

Hidráulica *básica* *paso a paso*

Para estudiantes de Ingeniería.
Teoría y ejemplos.

Izquierdo E.

Edición revisada. Febrero 2016

Obra protegida por derechos de autor
Se prohíbe la reproducción parcial o total
072813372800-1

Presentación

La pandemia del Covid 19 ha ocasionado estragos y cambios en la vida de todos, lamentables vidas perdidas, problemas económicos, confinamiento y angustia, entre otros. No obstante, el comportamiento heroico de los trabajadores de la salud resulta ejemplar y los esfuerzos de adaptación los estamos haciendo todos.

Una reflexión importante es que estos esfuerzos resultan más fáciles y efectivos cuando nos apoyamos unos a otros, cuando los hacemos en comunidad, organizados, cuando aportamos de manera generosa nuestra capacidad y ayudamos a los demás.

En ese sentido decidí aportar mi pequeña contribución a la comunidad estudiantil de la ESIA-Z, poniendo a disposición de manera abierta y gratuita el presente material que comprende la totalidad del curso de Hidráulica Básica y es producto de muchos años de trabajo.

Espero que sea de utilidad y resulte un apoyo y una motivación para mejorar tu aprendizaje y tu formación como ingeniero y como persona digna, capaz e íntegra.

Atentamente

M. en C. Eduardo Izquierdo Moreno.

“La Técnica al Servicio de la Patria”

Se autoriza la reproducción parcial o total citando la fuente.

Se agradecen comentarios y observaciones al correo
eizquierdom@ipn.mx

Unidad 1

Propiedades físicas de los fluidos.

1.0.- Introducción: En esta unidad estudiaremos las propiedades físicas más importantes de los fluidos, especialmente de los líquidos, y su expresión en los distintos sistemas de unidades.

1.1.- Estados de la materia: Es común decir que la materia se presenta en tres estados, Aunque en realidad son cuatro:

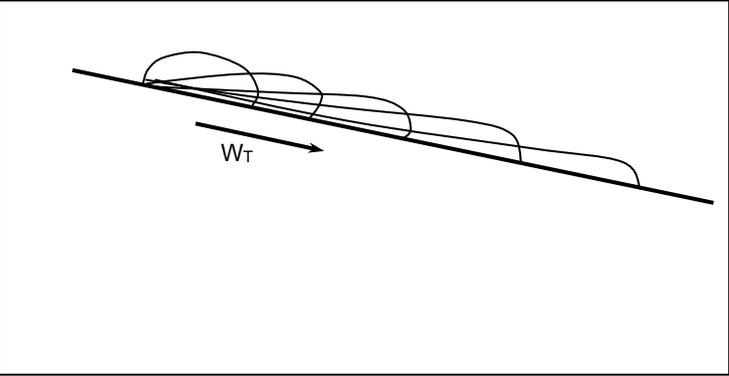
Estados de la materia	Características más evidentes
Sólido	<ul style="list-style-type: none"> • Forma definida y “permanente”. • Volumen constante. • Presentan resistencia a diversos esfuerzos.
Líquido	<ul style="list-style-type: none"> • Forma indefinida, toman la del recipiente que los contiene y presentan superficies libres. • Volumen constante (si la temperatura permanece constante) • Resisten presiones (esfuerzos normales de compresión) • Los esfuerzos tangenciales, también llamados cortantes, los deforman continuamente, los hacen fluir.
Gaseoso	<ul style="list-style-type: none"> • Forma indefinida • Volumen variable, se comporta en relación inversa a la presión, en recipientes cerrados se expanden hasta ocupar todo el volumen del recipiente. • Sus moléculas se mueven en forma caótica, cuya velocidad y/o energía depende en forma directa de la temperatura. • Los esfuerzos tangenciales los deforman continuamente, los hacen fluir.
Plasma	<ul style="list-style-type: none"> • Es un gas ionizado, sus átomos se han separado de uno o más electrones, por ello está compuesto de aniones y cationes. • Sus moléculas pueden estar tan o más separadas que las de un gas y también se mueven de forma caótica. • Son excelentes conductores de la electricidad y reaccionan al magnetismo. • Ejemplos: la atmósfera solar, los gases (de mercurio y neón) de las lámparas fluorescentes, las capas exteriores de la atmósfera terrestre: ionósfera y magnetósfera.

A los líquidos y gases se les llama fluidos.

Fluidos: Son aquellos materiales que pueden “fluir” es decir, escurrir. Esto significa que se pueden deformar de manera continua en presencia de esfuerzos cortantes.

Flujo: Esguerrimiento, acción de fluir, movimiento de los fluidos.

Una gota de líquido esgurre; es decir, se deforma continuamente o fluye sobre un plano inclinado, debido al esfuerzo cortante (o tangencial) que provoca la componente tangencial de la fuerza de gravedad (peso).



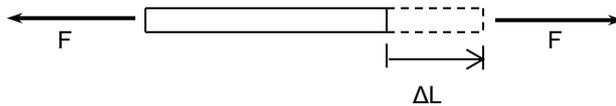
1.2 Tipos de esfuerzos

Concepto de esfuerzo. Definimos a un esfuerzo como el cociente de la fuerza que actúa en un área, entre dicha área

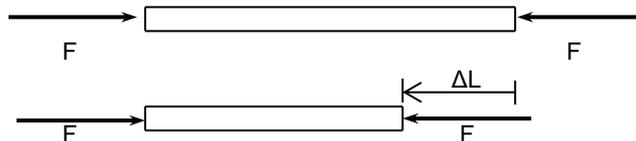
$$\text{esfuerzo} = \frac{\text{fuerza}}{\text{area}} \quad \sigma = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

Por la forma de aplicación de la fuerza existen distintos tipos de esfuerzos:

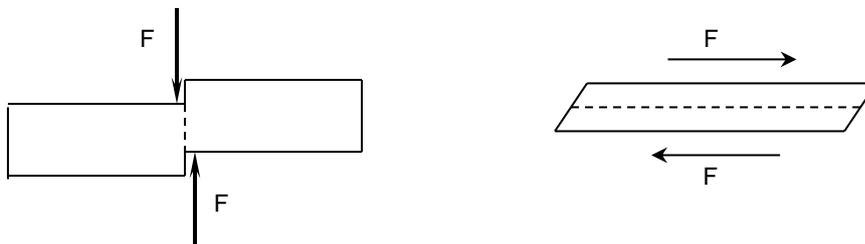
Esfuerzos normales de tensión o tensiones: Las fuerzas son perpendiculares al área sobre la que actúan y tienden a alargar a los cuerpos en el sentido de aplicación de las fuerzas



Esfuerzos normales de compresión o presiones: Las fuerzas son perpendiculares a las áreas en que están aplicadas y tienden a disminuir la dimensión geométrica del cuerpo en el sentido de aplicación de las fuerzas

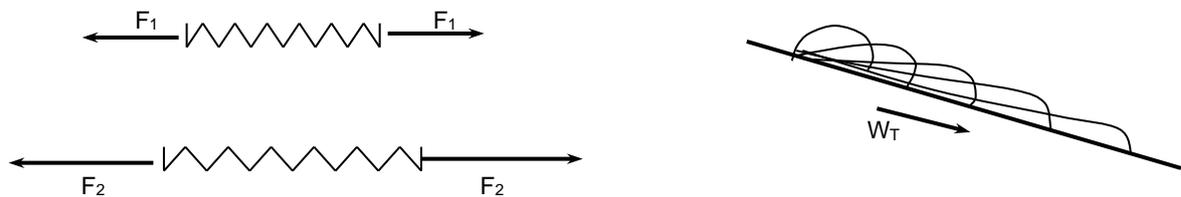


Esfuerzos tangenciales o cortantes: Las fuerzas son tangenciales a las superficies que las soportan y tienden a cizallar o cortar a los cuerpos siguiendo a esas superficies.



Los esfuerzos en los fluidos:

- Los esfuerzos normales de tensión prácticamente no existen en los fluidos.
- Los esfuerzos normales de compresión son los únicos que existen cuando los fluidos están en reposo.
- **Los esfuerzos tangenciales o cortantes son los que ocasionan que un fluido escurra o fluya, es decir, producen una deformación continua sin que sea necesario un aumento de la magnitud del esfuerzo, lo cual es una diferencia con el comportamiento de los sólidos elásticos, como se explica en la siguiente figura.**



Deformación elástica. Para aumentar la deformación de un resorte se necesita aumentar la fuerza y por lo tanto el esfuerzo

Deformación de fluencia o flujo. En los fluidos la deformación aumenta con el tiempo sin que aumente la fuerza ni el esfuerzo.

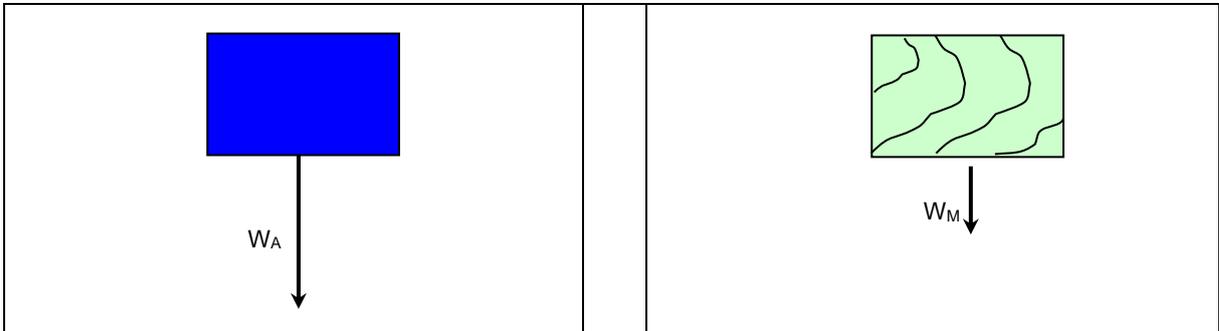
1.3.- Propiedades físicas de los fluidos: Una clasificación

Relacionadas con la masa y la gravedad:	<ul style="list-style-type: none"> • Peso Específico • Densidad • Densidad relativa
Relacionadas con la resistencia ante los esfuerzos cortantes:	<ul style="list-style-type: none"> • Viscosidad • Viscosidad cinemática
Relacionadas con la resistencia ante los esfuerzos de compresión:	<ul style="list-style-type: none"> • Elasticidad • Compresibilidad
Fuerzas a nivel molecular:	<ul style="list-style-type: none"> • Cohesión • Adhesión
Comportamiento en interfaces y tubos capilares (también influidas por las fuerzas eléctricas a nivel molecular).	<ul style="list-style-type: none"> • Tensión superficial • Capilaridad
Relacionadas con la presión, la temperatura y el cambio de estado.	<ul style="list-style-type: none"> • Evaporación • Ebullición • Presión de vapor • Cavitación

La *temperatura* no es una propiedad de los fluidos sino una variable del medio ambiente que modifica casi todas las propiedades como se explica en cada una.

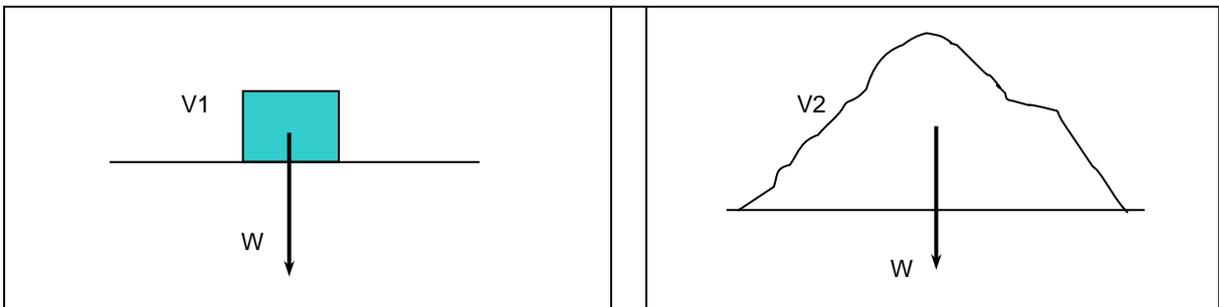
Peso específico γ (gama).

Al comparar dos cuerpos de volúmenes iguales pero materiales diferentes, por ejemplo acero y madera, nos percatamos de la diferencia en peso.



Cuando decimos que el acero es más pesado que la madera, implícitamente estamos refiriéndonos a volúmenes iguales.

También podemos tener dos cuerpos con el mismo peso y siendo de materiales diferentes, ocuparan volúmenes diferentes, plomo y tierra, por ejemplo.



Lo anterior nos lleva a la necesidad de desarrollar un nuevo concepto físico que resulta más significativo:

El peso específico de un cuerpo se define como la relación del peso de un cuerpo entre el volumen que ocupa, si en lugar de un cuerpo en particular nos referimos a un **material**, **el peso específico se define como el peso por unidad de volumen.**

$$\text{Peso..específico} = \frac{\text{Peso}}{\text{Volúmen}} \qquad \gamma = \frac{W}{V} \qquad (1.2)$$

Otros nombres son: **Peso volumétrico, Densidad ponderal y Densidad en peso.**

Sus dimensiones¹ son fuerza entre volumen:

$$[\gamma] = \frac{[W]}{[V]} = \frac{F}{L^3} = FL^{-3} \qquad \text{en el técnico}$$

¹ Recordar que las dimensiones son “unidades generales” que ayudan a comprender la naturaleza del concepto.

$$[\gamma] = \frac{[W]}{[V]} = \frac{MLT^{-2}}{L^3} = ML^{-2}T^{-2} \quad \text{en el absoluto}$$

Sus unidades son unidades de fuerza entre unidades de volumen:

En el sistema internacional	$[\gamma] = \frac{[W]}{[V]} = \frac{N}{m^3}$
En el sistema MKS técnico	$[\gamma] = \frac{[W]}{[V]} = \frac{kg}{m^3}$
En el sistema Ingles técnico	$[\gamma] = \frac{[W]}{[V]} = \frac{lb}{ft^3}$

Debido a que los cuerpos se dilatan (aumentan su volumen con el aumento de la temperatura), el peso específico disminuye al aumentar la temperatura; sin embargo esta variación es pequeña, (ver tabla al final de esta unidad) y dado el carácter aproximado de la mayoría de los cálculos de ingeniería muchas veces no se toma en cuenta, considerándose el valor más alto para estar del lado de la seguridad.

Densidad ρ (ró).

Por consideraciones similares a las del peso específico, también se desarrolla el concepto de *densidad, masa específica, densidad absoluta, masa volumétrica o densidad en masa*.

La densidad es la relación o cociente de la masa de un cuerpo entre su volumen. Si nos referimos a un *material, la densidad es la masa contenida en la unidad de volumen.*

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}} = \rho = \frac{m}{V} \quad (1.3)$$

Sus dimensiones son masa entre volumen:

$$[\rho] = \frac{[m]}{[V]} = \frac{M}{L^3} = ML^{-3} \quad \text{en el absoluto}$$

$$[\rho] = \frac{[m]}{[V]} = \frac{FT^2L^{-1}}{L^3} = FT^{-2}L^{-4} \quad \text{en el técnico}$$

Sus unidades son unidades de masa entre unidades de volumen:

En el sistema internacional	$[\rho] = \frac{[m]}{[V]} = \frac{kg}{m^3}$
En el sistema MKS técnico	$[\rho] = \frac{[m]}{[V]} = \frac{UTM}{m^3} = \frac{Kg \cdot s^2 / m}{m^3} = \frac{Kg \cdot s^2}{m^4}$
En el sistema Ingles técnico	$[\rho] = \frac{[m]}{[V]} = \frac{slug}{ft^3} = \frac{lb \cdot s^2 / ft}{ft^3} = \frac{lb \cdot s^2}{ft^4}$

El aumento de temperatura produce una disminución de la densidad debido a la dilatación de los cuerpos, pero al igual que en el peso específico, esta variación es insignificante para la mayoría de los cálculos de ingeniería.

Relación entre peso específico y densidad:

De la segunda Ley de Newton proviene la conocida relación entre peso y masa:

$$W = mg \tag{1.4}$$

Dividiendo ambos miembros de la ecuación entre volumen

$$\frac{W}{V} = \frac{m}{V} g$$

Obtenemos

$$\gamma = \rho g \tag{1.5}$$

“El peso específico es igual a la masa específica por la gravedad”

Densidad relativa Dr o δ (delta minúscula).

En muchas ocasiones el peso específico de un material se compara con el del agua: “la madera es más ligera que el agua y por eso flota”, “el mármol pesa 2.6 veces lo que pesa el agua”, etc. pero realmente no hablamos de peso, sino de una comparación del peso específico (o la densidad) de un material en relación con el peso específico (o la densidad) del agua: ***Densidad relativa de un material es el cociente del peso específico del material entre el peso específico del agua***

$$Dr_m = \frac{\text{Peso.específico.del.material}}{\text{Peso.específico.del.agua}}$$

En literales:

$$Dr_m = \frac{\gamma_m}{\gamma_a} \tag{1.6}$$

Si dividimos el numerador y el denominador entre la aceleración de la gravedad, el cociente no se altera

$$Dr_m = \frac{\gamma_m / g}{\gamma_a / g}$$

y queda

$$Dr_m = \frac{\rho_m}{\rho_a} \tag{1.7}$$

Es decir: ***La densidad relativa de un material también es el cociente de la densidad del material entre la densidad del agua.***

Si multiplicamos el numerador y el denominador de la Ec. 1.6 por el volumen de un cuerpo, el cociente no se altera y obtenemos una expresión para calcular la densidad relativa de un cuerpo

$$Dr_c = \frac{\gamma_c V}{\gamma_a V} = \frac{W_c}{W_{=Va}} \tag{1.8}$$

Es decir:

$$\text{Densidad relativa de un cuerpo} = \frac{\text{Peso del cuerpo}}{\text{Peso de igual volúmen de agua}}$$

Como podemos ver la densidad relativa es un número sin unidades, que significa el número de veces que un material es más (o menos) pesado que el agua, y tiene la ventaja de conservar su valor en cualquier sistema de unidades.

A partir de la definición (Ecs. 1.6 y 1.7) es evidente que la densidad relativa del agua es 1 en todos los sistemas de unidades.

Problemas tipo: A partir de sus definiciones es claro que existen relaciones entre los tres conceptos de peso específico, densidad y densidad relativa, muchos problemas típicos consisten en encontrar los valores de dos conceptos faltantes a partir del tercer concepto conocido.

Ejemplo 1.1. El peso específico del agua es de 1 kg /lt, encontrar el valor del peso específico, la densidad y la densidad relativa en el MKS técnico, en el MKS absoluto y en el inglés técnico.

Solución: El dato $\gamma = 1 \text{ Kg / lt}$ está expresado en una unidad técnica, ya que el peso específico es peso sobre volumen y el kg aquí se usa para medir el peso (fuerza), y el litro, para medir volumen. El que por cierto es igual a un decímetro cúbico.

Un razonamiento sencillo pero muy útil es el siguiente: si un litro de agua pesa un kilo, un metro cúbico (que tiene 1000 lt) pesa 1000 kg. En símbolos:

$$\gamma = \frac{1 \text{ kg}}{\text{lt}} = \frac{1 \text{ kg}}{\text{lt}} \left(\frac{1000 \text{ lt}}{1 \text{ m}^3} \right) = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{en el MKS técnico.}$$

De la ec. $\gamma = \rho g$ despejamos la densidad, que para el agua en el MKS técnico es:

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 101.93 \frac{\text{kg} \cdot \text{s}^2}{\text{m} \cdot \text{m}^3} = 101.93 \frac{\text{UTM}}{\text{m}^3}$$

En el MKS absoluto los kg son masa², por lo que el valor

$$1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \rho \quad \text{es la densidad.}$$

El peso específico se calcula por $\gamma = \rho g$

$$\gamma = \rho g = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

Para el Inglés técnico, nos apoyamos en los datos del MKS técnico:

$$\gamma = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left(\frac{1 \text{ lb}}{0.454 \text{ kg}} \right) \left(\frac{0.3048 \text{ m}}{1 \text{ ft}} \right)^3 = 62.37 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

² Esto es lo que llamamos "el salto", que permite pasar de los kg fuerza en el MKS técnico a los kg masa en el MKS absoluto. Es decir conservamos el valor y la unidad pero cambiamos de concepto (de fuerza a masa) al pasar de un sistema a otro. También se puede hacer en el sentido inverso.

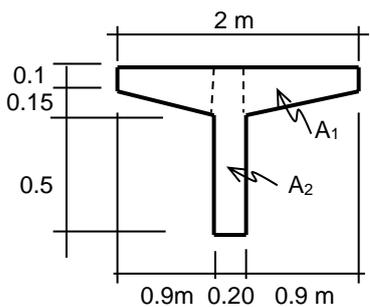
$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{62.37 \frac{lb}{ft^3}}{32.2 \frac{ft}{s^2}} = 1.937 \frac{lb \cdot s^2}{ft \cdot ft^3} = 1.937 \frac{slugs}{ft^3}$$

La densidad relativa: De su definición

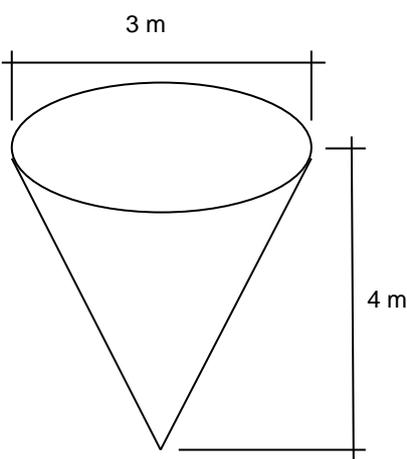
$$Dr_M = \frac{\gamma_M}{\gamma_a} = \frac{\rho_M}{\rho_a}$$

Es obvio que la densidad relativa del agua es 1 en todos los sistemas.

Ejemplo 1.2. La densidad relativa del concreto es de 2.4, Calcular el peso de una viga T de 12 m de longitud cuya sección tiene los datos mostrados. Resolverlo en el sistema MKS absoluto.

	<p>Solución: Despejando la ec. 1.6</p> $\gamma_m = Dr_m \gamma_{ag} = 2.4(9810) \frac{N}{m^3} = 23544 \frac{N}{m^3}$ <p>Área de la sección transversal</p> $A = 2A_1 + A_2 = \{2(0.25 + 0.1)0.9 / 2\} + 0.75(0.2) = 0.465m^2$ $V = AL = (0.465)(12) = 5.58m^3$ $W = \gamma V = 23544 \frac{N}{m^3} (5.58m^3) = 131375N$ $W = 131.4kN$
--	--

Ejemplo 1.3. La densidad de un tipo de arena es 1.4 Ton/m³ y se almacena en una tolva cónica con las medidas mostradas. Calcular: A) El peso específico, la densidad y la densidad relativa de la arena. B) El peso de la arena cuando la tolva esté llena. Resolver en el MKS Técnico.

<p>Solución:</p> <p>A) Si se decide resolver en el MKS Téc. el dato de 1.4 ton /m³ puede ser considerado peso específico, siendo las toneladas, fuerza, entonces:</p> $\gamma = \frac{1.4 \text{ ton}}{1 \text{ m}^3} = 1400 \frac{kg}{m^3}$ $\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{1400 \frac{kg}{m^3}}{9.81 \frac{m}{s^2}} = 142.71 \frac{UTM}{m^3}$ $Dr_M = \frac{\gamma_M}{\gamma_a} = \frac{1400 \frac{kg}{m^3}}{1000 \frac{kg}{m^3}} = 1.4$ <p>El volumen de un cono es</p> $V = \frac{1}{3}AH = \frac{\pi D^2 H}{12}$ $V = \frac{\pi(3)^2 4}{12} = 9.425 \text{ m}^3$	
<p>B)</p> $W = \gamma V = 1400 \frac{kg}{m^3} (9.425m^3)$ $W = 13,195 \text{ kg}$ <p>Resolver en el SI y en unidades inglesas</p>	

Ejemplo 1.4. Un barril de petróleo crudo tiene 0.80 m de diámetro y 1.10 m de altura, calcular su peso. Masa, densidad y peso específico en el sistema MKS técnico, MKS absoluto e inglés técnico. Suponer $D_r = 0.855$.

Solución:

Calculamos el volumen:

$$V = Ah = \frac{\pi D^2}{4} h = \frac{\pi(0.8)^2}{4} (1.1) = 0.5529 m^3$$

$$V = 0.5529 m^3 = (0.5529 m^3) \left(\frac{1 ft}{0.3028 m} \right)^3 = 19.525 ft^3$$

En el MKS Absoluto:

$$D_r = \frac{\rho_c}{\rho_A}$$

$$\rho_c = D_r * \rho_a = 0.855(1000) = 855 \frac{kg}{m^3}$$

$$\gamma = \rho g = 855 \frac{kg}{m^3} 9.81 \frac{m}{s^2} = 8378.5 \frac{N}{m^3}$$

$$m = \rho V = 855 \frac{kg}{m^3} (0.5529 m^3) = 472.7 kg$$

$$w = \gamma V = 8378.5 \frac{N}{m^3} (0.5529 m^3) = 4632.5 N$$

Evidentemente el peso también se podría calcular por $w = mg$

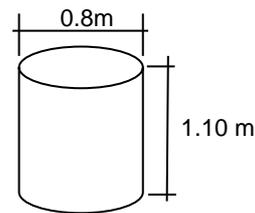
En el MKS técnico (ahora los 1000 kg del agua es γ) entonces de:

$$D_r = \frac{\gamma_c}{\gamma_A} \text{ despejamos}$$

$$\gamma_c = D_r \gamma_A = .855 \left(1000 \frac{kg}{m^3} \right) = 855 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{855 \frac{kg}{m^3}}{9.81 \frac{m}{s^2}} = 87.15 \frac{kg s^2}{m^3}$$

$$\rho = 87.15 \frac{UTM}{m^3}$$



$$w = \gamma V = 855 \frac{kg}{m^3} (0.5529 m^3) = 472.7 kg$$

$$m = \rho V = 87.15 \frac{UTM}{m^3} (0.5529 m^3) = 48.18 UTM$$

Evidentemente la masa también se podría calcular por: $m = w/g$

En el inglés técnico:

$$\gamma_c = D_r \gamma_A = .855 \left(62.37 \frac{lb}{ft^3} \right) = 53.33 \frac{lb}{ft^3}$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{53.33 \frac{lb}{ft^3}}{32.2 \frac{ft}{s^2}} = 1.656 \frac{lb s^2}{ft^3}$$

$$\rho = 1.656 \frac{slug}{ft^3}$$

$$w = \gamma V = 53.33 \frac{lb}{ft^3} (19.525 ft^3) = 1041.3 lb$$

$$m = \rho V = 1.656 \frac{lb s^2}{ft^3} (19.525 ft^3) = 32.33 slug$$

Viscosidad, Viscosidad dinámica o Viscosidad absoluta μ (mu).

Todos hemos observado que la miel escurre de manera diferente al agua o al aceite. Si tenemos un vaso con cada uno de los líquidos anteriores y lo vaciamos en otro recipiente, observamos que la miel escurre lentamente y que una gran cantidad se queda adherida a las paredes del primer vaso, el aceite escurre más fácilmente y es menor la cantidad que queda pegada a las paredes, y el agua escurre rápida y fácilmente. Algo semejante observamos si metemos una cuchara y agitamos: la miel, se resiste a ser agitada, aunque lo hagamos con fuerza. El agua se agita fácilmente y el aceite se comporta de manera intermedia.

Estas diferencias en el comportamiento se deben a una característica de los fluidos llamada **viscosidad**, que es la resistencia que presentan los fluidos a escurrir, o sea, a fluir, a deformarse bajo la acción de esfuerzos cortantes.

De manera que la viscosidad solo se manifiesta si hay escurrimiento o flujo. En los fluidos en reposo la viscosidad no se manifiesta.

La viscosidad es la resistencia interna que presentan los fluidos a deformarse continuamente cuando se les aplican esfuerzos cortantes.

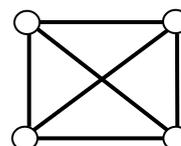
Al hablar de resistencia interna nos referimos a una especie de “fricción” entre las partículas de fluido. Esa “fricción” es de diferente naturaleza que la que se presenta entre dos superficies de cuerpos sólidos, o la que se presenta entre partículas sólidas como la arena u otros suelos. De hecho, *en los líquidos la viscosidad depende principalmente de la cohesión entre las moléculas del propio líquido.*

Se llama **cohesión a las fuerzas de atracción entre las moléculas de un mismo material.** Las fuerzas de cohesión son de origen eléctrico, y permiten explicar gran parte del comportamiento a nivel macro de los materiales.

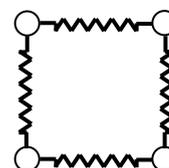
En los sólidos las fuerzas de cohesión entre sus moléculas son grandes, lo que, a nivel macro, les confieren sus características de forma definida, volumen constante, dureza y resistencia a los esfuerzos. En los líquidos las fuerzas de cohesión son pequeñas, por lo que no tienen forma definida, pero sí volumen constante, incluso ante la presencia de presiones considerables. En los gases, las fuerzas de cohesión son extraordinariamente pequeñas, de manera que se dispersan con mucha facilidad por lo que carecen de forma, se mueven de manera caótica y su volumen varía significativamente con la presión.

Podemos imaginar la estructura molecular de diferentes materiales: Un sólido rígido tendría enlaces extraordinariamente fuertes (rígidos) y en muchas direcciones, enlazando o conectando a las diferentes moléculas, un sólido elástico tendrá menos enlaces y serán elásticos, mientras que un líquido viscoso tendrá menos enlaces y se podrán deformar muchísimo sin necesidad de aumentar la fuerza deformadora.

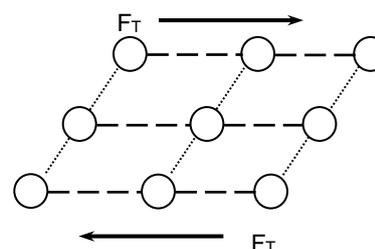
La cohesión molecular de un sólido rígido debería ser muy fuerte de manera que no permita deformaciones.



La cohesión molecular de un sólido elástico permite deformaciones proporcionales a las fuerzas deformadoras.



La cohesión en un líquido es mucho menor, de manera que permite deformaciones continuas sin que se aumente la fuerza deformadora, (imagina que las ligaduras son de chicle). En este caso la fuerza debe ser tangencial. Eso es fluir.



La deformación en los sólidos es proporcional al esfuerzo (Ley de Hooke), mientras que los fluidos fluyen bajo el esfuerzo más ligero, de manera que **la aplicación de un esfuerzo tangencial o cortante durante un lapso de tiempo, produce una deformación continua, prolongada, durante todo ese tiempo, esto es el flujo.**

La viscosidad resulta ser la propiedad más importante cuando hay flujo (escurrimiento), ya que ocasiona que parte de la energía cinética del fluido se disipe en el medio ambiente en forma de calor. Esa parte se considera como energía perdida para el fluido y se le llama “pérdidas de energía”. En el diseño de conductos, (canales o tuberías), es necesario calcular esas pérdidas y asegurarse de que haya energía suficiente para lograr que el fluido circule por el conducto hasta el lugar donde se necesita y en la cantidad que se requiere.

Si bien la viscosidad no es el único factor que interviene en las pérdidas de energía, si es uno de los más importantes. El estudio de las pérdidas de energía es objeto de la última unidad de este curso.

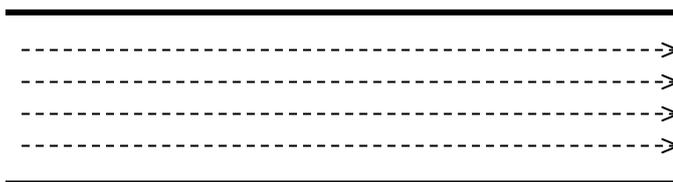
La viscosidad permite clasificar a los fluidos en:

- **Viscosos o reales.** Aquellos que tienen viscosidad y por lo tanto presentan pérdidas de energía cuando fluyen.
- **No viscosos o ideales.** Aquellos que carecen de viscosidad y por lo tanto no presentan pérdidas de energía.

Evidentemente el caso ideal no existe en la naturaleza y es solo un modelo teórico que en la actualidad tiene valor pedagógico y permite solucionar algunos problemas ingenieriles de manera aproximada.

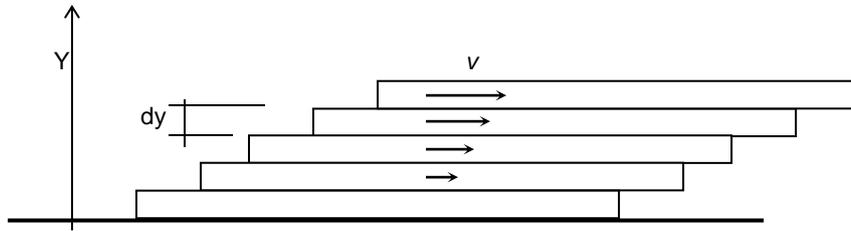
A su vez, los fluidos reales se clasifican en laminares, turbulentos y de transición, de acuerdo a la forma en que se mueven sus partículas.

Flujo laminar. Si la viscosidad es “alta” y la velocidad “baja”, podemos observar un movimiento ordenado de las partículas, con trayectorias rectas y paralelas, deslizándose unas sobre otras como si estuvieran formando capas o láminas. Este es el tipo de flujo que se presenta cuando escurre miel sobre una superficie ligeramente inclinada o al sacar una cuchara que estaba adentro de la miel. (El mismo tipo de flujo se puede ver con aceite viscoso como el que usan los autos en la transmisión o en el motor).



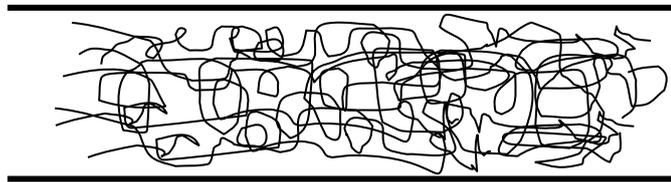
Trayectorias rectas y ordenadas de las partículas en un flujo laminar.

En este caso se puede observar claramente como las capas del líquido que están más alejadas del límite sólido se mueven o escurren más rápidamente que las capas más cercanas, de hecho, la capa que está en contacto directo con la superficie sólida permanece sin moverse. Por ello es que la cuchara se mantiene “embarrada” de miel aunque se le deje mucho tiempo escurriendo.



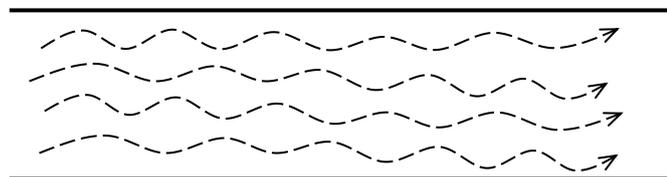
Representación del flujo laminar donde se muestran las capas de líquido deslizándose unas sobre otras. La primera capa de líquido está adherida al límite sólido, la velocidad aumenta conforme las capas se alejan de las paredes del conducto.

Flujo turbulento: Si la velocidad es “alta” y la viscosidad “baja”, las partículas de fluido se mueven en trayectorias caóticas formando torbellinos de diversos tamaños y con un gran efecto de mezclado, a esto se le llama **flujo turbulento**. Este tipo de flujo lo podemos ver en las volutas de humo de un cigarro, en el polvo que arrastran las ráfagas de viento, en la corriente de un río y en una cascada, también se presenta en el humo del escape de un camión, en el agua saliendo por la llave, de hecho es el tipo de flujo más común en la naturaleza.



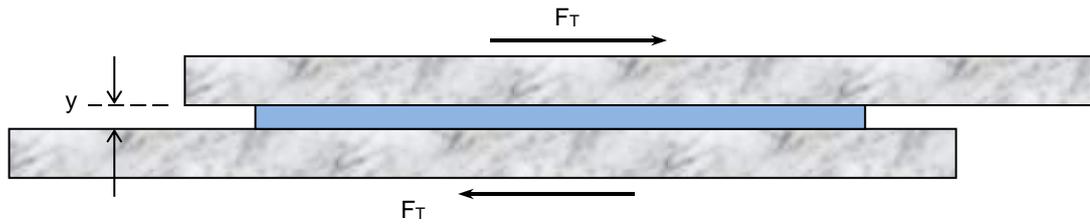
Trayectorias caóticas de las partículas en un flujo turbulento.

El **flujo de transición** es uno intermedio a los dos anteriores, donde las trayectorias de las partículas son ondulantes



Flujo de transición

Realicemos ahora el siguiente experimento con flujo laminar: Coloquemos una pequeña cantidad de aceite de transmisión entre dos placas transparentes suficientemente grandes para que podamos ignorar los efectos de borde (lo que pasa en las orillas), y distribuyamos el aceite de manera que se forme una capa uniforme entre las dos placas. Apliquemos ahora fuerzas tangenciales a cada placa de manera que una se deslice sobre la otra, con lo cual la capa de aceite quedará sometida a la acción de un esfuerzo cortante.



Aceite colocado entre dos placas y sometido a un esfuerzo cortante.

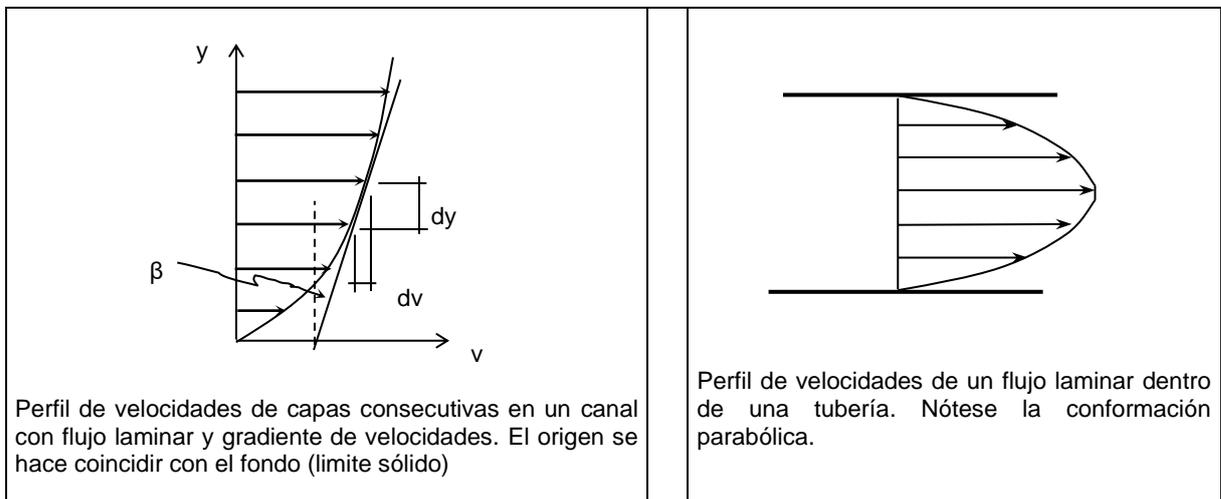
Observamos que el desplazamiento de la placa superior sobre la inferior no depende de la fuerza (lo cual, como habíamos dicho, es una diferencia notable respecto a los sólidos elásticos). Ese desplazamiento puede ser muy grande, aunque la fuerza sea muy pequeña, más bien *depende del tiempo* que esté aplicada la fuerza. Ahora bien, esa fuerza está aplicada tangencialmente en toda el área del aceite, de manera que se le está aplicando un *esfuerzo tangencial o cortante* τ (tao), ó σ (sigma).

Por otra parte, si queremos que las placas se deslicen rápidamente y aplicamos las fuerzas de manera brusca, nos llevaremos una sorpresa, ¡la resistencia al esfuerzo cortante aumenta enormemente!

También podemos incrementar o disminuir el espesor “y” de la capa de aceite, y veremos que la resistencia al esfuerzo cortante se comporta de manera inversa a dicho espesor: si “y” es grande, el esfuerzo es pequeño y las placas se deslizan fácilmente. Si el espesor es pequeño el esfuerzo aumenta y el deslizamiento de las placas ocurre con mayor dificultad, es decir se presenta mayor resistencia. Esto explica la importancia de mantener bien lubricadas las partes móviles de los mecanismos.

En resumen, a partir de este sencillo experimento observamos que: **el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la velocidad de deformación e inversamente proporcional al espesor de la capa de líquido.** Esto está planteado en la **Ley de Newton de la viscosidad.**

Para explicarla, observemos más detalladamente como son las velocidades en el flujo laminar. Si graficamos las velocidades de las diferentes capas en relación con la separación al límite sólido, obtenemos el llamado “*perfil de velocidades*”.



El espesor de las capas es dy , la diferencia de velocidad entre dos capas consecutivas es dv , de manera que la inferior se mueve con una rapidez v y la superior con una rapidez ligeramente mayor $v+dv$, de ahí que en el tiempo dt las partículas de dos capas sucesivas recorran distancias diferentes $d_1 = v dt$, $d_2 = (v+dv)dt$, siendo $d_2 > d_1$ de manera que el fluido se distorsiona y se presenta un esfuerzo cortante entre las dos capas.

La deformación entre dos capas sucesivas es:

$$d_2 - d_1 = (v + dv)dt - vdt = dvdt$$

Es decir, la deformación depende del tiempo, lo que ya habíamos descubierto experimentalmente.

En el perfil de velocidades también se observa que la velocidad presenta una variación dv al cambiar la distancia vertical y desde el límite sólido. Esto se representa mediante la derivada de la velocidad en relación con la distancia "y", y se conoce como gradiente de velocidad:

$$\frac{dv}{dy} = \text{gradiente de velocidad}$$

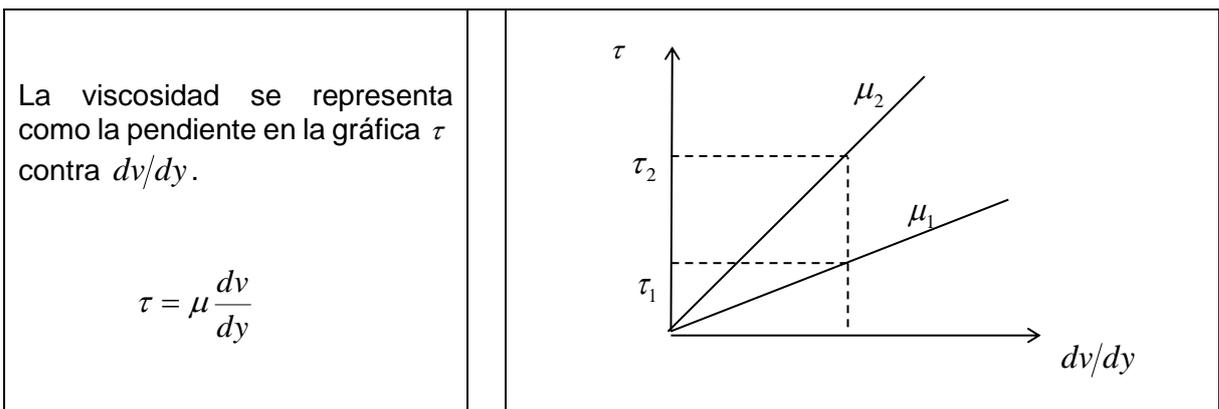
En el perfil de velocidades el gradiente se representa como la tangente del ángulo β formado entre la recta tangente y la vertical.

Ley de Newton de la viscosidad.

Se ha encontrado que, **para flujo laminar, el esfuerzo cortante τ (tao) es proporcional al gradiente de velocidad, según una constante de proporcionalidad llamada coeficiente de viscosidad, viscosidad dinámica o simplemente viscosidad**, representada por la letra griega μ (mú), es decir:

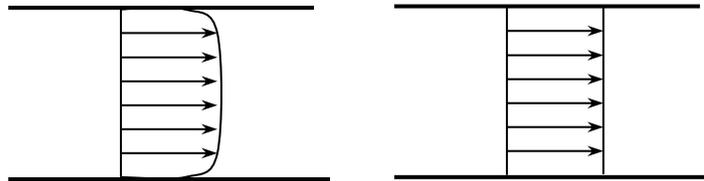
$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1.9)$$

Esta relación es conocida como **ley de Newton de la viscosidad**. Si graficamos el esfuerzo cortante τ contra la variación de la velocidad en relación con la distancia al límite sólido dv/dy la ecuación queda representada por una línea recta que pasa por el origen con pendiente μ . En la figura siguiente se muestra la relación τ contra dv/dy para dos líquidos de viscosidades diferentes ($\mu_2 > \mu_1$). Se observa claramente que para el mismo gradiente de velocidades dv/dy se requiere mayor esfuerzo tangencial τ cuando la viscosidad es mayor.



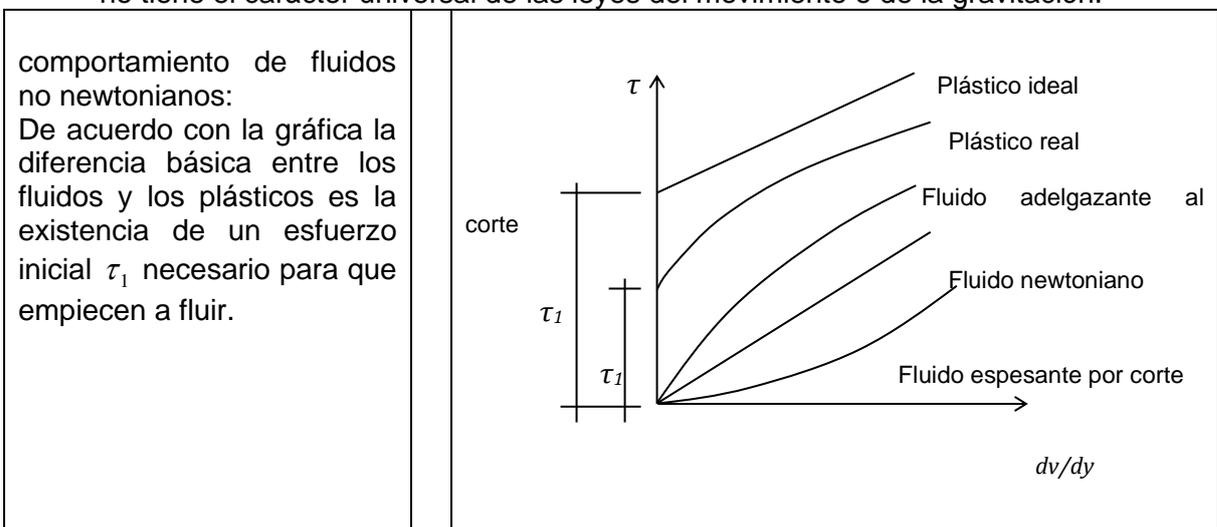
Sobre la ley de Newton de la viscosidad (ec. 1.9) es importante resaltar lo siguiente:

1. **Tanto τ como μ son independientes de la presión**, ya que no aparece en la ecuación.
2. **Cualquier esfuerzo cortante causará un flujo**. En la gráfica se ve claramente que para cualquier valor de τ diferente de cero, existirá una variación de velocidad y por lo tanto flujo.
3. Cuando $dv/dy = 0$, $\tau = 0$ sin importar la magnitud de μ . Es decir, **el esfuerzo cortante en fluidos viscosos que estén en reposo será cero**, o como habíamos dicho anteriormente, la viscosidad no se manifiesta en los fluidos estáticos.
4. El perfil de velocidad no puede ser tangente a un límite sólido (el ángulo β sería de 90° y su tangente infinito), porque eso requeriría un gradiente de velocidad infinito y un esfuerzo de corte infinito entre el fluido y el sólido.
5. De acuerdo con lo anterior, al acercarnos al límite sólido, el ángulo β crece, aumentando el valor del gradiente (la tangente de β) y por lo tanto el esfuerzo cortante τ también aumenta. Esto ya lo habíamos observado al hacer el experimento con dos placas, **a menor espesor de la capa de aceite, es mayor el esfuerzo necesario para que fluya con cierta velocidad**.
6. **Otro caso en el que el gradiente de velocidades vale cero $dv/dy = 0$** , y por lo tanto el esfuerzo cortante también $\tau = 0$, ocurre **cuando el perfil de velocidades es uniforme**; o sea que la velocidad es constante en toda la sección. **Esto sucede de manera teórica en el flujo de un fluido ideal y de manera aproximada en el flujo turbulento**, por lo que en este caso el efecto viscoso se reduce.



El perfil de velocidades de un flujo turbulento en una tubería se aproxima a un perfil uniforme.

7. **La validez de la ecuación se limita al flujo laminar de los fluidos newtonianos**, es decir los que cumplen esta relación lineal entre τ y dv/dy . A los fluidos que no la cumplen se les llama “no newtonianos”. Por lo tanto, la Ley de Newton de la viscosidad no tiene el carácter universal de las leyes del movimiento o de la gravitación.



De la ecuación 1.9 podemos despejar la viscosidad para obtener sus dimensiones y unidades:

$$\mu = \frac{\tau}{dv/dy} \quad (1.10)$$

Las dimensiones de la viscosidad en el sistema absoluto son:

$$[\mu] = \frac{[\tau]}{[dv/dy]} = \frac{FL^{-2}}{LT^{-1}L^{-1}} = \frac{MLT^{-2}L^{-2}}{T^{-1}} = ML^{-1}T^{-1}$$

Las dimensiones de la viscosidad en el sistema técnico son:

$$[\mu] = \frac{[\tau]}{[dv/dy]} = \frac{FL^{-2}}{LT^{-1}L^{-1}} = FL^{-2}T$$

Las unidades de la viscosidad en el sistema MKS absoluto o Sistema internacional son:

$$[\mu] = \frac{[\tau]}{[dv/dy]} = \frac{Pa}{ms^{-1}m^{-1}} = Pas = \frac{N}{m^2} s = \frac{kg \cdot m}{s^2} \frac{1}{m^2} s = \frac{kg}{m \cdot s}$$

Las unidades de la viscosidad en el sistema MKS técnico son:

$$[\mu] = \frac{[\tau]}{[dv/dy]} = \frac{kg/m^2}{ms^{-1}/m} = \frac{Kg \cdot s}{m^2}$$

En algunos casos todavía se usa la unidad del sistema cgs absoluto llamada *Poise*

$$1 \text{ Poise} = 0.1 \frac{Kg}{m \cdot s} = 0.1 Pa \cdot s \quad \text{en el MKS absoluto}$$

$$1 \text{ Poise} = 0.1019 \frac{Kg \cdot s}{m^2} \quad \text{en el MKS técnico}$$

Variación de la viscosidad con la temperatura.

Es bien sabido que si calentamos la miel fluirá más fácilmente, es decir, su viscosidad disminuye, esto ocurre con la gran mayoría de los líquidos: **La viscosidad de los líquidos disminuye al aumentar la temperatura**; sin embargo, con los gases ocurre lo contrario, **la viscosidad de un gas aumenta con la temperatura**. Para explicar esta diferencia de comportamiento debemos analizar las causas de la viscosidad.

A nivel molecular la viscosidad está determinada por las fuerzas de **cohesión** y por el **intercambio en la cantidad de movimiento** de las moléculas. En los líquidos las fuerzas de cohesión predominan y se relajan o disminuyen cuando aumenta la temperatura, por ello la viscosidad disminuye. En los gases, las fuerzas de cohesión son muy pequeñas y predomina el intercambio de la cantidad de movimiento: al aumentar la temperatura aumenta la energía cinética de las moléculas y por lo tanto, el número e intensidad de choques entre ellas, aumentando el intercambio en la cantidad de movimiento, por ello es que la viscosidad aumenta.

Explicemos ambos casos con una similitud: Imaginemos al líquido como una gran cantidad de personas que van caminando por un pasillo del metro o por una calle estrecha, todas en la misma dirección y con la misma velocidad (las personas representan a las moléculas), un

aumento de temperatura significa un aumento de velocidad, por lo que todas las personas caminarán más rápidamente y el conjunto (el flujo) fluirá más fácil y rápidamente, incluso podemos imaginarnos que al caminar más rápido aumentará la separación entre las distintas personas, por lo cual, si alguien quiere rebasar podrá hacerlo más fácil que cuando todos se movían lentamente; es decir, la viscosidad habrá disminuido.

Ahora imaginemos el gas como una gran cantidad de personas moviéndose en un espacio cerrado pero cada una en diferente dirección, algo así como lo que pasa en una plaza atestada de gente, en un mercado o en uno de los distribuidores del metro donde confluyen y salen una gran cantidad de pasillos. En todos los casos el movimiento de las personas (el flujo) es lento pues unas personas estorban a otras, si en ese lugar atestado, se escucharan disparos o alguien gritara ¡fuego!, la consecuencia sería catastrófica, cuando todos quisieran correr (incremento de energía cinética por aumento de temperatura) en diferentes direcciones, el número de choques; o sea, **el intercambio en la cantidad de movimiento** aumentaría enormemente, se estorbarían más unos a otros, muchos tropezarían, habría muchos lesionados y de cualquier manera el flujo, es decir el movimiento general de la masa de gente, se haría más lento. Eso pasa con la viscosidad de los gases.

Ejemplo 1.5. La viscosidad de un fluido es de 0.25 poises, encontrar su valor en unidades de los dos sistemas MKS.

Solución: Recordemos que 1 poise pertenece al cgs abs y

$$1 \text{ poise} = \frac{1 \text{ gr}}{\text{cm} * \text{s}} = 0.1 \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}} = 0.1 \text{ Pa} * \text{s}$$

Entonces en el MKS abs.

$$\mu = 0.25 \text{ poise} \left(\frac{0.1 \text{ Pa} * \text{s}}{1 \text{ poise}} \right) = 0.025 \text{ Pa} * \text{s}$$

Para pasar al MKS técnico convertiremos los newtons (de los pascuales) en Kg fuerza

$$\mu = 0.025 \text{ Pa} * \text{s} = 0.025 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * \text{s} \left(\frac{1 \text{ kg}}{9.81 \text{ N}} \right) = .0025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * \text{s}$$

Viscosidad cinemática.

En muchas ecuaciones de la Hidráulica aparece la relación o cociente de la viscosidad entre la densidad, por lo que se ha creado otro concepto para dicho cociente, llamándole viscosidad cinemática ν (nú):

$$\text{Viscosidad..cinemática} = \frac{\text{viscosidad}}{\text{densidad}}$$

En símbolos:
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.11)$$

Sus dimensiones en el sistema absoluto son:

$$[\nu] = \frac{[\mu]}{[\rho]} = \frac{ML^{-1}T^{-1}}{ML^{-3}} = L^2T^{-1}$$

Sus dimensiones en el sistema técnico son:

$$[v] = \frac{[\mu]}{[\rho]} = \frac{FL^{-2}T}{FL^{-1}T^2L^{-3}} = L^2T^{-1}$$

Podemos observar que en los dos sistemas sus dimensiones son iguales y están definidas únicamente en términos de longitud y tiempo, de ahí el nombre de “cinemática”.

Podemos obtener el mismo resultado con unidades específicas; es decir, en el MKS Abs.

$$[v] = \frac{[\mu]}{[\rho]} = \frac{\frac{kg}{m * s}}{\frac{kg}{m^3}} = \frac{m^2}{s}$$

En el MKS Téc.

$$[v] = \frac{[\mu]}{[\rho]} = \frac{\frac{kg * s}{m^2}}{\frac{kg * s^2}{m^4}} = \frac{m^2}{s}$$

Como resultado lógico de lo anterior, sus unidades son iguales en los dos sistemas MKS. En MKS abs y Tec.

$$[v] = \frac{m^2}{s}$$

Aunque todavía se usa la unidad de los cgs llamada stokes y definida como:

$$1stokes = 1 \frac{cm^2}{s} = 1 \times 10^{-4} \frac{m^2}{s}$$

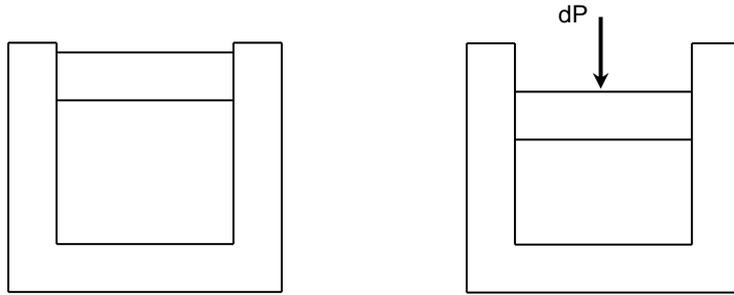
Elasticidad y compresibilidad.

Sabemos que, en los sólidos, la elasticidad es la capacidad que tiene un cuerpo de recuperar su forma original después de que ha sido deformado, en los fluidos, debido a que carecen de forma, la definimos en función del volumen:

“La elasticidad volumétrica es la capacidad de recuperar su volumen después de que ha sufrido un cambio de presión”. En contrapartida, **la compresibilidad es la capacidad de los fluidos de cambiar su volumen con un cambio de presión.** De manera que no solo son propiedades relacionadas sino recíprocas, como veremos a continuación.

Consideremos un recipiente de paredes gruesas y rígidas con un embolo en la parte superior que ajusta perfectamente.

Dentro del recipiente se encuentra un fluido de volumen V que experimentará una disminución de volumen dV cuando la presión se incremente dP .



No obstante, estos cambios, la masa $m = \rho \cdot V$ permanecerá constante, por lo que su diferencial valdrá cero

$$d(\rho \cdot V) = \rho dV + V d\rho = 0 \quad (1.12)$$

De aquí resulta que

$$-\frac{dV}{V} = \frac{d\rho}{\rho} \quad (1.13)$$

Es decir la disminución de volumen por unidad de volumen dV/V , cambio de volumen en relación al volumen original o deformación volumétrica unitaria, es igual al incremento de la densidad en relación a la densidad original. El signo menos indica disminución.

Dividiendo entre el cambio de presión dP

$$-\frac{dV/V}{dP} = \frac{d\rho/\rho}{dP} \quad (1.14)$$

Es decir, *el cambio de volumen dV en relación al volumen original V por cada cambio de presión dP es la capacidad de comprimirse o sea la **compresibilidad C_v** .*

$$\text{Compresibilidad} = C_v = -\frac{dV/V}{dP} = \frac{d\rho/\rho}{dP} \quad (1.15)$$

Las unidades de la compresibilidad son unidades de área entre unidades de fuerza:

$$[C_v] = \left[\frac{1}{P} \right] = \frac{m^2}{N}, \frac{m^2}{Kg}, \frac{ft^2}{lb}$$

El recíproco de la compresibilidad es el módulo de elasticidad volumétrica $E_v = K$

$$E_v = K = \frac{1}{C_v} = -\frac{dP}{dV/V} = +\frac{dP}{d\rho/\rho} \quad (1.16)$$

El módulo de elasticidad volumétrica es el cambio de presión dividido entre el cambio de volumen por unidad de volumen. El signo menos indica que con un aumento de presión el volumen disminuye. Inversamente, al aumentar la presión la densidad aumenta.

Dado que dV/V es adimensional, carece de unidades y por tanto el módulo de elasticidad tiene las dimensiones y unidades de la presión:

- Sus dimensiones son: FL^{-2} en el sistema técnico, $ML^{-1}T^{-2}$ en el absoluto.
- Sus unidades son: Kg/m^2 en el MKS técnico y N/m^2 en el MKS absoluto.

En los líquidos la compresibilidad es baja y los valores del módulo de elasticidad volumétrica son relativamente grandes, lo que significa que se requieren grandes cambios de presión para obtener cambios de volumen que resulten apreciables, por ello es *común considerar que los líquidos son **incompresibles***. Solo en algunos fenómenos como el “golpe de ariete” se manifiesta la elasticidad de los líquidos y debe tomarse en cuenta. Por otro lado el módulo de elasticidad volumétrica varía con la temperatura, pero en los líquidos esta variación no es muy grande.

Ejemplo 1.6. El módulo de elasticidad volumétrica del agua es del orden de 21 000 kg/cm². Para tener una idea de lo que esto significa, podemos suponer que se le aplica un incremento de presión de 10 Kg/cm² = 1x10⁵ kg/m² (algo así como 10 atmósferas o la presión a 100m de profundidad en agua) a 1 m³ de agua ¿cuál sería el cambio de volumen?

Despejando de la ec. 1.16 tenemos

$$-dV = \frac{VdP}{E} = -\frac{1m^3 * 10kg/cm^2}{21000kg/cm^2} = -\frac{1}{2100}m^3 = -4.76x10^{-4}m^3 \quad 3$$

Es decir, menos de cinco diezmilésimas de m³

En los gases la compresibilidad es alta, lo que significa que se obtienen grandes cambios de volumen con pequeñas variaciones de presión, por lo que se les considera **compresibles**. En consecuencia, los valores del módulo de elasticidad son bajos; sin embargo, la temperatura influye notablemente, por lo que habrá que tomar en cuenta las relaciones termodinámicas correspondientes.

Cuando los cambios de presión no son grandes, lo cual ocurre en gases moviéndose a bajas velocidades y con temperatura constante, podemos considerar a los gases como incompresibles. Suposición que mantendremos en estos apuntes.

Cohesión y adhesión.

Al estudiar la viscosidad vimos que la **cohesión** son las fuerzas de atracción entre las moléculas del mismo material, mientras que la **adhesión** son las fuerzas de atracción entre moléculas de diferentes materiales. Al igual que la cohesión, las fuerzas de adhesión son de origen eléctrico. El balance o valores relativos de las dos fuerzas permiten explicar algunos fenómenos a nivel macro tales como la formación de burbujas, la ascensión por tubos capilares y la formación de membranas elásticas en las superficies de los líquidos, entre otros.

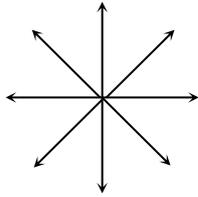
Tensión superficial.

La superficie libre de un líquido en contacto con la atmósfera se comporta como si fuera una membrana elástica de pequeña resistencia, lo que permite que los insectos caminen por la superficie libre del agua y que una aguja no se hunda si es depositada con cuidado.

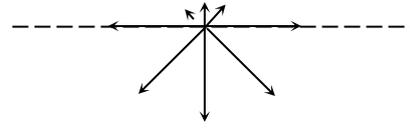
El comportamiento anterior se debe a la cohesión de las moléculas. Al interior de la masa líquida, una molécula es atraída en todas direcciones por las moléculas que le rodean, pero en la capa limítrofe con la atmósfera solo es atraída hacia abajo y hacia los lados (la atracción

³ Aunque la operación no se hizo con unidades homogéneas, es decir del mismo sistema, las unidades de presión y del módulo de elasticidad se anulan por ser las mismas.

hacia arriba por las pocas moléculas de vapor y por las moléculas de aire, es muy pequeña), produciendo ese comportamiento de membrana elástica.



Una molécula en interior de la masa líquida es atraída por las demás en todas direcciones.



Una molécula de la superficie es atraída solo hacia abajo y hacia los lados

Podemos establecer una analogía con el lienzo de salvamento que es tensado horizontalmente en todas direcciones, por un grupo de bomberos colocados en círculo, lo cual le confiere cierta capacidad de carga vertical. De hecho, considerar a la superficie de los líquidos como si fuera una membrana elástica es también una analogía teórica.

La tensión superficial σ (sigma) se define como la fuerza en la superficie del líquido, en dirección normal a una línea de longitud unitaria trazada en esa superficie. De aquí se desprende que sus dimensiones serán fuerza por longitud

$$[\sigma] = F/L = FL^{-1}$$

Por lo tanto:

En el MKS absoluto sus unidades son Newton por metro: N/m.

En el MKS técnico sus unidades son kilogramo fuerza por metro: kg/m.

Debido a que la tensión superficial depende directamente de las fuerzas de cohesión intermoleculares, su magnitud disminuirá al aumentar la temperatura. También depende de del fluido que se encuentre en contacto con la superficie del líquido, aunque por lo general se expresa en contacto con el aire.

La tensión superficial también se presenta en la formación de gotas, burbujas y pequeños chorros. Las pompas o burbujas de jabón proporcionan una buena oportunidad de observar el comportamiento de la membrana elástica, siendo ésta uno de los objetos más delgados que se pueden observar a simple vista.

Al observar las magnitudes de la tensión superficial de diferentes líquidos en la tabla del final de esta unidad, podemos percatarnos que son muy pequeñas: 0.029 N/m para el Benceno, 0.026 N/m para el petróleo crudo, 0.073 N/m para el agua, etc. Esto es el motivo para que en la mayor parte de los problemas de ingeniería no se tome en cuenta.

Capilaridad.

Se conoce como capilaridad el efecto de ascensión (o descenso) de la superficie libre de un líquido dentro de un tubo de pequeño diámetro, llamado por ello capilar. En un tubo capilar la superficie libre de los líquidos deja de ser una línea recta horizontal y forma una superficie curva llamada menisco. La capilaridad también se presenta en medios porosos.

<p>Adhesión mayor que cohesión. El agua y otros líquidos como aceites y el petróleo, asciende por tubos capilares de vidrio, formando meniscos cóncavos</p>	<p>Cohesión mayor que adhesión. El mercurio desciende por un tubo de vidrio formando meniscos convexos.</p>

El ascenso o descenso capilar se puede explicar por la correlación de fuerzas entre la cohesión y la adhesión. En el caso del ascenso es claro que las fuerzas de adhesión entre las moléculas del líquido y las del tubo son mayores que las de cohesión entre las moléculas del propio líquido, razón por la que el líquido es atraído hacia arriba, formando un menisco cóncavo o “que moja”. En el caso del mercurio y el vidrio, la cohesión es mucho mayor, por lo cual el líquido dentro del tubo es atraído hacia abajo formando un menisco convexo o “que no moja”. Sin embargo, si el tubo fuera de cobre, observaríamos una gran ascensión capilar debido a la fuerte atracción eléctrica entre el cobre y el mercurio.

Vaporización, ebullición presión de vapor y cavitación.

El paso de los estados sólido o líquido, al gaseoso, se conoce como **vaporización o evaporación**. A nivel molecular la **evaporación** ocurre cuando la energía cinética de las moléculas del líquido cercanas a la superficie vence a las fuerzas de cohesión y a la presión del gas que está sobre la superficie, entonces, algunas moléculas escapan de la masa líquida transformándose en moléculas sueltas, es decir gaseosas. También puede ocurrir el proceso inverso, es decir, que algunas moléculas gaseosas se incorporen a la masa líquida, lo que se conoce como **condensación**.

Al aumentar la temperatura aumenta la energía cinética de las moléculas del líquido con lo cual aumentará el número de las que escapan a la fase gaseosa. En un recipiente cerrado las moléculas que se evaporan contribuyen a aumentar la presión en la superficie, con lo cual aumentará el número de moléculas gaseosas que se reincorporan a la masa líquida. Cuando se presenta la combinación de presión y temperatura en la cual, el número de moléculas que se evapora iguala al de las que se condensa, se dice que se alcanza el **punto de saturación**, o que el **vapor está saturado**. También se dice que se encuentra en *equilibrio cinético*. La presión correspondiente a este equilibrio es la **presión de vapor** o **presión de vapor saturado** y depende sólo de la naturaleza del líquido y de la temperatura.

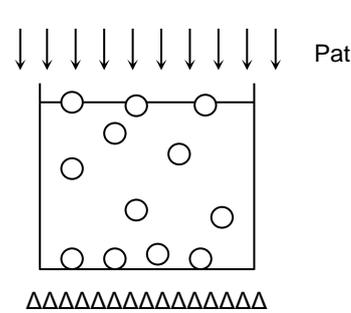
La **ebullición** es la formación de burbujas de vapor en el interior de la masa líquida **por aumento de temperatura, disminución de la presión o una mezcla de ambas condiciones**. El **punto de ebullición es la temperatura en la cual, para una presión dada, se presenta la ebullición**.

A temperaturas inferiores al punto de ebullición la evaporación tiene lugar únicamente en la superficie del líquido. En contraste, durante la ebullición también se forma vapor en el interior del líquido, que sale a la superficie en forma de burbujas.

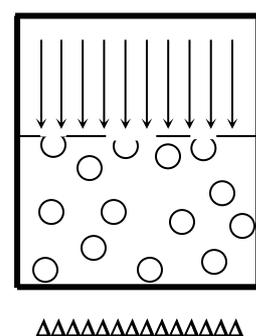
Cuando el punto de ebullición está próximo se forman diminutas burbujas en el interior del líquido, si la presión de vapor en el interior de las burbujas es menor que la presión externa a éstas, se colapsan de inmediato. Conforme aumenta la temperatura la presión de vapor dentro de las burbujas llega a ser igual a la existente en el entorno inmediato de la burbuja, en ese caso la burbuja no se colapsa, sino que aumenta de tamaño y asciende a la superficie iniciándose así la ebullición.

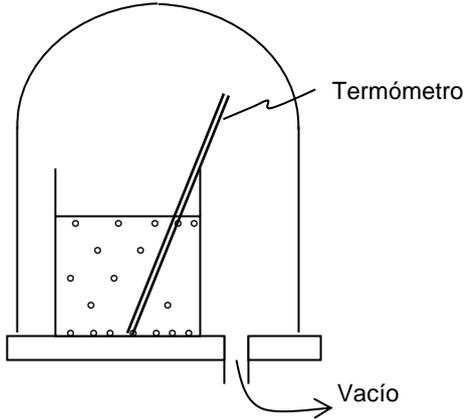
En el caso del agua, a una atmósfera de presión, el escape de moléculas para formar vapor se presenta desde temperaturas inferiores a los cero grados, es decir desde el estado sólido (a lo cual también se le llama *sublimación*), pero el efecto se incrementa con el aumento de temperatura hasta alcanzar los 100 °C, punto en el cual (a una atmósfera de presión) el agua entra en **ebullición**.

Sabemos que a una atmósfera de presión (o a nivel del mar) el agua hierve a 100 °C en un recipiente abierto (a la atmósfera), pero en otros lugares de mayor altura, donde la presión atmosférica es menor, el agua hierve a menor temperatura, por ejemplo en la Ciudad de México a 2300 m sobre el nivel del mar, el agua hierve a los 92 °C aprox. y en el Monte Everest a 8850 m, donde la presión atmosférica es del orden de un tercio de la que existe al nivel del mar, el agua hierve aproximadamente a los 70 °C.

<p>De manera que si podemos disminuir más la presión sobre el líquido este podrá entrar en ebullición a menor temperatura.</p>	 <p>The diagram shows a rectangular container with a horizontal line representing the liquid surface. Above the surface, several downward-pointing arrows are labeled 'Pat'. Inside the container, several small circles representing bubbles are shown at various depths, with some larger circles near the surface, indicating they are rising. Below the container, a row of small triangles represents a heat source.</p>
--	---

Por otro lado, si la presión sobre la superficie libre del agua es mayor que una atmósfera, la ebullición se presentará a temperaturas mayores. Esto es lo que ocurre en una olla de presión debido a que el vapor se acumula en el espacio entre la superficie libre y la tapa de la olla ejerciendo mayor presión, de manera que la temperatura se puede elevar por encima de los 100 °C lo que permite que los alimentos se cuezan con mayor rapidez.

<p>$P > 1 \text{ At}$</p>  <p>The diagram shows a rectangular container with a horizontal line representing the liquid surface. Above the surface, several downward-pointing arrows are shown, with the label '$P > 1 \text{ At}$' to the left. Inside the container, several small circles representing bubbles are shown at various depths, with some larger circles near the surface, indicating they are rising. Below the container, a row of small triangles represents a heat source.</p>	<p>El vapor acumulado entre la superficie del líquido y la tapa del recipiente incrementa la presión, ocasionando que la ebullición ocurra a mayor temperatura.</p>
---	---

<p>También se puede hacer el experimento contrario, colocando un recipiente con agua y un termómetro y todo esto dentro de una campana de cristal para hacerle vacío.</p> <p>Si el vacío es suficiente podemos observar que el agua entra en ebullición a temperatura ambiente.</p> <p><i>Un líquido hierve cuando su presión de vapor saturado es igual a la presión externa.</i></p>	<p>Campana de vacío</p> 
---	--

Es decir, existe una correspondencia entre la presión de vapor y la ebullición. De manera que podemos decir que: ***La presión de vapor es la que existe sobre un líquido cuando entra en ebullición a una temperatura dada.***

Presión de vapor para el agua⁴:

Temperatura °C	Presión de vapor Pv (kPa) abs	Temperatura °C	Presión de vapor Pv (kPa) abs
-50	0.004	40	7.38
-10	0.26	50	12.33
0	0.61	60	19.22
5	0.87	70	31.16
10	1.23	80	47.34
15	1.70	90	70.10
20	2.34	100	101.23
25	3.17	120	199
30	4.24	150	476

Cavitación.

Dentro de un flujo la presión puede disminuir por aumento de velocidad o de posición o por una combinación de ambos factores⁵. Si la presión disminuye lo suficiente y llega a ser igual o menor que la presión de vapor (correspondiente a la temperatura que exista), en esa zona del flujo se formaran burbujas de vapor que también se llaman cavidades.

A la formación de burbujas de vapor o cavidades por efecto de la disminución de la presión dentro de un flujo se le llama cavitación.

⁴ Apéndice 2 Vennardt y Street Mecánica de fluidos. CECSA Y Douglas C. Giancol, Física General. Prentice may.

⁵ Esto se estudia en la unidad 4 con la ecuación de Bernoulli.

A veces estas burbujas se acumulan en la parte más alta de una tubería y llegan a taponarla interrumpiendo el flujo, esto se previene con válvulas o respiraderos, como los que se colocan junto a los tinacos en la mayoría de las casas y que se conocen como “jarros de aire”.

Otras veces las burbujas son arrastradas por la corriente a zonas de alta presión ocurriendo *implosiones* que provocan elevaciones puntuales e instantáneas de presión y temperatura. El término implosiones significa el llenado brusco de un hueco o vacío, en este caso la burbuja, por efecto de la mayor presión a que se encuentran sometidas las moléculas alrededor de ese pequeño espacio vacío. Ese llenado brusco o repentino que proviene de todas direcciones ocasiona que en el centro de lo que era la burbuja choquen las moléculas que fueron impulsadas a llenar el hueco, provocando un aumento puntual de presión y temperatura.

Cuando esto ocurre cerca de superficies sólidas, se produce la fatiga del material sólido y algunas de las moléculas del mismo son arrastradas, de manera que con el tiempo las superficies se desgastan presentando una apariencia semejante a la de haber estado expuestas a ácidos o agentes corrosivos. El daño puede llegar a destruir las piezas, especialmente costosas como los álabes de una turbina, el impulsor de una bomba o la hélice de un barco, por lo cual debe tratarse de evitarse verificando que la presión no disminuya hasta llegar a la *presión de vapor*.

En conclusión, en las zonas de alta velocidad es necesario revisar que la presión no disminuya tanto como para alcanzar la presión de vapor.

Cuestionario. Propiedades físicas de los fluidos

1. ¿Cuáles son los estados de la materia y sus características más evidentes?
2. ¿Qué estados de la materia se agrupan en la categoría de fluidos?
3. ¿Qué es un fluido?
4. ¿Qué es fluir?
5. ¿Qué es un flujo?
6. ¿Cómo se define el esfuerzo y cuantos tipos hay?
7. ¿Cuáles son los esfuerzos que existen en los fluidos?
8. ¿Cuál es la diferencia entre la deformación elástica y la fluencia o flujo?
9. ¿Cuáles son las propiedades físicas de los fluidos relacionadas con la masa y la gravedad?
10. ¿Cuáles son las propiedades relacionadas con los esfuerzos cortantes?
11. ¿Cuáles son las fuerzas a nivel molecular que permiten explicar muchas propiedades de los fluidos?
12. ¿Qué fenómenos y propiedades están relacionadas con la presión, la temperatura y el cambio de fase?
13. ¿Cómo se define el peso específico, cuál es su ecuación, y cuales sus unidades en los principales sistemas?
14. ¿Cómo se define la densidad, cuál es su ecuación, y cuales sus unidades en los principales sistemas?
15. ¿Cómo se define la densidad relativa, cuál es su ecuación, y cuáles sus unidades en los principales sistemas?
16. Escribe la ecuación que relaciona a la densidad y al peso específico.
17. ¿Qué es la viscosidad?
18. ¿De qué depende la viscosidad?
19. ¿Qué es la cohesión?
20. ¿Cómo se clasifica a los fluidos con base en la viscosidad?
21. ¿Cuáles son los tipos de flujos que se presentan en un fluido real? Descríbelos.
22. ¿Qué es el perfil de velocidades?
23. ¿Qué es el gradiente de velocidades y cómo se representa?
24. ¿Qué plantea la ley de Newton de la viscosidad? Escríbela.
25. ¿Cuál es el rango de aplicación de la ley de Newton de la viscosidad?
26. A partir de la ley de Newton de la viscosidad menciona la principal diferencia entre la fricción de los sólidos y la viscosa.
27. ¿Por qué no se manifiesta la viscosidad en los fluidos en reposo?
28. ¿Qué valor de esfuerzo cortante se requiere para que ocurra el flujo?
29. ¿En qué casos el gradiente de velocidad vale cero?
30. ¿Cómo es el esfuerzo cortante en relación a la velocidad y al espesor de la capa de fluido?
31. ¿Qué es un fluido “no newtoniano”?
32. ¿Cuál es la diferencia entre los fluidos y los plásticos?
33. ¿Cuáles son las dimensiones de la viscosidad?
34. ¿Qué diferencia hay entre la viscosidad y la viscosidad dinámica?
35. ¿Cuáles son las unidades de la viscosidad en el SI?
36. ¿Qué es un poise y a que equivale?
37. ¿Cómo varía la viscosidad con la temperatura en líquidos y gases?
38. ¿Por qué la viscosidad varía de diferente forma en líquidos y gases cuando la temperatura cambia?
39. ¿Qué es la viscosidad cinemática? Escribe su ecuación.
40. ¿Cuáles son las dimensiones de la viscosidad cinemática?
41. ¿Qué es la elasticidad volumétrica?
42. ¿Qué es la compresibilidad?
43. ¿Cuál es la expresión matemática de la compresibilidad?

44. ¿Cuáles son las unidades del módulo de elasticidad volumétrica?
45. ¿En qué condiciones se considera a los gases como incompresibles?
46. ¿Qué es la adhesión?
47. ¿Qué es la tensión superficial y a qué se debe?
48. ¿Cuáles son las dimensiones de la tensión superficial?
49. ¿Qué es la capilaridad y a qué se debe?
50. ¿Qué es la evaporación?
51. ¿Qué es la condensación?
52. ¿Cuándo se dice que el espacio sobre un líquido está saturado?
53. ¿Qué es la presión de vapor y de qué depende?
54. ¿Qué es la ebullición?
55. ¿Qué es la cavitación?

Ejercicios propuestos

1.- La densidad de una resina es de 140 UTM/m^3 , encontrar el peso específico, la densidad y la densidad relativa. Si se envasa en barriles de 159 lt y que pesan 12 kg estando vacíos, cuánto pesará cada barril cuando esté lleno. Resolver en los tres sistemas.

Resp. En el MKS téc.) $\gamma = 1373.4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ $Dr = 1.373$ $W_R = 218.37 \text{ Kg}$ $W_B = 230.37 \text{ Kg}$

En el MKS Abs. $\gamma = 13469 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$; $\rho = 1373.4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$; $Dr = 1.373$ $W_R = 2142. \text{ N}$; $W_B = 2259.9 \text{ N}$

En el Inglés: $\gamma = 85.66 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$; $\rho = 2.66 \frac{\text{slug}}{\text{ft}^3}$; $Dr = 1.373$ $W_R = 481 \text{ lb}$; $W_B = 507.42 \text{ lb}$

2.- Si la densidad relativa de cierto tipo de petróleo crudo es de 0.82 encontrar cuánto pesa un barril de 159 lt que es el barril estándar.

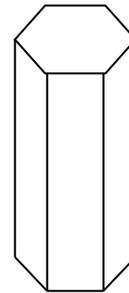
3.- La densidad relativa del concreto armado es 2.4. Encontrar: A) El peso específico y la densidad del concreto. B) El volumen y el peso de la columna hexagonal de 0.25 m de lado y 3.5 m de altura. C) La presión que ejercerá en la cimentación

Resp.

A) $\gamma = 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ $\rho = 244.65 \frac{\text{UTM}}{\text{m}^3}$ $Dr = 2.4$

B) $V = 0.568 \text{m}^3$; $W = 1364 \text{ Kg}$

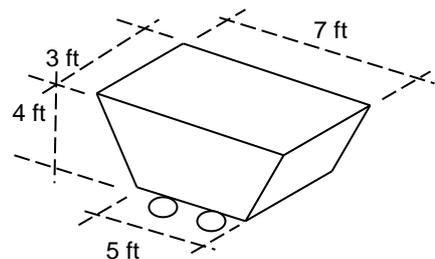
C) $P = 8399 \text{ kg/m}^2$



4.- El material de una mina tiene una densidad de 3.5 slugs/ft^3 . Si se extrae en góndolas como la mostrada, encontrar: A) el peso específico y la densidad relativa. B) el peso y la masa del material que llena la góndola al ras. Resolver en el inglés técnico y convertir al MKS técnico.

Resp. A)) $\gamma = 112.7 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$ $Dr = 1.8$

B) $W = 8114.4 \text{ lb}$ $m = 252 \text{ slugs}$



5.- Al vaciarse arena de una tolva se forma un cono de 2.5 m de altura y 6 m de diámetro, si el peso específico de la arena suelta es de 1800 kg/m^3 calcular: A) el volumen del cono formado. B) el peso de la arena C) la masa de la arena. Resolver en los tres sistemas.

Resp. En el SI: $V = 23.56 \text{ m}^3$; B) $W = 416,057 \text{ N}$; C) $m = 42,411 \text{ kg}$

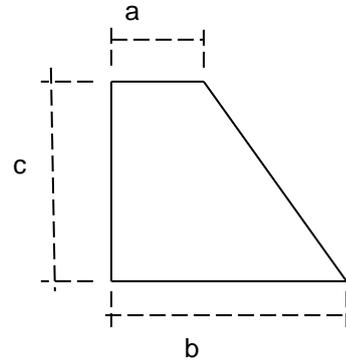
6.- Se va a construir un muro de mampostería de forma trapezoidal y las dimensiones indicadas, si la densidad es $D_r = 2.3$. Calcular: Peso específico, densidad, volumen, peso y masa. Resolver en el MKS téc.

Datos: $a = 1.5 \text{ ft}$; $b = 5 \text{ ft}$; $c = 10.4 \text{ ft}$; Longitud $L = 30 \text{ ft}$

Resp. $V = 28.7 \text{ m}^3$; $\gamma = 2300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$\rho = 234 \frac{\text{UTM}}{\text{m}^3}$

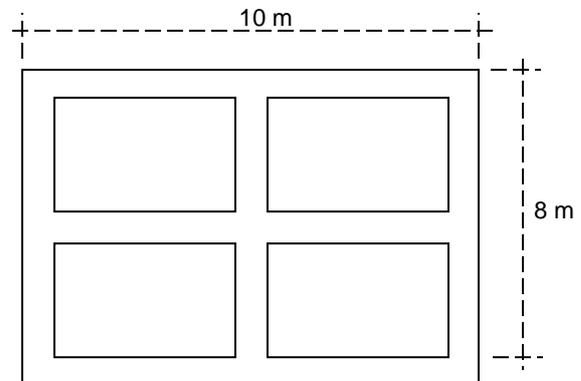
$W = 66035 \text{ kg}$; $m = 6731.4 \text{ UTM}$



7.- Se va a construir una losa de cimentación de concreto con las dimensiones mostradas, calcular el volumen y peso total. La losa es de 15 cm de espesor, las contratrabes son de 20 cm de espesor por 35 de peralte adicional al de la losa.

Sol. $V = 15.65 \text{ m}^3$;

$W = 37,569.6 \text{ kg}$



Vista inferior

8.- Encontrar el peso de una columna cilíndrica de mármol de 0.6 m de diámetro y 4.5 m de longitud. Resolver en el MKS abs.