

## **Mecánica de Fluidos**

### **Tema 6: Flujo viscoso en conductos**

# Flujo viscoso en conductos: Resumen

- Para resolver una red, se necesita aplicar Bernoulli entre diferentes puntos de la misma. Para ello se necesitarán evaluar las pérdida de carga.

$$\left( \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} + z \right)_1 - h_{turb} + h_{bomb} = \left( \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} + z \right)_2 + \overbrace{\sum_{\text{Cada tramo recto}} h_f + \sum_{\text{Cada elemento}} h_m}^{h_{\text{pérdidas}}}$$

Total length =  $\ell = 20$  m

- Pérdidas de carga primaria,  $h_f$ : en tramos rectos.

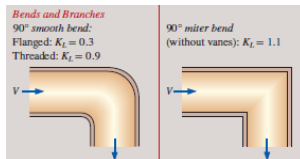
$$h_f = f \frac{L_{\text{tramo}}}{d} \frac{V^2}{2g} \begin{cases} \text{Laminar: } Re_d < 2300 \Rightarrow f = \frac{64}{Re_d} \\ \text{Turbulento: } Re_d > 2300 \Rightarrow \begin{cases} \frac{1}{f^{1/2}} = -2.0 \log \left( \frac{\varepsilon/d}{3.7} + \frac{2.51}{Re_d f^{1/2}} \right) \\ \text{ó} \\ \frac{1}{f^{1/2}} \cong -1.8 \log \left( \left( \frac{\varepsilon/d}{3.7} \right)^{1.1} + \frac{6.9}{Re_d} \right) \end{cases} \end{cases}$$

Diagrama de Moody:  $f$  de forma gráfica.

- Pérdidas de carga secundaria,  $h_m$ : en elementos concretos como codos, válvulas, uniones...

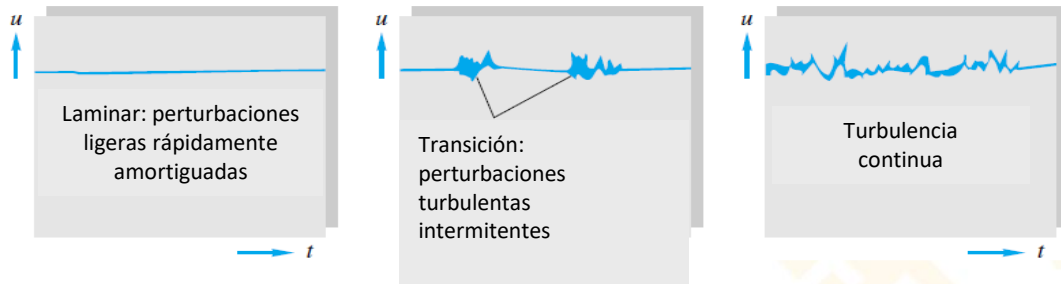
$$h_m = K \frac{V^2}{2g}$$

↑  
tablas

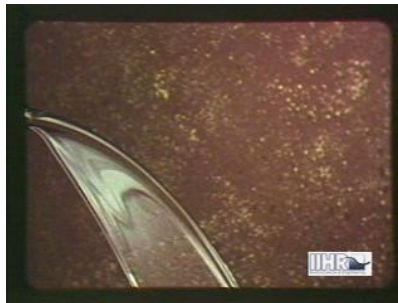


# Flujo viscoso en conductos: regímenes

- A moderados números de Reynolds se produce un cambio profundo y complicado en el comportamiento de los flujos.
- El movimiento deja de ser suave y ordenado (*laminar*) y se convierte en fluctuante y agitado (*turbulento*).
- Este proceso de cambio se denomina *transición* hacia la turbulencia. Influyen muchos efectos: rugosidad de la pared o las fluctuaciones en la corriente libre, siendo el Reynolds el parámetro básico.



- Flujo externo:

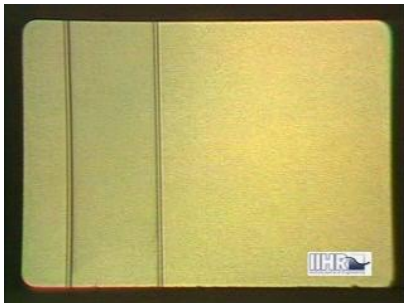


# Flujo viscoso en conductos: regímenes

- Estos son rangos indicativos que pueden variar con la geometría del flujo, la rugosidad de la superficie y los niveles de fluctuación de la corriente a la entrada.

$0 < Re < 1$ :	Movimiento laminar “lento” altamente viscoso
$1 < Re < 10^2$ :	Movimiento laminar. Fuerte dependencia del $Re$
$10^2 < Re < 10^3$ :	Movimiento laminar. Teoría de la capa límite
$10^3 < Re < 10^4$ :	Transición
$10^4 < Re < 10^6$ :	Turbulento. Moderada dependencia del $Re$ .
$10^6 < Re < \infty$ :	Turbulento. Débil dependencia del $Re$ .

- Movimiento laminar lento:  $Re < 1$



Vídeo

# Flujo viscoso en conductos: regímenes

- En 1883, Osborne Reynolds demostró que el cambio de régimen dependía un parámetro:

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu}$$

- Observó que para tubos comerciales, el valor de transición es  $Re_{d,crit} \approx 2300$ .
- Sin embargo, teniendo especial cuidado en redondear la entrada, poner paredes lisas, o con pocas perturbaciones se puede obtener un valor más elevado.
- Geometrías distintas: placas, alas, cilindros, esferas, etc... tendrán valores de Re críticos diferentes.



LAMINAR



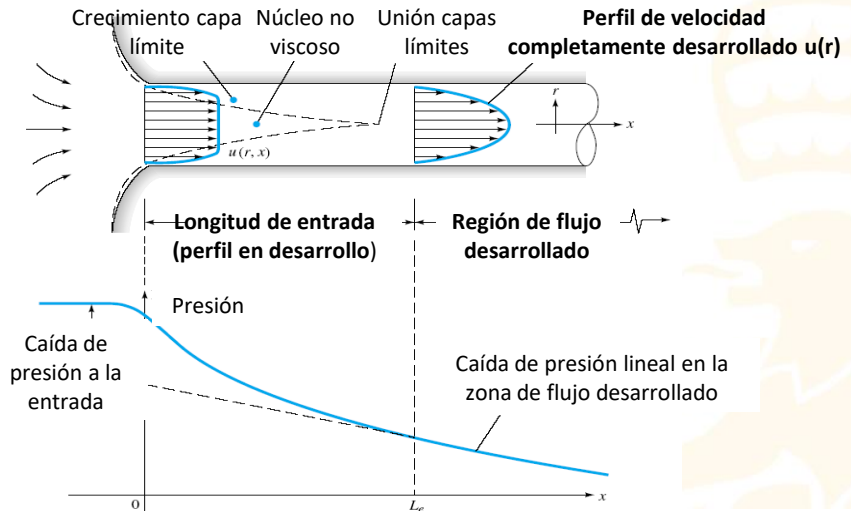
TRANSICIÓN



TURBULENTO

# Flujo interno: región de entrada

- Un flujo interno está confinado por paredes, y las regiones fluidas sometidas a los efectos viscosos crecerán y se encontrarán hasta ocupar todo el flujo.
- Hay una *región de entrada* donde la corriente no viscosa inicial converge y entra en el conducto. Las capas límite viscosas crecen aguas abajo, frenando el flujo en la pared y acelerando el núcleo central para mantener el caudal.
- A una distancia finita de la entrada, las capas límite se unen y el núcleo no viscoso desaparece. El flujo en el tubo es entonces completamente viscoso, y la velocidad axial se va ajustando hasta que no cambia con  $x$  y se dice que el flujo está *completamente desarrollado*. Aguas debajo de este punto, el perfil de velocidad es constante, el esfuerzo en la pared es constante y la presión disminuye linealmente con  $x$ , tanto en flujo laminar como turbulento.



En la región de entrada,

- ☐ a. El espesor del núcleo no viscoso aumenta.
- ☐ b. Las capas límite crecen hasta converger en un único punto.
- ☐ c. El espesor de las capas límites permanece constante.

## Flujo interno: región de entrada

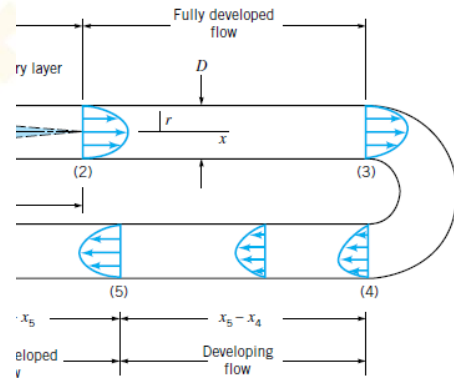
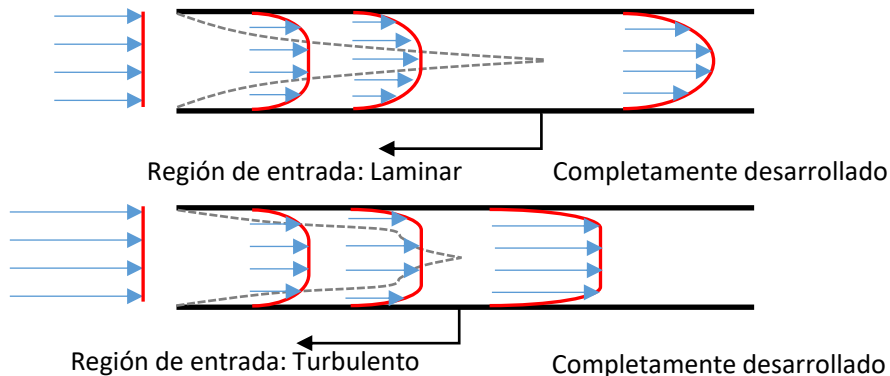
- El análisis dimensional indica que el número de Reynolds es el único parámetro que determina la longitud de entrada.

Laminar:  $\frac{L_e}{d} \approx 0.06Re \Rightarrow \text{Si } Re_{d,crit} \approx 2300 \Rightarrow L_{e,max} = 138d$

Turbulento:  $\frac{L_e}{d} \approx 4.4Re^{1/6}$

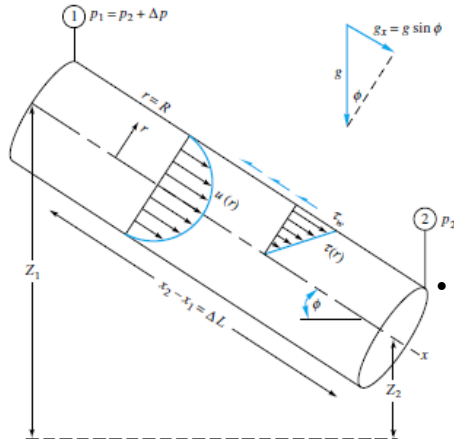
$Re_d$	4000	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$	$10^8$
$L_e/d$	18	20	30	44	65	95

- En flujo turbulento, las capas límites crecen más deprisa y la longitud de entrada  $L_e$  es relativamente más corta.
- En muchas aplicaciones con tubos, se tienen  $L \approx 1000d$ , en cuyo caso los efectos de la entrada son despreciables y se puede hacer un análisis simple de flujo completamente desarrollado.



# Pérdida de carga: el coeficiente de fricción

- Flujo estacionario incompresible, completamente desarrollado entre 1 y 2, del tubo inclinado de sección constante (velocidad media:  $V_1 = V_2, \alpha_1 = \alpha_2$ ):



$$\left( \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g} + z \right)_1 = \left( \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g} + z \right)_2 + h_f$$

$$\Rightarrow h_f = (z_1 - z_2) + \frac{\Delta p}{\rho g}$$

- Aplicando la ecuación de la cantidad de movimiento al volumen de control:

$$\begin{aligned} \sum F_x &= \Delta p(\pi R^2) + \rho g(\pi R^2)L \sin \phi - \tau_w(2\pi R)L = \\ &= \dot{m}(V_1 - V_2) = 0 \end{aligned}$$

- Reordenando los términos, la pérdida de carga:

$$(z_1 - z_2) + \frac{\Delta p}{\rho g} = h_f = \frac{2\tau_w L}{\rho g R} = \frac{4\tau_w L}{\rho g d}$$

El término  $h_f$  en un conducto de sección constante:

- ☐ a. es la variación de presión y altura expresada en metros  $\frac{\Delta p}{\rho g} + \Delta z$ .
- ☐ b. es la variación de presión.
- ☐ c. es inversamente proporcional a la longitud del conducto.

- Independientemente de si la tubería está horizontal o inclinada, la pérdida de carga es proporcional al esfuerzo de cortadura en la pared en el tubo.

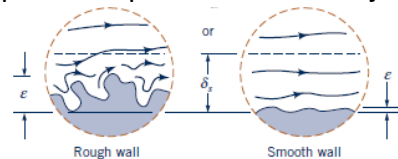


# Pérdida de carga

- Ecuación de Darcy-Weisbach, válida para laminar y turbulento:

$$h_f = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g}$$

- El parámetro adimensional  $f$  se denomina *coeficiente de fricción de Darcy*.
- El parámetro  $\varepsilon$  es la altura de la rugosidad de la pared, que es importante en el flujo turbulento en conductos (pero no en el laminar).



- El efecto de la “forma del conducto”: los coeficientes de fricción son distintos en conductos de sección circular, cuadrada y triangular.

- Con las ecuaciones anteriores:  $f = \frac{8\tau_w}{\rho V^2} \Rightarrow f = f(Re_d, \frac{\varepsilon}{d}, \text{forma del conducto})$

- Para conductos no circulares debemos interpretar,  $\tau_w$ , como el valor medio en el perímetro del conducto. Por esta razón, se prefiere la usar la ecuación de Darcy-Weisbach.

# Flujo laminar completamente desarrollado

- Conductos circulares: Flujo de Poiseuille

$$u = u_{max} \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \Rightarrow \begin{cases} V = \frac{Q}{A} = \frac{u_{max}}{2} \\ \tau_w = \left| \mu \frac{du}{dr} \right|_{r=R} = \frac{4\mu V}{R} = \frac{8\mu V}{d} \end{cases} \Rightarrow f = \frac{8\tau_w}{\rho V^2} = \frac{8(8\mu V/d)}{\rho V^2} = \frac{64}{\rho V d / \mu}$$

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

- En flujo laminar, el coeficiente de fricción del conducto es inversamente proporcional al número de Reynolds.
- La pérdida de carga:

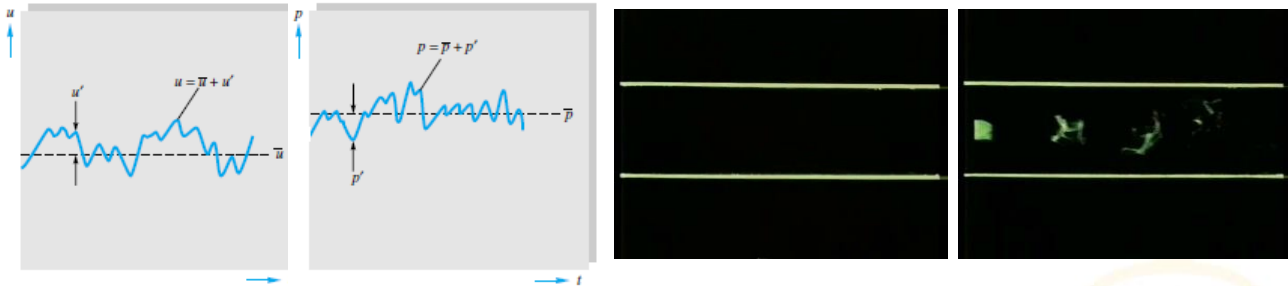
$$h_f = \frac{64}{Re_d} \frac{L V^2}{d 2g} = \frac{64}{\rho V d / \mu} \frac{L V^2}{d 2g} = \frac{128\mu L Q}{\pi \rho g d^4} = f(Q)$$

Para un flujo laminar completamente desarrollado en conductos circulares:

- ☐ a. el coeficiente de fricción es inversamente proporcional al número de Reynolds.
- ☐ b. las correlaciones del coeficiente de fricción son válidas para números de Reynolds superiores al crítico de 2300 aproximadamente.
- ☐ c. el coeficiente de fricción es inversamente proporcional al número de Reynolds y directamente proporcional a la rugosidad de la pared adimensionalizada con el diámetro del conducto.

# Flujo turbulento completamente desarrollado

- En flujo turbulento, debido a las fluctuaciones, cada término de presión o velocidad varía rápida y aleatoriamente en función de la posición y del tiempo.



- Generalmente queremos conocer valores medios de velocidad, presión, esfuerzo cortante, etc.
- La media temporal, en un periodo T de promediado mayor que cualquier periodo significativo de las fluctuaciones:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u \, dt \quad u' = u - \bar{u}$$

- La fluctuación  $u'$ , se define como la desviación de  $u$  de su valor medio:

$$\bar{u'} = \frac{1}{T} \int_0^T (u - \bar{u}) \, dt = \bar{u} - \bar{u} = 0$$

# Flujo turbulento completamente desarrollado

- Concepto de media temporal de Reynolds: separa cada propiedad en sus medias más las fluctuaciones correspondientes. Después hay que evaluar la media temporal de las ecuaciones.

$$u = \bar{u} + u' \quad v = \bar{v} + v' \quad w = \bar{w} + w' \quad p = \bar{p} + p'$$

- Ecuación de continuidad: idéntica a la expresión laminar.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

- Ecuación de cantidad de movimiento: en la dirección del movimiento principal, x.

$$\rho \frac{D\bar{u}}{Dt} = \rho g_x - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \rho \overline{u'^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \rho \overline{u'w'} \right)$$

- Los 3 términos  $-\rho \overline{u'^2}$ ,  $-\rho \overline{u'v'}$ ,  $-\rho \overline{u'w'}$  se denominan esfuerzos turbulentos. Realmente, son términos de aceleración convectiva, no esfuerzos, pero tienen el mismo efecto matemático.
- Son a priori incógnitas que deben relacionarse experimentalmente con las condiciones y la geometría del flujo.

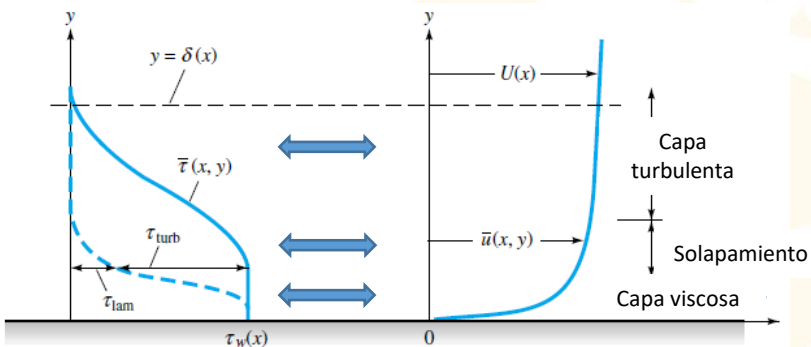
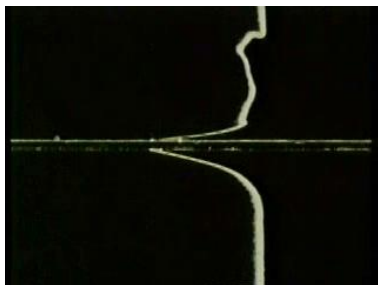
# Flujo turbulento completamente desarrollado

- En flujos en conductos y en capas límite, los esfuerzos  $-\rho \overline{u'v'}$  asociados con la dirección y normal a la pared son dominantes. Así la ecuación anterior se simplifica:

$$\rho \frac{D\bar{u}}{Dt} \approx \rho g_x - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} \right) = \rho g_x - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial y}$$

$\downarrow \qquad \qquad \downarrow$   
 $\tau = \tau_{lam} + \tau_{turb}$

- Los esfuerzos viscosos son dominantes cerca de la pared (*región interior o de la pared*) y los esfuerzos turbulentos lo son en la *región exterior*. Entre ambas existe una *región intermedia o de solape*, donde los esfuerzos viscosos como turbulentos son importantes.
- En la región exterior  $\tau_{turb}$  es 2 ó 3 órdenes de magnitud mayor que  $\tau_{lam}$ , y en la región de la pared ocurre lo contrario.



# Flujo turbulento completamente desarrollado

Después de realizar la media temporal de Reynolds, en régimen turbulento:

Seleccione una:

- ☐ a. Aparecen términos nuevos que pueden ser despreciados en la capa viscosa del flujo.
- ☐ b. Aparecen términos denominados esfuerzos turbulentos asociados a la viscosidad del fluido.
- ☐ c. La conservación de la masa contiene términos de fluctuación ( $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ )

Para un flujo turbulento próximo a la pared:

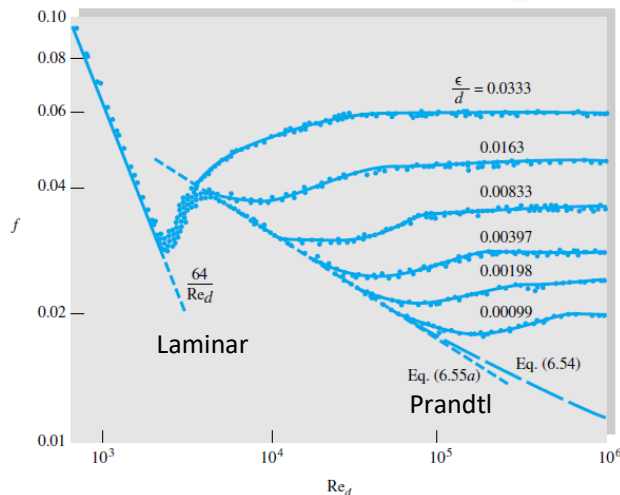
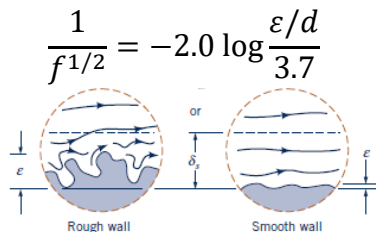
- ☐ a. lejos de la pared ambos tipos de esfuerzos son importantes.
- ☐ b. cerca de la pared los esfuerzos turbulentos son dominantes mientras que lejos de la pared lo son los esfuerzos viscosos.
- ☐ c. cerca de la pared los esfuerzos viscosos son dominantes mientras que lejos de la pared lo son los esfuerzos turbulentos.

# Flujo turbulento en conductos circulares

- Ley de Prandtl. Paredes lisas:** a partir del uso de la ecuación logarítmica, ajustando las constantes y empleando la definición de  $f$

$$\frac{u(r)}{u^*} \approx \frac{1}{\kappa} \ln \frac{(R-r)u^*}{\nu} + B \Rightarrow \frac{1}{f^{1/2}} = 2.0 \log(Re f^{1/2}) - 0.8$$

- Nikuradse:** simuló la rugosidad pegando granos de arena de tamaño uniforme en las paredes interiores de tubos, determinando los siguientes tres regímenes de rugosidad:
- Paredes hidrodinámicamente lisas, sin efecto de la rugosidad en la fricción
- Rugosidad de transición, moderado efecto de  $Re$
- Flujo dominado por la rugosidad, la subcapa viscosa no existe y la fricción es independiente del  $Re$ :



# Diagrama de Moody

- Para cubrir el rango de transición, Colebrook combinó las relaciones de paredes lisas y dominado por la rugosidad en una fórmula única.

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -2.0 \log \left( \frac{\varepsilon/d}{3.7} + \frac{2.51}{Re_d f^{1/2}} \right)$$

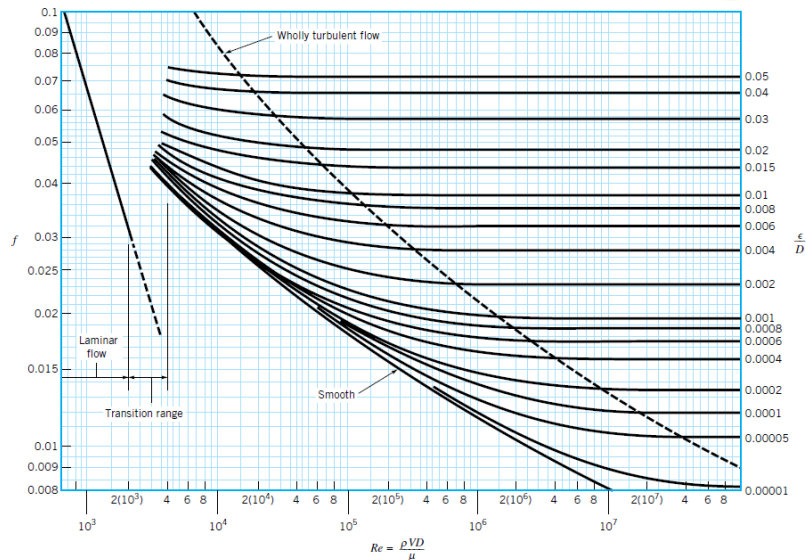
Simplificación

$$\frac{1}{f^{1/2}} \cong -1.8 \log \left( \left( \frac{\varepsilon/d}{3.7} \right)^{1.1} + \frac{6.9}{Re_d} \right)$$

- El diagrama es fiable si se aceptan errores inferiores al 15%. Puede ser utilizada para conductos circulares y no circulares.
- No existen coeficientes de fricción fiables en el rango de transición  $2000 < Re < 4000$ .

Equivalent Roughness for New Pipes [From Moody (Ref. 7) and Colebrook (Ref. 8)]

Pipe	Equivalent Roughness, $\varepsilon$	
	Feet	Millimeters
Riveted steel	0.003–0.03	0.9–9.0
Concrete	0.001–0.01	0.3–3.0
Wood stave	0.0006–0.003	0.18–0.9
Cast iron	0.00085	0.26
Galvanized iron	0.0005	0.15
Commercial steel or wrought iron	0.00015	0.045
Drawn tubing	0.000005	0.0015
Plastic, glass	0.0 (smooth)	0.0 (smooth)





El coeficiente de fricción de Darcy es:

- ☐ a. función del número de Reynolds y de la rugosidad superficial de la pared en régimen laminar.
- ☐ b. función del número de Reynolds y de la rugosidad superficial adimensional en cualquier régimen.
- ☐ c. directamente proporcional al esfuerzo de cortadura en la pared.

El rango de Reynolds de transición (rugosidad de transición) a la turbulencia total (dominado por la rugosidad):

- ☐ a. No se ve afectado por la rugosidad de la tubería.
- ☐ b. Es tanto más amplio cuanto mayor es la rugosidad de la tubería.
- ☐ c. Es tanto más amplio cuanto menor es la rugosidad de la tubería.

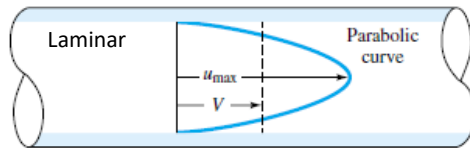
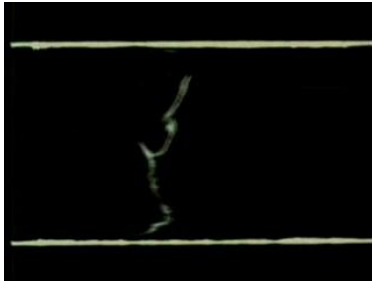
En una pared con rugosidad interior nula ( $\epsilon = 0$ ):

- ☐ a. El factor de fricción es nulo ( $f=0$ ).
- ☐ b. El factor de fricción depende del Reynolds como ( $f=cte \cdot Re$ ).
- ☐ c. La pérdida de carga por fricción no es nula ( $h_f > 0$ ).

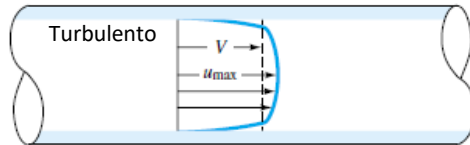
# Flujo turbulento en conductos circulares

- En conductos, una fórmula que relaciona la velocidad media con la máxima:

$$\frac{V}{u_{max}} \approx (1 + 1.3\sqrt{f})^{-1}$$



(a)



$Re_d$	4000	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$	$10^8$
$V/u_{max}$	0.790	0.811	0.849	0.875	0.893	0.907

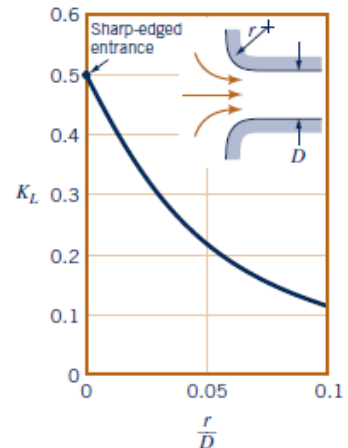
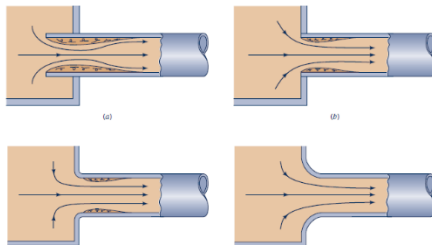
- El esfuerzo cortante es mayor en régimen turbulento que en laminar.
- Para un caudal  $Q$  dado, la presión disminuye con el diámetro en régimen turbulento,  $f(d^{-4.75})$ , y en laminar  $f(d^{-4})$ . La forma más fácil de reducir la presión de bombeo es poner tubos de mayor diámetro, aunque son más caros.

# Pérdidas localizadas

- En cualquier sistema de tuberías, además de la pérdida de carga por fricción, existen *pérdidas menores o localizadas* debidas a:
  - Entrada o salida de tuberías.
  - Ensanchamientos o contracciones bruscas
  - Curvas, codos, “tes” y otros accesorios.
  - Válvulas, abiertas o parcialmente cerradas.
  - Ensanchamiento o contracciones graduales.
- Las pérdidas no tienen por qué ser pequeñas. Se miden experimentalmente y se correlacionan con los parámetros de flujo, generalmente relativos a flujo turbulento.

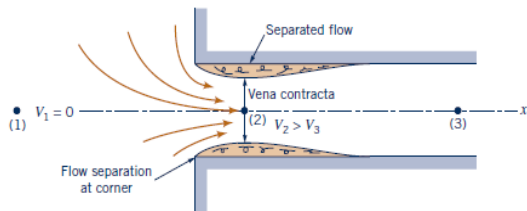
$$\Delta h_{tot} = h_f + \sum_i K_i \frac{V_i^2}{2g}$$

- Entradas o salidas de tuberías:**
  - $K = 1$ , salida de tubería a depósito



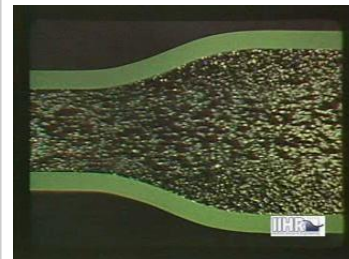
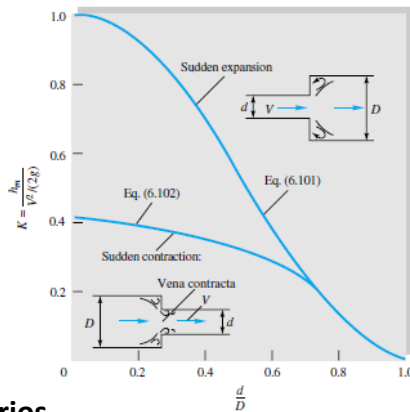
# Pérdidas localizadas

- **Ensanchamiento o contracción brusca**
- **Ensanchamiento o contracciones graduales**

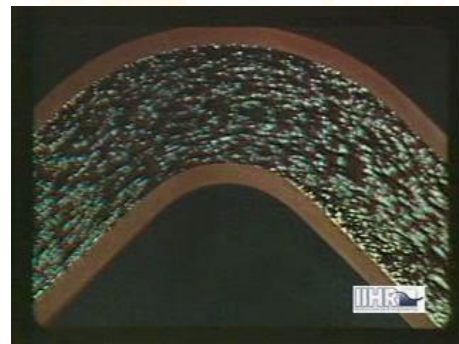
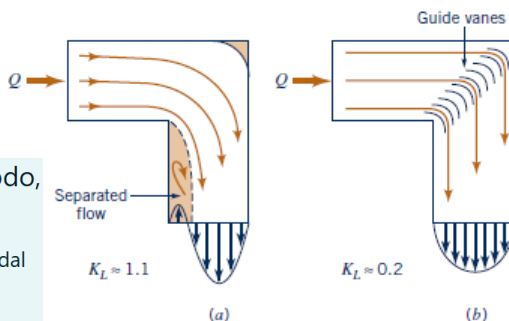


La pérdida de carga en el ensanchamiento/estrechamiento de la figura:

- ☐ a. Es mayor cuando el flujo lleva el sentido 2.
- ☐ b. Es igual en ambos sentidos.
- ☐ c. Es mayor cuando el flujo lleva el sentido 1.



- **Curvas, codos, “tes” y otros accesorios**



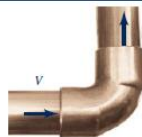
La pérdida de carga en un codo,

- ☐ a. disminuye al aumentar el caudal
- ☐ b. no depende del tipo de codo
- ☐ c. depende de su ángulo

# Pérdidas localizadas

## Válvulas, abiertas o parcialmente cerradas.

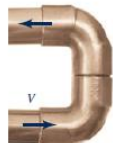
Component	$K_L$
<b>a. Elbows</b>	
Regular 90°, flanged	0.3
Regular 90°, threaded	1.5
Long radius 90°, flanged	0.2
Long radius 90°, threaded	0.7
Long radius 45°, flanged	0.2
Regular 45°, threaded	0.4
<b>b. 180° return bends</b>	
180° return bend, flanged	0.2
180° return bend, threaded	1.5
<b>c. Tees</b>	
Line flow, flanged	0.2
Line flow, threaded	0.9
Branch flow, flanged	1.0
Branch flow, threaded	2.0
<b>d. Union, threaded</b>	
	0.08
<b>*e. Valves</b>	
Globe, fully open	10
Angle, fully open	2
Gate, fully open	0.15
Gate, $\frac{1}{2}$ closed	0.26
Gate, $\frac{1}{3}$ closed	2.1
Gate, $\frac{2}{3}$ closed	17
Swing check, forward flow	2
Swing check, backward flow	$\infty$
Ball valve, fully open	0.05
Ball valve, $\frac{1}{3}$ closed	5.5
Ball valve, $\frac{2}{3}$ closed	210



90° elbow



45° elbow



180° return bend



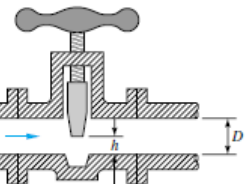
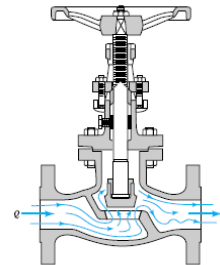
Tee



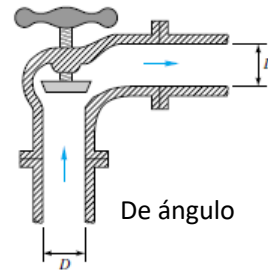
Tee



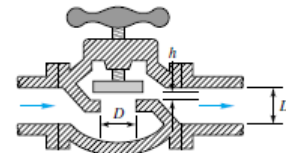
Union



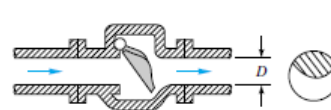
De compuerta



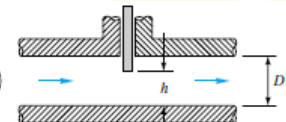
De ángulo



De globo



Anti-retorno



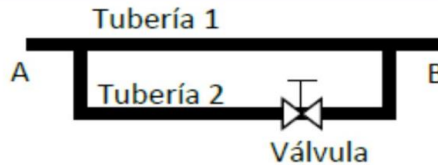
De disco

# Pérdidas localizadas

Un caudal  $Q$  constante llega a un paralelo de dos tuberías, tal y como se muestra en la figura. Al abrir un poco la válvula, entonces:

Seleccione una:

- ☐ a. La presión en A es igual a la presión en B.
- ☐ b. El coeficiente de fricción en la tubería 2 podría aumentar.
- ☐ c. El coeficiente de fricción en la tubería 1 podría aumentar.



Dos tuberías idénticas están en paralelo y en una de ellas hay una bomba. Entonces:

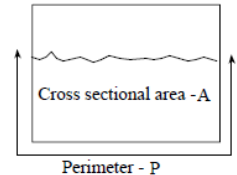
- ☐ a. La pérdida de carga es menor en el tramo con la bomba.
- ☐ b. La pérdida de carga es mayor en el tramo con la bomba.
- ☐ c. Las pérdidas de carga en ambas tuberías es la misma.

# Flujo en conductos no circulares

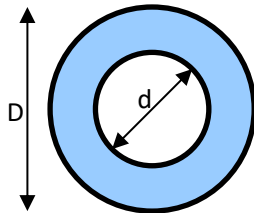
- En flujo laminar, las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento se pueden resolver en forma exacta. En flujos turbulentos, el perfil logarítmico se usa con el diámetro hidráulico, que es una aproximación excelente.

- Diámetro hidráulico:**

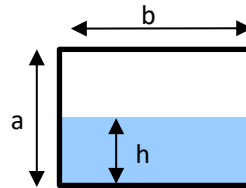
$$D_h = \frac{4 \times \text{Sección Transversal}}{\text{Perímetro mojado}}$$



- El perímetro mojado está determinado por todas las superficies sometidas a esfuerzos de fricción.
- Ejemplos:**



$$D_h = \frac{4 \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}}{\pi D + \pi d} = D - d$$



$$D_h = \frac{4hb}{2h + b}$$

El diámetro hidráulico de un conducto cuya sección es un triángulo equilátero de lado 1 es:

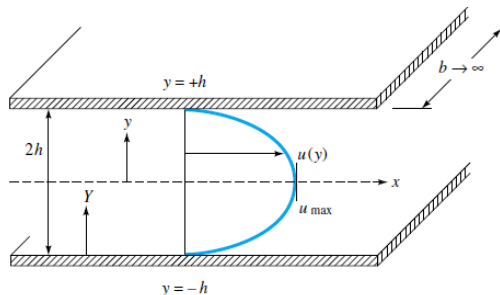
- ☐ a.  $8/3^{1/2}$
- ☐ b.  $3^{1/2}/2$
- ☐ c.  $3^{-1/2}$

# Flujo en conductos no circulares

- El coeficiente de fricción  $f$  basado en el diámetro hidráulico da estos resultados:

$$f \approx \begin{cases} \frac{64}{Re_{D_h}} & \pm 40\% \text{ flujo laminar} \\ f_{Colebrook, Moody} \left( Re_{D_h}, \frac{\epsilon}{D_h} \right) & \pm 15\% \text{ flujo turbulento} \end{cases}$$

- Ejemplo: Placas planas muy anchas



$$D_h = \frac{4(2hb)}{2b + 4h} (b \rightarrow \infty) = 4h$$

- Resolviendo el perfil de velocidad (por c. diferencial):

$$f = \frac{8\tau_w}{\rho V^2} = \frac{96}{Re_{D_h}}$$

- Pérdidas hidráulicas: con el  $D_h$ .

$$h_f = f \frac{L}{D_h} \frac{V^2}{2g}$$



# Medidores de caudal

- Casi todos los problemas prácticos con fluidos en ingeniería están relacionados con una medida precisa de flujo.
- El flujo se puede estimar a partir de un valor de velocidad local o a través de medidores de caudal.
- **Velocidad local:**
  - Trayectoria de partículas flotantes o de flotabilidad neutro
  - Dispositivos mecánicos giratorios:
    - Anemómetro de cazoletas
    - Rotor de Savonius
    - Molinete
    - Medidor de turbina
  - **Tubo Pitot**
  - Medidor electromagnético
  - Hilo y placas calientes
  - Anemómetro de láser por efecto Doppler



# Medidores de caudal

- **Tubo de Pitot:** en los orificios laterales se mide la presión estática  $p_s$  de la corriente y a través del orificio frontal se mide la presión de remanso  $p_o$ , obtenida al decelerar la corriente incidente hasta el reposo.



- Aplicando Bernoulli entre un punto de la corriente incidente y el punto de remanso:

$$\frac{p_s}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z \approx \frac{p_o}{\rho g} + \frac{0^2}{2g} + z$$



$$v \approx \sqrt{2 \frac{(p_o - p_s)}{\rho}}$$



- Tiene que estar alineado con la corriente. Si se emplea en gases, también hay corrección por compresibilidad.



# Medidores de caudal

- **Medidores de caudal:**
  - Medida de masa
    - Depósitos con báscula
    - Trampas basculantes
  - Medida de volumen
    - Depósitos calibrados
    - Pistones con movimiento alternativo
    - Anillos ranurados giratorio
    - Disco giratorio...
  - Medida con pérdida de carga
    - **Orificio en placa delgada: diafragma**
    - **Tobera**
    - **Tubo venturi**
  - Medidor de turbina
  - Rotámetro
  - Medidor de flujo laminar...



[Link a wikipedia](#)

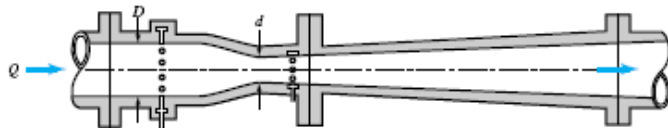
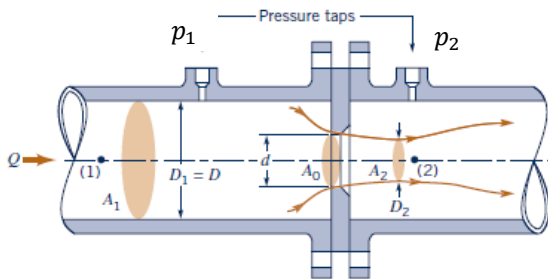
# Medidores de caudal

- Medidores de pérdida de carga: Diafragma, tobera y tubo venturi.

- Se mide la diferencia de presiones

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 \approx \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \Rightarrow$$

$$V_2 \approx \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left(1 - \frac{D_2^4}{D_1^4}\right)}}$$



- Esta expresión no es completamente exacta, porque se ha despreciado la fricción el conducto, donde es importante. Por tanto hay que calibrar el dispositivo a través de un *coeficiente de descarga*  $C_d$  adimensional que tiene en cuenta los posibles errores incluyendo el efecto de la la vena contracta.

$$Q = C_d A_{garganta} V_2$$



La velocidad de una corriente fluida medida con un tubo de Pitot viene dada por la expresión ( $p_0$  presión en el punto de remanso,  $p_s$  presión de la corriente a medir):

- ☐ a.  $\sqrt{2 \frac{p_0 - p_s}{\rho}}$
- ☐ b.  $\sqrt{2 \frac{p_0}{\rho}}$
- ☐ c.  $\sqrt{\frac{p_0 - p_s}{\rho}}$

Para medir el caudal en una instalación se emplea un diafragma (como en la figura). Para una determinada longitud  $h$ , se tiene un caudal  $Q$ . Cuando la altura se multiplica por cuatro, el caudal

Seleccione una:

- ☐ a. Se multiplica por 2, aproximadamente.
- ☐ b. También se multiplica por 4, aproximadamente.
- ☐ c. Se multiplica por 4, exactamente.

