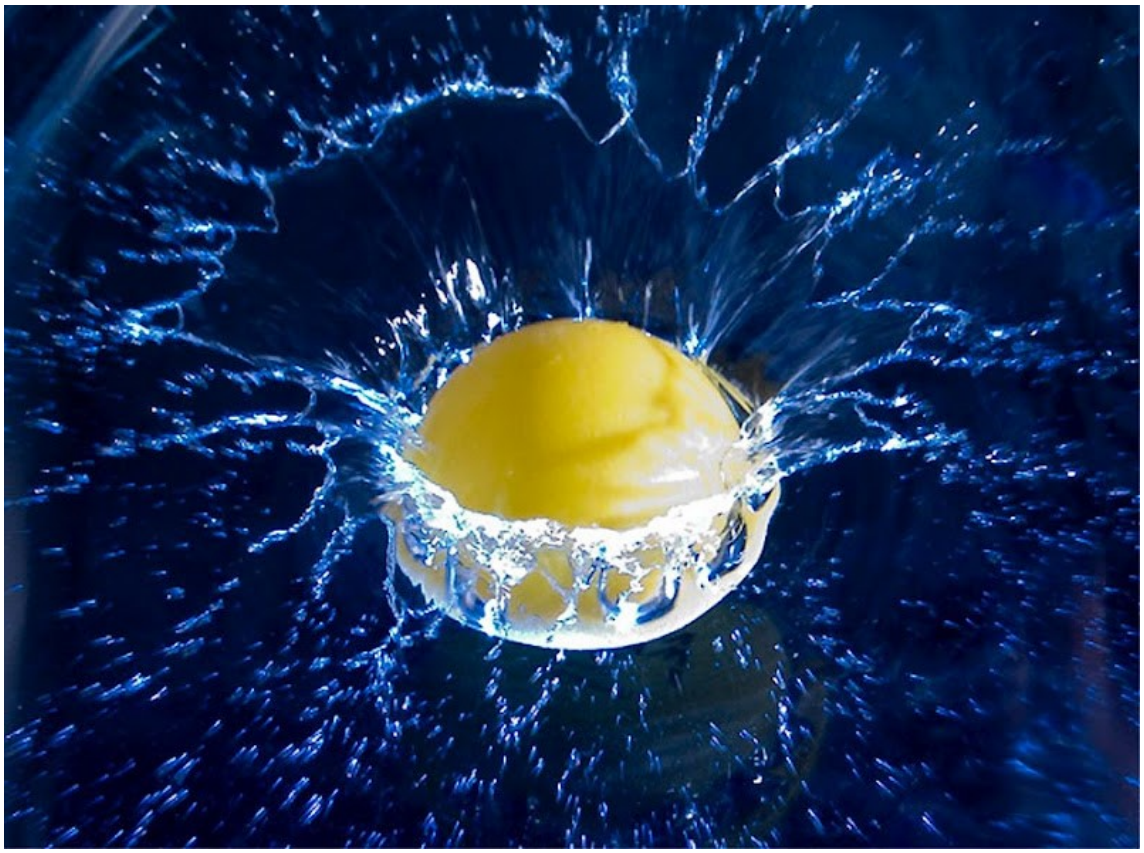
INSTITUTO FEDERAL DA BAHIA – IFBA

Mecânica dos Fluidos – ENG 520

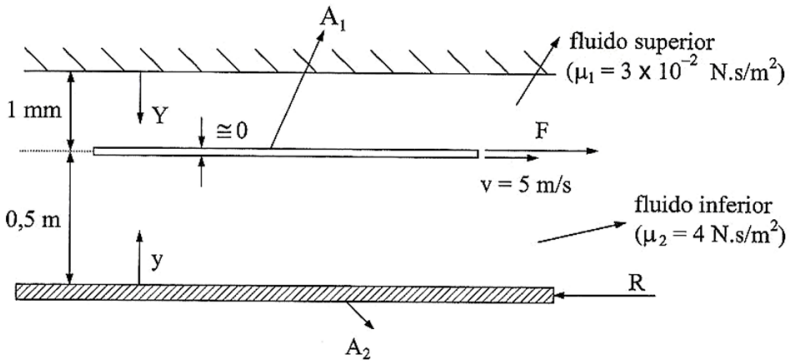
Prof. Édler Lins de Albuquerque

Lista de Exercícios



Parte 1 - Aplicações da Lei de Viscosidade de Newton e Introdução aos Escoamentos de Fluidos

Questão 1.1 Na figura abaixo, existem duas placas. A situada mais abaixo se encontra em repouso devido a ação de uma força R. A outra placa, que possui uma espessura desprezível, é impulsionada por uma força F de 500 N e se desloca na interface de dois fluidos newtonianos com uma velocidade constante v igual a 5 m/s. Na parte superior desta última placa a espessura de fluido é de 1 mm e o perfil de velocidades pode ser considerado linear. As áreas A_1 e A_2 são iguais a 2,5 m². Na parte inferior da mesma, o perfil de velocidades é dado por u(y) = *ay² + by + c*. Pede-se:

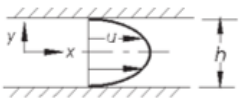


a) Determinar a tensão de cisalhamento na face inferior da placa em movimento.
b) Determinar a expressão do perfil de velocidades no fluido situado inferior à placa em movimento (u = f(y)).
c) Determinar o valor da força R que mantém a placa da base em repouso.

Resp.: a) 50N; b) $u(y) = 5\,y^2 + 7{,}5\,y$; c) R = 75N

Questão 1.2 Entre os extremos de duas placas, ocorre um escoamento laminar de um fluido newtoniano (água). O perfil de velocidades entre as placas é dado pela expressão abaixo:

$$\frac{u}{u_{máx}} = 1 - \left(\frac{2y}{h}\right)^2$$

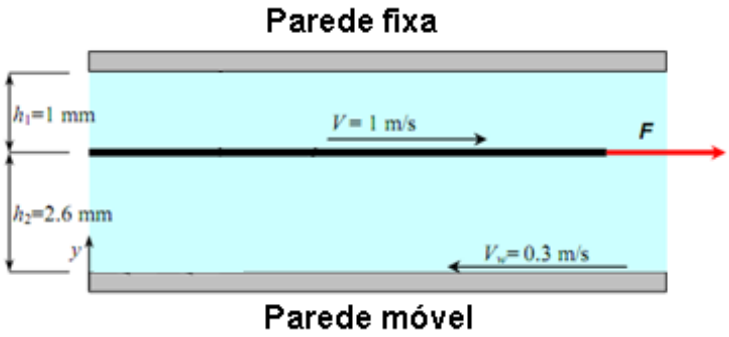


$$T = 15°C,\ u_{máx} = 0{,}05\ \text{m/s},\ h = 5\ \text{mm, água.}$$

De posse dos dados fornecidos, determinar a força sobre a seção da placa inferior, cujo valor de área corresponde a A = 0,3 m².

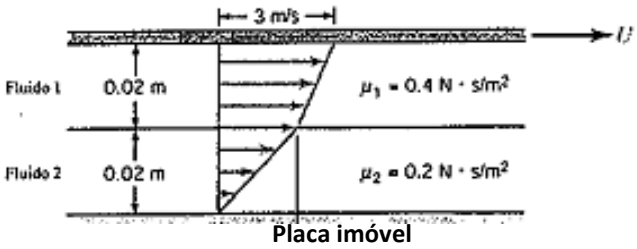
Resp.: F = 1,37 x 10⁻² N

Uma chapa fina de dimensões 20 cm x 20 cm é puxada horizontalmente com velocidade de 1 m/s sobre uma camada de óleo de 3,6 mm de espessura entre duas paredes planas, uma estacionária e a outra movendo-se com velocidade constante de 0,3 m/s, como mostrado. A viscosidade dinâmica do óleo é de 0,027 Pa s. Considerando que a velocidade em cada camada de óleo varie linearmente; i) Trace o perfil de velocidade na tubulação; ii) Determine os pontos em que a velocidade do óleo seja nula e iii) calcule força F que precisa ser aplicada sobre a chapa para manter o movimento.



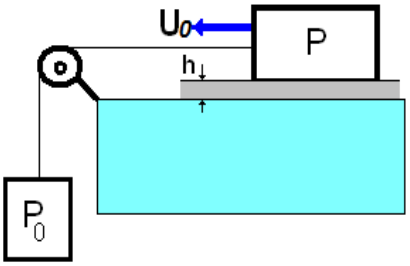
Resp.: ii) y = 0,6 mm e y = 3,6 mm; iii) F = 1,62 N

Questão 1.3 Considere o escoamento mostrado na figura abaixo. Nele duas camadas de fluidos são arrastadas pelo movimento da placa superior, com velocidade U = 3 m/s. A placa inferior permanece imóvel. O fluido do topo exerce uma tensão de cisalhamento na placa superior e o fluido do fundo exerce uma tensão de cisalhamento na placa inferior. Sabendo-se que a razão entre o valor da tensão de cisalhamento na superfície da placa superior e aquele referente à tensão de cisalhamento que atua na placa inferior é igual a 2, determinar: a. O valor da velocidade dos fluidos na interface entre as camadas de fluido; b. a taxa de deformação sofrida pelo fluido do topo e c. a força viscosa exercida pela placa imóvel sobre o fluido do fundo (considerar uma área de contato do fluido igual 0,5 m² no topo e no fundo).



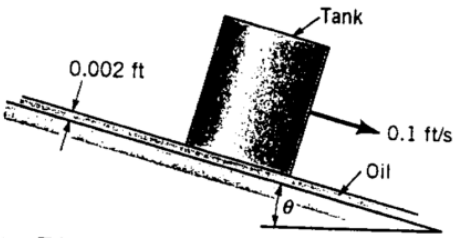
Resp.:a. v = 1,5 m s^{-1}; b.$(du/dy)_{topo}$ = 75 s^{-1}; c. F = 7,5 N.

Questão 1.4 Um bloco de peso P está sendo puxado sobre uma mesa por um outro peso P_0, como mostra a Figura a seguir. (i) Encontrar uma fórmula algébrica para a velocidade constante U_0 do bloco se ele desliza sobre um filme de óleo de espessura h e viscosidade dinâmica μ. Uma área A inferior do bloco está em contato com o óleo. (ii) Resolva o problema i na forma transitória, ou seja, a velocidade U = U(t), onde o movimento do bloco começa a partir do repouso e acelera até uma velocidade constante final.



Resp.: i) $U_0 = P_0\, h /(\mu A)$ ii) $U(t) = U_0\, [1 – \exp\{- (\mu\, t\, Ag)/[h\, (P_0 + P)]\}$

Um corpo cilíndrico de 40 lbf e 0,8 ft de diâmetro desce o plano inclinado indicado na figura abaixo. Sabendo-se que na parte inferior há uma película de um fluido newtoniano cuja espessura é constante e igual a 0,002 ft. Sabendo-se que a viscosidade vale 0,2 lbf s/ft2 e que o perfil de velocidades é linear. Determine o ângulo formado pelo plano inclinado e a horizontal.



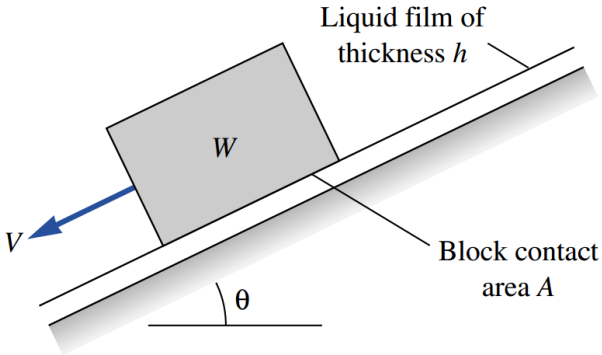
Resp.: $\theta = 7{,}22^{o}$.

Questão 1.5 Um bloco de peso W desliza para baixo em um plano inclinado lubrificado por um filme fino de óleo, como mostrado abaixo.

a) Deduza uma expressão para a velocidade terminal V (com aceleração nula) do bloco em função de h (espessura do filme de óleo), de A área de contato do bloco com o filme, do peso do bloco W, do ângulo θ e da viscosidade dinâmica do óleo μ.

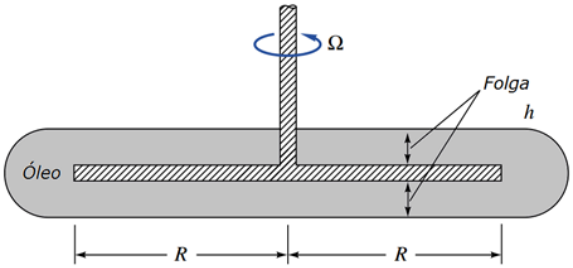
b) Refaça a letra a) para a velocidade instantânea do bloco em descida em função do tempo, problema dinâmico. Suponha que o bloco parte com velocidade nula.

c) Determine a velocidade terminal do bloco se a massa do bloco é 6 kg, A = 35 cm², θ = 15º, h = 1 mm e μ igual a 0,29 kg/(m s).



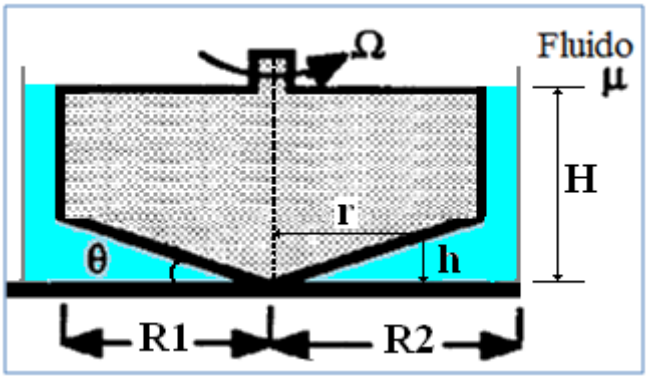
Resp.: a) $V=Wh\,sen(\theta)/(\mu A)$ b) $V(t)=Wh\,sen(\theta)/(\mu A) \times \{1 - exp[-\mu At/(mh)]\}$ c) $V = 0{,}0152\ m\ s^{-1}$.

Questão 1.6 O dispositivo da figura a seguir é chamado de viscosímetro de disco rotativo. Nele um disco de raio R gira a uma velocidade angular Ω no interior de um reservatório em forma de disco cheio com óleo de viscosidade dinâmica μ. Desprezando a tensão de cisalhamento nas bordas externas do disco, deduza uma fórmula para cálculo do torque viscoso (T) no disco em função das demais variáveis (Ω, R, μ e h). Determine a viscosidade dinâmica do óleo quando Ω for 900 rpm, R for igual a 5 cm, h igual a 1 mm e o torque viscoso for 0,537 N·m.



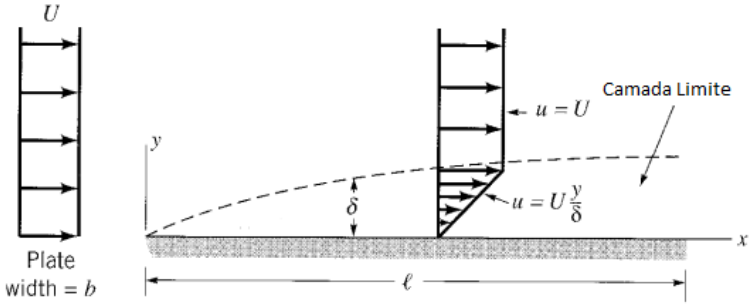
Resp.: $T = \pi\mu\Omega R^4/h$; μ = 0,290 Pa x s.

Questão 1.7 Na figura é mostrado um tipo de viscosímetro. O ângulo θ é muito pequeno, de forma que Sen(θ) $\approx \theta$, e o espaço vazio é preenchido com o líquido testado. Mede-se o torque M necessário para girar o viscosímetro a uma velocidade angular Ω. Por meio de suposições razoáveis, deduzir uma expressão para a viscosidade μ do fluido em função de M, R_1, R_2, H, Ω e θ.



Resp.: $\mu = 3\, M\, \text{sen}\theta\, (R_2-R_1)/[2\pi\Omega\, [3\, \text{sen}\theta\, R_1^3\, (H - R_1\, \text{tg}\theta)+R_1^3(R_2-R_1)]$

Questão 1.8 Um fluido viscoso escoa sobre uma placa plana que apresenta um bordo de ataque afiado, como mostrado na figura. Observa-se o desenvolvimento de uma camada limite de espessura δ, onde a velocidade do fluido varia de zero (na placa) até a velocidade do escoamento ao longe, U. Desta forma, a velocidade é dada por: u = U (y/δ). A espessura da camada limite aumenta com a distância x, conforme a seguinte equação: $\delta = 3{,}5\ (\nu\ x/U)^{1/2}$, onde ν é a viscosidade cinemática do fluido.



i. Determinar a expressão para a força de arrasto desenvolvida na placa considerando que o comprimento é *L* e a largura da placa vale b. Expresse seus resultados em função de *L*, b, ν e ρ, onde ρ é a massa específica do fluido.

ii. Determinar uma expressão para o N. de Reynolds na camada limite em função de x, ν, U, y. DICA: Usar x como comprimento característico do fenômeno. Determinar o valor de x a partir do qual se tem escoamento turbulento para y = δ, se $Re_{crítico}$ for igual a 2×10^5.

iii. Indique que tipo de suposições foram empregadas para modelar este escoamento e avalie a validade das mesmas. É razoável supor este comportamento para uma camada limite? Justifique.
Obs.: Indique as considerações necessárias para a resolução.

Resp.: i) $F_a = \rho\, \nu\, L\, b\, U/\delta$; *ii)* $Re = U\, y/(3{,}5\, \nu) \times (U\, x/\nu)^{1/2}$.

Questão 1.9 No escoamento de um fluido em um tubo de seção reta circular liso e raio igual a 20 cm, uma aproximação para a forma da camada-limite mostrada na figura ao lado é a fórmula seguinte:

$$u(y) = U\,\mathrm{sen}\left(\frac{\pi y}{2\delta}\right), 0 \le y \le \delta$$

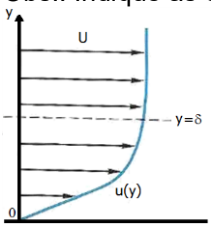
U é a velocidade da corrente longe da parede e δ a espessura da camada-limite. Se fluido for a gasolina a 20ºC e 1 atm (μ = 1,5 kg/(m s) e ρ = 1260 kg/m^3), e se U = 108 cm/s e δ = 30 mm, faça o que se pede:

i. Use a fórmula dada para calcular a tensão de cisalhamento τ_p na parede em atm;

ii. Encontre a posição na camada-limite em que τ é metade de τ_p;

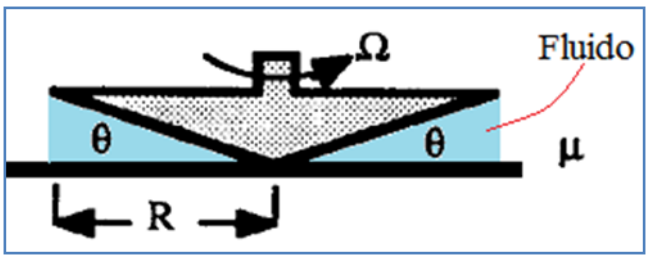
iii. Determine o número de Reynolds para este escoamento. Use δ como a dimensão característica. Discuta se as considerações efetuadas para a resolução do item i. podem ser consideradas válidas.

Obs.: Indique as considerações necessárias para a resolução.



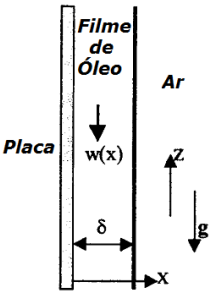
Resp.:
i) $\tau_p = \pi\,\mu\,U/(2\delta) = 84{,}8\ N\ m^{-2}$;
ii) $y = 2\delta/3$;
iii) $Re = (\rho\delta U/\mu)\ sen[\pi y/(2\delta)]$.

Questão 1.10 Na figura é mostrado um tipo de viscosímetro. O ângulo θ é muito pequeno, de forma que Sen(θ)$\approx\theta$, e o espaço vazio é preenchido com o líquido testado. Mede-se o torque M necessário para girar o cone a uma velocidade angular Ω é medido. Por meio de suposições razoáveis, deduzir uma expressão para a viscosidade μ do fluido em função de M, R, Ω e θ.



Resp.: $\mu = 3\,M\theta/(2\pi\Omega R^3)$

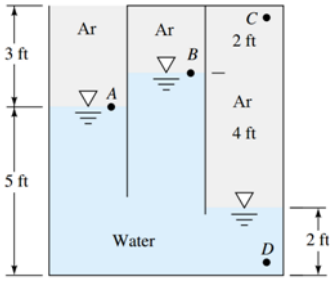
Questão 1.11 Um óleo de viscosidade μ e massa específica ρ escoa continuamente para baixo ao longo de uma placa vertical, longa e larga, como mostrado na figura. Na região mostrada, a forma do perfil de velocidade e a espessura do filme δ são independentes da distância z ao longo da placa. A velocidade vertical w torna-se função somente de x, e a resistência ao cisalhamento da atmosfera é desprezível. (i) Esboce a forma do perfil de velocidade obtido w(x) considerando as condições de contorno na placa e na superfície livre, explicando o porquê da mesma. (ii) Encontre uma expressão para a viscosidade do óleo em função de ρ, δ, $(dw/dx)_{placa}$ e da aceleração da gravidade. Obs.: Para o sistema de coordenadas, w e dw/dx são negativos. Indique as considerações necessárias para a resolução.



Resp.: $\mu = -\rho g\delta/(dw/dx)_{placa}$

Estática dos fluidos e empregos da Equação de Euler

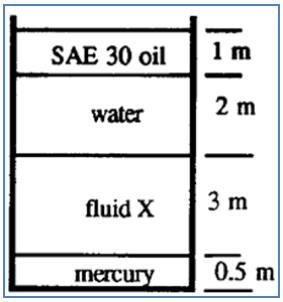
Questão 2.1 O sistema mostrado na figura ao lado está a 20ºC. Se a pressão no ponto A é de 90,973 kPa, determine as pressões no pontos B, C e D em Pa. Dados: $\gamma_{H2O} = 9{,}8 \times 10^3 N\ m^{-3}$; 1m = 3,2808 ft.



Resp.: p_B = 87985,92 Pa;
p_C = 99934,24 Pa;
p_D = 105908,4 Pa.

Questão 2.2 O sistema mostrado na figura ao lado está a 20ºC. A pressão atmosférica é de 1 atm. Um medidor de pressão indica que a pressão na interface óleo-água é 1/3 da pressão no fundo do tanque.

a) Verifique se esse medidor de pressão não apresenta defeito, ou seja, se é possível esta situação;
b) Se não houver erro no medidor, determine qual é a massa específica do fluido X e qual é a pressão no fundo do tanque.

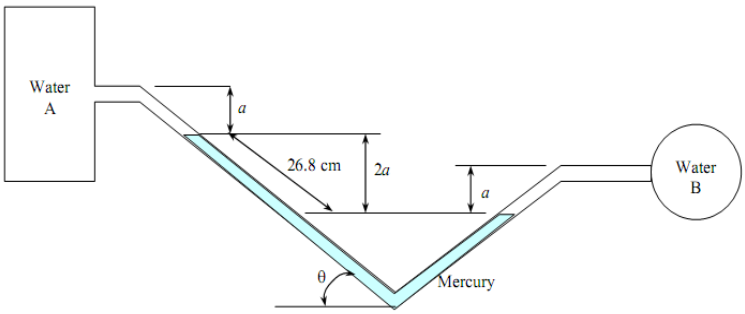


Dados: g = 9,81 m s^{-2}
ρ_{H2O} = 998 kg/m³
$\rho_{óleo\ SAE\ 30}$ = 891 kg/m³
ρ_{Hg} =13550 kg/m³

Resp.:
ρ_x =4556 kg/m³
p_{fundo} = 330,2 kPa

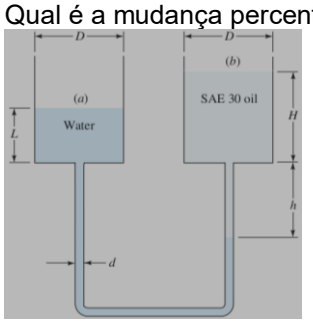
Questão 2.3 Dois tanques de água (20ºC) estão conectados entre si através de um manômetro de mercúrio com dois tubos inclinados, como mostrado. Determine:

a) A expressão para o cálculo do ângulo θ em função de a.
b) A diferença de pressão entre os tanques, se o valor de a for 12 cm.
c) A massa específica do fluido manométrico se o valor de a for de 5 cm, se o fluido nos tanques for o ar (15ºC) e a diferença de pressão entre A e B for de 500 Pa. Dentro de um recipiente com água (25ºC), esse fluido fica no fundo ou no topo do recipiente? Justifique.



Resp.: a) θ = ArcSen[2a/(26,8 cm)]; b) $p_B - p_A \cong$ 32,0 kPa; c) ρ_{fluido} = 509,7 kg m^{-3}.

Questão 2.4 Na figura abaixo, os recipientes (a) e (b) são cilíndricos e as condições são tais que pa = pb. Deduza uma fórmula para a diferença de pressão pa - pb quando a interface óleo-água à direita sobre uma distância Δh < h em duas situações limites: (i) d << D; (ii) d = 0,15 D. Qual é a mudança percentual no valor de Δp.



Resp.:

i) $p_A - p_B = \Delta h\,(\gamma_{H2O} - \gamma_{óleo})$

ii) $p_A - p_B = \Delta h\,[\gamma_{H2O}\,(1 + d^2/D^2) - \gamma_{óleo}\,(1 - d^2/D^2)]$

iii) *Δp é cerca de 39% maior*

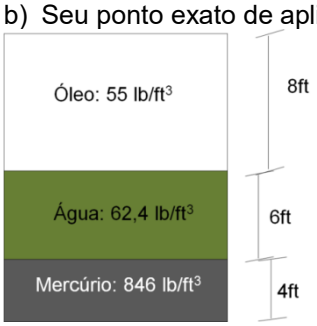
Questão 2.5 Considerando uma atmosfera adiabática, a pressão varia com o volume específico da seguinte maneira: $p\,(V_s)^k = \text{constante}$, onde p é a pressão, V_s o volume específico e k é a razão entre os calores específicos, $k = c_p/c_v$. Desenvolver uma expressão para a pressão como função da elevação, para essa atmosfera, usando o chão como referência. Dicas: Considerar o ar como um gás ideal de massa molar Mm_{ar}. Ao nível do mar, temperatura e pressão valem, respect., T_0 e p_0.

Resp.: $p = p_0\left[1 - \frac{Mm_{ar}(k-1)gz}{kRT_0}\right]^{k/k-1}$

Questão 2.6 Um tanque em formato de um prisma de base retangular é usado para armazenar três líquidos imiscíveis, como mostrado na figura abaixo. O tanque está complemente cheio e possui 20ft de profundidade e 7ft de largura. Calcule:

a) A força hidrostática resultante em cada parede lateral.

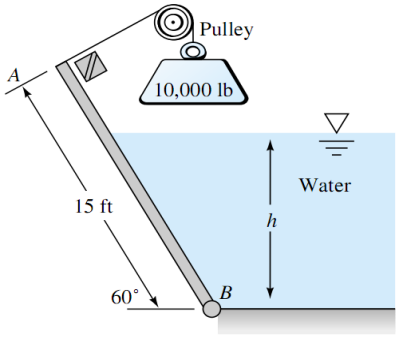
b) Seu ponto exato de aplicação.



Resp.:

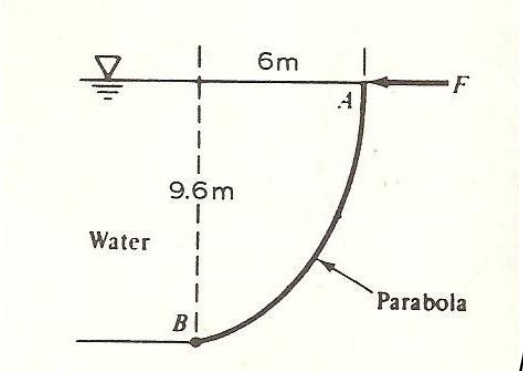
Questão 2.7 A comporta AB mostrada abaixo possui 15 ft de comprimento e 8 ft de largura (na direção que entra no papel). Ela está articulada na extremidade B, estando equilibrada no ponto A por um corpo cujo peso é de 10000 libras-força. O portão possui (uma polegada) 1in de aço (SG = 7,85) de espessura. Calcular o nível de água h (a 20°C) para o qual o portão começará a descer.

Dados: $\rho_{água}$ (a 20°C) = 62,4 lbf/ft³; 1 ft = 12 in.



Resp.: h = 10,6 ft

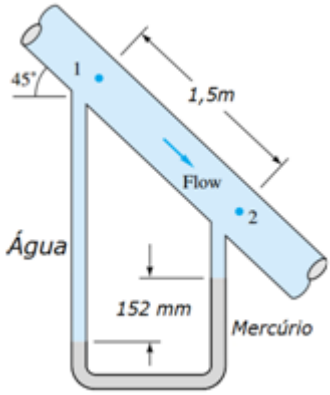
Questão 2.8 Em relação à comporta abaixo (10 m de profundidade), calcule a força F necessária para impedir a rotação em torno da articulação B. Despreze a pressão atmosférica.



$z = k\,x^2$, sendo k (m^{-1}).

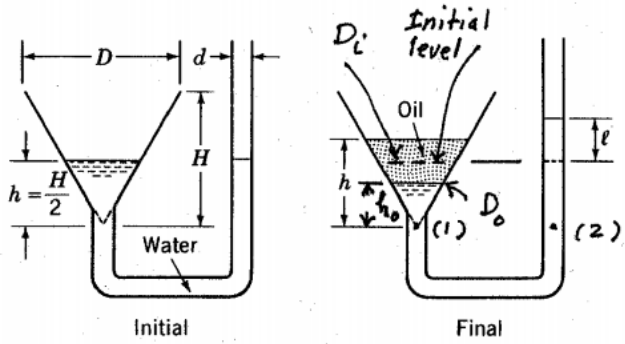
Resp.: F = 2,39 x 10^6 N

Questão 2.9 A água escoa para baixo em um tubo de 45o, como na figura ao lado. A queda de pressão p1 – p2 deve-se em parte à gravidade e em parte ao atrito. Um manômetro colocado entre os pontos 1 e 2 indica uma diferença de altura de 152 mm. Responda: a) Qual é a perda de pressão total entre os pontos 1 e 2? b) Qual é a queda de pressão por causa somente do atrito entre 1 e 2 em Pa? c) A leitura do manômetro corresponde somente à perda por atrito? Por quê? [Dados: γágua = 9800 N m-3, dHg = 13,56].



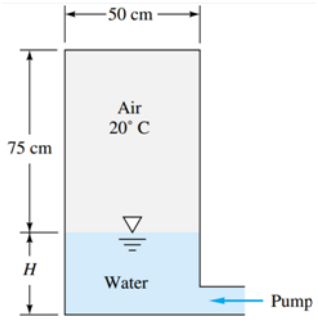
Resp.: a) $p_1 - p_2$ = 8314,9 Pa; b) Δp_{atrito} = 18709 Pa; c) Sim.

Questão 2.10 O arranjo mostrado inicialmente contém água e apresenta as seguintes dimensões: H = D = 0,605 m e d = 30,5 mm. Óleo (densidade 0,85) é vertido no funil até que o seu nível apresente uma altura, h, maior que H/2. Determine os valores do aumento do nível da água no tubo, l, em função de h para H/2 < h < H. (Indique todas as suposições necessárias para a resolução da questão).



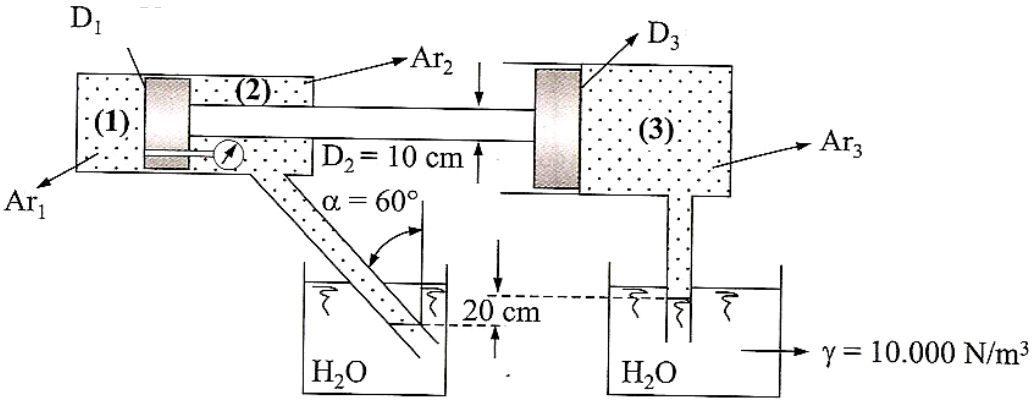
Resp.: Processo iterativo l = 0,85 h + 0,15 h_o -1 e h_o = (1 – 0,033 l)$^{1/3}$.

Questão 2.11 Um tanque cilíndrico é mostrado na figura ao lado. Ele se encontra sendo cheio com água a 20ºC ($\gamma H2O$ = 9790 N m-3) por uma bomba que desenvolve uma pressão de saída de 1,75 Bar. No instante mostrado, a pressão no ar é de 110 kPa e H = 35 cm. A bomba para quando ela não pode mais aumentar a pressão de água. Considerando uma compressão isotérmica do ar, calcule H para a condição de máxima pressão de água.



Resp.: H_{max} = 61,2 cm.

Questão 2.12 No esquema mostrado na figura a seguir, determinar a pressão em (1) sabendo-se que o sistema se encontra em equilíbrio. Dados: As câmaras são cilíndricas e possuem: D_1 = 30 cm, D_2 = 10 cm e D_3 = 50 cm. A leitura do manômetro instalado entre as câmaras (1) e (2) é igual a pm = 10 kPa. Considerar todas as pressões como pressões efetivas.



Resp.: p_1 = 15,83 kPa.

Questão 2.13 O efeito da compressibilidade da água do mar pode ficar importante se a pressão é observada em profundidades muito grandes. Sendo assim:

a) Admita que o módulo de compressibilidade [$B = dP/(d\rho/\rho)$] da água do mar é constante e obtenha uma relação entre a pressão e a profundidade que leve em conta a variação da massa específica do fluido com a profundidade.
b) Utilize o resultado da parte a. para determinar a pressão numa profundidade de 6 km. Admita que o módulo de compressibilidade da água do mar é $2{,}3 \cdot 10^9$ Pa e que a massa específica da água na superfície é igual a 1030 kg/m³. Compare este resultado com o obtido se a água do mar for incompressível.

Resp.: a) $p = p_0 - B \ln [1 - \rho_0 gh/B]$; b) p = 61,5 MPa e $p_{incomp.}$ = 60,7 MPa.

Cinemática e dinâmica de fluidos – Análise diferencial de escoamentos

Questão 3.1 A equação geral de um campo de velocidade é dada abaixo, U_o e V_o são constantes, $a_1 = b_1 = 1$ e $a_2 = b_2 = -1$.

$$V(x, y) = (U_o + a_1x + b_1y)\, i + (V_o + a_2x + b_2y)\, j$$

A respeito deste escamento responda ao que se pede:

a. Determinar, explicando, a dimensão e o regime de escoamento.
b. Determinar o módulo vetor aceleração e suas componentes.
c. Determine se este escoamento é incompressível.
d. Encontre a equação do vetor vorticidade e se o escoamento é irrotacional?
e. Encontre todas as coordenadas do tensor taxa de deformação.

Resp.: a. Escoamento bidimensional em regime permanente; b. $\|a\| = \sqrt{2\left(U_o^2 + V_o^2\right)}$. *c. Escoamento incompressível. d. Escoamento rotacional. e.* $\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & -2 \end{pmatrix}$.

Questão 3.2 A equação geral de um campo de velocidade em um escoamento invíscido é dada abaixo:

$$V(x, y, z) = -2xy\, i + (y^2 - x^2)\, j$$

A respeito deste escoamento responda ao que se pede:

a) Determinar, explicando, a dimensão e o regime de escoamento.
b) Classificar o escoamento quanto à compressibilidade e à rotação.
c) Determinar a expressão do vetor aceleração.
d) Determinar o valor da pressão no ponto (x, y) = (2,1), sabendo-se que a pressão no ponto (0, 0) é igual a p_0 e a massa específica vale ρ.

Resp.: a) bidimensional e em regime permanente; b) Escoamento incompressível e irrotacional; c) $a = 2x\,(x^2 + y^2)\, i + 2y\,(x^2 + y^2)\, j$. *d)* $p(2;1) = -25/2\,\rho + p_0$.

Questão 3.3 Um determinado campo de velocidades é dado pela seguinte equação: $\vec{V}(x, y, z, t) = -3xy\,\vec{i} - yz\,\vec{j} + 3xz\,\vec{k}$. Para este escoamento, faça o que se pede:

a) Classificar o escoamento em função do regime de operação. O regime é permanente ou transitório? Justifique sua resposta.
b) Classificar o escoamento em relação à compressibilidade e em relação à rotacionalidade. Justifique sua resposta.
c) Determinar a expressão do vetor aceleração, $\vec{a}(x, y, z, t) = a_x\,\vec{i} + a_y\,\vec{j} + a_z\,\vec{k}$ no ponto (x, y, z) = (0, -1, 1) para um tempo t qualquer.
d) Determinar o tensor taxa de deformação para este escoamento.

Resp.: a) Permanente; b) Compressível e rotacional; c) a = -1 j; $\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} -6y & -3x & 3z \\ -3x & -2z & -y \\ 3z & -y & 6x \end{pmatrix}$

Questão 3.4 Determine, se for possível, os valores de a e b para que o perfil de velocidade dado seja incompressível e rotacional: V (x, y, z) = (2x + 4y) i + (-2x-3z) j + (-2az + by) k.

Resp.: a =1 torna o escoamento incompressível, mas não existe b que torne o escoamento irrotacional. Logo, não existe um parte de valores a e b que tornem o escoamento simultaneamente incompressível e irrotacional.

Questão 3.5 Um escoamento de um fluido possui como equação de seu campo de velocidades a seguinte expressão: $\vec{V} = (Ax + B)\,\vec{i} + (C - Ay)\,\vec{j}$. Sabendo-se que A = 3 s-1, B = 6 m s-1 e C = 4 m s-1, determinar:

a. A dimensão do escoamento e sua classificação em relação à dependência da variável tempo. Justifique cada resposta.
b. O módulo e a direção do vetor aceleração no pto. (1, 3).
c. As taxas de deformação lineares para o escoamento e classificar o escoamento em compressível ou não. Justificar com os cálculos necessários.
d. O vetor velocidade angular e classificar o escoamento em rotacional ou irrotacional. Justificar com cálculos adequados.
e. As equações da linha de corrente, da linha de emissão e da linha de trajetória que passam no ponto (x, y) = (2, 2).

Resp.: a) Escoamento bidimensional e em regime permanente. b) ||a|| = 30,9 m s^{-2}, θ = Arctg(15/27]) = 29°. c) $\partial u/\partial x$ = 3 s^{-1} e $\partial v/\partial y$ = -3 s^{-1}. Escoamento incompressível. d) Escoamento irrotacional. e) 4x – 3xy -6y +16 = 0.

Questão 3.6 A equação geral de um campo de velocidade é dada abaixo.

$$V(x, y) = [(a_1 + a_2)\, x + (1-b_1)\, y]\, i + [\,(a_2 - a_1)\, x + 2b_1\, y]\, j$$

A respeito deste escoamento responda ao que se pede:

a. Determinar o módulo do vetor aceleração no ponto (x, y) = (2, -1), supondo-se aqui que $a_1 = a_2 = 1$ e $b_1 = 2$.

b. Encontre a equação do vetor vorticidade e determine, se possível, as condições necessárias para que o escoamento seja irrotacional e incompressível ao mesmo tempo.

c. Encontre todas as coordenadas do tensor taxa de deformação.

Resp.: a) ||a|| = 21,3 m/s² ; b) $\xi = (a_2 - a_1 + b_1 - 1)\, k$. Para que o escoamento seja incompressível e irrotacional simultaneamente, tem-se: $a_1 = -(b_1 + 1)/2$ e $a_2 = (1 - 3b_1)/2$. c) $\varepsilon_{xx} = 2(a_2 + a_1)$; $\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = (1 - b_1 + a_2 - a_1)$; $\varepsilon_{yy} = 4b_1$.

Questão 3.7 A equação geral de um campo de velocidade em um escoamento é dada por: $\mathbf{V(x,y,z) = Mx\,\vec{i} + My\,\vec{j} - 2Mz\,\vec{k}}$, onde M é uma constante. A respeito deste escoamento responda ao que se pede:

a) Classificar o escoamento quanto à compressibilidade e à rotação.
b) Determinar a expressão do vetor aceleração.
c) Considerando a influência da gravidade ($\vec{g} = -g\,\vec{k}$) e sabendo que o escoamento é invíscido e que o fluido possui uma massa específica ρ, determinar o campo de pressão p(x, y, z).

Resp.: a) Escoamento incompressível e irrotacional. b) a = M² x i + M² y j + 4M²z k.
c) (p,x,y,z) = - ρM²/2 (x² + y² - 4z²) + ρgz + c1.

Questão 3.8 Sendo dado o escoamento abaixo, responda ao que se pede, justificando sua resposta:

$$\vec{V}(x,y) = -\frac{Ky}{x^2+y^2}\,\vec{i} + \frac{Kx}{x^2+y^2}\,\vec{j}$$

a) As partículas fluidas sofrem algum tipo de deformação durante o escoamento? Prove contabilizando-as.
b) Qual o módulo do vetor velocidade angular no ponto (-1, 3)?
c) Qual o módulo do vetor aceleração no ponto (x, y) = (1,1)?
d) Qual a equação da(s) linha(s) de trajetória(s) que passa(m) no ponto (x, y) = (2, 1).

Resp.: a) $\partial u/\partial x = 2Kxy/(x^2 + y^2)^2$; $\partial v/\partial y = -2Kxy/(x^2 + y^2)^2$; $\partial u/\partial y = \partial v/\partial x = -K(x^2 - y^2)/(x^2 + y^2)^2$. b) $||\omega|| = 0$. c) $||a|| = \sqrt{2}K^2/4$. d) $x^2 + y^2 = 5$.

Questão 3.9 Um determinado campo de velocidades é dado pela seguinte equação: $\vec{V}(x,y,z,t) = 2tx\,\vec{i} - t^2y\,\vec{j} + 3xz\,\vec{k}$. Para este escoamento, faça o que se pede:

a) Classificar o escoamento em função do regime de operação. O regime é permanente ou transitório? Justifique sua resposta.
b) Classificar o escoamento em função da dimensão do vetor velocidade. O escoamento é uni, bi ou tridimensional? Justifique sua resposta.

c) Determinar a expressão do vetor aceleração, $\vec{a}(x,y,z,t) = a_x\,\vec{i} + a_y\,\vec{j} + a_z\,\vec{k}$ no ponto (x, y, z) = (2, -2, 0) para um tempo t qualquer.

Resp.: a) transitório; b) tridimensional; c) aceleração = (4+8t²) i + (4t-2t⁴)j.

Questão 3.10 A expressão para o vetor velocidade de um escoamento é a seguinte:

$$\vec{V}(x,y,z) = (x^2+y^2+z^2)\vec{i} + (xy+yz+z^2)\,\vec{j} + \left(-3xz - \frac{z^2}{2} - 4\right)\vec{k}\,.$$

Para este escoamento, faça o que se pede:

a) Determinar as taxas de dilatação lineares e a taxa de dilatação volumétrica. Estes valores permitem tirar que conclusão? Justifique sua resposta.

b) Determinar a expressão do vetor velocidade angular e indicar se o escoamento é irrotacional ou não. Justifique sua resposta.

c) Determinar as componentes do tensor taxa de deformação nos planos: (i) xy, (ii) xz e (iii) yz.

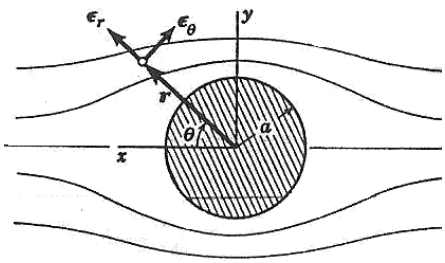
Resp.:

a) Taxas de dilatação lineares: $\partial u/\partial x = 2x$; $\partial v/\partial y = x+z$; $\partial w/\partial z = -3x-z$; Taxa de dilatação volumétrica = $\partial u/\partial x + \partial v/\partial y + \partial w/\partial z = 0$. Escoamento incompressível.

b) $\omega = -(y + 2z)/2\ i + 5z/2\ j - y/2\ k$. Escoamento rotacional.

c) $\varepsilon_{xy} = 3y$; $\varepsilon_{xz} = -z$ e $\varepsilon_{yz} = y + 2z$.

Questão 3.11 Seja o escoamento bidimensional em torno de um cilindro de raio a. A expressão do campo de velocidade de um escoamento em coordenadas cilíndricas é dado a seguir:



$$V(r,\theta) = -V_0 Cos\theta \cdot \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right)\vec{e}_r + V_0 Sen\theta \cdot \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right)\vec{e}_\theta$$

Onde V_0 é uma constante, $\vec{e_r}$ e $\vec{e_\theta}$ são versores nas direções radial e transversal, respectivamente.

Determinar:

a. O módulo e a direção da aceleração de uma partícula fluida em $\theta = \theta_0$ na superfície do cilindro, onde r = a.

b. Verifique como este escoamento se classifica em termos de rotação e da compressibilidade.

c. O tensor taxa de deformação para este escoamento.

Resp.: a. $||a|| = 4(V_0)^2/a \times Sen\theta_0$; $\alpha = (\pi - \theta_0)$ radianos. b. Escoamento incompressível e irrotacional. c) $\varepsilon_{rr} = -4(a^2/r^3)V_0\ Cos\theta$; $\varepsilon_{\theta\theta} = 4(a^2/r^3)V_0\ Cos\theta$; $\varepsilon_{r\theta} = \varepsilon_{\theta r} = -4(a^2/r^3)V_0\ Sen\theta$.

Questão 3.12 Um determinado campo de velocidades é dado pela seguinte equação:

$$V = 10\ i + (x^2 + y^2)\ j - 2xy\ k.$$

Para este escoamento, faça o que se pede:

a) Classificar o escoamento em relação à compressibilidade e em relação à rotacionalidade (se rotacional, indicar o sentido de rotação). Justifique sua resposta.

b) Determinar a expressão do vetor aceleração no ponto (x, y, z) = (3, 1, 0).

Resp.: a. Escoamento compressível e rotacional. b. a(3; 1; 0) = 80 j -80 k.

Questão 3.13 A equação geral de um campo de velocidade é dada por:

$$V\ (x, y) = [x\cdot(1+2t)]\ i + y\ j$$

A respeito deste escoamento responda ao que se pede:

a) Determinar, explicando, a dimensão e o regime de escoamento.

b) Determinar a expressão do vetor aceleração, distinguindo a aceleração local e a convectiva.

c) Encontrar a equação geral das linhas de corrente variáveis no tempo que passam todas através do ponto (x_o, y_o) em algum tempo t.

Resp.: a) Escoamento bidimensional e transiente. b) a = (2x) i (local) + $\{x\ (1+2t)^2\ i + y\ j\}$ (convectiva). c) $(y/y_0)^{(1+2t)} = x/x_0$.

Questão 3.14 Em muitas aplicações da mecânica dos fluidos os escoamentos são mais facilmente entendidos quando expressos em termos de funções auxiliares, tais como a Função Corrente (ψ) e a Função Potencial (ϕ), as quais, em geometria cartesiana e para um escoamento incompressível em duas dimensões, onde V = V(u, v), são dadas por:

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \; ; \; v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial y}$$

a. Os componentes do vetor velocidade de um escoamento bidimensional são: u = 2 x y e v = (x^2 - y^2). Escreva a equação da função corrente e da função potencial para este escoamento. Mostre que este escoamento é incompressível e irrotacional.

b. Para um dado escoamento a função corrente bidimensional é dada por: ψ = a y^2 - bx. Determine, se possível, os valores de a e b para que o escoamento seja irrotacional e a função potencial para este escoamento.

Resp.: a. Escoamento incompressível e irrotacional. $\psi = xy^2 - x^3/3$ e $\phi = yx^2 - y^3/3$. b. Não é possível pois o escoamento é rotacional.

Questão 3.15 A equação geral de um campo de velocidade desenvolvido em um tubo redondo de raio R, com um gradiente de pressão forçado dP/dz (constante e negativo) movendo o escoamento é dada abaixo:

$$\vec{V} = V(r, \theta, z), \text{ onde : } u_r = 0, u_\theta = 0 \text{ e } u_z = \left(\frac{1}{4\mu}\right)\left(\frac{dP}{dz}\right) \cdot \left(r^2 - R^2\right)$$

μ é a viscosidade do fluido.

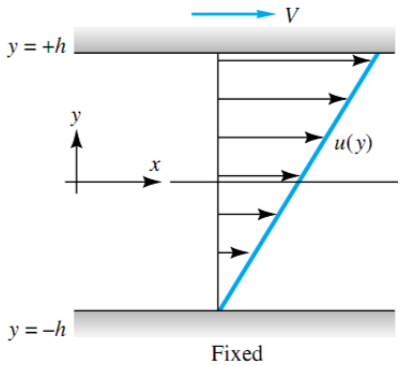
A respeito deste escoamento responda ao que se pede:

a) Classificar o escoamento quanto à compressibilidade e determinar se o escoamento é rotacional ou irrotacional? Se for rotacional, determine as componentes do vetor velocidade angular e determinar se as partículas giram no sentido horário ou anti-horário, explique.

b) Determinar o tensor taxa de deformação para este escoamento.

Resp.: a) O escoamento é incompressível e rotacional. $\omega = -r/(4\mu)$ (dP/dz) e_θ. Como ω é positiva, pois dP/dz < 0, por convenção, o sentido é anti-horário. b) $\varepsilon_{rz} = \varepsilon_{zr} = r/(2\mu)$ dP/dz; demais componentes nulas.

Questão 3.16 Considere o escoamento de Couette bidimensional, incompressível e permanente, segundo a figura abaixo. Nesta o escoamento ocorre entre duas placas paralelas infinitas com a placa superior movendo-se a uma velocidade constante e a placa inferior estacionária. Considere que o fluido não é newtoniano e tem tensões viscosas dadas por:



$$\tau_{xx} = a\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^c, \tau_{yy} = a\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^c$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \left(a/2\right) \cdot \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right]^c$$

em que a e c são constantes dependentes de propriedades do fluido.Sabendo-se que o escoamento é essencialmente axial, u ≠ 0 (v = w = 0), que não existe gradiente de pressão e os efeitos de gravidade são desprezíveis:

a. Determinar o perfil de velocidade u(y).
b. Como este perfil se compara com aquele de um fluido newtoniano (Escoamento de Couette)?

Resp.: a. u(y) = (V/2) (y/h + 1). b. A expressão obtida é igual a de um fluido Newtoniano.

Questão 3.17 Em muitas análises, é útil pensar em um conjunto de linhas de corrente como parte de um sistema de coordenadas. Neste caso, a letra s indica a posição da partícula ao longo de uma linha de corrente particular e a velocidade pode ser dada por V = V(s, t). Desta forma, a aceleração pode ser dada por:

$$\vec{a} = \vec{V}\left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial s}\right) + \frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$$

Em escoamentos em regime permanente, onde as linhas de corrente coincidem com as linhas de trajetória, a aceleração pode ser decomposta em duas parcelas, a_T, tangente à trajetória e outra, a_N, normal à trajetória, dadas conforme a seguir:

$$a_T = V\left(\frac{dV}{ds}\right) \qquad a_N = \frac{V^2}{R}$$

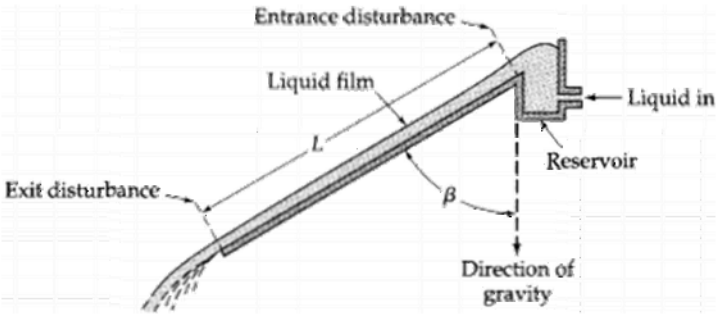
s é a trajetória da linha de corrente e R é o raio de curvatura da trajetória.

a. Para o escoamento dado por V = -Ax i + Ay j, determine a equação da linha de corrente que passa pelo ponto (x, y) = (2, 4).

b. Lembrando-se que o raio de curvatura de uma trajetória é dado por: $R = \dfrac{\left[1+\left(\dfrac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}}{\left(\dfrac{d^2y}{dx^2}\right)}$

Determinar o módulo da aceleração da partícula numa direção normal à linha de corrente e no sentido do centro de curvatura na posição (x, y) = (2, 4).
Resp.: a. xy = 8. b. $||a_N||$ = 3,57 A².

Questão 3.18 Numa placa plana inclinada (comprimento L e largura W) ocorre o escoamento de um líquido, fluido newtoniano, para baixo em regime permanente. As propriedades (T e P) são constantes, de forma que μ e ρ são também constantes. Desprezando-se os efeitos de borda, e considerando que as tensões viscosas são suficientes para conter a aceleração do fluido durante a descida. Sabendo-se que vx e vy podem ser consideradas nulas, e que a pressão é função somente de x, determine:

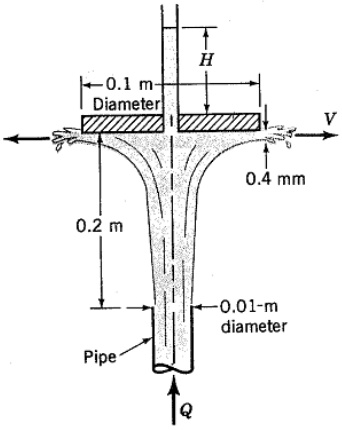


a) O perfil de velocidade para o fluido na descida;
b) A velocidade máxima atingida pelo fluido na descida;
c) A velocidade média de descida do fluido;
d) A distribuição dos fluxos de momento (tensão cisalhante);
e) A força exercida pelo fluido sobre a superfície sólida da placa.

Instrução: Parta das Equações da Continuidade e de Navier-Stokes e determine características (condições de contorno) para este escoamento. Faça suposições complementares quando necessário. Este problema está resolvido por outro caminho no capítulo 2 de BIRD et al. (2004). Só será considerada adequada a resolução pelo caminho que estamos propondo, ou seja, partindo das equações referidas!!!!

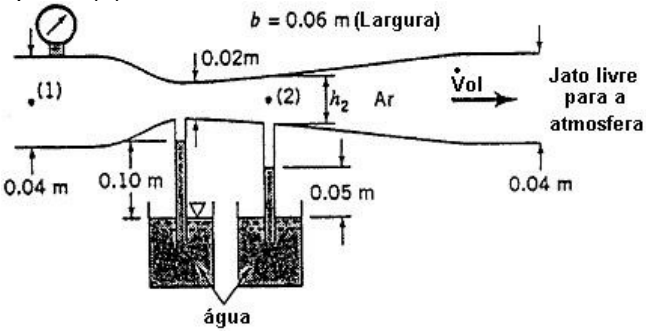
Aplicações da Equação de Bernoulli e Equações de Conservação na Forma Integral

Questão 4.1 Na figura abaixo é mostrado um jato sendo descarregado pelo tubo interagindo com um disco circular. Determinar a vazão em volume do escoamento e a altura manométrica H. No problema a geometria é axissimétrica.



Resp.: Vazão = 1,99 x 10^{-4} m³/s; H = 0,129 m.

Questão 4.2 No esquema mostrado na figura a seguir, o ar escoa no canal Venturi, com seção transversal retangular. A largura do canal é constante e igual a 0,06m. Considerando a condição operacional indicada na figura e admitindo que os efeitos viscosos e da compressibilidade são desprezíveis, determine: (a) a vazão volumétrica no canal; (b) A altura h2 e (c) a pressão no ponto (1).

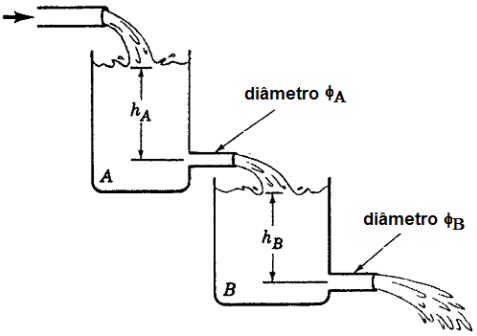


Resp.: a. 0,056 m³/s; b. 2,54 cm; c. 0 (p1 efetiva).

Questão 4.3 Na figura abaixo, um fluido escoa nos tanques e tubulações mostrados.

a. Determinar qual deve ser a razão entre os diâmetros (ϕ_B e ϕ_A) de cada tubulação de saída para que os níveis dos tanques permaneçam sem alteração.
b. Para a mesma situação do item a. calcular a velocidade em cada tubulação de saída dos tanques.

Dados: No início do processo h_A e h_B valem, respectivamente, 3,2 m e 0,2 m. g = 9,81 m s^{-2}.

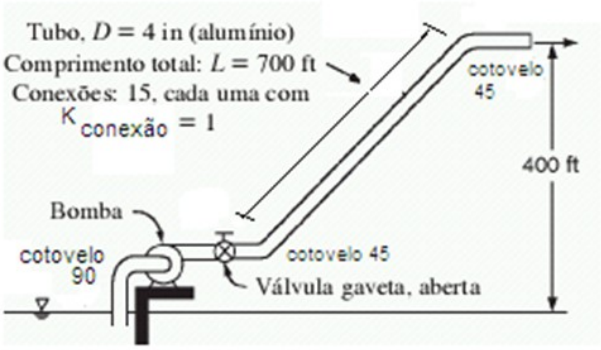


Resp.: a. $\phi B/\phi A$ = 2,0; b. vA = 7,92 m/s; vB = 1,98 m/s

Questão 4.4 Água de refrigeração (60ºF) é bombeada de um reservatório para brocas de perfuração, numa obra de construção, usando o sistema mostrado. A vazão deve ser 80,2 ft3/min e a água deve sair do bocal borrifador. Assim,

(a) Estime a potência efetivamente consumida pela bomba se sua eficiência é de 70%.

(b) Analise se há problemas de cavitação nesse sistema.



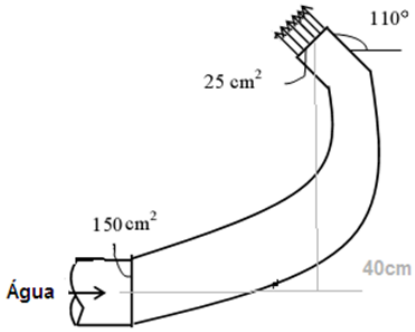
Dados:

P_{atm} = 14,7 psi (lbf/in^2); g = 32,2 ft/s^2;

Massa específica da água = 1,94 slug/ft^3 ; 1ft = 12 in.

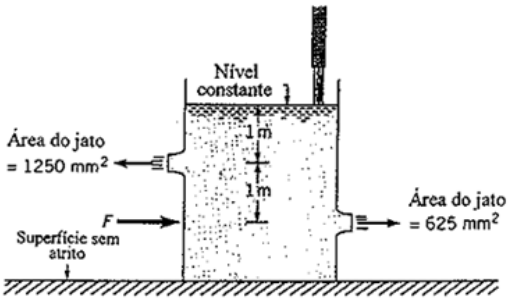
Resp.: a. 123,6 hp; b. Não haverá cavitação.

Questão 4.5 Um cotovelo redutor é usado para defletir o escoamento da água (25ºC) a uma vazão de 30 kg/s em um tubo direcionado para cima que forma um ângulo de 110º com a horizontal. O cotovelo descarrega água na atmosfera. A diferença de elevação entre os centros de saída e entrada é de 40 cm. A massa do cotovelo e da água que há nele é 50 kg. Determine a força resultante (módulo e direção) de ancoragem necessária para manter o cotovelo no lugar.



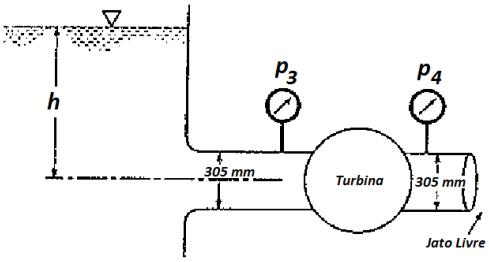
Resp.: F = 1534N, direção β = 327º.

Questão 4.6 A figura ao lado mostra um tanque sendo cheio em um escoamento vertical. O nível de líquido é constante e o tanque está apoiado num plano horizontal completamente liso. Determinar o módulo da força horizontal F necessária para manter o tanque imóvel.



Resp.: ||F|| = 0.

Questão 4.7 Quando água escoa na tubulação a uma vazão de 0,57 m³ s^{-1}, a turbina esboçada na figura abaixo gera 60 kW de potência elétrica e possui eficiência igual a 80%. Dado: usar γ_{H2O} = 10000 N m^{-3}.



Determinar:

a) Determinar a cota h da superfície livre da água;
b) A diferença de pressão: $p_3 - p_4$.
c) A vazão na tubulação horizontal se retirarmos a turbina do sistema.
d) Uma avaliação do processo mostrou que na época da implantação do processo o valor real de h era é cerca de 5% maior que o calculado em a). Hoje, após cerca de 5 anos de operação, observa-se que h real deve ser cerca de 30% maior para manter geração de eletricidade. Discuta o que pode justificar esta diferença observada ao longo do tempo.

Resp.: a. 13,16 m; b. 1,32x 10^5 Pa; c. 1,305 m/s.

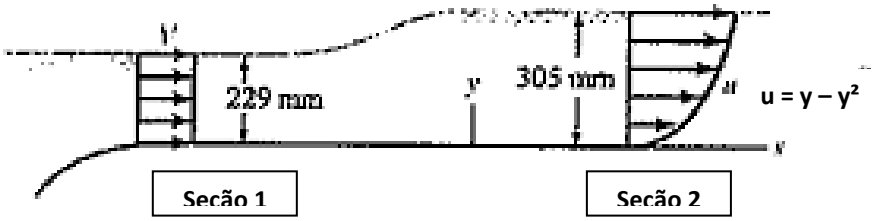
Questão 4.8 O compressor indicado na figura abaixo é alimentado (seção 1) por uma tubulação circular a uma vazão de 0,283 m³/s de ar na condição padrão. O tanque do compressor possui um volume de 0,57 m³. O ar é descarregado do tanque através de uma tubulação circular que apresenta diâmetro igual a 30,5 mm. A velocidade e a massa específica do ar que escoa no tubo de descarga (seção 2) são iguais a 213 m/s e 1,80 kg/m³, respectivamente. (Dado: massa específica do ar na condição padrão: 1,227 kg/m³).

a. Determinar a taxa de variação da massa de ar contida no tanque em kg/s.
b. Determinar a taxa média de variação da massa específica do ar contido no tanque.

Resp.: a. 6,65 x 10^{-2} kg/s; b. 1,18 x 10^{-1} kg m^{-3} s^{-1}.

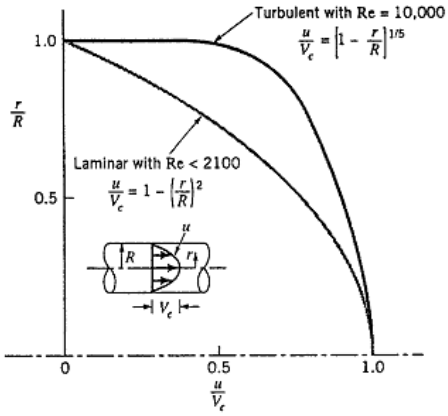
Questão 4.9 A figura abaixo mostra a vista lateral da região de entrada de um canal retangular que apresenta largura igual a 5,0 m. O perfil de velocidade na seção de entrada (altura igual a 229 mm) é uniforme e que, ao longe (altura igual a 305 mm), o perfil de velocidade é dado por u = y - y², onde y é dado em metros e u em m/s. Nestas condições, determine:

a) A vazão molar do escoamento (o fluido é a água a 25ºC);
b) O valor de V (velocidade do fluido na seção 1);
c) O valor da tensão de cisalhamento na parte central da seção 2.
d) O valor do número de Reynolds deste escoamento nas seções 1 e 2.
e) Em função do perfil de velocidade apresentado na seção 2, o perfil de escoamento nesta seção é laminar ou turbulento? Justifique sua resposta.



Resp.: a) 10,27 kmol/s; b) 0,162 m/s; c) 6,28 x 10^{-4} N/m².

Questão 4.10 A figura abaixo mostra que o perfil de velocidade de um escoamento laminar é bem diferente do encontrado em escoamentos turbulentos, sendo parabólico no regime laminar e dado pelo perfil mostrado na figura quando o escoamento é turbulento com Re = 10000. Considerando cada escoamento (laminar e turbulento com Re = 10000, em que posição (distância radial) você colocaria a ponta de um tubo de Pitot para que fosse medida diretamente a velocidade média do escoamento?

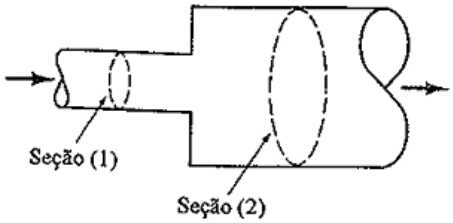


Resp.: laminar = 0,707 R; turbulento = r = 0,75 R.

Questão 4.11 Prove que a perda de energia disponível no escoamento numa expansão axissimétrica, veja na figura abaixo, $perda_{ex}$, pode ser calculada pela seguinte expressão:

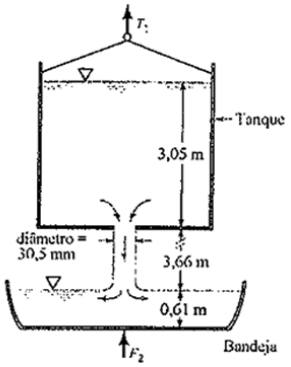
$$perda_{ex} = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{V_1^2}{2}$$

Onde A_1 é a área da seção transversal a montante da expansão, A_2 é a área da seção transversal a jusante da expansão e V_1 é a velocidade do escoamento a montante da expansão.



Questão 4.12 A figura ao lado mostra o escoamento de água de um grande tanque para uma bandeja num determinado instante. (a) Determinar, para o instante mostrado, o módulo da força no cabo, T1, sabendo que o massa total (água contida no tanque mais a massa do próprio tanque) é igual a 10 kg. (b) Determinar o módulo da força que sustenta a bandeja, F2, sabendo que a massa total (massa da água contida na bandeja com a massa da bandeja) é igual a 5 kg.

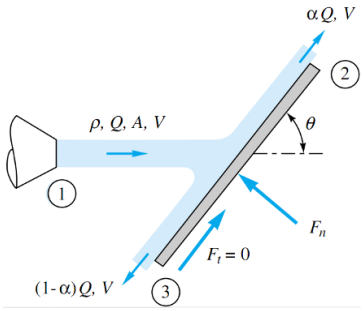
Resp.: a. 54,5 N; b. 16,3 N



Questão 4.13 Um jato atinge uma placa inclinada fixa, ele se parte em dois através das seções 2 e 3, de iguais velocidades $V = V_{jato}$, mas em diferentes vazões αQ na seção 2 e $(1-\alpha)$ Q na seção 3, sendo $0 < \alpha < 1$. Isso ocorre porque, para escamento sem atrito, o fluido não pode exercer uma força tangencial F_t sobre a placa. Assim sendo, faça a análise das forças envolvidas, considere $F_t = 0$ e determine:

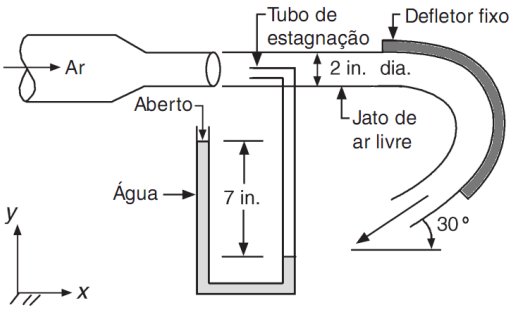
a) α em função de θ e explique porque α não depende das propriedades do jato.

b) F_n em função dos dados do problema e explique como determinar o ponto de aplicação da força F_n ao longo da placa.



Resp.: $\alpha = (1 + \cos\theta)/2$; $F_n = \rho Q A V \operatorname{Sen}(\theta)$.

Questão 4.14 Uma corrente de ar, nas condições padrão (15ºC e 1 atm), sai de um bocal de 2 in de diâmetro e atinge uma pá curva (defletor), como mostrado abaixo. Um tubo de estagnação conectado a um manômetro de tubo em U com água a 25ºC é instalado no plano de saída do bocal. Desprezando os efeitos do atrito no processo, calcule a velocidade do ar deixando o bocal e estime a componente horizontal da força exercida pelo jato sobre a pá. Indique as suposições usadas na resolução do problema.



Resp.: a) 53,8 m/s; b) 13,35 N apontando para a direita.

Questão 4.15 Água escoa no tubo inclinado mostrado na figura abaixo. Determine: (a) A diferença entre as pressões p1 e p2. (b) A perda de atrito em mca no escoamento entre as seções (1) e (2). (c) A força axial exercida pelo tubo sobre a água entre as seções (1) e (2). (d) A força normal exercida pelo tubo sobre a água entre as seções (1) e (2).

Dados:

Distância entre as seções (1) e (2) l = 1,52 m;

Diâmetro interno da tubulação D = 152 mm;

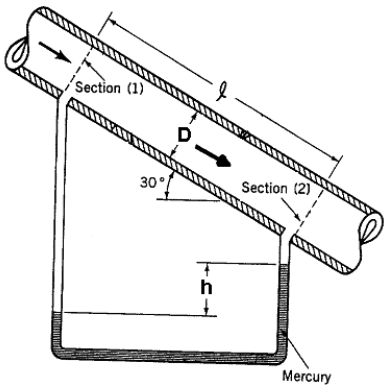
Desnível h na coluna de mercúrio = 152 mm;

$g = 10\ m/s^2$;

Massa específica da água a 25ºC = 999 kg/m³;

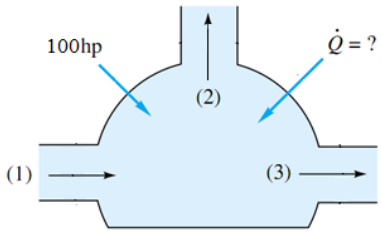
Densidade do mercúrio = 13,6;

Coeficientes de correção da energia cinética e do momento linear iguais a 1,0.



Resp.: a. 11,5 kPa; b. 1.92 mca; c. 347,2 N (direção contrária ao escoamento); d. 238,6 N (apontando para cima).

Questão 4.16 Na Figura a seguir é mostrada uma máquina que admite ar na Seção 1 e descarrega ar nas Seções 2 e 3.



As propriedades em cada seção são as seguintes:

Section	A, ft^2	Q, ft^3/s	T, °F	p, lbf/in^2 abs	z, ft
1	0.4	100	70	20	1.0
2	1.0	40	100	30	4.0
3	0.25	50	200	?	1.5

Trabalho é fornecido à máquina numa taxa de 100 hp. Assumindo que o ar é um gás perfeito (R = 1715 ft lb_f/(slug Ranquine) e cp = 6003 ft lb_f/(slug Ranquine)), determine:

a) A pressão p_3 em lbf/in^2.

b) O calor transferido durante o processo em BTU/s.

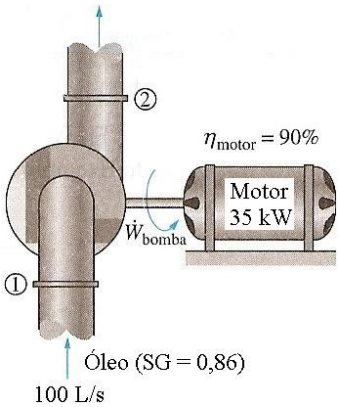
Dicas: Calcular a entalpia como h = c_p T + constante; 1 hp = 550 (lb_f ft)/s; 1 BTU = 778,2 lb_f ft; T (Rankine) = T(°F) + 460.

Resp.: a. 21,3 lbf/in^2; b. 99,4 BTU/s.

Questão 4.17 Uma bomba de óleo consome 35 kW de energia elétrica enquanto bombeia óleo com gravidade específica igual a 0,86 (γ_{H2O} = 9800 N/m³). A vazão volumétrica do escoamento permanece constante em 100 L/s. Os diâmetros das tubulações de entrada e de saída da bomba valem 8 cm e 12 cm, respectivamente. Sabendo-se que o coeficiente de correção da energia cinética vale 1,05 tanto para a entrada como para a saída da bomba, que a elevação da pressão do óleo na bomba é 400 kPa e a eficiência do motor for 90 %, determine:

(a) A eficiência mecânica da bomba.

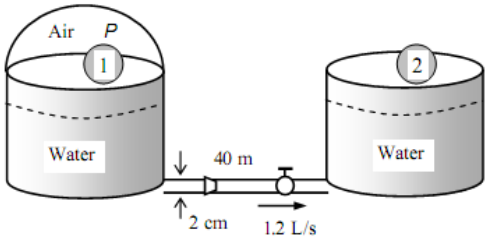
(b) A perda de carga no sistema.



Resp.: a) 81,5%; b) 6,9 m.

Escoamento Incompressível De Fluidos Em Tubulações

Questão 5.1 Dois reservatórios A e B contendo água (a 10ºC) estão conectados entre si através de um tubo de ferro fundido de 40 m de comprimento e 2 cm de diâmetro interno com uma entrada em aresta viva. O tubo também envolve uma válvula de retenção de batente e uma válvula de gaveta totalmente aberta. O nível da água em ambos os reservatórios é igual, mas o reservatório A é pressionado por ar comprimido, enquanto o reservatório B está aberto para a atmosfera numa pressão de 88kPa. Se a vazão inicial através do tubo for de 1,2 L/s, determine a pressão absoluta do ar na parte superior do reservatório A.



Dados:

Diâmetro interno da tubulação = 2 cm; Comprimento da tubulação = 40 m; Vazão volumétrica do escoamento = 1,2 L/s.

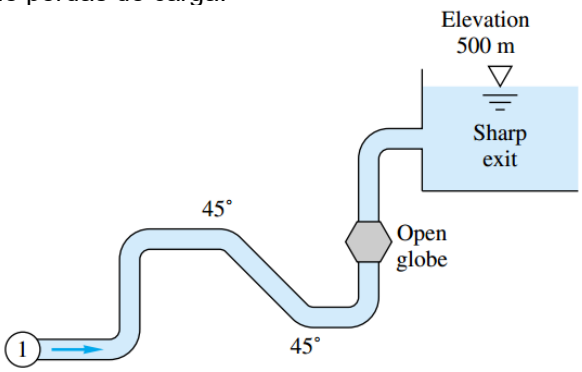
(1) Entrada súbita em aresta viva (k_{s1} = 0,5); (2) Válvula de retenção de batente (k_{s2} = 2,0)

(2) Válvula gaveta totalmente aberta (k_{s3} = 0,2) (4) Saída do tubo em aresta viva (k_{s4} = 1,0)

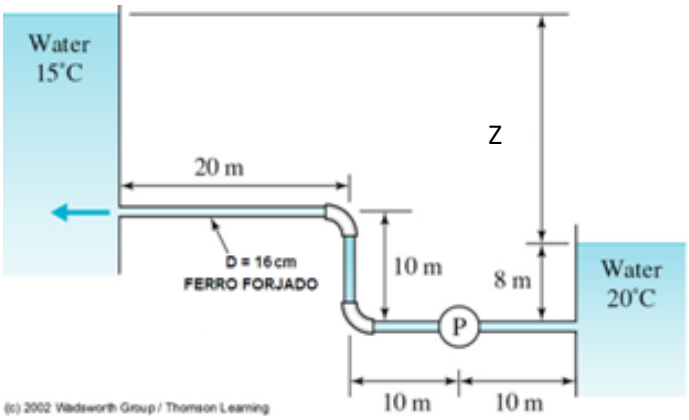
Propriedades da água a 10ºC: Massa específica igual a 999,7 kg/m^3; viscosidade dinâmica igual a $1{,}307\times10^{-3}$kg/(m·s). Rugosidade relativa do ferro fundido igual a 0,00026 m.

Resp.: 728 kPa.

Questão 5.2 O sistema mostrado na figura abaixo consiste em 1200 m de uma tubulação de ferro fundido de 5 cm, dois cotovelos (raios longos) de 45º e quatro de 90º, uma válvula globo completamente aberta e uma saída súbita no reservatório. Pense em formas de otimizar a instalação em termos de perdas de carga.

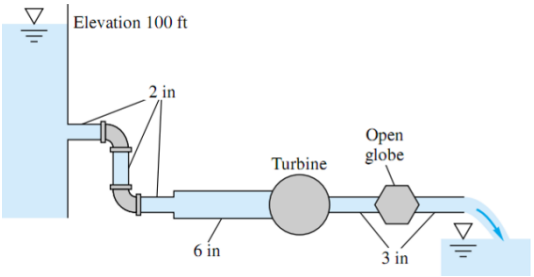


Questão 5.3 Sabendo-se que a vazão de água circulante no sistema abaixo é de 0,24 m³/s e a altura manométrica total é de 69 m, determine:
a) O valor de Z;
b) A eficiência da bomba se a potência efetivamente consumida pela bomba é 217 kW.
c) Qual o valor do nível de líquido no tanque a 20ºC para que ocorra cavitação na entrada da bomba.
d) A potência retirada do sistema por uma turbina, caso esta substituísse a bomba no sistema e o escoamento se desse do tanque mais alto para o mais baixo.



Resp.: a) 15,8 m; b) 74,8%; c) -9,96 m; d) 162,4 kW

Questão 5.4 Na figura abaixo, encontram-se 38 m de tubo de 2 in, 23 m de tubo de 6 in e 46 m de tubo de 3 in, todos em ferro fundido. Há, entre outros acessórios, três cotovelos de 90º e uma válvula globo aberta, todos flangeados.
a) Se a elevação de saída é zero, qual a potência (em hp) efetivamente extraída pela turbina quando a vazão é de 4,5 L/s de água a 20ºC? (Dado: Considere um rendimento do conjunto turbina-gerador igual a 90%).
b) Resolva o problema anterior, empregando-se tubos de PVC e acessórios rosqueados. Compare os resultados obtidos com a questão anterior.
c) Otimize a instalação mostrada em termos de perda de carga, ou seja, o que poderia ser feito para que conseguíssemos reduzir ao máximo a perda de carga neste sistema. Dê sugestões.



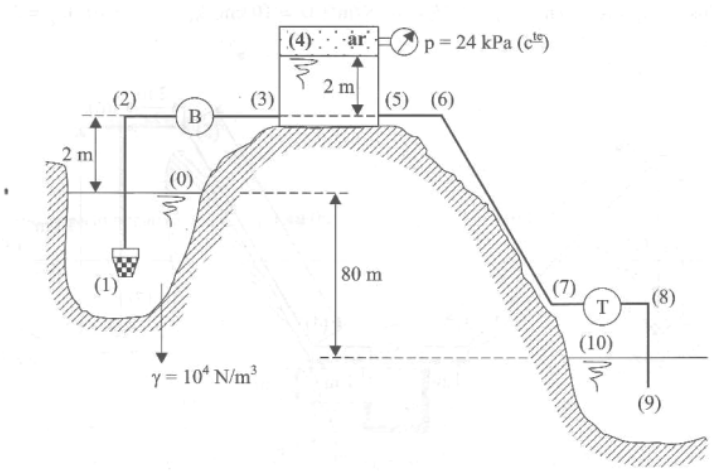
Resp.: a) 1,34 hp; b) 1,49 hp; c)

Questão 5.5 Um motor elétrico fornece 3 kW à bomba (B) da instalação abaixo, a qual possui rendimento igual a 80%. Em função dos dados fornecidos, determinar:

a) A perda de carga total entre (0) e (4);
b) O coeficiente de atrito da tubulação;
c) A perda de carga total entre (4) e (10);
d) O rendimento (eficiência) da turbina (T), se a potência aproveitada pela mesma é de 6,93 hp (1hp ≅ 746 W).

Dados:

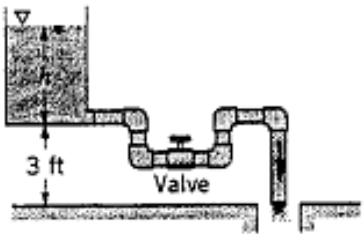
- Todas os tubos possuem a mesma seção transversal, cujo diâmetro é de 5 cm e feitas do mesmo material;
- Os coeficientes de perda singular são dados: k_{s1} = 10; k_{s2} = k_{s8} = 1,0; k_{s3} = k_{s5} = k_{s6} = k_{s7} = k_{s9} = 0,5;
- A vazão em volume na instalação é de 10 L s^{-1};
- O comprimento (real) das linhas (1) a (3) é de 10 m e de (5) a (9) é de 100 m.

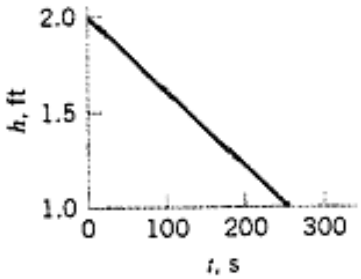


Resp.: a) 17,6 m; b) 9,06 x 10^{-3}; c) 27,9 m; d) 88,4%.

Questão 5.6 A altura da superfície livre de água no tanque, h, varia quando a válvula é aberta. Considerando o gráfico e a figura mostrados a seguir, responda:

a) Qual a área da seção transversal do tanque? Dados: O diâmetro interno dos componentes da tubulação e o comprimento da tubulação são iguais, respectivamente, a 183 mm e 6,1 m. Admita um fator de atrito igual a 0,03 e que os coeficientes de perda de carga singulares na entrada da tubulação, em cada curva e na válvula são, respectivamente, iguais a 0,5, 1,5 e 10.
b) Que medidas você implementaria para reduzir a perda de carga no sistema, mantendo a mesma vazão na saída da tubulação?





Dado adicional: 1ft = 0,3048 m.
Resp.: a. 25,7 m²

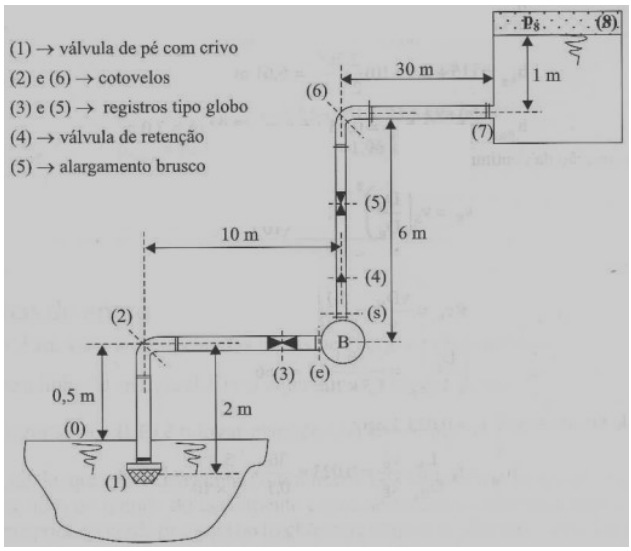
Questão 5.7 No esquema mostrado abaixo, você é o engenheiro responsável pelo projeto de uma instalação de bombeamento. Junto a um fabricante, no catálogo do mesmo observa-se bombas de 30 hp, 40 hp, 50 hp, 60 hp, 75 hp e 90 hp. Sabendo-se que a pressão p_8 é mantida constantemente igual a 532 kPa e a vazão média de escoamento for igual a 40 L/s, pede-se:

a) Selecionar a bomba adequada para este serviço, sabendo-se que o rendimento do sistema de bombeamento (conjunto motor-bomba) é de 0,7;

b) Determinar se haverá cavitação na entrada da bomba.

Dados:

- Tubos de ferro galvanizado (ε = 0,15 x 10^{-3} m);
- Os coeficientes de perda singular são dados: k_{s1} = 15; k_{s2} = k_{s6} = 0,9; k_{s3} = k_{s5} = 10; k_{s7} = 1; k_{s4} = 0,5;
- Propriedades da água: p^{vap} = 1,96 kPa (abs); γ = 10^4 N m^{-3}; ν = 10^{-6} m^2 s^{-1}; p_{atm} = 101 kPa;
- Diâmetros das tubulações de sucção (S) e recalque (R) da bomba: D_S = 15 cm e D_R = 10 cm.



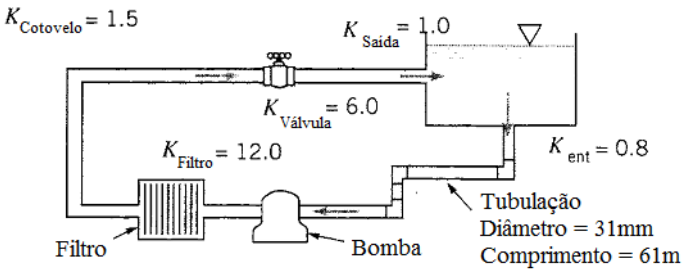
Resp.: a. 75 hp; b. Não.

Questão 5.8 Considere o escoamento de água no circuito fechado de uma piscina, como mostrado abaixo. Sabendo que a bomba transfere 272 W à água e que a rugosidade relativa dos tubos que compõe a tubulação é igual a 0,01, determine:

a) A vazão que escoa através do filtro mostrado;

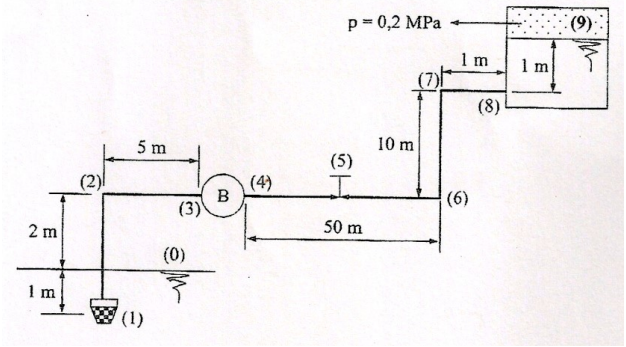
b) A perda de carga total do sistema em watt;

c) Observando o sistema existente, utilize a tabela dada na página inicial para otimizar o sistema, ou seja, reduzir a potência da bomba para efetuar o escoamento indicado.



Resp.: 1,44 L/s; b) 272 W.

Questão 5.9 Na figura abaixo é mostrado um sistema de bombeamento. Nele, água a 25ºC é transferida a uma vazão de 10L/s de uma piscina para um tanque pressurizado. Sabendo-se que as tubulações são de aço carbono (aço comercial).



Dados:

Diâmetro interno da tubulação de sucção = 10 cm;

Diâmetro interno da tubulação de recalque = 6,25 cm.

(1) - Válvula de pé com crivo (k_{s1} = 3,8) (2) - Cotovelo de 90º (k_{s2} = 0,39)

(5) – Válvula globo totalmente aberta (6) e (7) – Cotovelos de 90º ($k_{s6} = k_{s7}$ = 0,35)

(8) – Expansão repentina (alargamento)

Determinar:

a. A perda por atrito na linha de sucção em metros.

b. A perda por atrito na linha de recalque em metros.

c. A altura manométrica total (em metros) que a bomba precisa superar.

d. A eficiência mecânica da bomba, se a potência efetivamente gasta no processo é de 7,0 kW.

e. A pressão na seção de entrada da bomba (seção 3). Sabendo que a pressão de vapor da água a 25ºC é p^{vap} igual a 3 kPa, verifique se haverá cavitação.

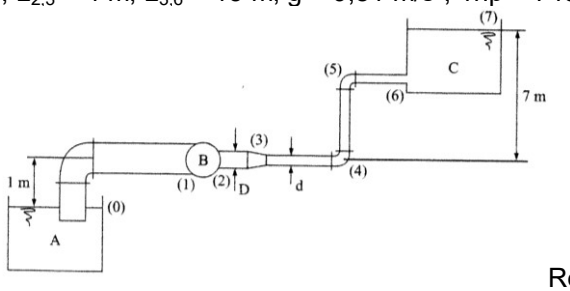
f. Determinar o diâmetro e o Coeficiente de atrito (Fator de Darcy) na linha de sucção para que, mantendo-se a mesma vazão volumétrica, tenhamos escoamento laminar na linha de sucção.

Resp.: a. 0,469 m; b) 16,58 m; c) 50,05 m; d) 71,5%; e) 7,58 x 10^4 Pa; f) D ≥ 5,54 m; f ≥ 2,78 x 10^{-2}.

Questão 5.10 A instalação da figura abaixo será usada para o transporte de 12 L/s de água do reservatório A para o reservatório C, ambos mantidos em nível constante. A bomba será adquirida do fabricante X, que produz bombas de potência nominal iguais a: 0,5 hp, 1 hp, 1,5 hp, 2 hp, 3 hp, 4 hp e 5 hp, todas com rendimento de 82 %. Desprezando-se as perdas entre as seções (0) e (1), determinar o que se pede:

a) A bomba apropriada para este serviço.
b) Se o escoamento fosse de C para A, qual a potência extraída por uma turbina T (com eficiência de 85%) que substituiria a bomba B.
c) Qual será a bomba indicada, caso a tubulação entre os pontos (3) e (6) seja substituída por outra de material três vezes mais rugoso e com o dobro de seu diâmetro.

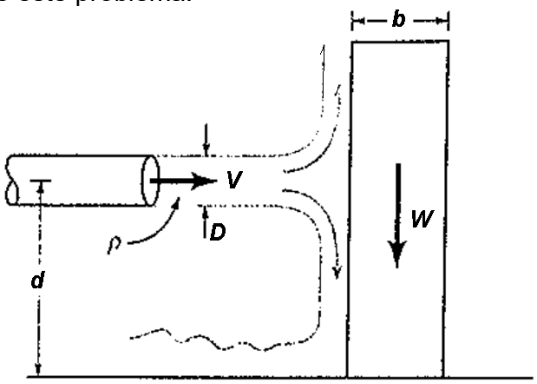
Dados: D = 10 cm, d = 8 cm, rugosidade = 5 x 10^{-5} m, $\gamma = 10^4$ N/m³, $\nu = 10^{-6}$ m²/s, k_{s3} = 0,1; $k_{s4} = k_{s5}$ = 0,5; k_{s6} = 1,0; $L_{2.3}$ = 4 m; $L_{3.6}$ = 15 m; g = 9,81 m/s², 1hp = 745,7 W.



Resp.: a. 2 hp

Análise dimensional

Questão 6.1 A figura a seguir mostra um jato de líquido incidindo em um bloco apoiado em um plano. Admita que a velocidade necessária para o bloco tombar, V, é função da massa específica do fluido, □, do diâmetro do jato, D, do peso do bloco, W, da largura do bloco, b, e da distância, d. Assim sendo, desenvolva um conjunto de parâmetros adimensionais que descreva adequadamente este problema.

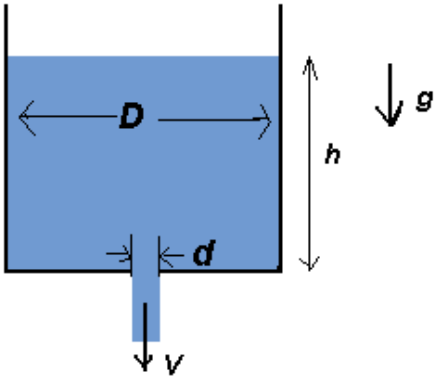


Questão 6.2 Um líquido com massa específica ρ e viscosidade μ escoa por gravidade através de um orifício com diâmetro d na parte inferior de um tanque com diâmetro D. No início da experiência, a superfície líquida está à altura h acima da parte inferior do tanque, como mostra a figura. O líquido sai do tanque impulsionado pela gravidade como um jato com velocidade média V direto para baixo, como mostra a figura. Usando a análise dimensional, faça o que se pede:

a. Gere uma relação adimensional para V como função dos outros parâmetros do problema (D, d, h, ρ, μ, g). (Sugestão: selecione h como sua escala de comprimento.)

b. Considerando o problema do item a., identifique os parâmetros adimensionais conhecidos que apareçam em seu resultado e explique seu significado físico.

c. Considere o caso no qual o orifício é muito pequeno comparado ao tanque (d<<<D). As experiências revelam que a velocidade média do jato V só depende da altura da superfície líquida h e da aceleração gravitacional g. Neste caso, se a altura da superfície líquida dobrar, com todas as outras condições iguais, por qual fator a velocidade média do jato aumentará?



Questões teóricas

Fundamentos da mecânica dos fluidos

Fundamentos 1 Discuta a respeito do conceito de *Continuum*. Explique no que consiste e explane sobre sua importância para a mecânica dos fluidos.
Fundamentos 2 Explique com suas palavras o que significam tensão superficial e pressão de vapor de um líquido e qual sua importância para a mecânica dos fluidos.
Fundamentos 3 Explique com suas palavras o que é a cavitação, indique como a teoria clássica explica este fenômeno e cite pelo menos uma medida que pode ser empregada em linhas de sucção para reduzir o risco de cavitação em bombas.
Fundamentos 4 Defina, explique a diferença e o significado de cada um dos seguintes termos: viscosidade cinemática, viscosidade aparente e viscosidade turbilhonar. Cite a importância de cada um para a mecânica dos fluidos.
Fundamentos 5 A respeito com conceito de viscosidade responda o que significa viscosidade aparente? Qual sua interpretação física? Como este conceito pode ser empregado para distinguir fluidos newtonianos e não-newtonianos? Responda definindo fluidos newtonianos, não-newtonianos, diferenciando-os e dê exemplos de fluidos seguindo estes comportamentos.
Fundamentos 6 O que significa viscosidade dinâmica? Qual sua interpretação física? Como podemos intuitivamente compreender sua ação durante escoamentos?
Fundamentos 7 Explique o que é o número de Reynolds. Coloque sua expressão geral, identifique cada termo, explique seu significado físico, sua importância e relate como este é empregado.
Fundamentos 8 Enuncie a Lei da Viscosidade de Newton. Mostre a equação, identificando seus termos e estabeleça que condições devem ser satisfeitas para sua aplicação. Indique quando ela pode ser aplicada e como ela pode servir na distinção do comportamento reológico de fluidos.
Fundamentos 9 Discuta escoamento laminar e turbulento. Defina-os e diferencie-os. Identifique e explique como devem ser os perfis de velocidade de um fluido escoando em uma tubulação de seção reta circular em regime permanente.
Fundamentos 10 Descreva o que são escoamentos laminares e escoamentos turbulentos? Quais as diferenças entre os mesmos? Como podemos distingui-los? Explique sua importância para a mecânica dos fluidos.

Estática dos Fluidos

Esática dos fluidos 1 Enuncie a Equação de Euler. Explique o que representa cada termo desta equação significa, indique as condições necessárias e suficientes para sua aplicação e descreva duas situações práticas onde a mesma pode ser empregada. Indique sua importância para a mecânica dos fluidos.
Esática dos fluidos 2 Em relação à equação de Euler, enuncie a mesma, explique seu significado e cite as considerações para sua aplicação. Cite sua importância para a mecânica dos fluidos.
Esática dos fluidos 3 Discuta a respeito da estabilidade de corpos flutuantes em fluidos. Descreva as principais forças que agem nestes corpos e seus pontos de aplicação no mesmo. Por fim, descreva o critério necessário para que um corpo ao ser inclinado de sua posição normal não venha a tombar.

Cinemática e dinâmica dos fluidos

Escoamentos e Bernoulli 1 O que significa dizer que um escoamento é incompressível?
Escoamentos e Bernoulli 2 O que significa dizer que um escoamento é irrotacional?
Escoamentos e Bernoulli 3 Enuncie a equação de Bernoulli, explique o significado físico de cada termo e explique sua importância para a mecânica dos fluidos. Dê um exemplo de fenômeno real no qual sua aplicação é corriqueira.

Leis de Conservação na forma integral

Leis Integrais 1 Enuncie e explique o significado e a importância do Teorema do Transporte de Reynolds para a mecânica dos fluidos, O ele diz? Explique cada um dos termos da equação geral. Exemplifique um fenômeno que pode ser estudado com a aplicação deste teorema.
Leis Integrais 2 Enuncie, explique cada termo e cite as condições de aplicação da equação da lei de conservação de energia em sua forma integral. Cite sua importância para a mecânica dos fluidos.
Leis Integrais 3 Enuncie o princípio de conservação da quantidade de movimento para volumes de controle em sua forma integral. Explique o significado físico de cada termo. Explique sua aplicação em problemas de mecânica dos fluidos. O que é possível se dizer sobre o momento de um corpo se a força total que age sobre ele é nula? Dê um exemplo de fenômeno real que ocorre em instalações industriais no qual sua aplicação é corriqueira.

Escoamento incompressível em tubos

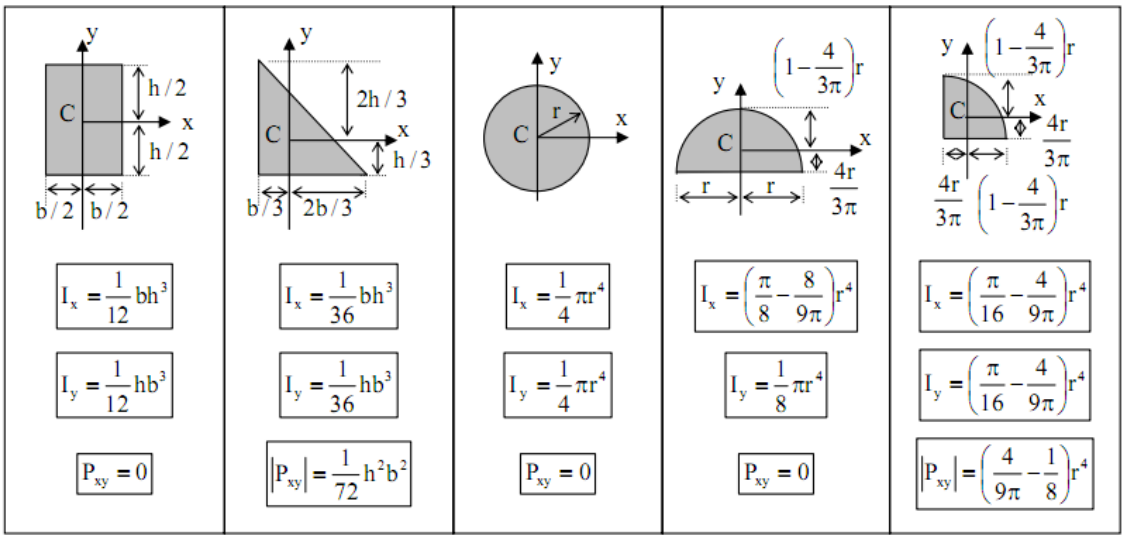
Escoamento em tubos 1 Conceitue escoamentos laminares e turbulentos, diferencie-os, indique como o conhecimento destes tipos de escoamentos são importantes no projeto de instalações que transportam fluidos em tubulações.
Escoamento em tubos 2 Defina, explique a origem e o significado das tensões de Reynolds em escoamentos turbulentos.
Escoamento em tubos 3 Explique o que é um escoamento totalmente desenvolvido e como este ocorre ao longo de uma tubulação. Cite suas implicações em instalações industriais.
Escoamento em tubos 4 Defina camada limite para o escoamento de um fluido em uma tubulação. Explique sua formação e desenvolvimento hidráulico ao longo de um tubo. Diferencie-a em escoamentos laminares e turbulentos. Discuta as implicações da mesma para o projeto de sistemas de tubulações.
Escoamento em tubos 5 Explicar por que existem critérios técnicos para determinar o ponto da tubulação onde deve haver a instalação de instrumentos de medição. Explique a importância do posicionamento correto de instrumentos de medição de vazão, temperatura etc. em tubulações em função do regime de escoamento. Discuta os erros que podem ocorrer em virtude do tipo de escoamento existente e da presença de singularidades nas proximidades.
Escoamento em tubos 6 Defina, diferencie e explique as características de escoamentos laminares e turbulentos considerando o escoamento de um fluido numa tubulação de área transversal circular. Discuta a respeito das tensões viscosas em escoamentos laminares e turbulentos. Em qual destes escoamentos tem-se maiores tensões? Por quê? Explique como elas atuam para determinar os perfis de velocidade de um fluido escoando em uma tubulação de seção reta circular em regime permanente.
Escoamento em tubos 7 Explique o que é um escoamento totalmente desenvolvido e como este se desenvolve ao longo de uma tubulação. Cite suas implicações em instalações industriais.
Escoamento em tubos 8 Defina, explique a diferença e o significado de cada um dos seguintes termos: viscosidade cinemática, viscosidade aparente e viscosidade turbilhonar. Cite a importância de cada um para a mecânica dos fluidos.

Análise dimensional

Análise dimensional 1 Explique com suas palavras o emprego do Teorema Pi de Buckingham em problemas de mecânica dos fluidos. Ilustre duas aplicações a problemas reais.

DADOS:

Tabela dos momentos de inércia das formas básicas



Geometria	Figura	$\bar{x}$	$\bar{y}$	Área
Área Semi-parabólica	A área entre a curva $y = \frac{h}{b^2}x^2$ e o eixo y, de x =0 a x = b.	$\frac{3b}{8}$	$\frac{3h}{5}$	$\frac{2bh}{3}$
Área Parabólica	A área entre a curva $y = \frac{h}{b^2}x^2$ e a linha y = h.	0	$\frac{3h}{5}$	$\frac{4bh}{3}$

DADOS:

Propriedades da Água			
Temperatura (ºC)	Viscosidade cinemática (m^2/s)	Viscosidade dinâmica ($N \times s / m^2$)	Pressão de vapor (abs) (kPa)
5	$1{,}519 \times 10^{-6}$	$1{,}519 \times 10^{-3}$	0,87
10	$1{,}308 \times 10^{-6}$	$1{,}308 \times 10^{-3}$	1,13
15	$1{,}141 \times 10^{-6}$	$1{,}140 \times 10^{-3}$	1,60
20	$1{,}007 \times 10^{-6}$	$1{,}005 \times 10^{-3}$	2,34
30	$0{,}804 \times 10^{-6}$	$0{,}801 \times 10^{-3}$	4,24

Material	Rugosidade
Ferro fundido	0,026 mm
Ferro forjado	0,046 mm

Acessório	Coeficiente de perda de carga singular (K_L)
Entrada súbita	0,78
Válvula gaveta aberta	0,10
Válvula globo aberta	10,0
Válvula de retenção	1,04
Válvula de pé	1,42
Cotovelo 90º	0,40
Cotovelo 45º	0,22
Saída	1,00

Dados adicionais:
- $g = 9{,}81 m/s^2$; 1 hp = 745,7 W;
- Densidade do mercúrio = 13,6;
- Massa específica da água (15 C) = 999,7 kg/m³;
- Massa específica da água (20 C) = 999,3 kg/m³;
- Massa específica da água (25 C) = 999,0 kg/m³;
- Coeficientes de correção da energia cinética e do momento linear iguais a 1,05.

<u>Fórmulas em coordenadas cilíndricas que podem auxiliar na resolução das questões:</u>

Equação 1: Vetor vorticidade.

[redacted]

Equação 2: Tensor taxa de deformação.

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{rr} & \varepsilon_{r\theta} & \varepsilon_{rz} \\ \varepsilon_{\theta r} & \varepsilon_{\theta\theta} & \varepsilon_{\theta z} \\ \varepsilon_{zr} & \varepsilon_{z\theta} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\left(\frac{\partial u_r}{\partial r}\right) & \left(r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{u_\theta}{r}\right) + \frac{1}{r}\frac{\partial u_r}{\partial \theta}\right) & \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r}\right) \\ \left(r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{u_\theta}{r}\right) + \frac{1}{r}\frac{\partial u_r}{\partial \theta}\right) & \left(\frac{1}{r}\frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r}\right) & \left(\frac{1}{r}\frac{\partial u_z}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial z}\right) \\ \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r}\right) & \left(\frac{1}{r}\frac{\partial u_z}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial z}\right) & 2\left(\frac{\partial u_r}{\partial z}\right) \end{pmatrix}$$

$onde\, \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}, \forall\, i \neq j.$

Equação de Haaland: $$\frac{1}{f^{1/2}} \approx -1{,}8 \log\left[\left(\frac{\varepsilon / D}{3{,}7}\right)^{1{,}11} + \frac{6{,}9}{Re}\right]$$

Exercícios Recomendados

Livro: YOUNG, DONALD F., MUNSON, BRUCE R. E OKIISHI, Fundamentos da Mecânica dos Fluidos. Tradução da 4ª edição norte-americana. Edgard Blucher, 2004.

Capítulo 1: 1.1 a 1.5; 1.16 a 1.20; 1.36; 1.37; 1.41 a 1.61; 1.62; 1.63; 1.65; 1.70; 1.72; 1.73; 1.76; 1.78.

Capítulo 2: 2.3; 2.4; 2.7; 2.7; 2.9; 2.10; 2.21; 2.22; 2.25; 2.26; 2.27; 2.28; 2.32; 2.33; 2.34; 2.41; 2.44; 2.47; 2.50; 2.51; 2.52; 2.60; 2.61; 2.68; 2.69; 2.75; 2.79, 2.81, 2.83.

Capítulo 3: 3.1 a 3.10, 3.12 a 3.16, 3.18 a 3.20, 3.29 a 3.33, 3.34, 3.39, 3.40, 3.44, 3.47, 3.49 a 3.53, 3.55, 3.56, 3.58, 3.60, 3.62, 3.64 a 3.71, 3.78 a 3.85, 3.87, 3.92, 3.94, 3.101, 3.102.

Capítulo 4: 4.1 a 4.7, 4.10, 4.14, 4.15, 4.17 a 4.19, 4.21 a 4.23, 4.26, 4.27, 4.29, 4.35, 4.36, 4.37,4.45, 4.46, 4.48, 4.51, 4.54-4.57, 4.59, 4.60, 4.61.

Capítulo 5: 5.4 e 5.5, 5.8 a 5.20, 5.29 a 5.34, 5.37-5.40, 5.42, 5.43, 5.44, 5.47, 5.50-5.52, 5.54-5.56, 5.58 a 5.62, 5.88-5.93, 5.95, 5.97, 5.99, 5.102-5.111, 5.115-5.128.

Capítulo 6: 6.1 a 6.8, 6.19 a 6.21, 6.69, 6.76-6.78, 6.80-6.83, 6.86- 6.92, 6.97, 6.98.

Referências Bibliográficas:

YOUNG, DONALD F., MUNSON, BRUCE R. E OKIISHI, Fundamentos da Mecânica dos Fluidos. Tradução da 4ª edição norte-americana. Edgard Blucher, 2004.

ÇENGEL, Y. A. e CIMBALA, J. M. Mecânica dos Fluidos. 1ª. Edição. McGraw Hill – Artmed, 2007.

BIRD, R. B. et al. Fenônemos de Transporte. 2ª Edição. LTC. 2004.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. Mecânica dos Fluidos - 6ª edição, LTC, 2006.

Histórico de atualizações
Versão 1.0 – 2011.2
Versão 1.1 – 2012.1
Versão 1.2 – 2013.1
Versão 1.3 – 2016.2