UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA
AREA DE TERMOFLUIDOS

GUIA DE LABORATORIO DE MECANICA DE FLUIDOS

BALANCE DE MASA Y ENERGÍA EN TUBERIAS Y ACCESORIOS HIDRAULICOS (C206)

Autores: Profs. Arturo Velásquez S.
Claudio Velásquez S.

Asignatura : Laboratorio General I.

Carrera : Ingeniería Civil Mecánica.

Area Académica : Termofluidos.

STGO. 2006.-

1. TITULO: “BALANCE DE MASA Y ENERGIA EN TUBERIAS Y ACCESORIOS HIDRAULICOS”

2. OBJETIVO DEL EXPERIMENTO

2.1 Familiarizar al estudiante con métodos de medición de flujos de fluidos y pérdidas de energía hidráulica en tuberías y singularidades.

2.2 Determinar rugosidades relativas y absolutas en tuberías mediante mediciones experimentales.

2.3 Encontrar coeficientes singulares de accesorios hidráulicos.

2.4 Con los datos experimentales, comprobar la validez de algunas fórmulas empíricas asociadas al fenómeno hidráulico.

3. BASES CONCEPTUALES

3.1 Medición de caudales:

La ecuación de continuidad permite presentar las siguientes fórmulas para cálculo de flujo de masa ($\dot{m}$) y caudal volumétrico (Q).

a) Flujo permanente $\left(\frac{\partial}{\partial t}=0\right)$

Gases: $$\dot{m}=\rho V A \quad (\rho \text{ variable}) \qquad [1]$$

Líquidos: $$Q=VA \quad (\rho \text{ constante}) \qquad [2]$$

$$Q=\frac{\forall}{t} \quad (\forall=\text{volumen}, t=\text{tiempo}) \qquad [3]$$

b) Flujo impermanente $\left(\frac{\partial}{\partial t}\neq 0\right)$

Gases: $$\dot{m}_i=\dot{m}_e \pm \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (\rho \neq \text{cte}) \qquad [4]$$

Líquidos: $$Q_i=Q_e \pm \Delta Q \quad (\rho=\text{cte}) \qquad [5]$$

donde:

$\dot{m}$	=	Flujo másico [kg_m/s].
Q	=	Caudal volumétrico [m^3/s].
ρ	=	Densidad media del fluido [kg_m/m^3].
V	=	Velocidad media del flujo en el área A [m/s].
A	=	Area de flujo [m^2].
Subíndice “i”	=	Ingreso al $\forall$.C.
Subíndice “e”	=	Egreso del $\forall$.C.
$\pm\frac{\Delta m}{\Delta t}$	=	Rapidez de almacenamiento de masa dentro del $\forall$.C.
$\pm\Delta Q$	=	Rapidez de acumulación de volumen dentro del $\forall$.C.

3.1.1 Métodos de medición de caudales másicos y volumétricos.

El objetivo de esta parte es encontrar un elemento (instrumento) que permita medir las variables independientes de las relaciones [1], [2], [3] y [4].

En conductos cerrados se pueden usar los siguientes elementos:

a) Medición directa de la velocidad mediante:

- Tubos de Pitot.
- Molinetes (anemómetros mecánicos).
- Hilo caliente.
- Otros.

b) Medición directa del flujo a través de instrumentos tales como:

- Tubo Venturi.
- Boquilla o tobera.
- Placa orificio.
- Flujómetro magnético.
- Rotámetro.
- Volumen por unidad de tiempo (aforo).
- Otros.

c) En conductos abiertos (canales) se usan:

- Tubo de Pitot
- Molinete
- Canal Venturi
- Vertedero
- Trazadores radiactivos
- Otros

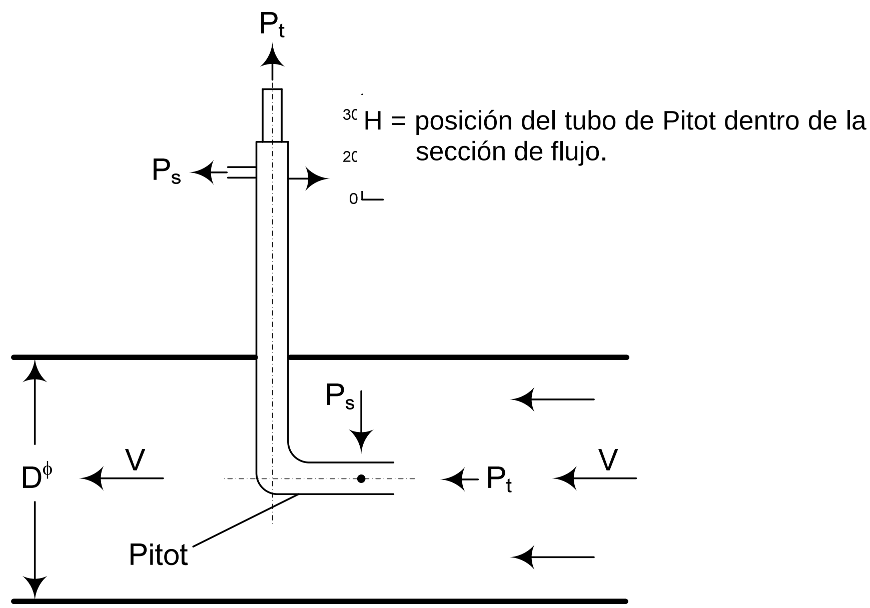
Nota: En terreno se puede usar cualquier dispositivo o elemento que pueda ser calibrado confiablemente.

d) Medición del perfil de velocidades

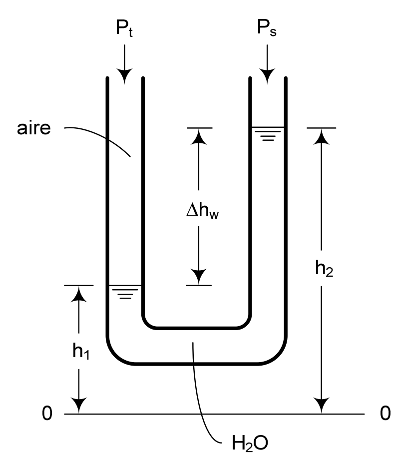
El instrumento que se usa en este laboratorio que permite calcular el caudal volumétrico de un flujo de gas, considerado como incompresible (bajas presiones), es el tubo de Pitot tipo Prandtl. También se usan molinetes y otros elementos.

En el laboratorio esta medición se realiza en un conducto cilíndrico (Túnel de Viento) conectado a un ventilador centrifugo. Este equipo contempla presiones relativamente bajas, razón por la cual el gas (aire) se asume incompresible ($\rho \approx$ cte).

La instalación del tubo de Pitot es la siguiente



La señal de P_s (presión estática) y la presión P_t (presión total) se miden mediante manómetros de columna de agua tipo U.



3.1.2 Método de cálculo

Luego de aplicar el teorema de Bernoulli (se considera μ=0) entre un punto del flujo aguas arriba del Pitot en una zona no perturbada y el punto estancamiento en el borde del Pitot, se tiene

$$u = \sqrt{2g\left(\frac{P_t}{\gamma_a} - \frac{P_s}{\gamma_a}\right)} \qquad [m/s] \qquad [6]$$

g = 9.8 (m/s^2)

$\frac{P}{\gamma_a}$ = metros de columna de aire.

Como $\Delta h_a = \frac{P_t}{\gamma_a} - \frac{P_s}{\gamma_a}$ se mide en columna de aire y como en el Laboratorio estas mediciones se hacen en columnas de agua, con la igualdad $P_a = P_w$, se encuentra la siguiente transformación

$$\Delta h_a = \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_a}\right)\Delta h_w \qquad [7]$$

donde

Δh_a = Altura de presión en metros de columna de aire.
γ_w = Peso específico del agua (w).
γ_a = Peso específico del aire(a).
Δh_w = Altura de presión en metros de columna de agua.

Por lo tanto, la ecuación [6] se transforma en la ecuación de trabajo

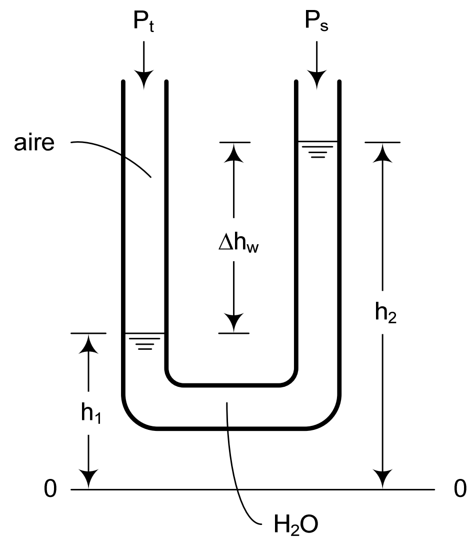
$$u = \sqrt{2g\left(\frac{\gamma_w}{\gamma_a}\right)\Delta h_w} \qquad (m/s) \qquad [8]$$

Obs.: En la relación anterior, $u = k\sqrt{\%}$, debiera llevar una constante k, pero que en el caso del Pitot vale k=1.

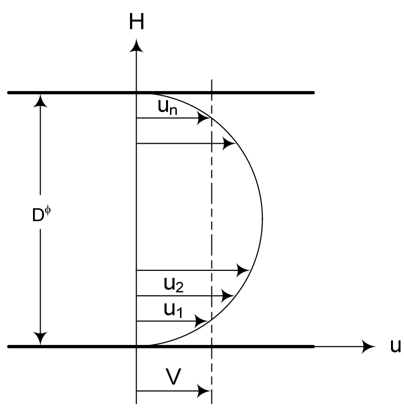
Para la tabla de valores de laboratorio se sugiere la siguiente:

P_a = Presión atmosférica.
T_a = Temperatura ambiente.

Lect N°	H (cm)	h_1 (cm)	h_2 (cm)	u (m/s)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				



El perfil de velocidad es de la forma



D^ϕ = diámetro del túnel

Velocidad puntual $\quad u_n = \sqrt{2g\left(\frac{\gamma_w}{\gamma_a}\right)\Delta h_{w_n}}$

Velocidad media $\quad V = \frac{u_1 + u_2 + \ldots\ldots + u_n}{n+1} \quad [m/s]$

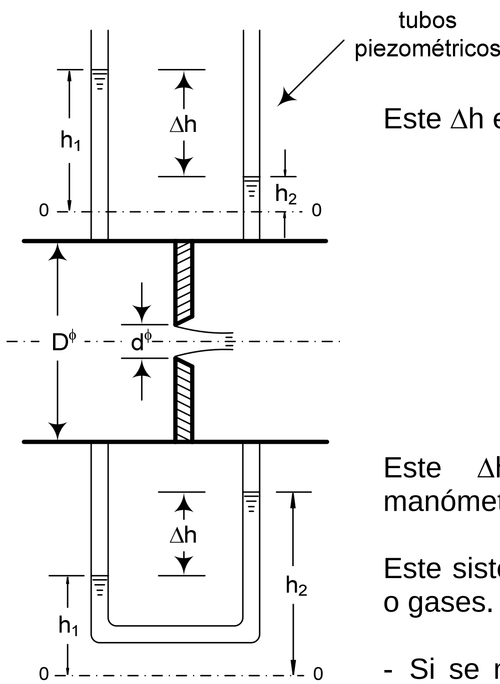
Con esta velocidad se calcula el caudal Q

$$Q = V\frac{\pi D^2}{4} \qquad [9]$$

3.1.3 Medición de caudal mediante estrangulación de flujo.

El Venturi, la boquilla y la placa orificio funcionan bajo este principio. Con ellos se pueden medir flujos de líquidos y gases.

A modo de ejemplo, supóngase una placa orificio.



Este Δh es columna del líquido que fluye.

Este Δh es columna del líquido del manómetro.

Este sistema se usa tanto para medir líquidos o gases.

- Si se mide agua, en el manómetro se usa mercurio.
- Si se mide gas, en el manómetro se puede usar agua u otro líquido.

A partir de la ecuación de continuidad y de energía (Bernoulli) se encuentra:

- Gas: $$Q = \frac{\pi d^2}{4}\sqrt{2g\left(\frac{\gamma_w}{\gamma_a}\right)\Delta h_w} \qquad \left(m^3/s\right) \qquad [10]$$

- Líquidos: $$Q = \frac{\pi d^2}{4}\sqrt{2g\Delta h} \qquad \left(m^3/s\right) \qquad [11]$$

- Gases: $$\dot{m} = \rho\sqrt{2g\left(\frac{\rho_w}{\rho}\right)\Delta h_w} \qquad [12]$$

donde ρ = P / (RT) (ecuación de los gases).

El caudal de contraste se mide volumétricamente.

3.1.4 Resultados de las mediciones

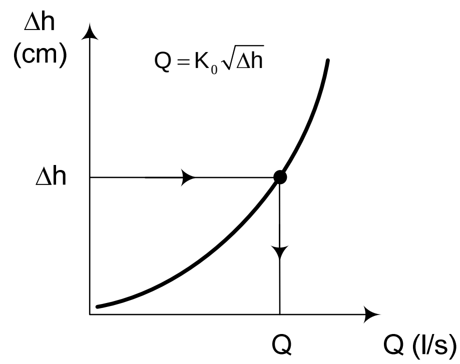
Los resultados se suelen presentar en tablas y/o gráficos.

Resultados

$Q = VA$ (conocido)
$\dot{m} = \rho VA$ (conocido)

Si se usa en instrumentos calibrados en las mediciones de los datos experimentales, se pueden obtener directamente curvas de calibración de los instrumentos que se estén contrastando.

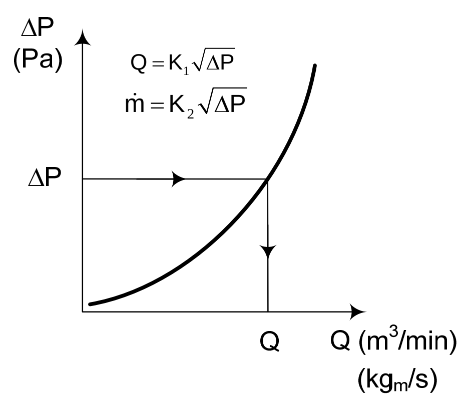
3.1.5 Calibración placa orificio líquidos



Valores calculados

Δh (cm)	Q (l/s)

3.1.6 Calibración placa orificio gases

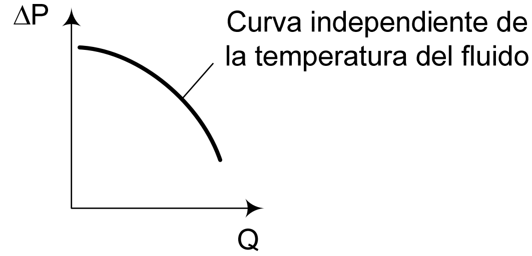


Valores calculados
Pa =…. (mmHg)
Ta =…. (°C)

ΔP (Pa)	Q (l/s) $\dot{m}$ (kg_m/s)

K_1, K_2 = constantes instrumentales.

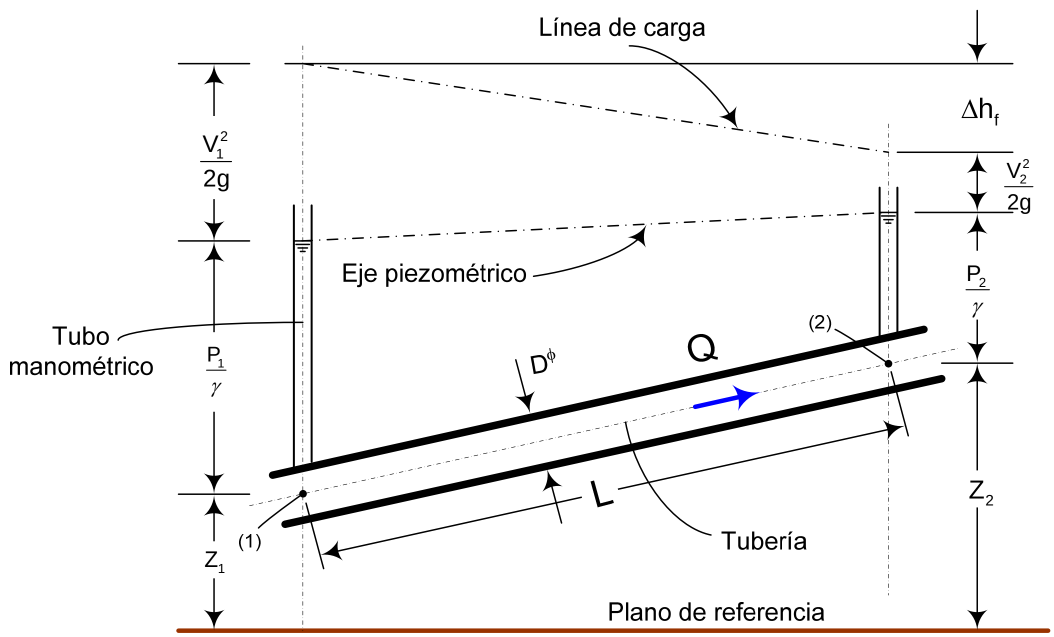
Obs.: Siempre las curvas de calibración de equipos e instrumentos que trabajen con gases se debe usar presión (ΔP) en vez de $\Delta h = \Delta P/\gamma$. La razón es que la presión es independiente del fluido que la ejerza.
Ejemplo: Curva de un ventilador calibrado con aire ambiente (20°C) que sería usado para mover aire a 500°C.



3.2 Medición de pérdida de energía

3.2.1 Pérdida de carga en tuberías

La presente figura representa una instalación típica de un sistema de tuberías en el cual es posible instalar tubos manométricos para realizar las mediciones del eje piezométrico y todos los parámetros asociados.



z	=	cota del punto en A
P/γ	=	altura de presión
$V^2/2g$	=	altura de velocidad
D	=	diámetro interno del tubo
Q	=	caudal
A	=	área de flujo
Δh_f	=	pérdida de carga por fricción viscosa.
$z + P/\gamma$	=	cota piezométrica

Aplicando un balance de energía entre la sección (1) y la sección (2) a través de la suma de Bernoulli, se tiene:

$$\Delta h_f = \left(z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \right)$$

como $h = z + \frac{P}{\gamma}$ = cota piezométrica y D = cte, $\Rightarrow V_1 = V_2$ por continuidad.

por lo tanto

$$\Delta h_f = h_1 - h_2 \qquad [13]$$

Esta fórmula solo sirve para medir pérdidas de carga.

Para calcular pérdidas de carga (diseño de tuberías) se usa la fórmula de DARCY-WEISBACH. Válida para cualquier fluido de μ = cte.

$$\Delta h_f = f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2g} \qquad [14]$$

También se usa la fórmula de HAZEN-WILLIAMS, válida solamente para agua cuyo uso está limitada a tuberías entre 2” a 72” de diámetro. La velocidad no debe ser superior a 16 pies/s con una temperatura alrededor de 60°F.

Para el sistema SI, se tiene:

$$U = 0.85 C R^{0.63} J^{0.54} \qquad [m/s] \qquad [15]$$

en que :

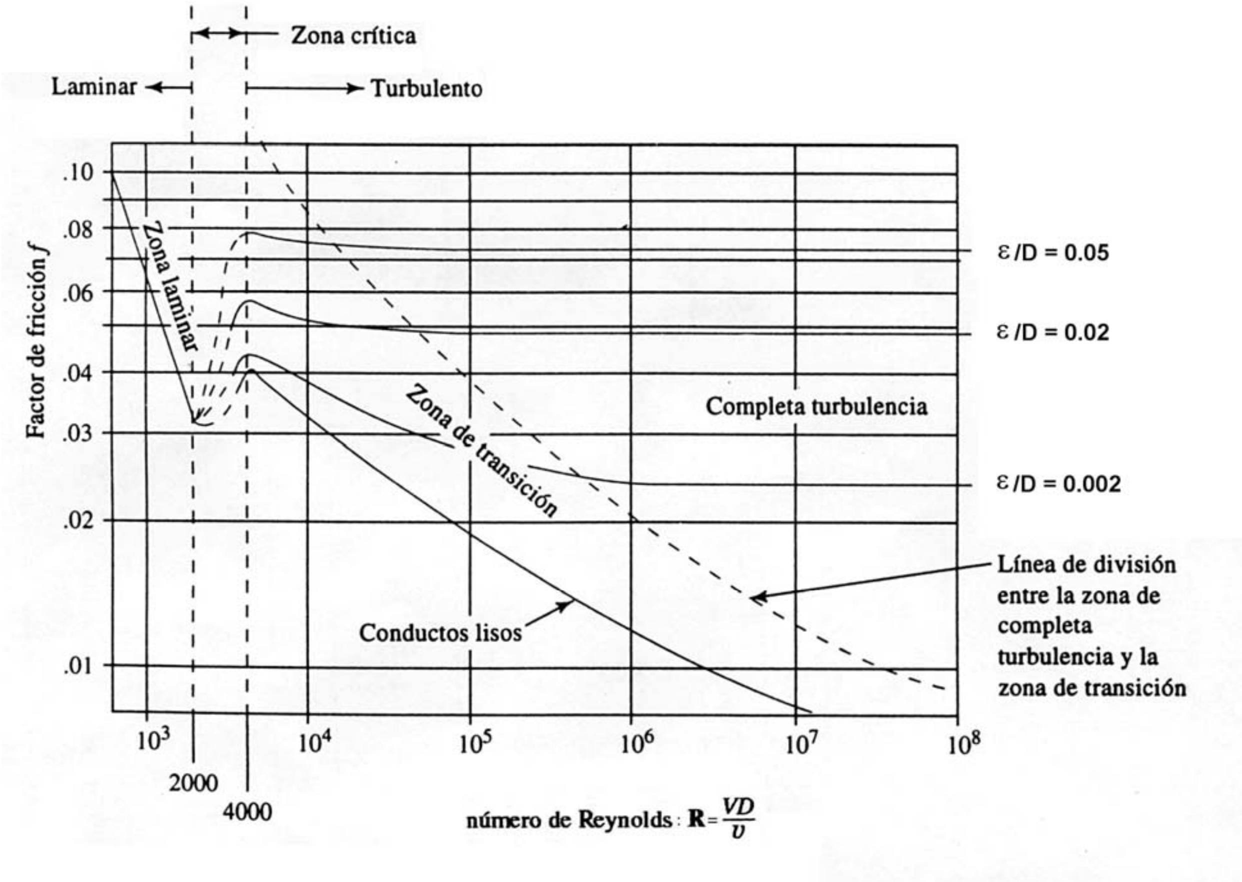
U = velocidad media del flujo (m/s)
C = coeficiente adimensional de Hanzen-Williams
R = radio hidráulico = $\dfrac{\text{area de flujo}}{\text{perímetro mojado}}$ (m)
J = pérdida de carga unitaria (m/m)

Tabla de HAZEN-WILLIAMS

Tipo de conducto	Valor para C
Acero, fierro fundido	150
Plástico, cobre	140
Concreto	120
Acero corrugado	60

Diagrama de Moody

El diagrama de Moody es universalmente válido para todos los flujos incompresibles, permanentes en tubos de cualquier forma de sección. En la figura siguiente se muestran las partes principales del Abaco de Moody.

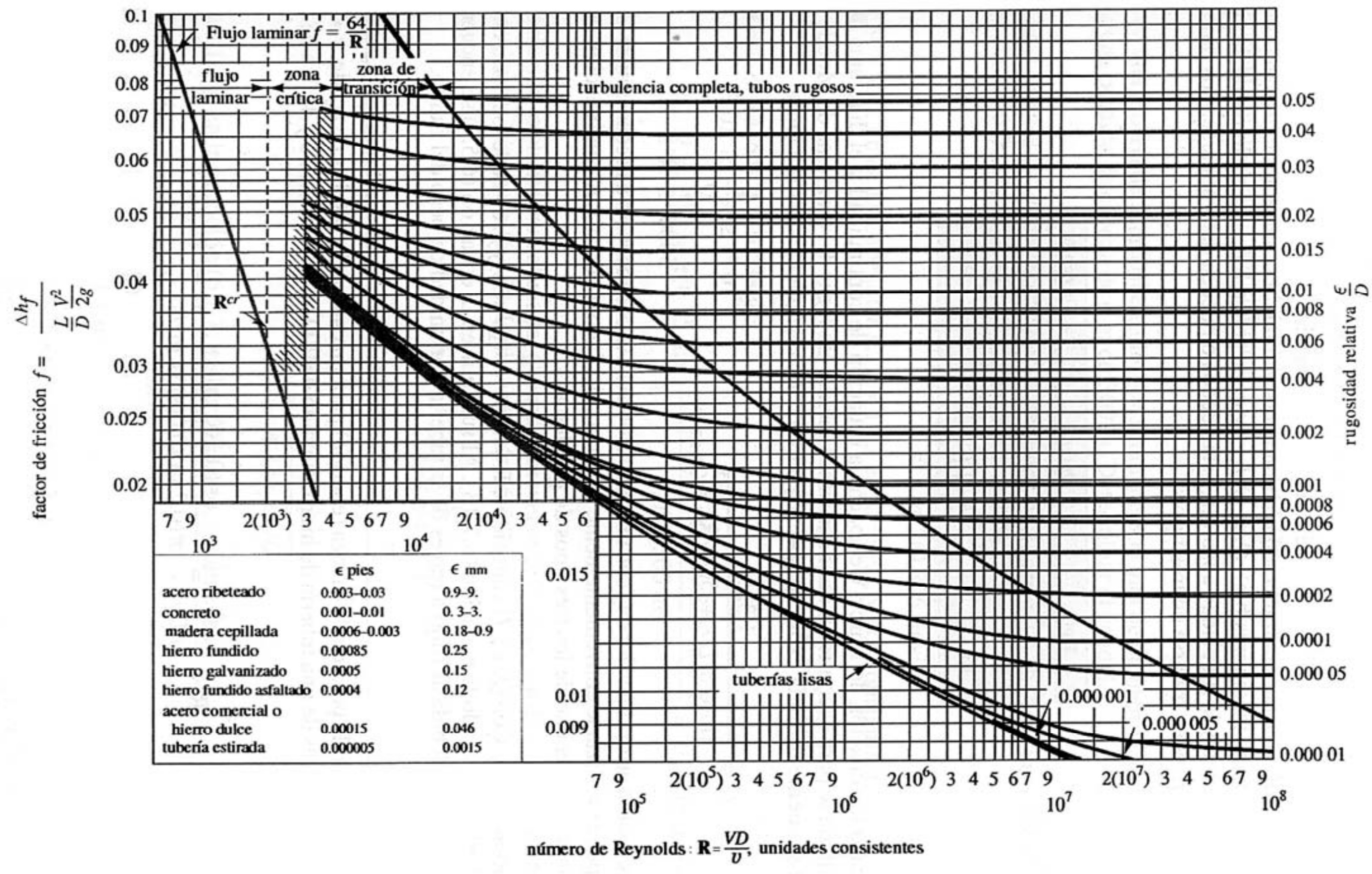


La línea punteada que separa la zona de transición turbulenta y la turbulenta plena queda delimitada por el valor

$$\mathrm{Re} = \frac{200D}{\varepsilon\sqrt{f}} \qquad [16]$$

El Abaco de Moody se basa en datos experimentales con un margen de error no mas allá de un 5% (el gráfico original fue propuesto por STANTON).

ABACO DE MOODY



Fórmula de Darcy

$$\Delta h_f = f\left(\frac{L}{D}\right)\frac{V^2}{2g} \qquad [17]$$

donde

- Δh_f = pérdida de carga que genera el tramo L de diámetro D (m)
- f = coeficiente o factor de fricción de Moody (sin dimensión)
- L = longitud del tramo de tubería considerada(m)
- D = diámetro interior del ducto (m)
- V = velocidad media o promedio del flujo en D (m/s)

La pérdida de energía en flujo laminar se calcula con la ecuación de HAGEN-POISEUILLE.

$$\Delta h_e = \frac{32\mu LV}{\gamma D^2} \qquad [18]$$

donde

μ = viscosidad dinámica del fluido
γ = peso específico del fluido

Por su parte, la caída de energía en flujo turbulento se calcula con la ecuación de DARCY [17].

Con la ayuda del Abaco de Moody se puede determinar la aspereza relativa o el factor de fricción, según se necesite, como función del número de Reynolds [(f = f(ε/D,Re), ε/D = f(f,Re), Re = f(f, ε/D)].

Por otra parte, el factor de fricción puede ser evaluado actualmente por fórmulas explícitas de f tales como:

1. SWAMEE-JAIN (1976)

$$f = 1.325\left\{\ln\left[0.27\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)+5.74\left(\frac{1}{Re}\right)^{0.9}\right]\right\}^{-2} \qquad [19]$$

$$0.01 > \frac{\varepsilon}{D} > 10^{-8}$$

$$10^{8} > Re > 5000$$

Esta relación presenta un error de menos del 2% con respecto al Abaco de Moody.

2. BLASIUS, para tubos lisos con Re < 10^5

$$f = \frac{0.316}{Re^{1/4}} \qquad [20]$$

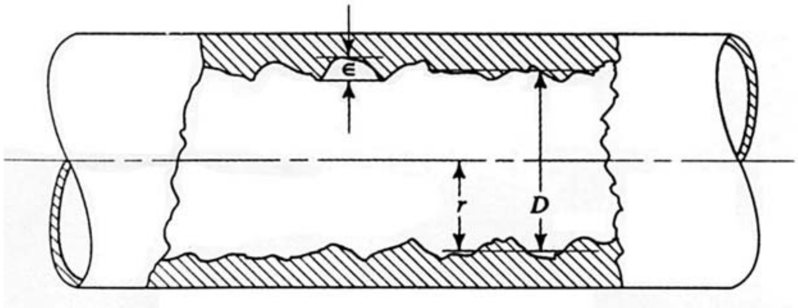
3. MOODY

$$f = 0.0055\left[1+\left(2\cdot 10^{4}\frac{\varepsilon}{D}+\frac{10^{6}}{Re}\right)^{1/3}\right] \qquad [21]$$

4. Flujo laminar, HAGEN-POISEUILLE

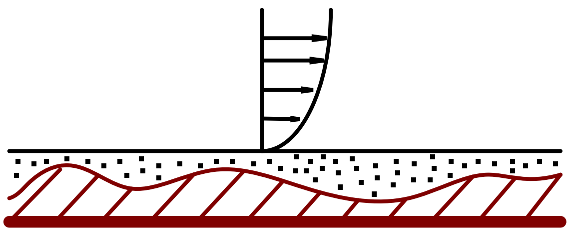
$$f = \frac{64}{Re} \qquad [22]$$

RUGOSIDAD DE LA PARED INTERNA DE UN TUBO.



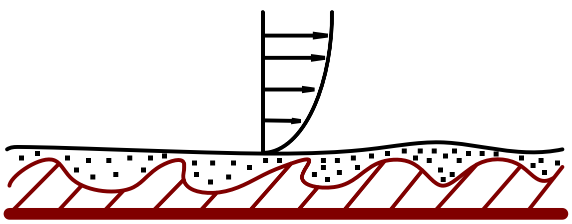
ε = aspereza absoluta
D = ϕ interior
ε/D = aspereza relativa

a.-



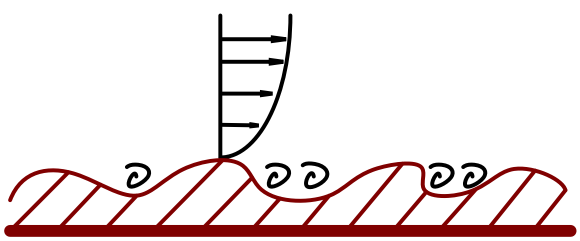
Tubo hidráulicamente liso o fin de régimen de transición.

b.-



Flujo turbulento en desarrollo.

c.-



Flujo turbulento plenamente desarrollado.

3.2.2 PÉRDIDA DE CARGA SINGULAR

La pérdida de energía en accesorios hidráulicos tales como; válvulas, tees, codos, válvulas de retención, serpentines, etc. se les llama, habitualmente, pérdida de carga singular.

La fórmula empírica usada es:

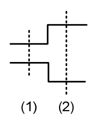
$$\Delta h_s = K \frac{V^2}{2g} \qquad [23]$$

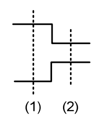
donde

Δh_s = pérdida de carga singular
K = coeficiente singular
V = mayor velocidad que interviene en la singularidad.

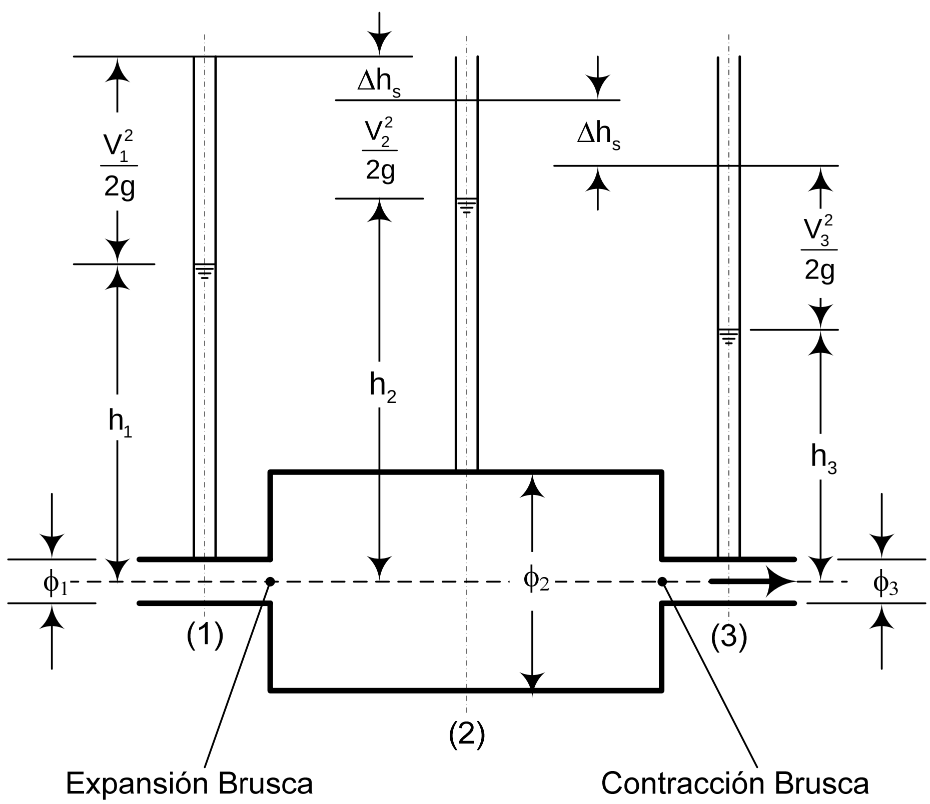
INSTALACION DE LABORATORIO

Las singularidades que contempla el laboratorio son:

- Expansión brusca 

- Contracción brusca 

Análisis energético



Balance de energía entre (1) y (2)

$$ {}_1\Delta h_{s2} = \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) \qquad [24] $$

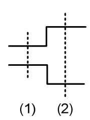
Balance de energía entre (2) y (3)

$$ {}_2\Delta h_{s3} = \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) - \left(h_3 + \frac{V_3^2}{2g} \right) \qquad [25] $$

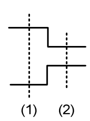
Los valores de V_1, V_2 y V_3 se calculan con la ecuación de continuidad.

$$ V_1 = \frac{4Q}{\pi d^2} \qquad V_2 = \frac{4Q}{\pi D^2} \qquad V_3 = V_1 \Rightarrow d_3 = d_1 $$

Con los valores de Δh_s medidas y con la fórmula [ ] se obtiene:



$$: \quad K_i = \frac{{}_1\Delta h_{s2}}{\left(\frac{V_1^2}{2g} \right)} \qquad [26] $$



$$: \quad K_e = \frac{{}_2\Delta h_{s3}}{\left(\frac{V_3^2}{2g} \right)} \qquad [27] $$

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 Tuberías

Los datos experimentales de cotas piezométricas (h), volumen (∀) y tiempo(t), se registran en la siguiente tabla:

T ºC = Temperatura del H_2O

L = Largo del tramo de tubería [m]

Lectura Nº	Diámetro (mm)	h_1 (cm H_2O)	h_2 (cm H_2O)	∀ (cm^3)	t (s)
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	d =				

4.2 Singularidades

Estos datos se registran

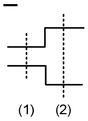
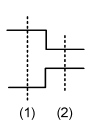
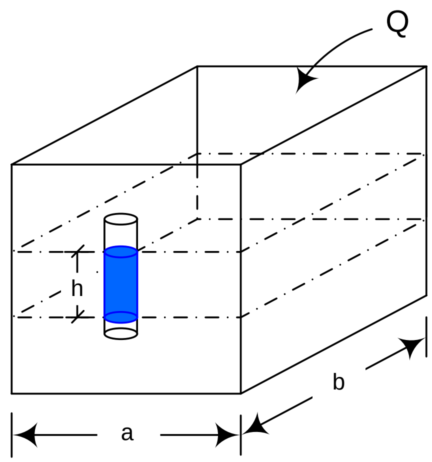
Fig	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_3 (cm)	∀ (cm^3)	t (s)
d=  D=					
					

Tabla diseñada sólo para dos caudales distintos.

5. PROCESAMIENTOS DE DATOS

5.1 Tuberías

Los caudales pequeños (tubería de pequeño diámetro) se miden con una probeta y un cronómetro, en cambio, los caudales grandes se miden con el estanque de aforo y cronómetro.



Se mide el caudal volumétricamente como:

$$\forall = a \cdot b \cdot h \quad \left[cm^3\right] \qquad [28]$$

donde:

a = ancho interior del estanque
b = largo interior del estanque
h = altura de columna de agua tomada el tubo nivel o piezómetro.

El procedimiento consiste en medir el tiempo que se demora en subir el agua una cierta altura h previamente fijada, indicada en la figura.

Por lo tanto, el caudal queda dado por

$$Q = \frac{\forall}{t} \quad \left[l/s\right] \qquad [29]$$

El caudal volumétrico se calcula siempre de esta manera, independiente del depósito aforador que se utilice (estanque, probeta).

Tabla de Resultados

Lectura Nº	Δh_f (cm)	V (m/s)	Q (l/s)	f	Re
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

Los valores de las columnas se calculan como sigue:

(1) : $\Delta h_f = h_1 - h_2$ $\Rightarrow$ medida directa

(2) : $V = \dfrac{4Q}{\pi d^2}$ $\Rightarrow$ continuidad

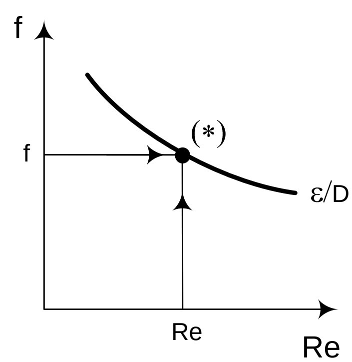
(3) : $Q = \dfrac{\forall}{t}$ $\Rightarrow$ caudal

(4) : $f = \dfrac{2gd(h_1 - h_2)}{LV^2}$ $\Rightarrow$ Darcy

(5) : $Re = \dfrac{VD}{\nu}$ $\Rightarrow$ Reynolds

Obtención de la aspereza

1. Con f y Re se entra al Abaco de Moody para depositar el punto experimental (*).



2. Luego de todos los puntos experimentales se traza la mejor curva paralela a las curvas dadas de parámetros (ε/D)
3. Por interpolación simple se calcula el valor de (ε/d) experimentado.

4. El valor absoluto se obtiene como:

$$\varepsilon = \left(\frac{\varepsilon}{\mathrm{d}}\right) \cdot \mathrm{d} \qquad [30]$$

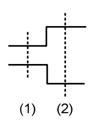
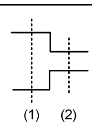
donde d = diámetro de la tubería ensayada.

$$\frac{\varepsilon}{\mathrm{d}} = \text{ valor obtenido de Moody}$$

5.2 Singularidades

El caudal se mide de igual forma que el caso de las tuberías.

Tabla de Resultados

Fig.	h_1 (cm)	$V_1^2/2g$ (cm)	h_2 (cm)	$V_2^2/2g$ (cm)	Δh_s (cm)	K
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
						

Las columnas se calculan con:

(1) : h_1 $\Rightarrow$ medida directa de laboratorio

(2) : $\dfrac{V_1^2}{2g}$ $\Rightarrow$ V_1 de la ecuación de cantidad (a)

(3) : h_2 $\Rightarrow$ medida directa de laboratorio

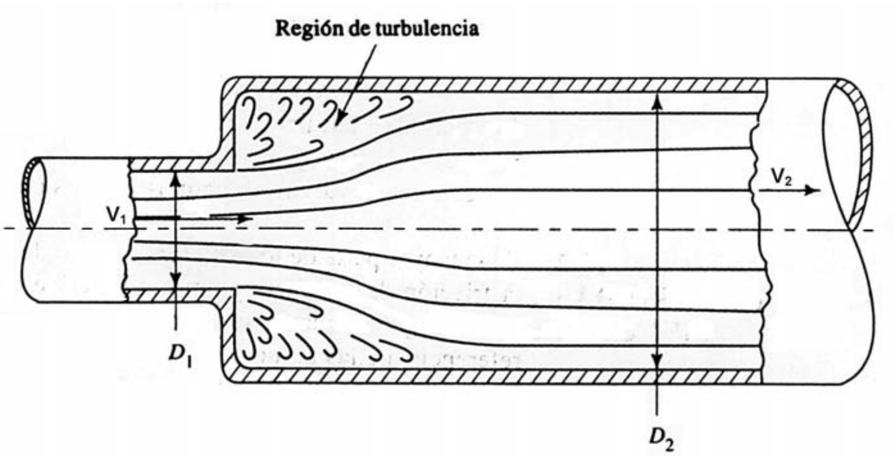
(4) : $\dfrac{V_2^2}{2g}$ $\Rightarrow$ V_2 de la ecuación de cantidad (D)

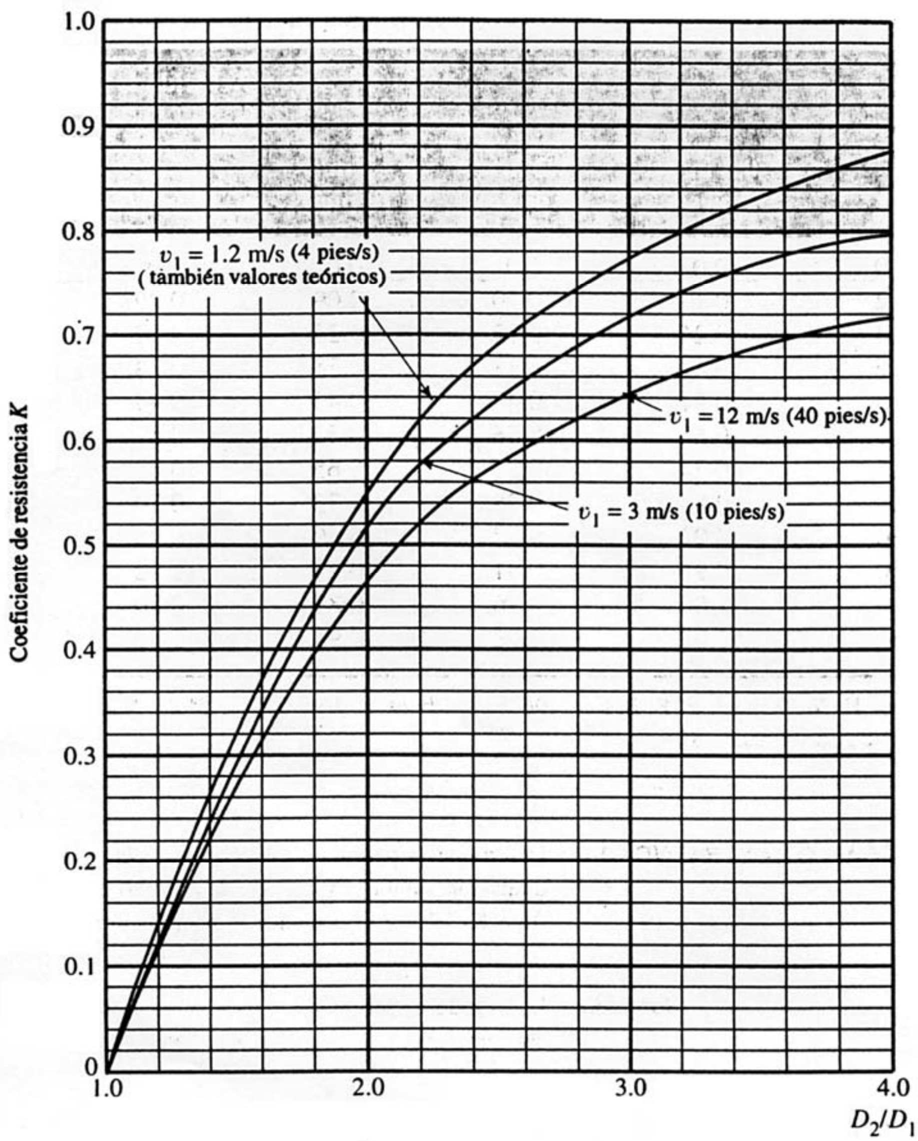
(5) : Δh_s $\Rightarrow$ de la ecuación [24] ó [25]

(6) : K $\Rightarrow$ de la ecuación [26] y [27]

Referencias para confrontar los resultados experimentales

Expansión Brusca

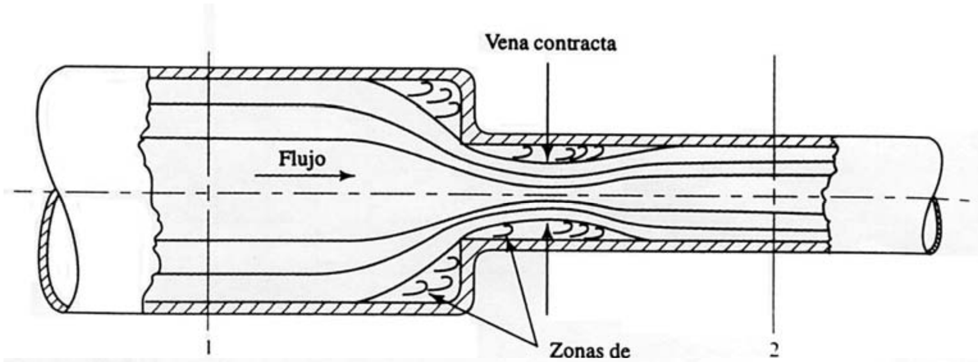


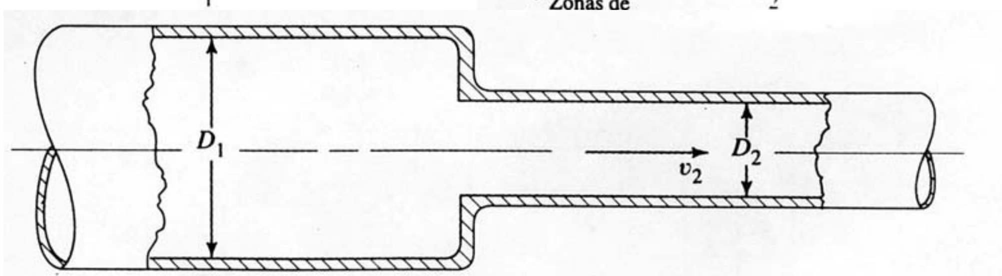


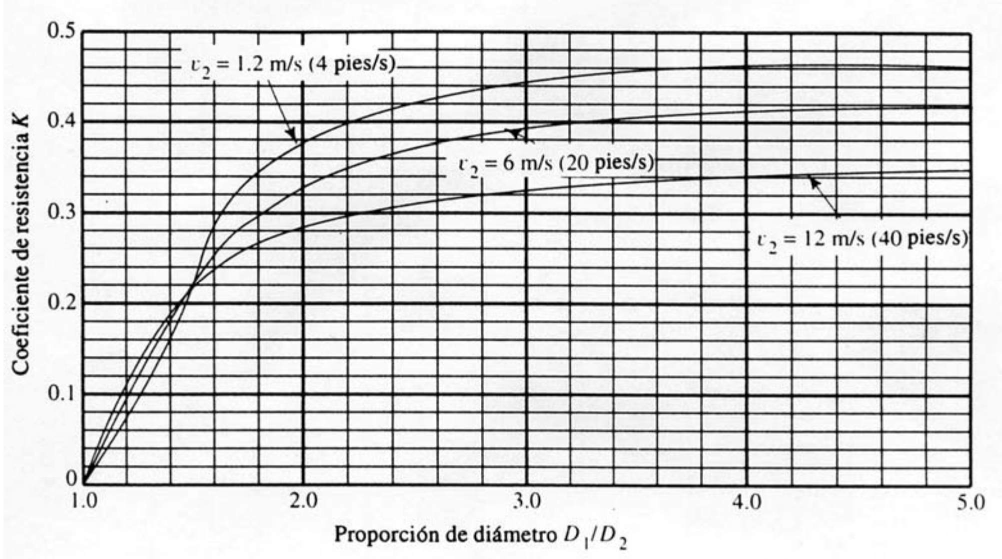
Se puede predecir analíticamente el valor de K aproximado para velocidades alrededor de V = 1,2 (m/s).

$$K = \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)\right]^2 = \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right]^2$$

Contracción Brusca







BIBLIOGRAFIA

1. CRANE …………. Manual de accesorios hidráulicos
2. STREETER ……….. Mecánica de Fluidos
3. POTTER ..………... Mecánica de Fluidos
4. MUNSON ……….. Fundamento de Mecánica de Fluidos