

## Tema 1. Hidráulica. Generalidades

1. Definición
2. Propiedades fundamentales de los líquidos
3. Conceptos previos: Peso, Densidad, Peso específico, Presión
4. Compresibilidad de un líquido
5. Tensión superficial
6. Viscosidad
7. Tensión de vapor. Cavitación

### 1. Definición

Un *fluido* es una sustancia que se deforma continuamente cuando se le aplica un esfuerzo tangencial por pequeño que sea. Fluidos son *líquidos* y *gases*. Los líquidos se diferencian de los gases por la fluidez y menor movilidad de sus partículas y porque ocupan un volumen determinado, separándose del aire mediante una superficie plana. En esta asignatura nos ocuparemos únicamente del comportamiento de los líquidos, y más concretamente, del agua.

La *Hidráulica* es la parte de la Mecánica que estudia el equilibrio y el movimiento de los fluidos con aplicación a los problemas de naturaleza práctica (conducciones, abastecimientos, riego, saneamientos, etc.).

Partiendo de la Mecánica racional, deduce, auxiliada por la experiencia, las fórmulas que permiten resolver los problemas de índole práctica con que a diario se encuentra el técnico. Se estudian los líquidos como si fueran fluidos perfectos (homogéneos, no viscosos e incompresibles) y se les aplican las leyes de la Mecánica, corrigiendo las fórmulas con coeficientes determinados empíricamente para que se ajusten a la realidad. Por lo tanto, *la Hidráulica es una ciencia aplicada y semiempírica*.

La parte de la Hidráulica que estudia las condiciones de equilibrio de los fluidos se llama *Hidroestática* o estática de fluidos, mientras que la *Hidrodinámica* se ocupa del movimiento de los mismos.

## 2. Propiedades fundamentales de los líquidos

Los líquidos son sistemas deformables constituidos por un número infinito de puntos materiales aislados, infinitesimales. Se trata de sistemas continuos donde no existen “espacios vacíos” dentro de la masa.

Desde el punto de vista de la Mecánica cabe destacar las siguientes propiedades fundamentales de los líquidos:

*Isotropía:* Se conocen como isótropos a las sustancias cuyas propiedades son idénticas en cualquier dirección.

*Movilidad:* Carencia de forma propia. Aptitud para adoptar cualquier forma, la del recipiente que los contiene.

*Viscosidad:* Propiedad por la que el líquido ofrece resistencia a los esfuerzos tangenciales que tienden a deformarlo.

*Compresibilidad:* Propiedad por la cual los líquidos disminuyen su volumen al estar sometidos a incrementos de presión positivos. En los líquidos esta disminución es muy pequeña, es decir, son poco compresibles.

Los líquidos que tienen las propiedades de isotropía, movilidad, incompresibilidad y no viscosos se llaman *líquidos perfectos*. Un líquido (fluido) perfecto no existe en la Naturaleza. En los líquidos existe, en la realidad, una atracción molecular, especie de cohesión, que es la viscosidad, y que expresa la resistencia del líquido a dejarse cortar o separar. Sin embargo, un líquido real en reposo se comporta como perfecto, ya que sólo se manifiesta la viscosidad cuando está sometido a esfuerzos que lo deforman.

### 3. Conceptos previos

#### Peso y masa

La *masa* es una propiedad intrínseca de los cuerpos. Se mide en:

Sistema cegesimal (CGS)	Gramo
Sistema Internacional (SI)	Kilogramo
Sistema Técnico (ST)	Kg – masa o UTM

El *peso* de un cuerpo se define como la fuerza con que es atraído por la Tierra, aplicada en su centro de gravedad (cdg).

$$p = m \cdot g$$

Al ser una fuerza, sus unidades son el Newton (N) en el SI, la Dina (Dn) en el CGS y el Kilopondio (Kp) en el ST.

#### Densidad y Peso específico

La *densidad absoluta* ( $\rho$ ) de un cuerpo se define como la relación entre su masa ( $m$ ) y el volumen ( $V$ ) que ocupa, es decir, es la masa de la unidad de volumen:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

En el SI la densidad se mide en  $\text{Kg}/\text{m}^3$ , en  $\text{g}/\text{cm}^3$  en el CGS y en  $\text{UTM}/\text{m}^3$  en el ST.

Por regla general, la densidad varía para una misma sustancia líquida en función de la temperatura (a más temperatura menor densidad) y de la presión (a más presión más densidad). Efectivamente, un aumento de temperatura implica un aumento de volumen por dilatación, y un aumento de presión, una disminución de volumen por compresión, mientras que en ambos casos la masa permanece constante.

Con frecuencia se considera como densidad del agua  $1000 \text{ kg/m}^3$  (SI) o  $1 \text{ g/cm}^3$  (CGS).

El *peso específico absoluto* ( $\gamma$ ) de un cuerpo se define como la relación entre su peso ( $p$ ) y el volumen ( $V$ ) que ocupa, es decir, es el peso de la unidad de volumen:

$$\gamma = \frac{p}{V} = \frac{m \cdot g}{V}$$

Sus unidades son:  $\text{N/m}^3$  en el SI,  $\text{Dn/cm}^3$  en el CGS y  $\text{Kg/m}^3$  en el ST. Considerando la aceleración de la gravedad  $g=9.8 \text{ m/s}^2$ , puede tomarse para el agua  $\gamma_{\text{Agua}} = 1000 \text{ kg - peso/m}^3$  ó  $102 \text{ Nw/m}^3$ .

El peso específico varía con la temperatura y la presión de forma similar a la descrita para la densidad. Ambas características están relacionadas de la siguiente manera:

$$\text{Como } \gamma = \frac{m \cdot g}{V} \text{ y } \rho = \frac{m}{V} \rightarrow \gamma = \rho \cdot g$$

$$p = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g = \gamma \cdot V$$

El *peso específico relativo* ( $\delta$ ) es el peso específico de una sustancia respecto del agua, por lo que es adimensional. La *densidad relativa* también viene referida a la densidad del agua.

$$\delta = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{agua}}} \quad \rho_{\text{relativa}} = \frac{\rho}{\rho_{\text{agua}}}$$

### Presión: atmosférica, relativa y absoluta

La *presión* es una fuerza normal ejercida sobre un cuerpo por unidad de superficie. Se mide en Pascales (SI), siendo  $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$ .

La *presión atmosférica* sobre un punto se define como el peso de la columna de aire, de base unidad, que gravita sobre dicho punto. Se mide con el *barómetro*, por lo que la presión atmosférica también se denomina *presión barométrica*.

$$\text{Presión que ejerce un líquido} = \frac{\text{Peso}}{\text{s}} = \frac{\gamma \cdot v}{\text{s}} = \frac{\gamma \cdot s \cdot h}{\text{s}} = \gamma \cdot h$$

$$\text{Presión} = \gamma \cdot h$$

Esta ecuación, fundamental en Hidráulica, representa la presión ejercida por una columna de líquido de altura  $h$ , peso específico  $\gamma$  y base unidad. Permite medir la presión mediante la *altura de presión*, que correspondería a la altura de una columna de agua que da lugar a una presión equivalente a la que soporta un punto determinado.

$$h = \frac{P}{\gamma}$$

Evidentemente, una misma presión  $P$  estará representada por distintas alturas según el líquido considerado, tanto mayores cuanto menor sea  $\gamma$ .

El valor de la presión atmosférica en condiciones normales y a nivel del mar es el equivalente a una columna de mercurio de 760 mm, y se denomina atmósfera física.

La *presión relativa* es la presión que existe sobre la presión atmosférica normal, es decir, tomando como origen de presiones la presión barométrica. Se mide con el *manómetro*, por lo que la presión relativa también se conoce como *presión manométrica*.

La *presión absoluta* que existe en un punto es la suma de las dos anteriores, es decir, es el valor de presión medido sobre el vacío o cero absoluto:

$$\text{Presión absoluta} = \text{Presión barométrica} + \text{Presión manométrica}$$

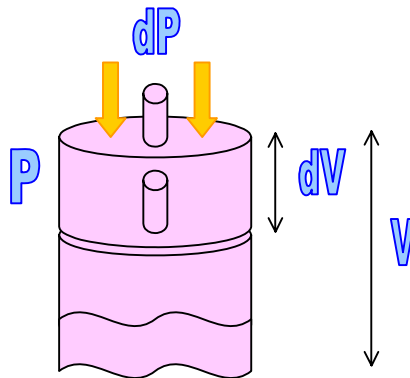
En ingeniería hidráulica se acostumbra a trabajar con presiones relativas o manométricas, a medir la presión en metros de columna de agua (m.c.a.) y a aplicar las equivalencias con la atmósfera técnica o métrica, ya que la atmósfera física proporciona valores no muy cómodos de manejar.

$$1 \text{ atm física} \approx 1.033 \text{ kg/cm}^2 = 1.013 \text{ bar} = 1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 10.33 \text{ m.c.a.} = 760 \text{ mm Hg}$$

$$1 \text{ atm técnica} \approx 1 \text{ kg/cm}^2 = 1 \text{ bar} = 98100 \text{ Pa} = 10 \text{ m.c.a.} = 100000 \text{ kg/m}^2$$

#### 4. Compresibilidad de un líquido

Los líquidos son compresibles, aunque para su estudio se considera que son incompresibles. En realidad, puede despreciarse su compresibilidad, ya que es baja en comparación con la que presentan los otros fluidos, los gases.



Consideramos un tubo cilíndrico lleno de líquido a una presión “p”, en reposo, y lo comprimimos apretando un émbolo colocado en su extremo, como representa la figura.

La disminución de volumen respecto a la variación de presión aplicada será:

$$\left( -\frac{dv}{v} \right) \cdot K = dp$$
$$K = \frac{dp}{-\frac{dv}{v}}$$

Siendo  $K$  el *coeficiente volumétrico de elasticidad*.

El *módulo volumétrico de compresibilidad* de un líquido ( $c$ ) se define como la inversa del coeficiente volumétrico de elasticidad.

$$c = \frac{1}{K}$$

$K = 0 \rightarrow$  Líquidos perfectos

$K = \infty \rightarrow$  Gases

$K_{H_2O} = 2100 \text{ kg/cm}^2$

## 5. Tensión superficial

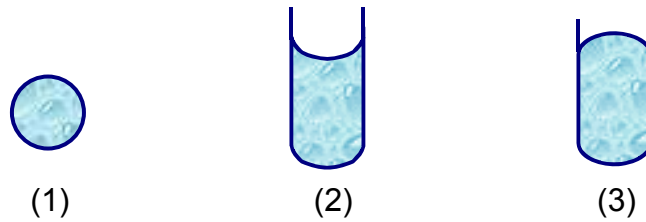
La tensión superficial de un líquido se define como el trabajo que hay que aplicar para aumentar en una unidad su superficie libre. Se debe a las fuerzas de atracción que se ejercen entre las moléculas de la superficie libre de un líquido, que son debidas a la *cohesión* entre sus moléculas y a la *adhesión* entre las moléculas del líquido y las paredes del recipiente.

Los casos que se pueden presentar en función del balance entre las fuerzas de cohesión y adhesión son los siguientes:

1) Cohesión > Adhesión con el aire: El líquido libre adquiere una forma determinada sin necesidad de recipiente. Es el caso de las gotas de agua, que son esféricas, y es válido para volúmenes pequeños.

2) Adhesión > Cohesión: Se forma un menisco cóncavo al elevarse el líquido en contacto con el contorno sólido. Se dice que el líquido moja el recipiente, y es el caso del agua en un tubo de vidrio.

3) Adhesión < Cohesión: Se forma un menisco descendente, dando a la superficie del líquido aspecto convexo. En este caso se dice que el líquido no moja el recipiente, como sucede, por ejemplo, entre el mercurio y el vidrio.



En Hidráulica la tensión superficial no se tiene en cuenta por su poca importancia frente a las cargas hidrodinámicas, que son mucho mayores. Además, este fenómeno solo tiene importancia en conductos de pequeño diámetro (capilares), inusuales en la mayoría de las aplicaciones hidráulicas.

## 6. Viscosidad

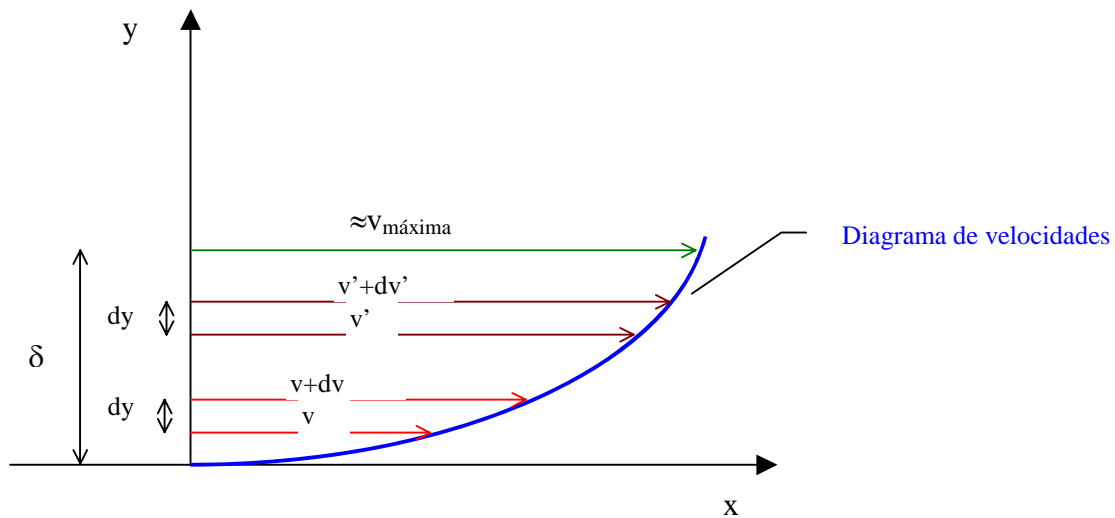
Los fluidos no pueden considerarse siempre como perfectos debido a su viscosidad. Se considera la lámina de fluido compuesta por infinitas capas paralelas, y la experiencia muestra que los fluidos oponen resistencia a ser deformados, es decir, a que cada lámina deslice sobre sus inmediatas, ya que al moverse una porción de fluido respecto a otra se originan fuerzas tangenciales que en algunos casos no pueden despreciarse. Se dice entonces que el líquido es *viscoso* y el fenómeno se denomina *viscosidad*.

La viscosidad expresa la resistencia del líquido a dejarse cortar o separar. Por ejemplo, un avión o un submarino se mueven con esfuerzo porque han de deformar, respectivamente, el aire o el agua que los envuelve.

*Se llama viscosidad dinámica o simplemente viscosidad ( $\mu$ ) de un fluido a la resistencia que éste opone a su deformación, o dicho de otro modo, a que las láminas de fluido deslicen entre sus inmediatas.*

Para una misma deformación, distintos fluidos oponen resistencias diferentes, es decir, *la viscosidad es una propiedad de los mismos.*

La figura representa un fluido en movimiento. La lámina de fluido en contacto con el contorno sólido queda pegada a él y su velocidad relativa es nula. A cierta distancia  $\delta$ , otra lámina se mueve prácticamente con la velocidad máxima. Las infinitas velocidades de las láminas intermedias varían entre ambos valores extremos, existiendo deslizamiento de unas capas sobre otras.



El diagrama o perfil de velocidades, distinto en cada caso, es tal que, en relación a la misma separación  $dy$ , la variación de velocidad entre dos capas próximas al contorno deslizan más, es decir  $\frac{dv}{dy} > \frac{dv'}{dy}$ . Esta derivada, llamada *gradiente de velocidad*, es máxima en la pared y nula a partir de la distancia  $\delta$  del contorno.

Supongamos dos placas paralelas que contienen entre ellas una capa muy delgada de líquido. Para que una placa se deslice sobre la otra, cortando o desgarrando la lámina de líquido interpuesta, hay que aplicar una fuerza tangencial o esfuerzo cortante ( $F$ ) que es igual a la resistencia por unidad de superficie que aparece entre las dos láminas deslizantes. El valor de esta fuerza es directamente proporcional a la superficie de contacto ( $s$ ) y al gradiente de velocidad  $\left(\frac{dv}{dy}\right)$ , es decir:

$$F \approx s \cdot \frac{dv}{dy}$$

El esfuerzo tangencial de rozamiento entre las capas (las cercanas a las paredes no se mueven y conforme se alejan de ellas la velocidad aumenta) es directamente proporcional a la diferencia de sus velocidades e inversamente proporcional a su separación.

También significa que fuera de la capa de espesor  $\delta$  el fluido se comporta como no viscoso, ya que  $F$  será nula al serlo  $\left(\frac{dv}{dy}\right)$ .

Esta capa de espesor  $\delta$  fue descubierta por Ludwig Prandtl (1875-1953) y se conoce como *capa límite*, pudiendo medir desde unas pocas micras a varios centímetros, e incluso metros, según los casos. Se estudiará en el tema 6.

El valor de la fuerza  $F$  es:

$$F = \mu \cdot s \cdot \frac{v}{y} \quad \text{Fórmula de Newton para la viscosidad}$$

$\mu$  : viscosidad del líquido, coeficiente de viscosidad, viscosidad absoluta, viscosidad dinámica

$s$ : superficie de cada una de las placas

$v$  : velocidad de una placa respecto a la otra

$y$  : espesor de la lámina líquida

Si suponemos la lámina de líquido compuesta por infinitas capas paralelas, resultará que si una placa está en reposo y la otra en movimiento, la capa de líquido en contacto con la placa en reposo también lo estará, y la capa en contacto con la capa en movimiento tendrá su mismo movimiento, y las capas intermedias tendrán velocidades proporcionales a su distancia a la placa en reposo.

Se utiliza también el *coeficiente de viscosidad cinemática* ( $\nu$ ), definido como el cociente entre la viscosidad absoluta ( $\mu$ ) y la densidad del líquido ( $\rho$ ):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu \cdot g}{\gamma} \quad \text{siendo } \gamma \text{ el peso específico del líquido } (\gamma = \rho \cdot g).$$

Unidades:

Sistema CGS (actualmente en desuso):

$$\mu = \frac{F \cdot y}{s \cdot v} = \frac{g}{cm^2} \cdot \frac{cm}{cm/s} = \frac{g \cdot s}{cm^2} \quad (\text{Poise})$$

$$v = \frac{\mu}{\rho} = \frac{g \cdot s/cm^2}{g \cdot s^2/cm^4} = \frac{cm^2}{s} \quad [L^2 \cdot T^{-1}] \quad (\text{Stoke})$$

Sistema Técnico:  $\mu = \frac{\mu_{CGS}}{98.1}$

$$v = v_{CGS} \cdot 10^{-4}$$

Sistema Internacional:  $\mu = \frac{kg}{m \cdot s} = 10 \text{ Poise}$

$$v = \frac{m^2}{s} = 10^4 \text{ Stoke}$$

El valor de la viscosidad es función de la temperatura, de forma que si aumenta la temperatura disminuye la viscosidad. La tabla 1.1 muestra el valor de la viscosidad cinemática del agua a diferentes temperaturas.

**Tabla 1.1. Viscosidad cinemática del agua ( $\nu$ ) a diferentes temperaturas (T)**

T (°C)	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	T (°C)	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)
4	$1.568 \cdot 10^{-6}$	30	$0.803 \cdot 10^{-6}$
5	$1.519 \cdot 10^{-6}$	40	$0.659 \cdot 10^{-6}$
10	$1.310 \cdot 10^{-6}$	50	$0.556 \cdot 10^{-6}$
15	$1.146 \cdot 10^{-6}$	60	$0.478 \cdot 10^{-6}$
20	$1.011 \cdot 10^{-6}$	70	$0.416 \cdot 10^{-6}$

Para temperaturas comprendidas entre 10 y 40° C, la viscosidad cinemática puede calcularse aproximadamente mediante la ecuación:

$$v = \frac{40}{t + 20} \cdot 10^{-6} \quad \text{con } t \text{ (°C) y } v \text{ (m}^2\text{/s)}$$

Para cálculo de riegos se consideran temperaturas comprendidas entre 15 y 20° C.

## 7. Tensión de vapor. Cavitación

Las moléculas de los líquidos se mueven en todas las direcciones y con todas las velocidades posibles. Solo las moléculas que posean una energía cinética mayor que las fuerzas de atracción podrán escapar del líquido, produciéndose su evaporación. Las moléculas escapadas quedan sobre la superficie libre del líquido y contribuyen a aumentar la presión del gas exterior con una presión parcial que se denomina tensión o presión de vapor. En un líquido que se encuentre en un recipiente cerrado con espacio libre sobre su superficie, esta tensión de vapor irá aumentando hasta que el número de moléculas que entran en el líquido se iguale con las que salen, estableciéndose un equilibrio entre el líquido y su tensión de vapor, que se conoce como tensión máxima de saturación (tms). La tensión máxima de saturación varía en función de la naturaleza del líquido y de la temperatura (a mayor temperatura mayor tensión de vapor).

Cuanto menor sea la presión absoluta a que está sometido un líquido menor será la temperatura a la que se produce su vaporización, es decir, su temperatura de saturación, y viceversa: cuanto menor sea la temperatura del líquido menor será la presión de vaporización. Por ejemplo, a la presión atmosférica normal (1 atm, 10 mca) el agua hierve a 100°C, pero si se somete el agua a la presión absoluta de 0.01 atm (0.1 mca), herviría a 7°C.

La tabla 1.2 muestra los valores de la tensión de vapor del agua a distintas temperaturas.

**Tabla 1.2. Tensión de vapor del agua,  $P_{v/\gamma}$ , (mca-absoluta) en función de la temperatura (T)**

T (°C)	$P_{v/\gamma}$	T (°C)	$P_{v/\gamma}$
0	0.062	40	0.753
4	0.083	50	1.258
10	0.125	60	2.033
20	0.239	80	4.831
30	0.433	100	10.333

Si en algún lugar de la conducción la presión absoluta es menor que la tensión de vapor a esa temperatura, el líquido hierve. Si posteriormente la presión absoluta aumenta hasta ser mayor que la tensión de vapor, el líquido se condensa.

La sucesión continuada de estos dos fenómenos producen vibraciones, contracciones y golpeteos que producen la corrosión de la conducción por cavitación, una de las mayores causas de avería en las instalaciones de bombeo. Se aprecian vibraciones en los manómetros y los daños se producen donde el gas pasa a líquido, como si se hubieran dado martillazos. La vena líquida disminuye al llevar una parte de gas, con lo que la sección disminuye a efectos prácticos, y con ella el caudal transportado.