

Ensayos Físico-Químicos

TEMA 6

DENSIDAD, VISCOSIDAD Y TENSIÓN SUPERFICIAL

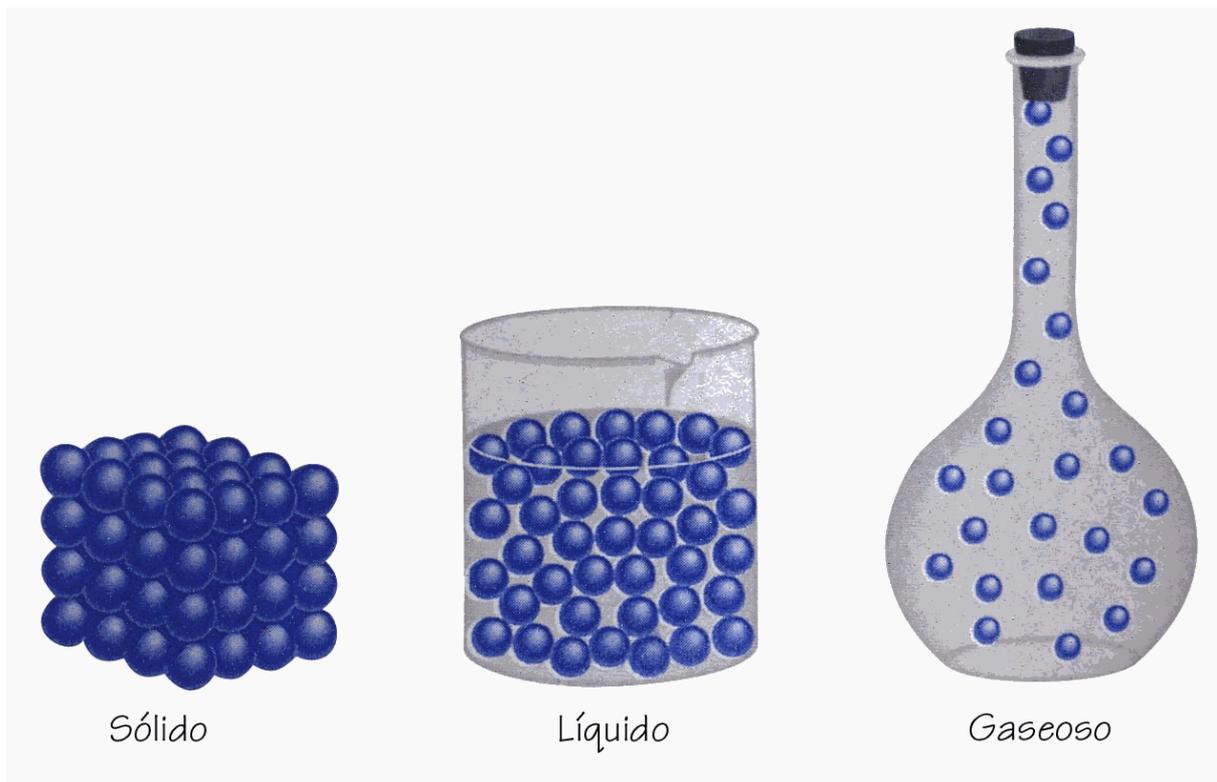
*Ciclo Formativo: Laboratorio de Análisis
y Control de Calidad*

MATERIA Y SUS PROPIEDADES

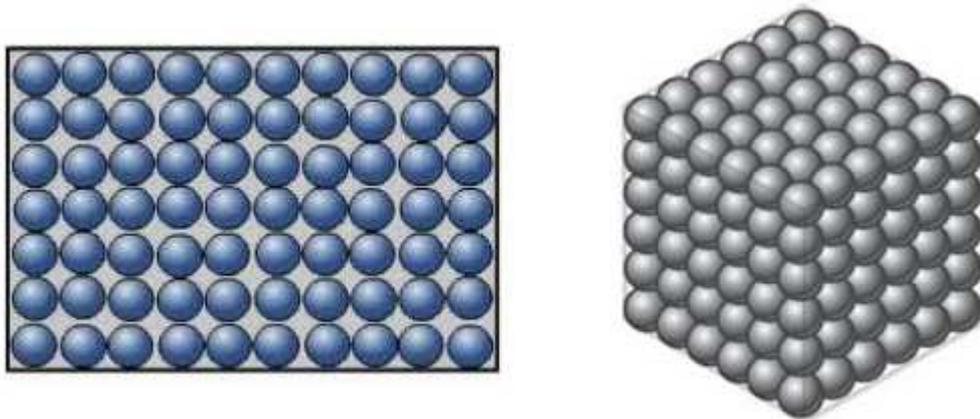
1. ESTADOS DE AGREGACIÓN DE LA MATERIA.

La materia se presenta en **tres estados** o **formas de agregación**: *sólido*, *líquido* y *gaseoso*. Dadas las condiciones existentes en la superficie terrestre, sólo algunas sustancias pueden hallarse de modo natural en los tres estados, tal es el caso del agua.

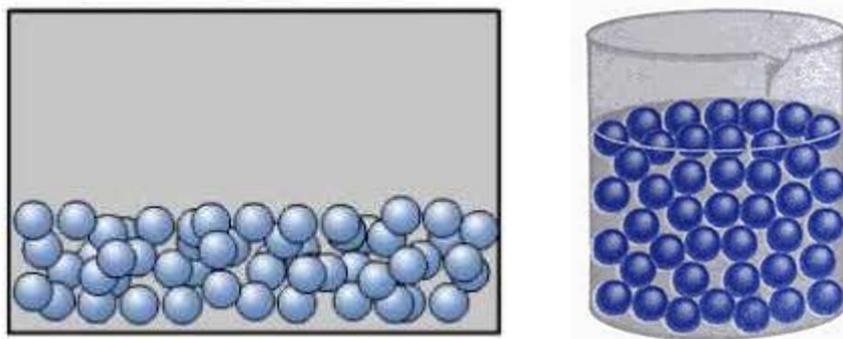
La mayoría de sustancias se presentan en un estado concreto. Así, los metales o las sustancias que constituyen los minerales se encuentran en estado sólido y el oxígeno o el CO₂ en estado gaseoso:



- **Los sólidos:** tienen forma y volumen constantes. Se caracterizan por la rigidez y regularidad de sus estructuras.



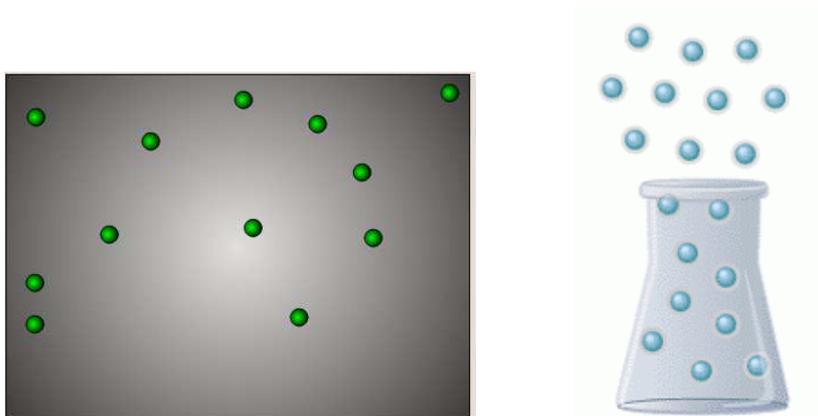
- **Los líquidos:** no tienen forma fija pero sí volumen. La variabilidad de forma y el presentar unas propiedades muy específicas son características de los líquidos.



Los líquidos, al igual que los sólidos, tienen volumen constante. En los líquidos las partículas están unidas por unas fuerzas de atracción menores que en los sólidos, por esta razón las partículas de un líquido pueden trasladarse con libertad. El número de partículas por unidad de volumen es muy alto, por ello son muy frecuentes las colisiones y fricciones entre ellas. Así se explica que los líquidos no tengan forma fija y adopten la forma del recipiente que los contiene. También se explican propiedades como la fluidez o la viscosidad.

En los líquidos el movimiento es desordenado, pero existen asociaciones de varias partículas que, como si fueran una, se mueven al unísono. Al aumentar la temperatura aumenta la movilidad de las partículas (su energía). Los gases, igual que los líquidos, no tienen forma fija pero, a diferencia de éstos, su volumen tampoco es fijo. También son fluidos, como los líquidos.

- **Los gases:** no tienen forma ni volumen fijos. En ellos es muy característica la gran variación de volumen que experimentan al cambiar las condiciones de temperatura y presión.



En los gases, las fuerzas que mantienen unidas las partículas son muy pequeñas. En un gas el número de partículas por unidad de volumen es también muy pequeño. Las partículas se mueven de forma desordenada, con choques entre ellas y con las paredes del recipiente que los contiene. Esto explica las propiedades de expansibilidad y compresibilidad que presentan los gases: sus partículas se mueven libremente, de modo que ocupan todo el espacio disponible.

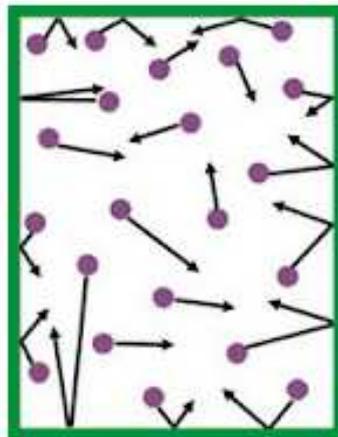
La compresibilidad tiene un límite, si se reduce mucho el volumen en que se encuentra confinado un gas éste pasará a estado líquido.

Al aumentar la temperatura las partículas se mueven más deprisa y chocan con más energía contra las paredes del recipiente, por lo que aumenta la presión.

2. LA TEORÍA CINÉTICO-MOLECULAR.

Para explicar las propiedades de los gases y su comportamiento, Clausius, Maxwell y Boltzmann desarrollaron la **teoría cinético-molecular**, que puede resumirse en tres postulados:

- 1) **Partículas en movimiento:** un gas consiste en un conjunto de partículas individuales en movimiento rectilíneo al azar, que chocan con las paredes del recipiente o entre ellas sin pérdida de energía.
- 2) **Volumen de las partículas:** el volumen de cada partícula individual es extremadamente pequeño comparado con el recipiente que lo contiene. El modelo representa a las partículas como si tuvieran masa, pero no volumen.
- 3) **Fuerzas entre partículas:** el movimiento y la disposición de las partículas queda determinado por dos tipos de fuerzas: unas **atractivas** o de cohesión que tienden a mantener unidas las partículas; otras **repulsivas** o de dispersión que tienden a alejarlas.



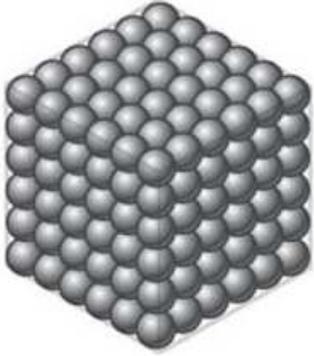
Este modelo es aplicable también a líquidos y sólidos con una ligera adaptación a las características de cada estado.

- **En los líquidos:** las fuerzas de atracción entre partículas son lo bastante fuertes para mantenerlas juntas, por eso los líquidos son mucho más densos y menos compresibles que los gases. Aunque tienen un volumen definido, las fuerzas de atracción no pueden evitar que las partículas deslicen unas respecto a otras; por eso pueden verse y adoptan la forma del recipiente.



- Las partículas están muy próximas aunque hay huecos entre ellas.
- Las partículas se mantienen a distancias similares a las de los sólidos, pero unidas por fuerzas más débiles, lo que justifica su movilidad. Esto permite el deslizamiento de unas partículas sobre otras y que se adapten al recipiente que los contiene.

- **En los sólidos:** las fuerzas de atracción son tan intensas que fijan las partículas a sus posiciones; por eso los sólidos son rígidos. Los que poseen estructuras muy ordenadas son **cristales**; y los que poseen estructuras desordenadas se denominan **amorfos**.

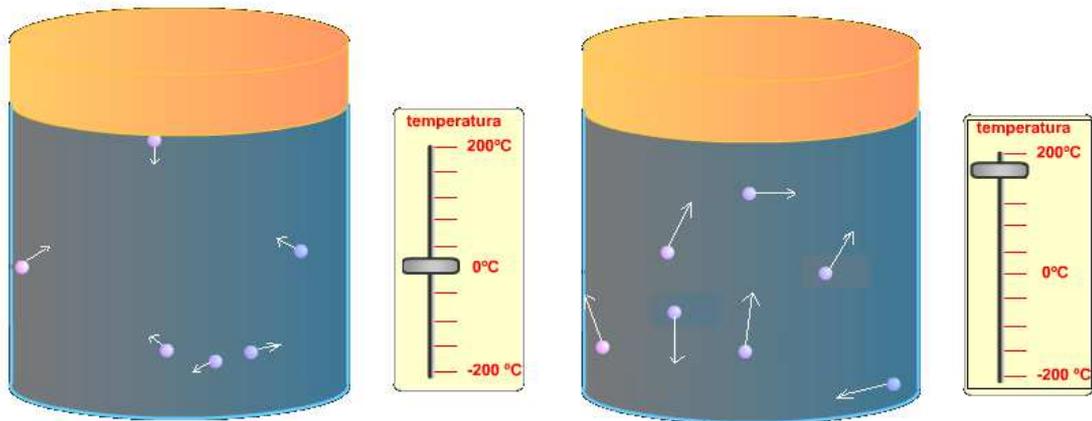


- Modelo de un sólido cristalino: las partículas están ordenadas y muy próximas, aunque hay huecos entre ellas.
- Las fuerzas mantienen unidas a las partículas en posiciones fijas, aunque vibran en torno a esas posiciones.

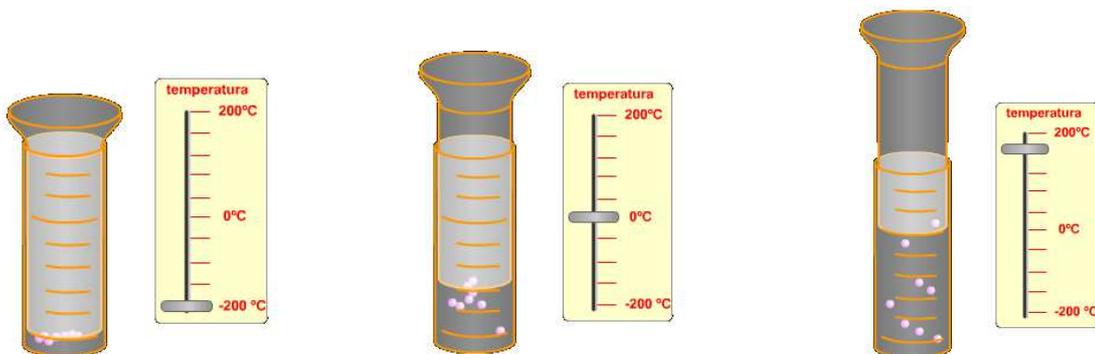
2.1. Teoría cinética y temperatura:

Las moléculas de un gas se mueven cada una con una velocidad, pero la velocidad media de todas ellas es proporcional a la temperatura.

La temperatura de un gas es una medida de la velocidad media de sus moléculas.



Al aumentar la temperatura aumenta la velocidad de las partículas y la energía con la que chocan contra las paredes del recipiente. La velocidad de las moléculas de gas y su energía es menor a una temperatura de 0°C y es más alta cuando aumentamos la temperatura a casi 200 °C.

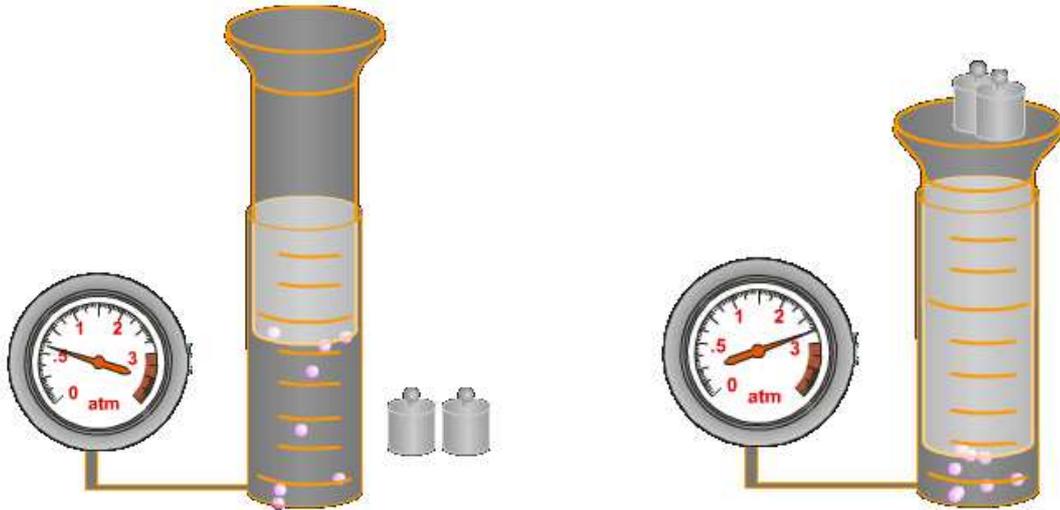


El volumen que ocupa el gas es mayor al aumentar la temperatura. Las moléculas chocan con más energía contra las paredes del recipiente.

2.2. Teoría cinética y presión:

Variación de volumen y temperatura constante.

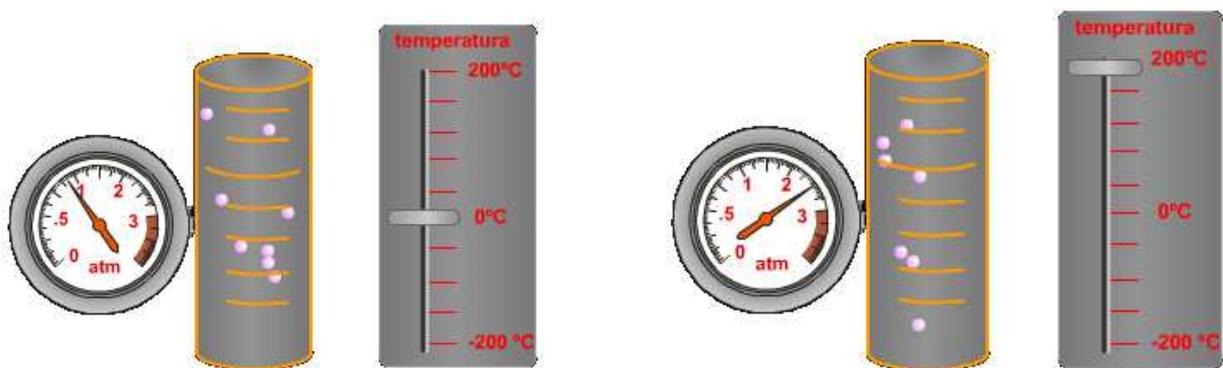
La presión que ejerce un gas es consecuencia de los choques de sus moléculas con las paredes del recipiente que los contiene.



Si disminuye el volumen ocupado por un gas, manteniendo constante la temperatura, las moléculas disponen de menos espacio para moverse y chocan con mayor frecuencia con las paredes. Como consecuencia de ello aumenta la presión.

Variación de temperatura y volumen constante.

Cuando aumenta la temperatura de un gas contenido en un recipiente, manteniendo el volumen constante, sus moléculas aumentan su velocidad media y chocan con más intensidad sobre las paredes del recipiente aumentando la presión.



Conclusiones:

La teoría cinético molecular explica muchos de los comportamientos y propiedades de los fluidos: régimen de movimiento por tuberías, presión, densidad, viscosidad,...

PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LA MATERIA

Las propiedades de los sistemas materiales pueden ser:

- **Propiedades generales:** como la masa y el volumen. Todos los sistemas las poseen pero no aportan información sobre el tipo de sustancia que constituye el sistema.
 - **La masa** es una propiedad de los sistemas materiales que mide la cantidad de materia que poseen. Se mide con una balanza y se expresa en Kg.
 - **El volumen** es una propiedad de los sistemas materiales que nos informa de la cantidad de espacio que ocupan. La unidad de volumen es el m³.
- **Propiedades específicas:** que dependen de la clase de sustancia que constituye el sistema, pero no de su cantidad ni de su forma.

El color, el brillo, la dureza, la conductividad, la densidad o la temperatura de fusión son propiedades específicas y entre todas permiten identificar de qué sustancia se trata.

Propiedades físico-químicas:

Las sustancias se caracterizan por sus propiedades y por su composición. El color, punto de fusión y punto de ebullición son propiedades físicas. Una propiedad física se puede medir y observar sin que cambie la composición o identidad de la sustancia: por ejemplo, es posible determinar el punto de fusión del hielo calentando un trozo de él y registrando la temperatura a la cual se transforma en agua. El agua difiere del hielo solo en apariencia, no en su composición, por lo que este cambio es físico; es posible congelar el agua para recuperar el hielo original. Por tanto, el punto de fusión de una sustancia es una propiedad física, de igual manera, cuando se dice que el helio gaseoso es más ligero que el aire, se hace referencia a una propiedad física.

Ejemplo: propiedades físicas del agua:

- a) Estado físico: sólida, líquida y gaseosa.
- b) Color: incolora.
- c) Sabor: sin sabor.
- d) Densidad: 1 g/cm³ a 4 °C.
- e) Punto de congelación: 0 °C.
- f) Punto de ebullición: 100 °C.
- g) Viscosidad: 1002 μP·s
- h) Tensión superficial: 0,0728 N/m.

Por otro lado el enunciado "el hidrógeno gaseoso se quema en presencia de oxígeno gaseoso para formar agua" describe una propiedad química del hidrógeno, ya que para observar esta propiedad se debe efectuar un cambio químico, en este caso la combustión. Después del cambio, los gases originales, hidrógeno y oxígeno, habrán desaparecido y quedará una sustancia química distinta, el agua. No es posible recuperar el hidrógeno del agua por medio de un cambio físico como la ebullición o la congelación. Este cambio es un cambio químico.

Cuando nos referimos a propiedades fisicoquímicas de las sustancias nos estamos refiriendo a propiedades que no suponen cambios de composición. En este tema estudiaremos algunas de estas propiedades fisicoquímicas de las sustancias y su medida:

Agrupando estas determinaciones según el estado físico del producto, son las siguientes:

| | |
|--------------------|--|
| Productos sólidos | densidad punto de fusión solubilidad en distintos disolventes contenido de humedad estructura cristalina resistencia mecánica propiedades magnéticas... |
| Productos líquidos | concentración densidad viscosidad tensión superficial punto de ebullición punto de congelación calores latentes acidez o alcalinidad índice de refracción índice de polarización... |
| Productos gaseosos | composición densidad humedad relativa poder de absorción... |

La realización práctica de la mayoría de estas determinaciones está normalizada, así como la forma en que deben expresarse los resultados, facilitando su estudio comparativo y estadístico.

En el tema presente se exponen con algún detalle las siguientes determinaciones:

- Densidad.
- Viscosidad.
- Tensión superficial.

Para poder estudiar estas propiedades necesitamos conocer información sobre los fluidos y su comportamiento como veremos más adelante.

FLUIDOS

1. INTRODUCCIÓN.

Concepto de fluido: los fluidos son una forma de agregación de la materia caracterizada por no tener forma propia. Las moléculas de un sólido están rígidamente unidas, mientras que las de un fluido pueden deslizarse entre sí venciendo una pequeña fuerza de rozamiento (viscosidad) entre moléculas o capas adyacentes. Esta fuerza de rozamiento la consideramos nula en el caso de los fluidos ideales.

Dentro de los fluidos distinguimos entre **líquidos y gases**. Estos últimos además de carecer de forma propia también carecen de volumen propio y son extraordinariamente compresibles, por lo que la densidad, ρ , no es constante.

$$\text{Líquidos: } \rho = \frac{m}{V} = cte \quad \rightarrow \quad \text{Gases: } \rho = \frac{m}{V} \neq cte$$

2. PRESIÓN DE LOS FLUIDOS.

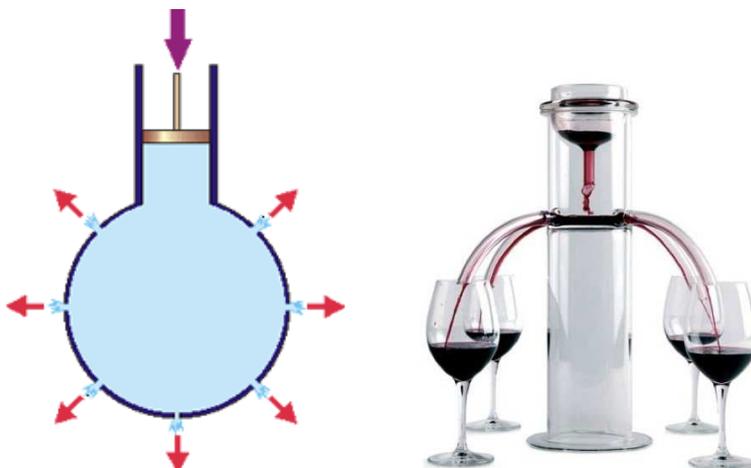
Cuando sumergimos un cuerpo en un fluido, las moléculas del fluido actúan sobre el cuerpo dando lugar a una fuerza, que si la referimos a una superficie nos dará la presión que ejerce el fluido sobre el cuerpo.

$$\text{Presión} = \frac{\text{fuerza}}{\text{superficie}} = \frac{F}{S}$$

La unidad en el S.I. es el Pascal ($\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$)

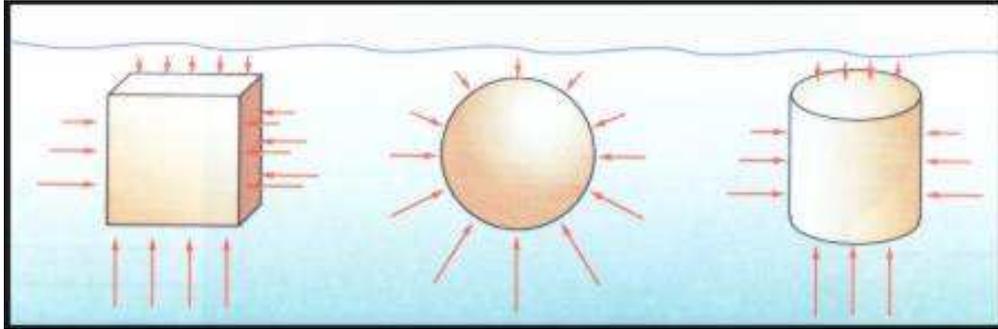
Principio de Pascal:

Si en un punto de un fluido se ejerce una presión, ésta se transmite de forma instantánea y con igual intensidad en todas las direcciones, tal como se observa en las figuras:

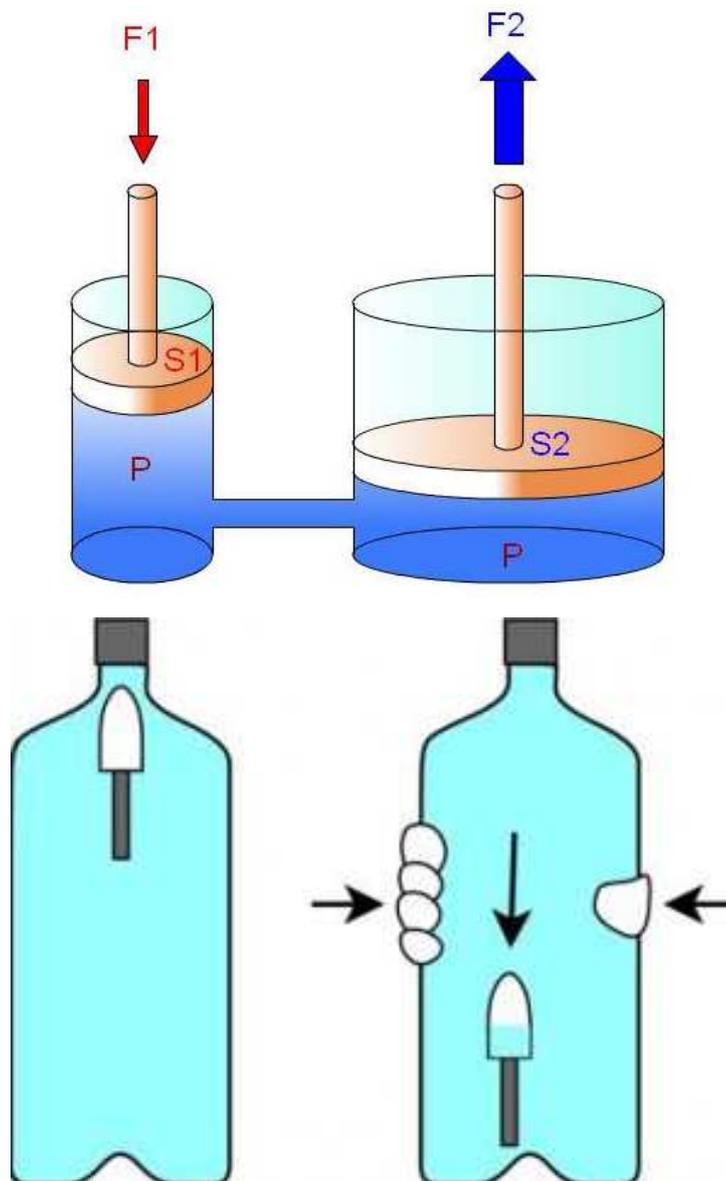


"El incremento de presión aplicado a una superficie de un fluido incompresible, un líquido contenido en un recipiente, se transmite con el mismo valor a cada una de las partes del mismo"

Los fluidos (líquidos y gases) ejercen sobre las paredes del recipiente que los contienen y sobre los cuerpos contenidos en su seno fuerzas que actúan siempre perpendicularmente a las superficies.



Aplicaciones del principio de Pascal:

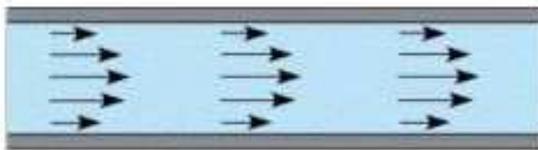


3. RÉGIMENES DE MOVIMIENTO DE LOS FLUIDOS.

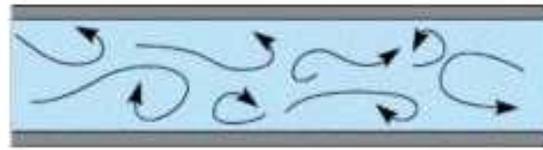
En un fluido en movimiento, cada una de sus partículas tiene en un determinado instante su propia velocidad, que puede ser constante o variar con el tiempo. Los fluidos reales presentan fuerzas de rozamiento entre moléculas (fuerzas viscosas).

Según sea el movimiento del fluido podemos clasificarlos en distintos regímenes:

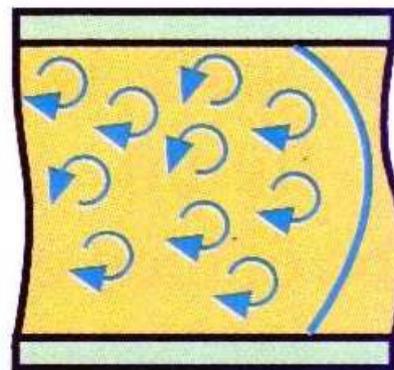
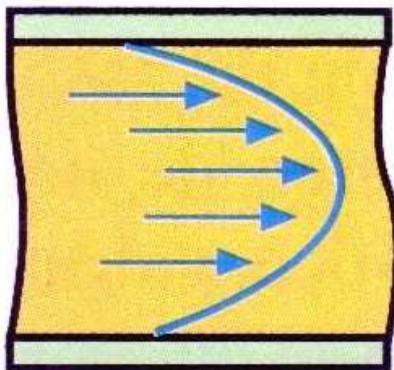
- Régimen de movimiento **estacionario**: la velocidad de la partícula en una conducción depende sólo de la posición.
- Régimen de movimiento **no estacionario**: la velocidad de la partícula depende de la posición y del tiempo.
- Régimen de movimiento **laminar**: las líneas de corriente (trayectorias de las partículas en régimen estacionario) no se entrecruzan, es decir, se deslizan unas sobre otras como estratos independientes.
- Régimen de movimiento **turbulento**: las líneas de corriente se entrecruzan dando lugar a turbulencias o remolinos independientes.
- Régimen de movimiento **no viscoso**: se prescinde de la fricción entre moléculas.
- Régimen de movimiento **viscoso**: es el caso real que tiene en cuenta el rozamiento viscoso entre moléculas.



laminar



turbulento

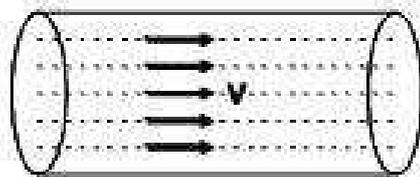


4. FLUIDOS IDEALES.

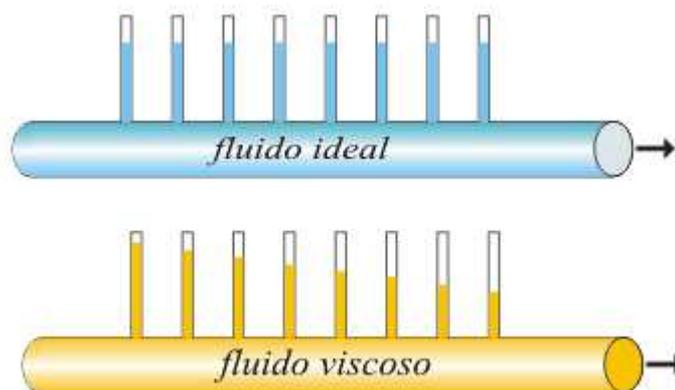
Cuando estudiamos los fluidos para conocer de forma general su comportamiento podemos estudiarlos considerándolos como fluidos ideales o perfectos, que son aquellas sustancias que no oponen ninguna resistencia a los cambios de forma. Estos fluidos ideales no experimentan ninguna variación de su energía potencial de forma, carecen de rozamiento cuando una capa se mueve con respecto a otra (rozamiento que, en los líquidos recibe el nombre de viscosidad) y no cambian de volumen bajo la acción de fuerzas exteriores, podemos decir que son incompresibles.

En síntesis, las condiciones bajo las cuales se analizará el movimiento de los líquidos ideales son las siguientes:

1. Son incompresibles, por lo tanto su densidad será constante.
2. No tienen rozamiento interno o sea no tienen viscosidad
3. El flujo es laminar por lo cual se forman líneas independientes entre sí, en donde cada partícula del fluido se desplaza siguiendo su trayectoria, sin cruzarse en la trayectoria de otra partícula. De lo contrario se denomina flujo "turbulento" en cuyo caso las líneas se entremezclan (como por ejemplo, en la estela de un barco), formándose torbellinos. El flujo en muchas tuberías a baja velocidad es prácticamente un flujo laminar en todo su recorrido.
4. Régimen estacionario o permanente lo que significa que, en cada punto, la presión y la velocidad son constantes (no varían al transcurrir el tiempo).

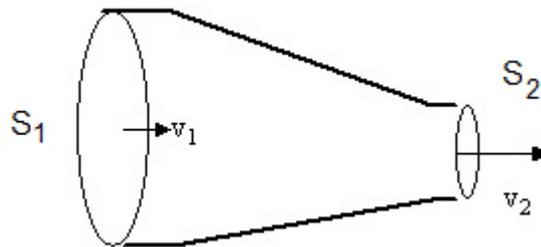


Flujo laminar en una tubería de sección constante por la cual circula un líquido ideal. Las líneas punteadas representan las llamadas líneas de corriente. En el flujo laminar estas líneas no se cruzan y para una misma sección la velocidad de las partículas es la misma.



5. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.

Consideremos un líquido que se introduce por una conducción por la sección 1 de área A_1 . Todas las partículas líquidas que atraviesan dicha sección se trasladan con una velocidad v_1 . Cuando, más adelante, atraviesan otra sección, 2, de área A_2 , lo hacen con una velocidad v_2 . Como en el movimiento entre secciones no existen ni aporte ni pérdida de líquido y además el líquido es incompresible, el caudal que entra por la sección 1 debe ser igual al caudal que sale por la sección 2, podemos decir:



El caudal será el mismo en cada sección de la conducción:

$$Q_1 = Q_2 \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

Por lo que:

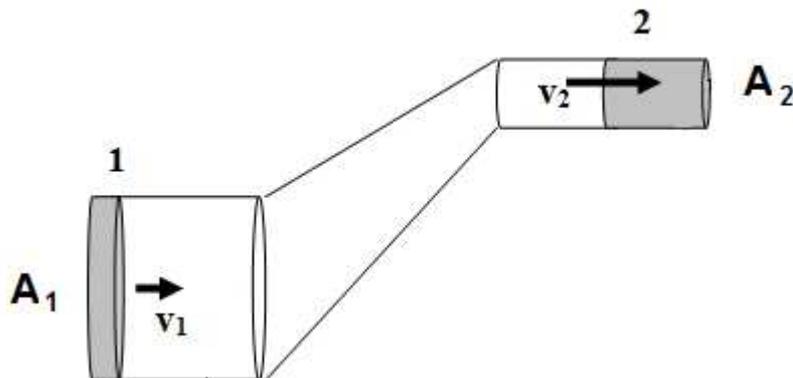
$$v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2$$

Así:

$$\boxed{S \cdot v = \text{cte} \rightarrow S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2}$$

La expresión anterior es conocida como **ECUACIÓN DE CONTINUIDAD** para el movimiento de líquidos en régimen estacionario.

“La velocidad de un líquido que pasa por una conducción es, en cada sección, inversamente proporcional al área de esa sección”.



Se observa por lo tanto que en las secciones de mayor área, la velocidad del fluido es menor y viceversa. De esta manera, para un determinado caudal y siendo conocidas las secciones de la tubería, podemos determinar la velocidad con que las partículas de un fluido la atraviesan.

Esta ecuación puede también utilizarse para fluidos reales siempre que se trate como fluido incompresible y que no existan pérdidas o ganancia de fluido.

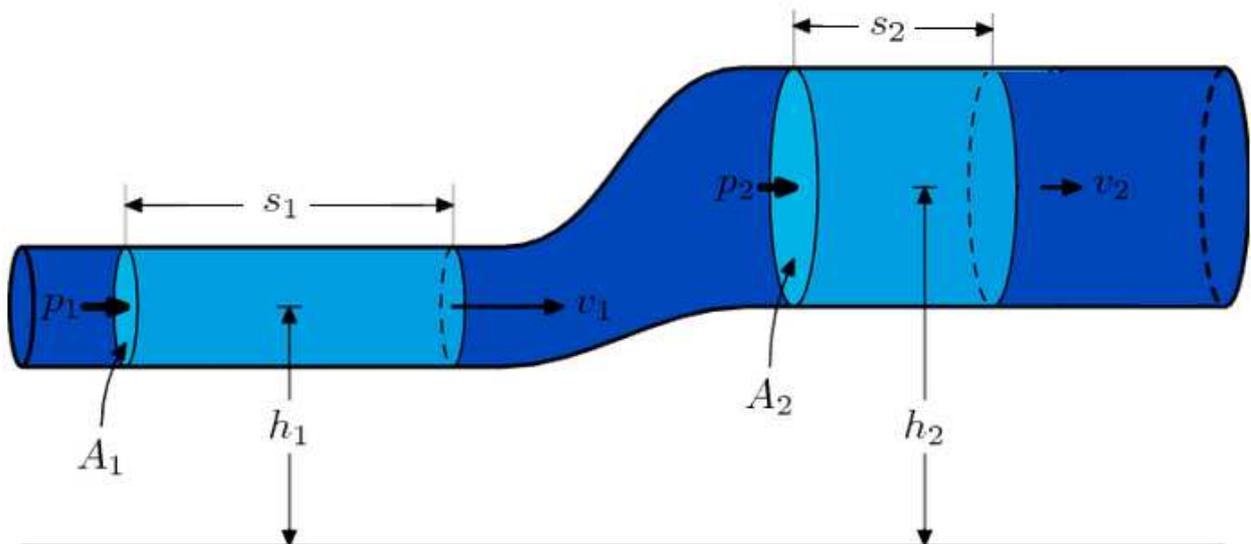
6. TEOREMA DE BERNOULLI.

El régimen de circulación de un fluido por una conducción se dice que sigue un régimen de Bernoulli cuando es estacionario, laminar y no viscoso. Es por tanto un régimen ideal.

El teorema de Bernoulli dice: *“en todo fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento), incompresible, en régimen laminar de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de todo su recorrido”*

El teorema considera los tres únicos tipos de energía que posee el fluido que pueden cambiar de un punto a otro de la conducción, pero manteniendo el valor total constante. Estos tipos son:

- Energía cinética.
- Energía potencial gravitatoria.
- Energía debida a la presión propia o manométrica.



Veamos cada una de ellas por separado:

- Energía cinética: debido a la velocidad de flujo: $E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$
- Energía potencial gravitatoria: debido a la altura del fluido: $E_p = m \cdot g \cdot h$
- Energía de flujo: debido a la presión a la que está sometido el fluido: $p \cdot V$

La energía permanece constante en cualquier punto de la conducción, así:

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot h + p \cdot V = \text{cte}$$

Donde: v = velocidad de flujo en la dirección considerada.

g = aceleración de la gravedad.

h = altura desde un punto de referencia.

p = presión a lo largo de la línea de corriente de fluido.

V = volumen de fluido

ρ = densidad del fluido

Si consideramos los puntos 1 y 2 de la conducción. La energía se mantendrá constante. Así:

$$\frac{1}{2} m \cdot v_1^2 + m \cdot g \cdot h_1 + p_1 \cdot V = \frac{1}{2} m \cdot v_2^2 + m \cdot g \cdot h_2 + p_2 \cdot V$$

Donde "m" es constante por ser un sistema cerrado y "V" también lo es al ser un fluido ideal incompresible.

Dividiendo los términos de la ecuación por "V". Obtendremos en función de la densidad "ρ". Recordar que $\rho = m/V \rightarrow$

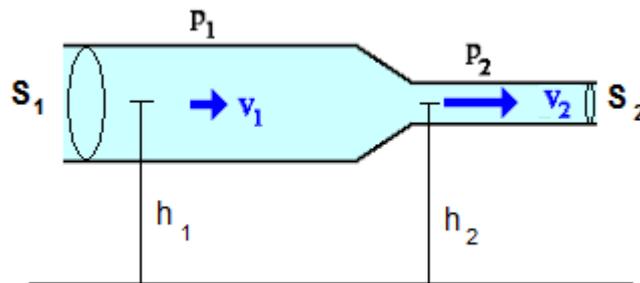
Así:
$$\frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 + p_1 = \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + p_2$$

En muchas conducciones la altura es constante con lo que podríamos simplificar la expresión a:

$$\frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + p_2$$

6.1. Aplicación del Teorema de Bernoulli. Efecto Venturi.

Supongamos una conducción horizontal como la de la figura adjunta, que en un determinado punto sufre un estrechamiento, la pregunta que surge es: ¿dónde hay más presión, en la zona ancha o en la zona estrecha? Intuitivamente, la respuesta será, en muchos casos, que en la zona estrecha. Sin embargo si aplicamos el teorema de Bernoulli en los puntos 1 y 2 de la figura tendremos:



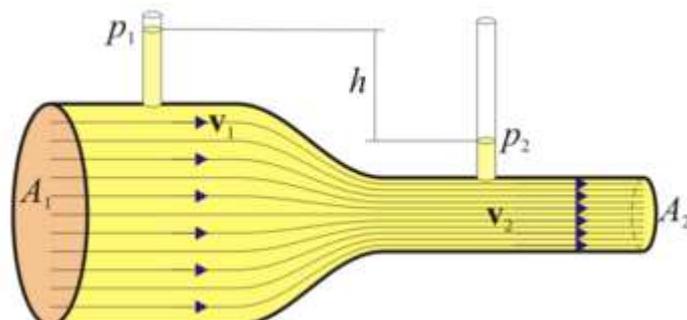
$$\frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 + p_1 = \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + p_2$$

Al ser la conducción horizontal: $h_1 = h_2$; y si tomamos el eje central de la tubería de referencia $h_1 = h_2 = 0$.

Simplificando:
$$\frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + p_2$$

La velocidad en el primer tramo de tubería "v₁" tiene que ser menor que en el segundo tramo más estrecho "v₂". Para que los dos términos de la ecuación sean iguales la presión en el primer tramo "p₁" tiene que ser mayor que la presión en el segundo tramo "p₂".

Es decir, en la zona ancha de una conducción hay más presión que en la zona estrecha, esa diferencia de presión se puede observar fácilmente con un sistema manométrico.



Ejemplo

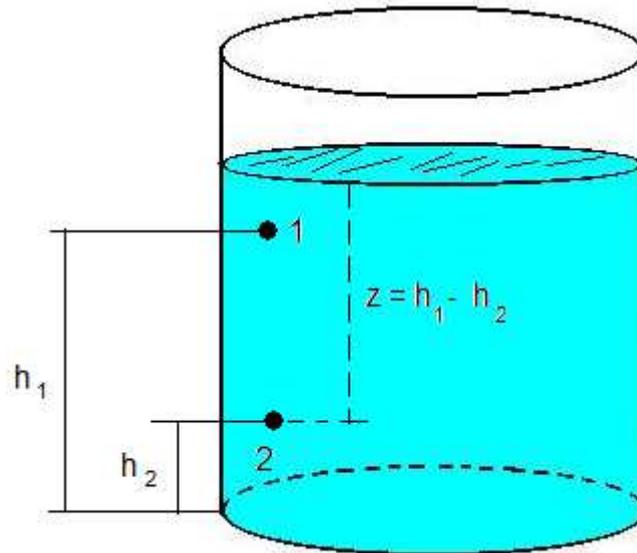
Fluido humano. Una multitud de espectadores pretende salir de una gran sala de cine. El salón es muy ancho, pero tiene abierta al fondo sólo una pequeña puerta que franquea el paso a una galería estrecha que conduce hasta la calle. La gente, impaciente dentro de la sala, se aglomera contra la puerta, abriéndose paso a empujones y codazos. La velocidad con que avanza este “fluido humano” antes de cruzar la puerta es pequeña y la presión es grande. Cuando las personas acceden a la galería, el tránsito se hace más rápido y la presión se alivia. Si bien este fluido no es ideal, puesto que es compresible y viscoso (incluso podría ser turbulento), constituye un buen modelo de circulación dentro de un tubo que se estrecha. Observamos que en la zona angosta la velocidad de la corriente es mayor y la presión es menor.

6.2. Aplicaciones del teorema.

- Las **chimeneas** son altas para aprovechar que la velocidad del viento es más constante y elevada a mayores alturas. Cuanto más rápidamente sopla el viento sobre la boca de una chimenea, más baja es la presión y mayor es la diferencia de presión entre la base y la boca de la chimenea, en consecuencia, los gases de combustión se extraen mejor.
- La ecuación de Bernoulli y la ecuación de continuidad también nos dicen que si reducimos el área transversal de una tubería para que aumente la velocidad del fluido que pasa por ella, se reducirá la presión.
- La aplicación a la natación: las manos del nadador cortan el agua generando una menor presión y mayor propulsión.
- En un carburador de automóvil, la presión del aire que pasa a través del cuerpo del carburador, disminuye cuando pasa por un estrangulamiento. Al disminuir la presión, la gasolina fluye, se vaporiza y se mezcla con la corriente de aire.
- La tasa de flujo de fluido desde un tanque está dada por la ecuación de Bernoulli.
- En oxigenoterapia, la mayor parte de sistemas de suministro de oxígeno utilizan dispositivos de tipo Venturi, el cual está basado en el principio de Bernoulli.

7. ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA HIDROSTÁTICA.

Aplicamos el Teorema de Bernoulli en el recipiente de la figura en los puntos 1 y 2.



$$\frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 + p_1 = \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + p_2$$

Como el sistema está en reposo “ v_1 ” y “ v_2 ” son igual a “0”. Por lo tanto la ecuación quedará:

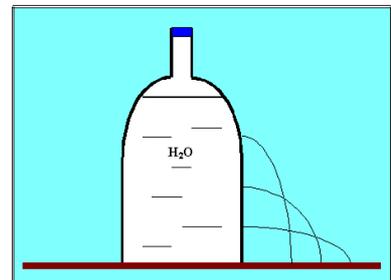
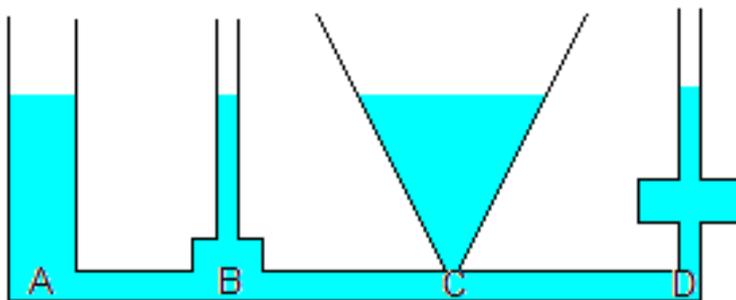
$$\rho \cdot g \cdot h_1 + p_1 = \rho \cdot g \cdot h_2 + p_2$$

Seguimos operando para obtener las diferencias de presión en el punto 1 y el punto 2. Así:

$$p_2 - p_1 = \rho \cdot g \cdot h_1 - \rho \cdot g \cdot h_2 = \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2)$$

Si el punto 1 estuviera en la superficie, donde se está ejerciendo la presión atmosférica, la presión en el punto 2, situado a una profundidad $z = h_1 - h_2$, nos quedaría la expresión:

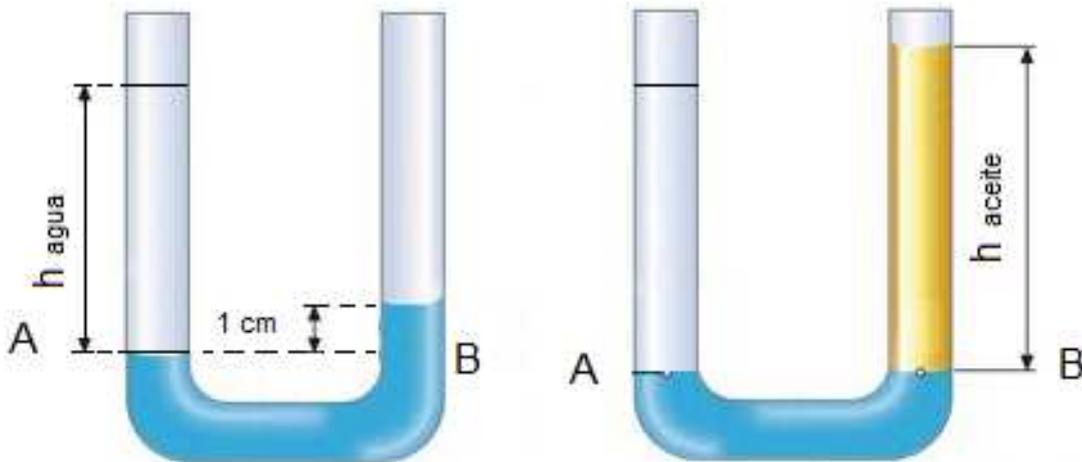
$$p_2 = p_{at} + \rho \cdot g \cdot z$$



Todos los puntos (A, B, C y D) están sometidos a la misma presión. No depende de la forma del recipiente y sólo depende de la profundidad.

7.1. Ejemplo aplicación Teorema Fundamental y Principio de Pascal.

En unos vasos comunicantes hay agua y mercurio. La diferencia de altura en los niveles del mercurio es de 1 cm. Calcular la altura de aceite que se debe añadir por la rama que contiene solo mercurio, para que el nivel de éste en los vasos sea el mismo: $\rho_{\text{Hg}} = 13,6 \text{ g/cm}^3$; $\rho_{\text{aceite}} = 0,9 \text{ g/cm}^3$; $\rho_{\text{agua}} = 1,0 \text{ g/cm}^3$.



En el primero de los dibujos, cuando sólo tenemos mercurio y agua, aplicamos el principio de Pascal al nivel de la línea de puntos (enrase inferior del mercurio) puntos A y B; a partir de ese punto, en el vaso de la derecha tenemos una columna de mercurio de 1 cm de altura y en la columna de la izquierda una altura de agua de altura desconocida h_{agua}

Según el principio de Pascal: $p_A = p_B$

Donde: $p_A = p_{\text{at}} + \rho_{\text{agua}} \cdot g \cdot h_{\text{agua}}$ y $p_B = p_{\text{at}} + \rho_{\text{Hg}} \cdot g \cdot h_{\text{Hg}}$

Igualamos las ecuaciones: $p_A = p_B$; $p_{\text{at}} + \rho_{\text{agua}} \cdot g \cdot h_{\text{agua}} = p_{\text{at}} + \rho_{\text{Hg}} \cdot g \cdot h_{\text{Hg}}$

Sustituyendo y simplificando: $1,0 \cdot 980 \cdot h_{\text{agua}} = 13,6 \cdot 980 \cdot 1$; $h_{\text{agua}} = 13,6 \text{ cm}$

Procediendo de modo análogo en el segundo de los dibujos:

$$p_A = p_B$$

$$p_A = p_{\text{at}} + \rho_{\text{agua}} \cdot g \cdot h_{\text{agua}} \quad \text{y} \quad p_B = p_{\text{at}} + \rho_{\text{aceite}} \cdot g \cdot h_{\text{aceite}}$$

Igualamos las ecuaciones: $p_A = p_B$; $p_{\text{at}} + \rho_{\text{agua}} \cdot g \cdot h_{\text{agua}} = p_{\text{at}} + \rho_{\text{aceite}} \cdot g \cdot h_{\text{aceite}}$

Sustituyendo y simplificando: $1,0 \cdot 980 \cdot 13,6 = 0,9 \cdot 980 \cdot h_{\text{aceite}}$; $h_{\text{aceite}} = 15,11 \text{ cm}$

8. PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES.

En nuestra vida diaria podemos hacer observaciones como las siguientes:

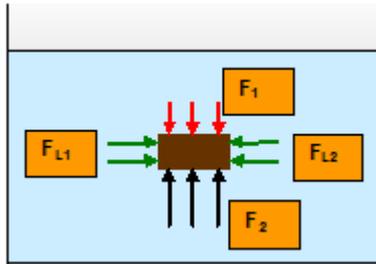
1. Cuando nos sumergimos en una piscina o en el mar parece que *somos más ligeros*.
2. Los globos se elevan en el aire al soltarlos.
3. Un trozo de hierro no flota pero si le damos la forma de barco, vemos que flota.

La explicación científica sobre estos hechos la encontró hace muchos siglos, ARQUÍMEDES.

Los fluidos ejercen fuerzas hacia arriba (ascensionales) sobre los objetos situados en su seno. La naturaleza y valor de estas fuerzas quedan determinadas por el **Principio de Arquímedes**:

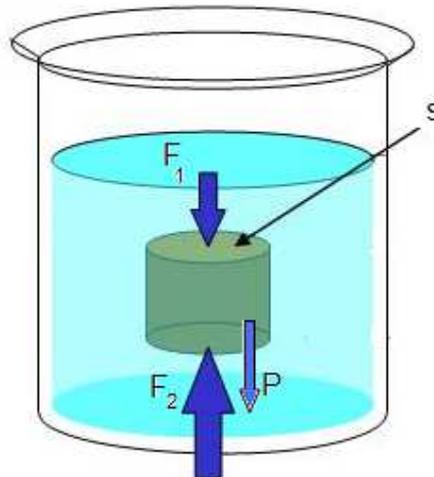
"Todo cuerpo sumergido en un fluido (líquido o gas), experimenta una fuerza (empuje) vertical y hacia arriba igual al peso del fluido desalojado"

Observemos las figuras siguientes. En la primera figura de un objeto sumergido en un fluido podemos ver las fuerzas que actúan de forma perpendicular sobre cada una de sus caras. Prescindiremos de las fuerzas laterales puesto que se anulan por razones de simetría.



En la segunda figura observamos que las presiones P_1 y P_2 , ejercidas respectivamente sobre la cara superior e inferior del cilindro, dan lugar a las fuerzas F_1 y F_2 respectivamente, además del peso "P".

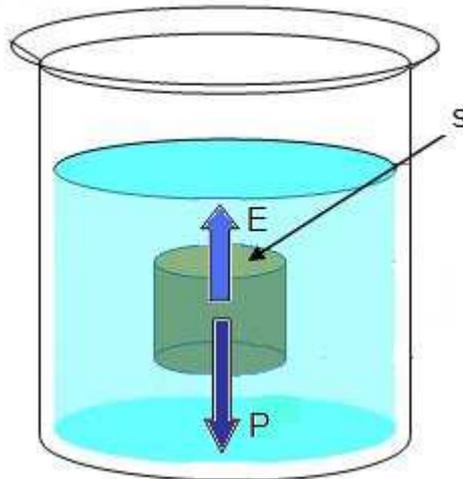
$$F_1 = P_1 \cdot S \quad \text{y} \quad F_2 = P_2 \cdot S$$



Como P_2 es mayor que P_1 (la cara inferior del cilindro está a mayor profundidad), lógicamente F_2 también será mayor que F_1 lo que nos permite definir una fuerza de carácter hidrostático dirigida hacia arriba y denominada **EMPUJE**.

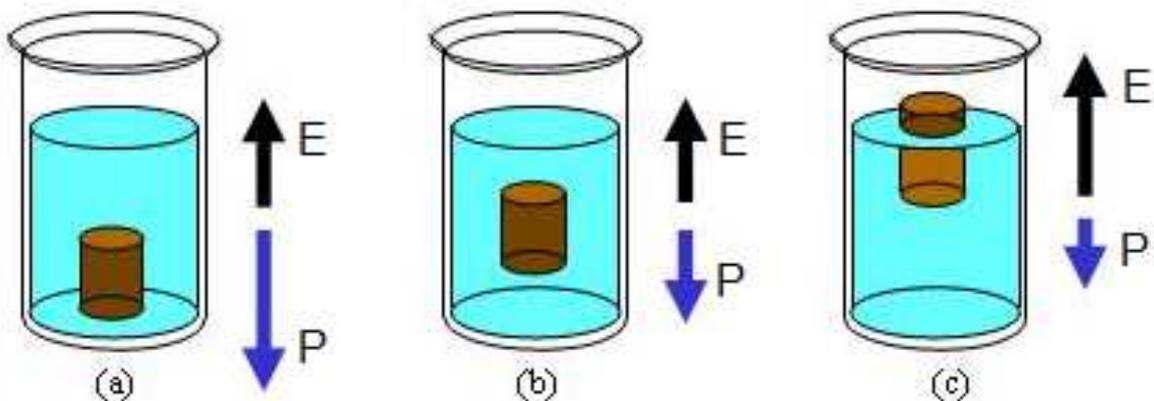
$$E = F_2 - F_1$$

En la figura siguiente podemos ver el resultado de las fuerzas que actúan sobre el cilindro. Fuerza ascensional EMPUJE y fuerza de gravedad PESO.



Se podrían considerar ahora tres casos:

- Peso mayor que el empuje ($P > E$). El cuerpo se hunde.
- Peso igual al empuje ($P = E$). El cuerpo queda en equilibrio.
- Peso menor que el empuje ($P < E$). El cuerpo flota, de forma que una vez alcanzado el equilibrio, el peso del cuerpo será igual al empuje de la parte sumergida.



El valor del **empuje** viene dado por el Principio de Arquímedes. El empuje es igual al peso del volumen de líquido desalojado.

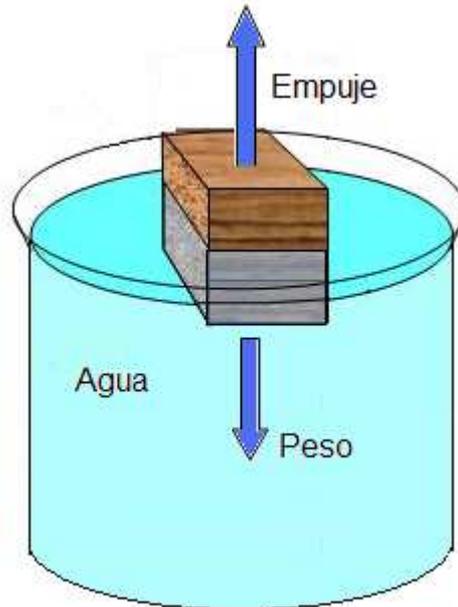
$$E = \text{Peso (líquido desalojado)} = m_{(\text{líquido})} \cdot g = V_{(\text{líquido})} \cdot d_{(\text{líquido})} \cdot g$$

Así podemos hablar de **peso aparente** de un cuerpo.

$$\text{Peso (aparente)} = \text{Peso (real)} - \text{Empuje}$$

8.1. Si un cuerpo flota ¿qué volumen del cuerpo estará sumergido? ¿Y qué volumen emerge?

Si el **Empuje** que calculamos suponiendo el cuerpo totalmente sumergido es mayor que el **Peso real** de dicho cuerpo, éste flotará.



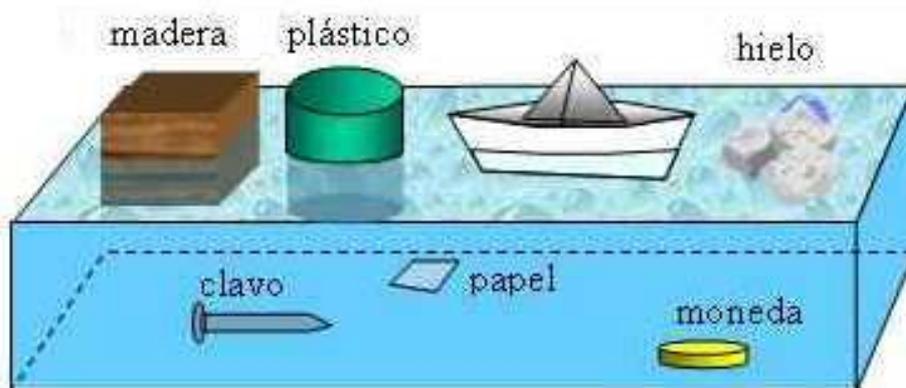
$$V_{(\text{líquido desalojado})} < V_{\text{cuerpo}}$$

El volumen de líquido desalojado no coincide con el volumen del cuerpo.

$$E = \text{Peso}_{(\text{líqu. desalojado})} = m_{(\text{líqu. desalojado})} \cdot g = V_{(\text{líqu. desalojado})} \cdot d_{(\text{líqu.})} \cdot g$$

Si el cuerpo flota mantendrá una parte sumergida y otra emergida de tal forma que:

$$\text{Peso real del cuerpo } (m \cdot g) = E \text{ (peso del líquido desalojado)}$$



DENSIDAD

1. DENSIDAD.

Aunque toda la materia posee masa y volumen, la misma masa de sustancias diferentes ocupa distintos volúmenes, así notamos que el hierro o el hormigón son pesados, mientras que la misma cantidad de un plástico o de corcho son ligeras. La propiedad que nos permite medir la ligereza o pesadez de una sustancia recibe el nombre de densidad. Cuanto mayor sea la densidad de un cuerpo, más pesado nos parecerá este.

La densidad se define como el cociente entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa.

$$\text{densidad} = \text{masa/volumen} ; \quad \rho = m / v$$

Unidades:

Así, como en el S.I. la masa se mide en kilogramos (kg) y el volumen en metros cúbicos (m³) la densidad se medirá en kilogramos por metro cúbico (kg/m³).

Esta unidad de medida, sin embargo, no es muy utilizada puesto que utiliza cifras no tan manejables como otras. Por ejemplo, para el agua, como un kilogramo ocupa un volumen de un litro, es decir, de 0,001 m³, la densidad será de: 1000 kg/m³

La mayoría de las sustancias tienen densidades similares a las del agua por lo que, de usar esta unidad, se estarían usando siempre números muy altos. Para evitarlo, se suele emplear otra unidad de medida el gramo por centímetro cúbico (gr/cm³), de esta forma la densidad del agua será: 1 g/cm³. Cifra mucho más manejable. Las medidas de la **densidad** quedan, en su mayor parte, ahora mucho más pequeñas y fáciles de usar.

Para pasar de esta unidad "g/cm³" a "kg/m³", o viceversa, solo habrá que multiplicar o dividir por 1000. Se puede observar en la tabla siguiente:

| Sustancia | Densidad en kg/m ³ | Densidad en g/cm ³ |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Agua | 1000 | 1 |
| Aceite | 920 | 0,92 |
| Gasolina | 680 | 0,68 |
| Plomo | 11300 | 11,3 |
| Acero | 7800 | 7,8 |
| Mercurio | 13600 | 13,6 |
| Madera | 900 | 0,9 |
| Aire | 1,3 | 0,0013 |
| Butano | 2,6 | 0,0026 |
| Dióxido carbono | 1,8 | 0,0018 |

2. INFLUENCIA DE LA PRESIÓN Y TEMPERATURA SOBRE LA DENSIDAD.

En general, la densidad de una sustancia varía cuando cambia la presión y/o la temperatura.

Cuando aumenta la **presión**, la densidad de cualquier material aumenta. En los sólidos y líquidos la influencia de la presión es prácticamente despreciable ya que unos y otros se consideran incompresibles. En el caso de los gases si que afecta de forma importante el cambio de presión en la variación de la densidad: mayor presión más densidad y menor presión menor densidad.

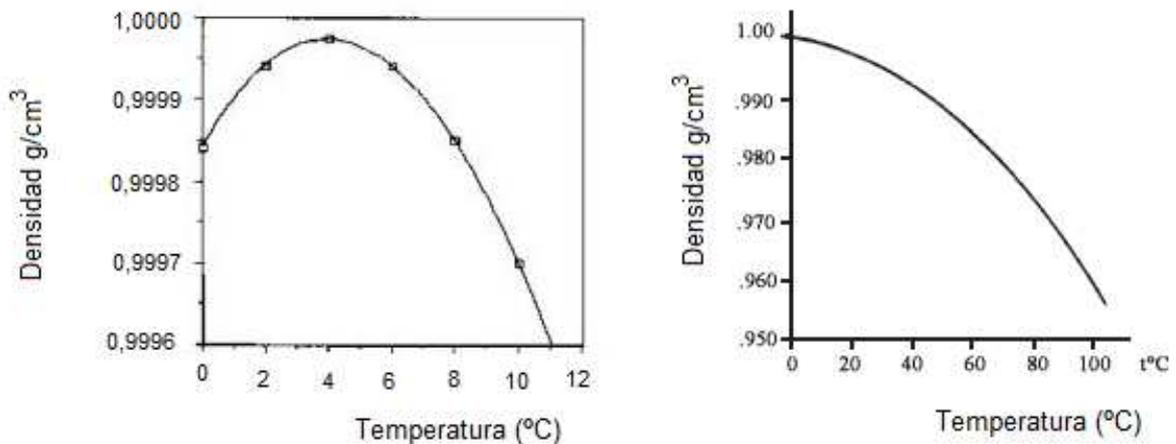
Como norma general, al aumentar la **temperatura**, la densidad disminuye (si la presión permanece constante). Si aumenta la temperatura, aumenta el volumen y manteniéndose la masa por lo que disminuye la densidad. Si la temperatura baja, disminuye el volumen para la misma masa, luego aumenta la densidad.

La variación de la densidad de los sólidos con la temperatura es, en general, muy pequeña, y, normalmente despreciable con los rangos de temperatura a los que se realizan las determinaciones en el laboratorio. Podría ser relativamente importante en algunos casos: por ejemplo hay que dejar espacio entre los raíles del tren ya que hay dilatación por calentamiento (cambio densidad).

En los líquidos la variación de densidad por influencia de la temperatura es importante y del orden de $0,001 \text{ g/cm}^3$ por cada grado centígrado.

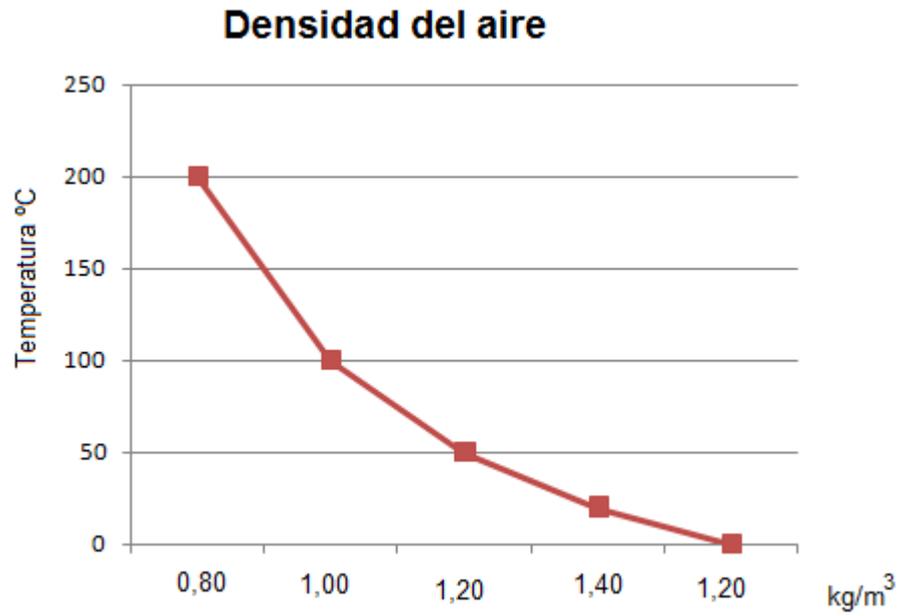
En el caso del agua existe una anomalía entre $0 \text{ }^\circ\text{C}$ y los $4 \text{ }^\circ\text{C}$ donde la densidad aumenta con la temperatura, pero a partir de los $4 \text{ }^\circ\text{C}$ la densidad comienza a descender con la temperatura.

Densidad del agua en función de la temperatura



| Temp. (°C) | Densidad g/cm^3 | Temp. (°C) | Densidad g/cm^3 | Temp. (°C) | Densidad g/cm^3 |
|------------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|--------------------------|
| 0 | 0,9998 | 35 | 0,9941 | 70 | 0,9778 |
| 5 | 0,9999 | 40 | 0,9922 | 75 | 0,9750 |
| 10 | 0,9997 | 45 | 0,9898 | 80 | 0,9718 |
| 15 | 0,9992 | 50 | 0,9881 | 85 | 0,9690 |
| 20 | 0,9982 | 55 | 0,9858 | 90 | 0,9653 |
| 25 | 0,9974 | 60 | 0,9832 | 95 | 0,9619 |
| 30 | 0,9956 | 65 | 0,9806 | 100 | 0,9581 |

En el caso de los gases la influencia de la temperatura en su densidad es muy importante como se puede observar en la gráfica siguiente para la densidad del aire.



A mayor temperatura la densidad es menor para los gases.

3. TIPOS DE DENSIDAD.

Dependiendo de como realicemos la medida de densidad o si la referimos a otras sustancias podemos diferenciar entre:

- Densidad absoluta.
- Densidad relativa.
- Densidad media o puntual.
- Densidad aparente.

3.1. Densidad absoluta.

La densidad **absoluta** es la magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen que ocupa una sustancia.

$$\text{densidad} = \text{masa/volumen} ; \quad \rho = m / v$$

Las unidades más habituales son el kg/m³ y el g/cm³.

3.2. Densidad relativa.

La **densidad relativa** es una comparación de la densidad de una sustancia con la densidad de otra que se toma como referencia. Ambas densidades se expresan en las mismas unidades y en iguales condiciones de temperatura y presión. La densidad relativa es adimensional (sin unidades), ya que queda definida como el cociente de dos densidades.

Se define como el cociente entre la densidad de la sustancia y la de otra sustancia que se toma como referencia, resultando:

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_0}$$

Donde: ρ_r es la densidad relativa,

ρ es la densidad absoluta

ρ_0 es la densidad de referencia

- Para los líquidos y sólidos, la densidad de referencia habitual es la del agua líquida con una presión de 1 atmósfera y una temperatura de 4 °C. En estas condiciones la densidad del agua es de 1000 kg/m³ o más utilizada 1,000 g/cm³.
- Para los gases, la densidad de referencia habitual es la del aire a la presión de 1 atmósfera y la temperatura de 0 °C.

También se puede calcular o medir la densidad relativa como el cociente entre los pesos o masas de idénticos volúmenes de la sustancia problema y de la sustancia de referencia:

$$\rho_r = \frac{m_s / V}{m_0 / V} = \frac{\rho_s}{\rho_0}$$

3.3. Densidad media y puntual.

Cuando se calcula la densidad de un sistema homogéneo, la expresión masa/volumen puede aplicarse a todo el sistema o a cualquier zona y se obtendrá siempre el mismo resultado.

Sin embargo, un sistema heterogéneo (granito formado por distintos materiales) no presenta la misma densidad en partes diferentes. En este caso, hay que medir la “densidad **media**”, dividiendo la masa del objeto por su volumen o la “densidad **puntual**” que será distinta en cada punto o posición del sistema y que puede venir definida como:

$$\rho = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{m}{V} = \frac{dm}{dV}$$

La densidad del objeto o cuerpo será el sumatorio de las densidades puntuales calculadas.

3.4. Densidad aparente y real.

La densidad aparente es una magnitud aplicada en materiales porosos como el suelo, los cuales forman cuerpos heterogéneos con intersticios de aire u otra sustancia normalmente más ligera, de forma que la densidad total del cuerpo es menor que la densidad del material poroso si se compactase.

En el caso de un material mezclado con aire se tiene:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ap}}{V_{ap}} = \frac{m_s + m_{aire}}{V_s + V_{aire}}$$

La densidad aparente de un material no es una propiedad intrínseca del material y depende de su compactación.

Esta determinación puede servir para conocer que masa de un material llenará un saco o un recipiente o cuanta agua puede absorber un suelo.

3.5. Peso específico.

Es la relación entre el peso del cuerpo y su volumen:

$$P_e = \frac{P}{V}$$

P = peso del cuerpo en N

V = volumen del cuerpo en m³

P_e = peso específico en N/m³ (también se puede medir en dinas/cm)

Podemos también expresar un peso específico relativo al igual que la densidad relativa:

$$D_r = \frac{P_1}{P_2} = \frac{P_1/V}{P_2/V} = \frac{P_1}{P_2}$$

La relación entre peso específico y densidad será la siguiente:

$$P_e = \frac{P}{V} = \frac{M \cdot g}{V} = D_a \cdot g$$

4. MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD.

Existen diversos métodos para la determinación de la densidad de distintos sistemas materiales. Se relacionan a continuación algunos de ellos:

- SÓLIDOS:
 - Midiendo y pesando.
 - Con balanza y probeta.
 - Con balanza hidrostática.
 - Con picnómetro. Sólidos pulverulentos.
 - Densidad aparente de sólidos.

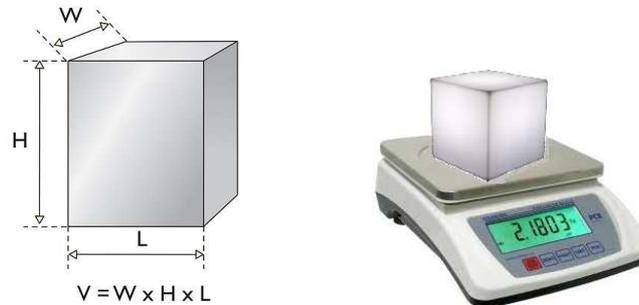
- LÍQUIDOS:
 - Con picnómetros.
 - Con balanza Mohr-Westphal.
 - Inmersor colgante.
 - Equipos multiparamétricos.
 - Con densímetros.
 - Con aerómetros.
 - Tubo en “U”.

- GASES:
 - Con balanza.
 - Con balón para gases.

5. MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE SÓLIDOS.

5.1. Densidad de sólidos regulares midiendo y determinando la masa.

Para objetos como cubos, cilindros, esferas, etc., podemos determinar su densidad midiendo las dimensiones de los objetos y determinando su masa.



Las dimensiones de estos objetos: longitud de aristas, diámetros, profundidades... se determinan utilizando equipos de medida: reglas, calibres, micrómetros, etc... Calcularemos el volumen utilizando las fórmulas adecuadas.

La masa la determinaremos utilizando balanzas granatarios o analíticas.

Así tendremos:

$$D = \frac{M}{V}$$

M = masa del objeto determinado con la balanza.

V = volumen del objeto determinado matemáticamente.

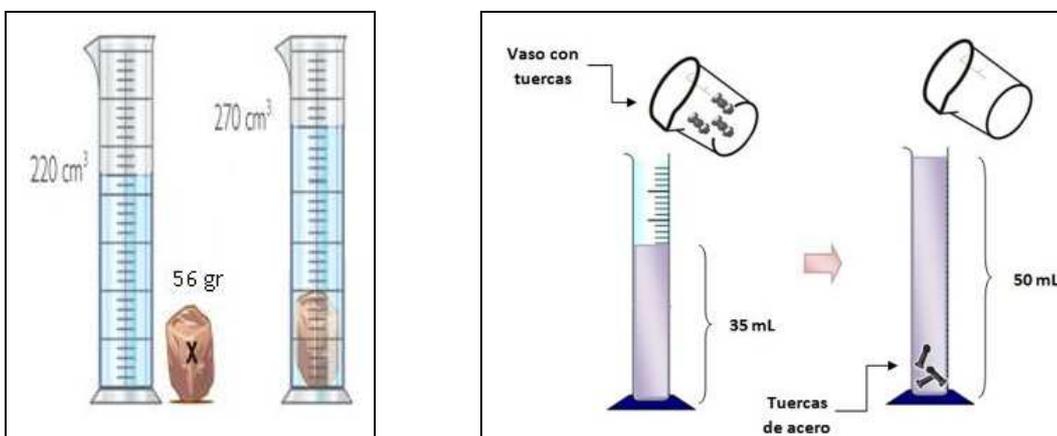
5.2. Densidad sólidos (regulares e irregulares) con probeta.

Es una aplicación directa del principio de Arquímedes. Con la balanza se halla la masa del cuerpo y su volumen se mide por el agua desalojada en una probeta graduada:

$$D = \frac{M}{V}$$

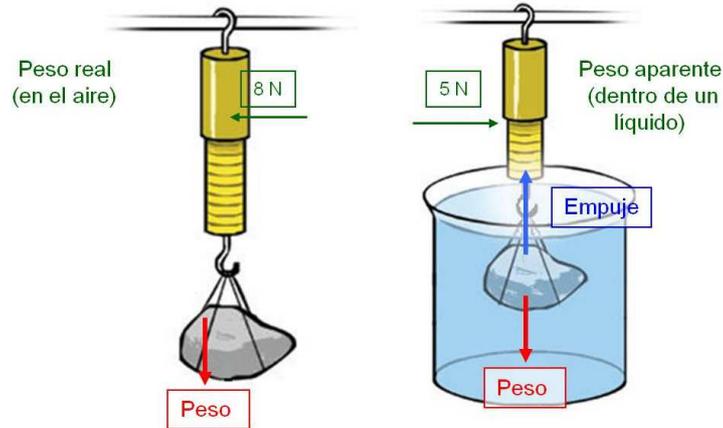
M = masa del cuerpo determinada con la balanza.

V = volumen del cuerpo = volumen de agua desalojado en la probeta.

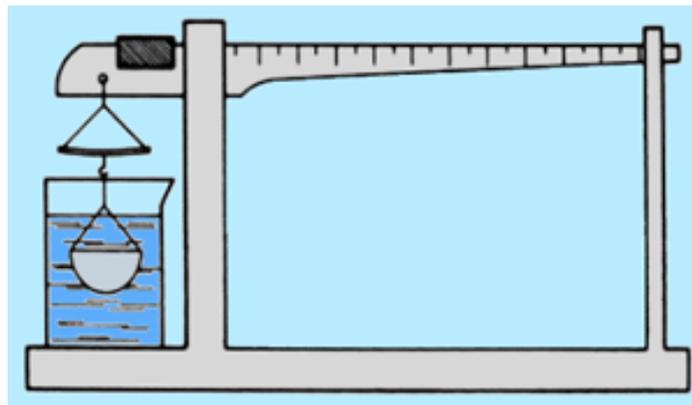


5.3. Densidad sólidos (regulares e irregulares) con balanza hidrostática.

La balanza hidrostática es muy similar a cualquier balanza de laboratorio. Se diferencia en que uno de los platillos es más corto o dispone de un sistema que permite suspender un cuerpo para someterlo al empuje de Arquímedes, dentro de una recipiente lleno de agua.



El efecto se observa claramente en el dibujo anterior. En este caso determinamos peso y no masa, pero se aplica el mismo principio que en la balanza hidrostática mostrada a continuación.



Realizamos la pesada del sólido colgando del alfiler como si fuera una balanza normal, esta será la masa del cuerpo M_1

Colocamos un recipiente con agua destilada y sumergimos el cuerpo. Volvemos a equilibrar la balanza con pesas. La diferencia entre el peso del cuerpo y el peso determinado en la segunda pesada será:

$$M_2 = M_1 - \text{peso de agua desalojada}$$

$$\text{De donde: peso de agua desalojada} = M_1 - M_2$$

Como la densidad del agua destilada es 1, el peso del agua = volumen de agua desalojada = volumen del sólido sumergido.

Así la densidad del sólido será:
$$D = \frac{M_1}{M_1 - M_2}$$

5.4. Densidad sólidos pulverulentos o en grano con picnómetro.

De gran utilidad para productos pulverulentos como cementos, harinas, arena, etc.

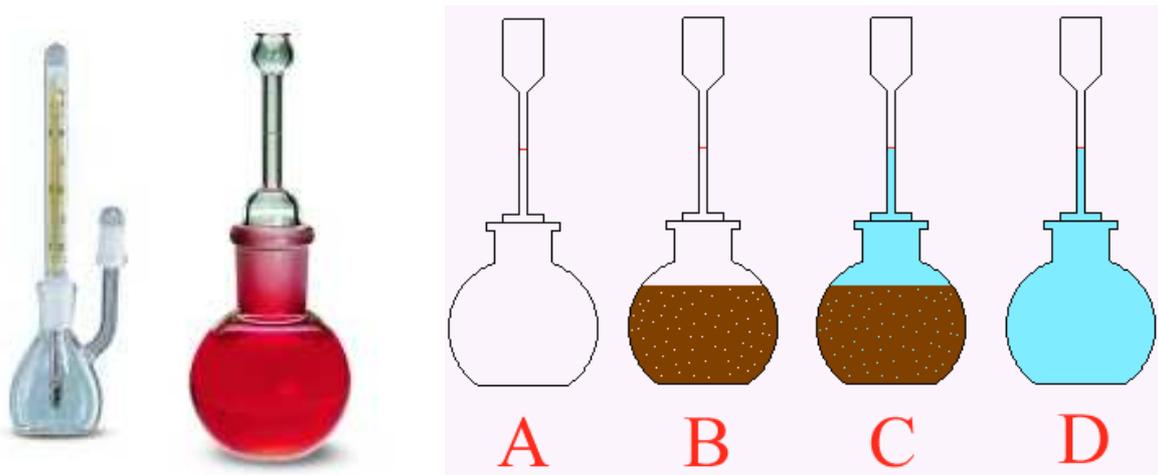
Buscamos mayor precisión, para ello utilizamos un pequeño matraz (picnómetro) del que previamente determinamos su volumen exacto con agua. El tapón es un tubo de diámetro interior estrecho lo que impide la evaporación del líquido y con un enrase para efectuar las lecturas con gran exactitud.

Para determinar la densidad de un sólido con picnómetro, éste debe tener un tamaño adecuado a las dimensiones del picnómetro y no reaccionar ni disolverse en el agua.

Pesando el picnómetro con el sólido y rellenando con agua destilada podemos obtener el volumen del sólido si además hemos calculado el volumen del picnómetro. Una vez obtenida la masa del sólido podemos calcular su densidad.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- A) Pesar el picnómetro vacío convenientemente limpio y seco: P_p
- B) Colocar la muestra dentro del picnómetro y pesar: $P_p + M$
- C) Rellenar picnómetro con agua destilada. Poner tapón, enrasar, secar y pesar: $P_p + M + A_r$
- D) Pesar picnómetro con agua destilada: $P_p + A$



El cálculo será:

$$\text{Masa del sólido: } B - A = (P_p + M) - P_p = M$$

$$\text{Masa de agua: } D - A = (P_p + A) - P_p = A$$

$$\text{Agua no desalojada: } C - B = (P_p + M + A_r) - (P_p + M) = A_r$$

$$\text{Agua desalojada} = \text{volumen del sólido} = A - A_r$$

$$\text{Así: } D_{\text{muestra}} = \frac{M}{V} = \frac{M}{(A - A_r)}$$

En este cálculo se habrá de tener en cuenta la temperatura para conocer la densidad del agua y por tanto el volumen real del picnómetro.

5.5. Densidad aparente de sólidos en grano o polvo.

La densidad aparente se define como el peso de una determinada muestra de suelo, o de cualquier otra mezcla de partículas pequeñas sueltas, dividido por el volumen que ocupan. Este volumen incluye las bolsas de aire entre las partículas, así como los espacios de poros dentro de las partículas.

Para medir la densidad aparente se toma una muestra de suelo o de la sustancia a analizar.

- A) Se necesita un recipiente de boca ancha, preferiblemente un cilindro cerrado en su base. Se pesa: P_r
- B) Se llena este recipiente con agua realizando el enrase con ayuda de un vidrio plano para evitar cualquier burbuja. Se pesa el recipiente con agua: $P_r + A$. La masa del agua A será el volumen del recipiente: (masa de agua \approx volumen de agua ya que la densidad es aproximadamente 1 g/cm^3). $A = \text{volumen del recipiente y volumen de la muestra}$.
- C) Se seca el recipiente y se llena con la muestra (habitualmente un suelo). Con ayuda de una regla o un objeto plano se enrassa al borde del recipiente. Se mide con una balanza la masa de la muestra: $P_r + M$

El cálculo será:

$$\text{Masa del sólido: } (P_r + M) - P_r = M$$

$$\text{Masa de agua: } B) - C) = (P_r + A) - P_r = A = \text{volumen muestra}$$

Así:

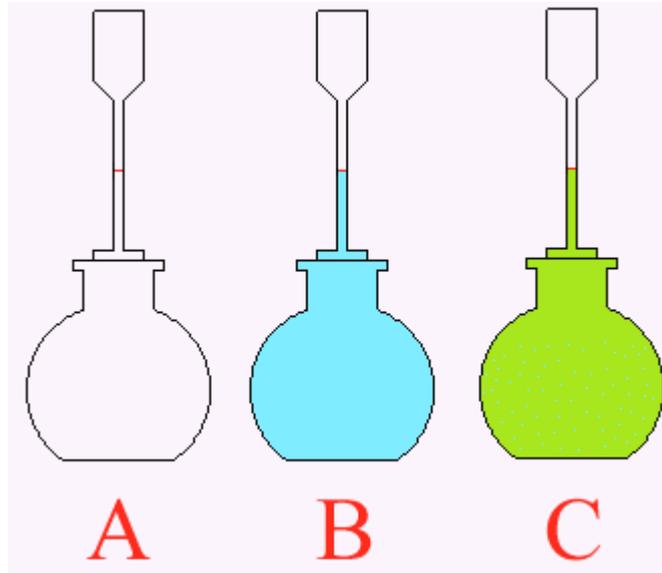
$$D_{\text{aparente muestra}} = \frac{M}{V} = \frac{M}{A}$$



6. MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LÍQUIDOS.

6.1. Densidad de líquidos con picnómetro.

Se emplean picnómetros de volumen conocido, llamados volumenómetros, con lo que automáticamente se determina el peso y el volumen del líquido a ensayar.



Buscamos mayor precisión, para ello utilizamos un pequeño matraz (picnómetro) del que previamente determinamos su volumen exacto con agua. El tapón es un tubo de diámetro interior estrecho lo que impide la evaporación del líquido y con un enrase para efectuar las lecturas con gran exactitud.

Pesando el picnómetro vacío y con agua determinamos el volumen del mismo. Se pesa posteriormente el picnómetro con la muestra de líquido problema y se obtiene su densidad.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- A) Pesar el picnómetro vacío convenientemente limpio y seco: P_p
- B) Rellenar picnómetro con agua destilada. Poner tapón, enrasar, secar y pesar: $P_p + A$
- C) Rellenar el picnómetro con la muestra líquida y pesar: $P_p + M$

El cálculo será:

$$\text{Masa del líquido problema: } C) - A) = (P_p + M) - P_p = M$$

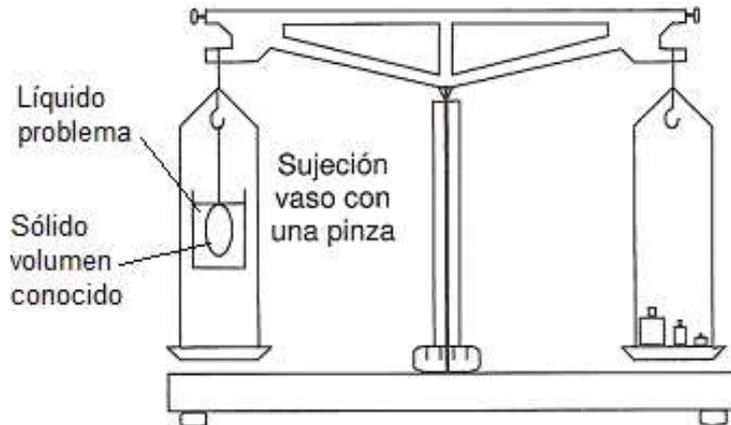
$$\text{Masa de agua = volumen picnómetro: } B) - A) = (P_p + A) - P_p = A$$

Así:
$$D_{\text{muestra}} = \frac{M}{V} = \frac{M}{A}$$

En este cálculo se habrá de tener en cuenta la temperatura para conocer la densidad del agua y por tanto el volumen real del picnómetro.

6.2. Determinación de densidades de líquidos con balanza hidrostática.

La balanza hidrostática se utiliza también para determinar la densidad de líquidos. Se utilizan las mismas fórmulas que en el caso de los sólidos, pero ahora la incógnita está en el líquido problema y debemos conocer perfectamente el volumen del sólido utilizado.



Si el volumen del sólido sumergido es conocido podremos determinar el empuje para este sólido. El procedimiento a seguir es el siguiente:

- A) Pesamos el sólido de volumen conocido: M_s
- B) Colocamos un recipiente con el líquido problema tal y como muestra la figura anterior. Determinamos la masa aparente: $M_{ap} = M_s - \text{empuje}$. Empuje = masa del volumen de líquido problema desalojado. $\text{Empuje} = M_s - M_{ap}$

Así:

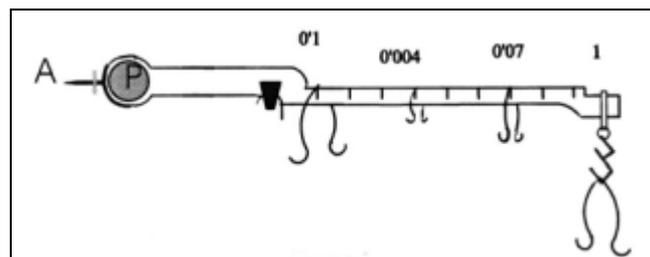
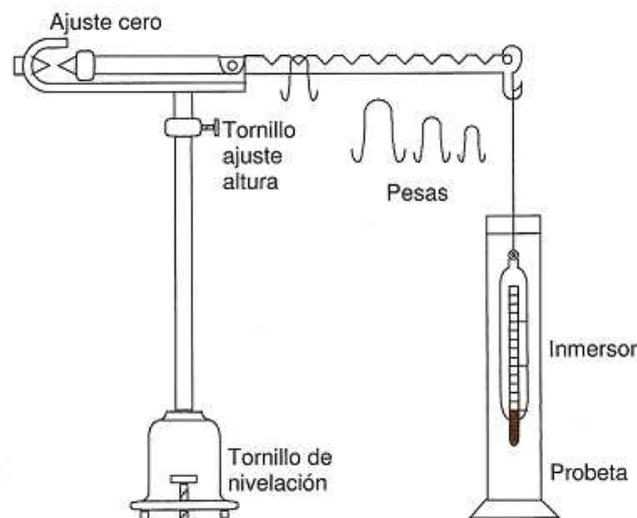
$$D_{\text{líquido problema}} = \frac{\text{Empuje}}{V_{\text{sólido}}}$$

6.3. Determinación de densidades de líquidos con balanza Mohr-Westphal.

Es una balanza especial adaptada para medir directamente la densidad de líquidos. Consta de un brazo pivotado dividido en 10 partes en cuyo extremo hay un inmersor con termómetro y varias pesas en forma de "U" llamadas "jinetillos". Existen pesas de varios tamaños, cada tamaño 10 veces menor que el anterior.

El fundamento de la medición es también el principio de Arquímedes. Primero se equilibra con agua destilada el inmersor y luego se sumerge en el líquido problema.

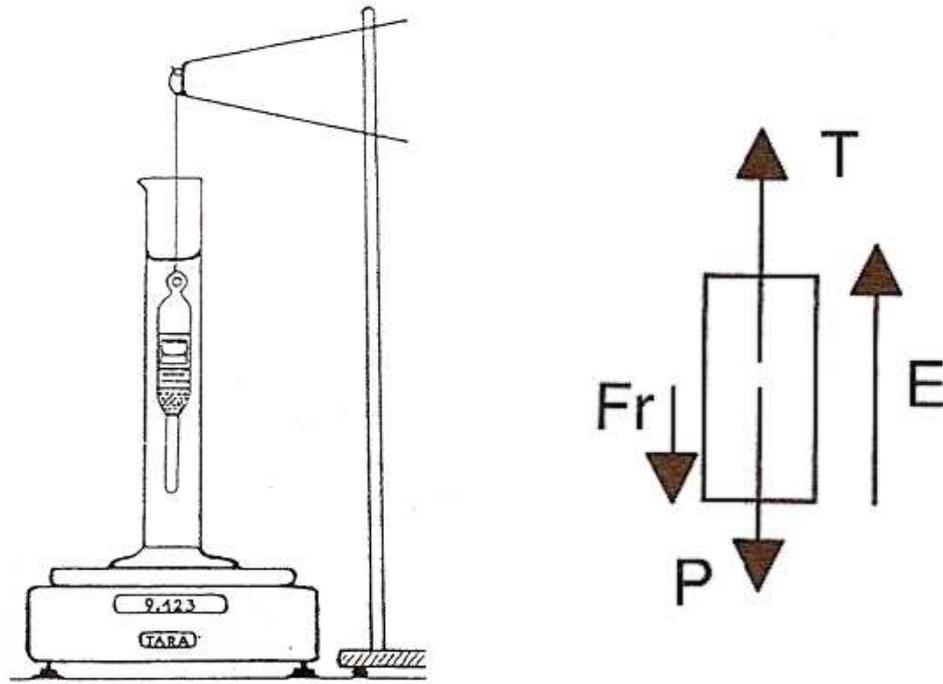
Se equilibra la balanza y la densidad se hace por lectura directa de cada uno de los jinetillos por su valor y en la posición en que estén.



La densidad mostrada en la figura sería: 1,174 veces la densidad del agua $\approx 1,174 \text{ g/cm}^3$

6.4. Determinación de densidades de líquidos con inmersor colgante.

Este método se basa en el incremento de peso que experimenta una probeta con el líquido a causa de la introducción de un cuerpo colgante de un volumen definido y preciso "INMERSOR".



El balance de fuerzas es:

PESO – EMPUJE – TENSIÓN = RESULTANTE (fuerza de reacción)

El peso es igual a la tensión de la cuerda. La resultante se manifiesta en la balanza quedando:

EMPUJE = RESULTANTE;

$$D_{LP} \cdot V_s \cdot g = M_1 \cdot g$$

Conociendo el volumen del sólido (normalmente 10 cm^3) podremos determinar la densidad del líquido problema. $D_{LP} = M_1/V_{ss}$

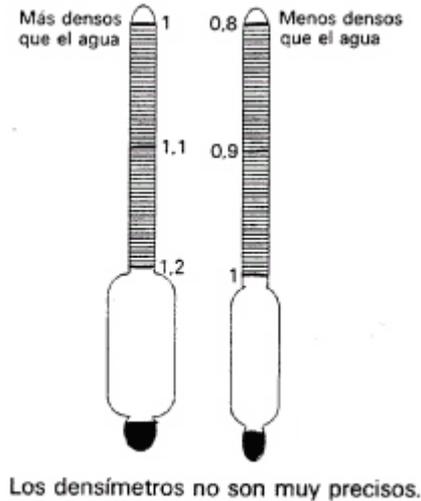
Se coloca la probeta con el líquido en el plato de la balanza electrónica en funcionamiento. Se pulsa la tara para situar la lectura en el cero estable. Se introduce con cuidado el inmersor, colgando de la pinza, sumergiéndolo por completo y bien centrado sin que toque la probeta. La pantalla de la balanza indica la pesada diferencial.

Se utilizan inmersores con un volumen conocido y sólo es necesario hacer la transformación de la lectura en densidad (normalmente dividiendo entre 10).

Se pueden utilizar distintos inmersores según la densidad del líquido a determinar y teniendo en cuenta la temperatura.

6.5. Determinación de densidades de líquidos con densímetros.

Los densímetros son varillas flotadoras de vidrio cilíndrico, terminados en un bulbo lastrado con plomo y una parte superior que posee un vástago graduado donde va la escala de medida, cuya profundidad de inmersión varía con la densidad del líquido.

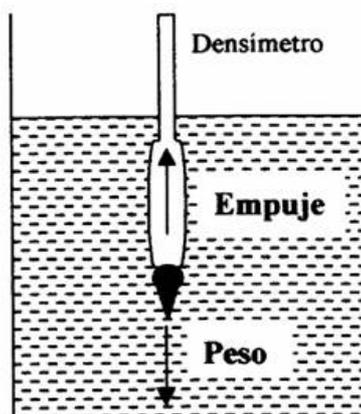


Se sumerge en el líquido y se lee directamente sobre la escala la densidad. El hundimiento del densímetro en un líquido es mayor cuanto menor es su densidad.

El líquido a ensayar se introduce en una probeta transparente.

El densímetro limpio sólo debe sujetarse por encima de la escala y al introducirlo no debe humedecerse más de 5 mm por encima del punto de lectura, ya que si no, el líquido adherido falsearía el valor de medición.

Cuando el densímetro ha alcanzado el equilibrio y flota libremente, sin tocar las paredes del recipiente, se lee “desde abajo” en caso de líquidos transparentes, mientras que en líquidos completamente opacos se lee “desde arriba”.



6.6. Determinación de densidades de líquidos con areómetros.

Tienen el mismo fundamento que los densímetros, pero se distinguen de ellos porque en lugar de medir densidades, miden las concentraciones de las disoluciones en las cuales se sumergen.

Los areómetros viene graduados en GRADOS BAUMÉ (°Bé). Para líquidos menos densos que el agua la escala en °Baumé va en sentido descendente: 10-11-12-13-14... y en líquidos más densos que el agua la escala en °Baumé va en sentido ascendente: 0-1-2-3-4...

Estos instrumentos se calibran en líquidos con una densidad conocida y a una temperatura determinada de 15 °C ó 20 °C.

Se utilizan algunos areómetros con escalas relacionadas con la densidad, pero que no dan directamente la densidad sino la concentración. Entre estos tenemos:

- Alcohómetro: se utiliza para determinar la densidad de soluciones acuosas de alcohol etílico. La lectura se da en grados alcohólicos que es el % en volumen de etanol. Están calibrados a 20°C.
- Mostímetro: se utiliza para determinar la densidad de los mostos procedentes de la uva. Puede tener doble escala dando también el grado alcohólico probable.
- Amoniómetro: se utiliza para determinar la densidad de soluciones amoniacales y tienen una escala graduada en divisiones iguales de 0° al 30°, que corresponde al 0-30% en peso de amoníaco.
- Lactómetro: se usa para determinar la densidad de la leche. El lactómetro Quevenne está graduado de 15° a 40° correspondiendo a pesos específicos que van de 1,015 a 1,040.
- Areómetro Brix: graduado en °Brix que corresponde al % en peso de azúcar (sacarosa a la temperatura de calibración).
- Oleómetro: se utiliza para determinar la densidad de aceites vegetales con una escala graduada de 50° a 0° correspondiendo a pesos específicos de 0,870 a 0,890.
- Sacarímetro: se usa en la determinación de la densidad de soluciones de azúcar correspondiendo a una concentración de 10 g/litro de sacarosa la densidad de 1,0386.
- Areómetro Baumé: explicado a continuación en más profundidad.



El areómetro Baumé:

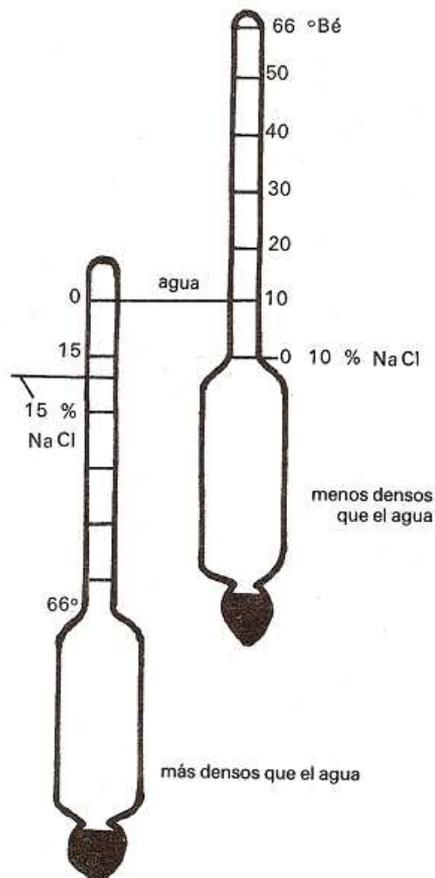
Para líquidos más densos que el agua el punto de enrase con agua destilada marca 0 °Bé. Para graduarlo se introduce en una disolución de 15 g de sal común y 85 g de agua., marcándose el valor 15 en el enrase y continuando la graduación hasta 66 ° Bé. La relación entre °Baumé y la densidad para un areómetro calibrado a 20 °C es:

$$P.E. = \frac{146}{146 - ^\circ B\acute{e}}$$

Para líquidos menos densos que el agua el punto de enrase con agua destilada marca 10 °Bé. La graduación se efectúa haciendo flotar en una solución de 10 g de NaCl y 90 g de agua; este punto es el 0 y se marca hasta 66 °Bé, de abajo a arriba. La escala está dividida en partes iguales y la relación entre °Bé y densidad viene dada por la siguiente fórmula:

$$P.E. = \frac{146}{136 + ^\circ B\acute{e}}$$

Estas fórmulas pueden tener alguna variación en el caso de utilizar la escala Americana.



Calculando la concentración en % de la sustancia y los °Baumé, puede hallarse cualquier otra concentración sólo con medir este último valor, ya que existe proporcionalidad directa entre ambos.

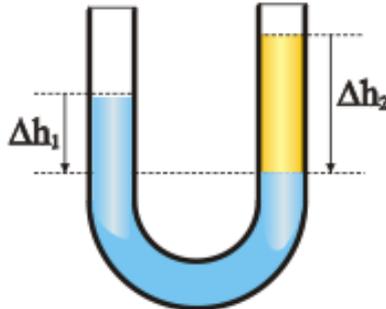
En la tabla siguiente se expresa la relación entre °Bé y densidades y una segunda tabla con información sobre productos comunes en el laboratorio.

| CORRESPONDENCIA ENTRE GRADOS BAUMÉ Y DENSIDADES A 15 °C | | | | | | | |
|---|----------|-----|----------|---------------------------------|----------|-----|----------|
| Líquidos menos densos que el agua | | | | Líquidos más densos que el agua | | | |
| °Bé | Densidad | °Bé | Densidad | °Bé | Densidad | °Bé | Densidad |
| 10 | 1,000 | 36 | 0,848 | 0 | 1,000 | 28 | 1,241 |
| 12 | 0,987 | 38 | 0,838 | 2 | 1,007 | 30 | 1,263 |
| 14 | 0,973 | 40 | 0,826 | 4 | 1,029 | 32 | 1,285 |
| 16 | 0,962 | 42 | 0,818 | 6 | 1,045 | 34 | 1,308 |
| 18 | 0,948 | 44 | 0,810 | 8 | 1,060 | 36 | 1,332 |
| 20 | 0,936 | 46 | 0,800 | 10 | 1,075 | 38 | 1,357 |
| 22 | 0,924 | 48 | 0,751 | 12 | 1,091 | 40 | 1,383 |
| 24 | 0,911 | 50 | 0,783 | 14 | 1,108 | 42 | 1,410 |
| 26 | 0,899 | 52 | 0,774 | 16 | 1,125 | 44 | 1,438 |
| 28 | 0,888 | 54 | 0,766 | 18 | 1,142 | 50 | 1,530 |
| 30 | 0,879 | 56 | 0,758 | 20 | 1,162 | 56 | 1,635 |
| 32 | 0,868 | 58 | 0,750 | 22 | 1,180 | 60 | 1,711 |
| 34 | 0,857 | 60 | 0,742 | 24 | 1,200 | 66 | 1,843 |

| DENSIDADES DE ALGUNAS SUSTANCIAS COMUNES EN EL LABORATORIO | | |
|--|------------------|----------|
| Sustancia | Grados Baumé °Bé | Densidad |
| Ácido sulfúrico concentrado | 66 °Bé | 1,84 |
| Ácido nítrico concentrado | 40 °Bé | 1,38 |
| Ácido clorhídrico concentrado | 23 °Bé | 1,19 |
| Amoniaco concentrado | 22 °Bé | 0,92 |
| Alcohol absoluto | 47 °Bé | 0,79 |
| Éter etílico | 65 °Bé | 0,71 |
| Ácido fosfórico concentrado | 62 °Bé | 1,70 |

6.7. Determinación de densidades de líquidos con tubo en “U”.

Se trata de un tubo transparente doblado en forma de “U” y abierto en ambos extremos. Por cada rama se vierten dos líquidos de diferente densidad e inmiscibles entre sí; por ejemplo, agua y aceite de cocina. El de menor densidad (aceite) quedará por encima del más denso (agua).



La presión en ambas ramas del tubo es la misma en el punto donde medimos las alturas. La superficie que queda al aire en ambos fluidos es la misma y la presión en ambas ramas es la atmosférica.

$$P_1 = P_2$$

Aplicando el principio general de la hidrostática en ambas columnas tenemos:

$$P_1 = P_2 \Rightarrow P_{\text{atm}} + D_{\text{aceite}} \cdot g \cdot h_{\text{aceite}} = P_{\text{atm}} + D_{\text{agua}} \cdot g \cdot h_{\text{agua}}$$

Simplificando la presión atmosférica (P_{atm}) que es igual en los dos casos y despejando, queda:

$$D_{\text{aceite}} \cdot g \cdot h_{\text{aceite}} = D_{\text{agua}} \cdot g \cdot h_{\text{agua}}$$

En ambos lados eliminamos la gravedad “g” y tendremos que:

$$D_{\text{aceite}} = D_{\text{agua}} \cdot h_{\text{agua}} / h_{\text{aceite}}$$

Conociendo por tanto la densidad del agua y midiendo las alturas de cada rama podremos calcular la densidad del aceite.

6.8. Determinación de densidades de líquidos con equipos multiparamétricos.

Se basa la medida en un tubo en “U” al que se hace vibrar. La frecuencia varía si el tubo en “U” está vacío o si está lleno de líquido. La medida electrónica de la frecuencia de oscilación está en relación a la masa de líquido o gas que se introduce en el tubo (el volumen del tubo permanece constante).

Con este equipo se pueden medir en °Brix, % de alcohol, otras concentraciones de ácidos.

Puede utilizarse prácticamente para cualquier tipo de líquidos con muy pequeña cantidad de muestra, de unos 2 cm³ Puede medir también grados Brix o porcentaje de alcohol.



7. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE GASES.

El hecho de que un gas sea compresible influye en su densidad; cuanto más se comprime tanto más denso se hace y ello es debido a que el mismo número de moléculas y la misma masa ocupan un menor volumen.

Para los gases o vapores la densidad se expresa en kg/m^3 .

Dado que la densidad de los gases es muy sensible a la temperatura y a la presión, se ha elegido un estado de referencia, determinado por $t = 0\text{ }^\circ\text{C}$ y $P = 1\text{ atm}$, en el que 1 mol de cualquier gas ocupa sensiblemente el mismo volumen: $22,4\text{ m}^3$ y la densidad se calcula por la relación:

$$d = \frac{\text{peso molecular}}{22,4} \text{ kg/m}^3 \text{ a } 0\text{ }^\circ\text{C y } 1\text{ atm.}$$

En la tabla se muestra la densidad de algunos gases con respecto al aire:

| Gas | Densidad relativa (Aire = 1) |
|---------------------|------------------------------|
| Gas natural | 0,60 – 0,70 |
| Gas de alto horno | 1,04 – 1,00 |
| Propano (comercial) | 1,52 |
| Butano (comercial) | 2,0 |
| Acetileno | 0,91 |
| Hidrógeno | 0,07 |
| Amoniaco | 0,60 |
| Monóxido de carbono | 0,97 |
| Etileno | 0,98 |

El comportamiento real de los gases difiere del comportamiento ideal. Así, moléculas de pequeño tamaño como las del hidrógeno (H_2) a alta temperatura se aproximan al comportamiento ideal, mientras que moléculas más grandes como las de amoniaco (NH_3) y a baja temperatura se alejan bastante del comportamiento ideal y no serán aplicables las ecuaciones de los gases perfectos.

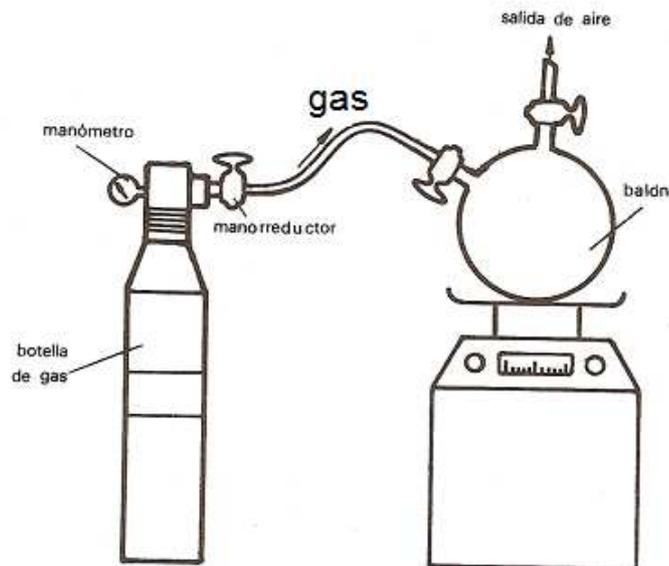
7.1. Medida de densidades de gases.

Con unos balones especiales se pueden medir densidades aproximadas de los gases con relación al aire.

Primeramente, se halla el volumen del balón llenándolo con agua destilada y su peso lleno de aire; luego se da entrada al gas manteniendo las dos llaves abiertas a fin de expulsar el aire del interior y hasta que las pesadas sean constantes.

La densidad relativa referida al aire en esas condiciones de presión y temperatura valdrán:

$$\text{Densidad relativa} = \text{peso gas problema} / \text{peso del gas referencia}$$



Primeramente se pesará con precisión el balón lleno de aire y luego se conectará este a la botella de gas. Una vez eliminado todo el aire se pesa de nuevo.

Se efectuarán varias pesadas para asegurarnos de que todo el aire ha sido desplazado.

VISCOSIDAD

1. INTRODUCCIÓN.

Los fluidos son los líquidos, los vapores y los gases. Su movimiento, transporte y propiedades son de gran importancia en muchos aspectos:

- El manejo de líquidos es mucho más sencillo y barato que el de sólidos. En la industria química se tiende a manejar las materias, siempre que sea posible, en estado líquido o en suspensión.
- El paso de un fluido por una tubería es dependiente de las características del fluido que circula por ella. Las bombas y equipos se diseñarán en función del fluido en circulación.
- En los lubricantes es fundamental controlar aspectos tales como la viscosidad y la densidad para conseguir un mejor efecto.
- En la fabricación de pinturas las características fluido-dinámicas deben de estar bien controladas para conseguir las mejores cualidades de aplicación, transporte, extensión, secado,.. Una pintura demasiado viscosa no cubre bien y una pintura poco viscosa se “descuelga” al aplicarla.
- En alimentación, por ejemplo, es importante las características de salsas, natas, cremas, mahonesas, mermeladas, miel,...

Uno de los parámetros más importantes en la influencia del movimiento de fluidos es la viscosidad.

2. VISCOSIDAD.

La **viscosidad** se define como el esfuerzo a la cortadura desarrollado en su seno o como la resistencia de rozamiento existente entre las moléculas del fluido que limitan su capacidad de fluir. Dicho de otra forma: “es la resistencia que oponen los fluidos a fluir”.

Esta resistencia se opone al movimiento de unas partículas sobre otras adyacentes y se considera como un rozamiento interno de las moléculas. Está provocada por las fuerzas de atracción entre las moléculas del líquido. Los fluidos con alta viscosidad ofrecen cierta resistencia a fluir, mientras que los poco viscosos lo hacen con facilidad.

El aceite de los motores por ejemplo, tiene una viscosidad y una resistencia a cortadura altas, mientras que la gasolina tiene una viscosidad baja. Las fuerzas de fricción en un fluido en movimiento son el resultado de la cohesión y del intercambio de la cantidad de movimiento entre moléculas.

Todos conocemos líquidos más o menos densos como la miel, glicerina, gel, pintura... En general, cuanto más larga sea una molécula, más facilidad para “liarse” y aumentar su viscosidad.

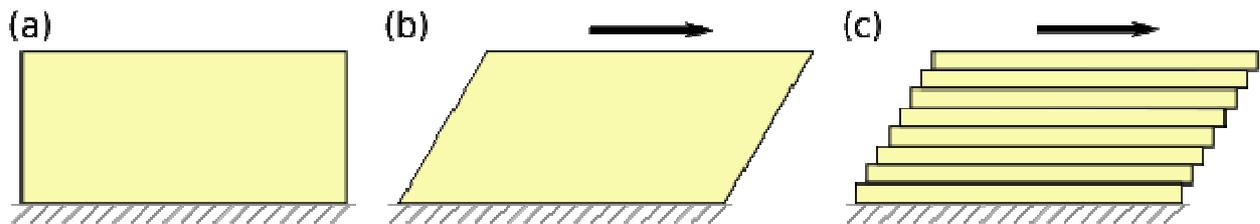
Líquidos con altas viscosidades no forman salpicaduras.

La viscosidad sólo se manifiesta en líquidos en movimiento, se define la viscosidad como la relación existente entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad. Esta viscosidad recibe el nombre de **viscosidad absoluta** o **viscosidad dinámica**. Generalmente se representa por la letra “ η_a ”.

Se conoce también otra viscosidad, denominada **viscosidad cinemática**, y se representa por " η_r ". Para calcular la viscosidad cinemática basta con dividir la viscosidad dinámica por la densidad del fluido.

Imaginemos un bloque sólido (no fluido) sometido a una fuerza tangencial (por ejemplo: una goma de borrar sobre la que se sitúa la palma de la mano que empuja en dirección paralela a la mesa.) En este caso (a), el material sólido opone una resistencia a la fuerza aplicada, pero se deforma (b), tanto más cuanto menor sea su rigidez.

Si imaginamos que la goma de borrar está formada por delgadas capas unas sobre otras, el resultado de la deformación es el desplazamiento relativo de unas capas respecto de las adyacentes, tal como muestra la figura (c).



En los líquidos, el pequeño rozamiento existente entre capas adyacentes se denomina viscosidad. Es su pequeña magnitud la que le confiere al fluido sus peculiares características; así, por ejemplo, si arrastramos la superficie de un líquido con la palma de la mano como hacíamos con la goma de borrar, las *capas* inferiores no se moverán o lo harán mucho más lentamente que la superficie ya que son arrastradas por efecto de la pequeña resistencia tangencial, mientras que las capas superiores **fluyen** con facilidad.

Si la viscosidad fuera muy grande, el rozamiento entre capas adyacentes lo sería también, lo que significa que éstas no podrían moverse unas respecto de otras o lo harían muy poco, es decir, estaríamos ante un sólido. Si por el contrario la viscosidad fuera cero, estaríamos ante un superfluido que presenta propiedades notables como escapar de los recipientes aunque no estén llenos (nitrógeno líquido, helio,..)

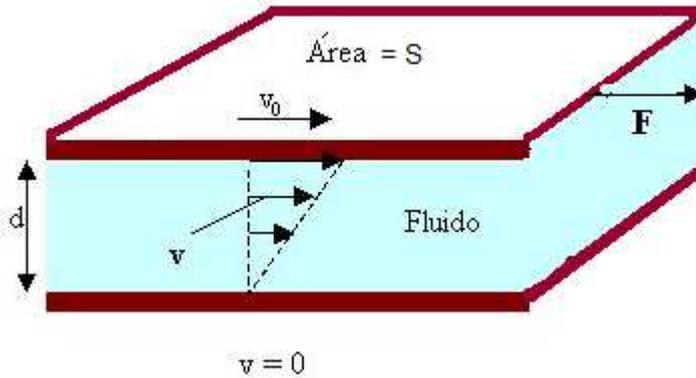
La viscosidad es característica de todos los fluidos, tanto líquidos como gases. Su estudio es más importante en líquidos.

2.1. Propiedades de la viscosidad

- La viscosidad absoluta de todos los fluidos es prácticamente independiente de la presión en el rango de valores de los ensayos de laboratorio y en la utilización en la industria.
- La viscosidad cinemática de los gases varía con la presión debido los cambios de densidad.
- En un líquido las moléculas tienen una movilidad limitada con fuerzas cohesivas grandes. Un aumento de la temperatura disminuye la cohesión entre moléculas (se apartan más) y decrece la viscosidad o "pegajosidad" del fluido.
- En un gas hay gran movilidad y muy poca cohesión, sin embargo las moléculas chocan y de aquí que se origina la viscosidad; al aumentar la temperatura la temperatura aumenta el movimiento aleatorio y por tanto la viscosidad

3. TIPOS DE VISCOSIDAD Y UNIDADES.

Sean dos láminas de fluido viscoso separadas por una distancia “d” de una superficie “S” y que se desplazan una sobre otra con una velocidad “v” arrastrada por una fuerza “F”.



Atendiendo a ello pueden medirse dos tipos de viscosidad:

- Viscosidad absoluta o dinámica.
- Viscosidad relativa o cinemática.

3.1. Viscosidad absoluta o dinámica.

Es la viscosidad de un fluido tal, que para comunicad a una capa de 1 cm^2 una velocidad constante de 1 cm/s con relación a otra capa situada a 1 cm de la primera, es necesario la aplicación de una fuerza de una dina.

Matemáticamente se expresa por:

$$\eta_a = \frac{F \cdot d}{S \cdot v}$$

F= fuerza en dinas

d = distancia en cm.

S = sección en cm^2 .

v = velocidad en cm/s

$$\eta_a = \text{viscosidad absoluta en } \frac{\text{dinas} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} = \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}} = \text{poise (P)}$$

Como el poise es una unidad muy grande, se emplea un submúltiplo, denominado centipoise:

$$1 \text{ centipoise} = 0,01 \text{ Poise} \quad 1 \text{ cP} = 0,01 \text{ P}$$

$$\text{Las unidades en el S.I. serían el } \frac{\text{Newton} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} = \text{Pa} \cdot \text{s}$$

Equivalencias entre unidades: $1 \text{ poise} = 0,1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$

3.2. Viscosidad relativa o cinemática.

Es la relación entre la viscosidad absoluta y la densidad del fluido:

$$\eta_r = \frac{\text{viscosidad absoluta}}{\text{densidad}} = \frac{\eta_a}{\rho_a} = \frac{\text{poise}}{\text{g/cm}^3} = \frac{\frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}}}{\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} = \text{Stoke (St)}$$

Como submúltiplo del Stoke se utiliza el centistoke:

$$1 \text{ centistoke} = 0,01 \text{ stoke} \quad 1 \text{ cSt} = 0,01 \text{ St}$$

Las unidades en el S.I. serían el $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

Equivalencia entre unidades: $1 \text{ stoke} = 1 \text{ cm}^2/\text{s} = 0,0001 \text{ m}^2/\text{s}$

Aún cabe considerar la viscosidad relativa midiendo la viscosidad de un fluido respecto a la de otro tomado como unidad. La viscosidad de los líquidos se suele referir al agua y la de los gases a la del aire.

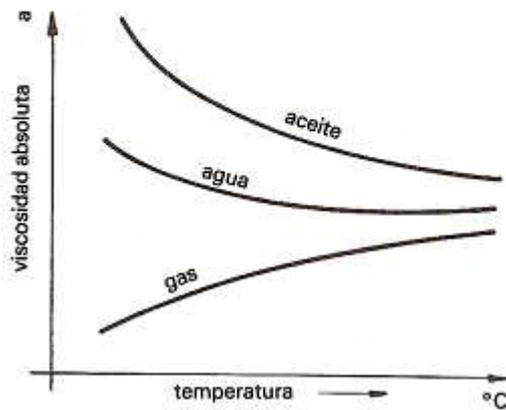
| Viscosidad de algunas sustancias | |
|----------------------------------|-------------------------|
| Fluido | Viscosidad (cP a 20 °C) |
| Aire | 0,018 |
| Acetona | 0,3 |
| Agua | 1,0 |
| Etanol | 1,2 |
| Mercurio | 1,5 |
| Etilenglicol | 20 |
| Aceite de oliva | 84 |
| Aceite SAE 5 | 32 |
| Aceite de motor SAE 20 | 125 |
| Aceite de motor SAE 50 | 540 |
| Glicerina | 500 |
| Miel | 1.500 |

4. VISCOSIDAD DE LÍQUIDOS Y GASES. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA.

Cuando aumenta la temperatura de cualquier sustancia (especialmente en líquidos y gases) las moléculas adquieren mayor movilidad y su cohesión disminuye, al igual que disminuye la acción de las fuerzas intermoleculares.

La viscosidad está poderosamente ligada a la temperatura hasta tal punto que no tiene sentido expresar sus valores sin indicar la temperatura de referencia. En general, la viscosidad de los líquidos disminuye con la temperatura, mientras que la de los gases, contrariamente, suele aumentar.

En la gráfica siguiente se observa la variación de la viscosidad de tres fluidos con la temperatura:



En la tabla siguiente se muestran las variaciones de la viscosidad dinámica y cinemática del agua, en función de la temperatura.

| Viscosidad del agua según la temperatura | | |
|--|-------|-------|
| Tª (°C) | cP | cSt |
| 0 | 1,79 | 1,79 |
| 20 | 1,002 | 1,008 |
| 20,2 | 1,000 | 1,002 |
| 40 | 0,653 | 0,660 |
| 60 | 0,471 | 0,480 |
| 80 | 0,358 | 0,368 |
| 100 | 0,281 | 0,239 |

5. OTRAS ESCALAS DE MEDIDA DE VISCOSIDAD.

5.1. Viscosidad SAE.

El nombre de esta escala proviene de la "Society of Automotive Engineers" que es una organización educativa y científica dedicada a la tecnología de la movilidad. Debido a su procedencia, es una medida para lubricantes de automoción y sirve de referencia en todo el mundo. Se designa mediante un número, el cual indica un intervalo de viscosidades (tablas). Así, por ejemplo, un lubricante SAE 20 poseerá una viscosidad comprendida entre 5,6 y 9,3 centiStokes a una temperatura de 99 °C.

Esta clasificación se divide en aceites para el motor, donde tenemos SAE 0W, 5W, 10W, 15W, 20W, 25W, 30, 40, 50 y 60; y por otra parte en aceites para engranajes, que englobaría SAE 70W, 75W, 80W, 85W, 90, 140, 250.

| Aceites de motor | | Aceites engranajes | |
|------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|
| Grado SAE | Viscosidad cinemática (cSt) 99 °C | Grado SAE | Viscosidad cinemática (cSt) 99 °C |
| 0W | 3,8 | | |
| 5W | 3,8 | 70W | 3,8 |
| 10W | 4,1 | 75W | 3,8 |
| 15W | 5,6 | 80W | 4,1 |
| 20W | 5,6 | 85W | 5,6 |
| 25W | 9,3 | 80 | 5,6 |
| 20 | 5,6 – 9,3 | 85 | 9,3 |
| 30 | 9,3 – 12,5 | 90 | 5,6 – 9,3 |
| 40 | 12,5 – 16,3 | 140 | 12,5 – 16,3 |
| 50 | 16,3 – 21,9 | 250 | 16,3 – 21,9 |
| 60 | 21,9 – 26,1 | | |

Si observamos el ejemplo anterior, nos habremos dado cuenta que los valores de viscosidad en grados SAE están medidos a 99 °C, pero alguna designación va acompañada la letra W (winter) lo que asegura que el aceite tendrá un buen comportamiento en frío. Cuando esta letra no aparece, debemos entender que no aseguran un correcto comportamiento a bajas temperaturas. Por consiguiente, si lo empleásemos en un motor, deberíamos hacerlo en épocas con clima cálido, como es el verano. Estos lubricantes que acabamos de ver reciben el nombre de aceites monogrado.

Existen también los aceites multigrado. Proviene de un aceite con características "W", al cual se le añaden aditivos que mejoran el "índice de viscosidad". Con esto logramos un lubricante polivalente, el cual asegura el comportamiento del fluido a bajas temperaturas, pero cuando éstas ascienden el lubricante pasa a comportarse como un aceite de verano.

Si tenemos un lubricante cuya designación es SAE 20W-50, estaremos empleando un fluido que a temperaturas bajas (-18 °C) poseerá las características de un SAE 20W, pero cuando la temperatura alcance los 99 °C el aceite se estará comportando como un SAE 50. De esta forma aseguraremos en todo momento una lubricación adecuada. Esto sucede habitualmente en todos los vehículos, ya que cuando se arranca el motor se encuentra a bajas temperaturas, sin embargo debido a su funcionamiento la temperatura va aumentando progresivamente.

5.2. Viscosidad ISO.

La escala ISO es aplicable a aceites industriales. Suele definirse por ISO VG, cuyas siglas significan "International Standard Organization" "Viscosity Grade".

La viscosidad en este sistema de clasificación, se divide en 18 grupos (tabla), que abarcan desde los 2 hasta los 1500 centistokes, medida a 40 °C. Gracias a este intervalo se engloban desde los aceites más finos (valvulinas) hasta los más espesos.

Cada grupo puede presentar un rango de viscosidades, por lo que se designará por un número que equivale a la viscosidad media. Por ejemplo, la viscosidad de un lubricante ISO VG 10 podrá oscilar entre 9 y 11 cSt, medida a 40 °C.

También debemos saber que el intervalo de viscosidades en cada grupo variará en +10% de su viscosidad cinemática media. Además, cada viscosidad media será aproximadamente el 50% superior a su anterior.

Las equivalencias entre el sistema SAE e ISO se pueden observar en las tablas

| Grado ISO | Punto medio cSt a 40 °C | Límites cSt a 40 °C | |
|-----------|-------------------------|---------------------|--------|
| | | Mínimo | Máximo |
| 2 | 2,2 | 1,98 | 2,42 |
| 3 | 3,2 | 2,88 | 3,52 |
| 5 | 4,6 | 4,14 | 5,06 |
| 7 | 6,8 | 6,12 | 7,48 |
| 10 | 10 | 9,0 | 11,0 |
| 15 | 15 | 13,5 | 16,5 |
| 22 | 22 | 19,8 | 24,2 |
| 32 | 32 | 28,8 | 35,2 |
| 46 | 46 | 41,4 | 50,6 |
| 68 | 68 | 61,2 | 74,8 |
| 100 | 100 | 90 | 110 |
| 150 | 150 | 135 | 165 |
| 220 | 220 | 198 | 242 |
| 320 | 320 | 288 | 352 |
| 460 | 460 | 414 | 506 |
| 680 | 680 | 612 | 748 |
| 1000 | 1000 | 900 | 1100 |
| 1500 | 1500 | 1350 | 1650 |

| Grado SAE | Grado ISO VG |
|-----------|--------------|
| 0W | 15-22 |
| 5W | 22 |
| 10W | 22-23 |
| 15W | 32-46 |
| 20W | 46-68 |
| 25W | 100 |
| 20 | 46-68 |
| 30 | 100 |
| 40 | 150 |
| 50 | 220 |
| 60 | 320 |

| Grado SAE | Grado ISO VG |
|-----------|--------------|
| 70W | 22-32 |
| 75W | 22-46 |
| 80W | 46-100 |
| 85W | 100-150 |
| 80 | 45-100 |
| 85 | 100 |
| 90 | 150-320 |
| 140 | 320-680 |
| 250 | 1000 |

6. REOLOGÍA.

La Reología es la rama de la Física que estudia la deformación o flujo de la materia. La Reología estudia los comportamientos elástico y viscoso y otros sistemas complejos con propiedades elásticas y viscosas, sustancias viscoelásticas.

Son objeto de estudio de la Reología materiales tales como plásticos, fibras sintéticas, pastas, lubricantes, cremas, suspensiones, emulsiones, etc, los cuales constituyen la materia prima de las industrias farmacéutica, cosmética, agroalimentaria, cerámica, de pinturas, de barnices y otras.

La reología estudia la elasticidad como deformación reversible que se asocia al comportamiento de los sólidos y el flujo o deformación irreversible que se asocia al comportamiento de los líquidos.

Elasticidad = deformación reversible.

Un cuerpo es perfectamente elástico si una deformación se presenta instantáneamente con la aplicación de una fuerza y desaparece completa e instantáneamente con la eliminación de la misma.

Los cuerpos elásticos no ideales son aquellos que frente a la aplicación de un esfuerzo presentan una deformación no instantánea, que no desaparece instantáneamente con la eliminación del mismo.

Se clasifican en sólidos elásticos completamente recuperables y sólidos elásticos incompletamente recuperables o visco elásticos.

Flujo = deformación irreversible. Esfuerzo Cortante (τ):

Cuando se aplica una fuerza en un punto de la superficie de un líquido, sobre éste se tendrán esfuerzos de tensión, compresión y corte. El esfuerzo se expresa en unidades de fuerza por unidad de área. La expresión matemática que define el esfuerzo de corte en términos de flujo está dada por la Ley de la viscosidad de Newton, donde se establece el flujo en una sola dirección, paralela al plano.

Desde el punto de vista de la reología, los fluidos más sencillos son los Newtonianos, llamados así porque su comportamiento sigue la ley de Newton: "El esfuerzo de corte es proporcional al gradiente de velocidad o velocidad de corte". La constante de proporcionalidad se denomina viscosidad y se mide en Pa·s (en SI), en la práctica se utiliza comúnmente el centipoise (cp).

Por definición, todos aquellos fluidos que no siguen el comportamiento descrito anteriormente son fluidos "no Newtonianos".

Una primera clasificación de los fluidos no newtonianos los divide en tres categorías:

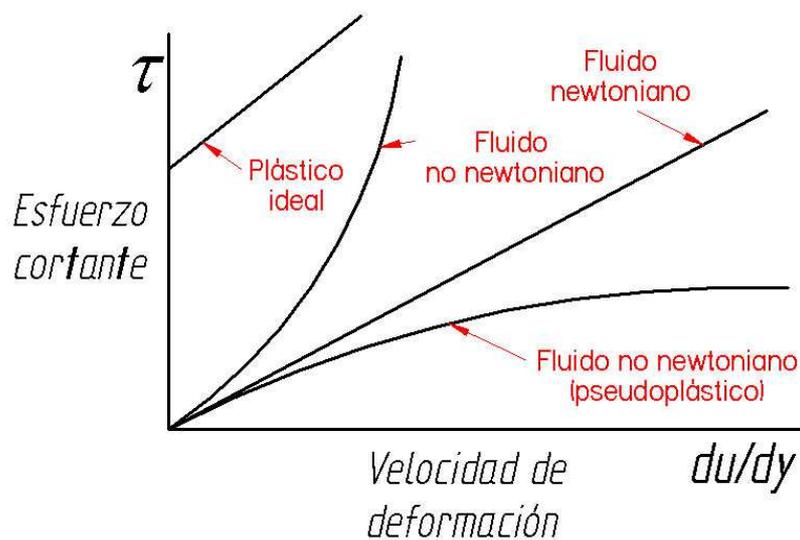
1. Comportamiento independiente del tiempo. El esfuerzo de corte solo depende de la velocidad de corte.
2. Comportamiento dependiente del tiempo. Depende del tiempo al que el fluido está sometido al esfuerzo.
3. Viscoelásticos. Estas sustancias fluyen cuando se aplica en ellas un esfuerzo de corte, pero tienen la particularidad de recuperar parcialmente su estado inicial, presentando entonces características de los cuerpos elásticos.

6.1. Fluido Newtoniano:

Un **fluido newtoniano** es un fluido cuya viscosidad puede considerarse constante en el tiempo. Los fluidos newtonianos son uno de los fluidos más sencillos de describir. La curva que muestra la relación entre el esfuerzo o cizalla contra su velocidad de deformación es lineal. El mejor ejemplo de este tipo de fluidos es el agua en contraposición al pegamento, la miel o los geles y sangre que son ejemplos de fluido no newtoniano.

Un buen número de fluidos comunes se comportan como fluidos newtonianos bajo condiciones normales de presión y temperatura: el aire, el agua, la gasolina, el vino y algunos aceites minerales.

La viscosidad de un fluido newtoniano no depende del tiempo de aplicación del esfuerzo, aunque sí puede depender tanto de la temperatura como de la presión a la que se encuentre



6.2. Fluidos no Newtonianos

Un **fluido no Newtoniano** es aquel que no se comporta de acuerdo con la Ley de Viscosidad de Newton, con la temperatura y la tensión cortante que se le aplica. Como resultado, un fluido no newtoniano no tiene un valor de viscosidad definido y constante, a diferencia de un fluido newtoniano.

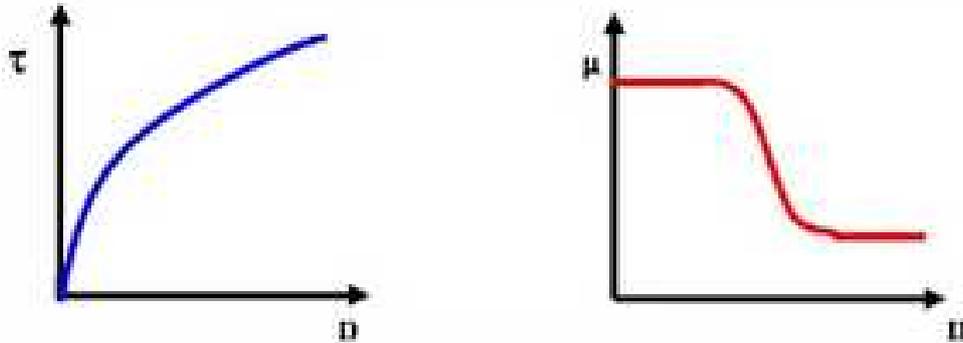
En estos fluidos puede resultar inadecuado utilizar la viscosidad como propiedad que caracteriza al material, estos fluidos se pueden caracterizar mejor mediante otras propiedades reológicas.

Un ejemplo de fluido no newtoniano puede hacerse fácilmente añadiendo almidón de maíz en una taza de agua. Cuando la suspensión se acerca a la concentración crítica es cuando las propiedades de este fluido no newtoniano se hacen evidentes. La aplicación de una fuerza con la cucharilla hace que el fluido se comporte de forma más parecida a un sólido que a un líquido. Si se deja en reposo recupera su comportamiento como líquido. Se investiga con este tipo de fluidos para la fabricación de chalecos antibalas, debido a su capacidad para absorber la energía del impacto de un proyectil a alta velocidad, pero permaneciendo flexibles si el impacto se produce a baja velocidad.

Un ejemplo familiar de un fluido con el comportamiento contrario es la pintura. Se desea que fluya fácilmente cuando se aplica con el pincel y se le aplica una presión, pero una vez depositada sobre la superficie se desea que no gotee.

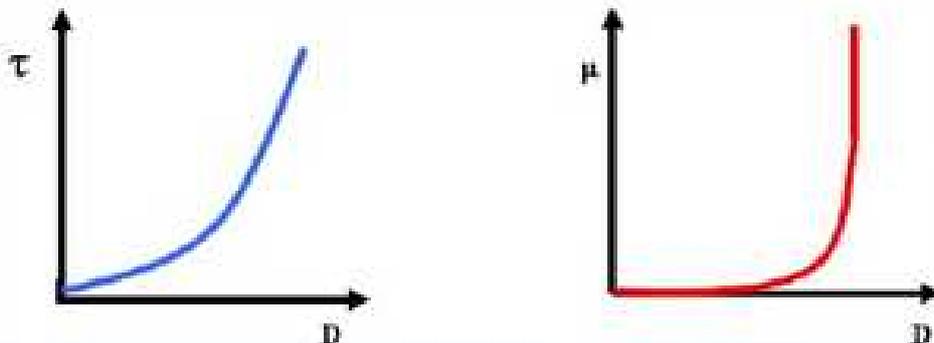
6.2.1. Pseudoplásticos

Este tipo de fluidos se caracterizan por una disminución de viscosidad, y de su esfuerzo cortante, con la velocidad de la deformación. Ejemplos de fluidos pseudoplásticos son: algunos tipos de ketchup, mostaza, algunas pinturas, suspensiones acuosas de arcilla.



6.2.2. Dilatantes:

Estas son suspensiones en las que se produce un aumento de la viscosidad con la velocidad de deformación, es decir, un aumento del esfuerzo cortante con dicha velocidad. Ejemplos de este tipo de fluidos son la harina de maíz mezclada con agua que da lugar a una masa que se vuelve muy espesa al moverla, las disoluciones de almidón muy concentradas, la arena mojada, etc.



6.2.3. Plástico de Bingham.

Estas sustancias presentan un comportamiento sólido mientras el esfuerzo de corte no supere un valor de fluencia, una vez superado este valor pueden adoptar un comportamiento newtoniano.

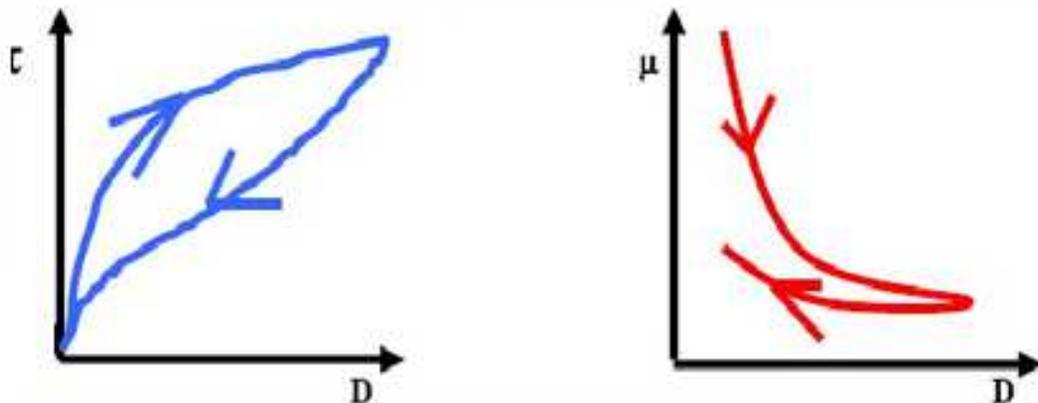
Estas características pueden ser deseables en ciertos fluidos, un caso típico es la pasta dental que se pretende que permanezca en reposo cuando está aplicada sobre el cepillo pero que fluya con el cepillado. El puré de tomate o un extracto de carne tienen también esta propiedad.

6.2.4. Fluidos tixotrópicos.

Se caracterizan por un cambio de su estructura interna al aplicar un esfuerzo. Esto produce la rotura de las largas cadenas que forman sus moléculas. Dichos fluidos una vez aplicado el esfuerzo sólo pueden recuperar su viscosidad inicial tras un tiempo de reposo.

La viscosidad va disminuyendo al aplicar una fuerza y acto seguido vuelve a aumentar al cesar dicha fuerza debido a la reconstrucción de sus estructuras y al retraso que se produce para adaptarse al cambio.

Ejemplos típicos de fluidos tixotrópicos son: las pinturas, el yogurt, las tintas de impresión, la salsa de tomate, algunos aceites del petróleo, etc.



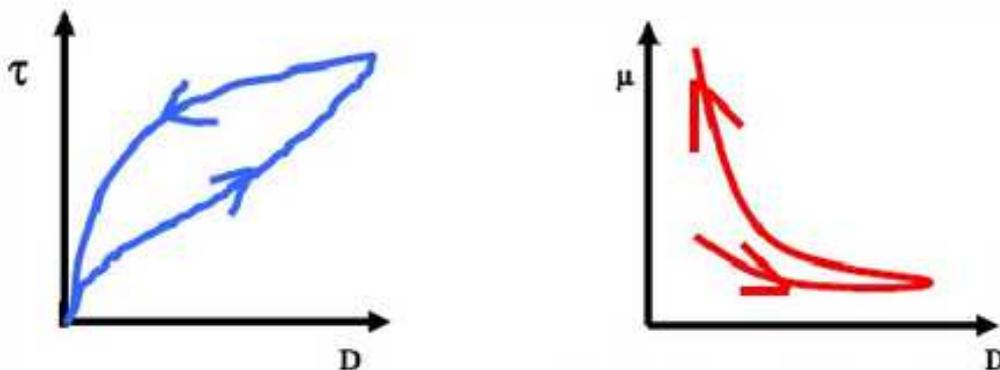
Al agitar se hace fluido y se espesa cuando cesa el esfuerzo

6.2.5. Fluidos reopécticos.

Estos fluidos se caracterizan por tener un comportamiento contrario a los tixotrópicos, es decir, que su viscosidad aumenta con el tiempo y con la velocidad de deformación aplicada.

Esto es debido a que si se aplica una fuerza se produce una deformación de enlaces intermoleculares conllevando un aumento de viscosidad, mientras que si cesa ésta se produce una destrucción de los enlaces, dando lugar a la disminución de la viscosidad.

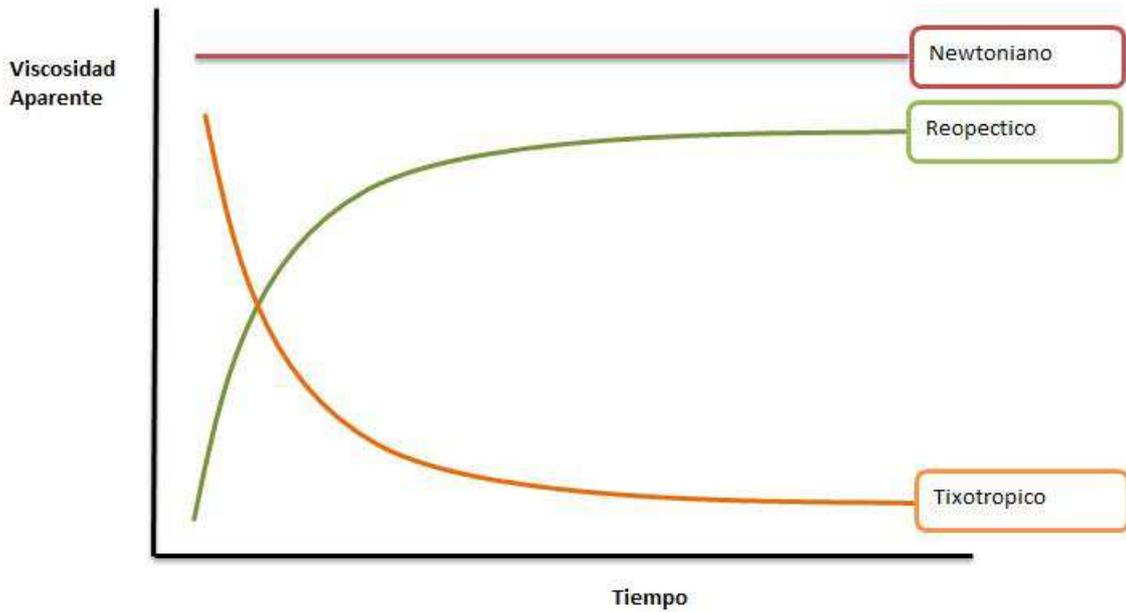
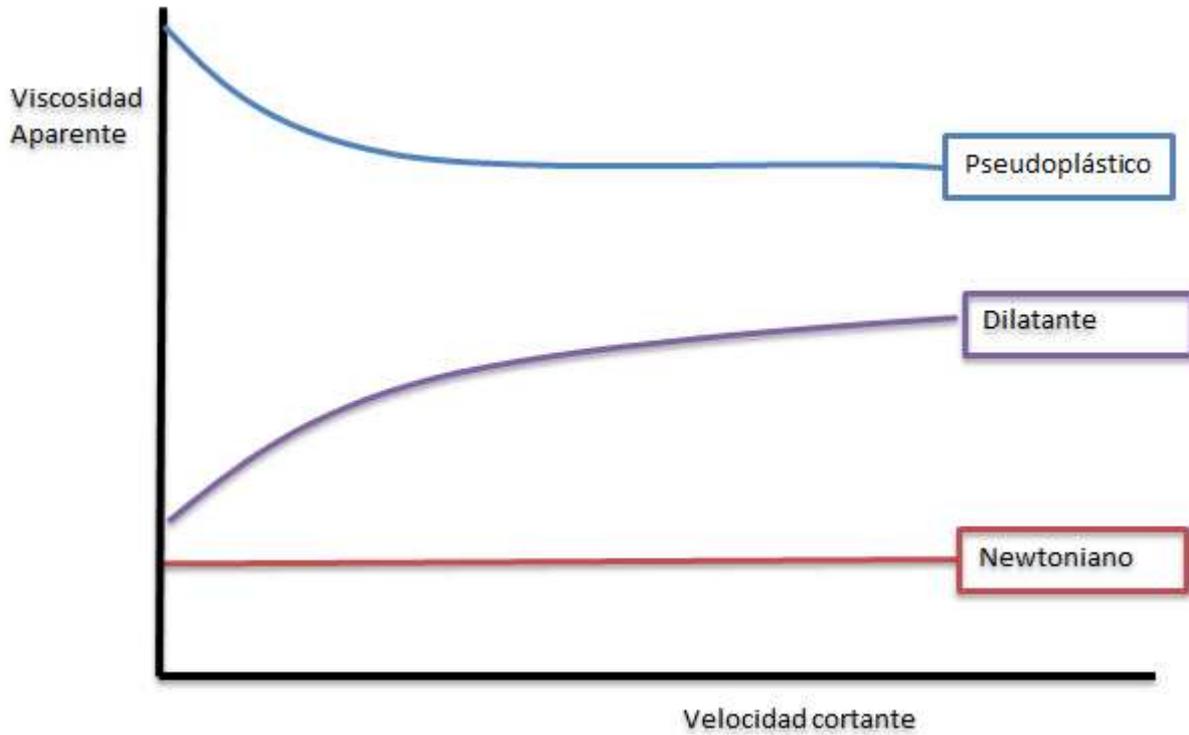
Existen pocos fluidos de este tipo. Un ejemplo es el yeso.



Al agitar vigorosamente se hace más viscoso

6.3. Viscosidad aparente de los fluidos

Una forma más intuitiva de conocer el comportamiento de los fluidos es establecer la viscosidad aparente en función del tiempo.



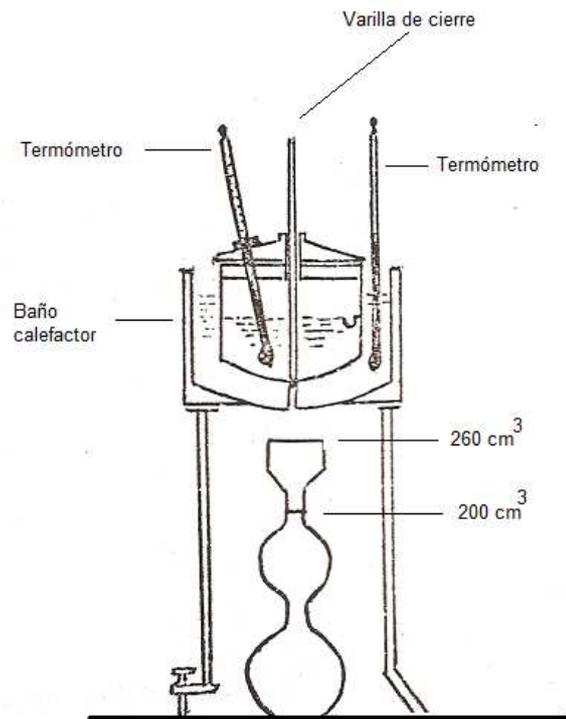
7. MÉTODOS DE MEDIDA DE VISCOSIDAD.

El viscosímetro es el aparato destinado a medir la viscosidad. Su funcionamiento está basado en alguno de los fenómenos relacionados con la viscosidad:

- Medida de la viscosidad dinámica o absoluta: se puede definir o medir por el tiempo en que un líquido tarda en fluir a través de un tubo capilar a una determinada temperatura. Su unidad es el centiPoise ($1 \text{ cP} = 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$)
 - Viscosímetro Engler.
 - Viscosímetros capilares: Cannon Fenske, Ostwald,...
 - Viscosímetro de Copa Ford.
- Medida de la viscosidad cinemática o relativa: representa la característica propia del líquido desechando las fuerzas que generan su movimiento. Por ejemplo cuando se hace mover algo dentro del fluido y se observa la oposición al giro o al movimiento de un objeto. Se define como el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad del producto en cuestión. Su unidad es el centiStoke ($1 \text{ cSt} = \text{mm}^2/\text{s}$)
 - Viscosímetro rotacional.
 - Viscosímetro de caída de bola o Höppler.

7.1. Determinación de la viscosidad con el viscosímetro de Engler.

Se utiliza para determinar la viscosidad relativa de los aceites lubricantes, petróleos, gasolinas, etc. a la temperatura de trabajo que suele ser de 20º a 80º. Se precisan 200 a 250 cm³ de producto para la determinación. Consta de un depósito o vasija metálica, niquelada o dorada en su interior, con un orificio y tubo de salida en su base algo cónica, y con tres índices o señales que marcan la capacidad fija del instrumento.



Es uno de los equipos más utilizado en la medida de viscosidades relativas. Consta de un recipiente donde se coloca el líquido cuya densidad se mide y en un baño exterior de agua o aceite. El conjunto está soportado por un trípode, u otro medio, con un nivelador de tornillos a fin de mantenerlo perfectamente horizontal. El depósito con el líquido a ensayar lleva tres puntos de enrase y se mide siempre el mismo volumen en cada ensayo.

La determinación consiste en determinar con un cronómetro el tiempo que tarda en verterse 200 cm³ de agua destilada y el empleado por igual cantidad del líquido problema, a la misma temperatura en ambos casos.

El cálculo será el resultado del cociente:

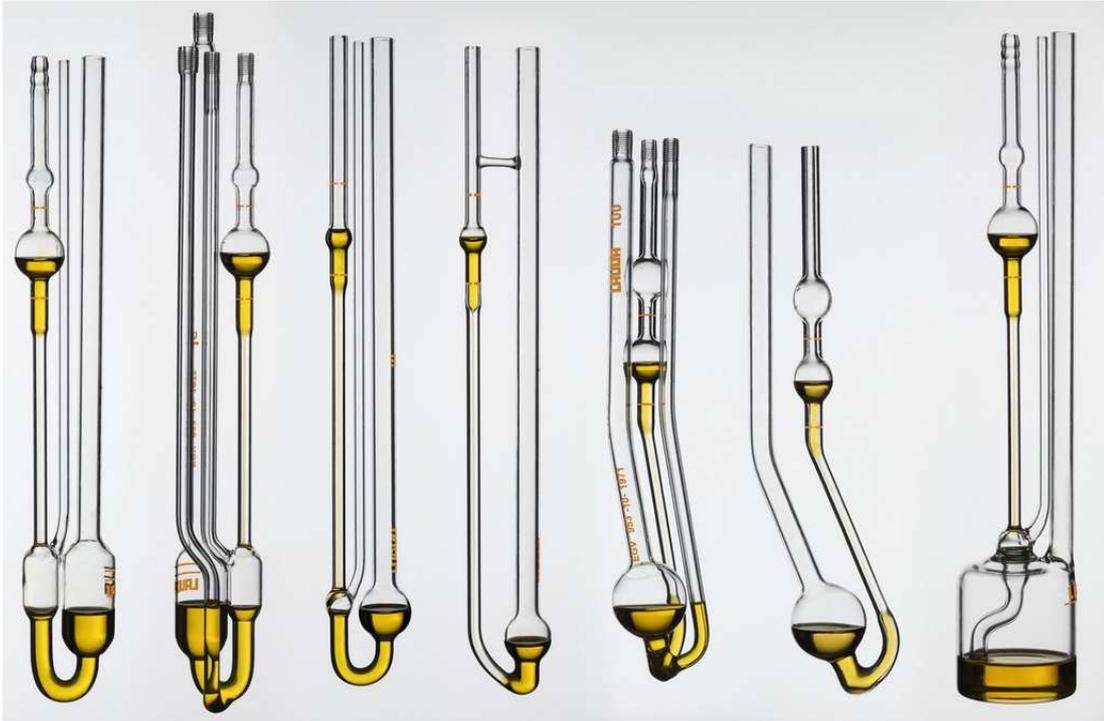
$$\text{Engler} = \frac{\text{Tiempo en verter } 200 \text{ cm}^3 \text{ de líquido a } t \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{Tiempo en verter } 200 \text{ cm}^3 \text{ de agua a } 20 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Como la viscosidad depende de la temperatura, se efectúan ensayos a valores distintos de la misma.

7.2. Determinación de la viscosidad con el viscosímetro de Cannon-Fenske y otros viscosímetros capilares.

Los viscosímetros capilares (los de Cannon-Fenske y de Ostwald son los más utilizados) consisten en tubos de vidrio de forma irregular, una de cuyas ramas posee un estrechamiento capilar con ensanchamientos en los extremos.

Primero se calibra con agua destilada, midiendo el tiempo de descenso entre las dos marcas señaladas en el tubo y, luego, se ensaya con el líquido problema a distintas temperaturas en baños calefactores.



Con estos viscosímetros se mide la viscosidad cinemática en Stokes.

Se calibra primero el aparato llenándolo de agua y se cronometra el tiempo que tarda en descender entre los dos puntos de referencia a una temperatura de 20 °C.

Viscosidad del agua a 20 °C = 1 centipoise (1cP)

$$\eta_r = \frac{\text{Tiempo líquido a } t \text{ °C}}{\text{Tiempo agua a } 20 \text{ °C}}$$

Para un cálculo más preciso se multiplica cada uno de los tiempos hallados por la densidad del líquido.

$$\eta_r = \frac{\rho_1 \cdot t_1}{\rho_2 \cdot t_2}$$

ρ_1 y ρ_2 = densidades de líquido y agua.

t_1 y t_2 = tiempo del líquido y del agua.

7.3. Determinación de la viscosidad con el viscosímetro de Copa Ford.

Este aparato permite determinar con rapidez y fácilmente la viscosidad o la consistencia de barnices, pinturas y otros productos similares.

El aparato consiste en una copa de medidas determinadas apoyada sobre un trípode regulable por sus pies. Antes de comenzar el ensayo es conveniente que la copa y el recipiente que contiene el producto a ensayar, estén a 20 °C.

La medida de viscosidad se efectúa llenando la copa hasta el rebosadero y dejando caer el fluido en un recipiente situado debajo de la copa y cronometrando el tiempo de caída hasta que se produce por primera vez la ruptura del hilo de líquido.



El tiempo en segundos indica la viscosidad en grados DIN.

Puede convertirse la viscosidad DIN en otros sistemas de medida a través de las siguientes relaciones:

$$1 \text{ } ^\circ \text{ DIN de viscosidad} \equiv 0,1 \text{ } ^\circ \text{ Engler} \equiv 0,059 \text{ } ^\circ \text{ Redwood} \equiv 0,07 \text{ } ^\circ \text{ Saybolt}$$



7.4. Determinación de la viscosidad con el viscosímetro rotatorio.

El funcionamiento de un Viscosímetro rotacional se basa en la resistencia a la torsión que ofrece un líquido al giro de un husillo de características conocidas, sumergido en el líquido. El cilindro o disco (husillo) giratorio, está acoplado con un muelle al árbol motor que gira a una velocidad determinada. El ángulo de desviación del eje se mide electrónicamente dando la medida de torsión.

Los cálculos realizados dentro de los viscosímetros a partir de las medidas de la fuerza de torsión. De la velocidad del eje y de sus características, dan una lectura directa de la viscosidad en centipoises (mPas).



Los viscosímetros disponen de una serie de varios tipos de husillos y de una extensa gama de velocidades, proporcionando así una gran capacidad de medida de la viscosidad. Para cualquier líquido de viscosidad determinada, la resistencia al avance aumenta proporcionalmente a la velocidad de rotación del husillo o al tamaño del mismo.

Los viscosímetros permiten efectuar la medición en cP teniendo en cuenta la velocidad seleccionada y el tipo de husillo escogido. Las combinaciones de husillos y velocidades, permiten elegir una escala óptima para cualquier medición, dentro de la gama del equipo.

Los cambios de rango pueden realizarse utilizando el mismo husillo a diferentes velocidades para determinar las propiedades reológicas de un líquido.

7.5. Determinación de la viscosidad con el viscosímetro de caída de bola.

El viscosímetro de caída de bola se basa en el sistema de medida de Höppler.



En este experimento estudiamos la dependencia de la viscosidad de un líquido newtoniano en función de la temperatura. El procedimiento consiste en medir el tiempo que una esfera sólida necesita para recorrer una distancia entre dos puntos de referencia dentro del tubo inclinado que contiene la muestra bajo estudio. Mediante un termostato de circulación podemos variar la temperatura de la muestra y estudiar la variación de la viscosidad con la temperatura.



Los resultados obtenidos se determinan como viscosidad dinámica (η) en la medida estandarizada en el sistema internacional (mPa.s) :

$$\eta = K (\rho_1 - \rho_2) \cdot T$$

En donde K es la constante de la bola, ρ_1 la densidad de la bola, ρ_2 la densidad del líquido a la temperatura de trabajo y t el tiempo de caída de la bola.

TENSIÓN SUPERFICIAL

1. LA TENSIÓN SUPERFICIAL.

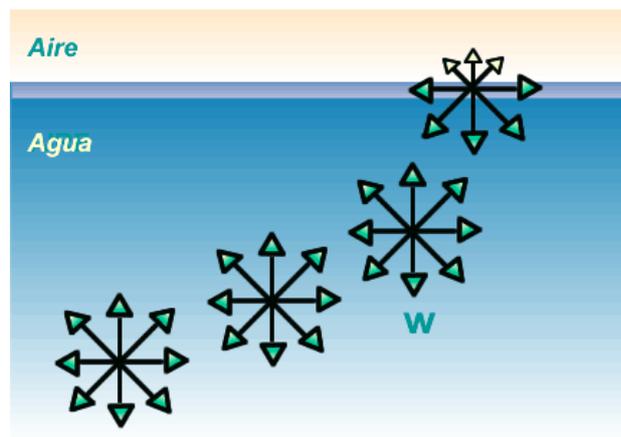
Existen determinados fenómenos físicos:

- Ascenso de un fluido por un capilar.
- Formación de gotas
- Formación de pompas.
- Resistencia de un líquido a la penetración en su superficie.
- "Flotabilidad" del acero o aluminio en agua, etc.

que sólo pueden ser explicados si tenemos en cuenta que las superficies libres de los líquidos se comportan de un modo distinto a como lo hace un líquido alejado de la superficie.



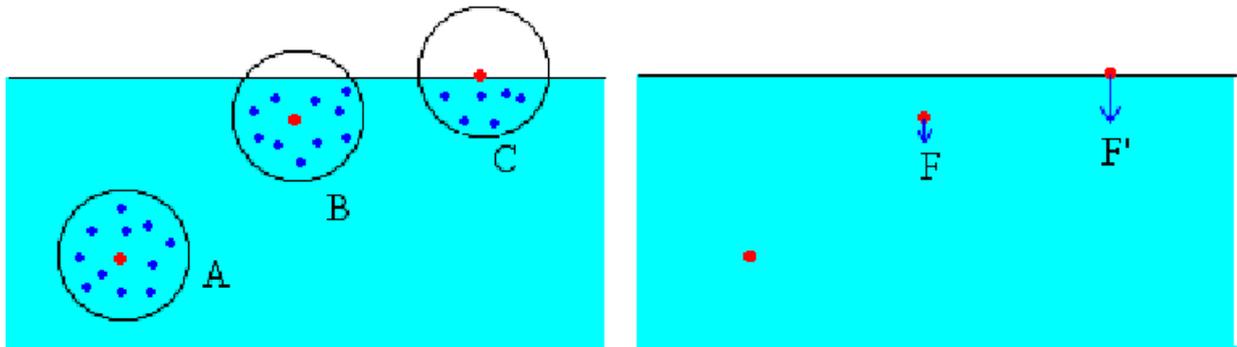
Para poder comprender estos fenómenos tendremos en cuenta las interacciones entre moléculas (fuerzas de Van der Waals, gravitacionales, etc.). Para ello consideraremos moléculas en el seno de un fluido: en la superficie y en el interior.



En la figura se observa como la resultante de fuerzas en una molécula situada en el interior del fluido es nula por razones de simetría, mientras que en una molécula situada en la superficie la resultante será una fuerza perpendicular a la superficie y dirigida hacia el seno del líquido.

El radio de acción de las fuerzas moleculares es relativamente pequeño, abarca a las moléculas vecinas más cercanas. Vamos a determinar de forma cualitativa, la resultante de las fuerzas de interacción sobre una molécula que se encuentra en

- A, el interior del líquido
- B, en las proximidades de la superficie
- C, en la superficie

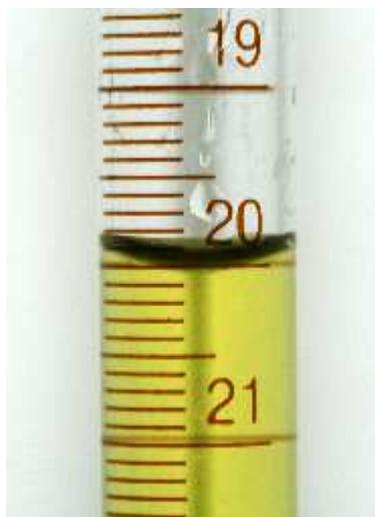


Consideremos una molécula (en color rojo y mayor tamaño) en el seno de un líquido en equilibrio, alejada de la superficie libre tal como la A. Por simetría, la resultante de todas las fuerzas atractivas procedentes de las moléculas (en color azul y más pequeñas) que la rodean, será nula.

En cambio, si la molécula se encuentra en B, por existir en valor medio menos moléculas arriba que abajo, la molécula en cuestión estará sometida a una fuerza resultante dirigida hacia el interior del líquido (F).

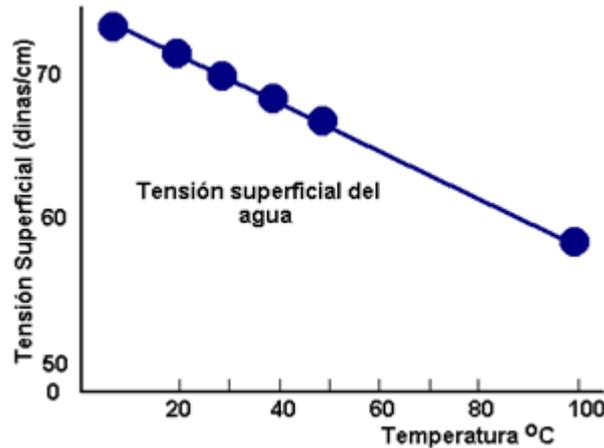
Si la molécula se encuentra en C, la resultante de las fuerzas de interacción es mayor que en el caso B. Las fuerzas de interacción, hacen que las moléculas situadas en las proximidades de la superficie libre de un fluido experimenten una fuerza dirigida hacia el interior del líquido (F').

Como todo sistema mecánico tiende a adoptar espontáneamente el estado de más baja energía potencial, se comprende que los líquidos tengan tendencia a presentar al exterior la superficie más pequeña posible. Los líquidos tenderán a formar una superficie curvada como se observa en la formación de "meniscos" en las figuras siguientes.



1.1. Propiedades de la tensión superficial.

- A mayor fuerza cohesión entre moléculas líquido, mayor será la tensión superficial.
- Para un líquido dado, el valor de σ disminuye con la temperatura, debido al aumento de la cinética molecular, lo que disminuye las fuerzas intermoleculares.



- La tensión superficial depende de la naturaleza de las dos fases puestas en contacto:
 - Líquido con un gas.
 - Dos líquidos en contacto.
 - Líquido con una superficie sólida. El líquido podrá mojar o no debido a las diferencias entre las fuerzas cohesivas (dentro del líquido) y las adhesivas (líquido-superficie sólida).

2. FÓRMULA Y UNIDADES DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL.

Se denomina tensión superficial a la fuerza que actúa por unidad de longitud en el borde de una superficie libre de un líquido en equilibrio y que tiende a contraer dicha superficie. Así:

$$\sigma = \frac{F}{L} = \frac{\text{Newton}}{m}$$

Alternativamente, la tensión superficial, se puede definir como la cantidad de energía necesaria para aumentar su superficie por unidad de área. En este caso, se medirá en unidades de energía/superficie ($\text{J/m}^2 = \text{N/m}$). Así:

$$\sigma = \frac{E}{A} = \frac{\text{Julio}}{m^2}$$

Se puede encontrar en distinta bibliografía la tensión superficial con la letra gamma, γ .

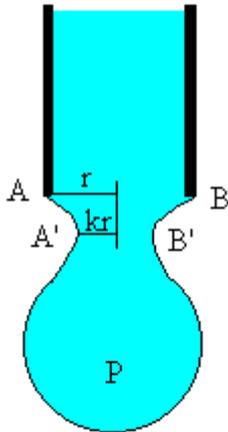
Otras unidades muy utilizadas son la dina/cm y el ergio/cm².

$$\begin{aligned} 1 \text{ dina/cm} &= 1 \cdot 10^{-3} \text{ N/m} & 1 \text{ N/m} &= 1000 \text{ dina/cm} \\ 1 \text{ ergio/cm}^2 &= 1 \cdot 10^{-3} \text{ J/m}^2 & 1 \text{ J/m}^2 &= 1000 \text{ ergio/cm}^2 \end{aligned}$$

3. LEYES Y APLICACIONES DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL.

3.1. Ley de Tate.

En el fluir lentamente de un líquido por el extremo de un tubo vertical estrecho, se forma una gota que va creciendo poco a poco, pero cuando el peso es suficiente se produce una estrangulación y la gota cae. Hasta el momento de la caída de la gota, ésta estaba sostenida por la tensión superficial existente a lo largo de la estrangulación. Cuando el peso iguala a dicha tensión tiene lugar la caída.



Tate enuncia su ley de este modo: "el peso de una gota es proporcional al radio del tubo y a la tensión superficial".

$$P = k \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma$$

Siendo P el peso de la gota, y k un coeficiente de contracción que se ha de determinar experimentalmente.

De esta fórmula se deduce que todas las gotas que salen por un mismo orificio tienen idéntico peso. Esto se aplica cuando utilizamos un cuentagotas para medir pequeñas cantidades de líquido.

La aplicación de esta ley nos permite realizar medidas relativas de la tensión superficial. Sabiendo la tensión superficial del agua podemos medir la tensión superficial del líquido problema.

Llenamos un cuentagotas de agua cuya tensión superficial es σ_1 , y dejamos caer un número n de gotas sobre el platillo de una balanza, medimos su masa m_1 (normalmente agua).

Llenamos el mismo cuentagotas con un líquido cuya tensión superficial es desconocida σ_2 , dejamos caer el mismo número n de gotas sobre el platillo de la balanza y medimos su masa m_2 .

La ley de Tate nos dice que se deberá cumplir la relación:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$$

El agua destilada es el líquido de referencia con tensión superficial a 20 °C es de 0,0728 N/m = 72,8 dina/cm

Ejemplo:

- 10 gotas de agua tienen una masa de 586 mg
- 10 gotas de aceite tienen una masa de 267 mg

La tensión superficial del aceite será:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \Rightarrow \frac{586}{267} = \frac{0,0728}{\sigma_2}$$

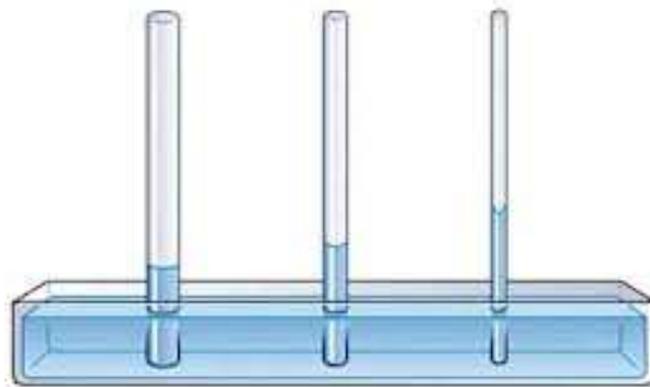
La tensión superficial del aceite es $\sigma_2 = 0,033 \text{ N/m}$

3.2. Ley de Jurin de capilaridad.

Por capilaridad asciende el líquido a través de una mecha, se propaga la tinta a través de un papel secante, asciende la savia en los vegetales, etc...

El ascenso de un líquido por un tubo capilar viene regido por la tensión superficial de aquél. La altura a la que se eleva o desciende un líquido en un capilar es directamente proporcional a su tensión superficial y está en razón inversa a la densidad del líquido del radio del tubo.

Este fenómeno fue estudiado por Jurin y se expresa así: *“los ascensos de un líquido en diferentes tubos capilares son inversamente proporcionales a los radios de éstos”*



La ley de Jurin define la altura que se alcanza cuando se equilibra el peso de la columna de líquido y la fuerza de ascensión por capilaridad. La altura h en metros de una columna líquida está dada por la ecuación:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r}$$

Donde:

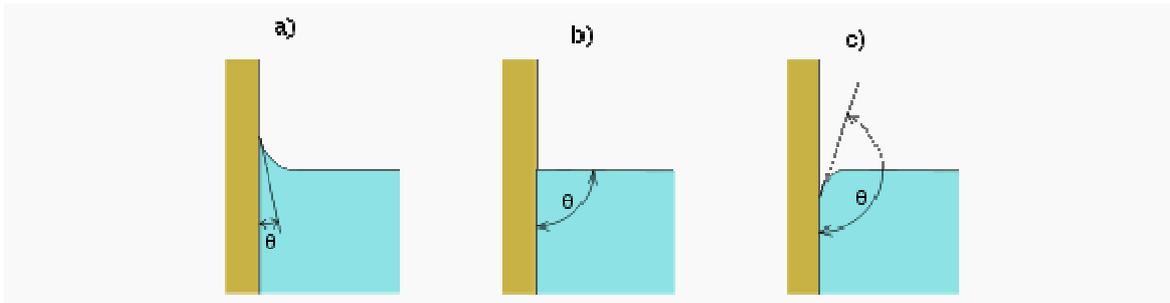
σ = tensión superficial (N/m)

$\cos \theta$ = ángulo de contacto

ρ = densidad del líquido (kg/m^3)

g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

r = radio del tubo (m)



Para un tubo de vidrio en el aire a nivel del mar y lleno de agua destilada,

$$\sigma = 0,0728 \text{ N/m}$$

$$\cos \theta = \cos 0^\circ = 1,000$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

entonces, la altura de la columna de agua, en metros, será:

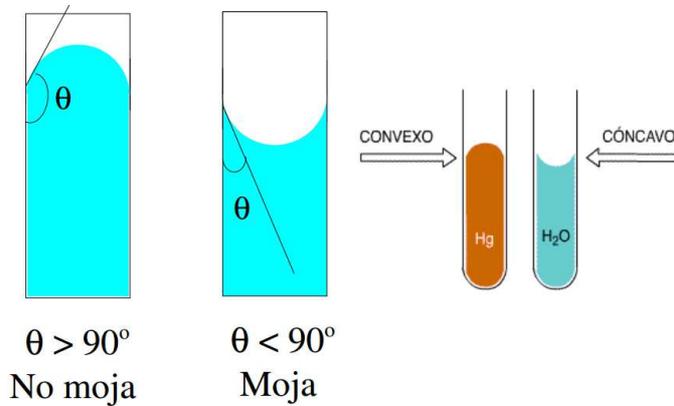
$$h \approx \frac{2 \cdot 0,0728 \cdot 1,000}{1000 \cdot 9,8 \cdot r} \approx \frac{1,5 \cdot 10^{-5}}{r} \text{ m}$$

Por ejemplo, en un tubo de 1 mm de radio, el agua ascenderá por capilaridad unos 15 mm.

| Tensión superficial de algunos líquidos | |
|---|-------------------------|
| Líquido | Tensión superficial N/m |
| Alcohol etílico | 0,0223 |
| Benceno | 0,0289 |
| Tetracloruro de Carbono | 0,0267 |
| Querosene | 0,023 - 0,032 |
| Mercurio | 0,51 |
| Petróleo | 0,023 - 0,038 |
| Lubricante | 0,023 - 0,038 |
| Agua | 0,074 |

3.3. Formación de meniscos.

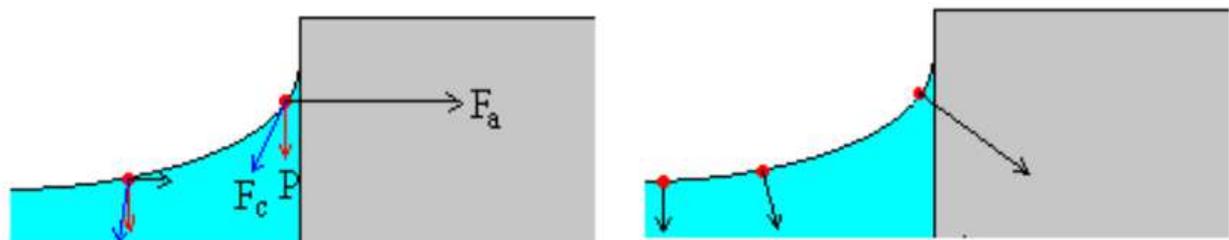
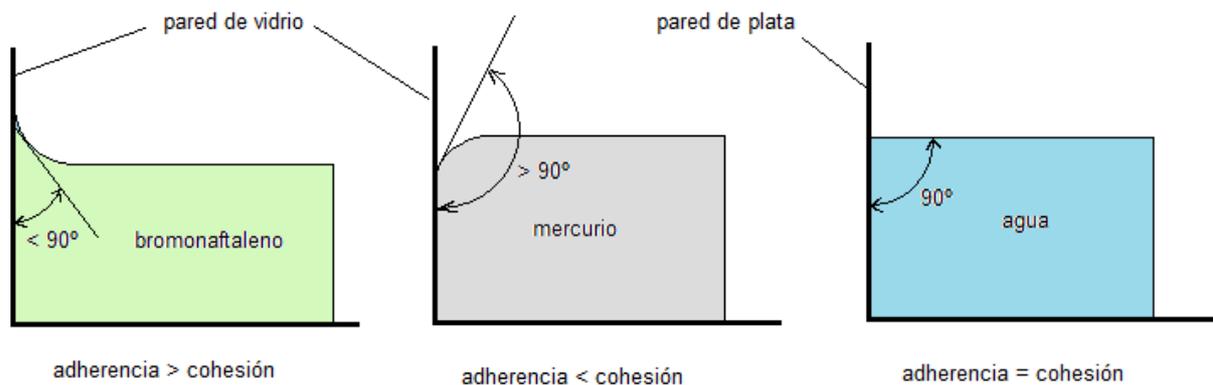
Al poner en contacto un líquido con una pared sólida, la superficie del líquido se curva formándose los meniscos, que pueden ser cóncavos o convexos.



Siempre que el líquido moja al sólido, es decir, siempre que la adherencia entre el sólido y el líquido es mayor que la fuerza de cohesión de éste último, se forma un menisco cóncavo. Forman meniscos cóncavos: el agua, ácidos y la mayoría de los líquidos orgánicos.

Por el contrario, siempre que el líquido no moja al sólido, es decir, siempre que la cohesión de las moléculas del líquido es mayor que su adherencia al sólido, se forma un menisco convexo. El caso típico es el del mercurio cuyas moléculas tienen una gran cohesión.

En el caso de que la adherencia sea aproximadamente igual a la cohesión del líquido, como es el caso del agua-plata, no hay menisco.



En el ascenso del líquido por el capilar podemos ver como es consecuencia del balance entre tres fuerzas: adhesión, cohesión y peso.

3.4. Ley de Laplace.

Se relaciona con esta ley la diferencia de presiones entre las dos caras de una superficie líquida cerrada con la tensión superficial de la sustancia que forma esa superficie.

La fórmula de Laplace demuestra que la presión en el interior de de una superficie esférica es siempre mayor que en el exterior, que la diferencia de presión se incrementa cuando disminuye al radio de dicha superficie, y que se hace cero cuando la superficie es plana (radio infinito). Así:

$$\Delta P = P_i - P_e = \frac{2 \cdot \sigma}{R}$$

Donde:

ΔP = diferencia de presión ambas superficies.

P_i = presión interior

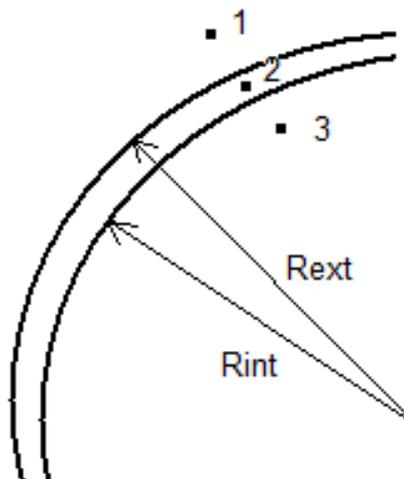
P_e = presión exterior

σ = tensión superficial de la sustancia

R = radio de la esfera

Esta es la sobrepresión que existe en una gota de agua o en una burbuja, para el caso de una pompa, este valor se multiplica por 2, puesto que hay dos superficies interfase (aire-líquido).

Para una pompa esférica existen dos superficies una interior y otra exterior, como las paredes son muy finas se puede suponer que $r_{\text{interior}} = r_{\text{exterior}}$, entonces:



Entre los puntos 2 y 3: $\Delta P = P_3 - P_2 = \frac{2 \cdot \sigma}{R}$

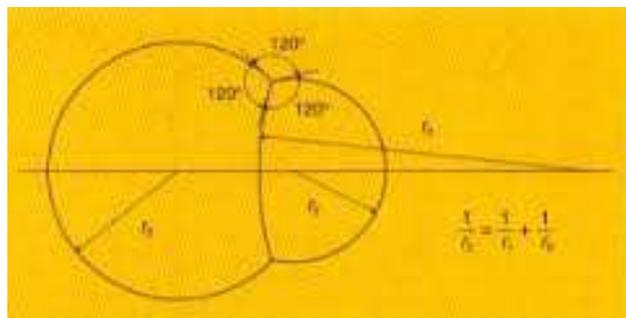
Entre los puntos 1 y 2: $\Delta P = P_2 - P_1 = \frac{2 \cdot \sigma}{R}$

Sumando las expresiones: $P_3 - P_1 = \frac{4 \cdot \sigma}{R}$ que es la expresión para una burbuja o pompa.

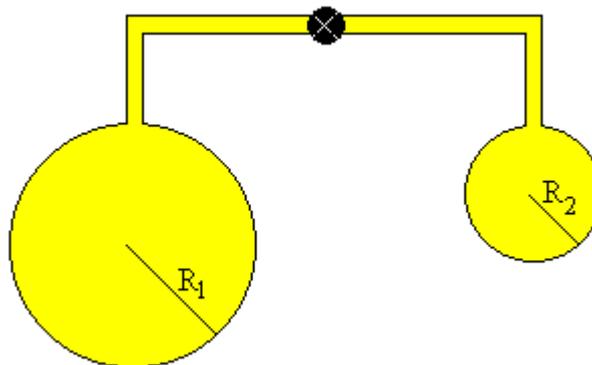
La esfera tiene menor área superficial para un volumen dado. La tensión superficial tiende a reducir el área de la superficie y por tanto, el volumen de la gota.

Los líquidos tienden a minimizar su superficie. Por esta razón, las gotas tienen forma esférica en ausencia de gravedad.

Cuando dos pompas se unen, se aplican los mismos principios físicos, y las pompas adoptarán la forma con el menor área posible. Su pared común se desplazará e integrará con la pompa de mayor tamaño, ya que las pompas más pequeñas tienen una presión interna mayor. Si las pompas son de igual tamaño, la pared será plana.



Si se encuentran dos o más pompas, se colocan de manera que sólo se tocan tres paredes en una misma línea, separadas por ángulos de 120° . Esta es, de nuevo, la elección más eficiente, y es la razón por la que las celdas de un panal usan ángulos de 120° , formando hexágonos.

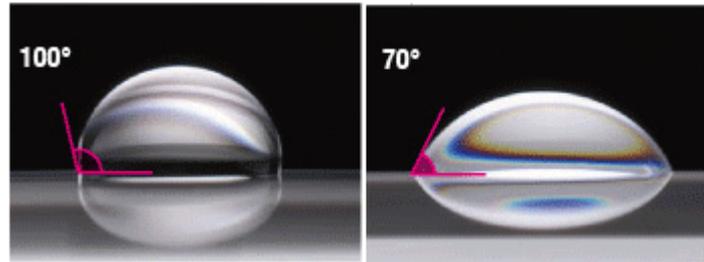


Si ponemos dos pompas de jabón de radios R_1 y R_2 en los extremos de un tubo, y abrimos la llave que las comunica veremos que la pompa de jabón de radio menor es "comida" por la pompa de radio mayor.

Observamos como la burbuja pequeña se hace cada vez más pequeña mientras crece la burbuja grande.

3.5. Mojabilidad.

La mojabilidad es la capacidad que tiene un líquido de extenderse y dejar una traza sobre un sólido. Depende de las interacciones intermoleculares entre las moléculas superficiales de ambas sustancias. Se puede determinar a partir del ángulo que el líquido forma en la superficie de contacto con el sólido, denominado ángulo de contacto; a menor ángulo de contacto, mayor mojabilidad.

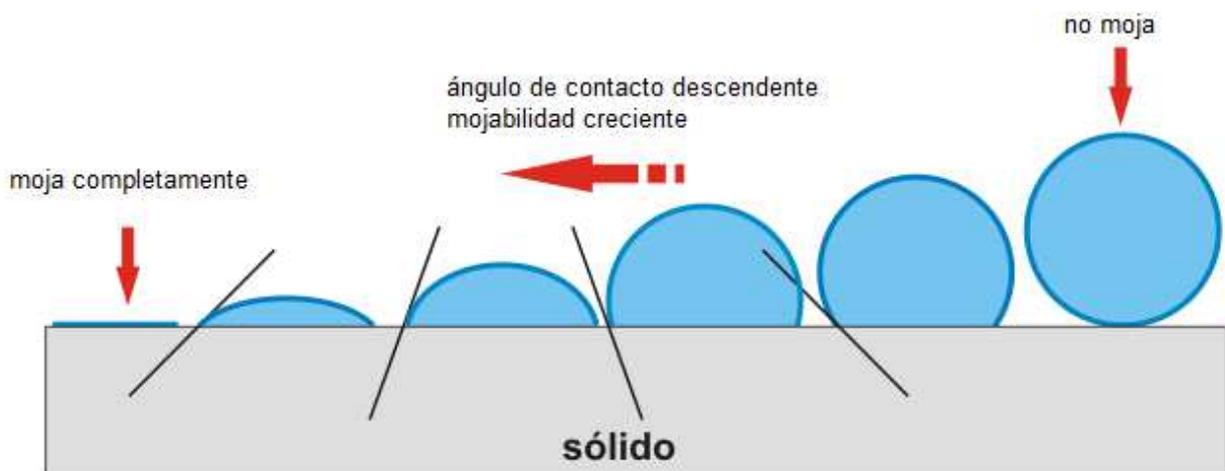


La mojabilidad está relacionada con otros efectos, como la capilaridad. Independientemente del valor de la mojabilidad, cualquier líquido sobre una superficie sólida forma un casquete esférico. Algunas sustancias disueltas en el agua pueden modificar su tensión superficial y por tanto su mojabilidad.

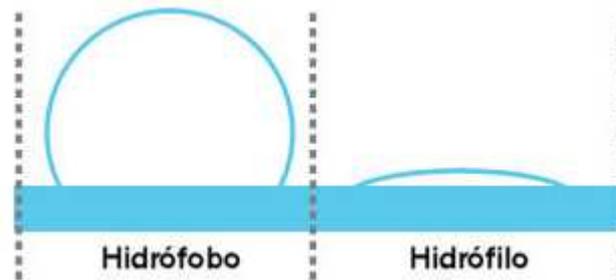
La mojabilidad depende de las fuerzas intermoleculares de los materiales en contacto; las fuerzas adhesivas entre el líquido y el sólido provocan que el líquido se extienda por la superficie, mientras que las cohesivas del líquido hacen que éste se “abulte” y tienda a evitarla.

El ángulo de contacto θ es el ángulo que forma el líquido respecto a la superficie de contacto con el sólido, y está determinado por la resultante de las fuerzas adhesivas y cohesivas. Como la tendencia de una gota a expandirse en una superficie plana aumenta con la disminución del ángulo de contacto, este ángulo proporciona una medida de la inversa de la mojabilidad.

Un ángulo de contacto pequeño ($< 90^\circ$) indica que la mojabilidad es muy alta, y el fluido se extenderá sobre la superficie; ángulos de contacto grandes ($> 90^\circ$) significan que la mojabilidad es baja y el fluido disminuirá el contacto con la superficie, formando una gota compacta.



En el caso del agua, una superficie en la cual la mojabilidad sea alta se denomina hidrofílica, y en caso contrario hidrofóbica. Las superficies superhidrofóbicas presentan ángulos de contacto mayores a 150° , produciéndose un escaso contacto entre la gota líquida y la superficie. Este fenómeno se denomina *efecto lotus*. Para líquidos distintos al agua, se utiliza el término liófilo para designar a la condición de ángulo de contacto pequeño, y liófobo para ángulos de contacto grandes. De modo similar, se utilizan los términos onmifóbico y onmifílico para líquidos polares y apolares, respectivamente.



| Ángulos de contacto e interacciones sólido/líquido y líquido/líquido | | | |
|--|----------------------|--------------------------|-------------------|
| Ángulo de contacto | Grado de mojabilidad | Fuerzas intermoleculares | |
| | | S/L Interacciones | L/L Interacciones |
| $\theta = 0$ | perfecta | fuerte | débil |
| $0 < \theta < 90^\circ$ | alta | fuerte | fuerte |
| | | débil | débil |
| $90^\circ < \theta < 180$ | baja | débil | fuerte |
| $\theta = 180^\circ$ | nula | débil | fuerte |

Existen dos tipos principales de superficies sólidas con las que los líquidos pueden interactuar:

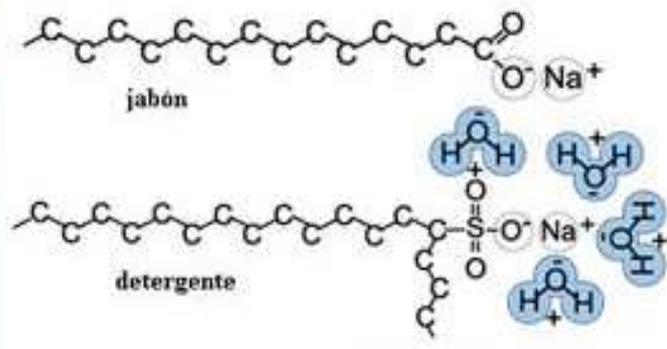
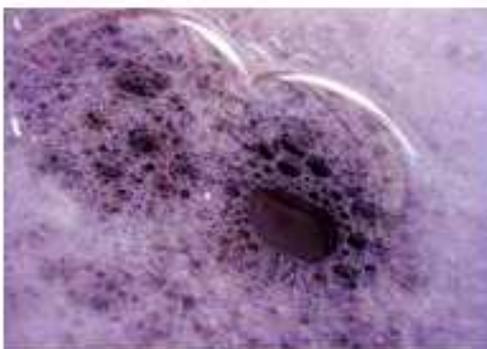
- Sólidos como los metales, los vidrios y las cerámicas, se conocen como «sólidos duros» porque sus enlaces químicos son muy fuertes. Por tanto, es necesaria una gran cantidad de energía para romper dichos sólidos; se les denomina superficies de «alta energía». La mayoría de los líquidos moleculares presentan mojabilidad completa al estar en contacto con este tipo de superficies.
- Los sólidos denominados superficies de «baja energía» se encuentran los cristales moleculares débiles, como los fluorocarbonos y los hidrocarburos, en los que las moléculas se encuentran unidas esencialmente por las interacciones entre las mismas, ya sea mediante puentes de hidrógeno o fuerzas de van der Waals. En este caso, la mojabilidad dependerá del tipo de líquido escogido, pudiendo ser parcial o completa

3.6. Sustancias que modifican la tensión superficial. Tensioactivos.

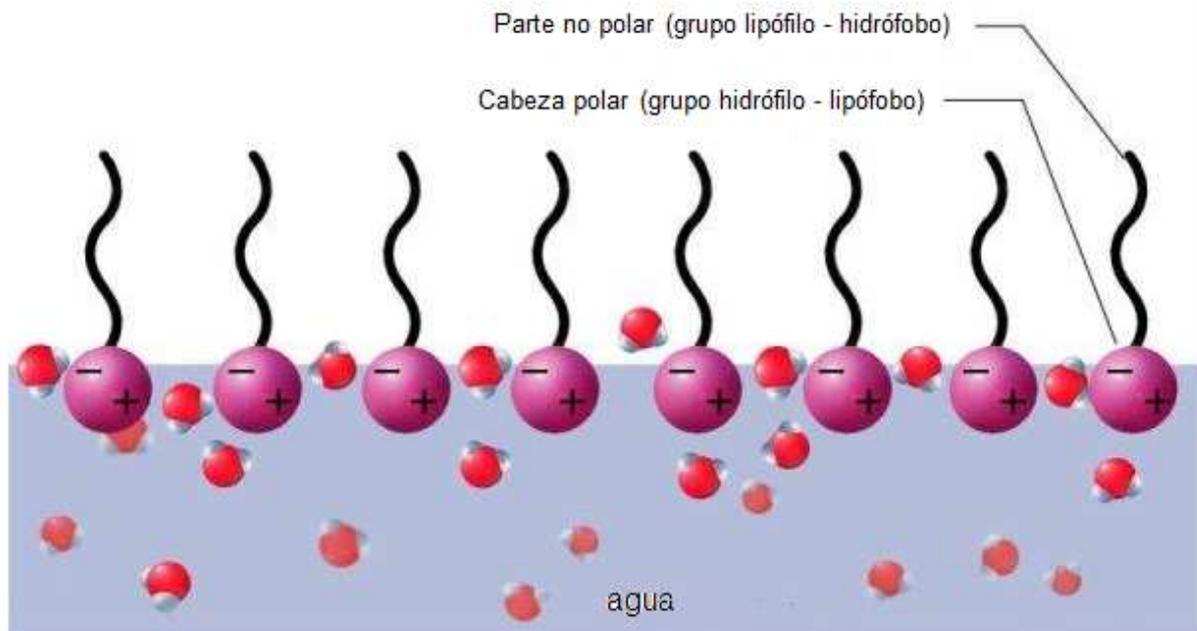
Hay una serie de sustancias orgánicas solubles que, añadidas al agua en una dosis muy débil, son absorbidas positivamente en la interfase de forma extraordinariamente viva, lo que hace reducir fuertemente las fuerzas superficiales.

Estas sustancias, que actúan intensamente sobre las propiedades superficiales, se denominan *tensioactivos* o *surfactantes*, siendo los más característicos los *detergentes* o *jabones*.

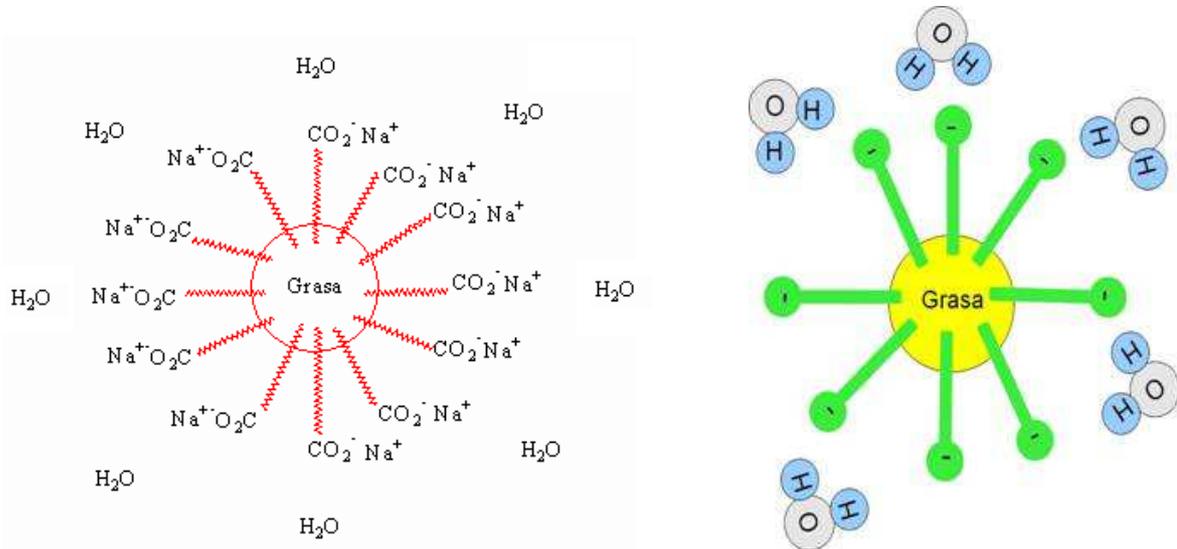
Podemos romper esta tensión superficial del agua con los tensioactivos. Los tensioactivos son sustancias que nos permiten poner en contacto dos fases, en este caso poner en contacto el aire con el agua. La estructura de los tensioactivos consta de una parte hidrófila (amante del agua) grupos polares y una parte hidrófoba (no le gusta el agua) son cadenas de carbonos de 12-14-18 unidades.



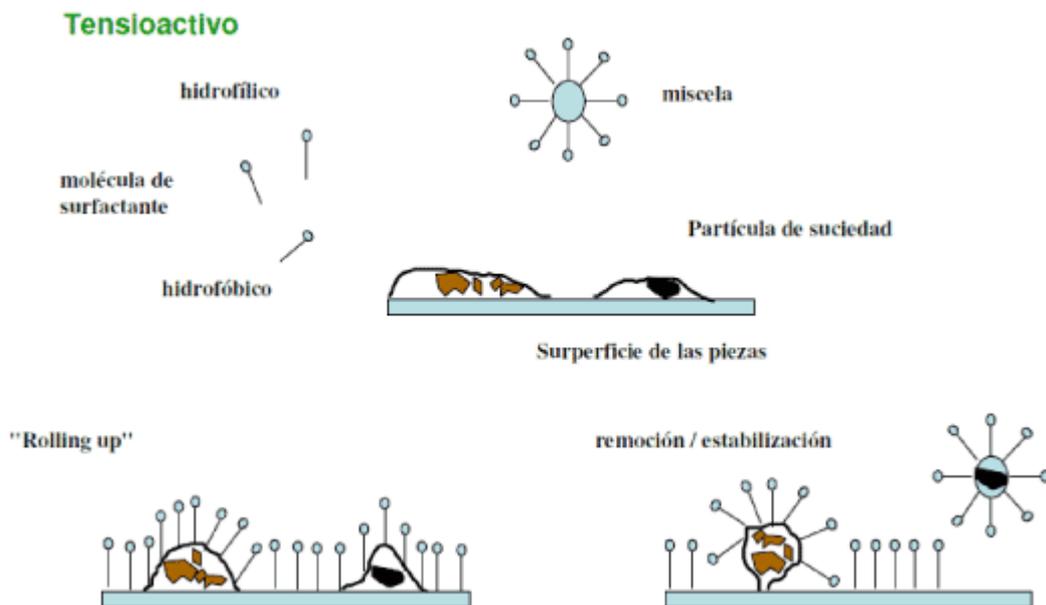
Al añadir tensioactivos al agua estos se reparten por la superficie del líquido dejando la parte hidrófoba al exterior y la parte hidrófila en contacto con el agua. Esto implica que las moléculas de agua de la superficie ya no están en contacto con el aire, han sido sustituidas por moléculas de tensioactivo rompiendo así la tensión superficial.



Los tensioactivos forman parte de los jabones, detergentes, ya sean para el lavado de ropa, platos, etc. Los tensioactivos nos permiten poner en contacto dos fases. La suciedad presente en los platos o la ropa son de origen orgánico y, como se sabe, las fases acuosas y orgánicas son inmiscibles (no se unen). Gracias a los tensioactivos podemos poner en contacto estas dos fases y podemos disolver la materia orgánica en el agua.



Debido a que la parte hidrofóbica del tensioactivo se une a la materia orgánica del plato o del tejido, deja las cabezas hidrofílicas hacia afuera en contacto con el agua y arrastra la suciedad de nuestra superficie a limpiar. A estas formaciones se las llama "miscelas".

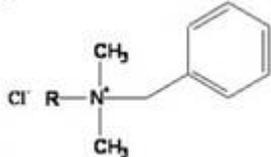
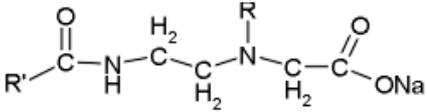


Así que un detergente está compuesto principalmente por tensioactivos, además de otros aditivos, como pueden ser agentes complejantes para reducir la dureza del agua, perfumes y espumantes. Algunos llevan blanqueantes para la ropa blanca basados en liberadores de cloro u oxígeno, y hasta sequestrantes de colores.

3.6.1. Estructura de los tensioactivos.

Todos los tensioactivos tienen en su estructura una porción polar o iónica (porción hidrófila) y otra no polar (porción hidrófoba), se clasifican según los iones presentes en las moléculas:

- **Tensioactivos aniónicos:** la parte hidrofílica posee una carga negativa. Ésta suele tratarse de un grupo carboxilato, sulfato, sulfonato o fosfato. Son los más utilizados.
- **Tensioactivos catiónicos:** la parte hidrofílica posee una carga positiva. Estos tensioactivos suelen tener una alta adherencia en diferentes sustratos y una alta "persistencia" en esa adhesión.
- **Tensioactivos no iónicos:** no contienen grupos funcionales disociables (ionizables) y, por lo tanto, no se disocian en el agua en iones. Como todo tensioactivo, se compone de una parte no polar y una parte polar.
- **Tensioactivos anfóteros:** poseen tanto un grupo catiónico como un grupo aniónico. El uso del término anfótero lo hace más restrictivo: La carga de la molécula debe cambiar con el pH.

| Clase | Definición | pH de empleo | Ejemplo |
|------------|--|--------------|---|
| Aniónicos | Porción hidrófila aniónica | >7 | $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{CH}_2\text{C}-(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_7-\text{C}_{12}\text{H}_{25} \\ \\ \text{HO}-\text{C}-\text{COO}^\ominus\text{Na}^\oplus \\ \\ \text{CH}_2\text{C}-(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_7-\text{C}_{12}\text{H}_{25} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array}$ Dialurato 7 citrato de sodio |
| Catiónicos | Porción hidrófila catiónica | < 7 |  |
| No iónicos | Porción hidrófila polar | 1 a 14 | $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{10-16}-(\text{O}-\text{C}_3\text{H}_6)_{1-25}-\text{OH}$ |
| Anfóteros | Porción hidrófila aniónica o catiónica, dependiendo del pH | 1 a 14 |  R = alcohol o éter; R' = cadena alquílica |

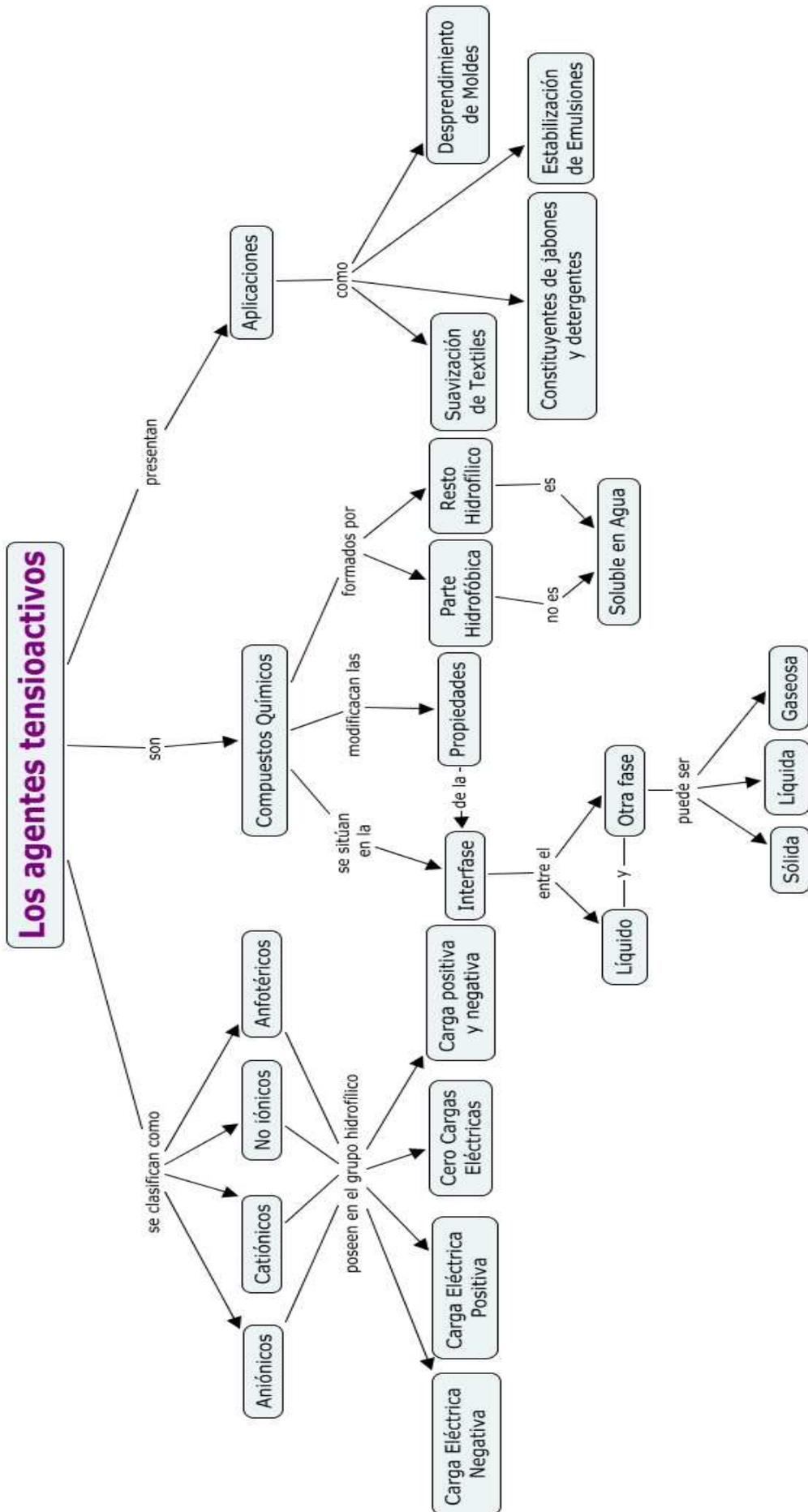
3.6.2. Propiedades de los tensioactivos.

Poder humectante: la parte apolar permite reducir la tensión superficial del agua. Esta propiedad permite favorecer su humedecimiento, aumentando la capacidad de disolución de la suciedad (la suciedad por si sola es poco soluble en agua).

Poder emulsionante: la parte polar permite disgregar la suciedad en fragmentos de una emulsión.

Poder de dispersión: propiedad que permite a las micelas mantenerse en suspensión en el agua e impedir que vuelvan a depositarse en la superficie.

Poder espumante: la espuma es útil ya que permite un mejor contacto del limpiador con la superficie a limpiar.



4. MÉTODOS DE MEDIDA DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL.

4.1. Determinación de la tensión superficial con estalagmómetro.

En el laboratorio, para medir la tensión superficial se utilizan métodos que se basan en la ley de Tate.

Según esta ley, cuando un líquido forma gotas en un capilar, el peso de cada gota (P) es proporcional a la tensión superficial del líquido (σ):

$$P = m \cdot g = k \cdot \sigma \quad \text{donde, } k = 2 \cdot \pi \cdot r$$

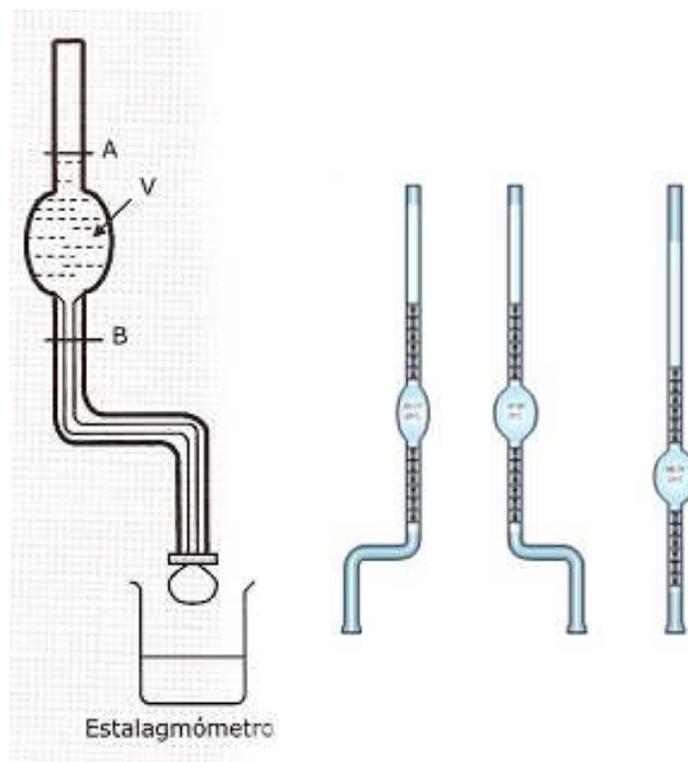
El factor de proporcionalidad (k) es la longitud de la circunferencia del capilar. Por tanto, para calcular la tensión superficial de un líquido, una vez conocida la constante del capilar (k), bastará con determinar el peso de una gota y aplicar la ecuación anterior. Para ello, puede utilizarse cualquier capilar, como por ejemplo una bureta, o un instrumento específico, el estalagmómetro.

El *estalagmómetro* está constituido por un tubo de vidrio con un ensanche en la parte superior y un capilar en la inferior. La boca del capilar, por donde saldrá la gota, está aplanado (tiene forma lenticular), para que la gota siempre se desprenda en ese punto. A ambos lados del ensanche hay una serie de marcas de referencia que delimitan un volumen fijo.

Previamente hay que medir la densidad del líquido, utilizando un picnómetro.

A continuación, se cuenta el número de gotas que caen por el capilar cuando el líquido pasa desde la marca superior hasta la inferior que hay a ambos lados del ensanche. El ritmo de goteo tiene que ser tal que permita contar las gotas con comodidad.

Como la masa de una gota es de determinación difícil resulta más cómodo contar el número de gotas (n) que contiene un volumen V de líquido de densidad conocida.



Si V es el volumen comprendido entre A y B y n el número de gotas que se desprenden al salir todo el volumen V por el capilar, el volumen de una gota valdrá:

$$\text{Volumen gota} = \frac{V}{n}$$

Una gota se desprende cuando su peso es igual a la fuerza que la mantiene unida al capilar:

$$\text{Peso gota} = m \cdot g = D \cdot \frac{V}{n} \cdot g$$

siendo D = densidad del líquido y g = aceleración de la gravedad.

Por otra parte, la fuerza que mantiene la gota sin caer es de

$$2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma$$

donde r = radio del capilar y σ = tensión superficial.

Igualando ambas ecuaciones resulta:

$$2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma = D \cdot \frac{V}{n} \cdot g \Rightarrow \sigma = \frac{D \cdot \frac{V}{n} \cdot g}{2 \cdot \pi \cdot r} = k \cdot \frac{D}{n}$$

Siendo k una constante para cada estalagmómetro e independiente del líquido.

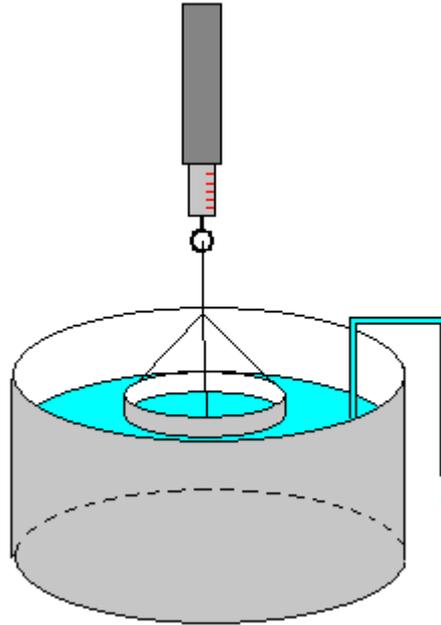
Contando el número de gotas (n) que se desprenden con igual volumen V de otro líquido cuya tensión superficial y densidad se conocen por las tablas se determina la tensión superficial del líquido problema según:

$$\frac{\sigma_{H_2O}}{\sigma_{LP}} = \frac{k \cdot \frac{D_{H_2O}}{n_{H_2O}}}{k \cdot \frac{D_{LP}}{n_{LP}}} \Rightarrow \sigma_{LP} = \sigma_{H_2O} \cdot \frac{n_{LP} \cdot D_{LP}}{n_{H_2O} \cdot D_{H_2O}}$$

Propiedades aproximadas de líquidos comunes a 20°C y presión atmosférica estándar

4.2. Determinación de la tensión superficial por el método Du Nouy.

El método de Du Nouy es uno de los más conocidos. Se mide la fuerza adicional ΔF que hay que ejercer sobre un anillo de aluminio justo en el momento en el que la lámina de líquido se va a romper.

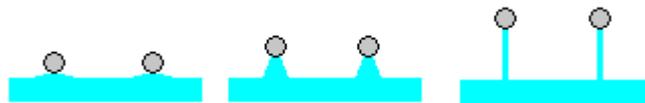


La tensión superficial del líquido se calcula a partir del diámetro $2R$ del anillo y del valor de la fuerza ΔF que mide el dinamómetro.

$$\sigma = \frac{\Delta F}{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r}$$

El líquido se coloca en un recipiente, con el anillo inicialmente sumergido. Mediante un tubo que hace de sifón se extrae poco a poco el líquido del recipiente.

En la figura se representa:



1. El comienzo del experimento
2. Cuando se va formando una lámina de líquido.
3. La situación final, cuando la lámina comprende únicamente dos superficies (en esta situación la medida de la fuerza es la correcta) justo antes de romperse.

Si el anillo tiene el borde puntiagudo, el peso del líquido que se ha elevado por encima de la superficie del líquido sin perturbar, es despreciable.