

# Hidráulica



## 5.- Hidrodinámica.

*Mejor que de nuestro juicio, debemos fiarnos del cálculo algebraico.*

**Leonhard Euler** (1707 - 1783)

*El gran libro de la naturaleza siempre está abierto ante nuestros ojos y la verdadera filosofía está escrita en él... Pero no lo podemos leer a menos que hayamos aprendido primero el lenguaje y los caracteres con los cuales está escrito... Está escrito en lenguaje matemático y los caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas*

**Galileo Galilei** (1564 - 1642)

*Los científicos exploran lo que es; los ingenieros exploran lo que aún no es*

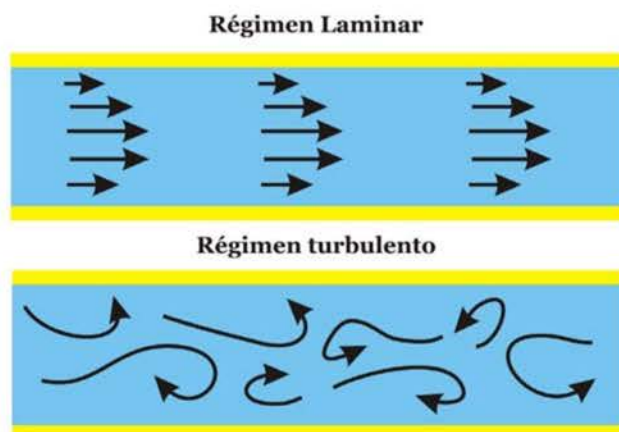
**Theodore von Karman**, ingeniero aeronáutico (1881 - 1963)

### 5.1.- Introducción

La **hidrodinámica** es la parte de la mecánica de fluidos se ocupa de las leyes o principios que rigen el comportamiento de los fluidos en movimiento, estas leyes son muy complejas, y aunque la hidrodinámica tiene una importancia práctica, para el trabajo del bombero, mayor que la hidrostática, sólo trataremos aquí los conceptos básicos que nos ayuden a comprender los fenómenos que se producen en una instalación de extinción.

El comportamiento de un fluido se encuentra bien definido, si por medio de una ecuación matemática somos capaces de definir la presión, la velocidad y la densidad que posee el fluido en cada punto. Por medio de una serie de herramientas matemáticas se llega a una expresión muy compleja conocida como **ecuación de Navier-Stokes**. Si esta ecuación se resolviera podríamos saber en cada momento la velocidad, la presión y la densidad en el fluido con tan solo sustituir valores en la solución de esta ecuación. Pero como no tiene solución hay que empezar a realizar simplificaciones en el comportamiento del fluido.

La primera que se puede hacer es que el fluido sea incompresible, es decir que la densidad no varíe a lo largo de su movimiento, esta simplificación es aceptable para el agua a presiones en las que se trabaja en hidráulica y para el aire a velocidad por debajo de la mitad de la velocidad del sonido.



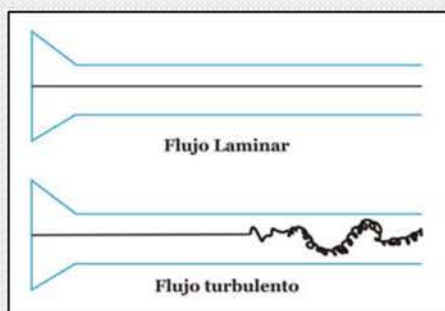
La segunda simplificación es en cuanto a la viscosidad, es decir, que el fluido no posea rozamientos internos o contra las conducciones por la que circula. Si la viscosidad de un fluido se puede despreciar se dice que el flujo es no viscoso y si encima es incompresible, entonces es lo que se conoce como **fluido ideal**, en este caso la ecuación de Navier Stokes, se resuelve y da la conocida ecuación de Bernoulli.

Si consideramos que la viscosidad del fluido no se puede despreciar, estamos ante el

denominado **fluido viscoso**. Las consecuencias de considerar la viscosidad en un fluido es que la solución de la ecuación de Navier-Stokes, ya no sea tan sencilla. La aparición de estas fuerzas de rozamiento interno, trae consigo que el fluido que circula por una conducción, dependiendo de la velocidad, de la densidad, la viscosidad y las dimensiones de la tubería lo haga de dos maneras en el denominado **régimen laminar**, en que el fluido circula en capas que se deslizan unas contra otras como los naipes en una baraja o en **régimen turbulento** en el que aparecen remolinos donde es imposible distinguir los filetes fluidos.

### El experimento de Reynolds

En 1883, **Osborne Reynolds** (1842-1912) un físico británico observó que cuando el agua fluía a través de un tubo largo y se marcaba con tinta, a baja velocidad las partículas de tinta se difundían lentamente y no tenían tiempo de diseminarse. A este flujo lo llamó **laminar**. Pero si se incrementa la velocidad por encima de un valor crítico, se observaba que a cierta distancia de la entrada del tubo se producía un repentino cambio, se producía un movimiento desordenado del filamento de tinta que llamó movimiento **turbulento**.



Reynolds probó disminuir y aumentar la viscosidad del fluido, calentando y enfriando el agua respectivamente. Llegando a la conclusión que en todos los casos existe una velocidad crítica, y que esta varía en proporción directa con la viscosidad del flujo. Para saber en qué régimen nos estamos moviendo estableció el **número de Reynolds**:

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

Donde ( $\rho$ ) es la densidad,  $V$  la velocidad,  $D$  el diámetro de la conducción y ( $\mu$ ) el coeficiente de viscosidad dinámica y ( $\nu$ ) es el coeficiente de viscosidad cinemática<sup>12</sup>.

Para  $Re$  por debajo de 2000, el fluido fluye de manera laminar y por encima de 4000 fluye de manera turbulenta, existiendo un periodo de transición en el que el flujo es difícil de delimitar si es turbulento o laminar.

Por ejemplo, una manguera de 25 y de 45 mm de diámetro, por la que circule agua a 2,5 m/s, el régimen será claramente turbulento:

$$Re_{25mm} = \frac{V \cdot D_{25}}{\nu} = \frac{2,5 \text{ m/s} \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{1,01 \cdot 10^{-6}} = 56.818$$

$$Re_{45mm} = \frac{V \cdot D_{45}}{\nu} = \frac{2,5 \text{ m/s} \cdot 45 \cdot 10^{-3}}{1,01 \cdot 10^{-6}} = 102.272$$

<sup>12</sup> Ver Apéndice III. Para el agua  $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .



Para superar las dificultades que representa emplear esta vía teórica en el estudio de los fluidos en movimiento, aparecen una serie de disciplinas prácticas que estudian desde el punto de vista de la ingeniería el comportamiento de los fluidos. La **hidráulica** estudia de una manera práctica el movimiento de los líquidos, ya sea agua o aceite, a través de una conducción ya sea abierta (canal) o cerrada (tubería), los almacenamientos (depósitos o embalses), así como las máquinas, que se emplean para dar o extraer la energía que poseen estos fluidos debido al movimiento, conocidas como bombas o turbinas respectivamente.

En los temas anteriores hemos definido los conceptos de **presión**, **caudal** y **velocidad** en un fluido, ahora consideraremos que se trata de agua circulando por una conducción cerrada (manguera). Estos tres conceptos se relacionan mediante los siguientes principios: la **ecuación de continuidad**, el **principio de Bernoulli** y la **ecuación de descarga**. La ecuación de continuidad nos relacionará la velocidad con el caudal que pasa por la sección de una conducción. El principio de Bernoulli nos muestra cómo varían las energías que dispone un fluido entre dos puntos de una instalación y por último, la de descarga nos permitirá ver la dependencia entre la presión y el caudal o la velocidad de un fluido cuando atraviesa un orificio de descarga.

### Velocidad del agua por una instalación

En la práctica la velocidad del agua dentro de una conducción no supera los 2,5 m/s, ya que a velocidades mayores se producen pérdidas de carga<sup>13</sup> importantes en la misma. Esto limita el caudal que circula por una conducción en función de su diámetro, así para los tres tipos de mangueras utilizadas en las instalaciones de extinción, el caudal máximo a trasegar sería:

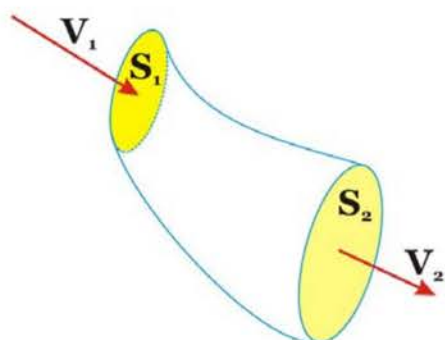
$Q_v = S \cdot V$		
$\phi$ (mm.)	S (mm <sup>2</sup> )	Q (l.p.m.)
25	490,90	73
45	1590	238
70	3848,36	570

Estas limitaciones en cuanto al caudal a trasegar, son importantes en las instalaciones fijas de distribución de agua, pero en el caso de las instalaciones de extinción, se pueden asumir velocidades mayores y por tanto mayores pérdidas de carga:

$\phi$ (mm.)	$Q_{\max}$ (l.p.m.)	V (m/s)
25	200	6,8
45	500	5,2
70	1.000	4,3

<sup>13</sup> Ver apartado 7.2.- Pérdidas de carga.

## 5.2.- Ecuación de continuidad.



Sean dos superficies,  $S_1$  y  $S_2$ , atravesadas por el agua a una velocidad  $v_1$  y  $v_2$  respectivamente.

Si suponemos que entre ambas superficies no existe ninguna aportación o pérdida de agua, el caudal másico que atraviesa la primera superficie es igual al que sale por la otra superficie<sup>14</sup>.

$$Q_{m1} = \rho \cdot S_1 \cdot v_1 = \rho \cdot S_2 \cdot v_2 = Q_{m2}$$

Luego:

$$\rho \cdot S \cdot v = \text{constante}$$

Dónde,  $\rho$  es la densidad del fluido ( $\text{Kg./m}^3$ ),  $S$  es el área ( $\text{m}^2$ ) y  $v$  la velocidad del fluido ( $\text{m/s}$ ).

Si consideramos que la densidad del fluido no varía entre las dos superficies, como en el caso del agua, tenemos la **ecuación de continuidad**:

$$S \cdot v = \text{constante}$$

La ecuación de continuidad hace que cuando el agua, en una manguera, pasa de una sección  $S_1$  hacia otra  $S_2$ , tal que se produce un estrechamiento ( $S_1 > S_2$ ), la velocidad aumenta ( $v_1 < v_2$ ).

### ¿Por qué se produce un atasco?



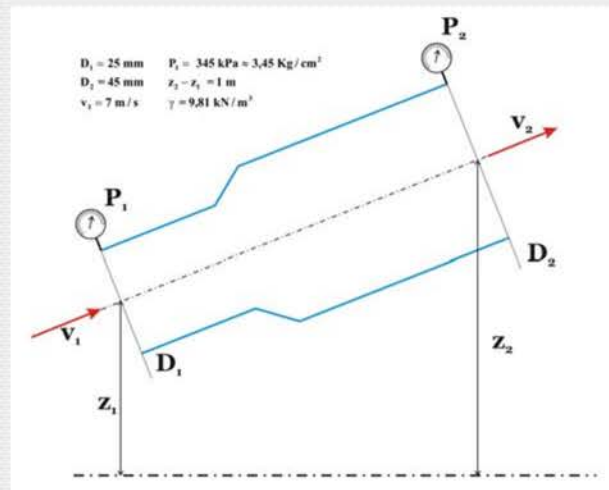
a 200 Km. /h

Cuando por una autopista de dos carriles con un límite de velocidad de 100 Km./h, se encuentra con un estrechamiento a causa de una obra, la circulación pasa a un solo carril, bajando el límite de velocidad a 50 Km./h, comprobamos que se produce una retención. Para evitar que se embotellaran los coches en el carril único los vehículos debería circular

Esto no le pasa al agua, que no se comprime, es decir no se genera un atasco, ya que aumenta la velocidad en el estrechamiento.

<sup>14</sup> Recordar que el caudal másico es igual a la densidad multiplicada por la sección de la conducción y por la velocidad.

### Ejemplo:



Hallar la velocidad  $v_2$  en el ensanchamiento.

Por la ecuación de continuidad:

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

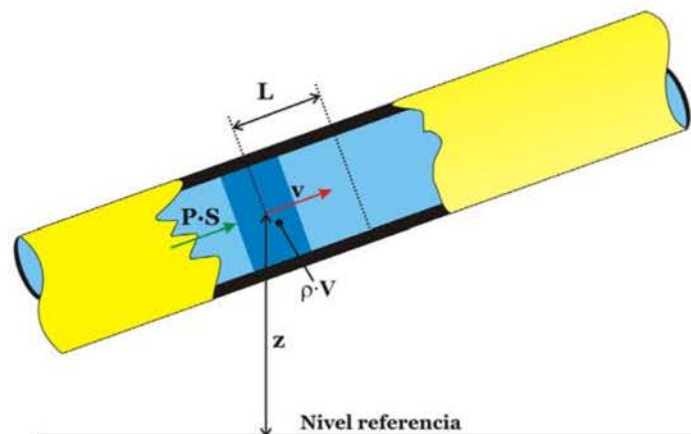
$$S_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,025)^2}{4} = 0,0004906 \text{ m}^2$$

$$S_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,045)^2}{4} = 0,0015896 \text{ m}^2$$

$$v_2 = \frac{S_1}{S_2} \cdot v_1 = \frac{0,0004906 \text{ m}^2}{0,0015896 \text{ m}^2} \cdot 7 \text{ m/s} = 2,16 \text{ m/s}$$

### 5.3.- Ecuación de Bernoulli.

Consideremos una manguera en carga con una presión  $P$ , situada a una altura geométrica  $z$  y que circula el agua a una velocidad  $v$ .



Un elemento de agua de volumen  $V$  y masa  $(\rho \cdot V)$  posee tres formas de energía por unidad de volumen:



- **Energía de presión**, será el trabajo ( $W$ ) necesario para mover la masa del elemento a través de la manguera una distancia  $L$  contra la presión  $P$ :

$$E_{\text{presión}} = W = F \cdot L = P \cdot S \cdot L = P \cdot V \Rightarrow \frac{E_{\text{presión}}}{V} = P$$

- **Energía potencial**:

$$E_p = m \cdot g \cdot z = (\rho \cdot V) \cdot g \cdot z \Rightarrow \frac{E_p}{V} = \rho \cdot g \cdot z$$

- **Energía cinética**:

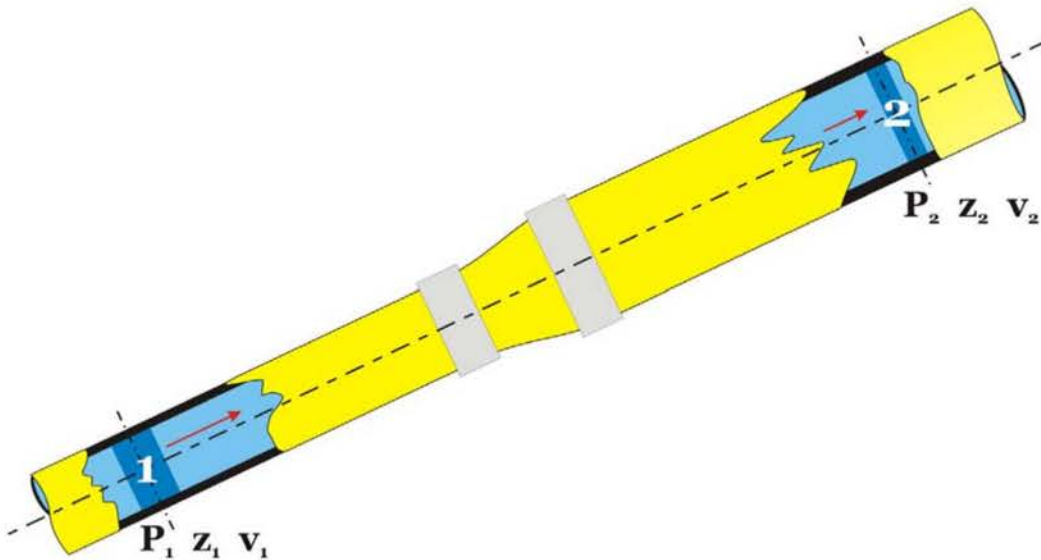
$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot V) \cdot v^2 \Rightarrow \frac{E_c}{V} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

Por lo tanto el elemento tiene una **energía total** por unidad de volumen de:

$$E_{\text{TOTAL}} = E_{\text{presión}} + E_p + E_c = P + \rho \cdot g \cdot z + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

Si dividimos la anterior expresión por el peso específico ( $\gamma = \rho \cdot g$ ):

$$e_{\text{TOTAL}} = \frac{E_{\text{TOTAL}}}{\gamma} = \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2 \cdot g} + z$$



Ahora consideramos que el elemento fluido se mueve entre la sección 1 a la 2 de una manguera como la mostrada en la figura en que existe un cambio de sección, por medio de una reducción, y se salva un desnivel. El principio de conservación de la energía considera que si no hay pérdidas entre ambos elementos, se cumple que:

$$e_{\text{TOTAL 1}} = e_{\text{TOTAL 2}}$$

Luego:

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

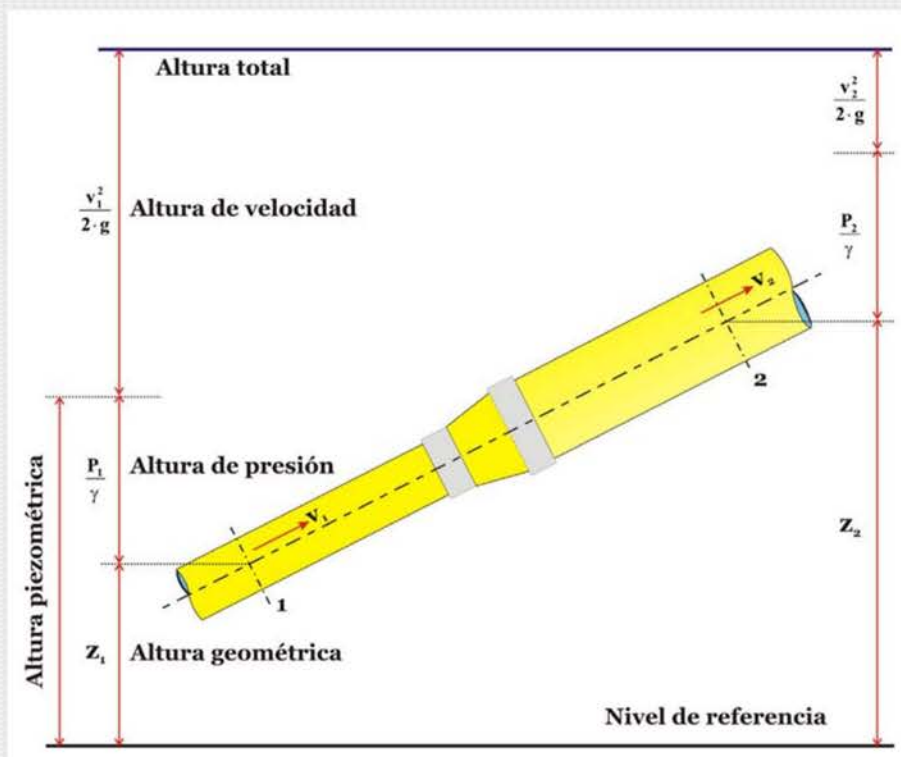
Esta es la conocida como **ecuación de Bernoulli**<sup>15</sup>

### Altura geométrica, piezométrica y total

Cada término de la ecuación de Bernoulli es una forma de energía que posee el fluido por unidad de peso del fluido que se mueve en el sistema, en el caso que nos ocupa agua. Es decir se mide en Julios/Newton, que es igual a metros. Por lo tanto cada término representa una altura.

$$\begin{array}{ll} \frac{P}{\gamma} & \text{altura de presión} \\ \frac{v^2}{2 \cdot g} & \text{altura de velocidad} \\ z & \text{altura geométrica} \end{array}$$

El siguiente esquema muestra la relación existente entre los tres tipos de energía conforme el fluido se desplaza desde 1 a 2, cada término cambia de valor, sin embargo **la altura total** permanece constante mientras no existan pérdidas de carga.

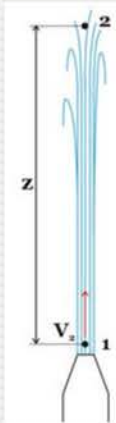


A la suma de la **altura geométrica** y la de **presión** se denomina comúnmente **altura piezométrica**

<sup>15</sup> Fue deducida por el matemático y físico suizo **Daniel Bernoulli** (1700- 1782) en su obra *Hydrodynamica* de 1738. Para una deducción más rigurosa ver Apéndice II.



### ¿A que altura llega un surtidor?



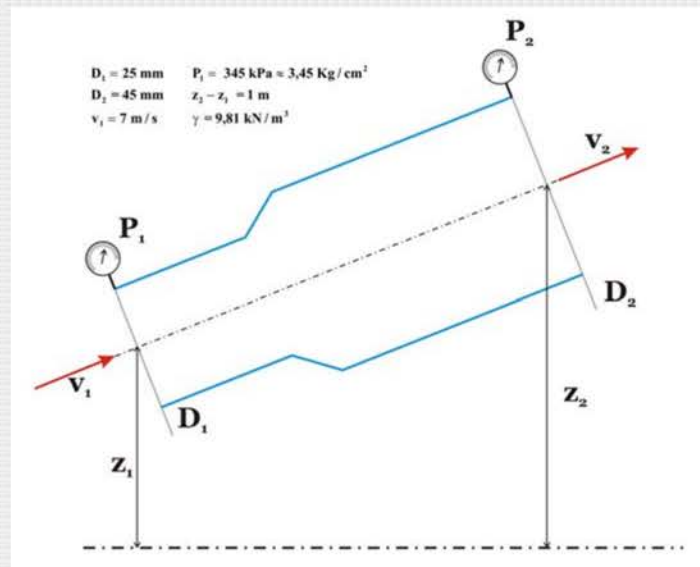
Consideremos un surtidor de agua, en este caso la presión permanece constante toda la altura de velocidad a la salida se gasta en adquirir energía potencial. Si aplicamos la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2:

$$\frac{v_1^2}{2g} = z + \frac{v_2^2}{2g}$$

Como la velocidad en 2 se anula, ya que el agua es frenada por la fuerza de gravedad, la altura que llega el chorro de agua será

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot z}$$

### Ejemplo:



Hallar la presión  $P_2$ , sabiendo que  $v_2 = 2,16 \text{ m/s}$ . (hallado anteriormente)

Por la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2 \Rightarrow \frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_1}{\gamma} - \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2 \cdot g} - (z_2 - z_1)$$

Sustituyendo valores

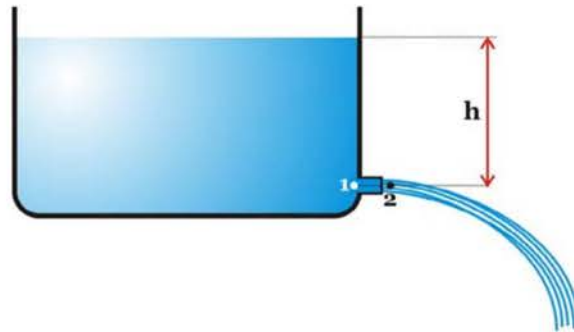
$$\frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2 \cdot g} - (z_2 - z_1) = \frac{345 \text{ kPa}}{9,81 \text{ kN/m}^3} + \frac{(7^2 - 2,16^2) \text{ m}^2/\text{s}^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} - 1 \text{ m} = 36,428 \text{ m.c.a}$$

Que es igual a  $P_1 = 9,81 \text{ kN/m}^3 \cdot 36,428 \text{ m} = 357,35 \text{ kPa} = 3,6 \text{ Kg/cm}^2$ .

Se observa, que la pérdida de presión debida al aumento de la energía potencial es compensada por la ganancia de energía al frenar el agua en el estrechamiento, por lo tanto la presión prácticamente queda igual.

#### 5.4.- Ecuación de descarga.

Sea un depósito de agua con un orificio inferior por el que se esta vaciando:



La velocidad con la que sale el líquido es igual:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Donde:

v: velocidad.

g: aceleración de la gravedad ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

h: altura.

A esta expresión se conoce como la **ecuación de Torricelli**<sup>16</sup> y se puede deducir aplicando Bernoulli entre los puntos 1 y 2, antes y después del orificio. La velocidad en 1 se puede considerar nula, ya que consideramos que h es lo suficientemente grande y la presión en 2 es la atmosférica por lo tanto la presión manométrica, será nula, así:

$$\frac{P_1}{\gamma} + 0 = 0 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \Rightarrow h = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \Rightarrow v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Por lo tanto el caudal que sale por el orificio será:

$$Q = K \cdot S \cdot v$$

Q: Caudal.

S: Sección del orificio.

K: es un factor que tiene en cuenta la astringencia<sup>17</sup> que sufre el fluido en su salida.

v: velocidad de descarga.

Aplicado el valor de v, queda:

$$Q = K \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = K \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{P}{\rho \cdot g}} = \left(K \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}}\right) \cdot S \cdot \sqrt{P} \approx k \cdot S \cdot \sqrt{P}$$

<sup>16</sup> Fue deducida por primera vez por el matemático y físico italiano Evangelista Torricelli (1608-1647).

<sup>17</sup> Se considera que el flujo se estrecha al pasar por el orificio de salida y por tanto no cubre toda la sección.

Por lo tanto el caudal es proporcional a la sección de salida (S) y a la raíz cuadrada de la presión (P) antes de la salida del orificio. A esta expresión se le conoce como **ecuación de descarga**.

### ¿Cuál es la velocidad de salida del agua en una lanza?

La **lanza**<sup>18</sup> es un aparato hidráulico que situamos al final de una manguera para conseguir que el agua salga con gran velocidad y llegue más lejos. El dispositivo posee un estrechamiento en el que se transforma la energía de presión que posee el fluido en velocidad.



Suponemos que no consideramos las pérdidas de carga, aplicamos Bernoulli entre los puntos 1 y 2, teniendo en cuenta que la presión en P<sub>2</sub> será nula y v<sub>1</sub> es muy pequeña comparado con v<sub>2</sub>:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \Rightarrow \frac{P_1}{\gamma} \gg \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \Rightarrow \frac{P_1}{\gamma} = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \Rightarrow v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{P_1}{\gamma}} \Rightarrow v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Sale de nuevo la **ecuación de Torricelli**.

Para ver el orden de magnitud de esta velocidad de salida (v<sub>2</sub>), supongamos que por la conducción circula agua con una velocidad (v<sub>1</sub>) de 2 m/s a una presión (P<sub>1</sub>) de 7,6 bares (7699 hPa). Esto se traduce en una velocidad a la salida (v<sub>2</sub>) de aproximadamente 40 m/s, en efecto:

$$\frac{P_1}{\gamma} = \frac{769,9 \text{ kPa}}{9,81 \text{ kN/m}^3} = 77,69 \text{ m.c.a.} ; \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{(2 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,204 \text{ m.c.a.}$$

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot (77,69 \text{ m.c.a.} + 0,204 \text{ m.c.a.})} \approx 40 \text{ m/s}$$

En la práctica será menor ya que no hemos tenido en cuenta las pérdidas de carga dentro del dispositivo. Este ejemplo nos muestra que el valor de la altura de presión es muchísimo mayor que el de la altura de velocidad.

Así el caudal que esta dando la lanza es igual a:

$$Q = K \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \approx k \cdot S \cdot \sqrt{P_1}$$

## 5.5.- Ecuación general de la energía

Aunque la ecuación de Bernoulli es aplicable a una gran cantidad de casos prácticos, tiene unas limitaciones que debemos tener en cuenta si queremos aplicarla correctamente:

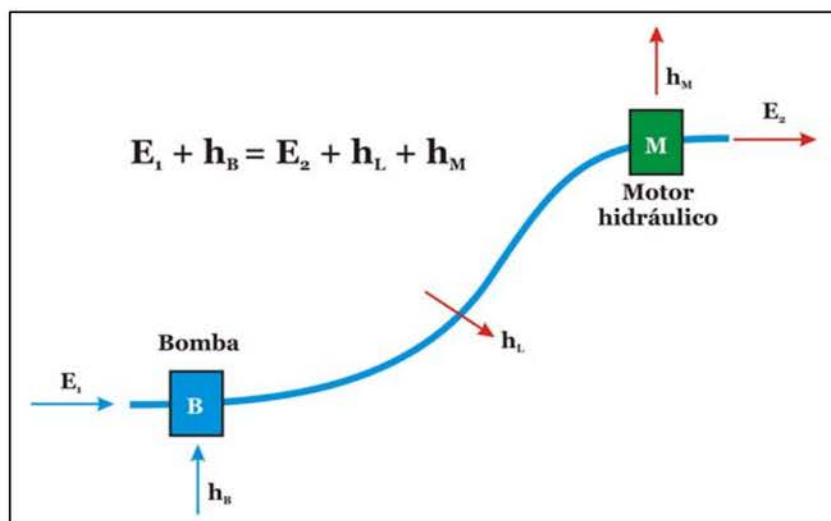
<sup>18</sup> Ver apartado 7.2.- Principios de funcionamiento de una lanza.



1. Solo es válida para fluidos incompresibles, como el caso del agua a las presiones que estamos considerando.
2. Durante el recorrido de la instalación no deben haber dispositivos (bombas o turbinas) que añadan o extraigan energía del agua, ya que la ecuación se ha deducido partiendo de que la energía permanece constante a lo largo de la instalación.
3. No se ha considerado que exista una transferencia de calor hacia el agua o fuera de la misma. Este punto en el caso de las instalaciones hidráulicas de extinción que nos ocupa, se cumplirá siempre.
4. Que no existen pérdidas de energía por fricción con los elementos de la instalación.

A pesar de estas restricciones, la ecuación de Bernoulli se puede aplicar en un sinnúmero de casos prácticos con un cierto grado de aproximación.

Cuando haya que considerar las limitaciones anteriores, entonces hay que aplicar lo que se conoce como la **ecuación de la energía** que es una generalización de la ecuación de Bernoulli:



$E_1$  y  $E_2$  son la energía total que tiene el fluido en las posiciones 1 y 2.

$h_B$  es la energía añadida por la bomba

$h_L$  es la energía disipada en la instalación, es decir las pérdidas de carga.

$h_M$  es la energía cedida a un motor hidráulico (turbobomba, ventilador, etc.)

Como:

$$E_1 = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1$$

$$E_2 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2$$

Podemos escribir la ecuación de la energía como:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 + h_B - h_M - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2$$

Esta ecuación la emplearemos cuando analicemos lo que se conoce como ecuación de línea de una instalación hidráulica.

### Resumen de conceptos

**Ecuación de continuidad**

$$\rho \cdot S \cdot V = \text{cont.}$$

**Ecuación de Bernoulli**

$$\frac{P}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2 \cdot g} = \text{cont.}$$

**Ecuación de Torricelli**

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

**Ecuación de descarga**

$$Q = k \cdot S \cdot \sqrt{P}$$

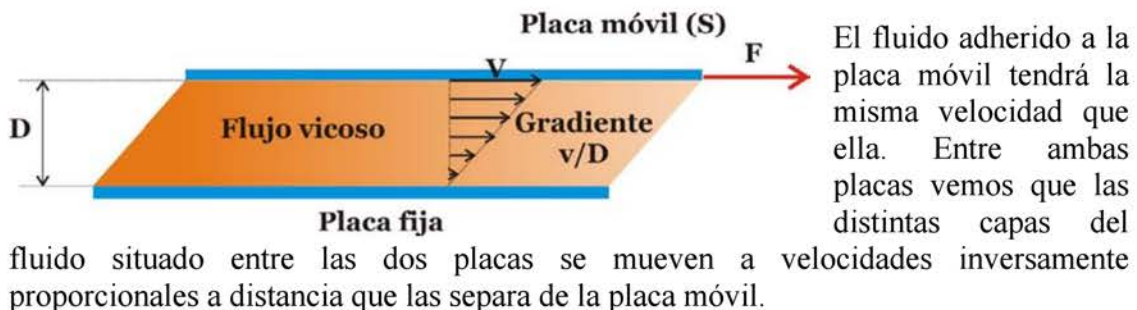
**Ecuación de la energía**

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 + h_B - h_M - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2$$

### Apéndice III. Viscosidad de los fluidos.

La **viscosidad** es una resistencia interna que tiene un fluido, consecuencia de las fuerzas de atracción entre las moléculas del mismo. Esto se materializa en que el esfuerzo que hay que hacer para que “fluya” un fluido esté en función de esta resistencia. Los fluidos con alta viscosidad ofrecen cierta resistencia a fluir, mientras que los poco viscosos lo hacen con facilidad. La viscosidad se ve afectada por las condiciones ambientales, especialmente por la temperatura y la presión, y por la presencia de aditivos modificadores de la misma, que varían la composición y estructura del fluido. Se definen dos tipos de viscosidad la **dinámica** y la **cinemática**.

La **viscosidad dinámica** es una medida del rozamiento interno que tienen las partículas fluidas. Si tenemos dos placas, una fija y otra móvil, separadas una distancia **D**, y dentro se encuentra el fluido y hacemos que la placa móvil se mueva con una velocidad constante **V**.



Para vencer la fricción entre placas será necesario aplicar una fuerza **F**. Dado que la fricción entre capas está relacionada con la viscosidad, se demuestra que esta fuerza es una medida de la fricción interna del fluido, ya que la misma es proporcional a la superficie de la placa móvil **S** y al gradiente de velocidad<sup>37</sup>. La proporcionalidad entre esta fuerza y el gradiente se denomina coeficiente de **viscosidad dinámica** ( $\mu$ ):

$$\mu = \frac{\frac{F}{S}}{\frac{V}{D}} \Rightarrow \tau = \frac{F}{S} = \mu \cdot \frac{V}{D}$$

El coeficiente se mide en unidades del sistema internacional en **Pa·s**, pero aún se emplea una unidad denominada **poise** que tiene la siguiente equivalencia:

$$\text{Poise} = 100 \text{ centiposes} = 1 \text{ g/(cm·s)} = 0,1 \text{ Pa·s}$$

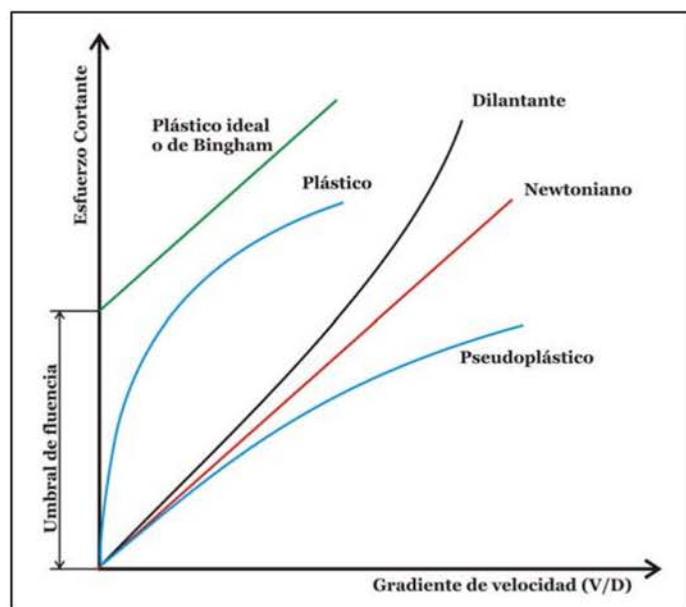
El término  $\tau$  (**F/S**) se denomina tensión tangencial o **esfuerzo cortante**, por lo que la viscosidad dinámica es la medida de la resistencia interna que tiene un fluido ante un esfuerzo cortante.

Debido a su naturaleza, la mayoría de los fluidos no varían su viscosidad al variar el esfuerzo cortante. Son los llamados **fluidos newtonianos**. En estos, el grado de

<sup>37</sup> Por gradiente entendemos como varía la velocidad con la distancia. Si decimos que varía linealmente, como ocurre con la mayoría de los fluidos, su valor es **V/D**.



desplazamiento de las capas de líquido es proporcional a la fuerza que se aplica. Existen otros fluidos que se denominan **no-newtonianos**, como son los **fluidos plásticos** o de **Bingham**, los cuales no fluyen mientras que la fuerza que se les aplica no supere un cierto umbral. Una vez superado el mismo, el desplazamiento conseguido es proporcional a la fuerza aplicada, por ejemplo la pasta de dientes, que no fluye del tubo hacia el exterior hasta que por apretar se sobrepasa un cierto esfuerzo.



En los fluidos **pseudoplásticos**, no aparece ningún umbral, pero el desplazamiento conseguido no es proporcional a la fuerza, sino que aumenta en una proporción mucho mayor. En los fluidos dilatantes la viscosidad aumenta al aumentar la fuerza aplicada. Es como si el fluido fuera frenándose al aplicar la fuerza. En los fluidos **tixotrópicos**, en estos la viscosidad va disminuyendo al aplicar una fuerza y acto seguido vuelve a aumentar al cesar la fuerza. El efecto contrario se conoce como

**reopexia**, un ejemplo de este tipo es la grasa empleada en la lubricación.

Pero en la práctica, sobre todo en el empleo de los aceites para lubricación, interesa otro tipo de viscosidad, que se conoce como **viscosidad cinemática** que representa la resistencia a fluir de un fluido bajo la acción de la gravedad. Se define el cociente de viscosidad cinemática ( $\nu$ ) como:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde  $\mu$  es el coeficiente de viscosidad dinámica y  $\rho$  la densidad, todo ello medido a la misma temperatura. La viscosidad cinemática puede definirse como el tiempo requerido por un volumen dado de fluido en fluir a través de un tubo capilar por acción de la gravedad, de hecho este es el método empleado para medir esta magnitud. El coeficiente de viscosidad dinámica se mide en las unidades del sistema internacional en  $\text{m}^2/\text{s}$ , pero aún se emplea una unidad denominada **stoke** que tiene la siguiente equivalencia:

$$\text{Stoke} = 100 \text{ centistokes} = 1 \text{ cm}^2/\text{s} = 0,0001 \text{ m}^2/\text{s}$$

La viscosidad cinemática es la que aparece comercialmente en las características de todos los lubricantes.

De lo expuesto se deduce que dos sustancias pueden tener la misma viscosidad dinámica, pero la más densa tendrá una menor viscosidad cinemática y por lo tanto se deslizará mucho mejor, que la de menor densidad, ya que las fuerzas gravitacionales, es decir el peso, son mayores que las fuerzas de rozamiento interno. Cuando aumenta

la temperatura de cualquier sustancia (especialmente en líquidos y gases), sus moléculas adquieren mayor movilidad y su cohesión disminuye. Así pues la viscosidad varía con la temperatura, aumentando cuando baja la temperatura y disminuyendo cuando se incrementa.

En la siguiente tabla se ven los valores de la viscosidad dinámica y cinemática, así como la densidad de algunos fluidos.

Fluido	$\mu$ (Pa · s)	$\rho$ (Kg./m <sup>3</sup> )	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)
Aire	$1,8 \cdot 10^{-5}$	1,20	$1,21 \cdot 10^{-5}$
Agua	$1,0 \cdot 10^{-3}$	1.000	$1,01 \cdot 10^{-6}$
Gasolina	$2,9 \cdot 10^{-4}$	680	$4,27 \cdot 10^{-7}$
Aceite SAE 30	0,26	933	$2,79 \cdot 10^{-4}$
Glicerina	1,5	1.263	$1,19 \cdot 10^{-3}$

## EMPUJE DE UNA INSTALACIÓN

En la aplicación de equilibrios dinámicos a una porción finita de masa fluida, este equilibrio resulta de la integración de acciones sobre todas las partículas que la constituyen. Las fuerzas que actúan en el sistema son la fuerza de enlace ( $F_e$ ) y las fuerzas gravitatorias ( $F_g$ ). Las fuerzas superficiales en el interior de la masa fluida se anulan unas a otras y por eso no las consideramos.

Pero según la 3ª ley de Newton, toda acción implica una reacción. Según la ecuación de Euler, que también se cumple para fluidos reales:

$$F_g + F_e = \rho Q (v_2 - v_1)$$

La resultante, que es la fuerza de enlace, queda constituida por las acciones que el medio exterior ejerce sobre la masa del fluido a través de  $w$ .

$$F_e = A + F_1 + F_2$$

donde

$A$  es la acción del canal que guía el fluido

$F_1$  y  $F_2$  son empujes normales sobre  $w_1$  y  $w_2$  del líquido circundante

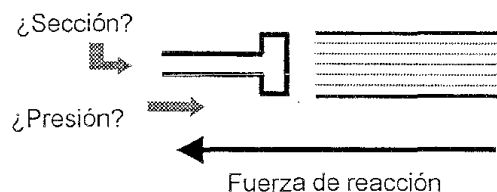
A la acción del canal guía,  $A$ , se opone la reacción  $R$  que el conducto descarga sobre el terreno o el personal que maneja la manguera. Esta fuerza equivale a la reacción del líquido sobre el conducto, y debe ser resistida por el material del conducto y por el anclaje.

Según la 3ª Ley de Newton, todo chorro que sale por un orificio o boquilla, ejerce una fuerza de reacción sobre dicho orificio o boquilla. La fuerza de salida del agua de la lanza debida a la presión, produce una reacción en sentido contrario a la salida del agua, que considerando que el líquido sale con velocidad, intensidad y dirección uniforme, tiene un valor:

$$R = F_{\text{reacción}} = \rho Q V / g$$

Esta fuerza de reacción dependerá de la sección del conductor ( $S$ ) y de la presión de salida ( $P$ ):  $F_{\text{reacción}} = 2 S P$

De forma que  $S$  y  $P$  son inversamente proporcionales.



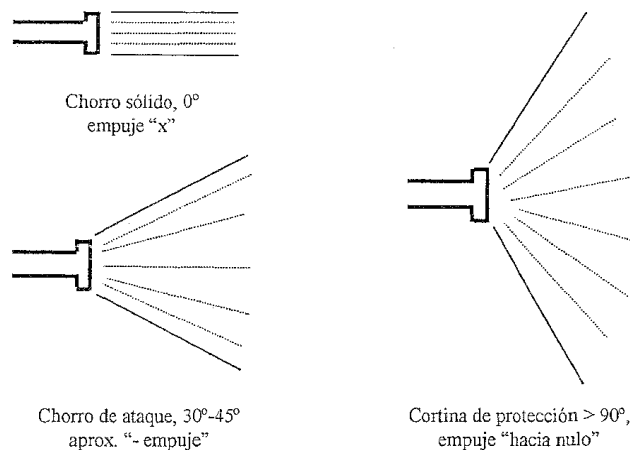
El empuje es mayor en un chorro sólido, que en uno de ataque; y éste, mayor que uno de protección: sólido > ataque > protección.

Al aumento de sección del conductor y/o de presión el empuje que tendrá que soportar la "punta de lanza" será mayor. Pero si en lugar de un chorro sólido, se produjese en forma cónica, el empuje iría disminuyendo, a medida que el cono fuese mayor hasta que se anularía a los 180° aprox:  $0 > [30, 45] > [90]$ .

La misma expresión de la fuerza de empuje o reacción puede definirse como:

$$R \text{ (Kgr)} = 0,016 d^2 \text{ (mm)} P \text{ (Kgr/mm}^2\text{)}$$





Los empujes son fuerzas vectoriales y se anulan unos con otros.

Al realizar un tendido y dejarlo en espera, tener la precaución de ponerlo en posición de cortina de protección, para conseguir así un menor empuje inicial, producir un menor daño y tener una mayor protección a la hora de trabajar.

## PÉRDIDAS DE CARGA

Al circular un fluido real por una manguera, la energía que proporciona su presión va disminuyendo a lo largo de la manguera. Esta disminución de presión o pérdida de carga se debe a que la energía se utiliza en parte en compensar la fricción o rozamiento contra las paredes de la manguera.

Además tienen una gran influencia las diferencias de sección y los obstáculos de curvas, codos, y válvulas; por ello deben utilizarse sólo los accesorios imprescindibles, para eliminar en lo posible las pérdidas de carga que se generan en ellos.

Por lo tanto tenemos dos tipos principales de pérdidas de carga:

- Pérdidas por fricción o pérdidas de carga **Generales**
  - Rozamiento agua – tubería; el rozamiento del agua con las paredes de la tubería al fluir
  - Rozamiento entre las propias partículas de agua; incluido el que se produce por las turbulencias cuando el agua cambia de dirección o se produce un fuerte aumento o disminución su velocidad, debidos a cambios bruscos en la sección las tuberías
- Pérdidas menores o de accesorios; pérdidas de carga **Singulares**

La mayoría de los sistemas de distribución de agua para protección contra incendios funcionan en régimen turbulento, siendo la tubería la principal responsable de las pérdidas por fricción. Las demás pérdidas se consideran en conjunto y se llaman “pérdidas menores” o “pérdidas en accesorios”.

Las pérdidas de carga son menores en el flujo laminar que en el turbulento.

### Pérdidas por fricción

Las pérdidas de presión o pérdidas de carga están influenciadas por las características de la manguera, especialmente su rugosidad, su diámetro, la longitud de manguera, y al caudal:

- Rugosidad; En concreto una manguera de caucho, con acabado interior liso, puede tener una pérdida de carga hasta tres veces inferior a una manguera de

lona del mismo diámetro. Además, cuanto mayor rugosidad, antes envejece la tubería. Así pues será mejor, en general, usar mangueras de caucho en vez de mangueras de lona. Si hacemos una comparación de las rugosidades de diferentes materiales, tenemos: Hormigón > fundición > fibrocemento > PVC > PE.

- **Diámetro;** Las pérdidas de carga son inversamente proporcionales al diámetro. Una manguera de doble diámetro tendrá la mitad de pérdida de carga. Así que para establecer una línea de gran longitud, es preferible usar mangueras de gran sección, y, si es preciso, reducir la sección en los últimos tramos de la línea.
- **Longitud;** Para un mismo caudal, las pérdidas de carga serán directamente proporcionales a la longitud de la manguera, es decir será el doble para una longitud de manguera doble. Será pues siempre preferible que la línea de manguera sea lo más corta posible, para evitar pérdidas de carga.
- **Caudal;** Para un mismo diámetro, la pérdida de carga será directamente proporcional al cuadrado del caudal, es decir si se duplica el caudal se cuadruplica la pérdida de carga.

Para:	Diámetro tubería	Pérdidas de carga
L = 100m P <sub>L</sub> = 3Kgr/cm <sup>2</sup>	Φ 25	1,5 Kgr/cm <sup>2</sup>
	Φ 45	0,6 Kgr/cm <sup>2</sup>
	Φ 70	0,07 Kgr/cm <sup>2</sup>

De forma que las pérdidas de carga son:

- Directamente proporcionales a la rugosidad de las paredes
- Directamente proporcionales a la longitud de la conducción
- Directamente proporcionales al cuadrado de la velocidad del líquido
- Inversamente proporcionales al diámetro de conducción.

Otros parámetros que incrementan las pérdidas de carga son:

- El aumento de la velocidad (= aumento de Q)
- El régimen turbulento
- El aumento de la viscosidad del fluido

Los datos experimentales permiten determinar que la resistencia friccional de una tubería es:

1. Independientemente de la presión en la misma.
2. Proporcional a la magnitud y al carácter del caudal (laminar o turbulento).
3. Variable según la velocidad del flujo (casi proporcional al cuadrado de la velocidad cuando ésta es superior a la crítica y, para velocidades inferiores, proporcional a su primera potencia).

**Fórmula de Chezy:** Quizá la expresión más antigua y mejor conocida que relaciona la velocidad con la pérdida por fricción en las tuberías es la fórmula de Chezy, que se expresa de este modo:

$$v = c\sqrt{rs},$$

donde

c es un factor que depende del tipo y rugosidad de la tubería;

r (radio hidráulico) es la superficie / circunferencia, es decir, d/4, siendo d el diámetro de la tubería en pies (m);

s es la pendiente hidráulica h / l, es decir, la pendiente del gradiente hidráulico en la que h es la pérdida de presión por fricción en una tubería de longitud l en pies (m).

**Fórmula de Darcy-Weisbach:** Otra fórmula clásica para calcular la pérdida por fricción en tuberías largas, rectas y de diámetro y rugosidad uniformes, es la establecida por Darcy, Manning, Fanning y otros. En los libros de texto esta fórmula se obtiene analizando las fuerzas que actúan sobre una partícula de agua que se mueve en el interior de una tubería. Llamada a menudo fórmula de Darcy-Weisbach, es una variante de la de Chezy con un factor de fricción 1 que sustituye a la c y se expresa como sigue:

$$h = f \frac{lv^2}{2dg}$$

donde:

h = pérdida de presión por rozamiento

l = longitud de la tubería

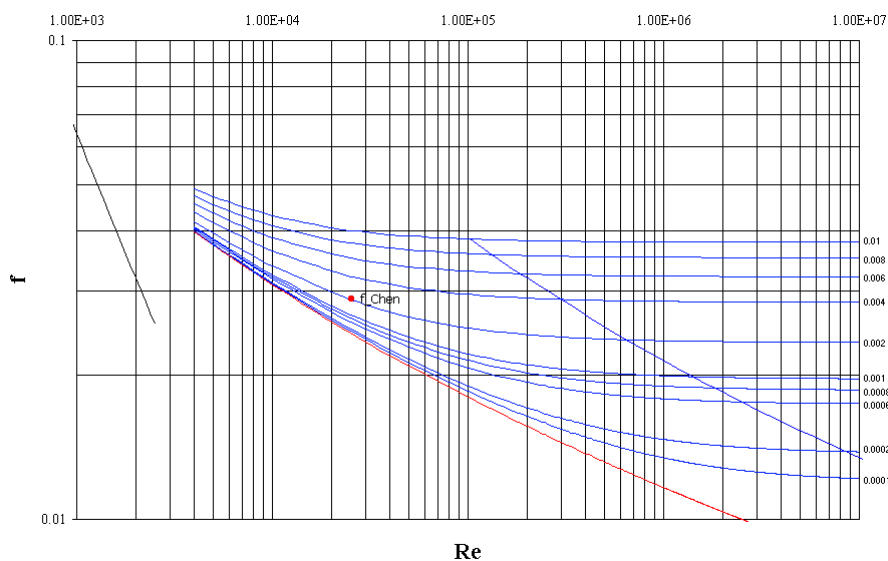
d = diámetro de la tubería

v = velocidad

g = aceleración de la gravedad

f = factor de fricción

La fórmula de Darcy-Weisbach es adecuada para todos los fluidos newtonianos. El factor de fricción f es adimensional y variable, dependiendo de la rugosidad interior de la tubería y del número de Reynolds. El valor de f se puede calcular por la ecuación de Colebrook-White, que es una fórmula híbrida entre teórica y empírica, o utilizando los diagramas de Moody.



**Fórmula de Hazen-Williams:** Las fórmulas de caudal - rozamiento que se utilizan normalmente en la hidráulica de la protección contra incendios han sido establecidas de modo experimental y por la experiencia. Estas fórmulas, que son variaciones de la de Chezy, son normalmente exponenciales del tipo:

$$V = Cr^x s^y$$

donde

V es la velocidad, C el coeficiente de rozamiento, r el radio hidráulico (área dividida por la circunferencia) y s la pendiente hidráulica (pérdida de presión dividida por la longitud).



La más popular de estas fórmulas es la de Hazen-Williams. Los coeficientes de rozamiento de fórmulas de este tipo son constantes, para tuberías de rugosidad dada, e independientes de la velocidad, por lo que la precisión de la fórmula varía. No obstante se consideran generalmente adecuados los valores fijos de la viscosidad y la densidad para la mayoría de las aplicaciones.

La fórmula básica de Hazen-Williams ( $V = 1,31C r^{0,63} s^{0,54}$ ) no es práctica para el cálculo de caudales normales para protección contra incendios.

En unidades del SI, la fórmula es:

$$p_m = 6,06 \times \frac{Q_m^{1,85}}{c^{1,85} d_m^{4,87}} \times 10^9$$

donde:

$P_m$  = pérdida de presión en kPa por cada 100 m de tubería

$Q_m$  = caudal en l/ min

$d_m$  = diámetro interior de la tubería en mm

La solución a los problemas de protección contra incendios relativos a caudales y fricciones en las tuberías, no requiere el cálculo directo mediante fórmulas, porque existen tablas y diagramas. No obstante, al usar las tablas y diagramas, que simplifican, hay que tener gran cuidado para saber el valor de  $c$  (coeficiente de fricción) en el que se basa la tabla o diagrama. Si el tipo o estado de una tubería requiere el uso de un  $c$  distinto, las pérdidas por fricción obtenidas de la tabla se deben multiplicar por un factor de conversión para hallar los resultados correctos.

#### Pérdidas menores o de accesorios

Mientras la mayoría de las pérdidas por rozamiento dentro de la tubería suponen la mayor parte de las pérdidas de presión, también se producen otras cuando la tubería cambia de dirección o de tamaño o cuando se instalan válvulas u otros accesorios. Estas pérdidas se conocen generalmente como “pérdidas menores”, aunque en algunos casos pueden ser importantes, como en el caso de las válvulas de retención o los trenes anti-reflujo que se instalan normalmente en los sistemas contra incendios.

La magnitud de las pérdidas menores se puede encontrar en muchos documentos de referencia y se expresa de diversas maneras, siendo las más corrientes las de longitud equivalente ( $l/d$ ), coeficiente de resistencia ( $k$ ) o coeficiente de caudal ( $C_v$ ).

- Longitud equivalente. Para la mayoría de los cálculos, la pérdida por rozamiento (+pérdidas menores) se calcula con el método de la longitud equivalente a partir de tablas, que expresan las pérdidas por rozamiento debidas a los accesorios como “longitud equivalente de tubería” que produce la misma pérdida. Esta longitud es suma de la longitud real, obteniéndose así la pérdida total por rozamiento de la tubería y los accesorios.
- Coeficientes de resistencia. A veces se utilizan los coeficientes de resistencia para expresar la pérdida de presión en una conexión en función de la velocidad, según la relación:

$$h_f = k \frac{v^2}{2g}$$

Los métodos de la longitud equivalente y del coeficiente de resistencia están relacionados entre sí con la fórmula básica de Darcy-Weisbach.

La mayoría de las pérdidas de entrada se calculan mediante coeficientes de resistencia.

- Coeficientes de caudal. Cuando la pérdida de una conexión se define por un coeficiente de caudal  $C_v$ , este coeficiente se define como el caudal de agua que produciría una pérdida por rozamiento conocida (generalmente 1 psi) a través de la conexión. Esta relación se expresa normalmente como:

$$Q = C_v \sqrt{h}$$

La presión en la punta de lanza mínima es de 3 kgr/cm<sup>2</sup>:

$$P_L = P_{\text{bomba}} \pm P_{\text{altura}} - H_f$$

donde

$P_{\text{altura}}$  es la presión perdida en elevar el agua (negativa; generalmente se trata de este caso) o ganada al descenderla (positiva).

$H_f$  son las pérdidas de carga

Para evitar las pérdidas de carga:

- Utilizar mangueras lisas (mangueras de fibras textiles y caucho en vez de lino)
- Usar la menor longitud posible; acorde con la necesidad
- Evitar dobleces y codos
- Realizar los grandes recorridos con el mayor diámetro posible

Como reglas generales:

- Cuando se produce una impulsión desde una cota superior a otra inferior, además de la presión de la bomba, tenemos que añadir 1Kgr por cada 10 m de desnivel recto (recordemos 10 mca).
- Cuando se produce una impulsión desde una cota inferior a una superior, además de las pérdidas de carga generales y singulares, tendremos que considerar que sufriremos una pérdida de carga de 1 kg cada 10 m verticales ascendentes.

A modo de conclusión podemos decir que la pérdida de carga de una instalación dependerá de:

- Caudal, relacionado estrechamente con la presión aplicada
- Diámetro de la manguera, a mayor diámetro menor presión, a menor diámetro mayor presión perdidas.
- Longitud del tendido
- La altura desfavorable (ascendente) o favorable (descendente)

## VARIACIONES DEL CAUDAL. GOLPE DE ARIETE

Se denomina golpe de ariete al efecto de un aumento de presión que acompaña a los cambios repentinos en la velocidad del agua que pasa por una tubería. Es un fenómeno de inercia producido por un cambio brusco de caudal en una instalación hidráulica que se define como *movimiento variable de fluidos compresibles producido por una rápida interrupción de la corriente en tuberías forzadas*.

- Régimen permanente: líquido incompresible. Podemos aplicar el teorema de Bernoulli entre dos secciones con movimiento uniforme.
- Régimen variable: se producen cambios de presión y velocidad en el tiempo. No podemos aplicar Bernoulli y no podemos suponer el líquido incompresible.

El régimen variable en corrientes forzadas dará lugar a cambios de velocidad relativamente rápidos que harán que la energía cinética se transforme en trabajos elásticos (del conducto y del agua) y en energía vibratoria, ondulatoria y térmica. Este fenómeno es el golpe de ariete.

El régimen variable puede formarse por:

- Presencia de aire en los conductos a presión
- Por maniobras con un obturador

El régimen variable producido por una manipulación rápida en el régimen de gasto depende de:

- La maniobra que lo provoca
- Los coeficientes de elasticidad del agua líquida (compresibilidad)
- El módulo de Young del conducto (tensión de tracción del material)

Cuando la velocidad decrece rápidamente o desaparece, la energía cinética de la columna de agua en movimiento es absorbida instantáneamente por la deformación elástica de la tubería y la capacidad de compresión del agua. Entonces se forma una onda de presión que se desplaza, con velocidades  $\leq 1400$  m/s, en ambos sentidos de la tubería. Esta velocidad o celeridad depende únicamente de:

- Las características de la conducción
- La elasticidad de la conducción
- El espesor de la conducción
- El diámetro de la conducción

Y nunca depende, en absoluto, del tiempo de maniobra ni de la velocidad y presión que tenga el agua al pasar por el lugar en que se produce la perturbación.

Los aumentos de presión pueden ser originados por el cierre de una válvula (lanzas, bifurcaciones, etc.), el paro de una bomba o la creación repentina de una demanda anormal de agua si se rompe la tubería principal. En algunas ocasiones el funcionamiento de las válvulas automáticas reguladoras de un sistema de rociadores puede producir un reflujo y crear fuertes subidas de presión en el sistema de protección.

El golpe de ariete puede ser positivo (al cierre de la válvula) o negativo (a la apertura).

El golpe de ariete es más de temer en tuberías de baja presión que de alta, ya que en los sistemas de alta presión las variaciones se soportan mejor, teniendo menos importancia en estos casos.

La fuerza del golpe de ariete puede llegar a romper tuberías, válvulas o accesorios. En teoría, si el sistema fuera perfectamente inelástico, esta fuerza podría llegar a ser infinita.

La elasticidad de las mangueras tiende a reducir el impacto del golpe de ariete. Pero el cierre repentino de las lanzas en las mangueras largas puede causar un aumento de presión suficiente para que se rompa la manguera. Las pruebas llevadas a cabo por el Servicio contra Incendios de la ciudad de Nueva York indican que los aumentos de presión al cerrar la lanza pueden ser aproximadamente del doble de la presión del hidrante. Esto sugiere la conveniencia de accionar las válvulas de las lanzas con sumo cuidado.

Cuando se produce el golpe de ariete la tubería se dilata y el fluido se comprime, volviendo ambos, por su elasticidad, a su estado inicial. Este efecto se repite estableciéndose un movimiento de presión oscilatorio cada vez con menos intensidad hasta que se anula; momento en que la energía cinética que llevaba el agua ha sido absorbida por rozamiento por la pared de la conducción; se ha transformado en energías térmica y de deformación.

Las tuberías de descarga de las bombas se ven sometidas a golpe de ariete causado por la separación de la columna de agua, que se puede producir cuando se para de repente una bomba (por corte de corriente, actuación manual, etc.) o cuando la válvula de descarga se cierra de repente mientras la bomba sigue funcionando. La separación de la columna se produce en algún punto después de la bomba, sobre todo en los más elevados, o si la pendiente hacia abajo de la tubería aumenta rápidamente.

Cuando se para el movimiento de avance de la columna, se produce un reflujo que la vuelve a unir. Si una bomba está situada en un lugar más elevado que la salida del sistema, puede resultar eficaz colocar en la tubería una válvula reguladora de vacío. Si existe presión estática (presión del agua sin movimiento por estar a cierta altura con respecto a la toma de presión) al descargar la bomba, es prácticamente imposible eliminar todo el agua cuando se invierte el sentido de marcha de la columna. En este caso se pueden instalar amortiguadores de las oscilaciones de presión o válvulas reguladoras de vacío, que produzcan el by-pass de parte de la columna de agua que vuelve hacia la válvula de retención o reguladora.

Si, después de una parada, se vuelve a poner en marcha rápidamente una bomba contra incendios, puede producirse un aumento de presión excesivo. Por eso, las instalaciones sujetas a funcionamiento intermitente se deben proteger mediante relés retardadores. No bastan las válvulas de seguridad sencillas, porque su funcionamiento es demasiado lento para contrarrestar la velocidad a la que se produce el aumento de presión. En los sistemas de protección contra incendios se suele utilizar una bomba auxiliar para mantener alta la presión del sistema y reducir el golpe de ariete producido al ponerse en marcha la bomba principal.

Los principales factores que contribuyen a la separación de una columna de agua son:

- (1) la rapidez con la que se interrumpa el flujo, bien por el cierre de una válvula o el paro de una bomba;
- (2) la longitud de las tuberías, que determina el tiempo durante el que la presión sigue cayendo, antes de que las ondas vuelvan desde el extremo más alejado de la tubería para contrarrestar la caída de presión inicial;
- (3) la presión operativa normal en los puntos críticos, como en lo alto de una colina;
- (4) la velocidad del agua justo antes de que se produzca el cierre de la válvula o el paro de la bomba. Cuanto mayor sea la velocidad, mayor será la separación de la columna, la velocidad de reflujo y la subida final de presión.

#### Teoría de la onda elástica

Los conceptos básicos de la teoría de la onda elástica son:

1. El aumento de la presión es proporcional a la disminución de la velocidad del fluido y a la velocidad de la onda de presión.
2. El aumento de la presión es independiente de la longitud y del perfil de la tubería.
3. La velocidad de la onda de presión es la misma que la del sonido a través del agua.



Las ondas de presión que coexisten se propagan a lo largo de la tubería en sentido inverso. Al cruzarse ambas ondas no interfieren su valor como corresponde a dos movimientos ondulatorios y el efecto total será la suma algebraica de cada onda.

Debe estudiarse la posibilidad de que se produzca el golpe de ariete en los sistemas de distribución, sobre todo en los provistos de bombas automáticas, y adoptarse medidas prácticas para evitar que se produzcan subidas o caídas bruscas de presión que sean destructivas. Sin embargo hay que tener en cuenta que, en las condiciones en las que están proyectados los sistemas de distribución para la protección contra incendios (con bombas dotadas de válvulas de retención en el lado de descarga, que funcionan automáticamente), no siempre se puede evitar esta posibilidad.

Se trata de un fenómeno que no se puede evitar, pero sí atenuar. Para reducir al mínimo el golpe de ariete, las válvulas y los hidrantes deben estar siempre en perfecto estado y usarse con cuidado para evitar que la presión suba muy bruscamente. Las válvulas accionadas a distancia se deben regular con todo cuidado para evitar que se cierren de repente (nunca en menos de 5 segundos).

Es un fenómeno complejo con graves efectos (daños en los puntos de conexión de instalaciones como racores de unión o de lanza, etc.), puede evitarse si se cierran y abren las llaves de paso lanza de la manguera progresivamente. Algunos camiones tienen dispositivos automáticos de regulación de presión para compensar variaciones bruscas de caudal.

Las principales formas de atenuar el fenómeno son:

- Instalar depósitos de presión (aire/agua) en el extremo de la conducción
- Colocar una válvula de seguridad (sobrepresión o alivio) que se abra al producirse una presión excesiva
- Realizar las aperturas y cierres de las válvulas lentamente
- Utilizar bombas de inercia que mantienen el giro después de una conexión para reducir el efecto

## **CAVITACIÓN**

La cavitación es el fenómeno consistente en la vaporización (paso de líquido a gas) del fluido circulante a temperaturas muy inferiores a la del punto de ebullición (100 °C en el agua). La ebullición del agua en condiciones normales se produce a 100 °C, es decir, cuando la presión exterior es igual a la atmosférica (1 atm).

La presión de vapor de un líquido es el equilibrio entre la superficie del líquido y su fase vapor. La presión de vapor es menor que la presión atmosférica.

Ahora bien, en el momento en que la presión vapor se eleve (por ejemplo por aumento de la temperatura), e iguale con la presión atmosférica, comenzará la vaporización de toda la masa del líquido (ebullición), habiéndose perdido el equilibrio, antes citado de la superficie. Cuando la presión vapor es igual a la presión atmosférica, se produce la vaporización de toda la masa del líquido.

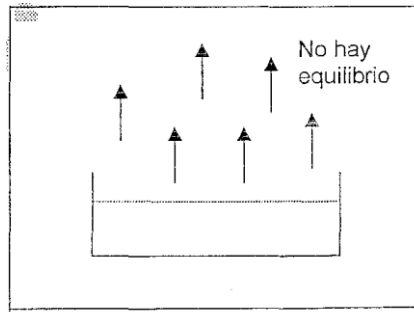


Fig 17. Presión de vapor = presión atmosférica

A la hora de aspirar, al intentar llegar al vacío, se produce una depresión en el interior de los conductos (mangotes) y del cuerpo de bomba. Esta presión se igualará con la presión de vapor del líquido y comenzará la vaporización (no llegará nunca a alcanzar su temperatura de ebullición).

Cuando las burbujas de vapor atraviesan una zona de alta presión (cuerpo de bomba), se producirá un colapso de las mismas haciendo trabajar a la bomba en vacío.

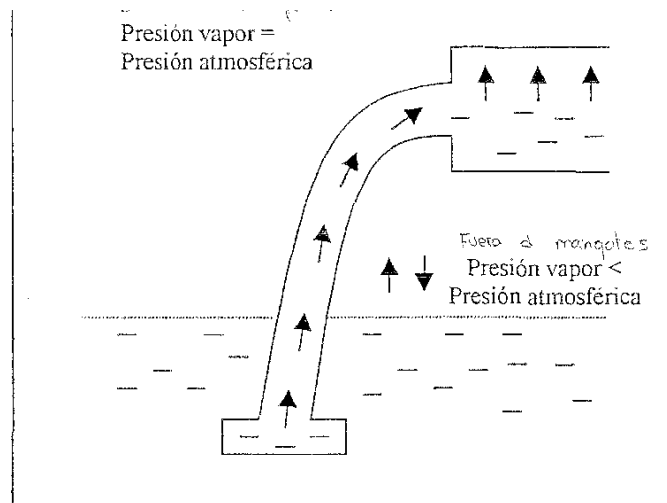


Fig 18. Fenómeno de cavitación en la aspiración

La cavitación, ocurre en el momento en que un líquido es sometido a una presión ( $P_1$ ) igual o menor que su presión de vaporización ( $P_v$ ) e instantes después es regresado a una presión mayor ( $P_2$ ) a la presión de vapor de éste. En el intervalo de estos dos sucesos se forman pequeñas burbujas de gas, las cuales al ser comprimidas por la presión mayor ( $P_2$ ), dejan un espacio ocasionando que las pequeñas partes en estado líquido se aceleren y choquen unas con otras.

La cavitación se refiere a la formación de bolsas de aire en la masa líquida, en puntos de baja presión (presión estática = presión de vapor del líquido). Cuando esta presión aumenta se reabsorben estas burbujas gaseosas y estallan provocando una explosión que puede producir la erosión mecánica de las paredes del conducto o el desgaste de los alabes de las bombas que están en contacto con la zona de condensación.

Según la ecuación de Bernoulli;

$$H = E_m/g = z + v^2/2g + p/\gamma + H_f \rightarrow p/\gamma = H - [z + v^2/2g + H_f]$$

Basándonos en esta ecuación podemos resolver que la cavitación se producirá:

- Valores relativamente bajos de H
- Una cota de elevación alta;  $z \uparrow$ ; en un tramo ascendente la z aumenta a costa de la disminución de presión
- Una altura cinética grande ( $v^2/2g$ ) que puede conseguirse estrechando el conducto, momento en que aumenta la velocidad a expensas de la presión
- Unas pérdidas de carga altas ( $H_f \uparrow$ ) implican un H menor y, en consecuencia, disminuye también al presión

Hay que intentar siempre que  $p/\gamma > P_v$  para que no exista cavitación.

Aunque el fenómeno de la cavitación aun es tema de estudio por los investigadores, se han realizado pruebas en líquidos sometiéndolos a esfuerzos de tensión en donde han sido capaces de soportar esfuerzos de tensión de hasta 34 atmósferas en laboratorios y bajo condiciones muy controladas.

Además se sabe que los árboles succionan la savia sometiéndolas a esfuerzos de tensión, pero nadie ha podido explicar este fenómeno, sin embargo si sometemos un líquido a esfuerzos de tensión reduciéndole la presión entrará en ebullición si esta es demasiada baja, de ahí la importancia de cuidar la presión de succión en las bombas.

En la naturaleza el mercurio es uno de los metales líquidos más utilizados en instrumentación debido, entre otras cosas, a que su punto de evaporización, que a 20 °C ocurre a 0,168 Pa, es muy bajo comparado con el del agua, que ocurre a 2,337 Pa para la misma temperatura. Sin embargo, por ser el agua el fluido más común vale la pena realizar un análisis de las condiciones de trabajo de éste con el fin de evitar en las bombas una presión menor a la de vaporización.

Tabla de tensión superficial y presión de vapor del agua

T, °C	$\gamma$ , N / m <sup>3</sup>	KPa
0	0.0756	0.611
10	0.0742	1.127
20	0.0728	2.337
30	0.0712	40242
40	0.0696	7.375
50	0.0679	12.34
60	0.0662	19.92
70	0.0644	31.16
80	0.0626	47.35
90	0.0608	70.11
100	0.0589	101.33

El parámetro adimensional que describe este fenómeno, es el número de cavitación

$$Ca = \frac{Pa - P_v}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

Donde

Pa Presión absoluta del fluido  
V Velocidad promedio  
Pv Presión de vapor  
ρ Densidad del fluido

Si se considera un fluido de densidad constante se observará que la cavitación depende de la presión de vaporización del líquido y aún más de la presión a que trabaja el fluido a la entrada y la velocidad a la que circulara, refiriéndose esto a los álabes del rotor.

### **Cavitación en bombas**

Otra forma de explicar el fenómeno de la cavitación es a través de la formula de Thoma, basada en las cargas de la bomba.

$$\delta = (HB - HS - HV) / H$$

Donde

H      Altura total de la bomba  
HV      Altura debida a la presión de saturación de vapor  
HB      Altura correspondiente a la presión atmosférica  
HS      Altura de succión de bombas

Siempre que el valor de HS sea excesivo y resulte un valor indeseable se puede esperar los efectos de la cavitación. En las bombas reciprocantes, compuestas por embolo, cilindro, válvulas de entrada, de salida y el mecanismo de accionamiento.

Aguas arriba de las bombas hay un incremento de presión; aguas abajo, el efecto de las bombas provoca succión tendiendo al vacío. La presión atmosférica (10,33 mca) es la causante de la elevación del agua por la tubería de aspiración (debido al vacío causado por la bomba). La presión mínima, se alcanza en la cara posterior de los alabes. Para evitar la cavitación en bombas, la presión mínima tiene que ser mayor que la presión de vapor a una temperatura dada (= 10,33 mca a 20 °C).

Teniendo en cuenta los sumandos de carga en la aspiración de la ecuación de Bernoulli:

$$h_A = z_A + p_A/\gamma + v_A^2/2g + H_f$$

donde

$h_A$  es la altura correspondiente a la presión atmosférica  
 $z_A$  es la diferencia de cotas entre la superficie libre del agua y el eje de la bomba  
 $p_A/\gamma$  es el sumando que debe ser  $> P_v$   
 $v_A^2/2g + H_f$  puede considerarse como  $f (KQ^2)$

De forma que si  $z_A + p_A/\gamma + v_A^2/2g + H_f > 10,33$  existirá cavitación que puede llevar la bomba al colapso por obligarla a trabajar en vacío. Para impedirlo habría que purgar la bomba y reiniciar su funcionamiento.

En donde la bomba aspira el agua por el vacío parcial, la presión atmosférica empuja el agua al cilindro, a través de la válvula de entrada, llenando el cilindro, se invierte el proceso y el pistón embolo empuja el cilindro, cerrando la válvula de entrada y el agua es forzada a subir, "hacia arriba" por la presión del pistón.

Por lo que resulta evidente que debido a esto, cuando la presión de succión del embolo es aumentada, la presión atmosférica es insuficiente para mantener el ritmo de succión de la bomba, el liquido empieza a entrar en ebullición si la presión de la bomba es menor que la de vaporización, comenzando la bomba a absorber vapor y gases causado por la aceleración del embolo, la presión aumentará y el vapor se condensará lo que producirá choques de impactos en la pared.



Sí el líquido en la bomba contiene gases disueltos, estos comenzarán a liberarse ocasionando problemas de corrosión en la tubería de acero. Además, existe la teoría de que las burbujas de vapor se forman en el lugar donde existen cuerpos extraños del fluido. Que fingen como sólidos, los cuales pueden ser granos de arena, polvo, partículas de metal, etc....

Existen bombas equipadas con pilotos de aviso que nos alertan de que se está produciendo en ellas cavitación.

La cavitación en una bomba se produce por alguna de las **causas** que se exponen a continuación, como productoras de la presencia de aire o vapor de agua en el interior de la bomba:

1. Por no ser adecuado el diámetro de la descarga desde el tanque de agua de la bomba centrífuga, con respecto al rendimiento de ésta. Es decir, cuando la expulsión de agua supera a la alimentación.
2. Por utilizar conductos de succión, cuyo diámetro no es adecuado para el rendimiento que ha sido calculada la bomba.
  - Cuando es por defecto de diámetro, el caudal que pueda penetrar por la succión de la bomba, no alcanza a abastecer el flujo de salida y por consiguiente ese "vacío de alimentación" produce las cavidades de aire que golpean en su interior.
  - Cuando es por exceso de diámetro, el problema puede crearlo el reductor que se coloque en la entrada de succión de la bomba, por la formación de un bolsón de aire delante de ese reductor. Pero esto sólo puede suceder cuando el diámetro del conducto de succión llegue a ser dos veces mayor que la boca de entrada, en cuyo caso debe colocarse un reductor inclinado y un tramo de caño recto entre el conducto y la bomba, debido a que el reductor común puede desviar.

Ej: un bolsón de aire en cañería de aspiración sobredimensionada → Cuando el diámetro de la cañería de aspiración es mayor que el de la bomba de toma de la bomba puede formarse un bolsón de aire delante del reductor.

Tales bolsones pueden ser eliminados utilizando un reductor inclinado.

El tramo recto adicional de caño es necesario si la cañería de aspiración es más de dos tamaños mayor que la entrada de la bomba.

3. Por una pendiente negativa en algún tramo de los conductos de succión.
4. Por tener los conductos de succión en sus uniones de acople, juntas o rodets de goma subdimensionados o que sobresalen de sus alojamientos específicos produciendo saltos o escalones que dan lugar a la formación de bolsones de aire, por desalineación entre conductos y bomba.
5. Por entrada de aire a través de las uniones de los conductos y/o en su acople con la boca de la bomba. Por estar obturado el filtro de la válvula de pie, lo cual impide la entrada del caudal de agua adecuado.
6. Por estar trabada la válvula de pie, reduciendo la sección de entrada del líquido.
7. Por excesiva altura de succión, cuando la autobomba no está equipada para vacío de desplazamiento positivo, cuya capacidad neumática concuerde con el diámetro de los conductos y de la boca de succión, como así también con el

rendimiento calculado por la bomba centrífuga.

8. Por trozos de material macizo, retenidos en algún sector de los impulsores o carcasa de la bomba, que hubieren penetrado a la misma, por no tener los filtros correspondientes en sus bocas de entrada.
9. Por dejar funcionando la bomba durante largo tiempo con agua en su interior, a una presión superior a los 2 Kg/ cm<sup>2</sup>, y las expulsiones y drenajes cerrados; produciendo vapor de agua al elevarse la temperatura de la misma.
10. Por succionar agua caliente con temperatura mayor a la del medio ambiente, la cual al recibir presión se puede evaporar en el interior de la bomba centrífuga.
11. Por entrada de aire, a través de los prensaestopa o sellos mecánicos del eje de la bomba centrífuga.

Ej: Bolsón de aire en línea de aspiración inclinada.

- Una pendiente negativa en la cañería de aspiración, crea una zona muerta donde puede formarse un bolsón de aire. Este bolsón puede ser arrastrado hasta la bomba, reduciendo o bloqueando completamente el flujo.
- Una pendiente positiva de un 1% o más, evita zonas muertas y bolsones de aire.

Ej: Bolsón de aire formado por desalineación de cañería y bomba. El caño excéntrico crea un escalón en la línea de aspiración, formando una zona muerta donde puede generarse un bolsón, tal escalón puede formarse por una junta que se adentra en el caño.

### **Efectos de la cavitación**

Las consecuencias de la cavitación son:

- Brusca caída del rendimiento
- Rápido deterioro de la bomba, por el gran aumento de temperatura en su interior y no refrigerarse (= "gripado") y por el efecto que causan las explosiones en su interior.
- Se manifiesta por "un ruido de burbujas".
- Disminución de la presión

Como ya se ha mencionado la cavitación ocurre en las bombas, aunque también sucede en los ductos sobre todo donde se encuentran reducciones seguidas de ampliaciones bruscas, (tubos venturi) estos efectos se pueden transmitir a las demás partes del equipo de bombeo reduciendo la eficiencia y pudiendo causar serios daños como la corrosión de partículas de metal (pitting).

Cuando las burbujas de vapor se implotan se produce una especie de martilleo lo que produce un deterioro en las paredes de la carcasa, de las palas del impulsor, cuyos daños están en función de la proximidad a la que se encuentran estas implosiones.

Los efectos que tiene sobre la maquinaria de bombeo son:

- **EFFECTO MECANICO.** Con las implosiones disminuyen los diámetros de las burbujas, las partículas en estado líquido se aceleran y se desplazan hacia el centro de estas burbujas chocando entre sí, estos choques provocan sobrepesiones (golpe de ariete) que se propagan en todas las direcciones afectando principalmente a las ranuras de las superficies metálicas por lo que

en muy poco tiempo pueden ocasionar daños a la estructura de la máquina (rotor).

Los golpeteos son muy fuertes y dan la impresión de que la bomba acarrea grava. Estos golpeteos causan un desequilibrio en la máquina dañando las uniones de los tubos con esta, así como aflojan las partes que la sostienen. Además, los martilleos, producen ruidos que pueden ser muy molestos durante la operación de la bomba.

El problema quizás más importante es el de la reducción de la eficiencia de la bomba. Entre las bombas más susceptibles a este fenómeno están las que tiene lados convexos y sobre todo en la parte trasera en donde pueden tener un área localizada que propicie la cavitación.

- EFECTO QUÍMICO: Con la implotación de las burbujas se liberan iones de oxígeno que atacan las superficies de los metales.

### **Prevención de la cavitación.**

Las soluciones, son:

- Bajar las revoluciones de la bomba, consiguiendo así:
  - menor calor interior → menor presión de vapor
  - menor caudal → menor velocidad → menores pérdidas
- Disminuir la altura de aspiración (no crear una depresión tan grande); se trata del término más importante. Para ello podemos utilizar bombas con carga positiva en la aspiración; bombas de autocebado.
- Disminuir las pérdidas de carga:
  - Limpiar la válvula de pie (puede estar obstruida)
  - Limpiar conducciones y alcachofas
  - Uso de aguas más limpias que tengan impurezas de menor diámetro
  - Aumentar el diámetro de la tubería de aspiración
  - Aumentar la longitud de la tubería de aspiración
  - Usar tuberías de menor rugosidad
  - Utilizar sólo las piezas intercaladas o de transición imprescindibles
  - Que la tubería de aspiración sea totalmente estanca

La mejor manera de evitar la cavitación es mediante un buen diseño con el fin de evitar en lo posible las bajas presiones, (sobre todo aquellas que estén por debajo del punto de vaporización).

Donde no sea posible, debido a factores externos fuera de nuestro alcance, se puede optar por introducir pequeñas cantidades de aire, inyectadas en la zona donde se produzcan el fenómeno, o utilizar protección catódica para evitar que el martilleo dañe las paredes de la máquina.

En cuanto al diseño, el sistema de bombeo se debe de seleccionar o diseñar con el fin de obtener una presión lo suficientemente grande a la entrada de la bomba para evitar la cavitación.

En la operación se pueden usar bombas multi-etapas para grandes alturas de bombeo, además cuando existan grandes pérdidas de carga entre el depósito fuente y la bomba podemos reducir la tendencia de la cavitación, minimizando la distancia entre la fuente y la bomba.

De acuerdo con la ecuación de Bernoulli, cuando la presión aumenta la velocidad disminuye y viceversa; así que se deberá de evitar en lo posible que la presión disminuya, evitando que la velocidad aumente.

En las turbinas de reacción el lugar mas propenso para la cavitación es la parte de atrás de los alabes de los rodets cerca de los bordes de salida. Por lo tanto la cavitación se puede evitar diseñando, operando e instalando una turbina de tal manera que no exista ningún punto en el que el valor de la presión absoluta se reduzca por debajo de la presión de evaporización.