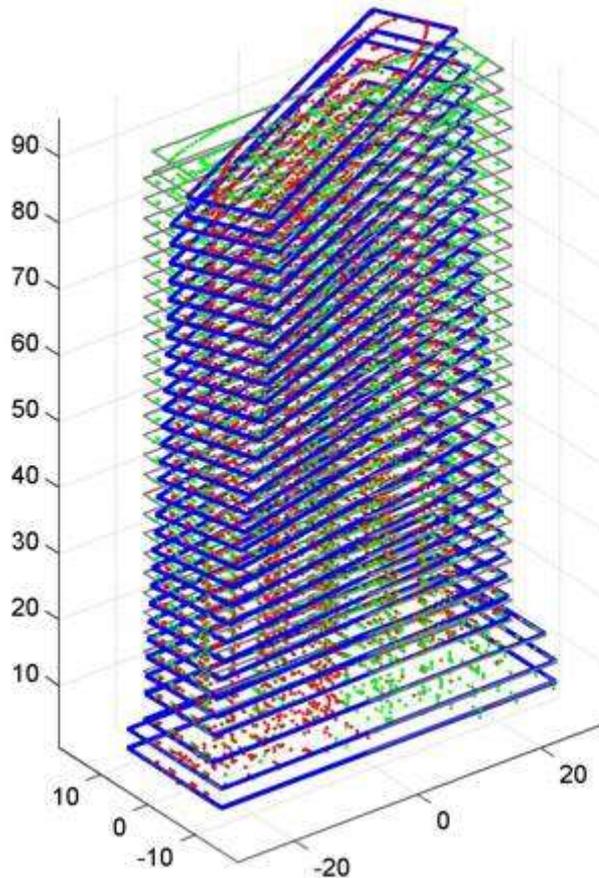


Exemplo: Cobertura de Estádio (2011)

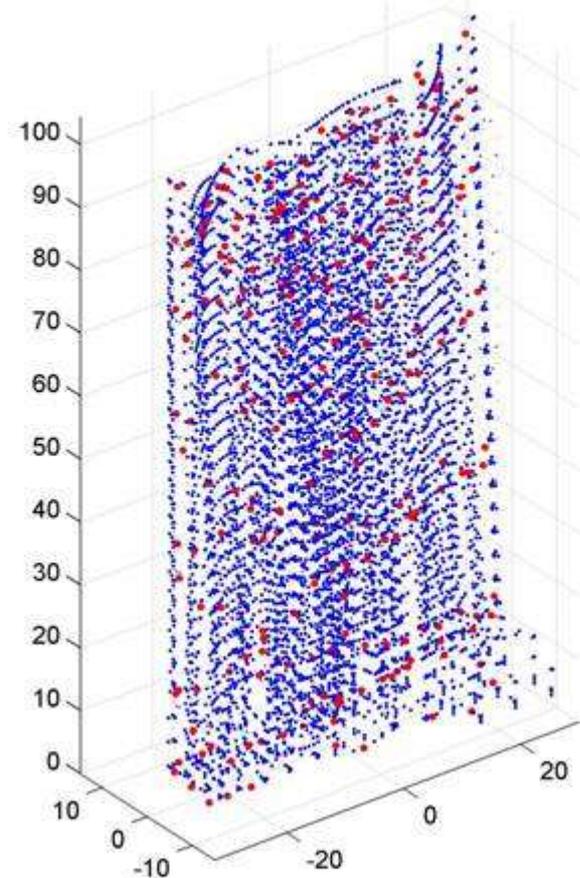
Histórico - em julho de 2011

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

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



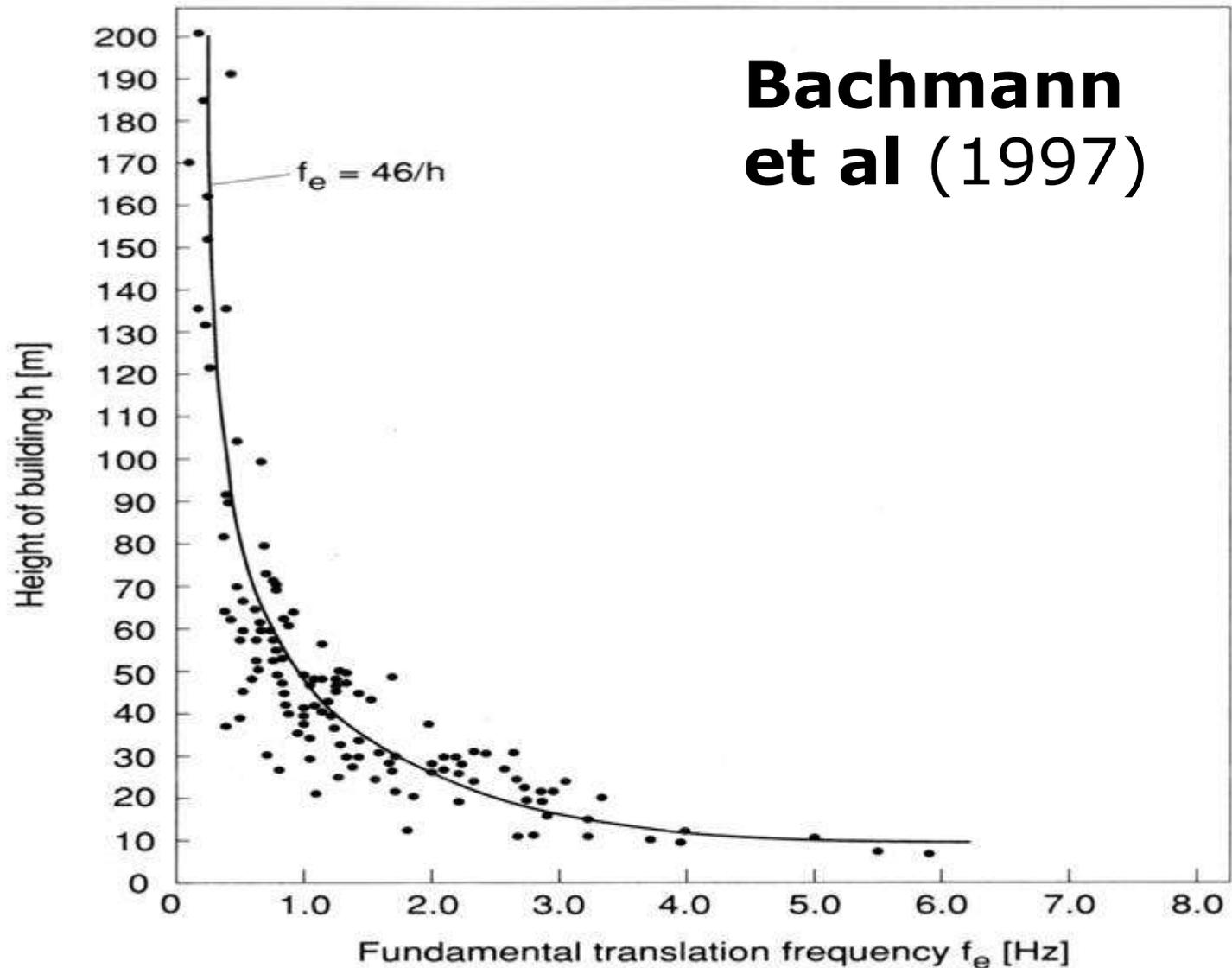
Modal shape 3 : $f_k = 0.245\text{Hz}$



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 apertado 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	-	-	-

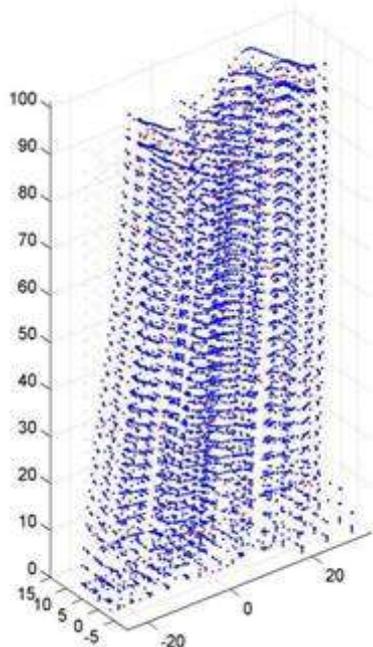
Em amarelo: torção predominante.

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

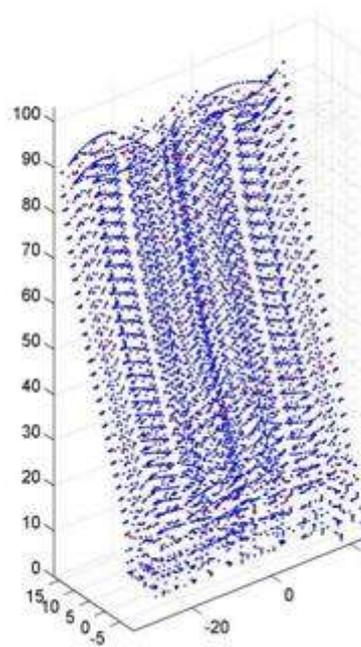
O que mudou???

- 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.

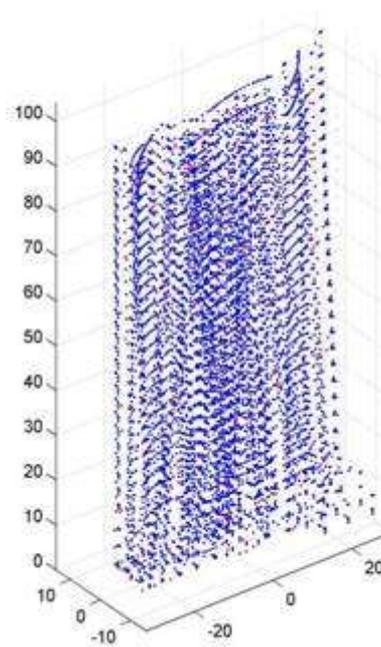
Modal shape 1 : $f_k = 0.2007\text{Hz}$



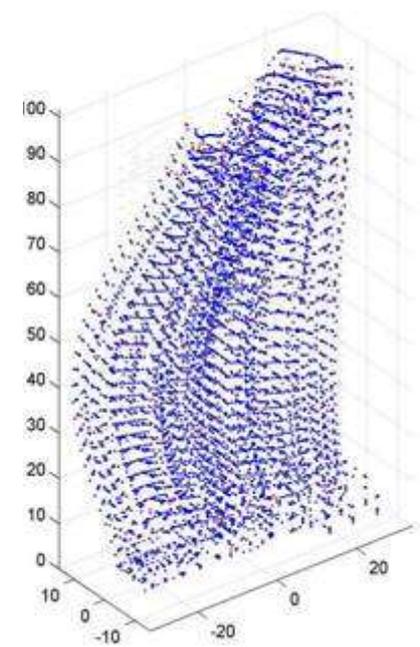
Modal shape 2 : $f_k = 0.2028\text{Hz}$



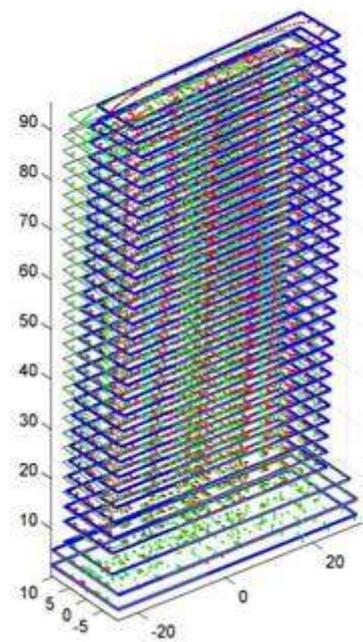
Modal shape 3 : $f_k = 0.2215\text{Hz}$



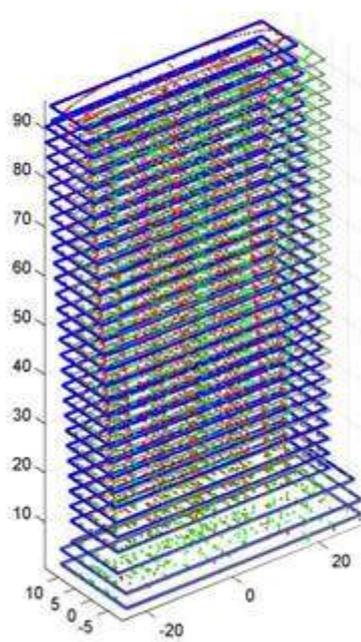
Modal shape 4 : $f_k = 0.6226\text{Hz}$



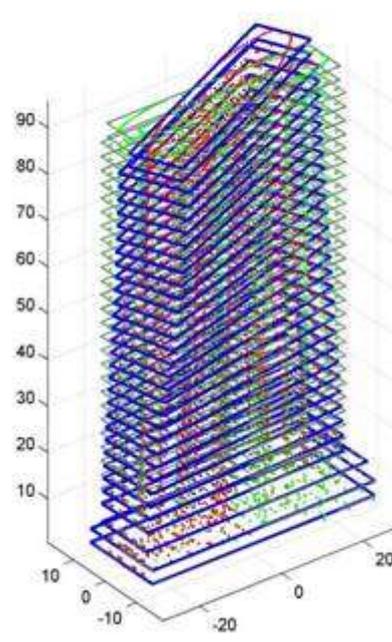
Modal shape 1 : $f_k = 0.2007\text{Hz}$



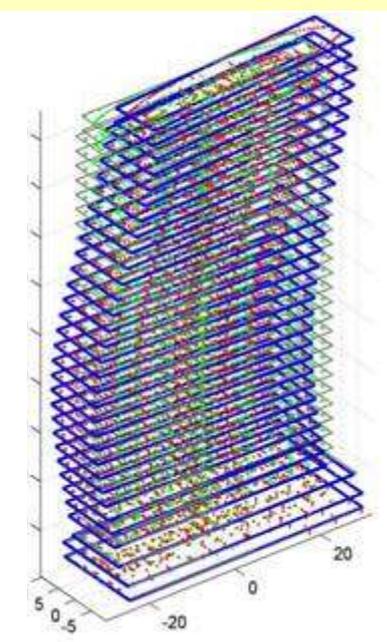
Modal shape 2 : $f_k = 0.2028\text{Hz}$



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



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

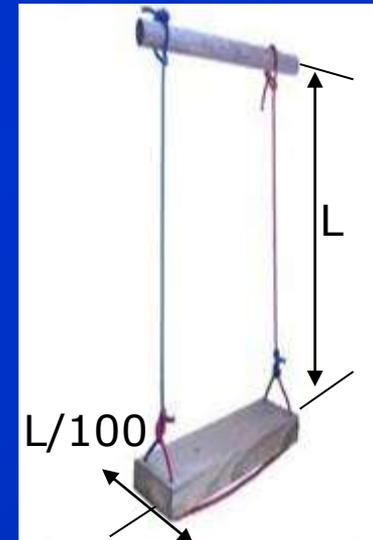
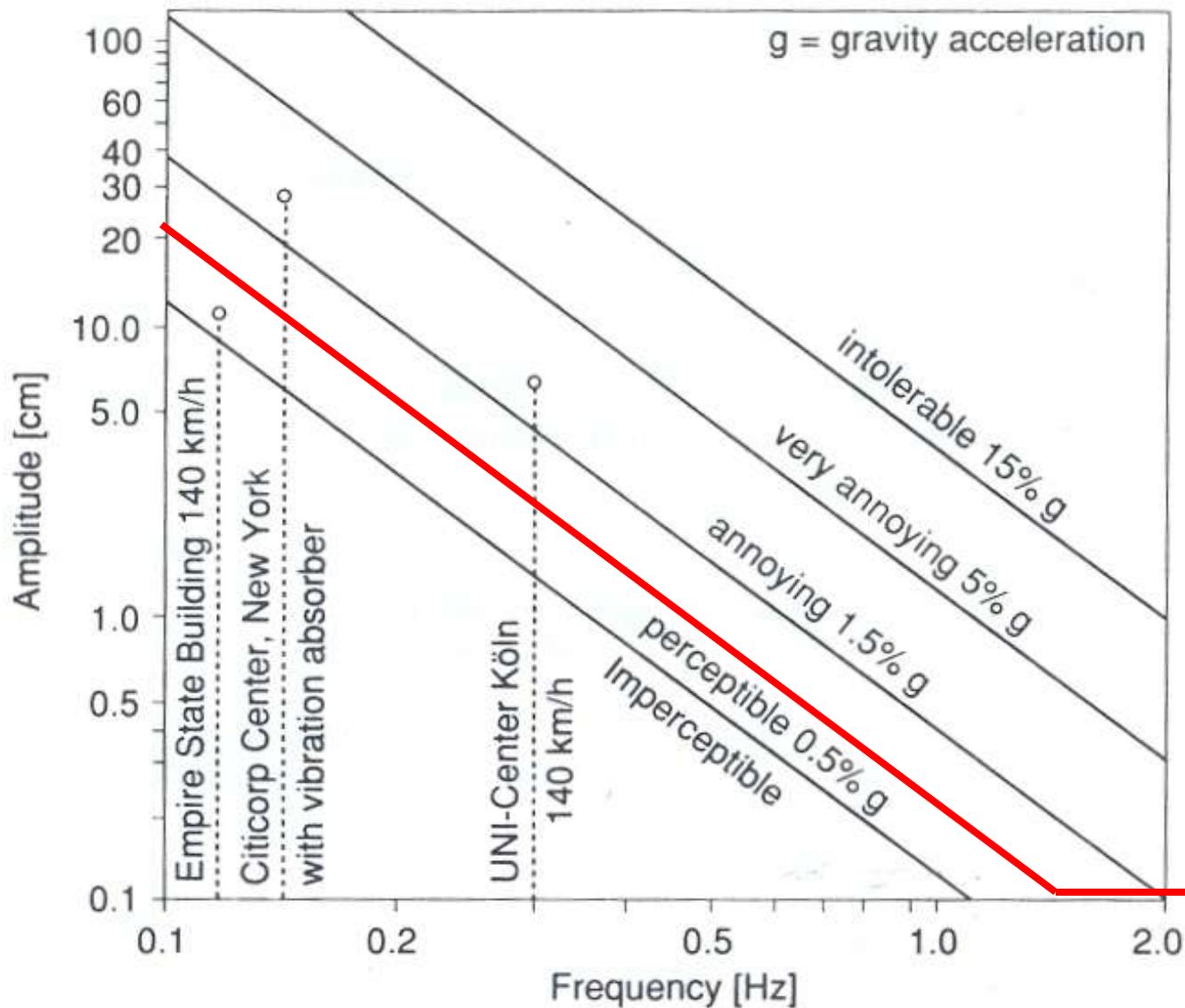


Consequentemente...

- 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.

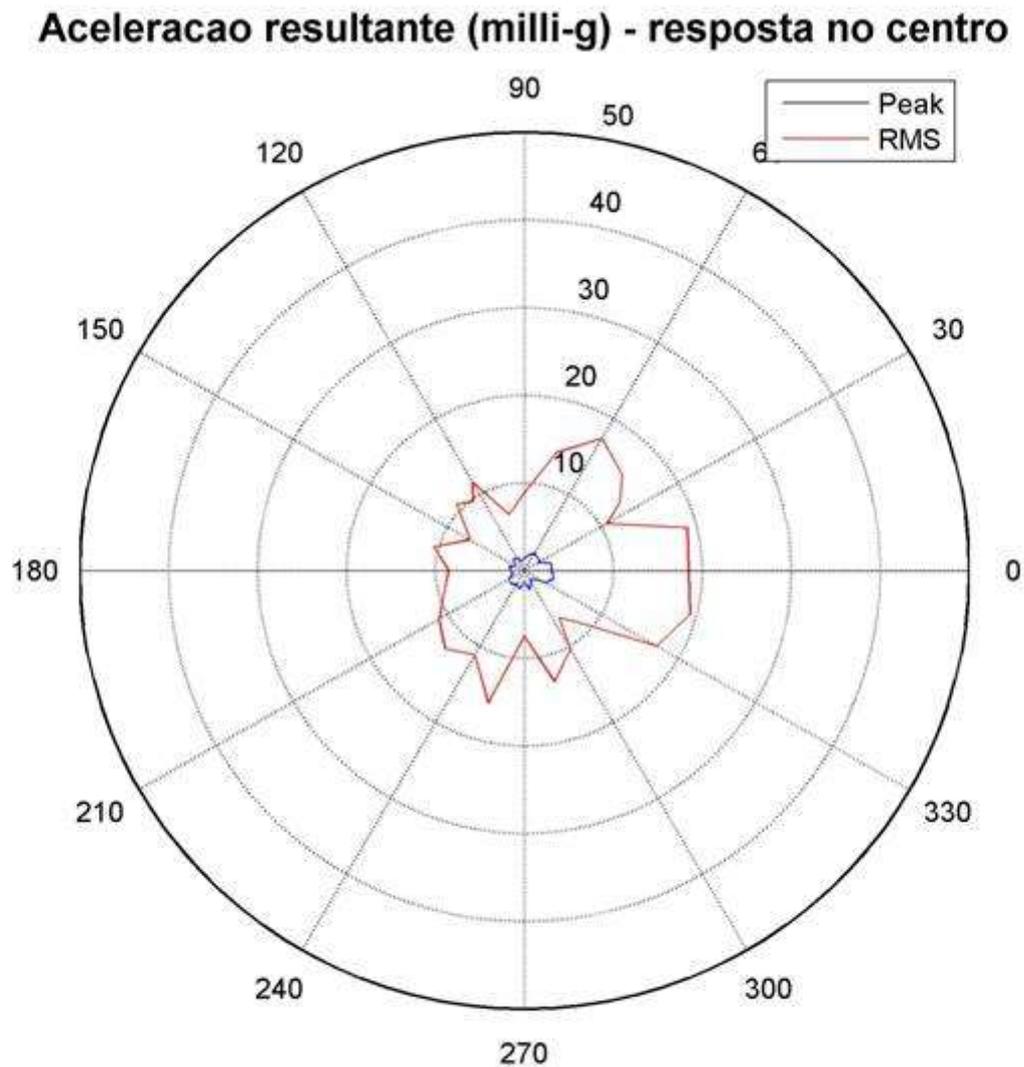
→ **HFPI.**

Implicações



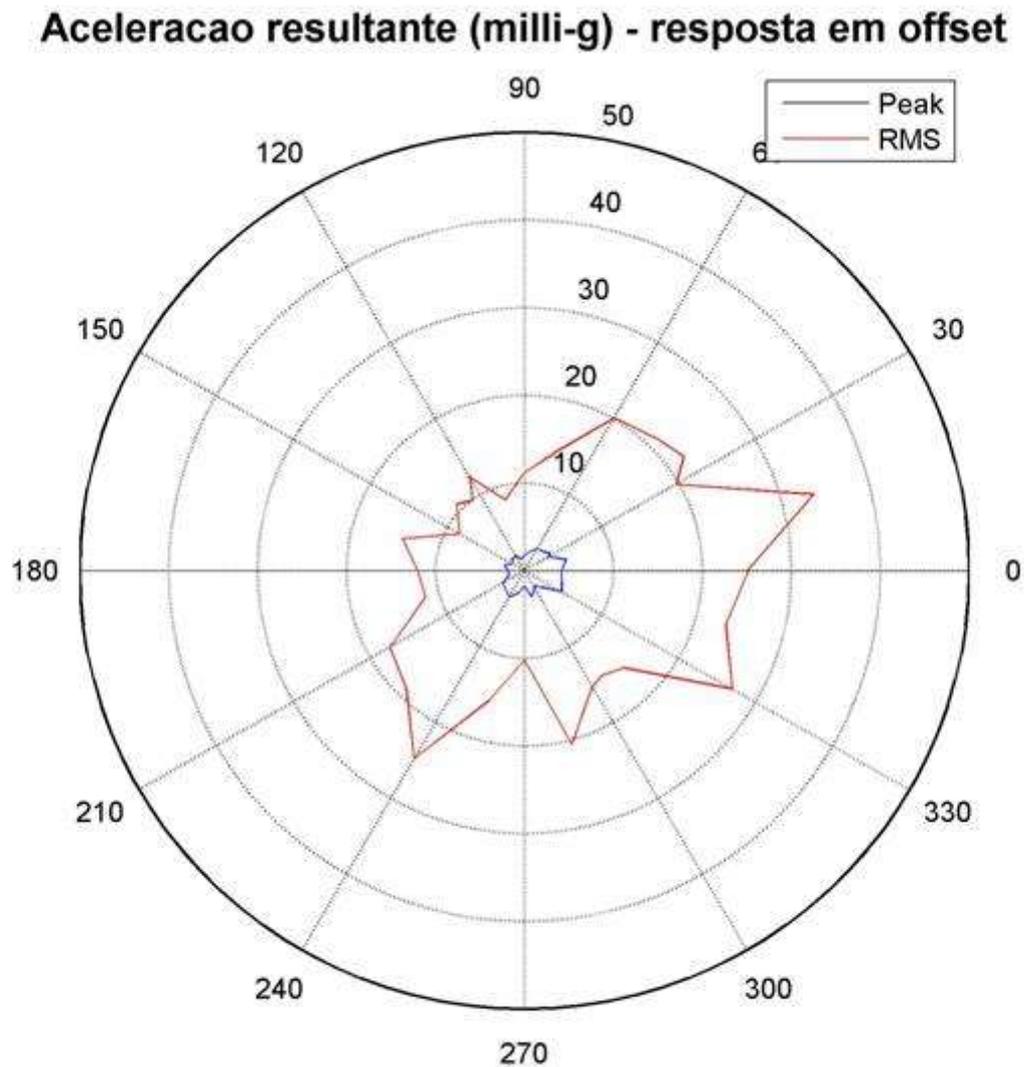
NBR6123:
 $a_{\max} \leq 10mG$

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



No centro de rigidez

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



No ponto de offset

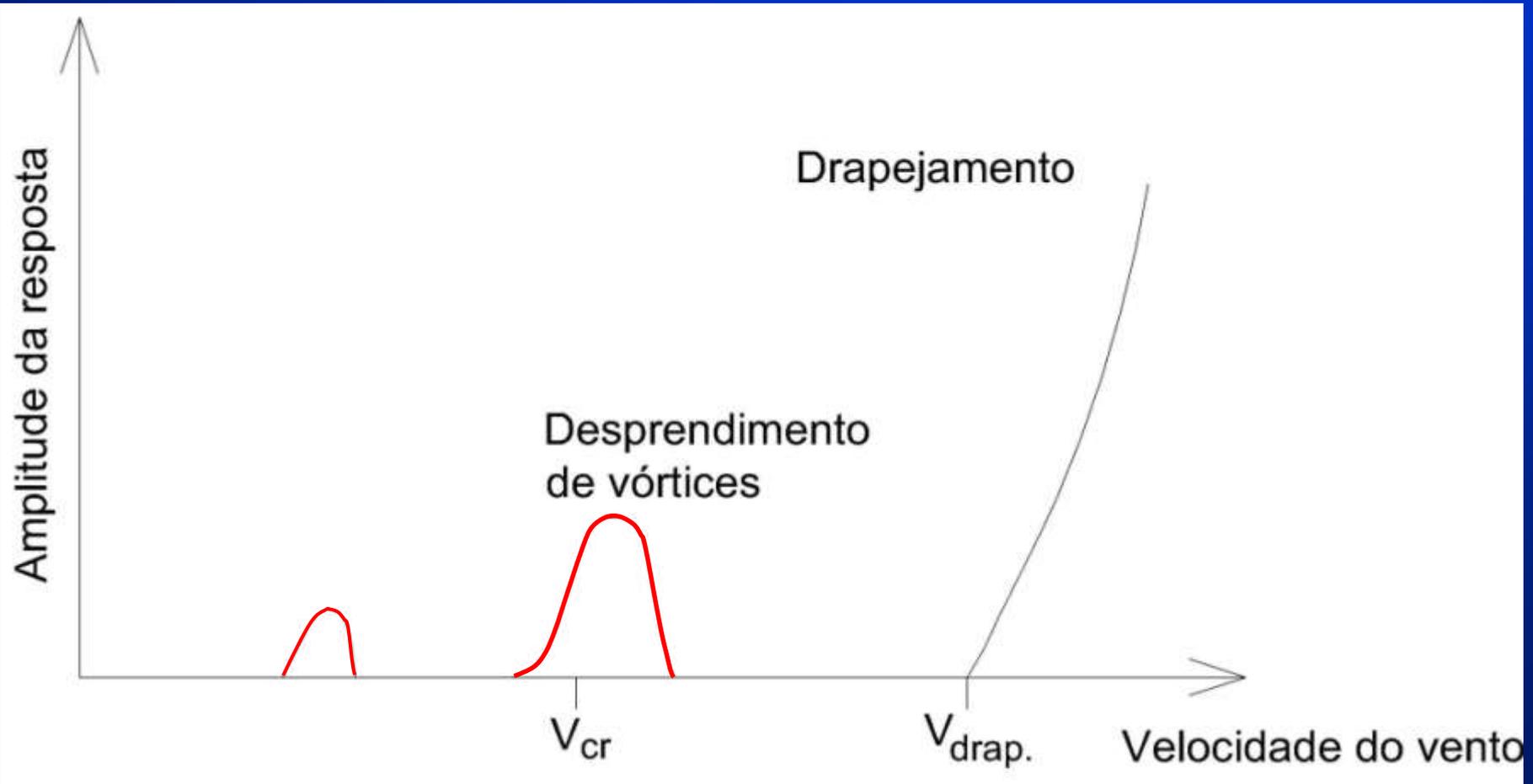
Comentários e questionamentos

- 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?

Efeitos do vento em Pontes

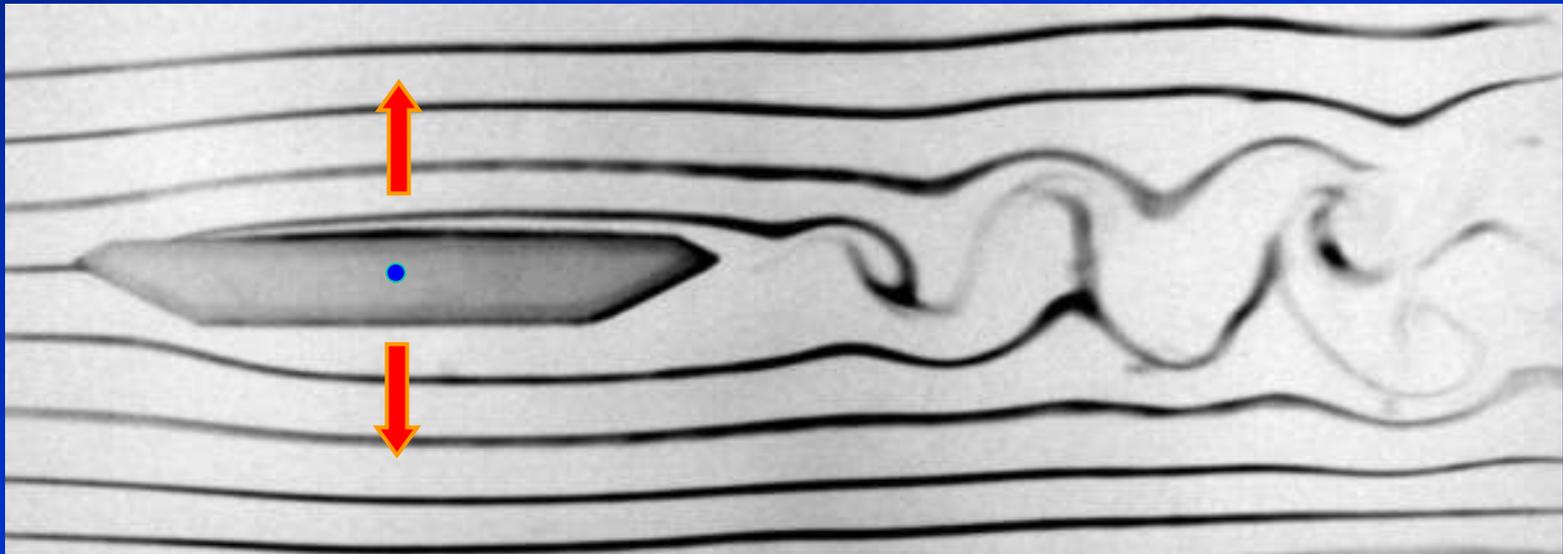
		Efeitos do vento médio (pressões e forças)		
Estáticos	Instabilidade Estática	Divergência torcional		
		Flambagem lateral		
Dinâmicos	Instabilidade Dinâmica	Galope	1 grau de liberdade	Respostas com amplitudes divergentes
		<i>Flutter</i> (instabilidade torcional)		
		<i>Flutter</i> clássico (acoplado)		
	Desprendimento de vórtices		Respostas com amplitudes limitadas	
Excitação devido às rajadas do vento - <i>buffeting</i>				

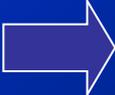
Resposta típica de corpos rombudos



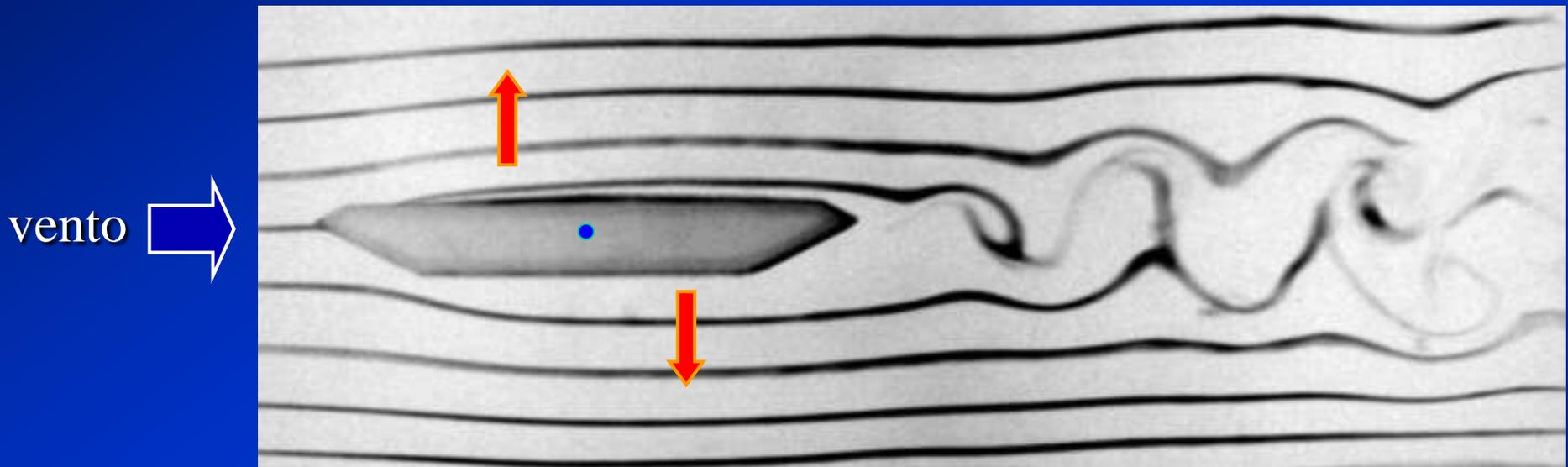
Desprendimento de vórtices

vento 



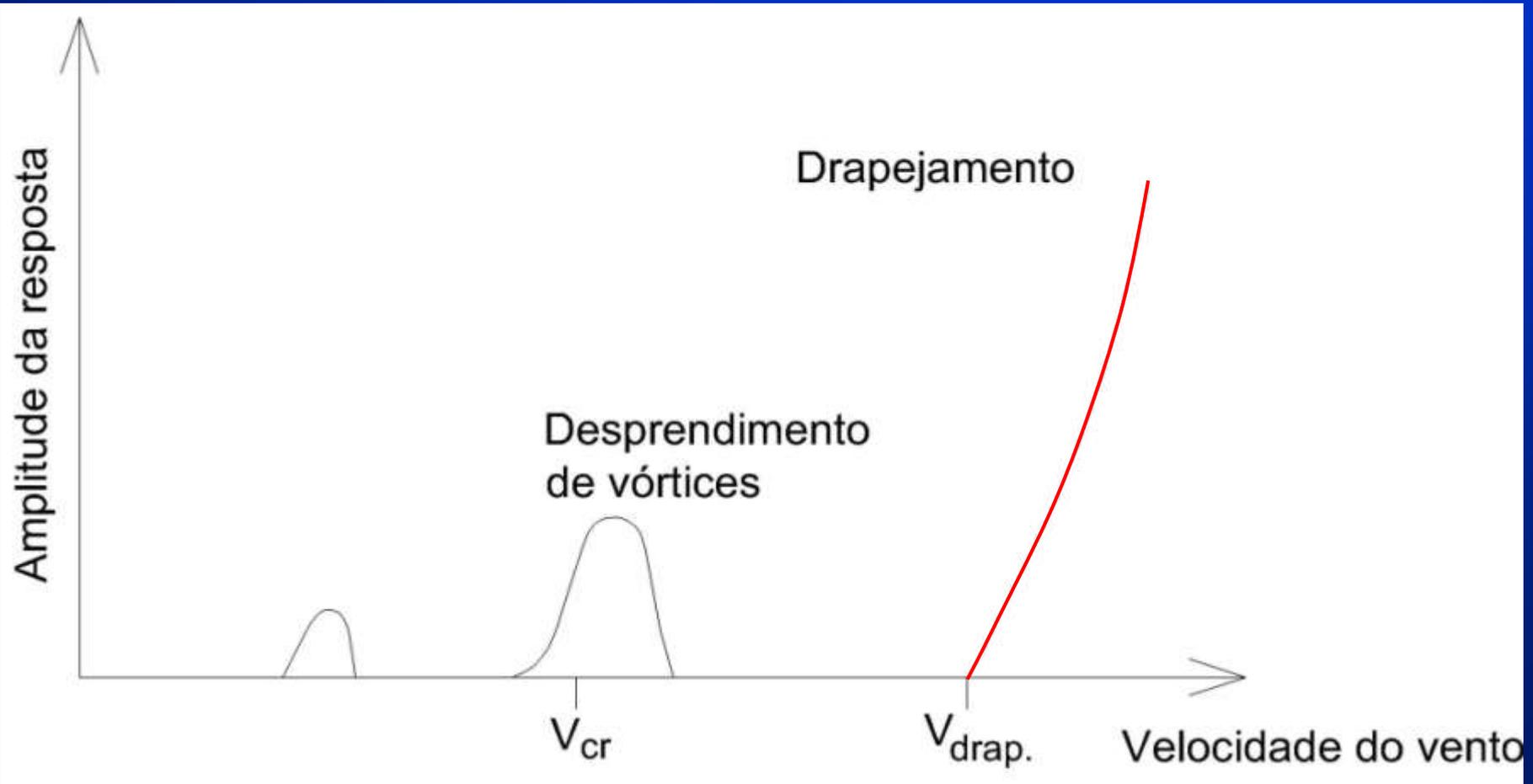
- Desprendimento alternado de vórtices
- Forças de sustentação sobre C.G.  • **MOV. VERTICAL**

Desprendimento de vórtices



- Desprendimento alternado de vórtices
- Forças de sustentação fora do C.G. ➡ • **MOV. TORCIONAL**

Resposta típica de corpos rombudos



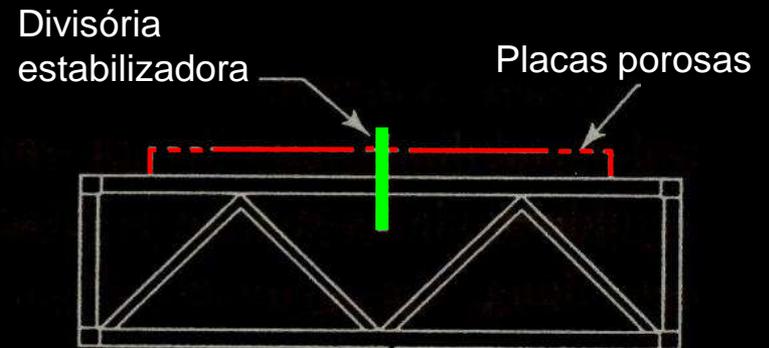
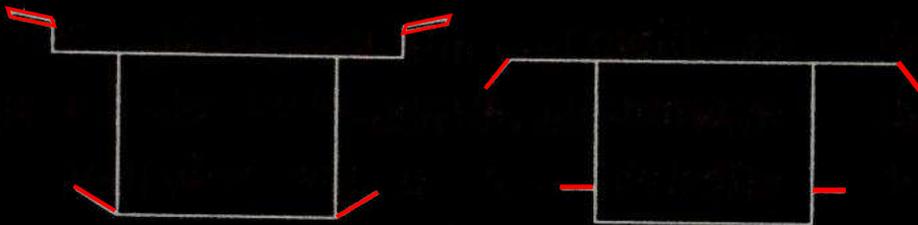
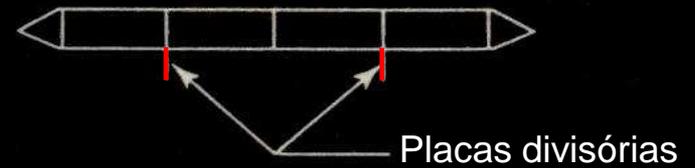
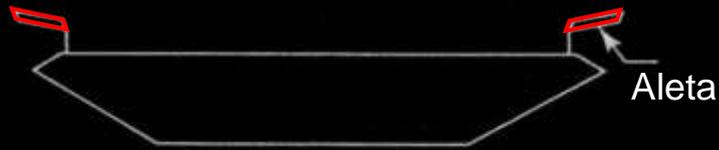
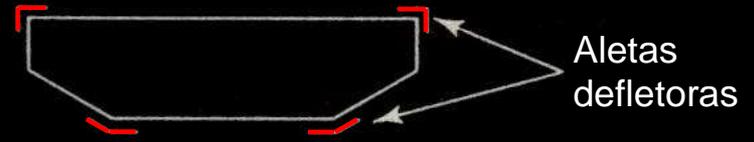
- Exemplo clássico de falha por instabilidade aerodinâmica: **Ponte de *Tacoma Narrows* - 1940**



- Secção Transversal 
- Drapejamento – *flutter*

- Projetada para resistir a ventos de até 200km/h
- Colapso com velocidade do vento de aproximadamente **68km/h!**

Controle de vibrações induzidas pelo vento: dispositivos aerodinâmicos

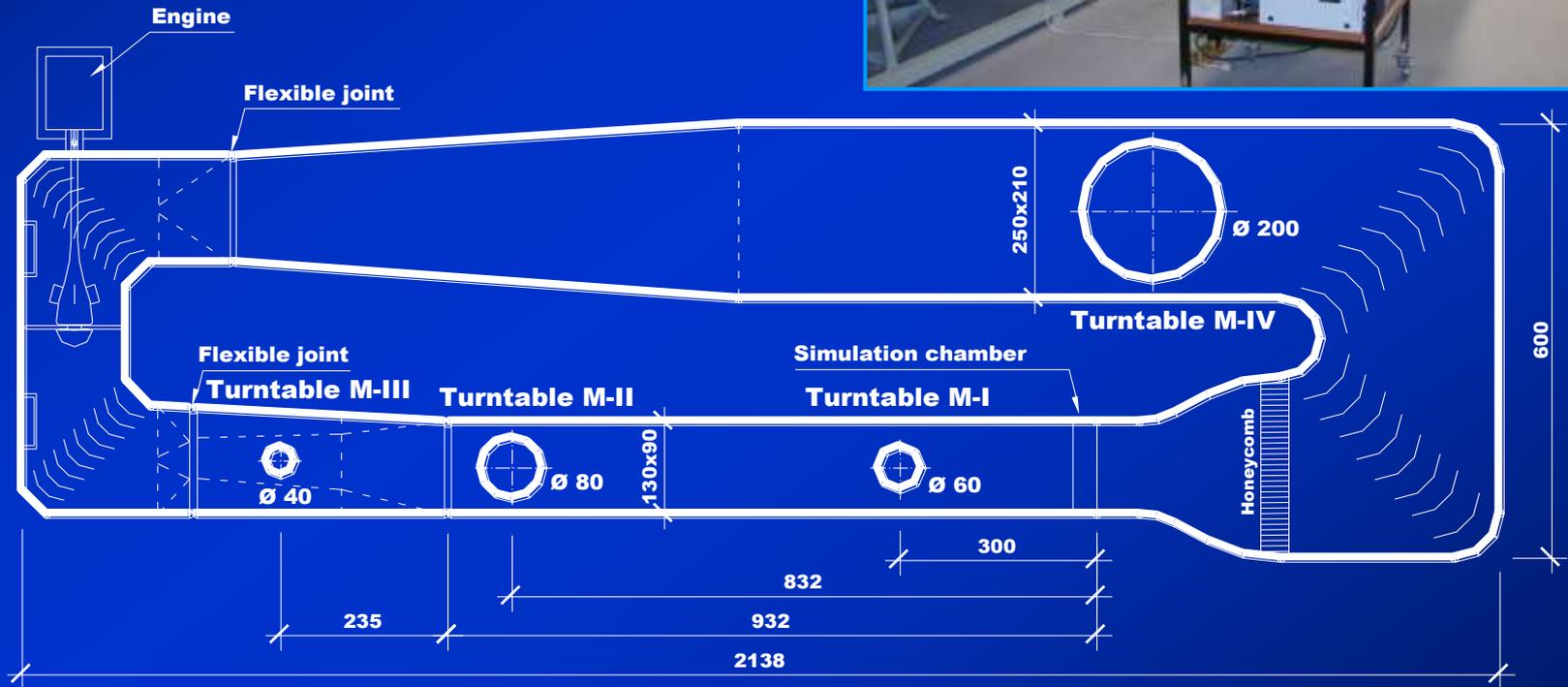




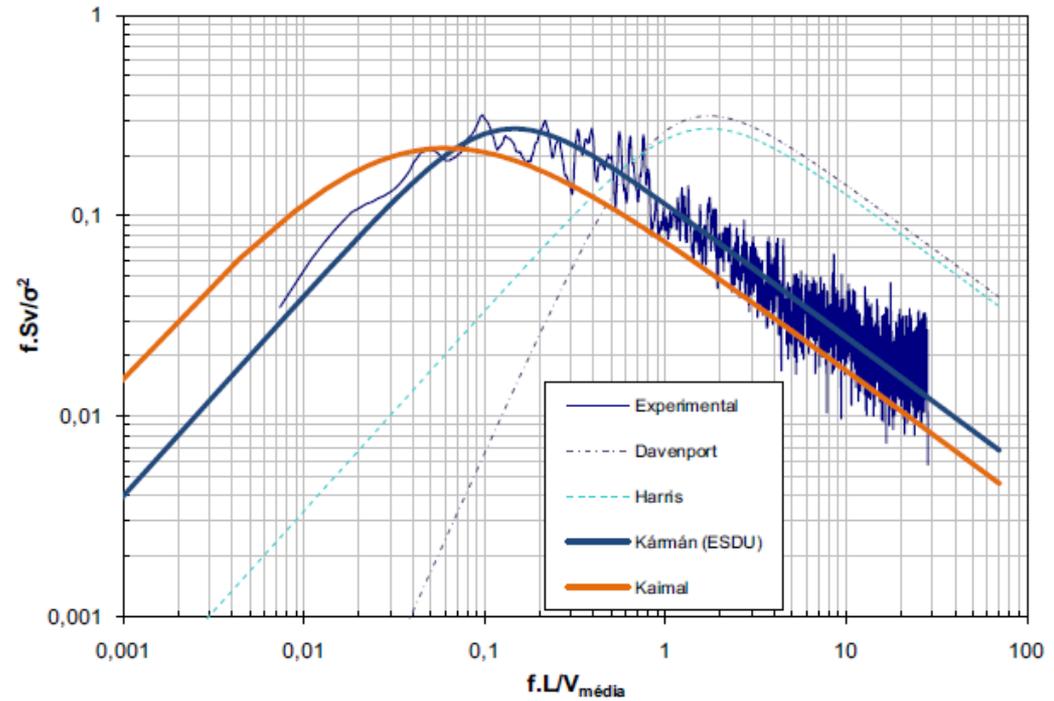
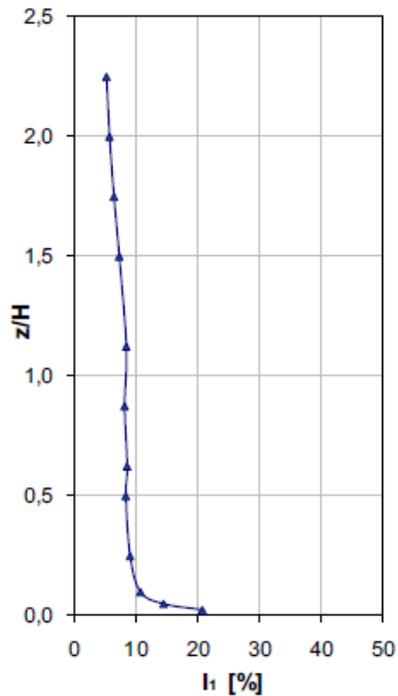
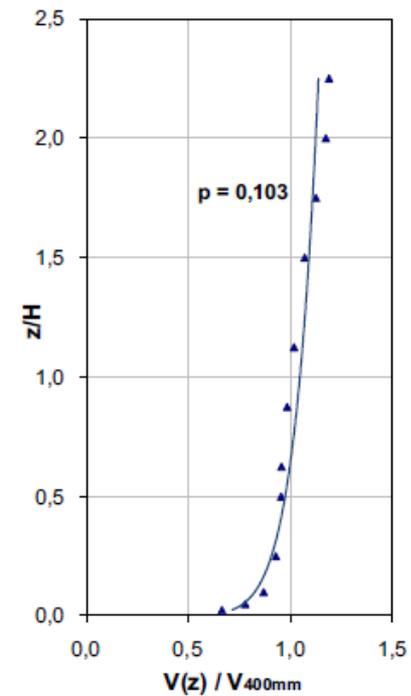


Túnel de Vento

Prof. Joaquim Blessmann



Boundary Layer Wind Tunnel Prof. Joaquim Blessmann
Dimensions in [cm]

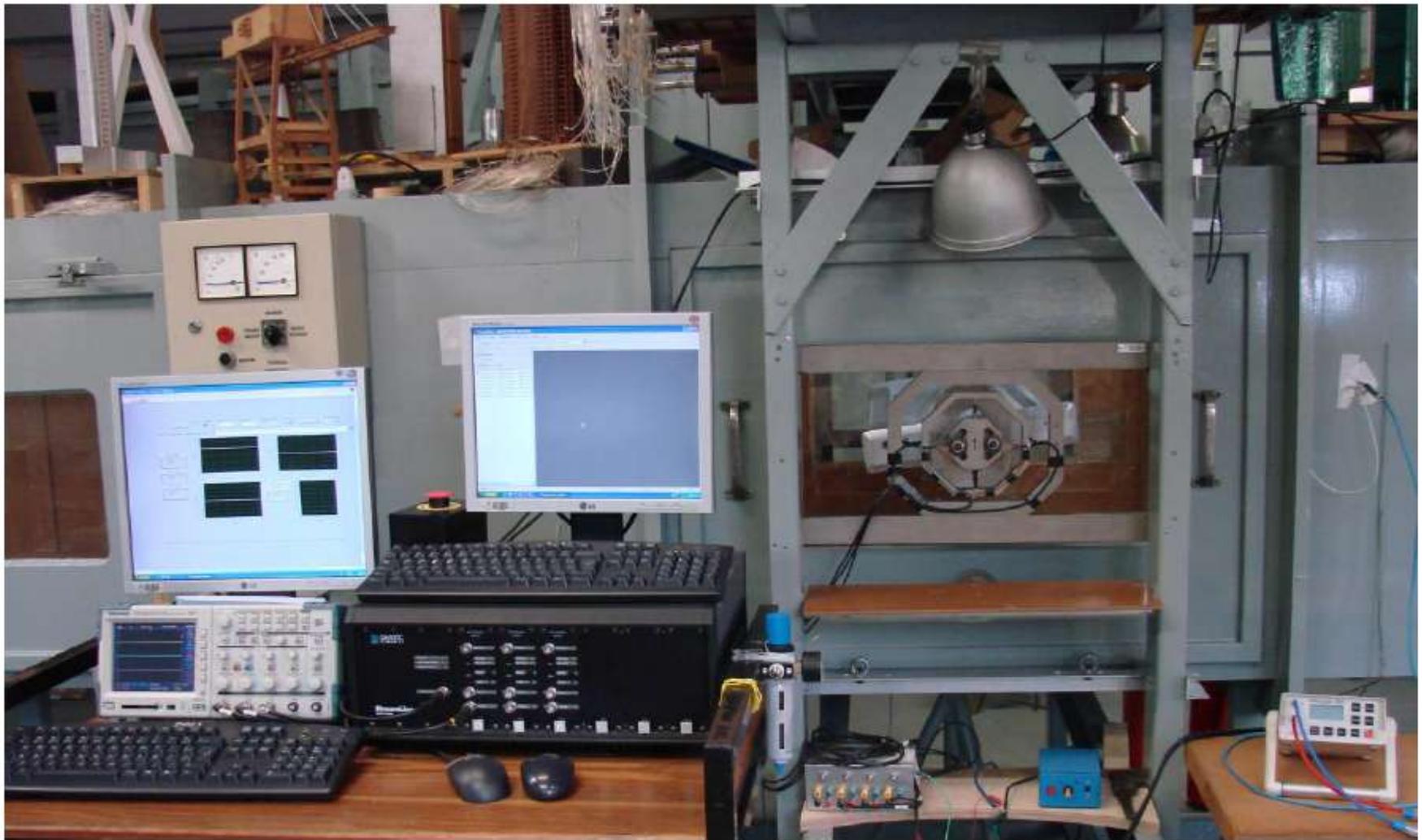


Perfil vertical das velocidades médias

Intensidade da componente longitudinal da turbulência

Espectro de potência da componente longitudinal da turbulência

Características de um dos ventos simulados na mesa de ensaios M-IV - *Ponte sobre o Rio Negro*



Aparato experimental para medição dos coeficientes aerodinâmicos através de célula de carga. *Nova Seção da Ponte Estaiada sobre o Rio Negro.*

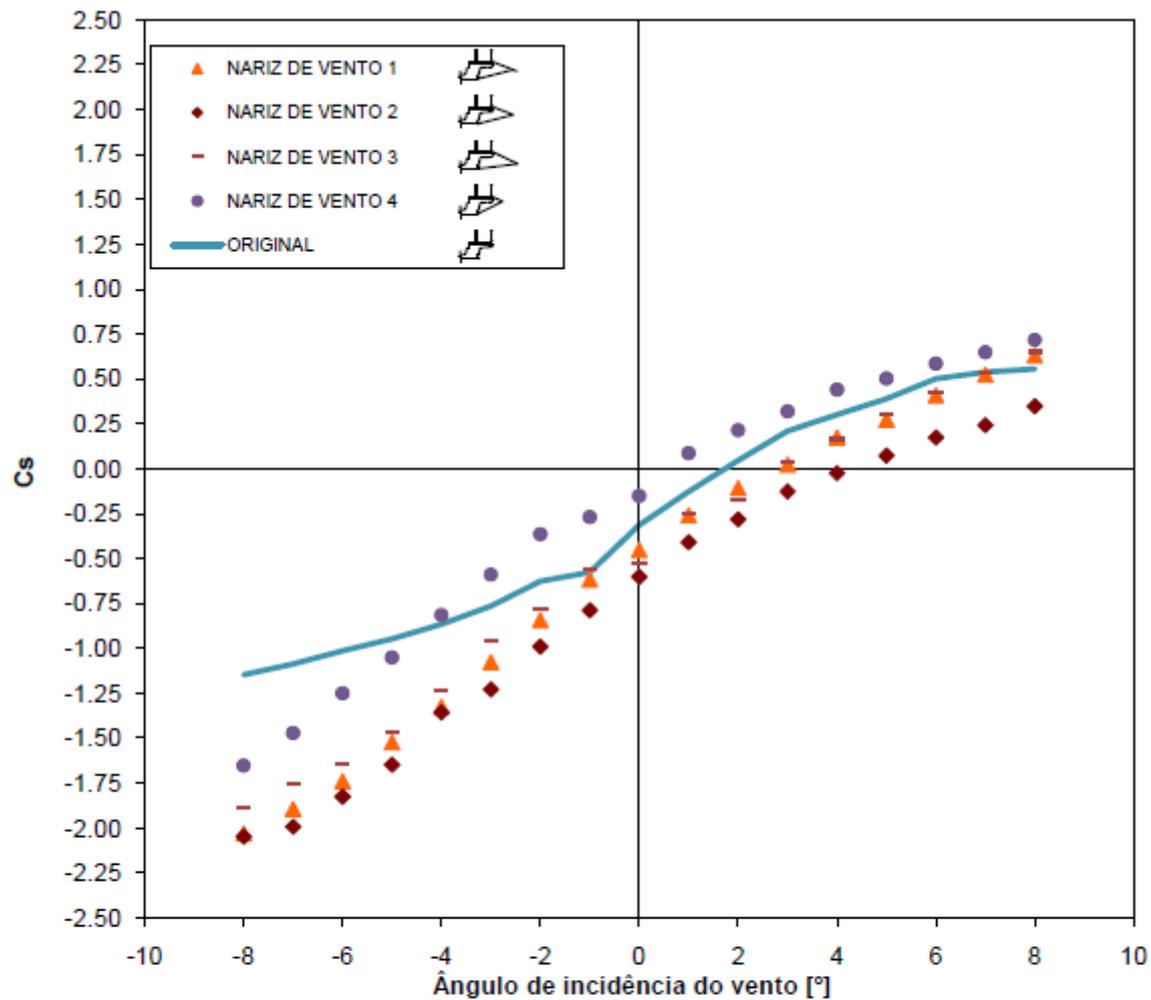
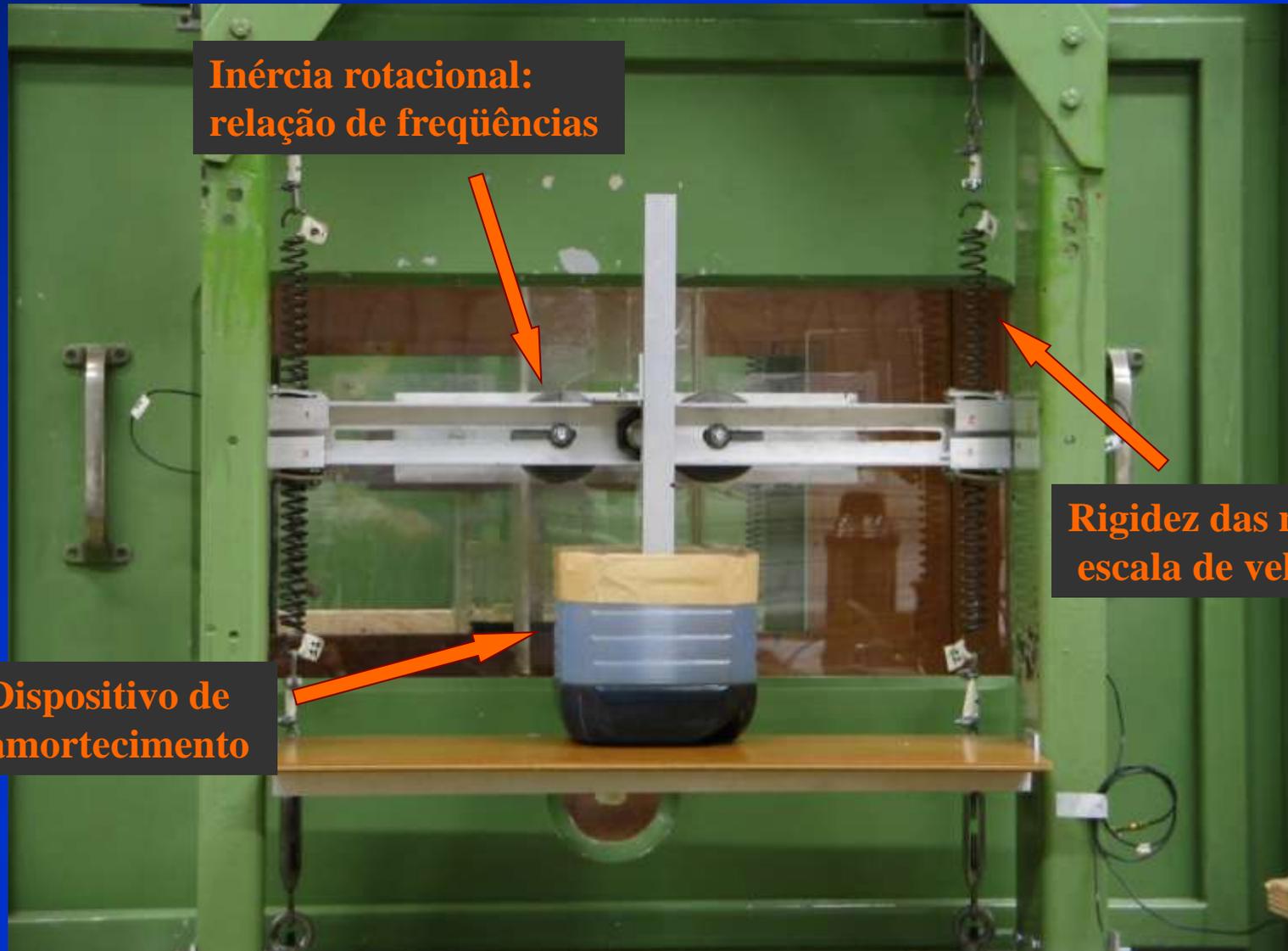


Figura 4 - Coeficiente de sustentação C_s - Ponte Estaiada sobre o Rio Negro.
Nova Seção - Vão convencional - escoamento suave.

- **SISTEMA DE APOIO ELÁSTICO**



**Inércia rotacional:
relação de frequências**

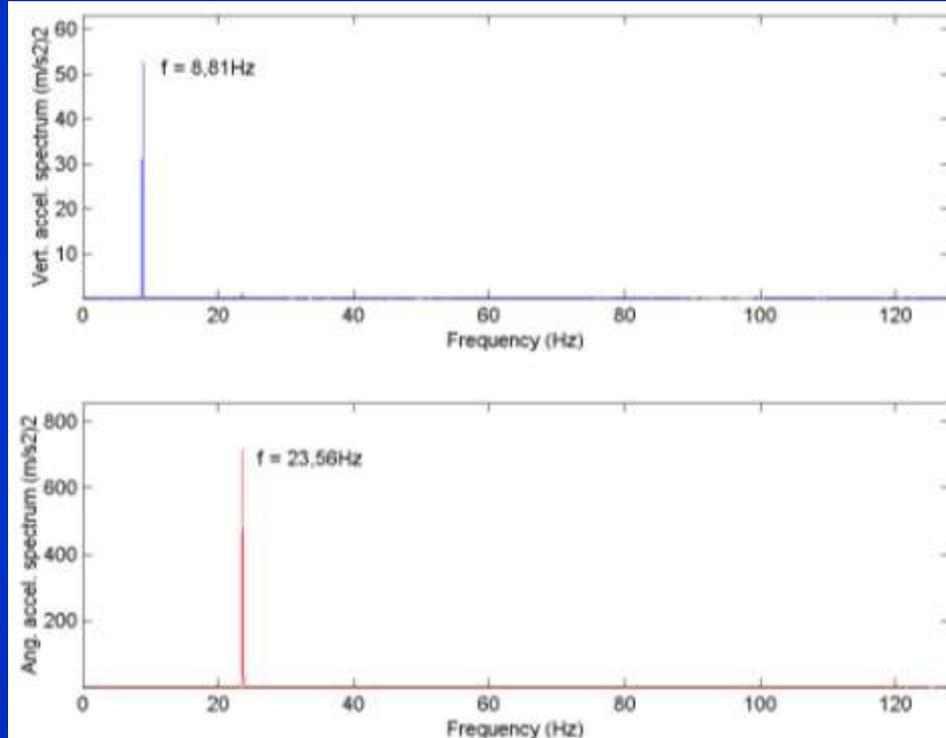
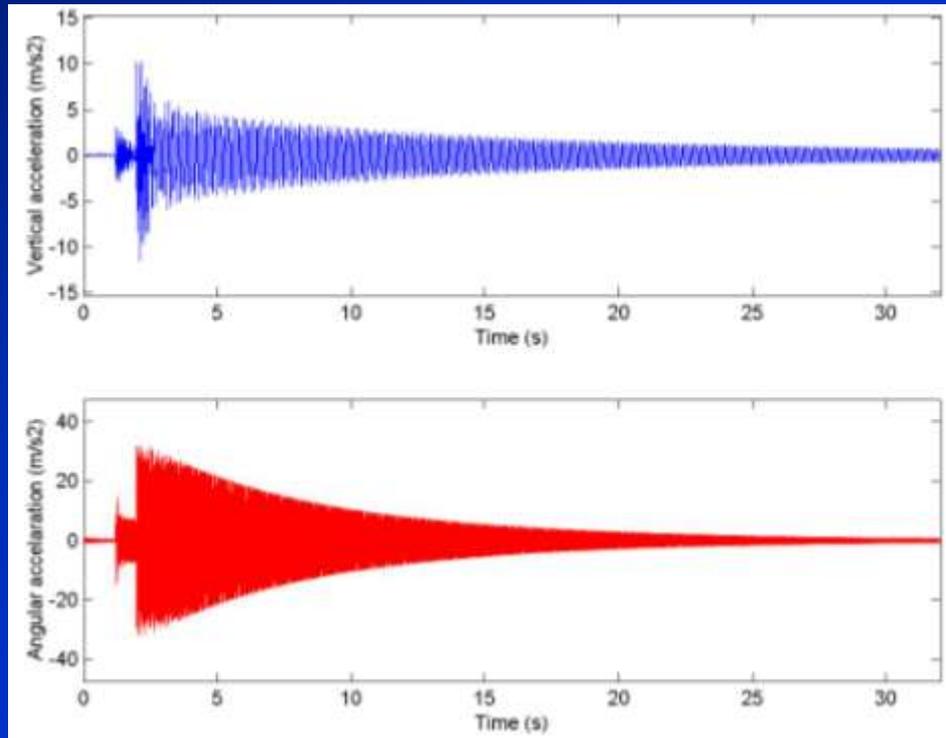
**Rigidez das molas:
escala de velocidades**

**Dispositivo de
amortecimento**



Modelo seccional do tabuleiro da *Nova Seção da Ponte Estaiada sobre o Rio Negro* no interior do Túnel de Vento – Configuração II - COM GUARDA-CORPO.

- CALIBRAÇÃO DO MODELO



- Registros das curvas de decaimento
- do modelo em vibração livre

- Espectros de potência dos registros
- em vibração livre do modelo

- *Flutter*



Modelo Aeroelástico Completo

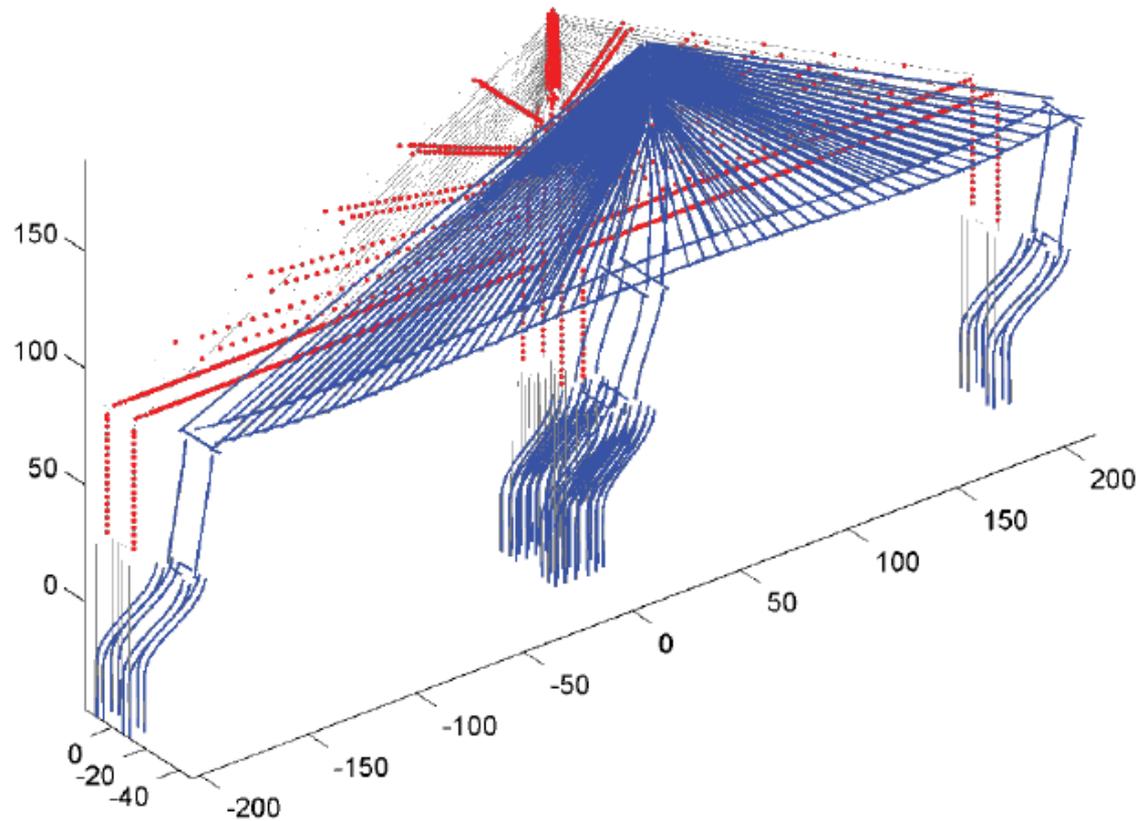
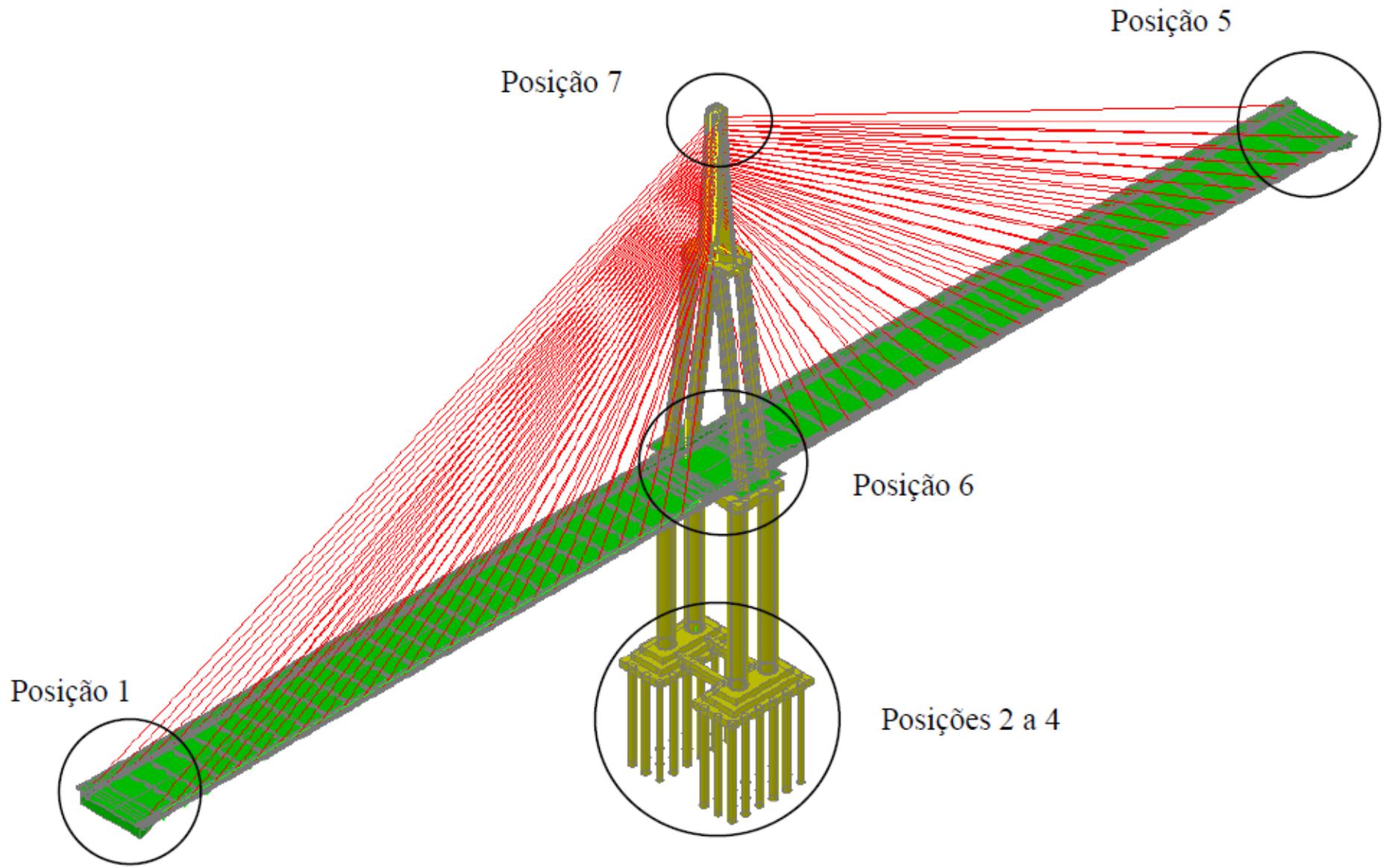
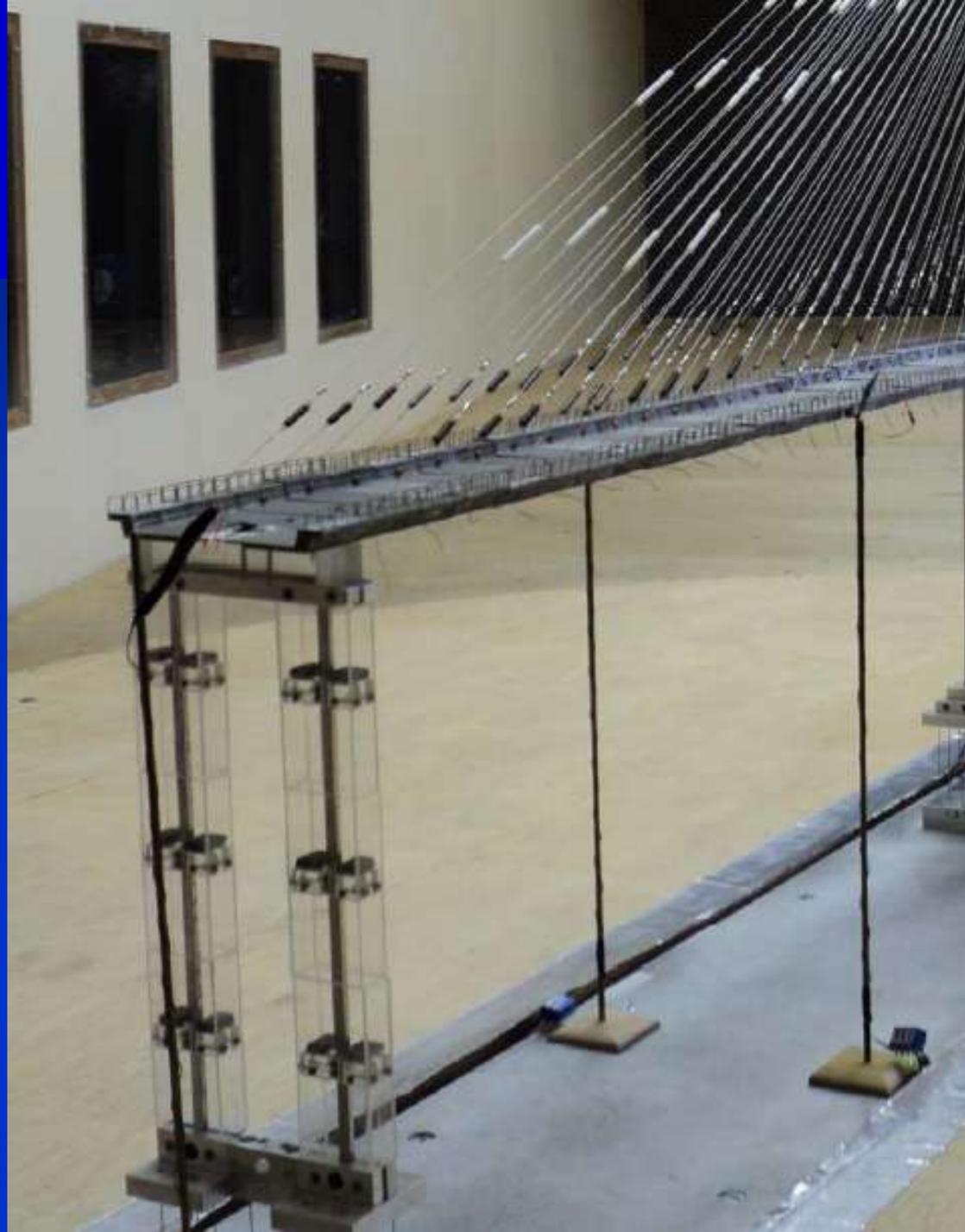
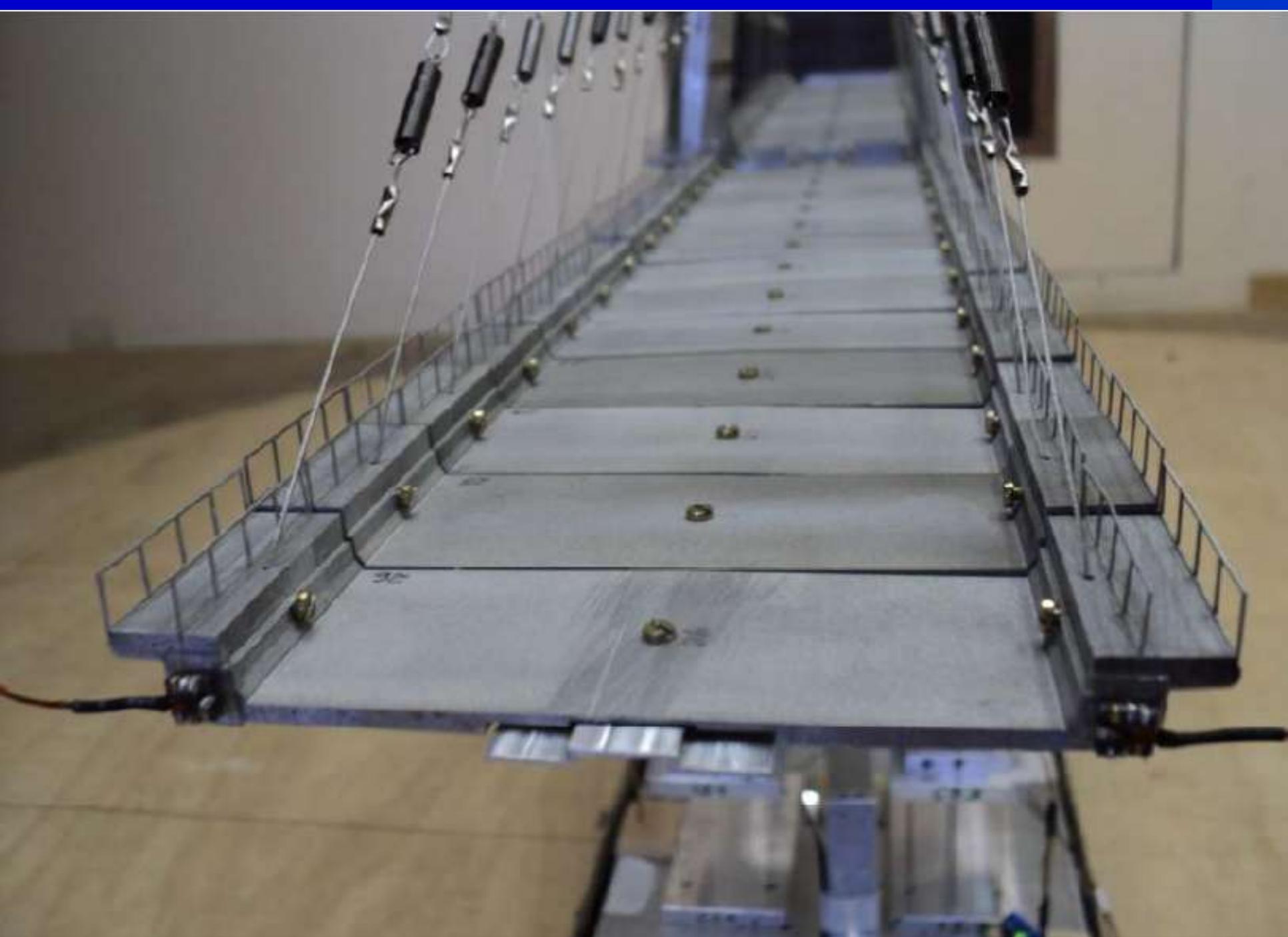


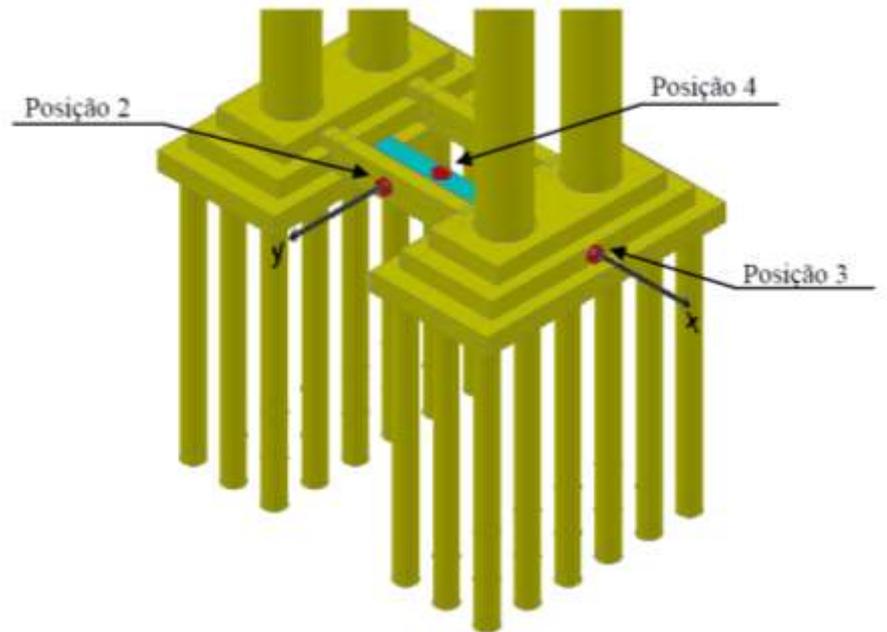
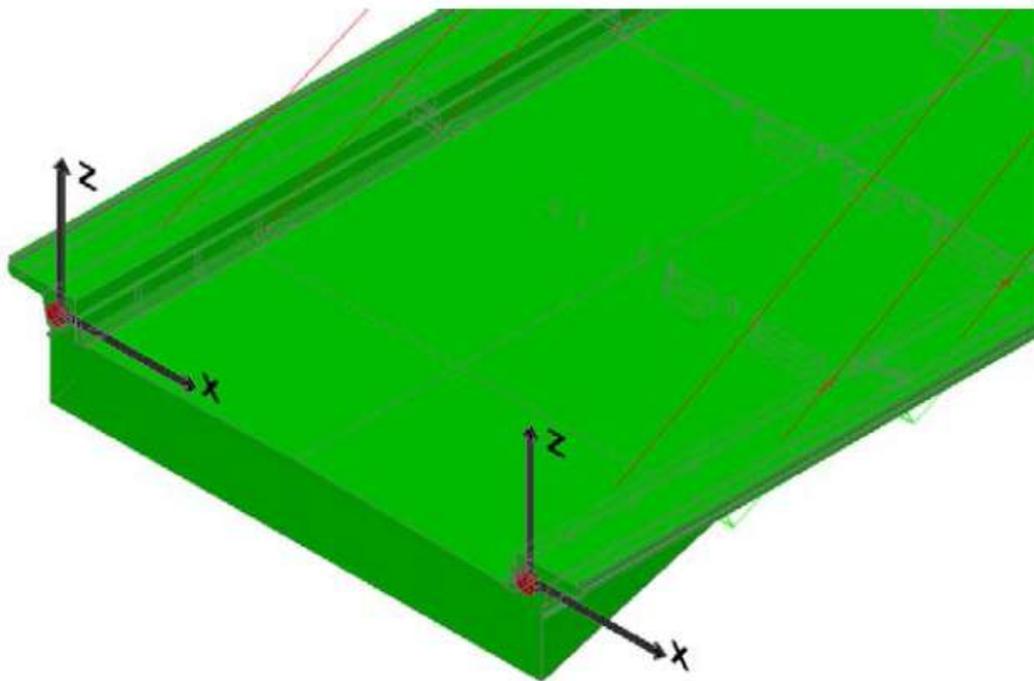
Figura 3: Configuração deformada da estrutura com deslocamentos ampliados 100 vezes, calculada conforme o método dinâmico descrito na seção 2. Os pontos vermelhos indicam, para fins de controle, os nós estruturais onde são aplicadas forças aerodinâmicas.



















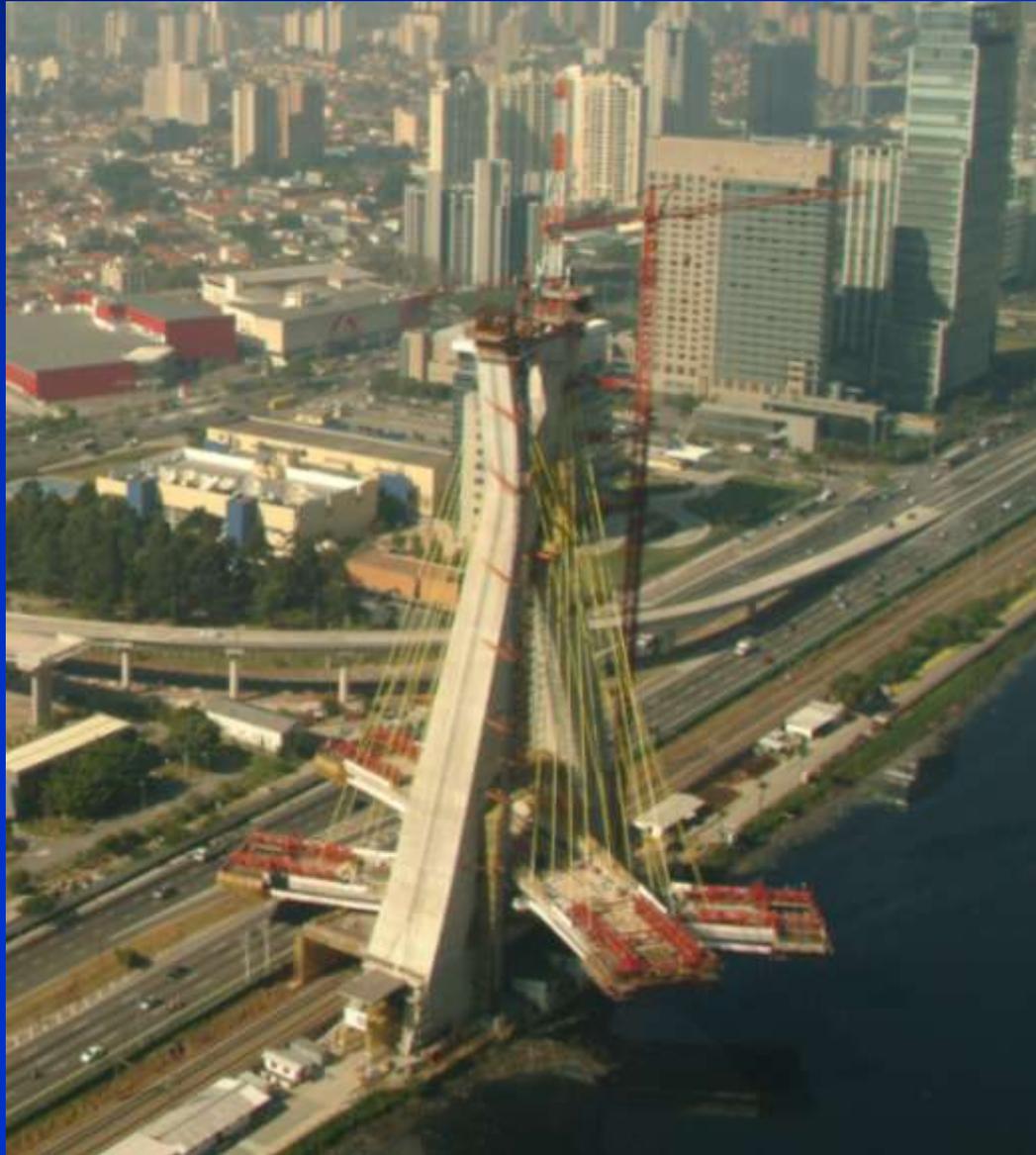




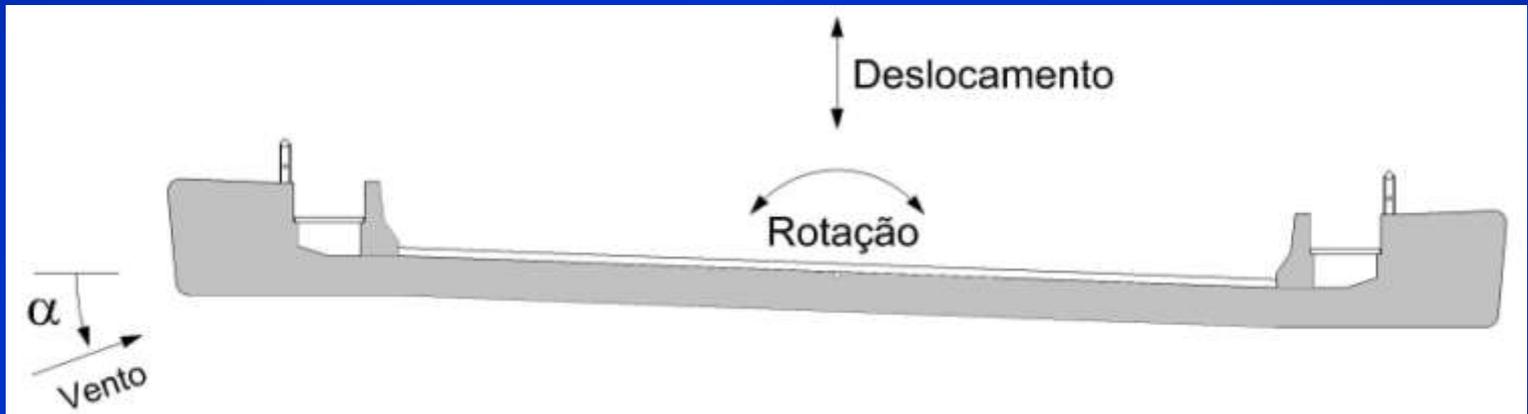






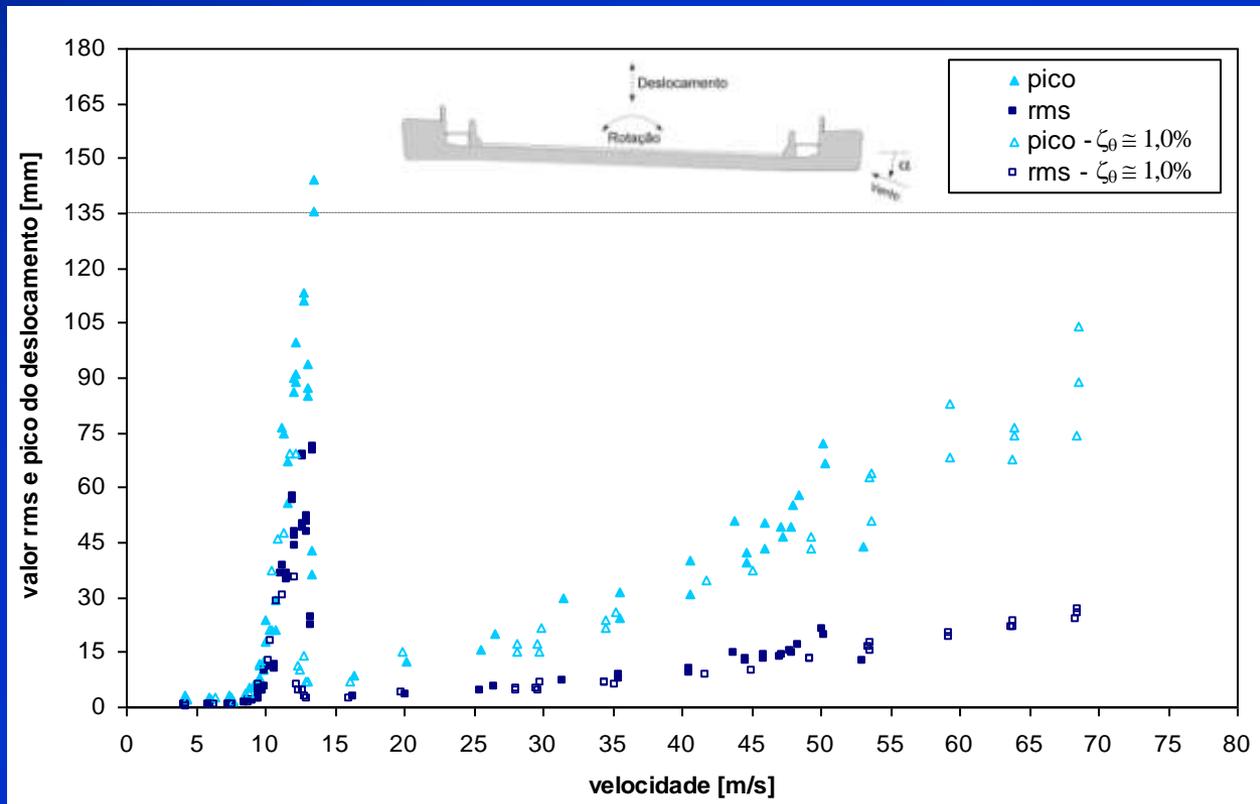


- **MODELO DINÂMICO – ISOLADO**



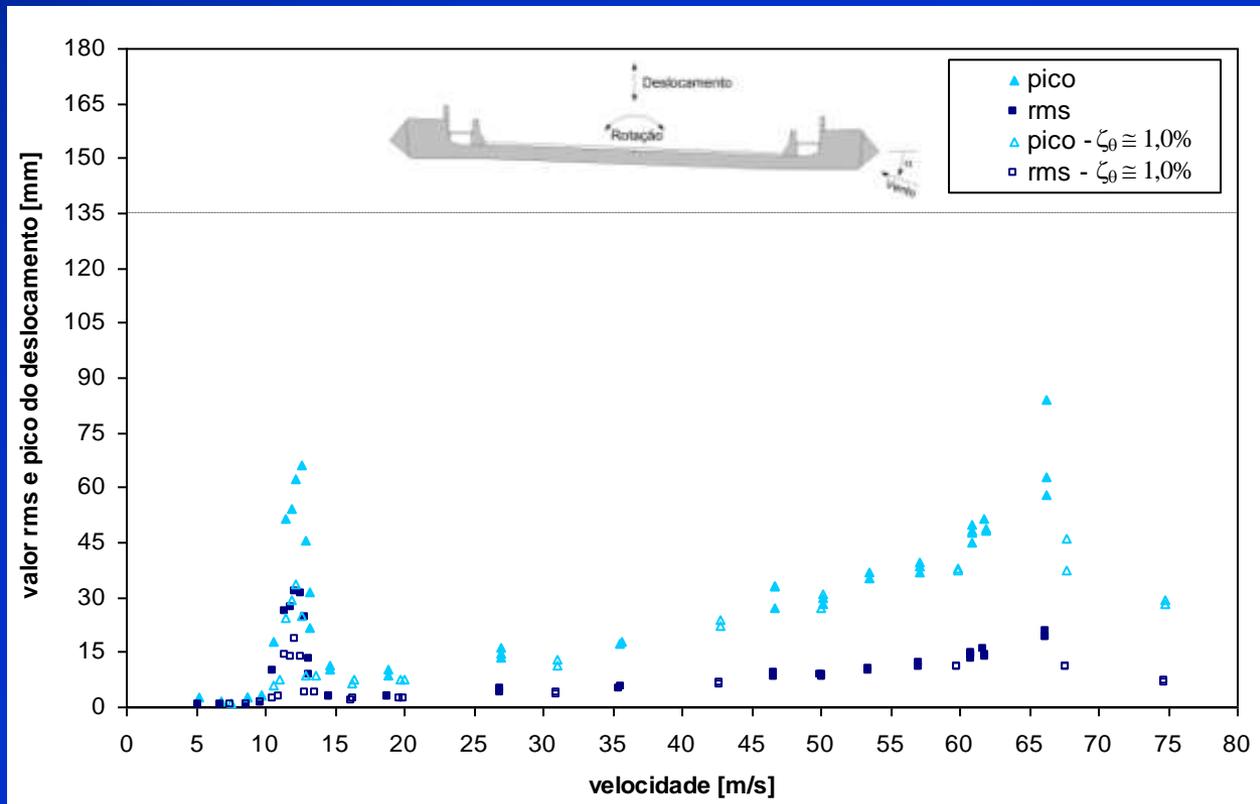
Fase III – Velocidades críticas – Nível de amortecimento estrutural

Deslocamento vertical - Escoamento uniforme e suave: $\alpha = -4^\circ$



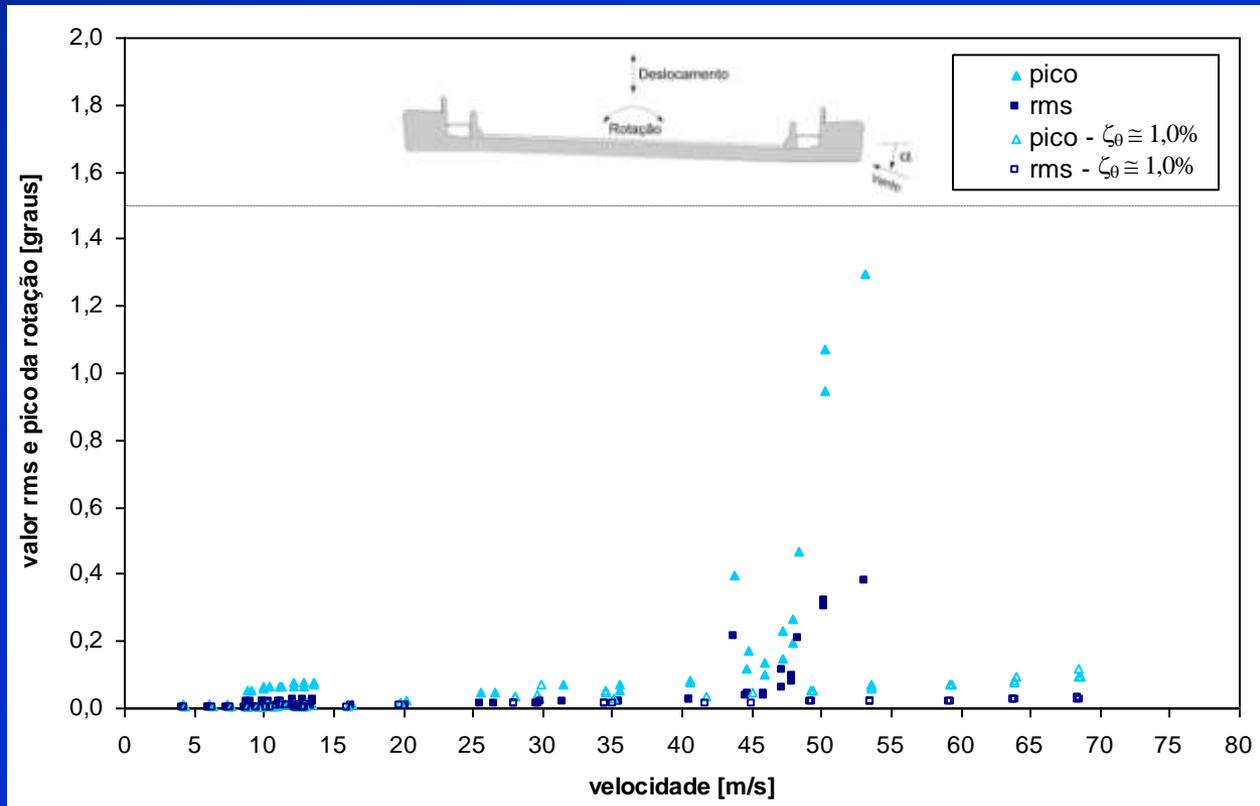
Fase III – Velocidades críticas – Forma da secção transversal

Deslocamento vertical - Escoamento uniforme e suave: $\alpha = -4^\circ$



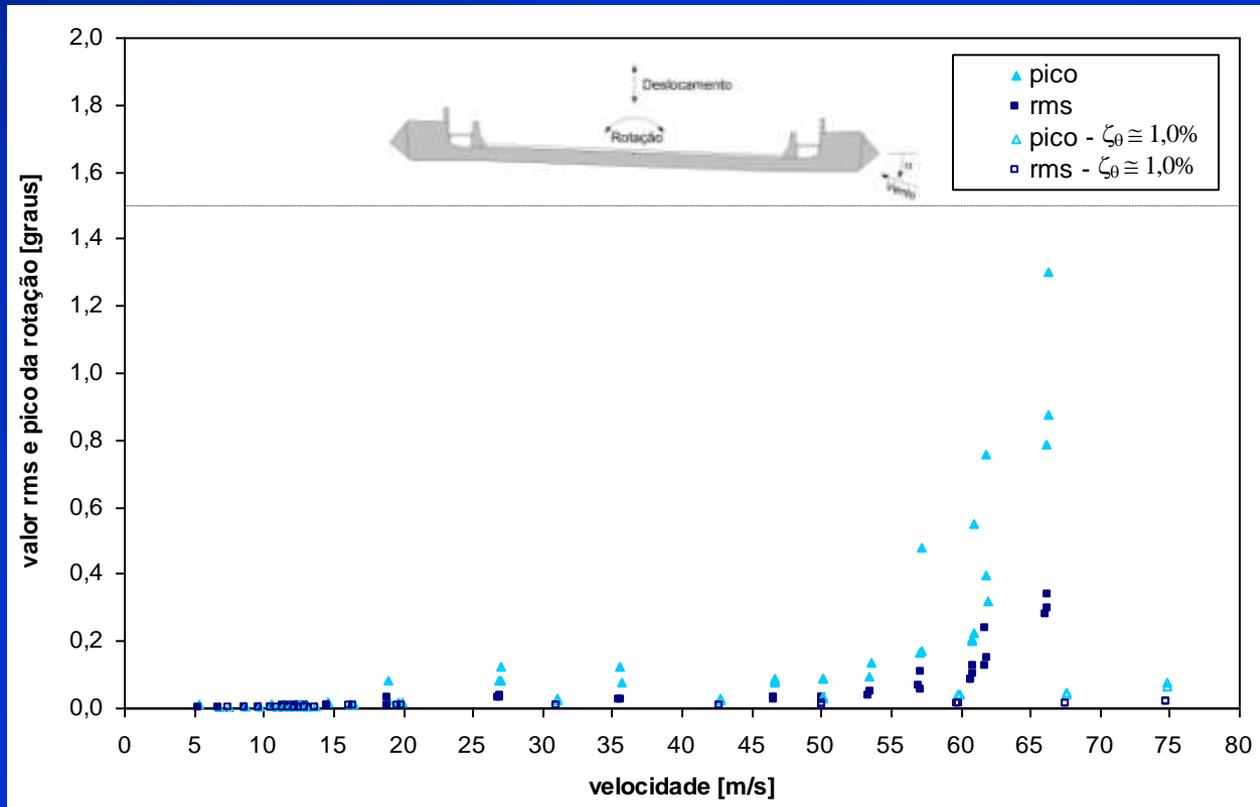
Fase III – Velocidades críticas – Nível de amortecimento estrutural

Rotação - Escoamento uniforme e suave: $\alpha = -4^\circ$



Fase III – Velocidades críticas – Forma da secção transversal

Rotação - escoamento uniforme e suave: $\alpha = -4^\circ$

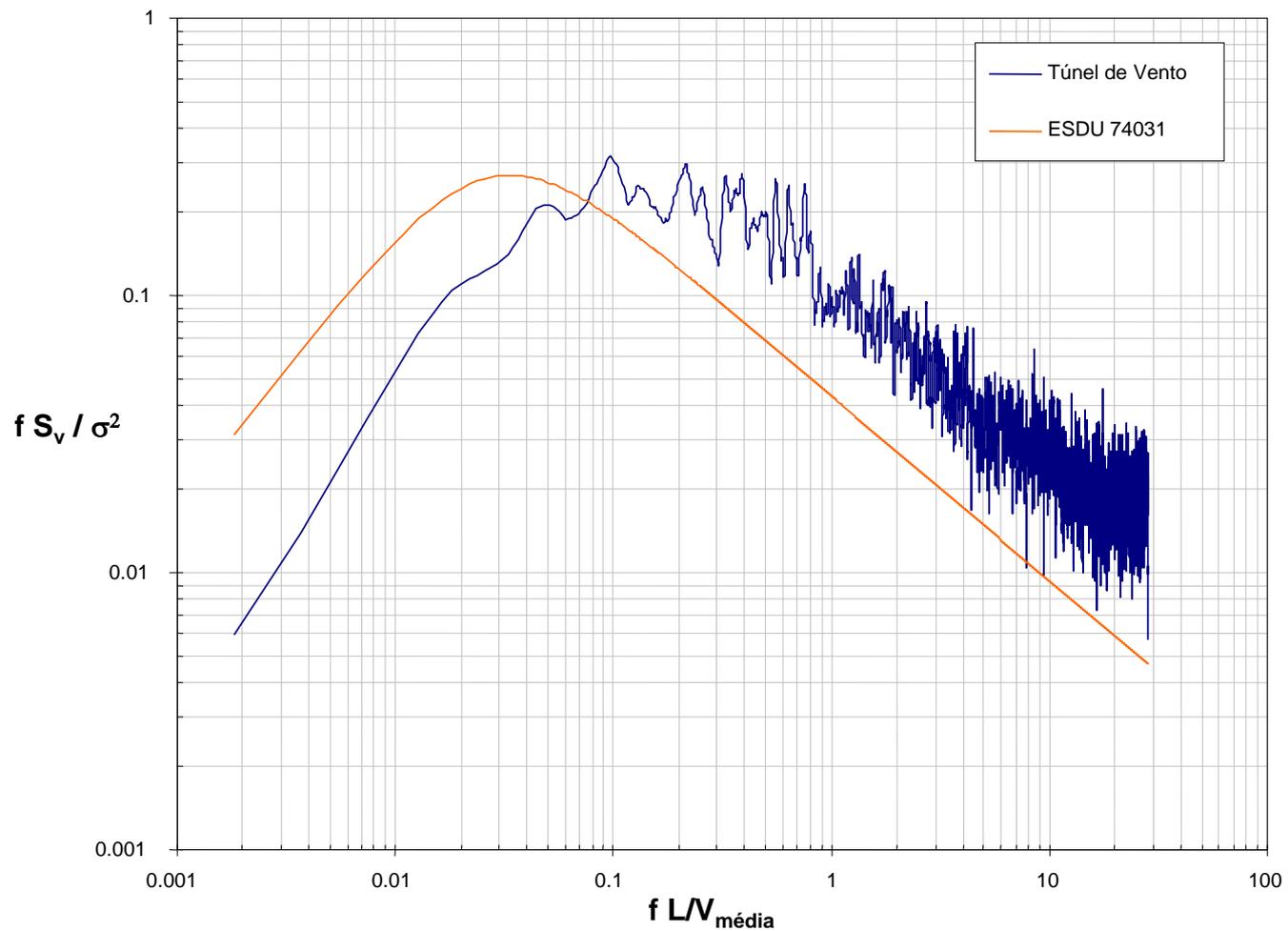


Simulação do vento natural – Câmara de ensaios com simuladores de Counihan e rugosidades disseminadas

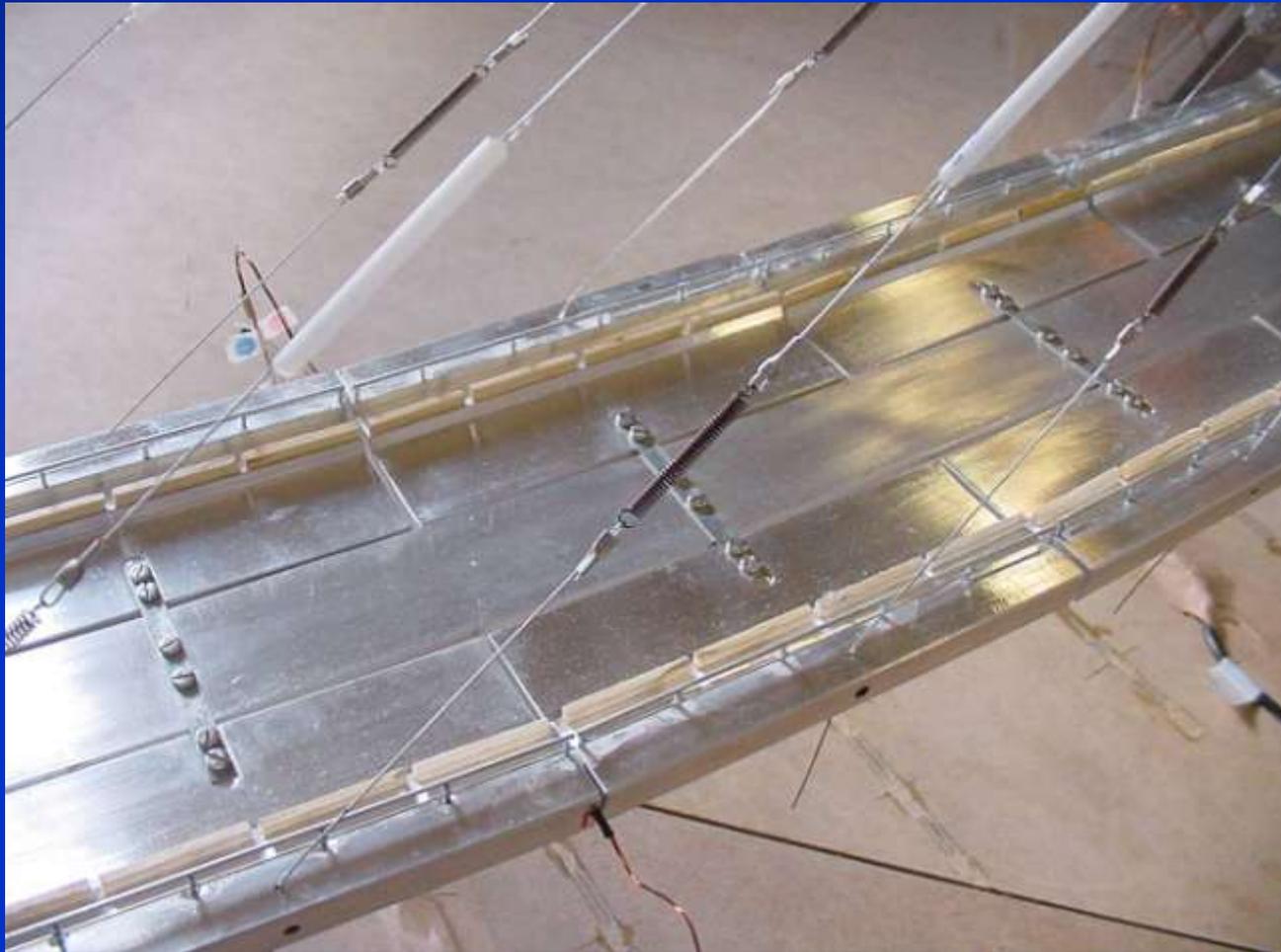


Características do vento simulado:

– densidade espectral da velocidade do vento



Fase IV – Modelo Aeroelástico Completo



Fase IV – Modelo Aeroelástico Completo



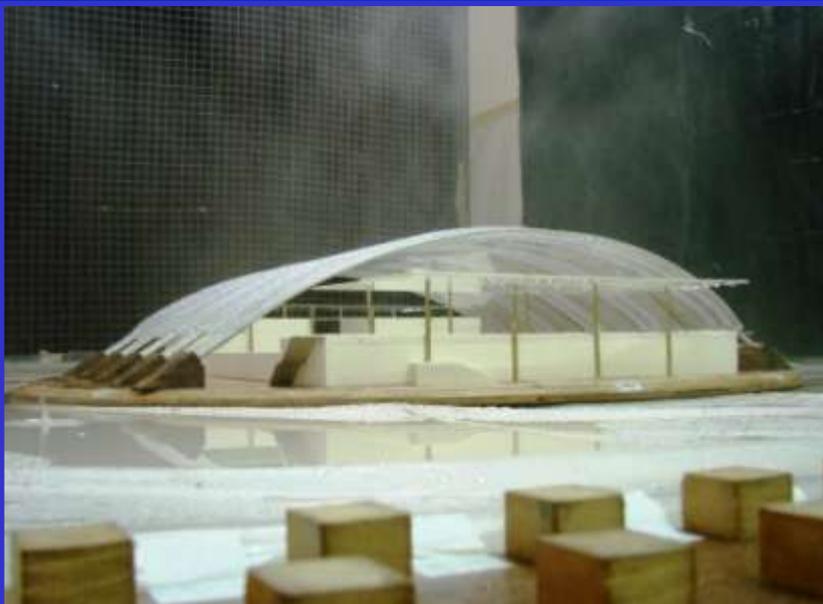




[Clique sobre a imagem](#)

Fase II: Estudo da Penetração da Chuva

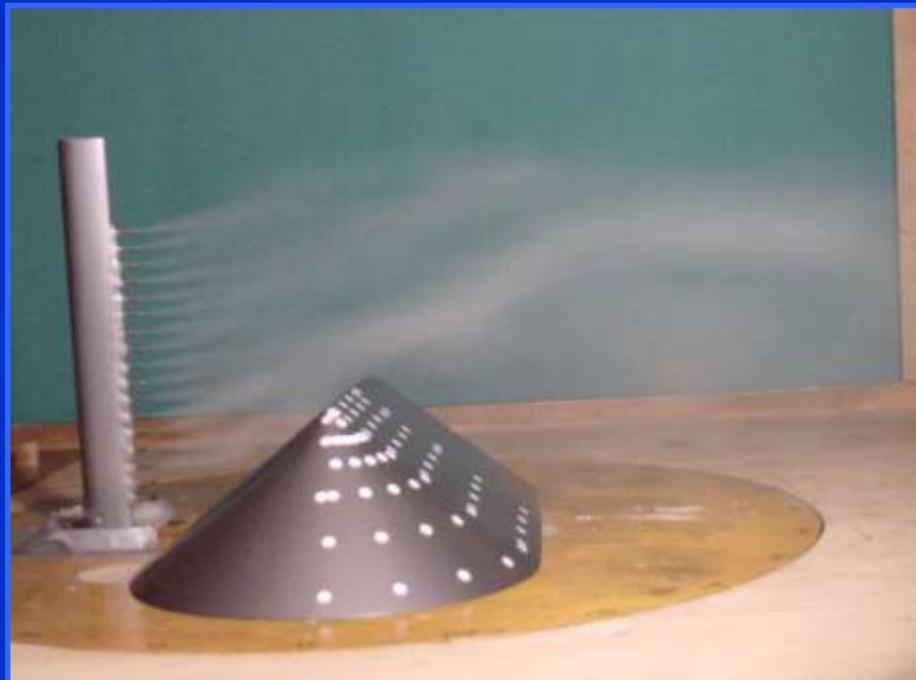
- ↪ Modelo reduzido do ginásio em escala 1/64;
- ↪ Simulação física da chuva combinada com o vento;
- ↪ Ensaio para 4 ângulos de incidência do vento ($p=0,22$; Cat. III e IV da NBR 6123/1988);
- ↪ Medição da deposição da chuva.



Pátio de Carvão de Tubarão – CVRD, Vitória - ES



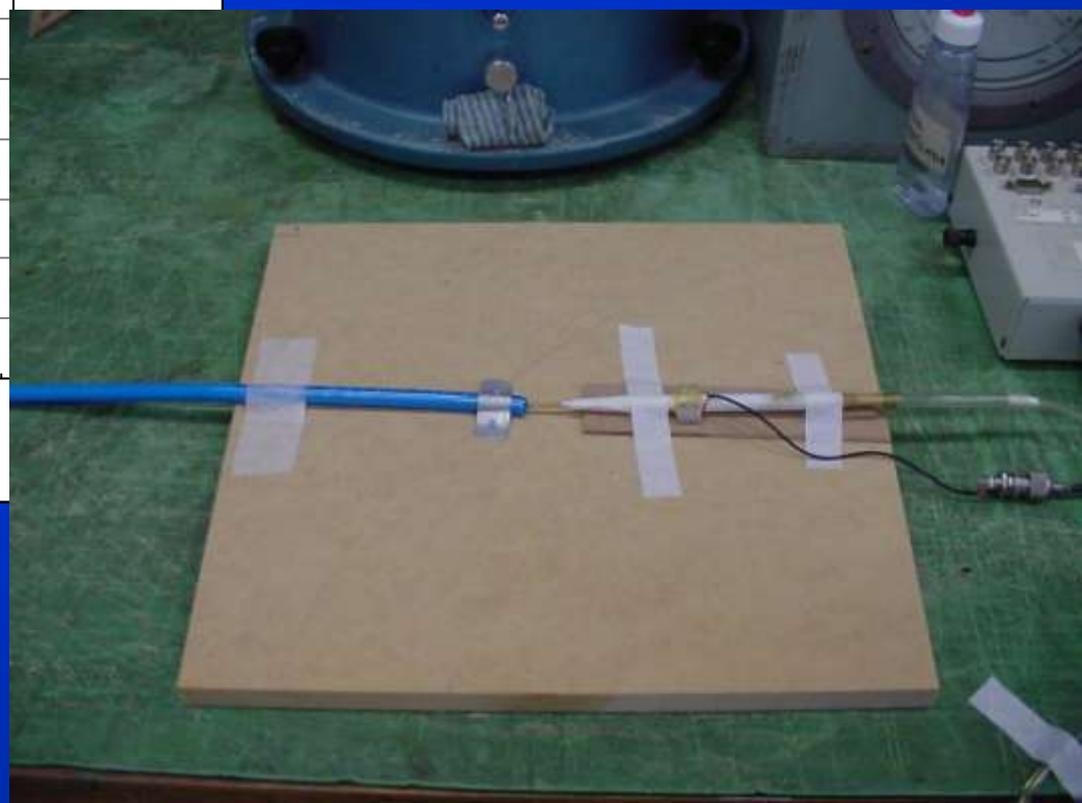
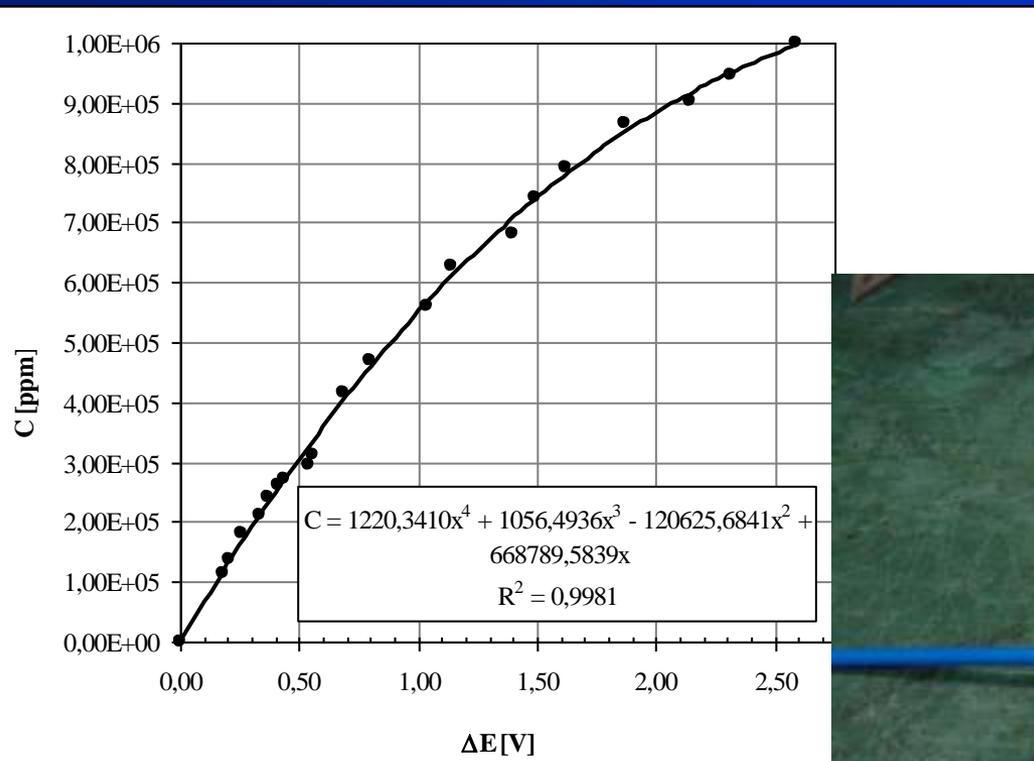
Pátio de Carvão de Tubarão – CVRD, Vitória - ES

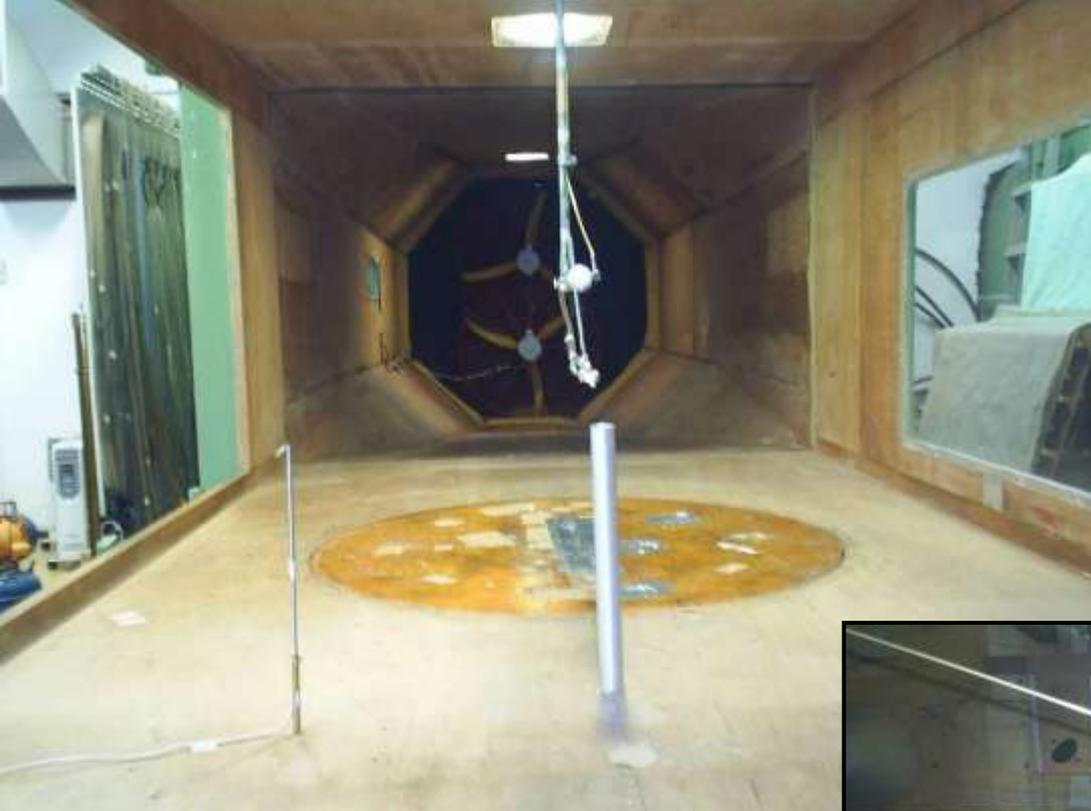


Transporte de partículas de carvão

Medição de Concentrações

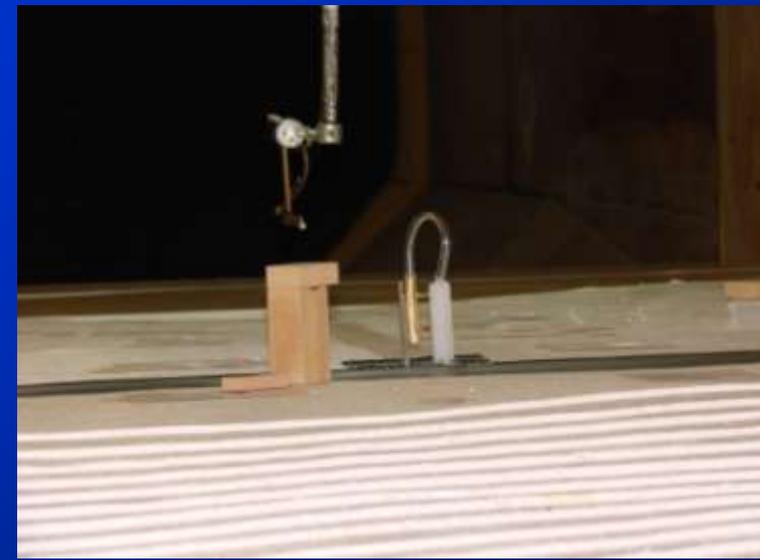
Curva de Calibração:

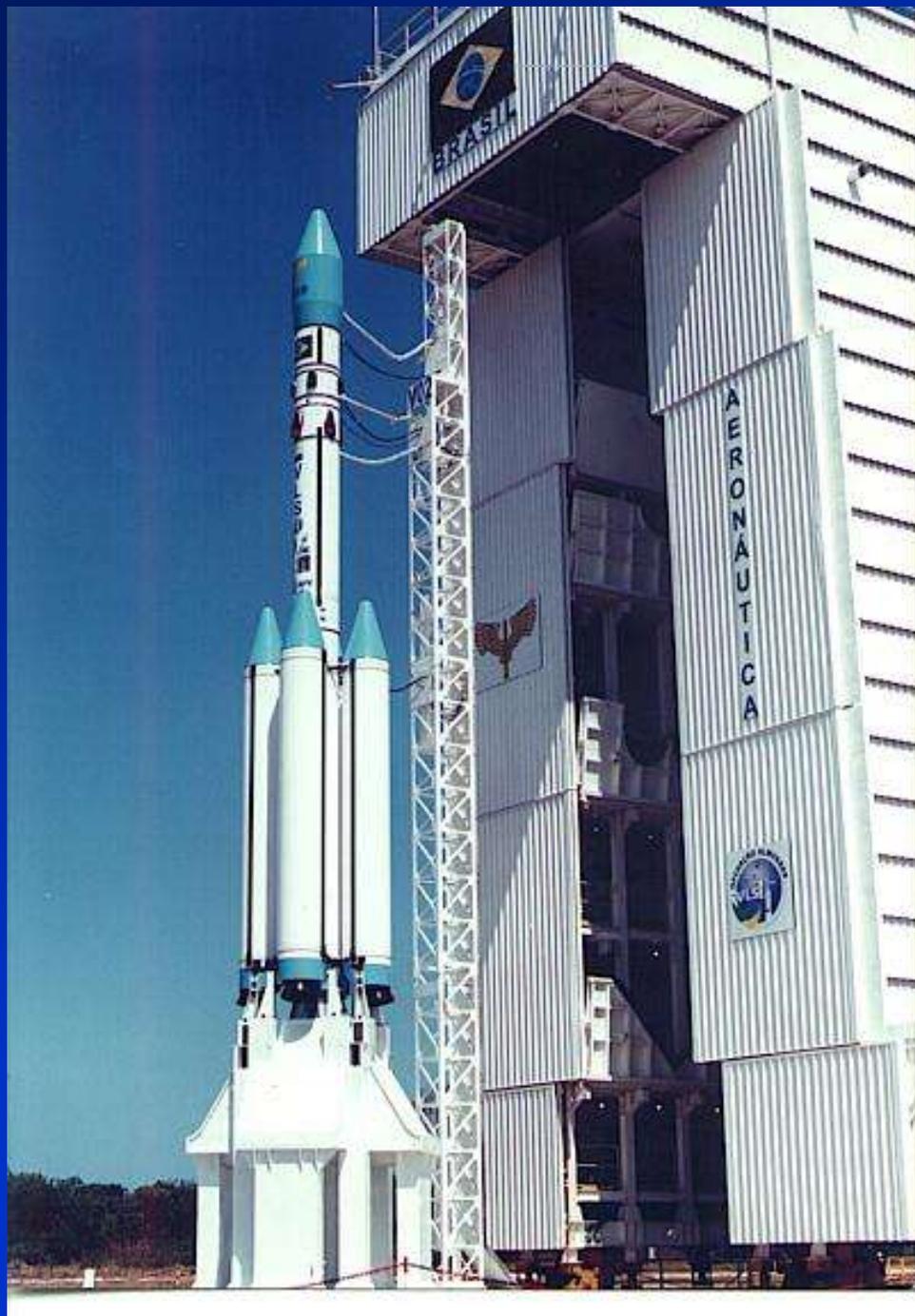




*CTA – Centro de
Lançamento de Alcântara,
Maranhão*

*Estudo em Túnel de Vento
da Dispersão de Gases no
Lançamento*





*CTA – Centro de
Lançamento de Alcântara,
Maranhão*

*Estudo em Túnel de Vento
da Dispersão de Gases no
Lançamento*





L A C

LABORATÓRIO
DE AERODINÂMICA
DAS CONSTRUÇÕES

