

CURSOS POSTGRADOS

CIRCE - UZ

Minihidraulica. 4 Pérdidas de Carga



ELEMENTOS DE CONDUCCIÓN

- Canales
- Cámara de Carga
- Tubería Forzada
- Válvulas
- Rejas

CANALES

La velocidad de corriente debe de ser lo suficientemente elevada como para que no sedimente el material arrastrado y no crezca vegetación, pero no tanto que llegue a erosionar las orillas, sobre todo cuando el canal no está revestido. La velocidad debe de superar los 0,6-0,9 m/s para impedir que se deposite la arena ; para evitar que se desarrollen algas, si el canal es de tierra y la temperatura ambiente oscila alrededor de los 20°C, hay que sobrepasar los 0,75 m/s. Si el canal no está revestido, la velocidad no puede pasar de 0,4-0,6 m/s, mientras que en un canal revestido con hormigón, la velocidad puede llegar a 10 m/s, si el agua que circula es limpia, o a 4 m/s si lleva arena o grava en suspensión. Estos valores en el mejor de los casos son estimaciones que solo pueden servir de guía.

CANALES

$$Q = \frac{AR^{2/3}S^{1/2}}{n} = \frac{A^{5/3}S^{1/2}}{nP^{2/3}}$$

$$S = \left(\frac{QnP^{2/3}}{A^{5/3}} \right)^2 = \left(\frac{Qn}{AR^{2/3}} \right)^2$$

- El caudal circulante (régimen uniforme y permanente) es función de :
 - *la sección transversal,*
 - *la pendiente longitudinal,*
 - *la rugosidad.*
- El régimen es siempre turbulento y estará gobernado por la ec. de Manning.
- **S = pendiente (m/m)**
- **A = sección transversal (m²)**
- **R = radio hidráulico (Area/perímetro mojado)(m)**
- **n = coef. de rugosidad de Manning (0.014 hormigón)**
- **P = Perímetro mojado (m)**
- **Q = caudal (m³/s)**

CANALES

Tabla 5.1
Valores típicos del coeficiente n de Mannings

Revestimiento del canal	Valor de n
madera limpia	0,011-0,012
madera con algas y musgo	0,015-0,017
de hormigón bien terminado	0,012-0,015
de hormigón gunitado	0,003-0,014
de tierra recto y limpio	0,022
como el anterior pero con hierbas	0.025-0.030
con mampostería suelta	0.020-0.025
revestido con asfalto	0.014-0.016

La capacidad de transporte aumenta con el radio hidráulico o con la disminución del perímetro mojado

CANALES

Valores típicos del n de Mannings

Revestimiento del canal	mínimo	normal	máximo
a. Acero liso			
1. Sin pintar	0,011	0,012	0,014
2. Pintado	0,012	0,013	0,017
b. Cemento			
1. Limpio en la superficie	0,010	0,011	0,013
2. Con mortero	0,011	0,013	0,015
c. Madera			
1. Cepillada sin tratar	0,011	0,012	0,014
2. Cepillada creosotada	0,011	0,012	0,015
3. Planchas con listones	0,012	0,015	0,018
d. Hormigón			
1. Terminado con lechada	0,013	0,015	0,016
2. Sin terminar	0,014	0,017	0,020
3. Gunitado	0,016	0,019	0,023
e. Mampostería			
1. Piedra partida cementada	0,017	0,025	0,030
2. Piedra partida suelta	0,023	0,032	0,035
3. Fondo cemento, lados son rip rap	0,020	0,030	0,035
f. De tierra recto y uniforme			
1. Limpio, terminado recientemente	0,016	0,018	0,020
2. Limpio con cierto uso	0,018	0,022	0,025
3. Con musgo corto, poca hierba	0,022	0,027	0,033

TUBERÍA FORZADA



- Conducción de caudal desde toma de carga hasta turbina.
- Capaz de soportar los diversos estados de presión interior.
- Mínima resistencia hidráulica.
- Resistencia estructural y durabilidad.

TUBERÍA FORZADA

Aéreas



- Menor obra civil si las condiciones de apoyo son favorables
- Facilidad de inspección
- Facilidad de reparación
- Agresión atmosférica
- Sometimiento a cargas climáticas
- Prever apoyos adecuados
- Impacto visual y ambiental apreciable en ocasiones

TUBERÍA FORZADA

Enterradas



Fig. 1.4- Instalación en obra

- Mínimos impactos visual y ambiental.
- Difícil inspección y reparación: grandes diámetros por el interior.
- Condiciones geotécnicas adecuadas para la instalación.
- Prever protección adecuada contra la corrosión en acero.
- Importante obra civil: (movimiento de tierras)
- Prever el comportamiento tenso-deformacional del conjunto tubería-terreno.

TUBERÍA FORZADA

Conducen el agua a presión desde la cámara de carga hasta la cámara de turbina

Materiales

Acero	→	Salto elevados y grandes diámetros
Hormigón	→	Salto elevados y diám. medios. Pesadas
Polietileno	→	Salto bajos. Pesadas y Robustas
PVC	→	Salto medios. Frágiles y deben enterrarse
PVC+Aleac de plástico	→	Salto medios. Dúctiles
PVC+Fibra de vidrio	→	Más Resistentes y menos peso

Tuberías de acero

- Ventajas
- Máxima fiabilidad en grandes presiones: material de gran tradición hidroeléctrica.
- Sin limitación en grandes diámetros
- Competitividad económica en grandes diámetros y presiones.
- Posibilidad de utilización de estándares helicosoldados (oleoductos y gasoductos) con ventaja económica.
- Control adecuado en taller
- Facilidad de puesta en obra (ligereza)
- Existencia de aceros de alta tenacidad con resistencia adecuada a bajas temperaturas
- Inconvenientes
- Corrosión: principal desventaja de la tubería de acero. Es obligatorio tomar las medidas adecuadas. Revestimientos. Protección catódica. Empleo de aceros especiales. Crítica en tuberías enterradas.
- Menos competitiva cuanto menor es el salto: espesor mínimo por riugidez y corrosión. Estudio de alternativas en cuanto a tipologías diferentes.

Tuberías de hormigón armado o pretensado (con o sin camisa de chapa)

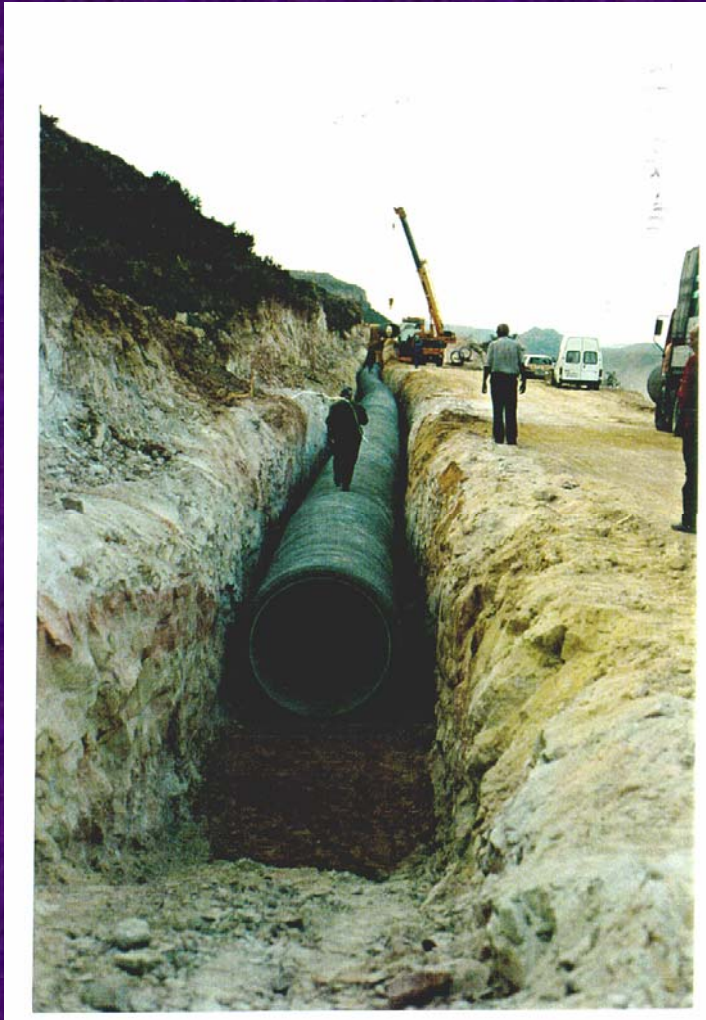


FOTOGRAFÍA N°36

VISTA DE LA TUBERÍA DE HORMIGÓN PRETENSADO CON CAMISA DE CHAPA

- Solución tradicional en abastecimientos (poca implantación en aprovechamientos hidroeléctricos)
- Uniones enchufe-campana con junta soldada o tórica
- La camisa de acero queda protegida de la corrosión por el hormigón

Inconvenientes en las tuberías de horm. Armado y Pretensado



- Gran peso, puesta en obra laboriosa y lenta, con grandes medios auxiliares
- Las juntas ejecutadas por soldadura entre camisas extremas no quedan protegidas por el hormigón del tubo: **CORROSIÓN**
- Evidentemente sólo se puede utilizar enterrada

Tuberías de Polietileno

- Baja y media densidad
- En aprovechamientos de baja altura de salto (< 35 m)
- Siempre enterrado
- **Inconvenientes**
- Tubería pesada
- Con $\Phi > 700$ mm poco competitiva
- Fluencia y envejecimiento
- **Novedad**
- Polietileno de altas prestaciones en saltos de hasta 160 m

Tuberías de Polietileno de alta densidad

- Φ limitado a 600 mm.
- Se pueden instalar al aire libre
- Radio de curvatura 30-40 veces el diámetro
- Soporta temperaturas inferiores a 0° C
- Inconveniente:
- Soldadura por fusión: maquinaria pesada.

Tuberías de PVC

- **VENTAJAS:**
 - Muy competitiva en alturas de medio salto (entre 30 y 100 m).
 - F 400 ha llegado a utilizarse hasta 200 m de salto.
 - Puede soldarse con disolventes (juntas sin flexión).
- **INCONVENIENTES:**
 - Fragilidad. Mayor inconveniente del PVC. Incompatible con substratos rocosos.
 - Sensibles a radiación Ultravioleta.
 - Grandes radios de curvatura.
 - Sólo hasta diámetros de 700 mm.

Tuberías de aleaciones de Plásticos

- Mezclas de PVC y derivados acrílicos.
- Saltos hasta 160 m.
- Comportamiento dúctil (mejora respecto al PVC).
- Limitación de diámetros hasta Φ 700 mm.

1. PÉRDIDAS DE CARGA

1.2. Pérdida de carga en las tuberías

- Un fluido circulando por una tubería experimenta resistencia en su movimiento proporcional a la longitud de la tubería.
- Tipos de flujos
 - Flujo laminar: fluye ordenado y suave. (propio de fluidos de gran gran viscosidad o velocidad suave)
 - Flujo turbulento: movimiento irregular y caótico
- Ejemplo: grifo de agua

1. PÉRDIDAS DE CARGA

1.2. Pérdida de carga en las tuberías

- La viscosidad expresa la facilidad que tienen un fluido para fluir cuando se le aplica una fuerza externa. Es una medida de la resistencia al deslizamiento entre capas o a sufrir deformaciones internas.
- Así la viscosidad es la propiedad por la que en un fluido se permite transmitir esfuerzos entre diferentes partes del mismo.
- Se puede intuir que por ejemplo la miel es un fluido más viscoso que el agua. Pero, cabe cuestionarse de qué forma puede afectar la viscosidad al movimiento fluido.

1. PÉRDIDAS DE CARGA

1.2. Pérdida de carga en las tuberías

- Un ejemplo muy visual sería el de un vaso con agua y uno con miel. Si se gira el vaso de agua, ésta tiende a girar también, pero sin llegar a acompañar las paredes del vaso a la misma velocidad.
- Si se gira más rápido, en un primer momento las paredes tomarán una mayor diferencia de velocidad respecto al agua.

1. PÉRDIDAS DE CARGA

1.2. Pérdida de carga en las tuberías

- Sin embargo para un vaso con miel, se tiene que al girar el vaso, la miel se mueve prácticamente a la par que el vaso. Si se tiende a hacer un giro muy brusco y rápido, entonces se aprecia cómo la miel de las paredes se sigue moviéndose con el vaso, pero la más alejada, en el centro del vaso, tiende a retrasarse.
- Este es el efecto de la viscosidad: permite transmitir esfuerzos entre diferentes capas de un fluido. Por eso en la miel, estos esfuerzos se transmiten bien, sin haber tan apenas diferencias en el movimiento.

1. PÉRDIDAS DE CARGA

1.2. Pérdidas de carga en las tuberías

- Estado crítico: paso de régimen laminar a turbulento.
- Número de Reynolds (Re):

$$\text{Re} = \frac{\text{densidad fluido (kg/m}^3\text{)} * \text{vel circulación (m/s)} * \text{Diámetro tubo (m)}}{\text{viscosidad dinámica del fluido (kg/ms)}}$$

$$\text{Re} = \frac{\text{velocidad de circulación (m/s)} * \text{diámetro del tubo (m)}}{\text{viscosidad cinemática del fluido (m}^2\text{/s)}}$$

- La viscosidad cinemática se obtiene dividiendo la viscosidad dinámica entre la densidad.

1. PÉRDIDAS DE CARGA

- A mayor viscosidad mayor resistencia al movimiento.
- Viscosidad dinámica del agua = $1,139 \times 10^{-3} \text{ kg/ms}$
- $Re < 2300$ Régimen laminar
- $Re > 4000$ Régimen turbulento
- $2300 < Re < 4000$ Zona inestable. Combinación de ambos, laminar y turbulento

1. PÉRDIDAS DE CARGA

Ecuación de Darcy

- Pérdida de carga en la tubería: $\Delta h_f = f * L * V^2 / (2 * g * D)$
 - Δh_f = pérdida de carga o rozamiento en la tubería (m de columna de fluido circulante)
 - L = longitud de tubería (m)
 - g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)
 - D = diámetro interior de la tubería (m)
 - V = velocidad media de circulación del fluido (m/s)
 - f = coeficiente de rozamiento o factor de fricción (adimensional).
Depende de laminar o turbulento.

1. PÉRDIDAS DE CARGA

1.2. Pérdidas de carga en las tuberías

- Caída de presión debido al rozamiento del fluido en las paredes de la tubería:

$$\Delta p_f = \rho * g * \Delta h_f$$

donde:

Δp_f = caída de presión por rozamiento en la tubería (Pa)

ρ = densidad del fluido (kg/m³)

1. PÉRDIDAS DE CARGA

1.2. Pérdidas de carga en las tuberías

Régimen Laminar

$$\Delta h_f = f * L * V^2 / (2 * g * D)$$

El coeficiente de rozamiento f sólo depende de Re y es

$$f = 64/Re$$

- Se entra con Re y con ϵ/D (los dos en milímetros o en la misma magnitud)

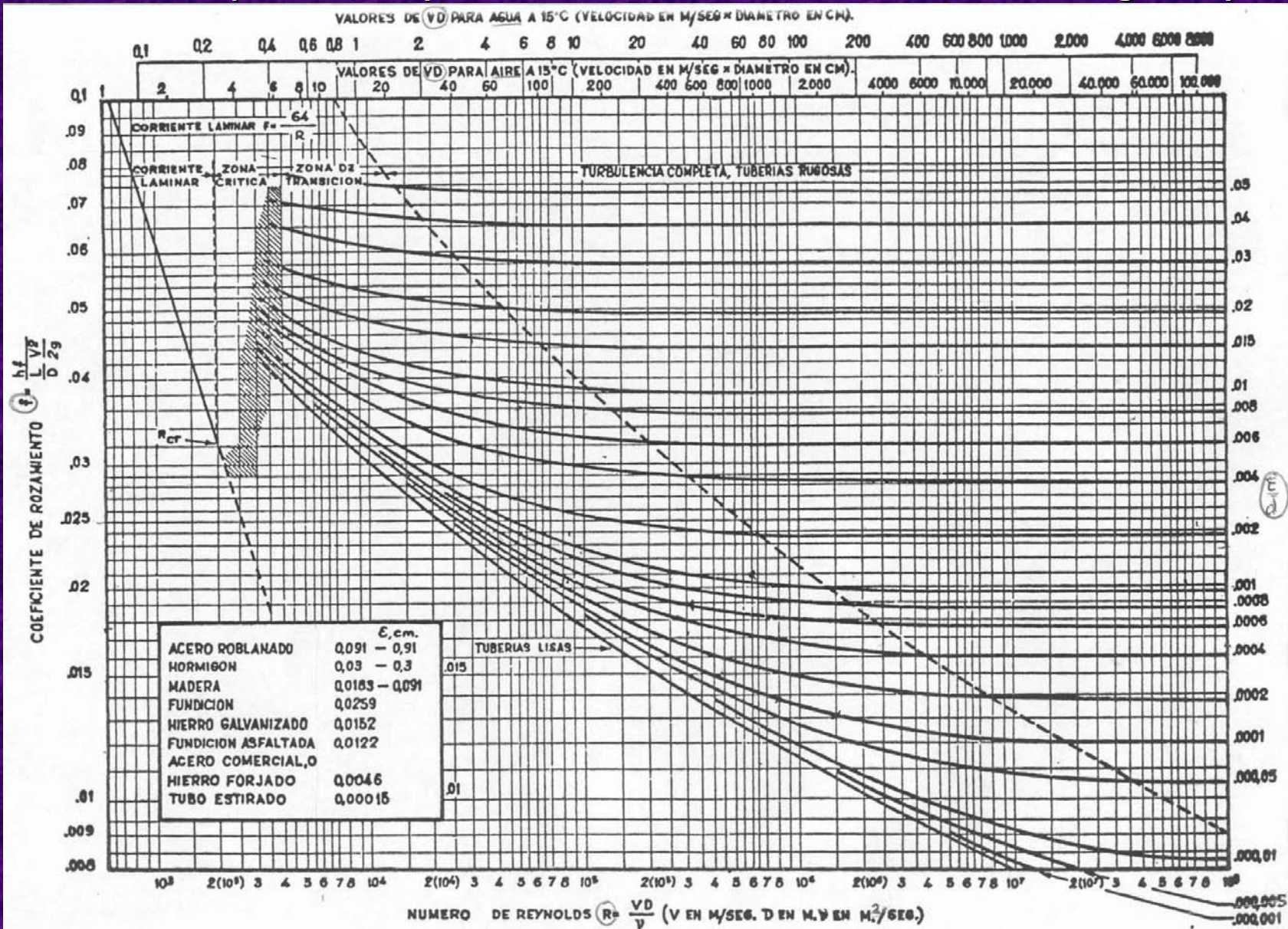


Fig. 5.32 Diagrama de Moody.

$Re < 2100$ LAMINAR
 $2100 < Re < 4000$ TRANSICION
 $Re > 4000$ TURBULENTO

TUBERÍA FORZADA

Tabla 5.4 Materiales utilizados en tuberías forzadas

Material	Módulo de Young (N/m ²)*E9	Coef.expansión (mm/°C)*E6	Carga de tracción (N/m ²)*E6	n
Acero soldado	206	12	400	0,012
Polietileno PE	0,55	140	5	0,009
PVC	2,75	54	13	0,009
Uralita	n.a	8,1	n.a.	0,011
Madera	n.a	n.a	n.a	0,012
Fundición	78,5	10	140	0,014
Hierro ductil	16,7	11	340	0,015
Metal corrugado	206	n.a	400	0,024

TUBERÍA FORZADA

Tabla 2.1. Altura de rugosidad, e, para diversos tubos comerciales

Clase de tubo	e(mm)
Tubería de polietileno	0,003
Tubería de fibra de vidrio con resina epoxi	0,003
Tubería de acero estirado sin costura	0,025
Tubería de acero soldado	0,60
Tubería de hierro fundido con barniz centrifugado	0,12
Tubería de uralita	0,025
Tubería de duelas de madera	0,30
Tubería de hormigón colado in situ/encofrado metálico	0,36
Tubería de hormigón prefabricado	0,3 - 3.0

TUBERÍA FORZADA

Características de diseño

Diámetro : Coste \longleftrightarrow Pérdida de carga

Manning y Fijar pérdidas de carga por fricción

$$\frac{h_f}{L} = 10,3 \frac{n^2 Q^2}{D^{5,333}}$$



$$D = \left(\frac{10,3(Qn)^2 L}{h_f} \right)^{0,185}$$

$$\text{Si } h_f = 0,04H$$



$$D = 2,69 \left(\frac{Q^2 n^2 L}{H} \right)^{0,1785}$$

CONDUCTOS CERRADOS

Calcular el caudal de agua a 10°C que puede circular por una tubería de acero soldado, de 1,5 m de diámetro, sin que la pérdida de carga supere los 2m por km de longitud.

Por una tubería de acero soldado de 900 mm de diámetro y 500 m de longitud se hace pasar un caudal de $1,2 \text{ m}^3/\text{seg}$. Calcular la pérdida de carga por fricción con el diagrama de Moody

En un aprovechamiento con un salto bruto de 85 m y un caudal de $3 \text{ m}^3/\text{seg}$, calcular el diámetro de una tubería forzada de 173 m de longitud, para que la pérdida de potencia (debido a la fricción) no supere el 4%.

1. PÉRDIDAS DE CARGA

1.3. Pérdida de carga en las piezas accesorias

- Válvulas, codos, llaves, curvas, cambios de sección, difusores, etc.

$$\Delta h_s = K_s * V^2 / (2 * g)$$

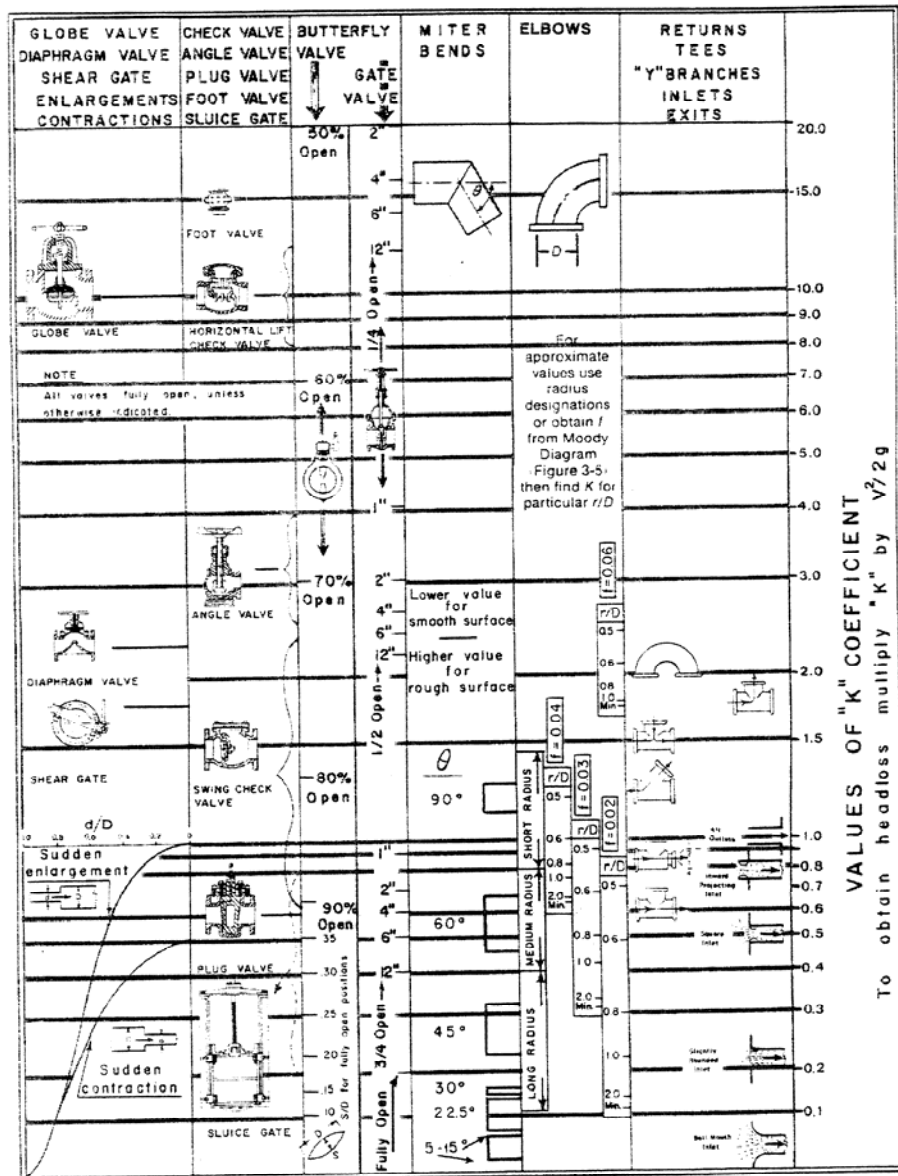
Δh_s = pérdida de carga o rozamiento localizado (m de columna de fluido circulante).

K_s = coeficiente de pérdidas. (adimensional en tablas)

V = velocidad media de circulación del fluido (m/s).

g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²).

- Pérdidas en diversos elementos.



Source: John F. Lenard, President, Lenard Engineering, Inc.

Figure 3-4 Resistance Coefficients of Valves and Fittings for Fluid Flows

PÉRDIDAS DE CARGA EN CAMBIOS DE SECCIÓN

Pérdida de carga en Ensanchamiento brusco

■ Haciendo el balance de materia y energía obtenemos:

$$K_P = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2$$

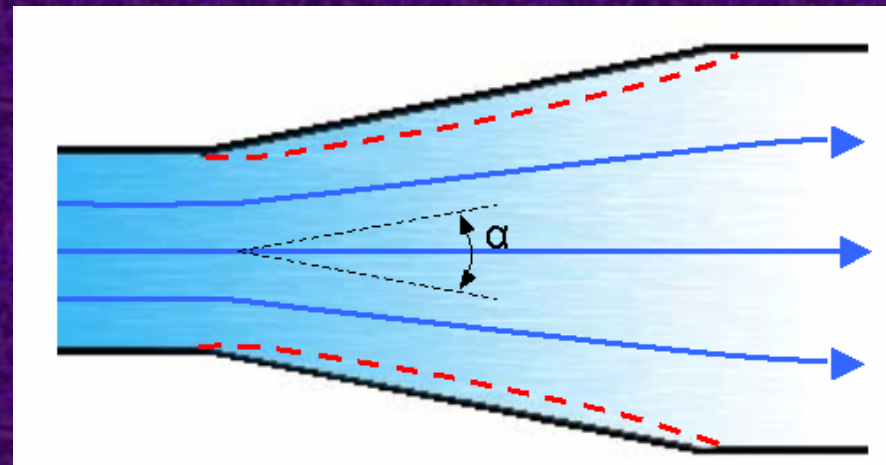
- d – diámetro de la tubería menor
- D – diámetro de la tubería mayor

PÉRDIDAS DE CARGA EN CAMBIOS DE SECCIÓN

Pérdida de carga en **Ensanchamiento gradual. Tubería troncocónica.**

■ Se utiliza la expresión del ensanchamiento brusco, pero suavizada por un factor adimensional 'a', variable en función del ángulo de conicidad :

$$K_p = a \times \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2$$



Coeficientes de modulación en función de la conicidad											
α (°)	4	6	8	10	15	20	30	40	50	60	180
a	0,15	0,13	0,14	0,17	0,3	0,4	0,7	0,95	1,1	1,2	1

PÉRDIDAS DE CARGA EN CAMBIOS DE SECCIÓN

Pérdida de carga en Estrechamiento brusco

- Las pérdidas son menores que en ensanchamiento brusco

$$K_p = 0,42 \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) \quad \text{si} \quad \frac{d}{D} < 0,76$$

- d – diámetro de la tubería menor
- D – diámetro de la tubería mayor
- Se dice estrechamiento brusco si $d/D < 0,76$

PÉRDIDAS DE CARGA EN CAMBIOS DE SECCIÓN

Pérdida de carga en Estrechamiento gradual

- Los estrechamientos graduales para conicidades menores a 20° , o mayores a 40° se hallan con la misma fórmula que el ensanchamiento brusco

$$K_P = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 \quad \text{si} \quad \frac{d}{D} > 0,76 \quad \text{y} \quad \begin{cases} \alpha < 20^\circ \\ \text{ó} \\ \alpha > 40^\circ \end{cases}$$

- Las pérdidas para estos casos de $d/D > 0,76$, a pesar de utilizarse la expresión para ensanchamiento brusco, son leves, puesto que la relación de diámetros es alta, y el término del paréntesis es de escasa importancia. Además se le aplica un factor al cuadrado, que lo disminuye más todavía

PÉRDIDAS DE CARGA EN CAMBIOS DE SECCIÓN

Pérdida de carga en Estrechamiento gradual

- Cabe resaltar como caso especial los estrechamientos de conicidades entre 20° y 40°, que resultan óptimos. En ellos las pérdidas serán mínimas, prácticamente despreciables:

$$K_p = 0,04 \quad \text{si} \quad 20 < \alpha < 40$$

REJAS Y LIMPIAREJAS

REJAS

Impiden la entrada de cuerpos sólidos que puedan obturar o estropear otros sistemas

Acero o plástico

Distancia entre barras:

Desde 12 mm (Pelton) hasta 150 mm (Hélice)

Consideraciones de diseño:

Reducir las pérdidas de carga

Soportar el empuje en caso de obstrucción

REJAS Y LIMPIAREJAS

REJAS

Una vez decidido cual será el caudal nominal, la reja y su entorno se dimensionarán de forma que la velocidad del agua (V_0), a su llegada, no sobrepase los 1,50 m/seg. ni sea inferior a los 0,60 m/seg. Para calcular la superficie total de la reja necesaria puede utilizarse la formula:

$$S = \frac{1}{K_1} \left(\frac{b+a}{a} \right) \frac{Q}{v_0 \sin \alpha} \quad (5.3)$$

S= superficie total de reja sumergida en condiciones normales

Q= caudal nominal

v_0 = velocidad del agua delante de la reja

b= anchura del barrote

a = espacio libre entre barros

K_1 = coeficiente para prever la colmatación parcial de la reja en condiciones normales de funcionamiento. Como orientación se dan los valores siguientes: para rejas sin limpia-rejas automático 0,20- 0,30. Para rejas con limpia-rejas automático y programador horario 0,4 - 0,6 y si se le añade un sensor de presión diferencial, 0,80 - 0,85.

α = ángulo que forman los barros de la reja con la horizontal de la solera. Para cámaras de carga el ángulo es del orden de los 60°. En las tomas de embalase, en cambio, las rejas suelen ser totalmente verticales ($\alpha=90^\circ$)

REJAS Y LIMPIAREJAS

REJAS

$$h_{\beta} = K_2 \left(\frac{b}{a} \right)^{4/3} \frac{v_0^2}{2g} \operatorname{sen} \alpha \quad (5.4)$$

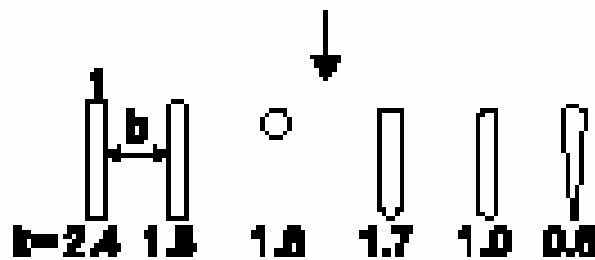
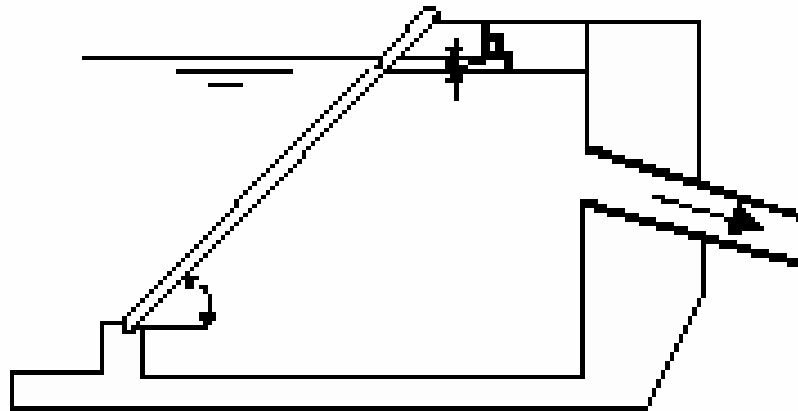
en la que h_r = pérdida de carga en la reja medida en m de columna de agua
 K_2 = coeficiente de forma que depende de la sección del barrote
 g = aceleración de la gravedad, y
 v_0 , b , a , y α son los parámetros descritos en la ecuación (5.3)

Para calcular la pérdida de carga adicional por inclinación de la corriente, se puede hacer uso de la expresión:

$$h_{\beta} = \frac{v_0^2}{2g} \operatorname{sen} \beta \quad (5.5)$$

REJAS Y LIMPIAREJAS

$$h_t = k_t (t/b)^{4/3} (V_0^2 / 2g) \sin \phi$$



- h_t = pérdida de carga (mm)
- t = espesor de la barra (mm)
- b = separación entre barras (mm)
- V_0 = velocidad corriente delante (m/seg)
- g = constante de aceleración (9.81 m/seg²)
- ϕ = ángulo de la rejilla

$$h_t = K_t \left(\frac{t}{b} \right)^{4/3} \left(\frac{V_0^2}{2g} \right) \sin \phi$$