



A resignação é o troféu conquistado por aqueles que vivem de suas derrotas.

Raimundo (Alemão)
Ferreira Ignácio

O cãozinho chamada Alemão nasceu com HIDROCEFALIA (acúmulo excessivo de líquido cefalorraquidiano dentro do crânio, que leva ao inchaço cerebral) e mesmo contra todos os diagnósticos conviveu comigo durante 3 anos, nos quais me ensinou muitas coisas, entre elas de não aceitar a resignação.

Vou iniciar esta aula apresentando a solução das atividades propostas na aula anterior.

Atividade 1: considerando o SI demonstrar que o número de Reynolds é um número adimensional.

$$[\rho] = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; [v] = \frac{\text{m}}{\text{s}}; [D] = \text{m}$$

$$[\mu] = \frac{\text{N} \times \text{s}}{\text{m}^2} \therefore [\text{Re}] = \frac{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \text{m}}{\frac{\text{N} \times \text{s}}{\text{m}^2}} = \frac{\text{kg}}{\text{m} \times \text{s}} \times \frac{\text{m}^2}{\text{N} \times \text{s}} = \frac{\text{kg} \times \text{m}}{\text{N} \times \text{s}^2} = \frac{\text{N}}{\text{N}} = 1$$

$\therefore [\text{Re}] \Rightarrow$ é um número puro

Atividade 2: Calcular o número de Reynolds e através dele classificar o escoamento incompressível em regime permanente e comparar a classificação obtida com a visualizada.



$$V = 50\text{mL}$$

$$t = 16,41\text{s}$$

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{50}{16,41} \cong 3,1 \frac{\text{mL}}{\text{s}} = 3,1 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q = v \times A \Rightarrow 3,1 \times 10^{-6} = v \times \frac{\pi \times (0,01)^2}{4}$$

$$v \cong 0,0395 \frac{\text{m}}{\text{s}} \therefore \text{Re} = \frac{0,0395 \times 0,01}{10^{-6}} \cong 395$$

$\text{Re} < 2000 \Rightarrow$ escoamento laminar

observado igual ao calculado



$$V = 550\text{mL}$$

$$t = 5,46\text{s}$$

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{550}{5,46} \cong 100,7 \frac{\text{mL}}{\text{s}} = 1,01 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q = v \times A \Rightarrow 1,01 \times 10^{-4} = v \times \frac{\pi \times (0,01)^2}{4}$$

$$v \cong 1,29 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 1,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \therefore \text{Re} = \frac{1,3 \times 0,01}{10^{-6}} \cong 13000$$

$\text{Re} > 4000 \Rightarrow$ escoamento turbulento

observado igual ao calculado



Evocando a formula do número de Reynolds introduzida na aula anterior e a utilizada no vídeo, podemos escrever:

$$\frac{\rho \times v \times D}{\mu} = \frac{v \times D}{\nu}$$

$$\therefore \nu = \frac{\mu}{\rho} \Rightarrow \nu = \text{viscosidade cinemática}$$

$$[\nu]_{SI} = \frac{\frac{N \times s}{m^2}}{\frac{kg}{m^3}} = \frac{N \times s}{m^2} \times \frac{m^3}{kg} = kg \times \frac{m}{s^2} \times \frac{s}{m^2} \times \frac{m^3}{kg} = \frac{m^2}{s}$$

$$[\nu]_{CGS} = \frac{cm^2}{s} = \text{Stoke}$$

$$1 \text{ centiStoke} = 10^{-2} \times \frac{cm^2}{s} = 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

A viscosidade cinemática geralmente é determinada em viscosímetros e um deles é o **viscosímetro de Saybolt**.

O viscosímetro Saybolt está baseado no tempo de passagem de um determinado volume do fluido através de tubos capilares. Permite determinar a viscosidade Saybolt Universal e Saybolt Furol a temperaturas que variam entre ambiente 5°C e 250°C. O ensaio baseia-se na medição dos segundos que uma quantidade padrão (geralmente 60 mL) leva para fluir completamente através de um furo padronizado (universal ou furol), a uma temperatura constante. O tempo cronometrado resulta em SSU (segundo Saybolt universal) ou SSF (segundo Saybolt furol).

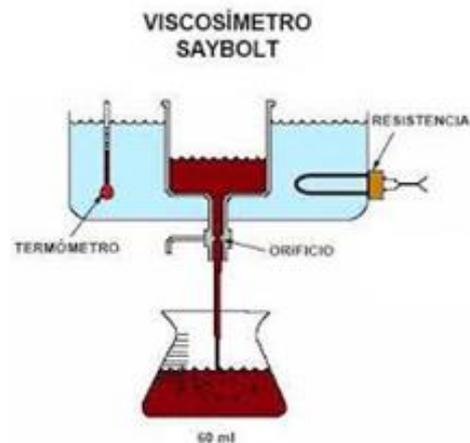


Imagem extraída da pesquisa sobre viscosímetro de Saybolt no site da google

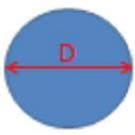
Através da viscosidade cinemática (ν) obtemos a viscosidade (μ), já que: $\mu = \nu \times \rho$.

Outro conceito introduzido através do vídeo da experiência de Reynolds (https://www.youtube.com/watch?v=V_ggiAWKtB0&feature=youtu.be) é o diâmetro hidráulico (D_H) que é fundamental para generalizar os estudos desenvolvidos através dos condutos forçados (fluido tem contato total com a parede interna do conduto) de seção transversal circular.

Diâmetro hidráulico

$$D_H = 4 \times \frac{\text{área da seção formada pelo fluido (A)}}{\text{perímetro molhado } (\sigma)}$$

perímetro molhado (σ) = perímetro formado pelo contato do fluido com parede



$$D_H = 4 \times \frac{\pi \times R^2}{2\pi \times R} = 2R = D$$

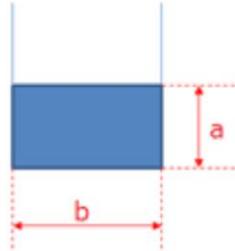
No conduto circular forçado tanto podemos trabalhar com o diâmetro interno como com o diâmetro hidráulico.



Importante ressaltar que o diâmetro hidráulico (D_H) é igual a 4 vezes o raio hidráulico (R_H), portanto: $D_H = 4 \times R_H$.

Através do diâmetro hidráulico, temos: $Re = \frac{\rho \times v \times D_H}{\mu} = \frac{v \times D_H}{\nu}$ e que pode ser definido para qualquer tipo de seção transversal, como o exemplo a seguir.

Outro exemplo de cálculo do diâmetro hidráulico:



$$D_H = 4 \times \frac{a \times b}{2a + b}$$



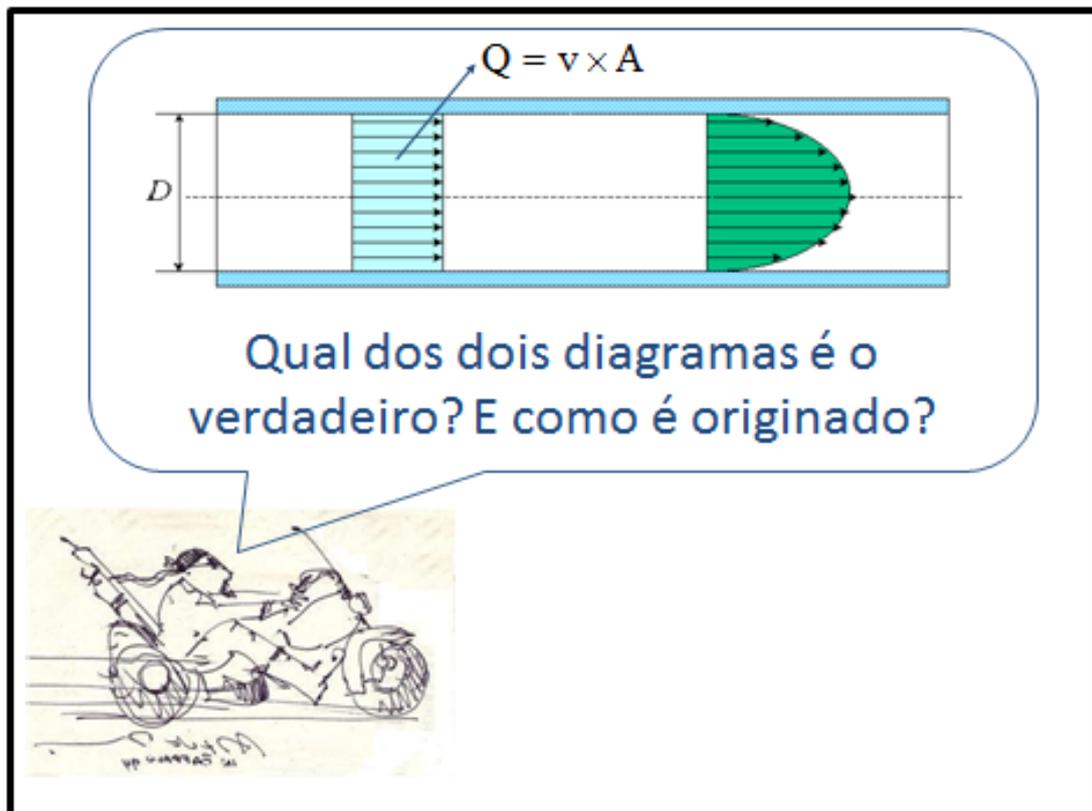
Calculado o diâmetro hidráulico podemos calcular o número de Reynolds e classificar o escoamento em laminar, transição ou turbulento.

No intuito de facilitar a compreensão da experiência de Reynolds através do vídeo, proponho as questões a seguir:

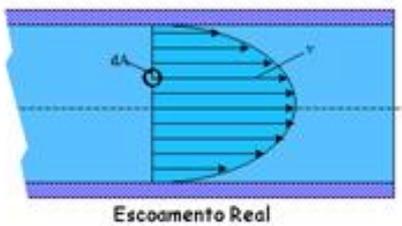
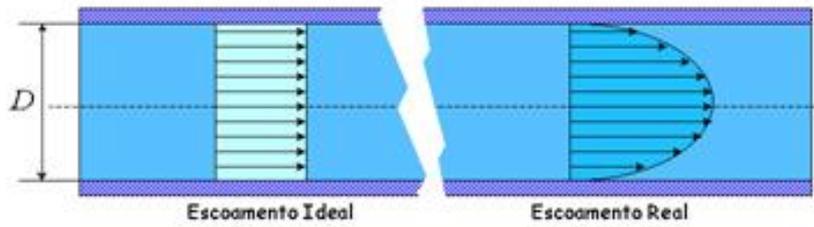
1. O que visualizamos na experiência de Reynolds?
2. O visualizado na experiência de Reynolds é importante para **calcular que parâmetro**, que é fundamental para o desenvolvimento de projetos de instalações hidráulicas?
3. Por que o nível do tanque que alimenta a tubulação (escoamento em queda livre) deve ser mantido constante?
4. Por que devemos calcular o volume inicial e final do tanque de alimentação? Como era calculado?
5. Como foi calculada a vazão direta na experiência de Reynolds?
6. Qual era o diâmetro interno do tubo de vidro utilizado na experiência de Reynolds? Para que ele servia?
7. Quais os tipos de escoamento estabelecidos por Reynolds?

8. Como Reynolds os classificou?
9. Como era calculada a velocidade média de escoamento na experiência de Reynolds?
10. Qual a dimensão (unidade) do número de Reynolds? Como era calculado?

Evocando o princípio de aderência e introduzindo o cálculo da velocidade média para o escoamento laminar e turbulento



Pelo princípio de aderência, temos:



$$dA \Rightarrow dq$$

$$dq = v \times dA \therefore \begin{cases} Q = \int_A v \times dA \rightarrow v = f(r) \\ Q \cong \sum dq \end{cases}$$

Cálculo da vazão em uma seção do escoamento.

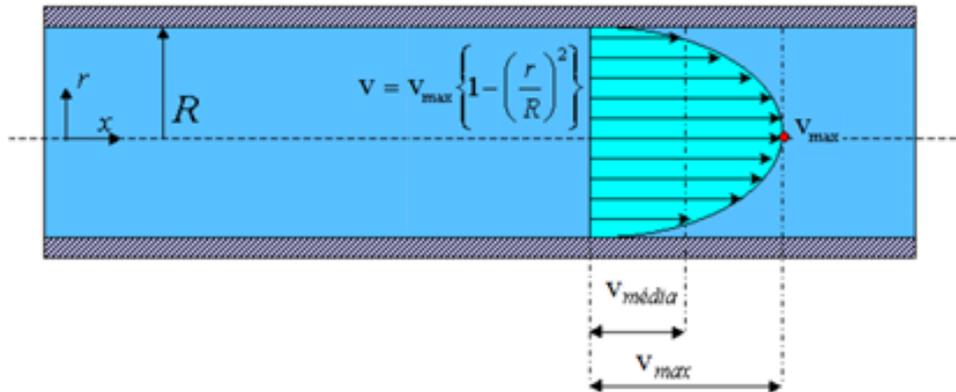


E para isto, devemos saber se o escoamento é laminar ou turbulento!



Para o escoamento laminar

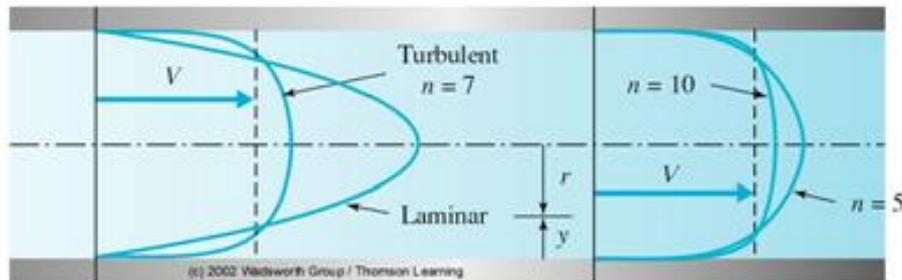
Escoamento laminar em um conduto forçado de seção circular



$$v_{média} = \frac{1}{\pi \times R^2} \times \int_0^R \left[v_{max} \times \left(\frac{R^2 - r^2}{R^2} \right) \right] \times 2\pi \times r \times dr$$

$$v_{média} = \frac{v_{máx}}{2}$$

Escoamento turbulento em um conduto forçado de seção circular

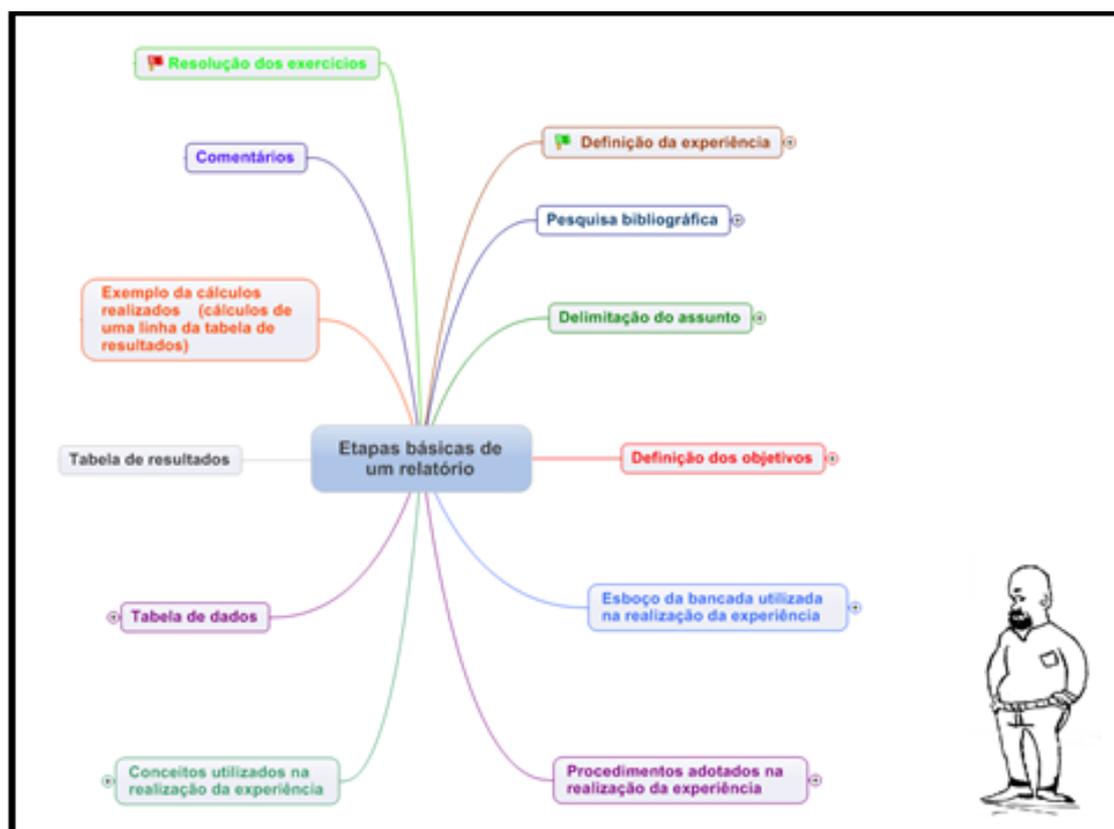
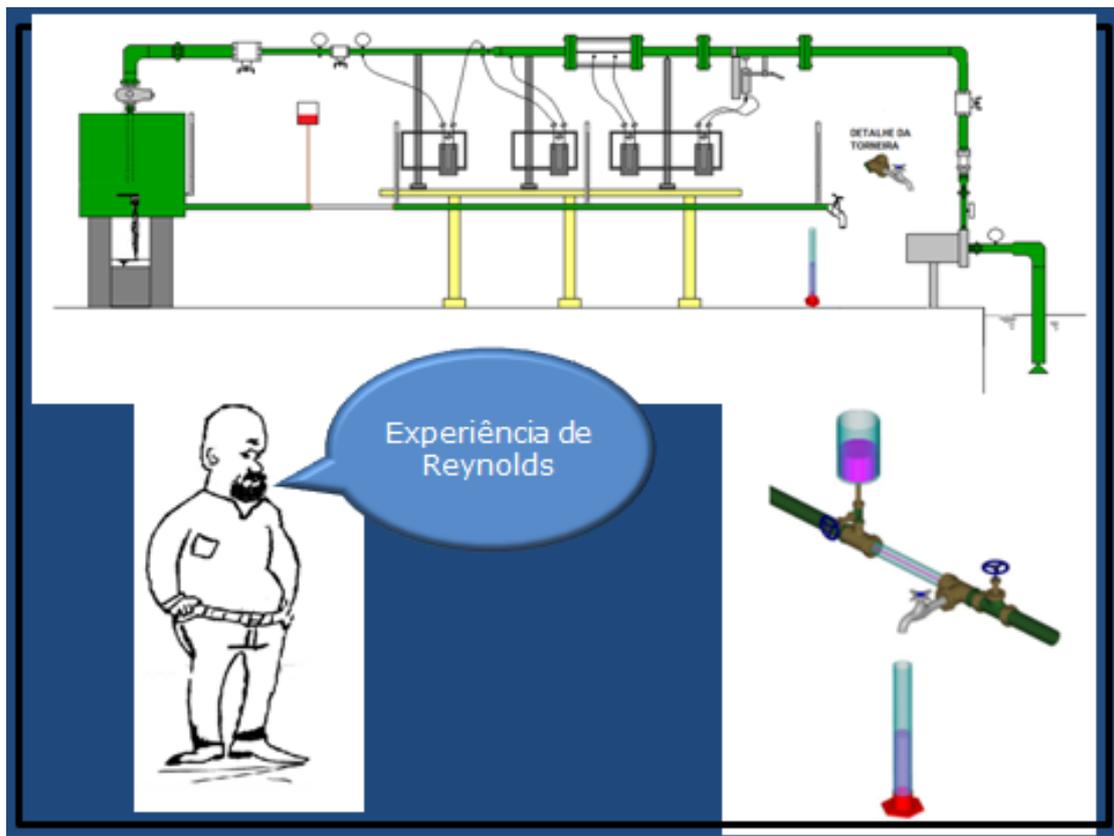


$$v = v_{max} \times \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{1/7}$$

$$v_{média} = \frac{1}{\pi \times R^2} \times \int_0^R \left[v_{max} \times \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{1/7} \right] \times 2\pi \times r \times dr$$

$$v_{média} = \frac{49}{60} \times v_{máx}$$

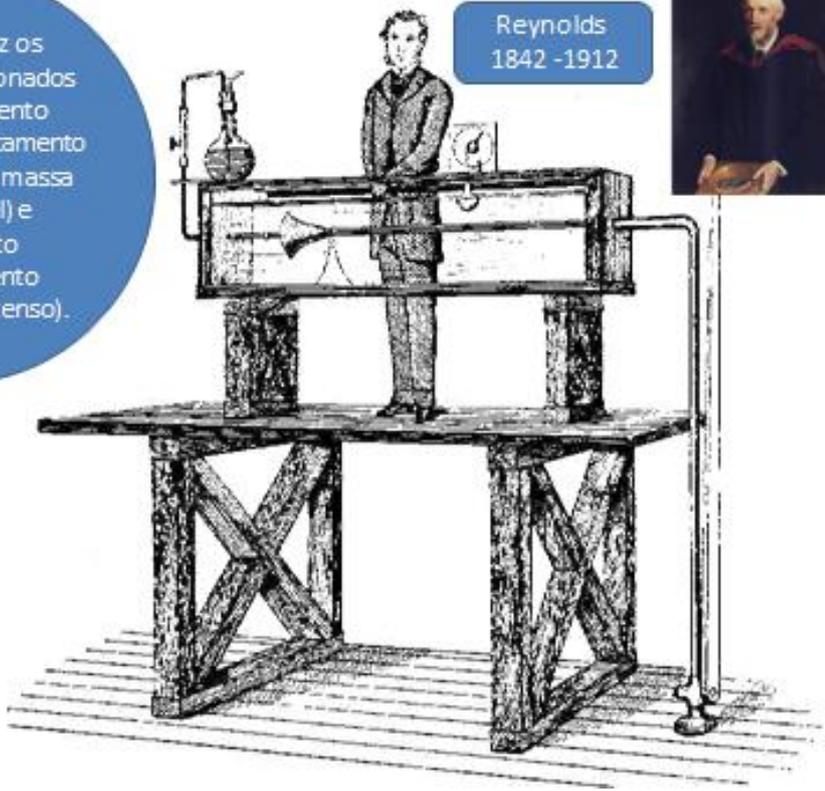
Síntese da experiência de Reynolds



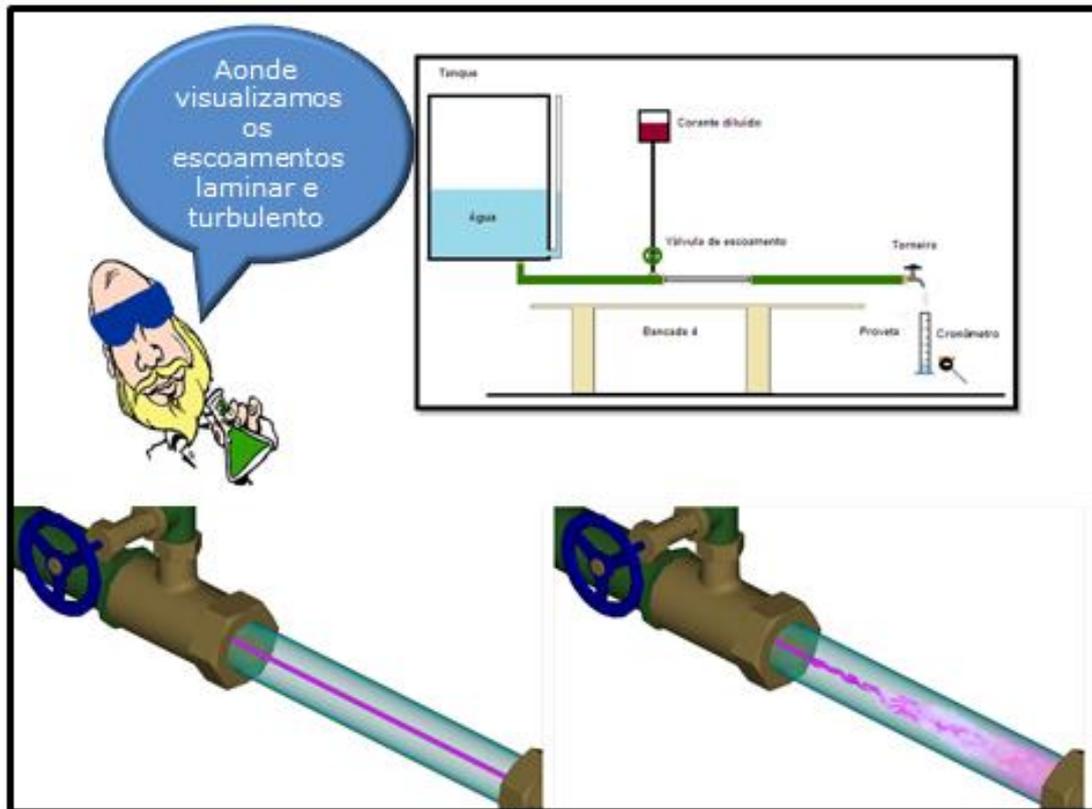
Reynolds fez os estudos relacionados aos escoamento laminar (deslocamento transversal de massa desprezível) e turbulento (deslocamento transversal intenso).



Reynolds
1842 - 1912



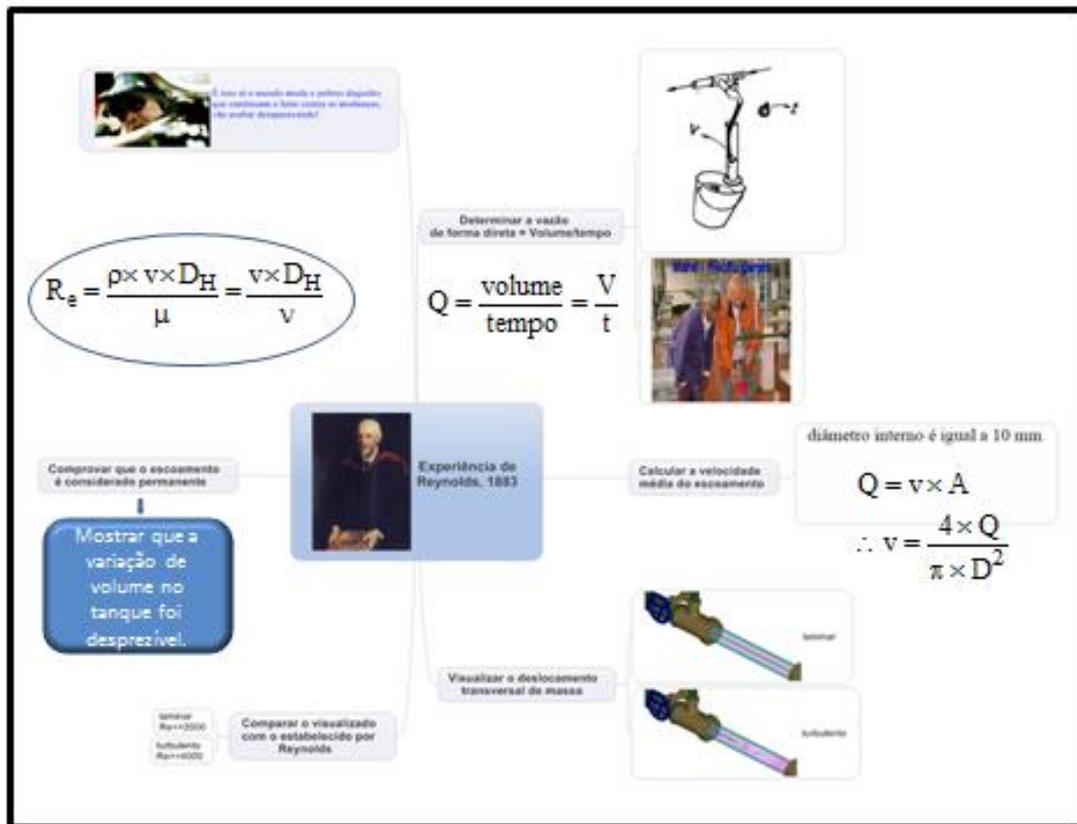
Reproduziremos a sua experiência em nossas bancadas



Além de visualizar o deslocamento transversal de massa, através desta experiência objetivamos:

1. Determinar a vazão de forma direta.
2. Calcular a velocidade média do escoamento.
3. Calcular o número de Reynolds.
4. Recordar a classificação do escoamento através do número de Reynolds.
5. Visualizar um escoamento em regime permanente.

Quanta coisa!



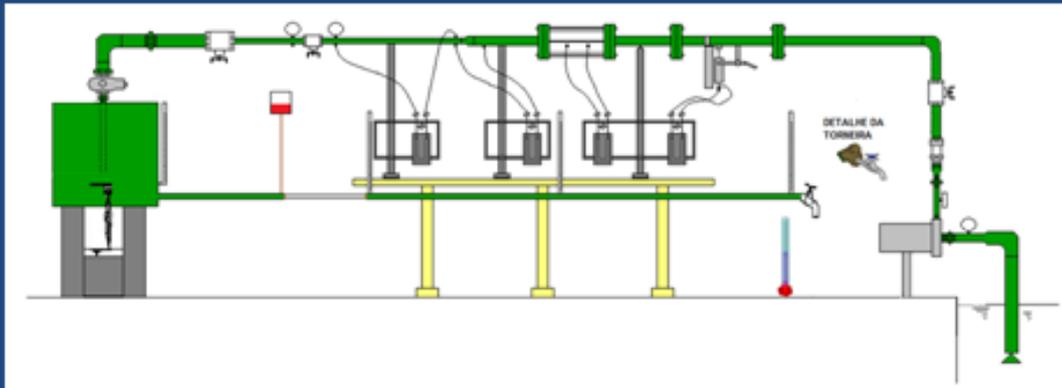
Através desta experiência, também objetivamos recordar que para tubos forçados de seção circular, temos:

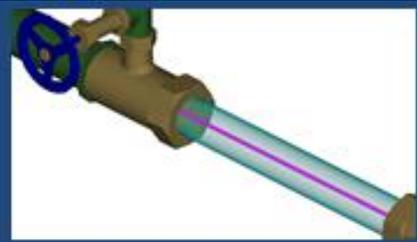
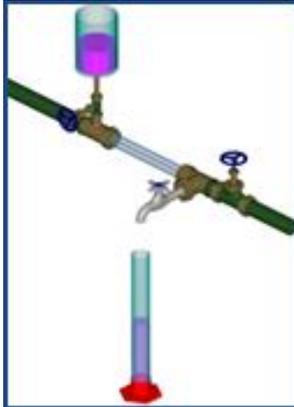
laminar $\rightarrow v = v_{\max} \times \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \rightarrow v_{\text{média}} = \frac{1}{2} \times v_{\max}$

turbulento $\rightarrow v = v_{\max} \times \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{1/7} \rightarrow v_{\text{média}} = \frac{49}{60} \times v_{\max}$

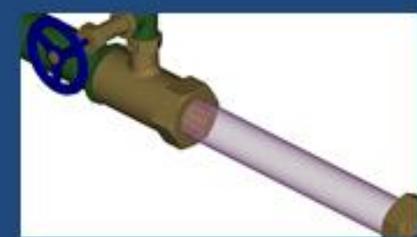
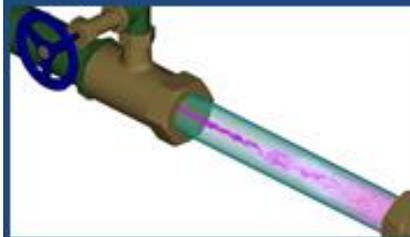


Esquemmatizando e visualizando nossa bancada





TRECHO ONDE OCORREM OS
ESCOAMENTOS E ONDE
VISUALIZAMOS OS TIPOS DE
ESCOAMENTO INCOMPRESSÍVEIS.



FOTOS DO
TRECHO ONDE
É REALIZADA A
EXPERIÊNCIA
DE REYNOLDS,
COM
ESCOAMENTO
LAMINAR E
TURBULENTO E
AINDA A
DETERMINAÇÃO
DA VAZÃO.

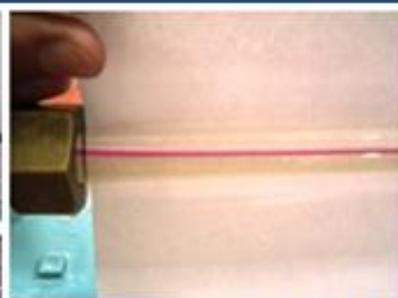




Tabela a ser preenchida: onde são exigidos dois valores para o escoamento laminar e dois para o turbulento, o outro valor, procuramos obter o de transição, que é a passagem do laminar para o turbulento, ou vice-versa

| Ensaio | Q | v | R _c | Tipo de Escoamento | Tipo de Escoamento |
|--------|-------------------|-----|----------------|--------------------|--------------------|
| | m ³ /s | m/s | F°L°T° | Pelos Cálculos | Visualizado |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |

Mais informações consulte:

<http://www.escoladavida.eng.br/mecflubasica/Apostila/Unidade%203/Simulacao%20de%20Reynolds%20un%203.pdf>
http://www.escoladavida.eng.br/mecflubasica/experiencia_de_Reynolds.pdf

Exercícios a serem resolvidos

- 1°) As fotos a seguir mostram, respectivamente, a determinação da vazão na experiência de Reynolds e o escoamento observado para a seguinte questão: qual o mínimo volume que recolhido na proveta em (25 + o último número do seu número de matrícula sem ser o dígito) segundos, produziria o escoamento representado.

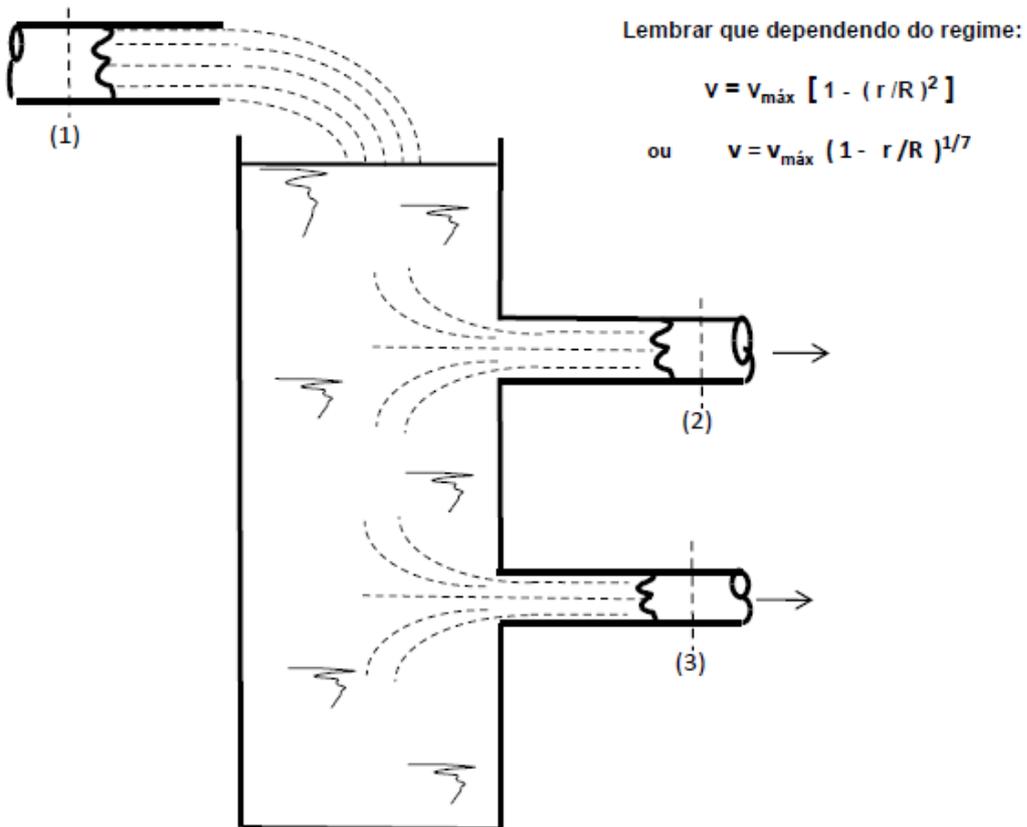


O nível do reservatório da figura, se mantém constante, mesmo sendo de pequenas dimensões. A viscosidade do fluido em escoamento é de $150 \text{ mm}^2/\text{s}$. Nas seções (1) e (2) o regime de escoamento está no limite entre o laminar e o de transição; ainda laminar. Na seção (3) o regime de escoamento está no limite entre o de transição e o turbulento; já no turbulento.

As velocidades no centro das seções (1) e (3) são respectivamente $2,5 \text{ m/s}$ e $3,7 \text{ m/s}$.

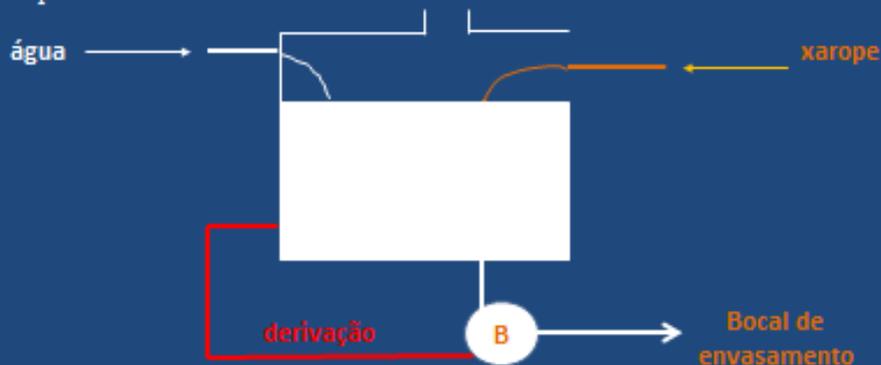
Pede-se determinar:

- As vazões nas três seções (1); (2) e (3).
- Os diâmetros nas três seções (1); (2) e (3).
- A velocidade de uma partícula fluida a 1 cm da parede interna na seção (3).



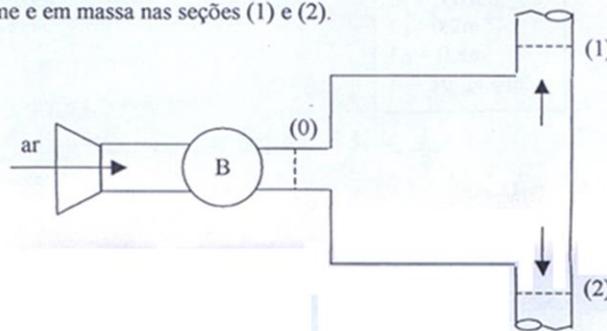
3º) O reservatório da figura, que se mantém a nível constante, é utilizado para preparar e engarrafar um produto que é constituído por um xarope diluído em água. O xarope tem viscosidade alta e assim, o escoamento é laminar no seu conduto de entrada de diâmetro 20 mm, onde a velocidade máxima é 3,18 m/s. O bocal de envasamento enche 200 garrafas de 750 mL com o produto em 1 minuto, alimentado por uma bomba que tem um conduto de derivação com o reservatório. No conduto de entrada da bomba de diâmetro de 40 mm, o escoamento é turbulento e tem velocidade de 2,3 m/s a 8 mm de distância da parede do conduto. Posto isto, determinar:

1. a vazão na derivação e o sentido do escoamento que deve ser indicado na figura;
2. a relação entre as vazões de xarope e água, ou seja, a que representa a composição do produto.



O insuflador de ar da figura fornece 4 kg/s na seção (0). O sistema está em regime permanente. Nas seções (1) e (2) deseja-se que o número de Reynolds seja 10^5 para que o movimento turbulento favoreça a homogeneização das temperaturas. Dados: $D_1 = 40\text{cm}$; $\rho_1 = 1,2\text{kg/m}^3$; $\mu_1 = 2,4 \times 10^{-5}\text{N}\cdot\text{s/m}^2$; $\rho_2 = 0,95\text{kg/m}^3$; $\mu_2 = 7,6 \times 10^{-5}\text{N}\cdot\text{s/m}^2$. Pede-se:

- a) o diâmetro D_2 ;
- b) a vazão em volume e em massa nas seções (1) e (2).



5º) Num laboratório, decide-se fazer a medida da viscosidade dinâmica de um fluido utilizando-se a Experiência de Reynolds. Inicialmente realiza-se um teste com água ($\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$).

Neste teste quando acontece a passagem de transição para turbulento, é recolhido no recipiente graduado um volume de 400 ml, em 50 s.

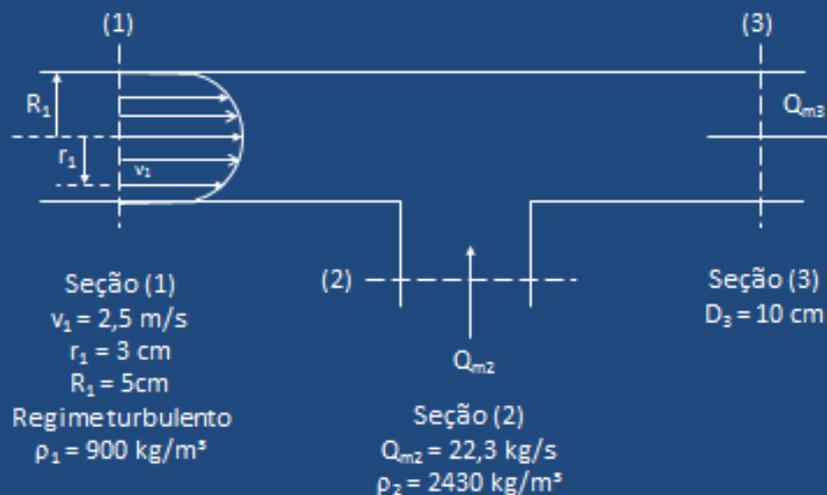
Nesta condição o recipiente graduado e a água contida no mesmo, são submetidos a uma balança, obtendo-se 0,7 kg. Com o fluido em estudo verifica-se que a passagem de laminar para a transição acontece quando se recolhem 900 mL no recipiente graduado, em 30 s. Nesta condição, na balança o recipiente graduado com o fluido em estudo registra-se 1 kg.

Qual a viscosidade do fluido em estudo em N s/m^2 ?

6º) Na tubulação da figura, determinar:

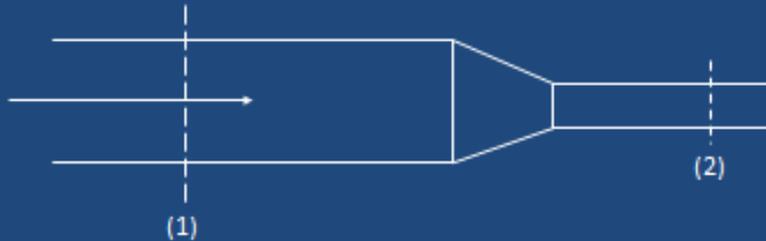
- a vazão em massa na seção (1);
- a massa específica na seção (3).

Respostas a) 16,57 kg/s e b) 1410 kg/m³



7º) No tubo da figura a seção (1) tem um diâmetro $D_1 = 18$ cm e o líquido apresenta um escoamento laminar com número de Reynolds igual a 2000, já na seção (2) o escoamento é turbulento com número de Reynolds igual a 6000. Na seção (1) o líquido tem uma velocidade igual a 3 m/s a 5 cm da parede do tubo, nesta situação, calcule:

- O diâmetro da seção (2);
- A viscosidade dinâmica do líquido se sua massa específica é igual a 800 kg/m^3 ;
- A velocidade na seção (2) a 1 cm da parede



Respostas a) $D_2 = 6$ cm; b) $0,134 \text{ Pa} \cdot \text{s}$; c) $17,6 \text{ m/s}$



Existem aqueles que não precisam estar conosco para estarem em nosso coração, MEG você sempre estará comigo e eu sempre lhe amarei!