

PROJETO DE UM TÚNEL DE VENTO EXPERIMENTAL EM FORMA DE BANCADA DIDÁTICA PARA USO EM AULAS DE ENGENHARIA

Carlos Vinicius Xavier Bessa – carlosviniciusxb@gmail.com

Universidade Federal de São Paulo, Campus Diadema, Departamento de Química

Endereço: Av. Nossa Senhora da Assunção, n.º 647, ap. 123C

CEP: 05359001 – São Paulo - SP

Fabiano Pagliosa Branco – pagliosa@gmail.com

Mauro Conti Pereira – maurocp@gmail.com

Universidade Católica Dom Bosco (UCDB),

Cursos de Engenharias Mecânica, Mecatrônica e da Computação

Av. Tamararé nº 6000

CEP 79117-900 – Campo Grande – MS

IFMS – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de MS

Av. Julio de Castilho nº 4960 – Jd. Panamá

CEP 79113-000 – Campo Grande – MS

Resumo: Este artigo descreve o projeto de um túnel de vento subsônico de circuito aberto e câmara de ensaio fechada, apresentando justificativas, cálculos e seleção de formas para os trechos que compõem o sistema. Um dos diversos cursos presentes no ensino de engenharia é o de Mecânica dos Fluidos, que trata das propriedades de fluidos em diversos estados e situações, bem como forças, pressões e turbulências causadas em um escoamento. O túnel de vento é uma das principais ferramentas de pesquisas experimentais no campo da aerodinâmica, uma das áreas de estudo da Mecânica dos Fluidos. No sistema projetado é possível visualizar o escoamento do fluxo, mensurar o perfil de velocidades descrito pela corrente de ar na câmara de ensaio e definir perdas de carga em uma superfície ou elemento.

Palavras-chave: Aerodinâmica, Mecânica dos Fluidos, Escoamento subsônico.

1 INTRODUÇÃO

O desejo de voar surgiu no homem ao observar os pássaros desbravando os céus, tal desejo é tão antigo que existem personagens da mitologia grega, Dédalo e Ícaro, que voavam utilizando protótipos de asas. (SMITH, 1992)

Para alçar vôo, fez-se necessário ao homem entender quais parâmetros possibilitariam tal feito, assim, a aerodinâmica surgiu, tendo como objetivo entender os fenômenos que um corpo deslocando-se pelo ar sofre.

Segundo CARRIL (1995), os primeiros experimentos realizados mostraram que os esforços devido a um escoamento de ar sobre um objeto é função da velocidade relativa entre eles, sendo assim, não importa se o objeto estudado se move no ar, ou se um fluxo de ar escoou ao redor do objeto.

Inicialmente, fez-se uso de ventos naturais para prover os estudos, mas a falta de controle dos parâmetros do escoamento levou ao desenvolvimento e criação dos túneis de vento. BLESSMANN (1990), em seu trabalho sobre aerodinâmica das construções, afirma que o

túnel desenvolvido por Francis Herbert Wenham em 1871 foi provavelmente o primeiro construído.

O mesmo autor também cita que, no final do século XIX, foi concluído que a melhor forma de realizar estudos aerodinâmicos seria a construção de túneis de vento, onde o ar escoava em torno de um modelo estacionário. WITTEWER *et al.* (2000) define túneis de vento como “equipamentos projetados para se obter condições e escoamentos de ar”.

O estudo de mecânica dos fluidos é vital em boa parte das áreas de atuação da engenharia, uma das áreas estudadas por ela é a fluidodinâmica, onde está inserida a aerodinâmica. SMITH (1992) define aerodinâmica como sendo o estudo do comportamento do ar em movimento e as forças resultantes advindas desse movimento. Com o intuito de estudar essa área da fluidodinâmica, foi proposta a construção do túnel de vento subsônico, pois este é o principal instrumento em um ensaio aerodinâmico.

2 CARACTERIZAÇÕES DE TÚNEL DE VENTO

As principais formas de caracterização para túneis de vento são feitas de acordo com a configuração da câmara de ensaio, com o circuito apresentado e pela velocidade desenvolvida em seu interior.

2.1 Caracterização pela câmara de ensaio

De acordo com BARLOW *et al.* (1999) as câmaras de ensaio podem apresentar as configurações aberta ou fechada. A primeira configuração é de simples construção e custo baixo, porém, CARRIL (1995) afirma que câmaras de ensaio em configuração aberta apresentam perdas de carga muito maiores que as câmaras em configuração fechada, diminuindo a velocidade do vento.

Na configuração aberta a câmara de ensaio não influencia o escoamento, sendo esta a configuração ideal para a simulação de aviões que voam longe da superfície da terra em altitudes elevadas. Já para a simulação de aparatos que se deslocam próximos a superfície, ou para o estudo de ventos câmaras de ensaio fechadas são mais utilizadas. Optou-se no projeto por uma câmara de ensaio fechada por apresentar menores perdas de carga.

2.2 Caracterização pelo tipo de circuito

Para a caracterização pelo tipo de circuito, os túneis de ventos são definidos como de circuito aberto, representado na Figura 1, ou de circuito fechado, como mostrado na Figura 2.

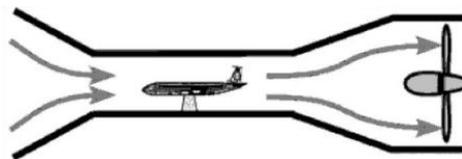


Figura 1 – Túnel de vento de circuito aberto. (ANDERSON & SCOTT, 2009)

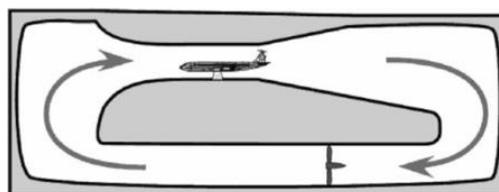


Figura 2 – Túnel de vento de circuito fechado. (ANDERSON & SCOTT, 2009)

Segundo BARLOW *et al.* (1999) os túneis de vento de circuito aberto são mais influenciados pelo ambiente externo do que os de circuito fechado, já que no segundo o ar externo não adentra no sistema. Porém, túneis de vento de circuito fechado são mais complexos, caros e de construção mais difícil que túneis de circuito aberto, sendo viável sua aplicação somente em casos que necessitem de extrema precisão.

Porém, a visualização do escoamento é prejudicada nos túneis de circuito fechado, pois pode haver recirculação de fumaça quando essa é inserida para revelar o escoamento. Como é interessante para o ensino de Mecânica dos Fluidos a visualização de turbulências em um escoamento, optou-se pelo projeto de um túnel de circuito aberto.

2.3 Caracterização pela velocidade de escoamento

Os túneis de vento podem também serem classificados de acordo com a velocidade de escoamento desenvolvido em seu interior. Os termos subsônico e supersônico fazem referência a velocidades que são respectivamente menores e maiores que a velocidade de propagação do som no meio. De acordo com FOX *et al.* (2006), o número de Mach (M), é igual à razão entre a velocidade local do escoamento (v) e a velocidade local de propagação do som (c), como demonstrado na Equação (1).

$$M = \frac{v}{c} \quad (1)$$

Conclui-se com a Equação (1) que, se $M < 1$, tem-se um escoamento subsônico. Quando $M > 1$, tem-se um escoamento supersônico. Existe também outra classificação de escoamento referida à velocidade de propagação do som, que é o escoamento sônico, onde $M = 1$, ou seja, a velocidade de escoamento do fluido é igual à velocidade local de propagação do som. É fundamental definir em que situação ocorre o escoamento, pois as propriedades e as características físicas do escoamento mudam significativamente de acordo a classificação.

Uma vantagem do escoamento subsônico são as baixas velocidades geralmente desenvolvidas neste, segundo FOX *et al.* (2006), quando $M < 0,4$ o escoamento de ar pode ser considerado incompressível, assim, optou-se por um túnel de baixa velocidade. O túnel projetado é classificado como sendo um túnel de vento subsônico de circuito aberto e câmara de ensaio fechada.

3 MODELAMENTO MATEMÁTICO

O sistema é constituído por um trecho de contração, que acelera o fluxo de ar gradualmente, uma grelha retificadora, que tem por função estabilizar o escoamento, uma câmara de ensaio, onde serão ensaiados os modelos, um difusor, que liga o conjunto ao sistema propulsor, que fornece uma diferença de pressão e proporciona o escoamento. A disposição das partes do sistema pode ser observada na Figura 3.

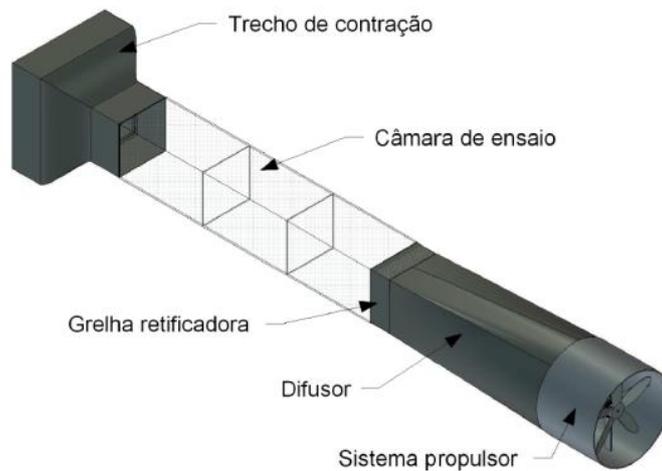


Figura 3 – Sistema proposto.

3.1 Câmara de ensaio

BARLOW *et al.* (1999) afirma que a câmara de ensaio deve ser projetada de acordo com os experimentos que se pretende realizar, principalmente segundo os modelos a serem ensaiados. O formato e área da câmara de ensaio definem o trecho de contração, o difusor e o sistema propulsor. Assim, em projetos de túneis de vento deve-se iniciar pela câmara de ensaio.

As perdas de carga causadas pela forma da câmara de ensaio são desprezíveis, deve-se então optar sempre que possível por formas de simples construção, que diminuem o custo do projeto. (RAE & POPPE, 1984)

O escoamento no interior da câmara deve ser uniforme, paralelo e livre de turbulências, pois é na câmara que são ensaiados os modelos e instalados os instrumentos. MORAIS (2007) afirma que, para que as paredes da câmara de ensaio não causem interferências no escoamento sobre o modelo ensaiado, as paredes devem estar a uma distância de $7d$ do modelo, isso é, para um modelo de dimensão d , as paredes devem estar a $7d$ de distância da superfície do modelo.

Como citado anteriormente, as paredes da câmara de ensaio devem estar a uma distância de $7d$ do modelo de dimensão d . Seguindo esse princípio, para ensaiar modelos pequenos, seria necessária uma câmara de ensaio de dimensões grandes, o que levaria o encarecimento do sistema propulsor (para conseguir velocidades mais elevadas) e também exigiria uma quantidade maior de material para construção.

O projeto em questão tem por fim o ensino de aerodinâmica, sendo assim, não há necessidade de que o modelo não sofra alguma influencia das paredes da câmara de ensaio. O sistema propulsor que fornecerá energia cinética ao sistema é um exaustor que não estava sendo usado, sendo assim, a vazão do sistema já estava determinada, fez-se o dimensionamento da câmara considerando a vazão fornecida pelo exaustor.

Para a verificação da velocidade média na câmara de ensaio (v_{cam}), utilizou-se a Equação (2). Essa equação despreza as perdas de cargas no sistema.

$$v_{cam} = \frac{Q}{A_{indiff}} \quad (2)$$

O sistema dimensionado possui uma câmara de ensaio com as dimensões apresentadas na Figura (4) comprimento total de 1,32 m, dividida em três seções de 0,44 m. As arestas da câmara de ensaio possuem 0,24 m, para uma seção transversal quadrada, a área da câmara de

ensaio, que é igual à área de entrada do difusor, A_{indiff} , é $0,0576 \text{ m}^2$. A câmara projetada é apresentada na Figura. 4.

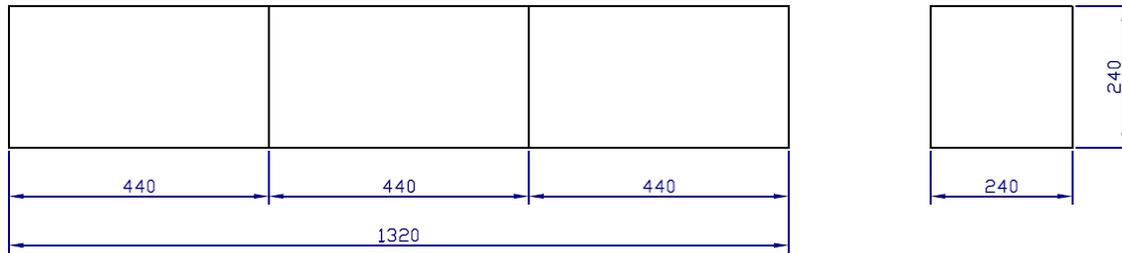


Figura 4 – Câmara de ensaio projetada para o túnel (Medidas em milímetros).

A vazão proporcionada pelo sistema propulsor é de $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$, desconsiderando as perdas de carga, o escoamento de ar no interior da câmara de ensaio deve desenvolver uma velocidade média por volta de 20 m/s .

3.2 Trecho de contração

Segundo CARRIL (1995), um bom projeto do trecho de contração deve produzir um escoamento paralelo, uniforme e com níveis reduzidos de turbulência, evitando um descolamento da camada limite, pois, caso contrário, o escoamento na câmara de ensaios é prejudicado.

Há diversos métodos matemáticos para se efetuar a determinação o perfil da parede do trecho de contração, de acordo com MOREL (1975) o escoamento de ar na saída do trecho de contração deve ser uniforme, para isso, o autor propõe um perfil de parede formado por duas curvas cúbicas, unidas suavemente em um ponto de inflexão.

FANG *et al.* (2001) propõem que o perfil da parede da região de contração deve ser construído de acordo com a Equação. (3) quando $x < x_m$ e pela Equação. (4) quando $x > x_m$, onde x_m é representado pela Equação (5). Os termos que compõem as equações podem ser observados na Figura. 5.

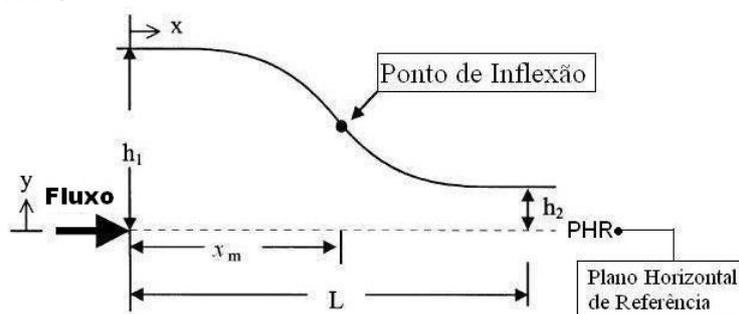


Figura 5 – Perfil da parede do trecho de contração. (FANG *et al.*, 2001)

$$y = (h_1 - h_2) \left[1 - \frac{L}{x_m^2} \left(\frac{x}{L} \right)^3 \right] + h_2 \quad (3)$$

$$y = \frac{(h_1 - h_2)}{1 - X_m} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^3 + h_2 \quad (4)$$

$$X_m = \frac{x_m}{L} \quad (5)$$

Fez-se uso do software MATLAB 6.0 para auxiliar na escolha do perfil da parede do trecho de contração. Desenvolveu-se um programa que plota gráficos fazendo uso das Equações (3), (4) e (5). Após algumas interações, adotou-se a configuração apresentada na Figura (6).

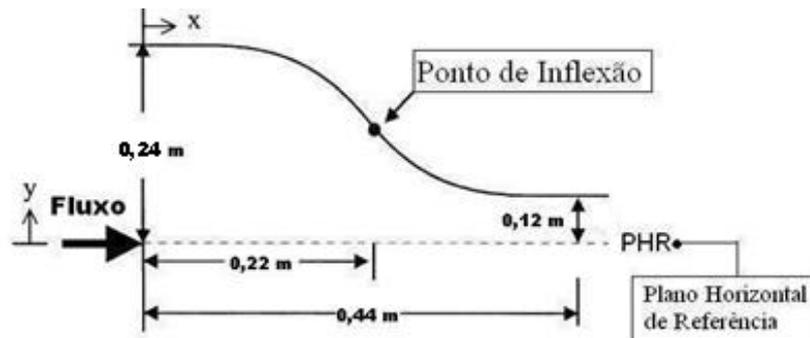
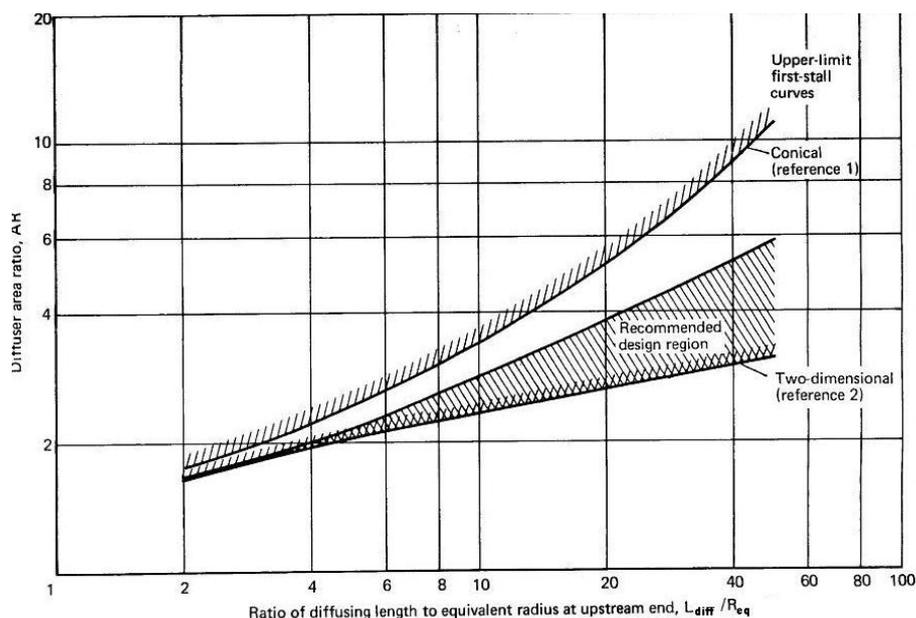


Figura 6 – Trecho de contração dimensionado.

3.3 Difusor

Através do difusor a câmara de ensaio é ligada ao sistema propulsor, no projeto, a câmara de ensaio tem seção transversal quadrada, enquanto o sistema propulsor tem seção transversal circular. Para que não sejam inseridas no escoamento turbulências, a mudança de seção deve ocorrer de forma suave e gradual.

ECKERT *et al.* (1976) propõem a utilização do gráfico apresentado na Figura 7 para o projeto de difusores em túneis de vento.



(b) Recommended design region.

Figura 7 – Gráfico para dimensionamento do difusor. (ECKERT *et al.*, 1976)

Tem-se que, na Figura 7, as linhas verticais do gráfico representam a razão entre o comprimento do difusor (L_{diff}) e o raio equivalente, R_{eq} , demonstrado na Equação. (5).

$$R_{eq} = \sqrt{\frac{A_{indiff}}{\pi}} \quad (5)$$

Na equação anterior, A_{indiff} representa a área de entrada do difusor, que no túnel projetado é igual à área da câmara de ensaio. As linhas horizontais do gráfico apresentado na Figura 5 são equivalentes a razão entre as áreas de saída e entrada do difusor, essa relação é conhecida como razão de difusão.

No sistema projetado tem-se que, a área de entrada do difusor é igual à área da câmara de ensaio, e a área de saída do difusor é igual à área relacionada ao diâmetro do sistema propulsor. Sabendo que a razão de difusão é equivalente a razão entre as áreas de entrada e saída do difusor, tem-se que esta é igual a 2,18.

Fazendo uso da Equação (5) determina-se o raio equivalente da seção de entrada do difusor, tem-se para o sistema que $R_{eq} \approx 0,1354$, observando o valor no gráfico da Figura (7) tem-se que a razão entre o comprimento do difusor (L_{diff}) e o raio equivalente deve estar situada entre 5,93 e 6,55 para estar dentro da região recomendada. Tem-se então que $0,8m < L_{diff} < 0,88m$. Optou-se por construir um difusor de 0,85m de comprimento.

3.4 Grelha retificadora

A grelha retificadora tem por função estabilizar o sistema, impedindo ou minimizando que turbulências que venham aparecer no difusor adentrem a câmara de ensaio. RAE *et al.* (1984) afirmam que o comprimento mínimo para a grelha retificadora é de 6 a 8 vezes a largura de sua célula. No caso de uma célula quadrada, a largura é igual à aresta da célula.

O sistema construído é dotado de uma grelha retificadora, situada entre a câmara de ensaio e o difusor. Quanto maior a velocidade de escoamento, maior é a perda de carga causada pela grelha, essa é instalada numa das regiões onde a velocidade é mais alta, porém, isso é justificado por essa região apresentar a menor área, diminuindo o custo de confecção.

A grelha projetada, mostrada na Figura 8, apresenta 658 células de seção circular, com 10 mm de diâmetro para cada célula, assim, optou-se por células do comprimento de 0,08 m, comprimento dessa forma a grelha tem seção quadrada com arestas de 0,24 m.

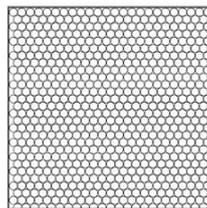


Figura 8 – Grelha retificadora projetada.

3.5 Sistema propulsor

HENN (2006) afirma que, para definir corretamente qual máquina de fluxo que deve fornecer a diferença de pressão ao sistema, pode-se utilizar o método da rotação específica (n_{qa}). Para a aplicação de tal modelo, é necessário antes definir o salto energético específico (

Y), a vazão requerida (Q), a diferença de pressão que deve ser aplicada (Δp) e a densidade do ar (ρ). Para o cálculo de Y , pode-se aplicar a Equação (6).

$$Y = \frac{\Delta p}{\rho} \quad (6)$$

Onde Δp é equivalente à perda de carga no túnel, assim para sua determinação deve-se estimar a perda de carga no sistema. Para a determinação de n_{qa} aplica-se a Equação (7). Com a determinação da velocidade de rotação específica basta escolher a máquina de fluxo apropriada segundo a Tabela. 1.

$$n_{qa} = 10^3 \frac{Q^{1/2}}{Y^{3/4}} \quad (7)$$

O sistema propulsor utilizado no sistema construído foi doado pela Universidade Católica Dom Bosco, consiste de um exaustor de parede, um ventilador axial feito em aço inox, com 400 mm de diâmetro.

Tabela 1 – Valores de n_{qa} indicados para diferentes máquinas de fluido (HENN, 2006)

Tipo de máquina de fluido	n_{qa}
Compressores de deslocamento positivo	$n_{qa} < 20$
Ventiladores e turbocompressores centrífugos	$20 = n_{qa} < 330$
Ventiladores e turbocompressores axiais	$330 = n_{qa} < 1800$

4 INSTRUMENTAÇÃO

Os equipamentos necessários para instrumentar completamente um túnel de vento são caros, então, optou-se por uma instrumentação mais simplificada, visto que esta pode ser aperfeiçoada ao longo do tempo.

O túnel de vento projetado é dotado de um anemômetro de fio-quentetubo, que tem por função determinar velocidades de escoamento no interior do sistema. Também foi inserido um manômetro multi-tubos, para verificar diferenças de pressões.

Para permitir a visualização do escoamento, o sistema é dotado de uma máquina de fumaça, assim, zonas de baixa pressão, turbulências e outros fenômenos que ocorrem na câmara de ensaio poderão ser observados.

5 CONCLUSÕES

O sistema de túnel de vento proposto foi dimensionado, projetado, instrumentado e construído, conforme pode ser observado na Figura 9.



Figura 9 – Túnel de vento construído.

A fim de determinar o tipo de escoamento na câmara de ensaio fez-se um ensaio de visualização. BLESSMANN (1990) afirma que, em um escoamento sobre cilindro, para uma camada limite laminar, o ponto de descolamento deve estar em torno de 80° em relação ao ponto de estagnação. Quando a camada limite apresentar-se turbulenta (apenas em velocidades de escoamento muito elevadas), o descolamento acontecerá em ângulos mais elevados, podendo superar os 130° . O ponto de estagnação é o ponto onde o escoamento é perpendicular a superfície do cilindro. Na Figura 10 podem-se observar os pontos e ângulos discutidos no ensaio realizado.

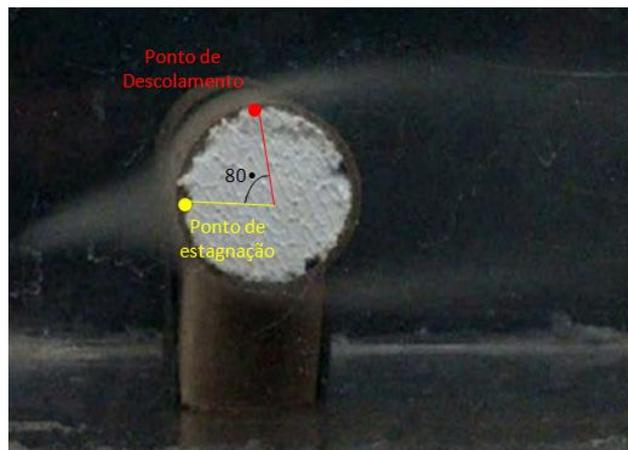


Figura 10 – Ensaio para determinação do tipo de camada limite.

Outros ensaios foram realizados, para verificação de distribuição de velocidades e visualização de escoamento sobre modelos. Pretende-se futuramente, desenvolver mais experimentos para que esses sejam aplicados em aulas durante o curso de Mecânica dos Fluidos da Universidade Católica Dom Bosco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, D.F, SCOTT, E., **Understanding Flight**, McGraw-Hill, 2nd ed., United States of America, 293p., 2009.

BARLOW, J.B., REA, W.H., POPE, A., **Low-Speed Wind Tunnel Testing**, Wiley-Interscience, United States of America, 728p., 1999.

BLESSMAN, J., **Aerodinâmica das Construções**, Editora Sagra Luzzatto, 2^a ed., Porto Alegre, RS, 264p., 1990.

CARRIL Jr, C.F, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO **Projeto, Construção e Calibração de um Túnel de Vento**, 100p., 1995. Dissertação (Mestrado).

ECKERT, W.T., MORT, K.W., JOPE, J., **Aerodynamic Design Guidelines and Computer Program for Estimation of Subsonic Wind Tunnel Performance**, National Aeronautics and Space Administration, United States of America, 186p., 1976.

FANG, F.M., CHEN, J.C., HONG, Y.T., **Experimental and analytical evaluation of flow in a square to square wind tunnel contraction**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, National Chung-Hsing University, Editora Elsevier, Taiwan, pp. 247-262., 2001

FOX, R.W., McDONALD, A.T., PRITCHARD, P.J., **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, Editora LTC, 6ª ed., Rio de Janeiro, RJ, 798p, 2006.

HENN, E.A.L., **Máquinas de Fluido**, Editora UFSM, 2ª ed., Santa Maria, RS, 474p., 2006.

MOREL, T., **Comprehensive Design of Axisymmetric Wind-Tunnel Contractions**, Journal of Fluid Engineering, 225p., 1975.

MORAIS, V. S., **A Interferência no Escoamento de um Fluido (Simulado Numericamente) Imposto pela Presença de Um Par de Cilindros de Base Quadrada Dispostos em Diferentes Situações de Geometrias cartesianas**, 4º PDPETRO, Campinas, SP, 2007

RAE Jr, W. H., POPE, A., **Low-Speed Wind Tunnel Testing**, 2nd. Ed. New York, John Wiley & Sons., 1984

SMITH, H., **The illustrated guide to aerodynamics**, McGraw-Hill, 2nd ed., United States of America, 186p., 1992.

WITTEWER, A.R., MÖLLER, S.V, **Characteristics of the low-speed Wind tunnel of the UNNE**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elsevier, pp. 307-320., 2000.

DESIGN OF A DIDACTIC WIND TUNEL FOR EXPERIMENTAL ENGINEERING CLASSES

Abstract: *This paper describes the design of a subsonic wind tunnel of the open circuit and closed test chamber type, including its design decisions, calculations and shape selection for each system component. One of these various areas in engineering education is Fluid Mechanics, which deals with the properties of fluids in several states and situations, as well as forces, pressures and turbulence in a flow. A wind tunnel is one of the main tools for experimental research in aerodynamics, a sub-area of Fluid Mechanics. The system described here is able to view the stream flow, measure the velocity profile described by the air flow in the test chamber and set pressure drops on a surface or element.*

Key-words: *Aerodynamics, Fluid mechanics, Subsonic flow.*