

## ESTUDO DO ESCOAMENTO NA ESTEIRA DE UM CORPO ROMBUDO BIDIMENSIONAL

**Karina Diogo de Sousa**

**Roberto da Mota Girardi**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Divisão de Engenharia Aeronáutica, 12.228-900, São José dos Campos, São Paulo, Brasil. E-mail: [girardi@era.ita.cta.br](mailto:girardi@era.ita.cta.br)

### Resumo

Este trabalho busca estudar o escoamento na esteira próxima à um corpo rombudo bidimensional, e os parâmetros que influenciam no mesmo. O mesmo está inserido dentro de um projeto de pesquisa mais amplo, no qual pretende-se otimizar um dispositivo de ventilação natural, que utiliza a depressão na base de um corpo rombudo, para realizar a sucção do ar do interior de uma instalação predial. Em uma primeira etapa, foi realizada a concepção do modelo a ser ensaiado (projeto e construção), bem como a preparação do experimento, onde são feitos mapeamentos dos campos de pressão, velocidade média e flutuante da esteira próxima do modelo, além da frequência de liberação dos vórtices e da vazão succionada pelo modelo. Com base nos resultados obtidos pode-se obter parâmetros importantes do escoamento, tais como o coeficiente de pressão na base, o número de Strouhal, a vazão succionada pelo corpo estudado e discutir a questão da definição do comprimento da região de formação.

**Palavras-chave:** Escoamento bidimensional, Esteira, Corpo rombudo, Ventilação natural

### 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de dispositivos de ventilação natural é muito importante não só por representar economia de energia, mas, também, por evitar adicionais agressões à ecologia devido à formação de represas e emissões de poluentes para a geração de energia elétrica. O dispositivo de ventilação natural estudado neste artigo foi proposto por Girardi (1999a) e é baseado na diferença de pressão entre a base de um corpo rombudo, sujeito ao vento atmosférico, e a região no interior de uma instalação predial. Essa diferença de pressão é induzida pela passagem de um escoamento externo que, contornando o dispositivo, gera uma zona de baixa pressão na base do corpo, causada basicamente pela presença de grandes vórtices na esteira próxima (região de formação) do mesmo. Desta forma, um fluxo de ar é estabelecido entre a região no interior da instalação predial e a base da placa, aberta a atmosfera, onde ocorre uma interação entre o fluxo interno e o escoamento externo, caracterizado pela formação e liberação de grandes vórtices.

Neste trabalho são relatados os primeiros resultados de uma pesquisa básica, cujo objetivo é estudar a interação entre o escoamento externo que passa por um corpo rombudo bidimensional e o fluxo ar proveniente da base do corpo, o qual é aspirado do ambiente devido à depressão que ocorre na esteira. Desta forma, pode-se entender melhor este tipo de escoamento e, com isto, melhorar a eficiência do dispositivo proposto. O objetivo específico do presente trabalho é apresentar e analisar os resultados referentes ao mapeamento dos

campos de velocidade (média e flutuante) e de pressão obtidos para o caso onde não há aspiração, os quais vão servir como base de comparação para os demais experimentos, onde a aspiração do ar será permitida. Além disto, também são analisados os resultados para o número de Strouhal com e sem fluxo interno, assim como a vazão succionada pelo corpo rombudo estudado.

Fage e Johansen (1928) estudaram as esteiras formadas por corpos de diferentes formas, sendo eles, um aerofólio, um cilindro e uma placa plana perpendicular ao escoamento entre outros. Foram obtidos resultados a respeito de características comuns a essas esteiras, a distribuição de velocidades nestas, e a largura média de cada uma delas. Esta largura foi usada para estabelecer a similaridade entre esteiras de corpos rombudos diferentes. Esta similaridade também foi verificada através do número de Strouhal, o qual se mostrou constante em relação à variações do número de Reynolds (Re).

Na região de formação observa-se uma flutuação significativa na medida das velocidades, a qual foi associada à presença de vórtices que são liberados em uma frequência bem definida. Bearman (1965) verificou que o máximo valor de velocidade flutuante (valor rms) é detectado na posição onde os vórtices alcançam sua maior intensidade (circulação) e, em seguida, são liberados para formar a chamada esteira de von Kármán. A distância entre este ponto e a base do corpo foi definida como comprimento da região de formação. Por outro lado, este parâmetro também pode ser definido através de medidas da distribuição de pressão estática ao longo da esteira. Roshko (1954) foi o primeiro a realizar este tipo de medida, verificando a presença de uma região onde a pressão alcança um valor mínimo, localizada na posição onde o vórtice tem a maior intensidade de circulação, isto é, o final da região de formação. Tanto medidas de velocidade de flutuação, como de pressão foram usadas por Sousa (1993) para o mesmo experimento, porém, verificou-se uma discrepância nos valores encontrados para o comprimento da região de formação, obtidos pelas técnicas usadas por Bearman (1965) e Roshko (1954). No presente trabalho são apresentados resultados que podem esclarecer este ponto, de maneira a aprimorar a definição do comprimento da região de formação.

A questão da bidimensionalidade do escoamento sobre um corpo rombudo foi bem discutida no trabalho de Bearman (1965), no qual foi introduzida a idéia do *end plate*, usado para minimizar a interação da camada limite das paredes laterais do túnel de vento com a esteira do corpo rombudo. Bearman (1965) mostrou que esta interação provoca uma distorção do escoamento nas extremidades do modelo, provocando uma tridimensionalidade que se propaga ao longo da envergadura do mesmo.

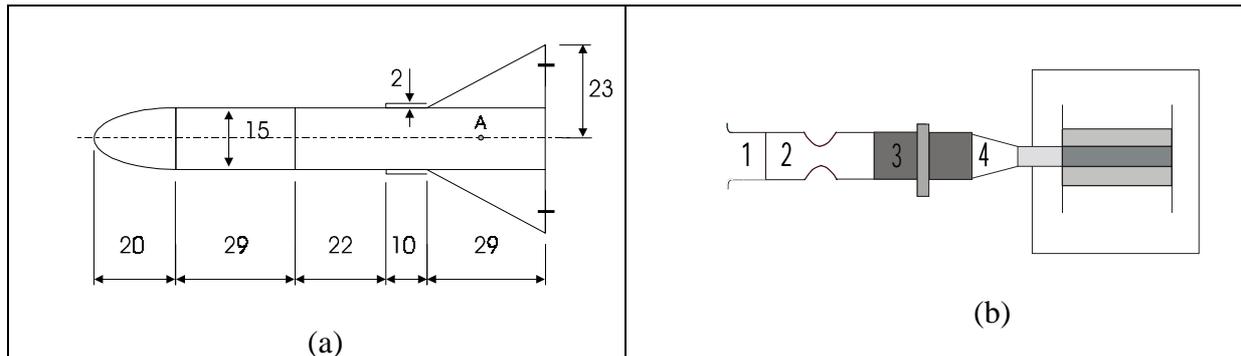
## 2. APARATO EXPERIMENTAL

Foi usado um túnel de vento de sopro, com seção de testes quadrada, com largura de 460 mm. A velocidade do escoamento pode ser variada na faixa entre 10 e 32 m/s e o nível de turbulência para velocidade máxima é de 0,5%.

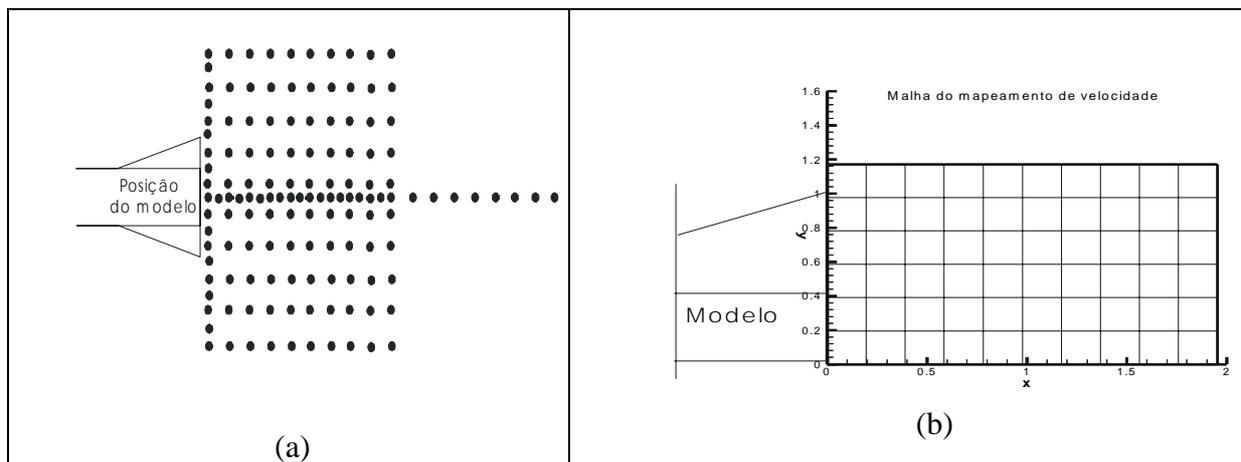
O projeto do modelo, mostrado na Fig. 1, teve como base as dimensões do túnel de vento e conceitos teóricos de aerodinâmica (vide Rae e Pope, 1984) que delimitam a melhor forma e tamanho dados ao protótipo. Uma consideração importante na elaboração do modelo é a razão de bloqueio deste em relação ao túnel, que não deve ultrapassar os 10%. Outra característica importante é a forma do modelo, constituído por: (i) um corpo central, necessário para a acomodação de telas e colméias em seu interior para uniformizar o fluxo de ar interno e (ii) uma cunha de 90 graus, localizada na parte traseira do corpo central, cuja função é aumentar a depressão na região da esteira. Deve ficar claro que este modelo é diferente do estudado por Bearman (1965), justamente pela presença da parte traseira em forma de cunha. A figura 1 b) mostra o modelo considerado junto com a aparelhagem que succiona o ar do ambiente externo. O trajeto percorrido pelo ar no interior da aparelhagem segue a indicação numérica:

proveniente do ambiente externo, entra pela peça indicada com o número 1, seguindo seu trajeto até entrar no modelo pela peça de número 4.

Para garantir a bidimensionalidade foram usados *end-plates*, que são placas fixadas às extremidades do modelo a ser ensaiado, cuja função é isolar o modelo da influência da camada limite das paredes laterais do túnel de vento. As dimensões dos *end-plates* foram calculadas utilizando as relações desenvolvidas por Kubo (1989). Para posicionar os *end-plates* com relação às paredes do túnel de vento é necessário conhecer a espessura da camada limite na seção de ensaio do mesmo. Esta informação foi obtida no trabalho de Sousa (1993), por meio da utilização da técnica de anemometria de fio quente.



**Figura 1:** (a) Vista lateral do modelo (todas as cotas estão em mm) e (b) vista de trás do modelo no interior do túnel de vento, com o duto para aspiração do fluxo de ar do ambiente.



**Figura 2:** (a) Posição das tomadas de pressão na superfície do *end-plate*. (b) Malha para medida dos campos de velocidade média e flutuante

Na superfície de um dos *end-plates* tem-se 136 tomadas de pressão, sendo que elas se situam cobrindo toda a região de formação, como mostrado na Fig. 2(a). Essas tomadas são distribuídas da seguinte maneira: (i) uma fileira vertical situada na base do modelo, com 11 tomadas igualmente espaçadas de 5 em 5mm; (ii) uma fileira horizontal central que começa na base do modelo e se estende até o final do *end-plate* com 27 tomada e (iii) um conjunto de tomadas, distribuídas em forma matricial 10 x 10, distanciados de 10 em 10 mm .

No modelo tem-se 20 pontos de tomada de pressão, onde 10 se situam na seção transversal central do modelo, espaçados de 2 em 2 mm e são usados para determinar a pressão na base do corpo. Outras 10 tomadas são posicionadas ao longo da envergadura do modelo e são usadas para verificar se o escoamento é bidimensional.

O mapeamento do campo de velocidades (média e flutuante) na esteira próxima do modelo foi realizado no plano de simetria do mesmo, no centro de sua envergadura, nos pontos definidos pelos nós da malha apresentada na Fig. 2(b). A medida de velocidade é feita com um anemômetro de fio quente (1 canal), fixando-se a sonda em um dispositivo de posicionamento da Dantec, cuja menor divisão é 0,1 mm. O fato da sensibilidade do anemômetro ser bastante elevada, determina uma boa precisão nas medidas de velocidade, mesmo de valores bastante baixos. Os dados foram coletados com o sistema de aquisição de dados e processados por um programa feito no *software Labview*, no qual o valor médio e o desvio padrão (valor rms) da velocidade são obtidos através de uma amostra da velocidade instantânea. Esse programa permite ao experimentador arbitrar parâmetros como o tempo de medida e a taxa de aquisição das mesmas.

As medidas de pressão foram feitas com a utilização de 4 válvulas seletoras (*scanivalves*), conectadas com 4 transdutores de pressão, as quais trabalham em paralelo, isto é, o sinal de cada um dos transdutores, após amplificado e filtrado, é ligado a um canal do sistema de aquisição de dados. Cada válvula seletora tem a capacidade de medir 48 tomadas de pressão. Para a coleta das medidas de pressão, foi feito um programa no ambiente do *software Labview* que controla automaticamente as válvulas seletoras, através de uma interface com reles, projetada e construída especialmente para este trabalho. No programa de aquisição dos dados e controle do experimento devem ser fixados os tempos de aquisição (60 segundos) e o tempo requerido para a estabilização da pressão, após a mudança de tomada de pressão realizada pela válvula. Após algumas experiências, verificou-se que 20 segundos é um tempo suficiente para a estabilização.

A frequência de liberação de vórtices, necessária para o cálculo do número de Strouhal, foi obtida através de uma amostra da velocidade instantânea medida com o anemômetro de fio quente. Através do sistema de aquisição de dados essa amostra é coletada e enviada a um analisador de espectro digital, existente no *software LabView*. Para este experimento, a sonda de fio quente é posicionada fora da esteira, a aproximadamente um comprimento característico da base do corpo, como feito por Bearman (1965). O ensaio foi feito para vários valores de velocidade do escoamento não perturbado, de maneira a se obter a variação do  $St$  com o  $Re$ .

A vazão succionada foi medida, para cada velocidade do túnel de vento, dentro da faixa permitida por este, com o auxílio do tubo de Venturi introduzido no duto de sucção durante os ensaios de vazão (vide Fig. 1b). Esse tubo de Venturi foi previamente calibrado (Girardi, 1999b) e um transdutor foi usado para medir a diferença de pressão nas tomadas do mesmo. O sinal de saída do transdutor de pressão é condicionado (amplificado e filtrado) e, em seguida, enviado ao sistema de aquisição de dados mencionado anteriormente.

A pressão dinâmica do escoamento não perturbado do túnel de vento é medida em tomadas de pressão, localizadas no início da seção de testes, através de transdutores de pressão, cujo sinal é condicionado e também enviado para o sistema de aquisição de dados. O valor desta pressão dinâmica é corrigido com base nos dados de uma calibração prévia.

### **3. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Neste trabalho são apresentados somente os resultados para o mapeamento de velocidade e de pressão para a configuração do modelo sem fluxo de ar succionado. Neste caso, foi feita a obstrução da entrada de ar (vide Fig. 1b), mantendo o modelo no interior do túnel de vento inalterado. Os resultados dos mapeamentos de velocidade (média e flutuante) são adimensionalizados pela velocidade do escoamento livre. As coordenadas X e Y são adimensionalizadas pela altura da base do modelo, que também é o comprimento característico usado na determinação do número de Reynolds.

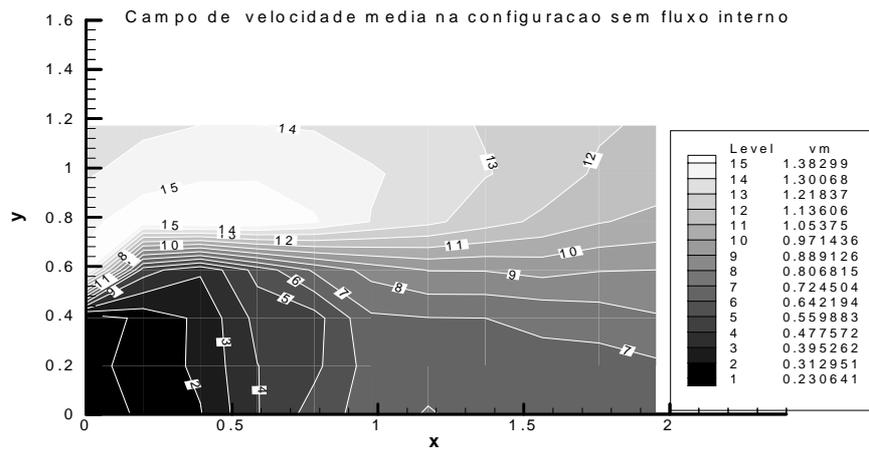
O campo de velocidade média é apresentada na Fig. 3. Pode-se observar que próximo à base do modelo as velocidades são muito baixas, evidenciando a chamada “região de água morta”. Próximo a  $Y=0,5$  (ponto de separação do escoamento) verifica-se a presença da camada de cisalhamento livre, caracterizada por altos valores do gradiente de velocidade (vorticidade).

Na Fig. 4, observa-se que a velocidade de flutuação ( $V'$ ) é incrementada a medida que se caminha ao longo da camada de cisalhamento livre. Para  $X \approx 0,75$  verifica-se que  $V'$  alcança um máximo, que se estende até  $X \approx 1,6$ . Este resultado deve ser explicado com base na velocidade induzida por um vórtice na sonda do anemômetro de fio quente. Logo após o ponto de separação, a vorticidade existente na camada de cisalhamento livre começa a se enrolar para formar um vórtice. Enquanto este vórtice caminha aproximadamente ao longo da camada de cisalhamento livre, sua intensidade (circulação) vai aumentando, acarretando maior flutuação da velocidade quando passa pela sonda de anemômetro de fio quente. Seguindo este raciocínio, verifica-se que a máxima flutuação deve ocorrer quando o vórtice tiver a máxima intensidade. A partir desta situação ocorre o desprendimento e a circulação do vórtice permanece aproximadamente constante, enquanto o mesmo é arrastado para jusante, para formar a chamada esteira de von Kármán. Neste caso, a região de máxima velocidade flutuante é o resultado da passagem do vórtice após ter ocorrido o desprendimento. A diminuição de  $V'$  para  $X > 1,6$  pode estar associada ao aumento do núcleo do vórtice, que ocorre devido à difusão da vorticidade por causa da viscosidade do fluido.

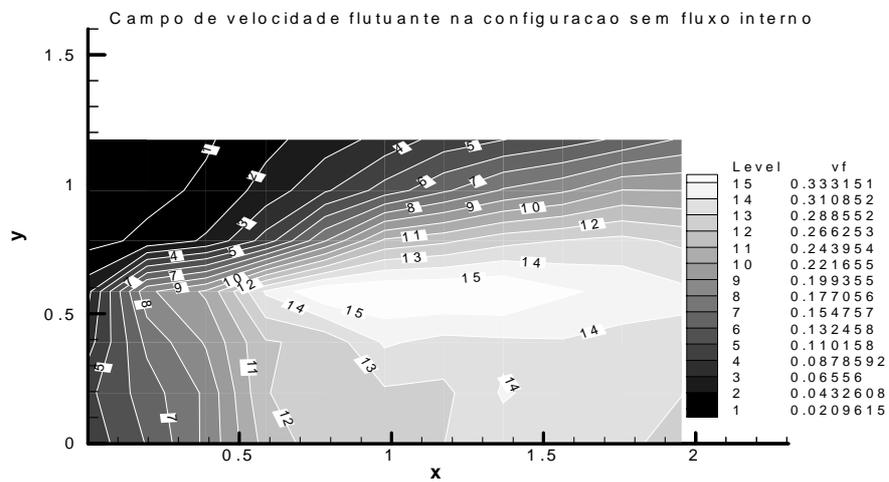
O coeficiente de pressão ( $C_p$ ) na superfície do *end plate* é mostrado na Fig. 5. Próximo à base do modelo, observa-se uma região de pressão constante, a qual é compatível com as baixas velocidades médias encontradas nesta região (vide Fig. 3). Na região entre  $X \approx 0,55$  e  $0,95$  verifica-se que o coeficiente de pressão alcança um valor mais baixo que aquele medido na base do modelo. O centro desta região é localizado em  $X \approx 0,75$  e, segundo Roshko (1954), este ponto é o final da região de formação. Esta afirmação é baseada no fato da pressão no núcleo do vórtice ser menor que a pressão na periferia, de modo que haja um balanço entre as forças de pressão e centrífuga em uma partícula fluida no interior do vórtice. Com base neste equilíbrio de forças, pode-se afirmar que um vórtice mais intenso (maior circulação) deverá ter pressão menor no seu núcleo. Assim, no final da região de formação obtém-se o menor valor de  $C_p$ .

Comparando as Figs. 4 e 5 verifica-se que região de máxima velocidade de flutuação é bem mais espalhada que a região de mínimo  $C_p$ . Levando-se em consideração as explicações dadas nos dois parágrafos precedentes, seria natural concluir que estas regiões coincidissem. Afinal, depois do desprendimento a circulação do vórtice é praticamente constante e a região de baixa pressão deveria se estender para jusante, ao longo da trajetória do mesmo. Esta aparente discrepância pode ser esclarecida recorrendo-se ao fato que o resultado para pressão é fruto de uma medida média, onde devem ser considerados os efeitos combinados dos vórtices liberados de cada fila da esteira e do tempo de permanência destes vórtices em uma região. Com base neste argumento, pode-se concluir que na região entre  $X \approx 0,55$  e  $0,95$  os vórtices levam um certo tempo interagindo entre si, maior que aquele gasto na região à jusante de  $X \approx 0,95$ , onde os vórtices passam de forma isolada, com uma velocidade pouco inferior à do escoamento não perturbado. No caso dos resultados para velocidade flutuante, que são obtidos com o anemômetro de fio quente, verifica-se duas regiões distintas, uma para cada fila de vórtices. Este tipo de medida está associada a passagem de um vórtice com uma determinada intensidade pelo ponto de medida, sendo, aparentemente, menos sensível a questão de tempo de residência discutido anteriormente.

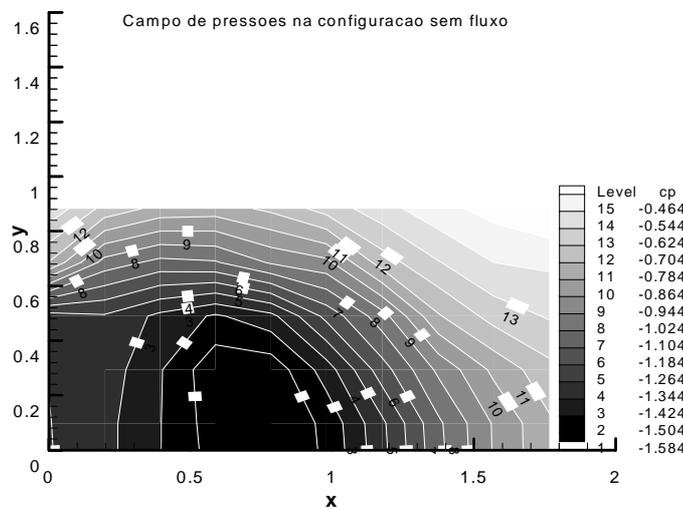
O número de Strouhal ( $St$ ) praticamente não varia com o  $Re$ , como pode ser visto na Fig. 6. Deve-se observar que a escala do gráfico esta bem ampliada e as oscilações no  $St$  estão dentro da faixa de incerteza do experimento. Esta explicação é corroborada pelo fato das



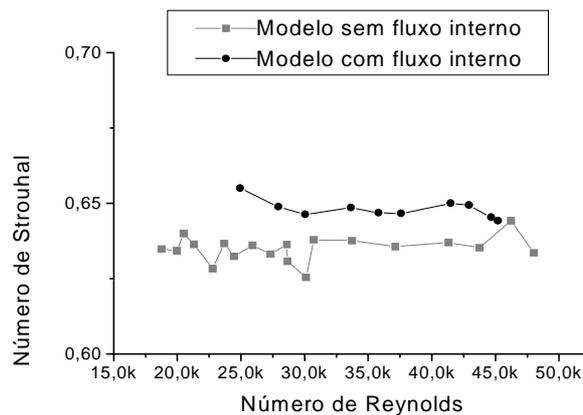
**Figura 3:** Mapeamento da velocidade media na esteira próxima do modelo para  $Re = 6,3 \cdot 10^4$ . Configuração sem fluxo interno.



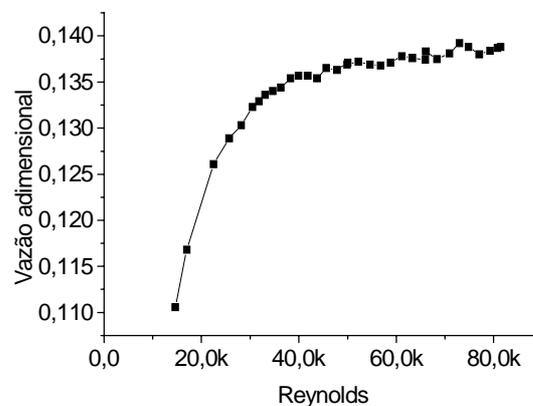
**Figura 4:** Mapeamento da velocidade flutuante (valor rms) na esteira próxima do modelo para  $Re = 6,3 \cdot 10^4$ . Configuração sem fluxo interno.



**Figura 5:** Campo de pressões para  $Re=7,6 \cdot 10^4$ . Configuração sem fluxo interno



**Figura 6:** Variação do número de Strouhal em função do número de Reynolds



**Figura 7:** Variação vazão em função do número de Reynolds

oscilações mencionadas acima serem mais pronunciadas para baixos valores de Re, os quais foram obtidos para valores baixos de pressão dinâmica. Na Fig. 6 pode-se observar que o St para o experimento com fluxo interno é pouco maior que aquele obtido sem fluxo. Até o momento estes autores não conhecem uma explicação para este resultado.

A vazão succionada da região externa ao túnel de vento para o interior da região de formação do modelo é adimensionalizada por  $V \cdot d^2$ , onde “V” é a velocidade do escoamento não perturbado e “d” é a altura da base do modelo. O comportamento observado na Fig. 7 está associado às perdas de carga que ocorrem no escoamento interno ao modelo e a tubulação externa ao túnel de vento, onde foi instalado o tubo de Venturi. É conhecido na literatura (Rae e Pope, 1984) que o coeficiente de perda de carga diminui com o aumento do Re do escoamento interno, provocando o incremento da vazão succionada pelo modelo. Deve-se lembrar que o aumento da velocidade do escoamento não perturbado provoca um incremento da vazão sucionada, com conseqüente aumento do Re do escoamento interno.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram apresentados os primeiros resultados da pesquisa conduzida para estudar o problema da interação do escoamento externo a um corpo rombudo com o escoamento interno, que sai da base deste corpo, devido à sucção causada pela depressão que

ocorre na região de formação. Estes resultados, referentes à configuração sem fluxo interno, servem como base de comparação, para se verificar as alterações que ocorrem quando o fluxo interno esta presente.

Os campos de velocidade média e flutuante e o campo de pressões forneceram informações importantes: (i) critérios para a determinação do comprimento da região de formação foram estabelecidos levando-se em conta tanto o campo de pressões como o de velocidade flutuante e (ii) a questão do tempo de residência dos vórtices na região de formação foi evidenciada.

Para o número de Strouhal foi apresentada uma comparação entre os valores com e sem fluxo interno. Pequena diferença foi detectada, evidenciando a questão da interação entre os escoamentos interno e externo, mencionada acima. No presente trabalho não foi possível fornecer uma explicação para esta diferença, evidenciando a necessidade de experimentos adicionais, que forneçam valores de outros parâmetros, que possam ser correlacionados com o  $St$ , de modo a se poder extrair informações que auxiliem na compreensão do escoamento em questão.

O comportamento da vazão succionada em função do  $Re$  foi análogo ao observado para o caso do modelo tridimensional do dispositivo de ventilação natural, relatado por Girardi (1999a). Este fato indica que os estudos em modelos bidimensionais deverão ser úteis para melhoria do dispositivo real.

Por meio de experimentos adicionais, foi possível constatar que o número de Reynolds na faixa analisada, não exerce influência determinante no comprimento e na largura da região de formação.

## 5. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Ampara a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelos recursos disponibilizados para a aquisição de equipamentos usados nesta pesquisa (processo 95/05569-1) e pelo suporte dado ao primeiro autor, na forma de bolsa de estudo (processo 98/12248-5).

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bearman, P.W., 1965, "Investigation of the flow behind a two-dimensional model with a blunt trailing edge and fitted with splitter plates", *J.Fluid Mech.*, vol.21, pp.241-255.
- Fage, A . and Johansen, F.C., 1928, "The structure of vortex sheets", *Phil.Mag*, vol.5, pp.417-441.
- Girardi, R.M., 1999a, "Natural ventilation device: a practical use for the depression in a bluff body wake", Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM), "Águas de Lindóia, SP, Brazil, (in CD).
- Girardi, R.M., 1999b, "Implementação de um Dispositivo para Calibração de Baixas Vazões", Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM), "Águas de Lindóia, SP, Brasil, (em CD).
- Kubo, Y. et al, 1989, "Effects of end plates and blockage of structural members on drag forces", *J. Wind Eng. Ind. Aerodynamics*, vol.32, pp.329-342.
- Rae, W.H. and Pope, A., 1984, "Low speed wind tunnel testing", John Wiley & Sons, Second edition, USA.
- Roshko, A., 1954, "On the drag and shedding frequency of two-dimensional bluff bodies", NACA TN 3169.
- Sousa, F.L., 1993, "Influência da razão de bloqueio no escoamento plano sobre corpos rombudos", Tese de mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), S.J.Campos, SP.