

AÇÃO ESTÁTICA DO VENTO SOBRE O EDIFÍCIO E_TOWER – SÃO PAULO

Acir Mércio Loredou-Souza (1); Ricardo Leopoldo e Silva França (2);
Joaquim Blessmann (1); Gustavo Javier Zani Núñez (3); Mário José Paluch (4)

(1) Professor, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia,
Universidade Federal do Rio grande do Sul
email: lac@cpgec.ufrgs.br
Av. Osvaldo Aranha, 99, 3º andar, Porto Alegre, RS

(2) Diretor, França & Associados Engenharia Ltda, São Paulo, SP, Brasil
email: ricardo@francaeassociados.com.br

(3) Doutorando, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
email: javier@vortex.ufrgs.br

(4) Professor, Universidade de Passo Fundo
email: corrient@upf.tche.br

Resumo

Este trabalho apresenta os resultados do estudo, em modelo reduzido, da ação estática do vento sobre o edifício e_Tower, atualmente em construção em São Paulo, SP. Trata-se de um prédio de 148m de altura, para o qual não há disponibilidade de informações em normas de vento.

Os ensaios foram realizados no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O trabalho apresenta uma comparação entre os resultados obtidos no ensaio em túnel de vento e os obtidos a partir de um modelo teórico aproximado, passível de enquadramento na NBR 6123 - Forças devidas ao vento em edificações, e na NBC - Norma Canadense. Os resultados apresentados incluem valores da força total na direção do vento, os correspondentes momentos fletores na base do prédio e momentos torsores obtidos.

No caso específico do edifício em estudo, os valores dos coeficientes de arrasto obtidos dos ensaios em túnel de vento são coerentes do ponto de vista aerodinâmico com relação à forma do prédio estudado e de sua vizinhança. Os momentos torçores obtidos nos ensaios para determinados ângulos de incidência do vento foram superiores, em torno de 20%, aos que seriam obtidos através das indicações da NBR-6123 para edifícios com seção transversal retangular em planta.

1 Introdução

Este trabalho apresenta os resultados do estudo, em modelo reduzido, da ação estática do vento sobre um edifício alto, a ser construído em São Paulo, Brasil. Maiores níveis de segurança e confiabilidade são atingidos quando a consideração criteriosa dos efeitos do vento é feita a partir da etapa de concepção. Este processo preventivo é, geralmente, o de menor custo e o de maior eficiência. Por estas razões e por não existirem coeficientes aerodinâmicos específicos para este prédio em normas de vento, foram realizados ensaios em túnel de vento no Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

No trabalho é realizada uma comparação dos resultados obtidos no ensaio em túnel de vento com os resultados estimados a partir da norma brasileira / NBR-6123 (1988) - Forças devidas ao vento em edificações e da norma canadense / NBC (1990).

2 Projeto do Modelo

Foi construído um modelo reduzido, em escala 1/333, do prédio acima descrito, o qual recebeu um total de 219 tomadas de pressão estática, localizadas de modo a possibilitar um levantamento da distribuição das pressões em todas as faces da edificação.

Esta distribuição das tomadas permitiu o levantamento das pressões em toda a edificação, girando-se o modelo de 360°. As pressões estáticas efetivas médias foram medidas a cada 15° de incidência do vento, com um total de 24 incidências x 219 tomadas resultando no montante de 5256 pontos de medida de pressões. A referência para o ângulo de incidência do vento é mostrada na figura 1.

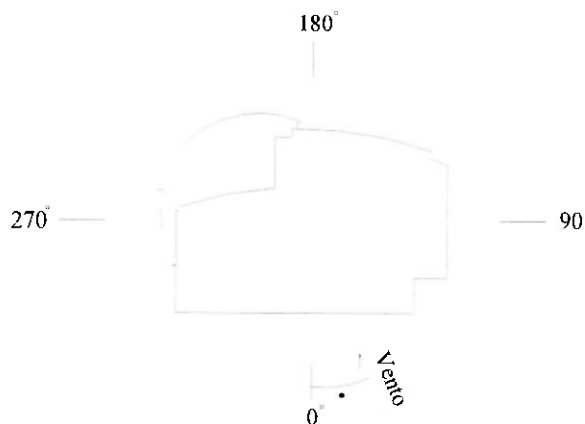


Figura 1 – Secção transversal do edifício e referência para ângulo de incidência do vento.

Foram simulados todos os detalhes significativos da edificação real para que as condições de semelhança fossem preservadas. Algumas simplificações foram realizadas no modelo para que certos detalhes arquitetônicos não afetassem localmente as medidas em determinadas tomadas de pressão, mantendo-se, contudo, a mesma aerodinâmica do escoamento. Uma fotografia do modelo reduzido do edifício é apresentada na figura 2.

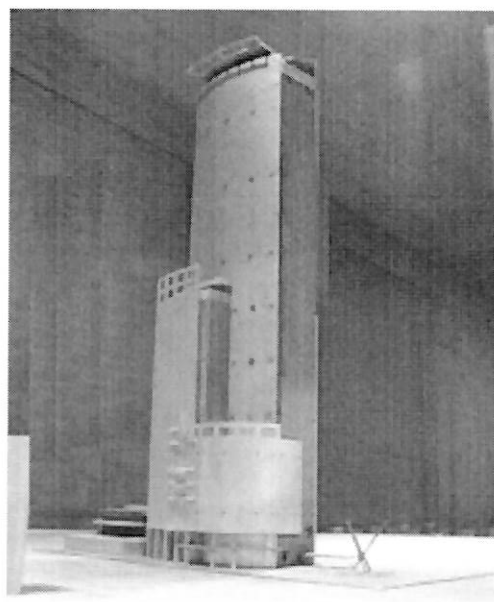


Figura 2 – Modelo reduzido do edifício.

3 Ensaios em Túnel de Vento

Os ensaios foram realizados no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Blessmann, 1982 e Cook, 1990), mostrado na figura 3. Trata-se de um túnel de vento de camada limite de retorno fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis. Este túnel permite a simulação das principais características de ventos naturais. Tem relação “comprimento / altura” da câmara de ensaios superior a 10. A velocidade máxima do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme e sem modelos, é de 150 km/h. A simulação correta das principais características do vento natural em túneis de vento é requisito básico para aplicações em Engenharia Civil (Davenport e Isyumov (1967)), sem a qual os resultados obtidos podem se afastar consideravelmente da realidade.



Figura 3 – Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann.

O vento simulado possui um perfil potencial de velocidades médias de expoente $p = 0,23$, que corresponde à terreno com rugosidade entre as categorias III e IV da NBR-6123 (ABNT, 1988). Suas características são as seguintes:

Categoria III – terreno plano ou ondulado com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas.

Exemplos:

- granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos;
 - fazendas com sebes e/ou muros;
 - subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas;
- A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual à 3,0m.

Categoria IV – terreno coberto por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada.

Exemplos:

- zonas de parques e bosques com muitas árvores;
- cidades pequenas e seus arredores;
- subúrbios densamente construídos de grandes cidades;
- áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.

A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10m. Esta categoria inclui também zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser consideradas na Categoria V.

O vento simulado engloba a gama de rugosidades existente. Considerando-se as características do local em estudo e do terreno próximo ao prédio, optou-se por testar os ângulos de incidência do vento com estas características. Próximo ao modelo instrumentado foram reproduzidas as edificações mais próximas, na escala do modelo, para que as condições de escoamento próximas ao edifício correspondessem o mais fielmente possível às condições reais às quais a edificação estará sujeita após concluída. Na figura 4 é apresentada uma fotografia do modelo reduzido do edifício e da simulação da vizinhança de entorno da edificação. Com o correr dos anos há tendência de aumento da rugosidade das zonas construídas devido à prováveis futuras urbanizações, o que poderá causar alguma redução nos esforços estáticos em algumas zonas da edificação. Por outro lado, possíveis efeitos nocivos de vizinhança podem ocorrer pela construção futura de outras edificações nas cercanias imediatas da edificação em estudo.

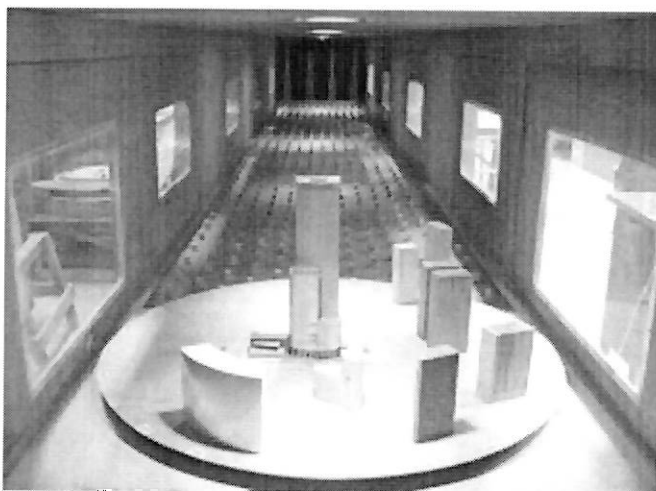
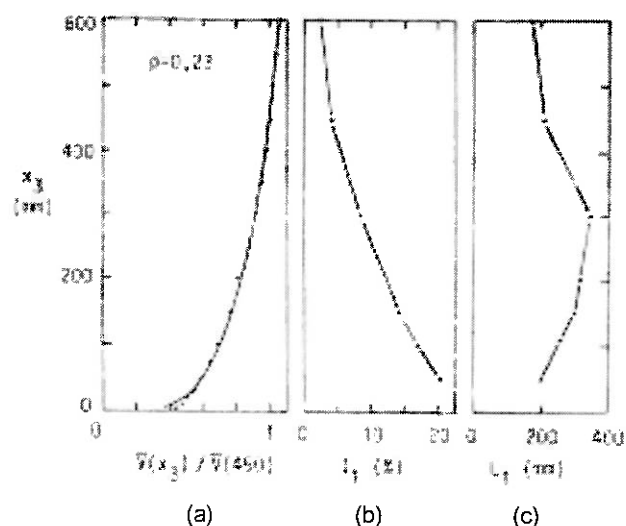


Figura 4 – Modelo reduzido do edifício no interior do túnel de vento.

As principais características do vento simulado podem ser vistas na figura 5: perfil vertical das velocidades médias, em porcentagem da velocidade média no eixo longitudinal do túnel (pontos experimentais e curva potencial teórica), intensidade (I_t) e macro-escala (L_t) da componente longitudinal da turbulência.



(a) perfil de velocidades médias
(b) intensidade da componente longitudinal da turbulência
(c) macroescala da componente longitudinal da turbulência

Figura 5 – Características do vento simulado.

O perfil das velocidades médias é expresso, aproximadamente, pela lei potencial:

$$\bar{V}(x_3) / \bar{V}_{ref} = x_3 / x_{ref}^p \quad (1)$$

Sendo: $\bar{V}(x_3)$ – velocidade média na altura x_3 ;
 $\bar{V}_{ref}$ – velocidade média em uma altura de referência (no túnel,
 $x_{ref} = 450\text{mm}$ – cota do eixo longitudinal do túnel);
 $p = 0,23$

4 Resultados dos Ensaios em Túnel de Vento

A partir dos registros das pressões estáticas foram calculados os coeficientes de pressão externa, médios, nas faces do modelo, definidos por:

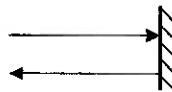
$$c_p = \bar{p} / q \quad (2)$$

sendo:

- $\bar{p}$ – pressão estática efetiva média no ponto de estudo, na superfície da edificação;
- q – pressão dinâmica de referência, no topo da edificação.

Foi adotada a seguinte convenção de sinais:

- coeficientes positivos: sobrepressão (+)
- coeficientes negativos: sucção (-)



Os coeficientes de pressão assim calculados permitiram a determinação de coeficientes de forma externos (C). O coeficiente de forma externo, C , aplicável a uma superfície plana de área A , é definido por:

$$C = F / qA \quad (3)$$

sendo F a resultante das pressões externas sobre a superfície plana (é uma força perpendicular a esta superfície).

Conforme a equação (2):

$$F = \int_A p \, dA = \int_A c_p q \, dA \quad (4)$$

Substituindo na (3):

$$C = \frac{1}{A} \int_A c_p \, dA \quad (5)$$

Esta última expressão permitiu a obtenção de C a partir de c_p , por integração numérica.

Para algumas incidências do vento, valores elevados de sucções externas aparecem em zonas restritas da edificação, zonas estas situadas nas proximidades das bordas. Estas sucções não aparecem simultaneamente em todas estas zonas, e são usadas apenas para o dimensionamento, verificação e ancoragem de elementos de vedação e da estrutura secundária por elas afetadas.

As forças globais de arrasto são obtidas a partir dos coeficientes de força, apresentados nas duas direções x e y indicadas na figura 6. Para a recomposição das forças globais, os coeficientes de força C_{fx} e C_{fy} nas respectivas direções devem ser multiplicados por suas correspondentes áreas projetadas, isto é, $A_x = 2347,15\text{m}^2$ ($149,5\text{m} \times 15,7\text{m}$) e $A_y = 5456,75\text{m}^2$ ($149,5\text{m} \times 36,5\text{m}$), e pela pressão dinâmica na altura de referência, a 150m de altura (altura real da edificação 148m). Na figura 7 é apresentada a variação do coeficiente de força em duas direções x e y em função do ângulo de incidência do vento.

Os coeficientes de torção são definidos por:

$$C_t = \frac{M_t}{q B_x B_y H} \quad (6)$$

sendo:

- M_t - momento torsor em relação ao centro da parte circular da fachada;
- B_x, B_y - dimensões nominais da seção transversal do prédio ($B_x = 36,5\text{m}$, $B_y = 15,7\text{m}$);
- H - altura de referência para o momento torsor ($149,5\text{m}$).

Os coeficientes de torção são apresentados em relação à origem dos eixos x e y indicados na figura 6.

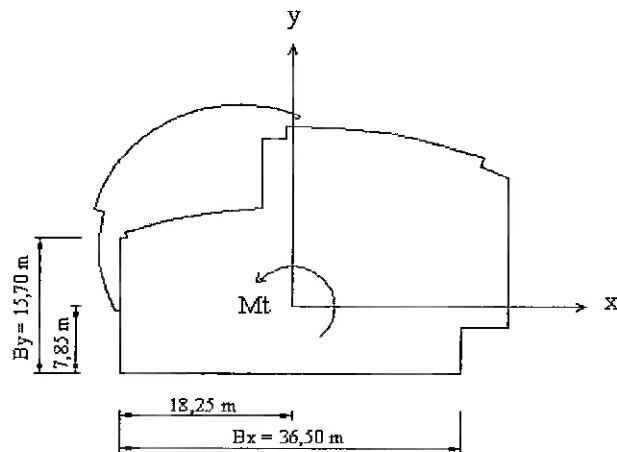


Figura 6 – Referência para coeficientes de força e de torção.

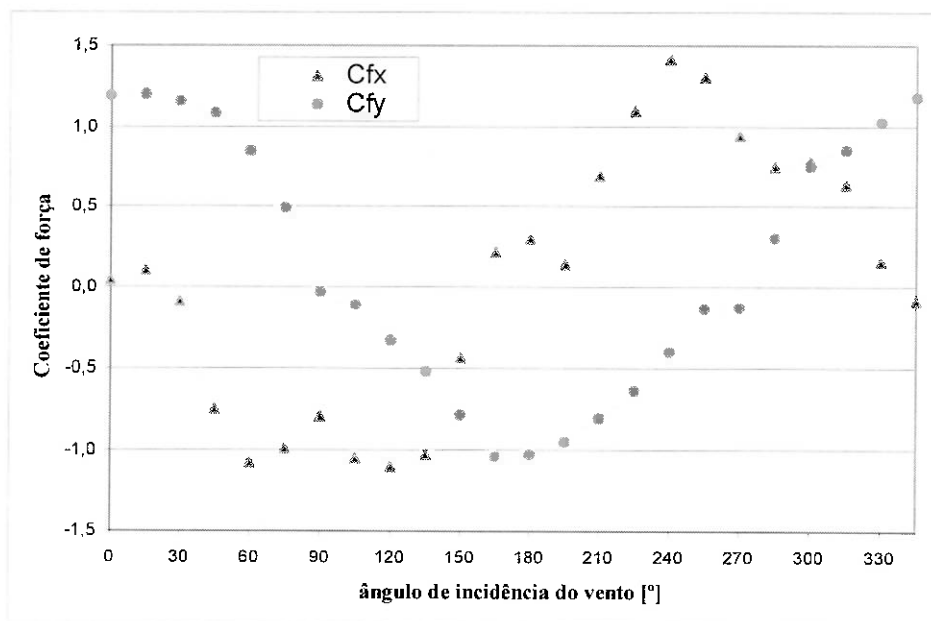


Figura 7 – Variação do coeficiente de força em função do ângulo de incidência do vento.

5 Processos Normativos

Foi realizada a comparação dos resultados obtidos nos ensaios em túnel de vento com os resultados obtidos a partir da norma brasileira / NBR-6123 - Forças devidas ao vento em edificações (ABNT, 1988) e da norma canadense / NBC (1990). Esta comparação foi feita em termos de solicitações resultantes na base da estrutura: esforço de corte, momento fletor e momento torsor, para vento incidindo perpendicularmente à face maior.

5.1 Processo da NORMA BRASILEIRA / NBR-6123

As forças devidas ao vento são dadas por:

$$F = C_a q A \quad (7)$$

sendo:

F – força, para efeitos globais, na superfície de área A ;
 C_a – coeficiente de arrasto;
 q – pressão dinâmica variável com a altura da edificação;
 A – área de referência.

A pressão dinâmica q [N/m^2] é obtida por:

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (8)$$

sendo:

$$V_k = V_o S_1 S_2 S_3 \quad (9)$$

Onde V_k [m/s] é a velocidade característica do vento, obtida através do produto entre V_o , velocidade básica do vento (máxima velocidade média medida sobre 3 segundos), e os fatores S_1 , S_2 , e S_3 . Estes fatores representam, respectivamente, o fator topográfico, o fator que considera a ação combinada da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação e da altura sobre o terreno e o fator estatístico que leva em consideração o grau de segurança estipulado para a edificação e sua vida útil. Estes parâmetros são determinados de acordo com as condições locais da edificação.

A norma brasileira fornece apenas coeficientes de arrasto para edificações de secção transversal retangular em planta. A forma da secção transversal adotada nesta estimativa, tem dimensões 36,5m x 19,3m, nas direções x e y , respectivamente (ver figura 6).

Os valores dos parâmetros utilizados nesta análise, para a geometria da edificação e condições locais, são apresentados abaixo:

$$\begin{aligned} V_o &= 38,0 \text{ m/s} \\ S_1 &= 1,0 \\ S_3 &= 1,0 \\ S_2 &= b F_r (z / 10)^p \\ b &= 0,93 \\ F_r &= 0,95 \\ p &= 0,115 \end{aligned}$$

5.2 Processo da NORMA CANADENSE / NBC (1990)

Neste processo as forças devidas ao vento são obtidas pelo seguinte produto:

$$F = C_e C_g C_p q A \quad (10)$$

onde:

C_e – coeficiente que considera os efeitos de altura e as condições de rugosidade de entorno, sendo baseado no perfil de velocidades médias do vento;

C_g – coeficiente que considera os efeitos das rajadas do vento e sua interação com as propriedades dinâmicas da estrutura;

C_p – coeficiente de pressão;

q – pressão de referência do vento;

A – área de referência da edificação.

A pressão de referência do vento q [kPa] é determinada por:

$$q = C \bar{V}^2 \quad (11)$$

onde:

$\bar{V}$ - velocidade de referência do vento [m/s] (média horária);

C – fator que depende da pressão atmosférica e temperatura do ar ($C = 650 \cdot 10^{-6}$).

A velocidade de referência $\bar{V}$ é definida como a velocidade média horária. A norma brasileira disponibiliza a velocidade média de rajada (sobre 3 segundos), a qual foi adequadamente convertida para média horária para ser empregada neste processo.

O coeficiente C_e é determinado pela seguinte expressão:

$$C_e = 0,5 \left(\frac{z}{12,7} \right)^{0,5} \quad (12)$$

onde z é a altura da edificação medida desde o nível do solo.

O fator C_g representa os efeitos de flutuação da velocidade do vento (rajadas) e sua interação com as características dinâmicas da estrutura.

Os valores do coeficiente de pressão C_p estão disponíveis para edificações com secção transversal retangular, portanto vale a mesma aproximação admitida no processo da norma brasileira, no que diz respeito à forma da secção transversal admitida.

$$\bar{V} = 24,70 \text{ m/s}$$

$$C = 0,00065$$

$$q = 0,397 \text{ kPa}$$

5.3 Solicitações a partir dos ensaios em túnel de vento

Tendo sido reproduzido no túnel de vento o perfil vertical de velocidades médias do vento natural no local da obra, e tendo sido adotada, como velocidade de referência, a velocidade do vento no topo da edificação para o cálculo dos coeficientes, S_2 deve ser sempre o correspondente ao topo da construção real.

O valor de V_k , assim obtido, aplica-se a toda a construção independentemente da zona ou faixa de estudo, mas dependendo da finalidade de cálculo, que fará variar S_2 conforme comentado no parágrafo acima.

O cálculo da força devida ao vento na base da edificação foi determinado através do produto entre os coeficientes de força obtidos através dos ensaios em túnel de vento, a pressão dinâmica de referência do vento (determinada com a velocidade no topo da edificação) e a área de referência correspondente da edificação. O momento fletor é obtido através do produto da força devida ao vento pela correspondente distância vertical equivalente em relação à base, e o momento torsor determinado a partir da relação indicada na equação (6).

5.4 Comparação

O quadro comparativo (tabela 1) apresentado abaixo fornece, de forma compacta, os resultados do estudo comparativo das solicitações obtidas entre os ensaios em túnel de vento e dois processos oficialmente normalizados, as normas brasileira e canadense.

Tabela 1: Quadro comparativo das solicitações na base do edifício.

	Ângulo de incidência do vento	Solicitações na base		
		Esforço de corte [kN]	Momento fletor [kN.m]	Momento torsor [kN.m]
Ensaio em túnel de vento	0°	8486	645810	30100
Norma brasileira NBR-6123 (1988)	0°	9054	720122	24785
Norma canadense NBC (1990)	0°	6287	543523	25363*

* O valor do momento torsor referido à Norma Canadense foi obtido a partir de uma aplicação da NBC (1990) em conjunto com recomendações de Isyumov (1983).

Os resultados deste estudo comparativo indicam que os ensaios em túnel de vento apresentaram valor de momento fletor na base cerca de 19% maior do que o valor estimado pela norma canadense. A norma brasileira estima um momento fletor da ordem de 12% maior do que o obtido em túnel de vento. O momento torsor determinado a partir dos ensaios em túnel de vento resultou em cerca de 20% maior que o determinado pelas normas brasileira e canadense. Esses resultados são válidos para incidência do vento em torno de 0°. Comparando-se os valores obtidos pelos dois procedimentos normativos verifica-se que a norma brasileira apresenta um valor de momento fletor da ordem de 32% maior em relação à norma canadense.

6 Análise dos Resultados

Existem diversos mecanismos que causam excitação em edifícios altos. Estes incluem a excitação direta pela energia cinética contida na turbulência atmosférica, o desprendimento cadenciado de vórtices, além de outros associados a efeitos aeroelásticos. Estes mecanismos são responsáveis pela indução de respostas na direção do vento e transversais a este, além de efeitos de torção.

Em um ambiente típico de cidade, onde vários edifícios altos e outros tipos de edificações encontram-se agrupados e em grande proximidade, cada edifício pode influenciar o campo aerodinâmico e, portanto, as forças do vento agindo sobre os outros ao redor. A presença de edifícios altos próximos (vizinhança) pode aumentar as respostas tanto na direção do vento como transversalmente a este, além dos efeitos de torção, em geral em torno de 30% a 40%, podendo entretanto resultar em aumentos muitíssimo superiores

para certas posições críticas de separação do escoamento, bem como de seu posicionamento e forma (Kwok, 1985), cita casos de aumento de mais de 400% na resposta na direção do vento). Pode-se citar o caso do edifício do Citibank, na Avenida Paulista, em São Paulo, SP, em que o momento torsor devido ao vento sofreu um acréscimo de até 125% para certas condições de incidência do vento, em relação ao que sofreria caso a vizinhança não existisse (Blessmann, 1992). Os efeitos de interferência em edifícios adjacentes, existentes ou propostos, costumam ser estudados em túnel de vento, simulando-se as principais características de ventos naturais e vizinhança mais próxima. Dentre muitos, citamos Isyumov e Loh (1982) no estudo da Trump Tower, em Nova York, e Davenport et al. (1971) no estudo da Sears Tower, em Chicago.

Modificações aerodinâmicas na forma da edificação podem trazer benefícios. Por exemplo, edifícios com seção transversal originalmente retangular em planta, podem ter sua resposta na direção do vento diminuída em torno de 40% caso as arestas vivas sejam eliminadas (chanfros). Em um estudo recente para um prédio de 73m de altura com seção transversal em forma de U, construído em São Paulo, SP, foram constatadas diferenças de até 100% nos valores dos coeficientes de arrasto, dependendo do ângulo de incidência do vento (Loredo-Souza et al., 2000). Existem diversas possibilidades de alterações arquitetônicas passíveis de acarretar diminuição nos esforços do vento, desde que convenientemente estudadas.

Caso a estrutura seja sensível a efeitos dinâmicos, deve-se conhecer bem o tipo de excitação pois o papel da massa, rigidez, amortecimento e forma aerodinâmica na redução das vibrações induzidas pelo vento é um tanto complexo, exceto no caso de um aumento da capacidade de amortecimento, o qual é sempre benéfico. Os ensaios do modelo estudado neste trabalho não incluíram a consideração de possíveis efeitos dinâmicos, os quais devem ser analisados em estudos específicos em túnel de vento, tomando-se como ponto de partida as informações sobre a ação estática do vento apresentadas neste estudo.

7 Conclusões

Os ensaios em túnel de vento do modelo reduzido do edifício permitiram a medição das pressões médias devidas ao vento para 24 ângulos de incidência do vento, levando-se em conta as características do terreno onde o prédio será construído e de sua vizinhança. O funcionamento global é distinto de acordo com a incidência do vento, conforme comentado no item 6.

A superfície externa da edificação apresenta regiões nas quais a sucção é muito alta, devendo-se tomar especial atenção aos efeitos locais.

As forças de arrasto e momentos de tombamento médios obtidos a partir dos resultados em túnel de vento estão dentro dos valores esperados para uma edificação com estas características. Já os momentos torsores na base calculados pelos procedimentos normativos ficaram abaixo do valor estimado pelo ensaio em túnel de vento. Esta não é uma constatação incomum, indicando a necessidade de uma revisão dos procedimentos normativos para a estimativa da torção em edifícios altos.

8 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Eng. Jorge Batlouni Neto, da Tecnum & Corporate Empreendimentos Imobiliários Ltda., à Munir Abbud Empreendimentos Imobiliários Ltda., à França & Associados Engenharia Ltda., e ao técnico Paulo Francisco Bueno, do Laboratório de Aerodinâmica das Construções, pela valiosa contribuição.

9 Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. NBR-6123 – **Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro. 88p. 1988.

BLESSMANN, J.. The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS; **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 10, 231-248, 1982.

BLESSMANN, J.. **Neighbouring wind effects on two tall buildings**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44. pp. 1041-1052, 1992.

COOK, N. J.. **The designer's guide to wind loading of building structures. Part 2: Static Structures**. (Building Research Establishment). London, UK. 1990.

DAVENPORT, A. G. AND ISYUMOV, N.. The Application of The Boundary Layer Wind Tunnel to the Prediction of Wind Loading. In: **Proceedings of the International Research Seminar: Wind Effects on Buildings and Structures**. Ottawa, Canada. September 11-15. Vol. 1 pp. 201-230, 1967.

DAVENPORT, A. G., ISYUMOV, N., JANDALI, T.. **A study of wind effects for the Sears Project**. Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory. The University of Western Ontario. Engineering Science Research Report. BLWT-5-71, 1971.

ISYUMOV, N., LOH, P.. **A study of wind effects on the Trump Tower, New York, N.Y.- facade pressures, overall wind induced forces and responses, and the pedestrian level wind environment**. Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory. The University of Western Ontario Engineering Science Research Report. BLWT – SS10 –1982.

ISYUMOV, N.. **Estimation of torsional wind loads on tall buildings**. ASCE State of the Art Report of Wind Action on Tall Buildings, 1983.

KWOK, K.C.S. **Aerodynamics of tall buildings**. In: **Ninth International Conference on Wind Engineering**. A State of the Art in Wind Engineering. Davenport Sixtieth Anniversary Volume. pp. 180-204, 1985.

LOREDO-SOUZA, A.M., NÚÑEZ, G.J.Z., E FANTE, J.T. **Efeitos do vento sobre um edifício alto com seção transversal em forma de U**. IV Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. 2000.

NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA. **National Research Council of Canada**, Associate Committee on the National Building Code, Ottawa, NRCC No. 23178. 1990.