

## **INFORME TÉCNICO: Pérdida de carga**

### **Pérdida de carga en tuberías**

#### **Definición**

“La circulación de fluidos viscosos en tuberías requiere un consumo de energía que se traduce en una pérdida presión”.

Teorema de Bernouilli: “El movimiento de un fluido perfecto (sin pérdidas energéticas) e incomprensible) en régimen permanente en una tubería verifica la siguiente ecuación”

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z = cte$$

v → velocidad (m/s)

g → gravedad 9,81 (m/s<sup>2</sup>)

p → presión (Pa)

ρ → densidad (kg/m<sup>3</sup>)

z → cota o altura (m)

Cada uno de los términos de la ecuación se definen como:

$\frac{v^2}{2g}$  → Presión dinámica: ligada al movimiento del fluido y es la presión producida por la energía cinética inherente a la masa del fluido.

$\frac{p}{\rho g}$  → Presión estática: En un fluido en reposo, las moléculas del mismo ejercen sobre la pared del recipiente que lo contiene una presión, llamada presión estática. En un punto cualquiera es igual en todas las direcciones (principio de Pascal).

z → Presión geométrica: ligada a la posición donde este el fluido; y es la presión producida por la energía potencial inherente a la masa del fluido.

El teorema de Bernouilli no es más que una ecuación energética.

Por la definición de pérdida de carga se puede entender que en el caso de un fluido no perfecto, ni incomprensible el valor de la ecuación de Bernouilli no es constante. La presión dinámica no se va a modificar ya que por la ley de continuidad sabemos que la velocidad (caudal) es constante; la presión geométrica tampoco se modificará si se mantiene la tubería en la misma cota; por lo tanto la pérdida de carga afecta exclusivamente a la presión estática. Esta pérdida de carga es un consumo de energía que se transforma en calor.

La determinación de la pérdida de carga es fundamental para el cálculo de redes abiertas o cerradas, ya que define la presión que por medio de una bomba u otro sistema tendrá que ser suministrada al fluido.

### Cálculo teórico

Partimos de la expresión que define la viscosidad absoluta en tuberías:

$$\mu = \frac{\pi \rho g h r^4 t}{8 L V}$$

$\rho g h$  → Presión en forma de columna de agua.

$r$  → radio de la tubería.

$t$  → tiempo.

$L$  → Longitud de la tubería.

$V$  → Volumen de fluido.

Usando la expresión de caudal volumétrico:

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q = v_m * A$$

$v_m$  → velocidad media.

$A$  → Sección =  $\pi * r^2$

$$\mu = \frac{\pi \rho g h r^4}{8 L Q}$$

$$Q = v_m * A = \frac{\pi \rho g h r^4}{8 L \mu}$$

$$h = \frac{8 \mu L v_m}{\rho g r^2} = \frac{32 \mu L v_m}{\rho g D^2}$$

$h$  es la expresión en columna del líquido que habría que vencer para producir el movimiento del fluido.

Multiplicando numerador y denominador por  $2v_m$ :

$$h = \frac{64}{\mu} \frac{L v_m^2}{D 2g}$$

El cociente  $\frac{v_m D \rho}{\mu}$  es una expresión adimensional conocida como número de Reynolds (Re), que Osborne Reynolds creó para ligar tres factores que definen el régimen del flujo de fluidos viscosos.

Cuando un fluido de viscosidad dinámica  $\mu$  (o de viscosidad cinemática  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ ) circula en régimen permanente, entre dos secciones de una tubería de diámetro interior  $D$ , separadas entre sí una distancia  $L$ , con una velocidad media  $v_m$ , habrá entre el origen y el final del tramo

una diferencia de presiones  $\Delta p = (p_1 - p_2) = h^* \rho$ , que se utiliza para mantener el movimiento del fluido.

$$h = \left( \frac{64}{\text{Re}} \right) \frac{L}{D} \frac{v_m^2}{2g} = f \frac{L}{D} \frac{v_m^2}{2g} \Rightarrow \text{Formula de Darcy-Weisbach}$$

$f \rightarrow$  Coeficiente de pérdida de carga en régimen laminar o coeficiente de fricción. Fórmula de Hagen-Poiseuille.

Cuando el movimiento del fluido no es en régimen laminar los valores de  $f$  son diferentes.

En régimen laminar la pérdida de carga tiene lugar entre las capas del líquido y no entre este y la tubería ya que la velocidad de contacto es 0. Cuando el régimen es turbulento la capa en contacto con la pared, con velocidad relativa 0, se hace cada vez más fina y las irregularidades de la pared afectan a partículas del líquido con mayor velocidad; en este caso la rugosidad de la pared tiene efectos en la pérdida de carga.

El factor  $f$  (o  $\lambda$ ) en general viene definido en el diagrama de Moody, en el cual vamos a obtener  $f$  en función de  $\text{Re}$  y de la rugosidad de la tubería. En este diagrama para régimen turbulento podemos definir tres zonas:

- Zona de tuberías hidráulicamente lisas, con pequeños valores de la rugosidad y del número de Reynolds, en el que el factor  $f$  se define como:

$$f = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} \quad \text{para } \text{Re} < 10^5 \quad (\text{Blasius})$$

$$f = 0,0032 + \frac{0,221}{\text{Re}^{0,237}} \quad \text{para } 10^5 < \text{Re} < 10^6$$

- Zona de transición: en la que el factor de rozamiento depende de la rugosidad relativa  $\varepsilon/D$ . En ella las curvas se definen por la fórmula experimental de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon}{3,72D} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right] \quad (\text{Colebrook-White})$$

que también se puede escribir como:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,14 + 2 \log \left( \frac{D}{\varepsilon} \right) - 2 \log \left[ 1 + \frac{9,3}{\text{Re} \left( \frac{\varepsilon}{D} \right) \sqrt{f}} \right] \quad (\text{Colebrook-White})$$

- Zona de tubos hidráulicamente rugosos, donde el coeficiente de fricción depende exclusivamente de la rugosidad relativa:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,14 + 2 \log \left( \frac{D}{\varepsilon} \right) \quad (\text{Nikuradse})$$

Una tuberías se considera hidráulicamente lisa si se cumple:

$$\text{Re} < \frac{23}{\varepsilon/D}$$

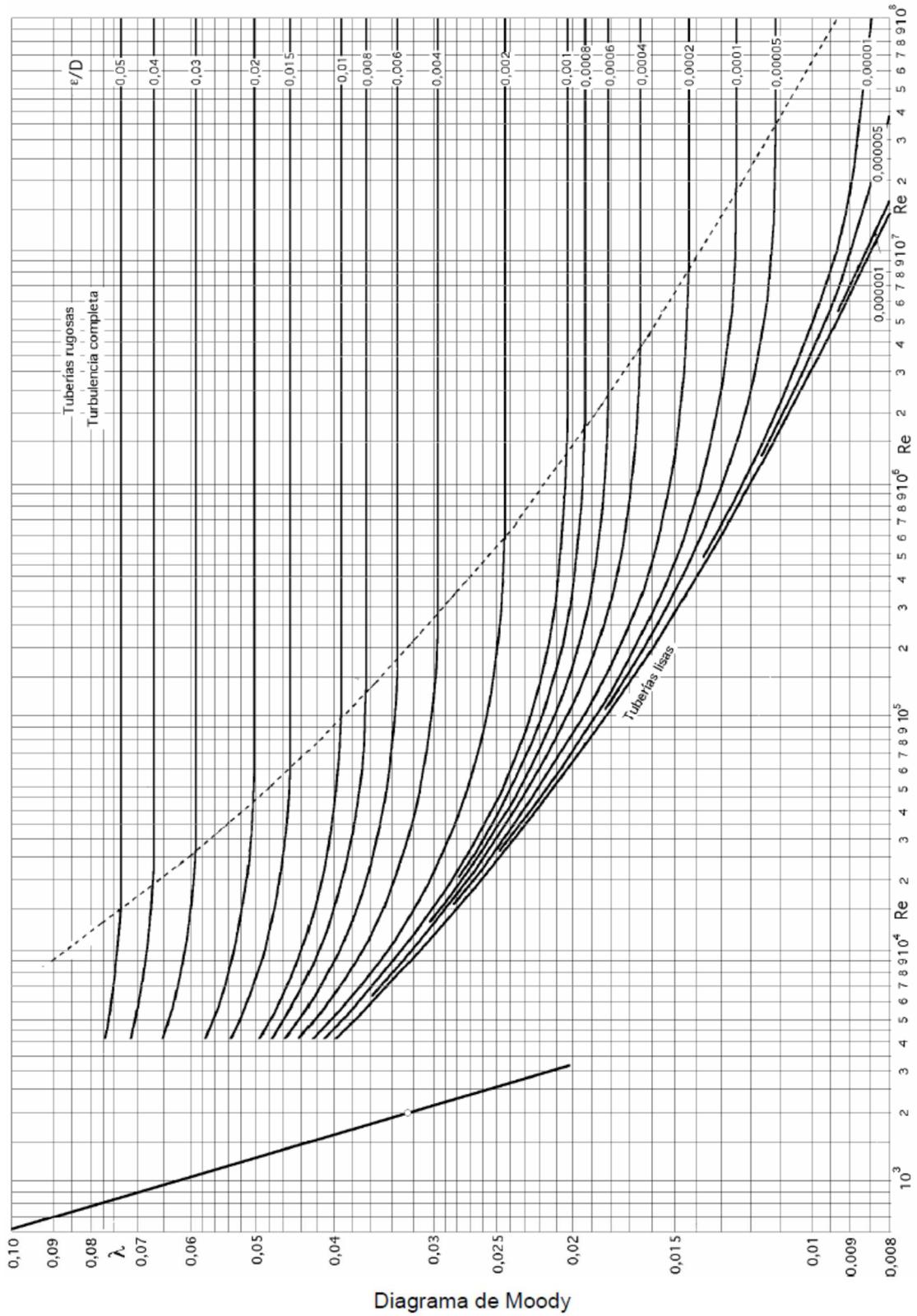


Diagrama de Moody



En el caso de tuberías de materiales termoplásticos, el método de cálculo de la pérdida de carga es el que marca la norma ISO TR 10501-1993: "Thermoplastic pipes for the transport of liquids under pressure – Calculation of head losses". El cual es un método de cálculo útil para el transporte de aguas bajo presión o de otros líquidos con una viscosidad dinámica similar hasta temperaturas de 45°C.

Según esta norma la pérdida de carga en metros por metro para agua a 20°C es:

$$J_0 = 5,37 \cdot 10^{-4} (d^{-1,24} \cdot v^{1,76}) \quad 4 \cdot 10^3 \leq Re \leq 1,5 \cdot 10^5$$

$$J_0 = 5,79 \cdot 10^{-4} (d^{-1,20} \cdot v^{0,80}) \quad 1,5 \cdot 10^5 \leq Re < 10^6$$

$d \rightarrow$  Diámetro interior en m.

$v \rightarrow$  Velocidad media en m/s.

En el caso de una temperatura  $t$  diferente a 20°C.

$$J_t = K_t \cdot J_0$$

$K_t =$  parámetro tabulado.

Los datos de pérdida de carga usados para los cálculos que aparecen en las tablas siguientes están basados en esta norma.

Las pérdidas de carga ( $\Delta P$  se dan en valores de mm. c.a.), son valores para agua a 20°C, en caso de querer usar otras temperaturas se deben aplicar como se ha comentado anteriormente los valores de  $K_t$  siguientes.

| Temperatura del agua (°C) | Factor de corrección de temperatura $K_t$  |                                 |
|---------------------------|--|---------------------------------|
|                           | $4 \cdot 10^3 \leq Re \leq 1,5 \cdot 10^5$ | $1,5 \cdot 10^5 \leq Re < 10^6$ |
| 0                         | 1,148                                      | 1,122                           |
| 5                         | 1,105                                      | 1,087                           |
| 10                        | 1,067                                      | 1,055                           |
| 15                        | 1,033                                      | 1,027                           |
| 20                        | 1,000                                      | 1,000                           |
| 25                        | 0,972                                      | 0,977                           |
| 30                        | 0,947                                      | 0,956                           |
| 35                        | 0,925                                      | 0,937                           |
| 40                        | 0,904                                      | 0,919                           |
| 45                        | 0,885                                      | 0,903                           |

## Tablas de pérdidas de carga

Los valores de pérdida de carga se dan para unos valores determinados de velocidades ya que según el CTE estos deben ir entre 0,5 m/s y 3,5 m/s. Aunque lo normal en estas dimensiones es trabajar entre 0,5 m/s y 2 m/s.

### Tabla de pérdida de carga para tubería Sapress y Sapress Xpress (PEX)

| Caudal |       | Ø16x1,8   |             | ø20x1,9   |             | ø25x2,3   |             | ø32x2,9   |             |
|--------|-------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| (l/s)  | (l/h) | Vel (m/s) | ΔP (mm c.a) |
| 0,01   | 36    | 0,1       | 1,6         |           |             |           |             |           |             |
| 0,02   | 72    | 0,2       | 5,3         |           |             |           |             |           |             |
| 0,03   | 108   | 0,2       | 10,7        |           |             |           |             |           |             |
| 0,04   | 144   | 0,3       | 17,8        |           |             |           |             |           |             |
| 0,05   | 180   | 0,4       | 26,3        | 0,2       | 7,4         | 0,2       | 2,5         |           |             |
| 0,06   | 216   | 0,5       | 36,3        | 0,3       | 10,2        | 0,2       | 3,4         |           |             |
| 0,07   | 252   | 0,6       | 47,6        | 0,3       | 13,3        | 0,2       | 4,5         |           |             |
| 0,08   | 288   | 0,7       | 60,2        | 0,4       | 16,9        | 0,2       | 5,6         |           |             |
| 0,09   | 324   | 0,7       | 74,1        | 0,4       | 20,8        | 0,3       | 6,9         |           |             |
| 0,1    | 360   | 0,8       | 89,2        | 0,5       | 25,0        | 0,3       | 8,3         | 0,2       | 2,5         |
| 0,12   | 432   | 1,0       | 122,9       | 0,6       | 34,4        | 0,4       | 11,5        | 0,2       | 3,5         |
| 0,14   | 504   | 1,2       | 161,3       | 0,7       | 45,2        | 0,4       | 15,1        | 0,3       | 4,6         |
| 0,16   | 576   | 1,3       | 204,0       | 0,8       | 57,1        | 0,5       | 19,1        | 0,3       | 5,8         |
| 0,18   | 648   | 1,5       | 251,0       | 0,9       | 70,3        | 0,6       | 23,5        | 0,3       | 7,1         |
| 0,20   | 720   | 1,7       | 302,1       | 1,0       | 84,6        | 0,6       | 28,3        | 0,4       | 8,6         |
| 0,22   | 792   | 1,8       | 357,3       | 1,1       | 100,1       | 0,7       | 33,4        | 0,4       | 10,2        |
| 0,24   | 864   | 2,0       | 416,4       | 1,2       | 116,7       | 0,7       | 38,9        | 0,4       | 11,8        |
| 0,26   | 936   |           |             | 1,3       | 134,3       | 0,8       | 44,8        | 0,5       | 13,6        |
| 0,28   | 1008  |           |             | 1,4       | 153,0       | 0,9       | 51,1        | 0,5       | 15,5        |
| 0,30   | 1080  |           |             | 1,5       | 172,8       | 0,9       | 57,7        | 0,6       | 17,5        |
| 0,35   | 1260  |           |             | 1,7       | 226,6       | 1,1       | 75,6        | 0,6       | 23,0        |
| 0,40   | 1440  |           |             | 1,9       | 286,6       | 1,2       | 95,7        | 0,7       | 29,1        |
| 0,45   | 1620  |           |             |           |             | 1,4       | 117,6       | 0,8       | 35,8        |
| 0,50   | 1800  |           |             |           |             | 1,5       | 141,7       | 0,9       | 43,1        |
| 0,55   | 1980  |           |             |           |             | 1,7       | 167,6       | 1,0       | 50,9        |
| 0,60   | 2160  |           |             |           |             | 1,8       | 195,3       | 1,1       | 59,4        |
| 0,65   | 2340  |           |             |           |             | 2,0       | 224,9       | 1,2       | 68,3        |
| 0,70   | 2520  |           |             |           |             | 2,1       | 256,2       | 1,3       | 77,9        |
| 0,75   | 2700  |           |             |           |             | 2,3       | 289,3       | 1,4       | 87,9        |
| 0,80   | 2880  |           |             |           |             | 2,4       | 324,0       | 1,5       | 98,5        |
| 0,85   | 3060  |           |             |           |             | 2,6       | 360,5       | 1,6       | 109,6       |
| 0,90   | 3240  |           |             |           |             | 2,8       | 398,7       | 1,7       | 121,2       |
| 0,95   | 3420  |           |             |           |             | 2,9       | 438,5       | 1,8       | 133,3       |
| 1,00   | 3600  |           |             |           |             |           |             | 1,9       | 145,8       |
| 1,50   | 5400  |           |             |           |             |           |             | 2,8       | 297,7       |



Tabla de pérdida de carga para tubería Multisapress

| Caudal |       | Ø16x2     |       | Ø18x2     |       | Ø20x2     |       | Ø20x2,25  |       | Ø25x2,5   |       | Ø32x3     |       |
|--------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| (l/s)  | (l/h) | Vel (m/s) | ΔP    |
| 0,01   | 36    | 0,1       | 1,8   |           |       |           |       |           |       |           |       |           |       |
| 0,02   | 72    | 0,2       | 6,1   |           |       |           |       |           |       |           |       |           |       |
| 0,03   | 108   | 0,3       | 12,5  |           |       |           |       |           |       |           |       |           |       |
| 0,04   | 144   | 0,4       | 20,8  |           |       |           |       |           |       |           |       |           |       |
| 0,05   | 180   | 0,4       | 30,8  | 0,3       | 14,8  | 0,2       | 7,8   | 0,3       | 9,1   |           |       |           |       |
| 0,06   | 216   | 0,5       | 42,4  | 0,4       | 20,4  | 0,3       | 10,8  | 0,3       | 12,6  |           |       |           |       |
| 0,07   | 252   | 0,6       | 55,7  | 0,5       | 26,7  | 0,3       | 14,2  | 0,4       | 16,5  |           |       |           |       |
| 0,08   | 288   | 0,7       | 70,4  | 0,5       | 33,8  | 0,4       | 17,9  | 0,4       | 20,8  |           |       |           |       |
| 0,09   | 324   | 0,8       | 86,6  | 0,6       | 41,6  | 0,4       | 22,0  | 0,5       | 25,6  |           |       |           |       |
| 0,10   | 360   | 0,9       | 104,3 | 0,6       | 50,1  | 0,5       | 26,5  | 0,5       | 30,8  | 0,3       | 9,2   | 0,2       | 2,6   |
| 0,12   | 432   | 1,1       | 143,7 | 0,8       | 69,0  | 0,6       | 36,5  | 0,6       | 42,5  | 0,4       | 12,6  | 0,2       | 3,6   |
| 0,14   | 504   | 1,2       | 188,5 | 0,9       | 90,5  | 0,7       | 47,9  | 0,7       | 55,8  | 0,4       | 16,6  | 0,3       | 4,8   |
| 0,16   | 576   | 1,4       | 238,4 | 1,0       | 114,5 | 0,8       | 60,6  | 0,8       | 70,5  | 0,5       | 21,0  | 0,3       | 6,0   |
| 0,18   | 648   | 1,6       | 293,4 | 1,2       | 140,8 | 0,9       | 74,6  | 1,0       | 86,8  | 0,6       | 25,8  | 0,3       | 7,4   |
| 0,20   | 720   | 1,8       | 353,1 | 1,3       | 169,5 | 1,0       | 89,8  | 1,1       | 104,4 | 0,6       | 31,0  | 0,4       | 8,9   |
| 0,22   | 792   | 1,9       | 417,6 | 1,4       | 200,5 | 1,1       | 106,2 | 1,2       | 123,5 | 0,7       | 36,7  | 0,4       | 10,5  |
| 0,24   | 864   | 2,1       | 486,7 | 1,6       | 233,7 | 1,2       | 123,8 | 1,3       | 144,0 | 0,8       | 42,8  | 0,5       | 12,3  |
| 0,26   | 936   |           |       | 1,7       | 269,0 | 1,3       | 142,5 | 1,4       | 165,7 | 0,8       | 49,3  | 0,5       | 14,1  |
| 0,28   | 1008  |           |       | 1,8       | 306,5 | 1,4       | 162,3 | 1,5       | 188,8 | 0,9       | 56,1  | 0,5       | 16,1  |
| 0,30   | 1080  |           |       | 1,9       | 346,1 | 1,5       | 183,3 | 1,6       | 213,2 | 1,0       | 63,4  | 0,6       | 18,2  |
| 0,35   | 1260  |           |       |           |       | 1,7       | 240,4 | 1,9       | 279,6 | 1,1       | 83,1  | 0,7       | 23,8  |
| 0,40   | 1440  |           |       |           |       | 2,0       | 314,1 | 2,1       | 353,7 | 1,3       | 105,1 | 0,8       | 30,2  |
| 0,45   | 1620  |           |       |           |       |           |       |           |       | 1,4       | 129,4 | 0,8       | 37,1  |
| 0,50   | 1800  |           |       |           |       |           |       |           |       | 1,6       | 155,7 | 0,9       | 44,7  |
| 0,55   | 1980  |           |       |           |       |           |       |           |       | 1,8       | 184,1 | 1,0       | 52,8  |
| 0,60   | 2160  |           |       |           |       |           |       |           |       | 1,9       | 214,6 | 1,1       | 61,6  |
| 0,65   | 2340  |           |       |           |       |           |       |           |       | 2,1       | 247,1 | 1,2       | 70,9  |
| 0,70   | 2520  |           |       |           |       |           |       |           |       | 2,2       | 281,5 | 1,3       | 80,7  |
| 0,75   | 2700  |           |       |           |       |           |       |           |       | 2,4       | 317,8 | 1,4       | 91,2  |
| 0,80   | 2880  |           |       |           |       |           |       |           |       | 2,5       | 356,1 | 1,5       | 102,1 |
| 0,85   | 3060  |           |       |           |       |           |       |           |       | 2,7       | 396,2 | 1,6       | 113,6 |
| 0,90   | 3240  |           |       |           |       |           |       |           |       | 2,9       | 438,1 | 1,7       | 125,5 |
| 0,95   | 3420  |           |       |           |       |           |       |           |       | 3,0       | 481,8 | 1,8       | 138,2 |
| 1,00   | 3600  |           |       |           |       |           |       |           |       | 3,2       | 527,4 | 1,9       | 151,3 |
| 1,50   | 5400  |           |       |           |       |           |       |           |       |           |       | 2,8       | 308,7 |

### Pérdida de carga singulares

Cuando en tuberías se presenta una alteración (codo, ensanchamiento...) se producen pérdidas de carga suplementarias, ya que esta perturbación de la corriente provoca la aparición de remolinos que incrementan la pérdida de carga. En general toda deformación de la vena hidráulica provoca pérdidas de carga suplementarias.

Estas pérdidas se pueden obtener únicamente de la experimentación y se admiten proporcional a la presión dinámica.

$$\Delta h = k * \frac{v_m^2}{2g}$$

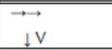
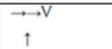
El valor  $v_m$  se considera la velocidad media, en codos, válvulas, etc., sin embargo cuando hay variaciones de la sección se considera como la velocidad en la sección más pequeña.

Muchas veces estas pérdidas se dan en forma de longitud equivalente de tubería; es decir, se supone un tubería de una longitud tal que produce la misma pérdida de carga.

$$k * \frac{v_m^2}{2g} = f \frac{L}{D} \frac{v_m^2}{2g} \qquad \frac{k}{f} = \frac{L}{D}$$

Esta igualdad es correcta si se mantiene los valores de  $f$ . Por ello este método sólo se usa como predimensionamiento.

El valor de  $k$  varía de unas publicaciones a otras. En la tabla siguiente se dan los valores de  $K$  para los elementos más utilizados.

| Elemento                 | K   |   |
|--------------------------|-----|---|
| T divergente             | 1.3 |  |
| T concurrente            | 0.9 |  |
| T directa con derivación | 0.3 |  |
| T a contracorriente      | 3   |  |
| Codo                     | 0.7 |   |
| Reducción                | 0.4 |   |
| Lira de dilatación       | 1   |   |
| Válvula de esfera        | 0.5 |   |
| Válvula de pistón        | 4.3 |   |