

Modelagem de edifícios altos em túnel de vento

ACIR MÉRCIO LOREDO-SOUZA

MARCELO MAIA ROCHA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ADRIAN ROBERTO WITTEW

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE – ARGENTINA

MARIO GUSTAVO KLAUS OLIVEIRA

VENTO-S CONSULTORIA EM ENGENHARIA DO VENTO

RESUMO

ESTE ARTIGO APRESENTA AS CARACTERÍSTICAS E PROCEDIMENTOS DA MODELAGEM DE EDIFÍCIOS ALTOS EM TÚNEL DE VENTO. NA PRIMEIRA PARTE, SÃO INDICADOS OS TIPOS DE RESPOSTA DAS EDIFICAÇÕES À AÇÃO DO VENTO ATMOSFÉRICO E ALGUNS EFEITOS QUE DEVEM SER CONSIDERADOS NA MODELAGEM. OS TÚNEIS DE VENTO DE CAMADA LIMITE, EM PARTICULAR O TÚNEL DE VENTO PROF. JOAQUIM BLESSMANN DA UFRGS E O TÚNEL DE VENTO

PROF. JACEK GORECKI DA UNNE, SÃO DESCRITOS E SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS SÃO INDICADAS. A SEGUIR, OS DIFERENTES MODELOS REDUZIDOS UTILIZADOS NOS TESTES ESTÁTICOS E DINÂMICOS EM TÚNEL DE VENTO SÃO AMPLAMENTE CARACTERIZADOS E, PARA ILUSTRAR OS TIPOS DE TESTES, SÃO APRESENTADOS ALGUNS RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NOS REFERIDOS TÚNEIS.

Palavras-chave: edifícios altos, túnel de vento, vibrações, modelo aerelástico.

I. INTRODUÇÃO

A ferramenta de trabalho mais eficiente para propiciar a prevenção e resolução dos problemas devidos ao vento é o Túnel de Vento. Basicamente existem três tipos de túneis: os aerodinâmicos, usados na aeronáutica (“1ª geração”), os de camada limite, para estudos que envolvem o escoamento atmosférico (“2ª geração”) e, finalmente, está tendo início a “3ª geração” de túneis de vento, os túneis tridimensionais, em que diversos tipos de escoamento podem ser simulados (Hangan, 2013; Loredo-Souza, 2013). Os requerimentos gerais de semelhança para reproduzir escoamentos de camada limite atmosférica em túneis de vento podem ser encontrados em Irwin et al (2013) e Loredo-Souza et al (2004). Além dos perfis verticais de velocidades médias do vento, é fundamental entender as características da turbulência

do escoamento, como sua intensidade e macro escala. Os espectros de potência do vento das principais componentes da turbulência do escoamento incidente devem também ser reproduzidos. Os tipos de eventos meteorológicos que causam ventos fortes no Brasil são descritos por Loredo-Souza (2012).

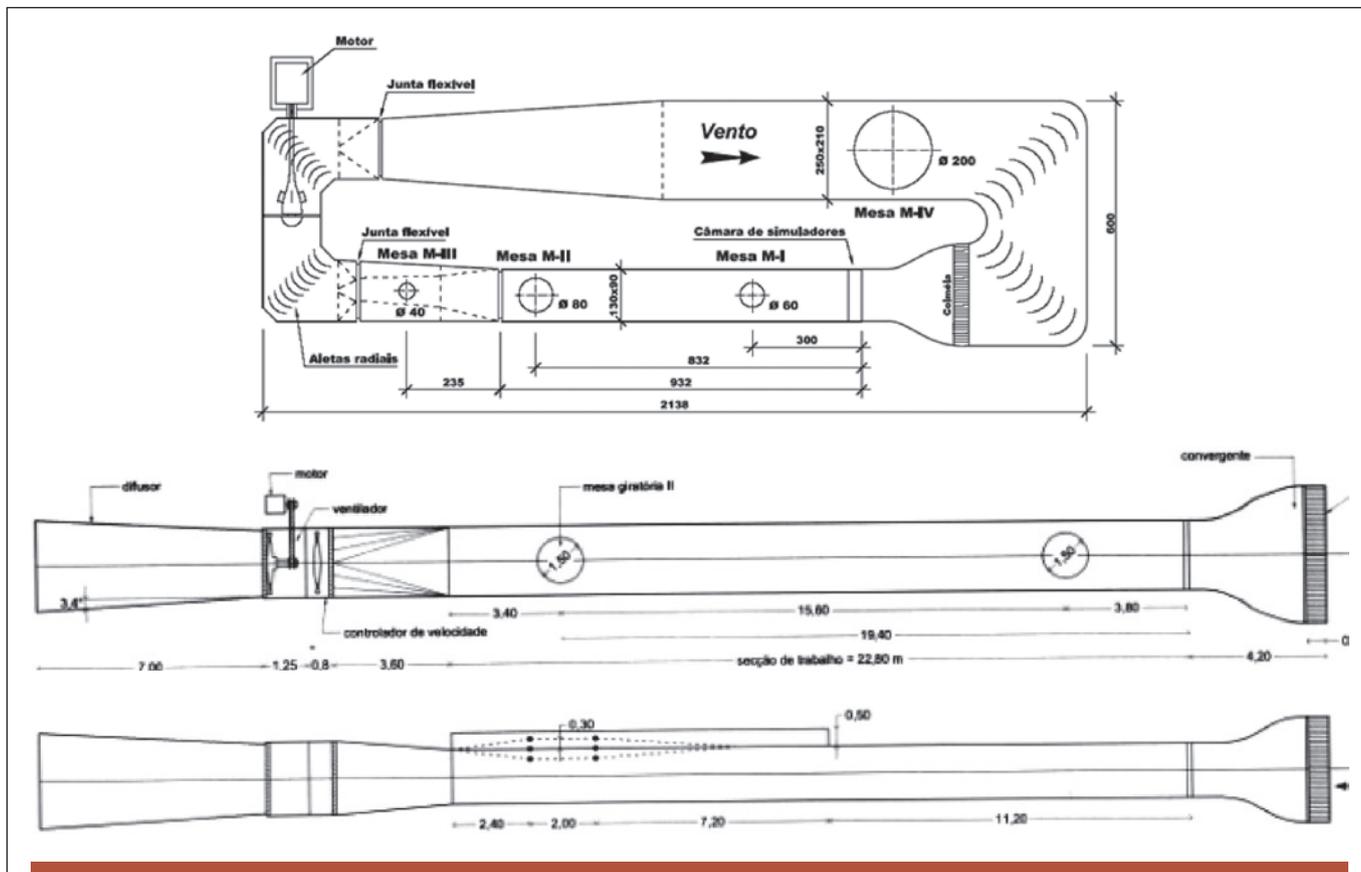
Pioneiro na América Latina, o Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil (Blessmann, 1982), é mostrado na figura 1, a qual também apresenta o Túnel de Vento Prof. Jacek Gorecki, da Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), Resistencia, Argentina (Wittwer e Möller, 2000). Estes são exemplos de túneis de segunda geração e são capazes de gerar ventos que simulam as principais características da camada limite atmosférica, tais como aqueles mostrados na figura 2.

2. AERODINÂMICA DOS EDIFÍCIOS ALTOS

2.1 Padrões de escoamento sobre edifícios altos e resposta à ação do vento

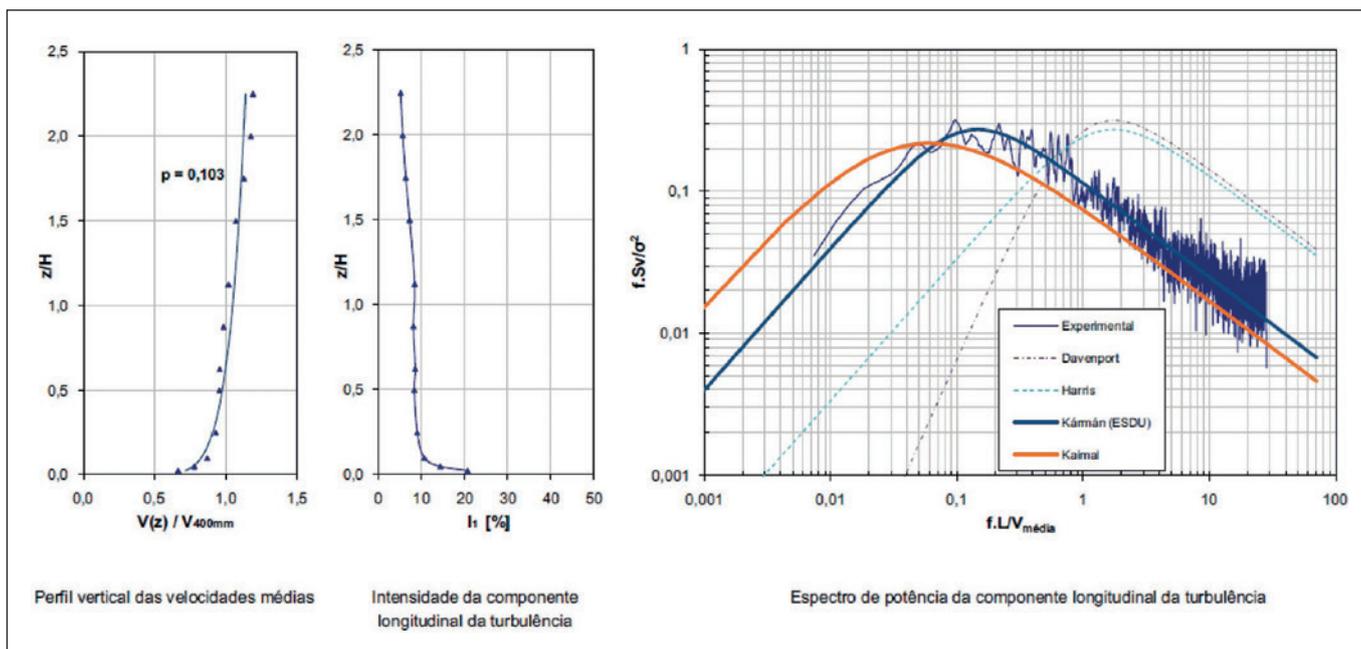
O escoamento incidente sobre edifícios não perturbados por obstáculos vizinhos é desviado tanto em direção ao topo quanto para as laterais, com a separação normalmente ocorrendo nas arestas vivas (figura 3). Além disso, a presença de um gradiente de pressões nos escoamentos turbulentos da camada limite atmosférica influi de forma marcante na indução de um escoamento descendente ao longo da face frontal, abaixo do ponto de estagnação. Este ocorre em uma altura em torno de 70 a 80 por cento da altura total do prédio. O escoamento descendente aumenta a velocidade do vento em torno da base do prédio. Esta é





► **Figura 1**

Túneis de Vento Prof. Joaquim Blessmann da UFRGS e Prof. Jacek Gorecki, da UNNE



► **Figura 2**

Principais características de um vento natural simulado em túnel de vento

uma das principais causas das condições excessivas da velocidade do vento junto ao solo nas proximidades

de prédios altos, o que pode afetar o conforto e segurança de pedestres que circulam em torno do empreen-

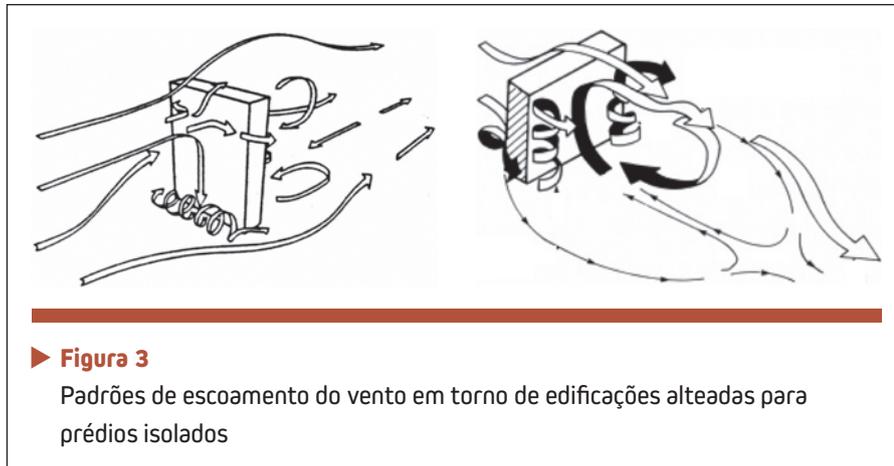
dimento. Na face de sotavento, tem-se a região da esteira, a qual apresenta uma zona de recirculação bem definida, com grande vorticidade.

Do ponto de vista da Engenharia do Vento, é conveniente separar a excitação devida ao vento e o movimento da estrutura em “resposta na direção do vento” e “resposta transversal ao vento”, além da “resposta torsional devida ao vento”

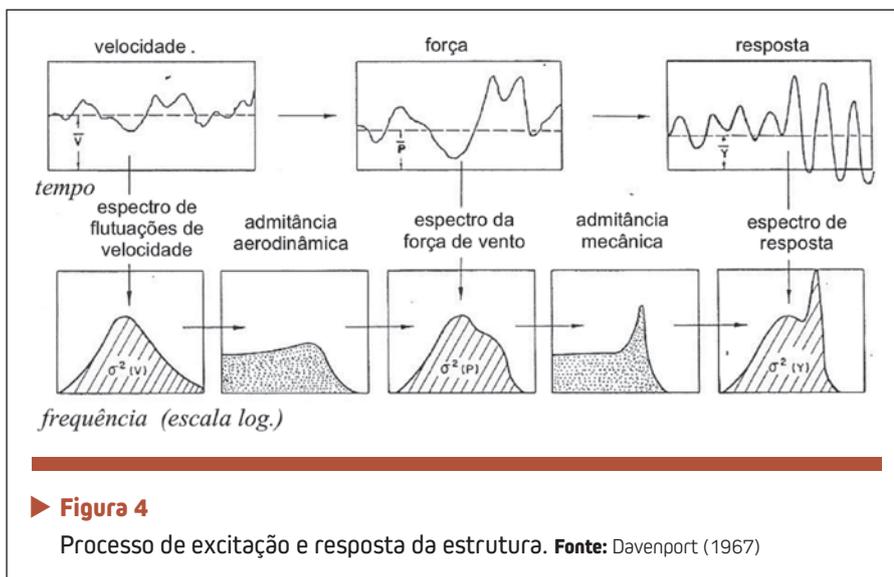
2.1.1 RESPOSTA NA DIREÇÃO DO VENTO

O diagrama exposto na figura 4 ilustra a proposição de Davenport (1967) para o processo de excitação e resposta de uma estrutura quando submetida à ação do vento. Os três gráficos na linha superior apresentam, respectivamente, a velocidade do vento, a força exercida por ele sobre a estrutura, bem como a resposta estrutural frente ao estímulo dado, todos no domínio do tempo. Na linha inferior, os gráficos são apresentados no domínio da frequência, sendo que o primeiro representa o espectro de flutuações da velocidade do vento. Ao se aplicar a função de admitância aerodinâmica, chega-se ao espectro das forças do vento, o qual, quando aplicado à função de admitância mecânica da estrutura, gera o espectro de resposta em termos de deslocamentos ou acelerações, por exemplo.

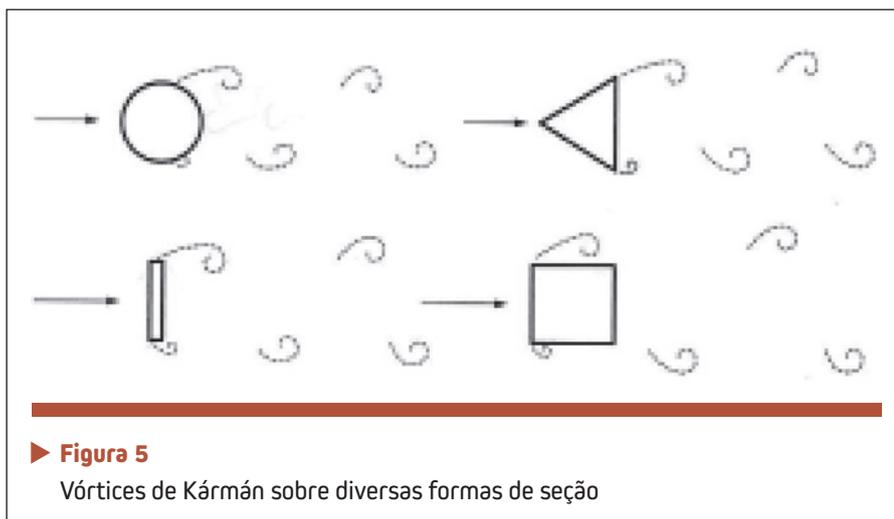
Uma vez simulado o vento natural, o espectro de força pode ser obtido através de um modelo rígido de pressões ou através de balanços de força específicas. A admitância aerodinâmica, a qual expressa a “personalidade aerodinâmica” da edificação, pode ser extraída através



► **Figura 3**
Padrões de escoamento do vento em torno de edificações alteadas para prédios isolados

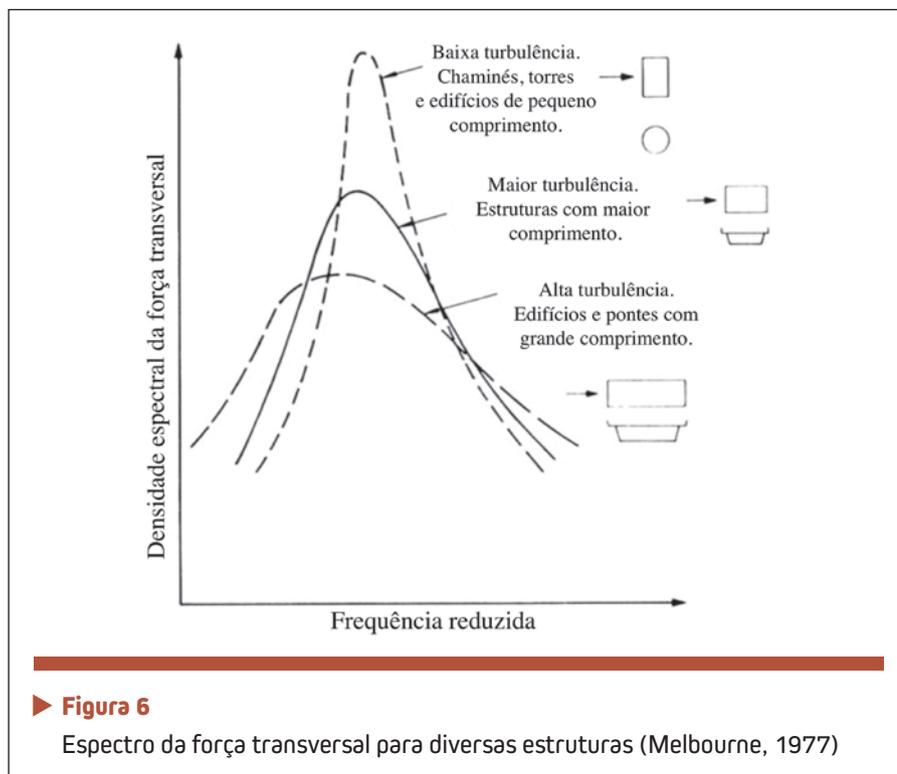


► **Figura 4**
Processo de excitação e resposta da estrutura. Fonte: Davenport (1967)



► **Figura 5**
Vórtices de Kármán sobre diversas formas de seção



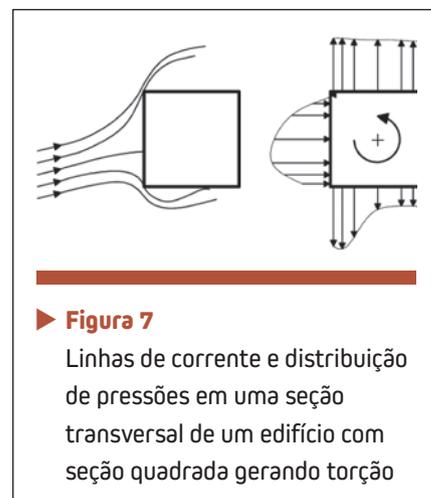


► **Figura 6**
Espectro da força transversal para diversas estruturas (Melbourne, 1977)

da relação entre o espectro de força (ou de pressões) e o espectro de velocidades. O espectro de resposta da estrutura pode ser obtido através do produto do espectro de forças pela admitância mecânica da estrutura, analiticamente, ou diretamente através de modelos aeroelásticos e dispositivos flexíveis com pelo menos três graus de liberdade.

2.1.2 RESPOSTA TRANSVERSAL AO VENTO

Os mecanismos de excitação transversal devido ao vento podem ser divididos em três categorias (Melbourne, 1977) associadas com: (1) nível de turbulência no escoamento incidente; (2) características da esteira, em particular o desprendimento de vórtices, conforme ilustrado na figura 5; (3) o movimento transversal da estrutura. São muitas as variáveis que influenciam a resposta transversal e muitas vezes elas se superpõem.



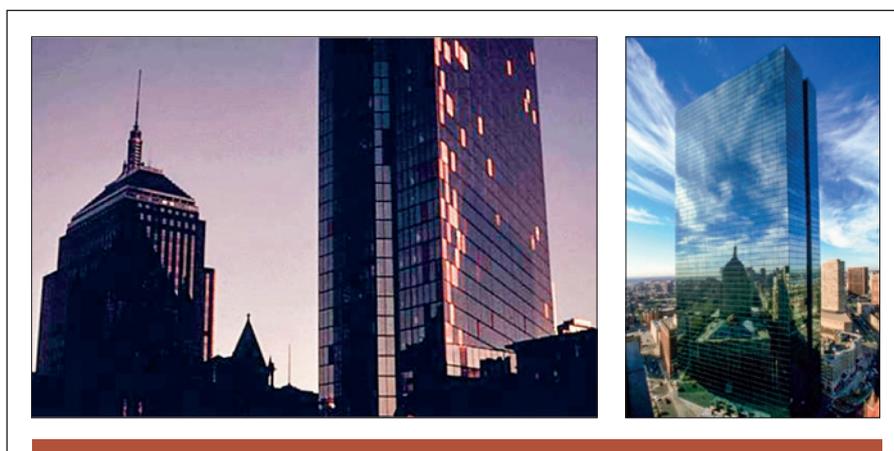
► **Figura 7**
Linhas de corrente e distribuição de pressões em uma seção transversal de um edifício com seção quadrada gerando torção

Partindo de um raciocínio semelhante ao indicado na figura 4, é de interesse para o projeto de edifícios altos o conhecimento do espectro da força transversal devida ao vento. Um resumo geral da distribuição das forças induzidas pela esteira no domínio da frequência é ilustrado na figura 6.

2.1.3 TORÇÃO

Tanto a presença de edificações vizinhas quanto a própria

Apesar dos avanços significativos no conhecimento ocorridos nos últimos anos, ainda não existe um método analítico genérico para o cálculo preciso da resposta transversal dos edifícios altos atuais. Um procedimento recente é proposto em Grala (2020).



► **Figura 8**
Edifício John Hancock, em Boston, EUA. Esquerda: arrancamento de painéis de vidro, logo após a inauguração, devido à ação do vento e baixa rigidez torsional da estrutura. Direita: situação atual, após a troca de todo o revestimento externo

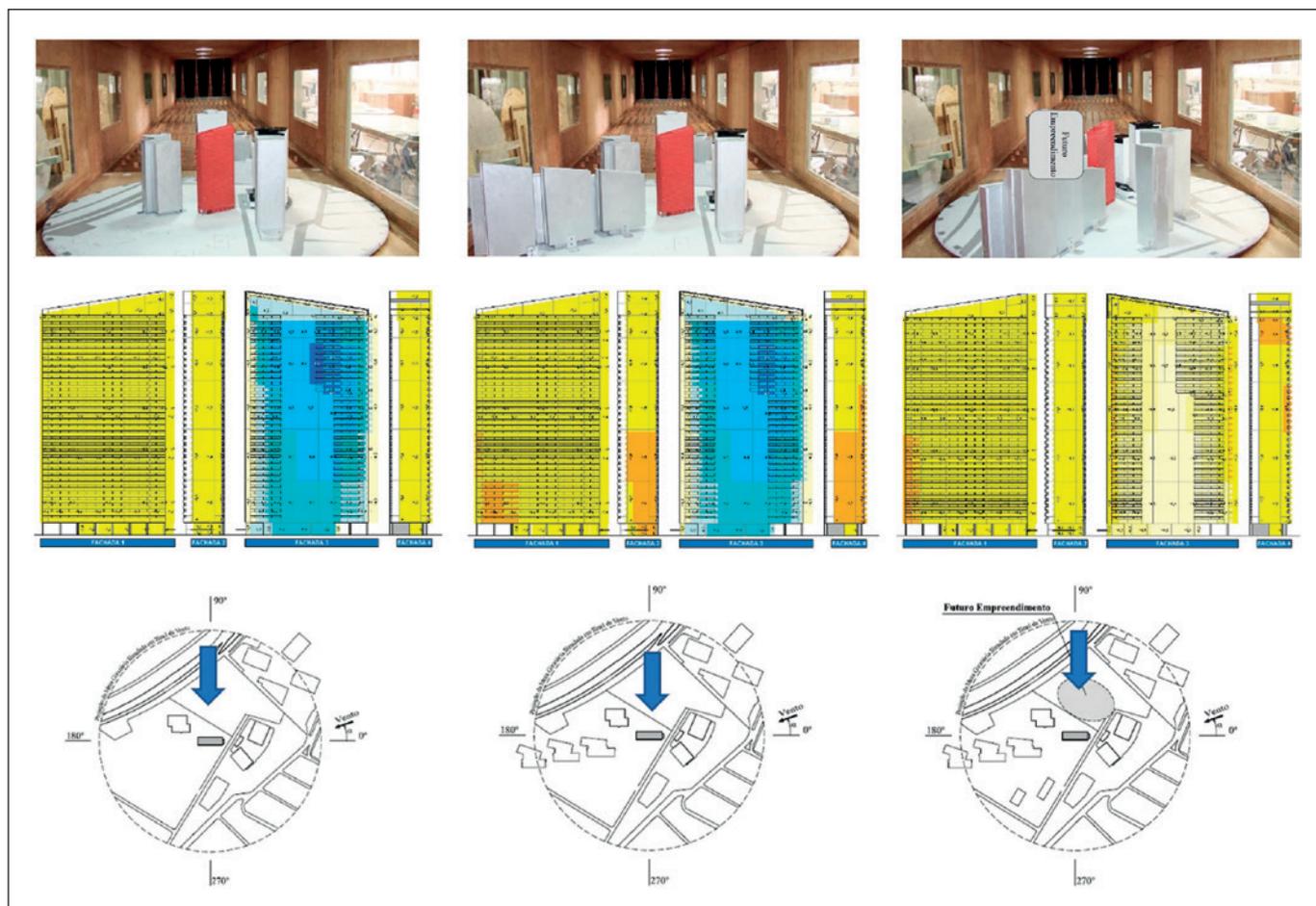
incidência oblíqua do vento podem causar assimetrias na distribuição das pressões sobre as edificações e gerar torção, conforme ilustrado na figura 7. Um dos acidentes mais conhecidos devido a este fenômeno ocorreu em Boston, EUA, em 1973, em que uma grande quantidade de painéis de vidro foi danificada com velocidades em torno de 22 m/s. A consequência foi o reforço de 300 vigas de aço, a colocação de um amortecedor de 600 toneladas

no 58º andar e a substituição dos 10.334 painéis de vidro (figura 8).

2.2 Efeitos de vizinhança

A presença de edificações vizinhas pode alterar completamente o padrão de escoamento ilustrado na figura 3. Um claro exemplo é a distribuição das pressões externas nas faces da Torre C2 do empreendimento Parque da Cidade, em São Paulo (SP), mostrado na figura 9 em sua

ordem construtiva inicialmente planejada, da esquerda para a direita. A linha superior mostra fotografias dos modelos reduzidos no interior do túnel de vento, a linha intermediária apresenta os diagramas com as distribuições das pressões externas nas faces da edificação (azul = sobrepressão; amarelo e laranja = sucção) e a linha inferior apresenta uma vista em planta com a posição do empreendimento e seus vizinhos imediatos. A seta azul indica a incidência do vento



► **Figura 9**

Efeitos das edificações vizinhas nas pressões devidas ao vento para a Torre C2 do empreendimento Parque da Cidade, em São Paulo, SP. Da esquerda para a direita, é indicada a ordem construtiva planejada para o empreendimento. Linha superior mostra fotografias dos modelos reduzidos no túnel de vento, linha intermediária, os diagramas com as distribuições das pressões externas, e a linha inferior, uma vista em planta com a posição do empreendimento e seus vizinhos imediatos. Projeto estrutural: França e Associados





para os casos apresentados. O mecanismo aerodinâmico é extremamente interessante: na primeira etapa construtiva, a distribuição das pressões externas foi muito próxima àquela de um modelo isolado, pois a interferência das edificações vizinhas era pequena. Na segunda fase construtiva, em que são construídos três prédios correspondentes à Gleba B, é nítido o aumento das sucções laterais devido à aceleração do escoamento através do espaço agora reduzido entre os

prédios (efeito Venturi). E finalmente, na configuração final, em que outro empreendimento é construído entre o prédio estudado e o vento incidente, a esteira do prédio vizinho altera completamente a distribuição das pressões externas na face de barlavento da Torre C2, diminuindo significativamente a força global para o ângulo de incidência do vento exemplificado. Ou seja, neste caso específico, o carregamento mais nocivo ocorreu para uma configuração construtiva intermedi-

ária, sendo a configuração final bem mais econômica.

Uma outra consequência do efeito Venturi, e o consequente aumento das sucções localizadas em áreas específicas das fachadas, é o possível arrancamento de elementos de vedação, conforme ilustrado na figura 10. Nesta, a figura superior esquerda apresenta uma representação esquemática do efeito Venturi gerado pela aceleração do escoamento através de prédios vizinhos. Em suas faces confrontantes, as



► **Figura 11**

Exemplo de modelo rígido testado no Túnel de Vento da UFRGS: Ed. Infinity Tower, em São Paulo. Projeto estrutural: Aluizio D´Avila

sucções são aumentadas (teorema de Bernoulli), podendo causar o arrancamento de painéis de revestimento, caso não sejam corretamente dimensionados. A figura inferior direita mostra um prédio que teve uma considerável quantidade de seus painéis de granito arrancados pelo vento. Junto à fotografia da falha, são mostrados os diagramas com as pressões externas devidas ao vento para a incidência que causou o sinistro, obtidas em ensaios em túnel de vento. O padrão de falha segue exatamente aquele indicado pelo estudo em túnel de vento, cujos modelos são mostrados na figura superior direita. Os ensaios em túnel de vento realizados no LAC-UFRGS identificaram claramente as zonas de maior sucção externa (amarelo e laranja) e seus respectivos valores, permitindo esclarecer as razões dos arrancamentos.

3. TIPOS DE MODELOS REDUZIDOS DE EDIFÍCIOS ALTOS

3.1 Modelos rígidos com tomadas de pressão

Este tipo de modelo é uma repro-

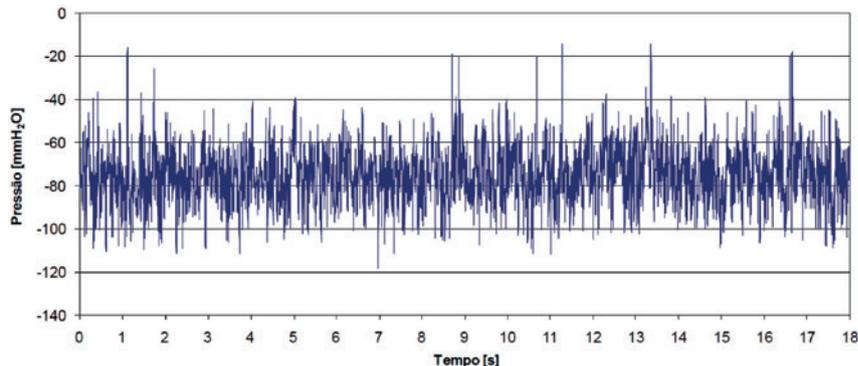
dução aerodinâmica da edificação real, conforme leis de semelhança, em uma escala convenientemente escolhida conforme as características do vento simulado. A figura 11 mostra o exemplo de um empreendimento estudado no LAC / UFRGS utilizando esta técnica. As forças aerodinâmicas são determinadas através da integração das pressões sobre a superfície exposta, medidas em “pontos” (termo utilizado aqui no sentido de uma área muito pequena) criteriosamente escolhidos. É o tipo de modelo mais utilizado por sua capacidade de fornecer

carregamentos estáticos e dinâmicos para o projeto de grande parte dos edifícios altos usualmente construídos. Este tipo de modelo é adequado quando a resposta estrutural não altera de forma relevante o escoamento em torno da estrutura (baixa interação fluido-estrutura).

O modelo tipo rígido é confeccionado de forma a reproduzir apenas os aspectos arquitetônicos relevantes da estrutura e do escoamento, e serve para determinação de pressões instantâneas ao longo do tempo (conforme ilustrado na figura 12). São medidas as pressões flutuantes na superfície externa do modelo reduzido da edificação, o qual é instrumentado com tomadas de pressão, sendo os ensaios realizados com vento incidindo entre 0° e 360°, com medidas a cada 10° ou 15°.

3.1.1 AÇÃO ESTÁTICA DO VENTO

Para este tipo de estudo, os relatórios com os resultados do ensaio usualmente incluem: (a) coeficientes de pressão externa médios,

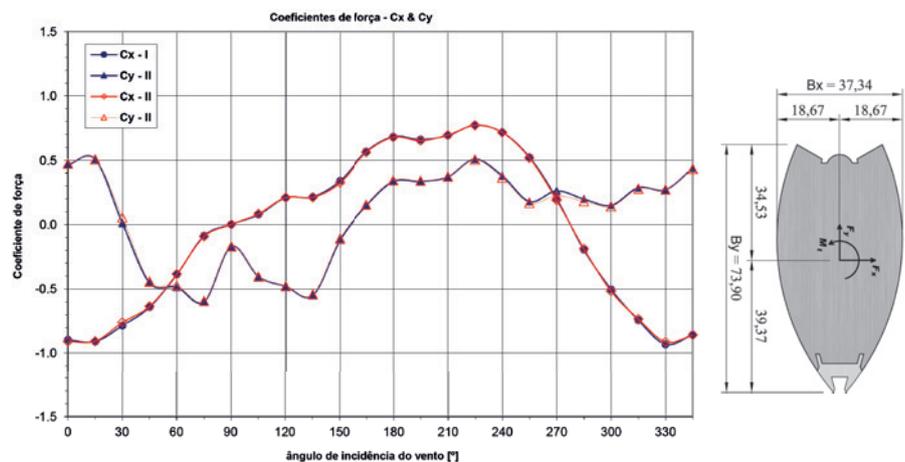


► **Figura 12**

Registro da variação das pressões ao longo do tempo obtido em uma tomada de pressão do modelo mostrado na figura 11



	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



► **Figura 13**

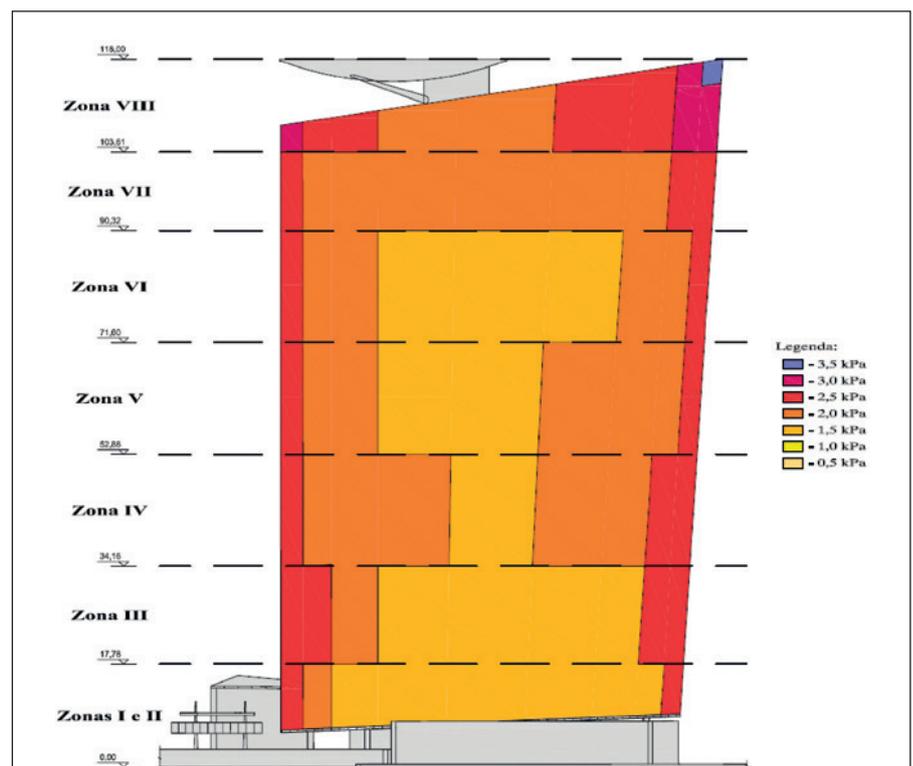
Varição dos coeficientes de força globais, em função do ângulo de incidência do vento, para o empreendimento apresentado na figura 11

máximos, mínimos, e valor rms (*root mean square*) para estudo de ações locais; (b) coeficientes de força, de momento fletor e de torção para determinação das solicitações globais (conforme ilustrado na figura 13); (c) valores de força, de momento fletor e de torção para determinação das solicitações globais, para velocidade de projeto a ser especificada pelo projetista; (d) coeficientes de força parciais, por pavimento, para duas direções ortogonais em relação à planta baixa de cada pavimento, para os ângulos de incidência do vento de ensaio; (e) valores das forças parciais, por pavimento, para duas direções ortogonais em relação à planta baixa de cada pavimento, para velocidade de projeto a ser especificada pelo projetista; (f) momentos de torção individuais por pavimento, para velocidade de projeto a ser especificada pelo projetista; (g) diagramas de blocos indicando as sucções (figura 14) e sobrepressões externas máximas para projeto dos elementos de revestimento.

As informações geradas nessa etapa dos estudos subsidiam o dimensionamento

estrutural preliminar, a partir do qual o projetista pode obter formas modais e frequências de vibração livre. Essas informações, juntamente com a

distribuição de massas (peso próprio e carga permanente), devem ser disponibilizadas para o estudo da resposta dinâmica descrito na seção seguinte.



► **Figura 14**

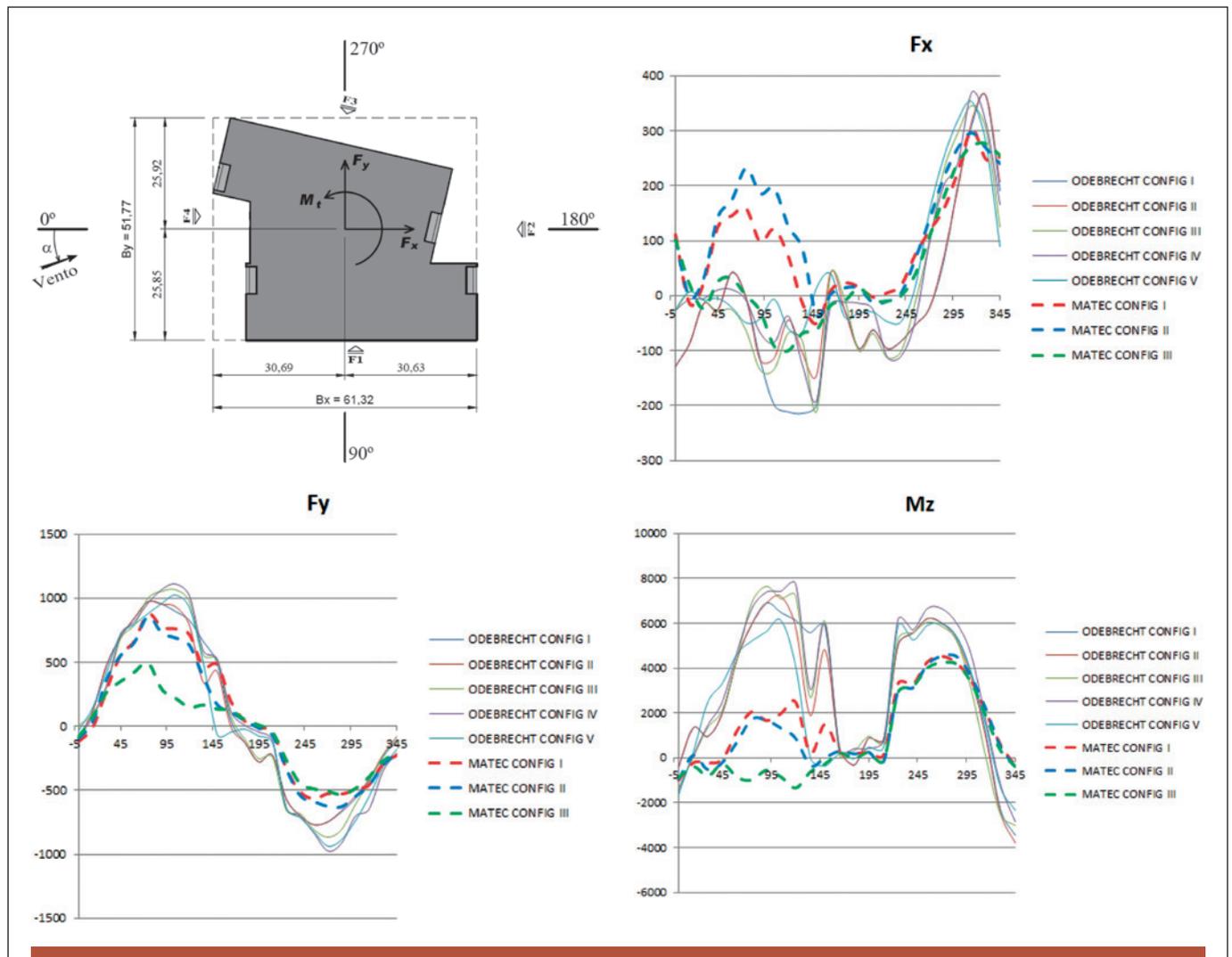
Exemplo de diagrama de blocos indicando as sucções externas máximas para um período de retorno de 50 anos, para o projeto dos elementos de revestimento do empreendimento apresentado na figura 11

Um interessante estudo que mostra a diferença causada pelos prédios vizinhos e por pequenas alterações no formato da edificação é apresentado nas figuras 15 e 16, as quais ilustram o caso de um grupo de três prédios que constituem a Gleba B do empreendimento Parque da Cidade, em São Paulo (SP), já introduzido na figura 9. O projeto estrutural é da Pasqua & Graziano Associados.

3.1.2 AÇÃO DINÂMICA DO VENTO

Além do efeito aerodinâmico decorrente das médias temporais das pressões aerodinâmicas atuantes, que é considerado através de forças estáticas a serem aplicadas no modelo de cálculo da estrutura, deve-se também considerar o efeito decorrente das flutuações das pressões no tempo. Estas flutuações de pressão são decorrentes principalmente

da turbulência atmosférica natural e da interação ar-estrutura, a qual condiciona o escoamento, causando o desprendimento de vórtices e outros fenômenos. Dois tipos de efeitos são gerados pela flutuação de pressões: (1) ocorrem picos de pressão, não necessariamente de forma simultânea sobre toda a superfície da estrutura, e conseqüentemente, às forças aerodinâmicas médias deve-se somar uma parcela adicional que



► **Figura 15**

Varição das Forças nas direções X e Y e Momentos de Torção em função do ângulo de incidência do vento para diferentes configurações de vizinhança e duas versões arquitetônicas semelhantes para o empreendimento Matec – Parque da Cidade – Torre B2. Projeto estrutural: Pasqua & Graziano Associados



represente de forma adequada a intensidade e a correlação desses picos, e (2) ocorrem ressonâncias (amplificações) na parcela da resposta estrutural que varia no tempo (resposta dinâmica), conforme o conteúdo de frequência das flutuações de pressão em relação às frequências naturais de vibração livre da estrutura.

Segundo a ABNT NBR 6123, estruturas sujeitas à ação do vento e que apresentem frequência fundamental de vibração livre inferior a 1 Hz devem ser verificadas quanto à amplificação dinâmica decorrente de ressonâncias. Portanto, para que a norma brasileira seja respeitada, a estrutura em questão deveria ser necessariamente analisada quanto à possibilidade de respostas ressonantes, efeito tipo (2). O embasamento desta especificação é que o espectro de potência da turbulência atmosférica tem energia suficiente para excitar uma estrutura até aproximadamente 1 Hz.

Caso se verifique que a possibilidade de resposta ressonante é desprezável, por ser a estrutura suficientemente rígida, basta que se considere o efeito estático dos picos de pressão, observando-se a sua estrutura de correlação, efeito tipo (1). Para a análise de ambos os tipos de efeito, é necessária a medição de pressões na forma de séries temporais, com uma resolução no tempo (taxa de amostragem) criteriosamente selecionada. A disposição das tomadas de pressão é feita de forma a permitir uma integração precisa do campo de pressões, gerando-se assim séries temporais para as forças resultantes, conforme uma definição conveniente de zonas (superfícies) de influência.

Como é realizada uma medição simultânea de pressões sobre as superfícies consideradas, a integração que gera as forças resultantes considera implicitamente a estrutura de correlação das pressões. As resultantes assim obtidas podem en-

tão ser utilizadas na avaliação dos efeitos tipos (1) e (2) mencionados anteriormente.

Para a análise dos efeitos dinâmicos das flutuações de pressão, é necessária a elaboração de um modelo computacional que permita a



► **Figura 16**

Modelos reduzidos do empreendimento Matec – Parque da Cidade no interior do túnel de vento do LAC – UFRGS. São mostradas três das configurações de vizinhança que constituíram o extenso estudo realizado em túnel de vento. Projeto estrutural: Pasqua & Graziano Associados



► **Figura 17**

Estudo, para fins comparativos, de um modelo de um edifício de grande altura construído em Balneário Camboriú (SC), nos túneis de vento do LAC-UFRGS, Brasil, e do LAC-UNNE, Argentina

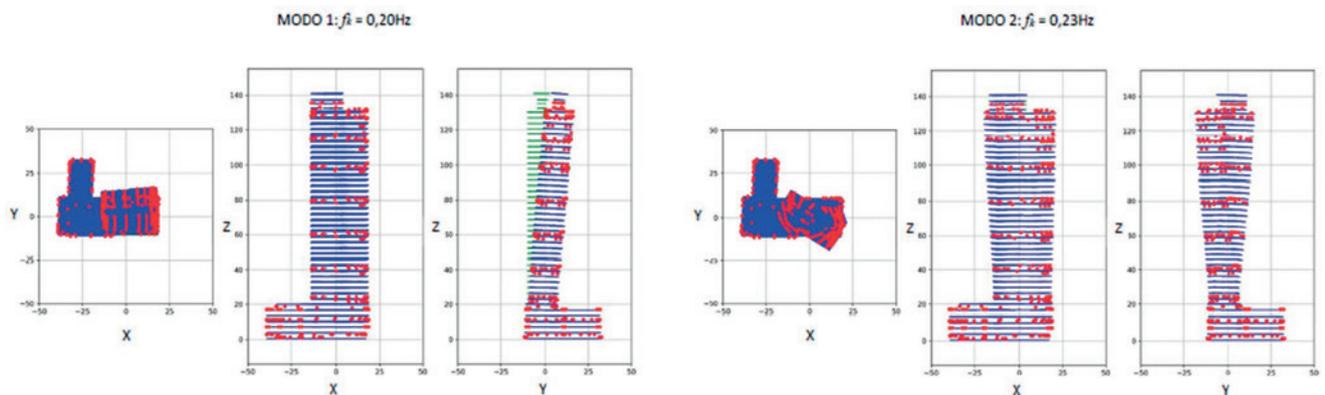
simulação do comportamento dinâmico da estrutura. Inicialmente, deve-se verificar as frequências fundamentais da estrutura, comparando-se o resultado com o valor de referência de 1 Hz, sugerido pela ABNT NBR 6123. Caso alguma das frequências fundamentais esteja abaixo desse valor, é recomendado pela norma que se verifique a resposta ressonante, ou seja, que as forças devidas ao vento sejam aplicadas dinamicamente. Nesse sentido, vários métodos podem ser utilizados, como, por exemplo, a

integração das equações de equilíbrio dinâmico com forças flutuantes no tempo, ou o método de superposição modal, a partir de séries temporais obtidas nos ensaios em túnel de vento.

Deve-se observar que, no caso de uma análise dinâmica ser realizada, a quantidade de dados a serem processados é expressivamente superior à de uma análise estática. Os métodos de análise usualmente utilizados são o HFPI (*High Frequency Pressure Integration Method*), com base nos resultados de modelos rígidos para

medição de pressões e a modelagem aeroelástica direta (descrita no item 3.2). A Figura 17 mostra o modelo de um edifício de grande altura construído em Balneário Camboriú (SC), no túnel de vento do LAC-UFRGS, analisado pela Vento-S utilizando o método HFPI, o qual foi também testado na UNNE, Argentina, para fins comparativos.

O método HFPI combina pressões dinâmicas, medidas experimentalmente em túnel de vento, com um modelo dinâmico teórico-numérico da estrutura, permitindo uma estimativa das amplitudes de deslocamentos, velocidades e acelerações que ocorrerão em resposta à ação do vento sobre a estrutura. O método compreende, portanto, as possíveis amplificações dinâmicas decorrentes de efeitos ressonantes, associados tanto à turbulência atmosférica quanto ao despreendimento de vórtices, que podem produzir na estrutura esforços maiores do que aqueles estimados em uma análise estática convencional.



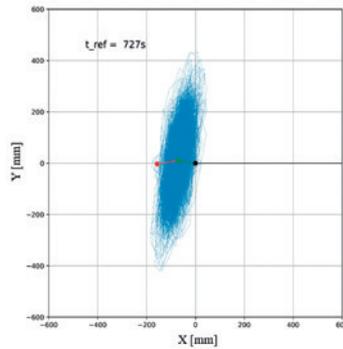
► **Figura 18**

Exemplo de formas modais de um estudo realizado pela Vento-S para um prédio alto que será construído em Itapema, SC. Projeto estrutural: BM Integrado Projeto Total

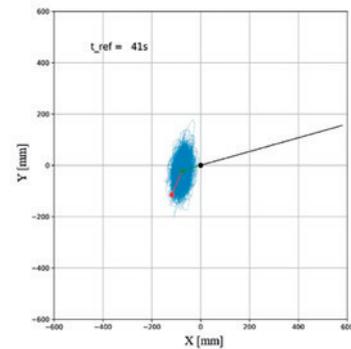




Trajetória horizontal do nó estrutural 6.207, coordenadas [+15,760+6,110+130,190]m, para $m = 50$ anos, $\zeta = 2\%$ e $\alpha = 180^\circ$.



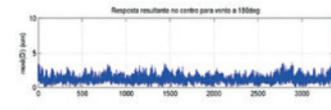
Trajetória horizontal do nó estrutural 6.207, coordenadas [+15,760+6,110+130,190]m, para $m = 50$ anos, $\zeta = 2\%$ e $\alpha = 195^\circ$.



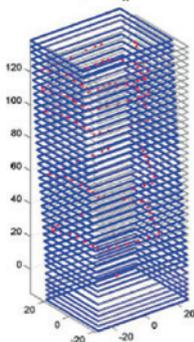
► **Figura 19**

Deslocamentos no topo de um prédio alto que será construído em Itapema, SC, utilizando o método HFPI, para dois ângulos de incidências do vento. Projeto estrutural: BM Integrado Projeto Total

Ação Dinâmica do Vento sobre as Torres A e B do Empreendimento W Torre Morumbi - São Paulo, SP



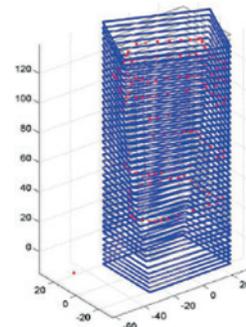
Modal shape 1 : $f_k = 0.27213\text{Hz}$



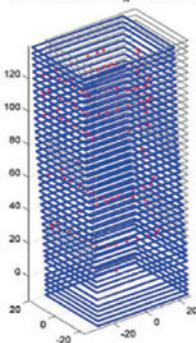
Respostas (deslocamentos)

- (1) mean + peak1 + peak2 + peak 3
- (2) mean + peak1 + peak2 - peak 3
- (3) mean + peak1 - peak2 + peak 3
- (4) mean + peak1 - peak2 - peak 3
- (5) mean - peak1 + peak2 + peak 3
- (6) mean - peak1 + peak2 - peak 3
- (7) mean - peak1 - peak2 + peak 3
- (8) mean - peak1 - peak2 - peak 3

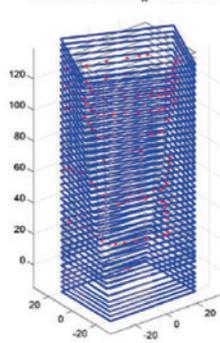
Modal shape 3 : $f_k = 0.55837\text{Hz}$



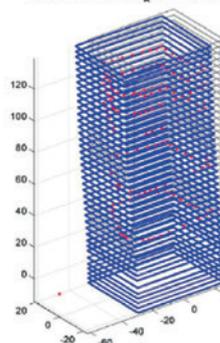
Modal shape 2 : $f_k = 0.33434\text{Hz}$



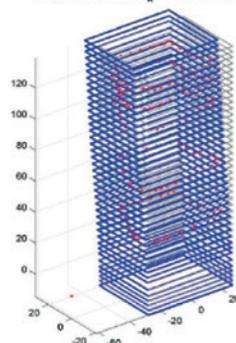
Modal shape 3 : $f_k = 0.55837\text{Hz}$



Modal shape 2 : $f_k = 0.33434\text{Hz}$



Modal shape 1 : $f_k = 0.27213\text{Hz}$



► **Figura 20**

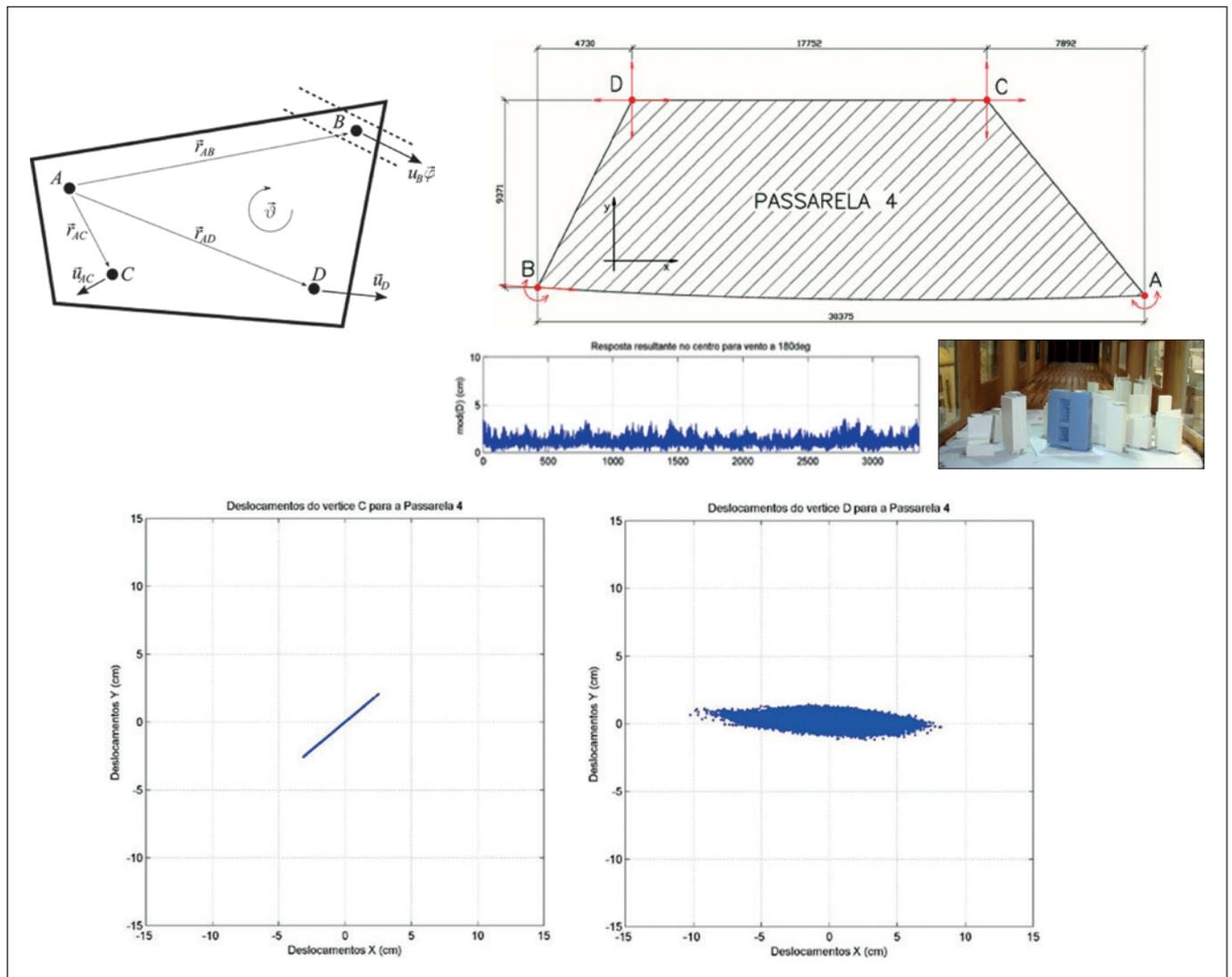
Formas modais simplificadas por pavimento das Torres A (modos 1 a 3 na figura da esquerda) e B (modos 1 a 3 na figura da direita), que compõe o empreendimento W Torre Morumbi, em São Paulo (SP), e as possibilidades de combinações de suas respostas modais de pico consideradas no estudo. Fonte: Rocha et al. (2012)

A validade dos resultados do HFPI depende, contudo, da possibilidade de ser desprezada a interação fluido-estrutura, que pode produzir efeitos de instabilidade ou de segunda ordem na resposta estrutural. Em termos gerais, pode-se considerar como válidos os resultados do HFPI quando as deformações da estrutura não implicarem em alterações significativas na forma do escoamento do ar em seu entorno. Esta hipótese é

geralmente válida para estruturas de prédios, mas não pode ser adotada, por exemplo, para tabuleiros de pontes suspensas ou estaiadas propensos a drapejamento (*flutter*). Nos casos em que a interação fluido-estrutura é relevante, faz-se indispensável a utilização de modelos reduzidos aeroelásticos.

Para aplicação do HFPI, além de todas as informações necessárias para um estudo convencional

de pressões aerodinâmicas, que compreendem a geometria externa da edificação e as características topográficas e de rugosidade superficial de seu entorno, são também necessárias as formas e frequências naturais de vibração livre para todos os modos de vibração relevantes. Exemplo de um estudo realizado no LAC, pela Vento-S, para um prédio alto que será construído em Itapema (SC), é mostrado



► **Figura 21**

Gráficos mostrando os deslocamentos estimados no plano horizontal para os apoios C e D da Passarela 4 do empreendimento WTorre Morumbi, estimados a partir de ensaios em túnel de vento. **Fonte:** Rocha et al. (2012)





► **Figura 22**

Fotografias mostrando as passarelas instaladas entre as Torres A e B do empreendimento W Torre Morumbi, São Paulo, SP

nas figuras 18 e 19. Os resultados da análise por HFPI para acelerações pode ser utilizado para estimativas da condição de conforto humano, sendo um requisito essencial para a verificação das condições de habitabilidade ou uso em serviço dessas edificações.

3.1.3 ESTUDOS ESPECIAIS

Um estudo inovador utilizando HFPI foi realizado para o empreendimento W Torre Morumbi, mostrado nas figuras 20 a 22 (Rocha et al, 2012). Este empreendimento consiste em duas torres conectadas por um conjunto de passarelas metálicas, que, por questões estruturais não podem impedir o deslocamento relativo das torres e devem, portanto, ser articuladas. Através do registro simultâneos das pressões dinâmicas nas duas torres e do uso da técnica HFPI, foi possível calcular as amplitudes e as trajetórias dos deslocamentos relativos, que foram então usados para o projeto das articulações de apoio.

Como foram considerados os três primeiros modos de vibração (sendo que o primeiro modo é dominado pela translação na direção y, o segundo pela translação na direção x, e o terceiro pela rotação em torno de z), conforme ilustrado na figura 20, tem-se um total de $2^3 = 8$ combinações de sinal. Estas combinações são calculadas para cada direção de incidência do vento (32 no caso do W Torre), perfazendo um total de 256 casos de carga. A figura

21 apresenta os gráficos de deslocamentos (no plano horizontal xy) para os vértices sobre os apoios C e D da Passarela 4.

3.2 Modelagem aeroelástica

A modelagem aeroelástica de estruturas é apropriada para simular propriedades dinâmicas dos modos de vibração que contribuem significativamente para a resposta induzida pelo vento em edifícios altos, nos



► **Figura 23**

Edifício Manhattan Tower, Rio de Janeiro, RJ: estrutura real (esquerda), modelo rígido de pressões (centro) e modelo aeroelástico tipo réplica (direita)

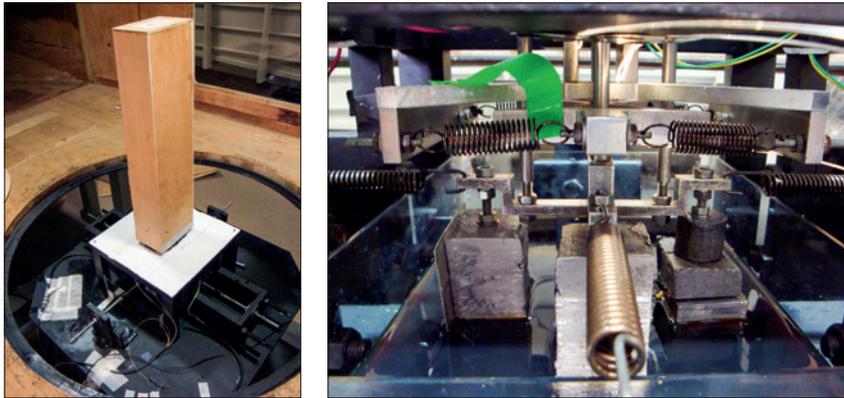
quais a interação ar-estrutura seja relevante ou para os quais se deseje conhecer diretamente as forças glo-

bais ou amplitudes de aceleração, sem a necessidade de medições de pressões. Nesta técnica, além de si-

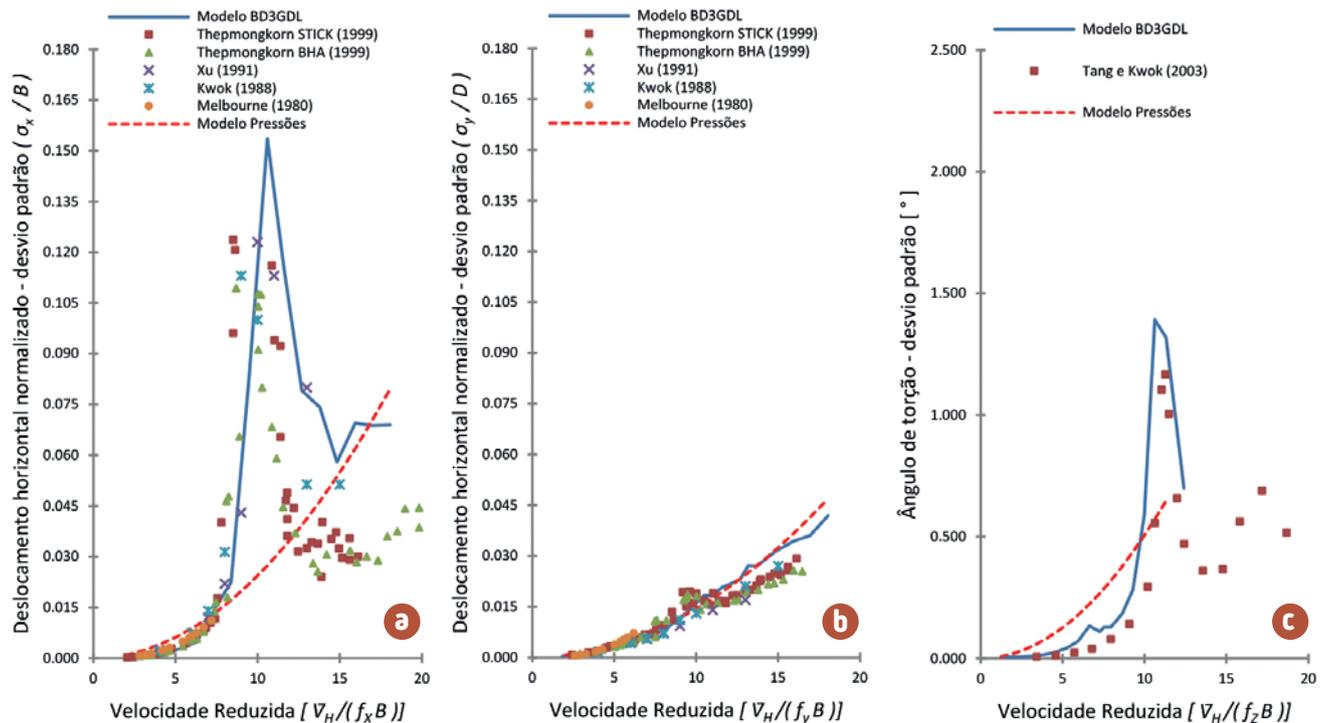
mular o escoamento natural do vento e a geometria externa da edificação, é necessário reproduzir as propriedades de rigidez, inércia e amortecimento da estrutura.

Os modelos aeroelásticos utilizados nos estudos de edifícios altos podem ser divididos em dois grupos: réplicas e modelos equivalentes.

As réplicas são modelos que reproduzem em escala todas as dimensões e formas geométricas, bem como as propriedades dos materiais, resultando na completa reprodução em escala das características dinâmicas do protótipo (estrutura real). Esse tipo de modelagem é mais recomendado para estruturas que têm suas propriedades elásticas concentradas ao longo da



► **Figura 24**
Dispositivo flexível de 3 graus de liberdade para ensaios aeroelásticos de modelos de edifícios altos. **Fonte:** Oliveira (2009)



► **Figura 25**
Respostas em função da velocidade reduzida do CAARC Building, com dispositivo de 3 graus de liberdade (Oliveira, 2009), comparadas com resultados de outros pesquisadores: (a) desvio padrão do deslocamento transversal normalizado; (b) desvio padrão do deslocamento longitudinal normalizado; (c) desvio padrão do ângulo de torção



geometria exterior, como é o caso de estruturas tubulares, chaminés e torres de comunicação. Esta técnica de modelagem permite conseguir a melhor simulação do protótipo, porém é também a mais trabalhosa e a mais custosa. Na Figura 23 (à direita), é mostrado um modelo do tipo réplica do edifício Manhattan Tower, Rio de Janeiro (RJ), construído no LAC/UFRGS.

Os chamados modelos equivalentes utilizam alguma analogia mecânica para reproduzir as características dinâmicas do protótipo. Geralmente, estes modelos são construídos com uma carcaça rígida que representa a geometria exterior do protótipo em escala, garantindo a correta representação das forças aerodinâmicas, e de um sistema mecânico interno

que simula as características de rigidez e amortecimento. A Figura 24 mostra um modelo equivalente de edifício alto, com 3 graus de liberdade em um dispositivo projetado e construído por Oliveira (2009). As respostas obtidas são apresentadas na figura 25, sendo os resultados comparados com os de outros pesquisadores.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem aerodinâmica de edifícios altos através de ensaios em túnel de vento é a técnica mais eficaz na determinação de seu comportamento frente à ação do vento, desde que realizada com o necessário conhecimento. O túnel de vento é uma ferramenta versátil e poderosa no auxílio do projeto estrutu-

ral e mitigação dos efeitos nocivos causados pelo vento. Neste artigo, foram analisados os diferentes tipos de modelos reduzidos de edifícios altos que são usados em túneis de vento para avaliar os efeitos estáticos e dinâmicos devidos ao vento atmosférico. São apresentados alguns resultados obtidos nos túneis de vento da camada limite da UFRGS e UNNE, bem como métodos de análise para a aplicação desses resultados na estrutura real. Estudos especiais baseados no método HFPI e na modelagem aerolástica podem ser aplicados na mitigação e controle de vibrações induzidas pelo vento nas estruturas cada vez mais esbeltas e arquitetonicamente arrojadas que estão sendo construídas atualmente. 

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988). ABNT NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro.
- [2] Blessmann, J. (1982) The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS; *J. Wind Eng. Ind. Aerodynamics*, 10, 231-248.
- [3] Davenport, A. G. (1967) Gust loading factors. *Journal of the Structural Division*, New York, v. 93, n. 1, p. 11-34, 1967.
- [4] Grala, P. (2020) Resposta de estruturas paralelepípedicas esbeltas frente ao fenômeno de desprendimento de vórtices: proposta para a ABNT NBR 6123. Tese de Doutorado. PPGEC - UFRGS.
- [5] Hangan, H. (2013) The WindEEE Research Institute and the WindEEE Dome. In: *WindEEE Scientific Symposium*. Western University, London, Canadá. 16-17 de Outubro, 2013.
- [6] Irwin, P., Denoon, R., Scott, D. (2013) *Wind Tunnel Testing of High-Rise Buildings: An output of the CBTUH Wind Engineering Working Group*. Council on Tall Buildings and Urban Habitat: Chicago.
- [7] Loredou-Souza, A. M. (2012) Meteorological events causing extreme winds in Brazil. *Wind and Structures*, v. 15, p. 177-188
- [8] Loredou-Souza, A. M. (2013) Thunderstorm Winds and Complex Terrains: Challenges for the Brazilian Engineering and the Innovative Potential of WindEEE. In: *WindEEE Scientific Symposium*. Western University, London, Canadá. 16-17 de Outubro.
- [9] Loredou-Souza, A. M., Rocha, M. M., Oliveira, M. G. K. (2018) Determinação experimental, em túnel de vento, do comportamento aerodinâmico do Empreendimento Matec – Parque da Cidade – Gleba B, São Paulo, SP. Relatório técnico. Vento-S Consultoria em Eng. do Vento e LAC – UFRGS. Setembro
- [10] Loredou-Souza, A.M.; Schettini, E.B.C., Paluch, M.J. (2004) Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento. *Turbulência*, Sérgio V. Möller e Jorge H. Silvestrini Editores, vol. 4, p. 137-163.
- [10] Melbourne, W. H. (1977) Cross-wind response of structures to wind actions. In: *ICWE 4, 1975, Heathrow. Proceedings*. Cambridge University Press. p. 343-358.
- [12] Oliveira, M. G. K. (2009) Desenvolvimento de uma balança dinâmica de três graus de liberdade para estudo dos efeitos de flexo-torção em edifícios altos submetidos à ação do vento. Tese de Doutorado. PPGEC - UFRGS.
- [13] Rocha, M. M., Loredou-Souza, A. M., Oliveira, M. G. K. (2012) Análise cinemática das passarelas do empreendimento W Torre Morumbi, São Paulo, SP, frente ao movimento relativo das Torres A e B causado pela ação dinâmica do vento. Relatório técnico. Vento-S Consultoria em Eng. do Vento e LAC – UFRGS. Setembro.
- [14] Wittwer, A.R.; Möller, S.V. (2000) Characteristics of the low speed wind tunnel of the UNNE. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 84, p. 307-320.