

Roteiro de experiência de laboratório:

# Escoamento ao redor de um cilindro em túnel de vento

## 1 Introdução

Nesta experiência de laboratório é apresentado o estudo da interação fluido-corpo na qual um fluido em movimento percorre o contorno da superfície externa de um corpo. Nestes casos é usual atribuir-se a denominação escoamento externo para situações em que o corpo está todo envolvido por fluido em movimento. Exemplos diversos onde este fenômeno ocorre podem ser citados, como dos automóveis, aviões, planadores, edifícios e pássaros, envolvidos pelo ar, ou dos submarinos, pilares de pontes e peixes, imersos em água.

O corpo escolhido para os ensaios é um cilindro fabricado em acrílico e o fluido que irá escoar ao redor dele será o ar atmosférico, movimentado em um túnel de vento.

## 2 Objetivos

A experiência tem como objetivos:

- a) realizar a medição da velocidade do ar com o uso de um tubo de Pitot estático, aplicando a equação de Bernoulli;
- b) determinar a distribuição de pressões e de coeficiente de pressão na superfície do cilindro;
- c) determinar a força de arrasto e o coeficiente de arrasto associados às pressões;
- d) analisar o comportamento do escoamento na região próxima ao cilindro, determinando suas características (laminar, turbulento) e observando o fenômeno da separação.

## 3 Fundamentos

### 3.1 Força e coeficiente de arrasto

Quando um corpo sólido está imerso em um fluido e há movimento relativo entre eles, surge uma força resultante desta interação. Esta força aplicada sobre o corpo é usualmente expressa em termos de duas componentes, uma paralela à velocidade do escoamento ao longe, chamada de *força de arrasto* ( $D$  ou  $F_D$ ), e outra perpendicular à velocidade do escoamento ao longe, chamada de *força de sustentação* ( $L$  ou  $F_L$ ).

Mesmo sendo o cilindro estudado tridimensional, adota-se nesta análise uma simplificação, fazendo-a bidimensional, conforme apresentado na figura 1. Uma consequência desta análise bidimensional é considerar as forças por unidade de comprimento na direção do eixo.

Em termo gerais, a interação fluido-corpo ocorre através de forças de superfície (contato). Estas forças estão associadas às distribuições de tensões tangenciais e normais sobre a superfície

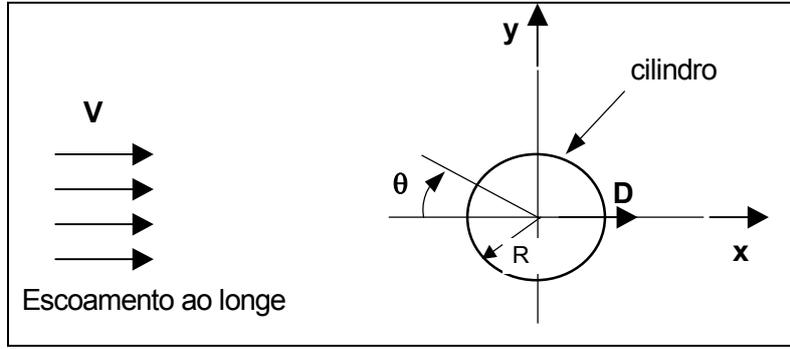


FIGURA 1 – Representação do escoamento em torno do cilindro e suas referências.

do cilindro. Num escoamento incompressível viscoso, como o considerado nesta experiência, as tensões tangenciais aparecem devido ao cisalhamento na camada limite e as tensões normais se devem à pressão ( $p$ ). A soma das integrações na área superficial do cilindro das distribuições de tensões de cisalhamento e de pressões resulta na *força total* ( $\vec{F}$ ), com componentes de arrasto e de sustentação. Nesta experiência, a contribuição das tensões tangenciais (atrito viscoso) será desprezada e, portanto, somente a integração das pressões será efetuada. Assim,

$$\vec{F} \approx \vec{F}_p \equiv - \int_A p \, d\vec{A},$$

onde  $\vec{F}_p$  simboliza a parcela da força resultante devida às pressões,  $A$  é a área da superfície do cilindro e  $d\vec{A} = \vec{n}dA$  é o vetor de área infinitesimal<sup>1</sup>.

Devido à simetria do cilindro e da média temporal do campo de velocidades em relação ao eixo  $x$ , a distribuição média de pressões também será simétrica em relação ao mesmo eixo, o que resulta em sustentação nula ( $L = 0$ ) para este escoamento. Assim, o foco deste estudo dirige-se para a força de arrasto, dada por

$$D \equiv \vec{F} \cdot \hat{i} \approx - \int_A p \, d\vec{A} \cdot \hat{i} = \int_A p \cos \theta \, dA,$$

onde  $\hat{i}$  é o versor na direção  $x$  e  $\theta$  é o ângulo do ponto considerado na superfície em relação ao eixo  $x$ , orientado conforme mostrado na figura 1. Sendo  $b$  o comprimento do cilindro e  $R$  o seu raio, a força de arrasto por comprimento do cilindro pode ser aproximada por

$$\frac{D}{b} \approx \int_0^{2\pi} p \cos \theta R \, d\theta. \quad (1)$$

A integração da equação (1) pode ser realizada de modo discreto tomando a somatória das contribuições da pressão sobre áreas definidas por intervalos angulares  $\Delta\theta$ , com  $\theta$  variando apenas de 0 a  $\pi$ , e multiplicando o resultado por dois. Isto porque está considerada a simetria do escoamento em relação ao eixo  $x$ . Assim,

$$\frac{D}{b} \approx 2 \sum_{i=1}^n p_i \cos \theta_i R \Delta\theta = 2R \Delta\theta \sum_{i=1}^n p_i \cos \theta_i,$$

onde  $p_i$  é a pressão no ponto referente ao ângulo  $\theta_i$ , e  $n$  é o número de pontos considerados para o cálculo, distribuídos de forma equiespaçada na semicircunferência de  $y$  positivo ou negativo.

<sup>1</sup>Um vetor de área tem módulo igual à área do elemento, direção normal ao elemento de área e sentido apontando para fora do corpo.

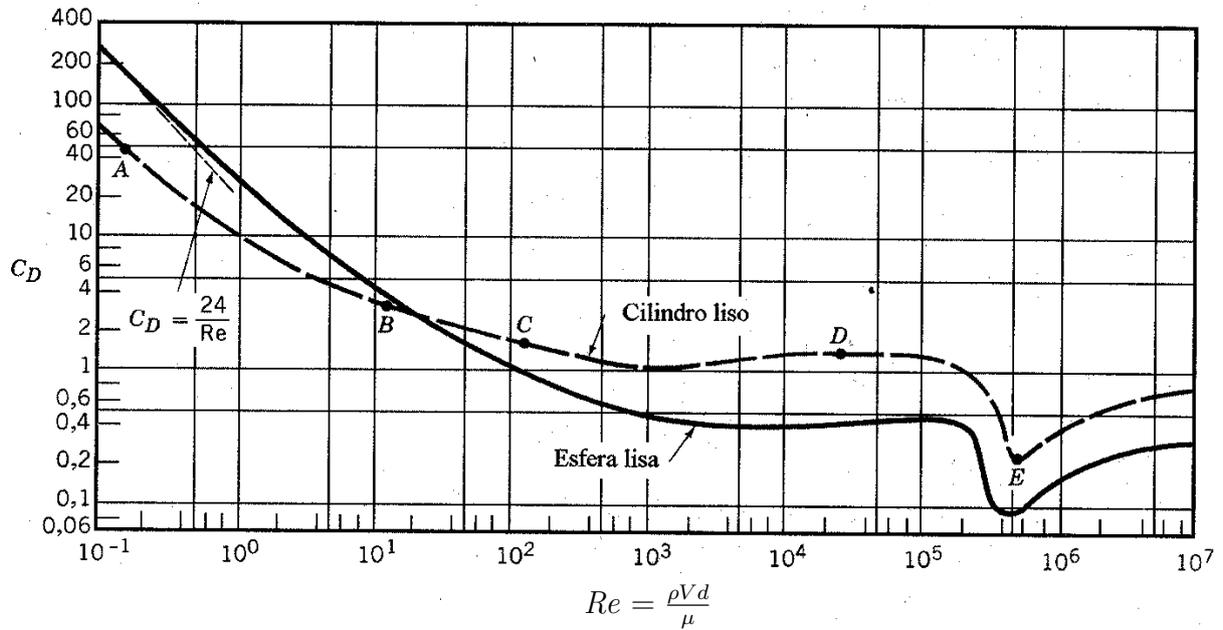


FIGURA 2 – Coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds (Munson *et al.* , 2004).

Todavia, a força de arrasto também pode ser determinada pela relação que utiliza o *coeficiente de arrasto* ( $C_D$ ):

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 A_{ref} = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 db,$$

na qual:

- $\rho$  é a massa específica do ar no escoamento ao longe;
- $V$  é a velocidade ao longe;
- $A_{ref}$  é a área de referência adotada, que neste caso é  $A_{ref} = db$  (área projetada do cilindro no plano transversal ao escoamento), sendo  $d = 2R$  o diâmetro do cilindro;
- $C_D$  é coeficiente de arrasto (adimensional).

O coeficiente de arrasto ( $C_D$ ) pode ser determinado experimentalmente e é usual apresentar seus valores graficamente em função de outro parâmetro adimensional, o número de Reynolds ( $Re = \rho V d / \mu$ , onde  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido), que representa as condições do escoamento, conforme pode ser visto na figura 2.

### 3.2 Coeficiente de pressão

A distribuição de pressões sobre a superfície do cilindro pode ser expressa através de um parâmetro identificado como *coeficiente de pressão* ( $C_p$ ) e dado pela expressão:

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho V^2},$$

na qual:

- $p = p(\theta)$  é a pressão em cada ponto na superfície do cilindro ;
- $p_0$  é uma pressão de referência (em geral é adotada a pressão estática no escoamento ao longe).

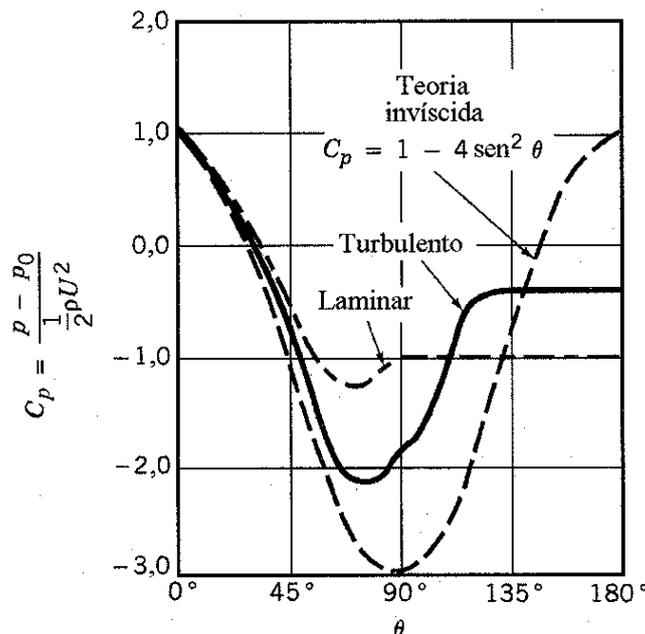


FIGURA 3 – Coeficiente de pressão em função do ângulo (Munson *et al.*, 2004).

Este coeficiente de pressão também pode ser associado à força de arrasto devida à pressão ( $D_p$ ) e ao coeficiente de arrasto devido à pressão ( $C_{Dp}$ ):

$$D_p = \int_A p \cos \theta dA = \frac{1}{2} \rho V^2 \int_A C_p \cos \theta dA,$$

$$C_{Dp} = \frac{D_p}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_{ref}} = \frac{\int_A C_p \cos \theta dA}{A_{ref}}.$$

Como dito na seção 3.1, nesta experiência aproximaremos a força de arrasto total  $D$  pela força de arrasto devida à pressão  $D_p$ . Consequentemente, o coeficiente de arrasto total será aproximado pelo coeficiente de arrasto devido à pressão, isto é,  $C_D \approx C_{Dp}$ .

A figura 3 mostra valores do coeficiente de pressão em função de  $\theta$  obtidos experimentalmente, para diferentes condições de escoamento. Nela está apresentado, também, o comportamento de  $C_p$  determinado teoricamente considerando escoamento de fluido não viscoso.

### 3.3 Medição de velocidade com tubo de Pitot estático

O *tubo de Pitot estático* é um instrumento desenvolvido para se obter a velocidade de um fluido em um ponto do campo de escoamento (velocidade local), a partir da medição da diferença entre a pressão total e a pressão estática neste ponto. No modelo utilizado nesta experiência, mostrado na figura 4, a pressão total é sentida por um orifício frontal conectado a um pequeno tubo interno ao Pitot, que transmite esta pressão até o terminal de saída que será conectado à um manômetro. A pressão estática é sentida por um conjunto de orifícios localizados ao redor do seu corpo (veja corte na seção A-A da figura 4), e é transmitida pela região anular entre o tubo interno da pressão total e tubo externo do Pitot. Este modelo de tubo de Pitot estático é adotado pela AMCA – *Air Movement and Control Association, Inc.*, para a realização de medições em sistemas de movimentação de ar.

Na figura 5, está ilustrada a utilização de um tubo de Pitot estático. Note que o tubo de Pitot está alinhado de forma que o plano do seu orifício frontal esteja perpendicular à linha de corrente que passa pelo ponto de medição. Nesta condição, a equação utilizada para o cálculo da velocidade é determinada pela aplicação da equação de Bernoulli entre dois pontos próximos

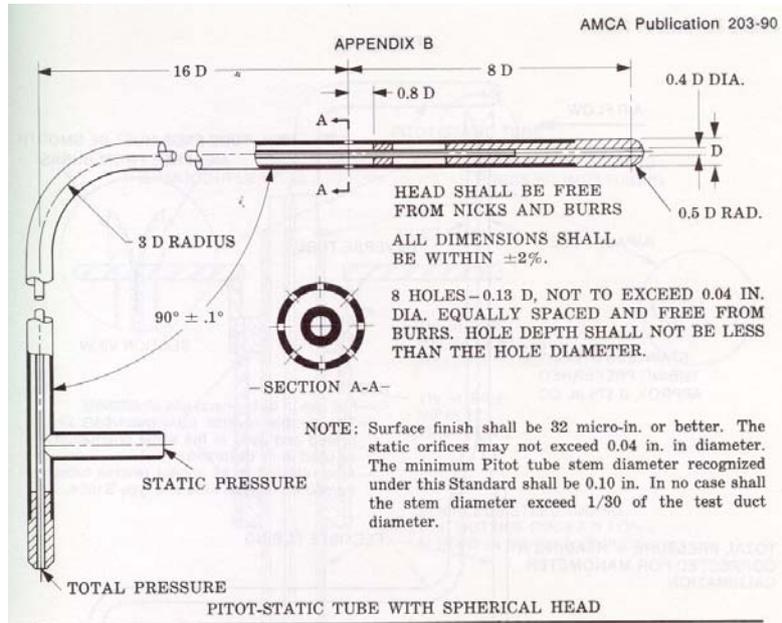


FIGURA 4 – Tubo de Pitot estático (AMCA 203-1990 – Apêndice B)

de uma mesma linha de corrente. Aplicando a equação de Bernoulli entre os pontos 1 e 2 mostrados na figura 5, temos:

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 + \rho g z_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2 + \rho g z_2.$$

Ao se posicionar o tubo de Pitot estático alinhado com uma linha de corrente, provoca-se uma desaceleração do fluido entre os pontos 1 e 2, admitida isentrópica (sem perdas), de modo que:

- $v_1$  é a velocidade do fluido em posição distante do Pitot (a ser determinada);
- $v_2$  é a velocidade do fluido no orifício frontal do Pitot (admitida zero);
- $p_1$  é a pressão estática associada à linha de corrente, que possui velocidade  $V_1$ ;
- $p_2$  é a pressão total (ou de estagnação) medida no orifício frontal do Pitot;
- $z_1 = z_2$ .

Logo:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}}, \quad \text{ou} \quad v = v_1 = \sqrt{\frac{2(p_{total} - p_{estática})}{\rho}}.$$

## 4 Aparato experimental

### 4.1 Túnel de vento

A experiência será realizada utilizando-se os seis túneis de vento do laboratório de Mecânica dos Fluidos; um desses túneis está mostrado na figura 6. Os túneis de vento são do tipo circuito fechado, isto é, o ar fica recirculando, com a seção de testes aberta, onde é posicionado o corpo de prova a ser testado. A velocidade do escoamento na seção de testes é controlada através de um inversor estático de frequência que varia a rotação do ventilador que movimenta o ar.

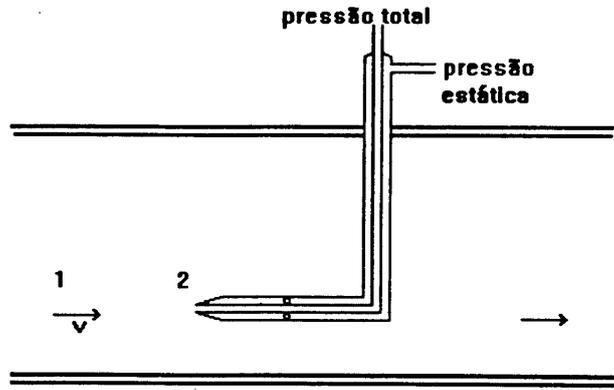


FIGURA 5 – Representação de um tubo de Pitot estático inserido no escoamento.



FIGURA 6 – Vista geral do túnel de vento. Cilindro na seção de testes (Carmo & Arienzo Jr, 2004).

## 4.2 Cilindro

O cilindro utilizado possui um pequeno orifício na superfície que permite a medição da pressão naquele ponto. O cilindro está posicionado na seção de testes através de um suporte, associado a um eixo que possui um transferidor que indica a posição angular do orifício, conforme mostra a figura 7. Na condição inicial o orifício deve estar alinhado com a indicação de ângulo zero no transferidor, e alinhado também com o eixo  $x$  (indicado na figura 1). O diâmetro do cilindro é  $d = 50$  mm.

## 4.3 Tubo de Pitot estático

O tubo de Pitot está fixado na haste de suporte, como mostra a figura 8, devendo ser posicionado próximo à região central da seção de testes (onde o cilindro é ensaiado), mas suficientemente distante do cilindro para que a presença de um corpo não provoque interferência nas medições realizadas no outro. Este posicionamento será feito previamente pelos técnicos de laboratório.



FIGURA 7 – Vista do cilindro de acrílico posicionado para ensaio (Carmo & Arienzo Jr, 2004).



FIGURA 8 – Tubo de Pitot estático (Carmo & Arienzo Jr, 2004).

#### 4.4 Manômetro

As pressões no cilindro e no Pitot devem ser medidas por um manômetro múltiplo inclinado, fixado na bancada do túnel de vento e mostrado na figura 9. O óleo utilizado no manômetro possui massa específica  $\rho_{\text{óleo}} = 784 \text{ kg/m}^3$ . O ângulo de inclinação do manômetro deve ser verificado e permite que as leituras realizadas no manômetro tenham maior resolução.

#### 4.5 Termômetro

Um termômetro será disponibilizado para a medição da temperatura do ar durante a experiência. Esse dado é necessário para a determinação das propriedades físicas do fluido que serão utilizadas nos cálculos posteriores.



FIGURA 9 – Manômetro múltiplo (Carmo & Arienzo Jr, 2004).

## 5 Procedimento experimental

### 5.1 Verificações e ajustes preliminares

Devem ser realizadas as seguintes verificações antes de iniciar o ensaio:

- posicionamento do orifício do cilindro e coincidência do zero na escala de ângulos do transferidor;
- ângulo de inclinação do manômetro múltiplo;
- identificação das mangueiras que conectam o manômetro ao cilindro e ao tubo de Pitot;
- posicionamento do tubo de Pitot em relação ao cilindro.

### 5.2 Estabelecendo velocidades no túnel de vento

O motor elétrico que aciona o ventilador do túnel de vento está ligado a um inversor estático de frequência. Este equipamento tem a finalidade de controlar a frequência da corrente elétrica que alimenta o motor. Assim, a rotação do motor e do ventilador e, conseqüentemente, a velocidade do escoamento na seção de testes pode ser ajustada.

As velocidades a serem testadas serão as correspondentes às frequências de 30, 40 e 50 Hz. No início da experiência, o inversor de frequência estará pré-ajustado pelo técnico do laboratório na frequência máxima (50 Hz) ou mínima (30 Hz). Deve-se então proceder da seguinte forma:

- Ligue no interruptor (liga-desliga) o inversor estático de frequência e acione o ventilador.
- Realize as medições de pressões para a primeira velocidade (veja seção 5.4).
- Faça outros ensaios reduzindo a frequência em intervalos de 10 Hz se a frequência inicial foi a máxima, ou aumentando a frequência em intervalos de 10 Hz se a frequência inicial foi a mínima.

### 5.3 Medição da temperatura e determinação das propriedades físicas do ar

Em algum momento durante a experiência, a temperatura do ar circulando no túnel de vento deve ser medida com o termômetro. Tanto a massa específica quanto a viscosidade do ar são funções da temperatura, portanto este dado deve ser utilizado para determinar os valores destas propriedades físicas. Para a determinação da viscosidade, pode-se usar, por exemplo, as tabelas encontradas nos apêndices dos livros indicados na bibliografia deste curso de Mecânica dos Fluidos ou a tabela afixada no laboratório, próximo à lousa. Para determinar a massa específica, deve-se utilizar a equação dos gases perfeitos,  $\rho = p/RT$ , onde  $R = 0,287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  é a constante do gás ar atmosférico em base mássica,  $T$  é a temperatura medida (em Kelvin), e  $p$  a pressão atmosférica, cujo valor pode ser obtido no site do laboratório de micrometeorologia do IAG-USP<sup>2</sup>, cuja estação de medição está localizada na Cidade Universitária.

---

<sup>2</sup>[http://www.iag.usp.br/meteo/labmicro/Data/Graficos/SP/Panorama\\_Atualizado.html](http://www.iag.usp.br/meteo/labmicro/Data/Graficos/SP/Panorama_Atualizado.html)

## 5.4 Medições de pressões

As pressões devem ser lidas no manômetro múltiplo inclinado, no qual cada leitura é obtida adotando como referência a posição, **no instante da leitura**, da tomada de pressão estática do tubo de Pitot. Deve-se cuidar para que a linha de visão esteja perpendicular ao plano do manômetro no momento da leitura.

- Meça a diferença entre os valores da pressão total e da pressão estática fornecidas pelo tubo de Pitot.
- Meça, em relação ao valor da pressão estática do tubo de Pitot, os valores de pressão na superfície do cilindro considerando incrementos angulares de  $10^\circ$ , ou seja, o orifício deve ser posicionado no ponto médio de arcos que correspondem a  $\Delta\theta = 10^\circ$ . Faça medidas para os ângulos de  $5^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $25^\circ$ , ..., até  $175^\circ$ , dispensando fazer de  $185^\circ$  a  $355^\circ$ , devido à simetria esperada nos resultados. Observe que ocorrem valores positivos e negativos de pressão efetiva.

*Atenção:* Ao modificar a posição angular do orifício do cilindro fique atento, verificando que o transferidor indicador da variação angular esteja sempre solidário ao cilindro, evitando erros de posicionamento. Evite esticar muito a mangueira que transmite a pressão, o que poderia segurar o cilindro provocando um escorregamento relativo entre este e o transferidor.

## 5.5 Visualização do comportamento do escoamento na superfície do cilindro

O comportamento do escoamento nas proximidades da superfície do cilindro deve ser visualizado com o uso da vareta com fio disponível na bancada. Aproxime a ponta com fio da vareta ao cilindro e percorra sua superfície, observando a mudança do comportamento do fio que ocorre depois que a camada limite se separa.

## 6 Questões propostas

Onde necessário, utilize o valor de  $g = 9,79 \text{ m/s}^2$  para a aceleração da gravidade <sup>3</sup>.

1. Para cada condição de rotação do ventilador determinar:

- a velocidade do escoamento ao longe com o Tubo de Pitot estático;
- o número de Reynolds do escoamento;
- a distribuição de pressões em torno de meio cilindro ( $p \times \theta$ );
- o coeficiente de pressão em função da posição angular ( $C_p \times \theta$ );
- as componentes da força de arrasto de pressão em função do ângulo ( $R\Delta\theta p \cos \theta \times \theta$ );
- a força de arrasto de pressão total ( $D_p$ ) por unidade de altura;
- o coeficiente de arrasto ( $C_D$ ).

*Observações:* Lembre-se que  $\Delta\theta$  deve ser utilizado em radianos para determinar a força de arrasto. As distribuições de pressões, de coeficientes de pressão e componentes da força de arrasto devem ser apresentadas em tabelas.

2. Apresentar os gráficos:

---

<sup>3</sup>[www.iag.usp.br/geofisica/geodesia/laboratorio.htm](http://www.iag.usp.br/geofisica/geodesia/laboratorio.htm)

- coeficiente de pressão pelo ângulo ( $C_p \times \theta$ ) para os três diferentes números de Reynolds testados;
- coeficiente de arrasto pelo número de Reynolds ( $C_D \times Re$ ).

Compare estes dois gráficos com resultados disponíveis na literatura (veja figuras 2 e 3) e comente a respeito de eventuais diferenças.

3. Identifique em que posição angular ocorre a separação da camada limite para cada valor de número de Reynolds. Apresente em uma tabela: número de Reynolds, posição da separação e se o escoamento na região da camada limite próximo à separação é laminar ou turbulento. Compare com outros resultados apresentados na literatura, cite as fontes.
4. Explique a relação entre o gradiente de pressões na direção do escoamento e a posição em que ocorre a separação. O que muda se a camada limite é laminar ou turbulenta e qual a consequência para o coeficiente de arrasto, no caso do cilindro? Que outro(s) fator(es) pode(m) causar a separação num escoamento externo qualquer?
5. Se o escoamento de fluido fosse não viscoso (ideal) em torno do cilindro, qual seria o valor obtido para a força de arrasto nesta interação fluido-corpo? Explique por quê.
6. O método empregado para o cálculo do arrasto neste experimento (medição das pressões na superfície e integração dos valores) poderia ser empregado para o cálculo do arrasto num aerofólio com baixo ângulo de ataque? Justifique.

## Referências

- CARMO, A. H. M. B., & ARIENZO JR, V. 2004. *Balança aerodinâmica didática para medição de forças de arrasto, sustentação e momento de arfagem*. Trabalho de formatura, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- MUNSON, B. R., YOUNG, D. F., & OKIISHI, T. H. 2004. *Fundamentos da Mecânica dos Fluidos*. 4ª ed. São Paulo: Blucher.