

CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS

José Antonio F. de Aguirre Aldama
Ingeniero Industrial (Técnicas energéticas)

1.- INTRODUCCIÓN

El objeto del presente trabajo es mostrar un resumen de los métodos más comunes de cálculo del flujo de fluidos por conductos cerrados y las pérdidas de carga ocasionadas en su discurrir por dichos conductos.

Los problemas de flujos reales se resuelven basándose en datos experimentales por métodos semiempíricos.

Antes de empezar con la resolución, debemos definir los dos tipos de flujos permanentes: flujo laminar y flujo turbulento.

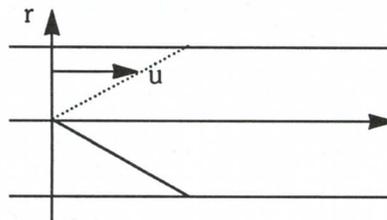
2.- FLUJO LAMINAR

En el flujo laminar el movimiento del fluido se desarrolla en láminas siendo un movimiento perfectamente ordenado en el que cada lámina tiene una velocidad de avance característica y todas ellas se mueven en la misma dirección y sentido que el flujo.

En este flujo, las pérdidas de carga se producen por efectos viscosos, entendiéndose tales efectos como los que provocan los esfuerzos cortantes entre láminas, es decir, los debidos a rozamientos internos entre láminas del fluido. Serán importantes los cálculos de distribución de velocidades, distribución de esfuerzos cortantes, caudal, pérdidas de carga, velocidades máxima y media. El flujo laminar viene determinado por la ley que relaciona la tensión cortante con la velocidad de deformación angular.

$$\tau = \mu \frac{du}{dr}$$

Los fluidos que siguen esta relación se llaman newtonianos.



τ = Tensión cortante

μ = Viscosidad absoluta

$\frac{du}{dr}$ = Velocidad de variación de la de formación unitaria cortante.

Velocidad crítica: Es aquella por debajo de la cual toda turbulencia es amortiguada por la viscosidad del fluido.

Número de Reynolds: Es un número adimensional que viene dado por el cociente de las fuerzas de inercia respecto de las fuerzas viscosas.

En tuberías circulares:

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu} = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

v = Velocidad media.

D = Diámetro de la tubería en m.

μ = Viscosidad absoluta o dinámica en kg/m².

ν = Viscosidad cinemática en m²/s.

ρ = Densidad del fluido en UTM/m³ o kg/m³.

En caso de sección recta no circular, se utiliza el RH radio hidráulico que viene definido por :

$$RH = \frac{\text{Área de la sección recta}}{\text{Perímetro mojado}}$$

Experimentalmente se demuestra que:

$0 < Re < 2 \cdot 10^3$ Régimen laminar

$2 \cdot 10^3 < Re < 6 \cdot 10^3$ Régimen transitorio

$6 \cdot 10^3 < Re$ Régimen turbulento

3.- FLUJO TURBULENTO

En el flujo turbulento el movimiento de los grupos moleculares es aleatorio y desordenado. Este flujo presenta una velocidad neta de avance en la dirección y sentido del flujo. Las pérdidas de carga se producen por el efecto del rozamiento entre partículas (viscosidad), y por el intercambio de la cantidad de movimiento (turbulencia) de tal forma que cuanto más turbulento es el flujo menor importancia relativa tiene la viscosidad. Su cálculo es muy complicado, basándose en la experimentación.

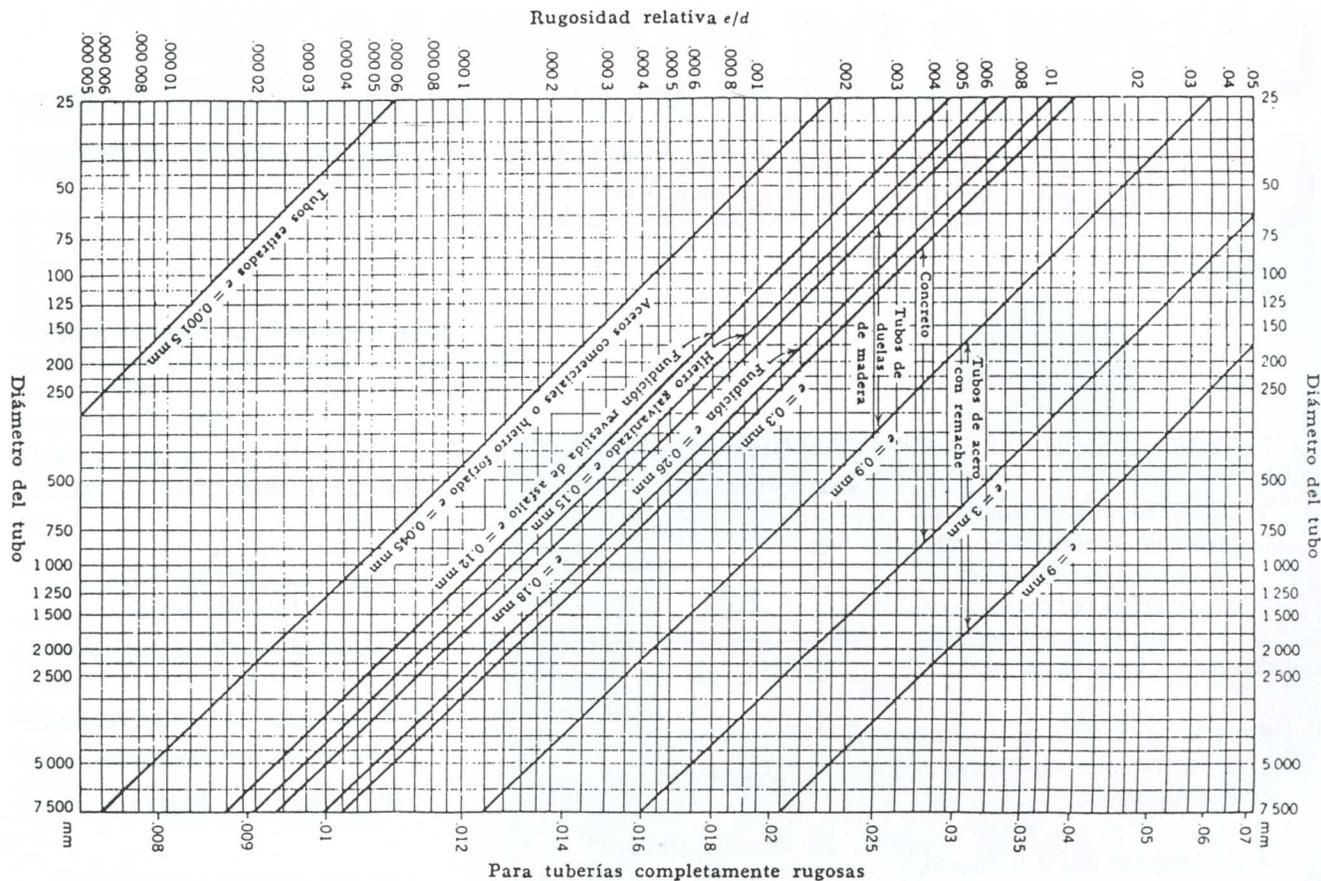
La tensión cortante en el flujo turbulento puede expresarse:

$$\tau = (\mu + \eta) \frac{du}{dr}$$

η depende de la densidad del fluido y características del movimiento (turbulencia)

4.- FLUJO DE TUBERÍAS. PÉRDIDAS DE CARGA

Si aplicamos la ecuación de la energía entre dos secciones A y B de una tubería, tenemos:



Gráfica de rugosidad relativa.

$$z_A + \frac{p_A}{\gamma} + \frac{v_A^2}{2g} - H = z_B + \frac{p_B}{\gamma} + \frac{v_B^2}{2g}$$

En el caso de fluidos ideales, se cumple que $H = 0$

z = Altura geométrica

$$\frac{p}{\rho \cdot g} = \text{Altura de presión} \quad \gamma = \rho \cdot g$$

$$\frac{v^2}{2g} = \text{Altura cinética}$$

altura geométrica + altura de presión = altura piezométrica

En el caso de fluidos ideales, se cumple que $H = 0$

H = Pérdidas de carga en m.

P = Presión del fluido.

V = Velocidad en una sección determinada.

γ = Peso específico.

Pérdidas de carga:

Las pérdidas de carga se dividen en primarias y secundarias teniendo ambas distinto origen. Las primarias o mayores son debidas al discurrir del fluido por tramos donde está totalmente desarrollado, es decir, donde el perfil de velocidades es el mismo en toda la tubería. Estas pérdidas son debidas al rozamiento de las láminas del fluido.

Las pérdidas secundarias o menores son las debidas al discurrir por tramos de sección variable o accesorios como son codos, válvulas, uniones, ensanchamientos, estrangulamientos, salidas de tubería o depósito, etc.

5.- CÁLCULO DE PÉRDIDAS MAYORES. FÓRMULA DE DARCY-WEISBACH

Esta fórmula es la básica para el cálculo de pérdidas de carga. Esta pérdida viene definida por:

$$H \text{ (m)} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

donde:

f : Coeficiente de fricción.

L : Longitud de la tubería en m.

D : Diámetro de la tubería en m.

v : Velocidad media del fluido en m/s.

Cálculo del coeficiente de fricción f :

Método analítico

Régimen laminar:

$$\text{Hagen-Poiseuille} \quad f = \frac{64}{Re}$$

Régimen turbulento:

$$\text{Nikuradse:} \quad \frac{1}{f^{1/2}} = -2 \log \frac{k/D}{3.7}$$

Zona de tubería rugosa

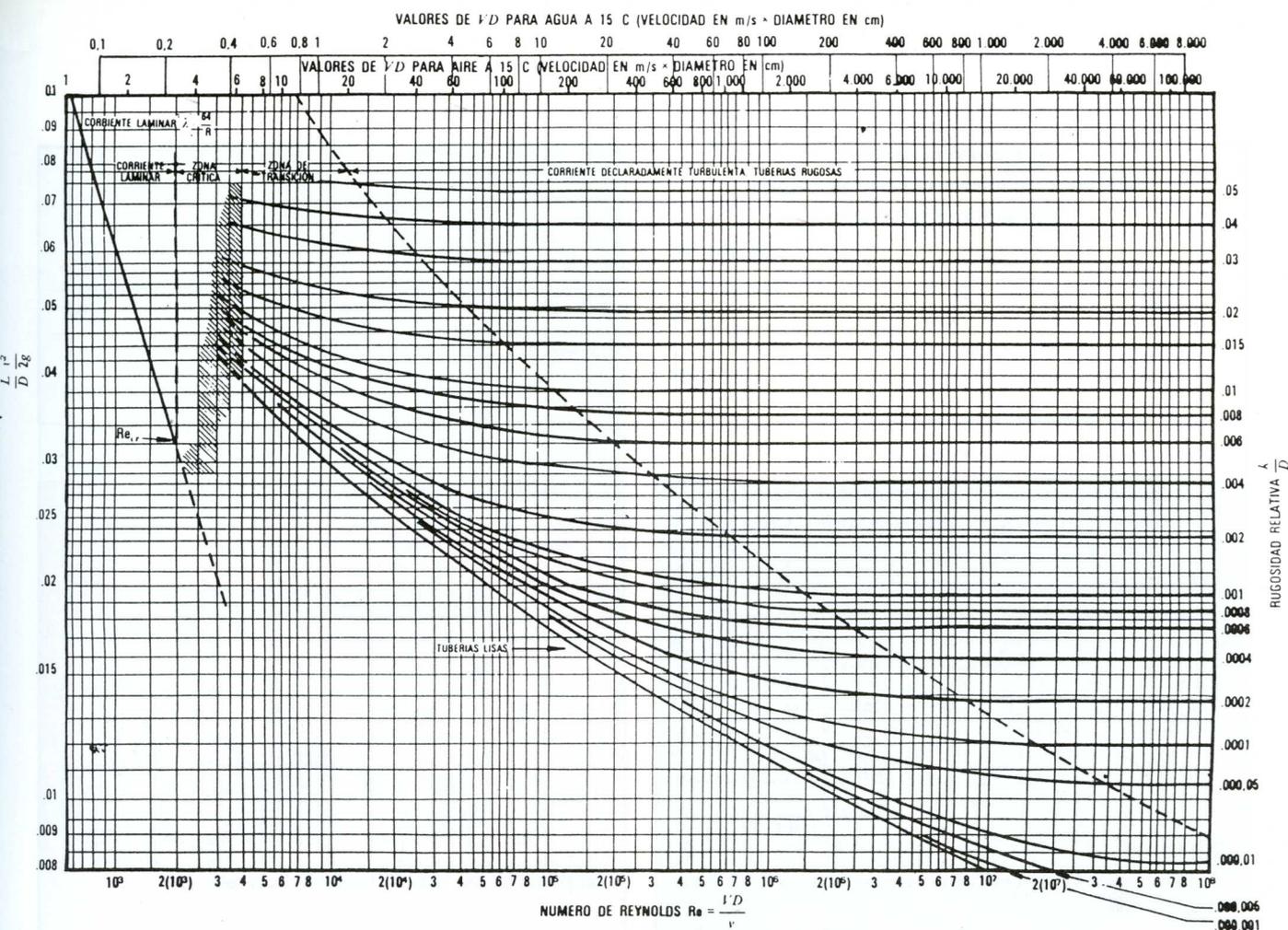


Diagrama de Moody para hallar el coeficiente de pérdidas de carga f en tuberías.

Blasius: $f = \frac{0,3164}{Re^{1/4}}$

$3000 < Re < 10^5$

T. lisas

Karman: $\frac{1}{f^{1/2}} = 2 \log (Re \cdot f^{1/4}) - 0,8$

T. lisas

Prandtl: $\frac{1}{f^{1/2}} = -2 \log \frac{2,51}{Re \cdot f^{1/4}}$

T. lisas

Colebrook: $\frac{1}{f^{1/2}} = -2 \log \left[\frac{k/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \cdot f^{1/4}} \right]$

T. rugosas

Método gráfico

1.- Mediante ábaco obtenemos la rugosidad relativa (e/d) o (k/D) donde e ó k es el tamaño medio de las protuberancias y, d ó D es el diámetro de la tubería.

2.- Con el valor de k/D y el número de Reynolds obtenemos en el diagrama de Moody el valor del coeficiente de fricción f .

6. -CÁLCULO DE PÉRDIDAS MENORES O SECUNDARIAS

Como se ha dicho, estas pérdidas se producen por la variación significativa en la configuración del flujo.

Su cálculo, es por lo general, muy complicado por lo que su evaluación se realiza por métodos experimentales. Normalmente se expresarán en la forma matemática:

$$H = \zeta \frac{v^2}{2g}$$

donde el valor de ζ lo obtendremos mediante tablas o diagramas según sea la naturaleza de donde se producen estas pérdidas.

Las tablas y diagramas se obtienen por experimentación.

7. -FLUJO DE AGUA EN TUBERÍAS

Para el cálculo de flujos de agua en tuberías a temperaturas normales y en régi-

men altamente turbulento, (ya que no se tiene en cuenta la viscosidad), se utiliza la fórmula empírica de Hazen-Williams cuya expresión matemática es:

$$v = 0,8492 C R^H S^{0,63} \cdot S^{0,54}$$

donde:

v : Velocidad media del fluido en m/s.

R : Radio hidráulico.

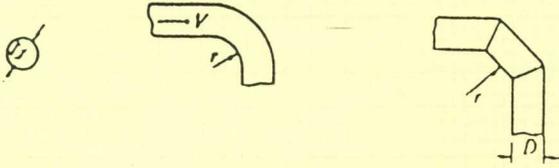
C : Coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams.

S : Pendiente de carga de la línea de alturas piezométricas (pérdida de carga por unidad de longitud del conducto en km)

Valores del coeficiente C :

Tuberías rectas y muy lisas	140
Tuberías de fundición lisas y nuevas	130
Tuberías de fundición usadas y de acero roblonado nuevas	110
Tuberías de alcantarillado vitrificadas	110
Tuberías de fundición con algunos años de servicio	100
Tuberías de fundición en malas condiciones	80

TABLA PARA EL CÁLCULO DEL
COEFICIENTE ζ DE PÉRDIDA DE CARGA SECUNDARIA
EN ACCESORIOS TIPO CODO



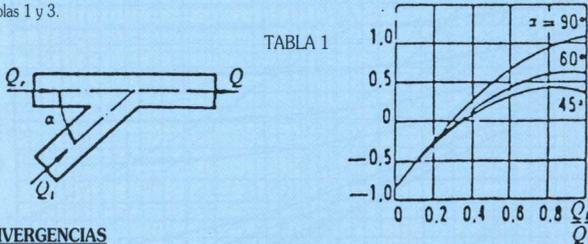
r/D	0	0,25	0,5	1,0
Una pieza ζ	0,8	0,4	0,25	0,16
Tres piezas ζ	...	0,8	0,4	0,3
Cinco piezas ζ	...	0,5	0,3	0,2

TABLA PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE ζ DE PÉRDIDA DE
CARGA SECUNDARIA EN ACCESORIOS DE CONEXIÓN TIPO (T)

Se calculan por separado las pérdidas en cada una de las ramas cuyo caudal sea menor que el máximo.

CONVERGENCIAS

Para el flujo que no cambia de sentido $\zeta = 0,05$. Para los flujos que cambian de sentido consultar las tablas 1 y 3.



DIVERGENCIAS

Para el flujo que no cambia de sentido $\zeta = 0,15$. Para los flujos que cambian de sentido consultar las tablas 2 y 3.

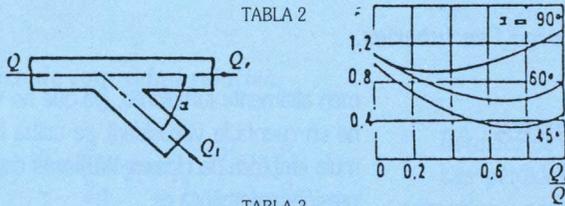
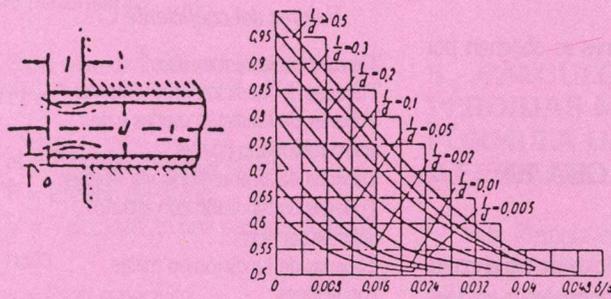


TABLA 3

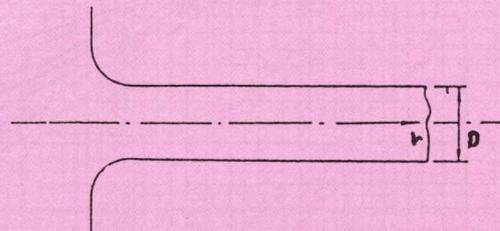
Figura					
ζ	0,5	1,0	1,5	3,0	0,05
Figura					
ζ	0,1	0,15	2,0	2,0	

TABLA PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE ζ DE PÉRDIDA DE
CARGA SECUNDARIA EN CONEXIONES A DEPÓSITOS

CONEXIÓN BRUSCA DE DEPÓSITO A TUBERÍA



CONEXIÓN SUAVE DE DEPÓSITO A TUBERÍA



r/D	0	0,02	0,04	0,08	0,12	0,16	>0,2
ζ	0,5	0,37	0,26	0,15	0,09	0,06	<0,03

CONEXIÓN A RAS DE PARED DE DEPÓSITO A TUBERÍA

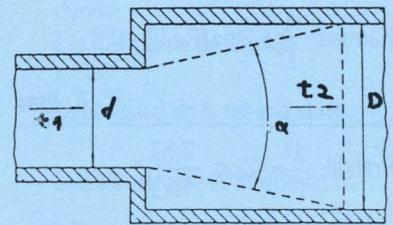
$\zeta = 0,5$

CONEXIÓN DE TUBERÍA A DEPÓSITO

$\zeta = 1$

TABLA PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE ζ DE PÉRDIDA DE
CARGA SECUNDARIA EN ACCESORIOS CÓNICOS

DIVERGENCIAS



$$\zeta = m \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]^2$$

α°	2,5	5	7,5	10	15	20	25	30
m	0,18	0,13	0,14	0,16	0,27	0,43	0,62	0,81

Ensanchamiento brusco $m = 1$

CONVERGENCIAS

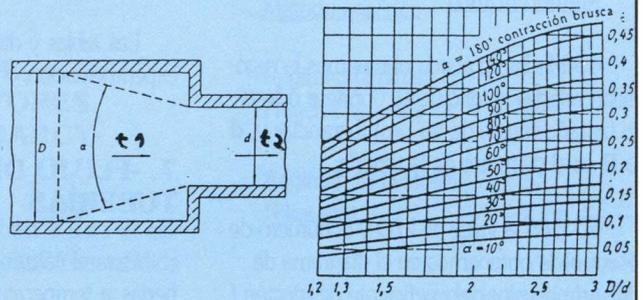
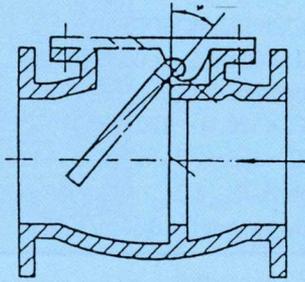


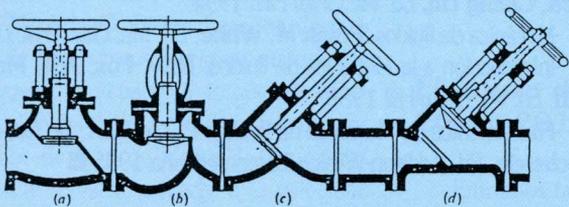
TABLA PARA EL CÁLCULO DEL
COEFICIENTE ζ DE PÉRDIDA DE CARGA SECUNDARIA
EN ACCESORIOS TIPO VÁLVULA

VÁLVULAS DE RETENCIÓN



ϕ	5°	10°	15°	20°	25°	30°	40°	50°	60°	65°	70°	90°
ζ	...	5,25	3,10	2,40	2,10	2,0	1,85	1,80	1,55	1,2	...	∞

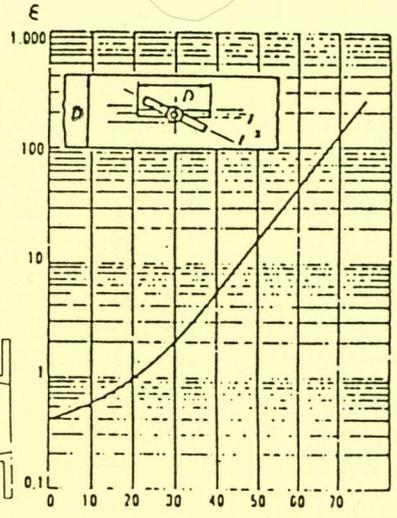
OTROS TIPOS DE VÁLVULAS



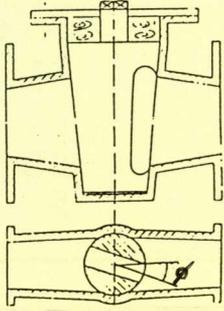
Esquema	a	b	c	d
ζ	2,9	2,0 a 2,7	1,4 a 2,5	0,44 a 0,8

TABLA PARA EL CÁLCULO DEL
COEFICIENTE ζ DE PÉRDIDA DE CARGA SECUNDARIA
EN ACCESORIOS TIPO VÁLVULA

VÁLVULAS DE MARIPOSA



VÁLVULAS TIPO MACHO



ϕ	5°	10°	15°	20°	25°	30°	40°	45°	50°	60°	65°	70°	90°
ζ	0,05	0,29	0,75	1,56	3,10	5,47	17,3	31,2	52,6	206	486	...	∞

TABLA PARA EL CÁLCULO DEL
COEFICIENTE ζ DE PÉRDIDA DE CARGA SECUNDARIA
EN ACCESORIOS CÓNICOS

Contracción brusca		Ensanchamiento gradual para un ángulo total del cono.						
D/d	ζ	4°	10°	15°	20°	30°	50°	60°
1,2	0,08	0,02	0,04	0,09	0,16	0,25	0,35	0,37
1,4	0,17	0,03	0,06	0,12	0,23	0,36	0,50	0,53
1,6	0,26	0,03	0,07	0,14	0,26	0,42	0,57	0,61
1,8	0,34	0,04	0,07	0,15	0,28	0,44	0,61	0,65
2,0	0,37	0,04	0,07	0,16	0,29	0,46	0,63	0,68
2,5	0,41	0,04	0,08	0,16	0,30	0,48	0,65	0,70
3,0	0,43	0,04	0,08	0,16	0,31	0,48	0,66	0,71
4,0	0,45	0,04	0,08	0,16	0,31	0,49	0,67	0,72
5,0	0,46	0,04	0,08	0,16	0,31	0,50	0,67	0,72

COEFICIENTE ζ EN VÁLVULAS DE COMPUERTA (ABIERTA): 0,25
COEFICIENTE ζ EN VÁLVULAS DE CONTROL (ABIERTA): 3

TABLA PARA EL CÁLCULO DEL
COEFICIENTE ζ DE PÉRDIDA DE CARGA SECUNDARIA
EN VÁLVULA DE PIE CON ALCACHOFA

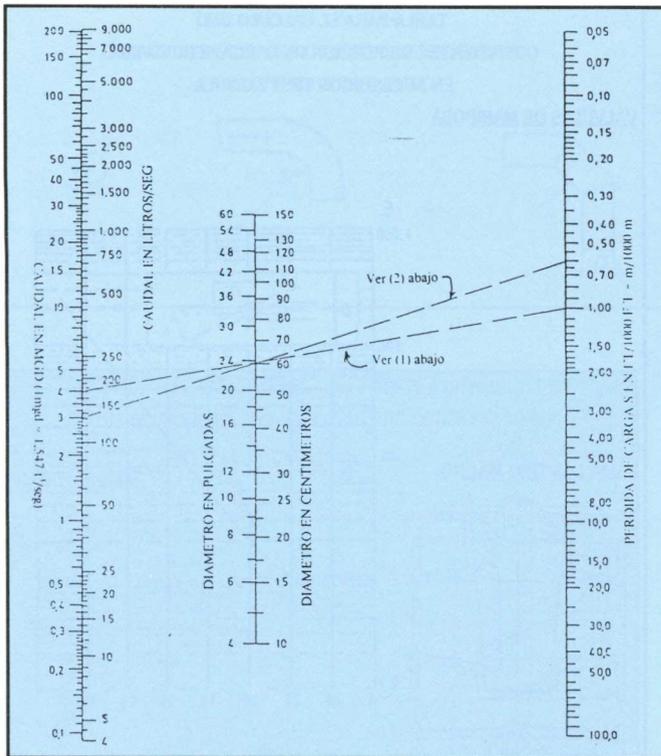
D (mm.)	z	D (mm.)	z
40	12,0	200	5,2
50	10,0	250	4,4
65	8,8	300	3,7
80	8,0	350	3,4
100	7,0	400	3,1
125	6,5	450	2,8
150	6,0	500	2,5

Existe un monograma en el que es posible obtener el caudal en función del diámetro de la tubería y de las pérdidas de carga S en o/oo y viceversa. Dicho monograma está elaborado para

$$C = 100$$

Si queremos utilizarlo para otro tipo de tuberías, habrá que hacer la modificación correspondiente y entrar con un caudal corregido.

Ej.: Dados D = 60 cm y S = 1 m / 1000 m para C = 100 obtenemos Q100 = 170 l/s. Si la tubería considerada tiene un C = 120, el caudal que circularía por ella sería Q120 = (120/100).170 = 204 l/s.



MONOGRAMA DE CAUDALES
FÓRMULA DE HAZEN-WILLIAMS. C= 100

UTILIZACIÓN DEL MONOGRAMA

- (1) Dado $D = 60$ cm, $S = 1.0$ m/1000 m. $C_1 = 120$: determinar el caudal Q .
 El nomograma da $Q_{100} = 170$ l/s.
 Para $C_1 = 120$. $Q = (120/100) 170 = 204$ l/s.
- (2) Dado $Q = 156$ l/s. $D = 60$ cm. $C_1 = 120$: determinar la pérdida de carga.
 Cambiando Q_{120} a Q_{100} : $Q_{100} = (100/120) 156 = 130$ l/s.
 El nomograma da $S = 0,60$ m/1000 m.

8.-BIBLIOGRAFÍA

- Mecánica de fluidos y Máquinas hidráulicas. **Claudio Mataix**. Ed. del Castillo, S.A. 1982.
- Mecánica de fluidos e Hidráulica. **Ronald V. Giles, Jack B. Evett, Cheng Liu**. Ed. Mc Graw-Hill. 1994.
- Mecánica de fluidos. **Frank M. White**. Ed. Mc. Graw-Hill 1993.
- Introducción a la Mecánica de fluidos. **R.W. Fox, A.T. Mc Donald**. Ed. Mc Graw-Hill 1989.
- Fundamentos de Mecánica de fluidos. **P. Gerhart, R. Gross, J. Hochstein**. Ed. Addison-Wesley Iberoamericana 1995. ■