Mecánica de Fluidos
SEGUNDO PARCIAL 16 – 06 – 2011

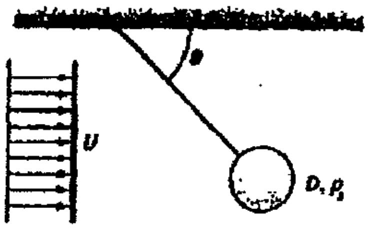
TEMA 1

Parte teórica

Ejercicio 1
Una placa plana delgada es colocada paralela a un flujo de 20 ft/s de agua a 20C¿A qué distancia desde el borde de ataque el espesor de la capa limite será de 1 in?

Ejercicio 2

Una esfera pesada de acero, y de diametro D, está agarrada a un tensor formando un ángulo θ, cuando está inmersa en un fluido de velocidad U.
Deducir una expresión para el ángulo en función de datos de la esfera y del flujo
Despreciar la resistencia que el aire le hace al tensor.



Ejercicio 3

Cuando únicamente influyen la gravedad y la inercia, demostrar que, para modelo y prototipo, la relación de caudales es igual a la relación de las longitudes elevada a las 5/2.

Mecánica de Fluidos
SEGUNDO PARCIAL 16 – 06 – 2011

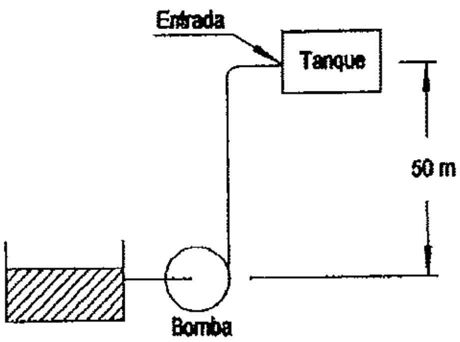
TEMA 2

Parte practica

EJERCICIO 1

Un cartel de 2 x 3 m pesa 400 N, está sobre una base apoyado en el suelo de un supermercado. ¿Qué velocidad del viento lo movería si es coeficiente de rozamiento estático es de 0,65? Tomar ρ_{aire} =1,23 Kg/m³; ν_{aire} = 1,26 10^{-5} m²/seg.

EJERCICIO 2



Una bomba con una eficiencia de 75% bombea un caudal de agua de 0,1 m³/seg hasta la entrada de un tanque. El depósito se encuentra a unos 50 metros sobre el nivel de la bomba y la presión que tiene que tener el fluido a la entrada del tanque es de 180 Kpa. La bomba succiona de un recipiente abierto a la atmósfera y toda la instalación tiene una cañería de diámetro 8 cm. La pérdida de energía de toda la instalación expresada como función de la velocidad es de [5,6 $V^2/2g$]. Con estos datos calcular cuál será la potencia que debe entregarse a la bomba para que pueda bombearse el líquido.

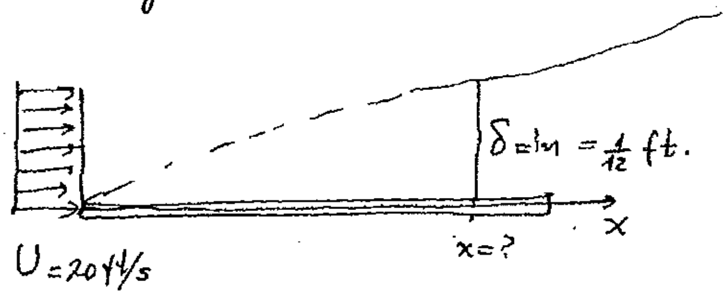
Tomar: ρ_{agua} =1000 Kg/m³; 10,33 metros de agua es 1 bar ó 1 Kg/cm² ó 101.3 Kpa.

EJERCICIO 3

Pruebas de arrastre demuestran que el arrastre en una placa cuadrada colocada normal a la velocidad de la corriente libre es una función de la velocidad, V, la densidad , la viscosidad, la intensidad de la turbulencia de la corriente libre, u' y la escala de turbulencia Ls. Aquí u' y Ls se miden en ft/s y ft respectivamente. Por análisis dimensional desarrolle grupos Pi que podrían usarse para correlacionar los datos experimentales

Ejercicio 1

Para agua a 20°C $\nu = 1.09 \times 10^{-5}\ ft^2/s$



Si suponemos flujo laminar $\dfrac{\delta}{x} = \dfrac{5}{\left(\frac{Ux}{\nu}\right)^{1/2}}$

$$\Rightarrow \cancel{x = \frac{\delta}{5}\left(\frac{Ux}{\nu}\right)^{1/2}}$$

$$\frac{\delta}{x} = \frac{5}{\left(\frac{U}{\nu}\right)^{1/2} x^{1/2}}$$

$$\frac{\delta}{5}\left(\frac{U}{\nu}\right)^{1/2} = \frac{x}{x^{1/2}} = x^{1/2}.$$

$$\boxed{\left(\frac{\delta}{5}\right)^2 \left(\frac{U}{\nu}\right) = x.} \quad (1).$$

$$\frac{U}{\nu} = \frac{20\ ft/s}{1.09\times10^{-5}\ ft^2/s} = 1.84\times10^{6}\ ft^{-1}$$

$$\Rightarrow x = \frac{\left(\frac{1}{12} ft\right)^2}{25} \cdot 1.84\times10^{6}\ ft^{-1} = 511\ ft.$$

Testeamos Re:

$$Re_x = \frac{Ux}{\nu} = \frac{20\ ft/s\ (511\ ft)}{1.09\times10^{-5}\ ft^2/s} = 9.4\times10^{7}.$$

este Re_x corresponde a un flujo turbulento.

$$\Rightarrow \frac{\delta}{x} = \frac{0.16}{\left(\frac{Ux}{\nu}\right)^{1/7}} = \frac{0.16}{\left(\frac{U}{\nu}\right)^{1/7} \cdot x^{1/7}}.$$

$$\frac{\delta}{0.16}\cdot\left(\frac{U}{\nu}\right)^{1/7} = \frac{x}{x^{1/7}} = x^{6/7} \Rightarrow$$

$$x = \left(\frac{\delta (U/\nu)^{1/7}}{0.16} \right)^{7/6} = \left[\frac{\left(\frac{1}{12}\,ft\right) \cdot \left(1{,}84 \times 10^6\, ft^{-1}\right)^{1/7}}{0.16} \right]^{7/6} = (4.09)^{7/6} = \boxed{5.17\ ft}$$

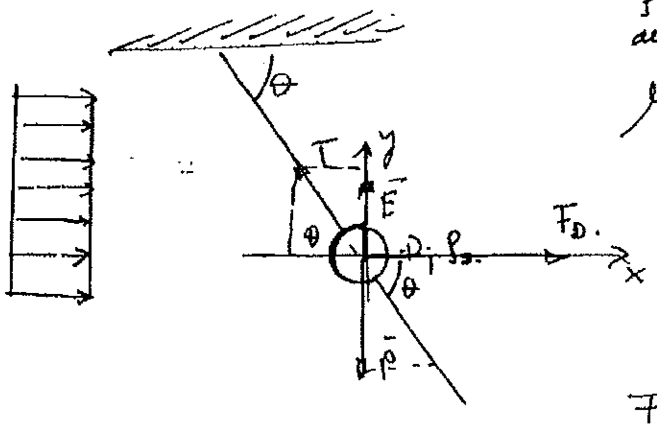
$$\rightarrow Re_x = \frac{(20\ ft/s) \cdot (5.17\ ft)}{(1.09 \times 10^{-5}\ ft^2/s)} = 9.5 \times 10^6.$$

Ésta es la posición correcta! el flujo es turbulento.

1 pie = 30,48 cm = 0,3048 m

$5{,}17\,ft \simeq \boxed{1{,}60\ m}$

ejercicio 2



$\rho_{air} = 1.225 \frac{kg}{m^3}$

$\mu: 1.78 \cdot x10^{-5} \frac{kg}{m s}$

Se asume equilibrio:

$$\begin{cases} -T\cos\theta + F_D = m \cdot a_x = 0 \ (1) \\ T \cdot \sin\theta - mg = m \cdot a_y = 0 \ (2) \end{cases}$$

$F_D = T \cdot \cos\theta$

$mg = T \cdot \sin\theta + E = T\sin\theta + \rho g V_s$

$\frac{F_D}{mg} = \frac{1}{tg\theta}$

$tg\theta = \frac{mg}{F_D}$ (3)

$\rho_e = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho V = \rho \cdot \frac{4}{3}\pi\left(\frac{D}{2}\right)^3 = \rho_e \cdot \frac{4}{3}\pi\frac{D^3}{8}$

$\therefore mg = \rho_e \frac{4}{3}\pi\frac{D^3}{8_2} g = \boxed{\frac{\pi D^3 g}{6}}$ (4)

$E = \rho g \frac{4}{3}\pi\frac{D^3}{8_2} = \boxed{\frac{\pi D^3}{6} \rho g}$ (6)

$F_D = \frac{1}{2}\rho \cdot U^2 \pi R^2 C_D$

$\frac{1}{2}\rho U^2 \pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 C_D$

$= \frac{1}{2}\rho U^2 \pi \frac{D^2}{4} \cdot C_D$

$\boxed{F_D = \frac{\pi}{8}\rho U^2 D^2 \cdot C_D}$ (5)

$$\boxed{tg\theta = \left[\frac{(\rho_e - \rho) g \frac{\pi}{6} \cdot D^3}{\frac{\pi}{8} C_D \rho U^2 D^2}\right]}$$

(7) $tg\theta = \frac{4}{3}\frac{(\rho_e - \rho) \cdot g D}{C_D \rho U^2}$

~~Si calculamos Re para los datos dados:~~

$$\cancel{Re_D = \frac{1.225(40).(0.03)}{1.78 \cdot 10^{-5}}}$$

Ejercicio 3

Si influye la gravedad $\Rightarrow F_1 = mg \Rightarrow$ ~~Ug~~

Si influye la inercia $\Rightarrow F_2 = ma \Rightarrow$ ~~Ua~~

$$\cancel{\frac{F_2}{F_1} = \frac{ma}{mg} = Fr = \frac{v^2}{Rg} = \left(\frac{L}{t}\right)^2}$$

La relación de fuerzas $\frac{F_2}{F_1}$ es número el nº de Froude.

$$Fr)_m = Fr)_p$$

$$Re)_m = Re)_p$$

$$\left.\frac{V^2}{Lg}\right)_m = \left.\frac{V^2}{Lg}\right)_p \qquad \frac{V_m^2}{L_m \cancel{g_m}} = \frac{V_p^2}{L_p \cancel{g_p}}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{V_m^2}{V_p^2} = \sqrt{\left(\frac{L_m}{L_p}\right)}$$

$$Q = \frac{A_m \cdot V_m}{A_p \cdot V_p} = \sqrt{\frac{L_m}{L_p}} \cdot \frac{L_m^2}{L_p^2} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{5/2} \#$$

Ejercicio 3.

$$F_D = f(V;\ \rho;\ \mu;\ u';\ L_s;\ )$$

$n = 6.$
$k = 3 \Rightarrow \Pi_1 \quad \Pi_2 \quad \Pi_3$

$$\Pi_1 = g(\Pi_2;\ \Pi_3).$$

Grupo dimensionales comunes: $V;\ \rho;\ L_s$.

$$\begin{cases} \Pi_1: & V^{a_1} \cdot \rho^{a_2} \cdot L_s^{a_3} \cdot F_D. \\ \Pi_2: & V^{b_1}\ \rho^{b_2}\ L_s^{b_3} \cdot \mu. \\ \Pi_3: & V^{c_1}\ \rho^{c_2}\ L_s^{c_3} \cdot u'. \end{cases}$$

Π_1:

$$[\Pi_1]. \quad \left(\frac{L}{t}\right)^{a_1} \cdot \left(\frac{m}{L^3}\right)^{a_2} \cdot L^{a_3} \cdot \left(\frac{mL}{t^2}\right)$$

$L \quad a_1 - 3a_2 + a_3 + 1 = 0.$

$t \quad -a_1 - 2 = 0. \quad \boxed{a_1 = -2}$

$m \quad a_2 + 1 = 0. \Rightarrow \boxed{a_2 = -1}.$

$$(-2) - 3(-1) + a_3 + 1 = 0.$$
$$-2 + 3 + a_3 + 1 = 0.$$
$$2 + a_3 = 0.$$
$$\boxed{a_3 = -2}$$

$$\Pi_1 : V^{-2} \cdot \rho^{-1} \cdot L_s^{-2} \cdot F_D \cdot = \boxed{\frac{F_D}{V^2 \rho L_s^2}}$$

$$\Pi_2 : V^{b_1} \rho^{b_2} L_s^{b_3} \mu$$

$$\left(\frac{L}{t}\right)^{b_1} \left(\frac{m}{L^3}\right)^{b_2} L_s^{b_3} \left(\frac{m}{L\,t}\right)$$

$L: \; b_1 - 3b_2 + b_3 - 1 = 0$

$t: \; -b_1 - 1 = 0 \quad \underline{b_1 = -1}$

$m: \; b_2 + 1 = 0 \Rightarrow \underline{b_2 = -1}$

$-1 - 3(-1) + b_3 - 1 = 0$

$-1 + 3 + b_3 - 1 = 0$

$b_3 + 1 = 0$

$b_3 = -1$

$$\Pi_2 : V^{-1} \rho^{-1} L_s^{-1} \mu = \frac{\mu}{V \rho L_s} = \frac{1}{Re}$$

$$\boxed{\Pi_2 = Re}$$

$$\Pi_3 : V^{c_1} \rho^{c_2} L_s^{c_3} u' \quad \Rightarrow \Pi_3 = V^{-1} \rho^{0} L_s^{0} u'^{1} \Rightarrow \boxed{\Pi_3 = \frac{u'}{V}}$$

$$\left(\frac{L}{t}\right)^{c_1} \left(\frac{m}{L^3}\right)^{c_2} L^{c_3} \frac{L}{t}$$

$m: \; \underline{c_2 = 0}$

$L: \; c_1 - 3c_2 + c_3 + 1 = 0$

$c_3 - 1 - c_1 = -1 + 1 = \underline{0}$

$-c_1 - 1 = 0 \quad \underline{c_1 = -1}$

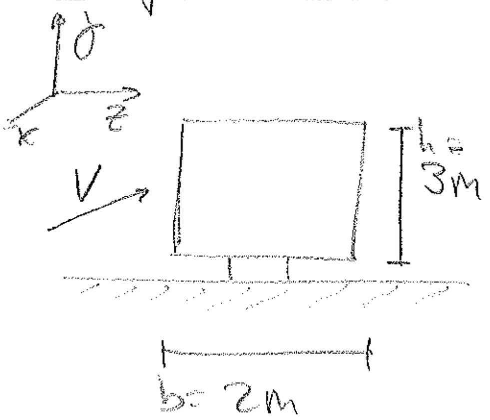
$$\Rightarrow \frac{F_D}{V^2 \rho L_s^2} = f\left(Re; \frac{u'}{V}\right).$$

$$\boxed{F_D = V^2 \rho L_s^2 \cdot f\left(Re; \frac{u'}{V}\right).}$$

f - experimental.

Ejercicio 1

Esquema del problema



Hallar V (velocidad del viento)

Datos: b, h, W (peso), $\mu_{estático}$, δ_{aire}, ν_{aire}

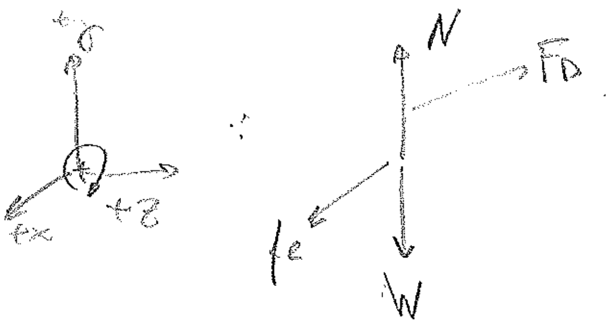
Resolución:

Para el cartel; $\boxed{\sum \vec{F} = \vec{0}}$ (1) $\boxed{\sum \vec{M} = \vec{0}}$ (2)

eje y: alto de la losa, eje z: ancho de la losa

eje x: normal a la losa

DCL



$\sum F_y = 0$

$\sum F_y = N - W = 0$; N: fuerza normal

$\boxed{N = W = 400\,N}$ (3)

·) por definición: fe (fuerza de rozamiento estático)

$\boxed{f_e = \mu_e N}$ (4) En este caso tomo la igualdad de la ec. $f_e \leq \mu_e \cdot N$; caso de fe máxima.

·) $\sum F_x = 0$, $F_D - f_e = 0$; $\boxed{F_D = \mu_e \cdot N}$ (5)

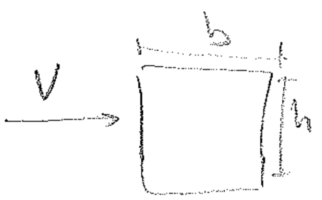
·) por definición; $\boxed{F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \delta \cdot V^2 A}$ (6)

donde: $\boxed{A = b \cdot h}$ (7), $C_D = f(Re)$, calculo el Re.

$\boxed{Re = \frac{\delta \cdot V \cdot L}{\mu} \quad \frac{V \cdot L}{\nu}}$ (7) tomo L = b (longitud característica, base)

dato faltante: V (velocidad). Problema de 3 incógnitas

(Re, Cd, V) y 2 ecuaciones (6) y (7). Puedo probar por tanteo e iteración. Utilizo datos de tabla 11-1 de Cengel (opcional):



Válido p/ $Re > 10^4$

b/h	CD
0,0	1,9
0,1	1,9
0,5	2,5
1,0	2,2
2,0	1,7
3,0	1,3

en este caso:

$$b/h = \frac{2}{3} = 0{,}67$$

Interpolo entre puntos;

$$y = A\,x + B$$

$$2{,}5 = A \cdot 0{,}5 + B$$

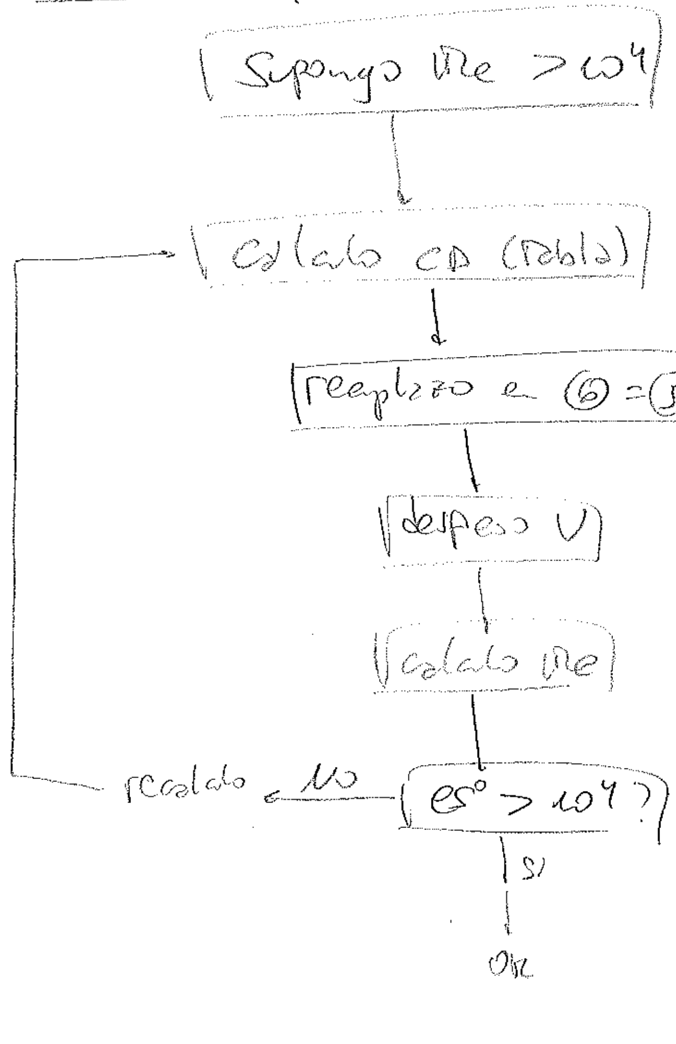
$$2{,}2 = A \cdot 1 + B$$

$$0{,}3 = -0{,}5A \;, \quad \boxed{A = -0{,}6}$$

$$2{,}5 = -0{,}6 \cdot 0{,}5 + B, \quad B = 2{,}8, \quad \boxed{CD = -0{,}6 \cdot \frac{b}{h} + 2{,}8}$$

$$CD = -0{,}6 \cdot 0{,}67 + 2{,}8 \;, \quad \boxed{CD = 2{,}4}$$

En iteración:



Con CD = 2,4, reemplazo en (6).

$$\frac{1}{2} \cdot CD \cdot \delta\, V^2 \cdot b \cdot h = \mu_e \cdot N$$

$$V = \left[\frac{\mu_e \cdot N \cdot 2}{CD\,\delta \cdot b \cdot h}\right]^{1/2}$$

(*) sigue en próxima hoja.

$$V = \left[\frac{0{,}05 \cdot 400\,\cancel{N} \cdot 2 \cdot \cancel{kg} \cdot m \cdot m^3}{2{,}4 \cdot 10^3\,\cancel{kg} \cdot 2\cancel{m} \cdot 3\cancel{m}\,s^2 \cdot \cancel{N}}\right]^{1/2} ; \boxed{V = 0{,}19\,\frac{m}{s}}$$

en Re; $Re = \dfrac{V \cdot L}{\nu} = \dfrac{0{,}19\,\cancel{m} \cdot 2\cancel{m}\;\cancel{s}}{\cancel{s} \cdot 1{,}26 \cdot 10^{-5}\,\cancel{m^2}}$; $\boxed{Re = 3{,}02 \cdot 10^4}$

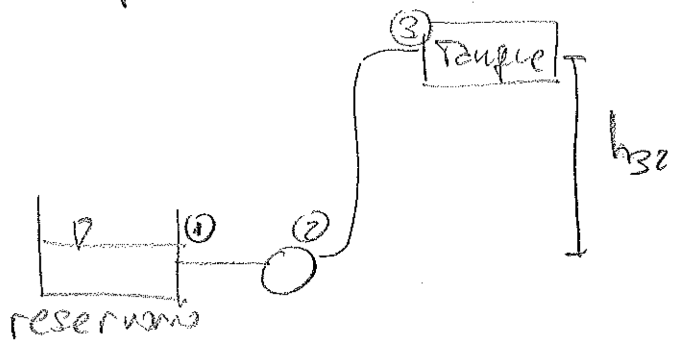
Vemos que $Re > 10^4$; $\therefore$ es válido el cálculo de C_D.

Respuesta: $\boxed{V = 0{,}19\,\frac{m}{s}}$

Ejercicio 2: Práctica

Hallar $\dot{L}_b$ (potencia de bomba)

Esquema:



Datos: η, Q, h_{32}, P_3, ϕ, $h_{perdida}$ ($h_p = f(V^2, g)$); δ_{agua}, P_{atm}

Consideraciones previas: ·) Volumen control: fluido entre ① y ②

·) Variación de energía interna despreciable.

·) ①: Superficie libre del reservorio

Resolución:

·) Aplico ec. de energía entre ① y ③

$$\boxed{\frac{(P_3 - P_1)}{\delta \cdot g} + \frac{V_3^2 - V_1^2}{2g} + (h_3 - h_1) = hb - hp} \quad \boxed{1}$$

Donde: ·) $P_3 = 180 \, kPa$

·) $P_1 = P_{atm} = 101{,}3 \, kPa$

·) $V_1 \to 0$ (en reservorio, fluido casi en reposo)

·) $h_3 - h_1 = h_3 - h_2$ dado que $h_1 = h_2$; $h_3 - h_1 = 50 \, m$

·) hp (altura de pérdida), $\boxed{hp = 5{,}6 \frac{V^2}{2g}} \quad \boxed{2}$

·) Puede expresarse $V_3 = f(Q)$, dado $Q = V \cdot A$

$$Q = V \cdot \frac{\pi \phi^2}{4} \longrightarrow \boxed{V_3 = \frac{4Q}{\pi \phi^2}} \quad \boxed{3} \qquad V_3 = 19{,}84 \, \frac{m}{s}$$

Con $\boxed{2}$ y $\boxed{3}$ en $\boxed{1}$, queda:

$$\left(\frac{P_3 - P_1}{\delta \cdot g}\right) + \frac{V_3^2 - \cancel{V_1^2}^{\,0}}{2g} + h_3 - h_1 = hb - \frac{5{,}6 \cdot V_3^2}{2g}$$

Tip! la pérdida de energía $hp = 5{,}6 \cdot \frac{V^2}{2g}$; refiere a la velocidad del flujo circulante por tubería, por tanto es aplicable la ec $\boxed{3}$ para cálculo de V_1

$$\frac{P_3 - P_1}{\delta \cdot g} + \frac{V_3^2}{2g} + h_{31} = hb - \frac{5{,}6 \cdot V_3^2}{2g}$$ despejo h.b:

$$\boxed{hb = \frac{P_3 - P_1}{\delta \cdot g} + \frac{V_3^2}{2g} \cdot (1 + 5{,}6) + h_{31}} \quad \boxed{4}$$

•) La potencia ideal entregada por bomba se define:

$$\boxed{(\dot{L}_b)_{id} = \delta \cdot g \cdot Q \cdot hb} \quad (5)$$

•) Expreso $V = f(Q)$ con $\boxed{3}$ en (4):

$$\boxed{hb = \frac{P_3 - P_1}{\delta \cdot g} + \frac{16\,Q^2 \cdot 6{,}6}{\pi^2 \cdot \phi^4 \cdot 2 \cdot g} + h_{31}} \quad \boxed{4^*}$$

reemplazo datos en $\boxed{4^*}$, luego en (5):

$$hb = \frac{(180 - 101{,}3)\,\cancel{kPa} \cdot \cancel{m^3} \cdot \cancel{1} \cdot \cancel{10^3 Pa} \cdot \cancel{N}\,\cancel{kg} \cdot m}{\cancel{10^3}\,\cancel{kg} \cdot 9{,}81\,\cancel{m}\,\cancel{kPa}\,\cancel{m^2}\,\cancel{Pa}\,\cancel{s^2}\,\cancel{N}} +$$

$$+ \frac{16 \cdot 6{,}6 \cdot \cancel{s^2} \cdot (0{,}1)^2\,\cancel{m^6}}{2 \cdot \pi^2 \cdot 9{,}81\,\cancel{m} \cdot (8 \cdot 10^{-2})^4\,\cancel{m^4} \cdot \cancel{s^2}} + 50\,m$$

$$hb = 8{,}02\,m + 133{,}14\,m + 50\,m; \qquad \boxed{hb = 191{,}16\,m}$$

En ec. (5):

$$\dot{L}b)_{id} = 10^3 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{9{,}81\,m}{s^2} \cdot \frac{0{,}1\,m^3}{s} \cdot 191{,}16\,m \; ; \; \underbrace{\underbrace{\underbrace{\frac{kg \cdot m}{s^2}}_{N} \cdot m}_{J} \cdot \frac{1}{s}}_{W}$$

$$\dot{L}b)_{id} = 187528 \cdot \cancel{W} \cdot \frac{1\,kW}{10^3\,\cancel{W}}$$

$$\boxed{\dot{L}b)_{id} = 187{,}53\,kW} \quad (5)$$

Considerando $\eta = 75\%$ (eficiencia) $\quad$ $\dot{L}_{real} \rightarrow \dot{L}_{id}$, $\Downarrow$ $L_{perdida}$

$$\boxed{\eta = \frac{\dot{L}b)_{id}}{\dot{L}b)_{real}}} \quad (6)$$

$$\dot{L}b)_{real} = \frac{\dot{L}b)_{id}}{\eta} = \frac{187{,}53\,kW}{0{,}75} \qquad \boxed{\dot{L}b)_{real} = 250{,}04\,kW}$$

A la bomba deben entregarsele 250,04 kW para que esta le entregue al fluido 187,53 kW, el resto va a perdidas.

<u>Verificación</u> reemplazo valores encontrados en ec (1):

$$\frac{(180-101{,}3)}{9{,}81 \cdot \cancel{10^3}} \cdot \cancel{10^3}\,m + \frac{(19{,}89)^2\,m^2\,s^2}{s^2 \cdot 2 \cdot 9{,}81\,m} + 50\,m = 191{,}16\,m - \frac{5{,}6\,(19{,}89)^2}{2 \cdot 9{,}81}\,m$$

$$78{,}186\,m \simeq 78{,}24\,m$$

$$\text{error} \simeq 0{,}07\%$$

<u>Ejercicio 3</u> Arrastre (F_D), $F_D = f(V, \delta, \mu, u', L_s, l)$

Hallar relación funcional con números Pi

<u>V</u>: velocidad, <u>δ</u>: densidad, <u>μ</u>: viscosidad <u>u'</u>: intensidad de turbulencia en corriente libre, <u>L_s</u>: escala de turbulencia.

<u>l</u>: longitud de lado, ~~placa~~ placa cuadrada.

¿Números pi? = Variables − magnitudes = 7 − 3 = 4

¿Consideraciones previas: ·) ¿pueden aparecer?
¿Reynolds? ¿Coeficiente de drag?

·) ¿Hay variables de igual magnitud? V y u', L_s y l.

Resolución: $[F_D] = \frac{M \cdot L}{T^2}$; $[V] = \frac{L}{T}$; $[\delta] = \frac{M}{L^3}$; $[\mu] = \frac{M}{LT}$

$[u'] = \frac{L}{T}$, $[L_s] = L$, $[l] = L$

·) $\pi_1 = Re$? $\quad \pi_1 = V^a \cdot \delta^b \cdot \mu^c \cdot l^1$

$$[\pi_1] = \left(\frac{L}{T}\right)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b \left(\frac{M}{LT}\right)^c \cdot L^1 \rightarrow \begin{cases} L) & a - 3b - c + 1 = 0 \\ M) & b + c = 0 \\ T) & -a - c = 0 \end{cases}$$

$b = -c$, $a = -c$, $\quad -c - 3(-c) - c + 1 = 0$

$-c + 3c - c + 1 = 0$, $\boxed{c = -1}$

$\boxed{a = 1}$ $\boxed{b = 1}$

$$\pi_1 = V^1 \cdot \delta^1 \cdot \mu^{-1} \cdot l^1 \Rightarrow \boxed{\pi_1 = \frac{V \cdot \delta \cdot l}{\mu} = Re} \quad (1)$$

·) $\pi_2 = Cd$? $\quad \pi_2 = F_D^a \cdot V^b \cdot l^c \cdot \delta^1$

$$[\pi_2] = \left(\frac{ML}{T^2}\right)^a \left(\frac{L}{T}\right)^b \cdot (L)^c \left(\frac{M}{L^3}\right)^1 \rightarrow \begin{cases} M) & a + 1 = 0, \ \boxed{a = (-1)} \\ T) & -2a - b = 0, \ \boxed{b = 2} \\ L) & a + b + c - 3 = 0 \ \boxed{c = 2} \end{cases}$$

$\pi_2 = F_D^{-1} \cdot V^2 \cdot l^2 \cdot \delta^1$, llamo $\pi_2^* = \frac{1}{\pi_2}$

$$\boxed{F_D = \pi_2^* \cdot V^2 \cdot \delta \cdot \underbrace{l^2}_{\text{Área de placa}}} \quad (2)$$

donde: $\pi_2^* = \frac{1}{2} Cd$ (Fórmula de Drag)

$$\boxed{\Pi_3 = \frac{v'}{v}} \quad (3) \qquad \boxed{\Pi_4 = \frac{l}{L_s}} \quad (4)$$

Finalmente:

$$\Pi_2^* = f(\Pi_1, \Pi_3, \Pi_4)$$

$$\boxed{F_D = \rho \cdot v^2 \cdot l^2 \cdot f\left(Re, \frac{v'}{v}, \frac{l}{L_s}\right)} \quad (5)$$