

## PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA NO ESCOAMENTO LAMINAR

### 1 – INTRODUÇÃO

Em 1883 Osborne Reynolds realizou um experimento que mostrou a existência de dois tipos de escoamento: “o primeiro onde os elementos do fluido seguem-se ao longo de linhas de movimento e que vão da maneira mais direta possível ao seu destino, e outro em que se movem em trajetórias sinuosas da maneira mais indireta possível”, seguindo a redação original. Ou seja, descreveu como visualizar escoamentos laminares e turbulentos. Na experiência de laboratório é reproduzido o experimento de Reynolds, onde é visualizado o escoamento de água em um duto de vidro, com uma agulha metálica injetando tinta na região central da tubulação.

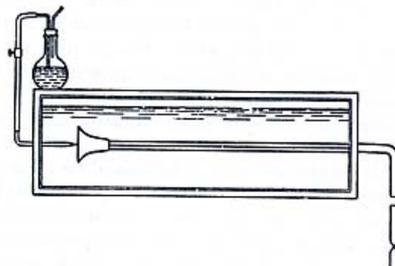
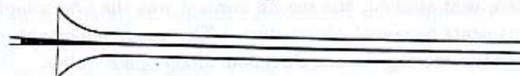


Figura do experimento de Reynolds.

The general results were as follows:—

(1.) When the velocities were sufficiently low, the streak of colour extended in a beautiful straight line through the tube, fig. 3.

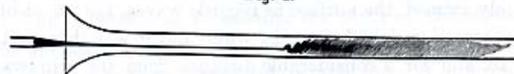
Fig. 3.



(2.) If the water in the tank had not quite settled to rest, at sufficiently low velocities, the streak would shift about the tube, but there was no appearance of sinuosity.

(3.) As the velocity was increased by small stages, at some point in the tube, always at a considerable distance from the trumpet or intake, the colour band would all at once mix up with the surrounding water, and fill the rest of the tube with a mass of coloured water, as in fig. 4.

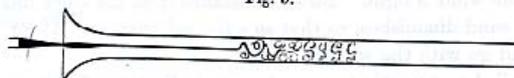
Fig. 4.



Any increase in the velocity caused the point of break down to approach the trumpet, but with no velocities that were tried did it reach this.

On viewing the tube by the light of an electric spark, the mass of colour resolved itself into a mass of more or less distinct curls, showing eddies, as in fig. 5.

Fig. 5.

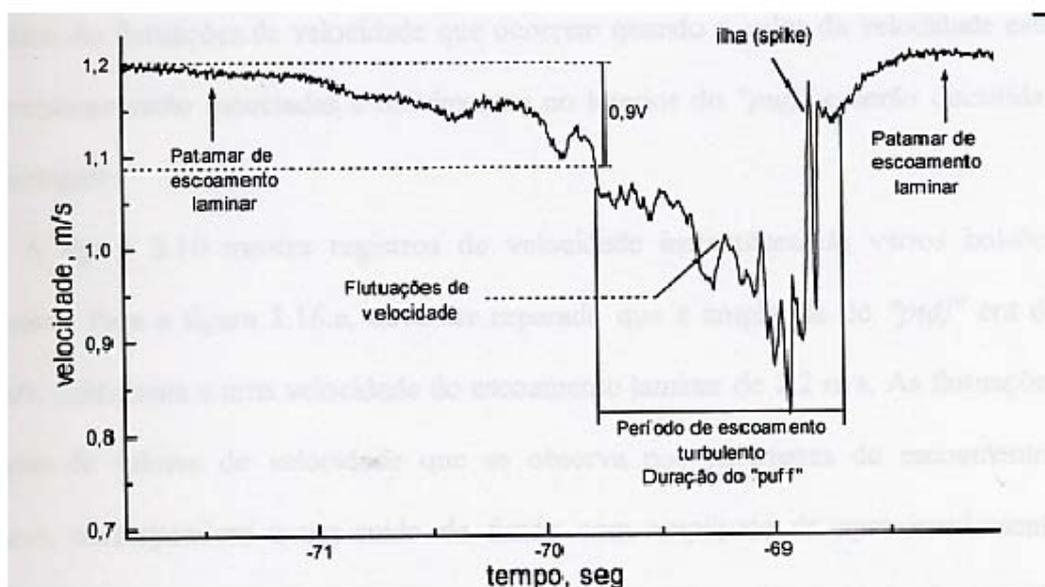


**Figura 1:** Experimento de Reynolds (reprodução da publicação de Osborne Reynolds, 1883)

Reynolds descreveu ainda a transição do escoamento laminar ao turbulento, conforme mostra a figura anterior, embora não entendesse como ocorresse e qual intensidade de perturbação causava a transição. Descreveu ainda que no escoamento laminar a perda de carga variava linearmente com a velocidade, enquanto no turbulento variava com o quadrado da velocidade. Mas não sabia como variava na transição.

Descreveu o aparecimento de turbilhões na transição do laminar para o turbulento (fenômeno atualmente chamado “*puff*”), que apareciam de maneira súbita, descrevendo inclusive a “intermitência” destes “*puffs*” como dado importante para caracterizar a transição. Na figura a seguir é mostrado um “*puff*” gerado por escoamento de ar em um duto, na transição do escoamento laminar para o turbulento.

O gráfico da figura 2 representa os valores de velocidade medidos por um anemômetro de fio quente no centro do duto: observe que escoamento é inicialmente laminar, da esquerda para a direita, e que o valor de velocidade decresce até se tornar instável e voltar ao valor original, novamente com escoamento laminar. Este mecanismo é o mesmo que acontece no interior do duto de vidro da experiência que será realizada, e este “*puff*” pode ser observado visualmente como uma perturbação de tinta azul que interrompe o filete de tinta central, que viaja rapidamente para a extremidade do duto e que indica o início da transição.



**Figura 2:** Representação gráfica da velocidade instantânea em função do tempo

Comumente considera-se que o escoamento é laminar para a faixa de  $0 < Re < 2000$  e turbulento para  $Re > 4000$ , onde  $Re =$  número de Reynolds  $= \rho V D / \mu$ , onde  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $V$  é a velocidade média na seção transversal do duto,  $D$  é o diâmetro hidráulico e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido. Apesar desta consideração simplificada ser utilizável na maior parte das situações, sabe-se que já se conseguiu escoamento laminar com  $Re > 100.000$  (condições muito particulares), e sabe-se que o  $Re$  da transição é determinado em grande parte pelas condições na entrada do duto (entrada em canto vivo produz transição a partir de  $Re = 2000$ , enquanto entradas arredondadas e suaves podem produzir transição a partir de  $Re = 10.000$ ); o comprimento da tubulação também tem um papel importante no fenômeno da transição, assim como perturbações externas.

## 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O presente estudo analisa a variação de energia que ocorre no escoamento de um fluido em um conduto. Como ponto de partida adota-se a equação que expressa a carga total em uma dada seção transversal de escoamento, sendo que carga é a energia por unidade de peso que o fluido possui naquela seção, conforme segue:

$$H = \frac{\alpha \cdot V^2}{2 \cdot g} + \frac{p}{\gamma} + z \quad \text{equação (1)}$$

na qual tem-se:

- H = carga total média na seção;
- $\alpha$  = coeficiente de energia cinética (no escoamento laminar tem valor igual a 2);
- V = velocidade média na seção;
- g = aceleração da gravidade;
- p = pressão estática na seção;
- $\gamma$  = peso específico do fluido que escoar;
- z = altura do ponto médio da seção a partir de um Plano Horizontal de Referência (PHR) ou cota do ponto médio da seção desde o PHR;

Aplicando-se a equação da energia, escrita em termos de carga, entre duas seções 1 e 2 consecutivas de um conduto reto horizontal com seção transversal constante, como o trecho de tubo de vidro posicionado entre dois medidores de pressão (piezômetros) desta experiência, pode-se determinar a perda de carga distribuída entre estas seções:

$$H_1 - H_2 = \Delta H_{1,2} = h_f \quad \text{equação (2)}$$

sendo:

$$H_1 = \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 \quad \text{e} \quad H_2 = \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2$$

$h_f$  = perda de carga distribuída (ocorre para trechos de duto reto com seção constante)

Considerando que o escoamento do fluido ocorre em regime permanente e incompressível, internamente a um tubo horizontal de seção transversal constante, segue que a vazão volumétrica é constante, as velocidades médias, e as cotas nas seções consecutivas são iguais. Assim a equação (2) pode ser expressa como:

$$h_f = \frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} \quad \text{equação (3)}$$

Destaca-se que, na experiência, a perda de carga distribuída deve ser determinada através da Linha Piezométrica (LP) média considerando os valores medidos para a carga em 4 seções consecutivas. Esta determinação pode ser feita graficamente, ou com uma equação ajustada para a curva da LP.

Historicamente vários pesquisadores realizaram experimentos para estudar o escoamento em tubos e avaliaram como ocorre a perda de energia e como relacionar os parâmetros relacionados a este fenômeno. Destacam-se nesta descoberta Jean Louis Marie Poiseuille (1799-1869), médico e fisiologista francês, e Gotthilf Hagen (1797-1884) engenheiro hidráulico alemão, que fizeram estudos independentes na mesma época.

No desenvolvimento experimental de equações para representar o fenômeno da perda de energia no escoamento é proposta por Henry Darcy (1803-1858) e por Julius Weisbach (1806-1871) a equação apresentada a seguir, aplicada para o cálculo de perda de carga distribuída:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \text{equação (4)}$$

sendo:

- f = coeficiente de perda de carga distribuída;
- L = comprimento do trecho de conduto considerado;
- $D_h$  = diâmetro hidráulico do trecho de conduto;

Aplicando-se os resultados dos experimentos de Poiseuille e de Hagen obtém-se a relação entre o coeficiente de perda de carga distribuída (**f**) (eventualmente chamado de fator de atrito) e o número de Reynolds (**Re**):

$$f = C \cdot Re^A \quad \text{equação (5)}$$

na qual os valores das constantes são:

$$C = 64 \quad \text{e} \quad A = -1$$

e o número de Reynolds (**Re**) é determinado com:

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} = \frac{V D_h}{\nu} \quad \text{equação (6)}$$

sendo:

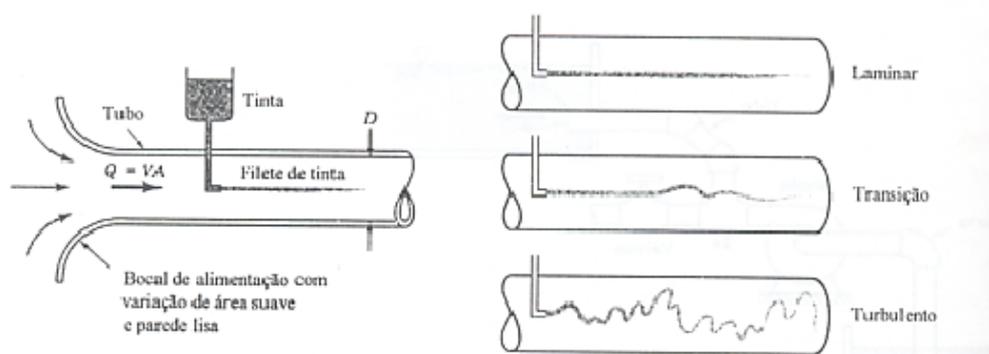
- $\rho$  = massa específica;
- $\mu$  = viscosidade dinâmica (ou absoluta);
- $\nu$  = viscosidade cinemática;

A combinação das equações (4), (5) e (6) apresenta como resultado a equação (7), no qual está explícita a dependência linear entre a velocidade média e a perda de carga distribuída para o escoamento em movimento laminar:

$$h_f = \frac{C \cdot \nu}{D_h^2} \cdot \frac{L \cdot V}{2g} \quad \text{equação (7)}$$

### 3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A figura 3, a seguir mostra um esquema da instalação do laboratório.



**Figura 3:** Esquema do experimento para visualização do tipo de escoamento

O aparato experimental é constituído por:

- reservatório de água;
- tubulação de vidro com diâmetro conhecido;
- quatro medidores de pressão constituídos por piezômetros graduados posicionados espaçadamente ao longo do duto de vidro;
- agulha metálica para injeção de tinta no centro da tubulação;
- reservatório de tinta;
- válvula reguladora de vazão;
- proveta graduada para medição de volume;
- cronômetro;
- régua ou trena.

A experiência consiste em:

- a) Medir o comprimento dos trechos do tubo de vidro localizados entre os piezômetros;
- b) Com a válvula fechada, vazão nula, verificar os valores das alturas de água nos piezômetros. Eventuais correções podem ser realizadas considerando um piezômetro com referência;
- c) Estabelecer escoamento no duto, abrindo a válvula reguladora, estabelecer escoamento de tinta através da agulha metálica. Regular a vazão até conseguir escoamento laminar, visualizado como um filete de tinta estável no tubo de vidro.
- d) Efetuar a leitura dos quatro piezômetros;
- e) Calcular a vazão correspondente cronometrando o tempo de enchimento da proveta, não use volumes pequenos pois as incertezas nos resultados podem aumentar;
- f) Repetir os itens **c)**, **d)** e **e)** para, no mínimo, mais 5 valores de vazão diferentes em escoamento laminar;
- g) Avaliar número de Reynolds no início da condição de transição: aumentar a vazão até o início da transição, quando são observadas perturbações (“*puffs*”) no filete central de tinta, tráfegando rapidamente e interrompendo a linha de tinta. Repetir o procedimento para calcular a vazão, e para apenas uma vazão;
- h) Avaliar Reynolds para escoamento completamente turbulento: aumentar a vazão até que o escoamento seja totalmente turbulento, visualizado como se as partículas de tinta do filete de tinta se dissipassem, ocupando desordenadamente o interior do tubo de vidro. Repetir o procedimento para calcular a vazão, e para apenas uma vazão.

**Nota:** Utilizar para as observações dos itens **g)** e **h)** o primeiro trecho do conduto de vidro, onde não há influência das conexões dos piezômetros;

#### 4 – QUESTÕES PROPOSTAS

- 4.1) Traçar para cada vazão do escoamento laminar a linha piezométrica ( $LP = P/\gamma + z$ ) e a linha de energia ( $LE = \alpha V^2/2g + P/\gamma + z$ ) em escala conveniente e indicando graficamente a perda de carga distribuída. Adotar um gráfico com LP e LE para cada para cada vazão.
- 4.2) Traçar o gráfico da função  $h_f = h_f(Q)$  e justificar o comportamento da curva. (Justificar analiticamente). Só para escoamento laminar.

- 4.3) Traçar o gráfico da função  $f = f(Re)$  em papel bilogarítmico, (onde  $f$  é o coeficiente de perda de carga distribuída), novamente somente para os dados referentes ao escoamento laminar. Considerar que a equação é do tipo  $(\log f = \log C + A \log Re)$ , e determinar os valores das constantes **A** e **C**. Comparar com os valores obtidos dos experimentos de Hagen e de Poiseuille.
- 4.4) Descrever dois casos práticos em que ocorre o regime laminar.
- 4.5) Calcular o número de Reynolds em que foi visualizada a transição. Comente.
- 4.6) Calcular o número de Reynolds em que foi visto que o escoamento já era totalmente turbulento. Comente.
- 4.7) Traçar o diagrama de velocidades correspondente à tubulação da instalação do laboratório para número de Reynolds igual a 800 e calcular a velocidade máxima neste caso.

## 5 – LEVANTAMENTO BIBLIOGRAFICO

Pesquisar referências bibliográficas que possam auxiliar a entender mais sobre o movimento laminar e sobre a perda de energia neste tipo de escoamento. Citar bibliografia usada.

Revisão de A. L. C. Mariani - janeiro de 2012