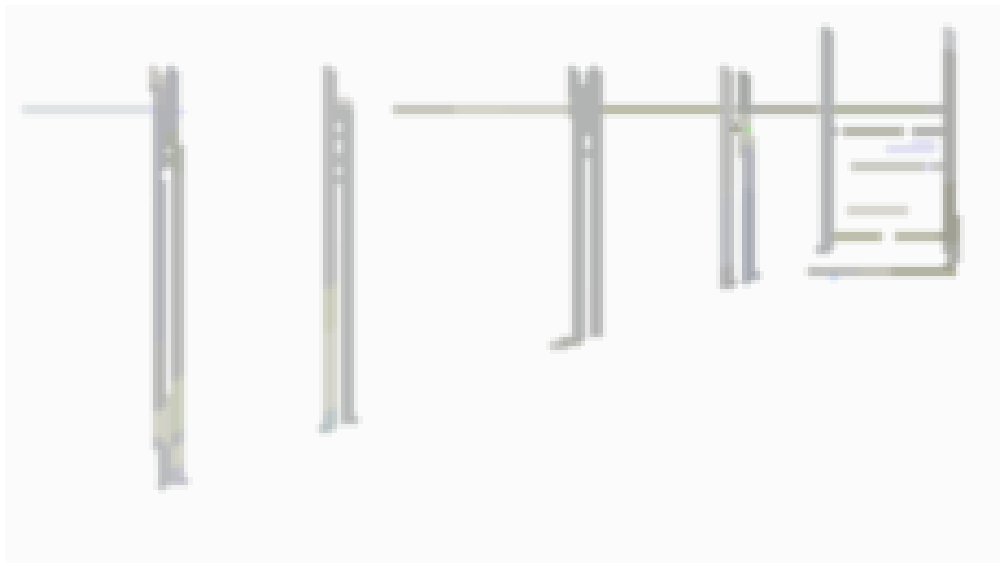


PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS



Autor:

Pedro Gea

Rao Estudios y proyectos S.L.

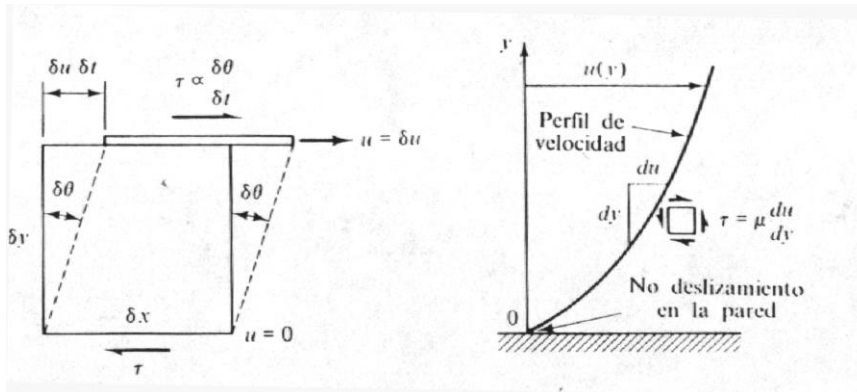
Curso de hidráulica básica

1. Propiedades del agua
2. Cálculo de pérdidas en tuberías
3. La ecuación de Bernouilli
4. Cálculo del diámetro óptimo en una red ramificada
5. Cálculo de redes malladas. Método de Hardy-Cross

1. PROPIEDADES DEL AGUA

Hay una serie de magnitudes tales como la presión, temperatura y densidad, conocidas por todos, y que podríamos definir como primarias a la hora de estudiar el estado de cualquier líquido, en este caso agua. Sin embargo hay otra serie de magnitudes que caracterizan de igual forma el comportamiento del agua como es la viscosidad.

Para definirla, supongamos que tenemos un fluido tal que pudiésemos deformarlo colocando una placa lisa en su superficie libre y desplazándola hacia un lado, tal y como se ve en la figura.



Esfuerzos cortantes en un fluido movido por una placa.

Perfil de velocidad generado en el fluido durante el movimiento

El fluido se deformará un ángulo $\delta\theta$, y este ángulo irá en aumento mientras sigamos actuando sobre la placa con la fuerza τ .

Por otro lado, el hecho de que se deforme el fluido indica que está moviéndose y que tiene cierta velocidad. Esta velocidad evidentemente será superior en la parte del fluido que está en contacto con la placa, ya que es el elemento que está aportando el movimiento, mientras que el fluido que está en contacto con la pared tiene velocidad nula por estar la pared parada, tal y como se puede ver en la figura anterior.

En fluidos comunes (agua, aceite, aire) hay una relación proporcional entre la esta fuerza aplicada y la velocidad del fluido, de tal forma que puede escribir:

$$\tau = \mu (d\theta/dt)$$

donde μ es la viscosidad del fluido.

De esta forma, la viscosidad se puede entender como la relación que existe entre la fuerza necesaria para mover un fluido y la velocidad que este llega a tener. Es decir, es una medida de la resistencia del fluido al movimiento.

Otro parámetro relacionado directamente con la viscosidad es la viscosidad cinemática, y que no es más que la relación entre la viscosidad y la densidad del fluido:

$$\nu = \mu / \rho$$

En la siguiente tabla se pueden observar algunos de los valores de viscosidades y viscosidades cinemáticas de algunos fluidos comunes:

Tabla 1.3
VISCOSIDAD Y VISCOSIDAD CINEMATICA DE OCHO FLUIDOS A 1 atm y 20° C

Fluido	μ , kg/(m·s)†	Relación $\mu/\mu(\text{H}_2)$	ρ , kg/m ³	ν , m ² /s†	Relación $\nu/\nu(\text{Hg})$
1. Hidrógeno	$8,9 \times 10^{-6}$	1,0	0,084	$1,06 \times 10^{-4}$	910
2. Aire	$1,8 \times 10^{-5}$	2,1	1,20	$1,51 \times 10^{-5}$	130
3. Gasolina	$2,9 \times 10^{-4}$	33	680	$4,27 \times 10^{-7}$	3,7
4. Agua	$1,0 \times 10^{-3}$	114	999	$1,01 \times 10^{-6}$	8,7
5. Alcohol etílico	$1,2 \times 10^{-3}$	135	789	$1,51 \times 10^{-6}$	13
6. Mercurio	$1,5 \times 10^{-3}$	170	13 540	$1,16 \times 10^{-7}$	1,0
7. Aceite SAE 30	0,26	29 700	933	$2,79 \times 10^{-4}$	2430
8. Glicerina	1,5	168 000	1 263	$1,19 \times 10^{-3}$	10 200

Variación de la viscosidad con la temperatura

Así como la presión no es un factor que influya mucho en la viscosidad de un fluido, la temperatura sí que lo es. La viscosidad de los gases y de algunos líquidos aumenta lentamente con la temperatura. Para el caso concreto del agua, un aumento de la temperatura produce una ligera disminución de su viscosidad.

En las siguientes tablas se puede apreciar las variaciones de la viscosidad con la temperatura.

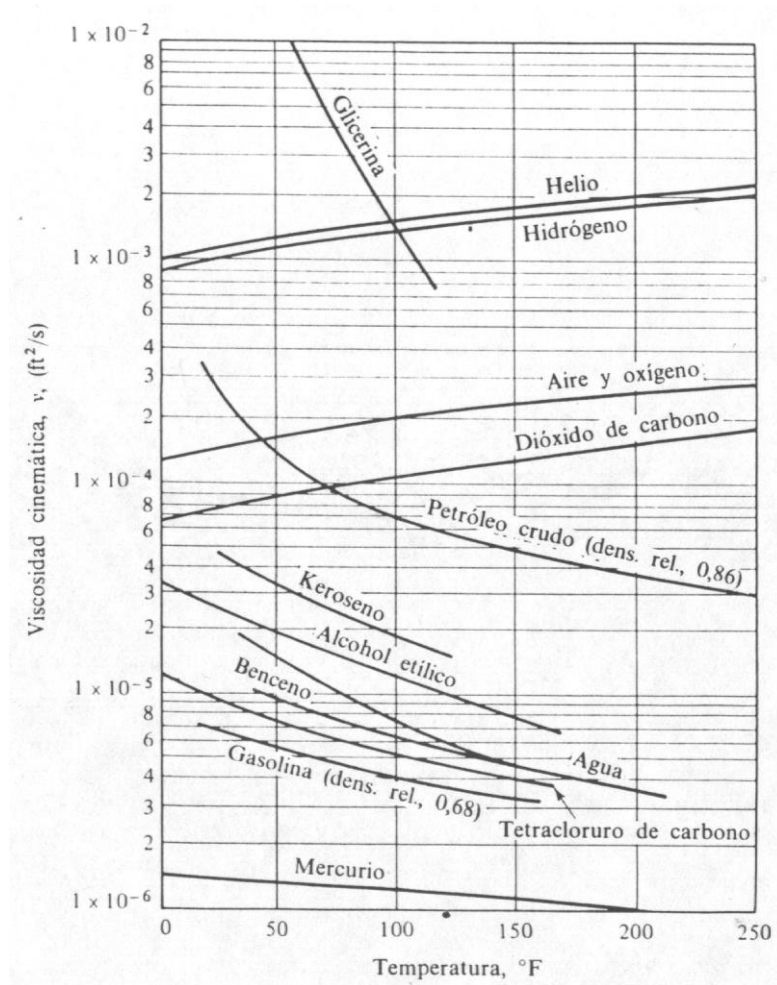


Gráfico de viscosidades cinemáticas de sustancias comunes

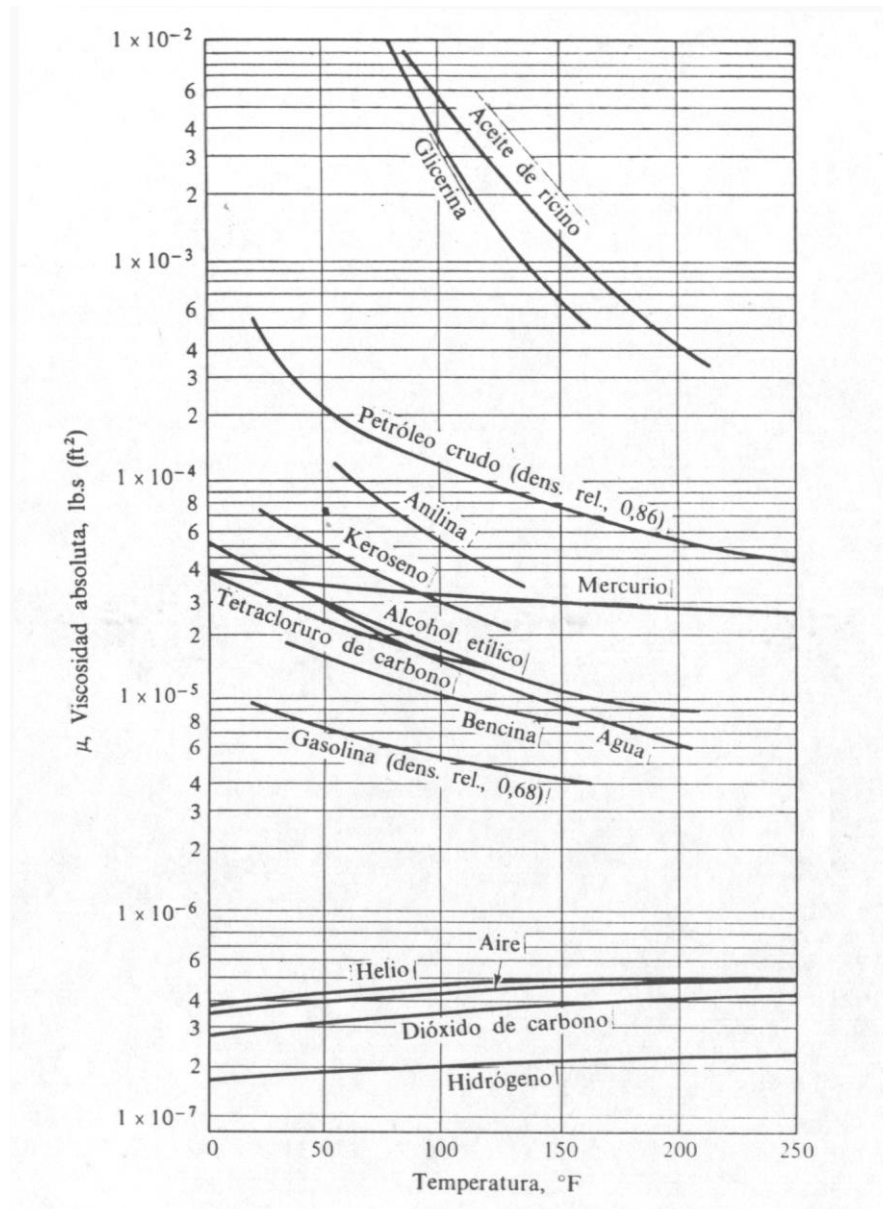


Gráfico de viscosidades absolutas de sustancias comunes

La ecuación que relaciona la viscosidad con un aumento de temperatura es la siguientes:

$$\mu / \mu_0 \approx (T/T_0)^n$$

donde μ_0 es una viscosidad conocida a una temperatura T_0 de referencia. Estos valores se encuentran en tablas para cada fluido.

Sin embargo si se produce un descenso de la temperatura la fórmula que más se aproxima es:

$$\mu \approx a e^{-bT}$$

en donde a y b se encuentran en tablas.

2. CALCULO DE LAS PERDIDAS EN TUBERÍAS

La pérdida de carga en una conducción a presión indica de alguna forma cuanto se “frena” el agua cuando circula por dicha conducción. Para ver esta idea, suponer que se tiene un pequeño depósito del que parte un conducto, tal y como se puede ver en la figura. Supongamos que en dicho conducto tenemos una serie de tubos piezométricos, que nos indican en cada punto donde estén localizados la presión que hay en ese punto.

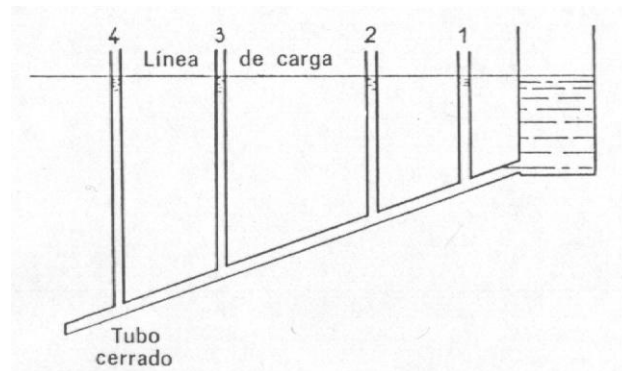


Figura deposito con un conducto por el que no circula agua, y en la que los tubos piezométricos indican la presión estática de cada punto del conducto

Pues bien, si no circula agua por el conducto se podrá observar como todos los tubos llegan a la misma altura, que es la altura del agua en el depósito. Si se hace circular agua y se llega a un régimen estacionario se podrá observar cómo disminuye la altura de agua en dichos tubos a medida que se alejan del depósito. Esta diferencia de alturas es la pérdida de carga del conducto.

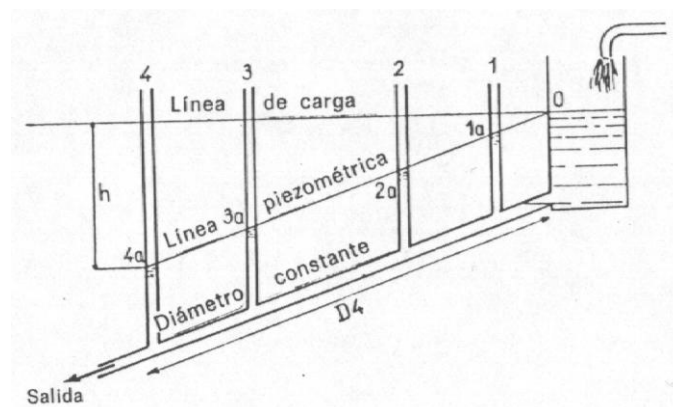


Figura del deposito en donde se ven las pérdidas en la conducción cuando se ha alcanzado el régimen estacionario

Para cuantificar estas pérdidas hay que tener en cuenta varios factores, que son: la rugosidad de la tubería, la velocidad del fluido que circula por ella, y las propiedades del fluido (densidad, viscosidad). La fórmula que nos da este valor es la ecuación de Darcy-Weisbach:

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

en donde:

- f es el factor de fricción
- v es la velocidad del fluido
- g es la aceleración de la gravedad, 9.8 m/s^2
- D es el diámetro de la conducción
- L es la longitud de la tubería

El parámetro factor de fricción es función al mismo tiempo de otros dos factores, el número de Reynolds

$$\text{Re} = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

y la rugosidad relativa

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{D}$$

El número de Reynolds nos viene a decir de que forma y con que velocidad está circulando el fluido. Un Re pequeño (<2000) nos indica un régimen laminar, propio de fluido con poca velocidad y muy viscosos. Un Re grande (>2500) nos indica un régimen turbulento, fluidos con mucha velocidad o poco viscosos, propios de conducciones a presión.

Por otro lado, la rugosidad relativa del tubo nos indica si las paredes del tubo son más o menos lisas. Para distintos materiales tenemos los siguientes valores:

Material	Rugosidad ε (mm)
Fibrocemento	0.025
Fundición revestida	0.03
Fundición no revestida	0.15
Hierro galvanizado	0.15
Hormigón armado	0.1
Hormigón liso	0.025
PVC y Polietileno	0.0025

Tabla con las rugosidades de materiales de tuberías comunes

Para calcular f habrá que ver primero si el fluido se encuentra en régimen laminar o turbulento, mediante el número de Reynolds, y seguidamente aplicar una de las dos fórmulas siguientes:

- Régimen laminar, se usa la fórmula de Poiseuille:

$$f = \frac{64}{\text{Re}}$$

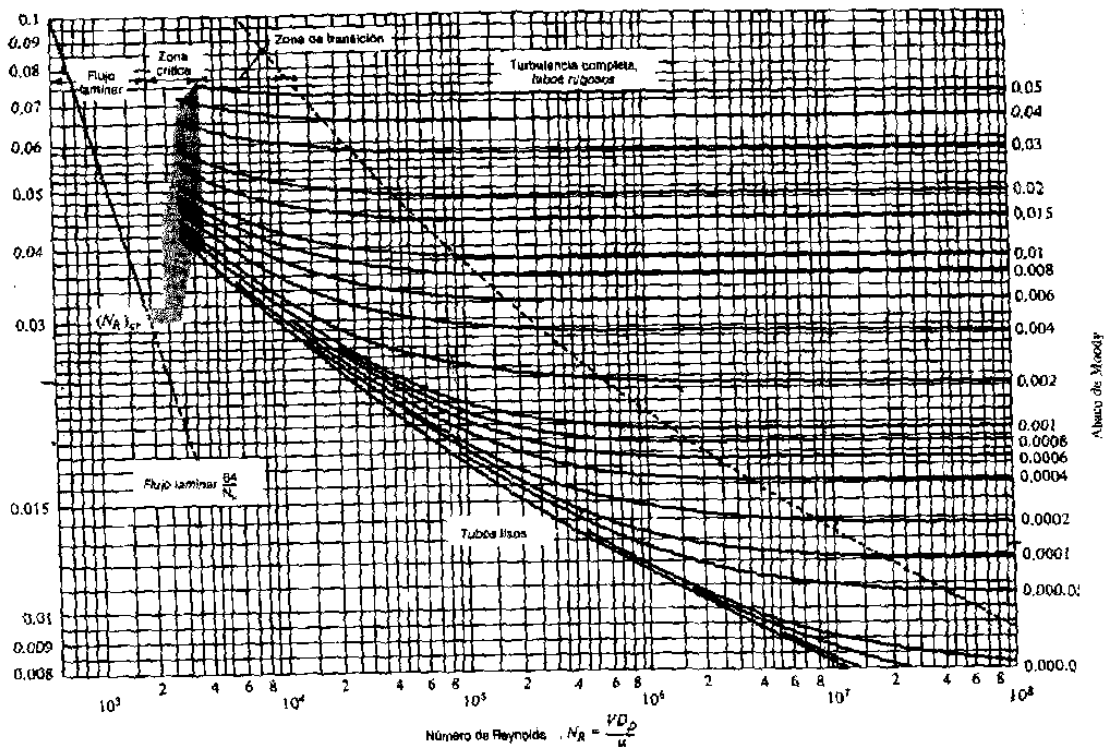
- Régimen turbulento, la fórmula más usada es la de Colebrook-White

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon_r}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \cdot \sqrt{f}} \right)$$

Esta última fórmula es bastante tediosa de resolver, ya que hay que hacer varias iteraciones para llegar al resultado final. La forma de operar es la siguiente:

1. Supongo un f inicial
2. Calculo un nuevo f'
3. Calculo la diferencia $|f-f'|$ y veo si es lo suficientemente pequeña, si no calculo otra vez f , pero ahora con el valor de f' obtenido.

Hay otra forma de calcular f , y es mediante el ábaco de Moody, en que aparece en el eje de las y el factor de fricción y en el de las x el número de Reynolds. Se puede determinar directamente f a partir de Re y ϵ_r . Este ábaco se muestra a continuación.



Ábaco de Moody para el cálculo del factor fricción

Como aplicación de todo esto veamos un ejemplo sencillo. Sea una conducción de fibrocemento de diámetro 100 mm con rugosidad $\epsilon = 0.025$ según la tabla anterior. Se sabe que la velocidad del agua en el interior de la conducción es de 1 m/s, y veamos cual es su factor de fricción.

En primer lugar calculamos el número de Reynolds, para ver en qué régimen nos encontramos. Este resulta ser:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} = \frac{1 \cdot 0.1}{10^{-6}} = 100000$$

Como es $Re > 4000$ nos encontramos en régimen turbulento. La rugosidad relativa

$$\text{es : } \varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{D} = 0.00025$$

Con estos dos valores vamos a la fórmula de Colebrook y obtenemos:

$$f = \frac{0.25}{\left(\log \left(\frac{0.00025}{3.7} + \frac{2.51 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{f}} \right) \right)^2}$$

ecuación que se resuelve de la forma indicada anteriormente. Finalmente se obtiene un factor de fricción:

$$f = 0.0195$$

3. LA ECUACIÓN DE BERNOUILLI

Esta ecuación es, de alguna forma, la que nos dice las presiones y los caudales que se tendrán en dos puntos de una misma conducción. Como todo el mundo sabe la energía no se crea ni se destruye, simplemente se transforma. En el caso del agua lo que nos dice esto es la ecuación de Bernouilli.

Para entender el concepto vamos a decir que el agua cuando circula por una conducción lleva asociadas tres tipos de energía: una llamada potencial, que viene dada por la altura a la que se encuentra el agua, otra cinética debida a la velocidad que lleva y otra llamada de presión, que como su nombre indica lo que nos dice es la presión interna del agua.

Además de estas tres existe, como en todo, la energía que se pierde cuando el agua circula de un punto a otro. Esta es la llamada pérdida de carga, definida ya en el punto anterior.

Con todos estos “ingredientes” estamos listos para definir la ecuación de Bernouilli, que dice que (en ausencia de pérdidas) la suma de las tres energías anteriores se mantiene constante entre dos puntos de una misma conducción, es decir:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = cte$$

Energía de
presión

Energía
potencial

Energía
cinética

en donde

- $\frac{P_1}{\gamma}$ es la presión del agua (sin tener en cuenta la presión aportada por una diferencia de cota), en metros de columna de agua (mca)
- z_1 es la cota a la que se encuentra el agua, este el término que nos da la presión debida a una diferencia de cotas
- $\frac{v_1^2}{2g}$ es el término de energía debido a la velocidad que lleva el agua

Sin embargo, como ya se ha comentado siempre hay pérdidas, con lo que al final nos queda que la energía que lleva el agua en un punto inicial será la misma que lleve en otro punto más las pérdidas, por tanto:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_f$$

Pérdidas
de carga

Que de forma resumida queda:

$$H_1 = H_2 + h_f$$

Por otro lado también se puede producir un aporte de energía al agua, este el caso cuando utilizamos una bomba, en el que la bomba aporta una energía al agua. En este caso la ecuación de Bernoulli se escribiría:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + H_b = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_f$$

en donde H_b es la presión que la bomba comunica al agua, en mca.

Para ver todo esto de forma práctica veamos un ejemplo sencillo.

Supongamos una tubería, conectada a un depósito de nivel constante a la cota de 150m. por la que circula agua con una pérdida de carga de 0,004 m/m. La longitud de la tubería es de 2000m y en el extremo final donde la cota es de 100m. existe una válvula de compuerta. Se cerramos cual será la presión en el extremo final si:

- a) La válvula está abierta.
- b) La válvula está cerrada.

a) Cuando la válvula esté abierta la presión en el extremo final se calcula aplicando el Teorema de Benoulli entre ambos extremos. Como el diámetro de la conducción no cambia, el término cinético se mantiene constante a lo largo de la conducción, y por tanto tiene el mismo valor en un lado de la ecuación y en el otro, por lo que se anulan. Así nos queda:

$$\frac{P_2}{\gamma} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + h_f \Rightarrow \frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_1}{\gamma} + z_1 - z_2 - h_f$$

Como la presión en 1 es cero

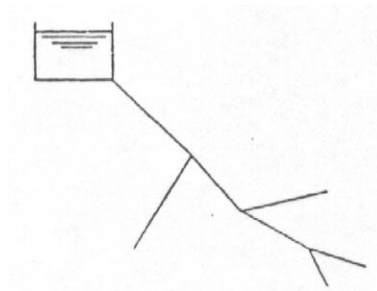
$$\frac{P_2}{\gamma} = 150 - 100 - (0,004 \times 2000) = 42 \text{ m.c.a.}$$

b) Cuando la válvula está cerrada no circula caudal por la tubería, por lo tanto las pérdidas de carga serán nulas y la presión en 2 se determina como la diferencia de cotas entre los extremos de la tubería, es decir el valor de la presión en 2 será la presión estática.

$$\frac{P_2}{\gamma} = z_2 - z_{21} = 150 - 100 = 50 \text{ m.c.a.}$$

4. CALCULO DEL DIAMETRO ÓPTIMO EN UNA RED RAMIFICADA

Lo primero es establecer el concepto de red ramificada. Una red se dice ramificada cuando está formada por una conducción “central” de la que parten otras conducciones de diámetros igual o más pequeños, tal y como se muestra en la figura:



Red ramificada

A la hora de diseñar y calcular una red ramificada hay que tener en cuenta además del criterio hidráulico, otra serie de criterios como puede el criterio económico, o el criterio energético.

Así, teniendo en cuenta lo anterior, se pueden poner cualquiera de los siguientes condicionantes a la hora de calcular el diámetro óptimo de una tubería.

1. *Limitar la velocidad máxima del fluido en la conducción.* Esta condición no garantiza que el caudal llegue a los nudos de consumo con una presión mínima que deseemos. La fórmula de Mougny nos da la velocidad máxima con el diámetro de la conducción.

$$v_{max} = 1.5 \cdot \sqrt{D + 0.05}$$

en donde

- v_{max} es la velocidad del agua en m/s
- D es el diámetro de la conducción en m.

2. *Pendiente hidráulica uniforme.* Con este criterio se pretende calcular el diámetro de las conducciones de la red ramificada manteniendo la pendiente hidráulica j en todas ellas. La pendiente hidráulica se define como las pérdidas de carga por metro de tubería en la conducción, es decir:

$$j = \frac{h_f}{L}$$

donde

- h_f son las pérdidas de carga, ecuación de Darcy-Weisbach
- L es la longitud de la tubería.

Ahora bien, ¿qué es lo que determina esa pendiente hidráulica ‘de referencia’?. Supongamos que tenemos una red ramificada y queremos tener en uno de los puntos más alejados una presión mínima. Esta situación ya nos da la pendiente hidráulica, ya que la exigencia de querer una presión mínima en un

punto, nos está diciendo la cantidad de ‘presión’ que puede perder el agua desde que se inyecta el agua en la conducción con una presión inicial hasta nuestro punto.

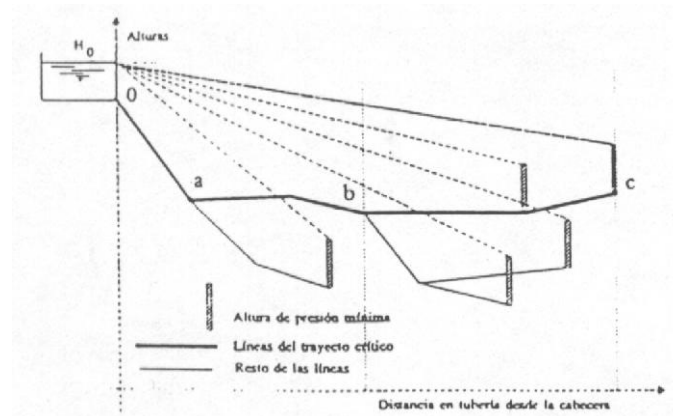


Gráfico en el que se analizan todos los puntos de la red y su pendiente hidráulica

Así se tiene que:

$$j_{disp} = \frac{h_f}{L} = \frac{H_0 - H_{min}}{L} = \frac{H_0 - \left(z + \frac{P_{min}}{\gamma} \right)}{L}$$

en donde

- H_0 es la presión inicial, por ejemplo la cota a la que se encuentre el depósito que alimenta la red o la presión a la que una bomba inyecta agua en la red desde un pozo, en mca
- Z es la cota del punto en el que se quiere una presión mínima, en metros

- $\frac{P_{min}}{\gamma}$ es la presión mínima de nuestro punto, en mca

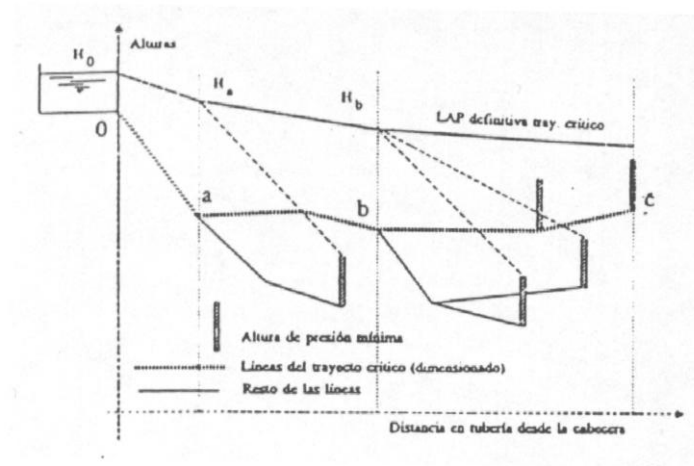


Gráfico en el que se calculan las nuevas pendientes de los nudos a partir del trayecto crítico

Por tanto, la forma de operar es sencilla: para cada punto de nuestra red hacemos la operación anterior, y el punto que dé la menor pendiente hidráulica es el que sirve de pendiente hidráulica de referencia. Una vez calculada la línea hasta este punto, se calculan el resto de tuberías a partir de esta pendiente hidráulica.

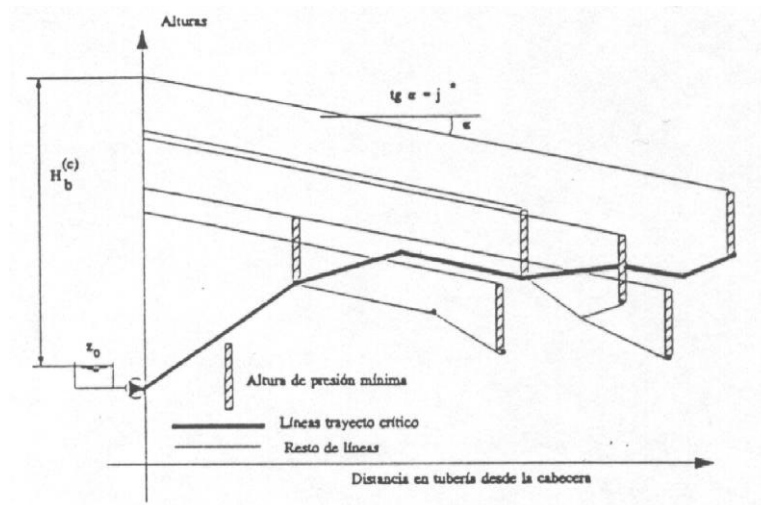


Gráfico en el que se ven las pendientes hidráulicas de los nudos con una bomba alimentando el sistema

Cuando lo que se tiene es una bomba que inyecta agua, hay que suponer una pendiente hidráulica inicial, que suele ser $j=0.007$ mca/km.

3. Desde el punto de vista económico, para calcular el diámetro óptimo de una conducción, vamos a suponer que tenemos una conducción sin ramificaciones ni mallas, alimentada por un depósito. La condición que nuevamente imponemos es que en el punto último de la conducción haya una determinada presión.

Si se tienen en cuenta sólo criterios exclusivamente energéticos se adoptaría un diámetro en el que el consumo de energía fuese el mínimo, aunque el metro lineal de tubería fuese muy caro. El coste energético es proporcional a la altura de bombeo, según la siguiente expresión:

$$C_E = \frac{9.81 \cdot Q_b \cdot H}{\eta} \cdot nh \cdot pkw$$

en donde

- C_E es el coste eneregético de la instalación, en ptas/año

- Q_b es el caudal bombeado, en m^3/s
- H_b es la altura de bombeo
- nh es el número de horas de bombeo anuales
- pkw es el precio del kilowatio.hora

Si por el contrario lo que preocupa es la inversión o los costos de la instalación montaríamos un diámetro pequeño que costase en el arranque poco dinero. La tubería ideal es aquella en donde confluyesen ambos conceptos.

La regla más generalizada es la de tomar como referencia la tarifa, porque al final las tuberías las diseñan los precios.

Suponiendo un eje de coordenadas en el que representásemos en verticales el gasto y en horizontales; en el diámetro optimo veríamos que la curva resultante el punto ideal sería aquel en el que los gastos fuesen mínimos. Analicemos a continuación los distintos gastos que confluyen, además del gasto energético ya comentado.

Tenemos el gasto de la instalación $C_{instalación}$:

$$C_{Instalacion} = C_{tubo} \cdot a \cdot L$$

en donde

- C_{tubo} es el coste total de tubo, que a su vez se puede descomponer en otros conceptos más clarificantes y que pueden ser:

$$C_{tubo} = P + M$$

en donde,

- P es el coste tubería colocada por metro lineal, en donde se incluye: coste de transporte de la tubería, el coste del montaje, el coste de las descargas, el coste del peonaje auxiliar, el coste de los acarreos etc.
- M es el coste del movimiento de tierras, la reposición de firme, el coste topografía, el coste del proyecto, el coste de dirección de obra, el coste de permisos etc.
- a es el factor de amortización, que se calcula según la siguiente fórmula

$$\alpha = \frac{(1+r)^T \cdot r}{(1+r)^T - r}$$

en donde

- r = Interés en tanto por 1
- T= Tiempo de amortización en años.

Finalmente tenemos el coste total, que es la suma del coste energético y del coste de la instalación. Una cosa que es clara es que fijándonos en la curva de la suma de ambos costes el diámetro óptimo de la conducción será aquel en la que la curva alcanza el valor más bajo.

$$C_T = C_{\text{Instalacion}} + C_E$$

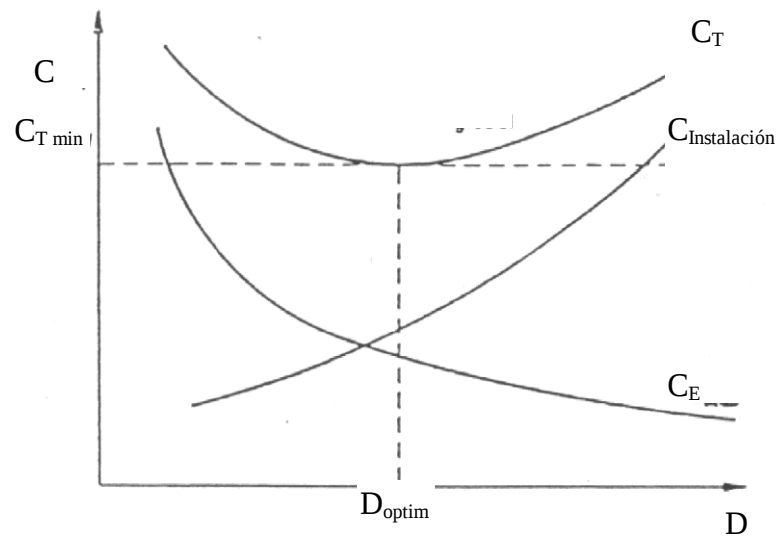


Gráfico con los costes de un sistema de tuberías

Si desarrollamos todos los factores anteriores, se puede llegar a las expresiones siguientes, dependiendo de si se tiene un depósito o una bomba alimentando la conducción:

$$D_i = \left(\frac{5 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot f \cdot Q^2}{a \cdot A'} \right)^{\frac{1}{a+5}}$$

en donde

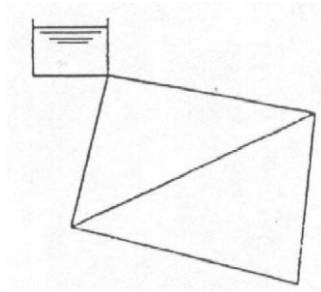
- $K_1 = \frac{Q}{0.7 \cdot 75} \cdot 736 \cdot t \cdot P$, y el caudal Q es en l/s, t es el tiempo de funcionamiento del grupo de bombeo en horas, P es el coste de la energía en ptas/kwh
- a y $A' = \alpha A$ coeficiente y exponente de la curva de ajuste de costes-diámetros, y que será de la forma :

$$C = A \cdot D^a$$

- K_2 vale 0.0826
- f es el factor de fricción, definido ya en puntos anteriores (ver fórmula de Colebrook)

5. CALCULO DE REDES MALLADAS (HARDY-CROSS)

Cuando una conducción de agua forma circuitos cerrados, se dice que está mallada, en contraposición a cuando la conducción está ramificada, en donde no se forman circuitos cerrados. La figura siguiente aclara este concepto:



Red mallada

Para el cálculo de las presiones y caudales que circulan por una red mallada en régimen estacionario hay varios métodos de cálculo entre los que destacan: el método de Hardy-Cross, el método de la teoría lineal, el método de Newton-Raphson y el método de tipo gradiente.

Sin duda, el método de Hardy-Cross es el de mayor difusión y uno de los más utilizados, y que es el que va ser expuesto a continuación. Una de sus características está en que en general utiliza menor número de incógnitas, y que además en cada iteración de cálculo las distintas ecuaciones del sistema se resuelven de una forma secuencial, de forma que no hay que resolver simultáneamente todas las ecuaciones del sistema.

Inicialmente el método se presentó con dos formas de resolver el problema, una con ecuaciones de los nudos y otra con ecuaciones de mallas. Esta última es mejor, ya que requiere un menor número de cálculos para llegar a la solución final.

Se tienen que cumplir una serie de hipótesis iniciales para la correcta resolución del sistema mediante el método de Hardy-Cross, que son:

1. Conocer las características de las líneas o conducciones, esto es longitud, diámetro y rugosidad (para poder establecer el factor de fricción).
2. En el sistema de ecuaciones para cada nudo debemos conocer o bien el caudal o bien su presión, y además al menos un nudo debe tener una presión conocida.
3. Eliminar los ramales cuyo caudal es conocido.

Los pasos para resolver un sistema mallado son los siguientes:

1. Numerar las mallas y nudos del sistema, asignando un sentido de circulación del agua a cada malla. El número de mallas de nuestro sistema viene dado por la siguiente ecuación:

$$M = L - N + 1$$

en donde

- M es el número de mallas
 - L es el número de líneas del sistema, contando aquellas conducciones que de forma imaginaria cerrarían una malla, por ejemplo si hay un sistema que está alimentado con dos depósitos se supondría como una L ficticia la que uniese los dos depósitos, aunque físicamente no sea así.
 - N es el número de nudos del sistema
2. Hallar las pérdidas de carga en cada línea del sistema, teniendo en cuenta el sentido de circulación del agua establecido en el punto 1 . Esta pérdida de carga la llamaremos resistencia de la línea R_i
 3. Suponer unos caudales para cada línea y nudo, de forma que se cumpla la ecuación de continuidad en todos los nudos. Evidentemente no se cumplirán las ecuaciones de malla. Así de tendrá:

$$\sum_{i,j \in \text{malla}} R_{ij} \cdot q_{ij,0} = 0$$

en donde

- i es el número de malla donde se encuentra la línea
- j es el número de la línea
- R_{ij} es la resistencia de la línea
- $q_{ij,0}$ es el caudal inicial que se ha supuesto que circula por dicha línea

4. Para corregir los caudales anteriores, se supone también unos caudales correctores para cada malla Δq , a los que también se les asigna un sentido, con lo que se tiene

$$\sum_{i,j \in \text{malla}} R_{ij} \cdot \left(q_{ij,0} + \sum_k \Delta q_k \right) = 0$$

en donde

- i es el número de malla donde se encuentra la línea
- j es el número de la línea
- k es el número de malla que afectan a la línea ij . Hay que hacer notar que en este caso es distinto el subíndice porque si hay una línea que pertenece a dos mallas evidentemente los caudales correctores se sumarán o restarán
- R_{ij} es la resistencia de la línea
- $q_{ij,0}$ es el caudal inicial que se ha supuesto que circula por dicha línea

6. EJEMPLOS DE CÁLCULO.

¿ Que diámetro poner en una instalación?

Por coste energético

Lo primero que habría que contestar es si estamos hablando de una impulsión o de una conducción, porque el planteamiento es bien distinto.

En una impulsión prima el coste de energía en una conducción las preocupaciones son los movimientos turbillonarios, el ataque por abrasión, etc.

Suponiendo una impulsión la contestación, sería que aquella en donde teniendo en cuenta los costes de un diámetro y del siguiente (Ya hablaremos mas

delante de costes de amortización y costes energéticos) veamos que sólo en energía de bomba la instalación de un diámetro superior se amortice en un plazo inferior que la amortización prevista de la instalación.

Por ser más fácil de ver en un ejemplo que en mil palabras lo hacemos.

Ejemplo: Suponemos una impulsión en la que tenemos que elevar un caudal de 100 litros por segundo de aguas limpias a una cota de 89 metros en una longitud de 3950 ml.

Si fijamos para este caudal con una tubería de fibrocemento de Ø 300 mm, tendremos que las pérdidas de carga por Km. sería $J = 5.12 \text{ m/Km}$. con una velocidad de 1.41 m/s. Si por el contrario decimos que lo vamos a subir con un Ø de 250 mm. Tendremos en idénticas condiciones pérdidas de carga $J = 12.51 \text{ m/Km}$. Con una velocidad de 2.03 m/seg.

Trasladando estos datos al cálculo de una bomba tendremos.

$$H.P = C.V = \delta \cdot H_m \cdot Q / \mu_m \cdot \mu_b ;$$

Sustituyendo en la fórmula las letras por sus valores veríamos que al final la diferencia de caballos depende de la variación de la altura manométrica, que como bien indica la expresión, contempla la presión de régimen que marcaría un manómetro y que es la suma de la altura geométrica más las pérdidas de carga de la tubería.

En el caso que nos ocupa tendremos:

$$\delta = \text{Peso específico para el agua} = 1$$

$$\mu_m = 75$$

$$\mu_b = 0.7$$

$$\mu T = 75 \times 0.7 = 52.5 \%$$

La potencia necesaria para vencer esta diferencia de pérdida de carga por emplear uno u otro diámetro sería:

$$CV = 1 \times (12.51 - 5.10) \times 3.95 \text{ Km.} \times 100 / 52.5 = 55.75 \text{ CV}$$

Que traducido a pesetas el coste de la diferencia de un Ø a otro sería:

$$CV \times 0.736 \text{ W/Kw} \times \text{Días /trabajo año} \times \text{Nº Horas / Día} \times \text{Ptas. / Kw}$$

Supuesto

$$55.75 \times 0.736 \times 360 \times 15 \times 13.50 = 2.991.232,8 \text{ Ptas/Año}$$

Redondeando y sólo en coste energético el instalar 3950 ml de tubería de ser de Ø 250 en lugar de Ø 300 cuesta en energía 3 Millones de pesetas año y ya para toda la vida.

Si ahora vemos una tarifa de tubo de FC comprobaremos que en dos años se habría amortizado la diferencia de coste de un tubo de 300 en lugar del de 250 mm. Sólo por este concepto.

Una idea de base es que dependiendo de que Ø no debemos pasar de 1.41 m/seg. Ya comprobaremos que en Ø superiores a 300 mm. Es justificable emplear velocidades superiores.

Tuberías telescópicas.

Cuando tenemos que montar una tubería para una conducción en donde con un Ø superior perdemos carga y con un inferior no llegamos a llevar el caudal

previsto, se nos plantea el montaje de tuberías telescópicas.

Cuando ya hemos llegado a esta conclusión se nos plantea cuántos metros de un diámetro y cuántos del otro y muchas otras preguntas más como por ejemplo qué nos conviene más la tubería de más diámetro arriba o en la parte baja.

El primer planteamiento que nos debemos hacer es escribir un sistema de las ecuaciones necesarias y que podría ser el que yo os indico para el caso de dos diámetros, a saber:

$$\begin{aligned} L_1 + L_2 &= L \\ L_1 i_1 + L_2 i_2 &= Li. \end{aligned}$$

A través de una tablas de Prandtl Colebook podemos conocer para un caudal determinado los valores para cada diámetro de i en m/km. El valor de la longitud total lo conocemos y el valor i lo podemos fijar en base a establecer el valor de resguardo que le queremos dar a la instalación y luego haciendo $i = H / L$; H es el desnivel que queremos emplear para pérdidas de carga.

El valor de

$L_1 = - L_2 + L$ y sustituyendo obtendremos este valor de L_1 después sustituyendo en $L = L_1 + L_2$ obtendremos el valor de L_2

La única incógnita que nos queda por despejar es donde poner los diámetros más grandes en la parte más próxima al deposito o en las partes bajas. Por simple lógica sabemos que cuanto más timbraje tiene una tubería, más precio tiene, por tanto la de más diámetro hay que colocarla arriba, para que la más “cara” sea de menos $\emptyset$ y en consecuencia valga menos

ANEXO: ELECCIÓN DEL TIPO DE TUBERÍA MÁS ADECUADO, EN FUNCIÓN DE LOS FACTORES QUE CONDICIONAN ESTA DECISIÓN.

PRÓLOGO:

Pretendemos dar criterios prácticos, de tipo general, con materiales utilizados habitualmente en conducciones de abastecimiento, distribución y riego.

Los factores a considerar:

- 1- El diámetro.
- 2- La presión de trabajo.
- 3- Las cargas externas (tierras y tráfico)
- 4- Costes de instalación.
- 5- Gastos de mantenimiento y reparaciones.
- 6- Costes energéticos.
- 7- Características del terreno y del agua a transportar.

1- INTRODUCCIÓN

Como criterio general y básico, una conducción debe proyectarse, para que transporte un determinado caudal, con el mínimo coste posible y un coeficiente de seguridad adecuado.

Hablamos de coste de 1ª inversión y costes de mantenimiento y explotación, durante un tiempo determinado.

El coeficiente de seguridad calculado de acuerdo con las Normas correspondientes a cada material. Teniendo en cuenta todos los condicionantes de servicio de la instalación,

Atribuimos a un mal comportamiento del material, un mal cálculo o una falta de cálculo.

El material deberá cumplir las Normas de Calidad que le son aplicables, y ser instalado en las condiciones que han servido de base.

El coeficiente de seguridad debe ser calculado siempre. El EXCESO, un despilfarro económico injustificable, por DEFECTO o supuestamente sobrado, puede que no lo sea.

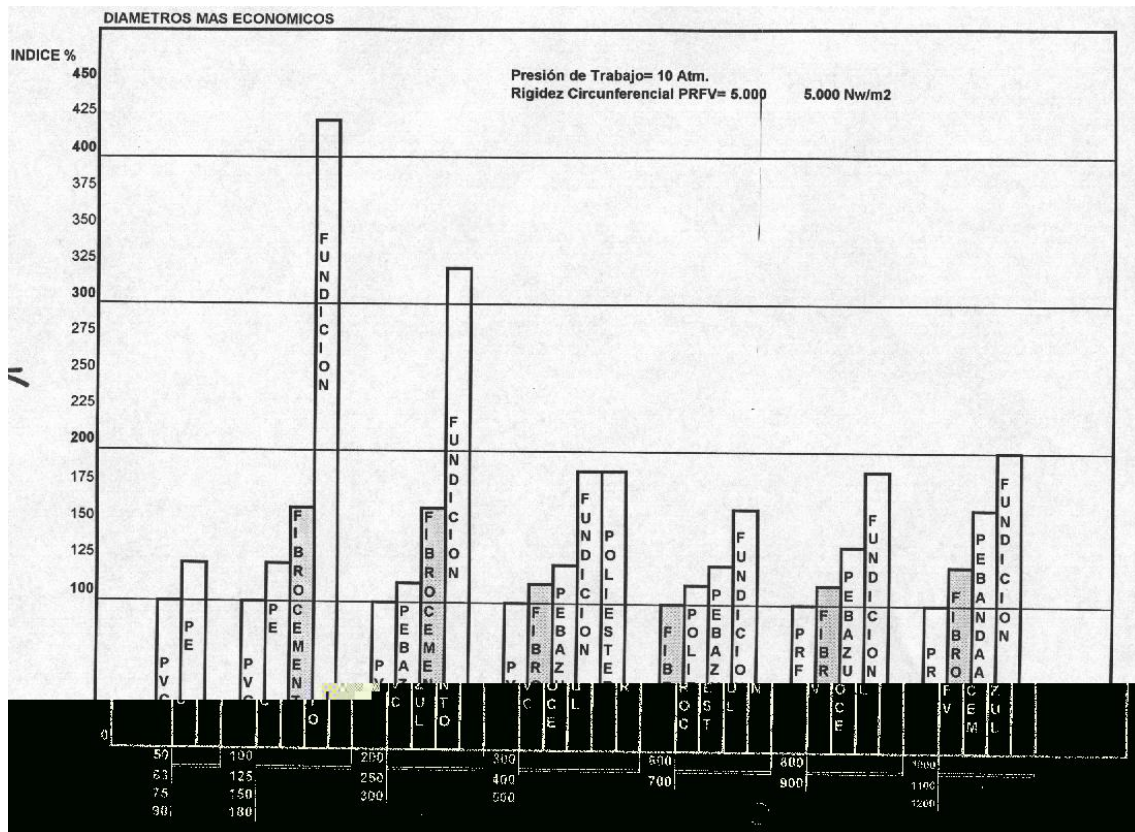
No hay material que sea perfecto en todas sus características. El proyectista deberá conocer sus ventajas e inconvenientes, valorar el coste y optar por la solución de mejor calidad - costo.

2- DIÁMETRO DE LA CONDUCCIÓN.

Existe una selección natural producida por razones puramente económicas. Nadie se plantea tubería de hormigón c/camisa de chapa en diámetro 100 mm, ni tubería de PVC de 1 500 mm.

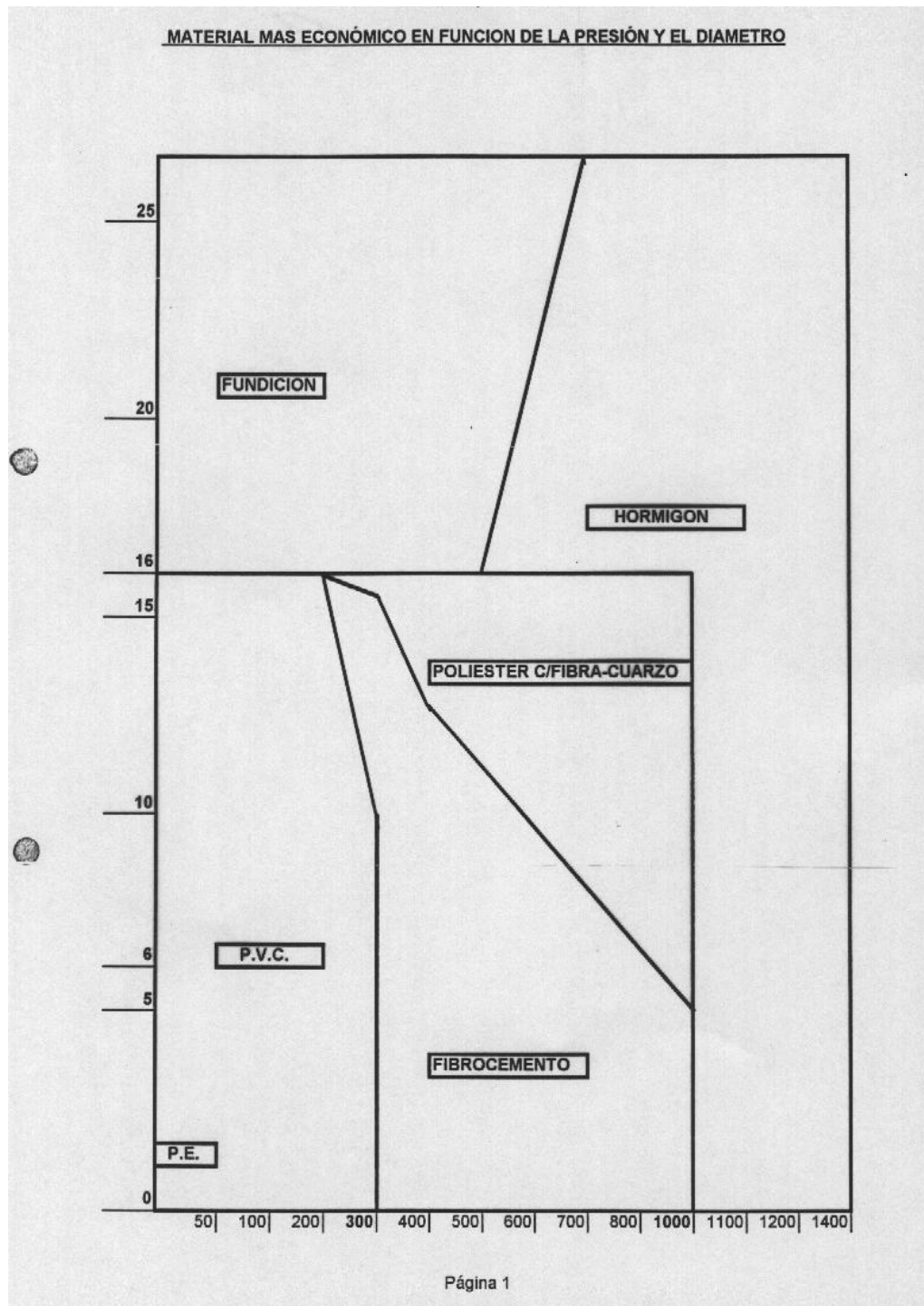
Analizaremos, materiales en función del diámetro, necesariamente a precios netos.

Índice 100 al material más económico dentro de cada grupo. Centrándonos en una presión de trabajo media de 10 Atm.



3- PRESIÓN DE TRABAJO.

La influencia cualitativa de la presión de trabajo en los diferentes diámetros se observa en el gráfico n° 2.



4- CARGAS EXTERNAS.

A tener en cuenta la simultaneidad de las cargas externas, la presión interna y el diámetro de la conducción, que a su vez son función de la forma en que se efectúa la instalación, factor

importante en tuberías con poca presión. Todas las tuberías deben ser calculadas teniendo en cuenta las cargas y las condiciones reales de la instalación.

- **Tubos fibrocemento** = cálculo s / Norma UNE- 88211, ISO-2785, AWWC 401/ 403, ATV A-127
- **Tubos Hormigón** = cálculo s / Instrucción Instituto Torroja, ATV A-127
- **Tubos plástico** = cálculo s/ ATV – 127 o UNE 53.331

La ATV-127 es aplicable a todos los materiales. En el caso de plásticos y fundición, aparte de calcular las tensiones, hay que calcular las deformaciones, que son las limitativas.

Influyen de forma decisiva las condiciones de instalación. **DECISIÓN** del proyectista: tubo menos resistente, mejorando las condiciones de la instalación, o a la inversa.

5- COSTES DE INSTALACIÓN

Se debe incluir:

- Apertura de zanja y rasanteo.
- Preparación de cama de arena.
- Manipulación de la tubería en obra.
- Colocación en zanja.
- Relleno y compactación, previas a las pruebas
- Pruebas de tubería y tapado final de la zanja

Es difícil cuantificar estos costes, dependen no sólo del tipo de tubería sino de :

- ◆ Ubicación de la obra.
- ◆ Volumen de la misma.
- ◆ Tipo de terreno
- ◆ Medios mecánicos disponibles, etc..

Cualitativamente:

POLIETILENO:

Ventajas: menor costo de instalación por:

- ✓ Poco peso
- ✓ Rollos gran longitud
- ✓ Flexibilidad para adaptarse al terreno

Inconvenientes:

- ✓ En presiones bajas, buena compactación alrededor del tubo.

PVC:

Ventajas:

- ✓ Facilidad de manipulación y montaje.

Inconvenientes:

- ✓ En presiones bajas, necesita una buena compactación.

FIBROCEMENTO:

Ventajas:

- ✓ Peso intermedio que permite que se manipule relativamente bien y juntas que permiten un montaje fácil.

Inconvenientes:

- ✓ En diámetros de < 300 , exige cuidar el rasanteo y la cama para evitar problemas de rotura por flexión.

FUNDICIÓN:**Ventaja:**

- ✓ Mayor resistencia mecánica, exige cuidar menos la instalación.

Inconvenientes:

- ✓ Mayor peso, montaje algo más difícil.

POLIESTER / F. VIDRIO 7 CUARZO:**Ventajas:**

- ✓ Peso intermedio y juntas incorporadas que permiten un montaje fácil.

Inconvenientes:

- ✓ Necesidad de una buena compactación.

HORMIGÓN:

Ventajas:

- ✓ No compactación.

Inconvenientes:

- ✓ Gran peso. Mucha dificultad en el montaje con un gran coste en el caso de uniones con junta soldada.

En cualquier caso, merece la pena hacer una buena instalación para evitarse problemas futuros.

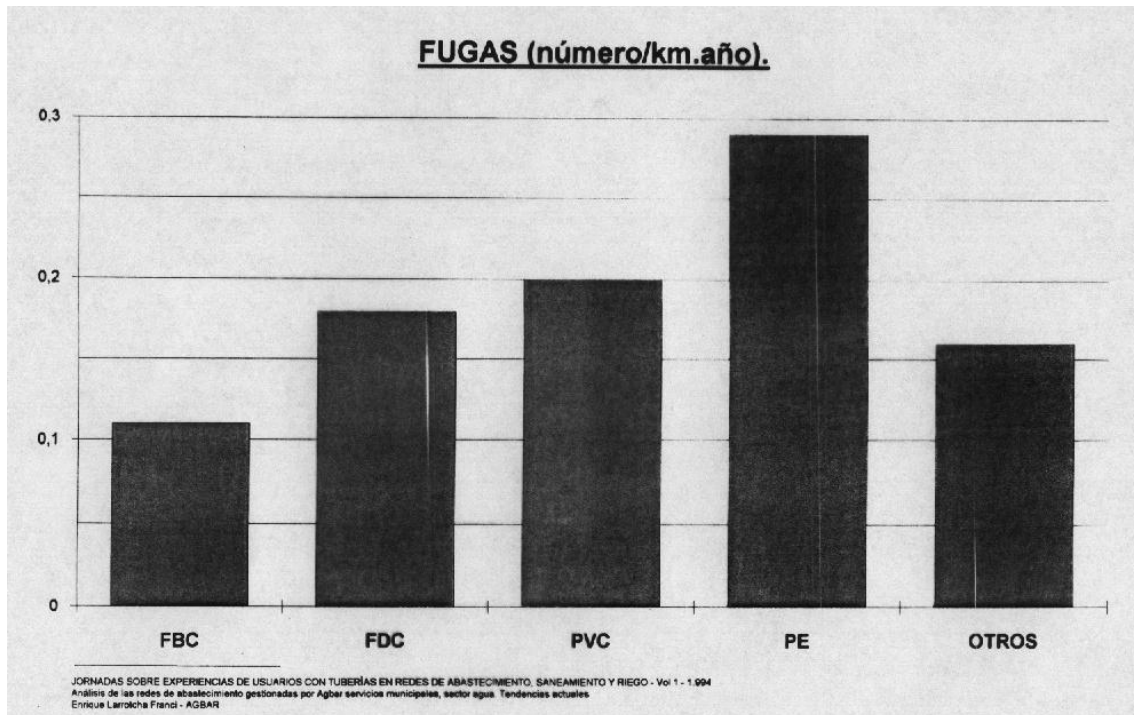
Los costes de instalación, en general representan aproximadamente un 20% del coste de adquisición.

6- GASTOS MANTENIMIENTO Y REPARACIÓN.

Deben incluirse el costo de detección, reparación de fugas y pérdidas de agua.

Acudir a estadísticas fiables, basadas en datos amplios, sin la influencia de casos aislados.

La estadística más amplia que conocemos es la del Instituto KIWA de Holanda, referidas a 20 000 Km de redes de abastecimiento y distribución con tuberías de acero, fibrocemento, fundición, PVC y polietileno.



- 1- El índice del acero.
- 2- El índice de la fundición
- 3- Crece el diámetro, disminuye el índice de interrupciones.

7-COSTES ENERGÉTICOS

Los costes de una impulsión, vienen dados por:

$$\text{Gasto anual} = 9.81 \times Q (H_g + H_f) \times N \times P / h$$

8-CARACTERÍSTICA DEL AGUA TRANSPORTADA

Como criterio general no supone problemas para ningún tipo de material, con pocas excepciones, siempre relacionadas con el PH del agua, nos estamos refiriendo a que ésta tenga un PH ácido en cuyo caso ataca a todas las tuberías que contengan cemento

Aguas duras (incrustaciones)

Aguas muy blandas (CaOH)

Elevado CO₂.