



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO E DANOS EM ESTRUTURAS REAIS CAUSADOS POR UM DOWNBURST

COMPARATIVE STUDY OF WIND TUNNEL TESTS AND FULL-SCALE DAMAGES CAUSED BY A DOWNBURST

Acir M. Loredo-Souza (P) (1); Elias G. Lima (2); Matthew B. Vallis (2); Marcelo M. Rocha (1); Adrian R. Wittwer (3); Mario G. K. Oliveira (4)

(1) Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

(2) Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

(3) Professor, Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Argentina

(4) Diretor, Vento-S Consultoria em Engenharia do Vento, Porto Alegre, RS, Brasil

Dirección para correspondencia: acir@ufrgs.br; (P) Presentador

Resumo

Na noite de 29 de janeiro, 2016, uma tempestade TS foi registrada em Porto Alegre, Brasil. Os ventos causaram danos na maior parte da cidade, deixando 220.000 residências sem energia elétrica e milhares sem água. O evento foi definido como um macroburst pelos meteorologistas devido às suas características e padrões de danos, mas somente registros de três anemômetros estavam disponíveis. Este evento meteorológico se tornou uma oportunidade para a verificação e comparação, em escala natural e sob escoamentos oriundos de downburst, do comportamento de edificações previamente testadas em túnel de vento de camada limite convencional. Seis edifícios de 80m de altura e dois estádios de futebol foram analisados. Os prédios apresentaram danos em suas fachadas, enquanto os estádios não foram atingidos. Em três dos prédios mais afetados, as distribuições de pressões nas fachadas obtidas do ensaio em túnel de vento mostram uma correspondência direta com as zonas danificadas dos edifícios construídos. Embora as características do escoamento dos ventos oriundos de downbursts possam ser diferentes daquelas de ventos sinóticos usualmente simulados em túneis de vento, pode-se concluir a partir da análise de campo que o uso de simulações em túneis de vento de camada limite convencionais ainda são uma ferramenta valiosa na previsão do carregamento das cargas de vento oriundas dos eventos meteorológicos que geram velocidades extremas no Brasil.

Palavras-chave: Downburst, Macrobust, Ventos TS, Túnel de Vento, Vento, Acidentes.

Abstract

On the night of January 29, 2016 a thunderstorm event was registered in Porto Alegre, Brazil. The winds caused damage in the majority of the city, leaving more than 220,000 houses without electricity and thousands without water. The event was defined as a macroburst by meteorologists due to its characteristics and destruction patterns, but only three anemometers were available with the event velocities records. This meteorological event offered an opportunity to check and compare, in full-scale and under a downburst flow, the behaviour of buildings previously tested in a conventional Boundary Layer Wind Tunnel. Six 80m tall buildings and two soccer stadiums were analysed. The buildings presented damage in their façades cladding, while the stadiums remained undamaged. In three of the most affected buildings the pressure distribution diagrams on the building façades, obtained from the wind tunnel study, show a direct correspondence with the damaged zones of the analysed full-scale buildings. Although the flow characteristics of downburst winds and conventional boundary layer simulations of synoptic winds may be different, it may be concluded from the full-scale survey that the use of current conventional wind tunnel simulations are still a valuable tool in the prediction of wind loads from most of the meteorological events that generate extreme winds in Brazil.

Keywords: Downburst, Macrobust, TS Winds, Wind Tunnel, Wind, Full-scale damage.

1. INTRODUÇÃO

Na noite de 29 de janeiro de 2016, a cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, foi afetada por um evento meteorológico severo. Os ventos causaram danos na maioria da cidade deixando 220.000 casas sem eletricidade e milhares sem água. Os serviços meteorológicos brasileiros indicaram que uma frente fria encontrou uma massa de ar quente e úmido levou à formação de uma super-célula sobre toda a região metropolitana. A temperatura atingiu 40° C, o que é normal para o verão de Porto Alegre e usualmente leva à formação de tormentas TS e à geração de ventos extremos (Loredo-Souza, 2012), mas este evento em particular teve uma duração mais longa (mais de 20 minutos) e altas velocidades do vento que se mantiveram durante o período. Meteorologistas e Engenheiros classificaram o evento como um downburst.

A máxima rajada medida foi de 33,2 m/s, na estação do INMET. No aeroporto, a máxima rajada registrada foi de 24,2 m/s e no cais do porto a máxima rajada medida foi de 27,2 m/s. A partir das características dos danos ocorridos, alguns meteorologistas estimaram que em uma grande área o vento possa ter atingido velocidades em torno de 28 m/s e, em alguns poucos bairros, em torno de 42 m/s. Árvores e automóveis foram derrubados por toda a cidade. Um padrão não rotatório foi observado e nada foi realmente “lançado” (exceto pedaços de vidro e pedras provenientes dos elementos de revestimento das fachadas de prédios), eliminando a hipótese de um tornado. Além disso, vídeos e testemunhas relatam ventos descendentes (verticais) extremamente fortes seguidos por ventos horizontais. Vários danos ocorreram em edificações, especialmente nas fachadas. A Figura 1 mostra alguns exemplos de danos ocorridos durante o evento. Este fenômeno meteorológico ofereceu uma oportunidade de verificar e comparar, em escala natural e sob um escoamento gerado por um downburst, o desempenho de edificações previamente ensaiadas em um túnel de vento de camada limite.



Figura 1. Danos causados pelo downburst que atingiu Porto Alegre em 29 de janeiro de 2016.

2. DOWNBURSTS NO BRASIL

2.1. Downbursts

Downburst é um termo primeiramente elaborado por Fujita (1985) e é entendido como uma densa e forte coluna de ar frio causada por uma corrente descendente em direção ao solo, a qual gera uma “explosão” de ventos divergentes. Em termos de escala espacial, um downburst pode ser classificado como uma micro-explosão, quando atinge até 4km em torno do epicentro, e como uma macro-explosão, quando supera esta gama. A Figura 2 mostra um período de duração típico de uma micro-explosão.

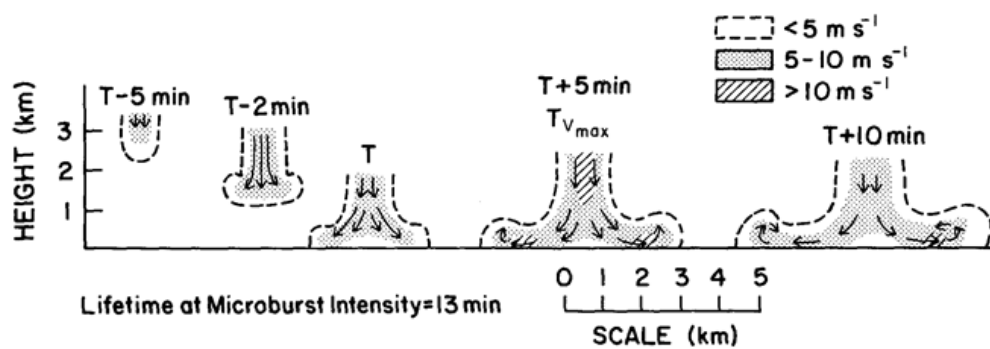


Figura 2. Período de duração típico de uma micro-explosão (Hjelmfelt, 1988).

Em termos de variação vertical, os perfis de velocidade dos downbursts (durante o processo de expansão horizontal) diferem daqueles tipicamente observados em perfis de camada limite atmosférica (CLA), conforme indicado na Figura 3. Isto pode ser extremamente importante para edifícios muito altos, mas para aqueles com altura equivalente aos estudados neste trabalho (não maiores que 80m) isto não parece muito significativo, embora pouco seja sabido sobre a estrutura da turbulência em um escoamento oriundo de downburst.

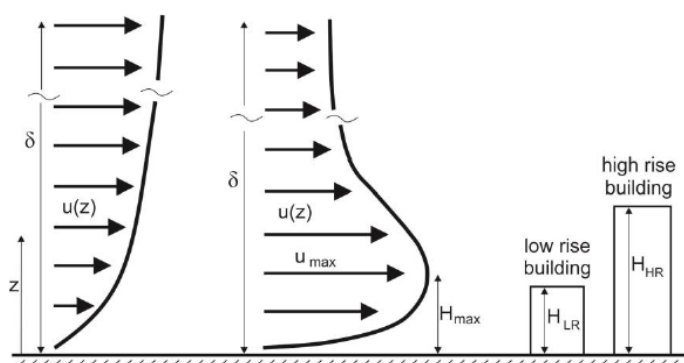


Figura 3. Esquema mostrando um perfil de velocidades de camada limite atmosférica, à esquerda, e um perfil de velocidades de um downburst durante o processo de expansão horizontal, à direita (Bertsch e Ruck, 2015).

2.2. O evento de Porto Alegre e ocorrências prévias no Brasil

O downburst é um fenômeno meteorológico muito particular e vários fatores precisam ser observados antes de sua ocorrência ser confirmada. O evento de clima severo observado em Porto Alegre pode ser classificado como uma macro-explosão principalmente devido ao seu padrão de destruição, mas se imagens de radar com melhor resolução estivessem disponíveis o evento poderia ser melhor entendido. A imagem de satélite da Figura 4 mostra uma super-célula bem desenvolvida sobre a cidade ao mesmo tempo em que as rajadas mais intensas foram registradas.

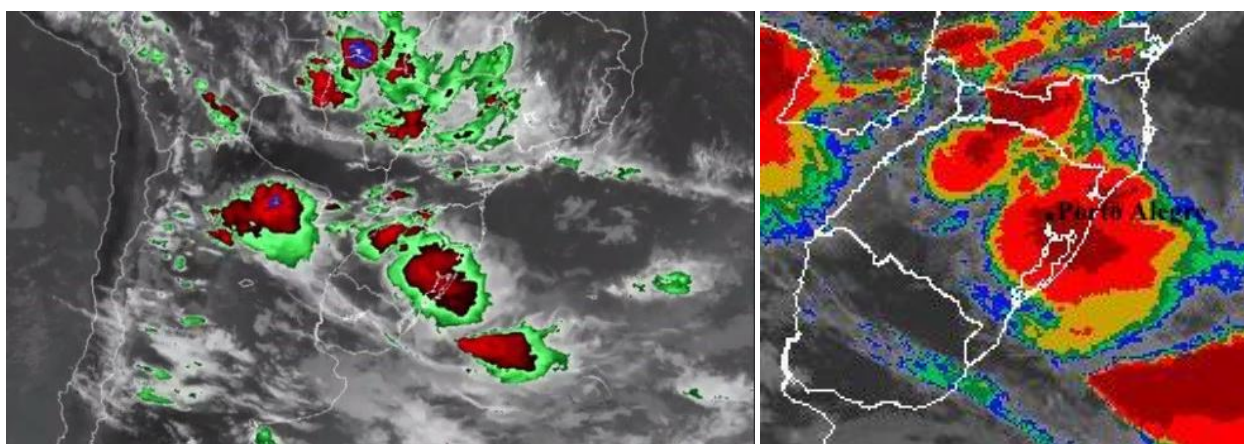


Figura 4. Imagem de satélite de uma super-célula sobre Porto Alegre em 30/01/2016 00:45:51 UTC (REDEMET, 2016).

Conforme Garstang et al. (1989), super-células são sistemas climáticos típicos que podem ser capazes de gerar downbursts. Mas existem vários parâmetros meteorológicos, tais como aqueles indicados na Tabela 1, que podem ser usados para identificar valores típicos encontrados durante uma ocorrência de downburst (Lima and Loredó-Souza, 2015). Também apresentados são os correspondentes valores característicos obtidos durante o evento em análise, onde é possível verificar as mudanças abruptas nos parâmetros meteorológicos predominantes. Devido às limitações de dados das Estações Meteorológicas Automáticas Brasileiras, para a Temperatura Potencial Equivalente e para a Taxa de Mistura os valores instantâneos na hora em que o downburst foi registrado, bem como da hora anterior, foram usados. Para os outros parâmetros, amplitudes máximas e mínimas na hora do evento foram utilizadas, sendo que elas descrevem as variações repentinas nas condições ambientais durante o evento.

Conforme mostrado na Tabela 2, algumas estações meteorológicas em torno de Porto Alegre também apresentaram rajadas de vento superiores a 10 m/s, mas somente Campo Bom (A884), 42 km de Porto Alegre, apresentou picos de pressão substanciais, seguidos por uma grande diminuição de temperatura, levantando a possibilidade da ocorrência de um outro downburst na área da “Grande Porto Alegre”. Entretanto, Canela (A879) e Bento Gonçalves (A840), respectivamente localizados a 85km e a 100km de Porto Alegre, registraram fortes rajadas de vento, mas nenhum pico de pressão. Reduções de temperatura podem ser justificadas pela aproximação de ar frio de uma frente de rajadas, o que também explica a mudança na direção do vento.

Tabela 1. Valores dos parâmetros meteorológicos típicos para a ocorrência de downbursts e aqueles observados para a estação meteorológica de Porto Alegre (A801) durante o evento.

Características	Gama de Valores Típicos de Downbursts	Referência	Porto Alegre
Diminuição de temp. entre a superfície e a camada fria próxima a 700hPa (K)	> 20	(Atkins e Wakimoto 1991)	Dados não disponíveis
Rajada de vento (m/s)	>10 (mín); 25 - 50 (eventos c/ danos severos)	(Garstang <i>et al.</i> 1998)	33,2
Diminuição efetiva da temperatura potencial equivalente instantânea (K)	> 4	(Garstang <i>et al.</i> 1998)	14,93
Diminuição de temperatura (°C)	> 5	(Garstang <i>et al.</i> 1998)	5,5
Diminuição do ponto de orvalho (°C)	-	-	1,8
Aumento na pressão atmosférica (hPa)	> 2,4	(Caracena e Maier 1987)	2,4
Decréscimo da taxa de mistura instantânea saturada (g/kg)	>3,5	(Garstang <i>et al.</i> 1998)	1,70
Diminuição da umidade relativa (%)	-	-	22
Precipitação registrada (mm/h)	> 0,5	(Garstang <i>et al.</i> 1998)	37,4

Table 2. Parâmetros meteorológicos obtidos em estações em torno de Porto Alegre.

Características	Canela	Campo Bom	Bento Gonçalves
Diminuição de temp. entre a superfície e a camada fria próxima a 700hPa (K)	Dados não disponíveis	Dados não disponíveis	Dados não disponíveis
Rajada de vento (m/s)	17,3	13,8	12,2
Diminuição efetiva da temperatura potencial equivalente instantânea (K)	17,41	18,84	Nenhum decréscimo registrado
Diminuição de temperatura (°C)	3,7	7,6	1,4
Diminuição do ponto de orvalho (°C)	4,4	5,0	0,7
Aumento na pressão atmosférica (hPa)	1.2	3,7	1,0
Decréscimo da taxa de mistura instantânea saturada (g/kg)	4,35	3,67	Nenhum decréscimo registrado
Diminuição da umidade relativa (%)	8	29	11
Precipitação registrada (mm/h)	0.6	6.4	0

Os dados disponíveis na Tabela 1 são relevantes para este estudo porque todos os parâmetros típicos para a ocorrência de um downburst foram registrados (exceto um) durante o evento de 29 de janeiro de 2016, confirmando a hipótese que um forte fenômeno desta natureza atingiu a área urbana de Porto Alegre. Estudos prévios já haviam indicado que a região sul do Brasil é suscetível à ocorrência de downbursts (Lima e Loredo-Souza, 2015). A principal preocupação em relação a este evento mais recente é em relação à segurança das edificações, pois ainda não é completamente entendido em que extensão as características dos ventos gerados por downbursts são diferentes daquelas de tormentas EPS, ou ventos sinóticos (Letchford e Chay, 2002). Isto pode deixar as edificações suscetíveis a falhas, colocando vidas em risco e causando grandes perdas econômicas, tais como aquelas observadas no evento de downburst de Porto Alegre.

3. ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO DE CAMADA LIMITE

Este evento meteorológico ofereceu uma oportunidade de verificar e comparar, em escala natural e sob um escoamento gerado por um downburst, o desempenho de edificações previamente ensaiadas em um túnel de vento de camada limite. Seis prédios com 80m de altura e dois estádios de futebol foram analisados. A Figura 5 mostra os modelos no interior do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Blessmann, 1982) e a Fig. 6 as principais características de um dos ventos simulados.

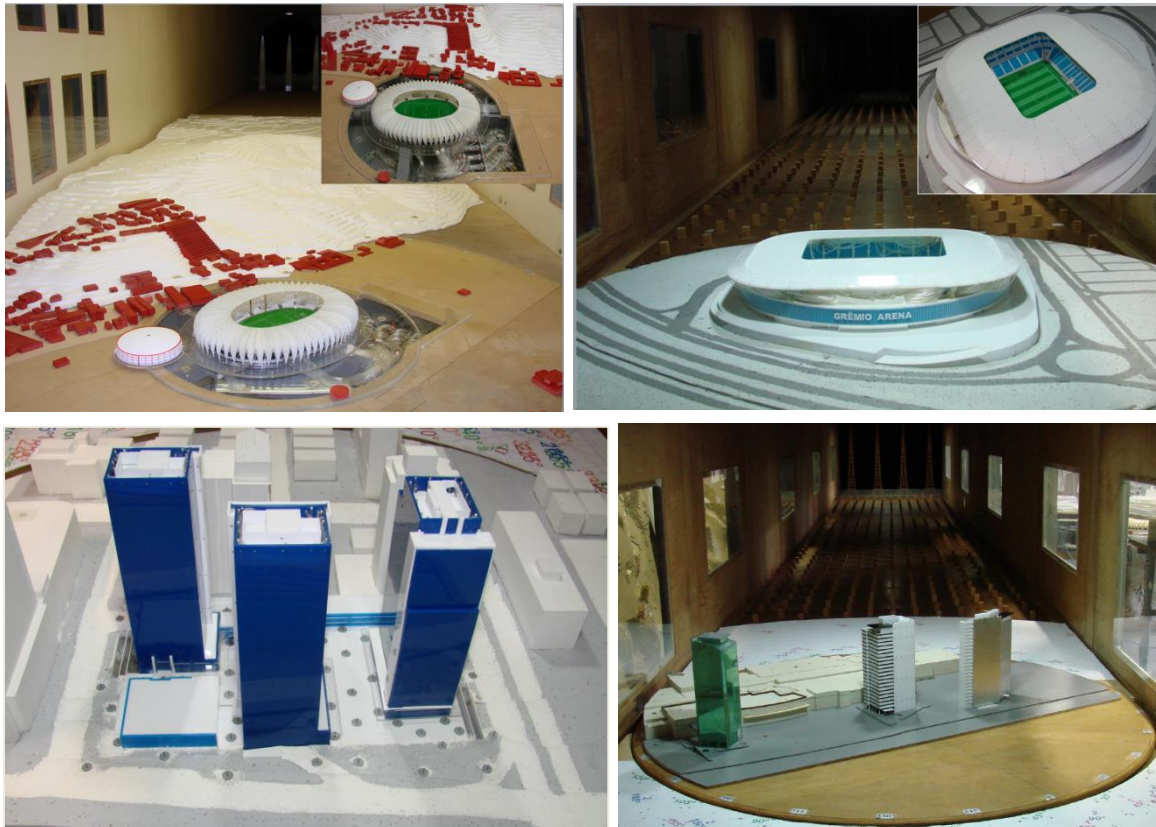


Figura 5. Modelos no interior do túnel de vento: dois estádios de futebol e seis prédios com 80m de altura.

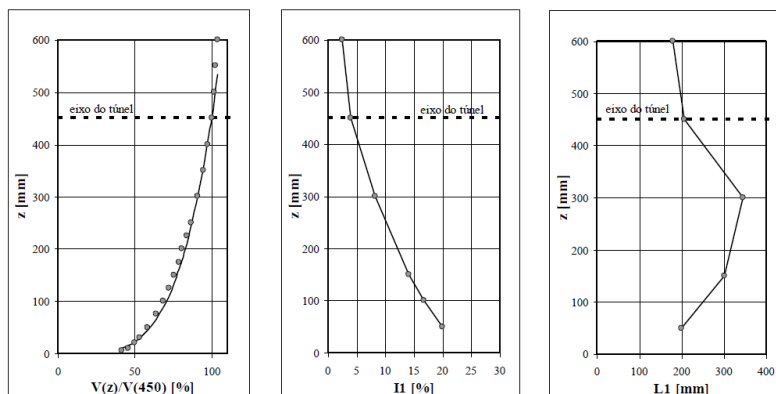


Figura 6. Principais características de um dos ventos simulados: perfil de velocidades médias, intensidade da turbulência e escala integral da componente longitudinal da turbulência.

Todos os modelos foram instrumentados e medições instantâneas de pressões foram realizadas nas superfícies dos modelos. A Fig. 7 mostra a distribuição dos coeficientes de pressão médios para um dos edifícios, para um ângulo de incidência do vento. Devido a limitações de espaço, as distribuições de coeficientes de pressão para outras edificações são mostradas na próxima seção, junto com as configurações de danos.



Figura 7. Diagramas de pressões médias nas fachadas do prédio em destaque, obtidos em ensaios em túnel de vento de camada limite (sucção = amarelo, laranja; sobrepressão = azul).

4. DESEMPENHO DAS EDIFICAÇÕES REAIS

Um mapa com mais de 400 casos de danos em uma grande área da cidade, registrados por Metroclima (2016), é mostrado na Fig. 8 juntamente com os locais onde medições oficiais de velocidade estavam disponíveis. Os danos são separados, de acordo com os ícones, em: árvores caídas, danos a estrutura e revestimento, e fogo. A densidade de danos foi maior do que o mapa está indicando, mas por clareza somente os mais severos são mostrados. São também indicadas na Fig. 8 as localizações das estruturas para as quais resultados de ensaios em túnel de vento estavam disponíveis.

Com relação às velocidades do vento, mesmo se as piores estimativas fossem admitidas, resultando em velocidades mais altas do que aquelas efetivamente medidas, a velocidade de referência recomendada para Porto Alegre pela Norma Brasileira NBR-6123 é uma rajada de vento de 46 m/s (Fig. 9), ou seja, não foi ultrapassada. Isto significa que os danos resultantes não foram devidos a um fenômeno não previsto, mas possivelmente a uma falta de entendimento nas especificações de projeto e/ou condições operacionais de estruturas e elementos de revestimento.

Analisando o desempenho das edificações estudadas, é possível verificar que os estádios permaneceram sem nenhum dano, enquanto as árvores e estruturas no entorno foram seriamente atingidas como pode ser visto na Fig. 10. Durante a fase de projeto, modificações e melhorias foram realizadas nas estruturas dos estádios com base nos resultados dos ensaios em túnel de vento, o que certamente resultou em um melhor desempenho em relação à ação do vento.

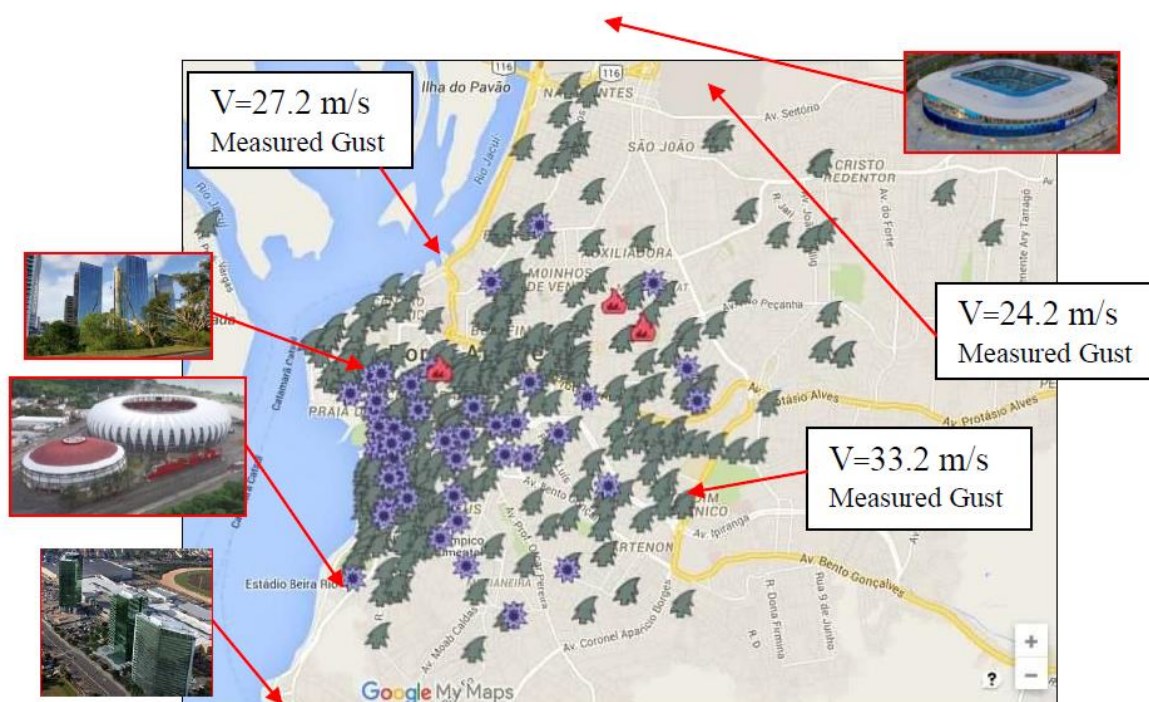


Figura 8. Mapa indicando danos ocorridos durante o downburst de 29 de janeiro de 2016 em Porto Alegre (adaptado de Metroclima, 2016), os locais e valores das medições oficiais de velocidades e as localizações e edificações para as quais resultados de ensaios em túnel de vento de camada limite estavam disponíveis.

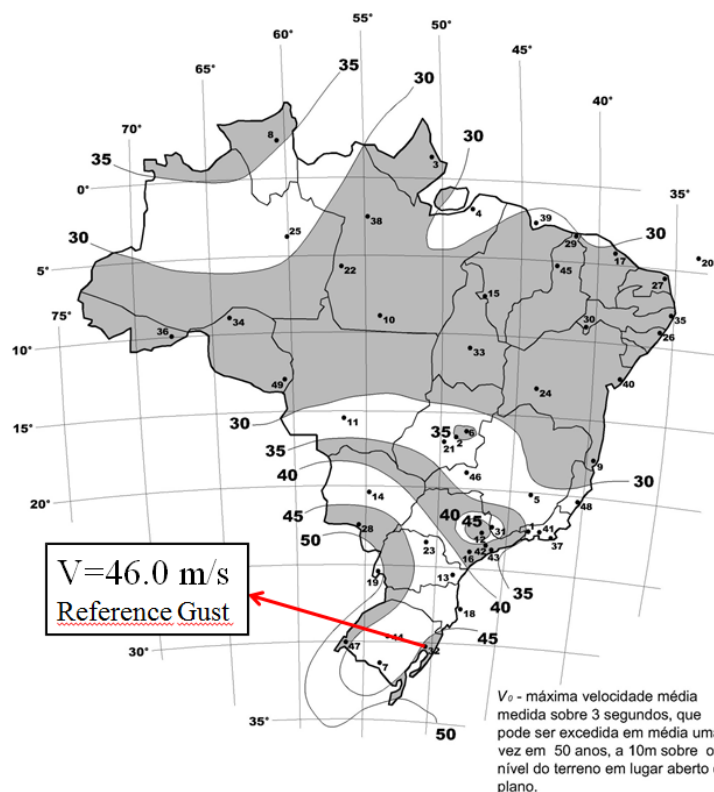


Figura 9. Mapa com as velocidades de referência do vento (rajada de 3s, em m/s, a 10m de altura, terreno aberto e plano). A velocidade para Porto Alegre é destacada (NBR-6123).



Figura 10. Danos a árvores e estruturas vizinhas causados pelo downburst e nenhum dano ao estádio.

Para o grupo de edifícios, o desempenho foi diferente. Todos apresentaram danos em suas fachadas (Figs. 11 a 13), mas em padrões bem distintos. Para o primeiro grupo de três prédios mostrado na Fig. 11, para o qual alguns diagramas de coeficientes de pressão são fornecidos na Fig. 7, as evidências mostraram que as janelas que foram mantidas fechadas e trancadas não sofreram danos, enquanto aquelas deixadas abertas, ou mesmo fechadas mas não trancadas, foram arrancadas ou quebradas pela ação do vento.



Figura 11. Danos a elementos de revestimento: algumas janelas que não estavam trancadas foram destruídas.

Para o outro grupo, correspondendo aos três dos edifícios mais afetados (Figs. 12 and 13), as fachadas têm dois tipos de elementos de revestimento: vidro e placas de granito. É possível observar que os danos mais severos ocorreram no revestimento de granito, o qual tem uma configuração específica de suporte e fixação, conforme indicado na Fig. 14. É interessante notar que os diagramas de distribuições de pressões nas fachadas do prédio indicado, obtidas do estudo em túnel de vento, mostram uma correspondência direta com as zonas danificadas do edifício real em análise.

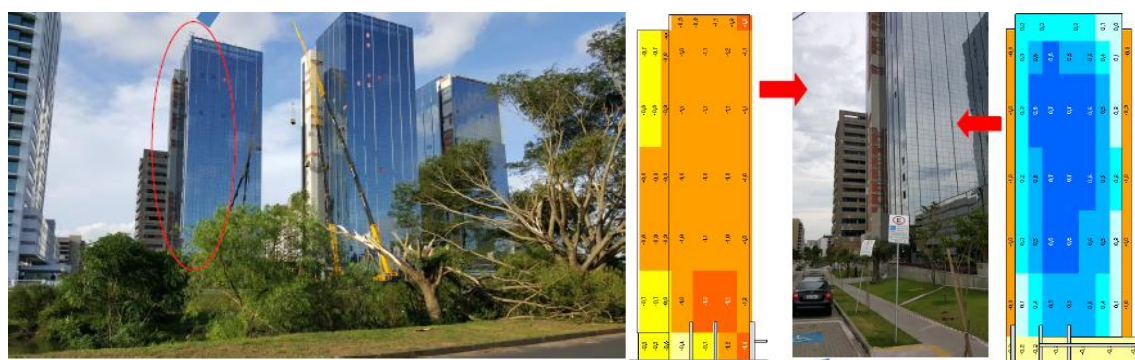


Figura 12. Danos causados pelo downburst e diagramas de coeficientes de pressão médios (sucção = amarelo, laranja; sobrepressão = azul) nas fachadas da Torre A, obtidos de ensaios em túnel de vento de camada limite.

Na Fig. 13 a correspondência entre as distribuições de pressão e os danos nas placas de granito usadas como revestimento é muito evidente. O sistema de suporte das placas de granito, mostrado na Fig. 14, não parece projetado para suportar pressões da ordem de magnitude daquelas que ocorreram no evento, lembrando que a velocidade de projeto indicada pela norma não foi atingida. Com relação ao revestimento de vidro, alguns danos ocorreram, mas em menor quantidade, sendo que algumas foram arrancadas quando deixadas abertas ou quebradas devido ao impacto de projéteis lançados pelo vento.

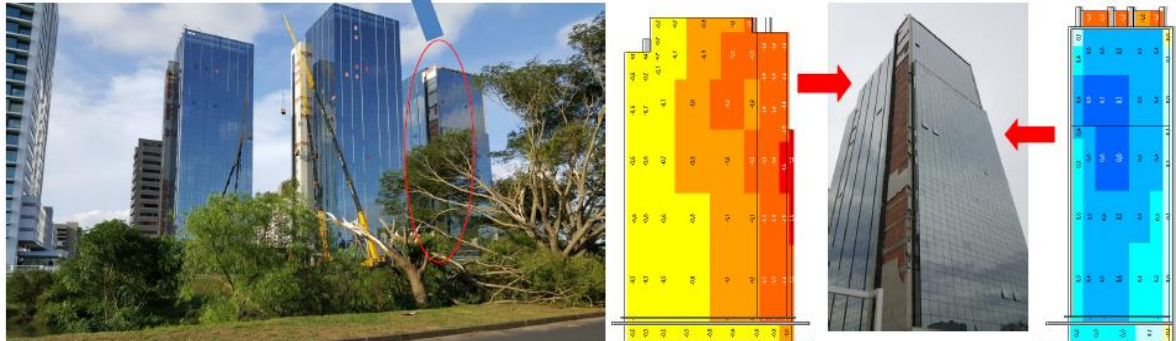


Figure 13. Danos causados pelo downburst e diagramas de coeficientes de pressão médios (sucção = amarelo, laranja; sobrepressão = azul) nas fachadas da Torre C, obtidos de ensaios em túnel de vento de camada limite.

5. CONCLUSÕES

Do que foi exposto acima, é possível concluir que o evento meteorológico que ocorreu em Porto Alegre em 29 de janeiro de 2016 pode ser classificado como uma macro-explosão (macroburst). Mas mesmo que danos severos tenham ocorrido em diversas edificações, não há evidência que as velocidades do vento tenham atingido a magnitude definida pela norma brasileira.

Embora as características de ventos oriundos de downbursts possam diferir daquelas de simulações convencionais de camada limite de ventos sinóticos, pode-se concluir, a partir das análises de campo, que o túnel de vento de camada limite convencional é ainda uma valiosa ferramenta na previsão das cargas de vento geradas pela maioria dos eventos meteorológicos que geram ventos extremos no Brasil. Esta conclusão é válida para os tipos de edificações estudados neste trabalho, com alturas até 80m. De qualquer forma, mais pesquisa é necessária para que se possa entender as diferenças nos carregamentos gerados por ventos não sinóticos.



Figura 14. Danos causados pelo downburst e sistema de suporte das placas de granito.



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as equipes do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da UFRGS, Brasil, do Laboratório de Aerodinâmica da UNNE, Argentina, e da empresa Vento-S Consultoria em Engenharia do Vento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988) NBR-6123 – Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro.
- Atkins, N., Wakimoto, R.M. (1991). Wet microburst activity over the southeastern United States: Implications for forecasting. *Weather and Forecasting*, v. 6, n. 4, p. 470-482.
- Bertsch, A., Ruck, B. (2015). Interaction between convective downdrafts and inner city areas – a wind tunnel study. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Wind Engineering – ICWE14*. Porto Alegre, Brazil. June 21-26.
- Blessmann, J. (1982) The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS; *J. Wind Eng. Ind. Aerodynamics*, 10 (1982), 231-248.
- Fujita, T.T., 1985. The Downburst - Microburst and Macrobust. SMRP-RP-210, Univ. of Chicago, p. 122.
- Caracena, F., Maier, M.W. (1987). Analysis of a microburst in the FACE meteorological mesonetwork in Southern Florida. *Monthly Weather Review*, v. 115, n. 5, p. 969-985.
- Garstang, M. et al. (1998). Convective cloud downdrafts as the cause of large blowdowns in the Amazon rainforest. *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 67, n. 1-4, p. 199-212.
- Hjelmfelt, M.R. (1988). Structure and life cycle of microburst outflows observed in Colorado. *Journal of Applied Meteorology*, v. 27, n. 8, p. 900-927.
- Letchford, C. W.; Chay, M. T. (2002). Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst. Part B: moving downburst observations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 90, n. 7, p. 733-753.
- Lima, E.G., Loredou-Souza, A.M. (2015). Analysis of downbursts occurrence in Brazil. *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 37 Ed. Especial SIC, ISSN on-line: 2179-460X, p. 32–38.
- Loredou-Souza, A.M. (2012). Meteorological events causing exteme winds in Brazil. *Wind and Structures*, Vol. 15, No. 2, 177-188.
- Metroclima (2016). , Feb 4. Available on <https://pbs.twimg.com/media/CaYE610WYAAcBJ0.jpg>INMET.
- REDEMET (2016). Feb 6. Available on <http://www.redemet.aer.mil.br/?i=produtos&p=imagens-de-satelite>.