

## DESEMPENHO DE UM DISPOSITIVO DE VENTILAÇÃO NATURAL, BASEADO NOS VÓRTICES GERADOS EM UMA ASA DELTA: MEDIDAS EM PROTÓTIPO

Roberto M. Girardi

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias

CEP.: 12.228-900 São José dos Campos, SP

e-mail: [girardi@aer.ita.br](mailto:girardi@aer.ita.br)

**RESUMO.** Dispositivo de ventilação natural é um aparato que promove a renovação do ar do interior de uma instalação predial (galpão, prédio, casa, etc), usando a energia do vento que passa sobre o teto de tal instalação. O dispositivo de ventilação natural estudado neste trabalho tem como princípio de funcionamento a depressão observada nos grandes vórtices que se formam no extradorso de uma asa delta, quando esta é posicionada com grande ângulo de ataque em relação à direção do escoamento não perturbado (vento atmosférico). Este dispositivo pode ser descrito da seguinte maneira: (i) Para promover a retirada do ar do ambiente interno utiliza-se um tubo circular com diâmetro constante, que atravessa o teto do prédio e liga as regiões interna e externa, como se fosse uma chaminé. (ii) Na extremidade inferior do tubo coloca-se uma entrada tipo boca de sino, a qual reduz a perda de carga e incrementa a vazão succionada. (iii) Na extremidade superior é posicionada a asa delta, com ângulo de ataque negativo, de maneira que os vórtices gerados ficam posicionados entre a superfície da asa e a seção de saída do tubo. Nesta região é estabelecida uma pressão menor que a atmosférica, a qual provoca um fluxo de ar entre as regiões interna e externa da instalação predial. Deve-se lembrar que a pressão no interior do prédio é aproximadamente igual a pressão ambiente local. O objetivo do presente artigo é relatar os resultados de uma série de experimentos obtidos com um protótipo instalado no teto do Laboratório de Engenharia Aeronáutica. Para mostrar o desempenho deste dispositivo foram feitas medidas da vazão succionada, direção do dispositivo, velocidade e direção do vento. Todas as medidas são realizadas por um sistema de aquisição de dados e um trabalho elaborado teve que ser realizado para a redução e análise dos resultados.

**Palavras Chave:** Ventilação Natural, Asa Delta, Medidas em Protótipo

### 1. Introdução

Como pode ser visto na figura 1(a), o objetivo do dispositivo estudado neste trabalho é succionar o ar do interior de uma instalação predial, promovendo a renovação do mesmo, o qual é forçado a entrar no prédio através de aberturas, tais como portas e janelas. A sucção do ar, realizada pelo dispositivo de ventilação natural, ocorre devido ao fato que a pressão na região inferior da asa delta, em alto ângulo de incidência, é menor que a pressão ambiente, existente no interior da instalação predial. Esta depressão é causada pela passagem do vento pela asa delta, a qual é mantida alinhada à direção da velocidade do vento, isto é, o plano vertical que passa pela altura do triângulo (asa delta) deve estar alinhado com a direção do vento.

Na figura 1(b) é mostrada a vista frontal do dispositivo de ventilação natural, o qual é constituído basicamente por: um tubo reto (2), que é fixado no teto da instalação predial, uma peça que faz a transição de uma seção circular à uma seção trapezoidal (4), uma asa delta (5) e uma aleta diretora (6), que mantém o dispositivo alinhado com a direção do vento. Um detalhe importante é a forma da parte inferior do tubo reto, entrada tipo "boca de sino" (1), que facilita a admissão do ar no dispositivo, minimizando perdas de pressão, com conseqüente aumento da vazão de ar aspirado. A saia (3) evita que água da chuva entre no tubo e, ao mesmo tempo, minimiza o ar que escoar pelo vão entre o tubo reto (2) e a peça de transição (4), a qual gira em relação ao tubo reto.

O dispositivo descrito acima é uma evolução do aparato analisado por Girardi (1999, 2000), onde a ventilação natural é promovida devido a uma diferença de pressão entre a região interna de uma instalação predial (aproximadamente igual à ambiente) e a região na base de um corpo rombudo, cuja pressão é sempre mais baixa que a pressão ambiente, devido a formação e liberação de vórtices, os quais constituem a esteira deste corpo (Fage & Johansen, 1927).

No dispositivo tratado no presente trabalho, a região de baixa pressão, localizada na parte superior do dispositivo, tem origem nos vórtices longitudinais que aparecem em uma asa delta quando a mesma é posicionada com alto ângulo de ataque em relação à direção do vento. Estes vórtices são formados nos bordos de ataque da asa delta, devido à liberação e posterior enrolamento da vorticidade gerada na superfície da asa (Katz & Plotkin, 1991). Devido aos valores elevados de circulação, o coeficiente de pressão na região do núcleo destes vórtices é muito baixo, sendo esta a causa da elevada sustentação encontrada em asas delta em alto ângulo de ataque.

A forma em planta da asa delta, isto é, o alongamento e o enflechamento, assim como o ângulo de ataque tem influência na intensidade (circulação) dos vórtices longitudinais que se estabelecem no extradorso da asa (Rinoie et al., 1997). Quanto maior o ângulo de ataque maior a intensidade do vórtice e menores são os valores encontrados para o coeficiente de pressão. Com base nesta informação poder-se-ia concluir que o ângulo de incidência deveria ser maximizado para que o mesmo ocorresse com a vazão succionada pelo dispositivo de ventilação natural. No entanto, existe um limite para este ângulo de ataque, que está associado a um fenômeno conhecido como rompimento do vórtice (“vortex breakdown”), no qual ocorre uma desorganização do escoamento vortical, associada a uma redução da circulação e, conseqüentemente, incremento do coeficiente de pressão (pressão fica menos negativa) no núcleo dos vórtices (Kuo & Hsu, 1997).

Além dos aspectos discutidos no parágrafo anterior, outros parâmetros também têm influência sobre a vazão succionada pelo dispositivo proposto neste trabalho: (i) a distância da superfície da asa delta à seção de saída do escoamento (peça de transição), (ii) a posição relativa entre o eixo de simetria do tubo e o apex da asa delta e (iii) a razão entre a corda da asa delta (dimensão característica) e o diâmetro do tubo. Neste trabalho, os parâmetros que influem sobre o desempenho do dispositivo não serão variados, sendo isto o escopo de outro trabalho realizado com modelos instalados no interior de um túnel de vento.

No presente trabalho serão apresentados os resultados obtidos para uma única configuração, construída em escala 1:1 (protótipo), a qual foi instalada no teto de uma instalação predial, ficando a mesma sujeita às variações de velocidade e direção do vento atmosférico. Para se determinar o desempenho do protótipo foram feitas medidas de direção e velocidade do vento, da vazão succionada e da direção da parte móvel do dispositivo. Para tanto, foram utilizados sensores disponíveis no mercado e também foi necessário construir medidores especiais, tal como o medidor de vazão succionada. Os sinais destes sensores foram condicionados e enviados a um micro computador, equipado com placa de aquisição de dados.

Devido às variações de velocidade e direção do vento e, também, devido às características dinâmicas (respostas dos sistemas dinâmicos envolvidos) da parte móvel do dispositivo e dos sensores usados, a análise dos resultados é uma tarefa relativamente complexa, a qual teve que ser desenvolvida no decorrer do presente trabalho.

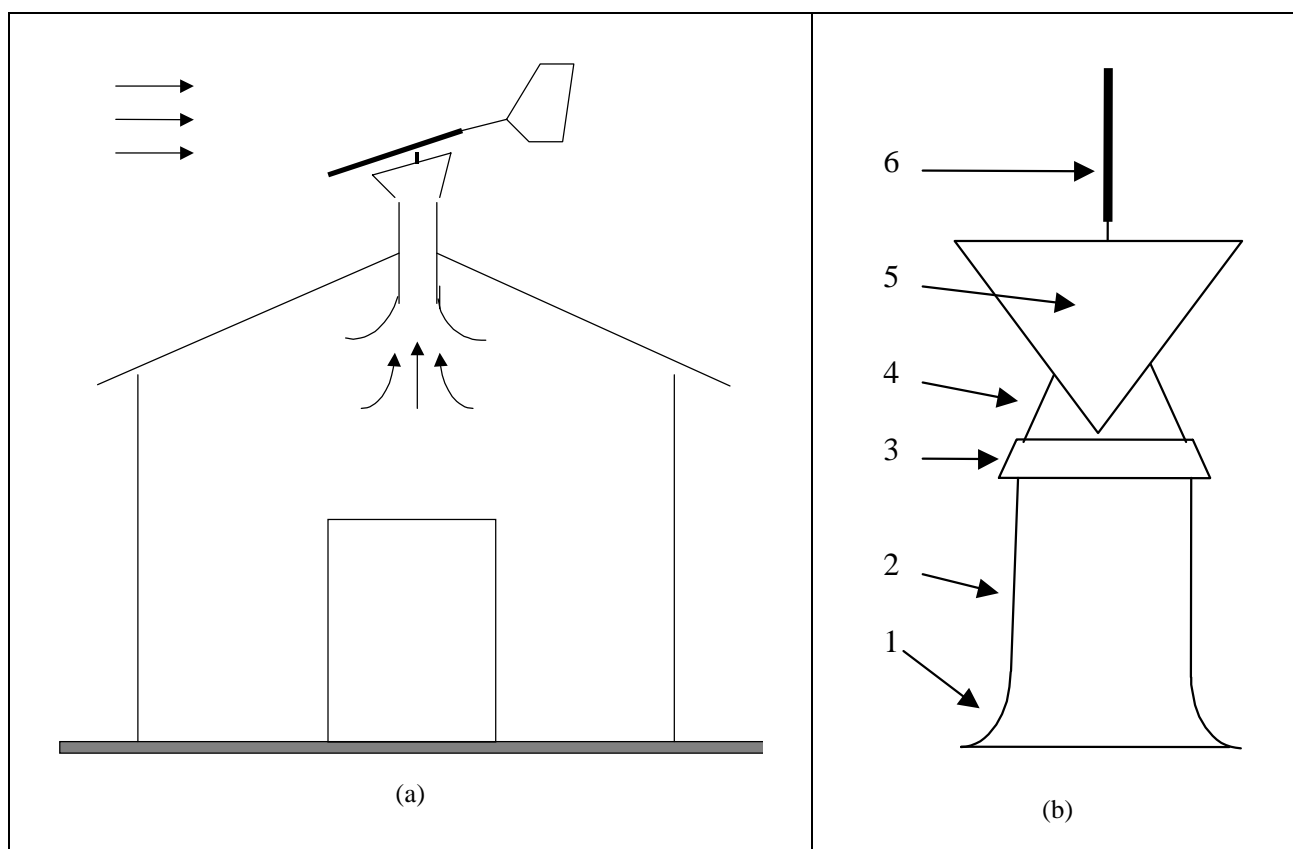


Figura 1: (a) Dispositivo de ventilação natural posicionado no teto de uma instalação predial (b) Partes que constituem o dispositivo de ventilação natural.

## 2. Aparato e Procedimento Experimental

Nesta parte do trabalho serão descritas as montagens e os dispositivos usados tanto na execução dos ensaios de campo, quanto na calibração dos diversos instrumentos usados para a determinação do desempenho do dispositivo de ventilação natural. Um aspecto muito importante é o pós processamento dos resultados obtidos durante os ensaios,

devido às constantes variações da velocidade e direção do vento, assim como, do tempo de resposta da parte móvel do dispositivo de ventilação natural.

## 2.1 Descrição do Protótipo

O primeiro protótipo (que é estudado neste trabalho) é uma configuração simplificada do dispositivo esquematizado na Fig. 1(b). Neste não foram usados a entrada tipo “boca de sino” (1), a peça de transição (4) e a saia (3). O tubo reto (2) possui diâmetro interno médio de 292,1 mm, diâmetro externo de 300 mm e comprimento de 3.000 mm. A asa delta utilizada, que é mostrada na figura 2(a), é feita de chapa de aço galvanizado com 1 mm de espessura. Elementos estruturais, feitos de ferro, são usados para dar rigidez e para suportar a aleta diretora, que é mostrada na figura 2(b). Esta também é feita de chapa de aço galvanizado com 1 mm de espessura. Também na Fig. 2(b) pode-se observar a montagem da parte móvel do dispositivo, constituído pela asa delta, pelo suporte e pela aleta diretora, na extremidade superior do tubo que faz a ligação entre as regiões interna e externa da instalação predial. Pode-se verificar que o eixo, que permite o alinhamento com a direção do vento, montado em um rolamento, o qual é fixado a superfície interna do tubo através de suportes.

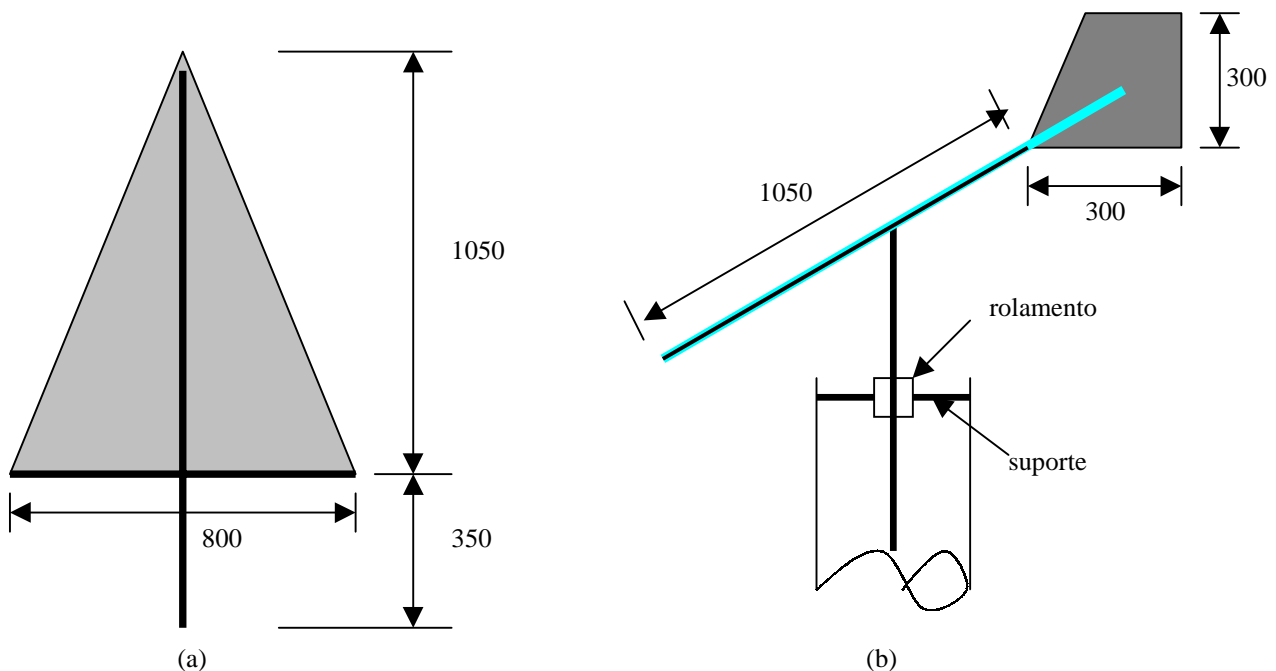


Figura 2: (a) Asa delta usada no protótipo do dispositivo de ventilação natural. (b) Asa delta e empena diretora montados na parte superior do tubo (dimensões em mm).

## 2.2 Descrição dos medidores

Para determinar o desempenho do dispositivo de ventilação natural descrito anteriormente é necessário realizar as medidas da vazão succionada em função da velocidade do vento. Além disto, como o protótipo está sujeito ao vento atmosférico, o qual muda constantemente de direção, há a necessidade de se medir a direção do vento. Como será visto, devido à presença de obstáculos ao redor da posição onde o dispositivo foi instalado, os resultados relativos a direção do vento tem uma grande importância neste trabalho. Devido ao comportamento dinâmico da parte móvel do dispositivo de ventilação é importante registrar a direção do mesmo em função do tempo. Tendo por base os resultados obtidos para a direção, do vento e do dispositivo, em função do tempo pode-se determinar as características dinâmicas do dispositivo e, com isto, melhorar o projeto da aleta diretora.

Para a medida da vazão succionada, que passa pelo interior do tubo com diâmetro de 292,1 mm, existem algumas alternativas descritas a seguir:

Uma destas alternativas é a instalação de um ou mais tubos de Pitot no interior do tubo, os quais seriam ligados a transdutores de pressão, cujo sinal deveria ser enviado a um sistema de aquisição de dados. Através de uma calibração, os valores obtidos de velocidade seriam correlacionados com a vazão no interior do tubo. Esta alternativa é atrativa devido a simplicidade, robustez e preço do sistema de medida. No entanto, como a vazão succionada depende da velocidade do vento e, portanto, certamente ocorrem momentos, durante os ensaios, onde se tem valores relativamente baixos, a utilização do tubo de Pitot inviabiliza a obtenção de resultados confiáveis. Deve-se lembrar que este instrumento torna-se pouco confiável para medidas abaixo de 3,0 m/s.

Devidos aos baixos valores de velocidade no interior do tubo e devido as variações de vazão que ocorrem por causa das variações de velocidade do vento, uma alternativa interessante é o anemômetro de fio quente. Por outro lado, este

equipamento é influenciado pela temperatura ambiente e seu sinal de saída varia com o tempo, devido ao acúmulo de sujeira (ocorre alteração do coeficiente de película e prejudica a transferência de calor entre o fio aquecido e o escoamento que passa pelo mesmo). Tendo por base as dificuldades acima, fica difícil adotar um anemômetro de fio quente para realizar medidas de campo, onde as condições ambiente não podem ser controladas. Existem anemômetros mais robustos feitos especialmente para ambientes mais agressivos, porém, estes não estavam disponíveis e possuem custo elevado.

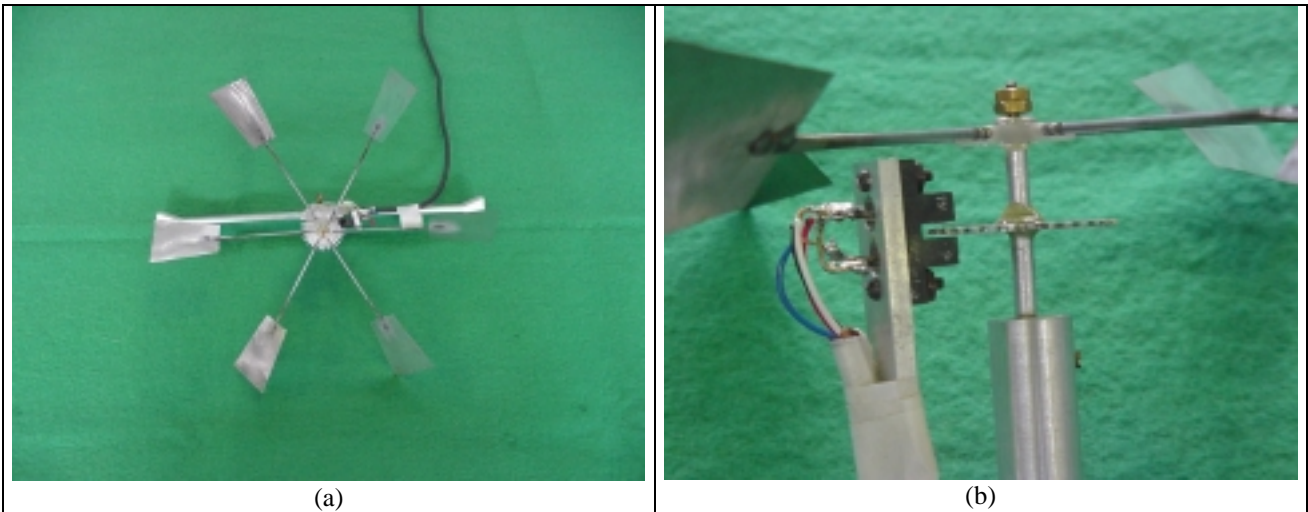


Figura 3: Anemômetro de palheta para medida da vazão succionada (a) Vista geral e (b) detalhe da roda dentada e do foto diodo usado para gerar um sinal para medida da rotação.

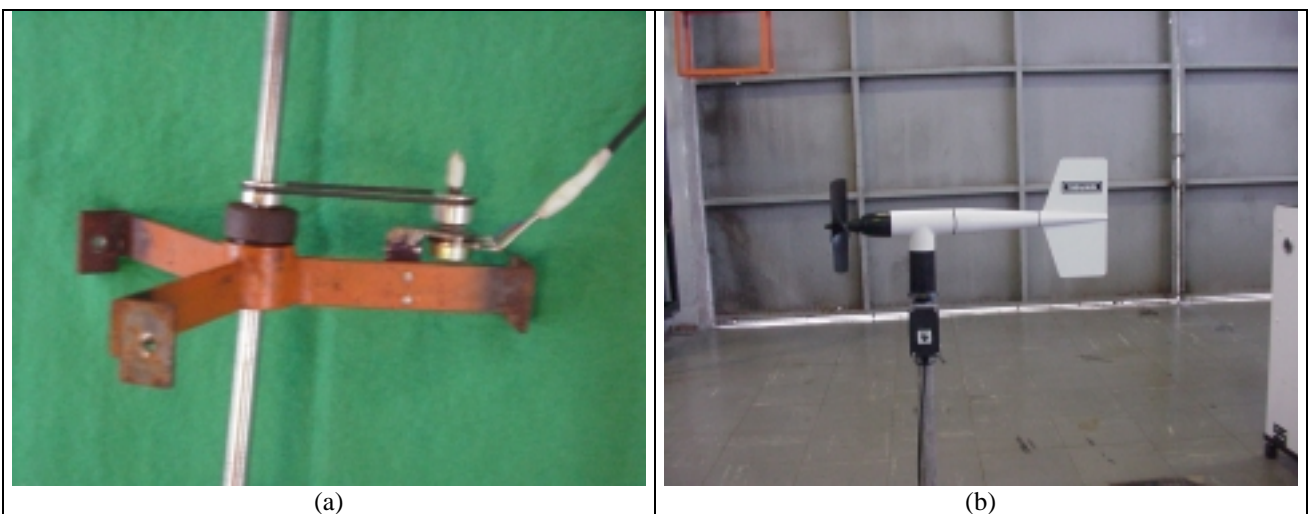


Figura 4: (a) Dispositivo para medida da posição angular da parte móvel do dispositivo de ventilação natural, instalado nas hastes de fixação do eixo de rotação da parte móvel. (b) Medidor de velocidade e direção do vento.

Tanto a velocidade como o acúmulo de sujeira acarretam modificação na curva de calibração do anemômetro de fio quente e causam erros na medida da velocidade. No entanto, se o correto valor de velocidade não é importante este instrumento pode ser usado, como no caso do medidor de vazão baseado na medida da frequência de liberação de vórtices de um corpo rombudo. Neste caso, um cilindro circular é instalado no interior do tubo, na direção transversal ao escoamento. A sonda de um anemômetro de fio quente é localizada a 1 ou 2 diâmetros na direção longitudinal e aproximadamente 0.7 diâmetros do plano de simetria da esteira, ficando fora da mesma. Desta forma, a sonda sente as variações de velocidade que ocorrem por ocasião da passagem dos vórtices da esteira do cilindro. Assim, não há necessidade de calibrar o anemômetro pois a frequência de oscilação de velocidade é o único resultado que interessa. Este dispositivo foi construído e calibrado, com sucesso, no escoamento da seção de testes do túnel de vento. Em seguida este dispositivo de medida foi instalado no interior do tubo para se realizar a calibração do mesmo, obtendo-se uma correlação entre a frequência e a vazão. Durante os ensaios de calibração foi observado que vórtices gerados na entrada do tubo tinham grande influência sobre o sinal de saída do anemômetro. As frequências destes vórtices são muito próximas daquelas geradas pelo corpo rombudo e não foi possível aplicar técnicas de filtragem do sinal.

Por fim foi feita a opção por utilizar um anemômetro de palheta, mostrado na figura 3(a), o qual foi projetado e construído especialmente para este trabalho. Este anemômetro é constituído por 6 palhetas, com formato de trapézio,

instaladas na extremidade de hastes metálicas, fixadas em um pequeno eixo. Com relação ao plano de rotação as palhetas tem uma inclinação de 45 graus. No eixo do anemômetro foi fixada uma roda dentada que pode permitir ou não a passagem da luz emitida por um foto diodo (vide Fig. 3(b)). Por ocasião da passagem da luz ocorre a excitação de um foto transistor, instalado no lado oposto do foto diodo (em relação ao plano da roda dentada), resultando em um pulso no sinal de saída do foto transistor. Devido à rotação do eixo e, como consequência, da roda dentada, obtém-se um trem de pulsos como sinal de saída. Utilizando-se uma placa de aquisição de dados (National Instruments) este sinal de saída é digitalizado e, em seguida, enviado para um analisador de espectro digital, que fornece a frequência dos pulsos.

Na figura 4(a) é mostrada a montagem para a medida da posição angular do dispositivo de ventilação natural. Um potenciômetro é instalado em uma das hastes que servem para a fixação do eixo do dispositivo à superfície interna do tubo. Uma pequena roldana é fixada ao eixo do potenciômetro e outra roldana, com o mesmo diâmetro, é fixada ao eixo do dispositivo. Estas duas roldanas são ligadas entre si por meio de um oring de borracha, que transmite o movimento angular do eixo para o potenciômetro. A alimentação do potenciômetro é feita por uma fonte DC, com uma tensão de 5,0 V. O sinal de saída é conectado à placa de aquisição de dados.

Para medir a velocidade e direção angular do vento atmosférico é usado um anemômetro de vento, marca Young, modelo 05103 (vide Fig. 4(b)), com capacidade de medir ventos na faixa entre 0 e 60 m/s. Este anemômetro possui quatro palhetas e seu eixo é ligado a um gerador de onda senoidal. A frequência desta onda é diretamente proporcional a velocidade do vento e o sinal de saída deste instrumento é conectado à placa de aquisição de dados. Através de um código computacional é feita a análise espectral do sinal para se obter a frequência do mesmo. A direção angular do vento é medida por meio de um potenciômetro ligado ao eixo de rotação do anemômetro, que se alinha com o vento através da empena posicionada no plano vertical. Este potenciômetro é alimentado por uma fonte DC com tensão de 5,0 V e o seu sinal de saída é enviado ao sistema de aquisição de dados.

## 2.2 Calibração dos medidores

Para calibrar o anemômetro de palheta descrito acima foi montado o aparato mostrado na figura 5(a), constituído por um tubo idêntico ao usado no campo, com diâmetro interno de 292,1 mm e comprimento de 3.000 mm (tubo branco da Fig. 5(a)). No interior deste tubo foi instalado o anemômetro de palheta, a uma certa distância da entrada do tubo, para minimizar a influência dos vórtices gerados na seção de entrada. Um ventilador axial foi conectado à saída deste tubo, de maneira que o escoamento passa primeiro pelo anemômetro, evitando que as perturbações geradas nas palhetas do ventilador tenham influência no ensaio de calibração. Para evitar que a rotação do escoamento, induzida pelas pás do ventilador, se propague até a posição onde o anemômetro foi montado, foram instaladas duas colmeias localizadas entre a seção de entrada do ventilador e seção do anemômetro. A velocidade do escoamento no interior do tubo é variada através da alteração da rotação do motor do ventilador, a qual é controlada por meio de um inversor de frequências.

Para realizar a calibração do anemômetro de palhetas é necessário realizar a medida da vazão que escoou pelo interior do tubo e correlaciona-la com a frequência do sinal de saída do anemômetro. Para tanto, foi decidido utilizar um tubo de Pitot conectado a um manômetro Betz, cuja menor divisão é 0,1 mm de coluna d'água. Na seção onde o anemômetro de palheta foi instalado podem ocorrer velocidades baixas, que não poderiam ser registradas pelo tubo de Pitot com precisão razoável. Devido a isto, foi necessário reduzir a área da seção de saída da montagem ( $D_s=110.6$  mm), para aumentar a velocidade, onde foi instalado o tubo de Pitot (vide Fig. 5(b)), localizado aproximadamente no centro da seção de saída.

A calibração foi feita variando-se a velocidade da seção de saída na faixa entre 3,0 e 16,0 m/s, como pode ser visto na Fig. 6(a). Pode-se observar um comportamento aproximadamente linear na faixa entre 4,0 e 16,0 m/s, no entanto, toda a faixa de dados obtida foi utilizada e um polinômio de segundo grau foi usado para ajustar os resultados experimentais. Durante os experimentos observou-se que o anemômetro de palheta só começa a girar (devido aos atritos) para velocidades acima de 0,3 m/s, na seção onde o mesmo está instalado. Esta informação é importante para a posterior análise dos resultados, onde deverão ser filtrados os resultados obtidos para velocidades do vento muito baixas.

Para finalizar o procedimento de calibração do anemômetro de palheta foi necessário fazer uma correlação entre a velocidade registrada pelo tubo de Pitot, localizado aproximadamente no centro da seção de saída, com a vazão do escoamento. A correlação mencionada acima foi feita fixando-se um valor para a vazão do escoamento e fazendo-se uma varredura do perfil de velocidades na seção de saída, através de um tubo de Pitot padrão, conectado a um manômetro Betz. Os resultados desta varredura são apresentados na Fig. 6(b), onde observa-se um perfil com máximos nas regiões próximas à superfície do tubo, devido a influência da contração, em forma de cone, mostrada na Fig. 5(b). Este perfil de velocidades foi usado para a determinação da vazão ( $Q$ ), em  $m^3/s$ , através de uma integração, obtendo-se uma correlação com a velocidade medida pelo tubo de Pitot instalado no centro da seção de saída ( $V$ ), dada em m/s. Esta correlação pode ser expressa por

$$Q = 9,22 \times 10^{-3} V \quad (1)$$

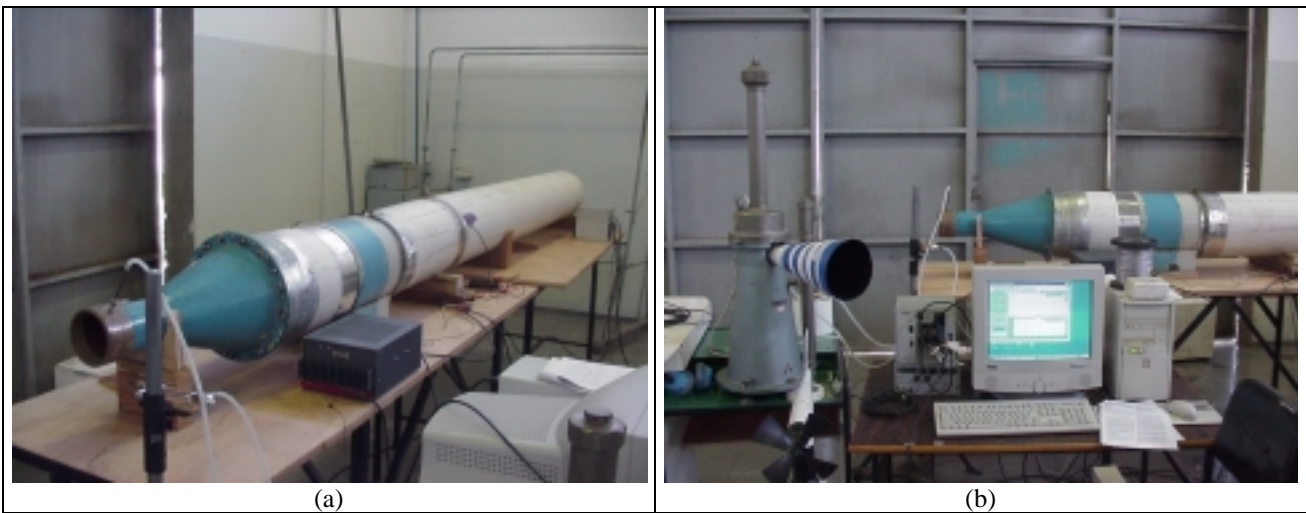


Figura 5: (a) Dispositivo usado na calibração do anemômetro de palheta e (b) montagem usada para fazer a correlação ente a vazão e a velocidade medida aproximadamente no centro da seção de saída do dispositivo.

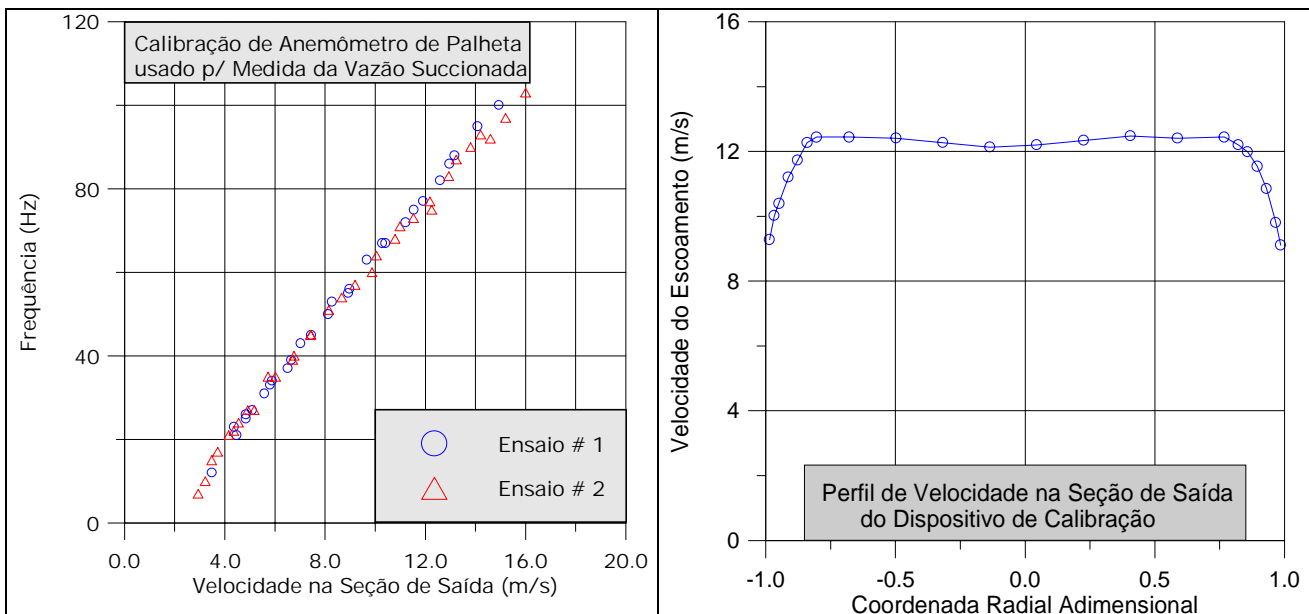


Figura 6: (a) Correlação da frequência do sinal de saída do anemômetro de palheta com a velocidade no centro da seção de saída. (b) Perfil de velocidades ao longo da seção transversal da saída do dispositivo.

O anemômetro de vento foi calibrado em duas etapas. Inicialmente o instrumento foi montado na seção de saída do túnel de vento, que possui seção transversal quadrada com 0,46 m de lado. No caso do anemômetro de vento a velocidade do escoamento deve ser correlacionada com a rotação da hélice, que é conectada a um gerador de onda senoidal. Assim, a velocidade do vento é função da frequência do sinal de saída do referido gerador. A velocidade na seção de ensaio do túnel de vento é medido por um tubo de Pitot instalado no início da seção de testes, o qual foi conectado a um transdutor de pressão. Este transdutor foi calibrado com auxílio de um manômetro Betz, com menor divisão igual a 0,1 mm de coluna d'água. O tubo de Pitot do túnel de vento foi calibrado com um tubo de Pitot padrão instalado na seção de saída da seção de testes. Os sinais de saída do anemômetro e do transdutor de pressão (conectado ao tubo de Pitot) foram ligados à placa de aquisição de dados e o ensaio foi realizado variando-se a velocidade do túnel de vento. Os resultados do ensaio mostraram que existe uma relação linear entre a velocidade do vento e a frequência do sinal de saída do anemômetro.

Na segunda etapa foi realizada a calibração do potenciômetro do anemômetro de vento, o qual fornece a posição angular do vento com relação a uma referência. Esta calibração foi feita com auxílio de um transferidor. A relação entre a tensão de saída do potenciômetro e a posição angular é linear e permite medidas entre 0 e 355 graus.

O potenciômetro instalado no dispositivo de ventilação natural foi calibrado de maneira semelhante ao discutido no parágrafo anterior e também forneceu uma relação linear entre a tensão de saída e a posição angular. No entanto, devido ao tipo do potenciômetro disponível, a faixa de ângulos que pode ser medida esta compreendida entre 0 e 260 graus.

### 2.3 Montagem do Aparato e Aquisição de Dados

Na figura 7 pode-se observar o dispositivo de ventilação natural e o anemômetro de vento instalados no teto de uma instalação predial. É interessante observar que o medidor de velocidade e direção do vento está posicionado aproximadamente na mesma altura do bordo de fuga da asa delta. O tubo branco do dispositivo de ventilação natural foi fixado ao beiral do teto da instalação predial, de maneira que a extremidade inferior (que não aparece na Fig. 7) succiona o ar do ambiente externo, isto é, esta extremidade não está localizada no interior da instalação predial. Este tipo de configuração não é ideal, porém, esta solução foi adotada para evitar que o teto do prédio fosse furado nesta primeira campanha de ensaios no campo. Em trabalhos posteriores deve-se melhorar esta situação para se ter um resultado mais próximo do real.



Figura 7: Dispositivo de ventilação natural e anemômetro de vento montados no teto de uma instalação predial.

A tensão de alimentação e os sinais de saída dos diversos instrumentos descritos anteriormente são transmitidos para o interior do prédio através de cabos blindados, cuja blindagem é aterrada para minimizar o problema do ruído adicionado ao sinal dos sensores. No interior do prédio existe uma fonte DC regulada, com tensão de 5,0 V, que é usada para alimentar os diversos sensores usados nesta pesquisa. Os sinais de saída dos sensores é conectado a uma placa de aquisição de dados e o experimento é controlado por um código desenvolvido para esta pesquisa, feito no ambiente o programa comercial “LabView”.

O código que realiza a aquisição dos dados tem a seguinte estrutura:

- (i) Em cada medida são registrados as frequências relacionadas à velocidade do vento e à vazão succionada pelo dispositivo de ventilação e as voltagens associadas as direções angulares do dispositivo e do vento. Para se obter as frequências é necessário fazer medidas dos sinais de saída durante um certo intervalo de tempo, suficiente para se determinar com precisão o espectro de frequências do trem de pulsos, proveniente do medidor da vazão, e da onda senoidal, proveniente do anemômetro de vento. Este intervalo de tempo é especificado indiretamente através do número de pontos medidos na amostra (N) e pela taxa de aquisição de dados (TA). Após ensaios preliminares verificou-se que  $N=300$  medidas e  $TA=1000$  medidas por segundo são valores adequados para garantir uma boa precisão dos resultados. Com estes valores verifica-se que o intervalo de tempo usado em cada medida é 0,3 segundos.
- (ii) Para cada ensaio deve-se especificar o número total de medidas (Nt) e o intervalo de tempo entre cada medida. Os resultados obtidos no presente trabalho foram obtidos com um intervalo de tempo de 2 segundos entre cada medida e os ensaios tiveram duração de uma ou duas horas. Desta forma, em alguns ensaios foram coletados 1800 medidas e em outros este número chegou a 3600. O intervalo de 2 segundos foi especificado com base em ensaios preliminares, para capturar as variações na velocidade e na direção do vento e suas consequências na vazão e na direção do dispositivo de ventilação natural.
- (iii) Os resultados dos parâmetros mencionados no item (i) são gravados em um arquivo de dados em função do tempo, de modo que possam ser pós processados “a posteriori”.
- (iv) Para obter as frequências relacionadas as medidas de vazão e velocidade do vento deve-se realizar uma série de operações especificadas a seguir: Inicialmente o sinal de voltagem proveniente dos sensores é digitalizado e enviado a um analisador de espectro digital. O espectro de potência é enviado para um detector de picos que fornece um conjunto de pares ordenados, constituídos pela frequência e amplitude de cada pico detectado. Por fim, deve-se selecionar a frequência do pico com maior amplitude. Para tanto, o conjunto de pares ordenados é enviado para uma espécie de filtro, onde todos os picos com amplitude inferior a um certo valor (amplitude de corte) são

eliminados. Esta amplitude de corte do espectro de potência foi definida, com base em ensaios preliminares, com valor de  $5,0 \times 10^{-3}$ , a qual é suficientemente grande para eliminar todas os picos com exceção do pico dominante.

- (v) Para se obter os valores para as posições angulares foi feita uma média das amostras colhidas durante o intervalo de tempo de 0,3 s. O desvio padrão destas amostras também é uma informação importante para verificar se a direção do vento e do dispositivo tiveram variações significativas durante o intervalo de aquisição dos dados da amostra.

### 3. Pós Processamento dos Dados

Como mencionado acima, os resultados de um ensaio são gravados em um arquivo de dados com  $N_t$  medidas de (i) instante de tempo da medida, (ii) frequência relacionadas à velocidade do vento, (iii) frequência relacionadas à vazão succionada pelo dispositivo de ventilação natural, (iv) valor da voltagem relacionada à posição angular do vento e (v) valor da voltagem relacionada à posição angular da parte móvel do dispositivo analisado.

Para analisar esta massa de resultados foi desenvolvido um código computacional, no ambiente do “LabView”, que realiza as seguintes tarefas:

- (i) Inicialmente é feita a leitura do arquivo de resultados do ensaio e são fornecidos os parâmetros relativos as curvas de calibração de cada um dos instrumentos. As condições ambientes (pressão e temperatura) e a dimensão característica (diâmetro externo do tubo, 300 mm) também deve ser dadas, com o objetivo de se calcular o número de Reynolds e de se fazer a adimensionalização da vazão.
- (i) Utilizando-se as curvas de calibração são determinados os valores de: (a) velocidade do vento ( $V$ ), em m/s, (b) vazão succionada ( $Q$ ), em  $m^3/s$ , (c) posição angular do vento ( $\theta$ ), em graus e (d) posição angular da parte móvel do dispositivo de ventilação natural ( $\phi$ ), em graus.
- (ii) Pode-se observar, na Fig. 6(a), que não foram obtidos resultados confiáveis na calibração do medidor de vazão para valores inferiores a aproximadamente 3 m/s. Recorrendo-se a eq. (1) verifica-se que a vazão associada a este valor de velocidade é  $0,02 m^3/s$ . Devido a isto, as medidas cujos valores de vazão são menores que este valor são retiradas da amostra completa de dados. O mesmo procedimento é feito para todas as medidas cuja velocidade do vento é nula. Isto foi feito para evitar problemas na adimensionalização da vazão, pois a velocidade do vento é usada e aparece no denominador do parâmetro adimensional.
- (iii) Levando em consideração os resultados que sobram desta primeira filtragem da amostra completa, pode-se determinar a vazão adimensional ( $Q_{ad}$ ) e o número de Reynolds ( $Re$ ), definidos abaixo

$$Q_{ad} = \frac{Q}{V.D} \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3)$$

- (iv) onde  $D$  é o diâmetro externo do tubo do dispositivo de ventilação natural,  $\rho$  é a densidade do ar calculada a partir dos valores para pressão e temperatura ambiente e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do ar, calculada a partir da temperatura ambiente.
- (v) Como o ensaio é realizado em um período relativamente longo (2 horas) podem ocorrer variações significativas da velocidade e da direção do vento. Devido a isto, decidiu-se dividir a amostra completa (isto é, após o processo de eliminação de algumas medidas, conforme explicado no item (iii)) em  $N_i$  intervalos iguais, isto é, com o mesmo número de medidas.
- (vi) Como pode ser visto na Fig. 8 (a), existe uma grande dispersão dos resultados a qual inviabiliza qualquer tipo de conclusão qualitativa ou quantitativa. Esta dispersão é causada pelas características do ensaio no campo, no qual não é possível controlar os parâmetros que tem influência nos resultados. No caso particular do presente trabalho, tanto a velocidade quanto a direção do vento variam constantemente. Devido às características dinâmicas do anemômetro de vento certamente deve haver uma defasagem nas medidas de  $V$  e  $\theta$ . Para a medida da vazão succionada pelo dispositivo pode-se atribuir as seguintes causas para a dispersão dos resultados: (a) a parte móvel do dispositivo possui uma inércia elevada e responde lentamente às mudanças da direção do vento. Neste caso, a velocidade do vento estaria com um ângulo de derrapagem em relação ao plano de simetria da asa delta e este problema acarreta redução da vazão succionada. (b) o sensor para medida da vazão possui um tempo de resposta, o qual não foi determinado neste trabalho, mas certamente pode causar uma defasagem entre as medidas de  $Q$  e  $V$ , isto é, estes dois parâmetros podem ter aumentado rapidamente, porém, devido ao tempo de resposta do medidor de vazão, o valor registrado para  $Q$  será menor que o valor correto, o qual estaria bem correlacionado com o valor registrado para  $V$ . Com o objetivo de reduzir a dispersão dos resultados foram feitas “filtragens” nas medidas que constituem cada um dos  $N_i$  intervalos, como descrito abaixo:
- (a) A primeira filtragem leva em consideração a variação das posições angulares do vento ( $\theta$ ) e da parte móvel do dispositivo de ventilação natural ( $\phi$ ). A idéia básica é aproveitar somente os resultados obtidos quando a direção do vento esta tendo uma variação lenta, que pode ser acompanhada com facilidade pela parte móvel do



dispositivo de ventilação. Para implementar esta idéia pode-se calcular as variações angulares, entre duas medidas, da direção do vento ( $\Delta\theta$ ) e do dispositivo de ventilação ( $\Delta\phi$ ), definidos por

$$\Delta\theta = \theta_{j+1} - \theta_j \quad (4a)$$

$$\Delta\phi = \phi_{j+1} - \phi_j \quad (4b)$$

onde  $\theta_j$  e  $\theta_{j+1}$  são as posições angulares do vento em duas medidas consecutivas e  $\phi_j$  e  $\phi_{j+1}$  representam a mesma coisa para medidas da parte móvel do dispositivo estudado. Se  $|\Delta\theta - \Delta\phi|$  for menor que o limite de correlação (fornecido pelo operador do código), para as variações das direções do vento e da parte móvel do dispositivo, então as duas medidas são consideradas. Caso contrário os resultados associados a medida "J" são retirados da amostra ("filtrados").

- (b) Na segunda etapa, a filtragem é feita com o objetivo de eliminar os resultados que não possuem uma correlação entre a vazão succionada (Q) e a velocidade do vento (V). Para tanto são definidas as seguintes variáveis adimensionais

$$V^+ = \frac{V_j}{V_M} \quad (5a)$$

$$Q^+ = \frac{Q_j}{Q_M} \quad (5b)$$

onde  $V_j$  e  $Q_j$  são, respectivamente, a velocidade e a vazão da medida "j" e  $V_M$  e  $Q_M$  são, respectivamente, os valores médios da velocidade e da vazão, em um dos  $N_i$  intervalos. Considerando as eqs. (5a) e (5b) verifica-se que os parâmetros  $V^+$  e  $Q^+$  variam em torno da unidade e podem ser comparados para verificar se estão correlacionados. Esta correlação é testada comparando-se o parâmetro  $|V^+ - Q^+|$  com o limite de correlação da velocidade com a vazão (fornecido pelo operador do código). A medida é considerada se o parâmetro acima for menor que o limite de correlação. Caso contrário a medida é retirada da amostra.

- (c) A terceira filtragem leva em consideração a variação da velocidade do vento (V) e a variação da vazão succionada pelo dispositivo de ventilação natural (Q). A idéia básica é aproveitar somente os resultados obtidos quando a velocidade do vento esta tendo uma variação lenta, que pode ser acompanhada com facilidade pelo medidor de vazão, instalado no dispositivo de ventilação. Para implementar esta idéia pode-se calcular as variações percentuais, entre duas medidas, da velocidade do vento ( $V'$ ) e da vazão succionada ( $Q'$ ), definidos por

$$V' = \frac{V_{j+1} - V_j}{V_j} \quad (6a)$$

$$Q' = \frac{Q_{j+1} - Q_j}{Q_j} \quad (6b)$$

onde  $V_j$  e  $V_{j+1}$  são, respectivamente, a velocidade do vento em duas medidas consecutivas e  $Q_j$  e  $Q_{j+1}$  representam a mesma coisa para medidas da vazão succionada. Se  $|V' - Q'|$  for menor que o limite de correlação (fornecido pelo operador do código), entre as variações da velocidade do vento e da vazão, então as duas medidas são consideradas. Caso contrário os resultados associados a medida "J" são retirados da amostra ("filtrados").

- (d) Ao final do processo de filtragem descrito acima, cada um dos  $N_i$  intervalos possui um número de medidas menor. Considerando a amostra reduzida de cada um dos intervalos, calcula-se a média e o desvio padrão de: (1) velocidade do vento, (2) posição da velocidade do vento, (3) vazão succionada pelo dispositivo de ventilação, (4) número de Reynolds e (5) vazão adimensional.
- (vii) As  $N_i$  amostras reduzidas, que resultaram do processo de filtragem, são reagrupadas e gravadas em um arquivo de saída para análise e visualização dos resultados. Na Fig. 8 (b) é mostrado o resultado obtido para a relação entre a velocidade do vento e a vazão succionada pelo dispositivo de ventilação natural, após o processo de filtragem

- descrito acima. Neste caso foram usados como limites de correlação: (1) para o ângulo um valor de 10 graus, (2) para a velocidade (item b) um valor de 0,04 e (3) para as variações de velocidade e vazão (item c) um valor de 0,02.
- (viii) Os valores médios e os desvios padrão, calculados no item vi (d), de cada uma das  $N_i$  amostras reduzidas são gravados em dois arquivos distintos.
  - (ix) Além dos resultados obtidos através do procedimento descrito acima é interessante utilizar a amostra completa, isto é, usar todos os dados registrados no ensaio sem qualquer tipo de eliminação de medidas, como no procedimento feito após o item (iii). Com esta amostra pode-se determinar os seguintes parâmetros:
    - Valor médio da vazão succionada pelo dispositivo durante o período do ensaio.
    - Valor médio da velocidade do vento durante o período do ensaio.
    - Valor médio da direção do vento durante o período do ensaio.
    - Volume de ar succionado pelo dispositivo durante o período do ensaio
    - Vazão integralizada, definida pela razão entre o volume succionado e o período do ensaio.

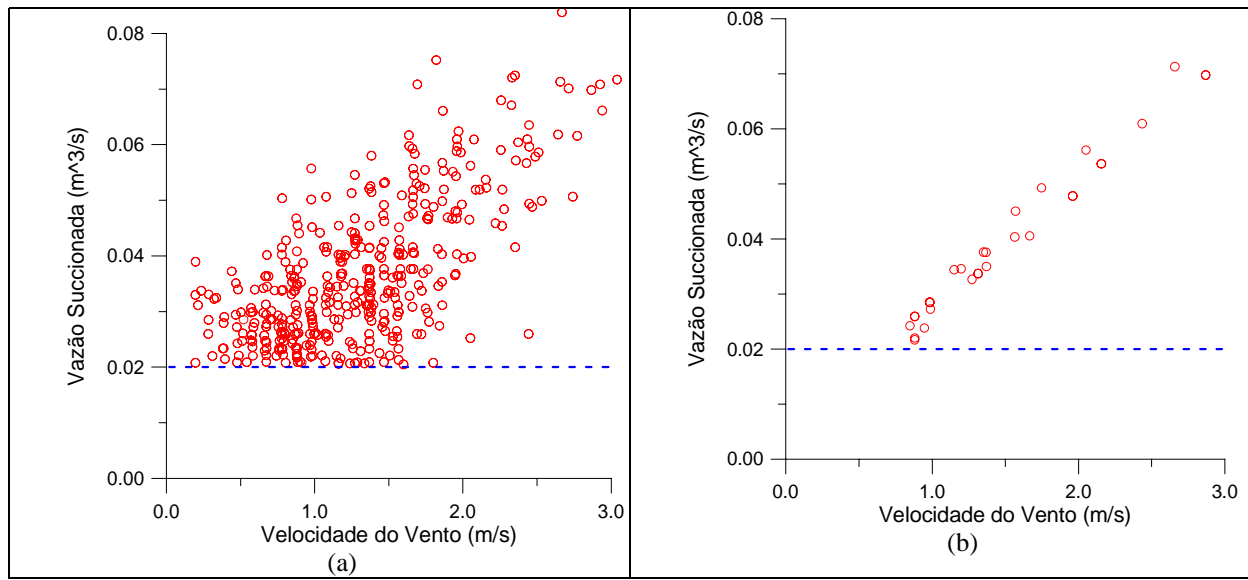


Figura 8: Ensaio de campo # 4: (a) Resultados não filtrados (b) Resultados filtrados segundo o procedimento descrito no item (vi).

#### 4. Apresentação e Análise dos Resultados

Nas figuras 9(a) e 9(b) são apresentados os resultados de 12 ensaios de campo, os quais foram pós processados como explicado na seção anterior deste trabalho. Nestas figuras são usadas todas as medidas que não foram eliminadas pela ação dos "filtros". Na Fig. 9(a) pode-se observar que os resultados referentes a um ensaio possuem uma relação aproximadamente linear entre a vazão succionada pelo dispositivo de ventilação e a velocidade do vento, que variou na faixa entre 0 e 8 m/s. No entanto, para ensaios diferentes observa-se uma variação da relação entre a velocidade do vento e a vazão succionada. Em alguns ensaios, como no teste nº 3, observa-se vazão bem maior que em outros ensaios, como no caso do teste nº 13. Na Fig. 9(b) pode-se observar, com maior nitidez, a dispersão dos resultados de ensaios diferentes. Nesta figura pode-se verificar que a vazão adimensional varia entre 0,18 e 0,58 e a maior parte dos resultados se concentra em torno do valor de 0,30.

Nas Figs. 10(a) e 10(b) são apresentados os valores médios, em cada intervalo da amostra completa, dos parâmetros que descrevem o desempenho do dispositivo de ventilação natural. Nestas figuras não são apresentados valores das medidas que não foram descartadas por ação dos filtros. Tais medidas foram usadas para se obter uma média de cada um dos parâmetros em cada um dos  $N_i$  intervalos, nos quais a amostra completa foi dividida.

Na Fig. 10(a) observa-se um resultado análogo ao mostrado na Fig. 9(a) e verifica-se a dispersão dos resultados quando se compara os diversos testes realizados neste trabalho.

A relação entre a vazão adimensional e a posição angular média (em cada intervalo da amostra completa) do vento é apresentada na Fig. 10 (b). Verifica-se que existe uma relação entre a direção do vento e a vazão succionada e tal relação é a causa da dispersão dos resultados que aparecem nas demais figuras. Deve-se notar que em um mesmo teste observa-se uma variação da vazão a qual é correlacionada com à mudanças da direção predominante do vento, durante a execução do ensaio.

Para explicar a influencia da direção do vento, deve-se lembrar que o dispositivo de ventilação natural foi instalado em uma das extremidades de um prédio, com altura de aproximadamente 5 m, sendo este rodeado por obstáculos diversos tais como outros prédios, da mesma altura e árvores. Desta forma, é possível que o vento incida sobre a asa delta com ângulos de ataque diferentes dependendo da direção do vento. Em ensaios preliminares em túnel de vento foi

constatado que o ângulo de ataque possui influência significativa sobre a vazão succionada, como se observa nos resultados apresentados neste trabalho.

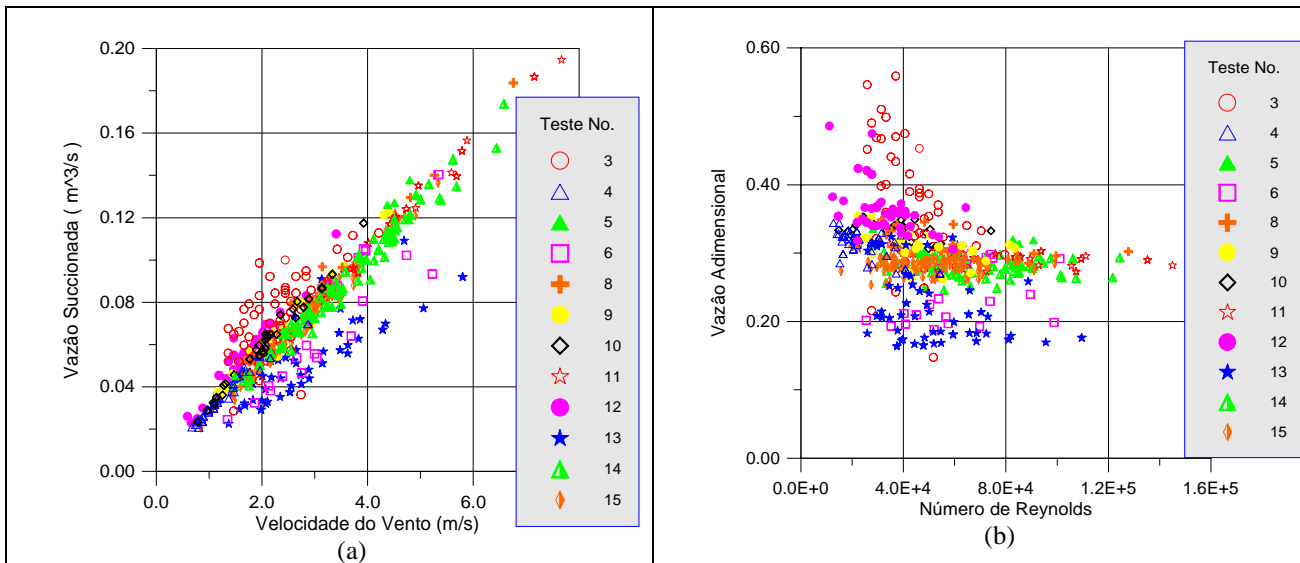


Figura 9: Resultados pós processados de um conjunto de ensaios: (a) Vazão succionada em função da velocidade do vento e (b) Vazão adimensional em função do número de Reynolds.

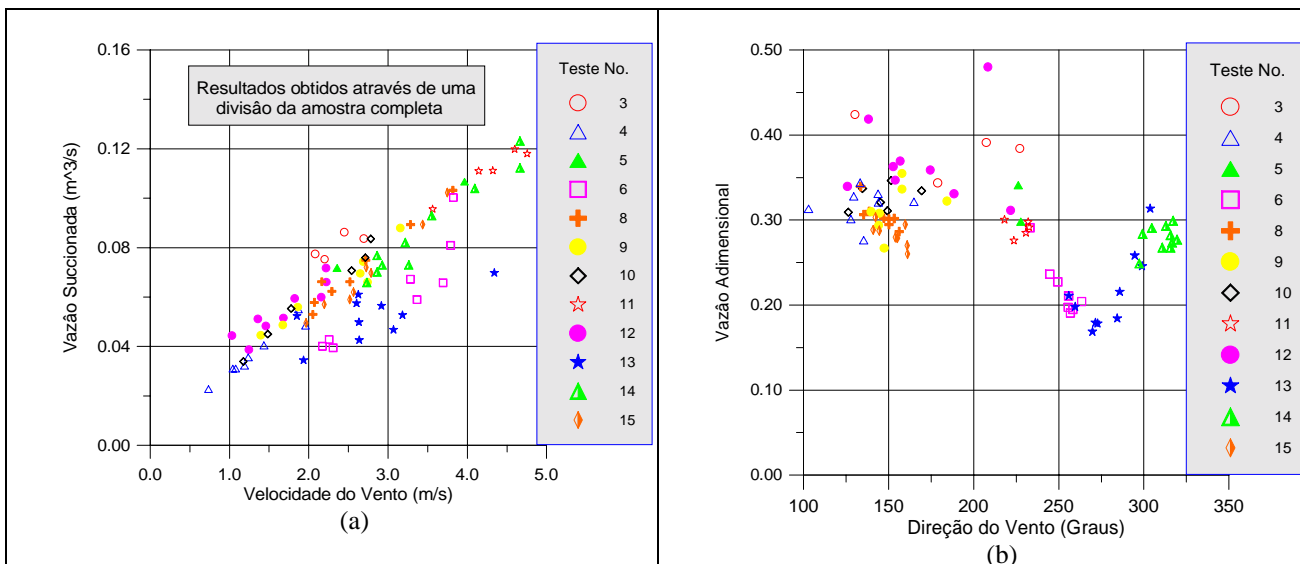


Figura 10: Resultados pós processados dividindo-se a amostra em intervalos: (a) Vazão média succionada em cada intervalo e (b) Vazão adimensional média em função da direção média do vento em cada intervalo.

## 5. Considerações Finais

Neste artigo foram relatadas os primeiros resultados do ensaio no campo do protótipo de um dispositivo de ventilação natural, que é baseado na depressão que existe no núcleo dos vórtices gerados por uma asa delta em alto ângulo de ataque.

Para a determinação do desempenho do dispositivo de ventilação foram usados um anemômetro para medir a velocidade e direção do vento atmosférico, o qual foi adquirido no mercado, e instrumentos projetados e construídos especialmente para este trabalho, como o anemômetro de palheta para a medida da vazão succionada e o medidor da posição angular da parte móvel do dispositivo de ventilação. Todos estes instrumentos foram calibrados de maneira a se garantir confiabilidade aos resultados experimentais.

Um conjunto de ensaios de campo foi realizado, sendo que estes ensaios tiveram duração de uma ou duas horas. Durante este período, as medidas foram realizadas por um sistema de aquisição de dados, que realizava uma medida a cada 2 segundos. Os resultados foram gravados em arquivo para posterior pós processamento.

Considerando-se um ensaio, foi verificada uma dispersão muito elevada dos resultados, decorrente da variação da velocidade e da direção do vento e, também, devido ao tempo de resposta da parte móvel do dispositivo por ocasião de

variações na direção do vento, assim como, das características dinâmicas do medidor de vazão. Para se obter resultados que pudessem ser analisados, foram implementados uma série de filtros que eliminam os resultados que não apresentam correlações impostas no pós processamento dos resultados. Deve-se deixar claro que os filtros implementados não são únicos e que novas técnicas para se realizar o pós processamento estão sendo estudadas.

Quando os resultados pós processados de diversos ensaios foram colocados no mesmo gráfico observou-se uma dispersão acentuada. No entanto, foi possível verificar uma correlação entre a vazão adimensional e a direção da velocidade do vento, que mostrou que a dispersão entre os diversos ensaios pode estar associada ao ângulo de ataque do vento sobre a asa delta, cujo valor pode estar variando com o direção do vento, devido a obstáculos que existem em torno da posição onde o dispositivo de ventilação foi instalado.

Para verificar se a afirmação acima é verdadeira deverão ser feitos ensaios adicionais onde deverá ser usado um sensor para a medida do ângulo de ataque do vento sobre a asa delta. Este sensor já foi construído e, no momento, passa pelos primeiros testes em campo.

## 6. Referências

- Doebelin, E.O. (1990), "Measurement Systems – Application and design", McGraw-Hill International Editions, Mechanical engineering series, 4<sup>th</sup>. Ed., USA.
- Fage, A. and Johansen, F.C., 1928, "The structure of vortex sheets", Phil.Mag, vol.5, pp.417-441.
- Girardi, R.M. "Natural ventilation device: a practical use for the depression in a bluff body wake". Brazilian Progress in Aerospace Engineering – 1999: a selection of papers from the Symposium on Aerospace Engineering. Editado por J.L.F. de Azevedo; O.A.F. Mello & FAPESP, pp. 1-10, 1999. ISBN: 85-87978-02-0
- Girardi, R.M. "A natural ventilation device based on the depression at the near wake of a bluff body", Sixth triennial International Symposium on Fluid Control measurement and Visualization (FLUCOME 2000), Sherbrooke, Quebec, Canada, August, 13-17, 2000.
- Katz, J. & Plotkin, A. (1991) Low-Speed Aerodynamics: From Wing Theory to Panel Methods". McGraw-Hill, USA.
- Kuo, C.H. & Hsu, C.W. (1997) "Development of Vortical Structure over Delta Wing with Leading- Edge Flap. Journal of Aircraft, Vol. 34, No. 5, Sept-Oct., pp. 577-584.
- Rinoie, K. et al. (1997) "Experimental Studies of a 70-degree Delta Wing with Vortex Flaps". Journal of Aircraft, Vol. 34, No. 5, Sept-Oct., pp. 600-605.

## PERFORMANCE OF A NATURAL VENTILATION DEVICE, BASED ON VORTICES GENERATED BY A DELTA WING: PROTOTYPE MEASUREMENTS

Roberto M. Girardi

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)  
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias  
CEP.: 12.228-900 São José dos Campos, SP  
e-mail: [girardi@ aer. ita. br](mailto:girardi@ aer. ita. br)

**ABSTRACT.** The objective of a natural ventilation device is to promote air circulation inside a building (industry, house, etc) by using the wind energy flowing at the building roof. The natural ventilation device, presented in this paper, works due to the depression caused by the great vortices established at the upper surface of a delta wing, positioned at high angles of attack relative to the wind direction. Such device can be explained in the following manner: (i) In order to promote the air withdrawn from the building interior it is used a tube with circular cross section, which cross the building roof and connects the interior and exterior regions, like a chimney. (ii) At the tube lower extremity, a bell mouth entrance is used to minimize the pressure losses and, as a consequence, maximize the flow rate sucked. (iii) At the upper tube extremity, a delta wing is positioned, with negative angle of attack, in such manner the generated vortices are positioned in the region between the wing surface and the tube exit section. A pressure lower than atmospheric one is established at such region and it causes the flow inside the tube, sucked from the building interior and discharging at the upper extremity. It must be remembered that inside the building the static pressure is approximately equal to the local atmospheric one. This paper objective is to report the first results of a series of experiments obtained with a prototype installed at the Aeronautical Engineering Laboratory roof. In order to show the device performance, measurements were made to obtain values for the flow rate sucked by the device, wind velocity and direction and angular position of the upper part of device, which must be aligned to the wind direction. A data acquisition system is used to perform all measurements and a relatively complex procedure has to be adopted to perform the data post-processing and to analyze the experimental results.

**Key Words:** Natural Ventilation, Delta Wing, Prototype Measurements