

# Medição em túneis de vento da velocidade do ar próxima à parede para estudos de conforto de pedestres

*Near wall measurements for pedestrian comfort studies in wind tunnels*

Gabriel Borelli Martins<sup>a\*</sup>, André Barsaglini da Costa<sup>a</sup>,  
Paulo José Saiz Jabardo<sup>a</sup>, Gilder Nader<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratório de Vazão, Centro de Metrologia Mecânica, Elétrica e de Fluidos, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

\*E-mail: gborelli@ipt.br

## Palavras-chave:

ação do vento em pedestres;  
conforto de pedestres;  
túnel de vento.

## Keywords:

*pedestrian-level wind action;  
pedestrian comfort; wind tunnel.*

## Resumo

O ambiente urbano está em constante transformação e seu planejamento adequado é fundamental para garantir a qualidade de vida da população. Uma ferramenta útil no estudo do ambiente urbano é o túnel de vento, que permite, por meio de ensaios em modelos reduzidos, avaliar condições de conforto ambiental, de dispersão de contaminantes e, também, de carga de vento nas estruturas. Esse trabalho tem foco em conforto de pedestres devido à ação mecânica do vento. O objetivo foi elaborar um compêndio de algumas técnicas experimentais utilizadas no túnel de vento do IPT para o estudo da ação do vento no nível dos pedestres em ambientes abertos, cada qual com suas limitações e vantagens de acordo com o problema a ser estudado. As técnicas analisadas e as conclusões obtidas foram: a erosão de areia é útil em uma análise preliminar e qualitativa de zonas planas de grande extensão; a anemometria de fio quente pode ser utilizada sempre e também é importante na investigação de efeitos de rajada, embora as medições sejam intrusivas e demoradas; os sensores Irwin, que foram desenvolvidos especificamente para o estudo de conforto de pedestres, devem ser cuidadosamente fabricados e calibrados, mas podem ser instalados em vários pontos ao longo do piso do modelo.

## Abstract

*The urban environment is dynamic and is constantly changing. Therefore, a proper planning is required in order to guarantee individuals' well-being. A useful tool to study the urban environment is the wind tunnel which allows, through scaled-model testing, the*

*evaluation of pedestrian comfort and pollutant dispersion as well as the evaluation of wind action on structures. This paper is focused on the pedestrian-level comfort due to wind mechanical action on outdoor spaces. The main goal was to compare experimental techniques used with this purpose in IPT's wind tunnel. The analyzed techniques and the obtained conclusion were: the sand erosion technique is useful when studying large flat areas from the qualitative point of view; hotwire anemometers are always useful, especially when gusts must be taken into account, although they can be highly intrusive and time consuming; Irwin sensors, developed specifically for near-wall measurements concerning pedestrian comfort studies, must be carefully manufactured and calibrated but can be installed in a large number of points along the model floor.*

## 1 Introdução

O escoamento do vento em ambientes urbanos é constantemente alterado por novas construções. A interação destas construções com o vento atmosférico resulta em regiões de baixa velocidade em que existe a possibilidade da formação de ilhas de calor e a dificuldade na dispersão de contaminantes; e regiões de alta velocidade no nível dos pedestres onde há a possibilidade de desconforto e o risco de acidentes (BLOCKEN; CARMELIET, 2004). Túneis de vento são ferramentas extremamente úteis no estudo desses problemas, oferecendo possibilidade de planejamento do ambiente construído. A investigação experimental de problemas que envolvem a ação do vento em pedestres traz, contudo, certas dificuldades e desafios, apresentados e discutidos nesse artigo.

Primeiramente, é importante distinguir o conforto devido à ação mecânica do vento, abordado neste trabalho, do conforto térmico. O estudo de conforto térmico em ambientes abertos sujeitos à ação do vento é bastante complexo, envolvendo diversas variáveis, sejam elas variáveis ambientais, como velocidade, temperatura e umidade ou variáveis relacionadas aos indivíduos, como metabolismo e vestimenta. O conforto pela ação mecânica do vento leva em consideração apenas o efeito do vento nas pessoas. Na maioria dos casos, estando as vestimentas adequadas às condições climáticas, os critérios de conforto térmico são respeitados se a ação do vento em si não trouxer problemas de conforto (LAWSON, 1975).

A primeira grande dificuldade na análise de conforto devido à ação do vento em pedestres diz respeito aos critérios que devem ser adotados. Não existe consenso quanto ao critério ideal e diversos trabalhos tratam do assunto, seja na proposição ou na comparação de critérios de conforto, como Blocken e Carmeliet (2004), Melbourne (1978), Bottema (1993), Koss (2006), Willemsen e Wisse (2007) e Stathopoulos (2009). Os trabalhos de Bottema (1993) e Koss (2006) tratam de critérios de conforto e trazem diversas comparações bastante interessantes. De modo geral, os critérios se resumem à estipulação de uma velocidade limite, considerando ou não rajadas, e à probabilidade de ultrapassar essa velocidade, como mostrado pelas **Equações 1 e 2**:

$$U_{eq} = \bar{U} + g\sigma_U \leq U_{lim} \quad (1)$$

$$P(U_{eq} \geq U_{lim}) \leq P_{lim} \quad (2)$$

Nestas equações,  $U_{eq}$  é a velocidade equivalente, ou velocidade de rajada, uma vez que é definida como a soma da velocidade média  $\bar{U}$  com o produto do desvio padrão da velocidade  $\sigma$  pelo fator de pico  $g$ . O fator de pico está relacionado com o período da rajada.  $U_{lim}$ , por sua vez, é o limite de velocidade considerado que em tese varia de acordo com a atividade praticada e com o critério (conforto ou perigo). A probabilidade de se exceder a velocidade limite é representada pelo termo  $P(U_{eq} \geq U_{lim})$  da **Equação 2**. Novamente, em cada critério, seja ele de conforto ou de perigo, são dados valores limites de probabilidade de se exceder a velocidade limite ( $P_{lim}$ ).

Métodos numéricos e experimentais são empregados para a determinação das velocidades locais que, em conjunto aos dados meteorológicos e ao critério adotado, determinam as condições locais de conforto. Tratando especificamente dos métodos experimentais, a complexidade dos modelos e a necessidade da medição de velocidade próxima da superfície (da ordem de 5 mm em modelos de escala 1:200) faz com que técnicas específicas de medição sejam empregadas nestes casos.

Este trabalho traz uma revisão de três técnicas e métodos de medição utilizados no estudo da velocidade do vento na altura de pedestres em modelos em escala reduzida. Inicialmente, o método de erosão de areia será apresentado. Embora esse forneça apenas uma aproximação dos valores de velocidade, é muito útil no estudo de áreas planas muito extensas, principalmente na identificação de zonas que devem ser mais bem estudadas. Em seguida, são abordadas técnicas de medição com anemômetros de fio quente, sendo identificadas suas vantagens e limitações. Finalmente, será apresentado um sensor diferencial de pressão desenvolvido por Irwin (1981), que atualmente é muito utilizado por laboratórios do mundo todo no estudo da ação mecânica do vento em pedestres por meio de ensaios em túnel de vento de modelos reduzidos (IRWIN, 1981; WU, STATHOPOULOS, 1994). Novamente, suas vantagens e limitações serão abordadas.

## 2 Necessidades impostas no estudo experimental de conforto de pedestres

Parte do estudo da ação mecânica do vento em pedestres, quando considerado ambientes urbanos abertos, é feita experimentalmente com modelos reduzidos em túneis de vento que simulam a camada limite atmosférica. Nas últimas décadas, a modelagem numérica, por meio de *softwares* de Fluidodinâmica Computacional (CFD, do acrônimo em inglês *Computational Fluid Dynamics*), demonstrou ser uma importante ferramenta de projeto e vem sendo utilizada de maneira complementar as técnicas experimentais (BLOCKEN; CARMELIET, 2004). Neste artigo, apenas a modelagem experimental será tratada, com enfoque em algumas técnicas comumente empregadas.

É importante ressaltar a necessidade de medidores omnidirecionais em estudos que envolvam a determinação da velocidade próxima à parede de modelos em escala reduzida de ambientes urbanos. Não se sabe de antemão a direção e o sentido do escoamento em cada ponto do modelo. Técnicas de visualização poderiam ser empregadas com este objetivo, contudo o trabalho envolvido para o mapeamento do escoamento nos diversos pontos do modelo para diversos ângulos de incidência do vento, sem considerar as altas intensidades de turbulência envolvidas, sugerem que essa não seja a melhor alternativa. Além disto, esse procedimento provavelmente implicaria em incertezas de medição adicionais. Desse modo, o ideal é trabalhar com sensores omnidirecionais.

Outra necessidade é a capacidade de medir grandes áreas de forma eficiente. Caso medidas pontuais sejam feitas, são necessários diversos sensores para medição simultânea ou um sistema automatizado de movimentação da sonda. Isto é importante para reduzir o tempo de ensaio, que pode ser bastante grande, dependendo da área que deve ser analisada. Novamente, uma alternativa que pode ser empregada para reduzir o tempo de ensaio, é a utilização prévia de técnicas de visualização para reduzir a área de estudo.

Sensores ópticos podem ser utilizados, desde que meçam as três componentes de velocidade. Apresentam a vantagem de não serem intrusivos. Contudo, em muitos casos, não há janela óptica para que sejam empregados. Além disso, o controle da densidade de partículas é, no geral, difícil devido às características geométricas dos modelos, à proximidade da parede e à turbulência. Sendo assim, embora técnicas ópticas possam ser ótimas alternativas em alguns casos, não serão tratadas neste trabalho pelos motivos descritos acima.

### 3 Técnica de erosão de areia

A técnica de erosão de areia é extremamente útil para investigar grandes áreas. Embora seja uma técnica substancialmente qualitativa, alguma informação quantitativa pode ser obtida (JABARDO et al., 2005). De qualquer forma, zonas críticas que necessitem de maiores investigações podem ser identificadas para posterior análise com outros medidores, como anemômetros de fio quente (LIVESEY et al., 1992).

A técnica consiste em espalhar uma fina camada de areia, de granulometria conhecida, o mais uniformemente possível na superfície do modelo. Uma foto é tirada antes do início do teste e posteriormente o ensaio é realizado em diferentes velocidades do vento. Cada velocidade é mantida constante no túnel de vento por alguns minutos e os padrões de erosão são registrados. Os grãos de areia se desprendem da superfície pelo fenômeno de erosão, que basicamente está ligado à velocidade de atrito na superfície do modelo, definido na **Equação 3**:

$$u_{*,0} = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (3)$$

Onde:

$u_{*,0}$  = velocidade de atrito na superfície do modelo em m/s;

$\tau_0$  = tensão de cisalhamento na superfície do modelo em N/m<sup>2</sup>;

$\rho$  = densidade do ar em kg/m<sup>3</sup>.

O diâmetro do grão de areia normalizado,  $d^+$ , definido na **Equação 4**, é bastante pequeno, menor que 5, o que indica que os grãos se encontram na subcamada viscosa, como mostrado no gráfico da **Figura 1** ( $y^+ < 5$ ), que apresenta a velocidade normalizada pela velocidade de atrito em função da distância normalizada (da mesma forma que foi feito para  $d^+$ ). Sendo assim, a erosão independerá do perfil de velocidades (JABARDO et al., 2005).

$$d^+ = \frac{u_* d}{\nu} \quad (4)$$

Onde:

$u_*$  = velocidade de atrito em m/s;

$d$  = diâmetro do grão de areia em m;

$\nu$  = viscosidade cinemática em m<sup>2</sup>/s.

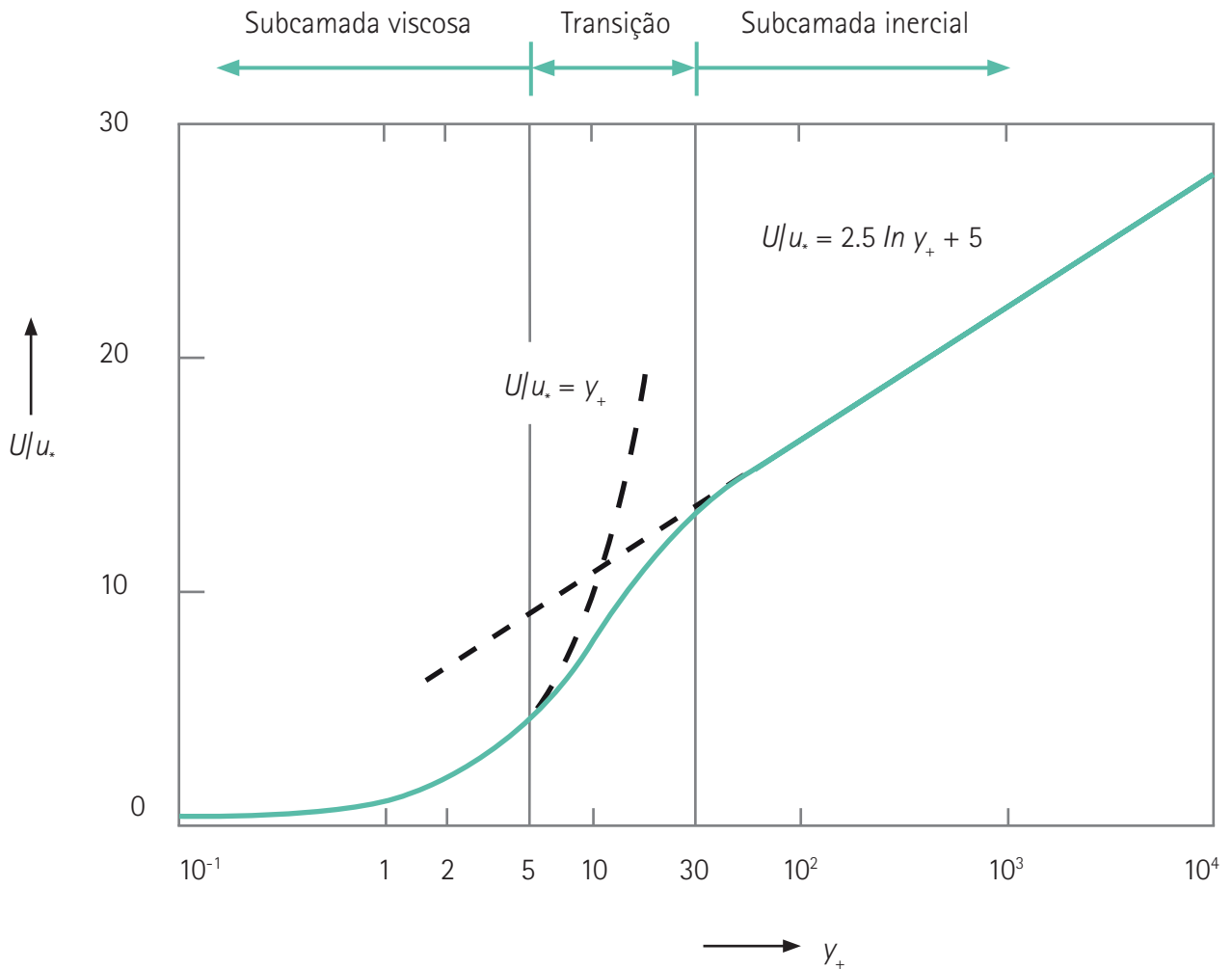


Figura 1 – Lei da parede.

Fonte: adaptado de Tennekes e Lumley (1972).

Para saber o valor aproximado da velocidade, inicialmente se determina a velocidade para a qual o fenômeno de erosão ocorre. Segundo Livesey et al. (1992), a velocidade limiar de desprendimento dos grãos de areia é de difícil determinação e depende, dentre outros fatores, do diâmetro dos grãos, rugosidade do modelo e turbulência local. Outra limitação do método é que deve ser aplicado apenas para terrenos planos. Caso seja necessário reproduzir as inclinações do terreno no modelo reduzido, não é recomendável utilizar a técnica de erosão.

Procedimentos básicos de processamento de imagem podem ser utilizados para facilitar a análise dos resultados obtidos nos ensaios em túnel de vento. No Túnel de Vento de Camada Limite Atmosférica (TVCLA) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo foi desenvolvido um procedimento que adota técnicas simples de processamento de imagem para aplicação nas figuras de erosão. Esse procedimento foi empregado por Oliveira et al. (2015a) e Oliveira et al. (2015b). Nesses trabalhos, foi realizado um estudo dos efeitos da verticalização de uma parcela da região leste da cidade de São Paulo (de acordo com o plano diretor da cidade) nas velocidades do vento no nível dos pedestres.

O procedimento consiste em separar as regiões de interesse por meio de máscaras, limiarizar a imagem (transformar a imagem inicial de 256 níveis de intensidade para uma imagem de dois níveis de intensidade a partir da escolha de um limiar de tom de cinza), aplicar um operador de dilatação para eliminar espaços vazios indesejados entre os grãos de areia, aplicar um operador de erosão de mesma dimensão que o operador dilatação para recuperar as bordas dos padrões de erosão originais, rotular a imagem, unir todas as imagens em uma figura apenas (com mapa de cores ou de contorno) e, finalmente, suavizar a figura resultante por meio da convolução de filtros lineares com o formato mostrado na **Equação 5**.

$$r(i,j)=\sum_{l,m} f(i+l,j+m)k(l,m) \quad (5)$$

Na **Equação 5**,  $r(i,j)$  é o valor do pixel na posição  $(i,j)$ , resultante da soma ponderada dos pixel da imagem original  $f(i+l,j+m)$ . Os coeficientes deste tipo de filtro são dados pela matriz  $k(l,m)$ . O exemplo mais simples deste tipo de matriz é dado abaixo, na **Equação 6**.

$$k = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

A **Figura 2** mostra duas imagens originais dos ensaios. A **Figura 2a** corresponde ao modelo antes do início dos ensaios e a **Figura 2b** corresponde ao padrão formado após o ensaio com velocidade do vento de 13,3 m/s na altura escolhida como referência.

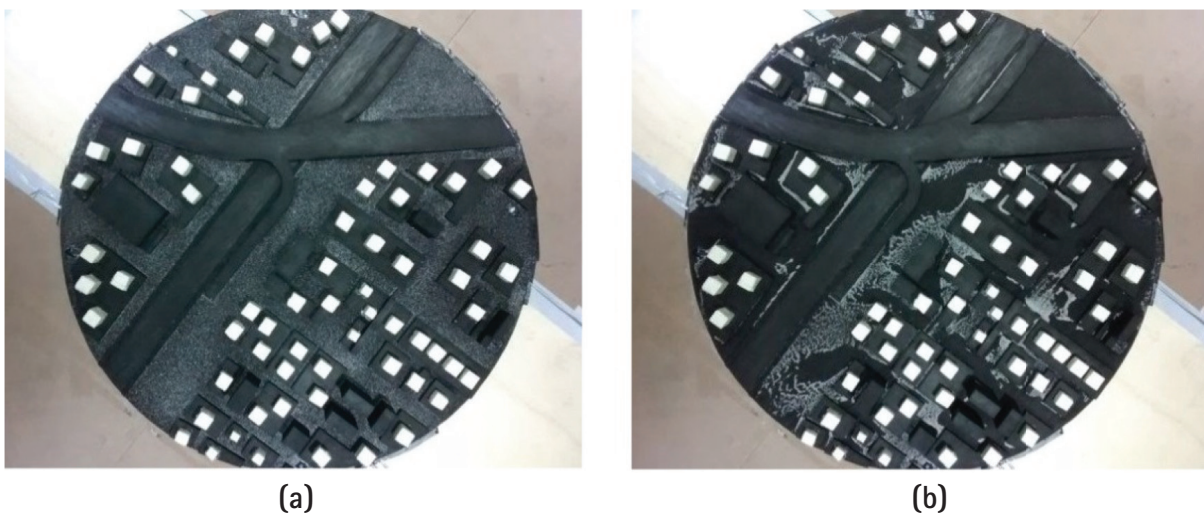


Figura 2 – Exemplos de imagens brutas do ensaio de erosão: (a) antes do início dos ensaios e (b) após o ensaio com velocidade de referência no túnel de vento de 13,3 m/s.

Fonte: elaborado pelos autores.

Na **Figura 3** é mostrada a máscara que foi aplicada nas imagens da **Figura 2**. Em seguida, foi feita a limiarização e aplicados operadores de dilatação e erosão. A aplicação desses operadores nessa sequência se chama fechamento e tem o objetivo de eliminar alguns espaços indesejados, como mostrado na **Figura 4**. Os resultados são mostrados nas imagens da **Figura 5**.



Figura 3 – Máscara aplicada nas imagens da Figura 2. As regiões em branco são as descartadas.  
Fonte: elaborado pelos autores.

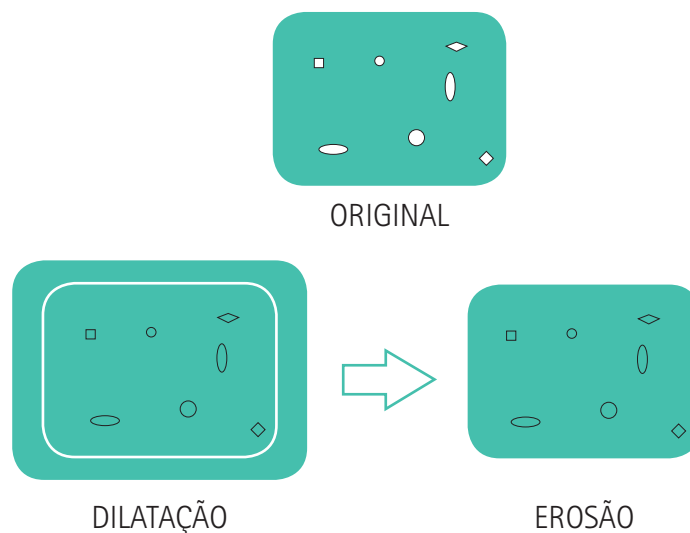


Figura 4 – Operadores dilatação e erosão aplicados em sequência para eliminar vazios.  
Fonte: elaborado pelos autores.



Figura 5 – Imagens da Figura 2 após aplicação da máscara e das operações de limiarização, dilatação e erosão.  
Fonte: elaborado pelos autores.

Após o processamento de todas as imagens, é possível atribuir a cada uma delas valores correspondentes, neste caso, a valores adimensionais de velocidade. O resultado é mostrado na **Figura 6** (após suavização). As regiões em vermelho correspondem às maiores velocidades no protótipo que podem ser desconfortáveis ou perigosas para os pedestres, ao passo que as regiões amarelas mais claras correspondem a zonas de baixa velocidade que podem representar problemas, sobretudo no que diz respeito à dispersão de contaminantes.



Figura 6 – Figura final após rotular todas as imagens do ensaio. Velocidades mais altas em vermelho e mais baixas em amarelo.  
Fonte: elaborado pelos autores.

## 4 Medição de velocidade próxima à superfície com anemômetros de fio quente

A anemometria de fio quente ainda é muito utilizada hoje, sobretudo no estudo de turbulência, mesmo com a evolução de técnicas ópticas não invasivas, tais como o LDA (*Laser Doppler Anemometry* – Anemometria a laser por efeito Doppler) e o TR-PIV (*Time-resolved PIV* – Sistema óptico de velocimetria por imagem de partículas).

A proximidade da parede traz consigo alguns efeitos na medição da velocidade com anemômetros de fio quente. Como tratado por Lanspeary (1997), esses efeitos são de origem aerodinâmica e térmica.

No que diz respeito à aerodinâmica, a própria geometria do suporte e dos prolongadores do filamento (sonda) influem no escoamento. Esses efeitos são considerados quando é realizada a calibração, contudo, não são os mesmos de quando a sonda é aproximada da superfície do modelo, resultando em erros de medição. Krishnamoorthy et al. (1985) mostram que a orientação e o posicionamento da sonda são importantes na medição da velocidade próxima à parede. No geral, a necessidade de inclinação do suporte (para medições muito próximas da parede) expõe sua maior parte, bem como os prolongadores, a uma região de maior quantidade de movimento, defletindo parte do escoamento para a superfície do modelo (LANSPEARY, 1997). Outro ponto que deve ser observado é que perto da parede, diferentemente das condições de calibração, a taxa de cisalhamento é grande, podendo aumentar ainda mais a distorção no campo de velocidades ao redor do filamento (KRISHNAMOORTHY et al., 1985).

Considerando escala do modelo de 1:200, as medições de velocidade no nível dos pedestres devem ser feitas a aproximadamente 5 mm, correspondente a 1 m na escala do protótipo (escala real). Como os ensaios são conduzidos à maior velocidade possível, visando a obter o maior número de Reynolds, pode-se considerar que  $y^+ \gg 5$ , e, portanto, desprezar efeitos térmicos devido à proximidade da parede.

Embora anemômetros de fio quente sejam boa alternativa para a medição da velocidade próxima à superfície do modelo, algumas dificuldades são observadas para a aplicação tratada neste trabalho. Primeiramente, uma sonda omnidirecional é necessária, ou um anemômetro de três filamentos que faça a medição simultânea das três componentes ortogonais da velocidade, como o mostrado na **Figura 7**, uma vez que a direção do escoamento normalmente não é conhecida. Além disso, o grande número de pontos de medição em conjunto com o estudo para vários ângulos de incidência do vento, que muitas vezes é necessário, tornam os ensaios muito demorados. Isso ocorre mesmo que seja adotado um sistema automático para o posicionamento da sonda, uma vez que, na maioria dos casos, edifícios e outras construções reproduzidas no modelo reduzido fazem com que o ensaio tenha que ser pausado diversas vezes para reposicionamento da sonda no sistema automático de posicionamento.



Figura 7 – Anemômetro de fio quente 3D.  
Fonte: elaborado pelos autores.

De qualquer forma, anemômetros a fio quente são bastante úteis. Caso o desvio padrão das três componentes ortogonais do vetor velocidade ou o tensor das tensões de Reynolds na altura dos pedestres seja de interesse, esse instrumento se apresenta, possivelmente, como a melhor opção.

## 5 Medição de velocidade com sensores Irwin

Tradicionalmente, o sensor omnidirecional desenvolvido por Irwin é composto de duas tomadas de pressão, sendo uma na altura da superfície do modelo e outra um pouco acima (IRWIN, 1981). Pode-se correlacionar, como exposto por Irwin (1981), a diferença de pressão entre essas duas tomadas com a velocidade do escoamento. O desenho técnico deste sensor é mostrado na **Figura 8**.

A grande vantagem dos sensores Irwin, além de serem sensores omnidirecionais, é que podem ser empregados em grande número concomitantemente aos ensaios de medição de pressão na fachada de edifícios. Não é incomum que estudos de conforto de pedestre sejam acompanhados de estudos de carregamento estático do vento e de comportamento dinâmico de edificações. Em todos esses casos, transdutores piezoresistivos de múltiplas tomadas de pressão são utilizados. Sendo assim, o tempo total de ensaio é significativamente reduzido. Esse tipo de sensor é capaz de medir não apenas as velocidades médias, mas também, como será indicado mais à frente, as variações de velocidade de baixa frequência.

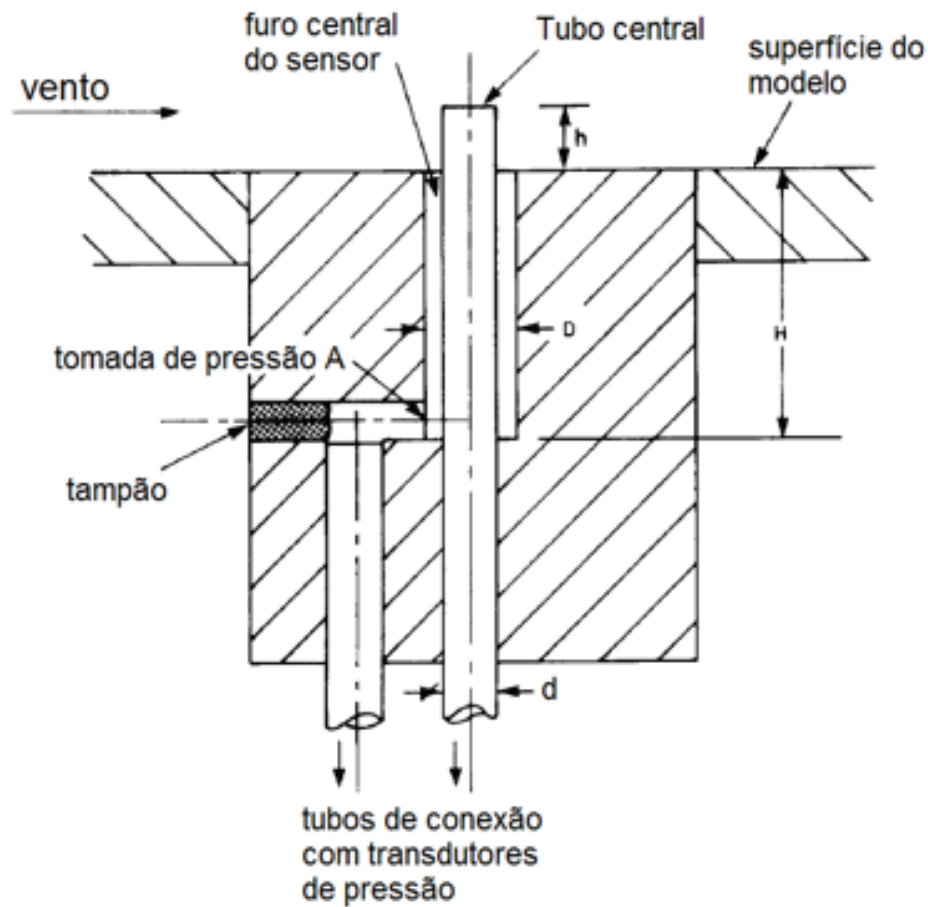


Figura8 – Desenho técnico do sensor Irwin.  
 Fonte: Adaptado de Irwin (1981).

O princípio de medição deste tipo de sensor é análogo ao de medidores de tensão de cisalhamento como o tubo de Preston (IRWIN, 1981). Pensando em uma camada limite turbulenta, a região próxima da parede obedece a uma lei universal do tipo mostrado na **Equação 7**.

$$U = u_* f\left(\frac{u_* z}{\nu}\right) \quad (7)$$

Onde:

$U$  = velocidade média em m/s;

$u_*$  = velocidade de atrito em m/s;

$z$  = distância da parede em m;

$\nu$  = viscosidade cinemática em m<sup>2</sup>/s.

Na **Equação 7**,  $f$  é uma função universal que, como explicado por Irwin (1981), compreende a subcamada viscosa, a região cuja lei logarítmica é válida e a região de transição. Todas estas regiões estão identificadas na **Figura 1**.

Como o perfil de velocidades médio segue uma lei universal, é de se esperar que a distribuição de pressão média em um obstáculo também siga uma lei universal. Sendo assim, a diferença de pressão entre dois pontos do obstáculo pode ser relacionada com a velocidade de atrito  $e$ , consequentemente, com a tensão de cisalhamento, a exemplo dos tubos de Preston. Levando-se em consideração a **Equação 7**, pode-se isolar  $u_*$  e obter a velocidade em função da diferença de pressão entre os dois pontos de medição do sensor.

Uma relação simples entre velocidade e variação de pressão instantâneas no obstáculo é a **Equação 8** (IRWIN, 1981; WU; STATHOPOULOS, 1994).

$$Q = \alpha + \beta \sqrt{\Delta p} \quad (8)$$

Onde:

$Q$  = módulo de velocidade em m/s;

$p$  = pressão em Pa;

$\alpha$  e  $\beta$  = coeficiente de calibração.

Foi utilizada a nomenclatura  $Q$  e não  $U$  para a velocidade, pois este sensor não é capaz de medir a direção do escoamento (notação condizente à notação adotada pelas referências deste trabalho). Sensores Irwin multifuros podem ser empregados caso a direção do escoamento seja de interesse (PALOMBI, COOK, 2010).

Contudo, para a determinação dos valores instantâneos de velocidade, alguns cuidados devem ser tomados. Os valores de  $\Delta p$  devem ser filtrados com um filtro passa baixa, que elimina os componentes do sinal de pressão com frequências superiores a  $1/T$ , de modo que a relação  $Tu_* / h \gg 1$  seja verdadeira, sendo  $T$  o período e  $h$  a altura de medição. Conforme o valor de  $Tu_* / h$  se aproxima de 1, o perfil de velocidade média tende a se distanciar da lei da parede (IRWIN, 1981). Sendo assim, existe um limite na medição da flutuação da velocidade. Além disso, como indicado por Wu e Stathopoulos (1994) e Irwin et al. (1979), nos casos em que a resposta em frequência é importante, deve-se trabalhar com mangueiras curtas (da ordem de 170 mm para taxa de amostragem de 100 Hz), restritores que aumentem o amortecimento ou correções no sinal digital por meio de função de transferência oriunda de calibração prévia (IRWIN; COOPER; GIRARD, 1979). Caso contrário, diferenças consideráveis são observadas na amplitude e na fase dos sinais de pressão.

Alguns comentários adicionais podem ser feitos no que diz respeito aos sensores Irwin. As diferenças de pressão envolvidas são muito baixas, de modo que tais sensores não são indicados para a medição de velocidades abaixo de 3 m/s (IRWIN, 1981), pois a diferença de pressão é menor que 5 Pa. Isto não costuma ser problemático para investigações de conforto de pedestres devido à ação mecânica do vento em túneis de vento. Trabalha-se com a maior velocidade possível no interior do túnel e as velocidades de interesse neste tipo de estudo são as mais altas. A interferência entre sensores é verificada quando um sensor se encontra na esteira do outro à distância inferior a  $12d$  (vide **Figura 8**). A altura  $h$  protuberante do sensor deve, preferencialmente, ser a própria altura de medição da velocidade, diferentemente do indicado por Irwin (1981). Erros tendem a aparecer quando a altura de medição da velocidade é diferente de  $h$  (WU, STATHOPOULOS, 1994).

Alguns sensores Irwin foram confeccionados para serem testados e utilizados em estudos de conforto de pedestres no TVCLA do IPT. Os desenhos técnicos foram confeccionados a partir das indicações do trabalho de Irwin (1981). Um dos sensores, pronto para uso, é mostrado na **Figura 9**.



**Figura 9 – Sensor Irwin utilizados nos testes iniciais.**  
Fonte: elaborado pelos autores.

Os sensores foram montados em uma placa plana na saída de um dos túneis de vento do IPT, que possui seção de testes de 0,5 m de largura por 0,5 m de altura para calibração, como mostrado na **Figura 10**. A **Figura 11**, por sua vez, mostra como o sensor deve ser instalado na superfície do modelo. Inicialmente, foi realizada uma verificação com um sistema de varredura de pressão por múltiplos canais, com 16 canais, sensores piezoresistivos, modelo DSA 3217 fabricado pela *Scanivalve*.

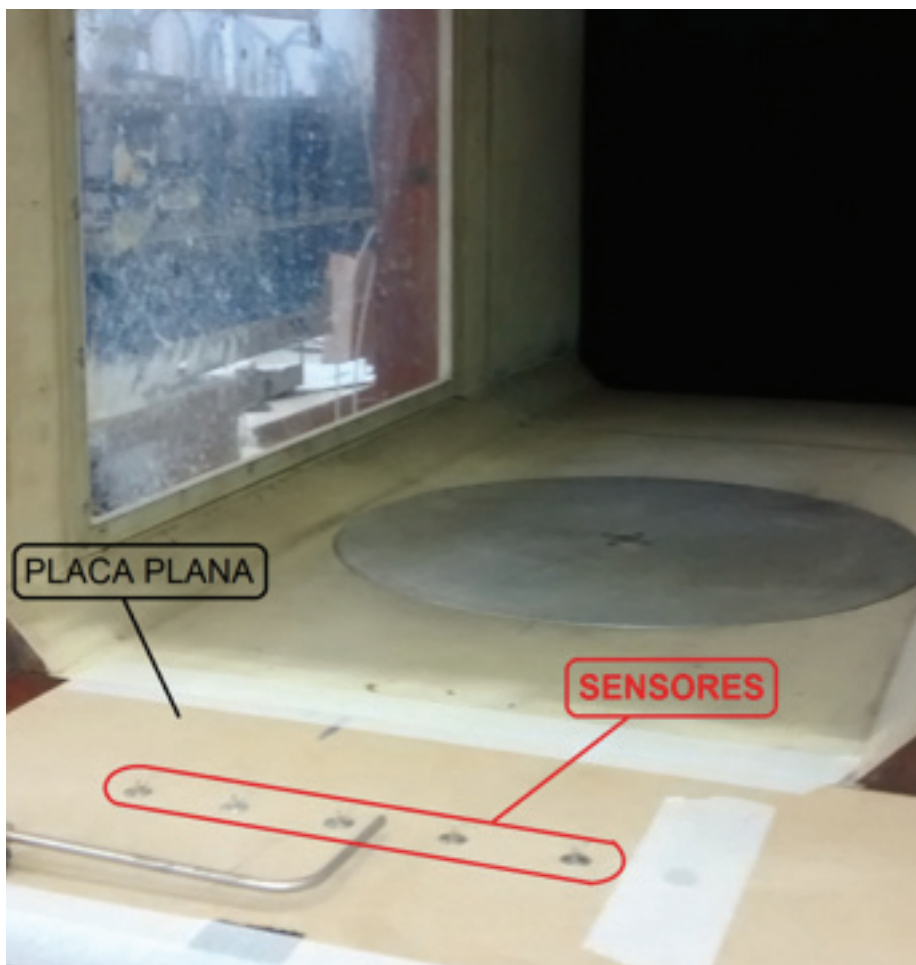


Figura 10 - Sensores Irwin montados em placa plana na saída de um dos túneis de vento do IPT.  
Fonte: elaborado pelos autores.



Figura 11 - Detalhes de sensores montados em placa plana da saída do túnel de vento.  
Fonte: elaborado pelos autores.

Por simplicidade, a **Equação 7** foi utilizada e os valores de velocidade foram medidos com um tubo de Pitot. As diferenças de pressão foram então medidas para diversas velocidades e incidências do vento. Percebeu-se que alguns sensores não apresentavam comportamento omnidirecional, ao passo que outros apresentavam, como o mostrado na **Figura 12**. Parte do motivo para este comportamento em alguns sensores está relacionado com a qualidade da fabricação dos mesmos. Os resultados sugerem que há necessidade de melhor controle dimensional e cuidado na fixação dos sensores na superfície do modelo. A fixação do tubo protuberante, por exemplo, mostrou-se problemática. O furo por onde este elemento é fixado apresenta certa folga e para fixação foi utilizada cola epóxi. Talvez o melhor seja um ajuste por interferência, de modo que haja melhor centralização do tubo protuberante com o furo na superfície do sensor, o que, por sua vez, melhoraria a omnidirecionalidade do sensor Irwin.

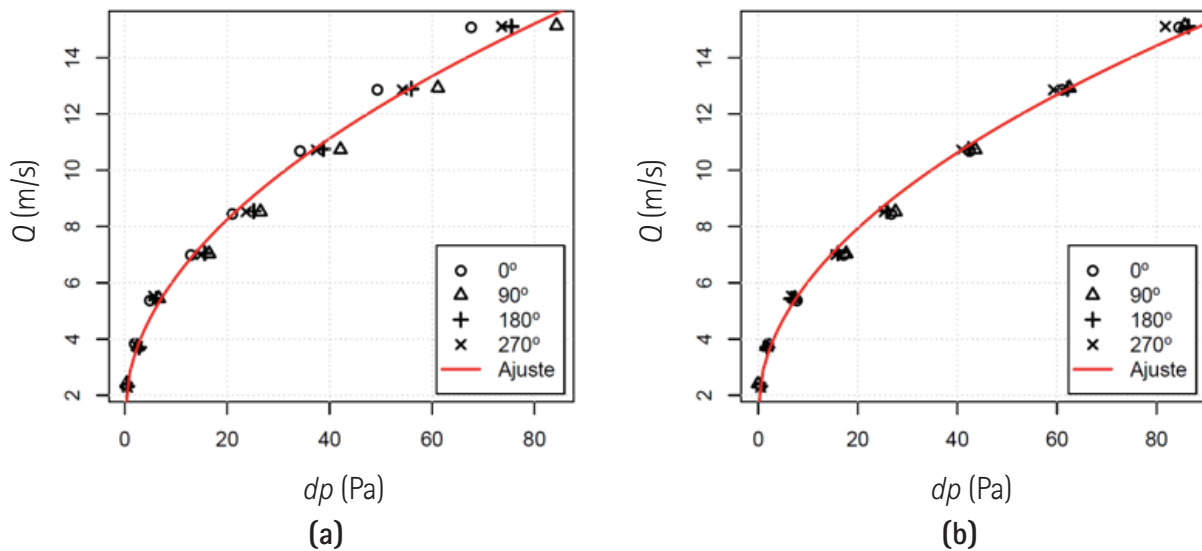


Figura 12 – Valores médios obtidos para quatro ângulos de incidência do vento e ajuste empregado no (a) sensor 1 e no (b) sensor 2.

Fonte: elaborado pelos autores.

## 6 Conclusões

Este trabalho discutiu algumas técnicas de medição voltadas para estudos de conforto de pedestres utilizando modelos reduzidos em túneis de vento. A partir do que foi exposto, algumas conclusões puderam ser tiradas.

Ensaio de erosão de areia podem ser empregados em modelos sem topografia, principalmente na identificação de zonas críticas pensando em risco de acidentes e no conforto de pedestres (velocidades elevadas) e pensando na dispersão de contaminantes e na formação de ilhas de calor (velocidades baixas). É uma técnica qualitativa particularmente interessante para investigação de grandes áreas.

Anemômetros de fio quente são instrumentos importantes, neste tipo de estudo e devem ser utilizado quando há necessidade de menores tempos de resposta na medição. Ademais, costumam ser empregados na calibração dos sensores Irwin.

Os sensores Irwin foram desenvolvidos especificamente para a aplicação em estudos de conforto de pedestres em ambientes externos. Sua fabricação requer certo cuidado, mas é relativamente simples. Podem ser empregados em grande quantidade se utilizado conectados a um sistema de varredura de pressão por múltiplos canais, reduzindo-se assim, de forma significativa, o tempo total de ensaio. Sua limitação está no tempo de resposta, uma vez que é indicado apenas para velocidades médias e resposta de baixa frequência, e na medição de velocidades baixas, abaixo de 3 m/s, o que não costuma ser problemático na aplicação discutida. Embora o valor de 3 m/s tenha sido encontrado na literatura, alguns testes realizados mostraram que o ideal é trabalhar com velocidades mais altas uma vez que a diferença de pressão encontrada para estas velocidades é inferior a 5 Pa.

## 7 Agradecimentos

Agradecemos a colaboração dos técnicos da oficina mecânica do IPT pela fabricação dos sensores Irwin utilizados neste trabalho. Além disso, gostaríamos de agradecer à engenheira Paula Bregiatto de Oliveira por ter realizado os ensaios de erosão de areia durante o seu período de estágio no IPT.

## 8 Referências

BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. Pedestrian wind environment around buildings: literature review and practical examples. **Journal of Thermal Envelope and Building Science**, v. 28, n. 2, p. 107-159, 2004.

BOTTEMA, M. **Wind climate and urban geometry**. 1993. Tese (Doutorado) - Technical University Eindhoven, Eindhoven, 1993.

IRWIN, H. P. A. H. A simple omnidirectional sensor for wind-tunnel studies of pedestrian-level winds. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 7, n. 3, p. 219-239, 1981.

IRWIN, H. P. A. H.; COOPER, K. R.; GIRARD, R. Corrections of distortion effects caused by tubing systems in measurements of fluctuating pressures. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 5, n. 1-2, p. 93-107, 1979.

JABARDO, P. J. S. J. et al. Influence of integral length scales on sand erosion techniques. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING (COBEM), 18., 2005, Ouro Preto. **Proceedings...** Rio de Janeiro: ABCM, 2005.

KRISHNAMOORTHY, L. V. et al. Effect of wire diameter and overheat ratio near a conducting wall. **Experiments in Fluids**, v. 3, n. 3, p. 121-127, 1985.

KOSS, H. H. On differences and similarities of applied wind comfort criteria. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 94, n. 11, p. 781-797, 2006.

LANSPEARY, P. V. **Establishing very low speed, disturbance-free flow for anemometry in turbulent boundary layers**. 1997. Tese (Doutorado) - The University of Adelaide, Adelaide, 1997.

LAWSON, T. V. The effect of wind on people in the vicinity of buildings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 4., 1975, London. **Proceedings...** Cambridge: Cambridge University Press, 1975.

LIVESEY, F. et al. Enhanced scour tests to evaluate pedestrian level winds. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 44, n. 1-3, p. 2265-2276, 1992.

MELBOURNE, W. H. Criteria for environmental wind conditions. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 3, n. 2-3, p. 241-249, 1978.

OLIVEIRA, P. B. et al. Consequences of verticalization. In: INTERNATIONAL PLEA CONFERENCE, 31., 2015, Bologna, Italy. **Proceedings...** Bologna: PLEA, 2015a.

OLIVEIRA, P. B. et al. Impacts of urban verticalization in the vicinity of FATEC Tatuapé. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 14., Porto Alegre, Brazil. **Proceedings...** Porto Alegre: PUCRS, 2015b.

PALOMBI, E.; COOK, N. Development and application of a directional Irwin sensor. In: UK CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 9., 2010, Bristol. **Proceedings...** London: Wind Engineering Society, 2010.

STATHOPOULOS, T. Wind and comfort. In: EUROPEAN & AFRICAN CONFERENCE ON WIND ENGINEERING (EACWE), 5., Florence, Italy, 2009. **Proceedings...** Kanagawa: IAWE, 2009.

TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. **A first course in turbulence**. Cambridge: MIT Press, 1972.

WILLEMSSEN, E.; WISSE, J. A. Design for wind comfort in the Netherlands: Procedures, criteria and open research issues. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 95, n. 9, p. 1541-1550, 2007.

WU, H.; STATHOPOULOS, T. Further experiments on Irwin's surface wind sensor. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 53, n. 3, p. 441-452, 1994.