

TÚNEL DE VENTO DO LACAF/FEC/UNICAMP - INSTRUMENTO PARA ENSAIOS DE MODELOS FÍSICOS REDUZIDOS E VENTILAÇÃO NATURAL

Edson Matsumoto, Lucila C. Labaki, Renata Martinho de Camargo e Alessandra R. Prata-Shimomura

*Universidade Estadual de Campinas / Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo/
Departamento de Arquitetura e Construção / LACAF – Laboratório de Conforto Ambiental e Física
Aplicada. Av. Albert Einstein, 951 - Caixa Postal: 6021 - CEP: 13083-852 - Campinas - SP (19)
3521.2064 - edson.mensagem@gmail.com; lucila@fec.unicamp.br; engtecno@uol.com.br;
aprata.shimo@gmail.com*

Palavras-Chaves: Túnel de Vento, Camada Limite Atmosférica, Ventilação Natural, Conforto Ambiental.

Resumo. Este artigo apresenta o Túnel de Vento de Camada Limite Atmosférica do LaCAF/Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas/SP, Brasil. Este instrumento foi desenvolvido e construído por meio de uma pesquisa de Projeto Temático, com apoio FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, que tem como objetivo viabilizar ensaios em modelos reduzidos de ventilação natural para análise do conforto ambiental. A metodologia adotada, para a construção deste, partiu de uma revisão bibliográfica referente a conforto térmico, equipamentos destinados a experimentos de ventilação natural, aerodinâmica aplicada à construção civil e mecânica dos fluidos, além de entrevistas com profissionais da área. A contribuição deste instrumento para a faculdade viabiliza a realização de ensaios de ventilação natural em modelos físicos, na interface dos estudos técnicos sobre desempenho ambiental (ensaios experimentais) e a prática do projeto (urbano e edifício), com as questões relacionadas com a ventilação natural. Diante das pesquisas que foram e estão sendo desenvolvidas na área ambiental no LACAF, este instrumento tem como foco a obtenção de dados qualitativos e quantitativos que poderão subsidiar os procedimentos de avaliação de desempenho ambiental.

1 INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta o Túnel de Vento de Camada Limite do LaCAF/Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas/SP, Brasil. Este instrumento foi desenvolvido e construído por meio de uma pesquisa de Projeto Temático, com apoio FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, que tem como objetivo viabilizar ensaios em modelos reduzidos de ventilação natural para análise do conforto ambiental.

O túnel de Vento de Camada Limite Atmosférica do Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada (LaCAF) da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas/SP (UNICAMP), Brasil, possui um comprimento total de 9,03m, com uma seção de ensaios de 4,8m de comprimento e seção transversal de 0,9m de largura por 0,8m de altura, produzindo uma área de 0,72m². O teto é móvel, regulável, para que a pressão estática ao longo de toda a seção de ensaio seja mantida constante. A velocidade máxima, com a seção de ensaios livre, é de 20m/s. Na **Figura 1** tem-se uma ilustração geral do projeto inicial do túnel de vento de circuito aberto, que funciona com um ventilador axial succionando o ar (Barros, 2008).

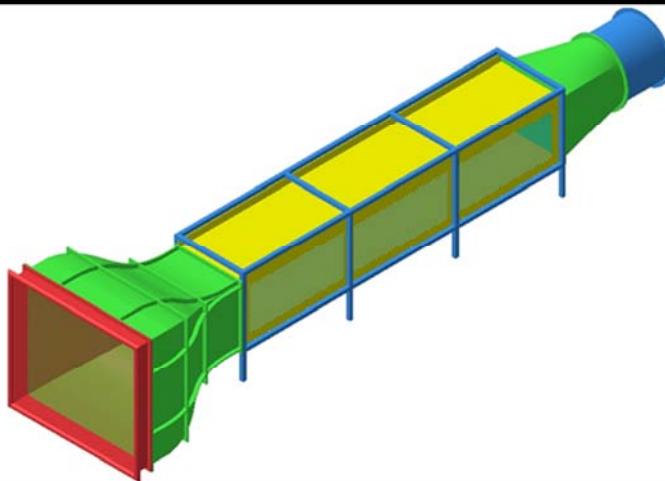


Figura 1: Ilustração geral do túnel de vento de circuito aberto: entrada de ar (através das duas telas de nylon fixadas na moldura vermelha), contração (seção verde, acoplada à moldura vermelha), seção de ensaios (seção amarela), difusor na saída da seção de ensaios (seção verde), ventilador axial e motor (seção azul).

O túnel de vento de camada limite atmosférica instalado no Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada é linear, de circuito aberto. O ar entra pelo bocal de entrada e passa por duas telas de *nylon*. Estas telas têm a função de reduzir os grandes vórtices que poderiam alcançar o interior do túnel. Após as telas, a seção transversal é reduzida aproximadamente seis vezes, para que o escoamento se torne laminar, sendo eliminada praticamente toda a turbulência (**Figura 2a**).

O ar passa agora pela seção de ensaios, que é mais longa do que nos túneis aerodinâmicos devido à necessidade de simular o perfil de velocidade da camada limite atmosférica. A **Figura 2b** mostra a lateral do túnel onde estão localizadas as 3 portas de acrílico de acesso à seção de ensaio para a preparação das maquetes.

O ar depois de atravessar toda a seção de ensaios e incidir na maquete, sai pelo difusor, que possui um diâmetro de 1,25m, mostrado na **Figura 3**. O ar é movimentado através do túnel por um conjunto motor-ventilador composto por um motor de 12,5HP e uma hélice com 1,20m de diâmetro e 16 pás.



(a)

(b)

Figura 2: (a) Detalhe da contração do bocal na entrada do túnel de vento; b) Lateral do túnel de vento, vista do lado das portas de acrílico da seção de ensaio.



(a)

(b)

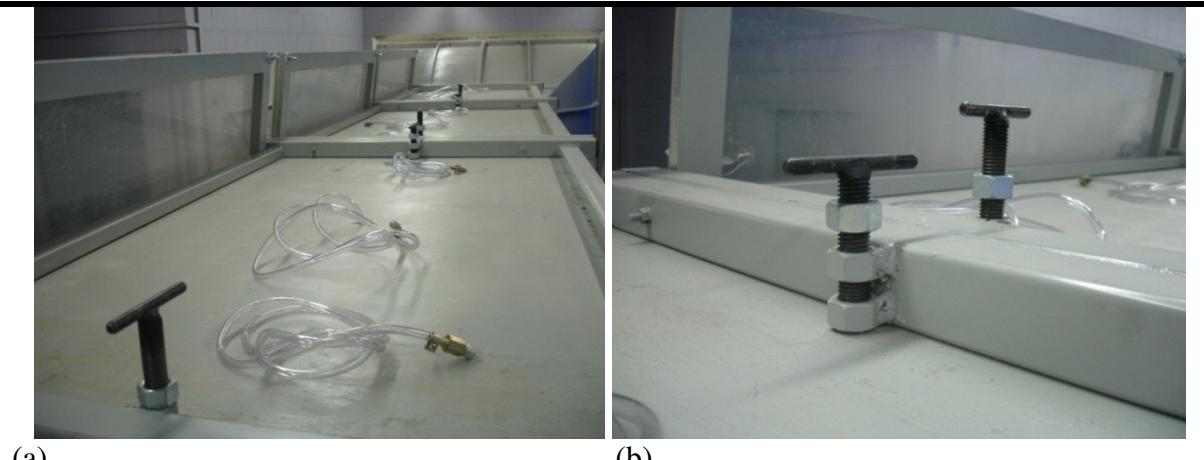
Figura 3: (a) Detalhe da contração do bocal na entrada do túnel de vento; b) Lateral do túnel de vento, vista do lado das portas de acrílico da seção de ensaio.

O escoamento no interior do túnel sofre perda de pressão, devido ao atrito, ao longo da seção de ensaio. Para fazer a equalização da pressão estática, é possível ajustar a altura do teto, dividido em três trechos, de tal maneira que a pressão seja a mesma nos nove pontos existentes ao longo da seção de ensaio.

Na **Figura 4a** tem-se uma vista geral externa do teto da seção de ensaio do túnel, onde estão localizadas as mangueiras das tomadas de pressão e os parafusos para os ajustes do posicionamento do teto. A **Figura 4b** mostra, em detalhe, dois parafusos do teto móvel.

A pressão estática é medida através um pequeno furo no centro de discos metálicos fixados no teto do túnel (**Figura 5**).

Para aumentar a segurança quando o ventilador estiver ligado, foi confeccionada uma tela, com fio de aço, no final da seção de ensaio para proteger as pás do ventilador, caso alguma parte da maquete se solte (**Figura 6a**). Na saída do túnel foi colocada uma tela de aço para que não se tenha acesso ao ventilador quando o túnel estiver em funcionamento e, assim, proteger os usuários de qualquer tipo de acidente (**Figura 6b**).



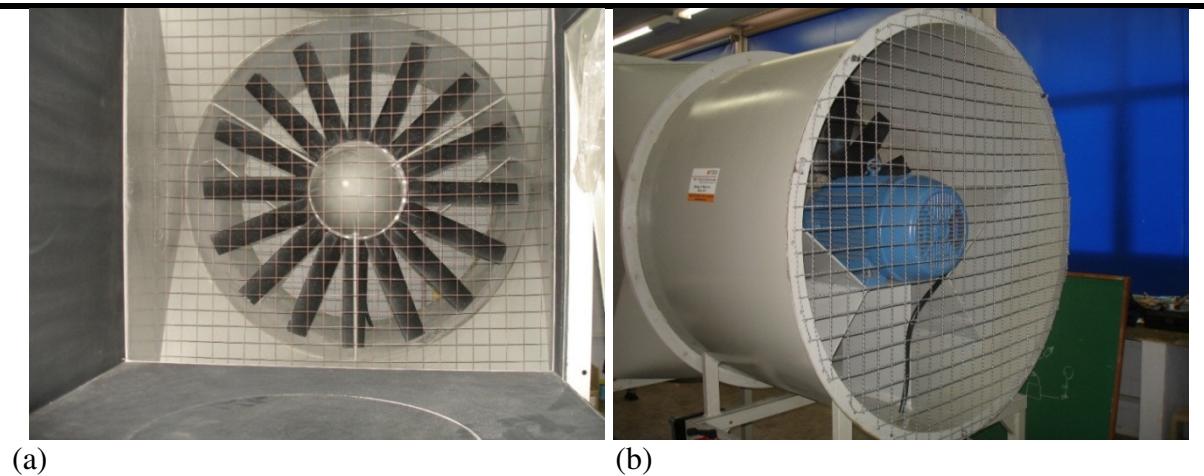
(a)

(b)

Figura 4: (a) Vista geral do teto do túnel de vento, onde se observa as mangueiras para as tomadas de pressão estática e os parafusos para ajustar o teto móvel; (b) Detalhe de dois parafusos do teto móvel.



Figura 5: Disco com um furo central fixado no teto da seção de ensaio do túnel, para a medida da pressão estática.



(a)

(b)

Figura 6: (a) Tela na saída da seção de ensaio, para proteção das pás do ventilador; (b) Tela de proteção na saída do túnel de vento.

Resumo dos dados do túnel de vento:

- Bocal de entrada: 2,20 m de largura x 1,95 m de altura (área de 4,20 m²);
- Duas telas de nylon com malhas quadradas de 1,5 mm, acopladas ao bocal de entrada;
- Seção de contração: 2,36 m de comprimento;
- Razão de contração entre o bocal de entrada e a seção de ensaios: 5,96;
- Seção de ensaio: 0,90 m de largura x 0,80 m de altura (área de 0,72 m²);
- Comprimento da seção de ensaio: 4,80 m;
- Disco giratório para fixação da maquete na seção de ensaio: 0,50 m de diâmetro;
- Comprimento do difusor: 1,87 m;
- Diâmetro das pás do ventilador: 1,20 m (16 pás);
- Diâmetro da saída do túnel de vento: 1,25 m;
- Motor: tensão 220 V, trifásico; potência: 12,5 HP;
- Frequência de rotação nominal: 860 rpm; vazão: 52.000 m³/h;
- Nove pontos de medida de pressão estática no teto da seção de ensaios;
- Inversor de freqüência de 15 HP para controlar a freqüência de rotação do motor;
- Comprimento total do túnel: 9,03 m;
- Velocidade máxima na seção de ensaio: 20 m/s a 850 rpm.

Este instrumento (**Figura 7**), para a faculdade, proporciona experimentações/ensaios contribuindo como uma interface dos estudos técnicos sobre conforto ambiental (ensaços experimentais) e a prática do projeto (urbano e edifício), com as questões relacionadas com a ventilação natural.



Figura 7: Vista geral do túnel de vento de camada limite atmosférica do LaCAF/FEC/UNICAMP.

2 METODOLOGIA

Para ensaiar modelos físicos de edificações no túnel de vento, é necessário simular o perfil de velocidades e de intensidade de turbulência da camada limite atmosférica (De Bortoli, Natalini et al, 2002) na seção de ensaios. Para isto, foi construído um painel com tubos e conexões de PVC e instalado na entrada da seção de ensaios do túnel. Estas conexões desviam o escoamento e podem produzir perfis de turbulência e de velocidade adequados para cada tipo de rugosidade. Foram utilizados os seguintes tipos de conexões de PVC: curva longa de 90°, curva curta 90°, “joelho” 90°, junção “T”. As conexões de PVC foram fixadas no painel

utilizando-se pedaços de tubo de PVC de 40 mm de diâmetro e 4 cm de comprimento. O painel com as conexões montadas é mostrado na **Figura 8**.

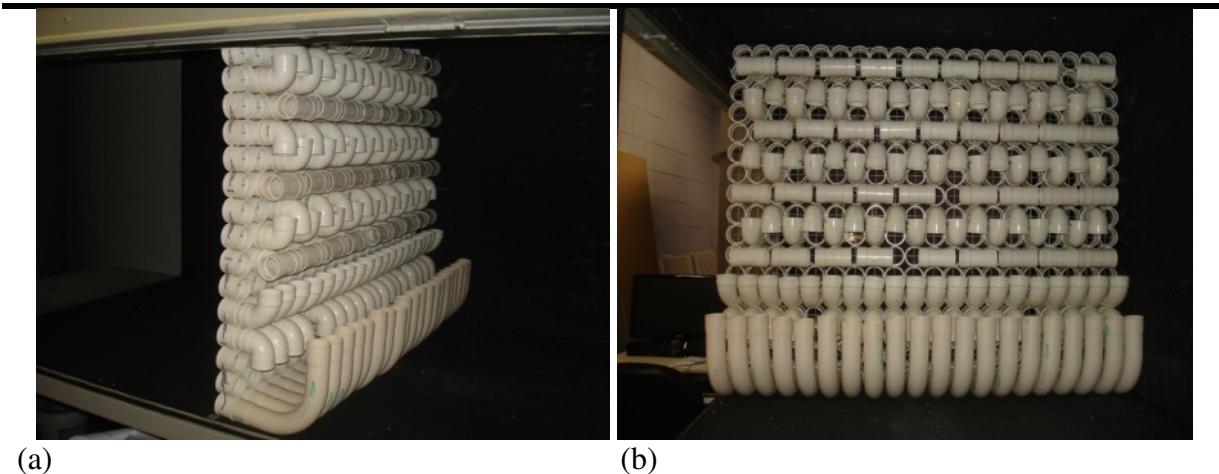


Figura 8: Painel de conexões de PVC na configuração 1. (a) Vista lateral; (b) Vista frontal, a partir da posição onde é instalado o modelo físico.

O perfil de velocidade na camada limite atmosférica, para diferentes tipos de rugosidades, pode ser expressa pela lei da potência (BARLOW, RAE, POPE, 1999),

$$\frac{U}{U_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (1)$$

onde U é a velocidade média na altura z e U_{ref} , a velocidade média na altura de referência. O expoente α varia de acordo com a rugosidade que se deseja simular. A intensidade de turbulência é um dos parâmetros utilizado para descrever a turbulência na seção de ensaio do túnel de vento. A intensidade de turbulência longitudinal I_u é definida como (BURTON, 2001):

$$I_u(z) = \frac{\sigma_u}{U} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (u_i - U)^2} \cdot \frac{1}{U} \quad (2)$$

onde σ_u é o desvio padrão da componente flutuante da velocidade na direção da velocidade média U a uma altura z e u_i é a componente flutuante da velocidade longitudinal.

Os perfis adimensionais das três velocidades ensaiadas e medidas na direção do eixo central da seção de ensaio são mostrados na **Figura 9**.

Observa-se que existe uma boa concordância entre os perfis, principalmente para entre as velocidades maiores (456 rotações por minuto (rpm) e 830 rpm). Apesar de alguns pontos discordantes, o perfil para a 124 rpm segue a mesma tendência dos outros perfis. Quando comparados com os perfis da lei da potência, observa-se que possuem a mesma tendência de crescimento.

Na **Figura 10** são mostrados os perfis adimensionais para a intensidade de turbulência na direção do eixo central da seção de ensaio. Apresentam discordâncias, mas possuem comportamentos semelhantes para as três velocidades ensaiadas. Quando comparados com os perfis obtidos por Davenport (BLESSMANN, 1995) observa-se que há uma grande semelhança com a curva B, para rugosidade média.

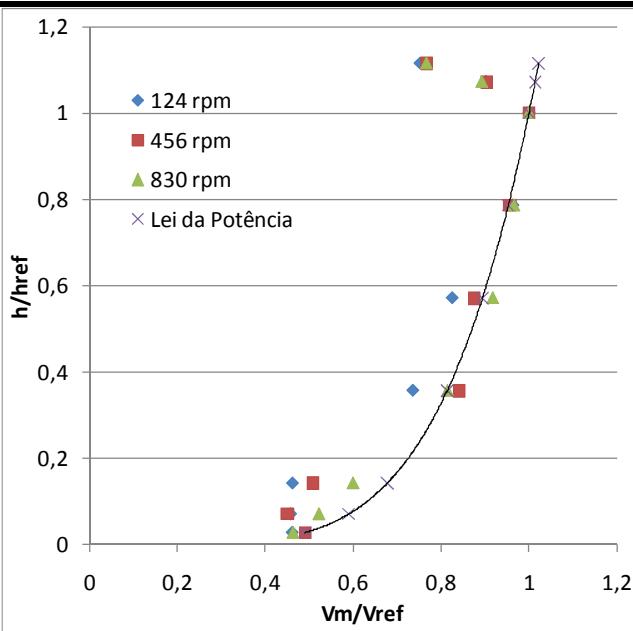


Figura 9: Perfis adimensionais na direção do eixo central da seção de ensaio para as três velocidades ensaiadas ($h_{ref}=0,7$ m e V_{ref} =velocidade na altura de referência), comparadas com a curva da lei da potência, para $\alpha=0,2$ (Matsumoto e Labaki, 2012).

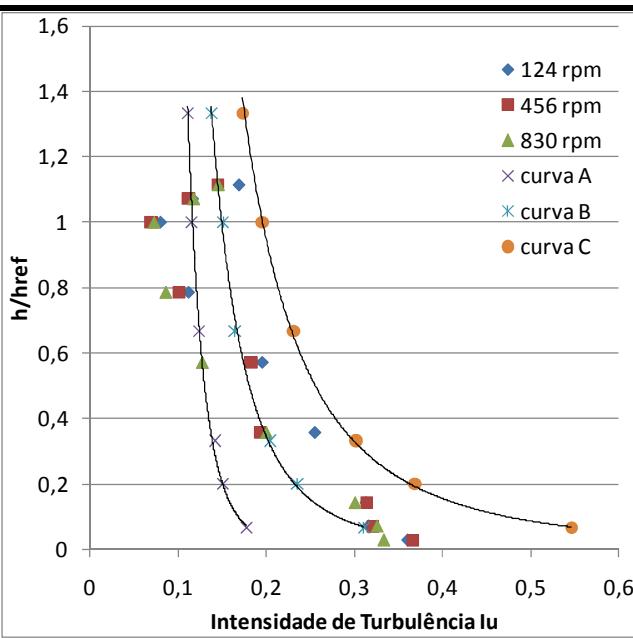


Figura 10: Perfis da intensidade de turbulência longitudinal (I_u) na direção do eixo central do túnel de vento para as três velocidades ensaiadas ($h_{ref}=0,70$ m), comparadas com as curvas para três diferentes rugosidades descritas por Davenport (Matsumoto e Labaki, 2012).

3 EXEMPLOS DE ENSAIOS REALIZADOS NO TÚNEL

Estudos experimentais, como ensaios em túnel de vento, ferramentas computacionais e/ou modelos matemáticos, são ferramentas importantes que permitem uma análise das transformações urbanas ou arquitetônicas aplicadas ao tecido urbano (quadras, bairros) ou em áreas pré-definidas na implementação de edifícios.

Como exemplo é possível destacar o ensaio realizado com modelo reduzido de área urbana (Bairro São José/Campinas/SP/Brasil), com duas configurações: sem vegetação e com vegetação (Figura 11 e Figura 12).



Figura 11: Modelo sem vegetação - área urbana.



Figura 12: Modelo com vegetação - espécies ypê-amarelo/Tabebuia chrysotricha e jambolão/Syzygium cumini L.

A maior dificuldade encontrada foi na confecção da escala dos modelos das espécies arbóreas analisadas, o que culminou no desdobramento em uma pesquisa de Iniciação Científica pelo laboratório. De qualquer forma, foi possível medir os valores de velocidade das duas configurações propostas, com as alterações na implantação dos conjuntos de espécies analisadas.

Para a verificação de propostas, podem-se utilizar técnicas para visualização qualitativa do fluxo de ar com fumaça ou técnica de erosão com areia e, para medições quantitativas, são utilizados anemômetros de fio quente e/ou tubo de Pitot, que permitem medir as velocidades das correntes que incidem sobre o modelo.

Se pensarmos nas condições internas de uma edificação, quantificar variáveis como velocidade e coeficiente de pressão; permite uma análise do comportamento do ar nos ambientes a fim de promover o conforto térmico e higiênico; bem como, verificar o aproveitamento das aberturas quanto ao consumo de energia e distribuição do fluxo.

Neste sentido foi realizada pesquisa para análise do elemento arquitetônico *shed* em projetos de hospitais. Esse elemento é utilizado para promover a iluminação e a ventilação natural. Como objeto de estudo, foram analisados dois trechos dos projetos dos hospitais da Rede Sarah Kubitschek: Belém e Brasília, Brasil (Erro! Fonte de referência não encontrada.).



Figura 13: Hospital Rede Sarah/Brasília e Sarah/Belém.

Os testes no túnel incluiram medições de velocidade do vento em vários pontos dentro e fora dos edifícios, utilizando como equipamento o anemômetro de fio quente (Erro! Fonte de referência não encontrada.). A comparação entre os dois tipos de *sheds* é importante para elaborar recomendações de projetos visando um melhor uso da ventilação natural.



Figura 14: Modelo em escala reduzida do shed - Rede Sarah/Belém e parcial de resultado obtido..

4 COMENTÁRIOS

O túnel de vento auxilia na verificação do espaço urbano e do edifício quanto à questão ambiental e, é de fundamental importância para a compreensão das condições atuais e que poderão fundamentar análises futuras sobre áreas semelhantes às analisadas.

Diante das pesquisas e trabalhos que foram e estão sendo desenvolvidos na área ambiental no LaCAF, este instrumento tem como foco a obtenção de dados qualitativos e quantitativos que poderão subsidiar os procedimentos de avaliação de desempenho ambiental.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento deste projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Barlow, J. B.; Rae JR., W. H.; Pope, A. Low-Speed Wind Tunnel Testing. *John Wiley & Sons*, New York, 3. ed., 713 p., 1999.
- Barros, A. B. *Projeto Preliminar de Túnel de Vento de Camada Limite Atmosférica para o Departamento de Arquitetura e Construção da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp*. TBX, 13 p., 2008.
- Blessmann, J. O vento na engenharia estrutural. *Editora da Universidade*, Porto Alegre, 166 p., 1995.
- Burton, W. V. Wind tunnel simulation of an atmospheric boundary layer. 73 p. *Master of Science in Mechanical Engineering*, Faculty of Texas Tech University, USA, 2001.
- De Bortoli, M. E.; Natalini, B.; Paluch, M. J.; Natalini, M. B. Part-depth Wind tunnel simulations of the atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90, p. 281, 2002.
- Matsumoto, E.; Labaki, L. C. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento utilizando tubos e conexões de PVC. *XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, ENTAC 2012*, Juiz de Fora, MG, Brasil, 2012 (*em publicação*).