ESCOAMENTO INTERNO - AULA 01

Tubulação de planta industrial

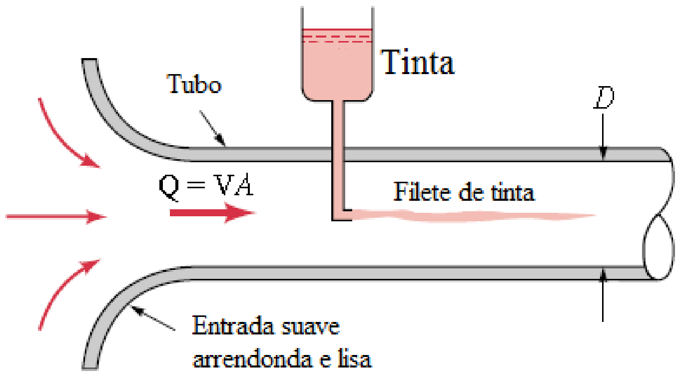
Tubulação da hidrelétrica de Henry Borden
(Cubatão – SP)

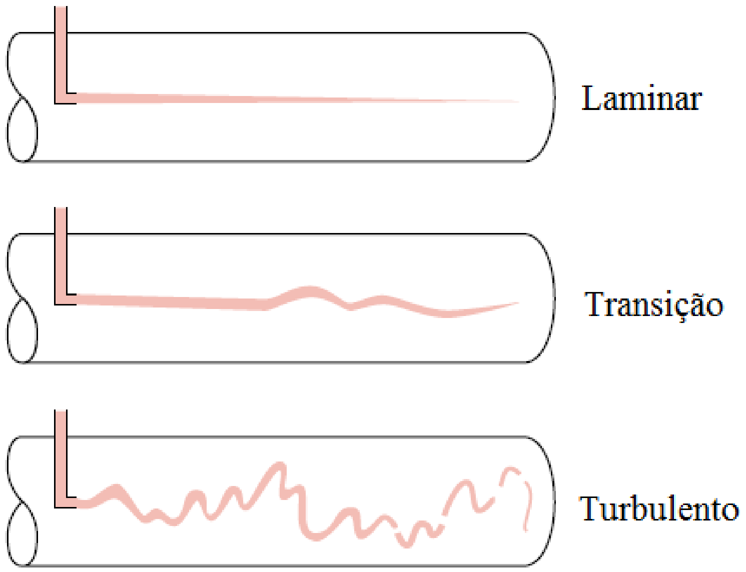
Sistema de dutos de ar condicionado

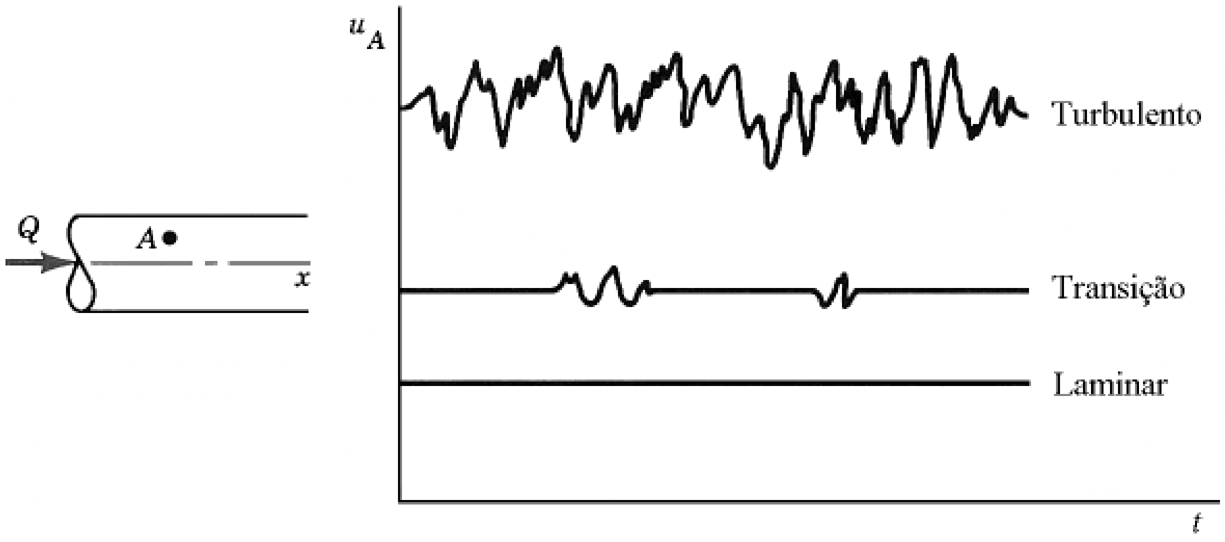

MYCOM
MYCOM
2 3:56AM


2 3:56AM

Características Gerais do escoamento laminar e turbulento







Características Gerais do escoamento laminar e turbulento

- Escoamento turbulento: velocidade apresenta flutuações aleatórias
- Parâmetro importante no escoamento viscoso em condutos: número de Reynolds

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu}$$

Para cálculos de engenharia:

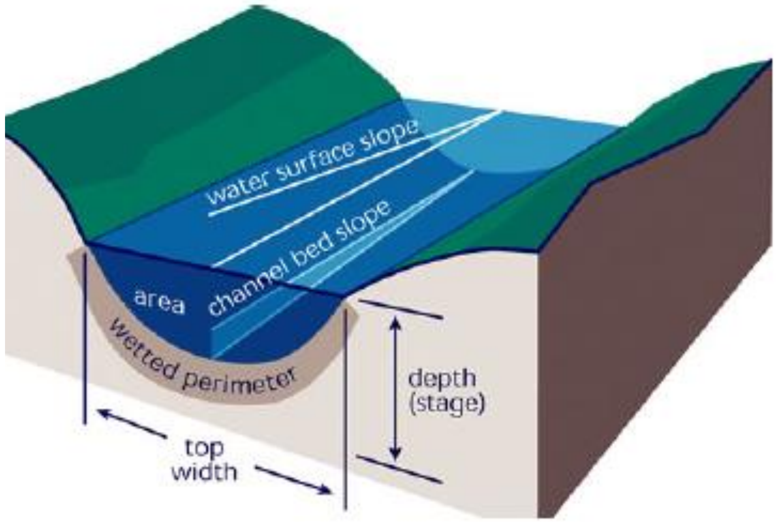
- Re ≤ 2100 → escoamento laminar
- 2100 ≤ Re ≤ 4000 → escoamento de transição
- Re > 4000 → escoamento turbulento

Dutos de seção não circular - Diâmetro hidráulico

$$D_h = \frac{4A}{P}$$

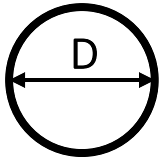
$A =$ área da seção transversal

$P =$ perímetro molhado

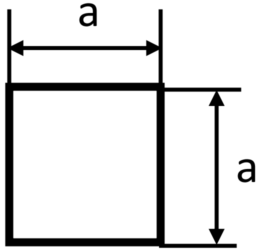


Seção

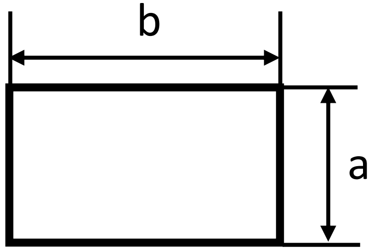
Diâmetro hidráulico



$$D_h = \frac{4A}{P} = \frac{4\,\frac{\pi D^2}{4}}{\pi D} = D$$



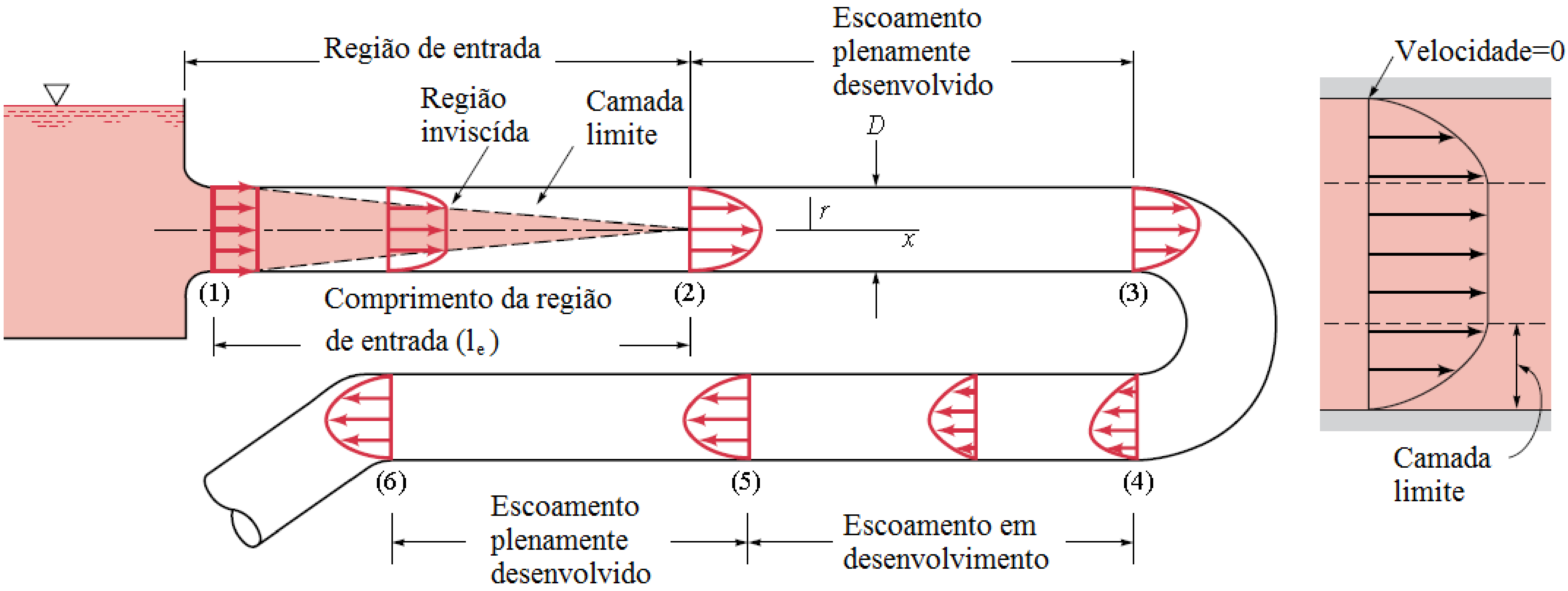
$$D_h = \frac{4A}{P} = \frac{4a^2}{4a} = \mathrm{a}$$



$$D_h = \frac{4A}{P} = \frac{4ab}{2(a+b)}$$

Características gerais: Região de entrada

Escoamento completamente desenvolvido



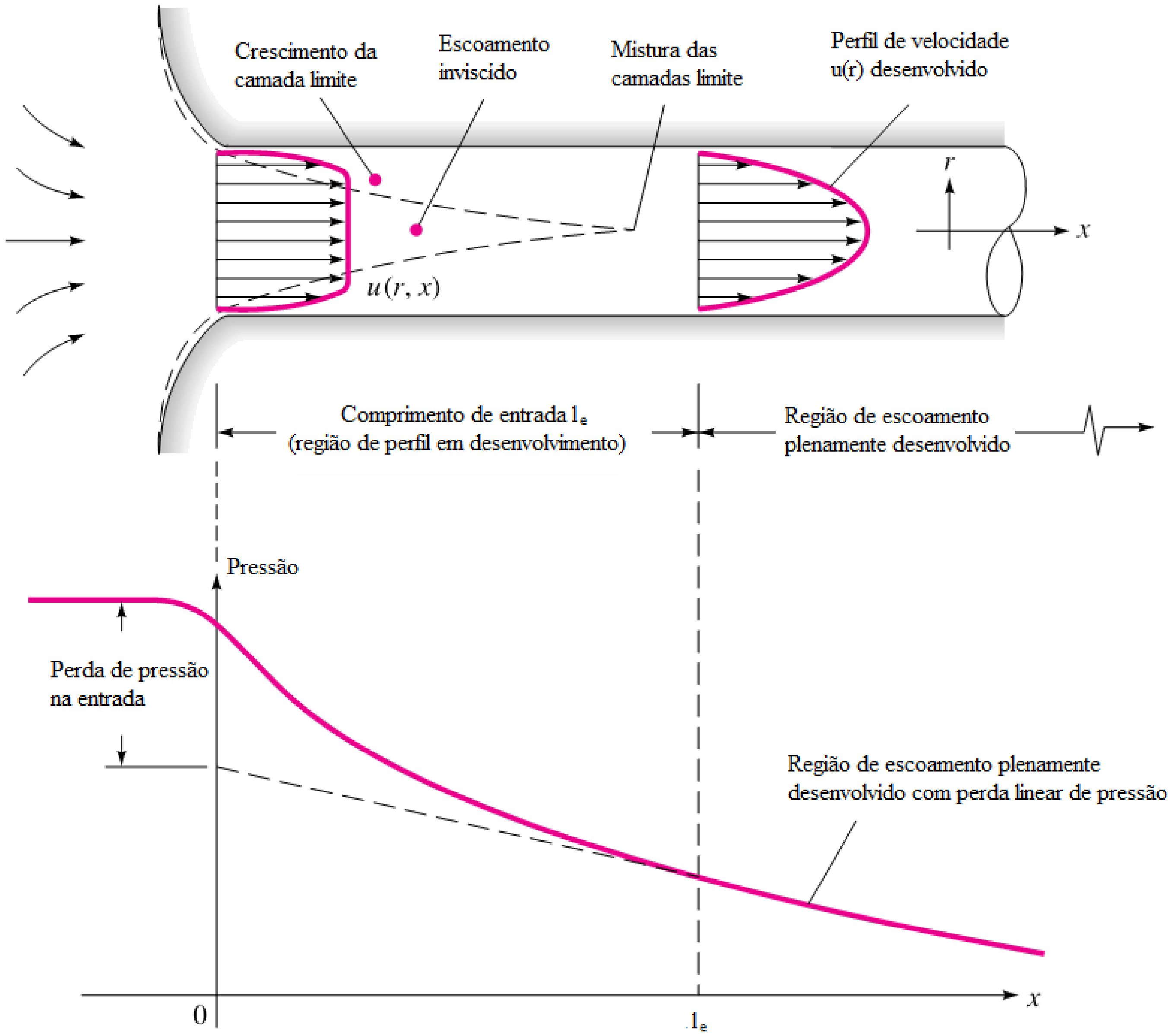
Características gerais: Região de entrada
Escoamento completamente desenvolvido

- Região de entrada: região do escoamento próxima da seção de alimentação.

- Escoamento plenamente (ou completamente) desenvolvido (E.P.D.): perfil de velocidades não muda com a distância longitudinal (eixo x).

- Comprimento da região de entrada l_e:
  - $l_e = 0{,}06 \cdot Re \cdot D$, para escoamento laminar
  - $l_e = 4{,}4 \cdot (Re)^{1/6} D$, para escoamento turbulento

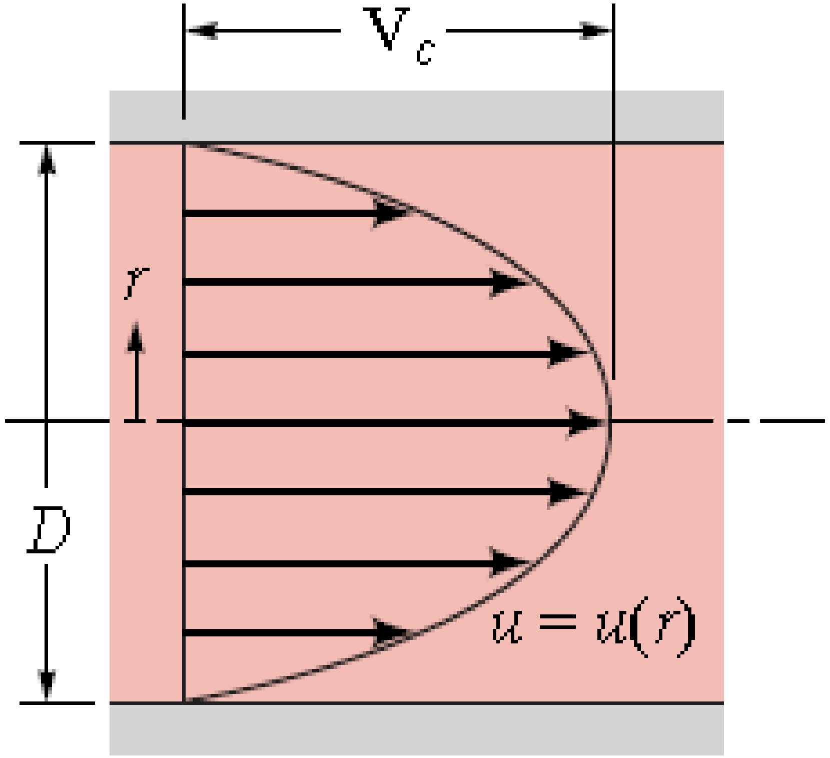
Características gerais: Tensão de cisalhamento e pressão



Características gerais: Tensão de cisalhamento e pressão

- Escoamento plenamente desenvolvido: forças de pressão são equilibradas pelas forças viscosas
- Escoamento não é plenamente desenvolvido: forças de inércia não são desprezíveis
- Tubo não é horizontal: força peso é relevante
- Efeitos viscosos fazem com que o gradiente de pressão não seja nulo.

Escoamento laminar plenamente desenvolvido



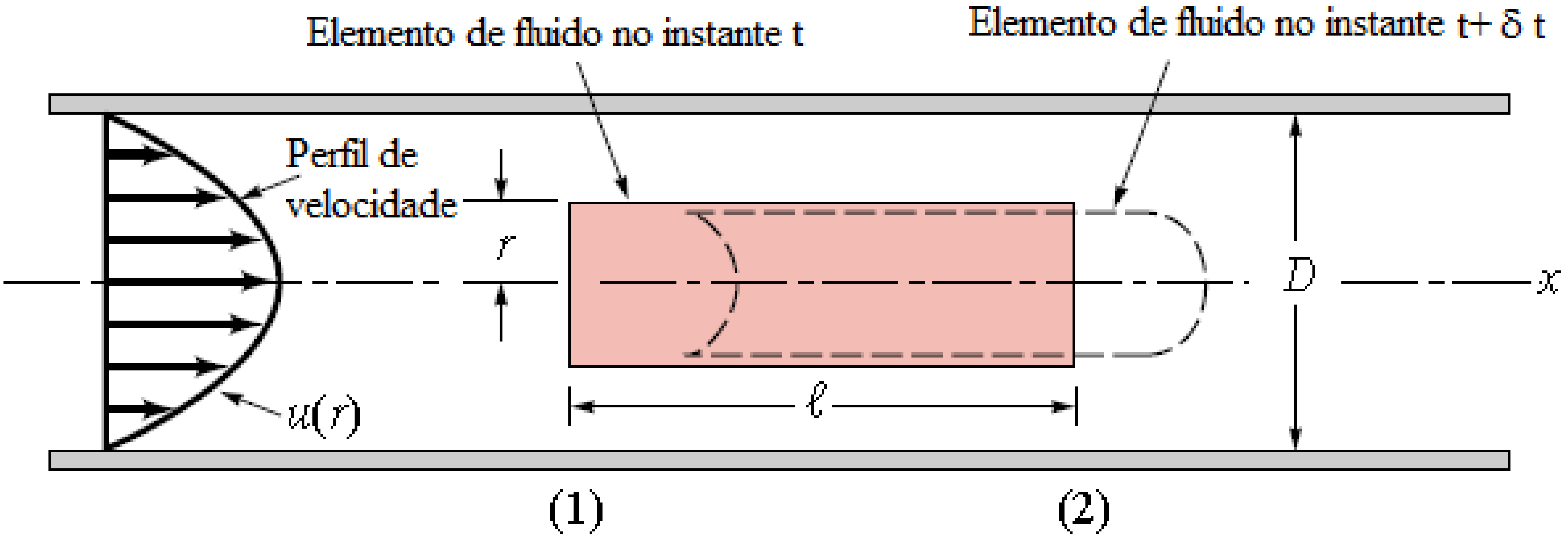
Hipóteses:

- Escoamento em trechos retos de tubulação
- Escoamento laminar plenamente desenvolvido
- Regime permanente
- Fluido Newtoniano
- Efeitos gravitacionais desprezados

$$u(r) = V_c\left[1-\left(\frac{2r}{D}\right)^2\right]$$

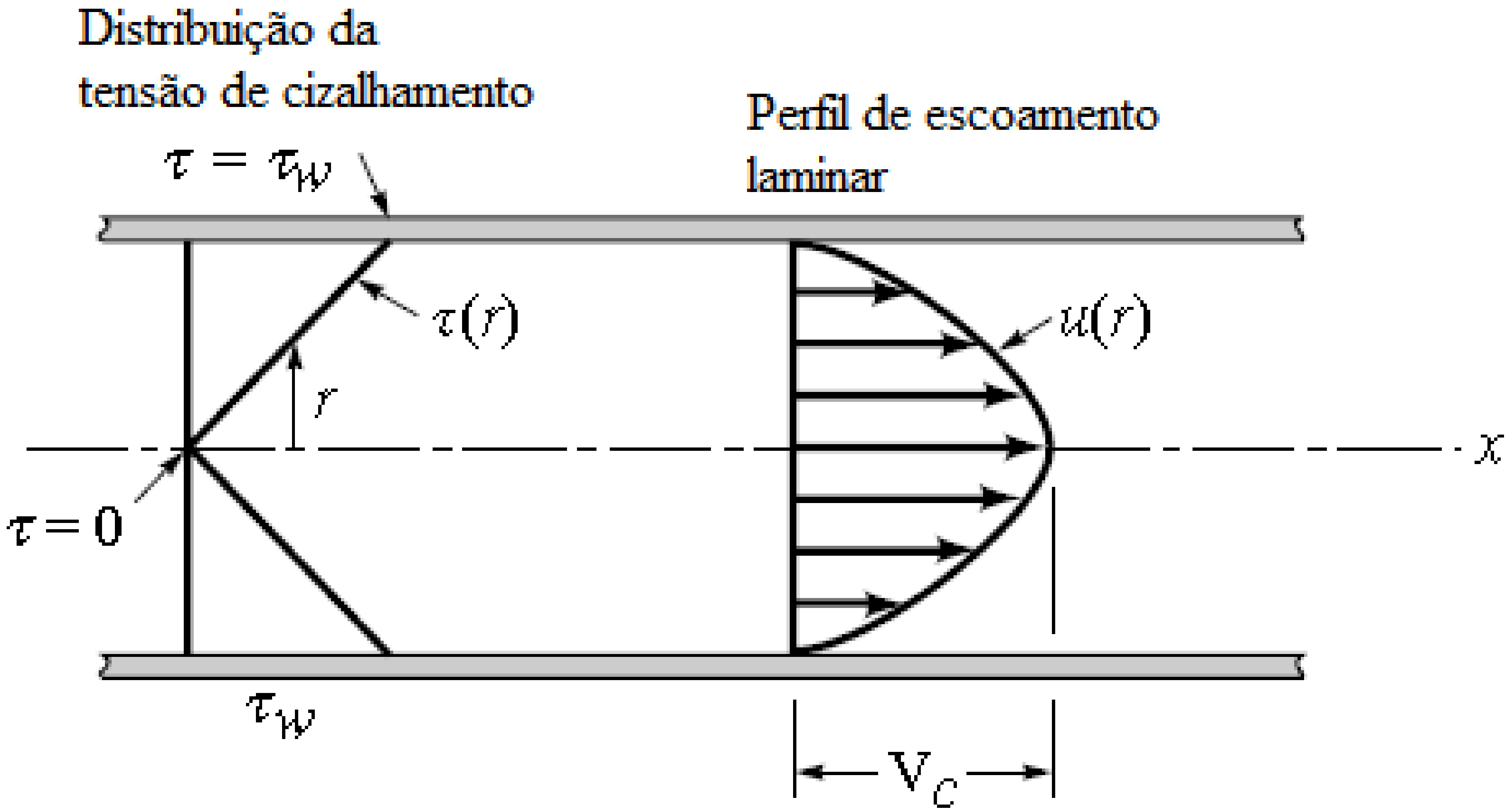
sendo: $$V_c = \frac{\Delta p D^2}{16\mu l}$$

Escoamento laminar plenamente desenvolvido



$$p_2 = p_1 - \Delta p; \Delta p > 0$$

Escoamento laminar plenamente desenvolvido



- Efeitos gravitacionais desprezados: pressão constante ao longo da seção vertical
- Pressão varia ao longo da tubulação

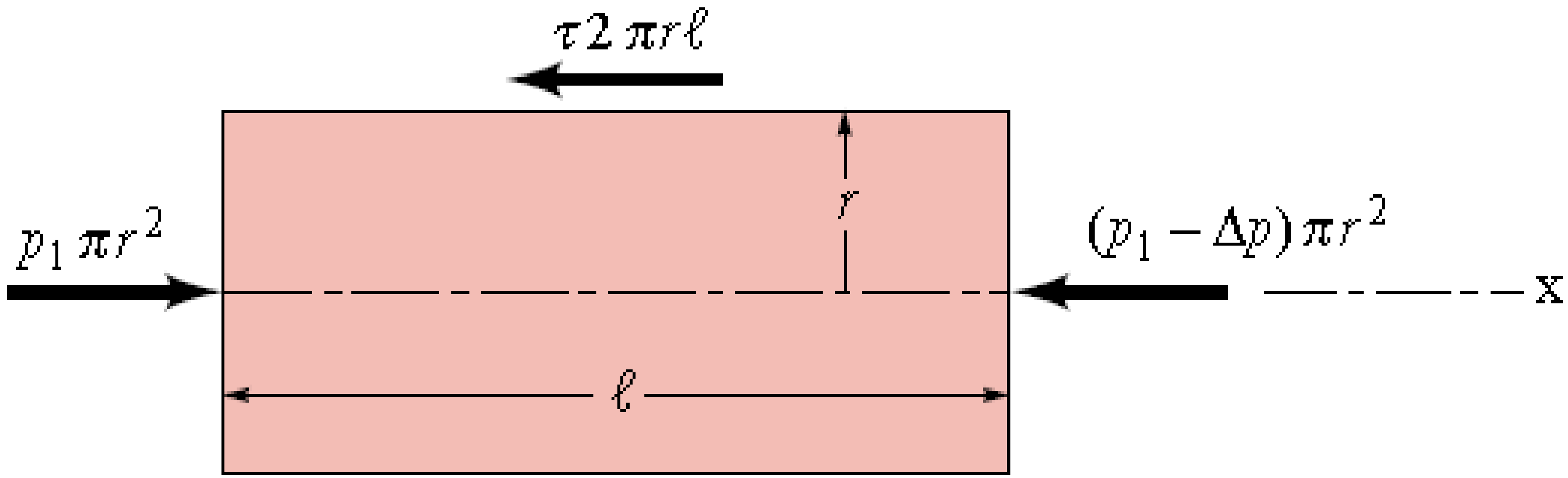
Escoamento laminar plenamente desenvolvido

2ª Lei de Newton: $\sum F_x = ma_x$

Sem aceleração no escoamento do fluido: $a_x = 0$

Camadas de fluido mais lentas exercem sobre o volume de controle uma força devido a tensão de cisalhamento:

$$F_{cisalhamento} = \tau * \left(2\pi rl\right)$$



Escoamento laminar plenamente desenvolvido

$$\sum F_x = 0$$

$$p_1 * \left(\pi r^2\right) - \left(p_1 - \Delta p\right) * \left(\pi r^2\right) - \tau * \left(2\pi r l\right) = 0$$

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{2\tau}{r}$$

$$\left.\begin{matrix}\Delta p \\ l\end{matrix}\right\} \text{ não depende de r} \quad \Rightarrow \quad \underbrace{\text{Para } \frac{2\tau}{r} \text{ não depende de r}}_{\tau = Cr}$$

Escoamento laminar plenamente desenvolvido

$$\tau = Cr$$

Condições de contorno:

- para r=0 → τ=0
- para r=D/2 → τ = τ_w (tensão de cisalhamento na parede)

$$\tau_w = C\frac{D}{2}$$

Logo:

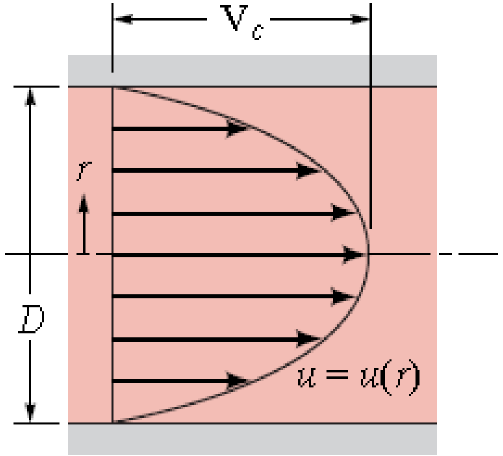
$$C = \frac{2\tau_w}{D} \Rightarrow \tau = \frac{2\tau_w}{D}r$$

Escoamento laminar plenamente desenvolvido

$$\tau = \frac{2\tau_w}{D} r$$

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{2\tau}{r}$$

$$\Delta p = \frac{4l\tau_w}{D}$$



$$\frac{du}{dr} < 0$$ (velocidade decresce com r)

$$\tau > 0$$

$$\tau = \mu \frac{du}{dr}$$ (Fluido newtoniano)

$$\tau = -\mu \frac{du}{dr}$$

Escoamento laminar plenamente desenvolvido

$$\left.\begin{aligned}\tau &= \frac{2\tau_w}{D} r \\ \tau &= -\mu \frac{du}{dr} \\ \tau_w &= \frac{\Delta p D}{4l}\end{aligned}\right\} \quad \underbrace{-\mu \frac{du}{dr} = \frac{2\tau_w}{D} r \Rightarrow \frac{du}{dr} = -\frac{2\tau_w}{\mu D} r}$$

$$\frac{du}{dr} = -\left(\frac{\Delta p}{2\mu l}\right) r$$

Escoamento laminar plenamente desenvolvido

$$\frac{du}{dr} = -\left(\frac{\Delta p}{2\mu l}\right) r \Rightarrow du = -\left(\frac{\Delta p}{2\mu l}\right) r dr$$

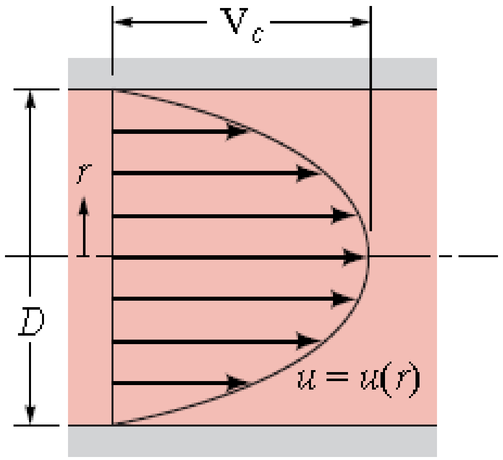
Integrando:

$$\int du = -\left(\frac{\Delta p}{2\mu l}\right) \int r dr$$

$$u = -\left(\frac{\Delta p}{2\mu l}\right) \frac{r^2}{2} + C_1 = -\left(\frac{\Delta p}{4\mu l}\right) r^2 + C_1$$

Escoamento laminar plenamente desenvolvido

$$u = -\left(\frac{\Delta p}{4\mu l}\right) r^2 + C_1$$



Como para r=D/2 →u=0:

$$0 = -\left(\frac{\Delta p}{4\mu l}\right)\left(\frac{D}{2}\right)^2 + C_1 \Rightarrow C_1 = \frac{\Delta p D^2}{16\mu l}$$

$$u = -\left(\frac{\Delta p}{4\mu l}\right) r^2 + C_1 = -\left(\frac{\Delta p}{4\mu l}\right) r^2 + \frac{\Delta p D^2}{16\mu l}$$

$$u = -\left(\frac{\Delta p}{4\mu l}\right) r^2 + \frac{\Delta p D^2}{16\mu l} = \frac{\Delta p D^2}{16\mu l}\left[1 - \left(\frac{2r}{D}\right)^2\right] = V_c\left[1 - \left(\frac{2r}{D}\right)^2\right]$$

Escoamento laminar plenamente desenvolvido

$$u = V_c\left[1-\left(\frac{2r}{D}\right)^2\right]$$

Vazão volumétrica (Q)

$$\dot{Q} = \int u dA = \int_{r=0}^{r=R} u(r) 2\pi r dr = \int_0^R V_c\left[1-\left(\frac{2r}{D}\right)^2\right] 2\pi r dr$$

$$\dot{Q} = 2\pi V_c \int_0^R \left[1-\left(\frac{2r}{D}\right)^2\right] r dr \Rightarrow \dot{Q} = \frac{\pi R^2 V_c}{2}$$

Escoamento laminar plenamente desenvolvido

Velocidade média:

$$V = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{\frac{\pi R^2 V_c}{2}}{\pi R^2} = \frac{V_c}{2}$$

Como: $V_c = \dfrac{\Delta p D^2}{16\mu l}$

$$V = \frac{V_c}{2} = \frac{\frac{\Delta p D^2}{16\mu l}}{2} = \frac{\Delta p D^2}{32\mu l}$$

Logo:

$$\dot{Q} = \frac{\pi R^2 V_c}{2} = \frac{\pi R^2 \frac{\Delta p D^2}{16\mu l}}{2} = \frac{\pi D^4 \Delta p}{128\mu l}$$

(Lei de Poiseuille)

Perda de caga em escoamento laminar plenamente desenvolvido

Para dutos circulares com diâmetro D:

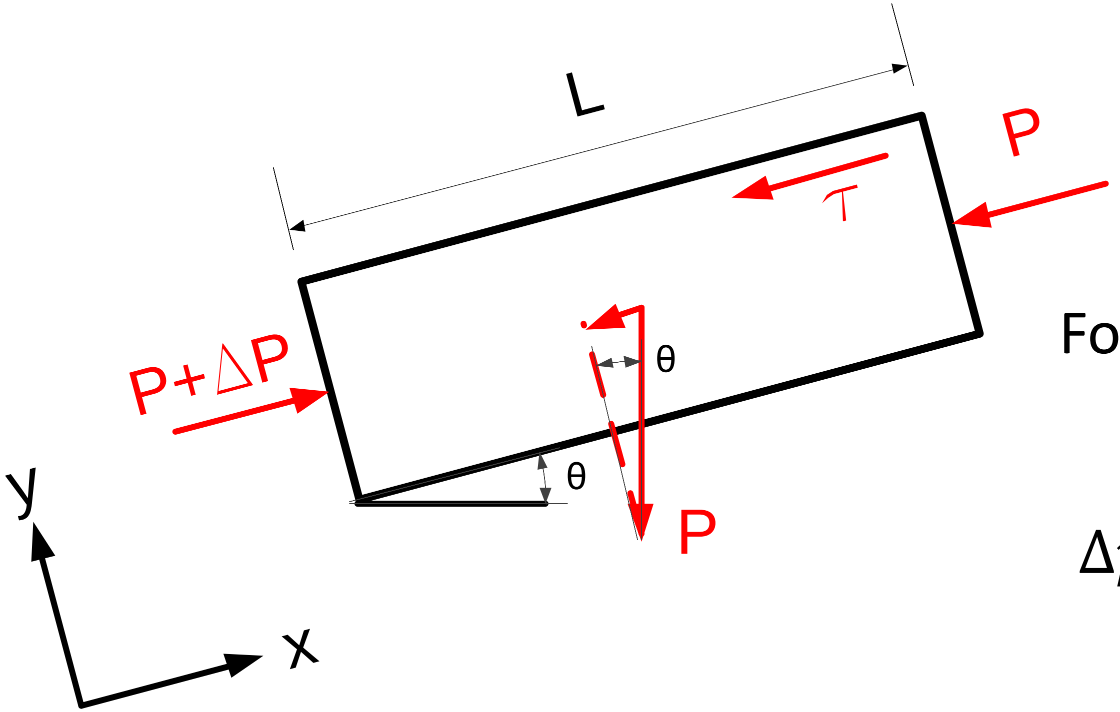
$$\dot{Q} = \frac{\pi D^4 \Delta p}{128 \mu L} = VA = V\frac{\pi}{4}D^2 \quad \Longrightarrow \quad \Delta p = 32\frac{\mu L V}{D^2}$$

Equação de Darcy-Wasbach para avaliação de perda de carga em dutos circulares com diâmetro D e comprimento L

$$h_f = \frac{\Delta p}{\gamma} = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \quad \Longrightarrow \quad \frac{32\frac{\mu L V}{D^2}}{\rho g} = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \quad \Longrightarrow \quad f = \frac{64\mu}{\rho V D} = \frac{64}{Re}$$

Perda de caga em escoamento laminar plenamente desenvolvido

Tubos de seção circular (diâmetro D=2R) inclinados de ângulo θ



Equilíbrio mecânico na direção x:

Forças de pressão=forças viscosas +Peso do líquido

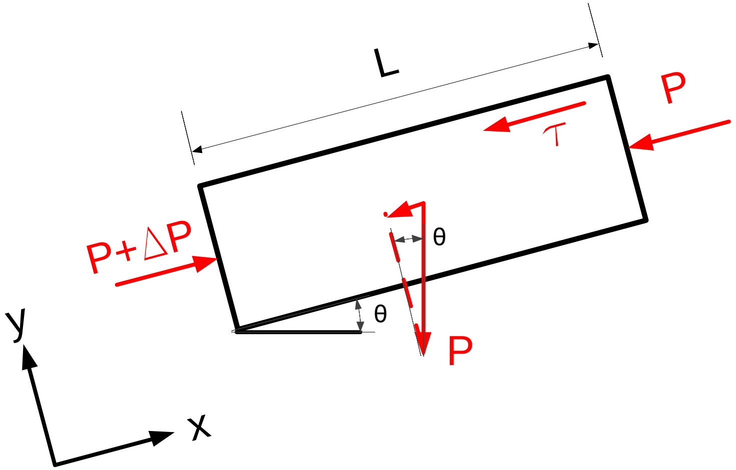
$$\Delta p \pi r^2 = \mu \frac{\partial u}{\partial r} 2\pi r L + \gamma \pi r^2 L sen\theta$$

$$\frac{\Delta p - \gamma L sen\theta}{L} = \mu \frac{\partial u}{\partial r} \frac{2}{r}$$

Perda de caga em escoamento laminar plenamente desenvolvido

Tubos de seção circular (diâmetro D=2r) inclinados de ângulo θ

Integrando de 0 a R:



$$V = \frac{(\Delta p - \gamma L sen\theta)D^2}{32\mu L}$$

$$\dot{Q} = \frac{(\Delta p - \gamma L sen\theta)D^4}{128\mu L}$$

$$\Delta p = \frac{32\mu L V}{D^2} + \gamma L sen\theta$$

$$\text{Tubos horizontais} \Rightarrow sen(0°) = 0 \Rightarrow \Delta p = \frac{32\mu L V}{D^2}$$

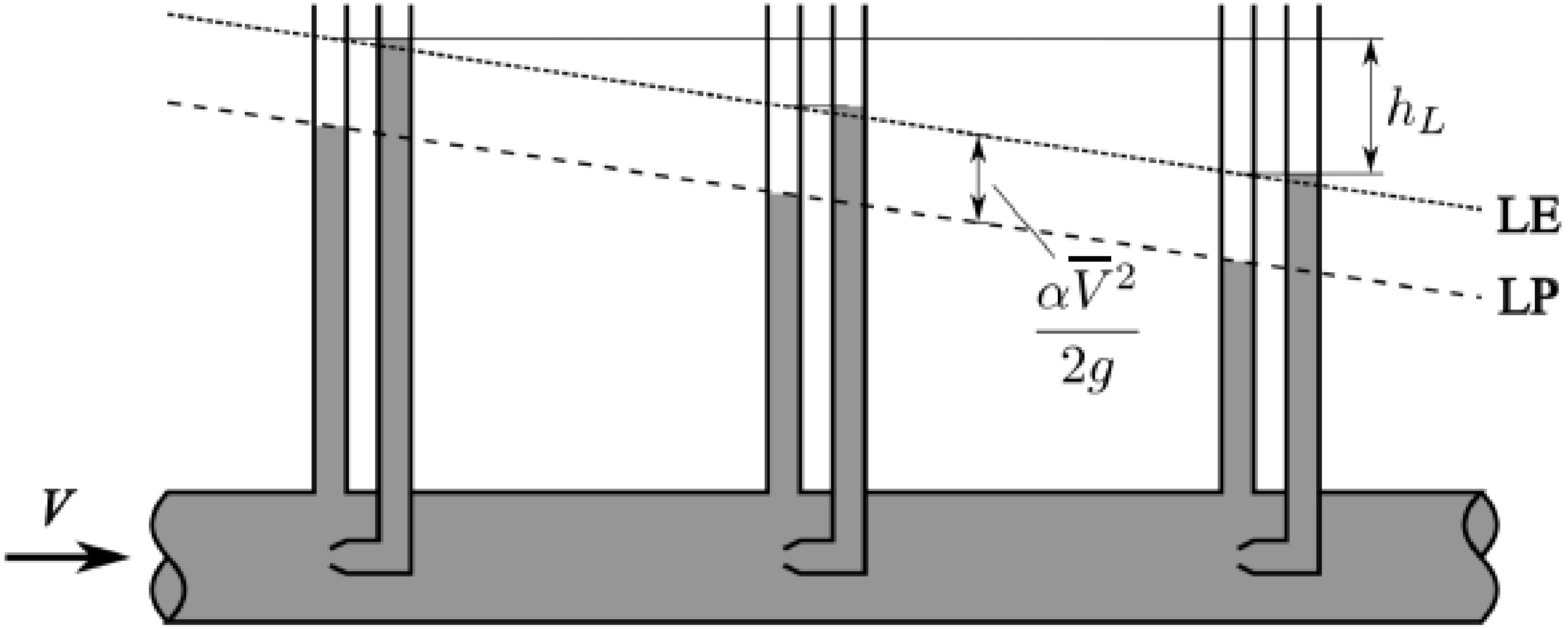
$$\text{Tubos verticais} \Rightarrow sen(90°) = 1 \Rightarrow \Delta p = \frac{32\mu L V}{D^2} + \gamma L$$

Linha piezométrica e Linha de energia

Equação de Bernoulli

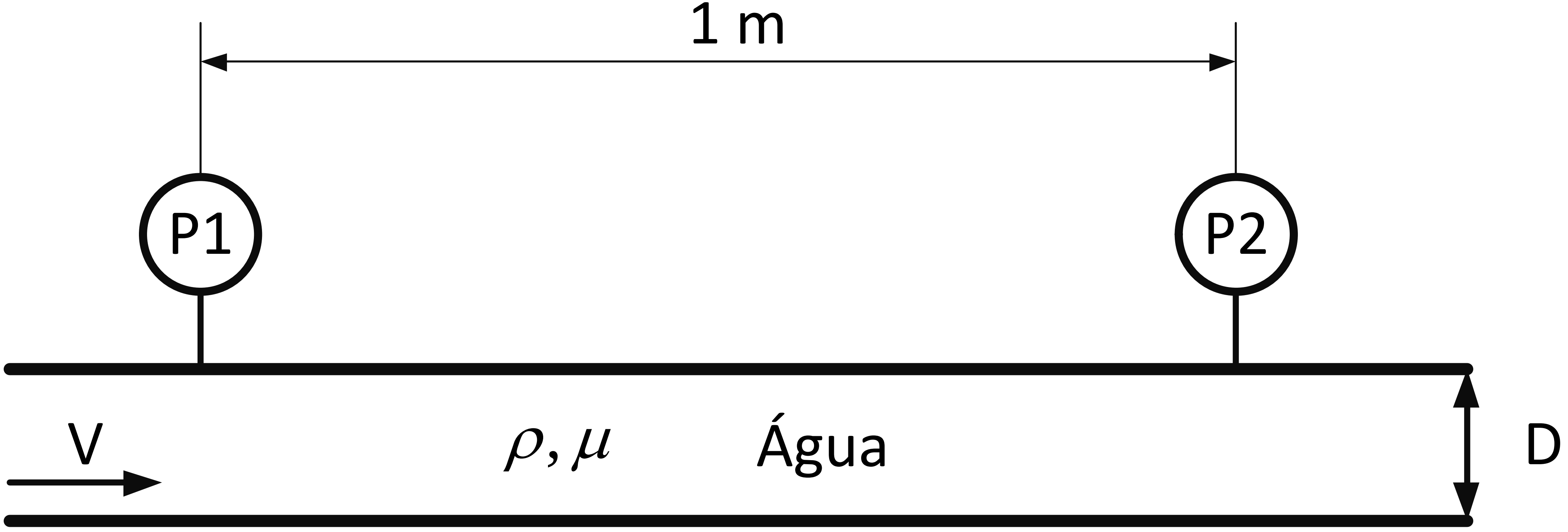
$$\frac{p}{\rho g} + z + \frac{V^2}{2g} = \text{constante}$$ ⟵ Linha de energia(LE) (unidade dos termos em metros)

$$\frac{p}{\rho g} + z = \text{constante}$$ ⟵ Linha piezométricas (LP) (unidade dos termos em metros)



Exercício 01

Água escoa em tubo horizontal com 1 mm de diâmetro no qual são colocados dois medidores de pressão separados por uma distância de 1 m. Qual é a perda máxima de pressão que pode ser medida, admitindo que o escoamento seja laminar?



Exercício 01

Para escoamento laminar:

$$\dot{Q} = \frac{\pi D^4 \Delta p}{128 \mu l} \Rightarrow \Delta p = \frac{128 \mu l \dot{Q}}{\pi D^4}$$

Para água a 20°C a 101,325 kPa: ρ=998,2 kg/m^3 e μ=1,002x10^{-3} N.s/m^2

Temos que:

$$\dot{Q} = VA = V \frac{\pi D^2}{4}$$

Para avaliar a máxima pressão , deve-se avaliar a maior velocidade para escoamento laminar em tubos. Logo: $V_{max} \rightarrow Re_{max} = 2100$

Exercício 01

Portanto:

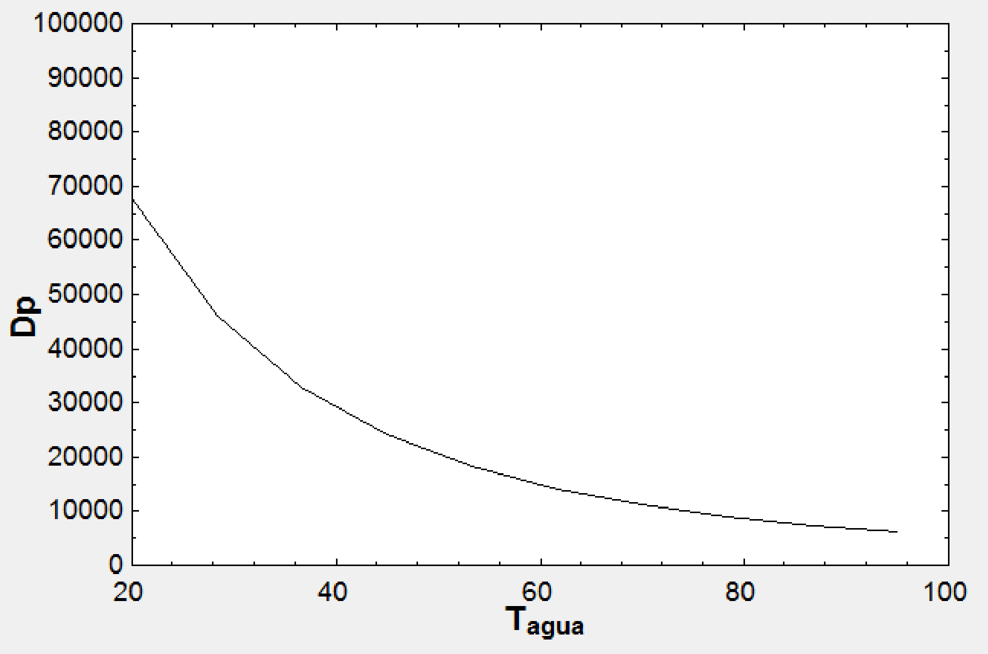
$$\mathrm{Re}_{\max} = 2100 = \frac{\rho V D}{\mu} \Rightarrow V = \frac{2100\mu}{\rho D} = \frac{2100*\left(1,002x10^{-3}\right)}{\left(998,2\right)\left(1x10^{-3}\right)} = 2,11 m/s$$

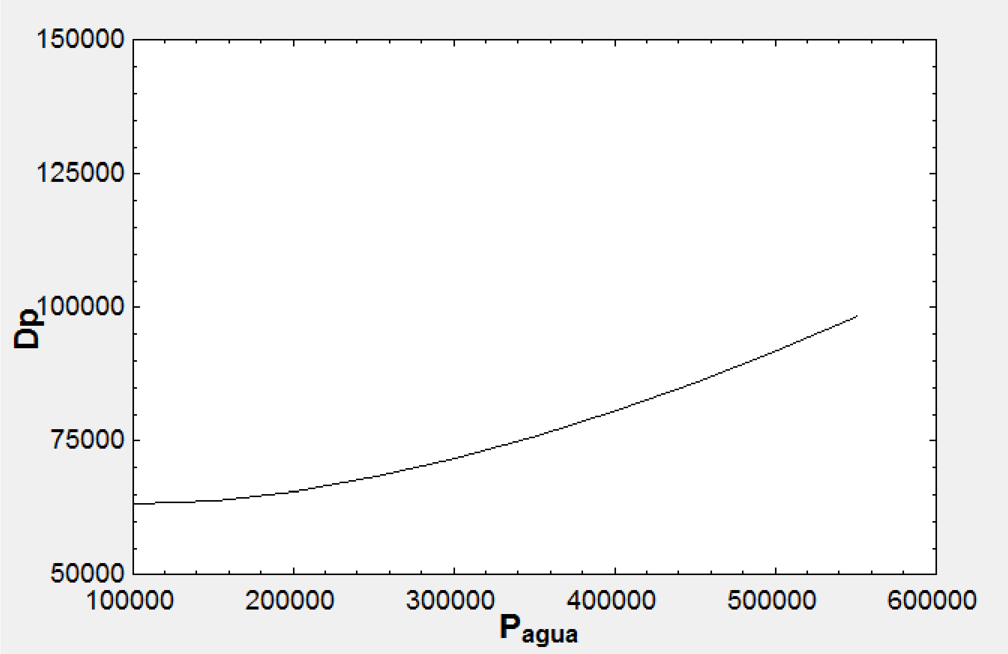
$$\dot{Q} = V\,\frac{\pi D^2}{4} = 2,11*\left(\frac{\pi\left(1x10^{-3}\right)^2}{4}\right) = 1,66x10^{-6}\, m^3/s$$

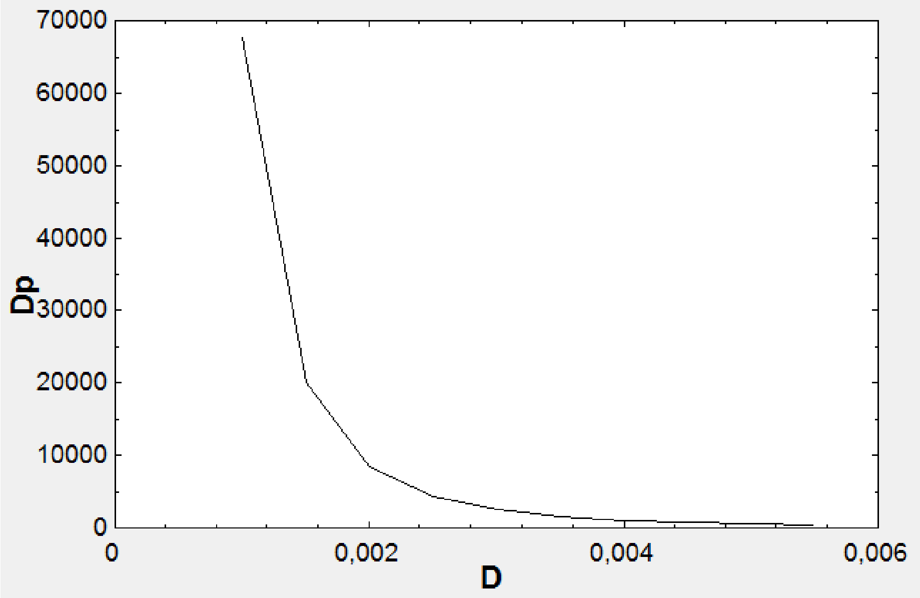
$$\Delta p = \frac{128\mu l \dot{Q}}{\pi D^4} = \frac{128*\left(1,002x10^{-3}\right)\left(1\right)\left(1,66x10^{-6}\right)}{\pi\left(1x10^{-3}\right)^4} = 6,76x10^4\,\frac{N}{m^2}$$

$$\Delta p = 6,76x10^4\,\frac{N}{m^2} = 6,76x10^4\,Pa = 67,6kPa$$

Exercício 01

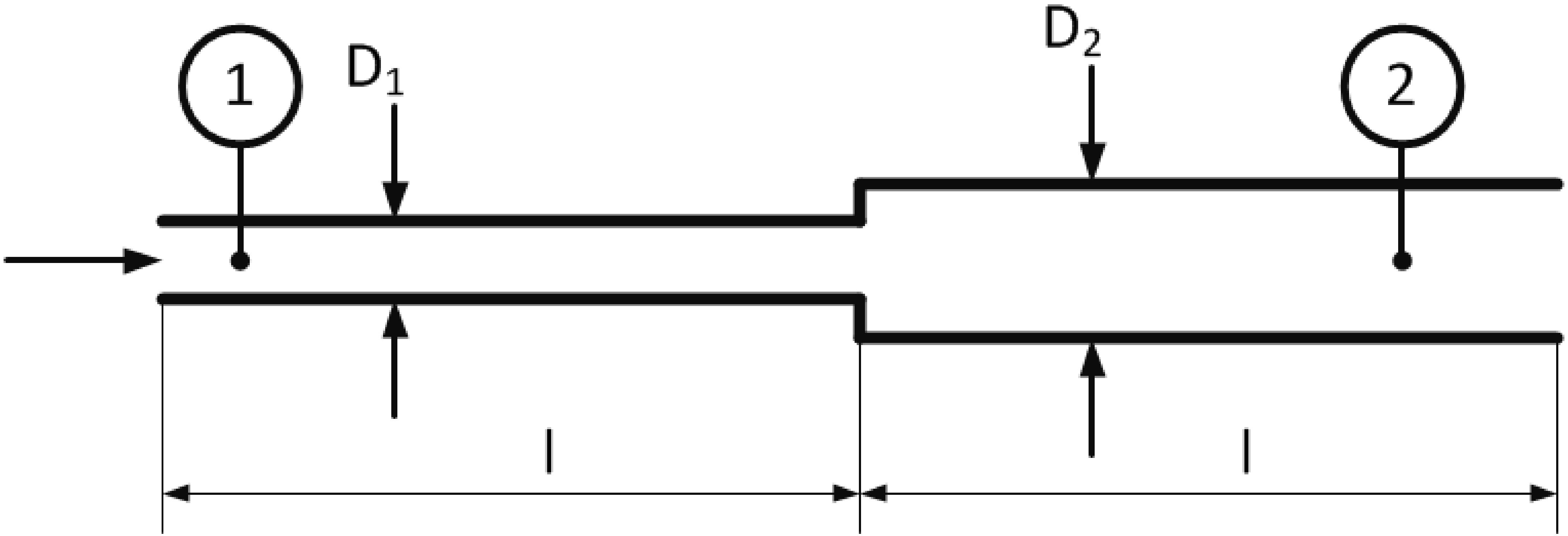






Exercício 02

Um fluido escoa em dois tubos horizontais de igual comprimento que conectados forma uma tubulação de comprimento 2l. Pode-se considerar que o escoamento é laminar e plenamente desenvolvido. A perda de pressão no primeiro trecho é 1,24 vezes maior que no segundo trecho. Se o diâmetro do primeiro trecho é D, determine o diâmetro do segundo trecho.



Exercício 02

Realizando o balanço de massa entre os pontos 1 e 2:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \Rightarrow \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2$$

Fazendo a hipótese de fluido incompressível e que variações da viscosidade são desprezíveis:

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \Rightarrow \dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 \qquad \rho_1 = \rho_2 \qquad \mu_1 = \mu_2$$

Sendo escoamento laminar plenamente desenvolvido:

$$\dot{Q} = \frac{\pi D^4 \Delta p}{128 \mu l} \Rightarrow \frac{\pi D_1^4 \Delta p_1}{128 \mu_1 l} = \frac{\pi D_2^4 \Delta p_2}{128 \mu_2 l} \quad \Longrightarrow \quad D^4 \Delta p_1 = D_2^4 \Delta p_2 \Rightarrow D_2 = D \left(\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} \right)^{1/4}$$

Exercício 02

Como: $\Delta p_1 = 1,24 \Delta p_2$

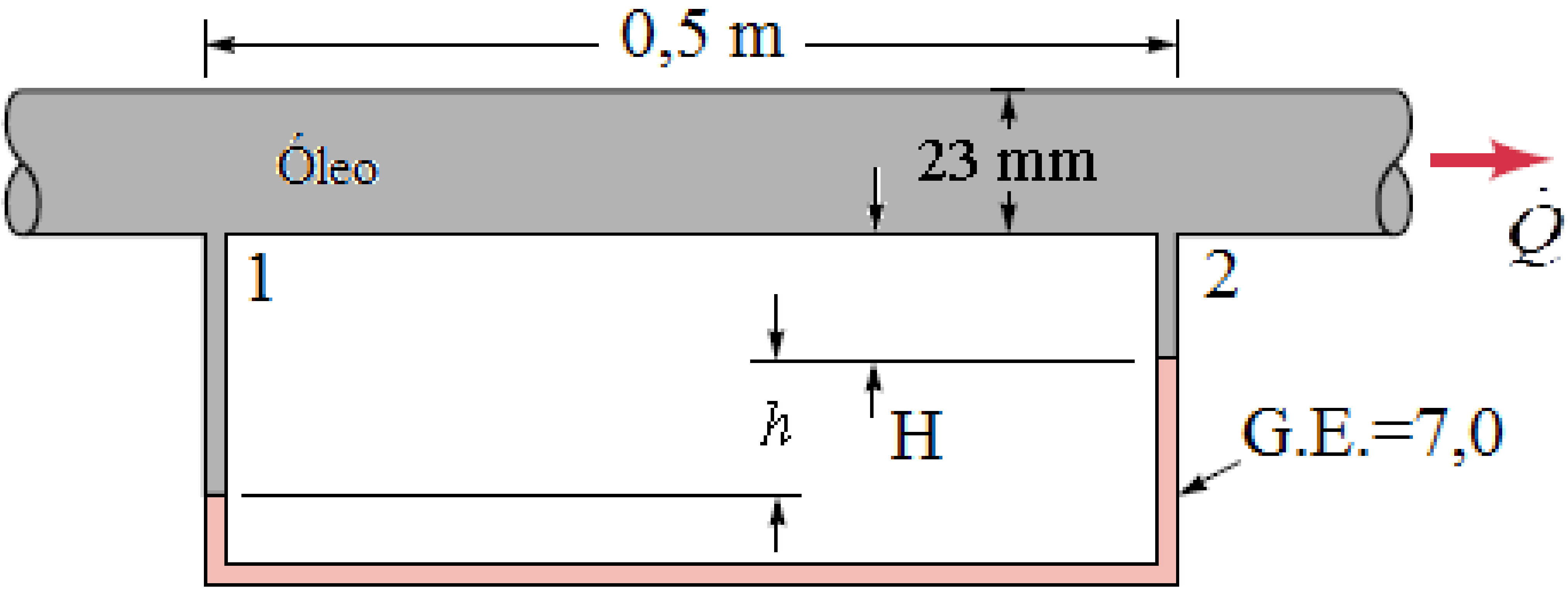
$$D_2 = D\left(\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2}\right)^{1/4}$$

$$D_2 = D\left(1,24\right)^{1/4}$$

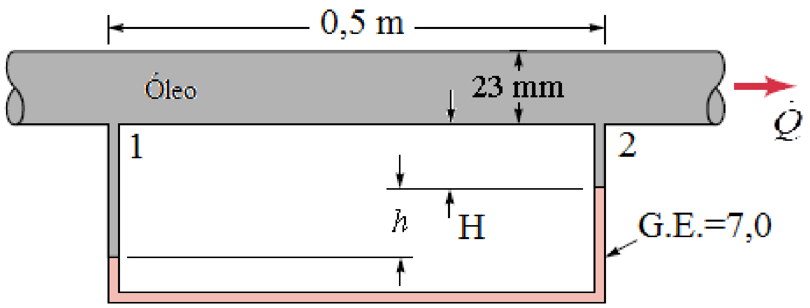
$$D_2 = 1,055D$$

Exercício 03

Óleo (peso específica=8.900 N/m³, viscosidade=0,10 N.s/m²) escoa em um tubo horizontal de diâmetro igual a 23 mm. Um manômetro em U é usado para medir a pressão como mostra a figura abaixo. Determine a faixa de valores de h para a condição de escoamento laminar



Exercício 03



$h_{mínimo}$=0 (sem escoamento)

$h_{máximo}$ → Re=2100 (escoamento laminar)

Realizando o equilíbrio de forças no manômetro em U temos:

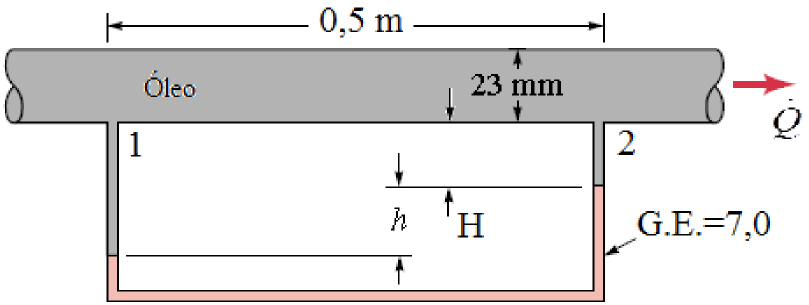
$$p_1 + \gamma_{óleo}(H+h) - \gamma_{manômetro}h - \gamma_{óleo}H = p_2$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\gamma_{manômetro} - \gamma_{óleo})h$$

Sendo escoamento laminar:

$$\Delta p = \frac{128\mu l\dot{Q}}{\pi D^4}$$

Exercício 03



Como:

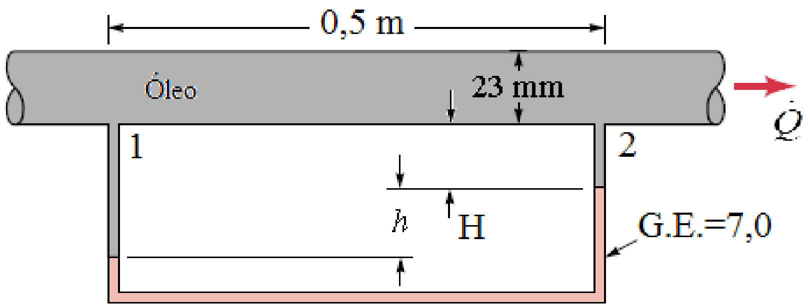
$$\dot{Q} = VA = V\frac{\pi D^2}{4}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_{óleo} V D}{\mu_{óleo}} = 2.100 \Rightarrow V = \frac{2.100\,\mu_{óleo}}{\rho_{óleo} D} = \frac{2.100 * 0{,}10}{\left(\frac{8.900}{9{,}81}\right) * 23x10^{-3}} = 10{,}06\, m/s$$

$$\dot{Q} = V\frac{\pi D^2}{4} = 10{,}06 * \frac{\pi \left(23x10^{-3}\right)^2}{4} = 0{,}0042\, m^3/s$$

$$\Delta p = \frac{128\,\mu_{óleo}\, l\, \dot{Q}}{\pi D^4} = \frac{128 * 0{,}10 * 0{,}50 * 0{,}0042}{\pi\left(23x10^{-3}\right)^4} = 30575\, N/m^2$$

Exercício 03



Como:

$$\Delta p = \left(\gamma_{manômetro} - \gamma_{óleo}\right) h$$

$$G.E = \frac{\gamma_{fluido}}{\gamma_{água}} \Rightarrow \gamma_{manômetro} = 7 * \gamma_{água} = 7 * \rho_{água} * g$$

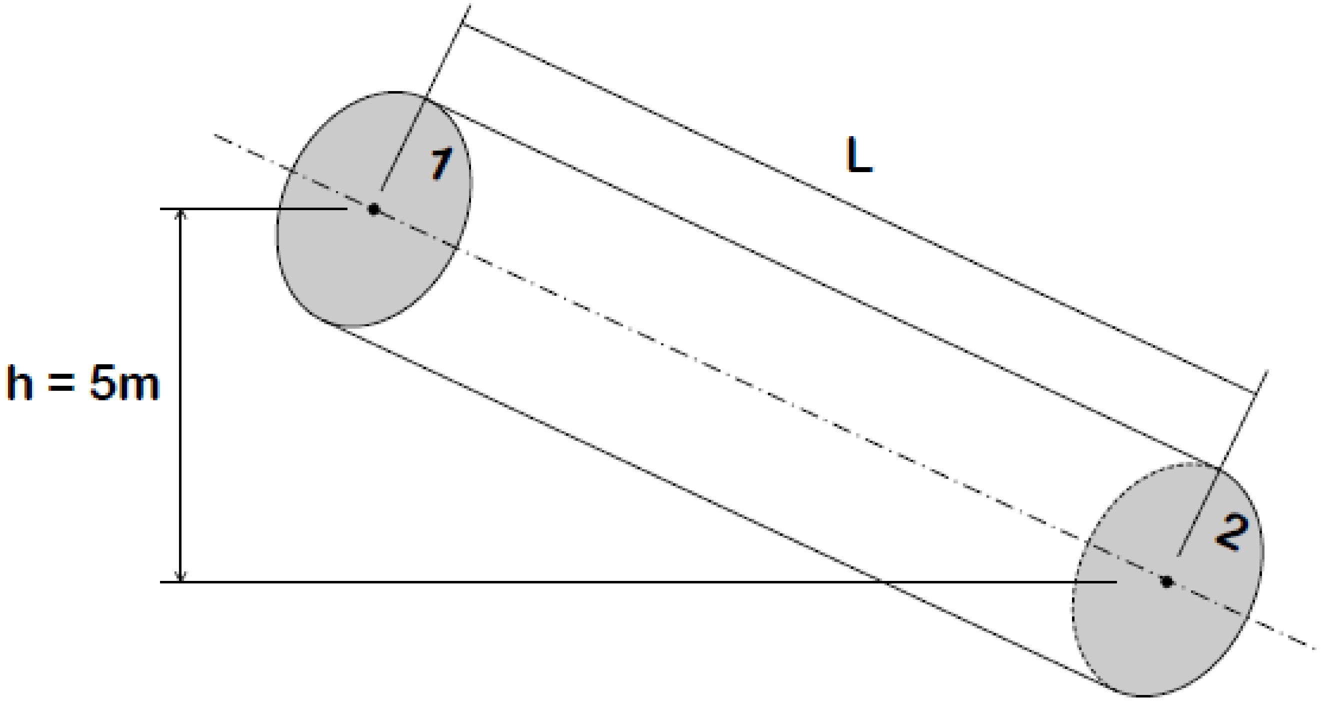
$$\gamma_{manômetro} = 7 * 1000 * 9,81 = 68670\ N/m^3$$

$$h = \frac{\Delta p}{\left(\gamma_{manômetro} - \gamma_{óleo}\right)} = \frac{30575}{(68670 - 8900)} = 0,51m$$

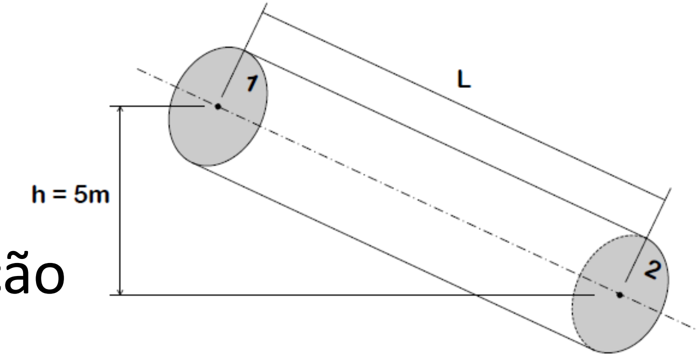
$$\therefore 0 \leq h \leq 0,51m$$

Exercício 04

No sistema representado na figura abaixo, o fluido escoa em velocidade média de 0,5 m/s em sentido desconhecido, a ser determinado. A pressão na seção 1 é de 200 kPa e em 2 de 300 kPa. Dados: diâmetro do tubo, D=10 mm; peso específico do fluido, γ=8.000 N/m^3; viscosidade dinâmica, μ=0,04 kg/(m.s). Pede-se: (a) o sentido do escoamento, (b) a perda de carga entre as seções 1 e 2 e (c) o comprimento do trecho de tubo L



Exercício 04



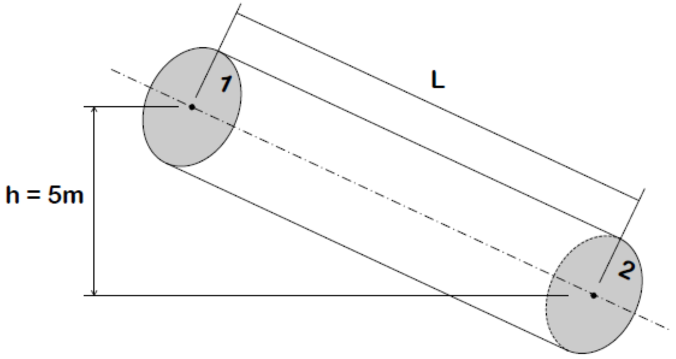
(a) o sentido do escoamento e perda de carga ao longo da tubulação

Aplicando a equação de Bernoulli para as seções 1 e2 temos:

$$H_1 = \frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + z_1 \qquad H_2 = \frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + z_2$$

$$\left.\begin{array}{l} Re = \dfrac{\rho V D}{\mu} \\[2ex] \rho = \dfrac{\gamma}{g} = \dfrac{8.000}{10} = 800\,kg/m^3 \end{array}\right\} \quad Re = \frac{800 \times 0{,}5 \times 10x10^{-3}}{0{,}04} = 100 < 2100 \text{ (laminar)}$$

Exercício 04



(a) o sentido do escoamento

$$H_2 - H_1 = \left[\frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + z_2\right] - \left[\frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + z_1\right]$$

$\alpha_1 e \alpha_2 = \text{coeficientes de turbulência}$

$V_1 = V_2 \; e \; \alpha_1 = \alpha_2 \; e \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$

$$H_2 - H_1 = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + (z_2 - z_1) = \frac{300.000 - 200.000}{8.000} - 5 = 7{,}5 \; m > 0$$

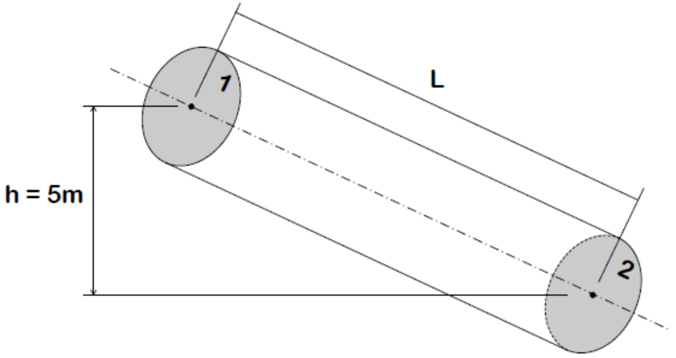
$H_2 - H_1 > 0 \Rightarrow H_2 > H_1 \Rightarrow \text{Escoamento é no sentido de 2 para 1}$

(b) perda de carga ao longo da tubulação

$$h_L = H_2 - H_1 = 7{,}5 \; m$$

Exercício 04

(c) Comprimento do trecho de tubo



$$Re = \frac{800 \times 0{,}5 \times 10x10^{-3}}{0{,}04} = 100 < 2100 \text{ (laminar)}$$

$$h_L = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$$

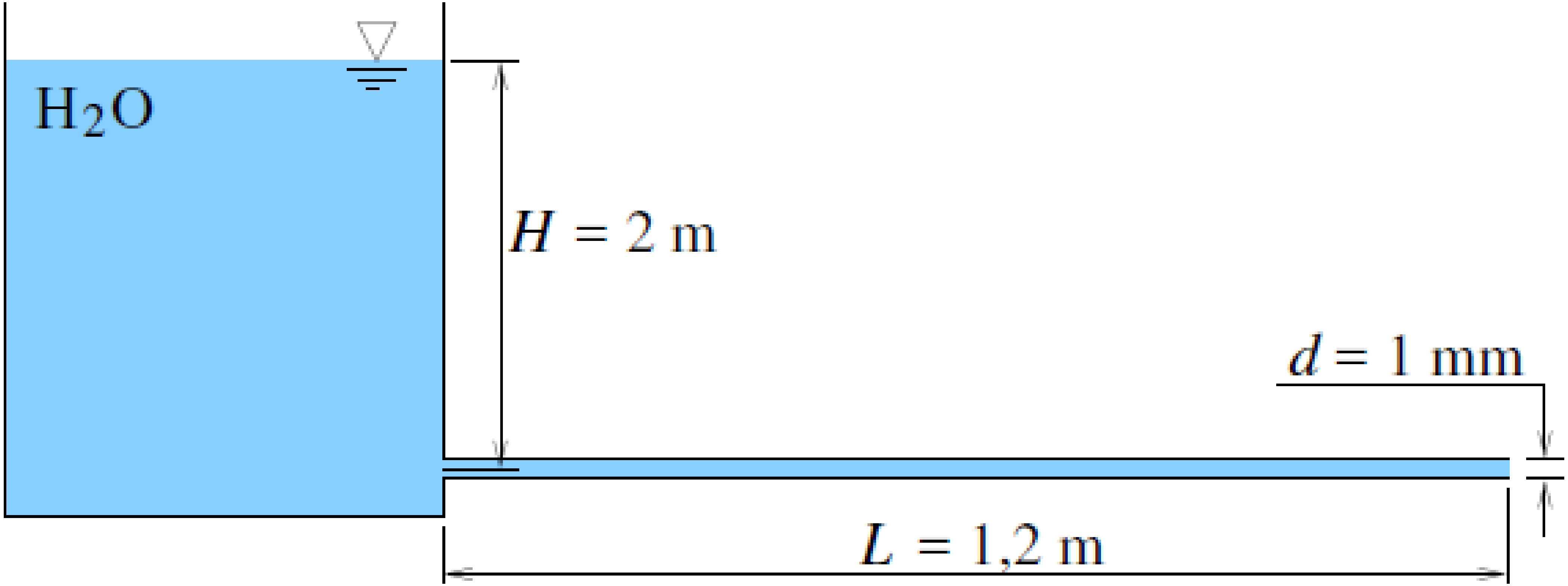
$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{100} = 0{,}64$$

$$L = \frac{2gDh_L}{fV^2} = \frac{2 \times 10 \times 10x10^{-3} \times 7{,}5}{0{,}64 \times (0{,}5)^2}$$

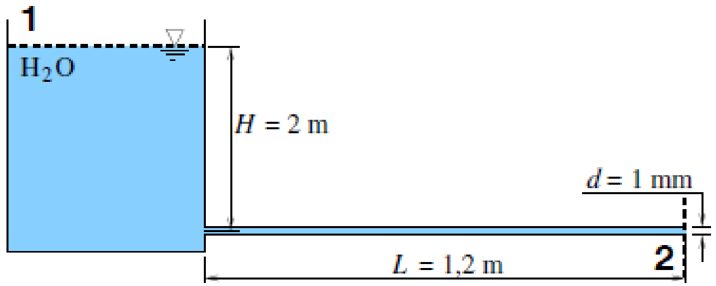
$$L = 9{,}375\ m$$

Exercício 04

Um tubo horizontal de pequeno diâmetro,(figura abaixo) é conectado a um reservatório. Se 6.600 mm^3 são capturados a cada 10s, estime a viscosidade cinemática da água nestas condições.



Exercício 04



Cálculo da viscosidade cinemática

$$Re = \frac{VD}{\upsilon} \Rightarrow \upsilon = \frac{VD}{Re}$$

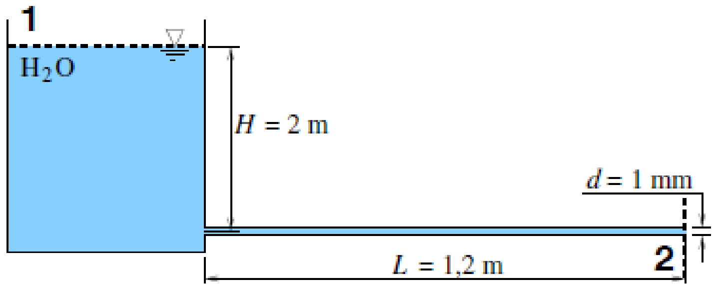
$$\dot{Q} = VA = \frac{\forall}{\Delta t}$$

$$V = \frac{\forall}{A\Delta t} = \frac{6.600}{\frac{\pi}{4}(1)^2 \times 10} = 840{,}3\,mm/s = 0{,}8403\,mm/s$$

Como avaliar Re? $\longrightarrow$ Avaliação do regime de escoamento

Hipótese: regime laminar ou turbulento?

Exercício 04



1ª hipótese: regime laminar

$$f = \frac{64}{Re}$$

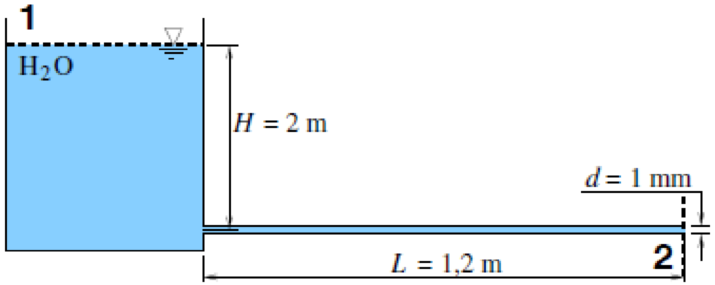
$$h_L = H_1 - H_2 = f\,\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$$

$$H_1 = \frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + z_1 \qquad H_2 = \frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + z_2$$

Regime laminar: $\alpha_1 = \alpha_2 = 2$

$$H_1 - H_2 = \left[\frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + z_1\right] - \left[\frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + z_2\right] = f\,\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$$

Exercício 04



$$H_1 - H_2 = \left[\frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + z_1\right] - \left[\frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + z_2\right] = f\,\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$$

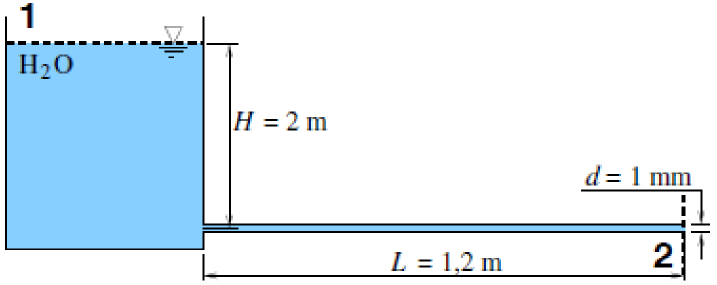
$$V_1 = 0 \; e \; p_1 = p_2 = p_{atm}$$

$$H_1 - H_2 = z_1 - z_2 - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = f\,\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$$

$$H - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = f\,\frac{L}{D}\frac{V_2^2}{2g}$$

$$f = \frac{2gD\left[H - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g}\right]}{L V_2^2}$$

Exercício 04



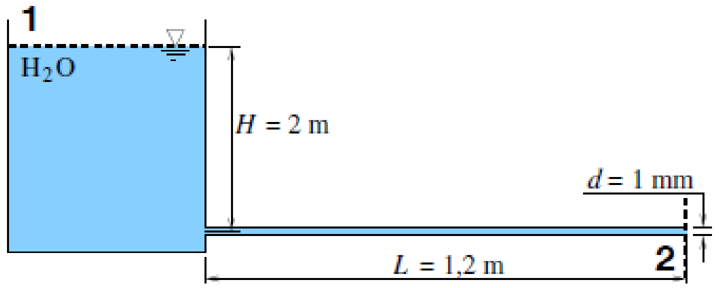
$$f = \frac{2gD\left[H - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g}\right]}{LV_2^2}$$

$$f = \frac{2 \times 10 \times 1x10^{-3}\left[2 - \frac{2 \times (0,8403)^2}{2 \times 10}\right]}{1,2 \times (0,8403)^2} = 0,046$$

$$f = \frac{64}{Re} \Rightarrow 0,046 = \frac{64}{Re} \Rightarrow Re = 1391 < 2100 \text{ (laminar)(hipótese comprovada!)}$$

$$\upsilon = \frac{VD}{Re} = \frac{0,8403 \times 1x10^{-3}}{1391} = 6,04x10^{-7}\ m^2/s$$

Exercício 04

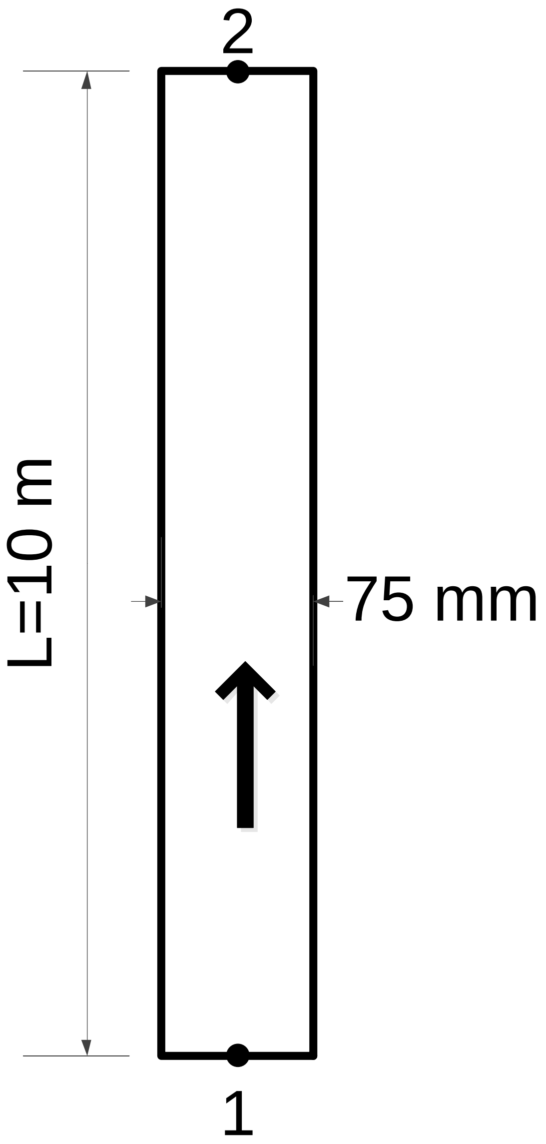


Verificação do comprimento de entrada: condição de escoamento laminar plenamente desenvolvido

$l_{entrada} = 0{,}06 D Re_D = 0{,}06 \times 1x10^{-3} \times 1391$ =0,084m (7% do comprimento total : OK!)

Exercício 05

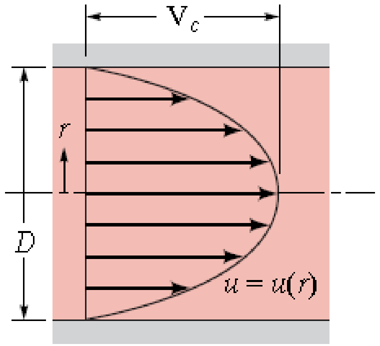
Glicerina a 20°C tem escoamento ascendente no tubo mostrado na figura ao lado. A velocidade na linha de centro é de 1,0 m/s. Nestas condições, Determine a perda de carga e a queda de pressão sabendo que o comprimento do tubo é de 10 m.



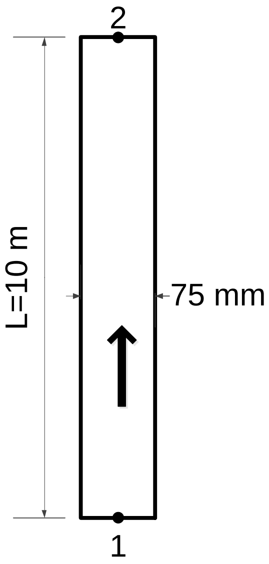
Exercício 05

Glicerina a 20°C:

- Massa específica (ρ)=1260 kg/m³
- Viscosidade dinâmica (μ)=1,5 Pa.s



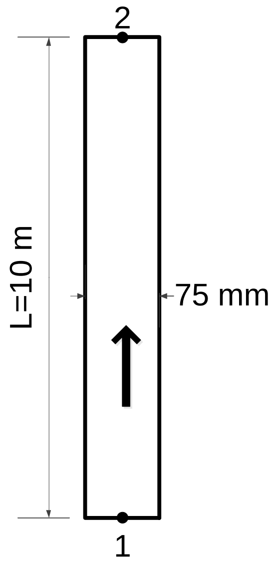
$$\bar{V} = \frac{V_c}{2} = \frac{1}{2} = 0,5\ m/s$$



Avaliação do regime de escoamento:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{1260 \times 0,5 \times 75x10^{-3}}{1,5} = 31,5 < 2100\ (laminar)$$

$$\Delta p = \frac{32\mu L V}{D^2} + \gamma L sen\theta$$



Exercício 05

$$\Delta p = \frac{32\mu LV}{D^2} + \gamma L sen\theta$$

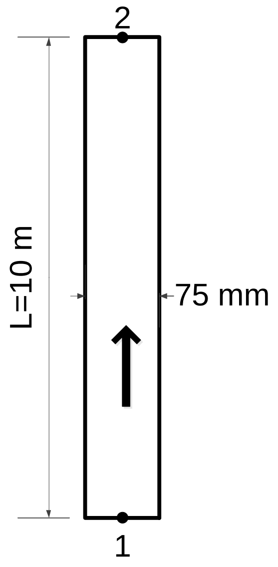
$$\Delta p = \frac{32 \times 1{,}5 \times 10 \times 0{,}5}{(75x10^{-3})^2} + (9{,}8 \times 1260 \times 10 \times sen(90°))$$

$$\Delta p = 166147 \text{ Pa} = 166{,}147 \text{ kPa}$$

$$\left[\frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + z_1\right] = \left[\frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + z_2\right] + h_L$$

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2\ ; \alpha_1 = \alpha_2\ ; \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma\ ;\ z_1 = 0 \text{ (referência)};\ z_2 = 10\ m$$

Exercício 05



$$\left[\frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + z_1\right] = \left[\frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + z_2\right] + h_L$$

$\bar{V}_1 = \bar{V}_2$; $\alpha_1 = \alpha_2$; $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$; $z_1 = 0$ (referência); $z_2 = 10\ m$

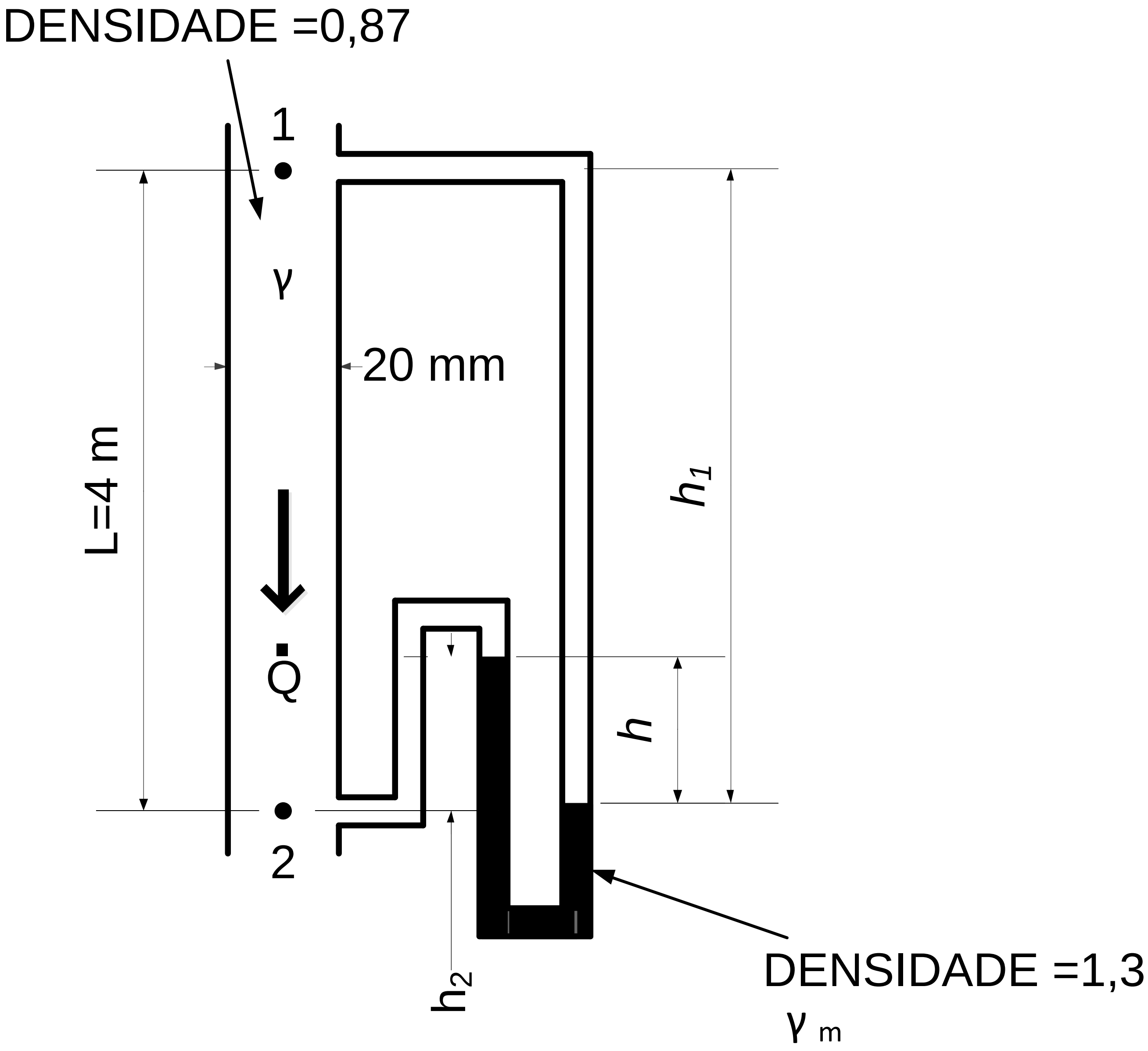
$$\frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} = L + h_L$$

$$h_L = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} - L$$

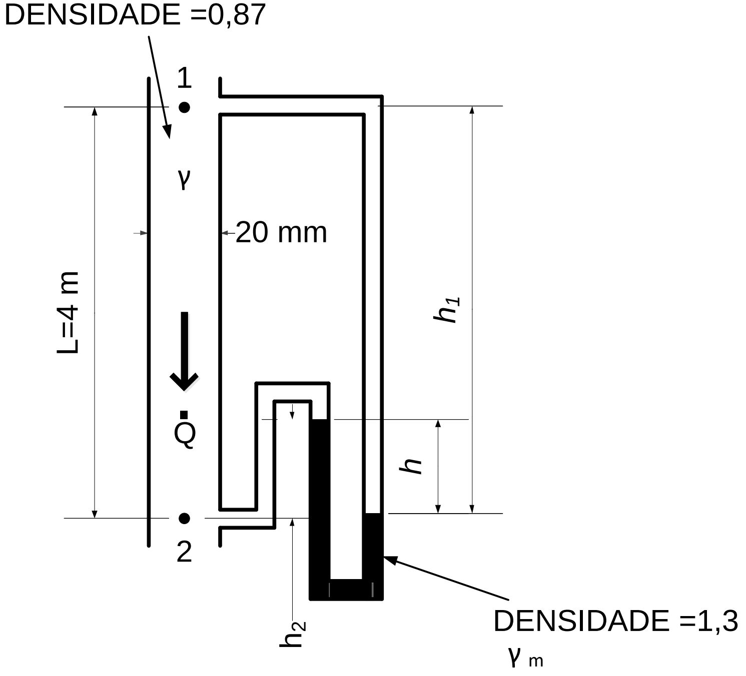
$$h_L = \frac{166147}{9{,}8 \times 1260} - 10 = 3{,}46\ m$$

Exercício 06

Óleo (SG=0,87; ν=2,2x10^{-4} m^2/s) escoa em tubo vertical mostrado na figura ao lado. A vazão do óleo é 4x10^{-4} m^3/s. Determine a leitura no manômetro (h)



Exercício 06



Analisando o manômetro:

$$p_2 = p_1 + \gamma h_1 - \gamma_m h + \gamma h_2$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \gamma_m h - \gamma(h_1 + h_2)$$

Mas:

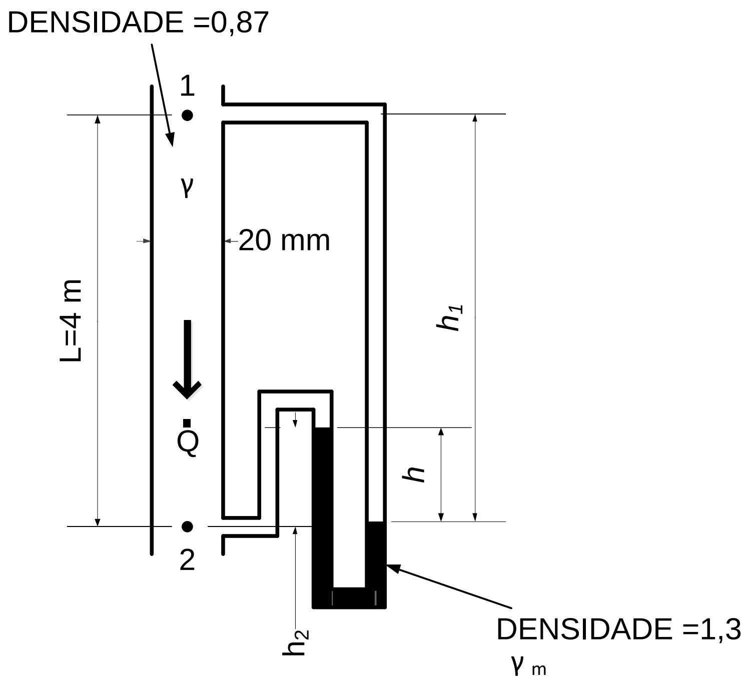
$$L - h_2 = h_1 - h \Rightarrow L + h = h_1 + h_2$$

Logo:

$$\Delta p = \gamma_m h - \gamma(L + h)$$

$$h = \frac{\Delta p + \gamma L}{\gamma_m - \gamma} \qquad (1)$$

Exercício 06



Cálculo da perda de pressão

Verificação do regime de escoamento:

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

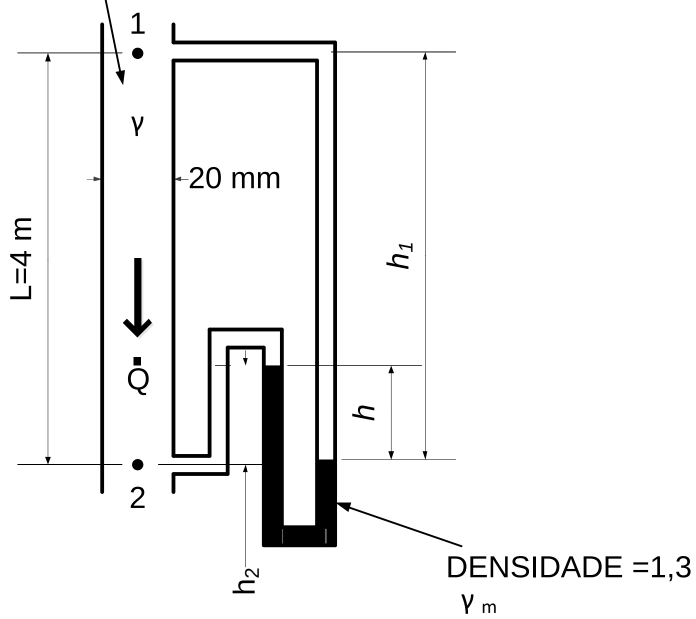
$$\dot{Q} = VA \Rightarrow V = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{4{,}0x10^{-4}}{\frac{\pi}{4}(20x10^{-3})^2} = 1{,}27\ m/s$$

$$Re = \frac{1{,}27 \times 20x10^{-3}}{2{,}2x10^{-4}} = 115{,}5 < 2100\ (\text{laminar})$$

$$\dot{Q} = \frac{\pi(\Delta p + \gamma L)D^4}{128\mu L}$$

Exercício 06

Cálculo da perda de pressão



$$\dot{Q} = \frac{\pi(\Delta p + \gamma L)D^4}{128\mu L}$$

$$\Delta p = \frac{32\mu LV}{D^2} - \gamma L sen\theta$$

$$\gamma = SG\gamma_{água} = SG\rho_{água}g = 0{,}87 \times 1000 \times 9{,}8 = 8526\ N/m^3$$

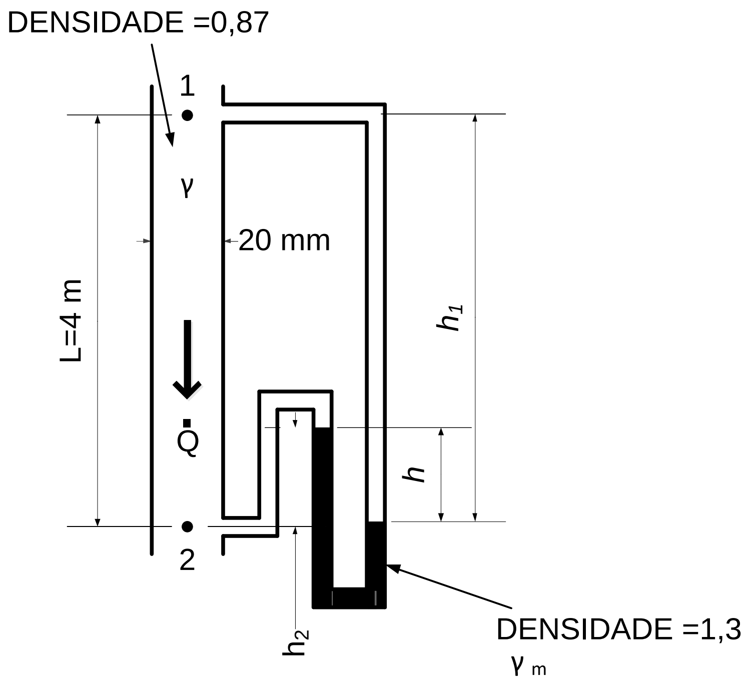
$$\mu = \upsilon\rho = \upsilon SG\rho_{água} = 2{,}2x10^{-4} \times 0{,}87 \times 1000 = 0{,}1914\ Pa.s$$

$$\Delta p = \frac{32 \times 0{,}1914 \times 4 \times 1{,}27}{(20x10^{-3})^2} + 8526 \times 4 \times sen(90°)$$

$$\Delta p = 77785 - 34104 = 43681\ Pa$$

Exercício 06

Cálculo da perda de pressão



Pela equação (1):

$$h = \frac{\Delta p + \gamma L}{\gamma_m - \gamma} = \frac{43681 + (1000 \times 9{,}8 \times 4)}{(1{,}3 \times 1000 \times 9{,}8) - 8526}$$

$$h = 19{,}7\ m$$