

παντα ρει

(Todo fluye)

HERACLITO (-540, -475)



Una gota de agua cayendo sobre una superficie

MECÁNICA DE FLUIDOS: ASPECTOS HISTÓRICOS

La Mecánica de Fluidos es la disciplina científica que se ocupa de la interacción de los fluidos con su entorno, así como de las aplicaciones de ingeniería que utilizan fluidos. La mecánica de fluidos es fundamental en prácticamente todos los campos de la ingeniería: industrial, aeronáutica, ambiental, naval, química, civil; así como en disciplinas científicas: oceanografía, meteorología, acústica.

Básicamente la mecánica de fluidos puede dividirse en: la estática de fluidos, que se ocupa de los fluidos en reposo, y la dinámica de fluidos, que trata de fluidos en movimiento. El término de hidrodinámica se aplica al flujo de líquidos o gases a baja velocidad, en los que puede considerarse que no hay variaciones de densidad, que se denominan incompresibles. La aerodinámica se ocupa del comportamiento de los gases cuando los cambios de velocidad y presión son suficientemente grandes para que sea necesario tener en cuenta los efectos de compresibilidad.

El interés por la dinámica de fluidos se remonta a las aplicaciones más antiguas de los fluidos en ingeniería. El matemático y filósofo griego ARQUÍMEDES realizó una de las primeras contribuciones con la invención del “tornillo sin fin” que se le atribuye tradicionalmente. Los romanos desarrollaron otras máquinas y mecanismos hidráulicos; no sólo empleaban el tornillo de Arquímedes para trasegar agua en agricultura y minería, sino que construyeron extensos sistemas de conducción de agua, los acueductos. Durante el siglo I a. C., el ingeniero y arquitecto VITRUBIO inventó la rueda hidráulica horizontal, que revolucionó la técnica de moler grano.

Después de Arquímedes pasaron más de 1600 años antes de que se produjera el siguiente avance científico significativo, debido al gran genio italiano LEONARDO DA VINCI, que aportó la primera ecuación de la conservación de masa, o ecuación de continuidad y desarrolló múltiples sistemas y mecanismos hidráulicos y aerodinámicos.

INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Posteriormente el matemático y físico italiano Evangelista TORRICELLI, inventó el barómetro en 1643, y formuló el Teorema de Torricelli, que relaciona la velocidad de salida de un líquido a través de un orificio de un recipiente, con la altura del líquido situado por encima del agujero.

La génesis de la actual mecánica de fluidos se debe al matemático y físico inglés Isaac NEWTON, con la publicación en 1687 de los *Philosophie naturalis principia mathematica* se inicia el carácter científico de la disciplina, en donde se analiza por primera vez la dinámica de fluidos basándose en leyes de la naturaleza de carácter general. En 1755 el matemático suizo Leonhard EULER, dedujo las ecuaciones básicas para un fluido ideal. EULER fue el primero en reconocer que las leyes dinámicas para los fluidos sólo se pueden expresar de forma relativamente sencilla si se supone que el fluido es ideal, en donde se desprecian los efectos disipativos internos por transporte de cantidad de movimiento entre partículas y el fluido es no viscoso. Sin embargo, como esto no es así en el caso de los fluidos reales en movimiento, los resultados con las ecuaciones de Euler, sólo pueden servir de estimación para flujos en los que los efectos de la viscosidad son pequeños.

El siguiente aporte de gran importancia, fue la primera expresión de la ecuación de conservación de energía, dada por Daniel BERNOULLI con la publicación en 1738 de su *Hydrodynamica sive de viribus et motibus fluidorum comentarii*; el denominado teorema de Bernoulli, establece que la energía mecánica total de un flujo incompresible y no viscoso es constante a lo largo de una línea de corriente (líneas de flujo que son paralelas a la dirección del flujo en cada punto, y que en el caso de flujo uniforme coinciden con la trayectoria de las partículas individuales de fluido) El problema de los efectos viscosos de disipación de energía, se empezó a abordar experimentalmente con flujos a baja velocidad en tuberías, independientemente en 1839 por el médico francés Jean POISEUILLE, que estaba interesado por las características del flujo de la sangre, y en 1840 por el ingeniero alemán Gotthif HAGEN. El primer intento de incluir los efectos de la viscosidad en las ecuaciones de gobierno de la dinámica de fluidos, se debió al ingeniero francés Claude NAVIER en 1827 e independientemente al matemático británico George STOKES, quien en 1845 perfeccionó las ecuaciones básicas para los fluidos viscosos incompresibles. Actualmente se las conoce como ecuaciones de Navier-Stokes.

En cuanto al problema del flujo en tuberías de un fluido viscoso, parte de la energía mecánica se disipa como consecuencia del rozamiento viscoso, lo que provoca una caída de presión a lo largo de la tubería; las ecuaciones de Navier-Stokes, sugieren que la caída de presión era proporcional a la velocidad media. Los experimentos llevados a cabo a mediados del siglo XIX demostraron que esto sólo era cierto para velocidades bajas; para velocidades altas, la caída de presión era más bien proporcional al cuadrado de la velocidad. Este problema no se resolvió hasta 1883, cuando el ingeniero británico Osborne REYNOLDS demostró la existencia de dos tipos de flujo viscoso en tuberías. A velocidades bajas, las partículas del fluido siguen las líneas de corriente (flujo laminar) y los resultados experimentales coinciden con las predicciones analíticas; a velocidades más elevadas, surgen fluctuaciones en la velocidad del flujo o turbulencias (flujo turbulento), en una forma difícil de predecir completamente. Reynolds también determinó que la transición del flujo laminar al turbulento era función de un único parámetro, que desde entonces se conoce como *Número de Reynolds*.

Los flujos turbulentos no se pueden evaluar exclusivamente a partir de las predicciones de las ecuaciones de conservación, y su análisis depende de una combinación de datos experimentales y modelos matemáticos. Gran parte de la investigación moderna en mecánica de fluidos está dedicada a una mejor formulación de la turbulencia,

INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

y que junto con las nuevas técnicas de simulación en ordenador (CFD: *computational fluid dynamics*), están resolviendo problemas cada vez más complejos. La complejidad de los flujos viscosos, y en particular de los flujos turbulentos, restringió en gran medida los avances en dinámica de fluidos hasta que el ingeniero alemán Ludwig PRANDTL publicó un artículo en el congreso de matemática aplicada, que muchos flujos pueden separarse en dos regiones principales. La región próxima a la superficie de interacción entre fluido y sólido está formada por una delgada zona en donde se manifiestan los efectos viscosos, y puede simplificarse el modelo matemático; fuera de esta *capa límite*, se pueden desprestigiar los efectos viscosos, y pueden emplearse las ecuaciones más simples para flujos no viscosos. La teoría de la capa límite ha hecho posible gran parte del desarrollo de los perfiles aerodinámicos, de las alas de los aviones, y de los alabes de las turbomáquinas.

Posteriores desarrollos y aplicaciones de la teoría de capa límite han sido desarrollados por varios investigadores: como el ingeniero húngaro Theodore Von KARMAN (discípulo del propio Prandtl), el matemático alemán Richard Von MISES, y el físico británico Geoffrey TAYLOR. El interés por el flujo de gases (flujo compresible) comenzó con el desarrollo de turbinas de vapor por el inventor británico Charles PARSONS y el ingeniero sueco Carl de LAVAL durante la década de 1880; pero los avances modernos tuvieron que esperar al desarrollo de la turbina de combustión y la propulsión a chorro de la década de 1930; y los posteriores estudios de balística y en general flujos a alta velocidad. El comportamiento en el flujo de un gas compresible depende de si la velocidad del flujo es mayor o menor que la velocidad de perturbaciones en el flujo; velocidad sónica o velocidad del sonido es la velocidad de pequeñas perturbaciones en el seno del fluido. Para un gas ideal, la velocidad del sonido es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta. Si la velocidad del flujo es menor que la sónica, flujo subsónico, las ondas de presión pueden transmitirse a través de todo el fluido y así adaptar el flujo que se dirige hacia un objeto; si la velocidad es mayor que la sónica, flujo supersónico, las ondas de presión no pueden viajar aguas arriba para adaptar el flujo; así el aire que se dirige hacia el ala de un avión en vuelo supersónico no está preparado para la perturbación que va a causar el ala y tiene que cambiar de dirección repentinamente en la proximidad del ala, lo que lleva a una compresión intensa u onda de choque. La relación entre la velocidad del flujo y la velocidad sónica se denomina número de Mach, en honor al físico austriaco Ernest MACH.

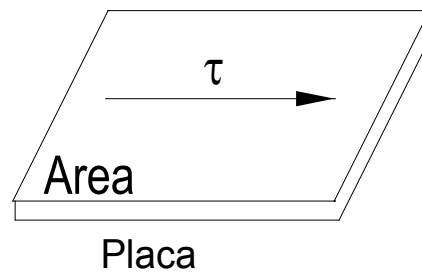
En cuanto a la estática de fluidos, su característica fundamental es que la fuerza ejercida por el entorno sobre cualquier partícula del fluido estático, es la misma en todas las direcciones; si las fuerzas fueran desiguales, la partícula se desplazaría en la dirección de la fuerza resultante. De ello se deduce que la fuerza por unidad de superficie que el fluido ejerce contra las paredes del recipiente que lo contiene, es perpendicular a la pared en cada punto; a la fuerza normal por unidad de superficie se le denomina presión. Este concepto fue formulado por primera vez por el matemático francés Blaise PASCAL en 1647, y se conoce como principio de Pascal.

El otro principio importante en estática de fluidos fue descubierto por el matemático griego ARQUÍMEDES; el principio de Arquímedes afirma que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta una fuerza vertical ascendente o Empuje; igual al peso del fluido desplazado por dicho cuerpo. El punto sobre el que puede considerarse que actúan todas las fuerzas de flotación, se llama centro de flotación, centro de carena en un buque. El centro de flotación está situado en la vertical del centro de gravedad del cuerpo; si está por encima el objeto flota en equilibrio y es estable; si el centro de flotación está por debajo del centro de gravedad, solo hay estabilidad si la distancia metacéntrica es positiva.

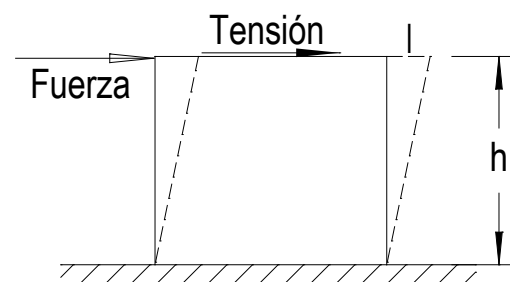
LOS FLUIDOS:

Consideraremos la materia en dos estados de agregación: sólido y fluido; además los fluidos incluyen a los líquidos y a los gases. La propiedad característica de los fluidos es su deformación continua bajo sollicitaciones externas. Las propiedades cualitativas más destacables de los fluidos son: **movilidad** entre las partículas que los constituyen (se adaptan a las formas de los recipientes que los contienen), **miscibilidad** por la rápida disgregación de partículas de las diferentes zonas del fluido, **compresibilidad** o variación de volumen bajo esfuerzos normales.

La movilidad y la miscibilidad vienen determinadas como consecuencia de la propiedad más importante de un fluido: su **deformabilidad continua** bajo esfuerzos tangenciales. Definimos un esfuerzo como el cociente entre la Fuerza aplicada y el área en cuestión. Básicamente podemos hablar de dos tipos de esfuerzos, los normales que son perpendiculares al área en estudio y los tangenciales, tangentes al área considerada. Generalmente los esfuerzos normales se los denomina con la letra σ (Sigma) y los tangenciales con la letra τ (Tau)

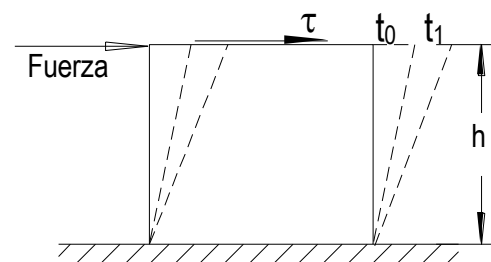


Un sólido sometido a un esfuerzo tangencial adquiere una determinada deformación, que puede ser permanente si se supera un cierto valor de tensión umbral, pudiendo llegar a la rotura si se sobrepasa la tensión de rotura; en cambio un fluido sometido a un esfuerzo tangencial, se deforma continuamente, adquiriendo una velocidad de deformación que depende de la tensión aplicada y de las características del propio fluido (a través de una propiedad característica llamada viscosidad)



Un sólido como el mostrado en la figura, es una sustancia que se deforma al ser sometido a una fuerza, pero su deformación no es continua, sino que es directamente proporcional a la tensión de corte aplicada τ , siempre que no se exceda el límite elástico del material. La tensión de corte es la relación entre la fuerza aplicada y el área A.

$$\tau = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Area}}$$



INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Debido a la fuerza el sólido se deforma hasta lograr un nuevo estado de equilibrio permaneciendo en él mientras que la fuerza actúe.

Si repetimos el experimento pero usando un fluido, se produce una deformación continua a medida que el tiempo transcurre, observándose que la velocidad de deformación U es proporcional a la tensión aplicada y a la altura h siendo $U \cong h \tau$, y además el perfil de velocidades es lineal.

Entonces $\frac{du}{dy} = \frac{U}{h}$ de donde podemos deducir que $\tau = \frac{U}{k h} = \frac{1}{k} \frac{U}{h} = \frac{1}{k} \frac{du}{dh}$ el factor $1/k$, depende del tipo de fluido

siendo una propiedad característica a la que llamaremos viscosidad y que se simboliza con la letra μ (coeficiente de viscosidad) por lo tanto la expresión anterior queda $\tau = \mu \frac{du}{dy}$

La deformación continua del fluido, da lugar a su movimiento, que se denomina *flujo*. Los fluidos poco viscosos fluyen fácilmente y los fluidos muy viscosos tienen dificultad para fluir.

A partir de estas consideraciones podemos dar como definición de fluido: *sustancia a la que la aplicación de una tensión tangencial le provoca su movimiento, al que se le denomina flujo.*

La otra propiedad característica de un fluido es su comportamiento ante esfuerzos normales de compresión, ante los cuales el fluido se deforma, disminuyendo su volumen; en el caso de los gases, las disminuciones de volumen son relativamente grandes, son fácilmente compresibles; y en el caso de los líquidos, las disminuciones de volumen son relativamente pequeñas, son difícilmente compresibles. En general los líquidos se denominan fluidos incompresibles y los gases fluidos compresibles; no obstante, líquido sometidos a grandes cambios de presión pueden comprimirse, y gases sometidos a pequeños cambios de presión no varían prácticamente su volumen.

EL FLUIDO COMO MODELO CONTINUO:

Para el estudio de los fluidos, hay que establecer un modelo de constitución. En realidad se trata de agregaciones moleculares, muy separadas entre sí en el caso de los gases y más próximas en el caso de los líquidos; y que se mueven con cierto grado de libertad en función de las fuerzas intermoleculares. La estructura molecular de la materia, es la que explica los estados de agregación de sólido, líquido y gas; teniendo en cuenta las distancias intermoleculares y las fuerzas intermoleculares. En los gases las distancias intermoleculares son grandes y las fuerzas intermoleculares pequeñas, lo que explica su gran compresibilidad; en los líquidos las distancias intermoleculares son bajas y las fuerzas intermoleculares altas, lo que explica su poca compresibilidad; y finalmente en los sólidos las distancias intermoleculares son muy bajas y las fuerzas intermoleculares muy altas.

Todos los fluidos están compuestos de moléculas en constante movimiento; sin embargo en la mayor parte de las aplicaciones, lo que interesa son los efectos promedio o macroscópicos de muchas moléculas; estos efectos macroscópicos son los que se perciben y se miden; con lo que se trata al fluido como una sustancia infinitamente divisible, es decir un medio continuo, no considerando el comportamiento de las moléculas individuales, con lo que los valores de las propiedades son continuos y el modelo de comportamiento de la materia se denomina modelo continuo.

El concepto de medio continuo es la base de la mecánica de fluidos clásica. La suposición de medio continuo es válida al tratar el comportamiento de fluidos bajo condiciones normales. *No obstante, falla siempre que la*

INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

trayectoria libre media de las moléculas se vuelve del mismo orden de magnitud que la longitud característica significativa más pequeña del problema. En problemas tales como los flujos de un gas de muy baja densidad que se encuentra, por ejemplo, en los vuelos que llegan a las partes más altas de la atmósfera, se debe abandonar el concepto de medio continuo en favor de los puntos de vista microscópicos y por tanto con valores estocásticos de sus propiedades, teniendo que recurrir a los modelos moleculares.

En criterio para usar uno u otro modelo viene determinado por la relación citada anteriormente, entre el recorrido libre medio de las moléculas y la dimensión longitudinal característica del fenómeno a estudiar, al que se denomina Número de KNUDSEN: $Kn = l_m / L$; así para valores de $Kn < 0,01$, la teoría de los medios continuos da resultados correctos.

La hipótesis general del modelo continuo, es que todas las magnitudes fluidas (velocidad, presión, densidad, temperatura, viscosidad, compresibilidad) se pueden definir por una función continua de 4 variables: las 3 espaciales y el tiempo. La continuidad de las funciones que definen las magnitudes físicas del fluido, permite obtener valores de magnitudes en determinados puntos a partir de los valores conocidos en puntos determinados y de sus variaciones parciales desde un punto a otro.

La hipótesis del modelo molecular, es que cada molécula tiene asociada una serie de propiedades (Velocidad, energía cinética, temperatura); los valores de estas propiedades se conservan en su recorrido y solamente cuando chocan, con otras moléculas o con los contornos, intercambian cantidades de estas propiedades (la distancia entre dos choques consecutivos es el recorrido libre, y su valor medio es el recorrido libre medio)

MODELO MOLECULAR: ESTRUCTURA MOLECULAR DE LA MATERIA

La materia (sólido, líquido o gas) está compuesta por moléculas en movimiento continuo interaccionado mutuamente entre ellas. Las fuerzas de interacción entre moléculas, son debidas tanto a su energía cinética (determinadas por su velocidad), como a su energía potencial (asociada a sus posiciones relativas). La fuerza de interacción intermolecular debida a la separación entre moléculas, se puede determinar a partir de la energía potencial de interacción entre moléculas. En el caso de los fluidos, ésta energía viene dada por la función potencial de LENNARD-JONES:

$$e_{12}(d) = e_0 \left[\left(\frac{d_0}{d} \right)^{12} - \left(\frac{d_0}{d} \right)^6 \right]$$

En donde: “d” es la distancia intermolecular entre dos moléculas (1 y 2): $d = |r_1 - r_2|$

“ d_0 ” es la distancia crítica, por debajo de la cual la fuerza es positiva (repulsiva)

“ e_0 ” es una constante que depende del tipo de molécula

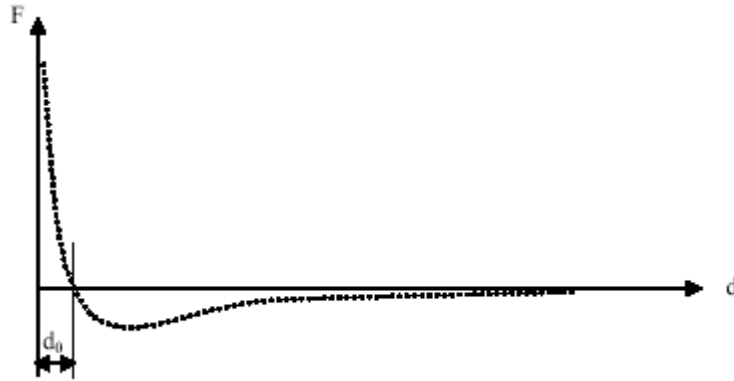
Con lo que la fuerza de interacción molecular es:

$$\vec{F}_{12} = - \frac{\partial e_{12}(d)}{\partial \vec{r}_1} = 6 \frac{e_0}{d_0} \left[2 \left(\frac{d_0}{d} \right)^{13} - \left(\frac{d_0}{d} \right)^7 \right] \frac{\vec{r}_1 - \vec{r}_2}{d}$$

En la representación gráfica de la fuerza intermolecular vs distancia intermolecular, se observa que para distancias menores que la crítica, la fuerza de repulsión es muy grande y cada vez mayor conforme disminuye la distancia, debido a la repulsión electrostática entre las nubes de electrones. Para distancias mayores que la crítica, las

INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

moléculas se atraen débilmente debidos a la formación de dipolos (fuerzas de Van der WAALS). La distancia crítica es del orden del tamaño característico molecular: $d_0 \cong 3 \cdot 10^{-10}$ m.



El distinto comportamiento de gases, líquidos y sólidos, viene determinado fundamentalmente por los valores de sus distancias intermoleculares características. Esta distancia es del orden de la raíz cúbica del volumen específico molecular.

Para un **gas** típico, como el nitrógeno, en condiciones normales (20°C, 1 atm), su densidad es de 1,164 kg/m³ y su masa molecular es de 28 kg/kmol, con lo que se tiene una distancia intermolecular del orden de $3,4 \cdot 10^{-9}$ m, que es unas diez veces superior a la distancia crítica.

Para un **líquido** típico, como el agua, en condiciones normales (20°C, 1 atm), su densidad es de 1000 kg/m³ y su masa molecular es de 18 kg/kmol, con lo que se tiene una distancia intermolecular de $3,1 \cdot 10^{-10}$ m, que es del orden de la distancia crítica.

Para un **sólido** típico, como el hierro, en condiciones normales (20°C, 1 atm), su densidad es de 7870 kg/m³ y su masa molecular es de 55,85 kg/kmol, con lo que se tiene una distancia intermolecular de $2,3 \cdot 10^{-10}$ m, que es del orden de la distancia crítica.

Así, en los gases, las moléculas están tan alejadas unas de otras, que las fuerzas intermoleculares son débiles, sobre todo en comparación con las fuerzas debidas a los intercambios de cantidad de movimiento. En un caso extremo, si se desprecian las fuerzas intermoleculares, la única interacción entre moléculas es debida a su energía cinética: es como si las moléculas estuviesen muy separadas unas de otras, denominándose **gas ideal**.

En el caso de líquidos y sólidos, sus distancias intermoleculares son del orden de la crítica, con lo que sus moléculas están tan próximas como lo permitan las fuerzas repulsivas. En el caso de los líquidos, la energía potencial debida a la distancia intermolecular, es del mismo orden que la energía cinética debida a la velocidad de cada partícula. En cambio en los sólidos la energía cinética es despreciable frente a la potencial.

El distinto comportamiento de gases, líquidos y sólidos frente a sollicitaciones externas, viene determinado por los valores relativos entre energía cinética (E_c) y energía potencial (E_p), y entre distancia intermolecular (D_i) y fuerza intermolecular potencial (F_i):

Gases:	$E_c \gg E_p$	^	$F_i \downarrow \downarrow \downarrow$	$D_i \uparrow \uparrow \uparrow$
Líquidos:	$E_c \approx E_p$	^	$F_i \downarrow$	$D_i \downarrow$
Sólidos:	$E_c \ll E_p$	^	$F_i \uparrow \uparrow \uparrow$	$D_i \downarrow \downarrow \downarrow$

INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Como casos extremos se tiene, el gas ideal con energía potencia nula, y el sólido rígido con energía cinética nula. Estas consideraciones, explican la distinción fundamental entre gases y líquidos, en cuanto a su compresibilidad (disminución del volumen frente a esfuerzos normales de compresión): los gases son fácilmente compresibles y en cambio para disminuir el volumen de un líquido (aumentar su densidad), se necesitan un gran aumento de presión. Es decir, en el caso de líquidos, sus distancias intermoleculares, están próximas a la crítica, y para comprimirlos, es necesario acercan las moléculas, es decir vencer fuerzas de repulsión proporcionales a la 14ª potencia de la disminución de distancia.

También se puede explica la diferencia entre fluidos (gases y líquidos) y sólidos, en cuanto a su respuesta bajo esfuerzos tangenciales de cizalla¹: los fluidos se deforman continuamente estableciéndose un movimiento del fluido al que se denomina flujo; en cambio los sólidos adquieren una determinada deformación, que permanece mientras permanezca el esfuerzo. Todo ello debido a las débiles fuerzas intermoleculares de los fluidos frente a las de los sólidos.

PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

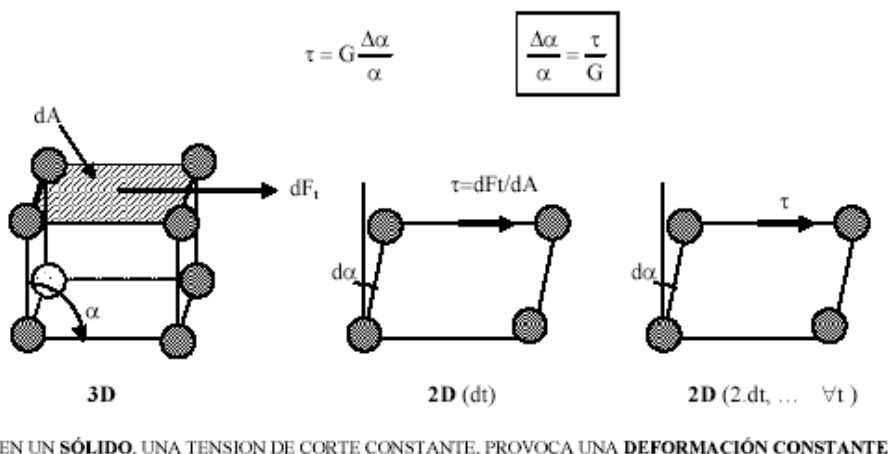
VISCOSIDAD:

La viscosidad es una propiedad inherente de los fluidos y que no es exhibida por otros medios continuos. La viscosidad es el parámetro del fluido que controla el transporte de la cantidad de movimiento a escala molecular determinando la relación entre las sollicitaciones tangenciales y la velocidad que la que se produce la deformación del fluido.

Consideremos una determinada agrupación de moléculas, en la que sobre un elemento de área, el entorno esta ejerciendo una fuerza tangencial. A la fuerza por unidad de área se le va denominar tensión, con lo que en este caso, se tienen **tensiones tangenciales, de corte o de cizalla: G**.

En el caso de un **sólido**, una tensión cortante, origina una deformación; la deformación unitaria ($\Delta\alpha/\alpha$) por unidad de tensión de corte (τ) es constante, en la zona de comportamiento elástico lineal del sólido; es decir para un determinado valor de la tensión de corte, el sólido experimenta una deformación constante, cuya magnitud depende intrínsecamente del tipo de material.

La constante es el **módulo de elasticidad de corte ó cizalla: G**

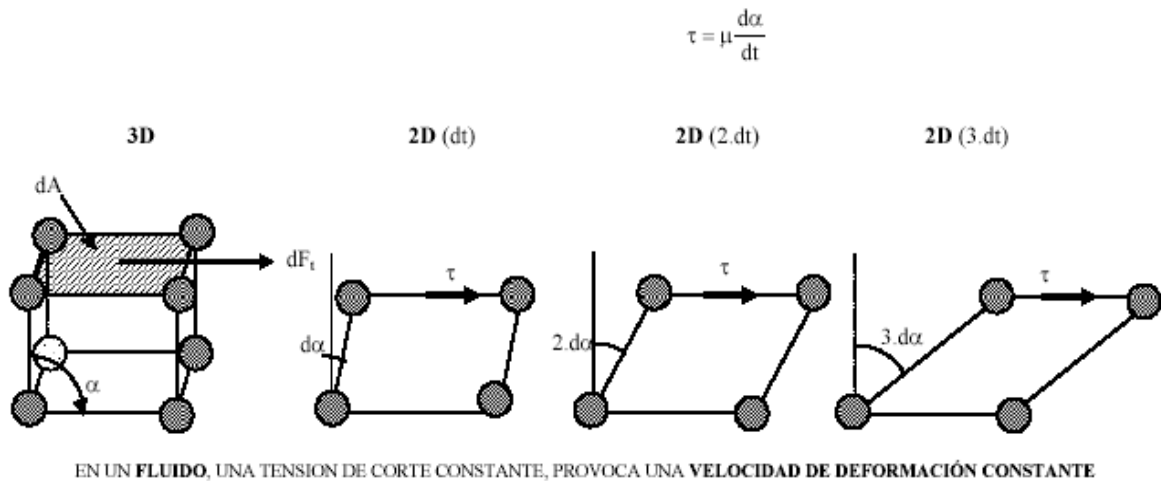


¹ Llamamos esfuerzos de cizalla también a los esfuerzos tangenciales, como por ejemplo los esfuerzos que hace un balancín para el corte de un metal, o bien una tijera,

INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

En el caso de un **FLUIDO**, una tensión cortante, origina una deformación que va aumentando con el tiempo. La **velocidad de deformación** ($d\alpha/dt$) depende del esfuerzo de corte aplicado y del fluido.

La velocidad de la deformación, por unidad de tensión de corte (τ) es **constante**, es decir para un determinado valor de la tensión de corte, el fluido experimenta una velocidad de deformación constante, cuya magnitud depende intrínsecamente del fluido, la constante es el coeficiente de viscosidad tangencial μ



En este punto, es importante la consideración de las **solicitaciones a nivel molecular**. En el caso de los **sólidos**, las fuerzas intermoleculares son elevadas y las distancias intermoleculares pequeñas. En el caso de los **líquidos**, las fuerzas intermoleculares son débiles y las distancias intermoleculares son pequeñas; y en el caso de los **gases**, las fuerzas intermoleculares son aún más débiles y las distancias intermoleculares grandes.

Esta diferente estructura molecular de la materia, hace que un sólido sometido a una sollicitación de corte (tangencial), se deforme, pero su alta fuerza de cohesión molecular es la que hace que esa deformación permanezca constante a lo largo del tiempo; además cuando cesa la sollicitación, cesa la deformación. En cambio en el caso de los líquidos y los gases, las débiles fuerzas de cohesión molecular, no resisten los esfuerzos tangenciales, y estos provocan una deformación continua en el tiempo. La deformación continua, hace que exista movimiento relativo entre moléculas, lo que establece el movimiento general del fluido, que se denomina **flujo**.

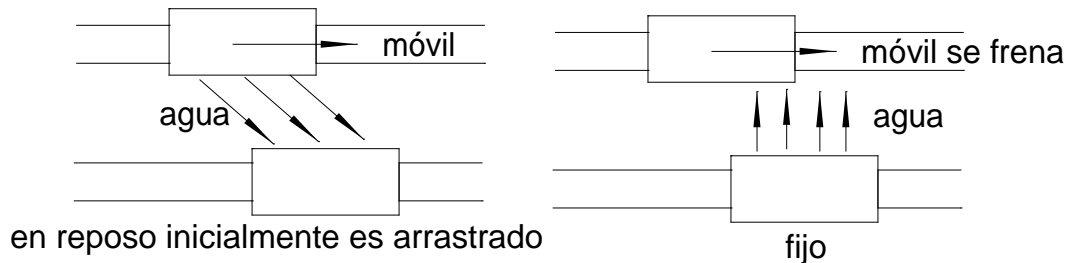
Este comportamiento es exclusivo de los fluidos, y es el que los distingue de los sólidos, la definición entonces de un fluido, sería por tanto, la materia que **ante esfuerzos de cizalla ó corte se deforma continuamente**.

Recordemos, que en comparación con este distinto comportamiento ante esfuerzos tangenciales, de los sólidos y los fluidos; el comportamiento ante esfuerzos de compresión, no es exclusivo de los fluidos. Aunque la magnitud del módulo de compresibilidad, puede establecer una clasificación: sólidos con un muy elevado módulo, líquidos con un alto módulo y gases con un pequeño modulo de compresibilidad.

Otro aspecto molecular de gran importancia, es la consideración de que en el proceso de fluir, se establece un movimiento relativo, y las moléculas más rápidas arrastran a las contiguas, y estas a su vez frenan a las que las arrastran; es decir hay un intercambio de cantidad de movimiento a nivel molecular. Esta consideración permite establecer, de forma rigurosa la **viscosidad**, como el **coeficiente de transporte de cantidad de movimiento a nivel molecular**.

INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Las moléculas que provienen de zonas de alta velocidad tienden a empujar las moléculas lentas y las moléculas que provienen de zonas de bajas velocidades tienden a frenar a las más rápidas. Como ejemplo supongamos un vagón móvil que al eyectar un chorro de agua mueve por arrastre a otro que se encuentra en reposo. Por el contrario, si el vagón fijo eyecta al agua, ésta tiende a frenar al vagón móvil.



A nivel molecular, además de transporte de cantidad de movimiento, pueden existir otros fenómenos de transporte, como el transporte de masa y de calor; a los coeficientes respectivos, se le denomina **difusividad** (coeficiente de transporte de masa) y **conductividad térmica** (coeficiente de transporte de calor).

LEY DE NEWTON DE VISCOSIDAD.

Una forma simple de poner de manifiesto la viscosidad, es considerar dos placas planas horizontales, entre las que se hay un determinado fluido; la placa inferior esta fija, y sobre la placa superior se aplica una determinada fuerza horizontal; el cociente entre la fuerza aplicada y la superficie de la placa superior es la tensión aplicada sobre el fluido. Si el fluido es no viscoso (ideal), éste no opone ninguna restricción al movimiento de la placa, que se movería con aceleración constante; si el fluido es viscoso, se observa que la placa adquiere una velocidad constante, como consecuencia de tener aceleración nula, debida a que la suma de fuerzas que actúan sobre la placa es nula. Las partículas de fluido que tocan la placa superior son arrastradas a la velocidad de la placa, estas partículas a su vez, arrastran a otras partículas que se mueven, pero a una velocidad inferior debido a las fuerzas y distancias intermoleculares, este proceso de **intercambio de cantidad de movimiento** entre partículas se extiende hasta las partículas a velocidad nula que están en contacto con la placa.

Con las consideraciones de flujo unidimensional ($u = u(y)$), si se hace una exploración del campo de velocidades de las partículas del fluido, desde las que están en contacto con la placa fija inferior (y por tanto a velocidad nula: $u(0) = u_{\text{placa inferior}} = 0$), hasta las partículas que están en contacto con la placa móvil superior (a su misma velocidad: $u(h) = u_{\text{placa superior}} = U$), se detecta un gradiente de velocidad (du / dy). Existiendo para algunos fluidos una relación lineal entre la tensión tangencial (fuerza tangencial por unidad de área de contacto, que se opone al movimiento de una parte del fluido en contacto con otra más lenta) y el gradiente de velocidad:

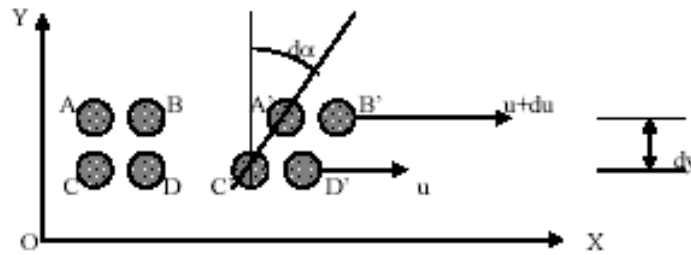
$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Los fluidos con relación lineal entre tensiones tangenciales y gradiente de velocidad, se denominan **newtonianos** y la ecuación anterior se denomina *Ley de Newton de viscosidad*.

En toda la extensión del fluido (desde la placa superior a la inferior) se presenta un estado de tensiones tangenciales: la zona de mayor velocidad produce un arrastre sobre la zona más lenta. Suponiendo un flujo en

INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

donde el fluido tiene un movimiento unidimensional, donde la velocidad de cada partícula es paralela al eje de las placas (OX), se puede concluir que el **gradiente de velocidad** esta marcando la **velocidad de deformación** del fluido:



Las partículas C y D se mueven a la misma velocidad (u), las partículas A y B se mueven a la misma velocidad y un poco más rápidas ($u + du$) que las inferiores, por lo que al cabo de un instante de tiempo (dt) las partículas ocupan nuevas posiciones, y debido a la diferencia de velocidades, las partículas superiores avanzan más que las inferiores dando lugar a una deformación angular $d\alpha$

$$d\alpha = \text{tg}(d\alpha) = \frac{AA' - CC'}{dy} = \frac{(u + du)dt - u \cdot dt}{dy} = \frac{du \cdot dt}{dy} \quad \Rightarrow \quad \frac{d\alpha}{dt} = \frac{du}{dy} \quad \left| \begin{array}{l} \text{Velocidad de deformación} = \frac{d\alpha}{dt} \\ \text{Gradiente de velocidad} = \frac{du}{dy} \end{array} \right.$$

Es decir, la velocidad de deformación viene determinada por el gradiente de velocidad: $\frac{d\alpha}{dt} = \frac{du}{dy}$

Las fuerzas de contacto por unidad de área de contacto, se denominan esfuerzos viscosos. En el caso unidimensional anterior, para un fluido newtoniano, solo aparece un esfuerzo tangencial en la dirección del flujo, que es proporcional al gradiente de velocidad, a través del coeficiente de viscosidad μ , que se denomina absoluta o dinámica. La llamada viscosidad cinemática es la relación entre la absoluta y la densidad del fluido en cuestión.

DIAGRAMA REOLÓGICO

La relación entre tensiones de corte y velocidades de deformación, puede representarse en un diagrama cartesiano que se denomina **diagrama reológico**. El término reología, fue establecido en 1929 por Eugene C. BINGHAM y deriva del griego “ $\rho\epsilon\omicron\sigma$ ” (rheos) = “corriente”.

En el diagrama reológico, cada tipo de fluido tiene una determinada curva representativa. Recordemos que a partir de la ley de Newton de viscosidad, la pendiente de la curva *tensión tangencial* versus *velocidad de deformación*, es la viscosidad del fluido. Si la pendiente es constante, se tiene un fluido newtoniano, y a los fluidos de comportamiento reológico no lineal se les denomina “no newtonianos”.

FLUIDO NEWTONIANO: la relación entre la tensión tangencial y la velocidad de deformación es lineal, la **constante de proporcionalidad** entre ambas variables es la **viscosidad** del fluido newtoniano; el comportamiento de este tipo de fluido, es el que exhibe bajo condiciones normales de operación la mayoría de los fluidos: si se someten a esfuerzos tangenciales fluyen (se deforman continuamente), si se duplica el esfuerzo tangencial, también se duplica la velocidad de deformación. La representación de un fluido newtoniano en el diagrama reológico, es una recta que pasa por el origen, los fluidos muy viscosos son rectas de gran pendiente, y los poco viscosos son rectas de poca pendiente. La mayor parte de los fluidos, exhiben un comportamiento newtoniano.

INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

FLUIDO IDEAL: si se considera un fluido en donde sus partículas pueden moverse sin interaccionar unas con otras, se comporta de tal manera que en su movimiento no hay transferencias entre partículas; su representación en el diagrama reológico es el eje horizontal: En el proceso de flujo no hay ningún tipo de esfuerzo tangencial; Con este tipo de comportamiento el fluido se denomina **ideal**. En un fluido ideal todos los coeficientes de transporte son nulos: viscosidad nula o fluido no viscoso (coeficiente de transporte de cantidad de movimiento), conductividad térmica nula (coeficiente de transporte de calor) y difusividad nula (coeficiente de transporte de masa).

PLÁSTICO IDEAL O PLÁSTICO DE BINGHAM: se comporta como un fluido newtoniano, pero tiene una **tensión tangencial umbral** por debajo de la cual el fluido no fluye; sometido a tensiones tangenciales mayores que el umbral, existe una deformación continua, que es proporcional a la tensión aplicada. En el diagrama reológico un plástico de Bingham esta representado por una recta de determinada pendiente que se inicia en la tensión umbral. Este tipo de comportamiento, lo suelen tener los fluidos empleados en alimentación: mayonesa, mostaza, margarina, ketchup,...

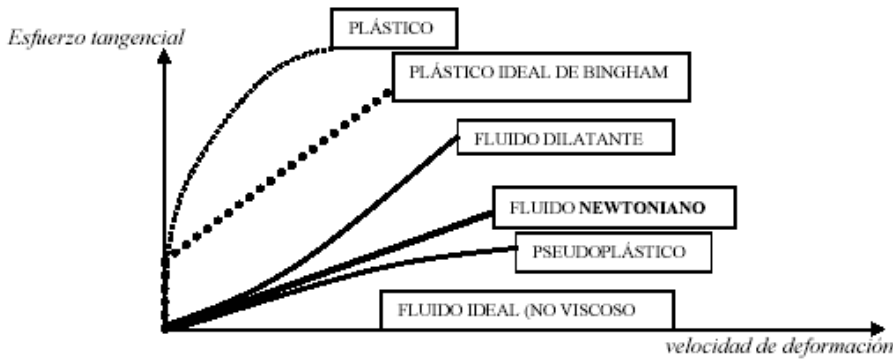
PSEUDOPLÁSTICO: su comportamiento reológico es de tal manera que bajo tensiones tangenciales pequeñas, fluye con dificultad, pero conforme se aumenta las tensiones de corte, el proceso de fluir mejora, es decir va disminuyendo la viscosidad; en el diagrama reológico un pseudoplástico esta representado por una curva que pasa por el origen, monótona decreciente, es decir, de **viscosidad** (pendiente) continuamente **decreciendo** con el aumento de tensión aplicada. Este comportamiento, es el que tiene las suspensiones, en donde en el seno de un fluido hay una cierta densidad de partículas sólidas: a tensiones tangenciales bajas, las partículas sólidas siguen homogéneamente repartidas, y conforme aumentan las tensiones tangenciales, éstas orientan las partículas sólidas con el flujo, y la suspensión baja su viscosidad.

PLÁSTICO, para iniciar el flujo, son necesario grandes tensiones de corte; a partir de lo cual, un pequeño aumento de la tensión de corte, origina grandes velocidades de deformación. Es decir, es difícil iniciar el proceso de fluir, pero una vez establecido el flujo, su aumento, es fácil.

La denominación de plástico ideal o de Bingham, es la extrapolación de un plástico, con pendiente infinita hasta la tensión umbral (es decir no hay proceso de flujo), y a partir de la tensión umbral con pendiente constante (es decir con viscosidad constante).

FLUIDO DILATANTE: su proceso de deformación continua bajo esfuerzos tangenciales es menos acusado conforme aumentan los citados esfuerzos; en un diagrama reológico su comportamiento esta representado por una curva que pasa por el origen, monótona creciente, es decir, de **viscosidad** continuamente **creciente** con el aumento de la tensión tangencial aplicada. Es lo que ocurre en las emulsiones, en donde el movimiento relativo entre partículas, originado por el flujo, hace que aumenten las uniones dipolares, con lo que aumenta la viscosidad.

INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS



COMPORTAMIENTO REOLOGICO DE DISTINTOS FLUIDOS: RELACION ENTRE ESFUERZO DE CORTE Y VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN

En el flujo unidimensional: $\vec{V} = u(y) \cdot \vec{i}$; el único término del gradiente de velocidad es du/dy , con lo que el módulo de la tensión tangencial para cada uno de los tipos de fluidos considerados es:

Fluido Newtoniano Ley de Newton de viscosidad $\tau = \mu \frac{du}{dy}$

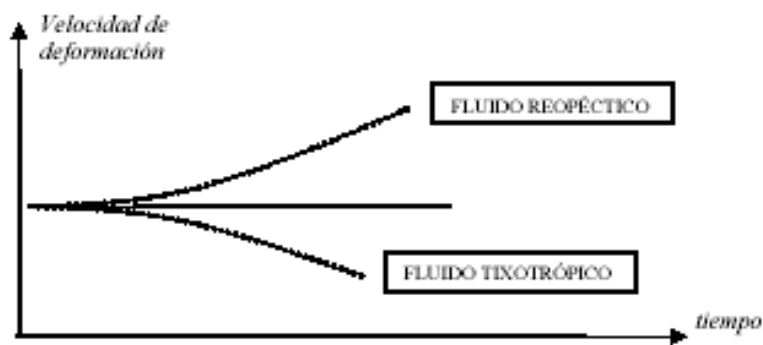
Plástico ideal de Bingham $\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy}$

Pseudoplástico y Fluido dilatante $\tau = \mu_0 \left(\frac{du}{dy} \right)^n$

μ_0 = Índice de viscosidad (unidades Pa x s; (Pascales por segundo))

n = Exponente del gradiente de velocidad; $n < 1$ pseudoplástico, $n > 1$ dilatante

Normalmente, bajo una determinada tensión tangencial, la velocidad de deformación no varía con el tiempo; pero en determinados fluidos, la velocidad de deformación puede aumentar con el tiempo: **fluido reopéctico**, o puede disminuir con el tiempo: **fluido tixotrópico**.



EFEECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA VISCOSIDAD.

El efecto de la variación de temperatura sobre la viscosidad, es totalmente distinto en gases y en líquidos, por la distinta estructura molecular, en cuanto a distancias y fuerzas intermoleculares: los gases tienen grandes recorridos libres medios como consecuencia de sus altas distancias intermoleculares, y en los líquidos el recorrido libre medio es bajo, debido a altas fuerzas intermoleculares y bajas distancias intermoleculares. En aumento de temperatura da lugar a un aumento del movimiento molecular y a un aumento de las distancias intermoleculares. En el caso de los

INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

gases, el aumento de temperatura fundamentalmente hace aumentar el intercambio de energía entre moléculas, con lo que los efectos viscosos de transmisión de cantidad de movimiento se ven aumentados, es decir hay un aumento de viscosidad; el otro efecto de aumento de distancias intermoleculares no es importante, por el hecho de que en gases estas distancias ya son de por sí muy altas. En el caso de los **líquidos**, el aumento de temperatura aumenta la separación molecular, disminuyendo las interacciones entre las moléculas, con lo que hay una disminución de transmisión de cantidad de movimiento y con ello de viscosidad. Es decir, el comportamiento de la viscosidad ante la temperatura, es totalmente diferente en gases y en líquidos: en gases un aumento de temperatura hace aumentar la viscosidad, y en líquido un aumento de temperatura hace disminuir la viscosidad.

Para evaluar la dependencia de la viscosidad con la temperatura se siguen las siguientes expresiones empíricas:

Para gases: Ecuación exponencial:
$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0,7}$$

Ecuación de SUTHERLAND:
$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{1 + KT_0}{1 + KT}$$

Para líquidos: Ecuación exponencial:
$$\mu = \mu_0 \bullet e^{\frac{k(T_0 - T)}{T_0}}$$

UNIDADES DE VISCOSIDAD.

Las dimensiones de la viscosidad absoluta son: $[\mu] = ML^{-1}T^{-1}$; en el Sistema Internacional² (SI) las unidades de viscosidad serán por lo tanto de Kg m⁻¹ s. A partir de la ley de Newton de viscosidad, se puede ver que la viscosidad es producto de una tensión por un tiempo, con lo también se puede expresar la unidad de viscosidad en el SI como Pa·s.

En el sistema CGS, las unidades de viscosidad son g/ cm . s, que se denomina poise (P), en honor a Jean L. POISEUILLE, que estableció la ecuación de medida experimental de la viscosidad, a partir de la caída de presión en flujo laminar en tuberías. Debido a que la viscosidad del agua a 1atm y 20°C es del orden de 0,01P, es decir un centipoise, que a la vez es igual a un milipascal por segundo: 1 cP = 1 mPa·s; por lo cual son usuales ambos términos en la unidad de viscosidad absoluta.

El cociente entre la viscosidad absoluta y la densidad, se denomina viscosidad cinemática. Las dimensiones de la viscosidad cinemática son: $[\nu] = L^2T^{-1}$, con lo que en el SI las unidades son: m²/s. En el sistema CGS la unidad es el cm²/s que se denomina stokes (St) en honor a George G. STOKES, que estableció en el estudio de la fuerza de arrastre de un fluido sobre una esfera. Debido a que la viscosidad cinemática del agua a 1atm y 20°C es del orden de 0,01St, es decir un centistoke, es usual este término como unidad de viscosidad cinemática.

La relación de unidades de viscosidad en los sistemas de unidades SI y CGS es:

viscosidad absoluta o dinámica (μ): 1 P = 0,1 Pa·s 1cP = 10⁻³ Pa·s = 1 mPa·s

viscosidad cinemática (ν): 1 St = 10⁻⁴ m²/s 1cSt = 10⁻⁶ m²/s

² Sistema internacional de unidades, con 7 unidades fundamentales: metro (m) para la longitud, kilogramo (kg) para la masa, segundo (s) para el tiempo, kelvin (K) para la temperatura absoluta, mol (mol) para la cantidad de materia, amperio (A) para la intensidad de corriente eléctrica, y candela (cd) para la intensidad de luz.

INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

presión atmosférica estándar (1 atm = 1013,25 mbar)	AGUA				AIRE			
	viscosidad absoluta Pa·s		viscosidad cinemática m ² /s		viscosidad absoluta Pa·s		viscosidad cinemática m ² /s	
temperatura (°C)	Pa·s	cP	m ² /s	cSt	Pa·s	cP	m ² /s	cSt
0	1,792 10 ⁻³	1,792	1,792 10 ⁻⁶	1,792	17,24 10 ⁻⁶	0,01724	13,33 10 ⁻⁶	13,33
10	1,307 10 ⁻³	1,307	1,307 10 ⁻⁶	1,307	17,73 10 ⁻⁶	0,01773	14,21 10 ⁻⁶	14,21
20	1,002 10 ⁻³	1,002	1,004 10 ⁻⁶	1,004	18,22 10 ⁻⁶	0,01822	15,12 10 ⁻⁶	15,12
30	0,797 10 ⁻³	0,797	0,801 10 ⁻⁶	0,801	18,69 10 ⁻⁶	0,01869	16,04 10 ⁻⁶	16,04
40	0,653 10 ⁻³	0,653	0,658 10 ⁻⁶	0,658	19,15 10 ⁻⁶	0,01915	16,98 10 ⁻⁶	16,98

Fluido (1 atm, 20 °C)	Viscosidad absoluta μ		Viscosidad cinemática ν		Densidad ρ kg/m ³
	Kg/ms	cP	m ² /s	cSt	
Hidrógeno	8,9 10 ⁻⁶	0,0089	0,106 10 ⁻³	106	0,084
Aire	18 10 ⁻⁶	0,018	15,1 10 ⁻⁶	15,1	1,2
Gasolina	0,29 10 ⁻³	0,29	0,427 10 ⁻⁶	0,427	680
Agua	1 10 ⁻³	1	1,01 10 ⁻⁶	1,01	999
Etanol	1,2 10 ⁻³	1,2	1,51 10 ⁻⁶	1,51	789
Mercurio	1,5 10 ⁻³	1,5	0,116 10 ⁻⁶	0,116	13540
Aceite SAE 30	26 10 ⁻³	26	0,279 10 ⁻³	279	933
Glicerina	1,5	1500	1,19 10 ⁻³	1190	1263

La medida experimental de la viscosidad se realiza con los **viscosímetros**. Normalmente se usa el viscosímetro de cilindros concéntricos; en donde se mide el par resistente al giro de un cilindro interior, concéntrico con uno exterior, entre los que se dispone el fluido a determinar su viscosidad. También se suelen usar los viscosímetros de descarga, en donde se mide el tiempo de descarga del fluido contenido en un determinado recipiente, bajo condiciones específicas de normativa. : así se tienen los SSU (segundos Saybolt universales) que miden el tiempo de descarga de un recipiente normalizado de 100 c.c. bajo condiciones de norma

En el caso de los **aceites lubricantes de automoción**, su viscosidad cinemática esta entre 30 y 300 cSt, en función del tipo de aceite y de la temperatura. Su comportamiento ante la temperatura viene determinado por el origen del crudo y por el proceso de destilación, y se suele expresar por un termino adimensional que se denomina **índice de viscosidad** (VI), los aceites de alto VI tienen pequeñas variaciones de viscosidad con la temperatura)

La **S.A.E.** (*Society of Automotive Engineers*), tiene su clasificación específica de los aceites de automoción en cuanto a su viscosidad y su comportamiento ante la temperatura; ordenados en intervalos de viscosidad (de menor a mayor): para bajas temperaturas (-30°C a -5°C), 0W, 5W, 10W, 15W, 20W, 25W (W de *winter*); y para alta temperatura (>100°C), 20, 30, 50. Los aceites monogrado tienen un índice de viscosidad bajo, con lo que fuera del rango de temperatura de utilización su viscosidad varia mucho; en cambio los aceites multigrado tienen índices de viscosidad altos, con lo que mantienen su viscosidad prácticamente constante en el rango de operación del aceite motor, así un aceite monogrado para usar solo en invierno será un SAE 20W, un monogrado para usar sólo en verano sería un SAE 50W, y un multigrado para usar todo el tiempo sería un SAE 20W50.

COMPRESIBILIDAD.

Consideremos una determinada agrupación de moléculas, sobre cuyos contornos exteriores, hay un aumento local de presión (p), es decir sobre cualquier elemento de área, el entorno esta ejerciendo una fuerza normal. A la fuerza

INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

por unidad de área se le va denominar tensión, con lo que en este caso, se tienen **tensiones normales**, a las que se les denomina **presión: p**.

Para todo tipo de materia (sólido, líquido o gas), el aumento de presión (Δp), origina siempre una disminución de volumen (ΔV). En la zona de elasticidad lineal de los materiales, la variación unitaria de volumen ($\Delta V/V$) por unidad de presión ($(\Delta V/V)/\Delta p$), es una constante, que viene determinada por las características elásticas del material, a través del **módulo de elasticidad volumétrica o módulo de compresibilidad**:

$$\xi = -\frac{\Delta p}{\Delta V/V}$$

Para los sólidos, ξ es muy grande, para líquidos es grande y para gases es pequeño. El signo “-”, es debido a que los sentidos de las variaciones de presión y de volumen son contrarios, es decir ante un aumento de presión, el volumen disminuye. Centrándonos, en el campo de los fluidos, si consideramos magnitudes elementales, si un determinado volumen de fluido (V) se somete a un aumento de presión (dp), el volumen se reduce en un determinado valor (dV), denominando **módulo de compresibilidad** del fluido a:

$$\xi = -V \frac{\Delta p}{\Delta V}$$

Un fluido poco compresible (líquidos) tiene alto módulo de compresibilidad y un fluido muy compresible (gases) tiene bajo módulo de compresibilidad. Para poder evaluar los cambios de presión y volumen (dP/dV), es necesario tener en cuenta el tipo de proceso de compresión: **isotérmico** (a temperatura constante), **isentrópico** (adiabático = sin pasaje de calor y sin efectos disipativos)

Lo que da lugar a la definición de los siguientes módulos:

Módulo de compresibilidad **isotermo**: $\xi = -V \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_T$

Módulo de compresibilidad **isentrópico**: $\xi = -V \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_s$

Las ecuaciones anteriores se suelen expresar en función de términos de densidad en vez de volumen, para esto debemos tener en cuenta que: $dm = d(\delta v) = d\delta v + \delta dv$, si consideramos un pequeño volumen de fluido donde la

masa no varía tenemos, $0 = d\delta v + \delta dv \Rightarrow -\frac{d\delta}{\delta} = \frac{dv}{v}$, multiplicando por dp y operando podemos expresar el

módulo como: $dp \frac{d\delta}{\delta} = \frac{dv}{v} dp \Rightarrow V \frac{dp}{dV} = -\delta \frac{dp}{d\delta} = \xi$, quedando en función de la densidad.

En el caso de líquidos, los dos módulos son prácticamente iguales; en cambio en gases, el módulo isotermo es siempre menor que el isentrópico. Así, agua a 20°C y 1 atm, tiene un módulo de compresibilidad de 2200 MPa; en cambio, aire a 20°C y 1 atm, tiene un módulo isotermo de 0,1013 MPa, y un módulo isentrópico de 0,1418 MPa.

Otra forma de **evaluar la compresibilidad de un fluido**, es la velocidad con la que se transmiten pequeñas perturbaciones en el seno del propio fluido; a esa velocidad se le denomina **velocidad sónica** o velocidad del sonido y viene determinada por:

INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

$$V_{\text{sonido}} = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\frac{\xi}{\rho}}$$

Los fluidos compresibles tienen bajas velocidades sónicas y los fluidos incompresibles tienen altas velocidades sónicas; así a 20°C y 1atm, la velocidad del sonido en agua es de 1483,2 m/s, y la velocidad del sonido en aire es de 331,3 m/s.

TENSION SUPERFICIAL.

En un líquido las fuerzas intermoleculares son relativamente grandes, con lo que no puede expansionarse libremente; así en contacto con otro líquido o con un gas, forma una interfase. Las moléculas del interior del líquido se repelen mutuamente hasta la distancia intermolecular (marcada por el equilibrio de las fuerzas de repulsión con las de atracción); en cambio las moléculas de la superficie libre³, están en desequilibrio. Este desequilibrio se da por que en el seno del fluido las moléculas son de la misma naturaleza y las fuerzas que equilibran son de cohesión⁴, en cambio, las moléculas del líquido en la superficie, no están en equilibrio puesto que en la dirección hacia el seno del fluido son atraídas hacia el mismo, pero el fluido que se encuentra sobre ellas es de distinta naturaleza, provocándose entonces un desequilibrio. Para que el desequilibrio provocado por las moléculas de la interfase sea mínimo, se debe tener el mínimo número de moléculas, con lo que en cada caso la superficie libre es la de mínima área, en función del resto de fuerzas que actúen.

En una superficie libre, la energía que se necesita para mantener un determinado número de moléculas en un elemento de área, es una propiedad inherente a la interfase, y se denomina **tensión superficial** σ (Sigma).

$$\sigma = \frac{dE}{dA}$$

Una consideración más clásica, es considerar la tensión superficial, como la fuerza elemental, que por unidad de longitud, mantiene unidas a las moléculas de la superficie, situadas a lo largo del elemento de longitud, como el caso de una gota de agua.

Así, por ejemplo, en la interfase agua-aire, a 20°C y 1 atm, la tensión superficial tiene un valor de 728 J/cm²; es decir para aumentar la superficie libre en 1cm² se necesitaría una energía de 728 J, que habría que aportar a las moléculas del interior para que pasen a la superficie. Lo que lleva a considerar normalmente como unidades de la tensión superficial N/m en el SI; evidentemente la definición energética es coherente, pues J/m² = N/m.

En la tabla siguiente se dan valores de tensiones superficiales de algunos líquidos con distintas interfases, a una temperatura de 20°C:

<i>Líquido</i> <i>interfase</i>	σ (N/m)
Agua-aire	0,0728
Mercurio-aire	0,476
Mercurio-agua	0,373
Metanol-aire	0,023

³ La superficie libre, es la interfase entre un líquido y un fluido (líquido o gas); es decir se pueden tener dos tipos de interfases: líquido-líquido y líquido-gas. Además, la interfase viene determinado por los contactos con paredes sólidas.

⁴ Las fuerzas entre moléculas de la misma naturaleza son llamadas de cohesión, las de distinta naturaleza son de adhesión

INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

El desequilibrio originado en la interfase por la tensión superficial, da lugar a una serie de fenómenos:

- Interacción con una pared sólida (líquidos que mojan o no mojan la superficie de contacto, ascenso descenso de la superficie libre en tubos capilares)
- Flotación de objetos en la superficie libre (flotación de una aguja, sustentación de insectos)
- Formación de gotas (una gota de agua en suspensión en aire (niebla) prácticamente sólo está sometida a la tensión superficial, que le hace adquirir la menor superficie posible, es decir adquiere la forma esférica)
- Evaporación superficial (las menores fuerzas intermoleculares de las moléculas de la superficie, con respecto a las del interior, hace que por efectos de agitación térmica, continuamente exista una migración de moléculas de la superficie libre hacia el exterior (proceso evaporación superficial)

SOBREPRESIÓN EN EL INTERIOR DE GOTAS:

Las fuerzas de tensión superficial que hacen que la superficie de una gota de líquido sea esférica, hacen que la presión en el interior de la gota sea superior a la exterior. Si se considera un corte de la gota esférica en dos mitades, la fuerza de tensión superficial actúa sobre el borde, es decir sobre una circunferencia, y la fuerza de presión interior actúa sobre la superficie de contacto de las dos mitades, es decir un círculo; a partir de estas consideraciones se obtiene el valor de la sobrepresión interior, por la denominada ecuación de YOUNG-LAPLACE:

$$\Delta P_{\text{GOTA}} = \frac{2\sigma}{r}$$

La fuerza interna del líquido está dada por la presión multiplicada por el área en cuestión $P \pi r^2$, pero el perímetro donde se encuentra la interfase con el otro fluido (aire) provoca una fuerza que mantiene la gota en equilibrio, que es igual a $\sigma 2\pi r$, como la gota está en equilibrio, se puede igualar

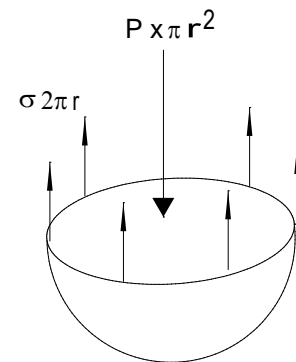
estas dos expresiones quedando $P \pi r^2 = \sigma 2\pi r$ de donde podemos inferir que $\Delta P_{\text{GOTA}} = \frac{2\sigma}{r}$

En el caso de considerar una burbuja, las fuerzas de tensión superficial, son las debidas tanto a la superficie libre exterior como a la interior, que son prácticamente esferas del mismo radio, con lo que se tiene:

$$\Delta P_{\text{BURBUJA}} = \frac{4\sigma}{r}$$

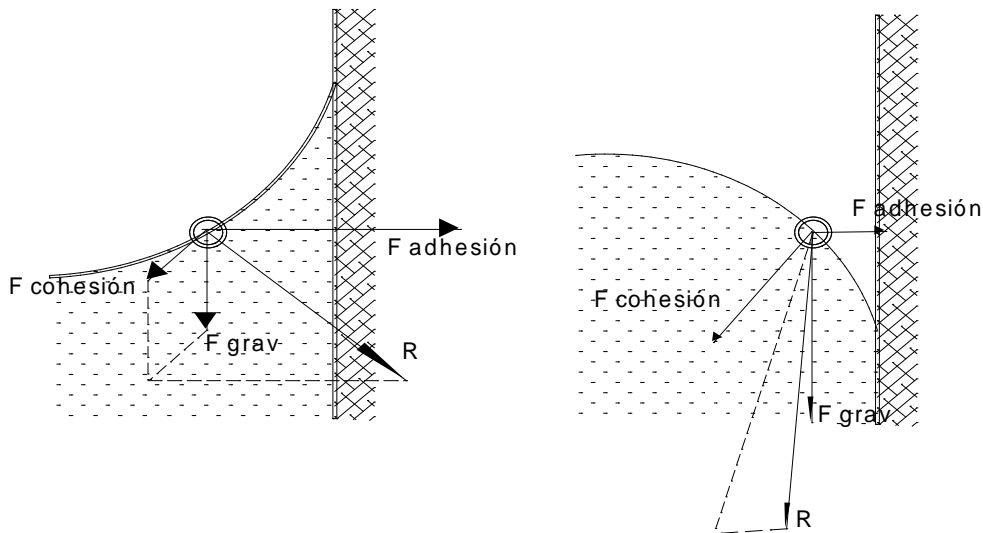
CAPILARIDAD.

En un líquido en reposo, las fuerzas que actúan sobre las moléculas de la superficie libre son: su peso y las fuerzas de cohesión con las moléculas que la rodean (con resultante vertical hacia abajo, por tener moléculas de líquido hacia abajo y moléculas de vapor y de gas por encima); lo que da una resultante neta sobre la molécula, vertical hacia abajo; y como la superficie libre es siempre perpendicular a la resultante de las fuerzas de presión, se tendrá un plano horizontal como superficie libre. En el caso de las moléculas cercanas a una pared, además aparece la **fuerza de adherencia** entre las moléculas del líquido y las de la pared, con sentido hacia la pared y dirección perpendicular a la pared. En la mayor parte de líquidos, las fuerzas de adherencia con las paredes, son mayores que las de cohesión, lo que da lugar a tener sólo dos fuerzas, el peso y la cohesión. En el caso de una pared vertical, la

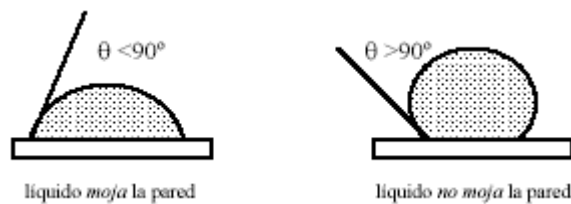


INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

resultante es una fuerza de sentido hacia la pared, entre la horizontal y la vertical: conforme las moléculas están más próximas, la fuerza de cohesión aumenta, y la dirección de la resultante es más horizontal. Esto es lo que lleva a que la **superficie libre**, tenga que pasar gradualmente de prácticamente vertical en la pared de contacto, a horizontal en puntos alejados de la pared: lo que da lugar a que la superficie libre adquiera una curvatura: es el denominado “**menisco**”. En ciertos casos el menisco formado, es convexo, y el **líquido** se dice que “**moja**” a la pared. En determinados líquidos, las fuerzas de cohesión intermolecular, son mayores que las de adherencia con las paredes, lo que lleva a que se tengan meniscos cóncavos, y el **líquido** se dice que “**no moja**” a la pared.



Estrictamente, la geometría del menisco, depende de las propiedades de tensión superficial y adherencia, asociadas a un conjunto de: líquido-gas-sólido; es decir, la formación de una superficie libre de un líquido, por encima del cual hay un gas, y cerca de una determinada pared sólida. La superficie libre de una interfase líquido-gas (o líquido-líquido) en contacto con una pared sólida, adquiere una curvatura con un determinado *ángulo de contacto* θ , cuyo valor depende del conjunto líquido-gas-sólido; si el líquido *moja* a la superficie, el ángulo de contacto es menor de 90° ; si el líquido *no moja* a la superficie, el ángulo de contacto es mayor de 90°



Así agua o etanol con superficie libre al aire y en contacto con vidrio tienen valores del ángulo de contacto prácticamente nulo (a temperatura normal de 20°C): $\theta \approx 0^\circ$; y en las mismas condiciones, el mercurio tiene un ángulo de contacto entre 130° y 150° .

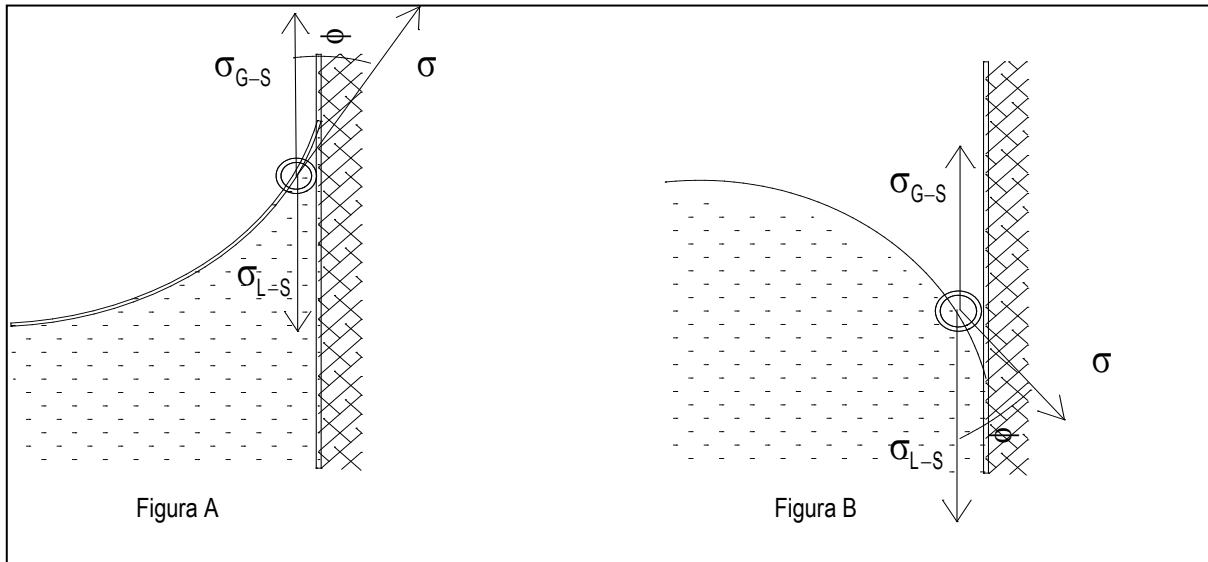
Capilaridad en tubos pequeños:

Cuando un tubo fino se introduce en la superficie libre de un líquido, el líquido asciende o desciende por el interior del tubo, debido a las fuerzas de tensión superficial y las fuerzas de contacto entre el líquido y las paredes del tubo. Este fenómeno se denomina capilaridad, y explica, por ejemplo el ascenso o descenso del líquido por el interior del tubo, cuando este se introduce en un determinado líquido; si el líquido “moja” el ángulo de contacto es

INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

menor de 90° y se tiene un ascenso capilar del líquido por el tubo; si el líquido “no moja” el ángulo de contacto es mayor de 90° y se tiene un descenso capilar del líquido por el tubo:

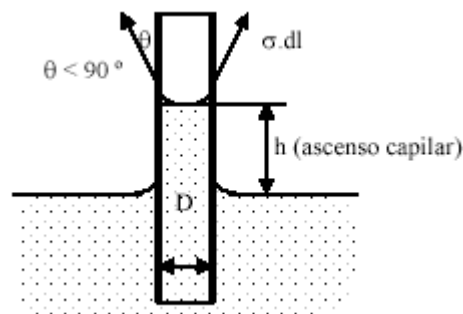
Así, cuando se tiene, en un recipiente, un líquido que moja las paredes del mismo, como el agua o los aceites en general, las tensiones debidas a las fuerzas de adherencia entre el líquido y la superficie en contacto con el mismo, σ_{L-S} , son mayores que las del aire atmosférico con esa superficie, σ_{G-S} , y entonces el equilibrio en cada elemento del perímetro de la superficie libre del líquido está dado por que la tensión superficial σ del líquido tiene una dirección como la indicada en las figuras siguientes:



Resulta de las figuras que con $\sigma_{L-S} > \sigma_{G-S}$, y teniendo en cuenta el ángulo del menisco θ

tenemos que $\sigma \cos \theta + \sigma_{G-S} = \sigma_{L-S}$, con lo que se deduce que las tensiones líquido sólido son mayores que las de gas – sólido, como resultado el líquido moja la superficie, figura A.

En cambio si la tensión de adherencia σ_{L-S} fuese menor que la σ_{G-S} se tendrá la figura B con $\sigma_{L-S} < \sigma_{G-S}$ y por lo tanto $\sigma \cos \theta + \sigma_{L-S} = \sigma_{G-S}$, deduciéndose que el líquido no moja la superficie (como el caso del mercurio por ejemplo)



El equilibrio de fuerzas sobre la masa de líquido que asciende por el tubo capilar, se establece entre la componente vertical de las fuerzas de tensión superficial y el peso de la columna de líquido; este equilibrio da una expresión de la altura “h” a la que asciende (desciende si $\theta > 90^\circ$) el líquido, que se denomina Ley de JURIN:

$$h = \frac{4 \sigma \cos \theta}{\delta g d}$$

INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Por los bajos valores de la tensión superficial, sólo son apreciables los ascensos-descensos capilares, en tubos de diámetros muy pequeños, que se denominan capilares; y que da el nombre al fenómeno. Así para agua en aire y tubos de vidrio, con valores del ángulo de contacto de aproximadamente 0° y tensión superficial con un valor de $0,0728 \text{ N/m}$, se tienen los siguientes valores del ascenso capilar, para distintos diámetros de los tubos:

<i>h(mm)</i>	297	29,7	2,97	0,29
<i>D(mm)</i>	0,1	1	10	100

PRESIÓN, DENSIDAD Y TEMPERATURA

La relación entre las variables presión, densidad y temperatura, viene determinada por la denominada ecuación térmica de estado: $f(p, \delta, T) = 0$; en el caso de considerar un gas ideal (no hay interacciones intermoleculares), esta ecuación es la dada por las leyes de BOYLE y CHARLES, o **ecuación térmica de estado**

$$P = \delta RT^5$$

La **presión**, puede definirse en un medio continuo, como la fuerza normal por unidad de área en el límite para un área tan pequeña como se desea (por ejemplo un punto de área nula)

$$P = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_{\text{NORMAL}}}{\Delta \text{Area}}$$

En el SI la unidad es el N/m^2 , que se denomina **Pascal**, en honor a Blaise PASCAL, por ser el que estableció el concepto escalar de la presión. Otras unidades de presión son:

<i>nombre de la unidad</i>	<i>unidad</i>	<i>factores de conversión</i>
pascal	Pa	1 Pa = 1 N/m^2
bar	bar	1 bar = 100 kPa
milibar	mbar	1 mbar = 100 Pa
metro de columna de agua	mH_2O	1 mH_2O = 9,80665 kPa
presión atmosférica estándar	atm	1 atm = 101,325 kPa
milímetro de columna de mercurio	mmHg	1 mmHg = $(1/0,760) = 133,3 \text{ Pa}$
Kilogramo f / centímetro cuadrado	kg/cm^2	1 kg/cm^2 = 0,980665 bar
libra fuerza / pulgada cuadrada	psi	1 psi = 6,893 kPa

Como origen de presiones se toma:

-la presión nula, obteniéndose *presiones absolutas* y la presión atmosférica local (presión barométrica) obteniéndose *presiones manométricas* (para presiones mayores que la atmosférica) o *Presiones vacuométricas* (para presiones menores que la atmosférica)

La **densidad** en un punto se define por el límite del cociente de una fracción de masa (entorno al punto considerado) por el volumen que ocupa, cuando el volumen tiende a cero (colapsa en el punto):

$$\delta = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

El **peso específico** es el peso por volumen de fluido, de la ecuación anterior se deduce que la densidad es la relación entre la masa y el volumen considerado, multiplicando ambos miembros por g tenemos:

⁵ La ecuación térmica de estado de un gas ideal en el ámbito termodinámico se expresa por: $pV = nRuT$; en donde "p" es la presión, "V" el volumen, "n" el número de moles, "Ru" la constante universal de los gases, y "T" la temperatura absoluta; expresando el número de moles por el cociente entre la masa y la masa molecular ($n=m/M$), se tiene la expresión normalmente utilizada en Termodinámica: $pV = RT$, en donde aparece el volumen específico ($v=V/m$) y la constante particular del gas considerado ($R=Ru/M$); teniendo en cuenta que la densidad es la inversa del volumen específico: $\delta=1/v$, se tiene la expresión de la ecuación térmica de estado para un gas ideal, que normalmente se utiliza en Mecánica de Fluidos: $p = \delta RT$.

INTRODUCCIÓN – PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

$$\delta g = \frac{m \cdot g}{V} = \frac{\text{Peso}}{V} = \gamma$$

Cuando nos referimos a la **densidad relativa**, nos referimos a un valor adimensional que no es otra cosa que la relación entre la densidad del fluido y la del agua⁶.

$$\delta_r = \frac{\delta_{\text{Fluido}}}{\delta_{\text{Agua}}}$$

La **temperatura** absoluta, esta asociada conceptualmente al equilibrio térmico: dos sistemas están en equilibrio térmico cuando en contacto diatermo (no adiabático) ninguno de los dos sistemas cambian su estado de equilibrio, con lo que dos sistemas en equilibrio térmico tienen la misma temperatura. La temperatura es una magnitud básica del SI y su unidad es el kelvin; que se define como 1/273,16 de la temperatura absoluta del punto triple del agua (273,16 K).

Otras unidades de temperatura son:

<i>nombre de la unidad</i>	<i>unidad</i>	<i>factores de conversión</i>
kelvin	K	1 K = (1/273,16) tº punto triple agua
grado Celsius	ºC	$\Delta^{\circ}\text{C} = \Delta\text{K}$ $t^{\circ}(\text{C}) = t^{\circ}(\text{K}) - 273,15$
Rankine	R	1 R = 1,8 K
grado Fahrenheit	ºF	$\Delta^{\circ}\text{F} = \Delta\text{R}$ $t^{\circ}(\text{F}) = t^{\circ}(\text{R}) - 459,67$

Bibliografía complementaria para consulta:

FRANK M. WHITE, Mecánica de Fluidos, Ed. Mc Graw Hill

WILLIAM F. HUGES, Dinámica de los fluidos, Ed Mc Graw Hill

ROBERT FOX – ALAN MAC DONALD, Introducción a la Mecánica de Fluidos, 4ta Edición, Mc Graw Hill

IRWIN SHAMES, Mecánica de Fluidos, 6ta Ed. Editorial Mc Graw Hill

RONALD GILES, Mecánica de los fluidos e Hidráulica, Ed. Mc Graw Hill

STREETER Y WEELER, Mecánica de los fluidos, Ed. Mc Graw Hill

⁶ A los fines prácticos la densidad del agua se toma como 1000 kg/m³