

UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL
"FRANCISCO DE MIRANDA"
ÁREA DE TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAL
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA

FENÓMENOS DE TRANSPORTE

UNIDAD I
INTRODUCCIÓN A LOS
FENÓMENOS DE TRANSPORTE.
HIDROSTÁTICA

I SEMESTRE 2007

Prof. Johemar Almera/Frank Botero/Pedro Vargas

UNIDAD I
INTRODUCCIÓN A LOS FENOMENOS DE TRANSPORTE.
HIDROSTATICA

Introducción

Unidades de Medición

1. Fluido

Concepto de fluido y conceptos del mismo como un continuo.

Propiedades de los fluidos, propiedades de transporte.

Ejercicios de propiedades de los fluidos

2. Ley de newton de la viscosidad.

Formas de evaluar la viscosidad.

Uso de tablas y nomogramas.

Tipos de fluidos por su comportamiento Reológico.

Fluidos Newtonianos y no newtonianos

Ejercicios de Ley de viscosidad de Newton

3 Estática de los fluidos.

Definición de presión y unidades.

Ecuación fundamental de la hidrostática.

Distribución de presiones.

Manometría y dispositivos para medir presión

Ejercicios de Estática de fluidos

MECANICA DE LOS FLUIDOS

Introducción

La rama de la ingeniería que trata del comportamiento de los fluidos recibe el nombre de *Mecánica de los Fluidos*. La mecánica de los fluidos es a su vez una parte de una disciplina más amplia llamada *mecánica de medios continuos*, que incluye también el estudio de sólidos sometidos a esfuerzos.

La mecánica de los fluidos tiene dos ramas importantes para los estudios que se realizan en ingeniería: la estática de los fluidos, que trata los fluidos en el estado de equilibrio sin esfuerzo cortante y la dinámica de los fluidos, que trata los fluidos cuando partes de los mismos se mueven con relación a otras.

La transferencia de momento en un fluido incluye el estudio del movimiento de los fluidos así como de las fuerzas que producen dicho movimiento. A partir de la segunda ley de Newton del movimiento, se sabe que la fuerza se relaciona directamente con la rapidez de cambio del momento de un sistema. Excluyendo a las fuerzas de acción a distancia, tales como la gravedad, se puede demostrar que las que actúan sobre un fluido, como la presión y el esfuerzo cortante, son el resultado de una transferencia microscópica (molecular) de momento. Así pues, al tema que históricamente se le ha llamado mecánica de fluidos, se le puede denominar también transferencia de momento, y este constituye uno de los tres fenómenos de transporte. Se define como fenómenos de transporte a la ciencia que se encarga del transporte de cantidad de movimiento (flujo viscoso), transporte de energía (conducción, convección y radiación) y transporte de materia (difusión).

Unidades de medición

Además del sistema internacional de unidades (SI), existen dos diferentes sistemas ingleses de unidades que se usan comúnmente en ingeniería. Dichos sistemas tienen sus raíces en la segunda ley del movimiento de Newton: fuerza es igual a la razón del cambio del momento con respecto al tiempo. Al definir cada término de esta ley, se ha establecido una relación directa entre las cuatro cantidades físicas básicas que se utilizan en mecánica: fuerza, masa, longitud y tiempo. Por la elección arbitraria de las dimensiones fundamentales, se ha presentado cierta confusión en el uso de los sistemas de unidades inglesas. La adopción del sistema de unidades SI como estándar mundial superará estas dificultades.

La relación entre fuerza y masa puede expresarse por el siguiente postulado de la segunda ley de Newton del movimiento:

$$F = \frac{m a}{g_c}$$

Donde g_c es el factor de conversión que se incluye para que las ecuaciones sean dimensionalmente consistentes.

En el sistema internacional (SI), la masa, la longitud y el tiempo se toman como unidades básicas. Las unidades básicas son la masa en kilogramos (kg), la longitud en metros (m) y el tiempo en segundos (s). La unidad de fuerza correspondiente es el Newton (N). Un Newton es la fuerza que se requiere para acelerar una masa de un kilogramo con una rapidez de un metro por segundo cada segundo (1 m/s^2). El factor de conversión, g_c es igual entonces a un kilogramo por metro sobre Newton por segundo al cuadrado ($1 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{N}\cdot\text{s}^2$).

En la práctica de la ingeniería, con frecuencia se ha escogido la fuerza, la longitud y el tiempo como unidades cuya definición es fundamental. En un segundo sistema, la fuerza se expresa en libras fuerza (lb_f), la longitud en pies (ft) y el tiempo en segundos (s). La unidad correspondiente de masa será la que se acelere en la proporción de 1 pie/s^2 por acción de una libra fuerza. Tal unidad de masa que tiene las dimensiones de $(\text{lb}_f)(\text{s}^2)/\text{pie}$ se llama slug. El factor de conversión, g_c es entonces un factor multiplicador que convierte slug en $(\text{lb}_f)(\text{s}^2)/\text{pie}$ y su valor es $1 \text{ slug}\cdot\text{pie}/(\text{lb}_f)(\text{s}^2)$.

Un tercer sistema que se encuentra en la práctica de la ingeniería incluye las cuatro unidades fundamentales. La unidad de fuerza es 1 lb_f y la unidad de masa es 1 lb_m , la longitud y el tiempo están dados en unidades de pies (ft) y segundos (s), respectivamente. Cuando se deja que una lb_m al nivel del mar caiga bajo la influencia de la gravedad, su aceleración será de $32,174 \text{ (ft)/(s}^2\text{)}$. La fuerza que la gravedad ejerce sobre una lb_m al nivel del mar se define como 1 lb_f . Por lo tanto, el factor de conversión, g_c , para dicho sistema es $32,174 \text{ (lb}_m\text{)(ft)/(lb}_f\text{)(s}^2\text{)}$.

Tabla N° 1. Resumen de sistema de unidades (Welty, 2005).

Sistema	Longitud	Tiempo	Fuerza	Masa	g_c
1	Metro	Segundo	Newton	Kilogramo	$1 \frac{\text{kg m/s}^2}{\text{N}}$
2	Pie	Segundo	Libra fuerza	Slug	$\frac{1 \text{ slug pie} / \text{s}^2}{\text{Lb}_f}$
3	Pie	Segundo	Libra fuerza	Libra masa	$\frac{32,174 \text{ Lb}_m \text{ pie} / \text{s}^2}{\text{Lb}_f}$

1.1 Fluido

Un fluido se define como una sustancia que se deforma continuamente cuando se le aplica un esfuerzo cortante, sin importante que tan pequeño sea el esfuerzo. Una fuerza cortante es el componente de una fuerza tangente a una superficie, y esta fuerza dividida por el área de la superficie es el esfuerzo cortante promedio sobre el área τ (tau) = F/A . El esfuerzo cortante en un punto es el valor límite de la fuerza cortante al área cuando se reduce a un punto.

Una consecuencia importante de esta definición es que cuando un fluido se encuentra en reposo, no pueden existir esfuerzos cortantes. Tanto los líquidos (los cuales cambian fácilmente de forma pero

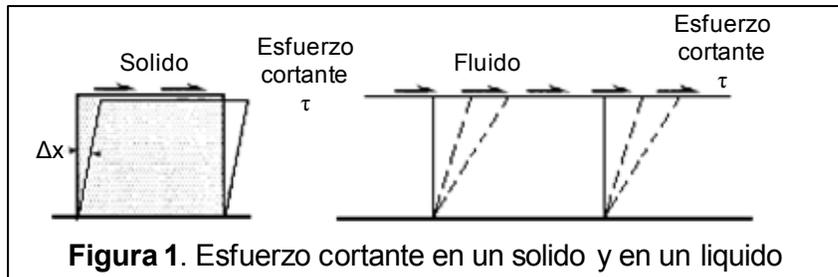


Figura 1. Esfuerzo cortante en un sólido y en un líquido

no de volumen) como los gases (los cuales cambian fácilmente de forma y de volumen) son fluidos. Algunas sustancias, como el vidrio, se clasifican técnicamente como fluidos. Sin embargo, la rapidez con la que se deforma el vidrio a temperaturas normales es tan pequeña que no es práctico considerarlo como fluido. El proceso de deformación continua se denomina fluidez. Un fluido es entonces una sustancia capaz de fluir y una fuerza cortante es el componente de una fuerza tangente

1.2. Concepto de fluido como continuo

Los fluidos al igual que el resto de la materia, están compuestos de moléculas; establecer el número de éstas es un verdadero desafío a la imaginación. En una pulgada cúbica de aire a temperatura ambiente existen aproximadamente 10^{20} moléculas. Cualquier teoría que intentara predecir los movimientos individuales de esta gran cantidad de moléculas sería en extremo compleja, y está más allá del conocimiento actual. Aunque la teoría cinética de los gases y la mecánica estadística tratan del movimiento de las moléculas, esto se hace en términos de grupos estadísticos en vez de moléculas individuales.

La mayor parte del trabajo de ingeniería se refiere al comportamiento macroscópico o en volumen de un fluido en vez del comportamiento microscópico o molecular. En la mayoría de los casos es conveniente considerar a un fluido como una distribución continua de materia o un **CONTINUO**. Existen, por supuesto, ciertos casos en que el concepto de continuo no es válido. Considérese, por ejemplo, el número de moléculas en un pequeño volumen de gas en reposo. Si el volumen se considerara suficientemente pequeño, el número de moléculas por unidad de volumen dependería del

tiempo, para el volumen microscópico, aunque el volumen macroscópico tuviera un número constante de moléculas. El concepto de continuo solo sería válido en el último caso. Al parecer, la validez de este enfoque depende del tipo de información que se desee más que de la naturaleza del fluido. El estudio de los fluidos como continuos es válido siempre y cuando el volumen más pequeño que nos interesa contenga un número suficiente de moléculas para que los promedios estadísticos tengan significado. Se considera que las propiedades macroscópicas de un continuo varían suavemente (continuamente) de un punto a otro del fluido.

1.3. Propiedades de los fluidos

La mecánica de los fluidos, como área de estudio, se ha desarrollado gracias al entendimiento de las propiedades de los fluidos, a la aplicación de las leyes básicas de la mecánica y la termodinámica y a una experimentación ordenada. Debido al comportamiento que tienen algunos fluidos, se hace interesante su estudio, sobre todo a nivel experimental, teniendo en cuenta que dicha sustancia posee ciertas propiedades tales como viscosidad y densidad, las cuales juegan papeles principales en flujos de canales abiertos y cerrados y en flujos alrededor de objetos sumergidos.

Este interés en el estudio de los fluidos es a consecuencia de que en la vida diaria no existe un fluido ideal, es decir, una sustancia en la cual se esté aplicando un esfuerzo, el cual puede ser muy pequeño, para que se resista a fluir con absoluta facilidad. En esta práctica se experimenta con la propiedad que tienen los fluidos de oponer resistencia a un efecto cortante por causa de la adhesión y cohesión, es decir, la viscosidad.

Algunos fluidos en particular los líquidos, tienen densidades que permanecen casi constantes dentro de amplios márgenes de presión y temperatura. Los fluidos que presentan esta cualidad casi siempre se consideran como incompresibles. Sin embargo, los efectos de la compresibilidad son una propiedad de la situación más que del fluido mismo. Por ejemplo, el flujo de aire a bajas velocidades se describe exactamente por medio de las mismas ecuaciones que describen el flujo de agua. Desde el punto de vista estático, el aire es un fluido compresible y el agua es incompresible (prácticamente incompresible). En lugar de clasificarlos de acuerdo con el fluido, los efectos de compresibilidad se consideran una propiedad del flujo. Se hace una distinción, si bien sutil, entre las propiedades del fluido y las propiedades del flujo, y advirtiendo al estudiante de la importancia de este concepto de aquí en adelante.

1.3.1. Fluidos compresibles e incompresibles

La mecánica de los fluidos trata tanto de los fluidos compresibles como de los incompresibles, es decir, de fluidos de densidad variable o densidad constante. Aunque no exista en realidad un fluido

incomprensible, este término se aplica en los casos donde el cambio de la densidad con la presión es despreciable. Éste suele ser el caso de los líquidos. Los gases también pueden considerarse como incompresibles cuando la variación de la presión es pequeña en comparación con la presión absoluta. El flujo del aire en un sistema de aire acondicionado es un caso en que el gas se puede considerar como incompresible, debido a que la variación de la presión es tan pequeña que el cambio de la densidad no tiene mayor importancia. No obstante, en el caso de un gas o vapor que fluye a alta velocidad a través de una tubería larga, la caída de presión puede resultar tan grande que el cambio en la densidad no es despreciable.

1.3.2. Compresibilidad de los líquidos

La compresibilidad (cambio de volumen debido a un cambio en presión) de un líquido es inversamente proporcional a su **modulo de elasticidad volumétrico**, también denominado **coeficiente de compresibilidad**. Se define este modulo como:

$$E = -\frac{dP}{\frac{dv}{v_i}} \quad (1)$$

Donde v es el volumen específico y P la presión. Las unidades de E son idénticas a las de P . El coeficiente de compresibilidad es análogo al modulo de elasticidad para sólidos. Sin embargo, para los fluidos se define en base de volumen y no en términos de la relación tensión – deformación unidimensional usual en cuerpos sólidos.

En la mayoría de los problemas técnicos, el valor que interesa es el coeficiente de compresibilidad a la presión atmosférica o cerca de ella. El coeficiente de compresibilidad es una propiedad del fluido y para los líquidos es una función de la temperatura y la presión.

1.3.3. Atmósfera estándar

Las atmósferas estándares se adoptaron por primera vez en los Estados Unidos y también en Europa en la década de los años 20, para satisfacer la necesidad de estandarizar la instrumentación aeronáutica y las actuaciones de los aviones. A nivel del mar las condiciones estándar se han adoptado como las siguientes:

$$P = 29,92 \text{ pulgHg} = 2116,2 \text{ Lbf/pie}^2 = 760 \text{ mmHg} = 101325 \text{ Pa}$$

$$T = 59 \text{ }^\circ\text{F} = 519 \text{ }^\circ\text{R} = 15 \text{ }^\circ\text{C} = 288 \text{ K}$$

$$\gamma = 0,0765 \text{ Lbf/pie}^3 = 11,99 \text{ N/m}^3$$

$$\rho = 0,002378 \text{ slug/pie}^3 = 1,2232 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 3,719 \cdot 10^{-7} \text{ Lbf s/ pie}^2 = 1,777 \cdot 10^{-8} \text{ kN s/m}^2$$

1.3.4. Fluido ideal

Un fluido ideal se puede definir como un fluido en el que no existe fricción; es **no viscoso** (es decir su viscosidad es cero). Por tanto, las fuerzas internas en cualquier sección dentro del mismo son siempre normales a la sección, incluso si hay movimiento. Estas fuerzas son puramente fuerzas de presión. Aunque no existe tal fluido en la práctica, muchos fluidos se aproximan al flujo sin fricción a una distancia razonable de los contornos sólidos, por lo que sus comportamientos muchas veces se pueden analizar suponiendo las propiedades de un fluido ideal. Es importante no confundir entre el concepto de fluido ideal y gas ideal (o perfecto).

En un **fluido real**, ya sea líquido o gas, se generan fuerzas tangenciales o cortantes siempre que se produzca movimiento relativo a un cuerpo, dando lugar a la fricción en el fluido, porque estas fuerzas oponen el movimiento de una partícula respecto a otra. Estas fuerzas de fricción dan lugar a una propiedad del fluido denominada viscosidad.

• Densidad, ρ (rho):

La densidad de un fluido se define como la masa por unidad de volumen. La densidad se usa para caracterizar la masa de un sistema fluido. En el sistema internacional se expresa en Kg/m^3 y en el sistema británico en slug/ft^3 .

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

El valor de la densidad puede variar ampliamente entre fluidos diferentes, pero para líquidos las variaciones de presión y temperatura en general afectan muy poco el valor de densidad. La densidad del agua a 60°F es $1,94 \text{ slug pie}^{-3}$ o 1000 kg m^{-3} . Al contrario de cómo sucede en los líquidos, la densidad de un gas es fuertemente afectada por la presión y la temperatura.

• Peso específico, γ (gamma):

El peso específico de un fluido se define como el peso por unidad de volumen. También representa la fuerza ejercida por la gravedad sobre una unidad de volumen de fluido, y por tanto se tiene que expresar con las unidades de fuerza por unidad de volumen. En el sistema internacional se expresa en N/m^3 y en el sistema británico en lb_f/ft^3 .

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (3)$$

El peso específico de un líquido varía ligeramente con la presión, dependiendo del coeficiente de compresibilidad del líquido, depende también de la temperatura, y la variación puede ser notable. Así mismo, depende también del valor local de la aceleración de la gravedad. La presencia de aire

disuelto, sales en solución y materia suspendida incrementarán los valores del peso específico del agua muy ligeramente.

Tabla N° 2: Comparación entre valores de pesos específicos a condiciones estándar

Elemento	Peso específico	Unidades
Agua	9,81	KN/m ³
Mercurio	133,12	KN/m ³
Aceite	7,85	KN/m ³
Madera	7,85	KN/m ³
Piedra Caliza	25,51	KN/m ³
Tetracloruro de carbono	15,6	KN/m ³

La densidad y el peso específico están relacionados de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad \gamma = \rho \cdot g \quad (4)$$

Se ha de notar que la densidad es una cantidad absoluta, debido a que depende de la masa, que es independiente de la posición. En cambio el peso específico no es una cantidad absoluta ya que depende del valor de la aceleración gravitacional (g), la cual varía con la posición, principalmente latitud y elevación por encima del nivel del mar.

• **Volumen específico, ν (uve):**

El volumen específico se define como el inverso de la densidad. Es decir, es el volumen ocupado por una unidad de masa de fluido. Se aplica frecuentemente a los gases, y se suele expresar en unidades de m³/Kg para el sistema internacional y ft³/slug para el sistema británico.

$$\nu = \frac{1}{\rho} \quad (5)$$

Esta propiedad no es de uso común en mecánica de los fluidos, pero si en termodinámica.

• **Densidad relativa (S) ó gravedad específica**

La densidad relativa de un líquido es la relación entre su densidad y la del agua pura a una temperatura estándar. Los físicos utilizan 4°C (39.2°F) como valor estándar, pero los ingenieros muchas veces utilizan 15.6°C (60°F). En el sistema métrico, la densidad del agua a 4°C es 1g/cm³ equivalente a 1000 kg m⁻³, y por tanto la densidad relativa (que no tiene dimensiones) de un líquido tiene el mismo valor numérico que su densidad expresada en g ml⁻¹ o mg m⁻³.

La densidad relativa de un gas es la relación entre su densidad y la del hidrogeno o aire a una temperatura y presión dadas, pero no existe un acuerdo general sobre estos estándares, por lo que es preciso especificarlos en cada caso.

$$S_g = \frac{M_{GAS}}{M_{AIRE}} = \frac{R_{AIRE}}{R_{GAS}} \quad (6)$$

Debido a que la densidad de un fluido varia con la temperatura, hay que determinar y concretar las densidades relativas a temperaturas concretas.

$$S = \frac{\rho(\text{a cualquier temperatura } T \text{ y } P \text{ dadas})}{\rho(\text{del aire a } T \text{ y } P \text{ dadas})} \quad (7)$$

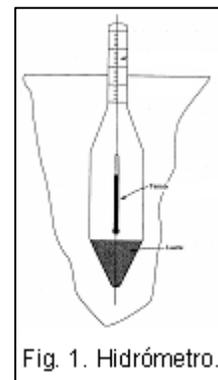
Medición de la densidad relativa

Se utiliza un Hidrómetro para medir directamente la densidad relativa de un líquido, tal como se muestra en la figura:

Normalmente se utiliza las escalas hidrométricas a saber:

➤ La escala API que se utiliza para productos del petróleo.

$$S\left(\frac{60^\circ\text{F}}{60^\circ\text{F}}\right) = \frac{141.5}{131.5 + ^\circ\text{API}} \quad (8)$$



➤ Las escalas BAUMÉ, que a su vez utiliza dos tipos:

a) Una para líquidos mas densos que el agua:

$$S\left(\frac{60^\circ\text{F}}{60^\circ\text{F}}\right) = \frac{145}{145 - ^\circ\text{BAUMÉ}} \quad (9)$$

b) Una para líquidos mas ligeros que el agua:

$$S\left(\frac{60^\circ\text{F}}{60^\circ\text{F}}\right) = \frac{140}{130 + ^\circ\text{BAUMÉ}} \quad (10)$$

• Presión de vapor

La evaporación se lleva a cabo porque algunas moléculas en la superficie del líquido poseen una cantidad de movimiento suficiente para superar las fuerzas intermoleculares de cohesión y escapar hacia la atmósfera. Si el recipiente esta cerrado de modo que arriba de la superficie del líquido hay un pequeño espacio de aire y en este espacio se hace el vacío, entonces ahí se crea una presión como resultado del vapor que se forma debido a las moléculas que escapan. Cuando se alcanza una condición de equilibrio de modo que el número de moléculas que abandonan la superficie es igual al número de moléculas que entran, se dice que el vapor esta saturado y la presión ejercida por el vapor

sobre la superficie del líquido se denomina **PRESIÓN DE VAPOR**. Como la presión de vapor esta estrechamente relacionada con la actividad molecular, el valor de la presión de vapor para un líquido particular depende de la temperatura, aumentando con ésta.

La ebullición, que es la formación de burbujas de vapor dentro de una masa de fluido, se inicia cuando la presión absoluta del fluido alcanza la presión de vapor. Como suele observarse comúnmente en la cocina, el agua a presión atmosférica normal hierve cuando la temperatura llega a 212°F (100 °C); es decir, la presión de vapor de agua a 212°F es 14,7 Lbf/pulg² (abs). Sin embargo, si se intenta hervir agua a una mayor elevación, por ejemplo a 10000 pie sobre el nivel del mar, donde la presión atmosférica es 10,1 Lbf pulg⁻² (abs), se encuentra que la ebullición comienza cuando la temperatura es aproximadamente de 193 °F. A esta temperatura, la presión de vapor del agua es de 10,1 Lbf pulg⁻² (abs). Así es posible inducir la ebullición a una presión dada que actúa sobre el fluido al elevar la temperatura, o bien, a una temperatura dada del fluido al disminuir la presión. La presión de vapor de los aceites pesados esta alrededor de 1 mmHg.

Una razón importante que justifica el interés en la presión de vapor y la ebullición es la observación común de que en los fluidos es posible crear una presión muy baja debido al movimiento del fluido, y si la presión se reduce a la presión de vapor, entonces se presenta la ebullición. Por ejemplo, este fenómeno puede ocurrir en un flujo que se desplaza por los pasajes irregulares y estrechos de una válvula o bomba. Cuando en un fluido que fluye se forman burbujas de vapor, estas son llevadas hasta regiones de mayor presión, donde repentinamente se rompen con intensidad suficiente para provocar un verdadero daño estructural. La formación y subsiguiente ruptura de las burbujas de vapor en un fluido que fluye, lo cual se denomina **cavitación**, es un fenómeno importante en flujo de fluidos.

• Tensión superficial

La tensión superficial (σ) es una fuerza de tensión distribuida a lo largo de la superficie, se debe primordialmente a la atracción molecular entre moléculas **parecidas (cohesión)** y a la atracción molecular entre moléculas **diferentes (adhesión)**. En el interior de un líquido (Fig. 3) las fuerzas cohesivas se cancelan, pero en la superficie libre del líquido las fuerzas cohesivas desde abajo exceden las fuerzas adhesivas desde el gas localizado por encima, dando como resultado una tensión superficial. Ésta es la razón por la cual una gota de agua adquiere una forma esférica, y los pequeños insectos pueden posarse en la superficie de un lago sin hundirse. La tensión superficial se mide como una intensidad de carga **lineal tangencial** a la superficie y se da por unidad de longitud de una línea dibujada sobre la superficie libre.

$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta L} \quad (11)$$

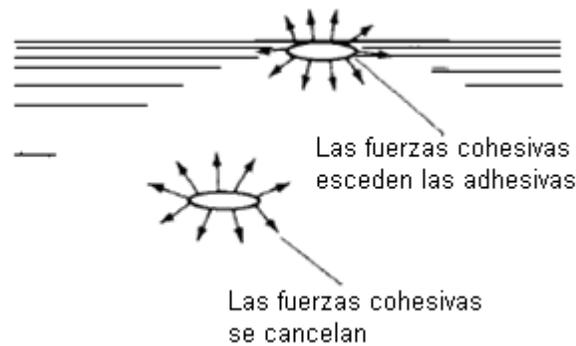


Fig.2. Fuerzas cohesivas y fuerzas adhesivas.

La tensión superficial es una propiedad del líquido y depende de la temperatura, así como del otro fluido con que esté en contacto en la interfase. Las unidades de la tensión superficial son N/m en el sistema internacional y lbf/pie en el sistema británico. El valor de la tensión superficial disminuye cuando aumenta la temperatura. El valor de la tensión superficial del agua en contacto con el aire es 0,0756 N/m a 0 °C.

• Capilaridad

“Es el ascenso de un fluido por las paredes de un tubo o cavidad hasta que la fuerza ascendente debida a la tensión superficial se equilibre con la columna descendente del peso de la columna de fluido”.

Entre los fenómenos comunes asociados con la tensión superficial esta el ascenso o (descenso) de un líquido en un tubo capilar. Si un pequeño tubo abierto se introduce en agua, el nivel de esta en el tubo sube por arriba del nivel del agua fuera del tubo. En esta situación se tiene una interfase liquido-gas-sólido. Existe una atracción (adhesión) entre la pared del tubo y las moléculas del líquido, que es suficientemente fuerte para superar la atracción (cohesión) mutua de las moléculas y empujarlas hacia arriba sobre la pared. Por tanto se dice que el líquido moja la superficie del sólido.

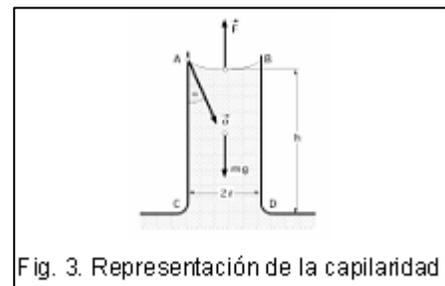


Fig. 3. Representación de la capilaridad

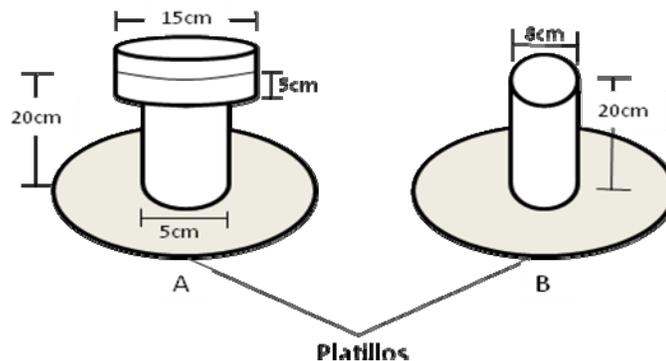
La altura, h , depende del valor de la tensión superficial, σ , el radio del tubo, z_r , el peso específico del líquido, γ , y el ángulo de contacto, α , entre el fluido y el tubo. Si la adhesión de las moléculas con la superficie del sólido es débil en comparación con la cohesión que hay entre las moléculas, entonces el líquido no moja la superficie y el nivel en el tubo colocado en un líquido que no moja se deprime. El mercurio es un muy buen ejemplo de líquido que no moja cuando se pone en contacto con un tubo de

vidrio. Para líquidos que no mojan, el ángulo de contacto es mayor que 90° y para el mercurio en contacto con vidrio limpio se tiene que $\theta = 130^\circ$.

Los efectos de tensión superficial son importantes en muchos problemas de mecánica de los fluidos que incluyen el movimiento de líquidos a través del suelo y otros medios porosos, el flujo de películas delgadas, la formación de gotas y burbujas, y la dispersión de chorros líquidos. Afortunadamente, en muchos problemas de mecánica de los fluidos los fenómenos superficiales, según son caracterizados por la tensión superficial, no son importantes, ya que las fuerzas inerciales, gravitacionales y viscosas son mucho más dominantes.

PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS. EJERCICIOS PROPUESTOS

- 1) Calcular la densidad y el peso específico del monóxido de carbono a 130 kPa y 15°C .
- 2) Calcular el peso específico de un galón de agua si su masa es 0,258 slugs.
- 3) El volumen específico de un gas perfecto a 100kPa y 30°C es de $0,55 \text{ m}^3/\text{kg}$. Calcular la constante del gas y su masa molecular.
- 4) Se tienen dos recipientes A y B colocados sobre los platillos de una balanza tal como indica la figura. Cuando están vacíos la balanza está en equilibrio. Al llenar el recipiente A de un líquido hasta una altura de 20cm, la balanza indica 930gr de peso, para volver a equilibrarla es necesario llenar el recipiente B con otro líquido hasta una altura de 20cm. ¿Cuáles son los pesos específicos de los líquidos?



- 5) Haciendo uso de nomogramas, encuentre la viscosidad de las siguientes sustancias:

Líquidos:

Acido Acético a 50°C

Cloroformo a 120°F

Hexano a 60°F

Gases

Metano a 300°F

Cloro a 300°C

Nitrógeno a 1000°F

2. Ley de Newton de la viscosidad

Cuando un fluido fluye a través de un canal cerrado, esto es, en una tubería o entre dos placas planas, se presentan dos tipos de flujo, dependiendo de la velocidad de dicho fluido. A velocidades bajas el fluido tiende a fluir (sin mezclado lateral) y las capas adyacentes al mismo se resbalan unas sobre otras como hojas de papel. En este caso no hay corrientes cruzadas en el seno del fluido,

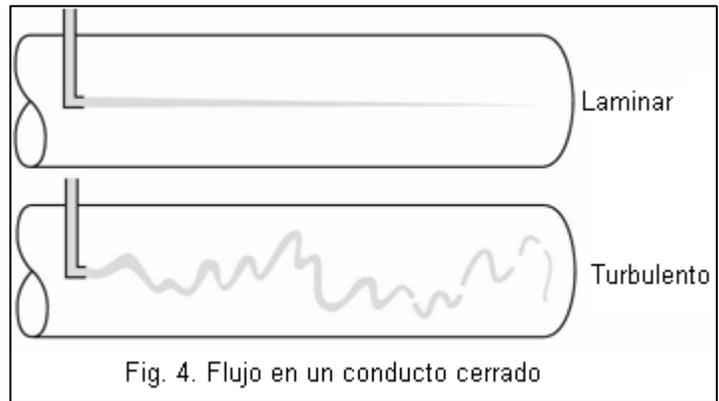


Fig. 4. Flujo en un conducto cerrado

ni tampoco remolinos. A este régimen de flujo se le llama flujo laminar. A velocidades más altas se forman remolinos lo que conlleva a un mezclado lateral en todas direcciones distintas e iguales a la dirección de flujo. Este régimen de flujo se llama flujo turbulento.

Consideremos un fluido, líquido o gas, contenido entre dos grandes láminas planas y paralelas, de área (A) y separadas por una distancia muy pequeña y como se muestra a continuación:

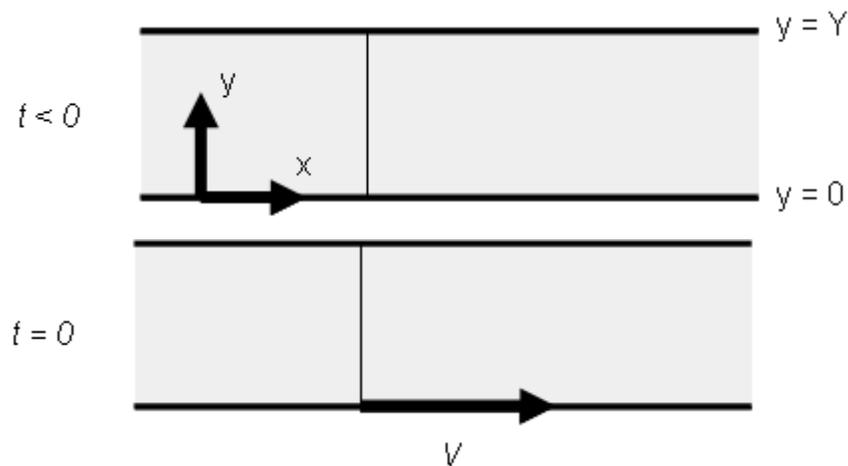


Figura. 5. Esfuerzo cortante en un fluido entre placas paralelas.

Supongamos que el sistema inicialmente está en reposo, pero al cabo del tiempo $t=0$, la lámina inferior se pone en movimiento en la dirección del eje x , con una velocidad constante V debido a aplicación de una fuerza F (Fig. 5). A medida que transcurre el tiempo el fluido gana cantidad de movimiento y finalmente se establece el perfil de la velocidad en régimen estacionario.

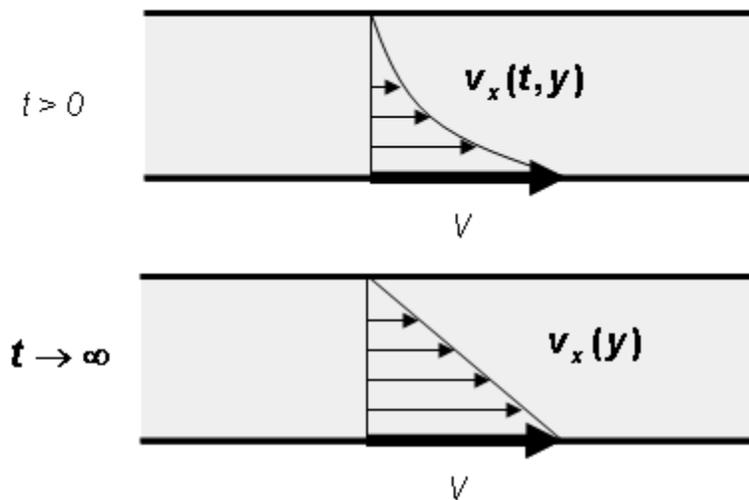


Figura. 6. Perfil de velocidades entre dos placas paralelas.

Es de hacer notar que la velocidad del fluido en primer lugar varía sólo con la altura y , es decir que para una altura fija, la velocidad desarrollada es la misma para cualquier valor de x . La fuerza F , llamada **Retardo Viscoso**, puede ser aplicada para producir el movimiento, o interpretarse como la que se origina producto de la fuerza viscosa del fluido para oponerse al movimiento originado por el vector velocidad V .

Esta fuerza viene dada por la siguiente expresión (para la mayoría de los fluidos), si se admite que el fluido se mueve en flujo laminar:

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{V}{y} \quad (12)$$

Esto quiere decir que la fuerza por unidad de área es proporcional a la disminución de la velocidad con la distancia vertical “ Y ” que separa las placas. La constante de proporcionalidad (μ) se conoce como la viscosidad dinámica del fluido. La fuerza por unidad de área que actúa tangencialmente al fluido, se conoce como esfuerzo cortante. La viscosidad es una propiedad que indica la resistencia que ofrece un fluido al movimiento relativo de sus moléculas. El coeficiente de viscosidad o simplemente viscosidad, es una medida de su resistencia al deslizamiento o a sufrir deformaciones internas. Por lo tanto, está vinculada a los esfuerzos de corte aplicados a los fluidos y a la velocidad de deformación. Retomando la ecuación 12 cuando Y tiende a cero, y usando la definición de derivada se puede escribir la expresión

$$\frac{F}{A} = \tau_{xy} = -\mu \frac{\partial v_x}{\partial y} \quad (13)$$

Esta última ecuación se denomina **Ecuación de Newton de la viscosidad**, ya que fue propuesta por primera vez por Isaac Newton. Los fluidos que cumplen esta ley se conocen como fluidos

Newtonianos. En la ecuación τ_{xy} , se conoce como el esfuerzo cortante. Los subíndices asociados a su notación tienen el siguiente significado.

x: Primer subíndice, indica la dirección del movimiento del fluido (coordenada x).

y: Segundo subíndice, indica la dirección de transferencia del movimiento (coordenada y).

El esfuerzo cortante τ_{xy} tiene unidades de fuerza por unidad de área, similares a presión, pero no es presión, la diferencia radica en los conceptos que explican en que formas están aplicadas las fuerzas.

En unidades del sistema internacional (S.I.) la ley se escribe:

$$\tau_{xy} = -\mu \frac{\partial V_x}{\partial y} \quad [\text{N/m}^2] \quad (14)$$

En el sistema Inglés

$$\tau_{xy} = -\frac{\mu}{gc} \frac{\partial V_x}{\partial y} \quad (\text{Lbf/ pie}^2) \quad (15)$$

Todos los fluidos que cumplen con la ley se llaman: fluidos Newtonianos. Todos los gases y la mayoría de los líquidos simples se comportan de acuerdo a esta ley. La forma transpuesta de la ecuación anterior sirve para definir la constante de proporcionalidad:

$$\mu \equiv -\frac{\tau_{xy}}{\frac{\partial V_x}{\partial y}} \quad (16)$$

Que se denomina **coeficiente de viscosidad** (μ), **viscosidad absoluta**, **viscosidad dinámica** (debido a que esta relacionada con la fuerza), o simplemente viscosidad del fluido. Las dimensiones de la viscosidad absoluta son fuerza por unidad de área. En el sistema internacional de unidades (SI), las unidades de viscosidad absoluta son las siguientes:

$$\text{Dimensiones de } \mu = \frac{\text{Dimensiones de } \tau}{\text{Dimensiones de } du/dy} = \frac{\text{N/m}^2}{\text{s}^{-1}} = \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} = \text{Pa s} = \frac{\text{kg}}{\text{m s}}$$

En el sistema británico de unidades, las unidades de viscosidad absoluta son las siguientes:

$$\text{Dimensiones de } \mu = \frac{\text{Lbf/pie}^2}{\text{pie/s}} = \frac{\text{Lbf s}}{\text{pie}^2}$$

Una unidad muy utilizada para la viscosidad en el sistema (CGS) es el poise (P), denominado así en honor a Jean Louis Poiseuille. El poise es igual a $1 \text{ g cm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ó $0,10 \text{ N s m}^{-2}$. El centipoise (cP) es igual a 0,01 Poise y es frecuentemente una unidad más cómoda. Tiene otra ventaja en cuanto que la viscosidad del agua a $68,4^\circ\text{F}$ es 1cP. Por tanto, el valor de la viscosidad en centipoise es una indicación de la viscosidad del fluido con respecto a la del agua a $68,4^\circ\text{F}$. Los fluidos newtonianos más comunes son: agua, aire, aceite, gasolina, alcohol, kerosene, benceno y glicerina.

En muchos problemas relacionados con la viscosidad, esta aparece dividida por la densidad. Esta relación se conoce como **viscosidad cinemática (v)**, así denominada por que la fuerza no esta involucrada en las dimensiones, quedando únicamente la longitud y el tiempo, como en cinemática. De esta forma:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\text{Centi Poise}}{\text{g}} = \frac{\frac{\text{g}}{\text{cm s}}}{\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} = [\text{Centi Stoke}]$$

La viscosidad cinemática se mide habitualmente en m^2s^{-1} en el sistema internacional y en $\text{pie}^2\text{s}^{-1}$ en el sistema británico de unidades. Anteriormente, las unidades utilizadas en el sistema (CGS) eran cm^2/seg , también denominado Stoke (St). El centistoke (cSt) ($0,01\text{St} = 10^{-6}\text{m}^2\text{s}^{-1}$) era la unidad más conveniente en muchas ocasiones.

Efectos de la presión y la temperatura sobre la viscosidad

La viscosidad absoluta de todos los fluidos es prácticamente independiente de la presión en el rango de valores que se encuentran en el campo de la ingeniería. La viscosidad cinemática de los gases varía con la presión debido a los cambios de densidad. La viscosidad de los vapores saturados o poco recalentados es modificada apreciablemente por cambios de presión, sin embargo los datos sobre vapores son incompletos y en algunos casos contradictorios, es por esto que cuando se trata de vapores distintos al de agua se hace caso omiso del efecto de la presión a causa de la falta de información adecuada.

En un líquido las moléculas tienen una movilidad limitada con fuerzas cohesivas grandes. Un aumento de la temperatura disminuye la cohesión entre moléculas (se apartan más) y decrece la viscosidad o “pegajosidad” del fluido. En un gas hay gran movilidad y muy poca cohesión, sin embargo las moléculas chocan y de aquí que se origina la viscosidad; al aumentar la temperatura la temperatura aumenta el movimiento aleatorio y por ende la viscosidad.

Tipos de fluidos por su comportamiento Reológico

La Reología es la ciencia que estudia la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos externos o más genéricamente estudia la respuesta de un fluido a los esfuerzos. Su estudio es esencial en muchas industrias, incluyendo las de plásticos, pinturas, alimentación, tintas de impresión, detergentes o aceites lubricantes, entre otras.

Hasta este punto hemos estudiado los fluidos **NEWTONIANOS** (debido a que cumplen con la ley de Newton de viscosidad), en los cuales el esfuerzo y la tasa de deformación del fluido se relacionaban mediante una ecuación lineal (Ec. 13). Sin embargo no todos los fluidos se comportan de esa forma, existe un grupo de fluidos que no cumplen con la ley de viscosidad del Newton y en consecuencia son denominados **NO NEWTONIANOS**.

Se tienen dos principales clasificaciones de los fluidos no newtonianos: independientes del tiempo y dependientes del tiempo. Como su nombre lo indica, los fluidos independientes del tiempo tienen una viscosidad, a cualquier tensión de corte, que no varía con el tiempo. La viscosidad de los fluidos dependientes del tiempo, sin embargo, cambiará con él.

Se pueden definir tres tipos de fluidos independientes del tiempo:

- **Pseudoplásticos:** La gráfica de la tensión de corte contra el gradiente de velocidad se encuentra por encima de la línea recta (Fig 7), de pendiente constante, correspondiente a los fluidos newtonianos. La curva inicia abruptamente, lo que indica una alta viscosidad aparente. Luego la pendiente disminuye al aumentar el gradiente de velocidad. Algunos ejemplos de este tipo de fluidos son el plasma sanguíneo, el polietileno fundido las suspensiones acuosas de arcilla.
- **Fluidos dilatantes:** La gráfica de la tensión de corte contra el gradiente de velocidad se encuentra por debajo de la línea recta correspondiente a los fluidos newtonianos. La curva empieza con una pendiente baja, lo que indica una baja viscosidad aparente. Luego la pendiente aumenta al aumentar el gradiente de velocidad. Algunos ejemplos de fluidos dilatadores son la fécula de maíz en etilenglicol, el almidón en agua y el dióxido de titanio.
- **Fluidos de Bingham:** En ocasiones conocidos como fluidos de tapón de flujo. Éstos requieren el desarrollo de un nivel significativo de tensión de corte antes de que empiece el flujo. Cuando empieza el flujo, se tiene una pendiente de la curva esencialmente lineal, lo cual indica una viscosidad aparente constante. Algunos ejemplos de fluidos de Bingham son el chocolate, la salsa de tomate, la mostaza, la mayonesa, la pasta dental, la pintura, el asfalto, algunas grasas y las suspensiones acuosas de ceniza de carbón o de sedimentos de aguas residuales.

La expresión matemática exacta para la relación del esfuerzo y la tasa de deformación varía de acuerdo al tipo de ajuste matemático realizado. Una de las de uso mas generalizado es la siguiente.

$$\tau_{xy} = k \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^n \quad (17)$$

Donde:

- $n > 1$ Fluido dilatante
- $n = 1$ Fluido Newtoniano
- $n < 1$ Fluido pseudoplástico
- k : Constante característica de cada fluido.

Por su parte la expresión matemática para los fluidos tipo Bingham es la siguiente

$$\tau_{xy} = \tau_0 + \mu_B \frac{\partial v}{\partial y} \quad (18)$$

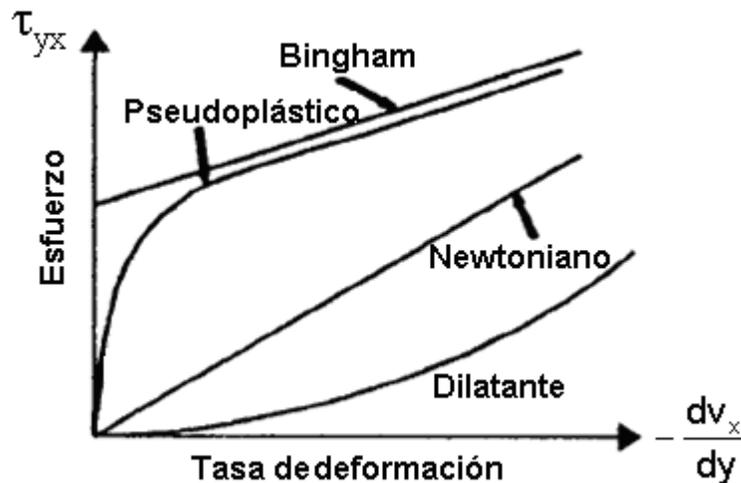


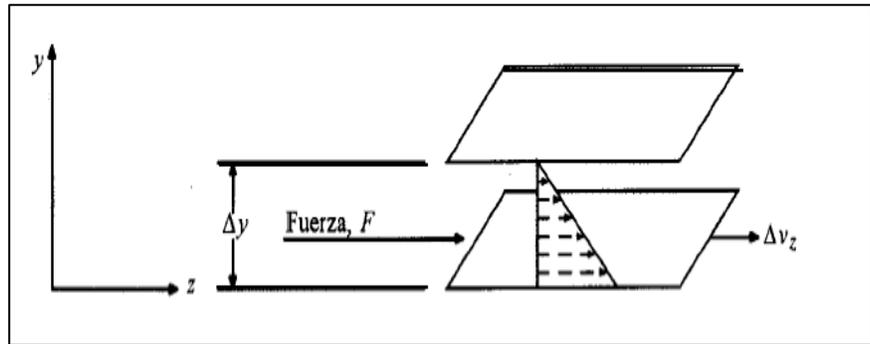
Figura 7. Diagrama reológico: fluidos independientes del tiempo.

Los fluidos dependientes del tiempo son:

- **Fluidos Tixotrópicos:** los cuales exhiben una disminución reversible de los esfuerzos cortantes con el tiempo cuando la velocidad de deformación es constante. Ejemplos: la manteca, algunas soluciones de polímeros, pintura y la tinta de impresión.
- **Fluidos Reopécticos:** Exhiben un aumento reversible del esfuerzo cortante con el tiempo, cuando la velocidad de deformación es constante.
- **Fluidos Viscoelásticos:** Exhiben una recuperación elástica de las deformaciones que se presentan durante el flujo, es decir muestran propiedades viscosas y elásticas. Los alimentos sólidos son en mayor o menor medida viscoelásticos.

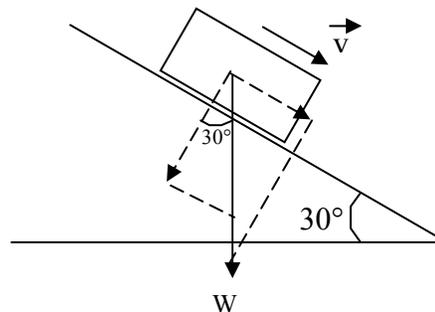
EJERCICIOS PROPUESTOS. LEY DE NEWTON DE LA VISCOSIDAD

1) Con referencia a la figura siguiente, la diferencia entre las dos placas paralelas es 0.00914 m y la placa inferior se desplaza a una velocidad relativa 0.366 m/s mayor que la superior. El fluido usado es aceite de linasa a 293 K.



- Calcule el esfuerzo cortante τ y la velocidad cortante en unidades de lb fuerza, pie y s.
- Repita en unidades del sistema internacional.
- Si se usa glicerina a 293 K, con viscosidad de 1.069 kg/m*s en lugar de aceite de linasa, ¿qué velocidad relativa se necesitará con la misma distancia entre las placas para obtener el mismo esfuerzo cortante en el inciso a)? Además, ¿cuál será la nueva velocidad cortante?

2) Un cuerpo pesa 120 lbf y tiene una superficie plana de 2,0 ft², el mismo se resbala sobre un plano lubricado que forma un ángulo de 30° con la horizontal. Si el lubricante tiene una viscosidad de 1,0 poise y el cuerpo se mueve a 3,0 ft/seg. Determine el espesor de la película de lubricante

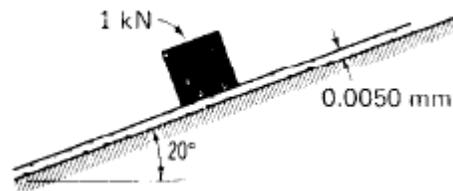


3) Una muestra de fluido esta entre dos platos paralelos separados por una distancia de 2mm. El área de los platos es de 100 cm². El plato inferior se encuentra fijo y el plato superior se mueve a una velocidad de 1cm/s cuando la fuerza aplicada es de 315dinas, y 5cm/s cuando la fuerza es de 1650dinas. Determinar:

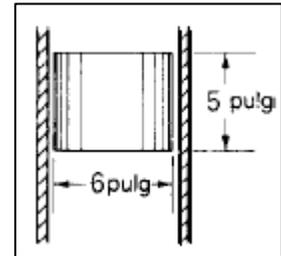
- Si el fluido es newtoniano
- ¿Cual es su viscosidad?

4) Un bloque de 1 kN de peso y 200 mm de lado se desliza hacia abajo en un plano inclinado sobre una película de aceite con un espesor de 0.0050 mm. Si se utiliza un perfil lineal de velocidades en el aceite, cuál es la velocidad terminal del bloque?

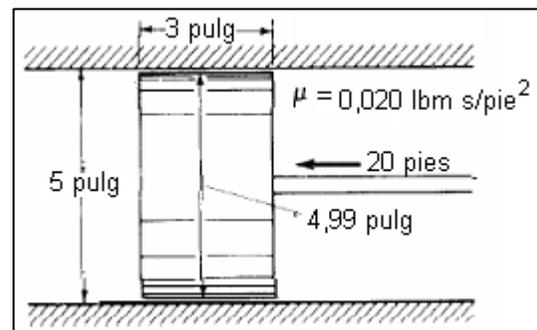
La viscosidad del aceite es 7×10^2 P.



5) Un cilindro de 20 lb de peso se desliza dentro de un tubo lubricado. La holgura entre el cilindro y el tubo es 0.001 pulg. Si se observa que el cilindro se desacelera a una tasa de 2 pies/s² cuando la velocidad es 20 pies/s, ¿cuál es la viscosidad del aceite? El diámetro del cilindro D es 6.00 pulg y la longitud L es 5.00 pulg.



6) Un émbolo se mueve a lo largo de un cilindro con una velocidad de 20 pie/s. La película de aceite que separa el émbolo del cilindro tiene una viscosidad de 0.020 lb s/pie². ¿Cuál es la fuerza que se requiere para mantener este movimiento?



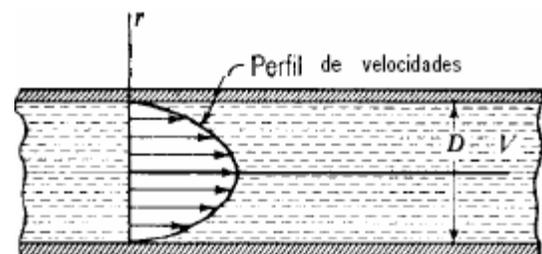
7) El agua corre a través de una tubería. El perfil de velocidad en una sección es como se muestra en la figura y matemáticamente está dado por donde β = una constante:

$$V = \frac{\beta}{4\mu} \left(\frac{D^2}{4} - r^2 \right)$$

Donde: β = una constante

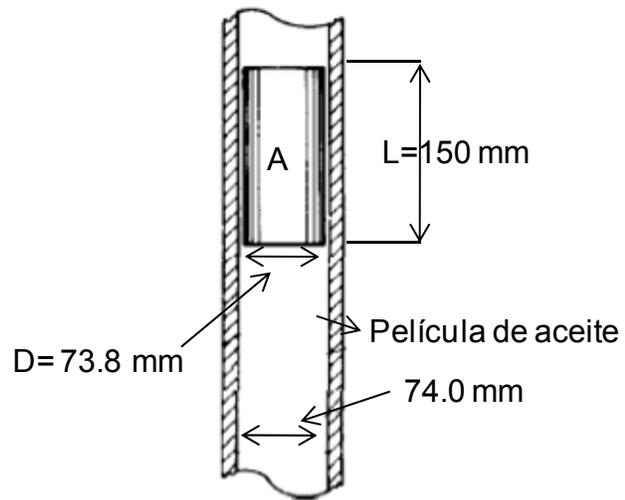
r = distancia radial desde la línea central

V = velocidad en cualquier posición r



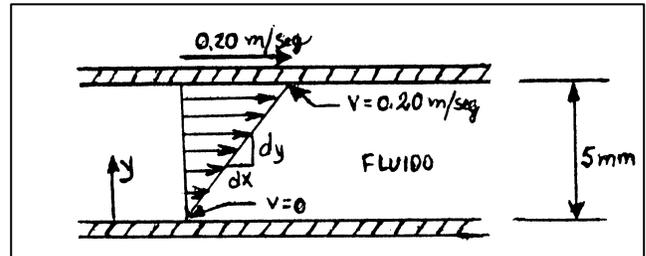
¿Cuál es el esfuerzo cortante sobre la pared de la tubería causado por el agua? ¿Cuál es el esfuerzo cortante en una posición $r = D/4$?; si en el perfil anterior persiste una distancia L a lo largo de la tubería, ¿qué arrastre se induce sobre la tubería por acción del agua en la dirección del flujo a lo largo de esta distancia?

8) Un cilindro sólido A de masa 2.5 kg se desliza hacia abajo dentro de un tubo, como se muestra en la figura. El cilindro es perfectamente concéntrico con la línea central del tubo con una película de aceite entre el cilindro y la superficie interna del tubo. El coeficiente de viscosidad del aceite es $7 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$. ¿Cuál es la velocidad *terminal* V , del cilindro, es decir, la velocidad constante final del cilindro? Ignore los efectos de presión del aire.



9) Una probeta rectangular, de área transversal $(0.1 \times 0.4) \text{ m}^2$, 0.9 m de longitud y $196000 \text{ N}/\text{m}^3$, resbala verticalmente a través de un ducto rectangular con una velocidad de 12 pie/s. La separación constante entre el ducto y la probeta es de 0,0254 plg y está lleno con un aceite de $5,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Encuentre la densidad del aceite.

10) Dos placas paralelas se encuentran separadas una distancia de 5 mm. Una de ellas se mueve a una velocidad constante de 0,20 m/s. Entre ambas placas se encuentra petróleo crudo ($s = 0,86$) y $1,95 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{seg}$, a una temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Se desea calcular la fuerza total ejercida sobre 1 m^2 de cada placa.



3. ESTÁTICA DE LOS FLUIDOS

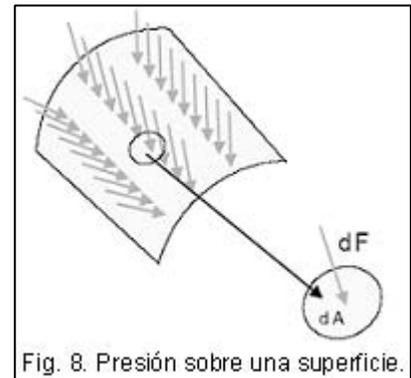
El término hidrostática se refiere al estudio de los fluidos en reposo. Los fluidos son sustancias, consideradas como un continuo de masa, donde su forma puede cambiar fácilmente por escurrimiento debido a la acción de fuerzas pequeñas. Si se analizan las fuerzas que pueden actuar sobre una porción de fluido, ellas pueden ser de dos tipos: causadas por agentes exteriores, típicamente por el peso de él y las causadas por el fluido que está en su exterior. Es conveniente distinguir la parte de esa última fuerza que actúa normal a la superficie, llamadas fuerzas debidas a la presión, de las fuerzas tangenciales o de viscosidad. Estas fuerzas tangenciales actuando sobre la superficie del elemento de fluido, no pueden ser equilibradas por fuerzas interiores, de modo que ellas causan escurrimiento del fluido. Si nos limitamos a fluidos en reposo, las fuerzas tangenciales no pueden existir. Ellas son relevantes en los casos donde los fluidos no están en equilibrio.

Definición de presión y unidades

En un fluido estático, una de las propiedades importantes es la presión del fluido. **La presión** se define como fuerza, dividida por el área sobre la cual se aplica. De esta manera, la presión (P) producida por una fuerza (E) distribuido sobre un área (A), se define como:

$$P = \frac{dF}{dA} \quad (19)$$

En procesos industriales existen variadas aplicaciones de medición de presión; entre estas aplicaciones se tienen: (1) Calidad del producto, la cual frecuentemente depende de ciertas presiones que se deben mantener en un



	14,7 Lbf pulg ⁻²
	2116 Lbf pies ⁻²
Unidades mas comunes para la presión atmosférica	29,92 pulg H ₂ O
	33,91 pies H ₂ O
	1 atm
	760 mmHg
	101325 Pa
	10,34 m H ₂ O

proceso; (2) Por seguridad, como por ejemplo, en recipientes presurizados donde la presión no debe exceder un valor máximo dado por las especificaciones de diseño; (3) En aplicaciones de medición de nivel, (4) En aplicaciones de medición de flujo, donde la diferencial de presión a través de una restricción es proporcional al cuadrado del flujo.

Distribución de presiones

Existen varias formas de expresar la presión. A continuación se presentan las de uso mas generalizado:

Presión Manométrica: Se define como la presión relativa a la presión atmosférica. Representa la diferencia positiva entre la presión medida y la presión atmosférica existente. Debe ser convertida a presión absoluta, sumándole el valor de la presión atmosférica actual.

Presión Absoluta: Es la suma de la presión manométrica más la presión atmosférica

Presión de Vacío: Es la presión medida por debajo de la presión atmosférica

Presión Diferencial: Es la diferencia en magnitud entre el valor de una presión y el valor de otra tomada como referencia. En el caso de la presión manométrica, se podría decir que ésta es una medida de presión diferencial en la cual la presión de referencia es la presión atmosférica.

Presión Hidrostática: Es la presión ejercida por una columna de líquido. Se calcula multiplicando la altura de la columna de líquido por la densidad o por la gravedad específica del líquido.

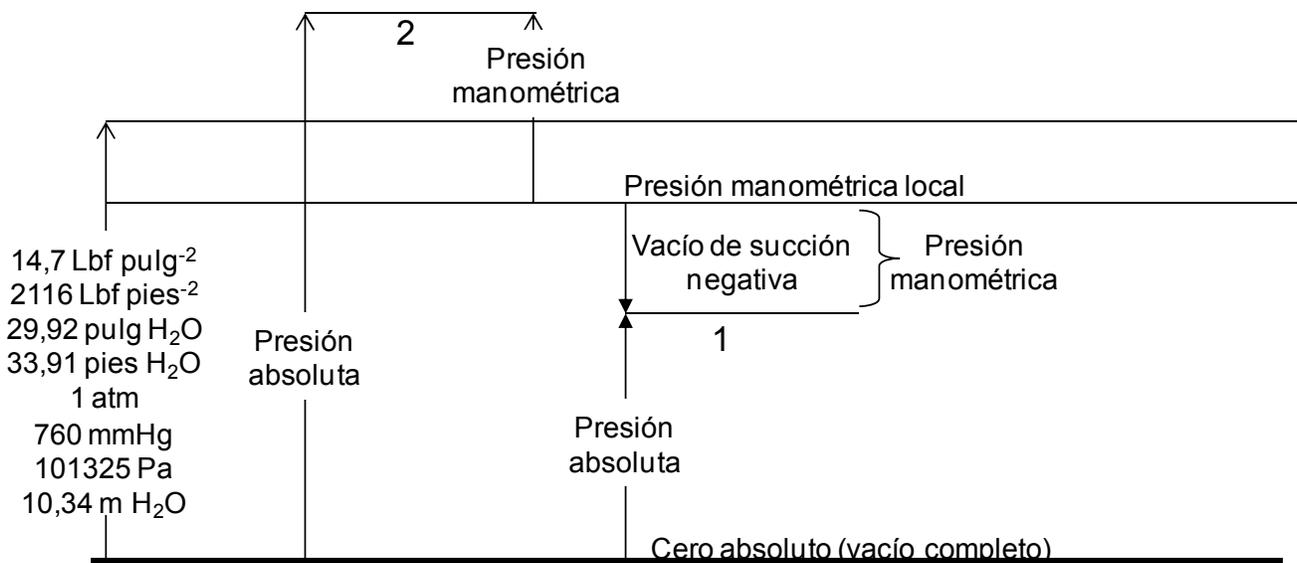


Fig. 11. Distribución de Presiones.

ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA HIDROSTÁTICA

Con la intención de deducir las ecuaciones que gobiernan a los fluidos en reposo, analicemos las fuerzas que actúan sobre un elemento diferencial de volumen ($\Delta x \Delta y \Delta z$) en el seno de un líquido estático (Fig.12).

Por estar en reposo, se debe cumplir que la sumatoria de las fuerzas que actúan sobre el cubo de líquido debe ser igual a cero en todas las direcciones.

$$\sum F_x = 0 \quad \sum F_y = 0 \quad \sum F_z = 0 \quad (20)$$

Haciendo un balance de fuerzas en cada una de las coordenadas (x, y, z), tenemos que:

Balance de fuerzas en x

$$(P\Delta y\Delta z)\Big|_x - (P\Delta y\Delta z)\Big|_{x+\Delta x} = 0 \quad (21)$$

Dividiendo por $\Delta x\Delta y\Delta z$

$$\frac{P\Big|_x - P\Big|_{x+\Delta x}}{\Delta x} = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad \text{Es decir que no hay variación de la presión en la coordenada x.}$$

De la misma forma para y

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad \text{Es decir que no hay variación de la presión en la coordenada y.}$$

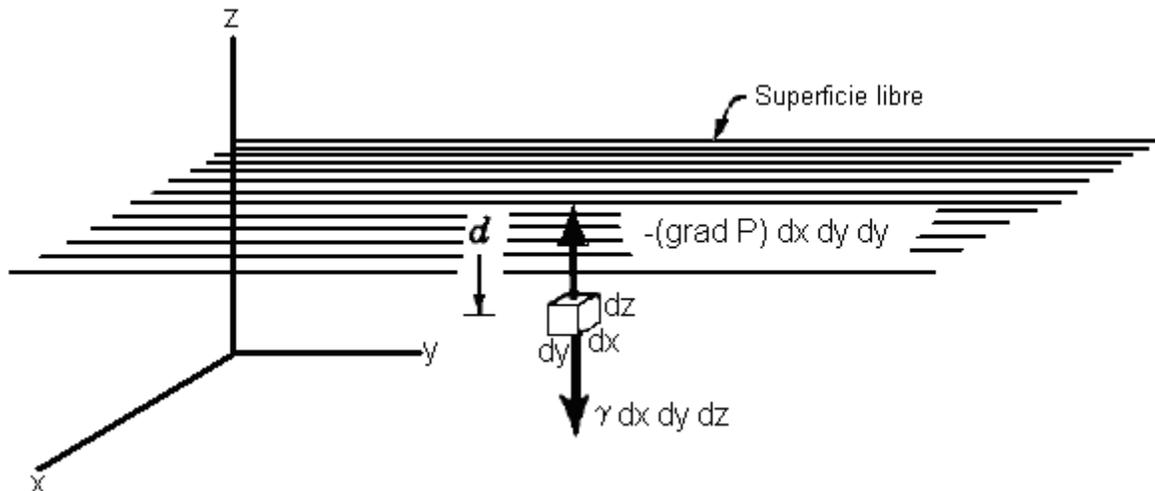


Fig 12. Distribución de presiones en un líquido en reposo.

Hasta ahora el balance de fuerzas indica que para un **fluido en reposo, la presión es la misma para la misma altura**. Realizando ahora el balance de fuerzas en z, las fuerzas involucradas son las mismas con el adicional del peso del fluido, lo cual se puede escribir como:

$$(P\Delta x\Delta y)\Big|_z - (P\Delta x\Delta y)\Big|_{z+\Delta z} - \rho\Delta x\Delta y\Delta z g = 0$$

Dividiendo por $\Delta x\Delta y\Delta z$

$$\frac{P\Big|_z - P\Big|_{z+\Delta z}}{\Delta z} - \rho g = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\gamma \quad (22)$$

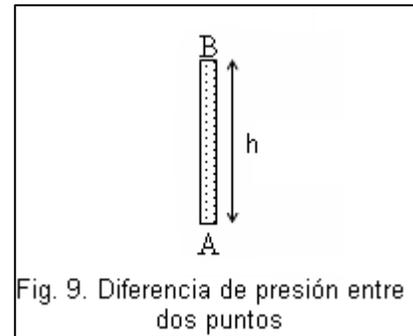
Esta Ecuación se conoce como la “**Ecuación Fundamental de la Hidrostática**” y escrita en forma vectorial queda expresada como:

$$\nabla P = -\gamma$$

Donde
$$\nabla P = \frac{\partial P}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial P}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial P}{\partial z} \hat{k}$$

La aplicación más común de la ecuación fundamental de la hidrostática es para el caso en el que la densidad del líquido es constante, en cuyo caso de la integración de la expresión anterior se obtiene:

$$P_A - P_B = \gamma(z_2 - z_1) = \gamma h = \rho g h \quad (23)$$



Paradoja de Pascal

Si se ponen en comunicación varias vasijas de formas diferentes como en la figura que sigue, se observa que el líquido alcanza el mismo nivel en todas ellas. A primera vista, debería ejercer mayor presión en su base aquel recipiente que contuviese mayor volumen de fluido.

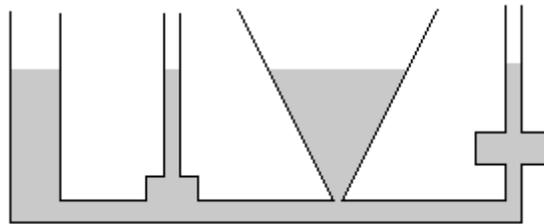


Fig. 10. Demostración de la paradoja de Pascal

La fuerza debida a la presión que ejerce un fluido en la base de un recipiente puede ser mayor o menor que el peso del líquido que contiene el recipiente, esta es en esencia la paradoja hidrostática. Como se ha demostrado, en la ecuación fundamental de la estática de fluidos, la presión solamente depende de la profundidad por debajo de la superficie del líquido y es independiente de la forma de la vasija que lo contiene. Como es igual la altura del líquido en todos los vasos, la presión en la base es la misma y el sistema de vasos comunicantes está en equilibrio.

En todos los casos, hemos de tener en cuenta que la fuerza que ejerce un fluido en equilibrio sobre una superficie debido a la presión es siempre perpendicular a dicha superficie.

Manometría y dispositivos para medir presión

Existen diversos aparatos para medir presión, solo se describirán aquellos que están basados en propiedades simples del equilibrio de columnas de fluidos. Los aparatos para medir la presión atmosférica se llaman barómetros, y los que miden presión en general se llaman manómetros.

- Manómetro diferencial Simple

Consta de un tubo transpirante en forma de U que lleva conectadas las ramas a los puntos entre los cuales quiere medirse la diferencia de presión. El tubo contiene fluido γ_1 que circula por la canalización y un fluido manométrico γ_2 más denso que aquel, e inmiscible con él.

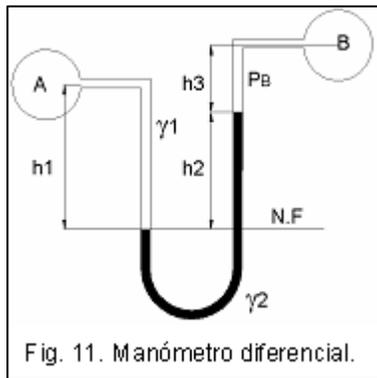


Fig. 11. Manómetro diferencial.

- Manómetro de pozo

En la figura se muestra otro tipo de manómetro, conocido como manómetro de pozo. Cuando se aplica una presión a un manómetro tipo pozo, el nivel de fluido en el pozo baja una pequeña distancia, mientras que el nivel en el brazo derecho sube una cantidad mayor, en proporción con el cociente de las áreas del pozo y del tubo. En el tubo se tiene una escala, de modo que la desviación

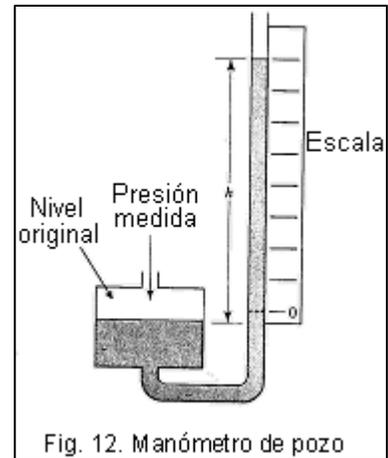


Fig. 12. Manómetro de pozo

puede leerse de manera directa. La escala está calibrada para tomar en cuenta la pequeña caída en el nivel del pozo.

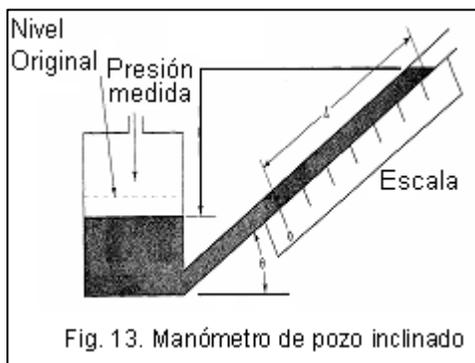


Fig. 13. Manómetro de pozo inclinado

El manómetro tipo pozo inclinado, que se presenta en la figura siguiente, tiene las mismas características que el tipo pozo, pero ofrece una mayor sensibilidad al colocar la escala a lo largo del tubo inclinado. La longitud de la escala aumenta como una función del ángulo de inclinación, θ , del tubo. Por ejemplo, si el ángulo θ en la figura) es de 15, el cociente de la longitud de la escala, L, y la desviación del manómetro, h, es:

- Manómetro diferencial de dos líquidos

Consta de un tubo en U transparente que contiene dos líquidos inmiscibles M1 y M2 de diferencia de densidades pequeña. En los extremos del tubo U hay dos ensanchamientos de sección suficiente

para que al desplazarse los niveles de separación de los líquidos manométricos se conserven prácticamente constantes los niveles entre líquido manométrico y el fluido que circula por la canalización.

- **Manómetro Bourdon**

Es típico de los dispositivos usados para la medición de presión manométrica. El elemento de presión es un tubo metálico hueco, curvo y plano, cerrado en un extremo; al otro extremo se conecta a la presión a medirse. Cuando aumenta la presión interna, el tubo tiende a enderezarse jalando una articulación a la cual se ha fijado una aguja indicadora, causando su movimiento. La carátula da una lectura igual a cero cuando el interior y exterior del tubo están a la misma presión sin importar su valor particular. La carátula puede graduarse con cualquier tipo de unidades, siendo las más comunes pascales, libras por pulgada cuadrada, libras por pie cuadrado, pulgadas de mercurio, pies de agua, centímetros de mercurio y milímetros de mercurio. Debido a las características de su construcción, el medidor mide la presión relativa a la presión del medio que rodea al tubo, que es la atmósfera local.

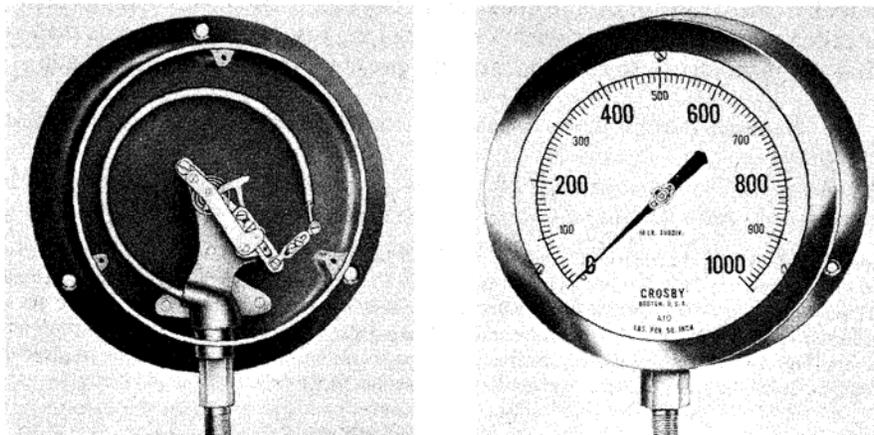
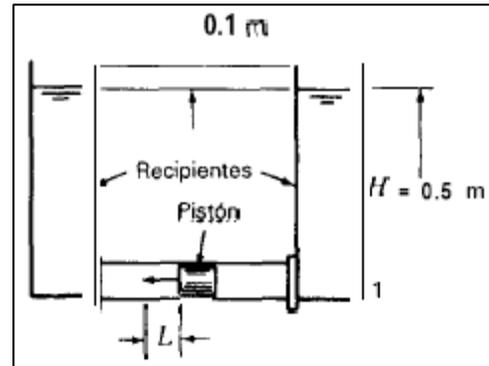


Fig. 14. Manómetros Bourdon.

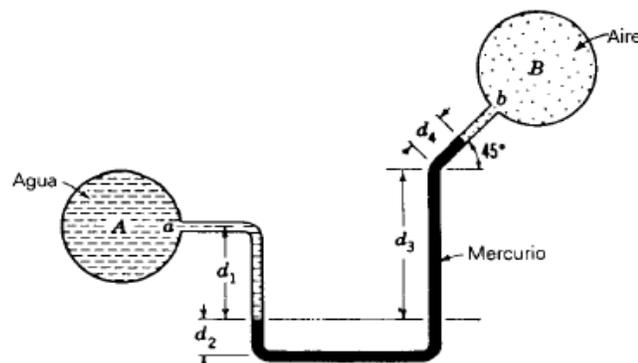
EJERCICIOS PROPUESTOS. MANOMETRÍA

1) Dos recipientes iguales, cada uno de ellos abierto a la atmósfera, se encuentran inicialmente llenos con el mismo líquido ($\rho = 700 \text{ kg/m}^3$) hasta el mismo nivel H . Los dos recipientes están conectados mediante una tubería en la cual se desliza lentamente un pistón sin fricción con sección transversal $A = 0.05 \text{ m}^2$. ¿Cuál es el trabajo hecho por el agua sobre el pistón al moverse una distancia $L = 0.1 \text{ m}$? La sección transversal de cada recipiente es el doble de la sección de la tubería.

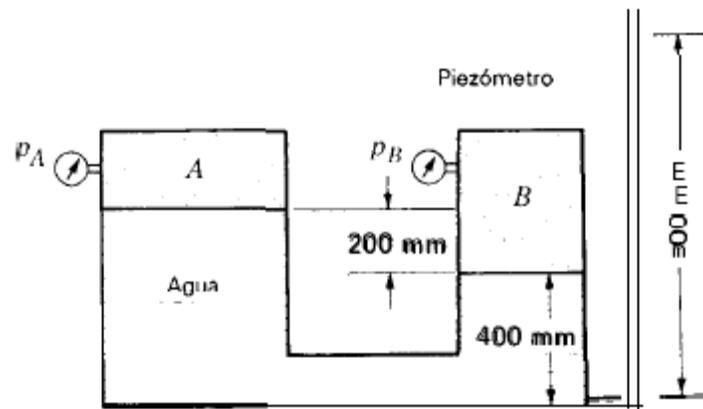


2) Resuelva el problema anterior para el caso cuando los recipientes se encuentren cerrados y el aire por encima de la superficie libre se encuentra a una presión manométrica p_0 de 200 kPa. El aire se expande isoentrópicamente en el recipiente del lado derecho y se comprime isotérmicamente en el recipiente del lado izquierdo. $R = 287 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{kg})(\text{K})$.

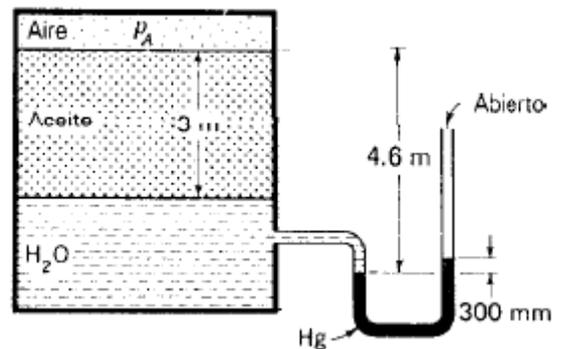
3) Encuentre la diferencia de presión entre los tanques A y B si $d_1 = 300 \text{ mm}$, $d_2 = 150 \text{ mm}$, $d_3 = 460 \text{ mm}$, $d_4 = 200 \text{ mm}$ y $D.R._{\text{Hg}} = 13,6$.



4) Un tubo abierto se conecta a un tanque. El agua sube hasta una altura de 900 mm dentro del tubo. Un tubo utilizado en esta forma se conoce como un piezómetro. ¿Cuáles son las presiones p_A y p_B del aire por encima del agua? Ignore los efectos capilares en el tubo.

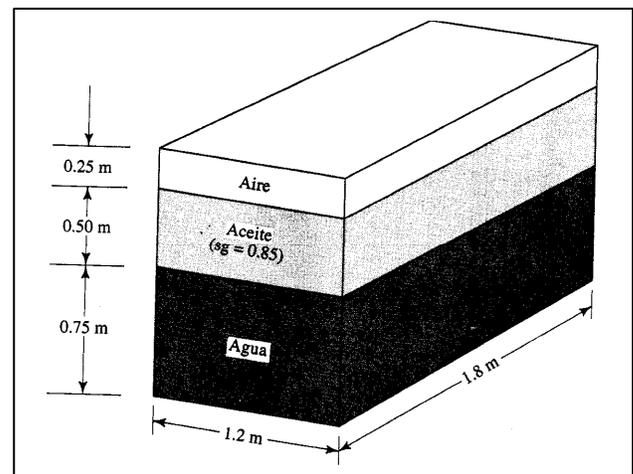


5) ¿Cuál es la presión p_A sabiendo que la densidad relativa del aceite es 0.8?

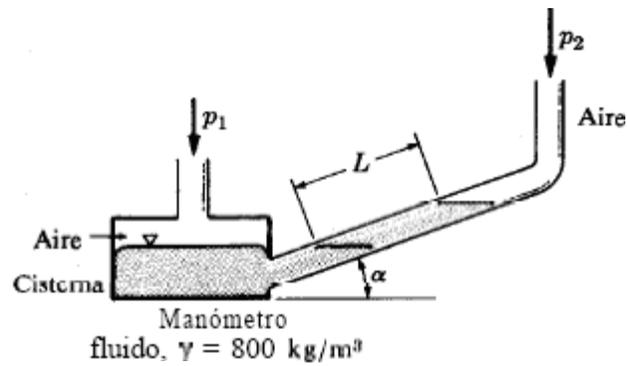


6) Un manómetro sencillo de tubo en U se instala a través de un medidor de orificio. El manómetro se llena con mercurio (densidad relativa = 13,6) y el líquido situado por encima del mercurio es tetracloruro de carbono (densidad relativa = 1,6). La lectura del manómetro es 200 mm. ¿Cuál es la diferencia de presión en el manómetro expresada en newton por metro cuadrado?

7) En la figura siguiente se muestra un recipiente cerrado que contiene agua y aceite. Por encima del aceite hay una presión de aire a 34 kPa por debajo de la presión atmosférica. Calcule la presión en el fondo del contenedor en kPa(gage).



8) La longitud de la columna de líquido para una presión diferencial dada, es aumentada inclinando el brazo del manómetro. Para el manómetro mostrado en la figura la razón de los diámetros de la cisterna al tubo del manómetro es 10:1. Determine el ángulo α si la verdadera presión diferencial es 12 kgf/cm^2 cuando $L = 30 \text{ cm}$, donde L es medida desde la posición de presión cero del fluido en el manómetro, en el tubo inclinado.



9) Para el manómetro que se muestra en la figura, calcular $P_A - P_B$.

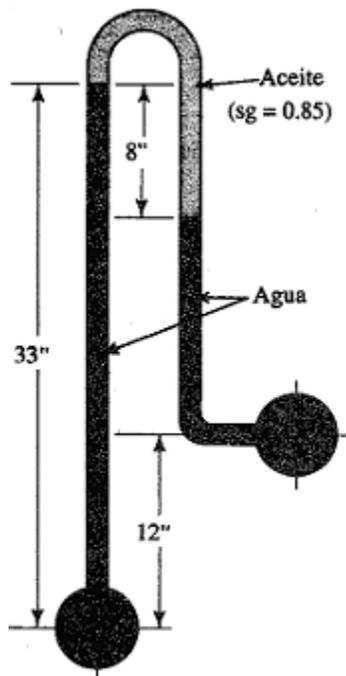


Fig. Problema 3.2

11) Para el tanque que se muestra en la figura, determine la lectura, en lb/puig^2 relativa, en el medidor de presión que está en el fondo si la parte superior del tanque está abierta a la atmósfera y la profundidad, h , del tanque es de 28.50 pies.

10) En la figura siguiente, inicialmente hay una lectura del manómetro de 6 in. La presión atmosférica es 14,70 psia. Si la presión absoluta en A se multiplica por 2, ¿cuál será la lectura manométrica?

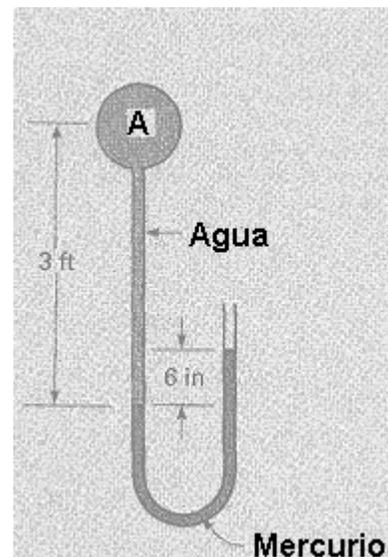


Fig. Problema 3.3

3.7.- En la figura se muestra un tanque cerrado que contiene gasolina flotando en agua. Calcule la presión de aire por encima de la gasolina.

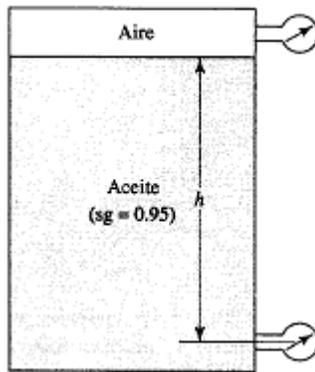


Fig. Problema 3.6

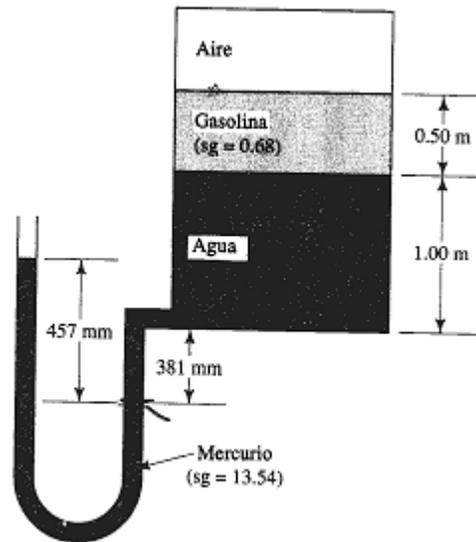


Fig. Problema 3.7

11) Determine la intensidad de la presión en A, si la presión en B es de 1.4 kg/cm^2 .

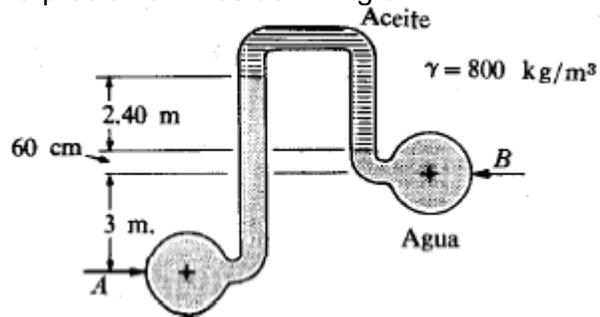


Fig. Problema 3.4