

## DETERMINAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM DISPOSITIVO DE VENTILAÇÃO NATURAL BASEADO NOS VÓRTICES DE UMA ASA DELTA – MEDIDAS EM TÚNEL DE VENTO.

**Luís Fernando Gouveia de Moraes**

Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE-ASA-L) - Praça Mal. Eduardo Gomes, 50. 12.228-900 S.J. dos Campos, SP.  
lfgmoraes@netscape.net

**Roberto da Motta Girardi**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)-Praça Mal. Eduardo Gomes, 50. 12.228-900 S.J. dos Campos, SP, Brasil  
girardi@ita.br

**Resumo.** O 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 externamente a tal instalação. O dispositivo apresentado 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 em túnel de vento. Para mostrar o desempenho deste dispositivo foram feitas medidas da vazão succionada em função da velocidade do vento. Estes resultados dependem de uma série de fatores, tais como: (i) ângulo de ataque da asa delta, (ii) distância da asa até a seção de saída do tubo e (iii) distância do tubo em relação ao bordo de ataque da placa. Todos estes parâmetros foram variados, com o objetivo de se verificar qual é a situação que maximiza a vazão succionada.

*Palavras chave: Aerodinâmica, Asa Delta, Ventilação Natural, Túnel de Vento.*

### 1. Introdução

Dispositivos de ventilação são extremamente importantes pois, além de promover o conforto ambiental a nível térmico, atuam na troca de ar em um habitáculo reduzindo a proliferação de micro organismos prejudiciais à saúde. Estes dispositivos, podem ser acionados elétrica ou eolicamente induzindo o processo convectivo. Este, implicará na movimentação do ar, no interior do habitáculo, para o exterior ou vice-versa.

A constante preocupação pela redução do consumo de energia elétrica, impõe um dispositivo que utilize a energia eólica para estabelecer um diferencial de pressões estáticas capaz de gerar o fluxo de ar que promoverá a ventilação do ambiente. Como esta diferença de pressões é pequena, utiliza-se um corpo rombudo, para estabelecer – na sua esteira - uma região de mais baixa pressão, como estudado por Girardi (2000). A diferença entre as pressões no habitáculo ( $p_{\text{interno}}$ ) e na esteira induz um fluxo de ar para fora resultando na ventilação do mesmo (Vide Fig. 1).

É certo, que a constância de ventos e sua velocidade serão fundamentais para uma boa ventilação. No entanto, se uma amplificação no diferencial de pressões puder ser obtida, certamente permitirá uma ventilação eficiente a baixas velocidades do escoamento.

O dispositivo que será descrito neste texto é diferente – tanto conceitualmente como em eficiência - daquele apresentado por Girardi (2000), pois emprega uma asa delta e consegue, graças aos intensos vórtices situados no extradorso da asa, aspirar maior vazão de ar. Estudos com esta configuração têm sido desenvolvidos desde 2001, no Laboratório de Engenharia Aeronáutica Prof. Feng (ITA) e os primeiros resultados estão relatados em Girardi (2002) e Moraes e Girardi (2004).

A asa delta foi concebida para aviões supersônicos por apresentar vários benefícios: baixo arrasto em cruzeiro, alta rigidez estrutural, grande volume interno etc. No entanto, verificou-se a médios e altos ângulos de ataque – do regime subsônico ao supersônico - o surgimento de dois vigorosos vórtices que se enrolam sobre a asa e são alimentados continuamente pela vorticidade produzida no intradorso da asa e lançada a partir do bordo de ataque, vide fig.2.

A formação destes potentes vórtices também ocorre em asas com grande enflechamento e nas condições descritas acima. No entanto, a asa delta é preferida por possuir maior rigidez estrutural e características geométricas adequadas a este dispositivo. Outra variante da asa delta é a duplo delta. Nela, uma asa delta é sobreposta a outra – com

ângulo de ápice maior. Ocorrem nesta asa 2 pares de vórtices, um gerado pela asa de menor ângulo de ápice e o outro par por aquela de maior ângulo.

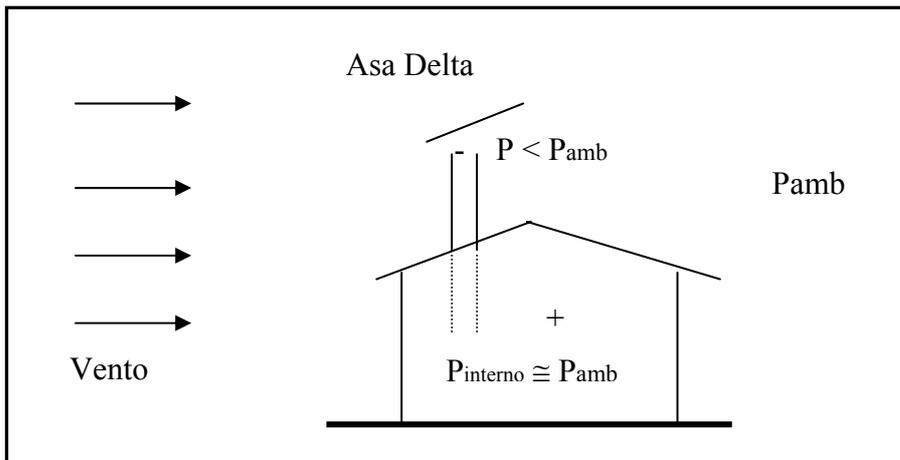


Figura 1. Esquema de funcionamento de um dispositivo de ventilação natural.

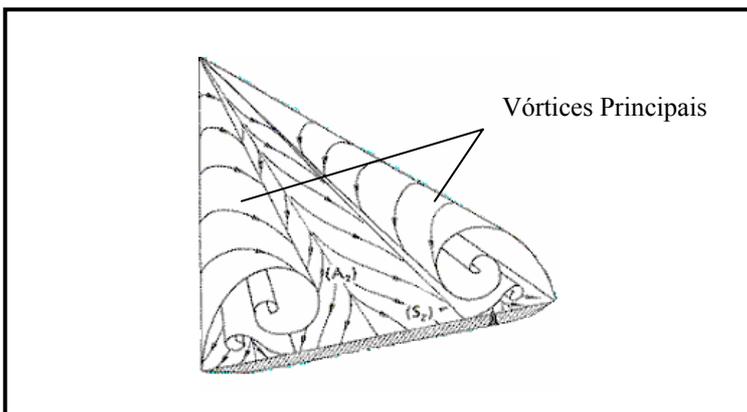


Figura 2. Vórtices sobre uma asa delta com alto ângulo de ataque.

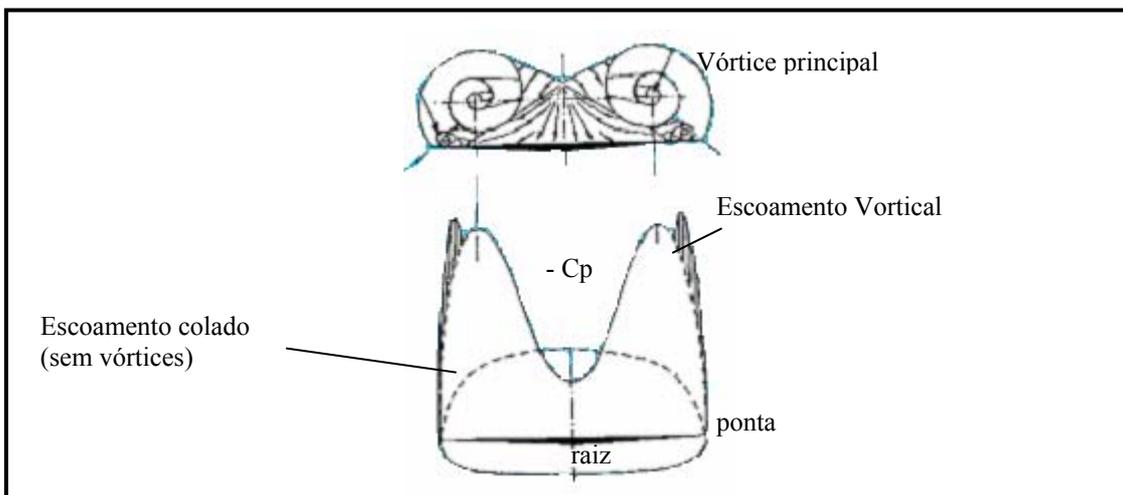


Figura 3. Distribuição do coeficiente de pressão em uma asa delta. Curva tracejada indica o Cp sem a presença de vórtices. A curva contínua mostra a distribuição de Cp no caso real (com vórtices).

Os vórtices assim gerados, criam uma grande depressão no extradorso da asa aumentando a sustentação, de modo não linear, com a variação do ângulo de ataque, como pode ser observado na Fig. 3. Aviões com asas de grande enflechamento utilizam a sustentação adicional produzida por estes vórtices para aterrissar e decolar em velocidades mais baixas e em ângulos de ataque acima dos convencionais para estes tipos de operações.

Ocorre, porém, que estes vórtices – estáveis e altamente energéticos sob determinadas condições – acabam por se desestabilizar para valores elevados de ângulo de ataque, induzindo ao estol na asa. A desestabilização do vórtice,

leva à redução da vorticidade (por unidade de área) do núcleo e sua conseqüente redução da intensidade (circulação) do núcleo do vórtice. Este fenômeno recebe o nome de colapso do vórtice (“vortex breakdown”) e não possui um agente iniciador identificado; existem sim fatores atenuantes e agravantes, tais como gradiente de pressão ao longo do comprimento do núcleo entre outros (Délery, 1984). Com isto, a pressão no extradorso irá aumentar reduzindo a aspiração.

A Fig. 4 apresenta a visualização, com a técnica de plano laser (“ laser sheet “), de um vórtice no extradorso de uma asa delta isolada. Observa-se o núcleo altamente coeso, sem fumaça – devido a centrifugação – e uma estrutura simétrica. Na Fig. 5, o vórtice é visualizado em uma posição após a ocorrência do “vortex breakdown”. Pode-se observar entrada de fumaça no núcleo, mostrando a redução da velocidade angular do escoamento do núcleo. A não simetria do escoamento está associada a pequenas assimetrias do modelo e/ou do escoamento não perturbado.

O “vortex breakdown” pode ser ocasionado por diversos fatores e produzir severos danos como, por exemplo, acelerar as falhas por fadiga em asas e empenagens. Além disto, para o presente estudo, este fenômeno pode ser o responsável pela redução da vazão sugada pelo dispositivo de ventilação para valores elevados de ângulo de ataque da asa delta.

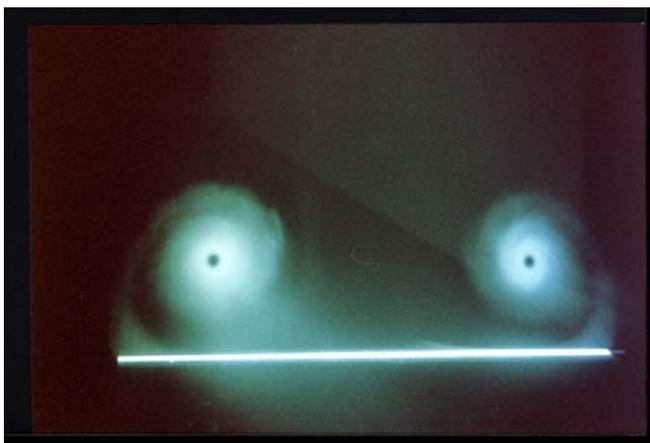


Figura 4. Vórtice simétrico, com núcleo coeso e de alta rotação. Barberis (1998)

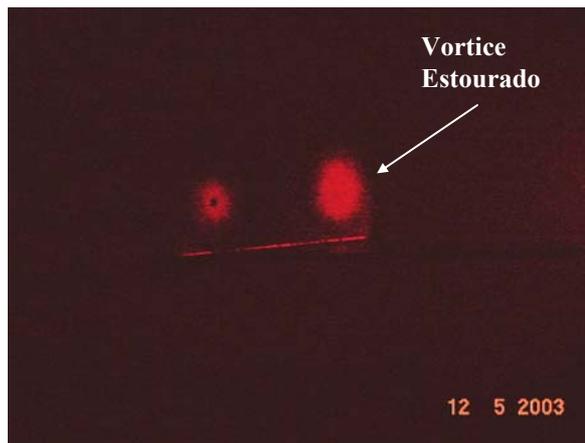


Figura 5. Vórtice assimétrico, com destruição do núcleo. Visualização em uma seção após o “ Vortex breakdown”. Moraes e Girardi (2004).

## 2. Descrição do Modelo :

Para os ensaios, foram construídas inicialmente, duas asas delta com as seguintes características: enflechamento de 70 graus, cordas na raiz de 200 mm e 300 mm e bordo de ataque com chanfro de 15 graus (vide Fig. 4). Denominar-se-à A1 para a asa delta grande e A2 para a asa delta pequena. Ambas foram construídas com chapas de alumínio com 4 mm de espessura. Todas as asas foram pintadas de preto e linhas brancas foram pintadas: uma na corda na raiz da asa e outras horizontais de 50 em 50 mm entre o bordo de fuga e o ápice da asa, de maneira a facilitar o posicionamento do centro do tubo em relação ao ápice da asa. Na interseção das linhas horizontais com a vertical foram realizadas marcações começando com o número 1 no bordo de fuga. A finalidade do chanfro é impor a separação do escoamento no bordo de ataque assegurando a formação do vórtice acima do extradorso da asa; impedindo com isso um descolamento local com recolamento logo em seguida (ou seja, uma bolha de recirculação). Além do que, um bordo de ataque sem chanfro é mais sensível as variações de Reynolds.

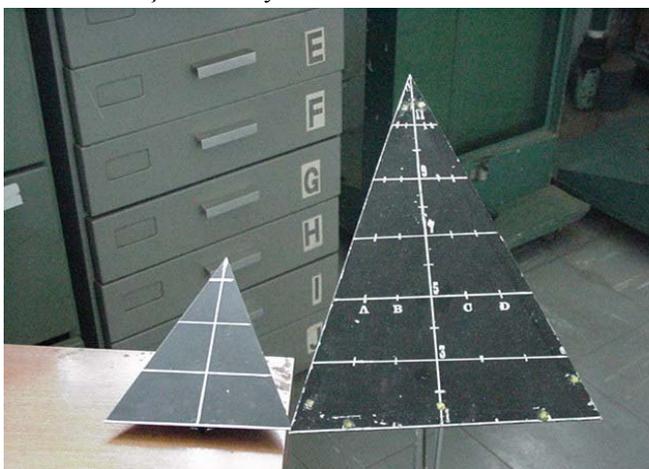


Figura 6. Asas delta empregadas nos experimentos, a numeração na corda da raiz da asa inicia-se no bordo de fuga.

As asas possuem dois pontos de fixação em seu intradorso: um central à asa e outro próximo ao bordo de fuga. O primeiro estava unido, por meio de um parafuso e rosca, a um mastro vertical o qual possui um rasgo em parte de seu comprimento (vide Fig. 7). O segundo ponto de fixação estava unido a uma pequena haste, também por um parafuso e porca, que por sua vez podia deslocar-se no rasgo do mastro e sendo fixo na posição de ensaio da mesma forma. Ou seja, a movimentação da haste no interior do rasgo permitia a asa variar seu ângulo de ataque (Observe a Fig. 7).

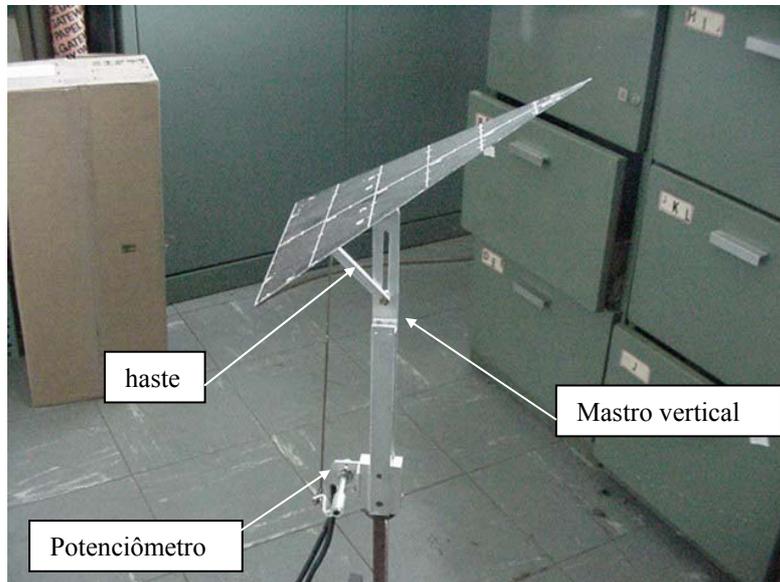


Figura 7. Conjunto asa delta, mastro e haste e potenciômetro, para medida do ângulo de ataque.

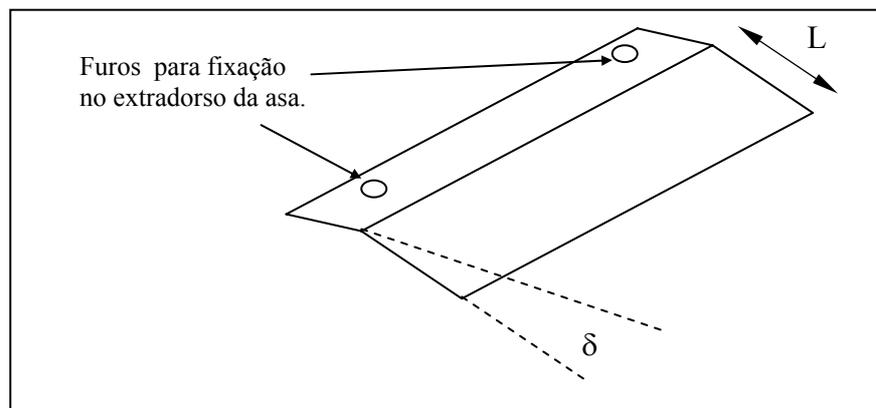


Figura 8. Forma das superfícies instaladas no bordo de fuga (“flap”) e nos bordos de ataque (“slat”) da asa.

A pesquisa descrita neste trabalho, emprega somente a asa delta A1, nela foram adaptados dispositivos hiper sustentadores como “flaps” e “slats”, que foram fixos com 2 parafusos no bordo de fuga e nos bordos de ataque. Os “flaps” e “slats” foram construídos com chapas de alumínio de 1 mm de espessura, nas dimensões (L) de 10, 20 e 30 mm e em ângulos de deflexão ( $\delta$ ) de 15, 30 e 45 graus (vide Fig. 8).

Em particular, somente para o “slat”, ensaiou-se uma geometria triangular com ápice coincidente com o ápice da asa. Este tipo de configuração não produziu bons resultados e, por este motivo, não será considerado na apresentação dos resultados.

Para realizar as medidas do ângulo de ataque da asa delta foi instalado um potenciômetro na parte inferior do mastro vertical (vide Fig. 7), em uma posição fora do fluxo de ar que passa pela montagem experimental. O movimento da asa é transmitido para o potenciômetro através de uma haste circular, conectada ao segundo ponto de fixação da asa delta, como pode ser visto na Fig. 7. Este dispositivo foi calibrado diversas vezes, utilizando-se um inclinômetro, capaz de realizar medidas com precisão de 0,01 grau. Com isto, o ângulo de ataque da asa podia ser monitorado durante os experimentos, de maneira a fornecer este parâmetro corretamente, mesmo que o vento causasse alguma modificação na atitude da asa.

O modelo e seu suporte foram posicionados fora do túnel e bem próximo a sua saída. Fora do túnel, para facilitar a montagem dos elementos da montagem experimental. Já o posicionamento próximo a saída do túnel foi para evitar a abertura do jato e interferência das camadas cisalhantes do escoamento do túnel com os vórtices na asa.

Para este experimento foi projetado e construído um sistema de posicionamento que permite a movimentação do conjunto asa-haste (e demais acessórios) nas direções horizontal e vertical. Com isto, pode-se variar o posicionamento deste conjunto relativamente ao tubo.

Um tubo de PVC, com 50 mm de diâmetro externo, estava conectado a um tubo de Venturi, com mesmo diâmetro, o qual possuía uma tomada de pressão estática antes da garganta ( $p_1$ ) e outra após ( $p_2$ ). Em função da diferença das pressões estáticas e das áreas das seções, obtém-se a vazão mássica usando a eq. 1.

$$Q = \frac{C.A_t}{\sqrt{1 - (A_t/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2.(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (1)$$

onde  $Q$  é a vazão volumétrica ( $m^3/s$ ),  $C$  é o coeficiente de descarga,  $A_t$  é a área da garganta ( $m^2$ ),  $A_1$  é a área antes da garganta ( $m^2$ ),  $\rho$  é a massa específica do ar ( $kg/m^3$ ),  $p_1$  é a pressão estática antes da garganta (Pa) e  $p_2$  é a pressão estática após a garganta (Pa)

O tubo Venturi utilizado foi calibrado em um dispositivo para calibração de baixas vazões relatado em Girardi (1999). Seu coeficiente de descarga varia com o Reynolds e esta característica foi considerada no presente trabalho. O valor da massa específica foi obtido com a equação dos gases perfeitos tendo sido empregados um barômetro de coluna de mercúrio e um termômetro para obtenção da pressão e temperatura ambientes, respectivamente. O diferencial de pressões ( $p_1-p_2$ ) foi medido por um transdutor de pressão diferencial. Para a medida da pressão dinâmica do escoamento que passa pela asa delta e, portanto, para a determinação da velocidade do vento, foi utilizado um segundo transdutor de pressão. Os transdutores de pressão foram calibrados empregando-se como padrão um manômetro Betz calibrado, cuja menor divisão é 0,1 mm de coluna d'água.

O túnel de vento utilizado nos ensaios (construído pela empresa Plint & Partner) possui seção de ensaios fechada (0,46 m x 0,46 m), circuito aberto, com velocidade variando na faixa entre 8 e 32 m/s e nível de turbulência de 0,5% na máxima velocidade. Como mencionado anteriormente, para evitar problemas na montagem do aparato experimental, a asa delta e o suporte foram colocados fora do túnel sofrendo a ação de um jato livre. Para que isto fosse feito, procedeu-se a uma calibração – sem a presença da asa e do suporte – da variação da pressão dinâmica entre o tubo de Pitot do túnel e a posição em que a asa foi ensaiada. Para a realização desta calibração foi instalado, na saída do túnel, um tubo de Pitot padrão conectado com um manômetro Betz.

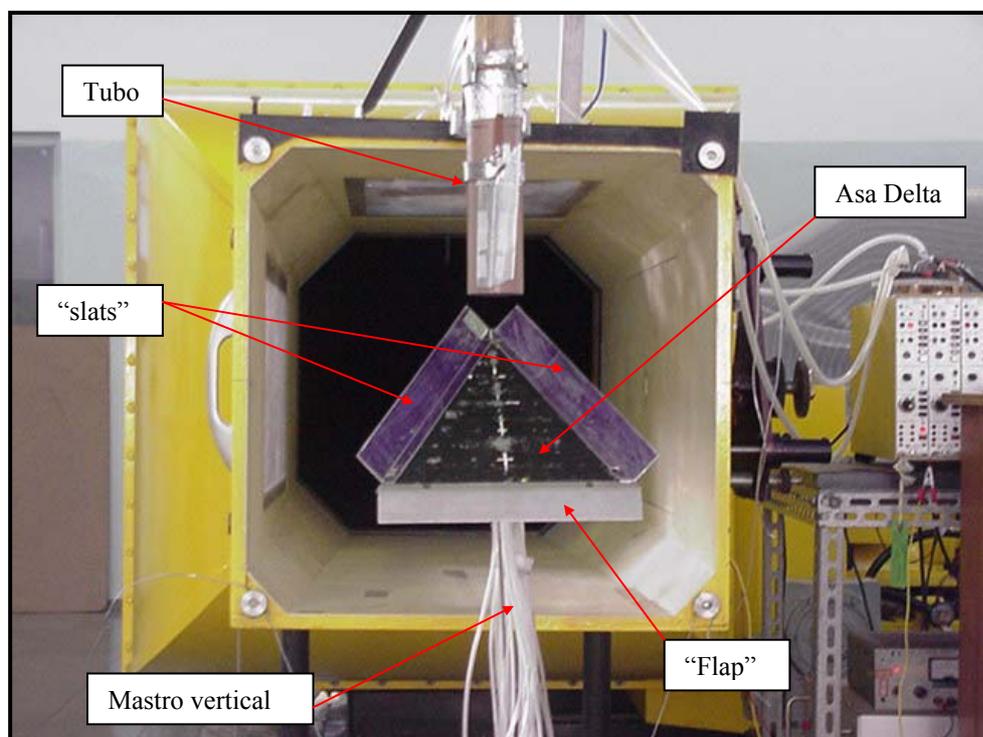


Figura 9. Asa montada na saída do túnel de vento com: (i) “flap” grande, defletido de 30° para baixo e (ii) “slat” grande, defletido 45° para cima.

A corda da asa foi alinhada com o eixo do túnel por meio de um teodolito e o eixo do tubo posicionado sobre as posições marcadas na corda usando um apontador laser. Este apontador era posicionado na parte superior do tubo graças a um adaptador e na parte inferior, outro adaptador – com um pequeno furo – que garantia que o feixe laser estava alinhado no eixo do tubo. Desta maneira, sabia-se antes de cada ensaio em qual posição o eixo do tubo estava apontado. Estes procedimentos foram realizados antes de cada ensaio.

A aquisição dos sinais eletrônicos, bem como a redução dos dados, foi realizada com programas desenvolvidos na plataforma LabView™.

Após a montagem e alinhamento da asa com o escoamento do túnel, procedeu-se ao posicionamento do tubo relativamente a asa. O tubo foi preso em um suporte solidário ao túnel (vide Fig. 9) e graças a um apontador laser, fez-se coincidir o eixo do tubo com o feixe. Com isto, pode-se visualizar na raiz da asa qual o ponto que seria interceptado pelo eixo do tubo. O ângulo entre o eixo do tubo e a perpendicular a asa no ponto de interseção é o próprio ângulo de ataque.

Os ensaios realizados objetivaram levantar o envelope operacional do dispositivo segundo um ângulo de ataque fixo. Outras pesquisas realizadas determinaram a influência da dimensão da asa e o emprego ou não do chanfro.

As adimensionalizações adotadas foram: para a vazão, o produto velocidade do escoamento e área de seção reta do tubo e para a distância tubo-asa o diâmetro do tubo ( $D$ ). Denota-se por  $h$  a distância, na vertical, entre o centro do tubo, na sua seção de saída, e a asa na posição de medida sobre a corda. Nesta pesquisa, todos os ensaios foram realizados a uma velocidade de 27 m/s e com ângulos de ataque entre 26 e 34 graus.

#### 4. Análise dos Resultados

Estudou-se inicialmente a influência do “flap” sobre a asa limpa. Na Fig. 10 são apresentados os resultados da vazão adimensional ( $Q/D^2V_\infty$ ) em função da distância adimensional entre a extremidade do tubo e a superfície da asa delta ( $h/D$ ). A vazão sugada pelo dispositivo alcança um valor máximo para uma distância ( $h$ ) aproximadamente igual a 1,2 vezes o diâmetro do tubo ( $D$ ). Uma questão importante na presente pesquisa é saber como é a configuração do escoamento associado a este valor máximo de vazão. Para obter-se informações que auxiliem na resposta desta questão é necessário um estudo de visualização de escoamento, o qual ainda não pôde ser feito. No entanto, tendo por base a utilização de fios de lã na ponta de uma haste (técnica de visualização simplificada), aparentemente existe uma interação dos vórtices gerados pela asa delta com o tubo e sua esteira. Para baixos valores de  $h/D$  observa-se que os vórtices gerados pela asa tem sua trajetória desviada pela presença do tubo. Nesta situação, a região de baixa pressão associada ao núcleo dos vórtices localiza-se abaixo da extremidade do tubo. A medida que a asa delta é distanciada da extremidade do tubo ( $h/D$  aumenta), a região de baixa pressão mencionada acima se aproxima da saída do tubo e acarreta aumento da vazão sugada. Nesta situação parece haver menor interação entre os vórtices e o tubo, pois existe espaço suficiente para os vórtices passarem entre a superfície da asa e a extremidade do tubo. Para incrementos adicionais de  $h/D$  os vórtices são afastados da extremidade do tubo e a vazão sugada é reduzida, como pode ser observado na Fig. 10.

A adição de um “flap” na asa delta aumentou a vazão sugada pelo dispositivo, relativamente a configuração sem “flap” (vide Fig. 10). O “flap” para baixo (deflexão positiva), mostrado na Fig. 9, gera um gradiente de pressão favorável que mantém o vórtice coeso e energizado. Isto é, o “flap” incrementa o coeficiente de sustentação da asa e, como consequência, ocorre o incremento da circulação, a qual está associada à intensidade dos vórtices que se estabelecem na região do extradorso da asa (depressão mais intensa no interior do núcleo do vórtice e, como consequência, aumento da vazão sugada pelo dispositivo). Embora os resultados não estejam mostrados neste trabalho, constata-se que, para o mesmo “flap”, mas, agora, defletido para cima (deflexão negativa), o gradiente torna-se adverso e a vazão sugada diminui. Conforme os trabalhos publicados por Barberis (1998), Délery (1984) e Délery (1990) este gradiente adverso ocasiona o estouro do vórtice e, no experimento em questão, redução da vazão aspirada. Pesquisas a respeito do desempenho de asas delta com “flaps” e “slats” estão publicadas em Marchman (1981) e Rinoie (1997).

A influência da dimensão do “flap” também pode ser observada na Fig. 10, para o caso em que a deflexão é 15 graus. Com o flap menor ( $L=10\text{mm}$ ) o dispositivo teve um desempenho pouco melhor que a asa delta isolada. Na mesma figura pode-se observar uma melhora acentuada quando esta dimensão aumenta para 20 mm (médio) e, novamente, uma melhora discreta para o “flap” de maior dimensão ( $L=30\text{mm}$ ). Este tipo de comportamento não linear também é observado para “flaps” instalados em aeronaves e a redução na capacidade de gerar CL (configuração com “flap” médio para maior) ocorre devido a descolamento do escoamento na superfície do “flap”.

O aumento do ângulo de deflexão do “flap” acarreta incremento na vazão sugada, como pode ser observado na Fig. 10, para o caso de “flap” grande. Após a análise relatada nos parágrafos precedentes este resultado já era esperado, pois a vazão sugada pelo dispositivo parece ter uma correlação forte com a capacidade da asa delta gerar sustentação. Neste caso também se observa um comportamento não linear, pois o incremento do ângulo de deflexão de 15 para 30 graus provocou aumento na vazão sugada, porém, uma variação de 30 para 45 graus não resultou em aumento de vazão. Como mencionado anteriormente, este comportamento deve ser causado pelo descolamento do escoamento na superfície do “flap”, porém, estudos de visualização devem ser realizados para a verificação desta afirmação.

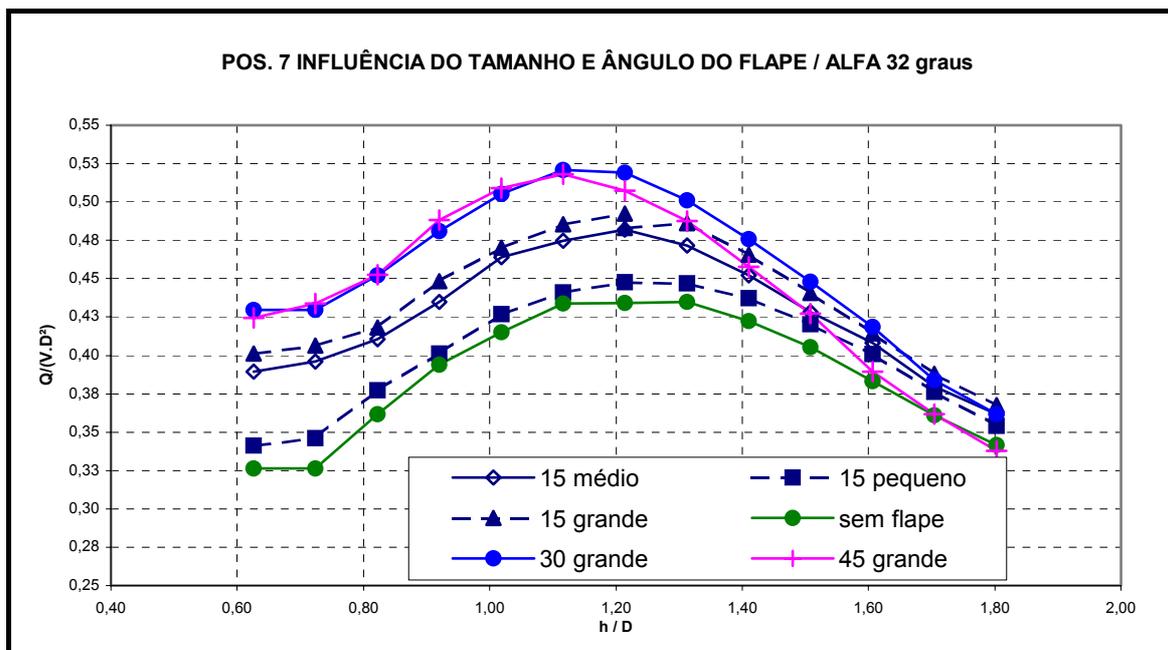


Figura 10. Vazão adimensional em função da distância entre a asa e a extremidade do tubo. Variações na geometria e ângulo de deflexão do “flap”.

Animado com o aumento na vazão aspirada, devido à implementação de “flap”, defletido para baixo (configuração que incrementa a sustentação gerada pela asa delta), resolveu-se estudar a adoção de “slats” para elevar, ainda mais, a vazão aspirada. Este estudo foi inspirado pelo fato que em aeronaves é comum o emprego de “flap” e “slats” para aumentar a sustentação em baixas velocidades (condições de decolagens e aterrissagens). A configuração dos “slats” foi, inicialmente, a mesma dos “flap”, ou seja, manteve-se a geometria, ângulos e dimensões. Na Fig. 11 são relatados os resultados obtidos com “slats” grandes ( $L=30\text{mm}$ ) com deflexão de 45 graus com relação ao plano da asa. Nestes ensaios o eixo do tubo foi alinhado com a posição 9 ( $X/C=0,33$ ) e o ângulo de ataque da asa delta foi ajustado em 27 graus.

Observa-se que a vazão adimensional da configuração com “slat” ( $Q/D^2V_\infty=0,49$ ) tem melhor desempenho que a asa limpa ( $Q/D^2V_\infty=0,44$ ). Além disto, pode-se verificar na Fig. 11, que a vazão sugada da configuração com “slat” alcança um valor máximo para uma distância  $h/D$  um pouco maior que a configuração com asa limpa. Este resultado indica uma modificação da topologia do escoamento, no sentido que o núcleo dos vórtices para a configuração com “slat” parece ter se afastado da superfície da asa delta. Este afastamento parece ter sido provocado devido a inclinação da superfície do “slat” para cima, afastando, com isto, a posição do bordo de ataque (onde ocorre a liberação de vorticidade que alimenta os vórtices) da superfície da asa. A melhora do desempenho da configuração da asa com “slat” pode ser função do incremento de área devido a instalação dos “slats”, os quais possuem uma dimensão razoável quando comparado com a área da asa. Este incremento de área está associado a um aumento de sustentação, o qual, como discutido anteriormente, está vinculado a intensidade dos vórtices formados no extradorso da asa e, portanto, com a vazão sugada pelo dispositivo de ventilação natural. Para verificar se a configuração com “slats” tem realmente melhor desempenho deverão ser realizados ensaios adicionais, comparando-se configurações diferentes que possuem a mesma área.

Ainda na Fig. 11, pode-se verificar o efeito da combinação dos dois tipos de dispositivos hipersustentadores (“flap” e “slats”). A configuração com “flap”, com deflexão de 30 graus (para baixo) e com “slat” ( $Q/D^2V_\infty=0,52$ ), apresentou uma melhora no desempenho, em termos de vazão aspirada, com relação a configuração sem “flap” ( $Q/D^2V_\infty=0,49$ ). No entanto, comparando-se com a configuração da asa com “flap”, porém, sem o “slat”, ( $Q/D^2V_\infty=0,52$ ) observa-se, que neste caso, a vazão sugada não é alterada devido a presença do “slat”. Até o presente momento este resultado não pode ser explicado. Experimentos adicionais, com ênfase em visualização do escoamento, deverão ser efetuados no futuro para se estudar as causas do referido resultado.

Como mostrado para asa sem “slat” (vide Fig. 10), o incremento do ângulo de deflexão do flap de 30 para 45 graus não acarreta aumento da vazão sugada pelo dispositivo de ventilação natural, como pode ser visto na Fig. 11, para a configuração com “slat”. Como discutido anteriormente, provavelmente, este comportamento não linear está associado a descolamento do escoamento na superfície do “flap”, porém, esta afirmação deverá ser confirmada através de ensaios de visualização.

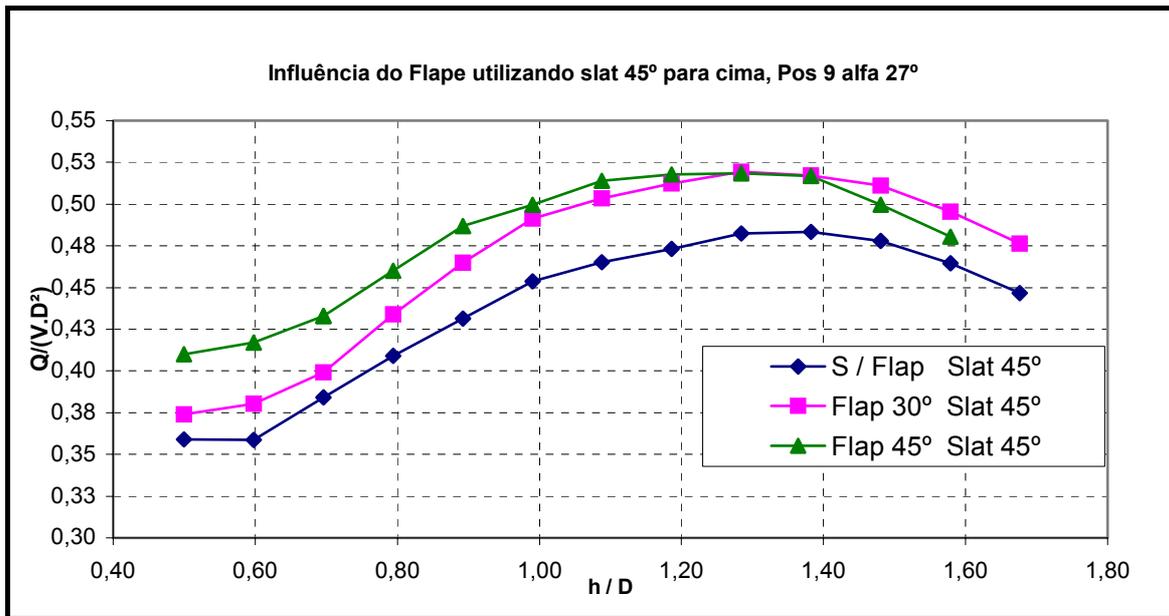


Figura 11. Vazão sugada em função do ângulo de “flap”, para “slat” grande, com deflexão de 45 graus.

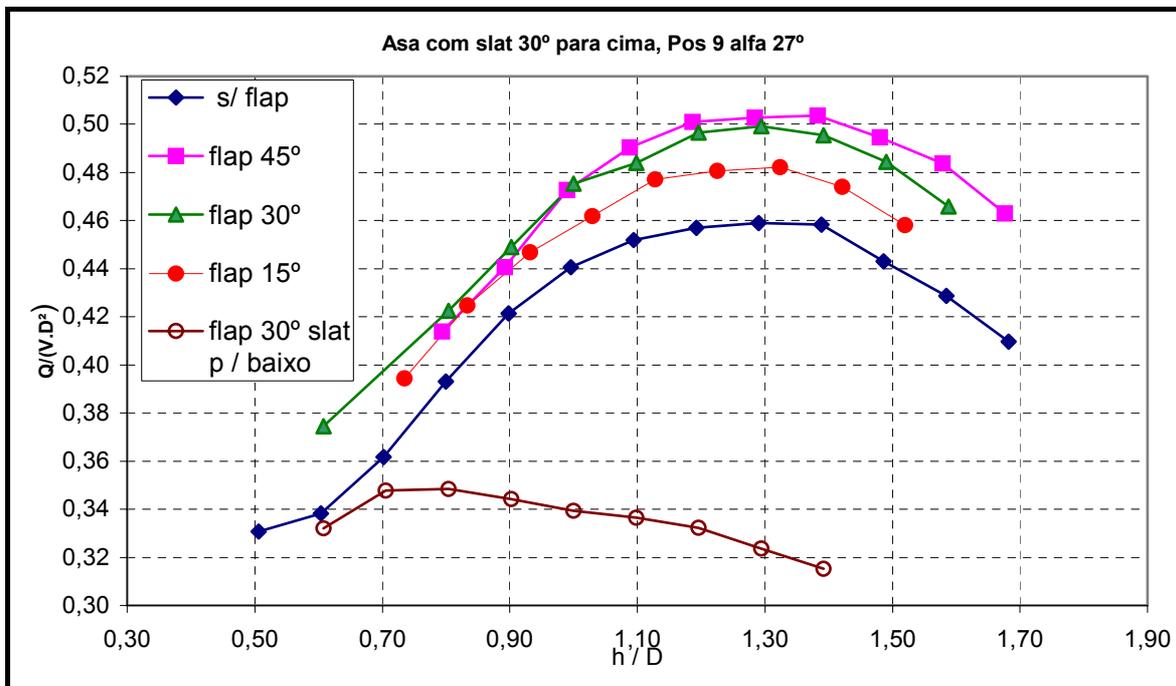


Figura 12. Vazão sugada em função do ângulo de “flap”, para “slat” grande, com deflexão de 30 graus.

Na Fig. 12 são apresentados os resultados obtidos com uma configuração constituída pela asa, por “slats” grandes ( $L=30$  mm), defletidos de um ângulo de 30 graus com relação ao plano da asa e pela presença (ou não) do “flap” grande ( $L=30$ mm), com diversos ângulos de deflexão em relação ao plano da asa. Nestes ensaios, o tubo esta alinhado com a posição número 9 ( $X/C = 0,33$ , a partir do ápice da asa), marcada na superfície da asa (vide Fig. 6) e a asa foi mantida com ângulo de ataque fixo, com valor de 27 graus.

Como pode ser verificado na Fig. 12, até uma distancia  $h/D \approx 0,9$  observa-se que o ângulo de deflexão do “flap” não possui efeito significativo na vazão sugada pelo dispositivo, para as configurações com “slats” orientados para cima (deflexão negativa). Este resultado pode estar associado à interferência entre os vórtices e o tubo. Esta interferência pode ser: (i) devido ao fato que a região de baixa pressão associada ao núcleo dos vórtices esteja afastada da seção de saída do tubo, (ii) devido a uma redução da intensidade dos vórtices, causada pela obstrução provocada pela presença do tubo e (iii) devido a uma combinação dos itens anteriores.

Ainda considerando as configurações com “slats” para cima, para distancias ( $h/D$ ) maiores que 0,9 observa-se um incremento da vazão sugada com relação ao ângulo de deflexão do “flap” (vide Fig. 12). Este resultado já era

esperado, pois, como discutido anteriormente, a vazão sugada pelo dispositivo parece estar associada à sustentação gerada pela asa. Para ângulos de deflexão do “flap” entre 0 e 30 graus observa-se um comportamento aproximadamente linear para o acréscimo da vazão adimensional máxima. No entanto, quando a deflexão do “flap” varia entre 30 e 45 graus verifica-se um incremento muito menor que na faixa de ângulos mais baixa. Este comportamento não linear já foi discutido anteriormente e deve-se ao descolamento na superfície do “flap”. Por fim, deve-se mencionar que o máximo de vazão sugada ocorreu para o mesmo valor de  $h/D$ . Este resultado indica que a posição dos vórtices em relação a asa não devem ter sido alteradas devido a deflexão do “flap”.

Ainda na Fig. 12 são mostrados os resultados obtidos para uma configuração com “slats” orientados para baixo (deflexão positiva), com “flap” defletido de um ângulo de 30 graus (também para baixo). Pode-se verificar que a vazão sugada alcançou valores bem menores que a configuração com “slats” defletidos na direção oposta e a vazão máxima ocorre para uma distância  $h/D$  bem menor. Este resultado pode ser explicado com base nos dados apresentados no trabalho de Marchman (1981) e Rionie (1997), onde foi verificado que, em uma asa isolada, ocorre descolamento no bordo de ataque do “slat” e posterior recolamento na superfície do mesmo, formando uma bolha de recirculação, colada na superfície do “slat”. Este fato pode explicar a causa do máximo de vazão sugada ter sido alcançado para valores mais baixos de  $h/D$ , pois a região de baixa pressão associada à vorticidade liberada do bordo de ataque está mais próximo da superfície da asa delta. Os baixos valores de vazão sugada parecem estar associados ao fato que a pressão no interior de uma bolha de recirculação é menos negativa que a pressão encontrada no interior de vórtices separados da superfície do obstáculo, como foi observado por Roshko (1954), para o caso de um escoamento sobre um cilindro circular.

Na Fig. 13 são apresentados os resultados para diversas configurações, ensaiadas com o tubo alinhado com a posição 9 e com a asa delta posicionada com 27 graus de ângulo de ataque, com exceção da configuração da configuração com “flap” e sem “slat”, que foi testada com ângulo de 30 graus. Inicialmente, deve-se observar que as configurações sem “slat” alcançam um valor máximo para  $h/D \approx 0,9$ , que é menor que o valor associado às configurações com “slat” ( $h/D \approx 1,3$ ), sendo isto uma evidencia do deslocamento dos vórtices provocado pela presença dos “slats” inclinados para cima.

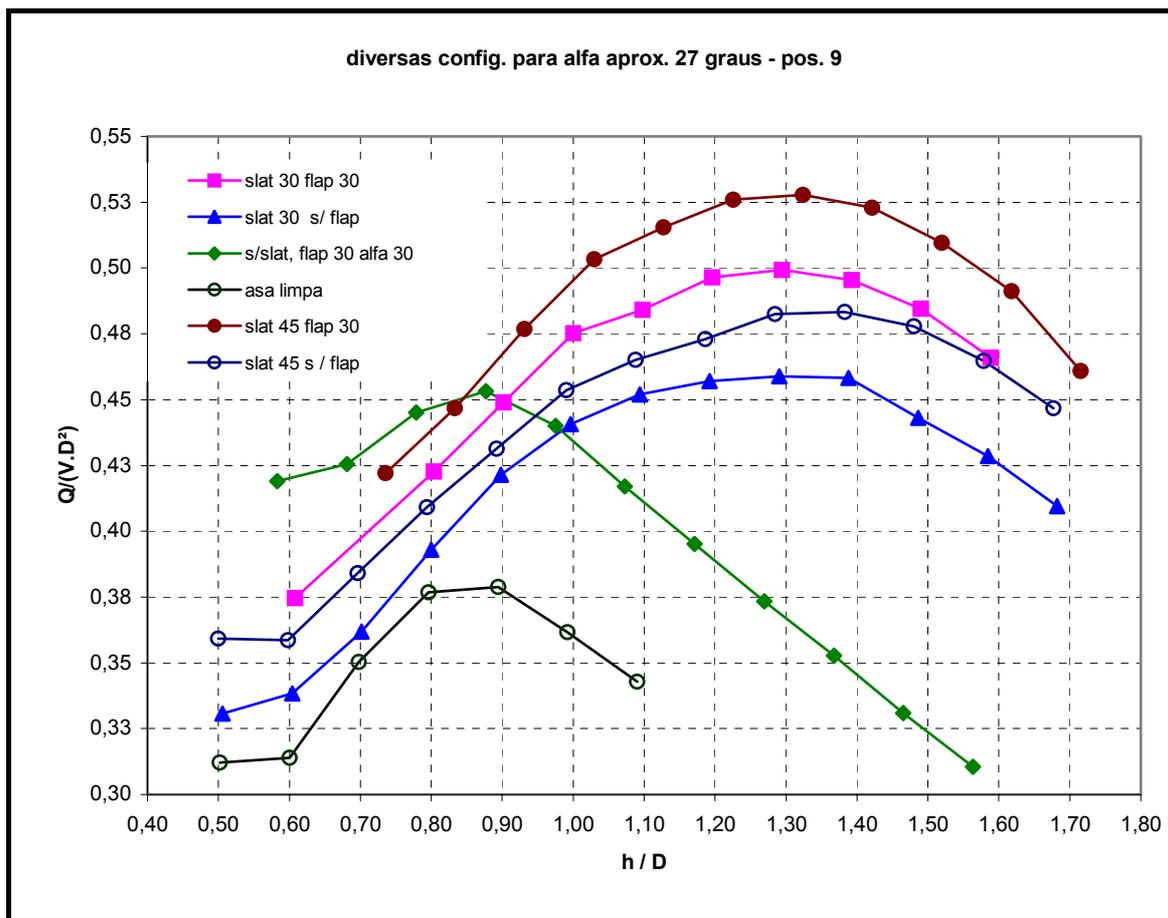


Figura 13. Comparação entre algumas configurações ensaiadas com o tubo acima da posição 9.

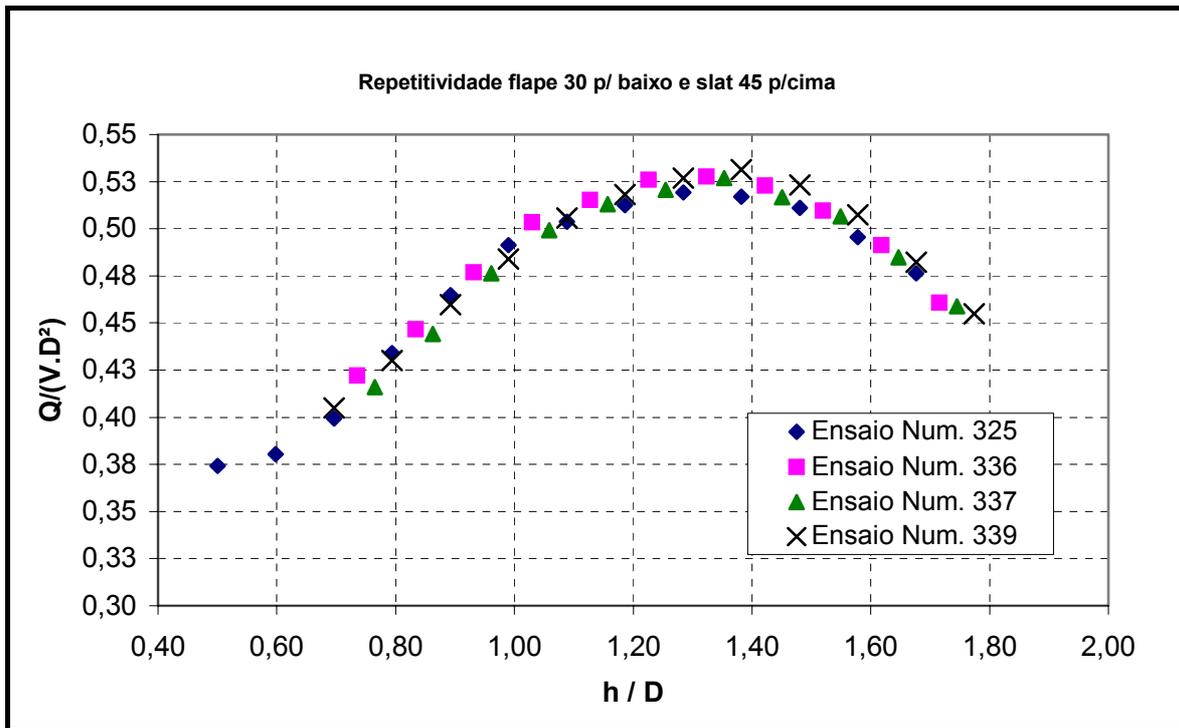


Figura 14. Ensaios de repetitividade na condição de maior vazão succionada

Comparando-se as configurações com “slat” (vide Fig. 13) não se observa modificação na distância adimensional ( $h/D$ ) onde ocorre o máximo valor da vazão sugada pelo dispositivo. Este resultado é interessante pois o ângulo de deflexão do “slat” modifica a distância, em relação a superfície da asa, onde a vorticidade é liberada para o escoamento, de maneira a formar as grandes estruturas vorticiais no extradorso da mesma. Este fato poderia resultar em diferentes distâncias do núcleo dos vórtices em relação a superfície da asa e, portanto, em valores diferentes de  $h/D$  onde ocorre sucção máxima. Por outro lado, na mesma figura pode-se verificar que “slats” mais inclinados acarretam valores mais elevados de vazão sugada pelo dispositivo, indicando que a intensidade dos vórtices gerados cresce em função da inclinação dos “slats” instalados na asa delta. Este resultado é muito interessante, porém, ainda não se tem uma explicação para o mesmo.

Na fig. 14 estão apresentados os resultados de ensaios, realizados com a mesma configuração, em dias diferentes, de maneira a mostrar a repetitividade obtida durante o desenvolvimento desta pesquisa. Vale a pena mencionar que todos os instrumentos foram calibrados antes de cada ensaio. A análise de incerteza foi realizada utilizando-se o método de Kline e McClintock (1953), de onde foram obtidos valores de  $\pm 0,0030$  e  $\pm 0,02$ , para os intervalos de incertezas associados à vazão adimensional e à distância adimensional, respectivamente, com uma confiabilidade de 95%.

## 5. Conclusões :

No presente trabalho estudou-se experimentalmente o desempenho de um dispositivo de ventilação natural, cuja característica fundamental é utilizar a depressão que ocorre no núcleo de vórtices gerados por uma asa delta em alto ângulo de ataque. Devido a isto, a vazão sugada pelo dispositivo é função da intensidade dos vórtices, da posição dos mesmos em relação a extremidade do tubo e, também, da interação que ocorre entre os escoamentos sobre a asa delta e sobre o tubo. Esta interação é muito complexa, sendo caracterizada pela presença dos vórtices longitudinais, gerados pela asa e por vórtices transversais, emitidos alternadamente, presentes na esteira do tubo. Um estudo aprofundado deste escoamento é muito interessante tanto do ponto de vista teórico, quanto do ponto de vista prático, com o objetivo de entender as características do escoamento para maximizar a vazão sugada pelo dispositivo.

A vazão sugada pelo dispositivo é função da dimensão e do ângulo de deflexão de “flaps” instalados no bordo de fuga da asa delta. Esta vazão é incrementada devido: (i) ao aumento da dimensão do “flap” e (ii) ao aumento do ângulo de deflexão. Estes dois parâmetros estão vinculados ao coeficiente de sustentação da asa e, também, a intensidade dos vórtices que se estabelecem no extradorso da asa. A vazão sugada pelo dispositivo varia de forma não linear com ambos os parâmetros acima e este comportamento parece estar associado ao descolamento da camada limite sobre a superfície do “flap”, como ocorre em asas convencionais.

A instalação de “slats” nos bordos de ataque da asa delta também acarretou em aumento da vazão sugada pelo dispositivo, quando defletido em sentido oposto ao “flap” (ângulo de deflexão negativo). Em asas com pouco enflechamento e afilamento mediano a utilização de “slats” com deflexão negativa acarreta redução do coeficiente de sustentação máximo e, devido a isto, o resultado relatado acima não era esperado. A utilização de “slats com ângulo de deflexão negativo provoca aumento da distância entre a asa e a extremidade do tubo na qual se observa o máximo valor da vazão sugada. Este resultado indica que o “slat” modifica a topologia do escoamento, afastando o núcleo dos vórtices da superfície da asa delta e este fato parece estar correlacionado com o incremento da intensidade destes vórtices e, portanto, com o aumento da vazão sugada pelo dispositivo.

Do ponto de vista quantitativo, o emprego de “slats” e “flap” resultaram em um aumento de 40% na vazão sugada relativamente a asa limpa, isto é, um incremento acentuado no desempenho do dispositivo de ventilação natural estudado neste trabalho.

Como mencionado anteriormente, ainda existe uma série de questões sem resposta definitiva, além de questões associadas à interação dos escoamentos sobre a asa e sobre o tubo. Para responder tais questões são necessários ensaios adicionais, dando-se ênfase a visualizações do escoamento associadas a medidas de parâmetros adicionais, tais como o campo de velocidades e a distribuição de pressão na superfície da asa delta. Um aspecto particularmente interessante é verificar se modificações na esteira do tubo podem incrementar a vazão sugada. Estas modificações podem ser implementadas através da utilização de carenagem no tubo e, também, através da instalação de uma placa divisória, que separa o escoamento na esteira em duas regiões, isolando a interação dos vórtices na esteira de von Kármán (vide Roshko, 1954). Este tipo de dispositivo também pode ser instalado na superfície da asa delta e, em asas isoladas, tal iniciativa pode atrasar o aparecimento do “vortex breakdown”, devido a evitar a interação dos vórtices gerados em cada bordo de ataque da asa. Este atraso permitiria aumentar o ângulo de ataque da asa delta e incrementar a vazão sugada pelo dispositivo.

## 6. Agradecimentos

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), que viabilizou a execução da presente pesquisa através de recursos para aquisição de equipamentos associados ao sistema de aquisição de dados e ao Técnico Mário Correia pela manufatura dos modelos.

## 7. Referências :

- Barberis, D. et alli, “Oscillations of Vortex Breakdown Location and its control by tangential Blowing”, AIAA 98-2914, United States.
- Délery, J. et alli, “Etudes fondamentales sur les écoulements Tourbillonnaires”, La Recherche Aérospatiale, 1984, France.
- Delery, J. – Physique des Ecoulements Tourbillonnaires – AGARD “ Symposium sur l’Aérodynamique des écoulements tourbillonnaires “ , 1990, Pays Bas.
- Girardi, R. M. “Implementação de um Dispositivo para Calibração de Baixas Vazões”. XV Congresso Brasileiro de Eng. Mecânica, Águas de Lindóia, SP, Brasil, 1999. Anais do COBEM 1999.
- Girardi, R. M., “A Natural Ventilation Device based on the depression at near wake of bluff body”, Sixth Triennial International Symposium on Fluid Control Measurement and Visualization (FLUCOME), 2000, Sherbrooke, Quebec, Proceedings of the Sixth Triennial International Symposium on Fluid Control Measurement and Visualization.
- Girardi, R.M., “Desempenho de um Dispositivo de Ventilação Natural, baseado nos vórtices gerados por uma asa delta: Medidas em protótipo”, Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas (ENCIT), 2002, Caxambu. Anais do ENCIT 2002.
- Kline, S.J. and McClintock, F.A., 1953, “Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments” ,Mechanical Engineering.
- Marchman III, J. F. ,”Aerodynamics of inverted Leading-edge flaps on Delta Wings”, J. of Aircraft, Vol. 18, n. 12, Dec. 1981.
- Moraes, L. F. G. and Girardi, R. M., “Dispositivo de Ventilação Natural Empregando uma Asa Delta em Alto ângulo de Ataque”, Anais do CONEM 2004, UFPA, 16 Ago 2004.
- Rionie, K. et alli, “Experimental Studies of a 70 degree Delta Wing with vortex flaps”, J. of Aircraft, Vol. 34, n.5, Sept-Oct 1997.
- Rionie, K., “Studies of Vortex Flaps for different Sweepback angle Delta Wings”, The Aeronautical Journal, Nov. 1997.
- Roshko, A., 1954, “On the drag and shedding frequency of two-dimensional bluff bodies”, NACA TN 3169.

## PERFORMANCE DETERMINATION OF A NATURAL VENTILATION DEVICE BASED ON THE VORTICES OF A DELTA WING – WIND TUNNEL MEASUREMENTS

Luís Fernando Gouveia de Moraes

CTA / IAE / Túnel de Vento 12.228-904, São José dos Campos, S.P, Brazil

lfgmoraes@netscape.net

Roberto da Motta Girardi

CTA/ITA/IEA/IEAA 12.228-904, São José dos Campos, S.P, Brazil

girardi@ita.br

### Abstract

*A natural ventilation device is an apparatus used to promote air exchange inside a building (that is, an industry, a house and etc), using the wind energy of the flow external to such building. The working principle of the device studied in the present paper is the depression observed at the great vortices located above the upper side of a delta wing at high angle of attack, relative to the undisturbed flow (atmospheric wind). This device can be described in the following way: (i) A circular tube, with constant diameter, is the way air is withdrawn from the building interior. Such tube crosses the roof and makes the connection between the interior and exterior building regions. (ii) In the tube lower end, a bell shaped entrance is used to reduce the pressure loss at this location and, as a consequence, increase the air flow rate. (iii) At some distance from the tube upper extremity, a delta wing is positioned with a negative angle of attack, in such way the vortices are located in a region between the delta wing surface and the tube upper extremity. In this region, the pressure is lower than the atmospheric one and, as a consequence, a flow is established inside the tube. It is worth to mention that inside the building the pressure is approximately equal to the atmospheric one. The present paper objective is to report the experimental results obtained with a model placed inside a wind tunnel. The performance of the device proposed in this work is determined by making measurements of the flow rate sucked by the device as a function of the wind velocity. On the other hand, the device performance depends on a set of parameters, such as: (i) delta wing angle of attack, (ii) distance between the tube upper extremity and the wing surface, (iii) tube position relative to the delta wing apex and (iv) use of flaps and slats. The parameters listed above were varied in order to find the maximum value for the flow rate sucked by the natural ventilation device.*

Keywords: Aerodynamics, Delta Wing, Natural Ventilation, Wind Tunnel.