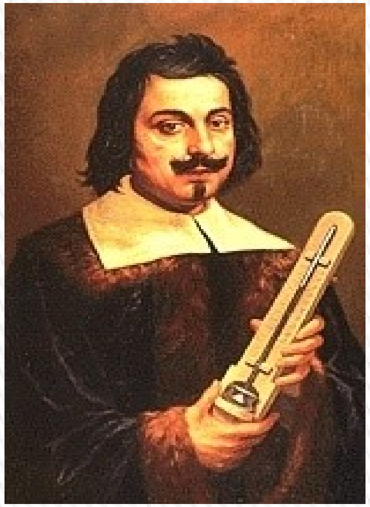
23- FLUIDOS REALES

Arquímedes
-288 Siracusa,
-212 muerto por un soldado romano en el sitios a Siracusa.
“Eureka, eureka! “

Blaise Pascal
19/6/1623, Francia.
Muere en 1662.
Matemático, físico, filósofo y teólogo.
Inventó una máquina para sumar, la prensa hidráulica y la jeringa.

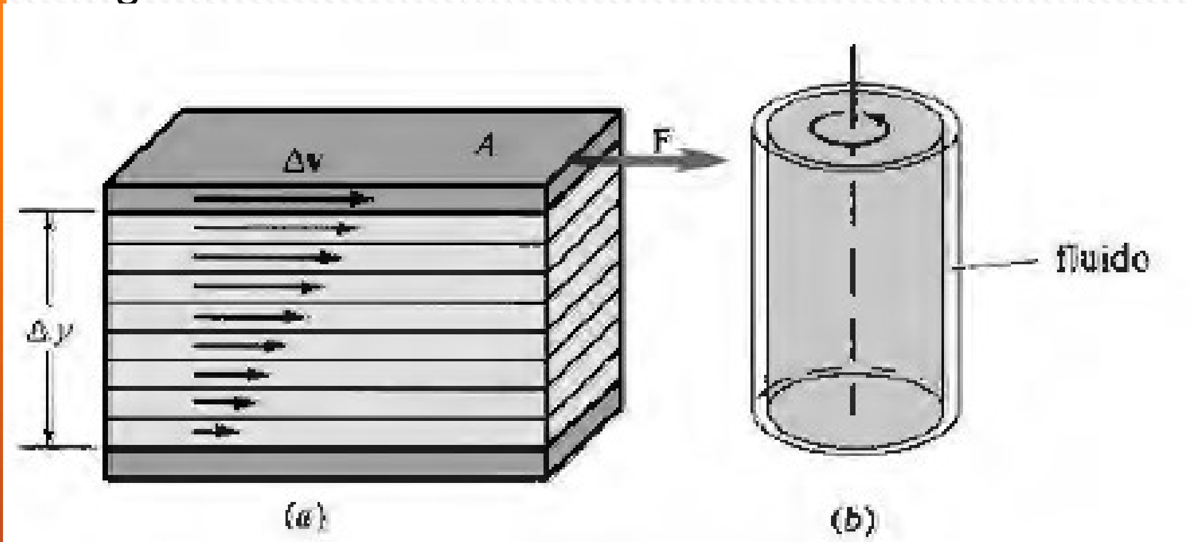


Evangelista Torricelli
15/10/1608, Florencia. .
Muere en 1662.
Físico y matemático.
Inventó el barómetro.

Daniel Bernoulli
8/2/1700, Basilea.
Muere en 1782.
Físico , médico y matemático.

VISCOSIDAD

Los **fluidos reales** al moverse siempre experimentan ciertos efectos debidos a **fuerzas de rozamiento** o **fuerzas viscosas**.
Cuando el trabajo realizado contra estas fuerzas disipativas es comparable al trabajo total realizado sobre el fluido o al cambio de su energía mecánica, la ecuación de Bernoulli no puede utilizarse.
Por ejemplo, la ecuación de Bernoulli puede dar una descripción adecuada del flujo de la sangre en las arterias mayores de los mamíferos, pero no en los conductos sanguíneos más estrechos.



La figura muestra dos placas planas separadas por una delgada capa de fluido.
Si la placa inferior se mantiene fija, se ha de ejercer una fuerza para mover la placa superior con velocidad constante.

Esta fuerza se necesita para contrarrestar las fuerzas viscosas debidas al líquido, y es mayor para líquidos muy viscosos, tales como la melaza, que para fluidos poco viscosos, como el agua.

VISCOSIDAD

Se observa que la fuerza *F es proporcional al área* de las placas *A y a la velocidad de la placa superior Δv,* e inversamente proporcional a la separación entre las placas *Δy*

$$F = \eta A \frac{\Delta v}{\Delta y}$$

La constante de proporcionalidad η *(eta) se denomina* **viscosidad**.
Según esta ecuación, las dimensiones de la viscosidad son:

$$[\eta] = \left[\frac{F/A}{\Delta v/\Delta y}\right] = \frac{MLT^{-2}/L^2}{LT^{-1}/L} = ML^{-1}T^{-1}$$

La unidad S.I. de viscosidad es: 1 kg/(m. S) = 1 Pa.s (pascal.segundo).
También es equivalente a 1 N.s/m^2.
Se usa además como unidad de viscosidad el **poise,** (por el científico francés J. L. Poiseuille 1799-1869).
Relación entre las unidades SI de viscosidad y el poise es: 1 poise= 10^{-1} N·s/m^2

Esta definición de viscosidad corresponde a la denominada **viscosidad dinámica o absluta.** También se define la **viscosidad cinemática**, como el cociente de la viscosidad dinámica dividida la densidad, cuya unidad en el S.I. es el m^2/s.
Otra unidad de la viscosidad cinemática es el stoke 1St¨= 10^{-4} m^2/s

VISCOSIDAD

Valores típicos de la viscosidad en pascales-segundo (Pa-s)

Temperatura, °C	Aceite de castor	Agua	Aire	Sangre normal*	Plasma sanguíneo*
0	5,3	$1{,}792 \times 10^{-3}$	$1{,}71 \times 10^{-5}$		
20	0,986	$1{,}005 \times 10^{-3}$	$1{,}81 \times 10^{-5}$	$3{,}015 \times 10^{-3}$	$1{,}810 \times 10^{-3}$
37	—	$0{,}6947 \times 10^{-3}$	$1{,}87 \times 10^{-5}$	$2{,}084 \times 10^{-3}$	$1{,}257 \times 10^{-3}$
40	0,231	$0{,}656 \times 10^{-3}$	$1{,}90 \times 10^{-5}$		
60	0,080	$0{,}469 \times 10^{-3}$	$2{,}00 \times 10^{-5}$		
80	0,030	$0{,}357 \times 10^{-3}$	$2{,}09 \times 10^{-5}$		
100	0,017	$0{,}284 \times 10^{-3}$	$2{,}18 \times 10^{-5}$		

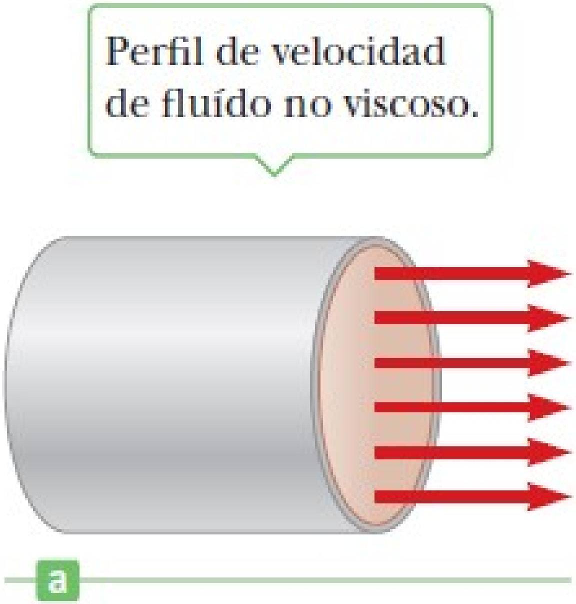
* Las viscosidades relativas (η/η_{agua} de la sangre y del plasma permanecen casi constantes a temperaturas comprendidas entre 0° C y 37° C.

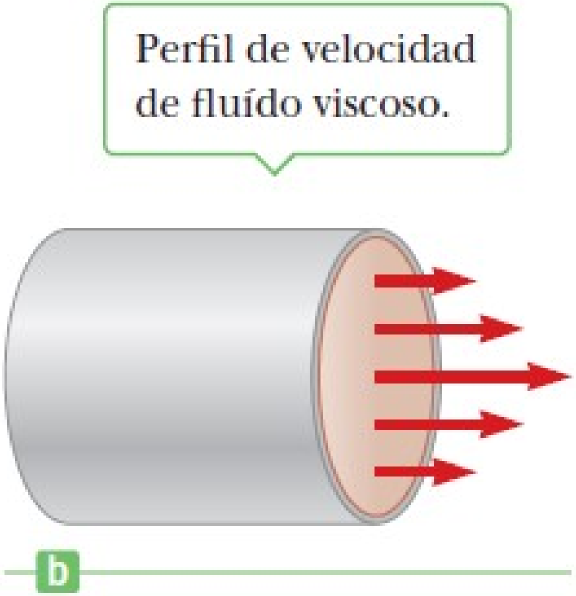
En la tabla se dan algunas viscosidades típicas. En general, cuando la temperatura disminuye los líquidos se vuelven más viscosos, como se observa fácilmente en el aceite de los motores, la miel y otros fluidos viscosos. En cambio, los gases son cada vez menos viscosos a medida que baja la temperatura.

Como en general las fuerzas viscosas son pequeñas, los fluidos se utilizan a menudo como lubricantes para disminuir el rozamiento.

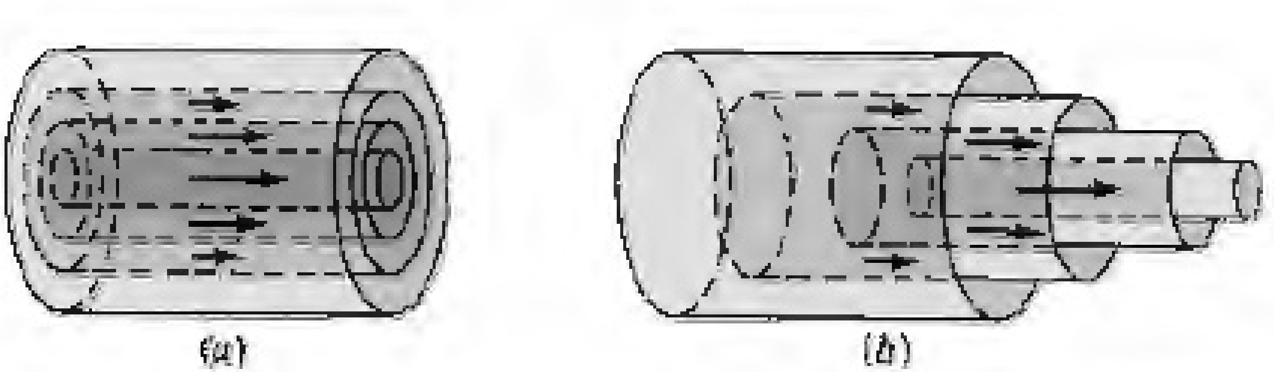
FLUJO LAMINAR

Un fluido viscoso tiende a adherirse a una superficie sólida que está en contacto con ella.
Siempre hay una *capa de frontera* delgada de fluido cerca de la superficie, en la que el fluido está casi en reposo con respecto a ella.
La capa vecina a la tubería inferior está parada
La capas siguientes van aumentando su rapidez, a medida que se alejan de las paredes alcanzando su máximo en el centro. .
Esta estructura de capas o ***flujo laminar*** ***se presenta en los fluidos viscosos a baja velocidad***.
Cuando la velocidad del fluido aumenta mucho, el flujo cambia de carácter y se vuelve ***turbulento***.
En general, el flujo turbulento es indeseable ya que disipa más energía mecánica que el flujo laminar.
Aviones y automóviles se diseñan de forma que el flujo de aire en sus proximidades sea lo más laminar posible. Asimismo, en la naturaleza el flujo sanguíneo en el sistema circulatorio es normalmente laminar en vez de turbulento.



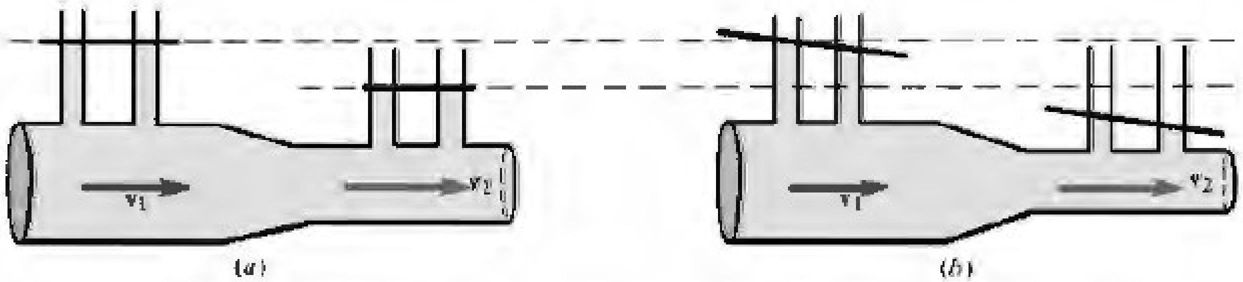


FLUJO LAMINAR



Consideremos un fluido que se mueve por un tubo con velocidad suficientemente baja para que el flujo sea laminar.

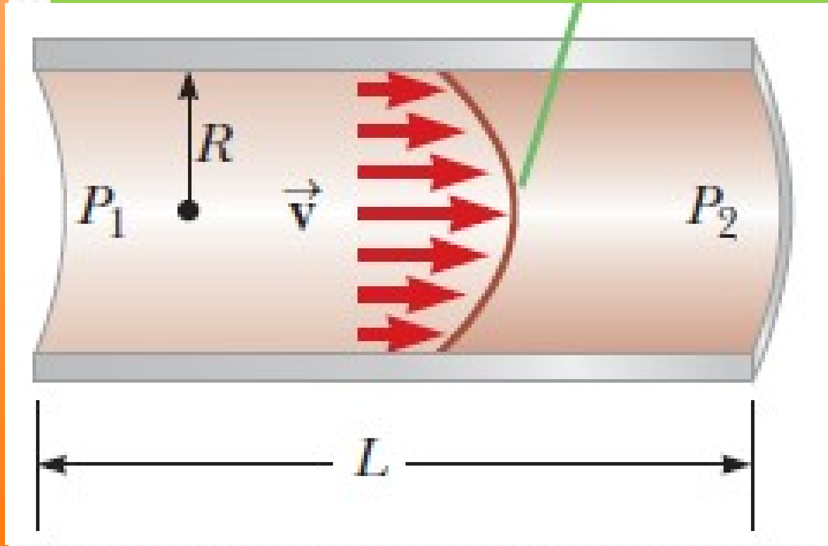
El fluido tiene la máxima velocidad $v_{máx}$ *en* el centro. La velocidad media es la mitad de dicha velocidad, es decir, $v_{med} = v_{máx}/2$, *y, según* la ecuación de continuidad, el gasto (caudal) viene dado por $Q = Av_{med} = Av_{máx} / 2$



En un tubo horizontal de sección transversal constante, la ecuación de continuidad implica que la v_{med} *sea constante .*

Sin embargo, la presión disminuye a medida que el fluido avanza por el tubo. Esto se debe a que ha de hacerse trabajo para contrarrestar las fuerzas viscosas. Si la sección transversal varía o si el tubo no es horizontal, se producen cambios adicionales de presión de acuerdo con la ecuación de Bernoulli, como se muestra en la figura.

FLUJO LAMINAR



La caída de presión $\Delta P = P_1 - P_2$ *a lo largo de un* tubo horizontal de sección transversal constante es proporcional a las fuerzas viscosas y, por lo tanto, a la velocidad media del fluido. Además, la caída de presión es proporcional a la longitud del tubo, ya que el trabajo realizado contra las fuerzas viscosas es proporcional al desplazamiento.

Entonces $\Delta P \propto v_{med} L$ ó $v_{med} \propto \Delta P / L$.

Por lo tanto la velocidad media v_{med} *y el gasto del fluido* $Q = A.v_{med}$ *son proporcionales al gradiente de presión* $\Delta P / L$.

La velocidad media depende de otros factores: es más fácil bombear fluido a lo largo de un tubo ancho que a lo largo de un tubo estrecho, y es más fácil bombear un fluido poco viscoso que uno bastante viscoso.

Así pues, v_{med} *ha de depender* también del radio *R del tubo y de la viscosidad* η.

Se puede probar que:

$$v_{med} = \frac{\Delta P R^2}{8\eta L}$$

$$Q = \frac{\Delta P \pi R^4}{8\eta L}$$

ley de Poiseuille

FLUJO LAMINAR

Ley de Poiseuille: el gasto *Q* aumenta si se incrementa la diferencia de presión en el tubo *ΔP* o si aumenta el radio *R* de éste y disminuye si aumenta la viscosidad del fluido η y/o la longitud *L* de la tubería.

$$Q = \frac{\Delta P \pi R^4}{8 \eta L}$$

Como el gasto es proporcional a R^4 implica, por ejemplo, que en los conductos sanguíneos pequeñas variaciones de los radios pueden producir grandes cambios en el gasto. Por ejemplo, al pasar de *R a 1,19R se tiene un aumento en el gasto de* $(1,19)^4 = 2$.

- La viscosidad de la sangre aumenta si se incrementa el número de glóbulos rojos en la sangre; si esto sucede, se requiere una mayor presión de bombeo del corazón para mantenerla en circulación que cuando la concentración es menor.
- El gasto varía con el radio del tubo elevado a la cuarta potencia, si hay una reducción en una vena o en una arteria, el corazón tendrá que trabajar considerablemente más para producir un mayor descenso de presión, y, por lo tanto, para mantener el gasto necesario.

Esta relación explica el vínculo entre una dieta alta en colesterol (que tiende a reducir el diámetro de las arterias) y una presión arterial elevada.
Debido a la dependencia R^4, incluso un leve estrechamiento de las arterias puede elevar considerablemente la presión arterial y forzar el músculo cardiaco.

FLUJO TURBULENTO

a) Baja rapidez: flujo laminar

b) Alta rapidez: flujo turbulento

La ley de Poiseuille se cumple solamente para flujos laminares.

Sin embargo, frecuentemente el flujo no es laminar, sino turbulento, y se parece entonces a la estela de una lancha rápida, con torbellinos y remolinos.

En las figuras se muestran algunos ejemplos de flujo turbulento.

La disipación de energía mecánica es en general mucho mayor en el flujo turbulento que en el laminar. Por lo tanto, a menudo resulta deseable asegurar que el flujo no se haga turbulento.

Es mucho más dificil estudiar el flujo turbulento que el flujo laminar.

Por ejemplo, la ley de Poiseuille para el gasto en un tubo cilíndrico en régimen laminar no tiene ningún análogo para el flujo turbulento.

En la práctica, el flujo turbulento se trata mediante diversas reglas empíricas y relaciones obtenidas tras muchos estudios experimentales.

Para poder determinar cuándo el flujo es laminar o turbulento utilizaremos una de estas reglas empíricas

FLUJO TURBULENTO

El valor de una magnitud adimensional denominada ***número de Reynolds N_R***
determina si el flujo es laminar o turbulento.
Consideremos un fluido de **densidad ρ** *y* ***viscosidad*** η .
Si fluye por un **tubo de diámetro D** *y tiene una* **velocidad media v_{med}**
entonces el número de Reynolds se define como:

$$N_R = \frac{2\rho v_{med} R}{\eta} = \frac{\rho v_{med} D}{\eta}$$

En los *tubos se ha hallado experimentalmente que para:*

N_R < 2000 — *el flujo es laminar*
N_R > 3000 — *el flujo es turbulento*
2000< N_R < 3000 — *el flujo es inestable* (puede pasar de laminar a turbulento o viceversa)

El número de Reynolds indica también si el flujo alrededor de un obstáculo, como la proa de un barco o el ala de un avión, es turbulento o laminar.
En general, el número de Reynolds al que aparece la turbulencia depende mucho de la forma del obstáculo y no viene dado por la ecuación anterior.

Ejemplos: Ejercicio 7.12 y 7.13

FUERZAS DE ARRASTRE VISCOSAS

Si sacamos la mano por la ventanilla de un vehículo en marcha habremos observado que un objeto que se mueve en un fluido experimenta una fuerza que aumenta con la velocidad.

A velocidades muy bajas, esta *fuerza de resistencia o arrastre se debe principalmente* a las fuerzas viscosas y es proporcional a la velocidad *v*.
***A velocidades mayores, pero aún relativamente* bajas, el objeto acelera el fluido que se mueve en sus proximidades, y la fuerza varía aproximadamente como v^2.**

Consideramos las ***fuerzas de arrastre** a bajas velocidades*, o ***fuerzas de arrastre viscosas.***

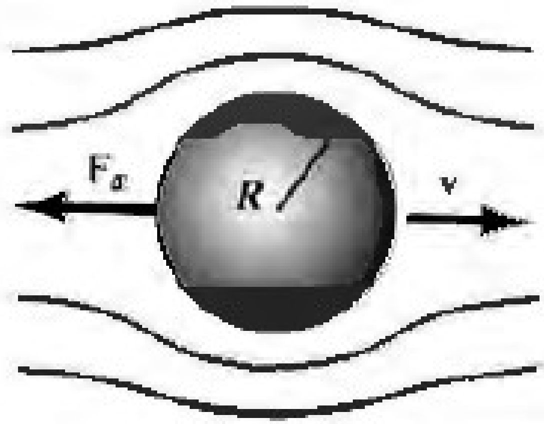
Las fuerzas de arrastre viscosas se deben a que la capa de fluido adyacente a un objeto se halla en reposo con respecto a dicho objeto. Cuando el objeto se mueve a través del fluido, esta capa experimenta una fuerza de rozamiento con respecto a la capa contigua de fluido, que se mueve rápidamente.

Las sucesivas capas próximas al objeto producen fuerzas de rozamiento unas respecto de otras y el resultado neto es una fuerza que frena el movimiento del objeto en el fluido.

Dada la proporcionalidad directa que se ha observado a bajas velocidades entre la fuerza y la velocidad, se puede obtener la forma general de dicha ley de fuerza a bajas velocidades mediante análisis dimensional.

FUERZAS DE ARRASTRE VISCOSAS

La condición básica bajo la cual la fuerza de arrastre tiene la forma que obtendremos es que el objeto se mueva muy lentamente en el fluido y que el correspondiente número de Reynolds sea muy pequeño.



La figura muestra un objeto esférico de radio *R que se mueve con una pequeña velocidad v a través* de un fluido de viscosidad η *y densidad* ρ_0.
El resultado es que la fuerza de arrastre viscosa sobre un objeto ha de ser de la forma:

$$F_a = \phi R v \eta$$

ϕ es una constante adimensionada, y que para una **esfera** vale $\phi = 6\pi$

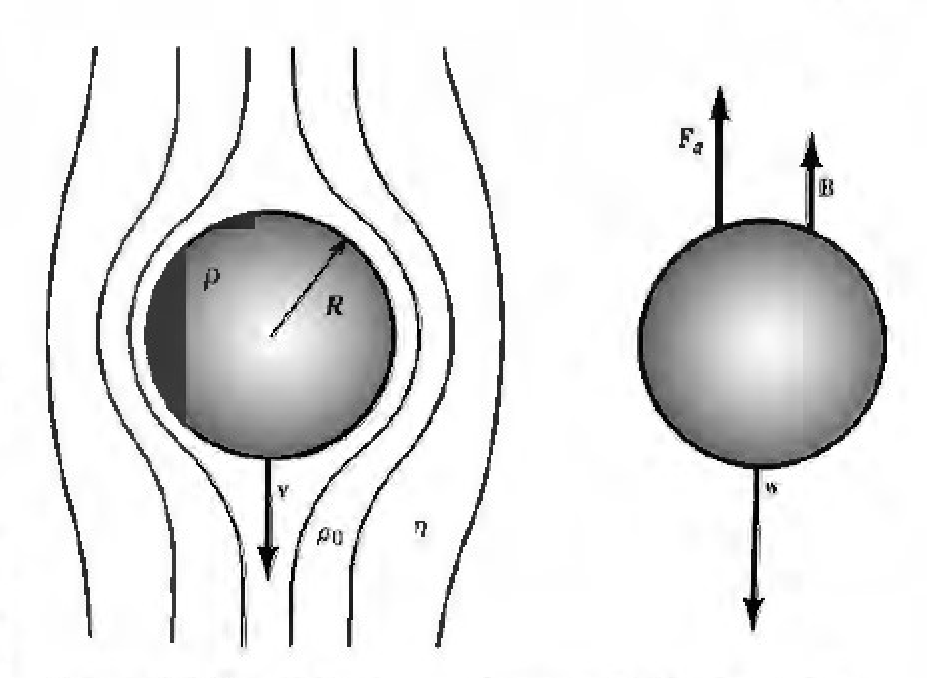
Este resultado es válido cuando la velocidad es suficientemente pequeña.
En términos del número de Reynolds para una esfera dé radio *R, la condición es* que $N_R < 1$.
Si N_R *es igual o mayor que 1**, la fuerza de arrastre pasa a ser proporcional*** a $\mathbf{v^2}$
Ello ocurre a velocidades muy por debajo del umbral de la turbulencia y se debe, a la energía cinética que se comunica al fluido. Para una esfera:

$$F_a = 6\pi R v \eta$$

Ley de Stokes

Para formas complicadas, se puede seguir usando la ecuación , pero ϕ se ha de determinar experimentalmente y *R ha de interpretarse* como alguna longitud característica del objeto, como por ejemplo el radio medio de un glóbulo rojo.

FUERZAS DE ARRASTRE VISCOSAS



A veces resulta posible obtener información sobre la forma o el ·tamaño de un objeto pequeño si se determina la fuerza de arrastre que experimenta en su movimiento.
Para dar un ejemplo de cómo se utiliza la ley de Stokes, calculamos la **velocidad máxima o límite v_T** de una pequeña esfera de radio *R y densidad ρ que cae a través* de un fluido de viscosidad η *y densidad ρ_0*

La velocidad límite se alcanza cuando la fuerza de arrastre *F_a es contrarrestada exactamente por el peso* ***w*** *y el empuje* **B.**
El volumen de la esfera es *$V= 4\pi R^3/3$ y su peso es $w = \rho g V$.*
La fuerza de empuje hacia arriba es igual al peso del fluido desalojado *$B = \rho_0 g V$*
Según la ley de Stokes, la fuerza viscosa de arrastre a la velocidad límite es
$F_a= 6\pi R v_T \eta$.
Entonces la velocidad límite v_T se alcanza cuando *$F_a = w - B$, o sea*

$$6\pi R v_T \eta = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho g - \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_0 g$$

FUERZAS DE ARRASTRE VISCOSAS

$$6\pi R v_T \eta = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho g - \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_0 g$$

despejando la velocidad límite v_T :

$$v_T = \frac{2}{9}\frac{R^2}{\eta} g(\rho - \rho_0)$$

Si se miden *R y v_r, esta ecuación proporciona una forma* de hallar la viscosidad del fluido.

La ecuación para la velocidad límite sólo vale para objetos muy pequeños, tales como partículas de polvo en el aire o macromoléculas en solución.
Para objetos mayores, la velocidad límite predicha por esta ecuación corresponde a un número de Reynolds mucho mayor que 1, de modo que la ley de Stokes no es aplicable.

Por ejemplo, para una esfera de 1 cm de radio en aire, N_R = ***1*** *cuando v=1,5 mm/s.* Así pues, el arrastre a «altas velocidades» se aplica esencialmente a todos los problemas en que interviene el movimiento de objetos macroscópicos

FUERZAS DE ARRASTRE VISCOSAS

La fórmula para la fuerza de arrastre a altas velocidades para una esfera en un fluido también puede hallar utilizando el análisis dimensional.
Se supone que la fuerza es proporcional a v^2, a potencias desconocidas del radio de la esfera *R, de la viscosidad del fluido* η *y* de la densidad del fluido ρ_0.
El resultado es:

$$F_a = C_D A \frac{\rho_0 v^2}{2}$$

C_D es el coeficiente de arrastre que se obtiene experimentalmente

Este resultado es válido para objetos de cualquier forma.
Los valores de C_D están tabulados.

FUERZAS DE ARRASTRE VISCOSAS

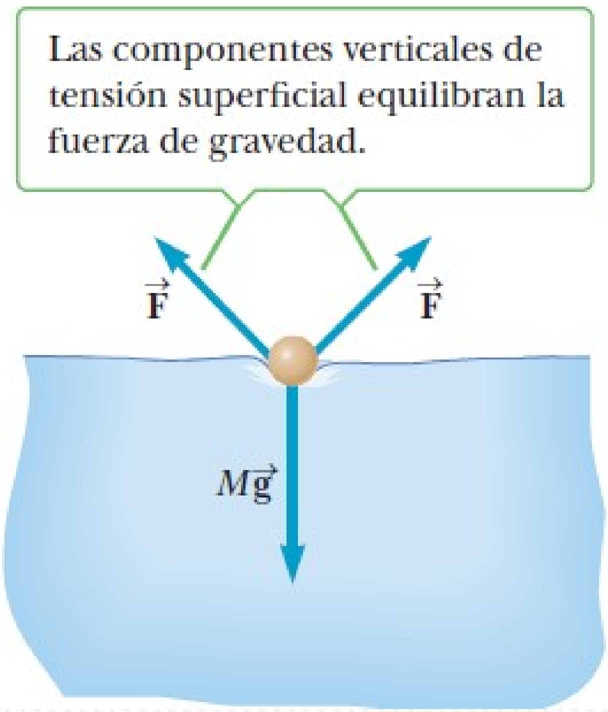
Type of Object	Drag Coefficient - c_d -	Frontal Area
Laminar flat plate (Re=106)	0.001	
Dolphin	0.0036	wetted area
Turbulent flat plate (Re=106)	0.005	
Subsonic Transport Aircraft	0.012	
Supersonic Fighter,M=2.5	0.016	
Streamlined body	0.04	π / 4 d2
Airplane wing, normal position	0.05	
Sreamlined half-body	0.09	
Long stream-lined body	0.1	
Bicycle - Streamlined Velomobile	0.12	5 ft^2 (0.47 m^2)
Airplane wing, stalled	0.15	
Modern car like a Tesla model 3 or model Y	0.23	
Toyota Prius, Tesla model S	0.24	frontal area
Tesla model X		
Sports car, sloping rear	0.2 - 0.3	frontal area
Common car like Opel Vectra (class C)	0.29	frontal area
Hollow semi-sphere facing stream	0.38	
Bird	0.4	frontal area
Solid Hemisphere	0.42	π / 4 d2
Sphere	0.5	
Saloon Car, stepped rear	0.4 - 0.5	frontal area
Bike - Drafting behind an other cyclist	0.5	3.9 ft^2 (0.36 m^2)
Convertible, open top	0.6 - 0.7	frontal area
Bus	0.6 - 0.8	frontal area
Old Car like a T-ford	0.7 - 0.9	frontal area
Cube	0.8	s2
Bike - Racing	0.88	3.9 ft^2 (0.36 m^2)
Bicycle	0.9	
Tractor Trailed Truck	0.96	frontal area
Truck	0.8 - 1.0	frontal area
Person standing	1.0 – 1.3	
Bike - Upright Commuter	1.1	5.5 ft^2 (0.51 m^2)
Thin Disk	1.1	π / 4 d2
Solid Hemisphere flow normal to flat side	1.17	π / 4 d2
Squared flat plate at 90 deg	1.17	
Wires and cables	1.0 - 1.3	
Person (upright position)	1.0 - 1.3	
Hollow semi-cylinder opposite stream	1.2	
Ski jumper	1.2 - 1.3	
Hollow semi-sphere opposite stream	1.42	
Passenger Train	1.8	frontal area
Motorcycle and rider	1.8	frontal area
Long flat plate at 90 deg	1.98	
Rectangular box	2.1	

Ejemplo: ejercicio 7.14

FUERZAS DE COHESIÓN EN LÍQUIDOS

Los líquidos también tienen una fuerte tendencia a mantenerse intactos.
Al igual que en los sólidos, la cohesión de los líquidos se debe a las fuerzas de atracción entre las moléculas. Debido a estas atracciones, los líquidos presentan superficies bien definidas que, como las membranas estiradas o las cintas de goma, tienden a presentar un área mínima.
Esta propiedad de las superficies de los líquidos es la llamada **tensión superficial**.

Los insectos pueden avanzar encima del agua porque su peso es contrarrestado por la resistencia de la superficie a la deformación.

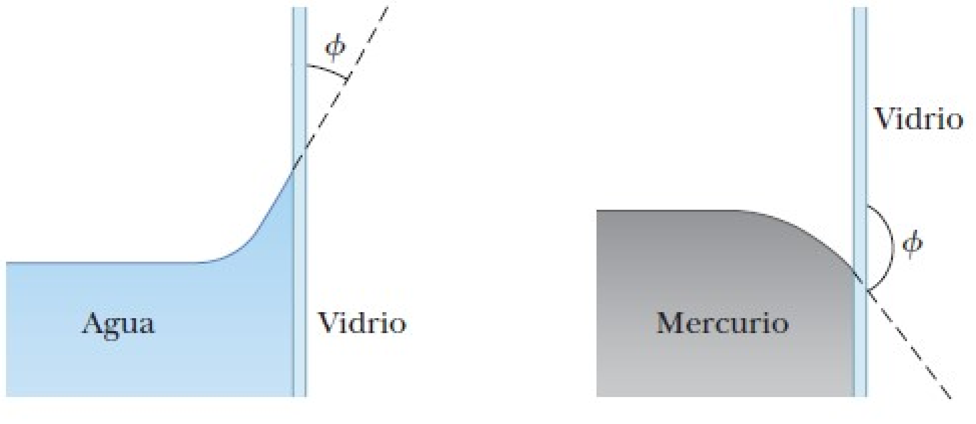


Si, con cuidado, se coloca una aguja sobre la superficie de un tazón de agua, se verá que la aguja flota aún cuando la densidad del acero sea unas ocho veces más que la del agua.
Este fenómeno puede explicarse por la tensión superficial. Un examen minucioso de la aguja muestra que en realidad se apoya en una depresión de la superficie del líquido.

FUERZAS DE COHESIÓN EN LÍQUIDOS

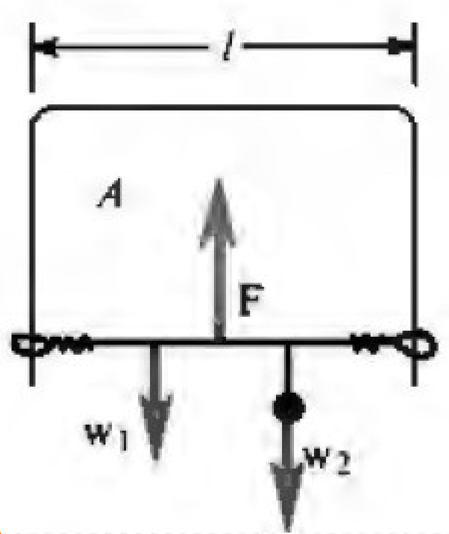
Además de las fuerzas atractivas entre ellas, las moléculas de los líquidos experimentan fuerzas atractivas o repulsivas con las moléculas de otras sustancias. Las fuerzas entre moléculas semejantes, por ejemplo las fuerzas entre moléculas de agua, se llaman **fuerzas de cohesión** y las fuerzas entre moléculas diferentes se llaman **fuerzas de adherencia.**

Para el agua, la fuerza de adhesión es mayor que la fuerza de cohesión. Para el mercurio, la fuerza de adhesión es menor que la fuerza de cohesión. Por esto, el agua sube en las proximidades de una superficie vertical de vidrio, mientras que al mercurio le sucede lo contrario.



Las propiedades cohesivas de los líquidos pueden alterarse mediante la adición de pequeñas cantidades de otras sustancias.
Por ejemplo, las moléculas de los aceites son ***hidrófobas*** *(enemigas del agua) y los aceites* no se disuelven en agua pura.
Las moléculas de los jabones y detergentes tienen una parte hidrófoba y una parte ***hidrófila*** *(amiga del agua). La parte hidrófila se* orienta hacia la superficie del agua y la parte hidrófoba rodea el aceite o la grasa.
Ello contribuye a la disolución y supresión del aceite y de la grasa.

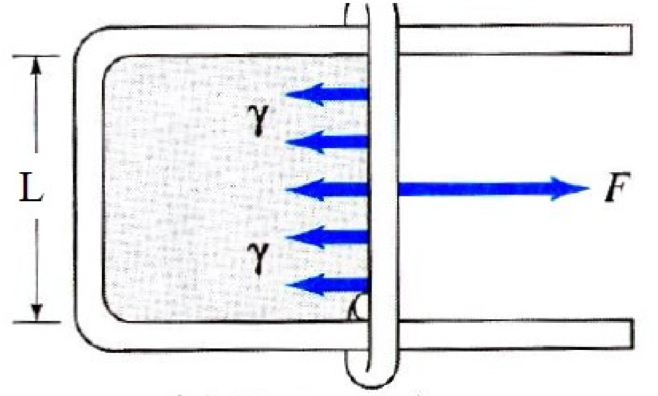
TENSIÓN SUPERFICIAL



Una forma de observar los efectos de la tensión superficial es mojar en un líquido un aparato como el que se muestra en la figura, que consiste en un alambre en forma de U, un alambre deslizante de peso w_1 y un peso colgante w_2.
Una película delgada de líquido llena el área comprendida entre los alambres. Si el peso total $w = w_1 + w_2$ *se escoge adecuadamente, las* dos superficies de la película ejercen una fuerza F igual y opuesta al peso, y el alambre deslizante .permanece en reposo. En esta situación la fuerza *F debida* a la tensión superficial es igual en módulo a *w.*

La ***tensión superficial*** γ ***se define como la fuerza*** **por unidad de longitud ejercida por** ***una de las superficies.***
Entonces, si el alambre recto de la figura tiene una longitud L, lá fuerza neta hacia arriba debida a las dos superficies es $F = 2\gamma L$.
Por lo tanto, la tensión superficial es:

$$\gamma = \frac{F}{2L}$$



(a) Vista superior
(b) Vista lateral (amplificada)

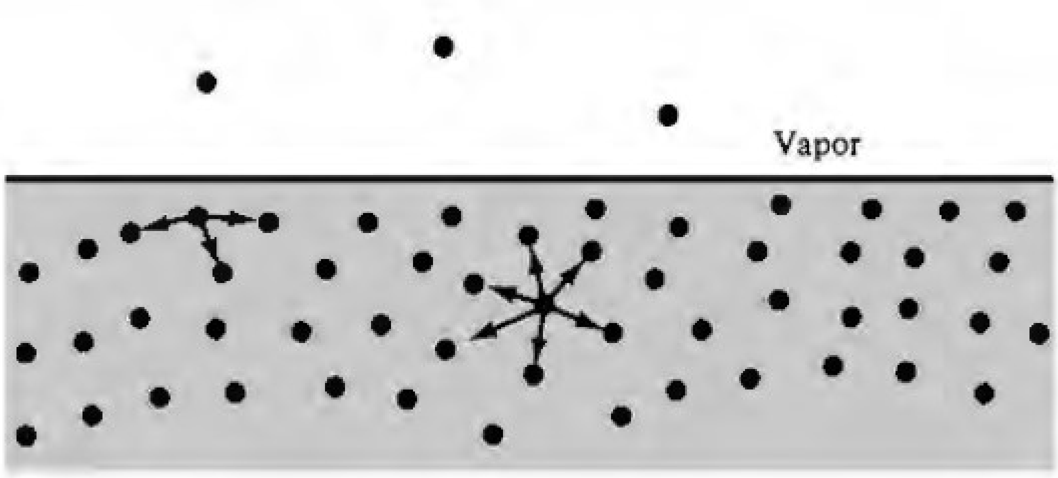
En la tabla siguiente se dan ·algunos valores representativos de la tensión superficial.

TENSIÓN SUPERFICIAL

Tensión superficial de algunos líquidos representativos en contacto con el aire

Líquido	Tensión superficial ($N\ m^{-1}$)	Temperatura (0 °C)
Alcohol etílico	$2{,}23 \times 10^{-2}$	20
Aceite de oliva	$3{,}20 \times 10^{-2}$	20
Glicerina	$6{,}31 \times 10^{-2}$	20
Agua	$7{,}56 \times 10^{-2}$	0
	$7{,}28 \times 10^{-2}$	20
	$6{,}62 \times 10^{-2}$	60
	$5{,}89 \times 10^{-2}$	100
Mercurio	0,465	20
Plata	0,800	970
Oro	1,000	1070
Cobre	1,100	1130
Oxígeno	$1{,}57 \times 10^{-2}$	−193
Neón	$5{,}15 \times 10^{-3}$	−247

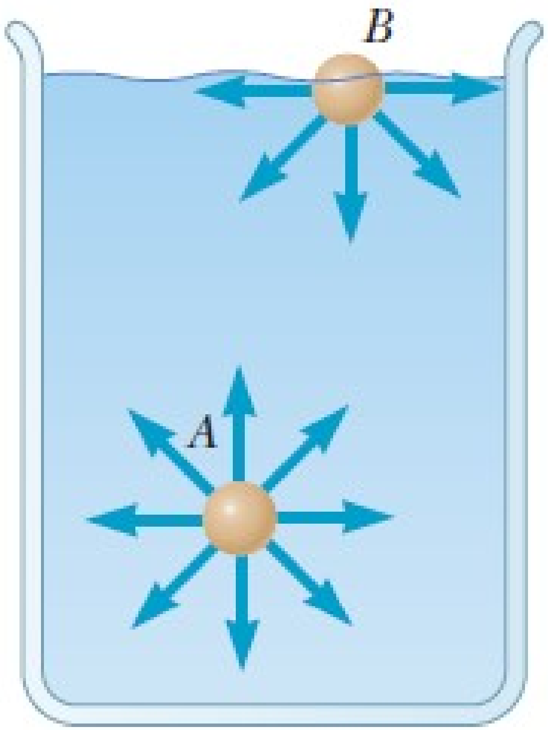
TENSIÓN SUPERFICIAL



Veamos por qué las fuerzas se atribuyen a las superficies.
Si el aparato se halla en equilibrio y el alambre deslizante se desplaza hacia arriba o hacia abajo, se halla de nuevo en equilibrio en cada posición, aunque el grosor de la película haya cambiado.

Por tanto el espesor de la película no tiene importancia.
Si la película se estira, las moléculas del fluido se desplazan hacia la superficie y el área de ésta aumenta. Como la fuerza permanece constante en tanto que el espesor de la película varía, la fuerza se ha de atribuir a la superficie de ésta.
Podemos comprender la causa de este comportamiento con la ayuda de una imagen microscópica de la superficie de separación entre un líquido y su vapor.
Una molécula en el interior del líquido experimenta fuerzas atractivas debidas a todas sus vecinas, lo ·cual hace disminuir su energía potencial.
Una molécula en la superficie no tiene tantas vecinas, y su energía potencial no es tan baja. Por consiguiente, las moléculas de la superficie se disponen de forma que tengan el máximo número posible de vecinas.
En este proceso, hacen mínima el área de la superficie y la energía potencial y producen la tensión superficial observada.

TENSIÓN SUPERFICIAL

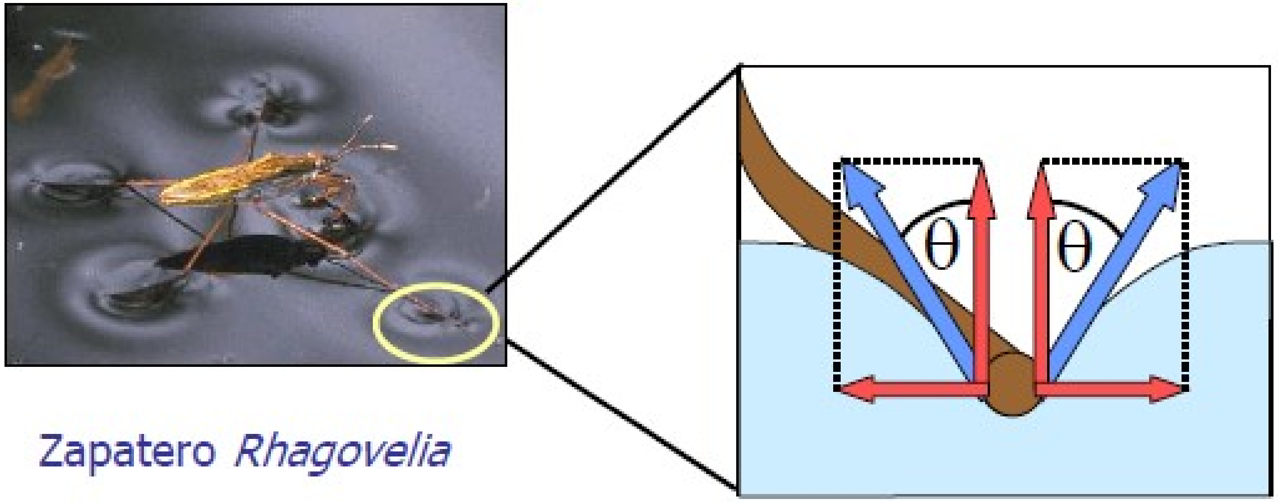


Consideremos una molécula en el punto *A en un recipiente de agua, como en la figura.*
Aún cuando las moléculas cercanas ejercen fuerzas sobre esa molécula, la fuerza neta sobre ella es cero porque está completamente rodeada por otras moléculas y es atraída por igual en todas direcciones. La molécula en *B, sin embargo, no es atraída igualmente en todas direcciones. Ya* que no hay moléculas encima que ejerzan fuerza hacia arriba, la molécula en *B es atraída* hacia el interior del líquido.

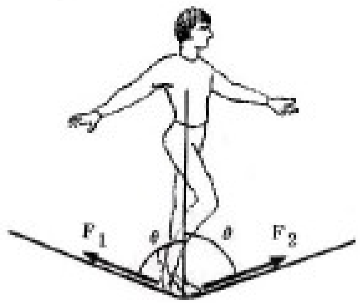
La contracción en la superficie del líquido cesa cuando la atracción hacia adentro ejercida sobre las moléculas de la superficie queda balanceada por las fuerzas de repulsión hacia fuera que surgen por colisiones con moléculas del interior del líquido.
El efecto neto de esta atracción sobre todas las moléculas de la superficie es hacer que la superficie del líquido se contraiga y, en consecuencia, forme un área del líquido tan pequeña como sea posible.
Las gotas de agua toman una forma esférica porque una esfera tiene la mínima área supericial para contener un volumen dado.

TENSIÓN SUPERFICIAL

Ejemplo biológico: andando sobre el agua



Zapatero *Rhagovelia*



equilibrista

El peso del insecto queda compensado por la resistencia de la superficie del agua a ser deformada, igual que le ocurre al equilibrista.
Esta fuerza sólo tiene componente vertical, pues la horizontal se anula:

componente vertical: $F_y = 2\pi r\gamma \cos\theta$ $\quad$ ($\times$ número de patas)

donde r es el radio de la depresión circular que forma la pata sobre la superficie (bastante grande pues las patas están muy extendidas).
Hojas y flores también pueden flotar aunque sean más densas que el agua.

Ejemplo: ejercicio 7.15