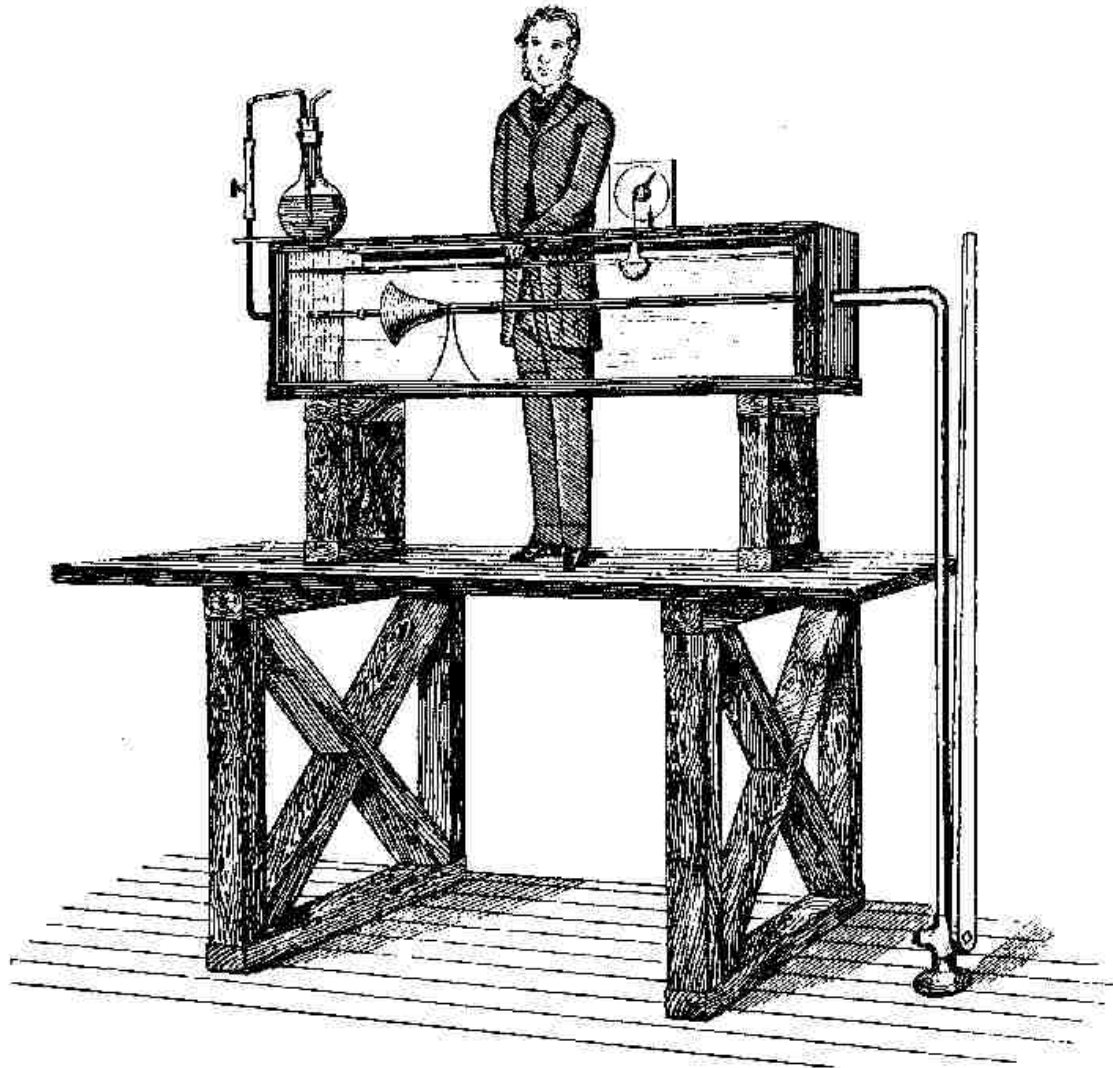


## ***Escoamento Laminar e Escoamento Turbulento***

### **Experimento de Reynolds (1883)**



**Fig. 1** Ilustração do aparato experimental (sem escala)

Dimensões do tanque 6 ft x 18 ft x 18 ft (1,83 m x 5,5 m x 5,5 m)

Equipamentos principais: Tubo de vidro, convergente cônico de madeira, tubo metálico, válvula para controle de vazão (com haste longa de comando) e sistema de injeção de líquido colorido.

Fonte: Manchester School of Engineer

(<http://www.eng.man.ac.uk/historic/reynolds/oreyna.htm>)

A experiência de Reynolds (1883) demonstrou a existência de dois tipos de escoamentos, o escoamento laminar e o escoamento turbulento. O experimento teve como objetivo a visualização do padrão de escoamento de água através de um tubo de vidro, com o auxílio de um fluido colorido (corante).

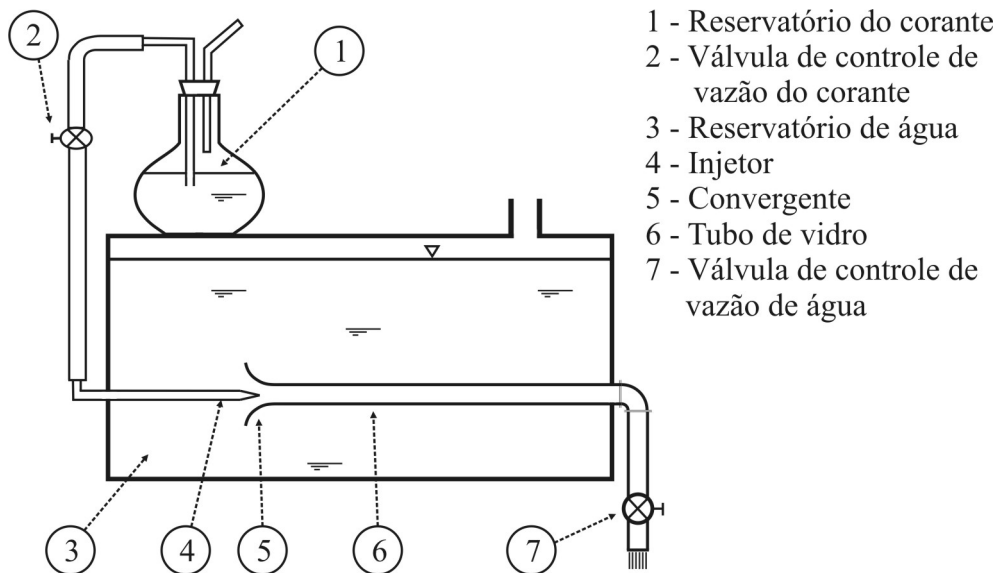
Seja um reservatório com água como ilustrado na Fig.2. Um tubo de vidro, em cuja extremidade é adaptado um convergente, é mantido dentro do reservatório e ligado a um sistema externo que contém uma válvula que tem a função de regular a vazão. No eixo do tubo de vidro é injetado um líquido corante que possibilitará a visualização do padrão de escoamento.

Para garantir o estabelecimento do regime permanente, o reservatório contendo água deve ter dimensões adequadas para que a quantidade de água retirada durante o experimento não afete significativamente o nível do mesmo, e ao abrir ou fechar a válvula (7), as observações devem ser realizadas após um intervalo de tempo suficientemente grande. O ambiente também deve ter sua temperatura e pressões controladas.

Para pequenas vazões o líquido corante forma um filete contínuo paralelo ao eixo do tubo (6). Vazões crescentes induzem oscilações que são amplificadas à medida que o aumento vai ocorrendo, culminando no completo desaparecimento do filete, ou seja, uma mistura completa no interior do tubo de vidro (6) do líquido corante, indicando uma diluição total. É possível concluir que ocorrem dois tipos distintos de escoamentos separados por uma transição.

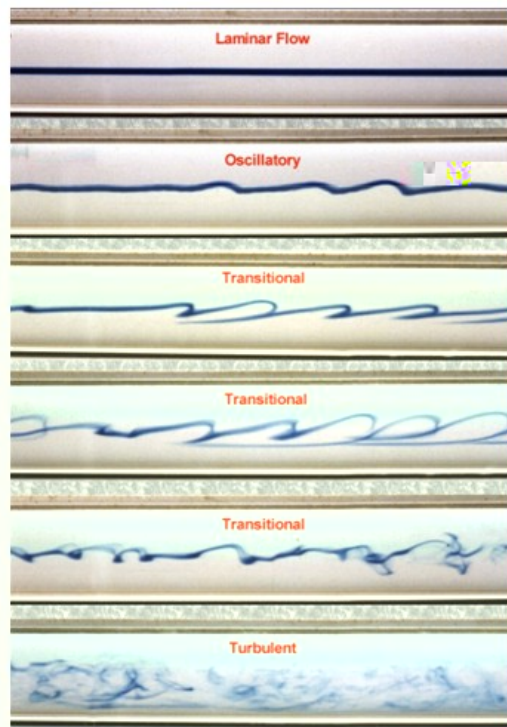
No primeiro caso, no qual é observável o filete colorido conclui-se que as partículas viajam sem agitações transversais, mantendo-se em lâminas concêntricas entre as quais não há troca macroscópica de partículas.

No segundo caso, as partículas apresentam velocidades transversais importantes, já que o filete desaparece pela diluição de suas partículas no volume de água.



**Fig.2** Esquema do experimento

## Aspecto do escoamento no tubo de vidro



As principais características dos escoamentos são:

- a) escoamento laminar: é definido como aquele no qual o fluido se move em camadas, ou lâminas, uma camada escorregando sobre a adjacente havendo somente troca de quantidade de movimento molecular. Qualquer tendência para instabilidade e turbulência é amortecida por forças viscosas de cisalhamento que dificultam o movimento relativo entre as camadas adjacentes do fluido.
- b) Escoamento turbulento é aquele no qual as partículas apresentam movimento caótico macroscópico, isto é, a velocidade apresenta componentes transversais ao movimento geral do conjunto ao fluido. O escoamento turbulento apresenta também as seguintes características importantes:
  - Irregularidade
  - Difusividade
  - Altos números de Reynolds
  - Flutuações tridimensionais (vorticidade)
  - Dissipação de energia

Contudo, o escoamento turbulento obedece aos mecanismos da mecânica dos meios contínuos e o fenômeno da turbulência não é uma característica dos fluidos mas do escoamento.

A natureza de um escoamento, isto é, se laminar ou turbulento e sua posição relativa numa escala de turbulência é indicada pelo *número de Reynolds* ( $Re$ ). O número de Reynolds é a relação entre as forças de inércia ( $F_i$ ) e as forças viscosas ( $F_\mu$ ):

$$Re = \frac{\sum F_i}{\sum F_\mu}$$

Para dutos circulares de diâmetro  $D$ :

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$$

A tensão de cisalhamento (para fluidos newtonianos) também é calculada de modo diferente para os dois tipos de escoamento:

$$\text{Escoamento Laminar: } \tau = \mu \frac{dV}{dy}$$

$$\text{Escoamento Turbulento: } \tau_{Turb} = (\mu + \chi) \frac{dV}{dy}$$

No regime turbulento a troca de energia no interior do escoamento resulta em tensões maiores. Esse movimento também dissipa energia por atrito viscoso. Como resultado dos dois efeitos o fluido se comporta como se sua viscosidade fosse aumentada. Muitos e complexos modelos tentam determinar o comportamento dos escoamentos turbulentos. A última equação apresentada faz parte de um modelo simples para tratar de escoamentos turbulentos, seu nome é modelo do comprimento de mistura de Prandtl, conhecido também como modelo de **zero** equação. Outra forma de apresentação da equação para tensão de cisalhamento nos escoamentos turbulentos usando modelo de zero equação é:

$$\tau_{Turb} = (\mu + \rho \nu_{Turb}) \frac{dV}{dy}, \text{ onde } \chi = \rho \nu_{Turb}$$

A viscosidade turbulenta  $\nu_{Turb}$ , ao contrário da viscosidade absoluta não é uma propriedade termodinâmica dos fluidos, que como já mencionado, pode ser determinada conhecendo-se, para um estado termodinâmico a pressão e a temperatura (ou quaisquer outras duas propriedades termodinâmicas independentes). A viscosidade turbulenta depende apenas das condições do escoamento.