



Universidad Nacional Experimental del Táchira
Departamento de Ingeniería Mecánica
Núcleo de Termofluidos

Asignatura: Laboratorio de Mecánica de Fluidos
Código: 0121 L
Carrera: Ingeniería Mecánica
Profesor: Rubén D. Omaña C., Nelson Fumo V.,
Fernando González
Apoio Técnico: T.S.U. Jorge Bedoya

Práctica IV: Pérdidas en sistemas hidráulicos de tuberías

Objetivos específicos:

- ❖ Estudiar la ecuación general de la energía para flujo viscoso, aplicado a flujo interno en tuberías y accesorios.
- ❖ Calcular experimentalmente coeficientes de fricción, coeficientes de pérdidas y longitud equivalente para diferentes accesorios.
- ❖ Comparar los resultados experimentales con los resultados teóricos reportados.

Fundamentos:

Para el cálculo de las pérdidas en los sistemas hidráulicos de tuberías es necesario conocer la ecuación de la primera ley de la termodinámica o ecuación de la conservación de la energía, la cual establece que:

$$\frac{p_{salida}}{\gamma} + \frac{V_{salida}^2}{2g} + Z_{salida} = \frac{p_{entrada}}{\gamma} + \frac{V_{entrada}^2}{2g} + Z_{entrada} + \text{pérdidas}$$

Es común ver esta ecuación escrita de la siguiente manera

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + hl \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde “ hl ” (pérdida de carga total) son las pérdidas totales que ocurren en el sistema y que a su vez están constituidas por dos tipos de pérdidas:

$$hl = hl_M + hl_m \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

hl_M = pérdidas mayores debidas a los efectos de rozamiento en un flujo completamente desarrollado de un conducto de área constante (tramos rectos)

hl_m = pérdidas menores debidas a accesorios, cambios de área, etc.

CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS MAYORES.

Las pérdidas mayores en sistemas de tuberías están asociadas a tramos rectos, y son calculadas de acuerdo a la ecuación de Darcy- Weisbach:

$$hl_M = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- L= longitud del tubo
- D= Diámetro interno
- V= Velocidad media del fluido
- f = Factor de fricción.

El Factor de fricción f , depende en gran parte del régimen de flujo y éste a su vez depende de parámetros o factores como son:

- a) La densidad, ρ
- b) La viscosidad, μ
- c) El diámetro de la tubería, D
- d) La velocidad del fluido, V

Estos 4 parámetros se agrupan en un solo componente adimensional llamado “Numero de Reynolds”, (Re), el cual permite determinar qué tipo de flujo está siendo transportado por el interior de la tubería, de tal manera que si:

$Re < 2000$, el flujo es laminar

$Re > 4000$, el flujo es turbulento

$2000 < Re < 4000$ se trata de flujo en régimen de transición. (ver fig.1)

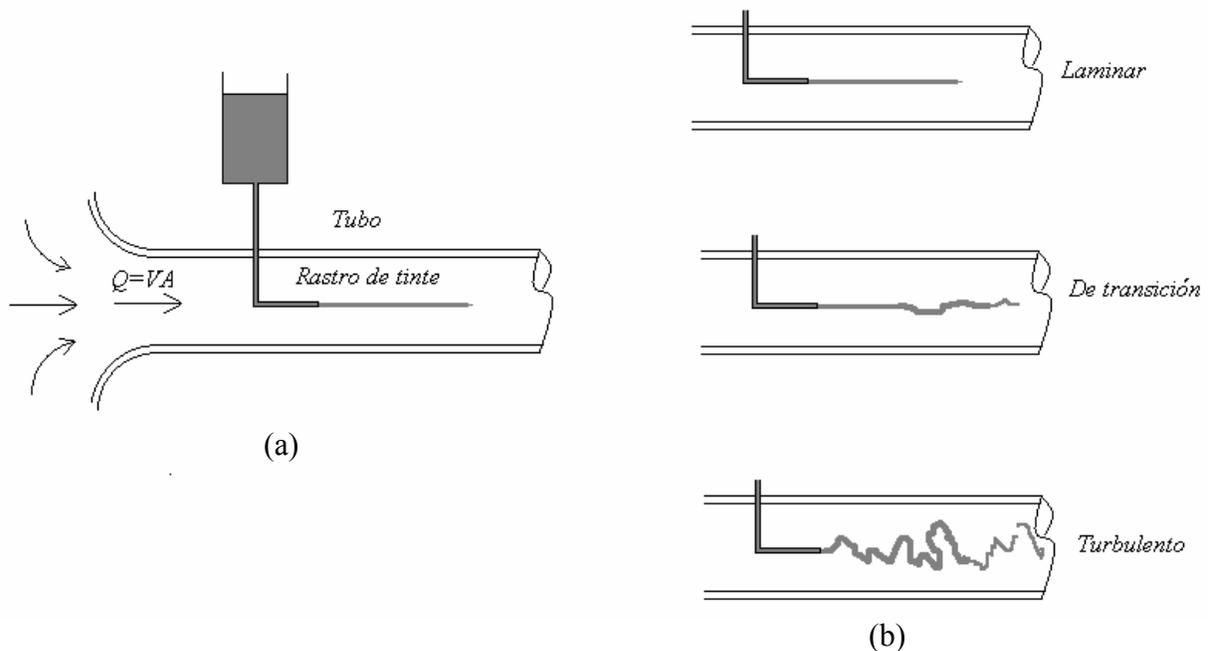


Figura 1 a) Experimento para ilustrar el tipo de flujo. b) Estelas de colorantes representativas

Utilizando estos parámetros el número de Reynolds puede ser hallado con la siguiente ecuación:

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad \text{Ecuación 4}$$

La ecuación 4 puede ser escrita en función de caudal:

$$\text{Re} = \frac{4 \rho Q}{\pi \mu D} = \frac{4 Q}{\pi \nu D} \quad \text{Ecuación 5}$$

Una vez obtenido el régimen de flujo, el factor de fricción (f) se determina de la siguiente manera:

- ❖ Cuando el flujo es laminar, es decir, $\text{Re} < 2000$, el factor de fricción es calculado mediante la ecuación:

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Sustituyendo la ecuación 6 en la ecuación 3, las pérdidas mayores pueden ser obtenidas con la siguiente ecuación (Hagen- Pouseville):

$$h_{l_M} = \frac{64}{\text{Re}} * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g} \quad \text{Ecuación 7}$$

- ❖ Cuando el flujo es turbulento, $\text{Re} > 4000$, el factor de fricción depende del número de Reynolds (Re) y de la rugosidad relativa (ϵ), $f=f(\text{Re},\epsilon)$, y es determinado de forma teórica mediante el diagrama de Moody, que es una representación de la ecuación de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\left(\frac{\epsilon}{D} \right)}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad \text{Ecuación 8}$$

Una dificultad con el uso de la ecuación de Colebrook es el hecho de que está implícita en la dependencia de f , es decir, para condiciones dadas (Re y ϵ/D) no es posible despejar f sin emplear algún tipo de esquema iterativo. Con el uso de computadoras y calculadoras modernas no es difícil realizar tales cálculos, sin embargo, hoy en día, todavía se sigue usando el diagrama de Moody para el cálculo del factor de fricción. (ver figura 2)

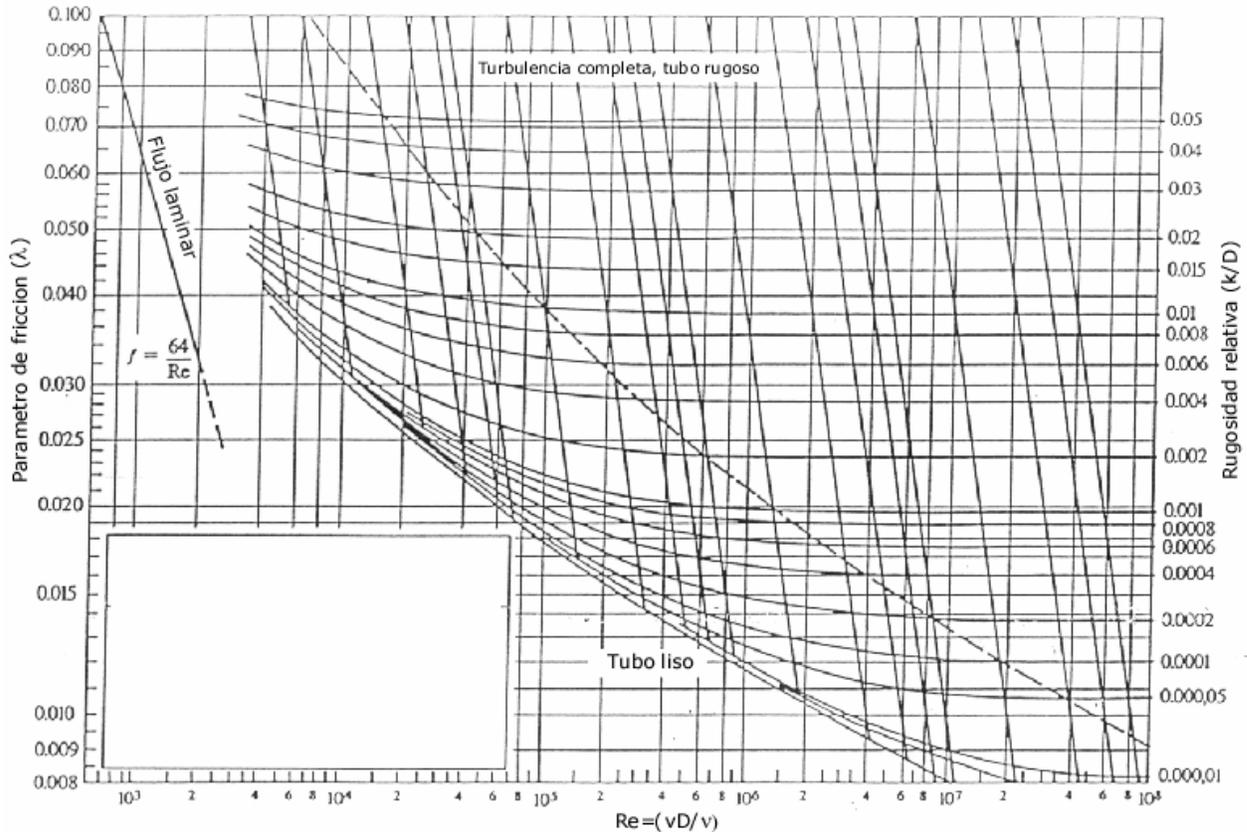


Figura 2 Diagrama de Moody. “Factor de fricción (f), como función del número de Reynolds y la rugosidad relativa (ϵ/D).

Una vez determinado el factor de fricción, las pérdidas mayores son calculadas mediante la ecuación de Darcy-Weisbach, (ecuación 3)

Para la práctica de pérdidas se requiere calcular el factor de fricción en forma experimental para tramos rectos, para lo cual se procede de la siguiente manera:

Recordando que $hl = hl_M + hl_m$, y que en un tramo recto sin accesorios $hl_m = 0$, por tanto, $hl = hl_M$

De la ecuación 1, despejando hl_M se obtiene:

$$hl_M = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} + Z_1 - Z_2$$

Donde la caída de presión entre los puntos 1 y 2, para un tramo recto, es calculada mediante las alturas piezométricas de los manómetros de columna de agua, de la siguiente manera:

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = h_1 - h_2 \quad \text{Ecuación 9}$$

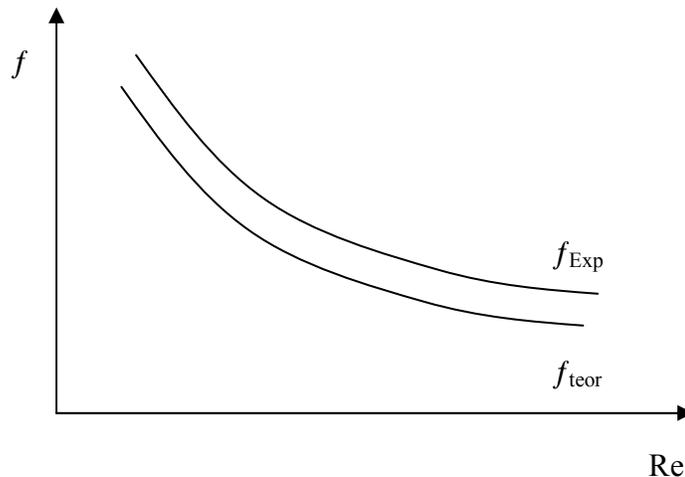
$$hl_M = h_1 - h_2 + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} + Z_1 - Z_2$$

Al tratarse de tubería horizontal de sección constante y flujo incompresible, se tiene que $V_1=V_2$ y $Z_1=Z_2$, por lo que $h_{lM}=h_1-h_2$ y sustituyendo en la ecuación 3 se obtiene:

$$h_1 - h_2 = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$f_{Exp} = \frac{2gD(h_1 - h_2)}{LV^2} \quad \text{Ecuación 11}$$

Al variar el caudal que pasa por la tubería, se pueden obtener varios valores del factor de fricción y éste puede ser graficado en función del Número de Reynolds, obteniéndose una curva como la mostrada a continuación:



CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS MENORES. (h_{lM})

Casi todos los sistemas contienen considerablemente más que tubos rectos. Estos componentes adicionales (Válvulas, codos, conexiones en T, etc.) contribuyen a la pérdida de carga global del sistema. Estas pérdidas se denominan pérdidas menores, con la consecuencia aparente de que la mayor parte de pérdidas del sistema está asociada con la fricción en las porciones rectas de las tuberías, las pérdidas mayores. En muchos casos es cierto lo anterior, sin embargo, en otros casos las pérdidas menores podrían ser mayores que las pérdidas por fricción o pérdidas mayores.

A continuación se indica como determinar las diversas pérdidas menores que suelen ocurrir en sistemas de tuberías.

El método más comúnmente usado para determinar las pérdidas de carga o caídas de presión es especificar el *coeficiente de pérdida*, K_L , como

$$h_l = K_L \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuación 12}$$

La caída de presión a través de un componente que tiene un coeficiente de pérdida de $K_L=1$ es igual a la presión dinámica, $V^2/2g$.

El valor real de K_L depende en gran medida de la geometría del componente considerado, también puede depender de las propiedades del fluido, es decir,

$$K_L = \phi(\text{geometría}, Re)$$

Algunas veces, las pérdidas menores están dadas en términos de una longitud equivalente, l_{eq} . En esta terminología, la pérdida de carga a través de un componente está dada en términos de la longitud equivalente de tubería que produce la misma pérdida de carga que el componente. Por ejemplo, si la longitud equivalente en un codo está tabulada con un valor de 30, esto quiere decir que la pérdida en ese codo equivale a la pérdida que ocurre en una tubería recta de 30 m de longitud. De esta forma, la ecuación para pérdidas menores queda expresada:

$$h_l = K_L \frac{V^2}{2g} = f \frac{l_{eq}}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Donde

$$l_{eq} = \frac{K_L D}{f}$$

El valor de l_{eq}/D se encuentra tabulado en tablas y se conoce como la longitud equivalente adimensional, para el factor de fricción, f , se emplea el calculado previamente para las pérdidas mayores.

La longitud equivalente, l_{eq} , se puede determinar de forma experimental a partir de la ecuación de Bernoulli, de manera similar a lo realizado para las pérdidas mayores:

$$hl = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} = h_1 - h_2 = f \frac{l_{eq}}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Despejando

$$\frac{l_{eq}}{D} = \frac{2g(h_1 - h_2)}{fV^2} \quad \text{Ecuación 13}$$

La ecuación 13 permite calcular la longitud equivalente experimental, la cual puede ser comparada con la obtenida por tablas.

Pérdidas menores en las válvulas.

Para el caso de válvulas cuya caída de presión es demasiado alta, se utilizan piezómetros con mercurio. Para este caso la ecuación se calcula de la siguiente manera:

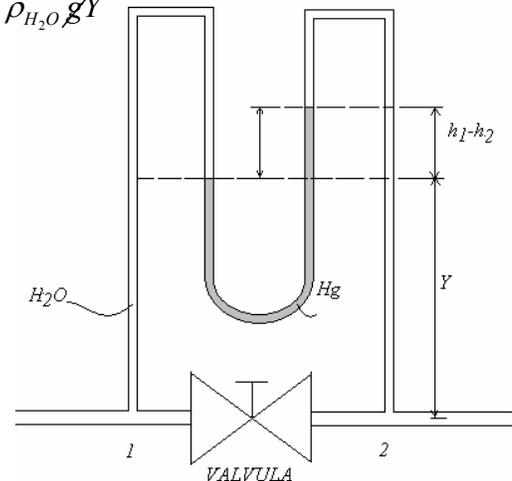
$$P_1 = P_2 - \rho_{H_2O} gY - \rho_{H_2O} g(h_1 - h_2) + \rho_{H_2O} gS_{Hg}(h_1 - h_2) + \rho_{H_2O} gY$$

$$P_1 - P_2 = \rho_{H_2O} g(h_1 - h_2)(S_{Hg} - 1)$$

Ecuaciones 14

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma_{H_2O}} = (h_1 - h_2)(S_{Hg} - 1) = f \frac{l_{eq}}{D} \frac{V^2}{2g}$$

$$\left. \frac{l_{eq}}{D} \right)_{Exp} = \frac{(h_1 - h_2)2g(S_{Hg} - 1)}{fV^2} = \frac{(h_1 - h_2)2g12.6}{fV^2}$$



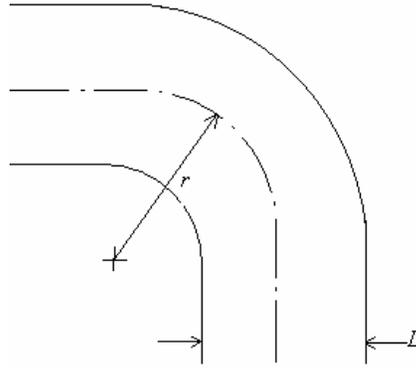
Pérdidas menores en codos y curvaturas.

Curva de $r=50,8\text{mm}$; $\frac{r}{D} = \frac{50,8\text{mm}}{13.7\text{mm}}$ Se calcula $\left(\frac{L_e}{D}\right)$ según ecuación 13

De igual manera se realiza para los codos de $r=101,6\text{mm}$ y $r=152,4\text{mm}$.

Una gráfica que se puede realizar para observar las pérdidas en codos de acuerdo al radio de curvatura

es $\left(\frac{L_e}{D}\right)$ vs. $\frac{r}{D}$



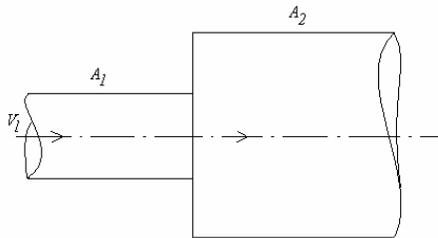
Pérdidas menores en expansiones y contracciones súbitas.

Para el caso de contracciones y expansiones súbitas existe un factor de resistencia denominado K y esta dado por:

$K = f \frac{L_e}{D}$ Con lo cual la ecuación para el cálculo de las pérdidas está dada por:

$$h_{lm} = f \frac{L_e}{D} \frac{V^2}{2g}$$

$$h_{lm} = K \frac{V^2}{2g}$$



Utilizando para este cálculo la mayor velocidad, que se presenta en el área menor.

$$h_{lm} = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} = K \frac{V^2}{2g}$$

El procedimiento experimental para el cálculo de la pérdida de carga de la expansión y la contracción súbita se explica más adelante.

Desarrollo de la Práctica:

El tablero para el estudio de pérdidas hidráulicas ubicado en el laboratorio, consta de dos (2) circuitos identificados como:

- a) Circuito N° 1 (Azul oscuro) compuesto por:
- | | | |
|--|-------------|---------------------|
| a.1 Tramo recto horizontal (L=914mm (1 yd); $\phi=13,7\text{mm}$) | Piezómetros | h_3 : h_4 |
| a.2 Codo métrico 90°; (radio=0mm) | Piezómetros | h_5 : h_6 |
| a.3 Codo estándar (radio=12,7mm) | Piezómetros | h_1 : h_2 |
| a.4 Válvula de compuerta | Piezómetros | h_{17} : h_{18} |
- b) Circuito N° 2 (Azul claro) compuesto por:
- | | | |
|--|-------------|---------------------|
| b.1 Expansión ($\phi_{\text{entrada}}=13,7\text{mm}$; $\phi_{\text{salida}}=26,4\text{mm}$) | Piezómetros | h_7 : h_8 |
| b.2 Tramo recto horizontal (L=914mm (1 yd); $\phi=26,4\text{mm}$) | Piezómetros | h_8 : h_9 |
| b.3 Contracción ($\phi_{\text{entrada}}=26,4\text{mm}$; $\phi_{\text{salida}}=13,7\text{mm}$) | Piezómetros | h_9 : h_{10} |
| b.4 Curva (radio=50.8mm; $\phi=13,7\text{mm}$) | Piezómetros | h_{15} : h_{16} |
| b.5 Curva (radio=101,6mm; $\phi=13,7\text{mm}$) | Piezómetros | h_{11} : h_{12} |
| b.6 Curva (radio=152,4mm; $\phi=13,7\text{mm}$) | Piezómetros | h_{13} : h_{14} |
| b.7 Válvula de globo | Piezómetros | h_{19} : h_{20} |

Procedimiento Experimental:

1. Para la recolección de datos, siga el procedimiento descrito en el tablero de pérdidas hidráulicas y realice el número de pruebas asignadas por el profesor.
2. Una vez realizadas las pruebas asignadas, efectúe los siguientes cálculos:

- Caudal real, $Q_r = \frac{m}{t * \rho} \left[\frac{m^3}{s} \right]$

- Velocidad, $V = \frac{Q_R}{A}; \Rightarrow A = \frac{\pi d^2}{4}$

- Número de Reynolds, $Re = \frac{VD}{\nu} \Rightarrow \nu = 0,897 * 10^{-6} \frac{m^2}{s} (25^\circ C)$

- **Circuito Azul oscuro (I)**: Para el tramo recto horizontal, puntos 3 y 4, determine:
- a) La pérdida de la energía debida a la fricción (h_{LM})

$$h_{LM\text{teorica}} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \qquad h_{LM\text{exp}} = h_3 - h_4$$

- b) El coeficiente de fricción (f)

$$f_{Exp} = \frac{2gD(h_3 - h_4)}{LV^2} \qquad f_{teor} = (\text{Diagrama de Moody})$$

Donde:

- L=914 mm
- $\phi=13.7$ m
- Material de la tubería= Cobre
- Rugosidad Absoluta del Cobre= $e=0,000015$ m
- Rugosidad Relativa $\varepsilon=e/D$

$$\nu_{25^{\circ}\text{C agua}} = 0,897 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\mu_{25^{\circ}\text{C agua}} = 0,912 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^2$$

c) El coeficiente de Resistencia (K)

Determine para cada uno de los codos (métrico y estándar) las pérdidas de energía (h_{lm}), y el coeficiente de resistencia

$$K_{tubo} = f \frac{L}{D} \qquad h_{lm_{teor}} = K_{tubo} \frac{V^2}{2g}$$

$$h_{lm_{exp}} = (h_e - h_s) - (h_3 - h_4); \qquad K_{Exp} = \frac{(h_e - h_s) - (h_3 - h_4)2g}{V^2}$$

h_e = altura del piezómetro a la entrada

h_s = altura del piezómetro a la salida

Obsérvese que para determinar las pérdidas en la mayoría de los accesorios, el piezómetro a la salida no se encuentra inmediatamente después del mismo, sino a una distancia de una yarda (914mm) después, esto sucede porque el piezómetro se coloca de tal manera que la medición no sea afectada por la turbulencia creada en el accesorio, por esta razón, se debe restar la pérdida de energía motivada al tramo recto ($h_3 - h_4$), con el fin de obtener solo la del accesorio.

- Determine la pérdida de energía (h_{lm}) y el coeficiente de resistencia (K) para la válvula de compuerta. (Viene de las ecuaciones 14)

$$h_{lm_{teorico}} = f \frac{L_e}{D} \frac{V^2}{2g} \qquad \frac{L_e}{D} = \frac{12,6 * 2g(h_{17} - h_{18})}{fV^2}$$

$$h_{lm_{Exp}} = (h_{17} - h_{18})12,6 \qquad k_{teor} = f \frac{L_e}{D}$$

$$K_{Exp} = \frac{12,6(h_{17} - h_{18})2g}{V^2} \qquad h_{lm_{Teor}} = \frac{KV^2}{2g}$$

- **Circuito Azul claro (II)** Realice los cálculos de Q_R , Re y Velocidad de la misma manera que la realizada para el circuito azul oscuro (I).
- Calcule la pérdida de la energía debida a la fricción (h_{fM}), el coeficiente de fricción (f) y el coeficiente de resistencia (K) en el tramo de tubo recto de 26,4mm de diámetro y 914mm de longitud. (ver ecuaciones del circuito I, azul oscuro)
- Hallar para cada prueba la pérdida de carga (h_{lm}) a través de la **expansión súbita**, puntos 7 y 8. Se tiene:

$$h_8 - h_7 = \frac{(V_7^2 - V_8^2)}{2g} - h_l$$

$$h_l = \frac{(V_7 - V_8)^2}{2g}$$

$$h_8 - h_7 = \frac{(V_7^2 - V_8^2) - (V_7 - V_8)^2}{2g}$$

Compare estos valores con los medidos en los puntos 7 y 8.

- Hallar para cada prueba la pérdida de carga (h_{lm}) a través de la **contracción súbita**, puntos 9 y 10. Se tiene:

$$h_9 - h_{10} = \frac{V_{10}^2 \left(1 - \left(\frac{D_{10}}{D_9} \right)^4 \right)}{2g} + h_l$$

$$h_l = \frac{KV_{10}^2}{2g}$$

$$h_9 - h_{10} = \frac{V_{10}^2 \left(1 - \left(\frac{D_{10}}{D_9} \right)^4 \right)}{2g} + \frac{KV_{10}^2}{2g}$$

Los valores teóricos de K se pueden obtener en el libro de mecánica de los fluidos de Fox McDonald (1995), página 392 y 393. (fig.8.17)

Compare estos valores con los medidos en los puntos 9 y 10

- Determine la pérdida de energía (h_{lm}), los coeficientes de resistencia (K) y las longitudes equivalentes (L_e/D), para las curvas de 50,8mm; 101,6mm y 152,4mm, respectivamente

$$h_{lm} = K \frac{V^2}{2g}$$

$$h_{lm} = [(h_e - h_s) - (h_3 - h_4)]$$

$$K_{Exp} = \frac{[(h_e - h_s) - (h_3 - h_4)] 2g}{V^2}$$

$$K_{Teor} = f \frac{L_e}{D} \text{ (Diagrama de Moody)}$$

$$\left(\frac{L_e}{D} \right)_{Exp} = \frac{[(h_e - h_s) - (h_3 - h_4)] 2g}{fV^2}$$

$$\left(\frac{L_e}{D} \right)_{Teor} = \frac{KD}{f}$$

- Hallar la pérdida de carga (h_{lm}) y el coeficiente de resistencia (K) para la válvula de globo. (usar las ecuaciones 14), para la válvula de globo.

Post laboratorio

La presente guía es una orientación para la elaboración del procesamiento de datos de la práctica de pérdidas.

1. Realizar la tabla de datos (circuito I y II)
2. Realizar una tabla de resultados para el circuito I donde se incluya:
Caudal, Velocidad, Número de Reynolds (Re), pérdida de energía debida a la fricción (hl), Factor de fricción (f), Coeficientes de Pérdidas y Le/D para el codo métrico (K_{mt} y Le/D), codo estándar (K_{st} y Le/D) y válvula de compuerta (K_{vc} y Le/D).
3. Realizar una tabla de resultados para el circuito II donde se incluya:
Caudal, Velocidad, Número de Reynolds (Re), Factor de fricción (f), Pérdidas por fricción (hl_m), Coeficientes de Pérdidas y Le/D para la expansión (K_{exp} y Le/D), contracción (K_{cont} y Le/D), curvaturas ($K_{50.8}$, $K_{101.6}$ y $K_{152.4}$ mm y sus Le/D) y válvula de globo (K_{vg} y Le/D).
4. Gráfica de (h_3-h_4) vs. Caudal
Esta gráfica es imprescindible para poder estimar las pérdidas por fricción (hl_M) en el circuito II (dato requerido en los resultados del circuito II).
5. Gráfica f vs. Re
6. Gráfica K_{cont} y K_{exp} vs. Q_r (las dos curvas en una misma gráfica)
7. Gráfica K_{vc} y K_{vg} vs. Q_r (las dos curvas en una misma gráfica)
8. Gráfica K_{curvas} ($K_{50.8}$, $K_{101.6}$ y $K_{152.4}$) vs. Q_r (las tres curvas en una misma gráfica)
9. Gráfica K_{curvas} ($K_{50.8}$, $K_{101.6}$ y $K_{152.4}$) vs. r/D (las tres curvas en una misma gráfica)
10. Gráfica K_{st} y K_{cm} vs. Q_r (las dos curvas en una misma gráfica)

Informe opcional sobre la práctica de pérdidas:

1. Presentar un cálculo tipo.
1. Desarrollar hoja de Excel según modelo anexo.
2. Análisis de resultados y conclusiones sobre los resultados experimentales.
3. Comparación de los resultados experimentales con los presentados en el libro FOX y McDonald.
4. Análisis de resultados y conclusiones sobre la comparación de resultados experimentales con los del Fox y McDonald.

Notas:

El análisis de resultados y las conclusiones deben ir inmediatamente después de la respectiva gráfica. De igual manera para la comparación de resultados.

Material en etapa de revisión.

