



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

## ABASTECIMIENTO DE AGUAS

TEMA 14  
Cálculos  
hidráulicos  
en tuberías  
forzadas

Juan García Bermejo



## INTRODUCCIÓN

**DEFINICIÓN** → La red de distribución conduce el agua potable desde los puntos de entrada a ésta hasta los distintos usuarios.

Están formadas por tuberías de distintos diámetros situadas bajo las calles, enterradas, donde pueden ser reparadas sin permisos de particulares.

Las redes de distribución se pueden clasificar:

### Según su importancia

- Redes de distribución
- Redes de transporte: tomas de sectores

### Según el movimiento del agua

- Lámina libre
- Forzadas: gravedad, impulsadas

### Según su forma

- Ramificadas o arborescentes
- Malladas

*TUBERÍA* → Forma óptima de transportar el agua en presión, tanto mecánica como hidráulicamente.



### MECÁNICAMENTE

- Antifunicular de las cargas exteriores del terreno: trabaja a compresión
- Reparte de manera uniforme los esfuerzos procedentes de la presión interna: trabaja a tracción



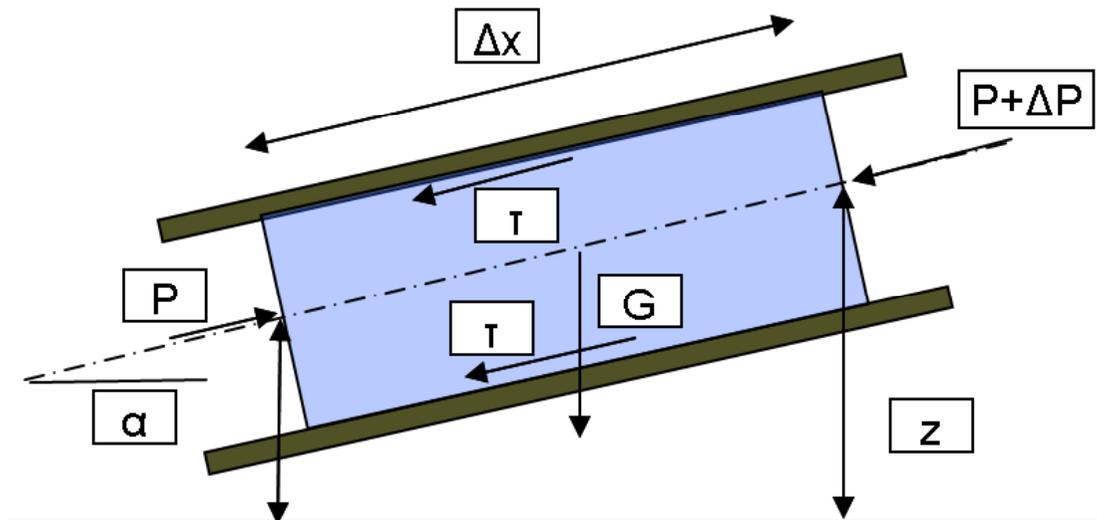
### HIDRÁULICAMENTE

- Sin esquinas, ni aristas vivas. Facilita la mezcla
- Evita que se produzca el régimen turbulento
- Evita producción de deposiciones

### HIPÓTESIS DE PARTIDA

- 1) Fluido incompresible, uniformemente viscoso (fluido newtoniano)
- 2) Flujo uniforme, estacionario
- 3) Sección de conducción constante

Planteamos equilibrio de fuerzas en sección de control:



Fuerzas de presión:  $F_p = p \cdot S - (p + \Delta p) \cdot S$

Fuerzas de fricción:  $F_F = -\tau \cdot P_m \Delta x$

Fuerzas másicas:  $F_G = -\gamma \cdot S \cdot \Delta x \cdot \text{sen} \alpha$

$$p \cdot S - (p + \Delta p) \cdot S - \tau \cdot P_m \cdot \Delta x - \gamma \cdot S \cdot \Delta x \cdot \text{sen} \alpha = 0$$

$$\tau = -\gamma \frac{S}{P_m} \cdot \frac{\Delta \left( \frac{P}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2 \cdot g} \right)}{\Delta x} \qquad I = -\frac{\Delta B}{\Delta x} = -\frac{\Delta \left( \frac{P}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2 \cdot g} \right)}{\Delta x}$$

$$\tau = \gamma \cdot I \cdot R_H$$

## DEFINICIONES

### Rugosidad absoluta de las paredes interiores de la conducción (K)

Experimentalmente se comprueba que:

$$\tau = \lambda \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad \text{con} \quad \lambda = \varphi \left( \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}, \frac{K}{D} \right)$$

Por tanto, sustituyendo el valor de  $\tau$  calculado anteriormente:

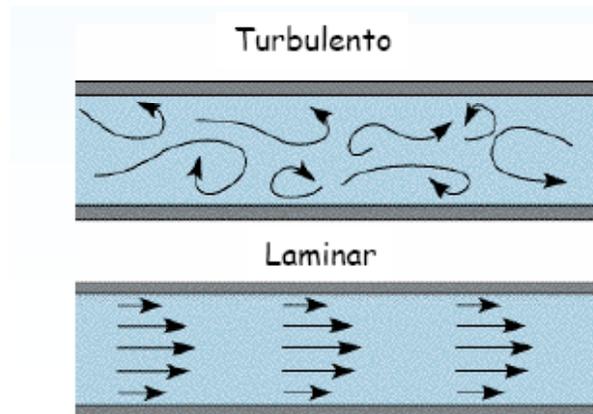
$$I = \lambda \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot \frac{1}{R_H \gamma} \quad \text{si sustituimos además} \quad \lambda = 4 \cdot f$$

y teniendo en cuenta que  $R_H = D / 4$  obtenemos la ecuación de Darcy- Weisbach

$$I = \frac{f}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

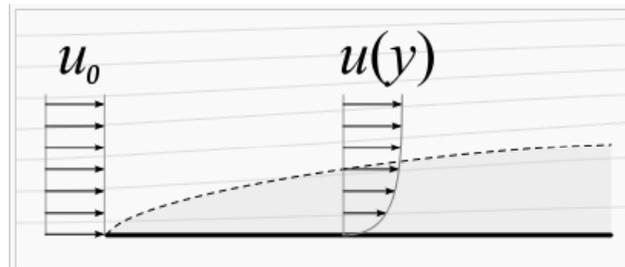
### Movimiento laminar y turbulento

Depende de la viscosidad del fluido (fricción interna) y del flujo.



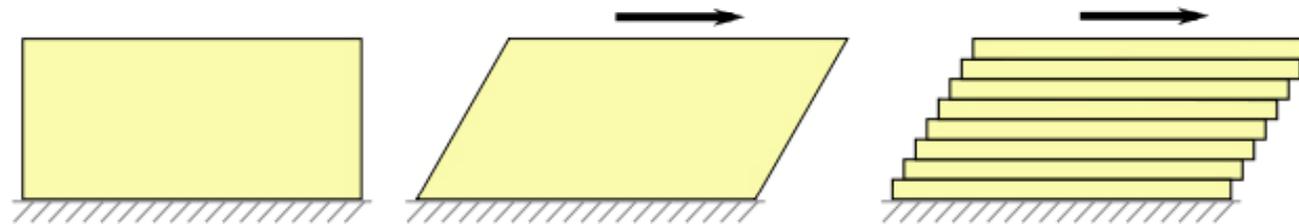
### Capa límite

Es la zona en la que el movimiento está perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto, la velocidad pasa de cero a  $v$ . La capa límite puede ser turbulenta o laminar.



### Viscosidad dinámica o absoluta

Es la fuerza tangencial transmitida por unidad de área al moverse uno de los planos de un fluido con velocidad unidad



La viscosidad cinemática es la dinámica dividida por la densidad del fluido

### Número de Reynolds

Es la relación entre las fuerzas inerciales y gravitacionales:

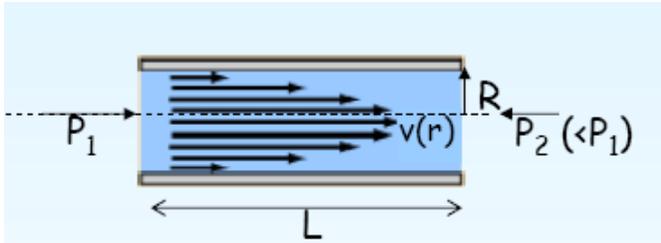
Si  $Re < 2.000$  el régimen es laminar, en caso de superar este valor las perturbaciones aumentan y se inician las transiciones al régimen turbulento

$$R_e = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu}$$

## MOVIMIENTO LAMINAR Y TURBULENTO

**MOVIMIENTO LAMINAR** Ec. de Hagen-Poiseuille ( $R_e < 2.000$ )

Considerando el sumatorio de fuerzas en un cilindro de fluido horizontal y z cte.



$$(P_1 - P_2) \cdot \pi \cdot r^2 = -\mu(2 \cdot \pi \cdot r \cdot L) \cdot \frac{dv}{dr}$$

$$(P_1 - P_2) \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} = \tau \cdot L \cdot \pi \cdot D$$

$$I = \frac{64}{R_e} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \cdot \frac{1}{D}$$

$$V_{media} = \frac{\Delta p \cdot D^2}{32 \cdot \mu \cdot L}$$

$$\tau = \gamma \cdot I \cdot R_H$$

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

### MOVIMIENTO TURBULENTO ( $R_e > 2.000$ )

#### 1) Conducto liso

- *Subcapa viscosa* → Movimiento cuasi-viscoso
- *Capa de transición* → A continuación de la anterior

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad \tau_0 = \rho \cdot u^{*2} \quad \tau = \mu \cdot \frac{v}{y} \quad \frac{v}{u^*} = \frac{u^* \cdot y}{\mu / \rho}$$

Capas de poco espesor, normalmente se desprecia su cálculo

- *Zona de turbulencia*

$$\frac{v}{u^*} = A \cdot \ln R_e + B$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log [R_e \cdot \sqrt{f}] - 0,8$$

### 2) Conducto rugoso

- *Zona de tamaño de rugosidad de mayor espesor que subcapas viscosa y transición.*

f dependerá únicamente de  $K/D$  y no de la viscosidad

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log \left[ \frac{D}{K} \right] + 1,14$$

- *Zona de tamaño de rugosidad de menor espesor que subcapas viscosa y de transición.*

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left[ \frac{K/D}{3,715} + \frac{2,51}{R_e \sqrt{f}} \right]$$

## RESOLUCIÓN DE CASOS CON TUBERÍAS COMERCIALES

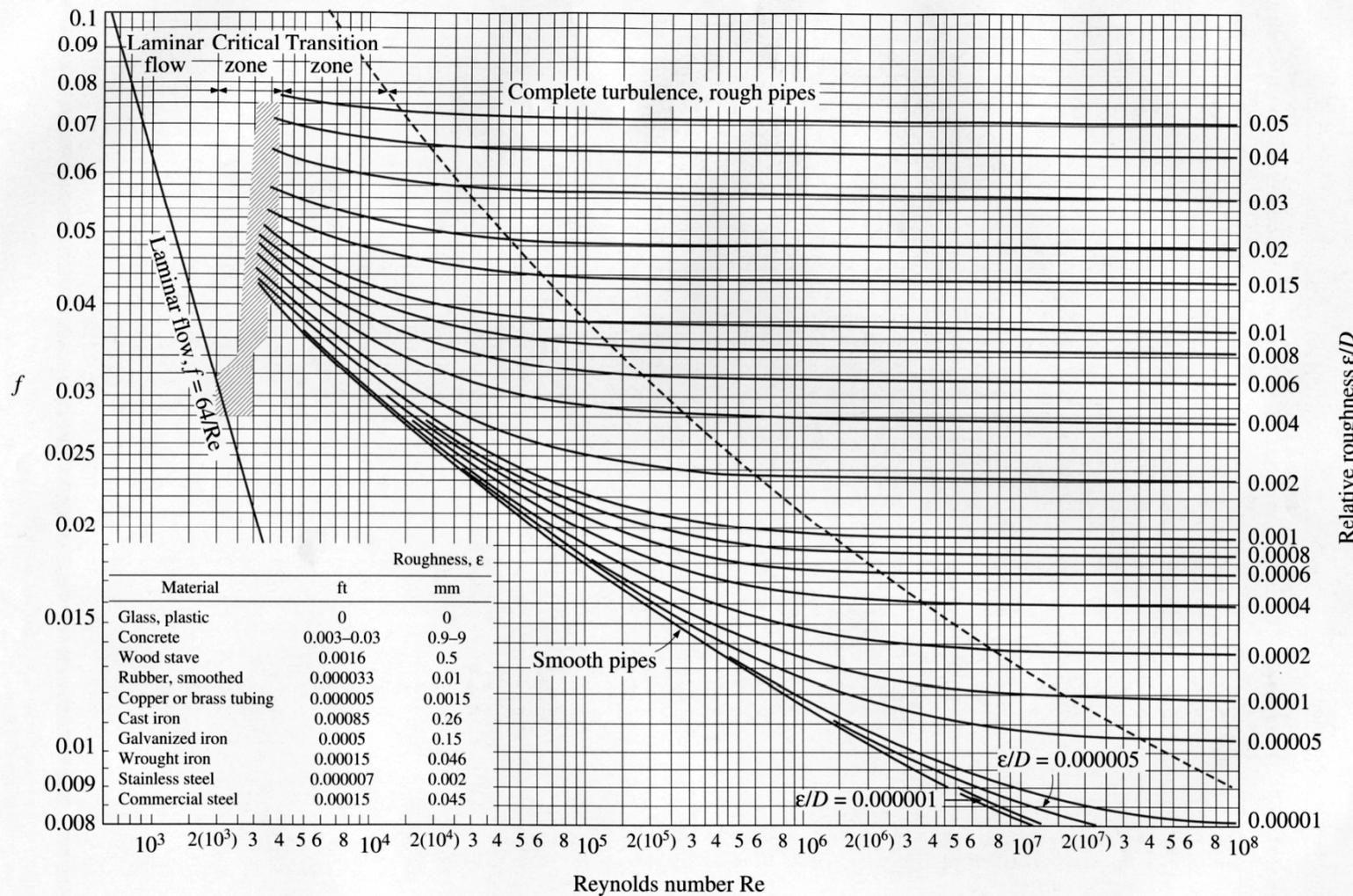
- 1) Fórmula que se aproxime a todos los casos → COLEBROOK-WHITE

Implícita resolución por tanteos

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log \frac{D}{K} + 1,14 - 2 \cdot \log \left[ 1 + 9,35 \frac{D/K}{Re \sqrt{f}} \right]$$

Queremos calcular coeficiente de pérdidas y conocemos rugosidad absoluta y número de Reynolds.

- 2) Ábaco de Moody

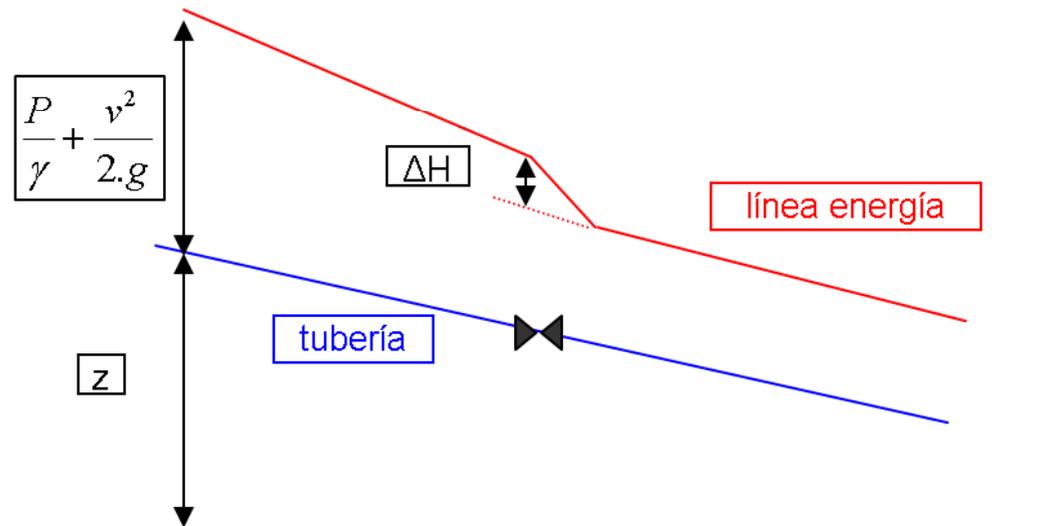


**FIGURE A-27**  
The Moody chart for the friction factor for fully developed flow in circular tubes.

## PÉRDIDAS DE CARGA LOCALIZADAS

Línea de Carga es el trinomio de Bernouilli.

Para nuestro caso de flujo uniforme, la línea de carga es una recta no paralela a la pendiente de la tubería.



$$\Delta H = \varphi \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad \varphi = \varphi (R_e, \text{geometría})$$

Para flujo turbulento  $R_e$  no interviene en la función  $\varphi$ , que solo depende de la geometría.

En este caso se puede expresar la función como:

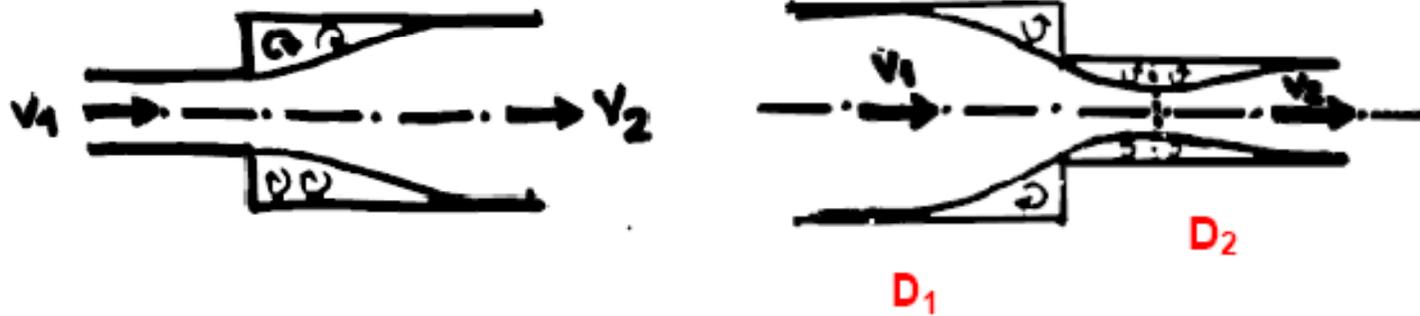
Una  
longitud  
equivalente

$$\Delta H = f \cdot \frac{L_e}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Un  
número de  
diámetros  
equivalentes

$$\Delta H = f \cdot \frac{N \cdot D}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

**Pérdidas por ampliación / reducción**

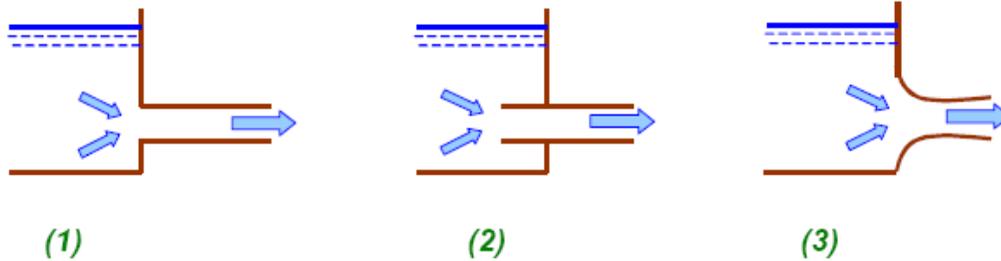


$$\Delta H = \varphi \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

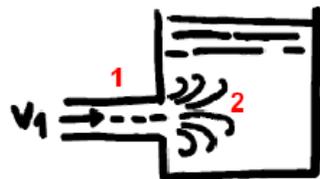
$$\varphi = \left[ 1 - \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2$$

$D_2/D_1$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\Phi$	0,5	0,45	0,38	0,28	0,12	0

### Pérdidas por entrada



Caso	1	2	3
$\phi$	0,5	1	0,04



$$\phi = 1$$

### CURVAS (diámetros equivalente)

R/D	1	2	4	6	8	10
N	20	12	13	18	24	30

### Pérdidas en válvulas

Dependerán de la tipología y el grado de apertura

## GOLPE DE ARIETE

*DEFINICIÓN* → La parada de bombas o el cierre de válvulas de manera precipitada provoca una brusca variación de la velocidad del líquido de la tubería que provoca una oscilación de sobrepresión y depresión que se propaga por el tubo y se amortigua con el tiempo.

Primeros estudios → Jouguet y Michaud

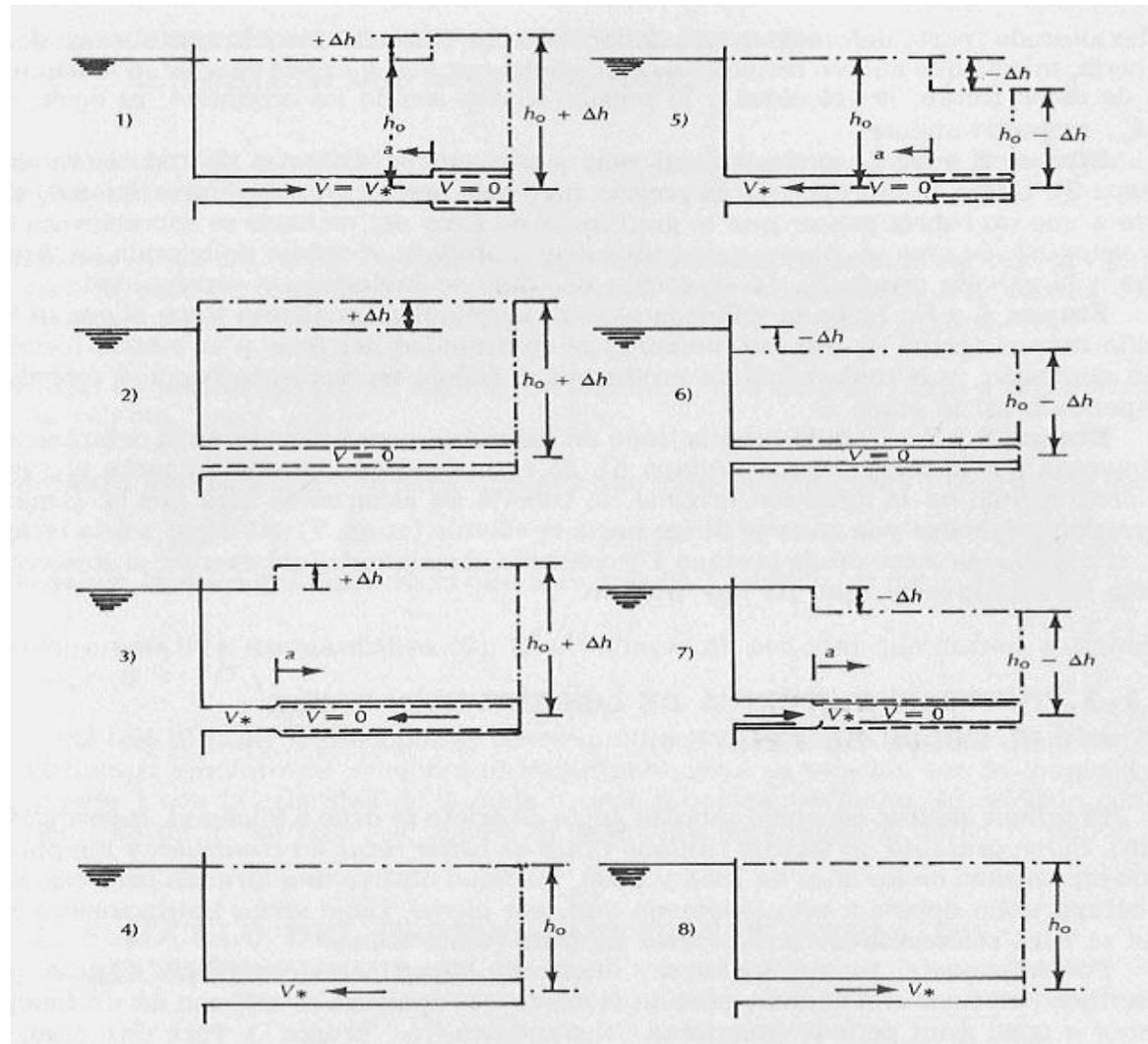
**IMPULSO  
MECÁNICO**

=

**VARIACIÓN DE LA  
CANTIDAD DE MOVIMIENTO**

$$F \cdot T$$

$$\Delta (M \cdot V)$$



Si denominamos  $P_g$  a la sobrepresión originada tendremos:

$$P_g \cdot S \cdot T = M \cdot (V - 0)$$

siendo:

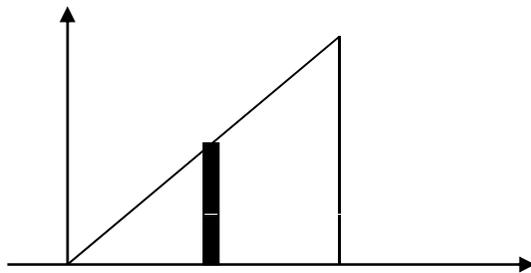
$$M = \frac{\gamma \cdot S \cdot L}{g} \quad P_g = \frac{\gamma \cdot L \cdot V}{g \cdot T}$$

Dividiendo por el peso específico obtenemos (en m.c.a.):

$$P_g = \frac{L \cdot V}{g \cdot T}$$

Pero hemos supuesto  $P_g$  constante en todo momento y eso no es cierto. Parte de cero y crece hasta que se finaliza la maniobra.

Michaud introduce:



$$P_g (\text{Michaud}) = 2 \cdot P_g (\text{Jouguet})$$

$$P_g = \frac{2 \cdot L \cdot V}{g \cdot T}$$

*TEORÍA DE ALLIEVI DE MOVIMIENTO DE ONDA:*

- a) Cierre de la válvula, sobrepresión positiva ( $P + P_g$ ) hacia el depósito, que avanza a velocidad  $v_a$ .

Dilatación de la tubería y compresión del fluido

- b) Al llegar al depósito, la onda cambia de signo y se propaga en dirección aguas abajo hacia la válvula ( $P - P_g$ )
- c) Al llegar a la válvula, la tubería se contrae ( $P - P_g$ ).  
La onda se propaga de nuevo hacia el depósito
- d) La onda cambia de signo a positiva al llegar al depósito y vuelve hacia la válvula donde se inicia de nuevo el proceso.

El fenómeno es cíclico si :

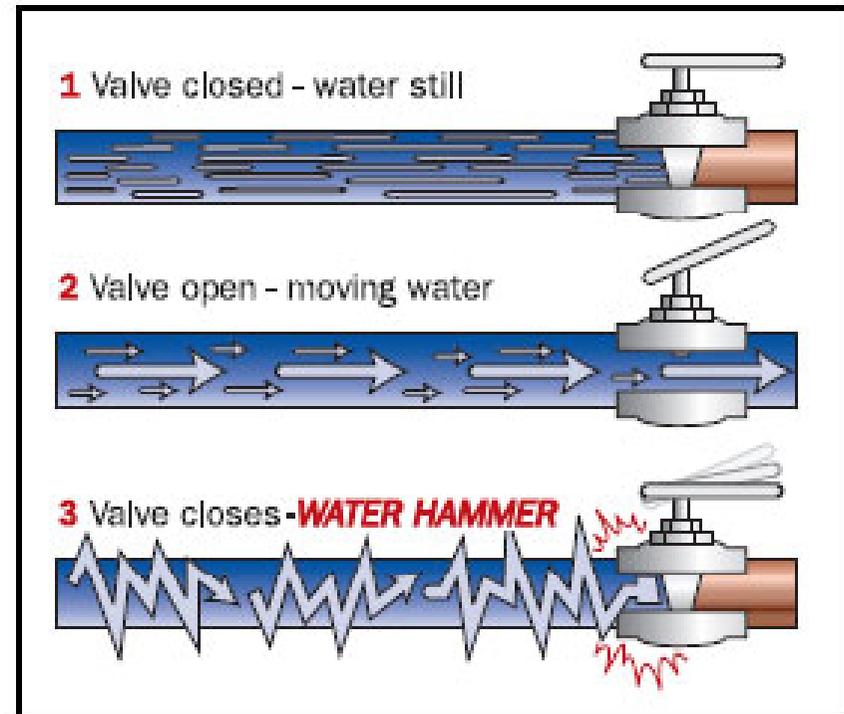
$$T < \frac{2L}{a}$$

Celeridad de la onda:

$$\frac{1}{a^2} = \frac{\gamma}{g} \left( \frac{1}{E_1} + \frac{D}{E.e} \right)$$

siendo:

- $E$  = Módulo de elasticidad del material
- $E_1$  (agua) = 21.000 kg/cm<sup>2</sup>



### CÁLCULO EN TUBERÍAS DE IMPULSIÓN

(por ejemplo, al reducir de manera brusca el número de revoluciones de la bomba)

Se calcula  $T$  con la fórmula de Mendiluce:

$$T = 1 + \frac{K \cdot L \cdot V}{g \cdot H_m}$$

con  $K$  que vale:

$K = 2$	para	$L < 500 \text{ m}$
$K = 1,5$	para	$500 \text{ m} < L < 1.500 \text{ m}$
$K = 1$	para	$L > 1.500 \text{ m}$

Así se elige la fórmula de Michaud para:

$$P_g = \frac{2 \cdot L \cdot V}{g \cdot T}$$

$$L < \frac{a \cdot T}{2} \quad (\text{impulsiones cortas})$$

Así se elige la fórmula de Allievi para:

$$P_g = \frac{a \cdot V}{g}$$

$$L > \frac{a \cdot T}{2} \quad (\text{impulsiones largas})$$



### CÁLCULO EN TUBERÍAS DE GRAVEDAD

**Caso A** → Cierre rápido

$$T < \frac{2 \cdot L}{a} \quad \text{Fórmula de Allievi:} \quad P_g = \frac{a \cdot V}{g}$$

**Caso B** → Cierre lento

$$T > \frac{2 \cdot L}{a} \quad \text{Fórmula de Michaud:} \quad P_g = \frac{2 \cdot L \cdot V}{g \cdot T}$$





## Capítulo 5. REDES DE DISTRIBUCIÓN

### Tema 14. Cálculos hidráulicos en tuberías forzadas



## BIBLIOGRAFÍA

CEH – CEDEX. *Guía técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión*. 6ª ed. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, 2009. 442 p. ISBN: 9788477904922 .

HERNÁNDEZ MUÑOZ, A. *Abastecimiento y distribución de aguas*. 4ª ed. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2000. 914 p. Colección Señor nº 6. ISBN: 84-380-0165-3.

LIRIA MONTAÑÉS, J. *Proyecto de distribución de agua en poblaciones*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1995. 278 p. Colección Señor nº 1. ISBN: 978-84-380-0081-6.

SUAREZ LÓPEZ, J et al. *Manual de conducciones Uralita*. 1ª ed. Madrid: Thomson-paraninfo, 2004. 857 p. ISBN: 842832882X.

VICENTE MÉNDEZ, M. *Tuberías a presión en los sistemas de abastecimiento de agua*. Caracas: Publicaciones UCAB, 2007. ISBN: 980-244-106-6.



# Capítulo 5. REDES DE DISTRIBUCIÓN

## Tema 14. Cálculos hidráulicos en tuberías forzadas



### REFERENCIA DE IMÁGENES

#### DIPOSITIVA PORTADA

“YL Brand Ductile Iron Pipes” [Imagen tomada de] “Construction Accessories. Descriptions”. *Grande Alliance Corporation* [en línea]. Disponible en: <<http://www.grandealliance.com.sg/YLpipe.JPG>>. [Consulta: 20 de febrero de 2011]

#### DIPOSITIVA página 3

“Tuberías” © Francisco Javier Pérez de la Cruz

#### DIPOSITIVA página 4

“Equilibrio de fuerzas” © Juan García Bermejo

#### DIPOSITIVA página 7

[Imagen tomada de] “La función de los escapes” [blog de] *Jotuna* [en línea]. 15 de diciembre de 2008. Disponible en: <<http://www.cheng.cam.ac.uk/research/groups/electrochem/JAVA/electrochemistry/ELEC/I2fig/laminar.gif>>. [Consulta: 20 de febrero de 2011]

“Laminar boundary layer scheme” [Imagen tomada de] “Capa límite”. *Wikipedia, la enciclopedia libre* [en línea]. 20 de mayo de 2011. Disponible en: <[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0e/Laminar\\_boundary\\_layer\\_scheme.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0e/Laminar_boundary_layer_scheme.svg)>. [Consulta: 6 de julio de 2011]



# Capítulo 5. REDES DE DISTRIBUCIÓN

## Tema 14. Cálculos hidráulicos en tuberías forzadas



### **DIAPPOSITIVA página 8**

“Solido deformacion tangencial” [Imagen tomada de] “Viscosidad” *Wikipedia, la enciclopedia libre* [en línea]. 28 de junio de 2011. Disponible en:  
<[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c9/Solido\\_deformacion\\_tangencial.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c9/Solido_deformacion_tangencial.svg)>. [Consulta: 6 de julio de 2011]

### **DIAPPOSITIVA página 9**

[Imágenes tomadas de] “Poiseuille flow”. *Flickr* [en línea]. Disponible en:  
<<http://www.flickr.com/photos/mitopencourseware/3489476200/>>. [Consulta: 20 de febrero de 2011]

### **DIAPPOSITIVA página 13**

“Moody’s chart” [Imagen tomada de] *Pickmix* [en línea]. Disponible en:  
<<http://people.msoe.edu/tritt/be382/graphics/Moody.png>>. [Consulta: 20 de febrero de 2011]

### **DIAPPOSITIVA página 14**

“Pérdida de carga” © Juan García Bermejo

### **DIAPPOSITIVA página 16**

“Perdidas1” © Juan García Bermejo

### **DIAPPOSITIVA página 17**

“Pérdidas2” © Juan García Bermejo



## Capítulo 5. REDES DE DISTRIBUCIÓN

### Tema 14. Cálculos hidráulicos en tuberías forzadas



#### **DIPOSITIVA página 19**

[Imagen tomada de] *Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México* [en línea]. Disponible en: <<http://tabasco.torreingenieria.unam.mx/ASH/Archivos%20a%20bajar/secuencia.jpg>>. [Consulta: 20 de febrero de 2011]

#### **DIPOSITIVA página 22**

[Imagen tomada de] “Water hammer information”. *PlumbingMart* [en línea]. Disponible en: <<http://www.plumbingmart.com/images/water-hammer-valve.jpg>>. [Consulta: 20 de febrero de 2011]

#### **DIPOSITIVA página 24**

[Imagen tomada de] “Aprovechamiento conjunto de los recursos hidráulicos del centro y sureste de España. Complejo Tajo-Segura”. *Centro de Estudios Hidrográficos CEH-CEDEX* [en línea]. Disponible en: <[http://hercules.cedex.es/Planificacion/images/ComplejoTajoSegura/Tuberias\\_impulsion\\_central\\_Bolarque.JPG](http://hercules.cedex.es/Planificacion/images/ComplejoTajoSegura/Tuberias_impulsion_central_Bolarque.JPG)>. [Consulta: 20 de febrero de 2011]

#### **DIPOSITIVA página 25**

“Tubería polietileno conducción agua presión” [Imagen tomada de] “Mercado agrario”. *Agroterra* [en línea]. Disponible en: <[http://www.agroterra.com/mercado/usuarios/ImagenesPRDs/3363\\_Saleplas.JPG](http://www.agroterra.com/mercado/usuarios/ImagenesPRDs/3363_Saleplas.JPG)>. [Consulta: 20 de febrero de 2011]