

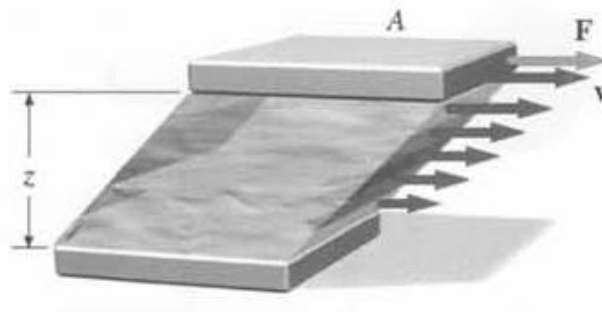
## TEMA 9. FLUIDOS VISCOSOS

### 1. Noción de viscosidad

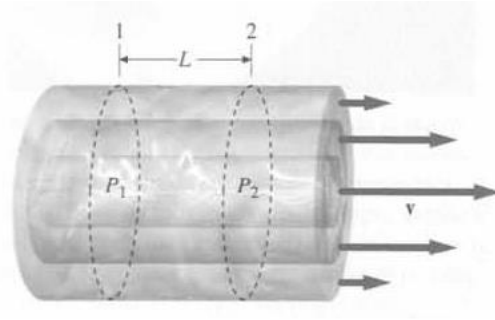
La primera referencia al concepto de viscosidad se debe a Newton, cuando en su obra "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica" afirma que la resistencia ejercida a raíz de una falta de deslizamiento en un fluido es proporcional a la velocidad con la que las partes del fluido se separan entre sí. De este modo, se establece la proporcionalidad existente entre el esfuerzo por unidad de área necesario para producir una variación (gradiente) de velocidades en un fluido, siendo la constante de proporcionalidad un factor que describe "la capacidad de deslizamiento de un fluido". Dicha constante de proporcionalidad es a lo que más tarde se llamaría viscosidad.

La viscosidad puede considerarse el rozamiento interno de un fluido. Todos los fluidos reales tienen una resistencia interna al flujo, la cual puede verse como fricción entre las moléculas del fluido. Tanto los gases como los líquidos presentan viscosidad, aunque los líquidos son mucho más viscosos que los gases. En el caso de los líquidos, la viscosidad se debe a las fuerzas de cohesión de corto alcance y en los gases, se debe a los choques entre las moléculas.

Por eso es necesario ejercer una fuerza para hacer que una capa líquida se deslice sobre otra, o para hacer que una superficie se deslice sobre otra cuando hay una capa de líquido entre ambas, creando lo que se llama una **cizalladura** o variación de la velocidad con la altura.



Cuando un fluido viscoso fluye por una tubería, su velocidad es mayor en el centro de la tubería. Próximo a las paredes de la misma, el fluido tiende a permanecer en reposo.



$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad \text{proporcional al caudal.}$$

$$\Delta P = \underbrace{Av}_{\text{caudal}} \cdot R$$

R = resistencia al flujo.

Se define el **coeficiente de viscosidad**  $\eta$ :

$$F = \eta \frac{A v}{z}$$

Donde F es la fuerza para desplazar una placa respecto a otra en un fluido confinado entre dos placas paralelas de superficie A.

Las dimensiones SI de  $\eta$ :

$$[\eta] = Pa \cdot s$$

Una unidad de uso común es el **poise**:

$$1 \text{ poise} = 0,1 Pa \cdot s$$

*Valores de viscosidad para diversos materiales.*

Líquido	Viscosidad aproximada (Pa-s)
Vidrio fundido(500°C)	$10^{12}$
Bitumen	$10^8$
Polímeros fundidos	$10^3$
Jarabes	$10^2$
Miel líquida	$10^1$
Glicerol	$10^{-1}$
Aceite de oliva	$10^{-2}$
Agua	$10^{-3}$
Aire	$10^{-5}$

De acuerdo con lo explicado, podemos definir lo que se conoce como **fluido newtoniano**. Un fluido newtoniano es aquel fluido cuyo valor de la viscosidad, a una presión y temperatura dadas, es único para cualquier velocidad de cizalla, siendo independiente del tiempo de aplicación de la cizalla. Es decir, hay una relación lineal entre el esfuerzo de corte o fuerza por unidad de área ( $\tau = \frac{F}{A}$ ) y la deformación o cizalladura  $\dot{\gamma}$ .

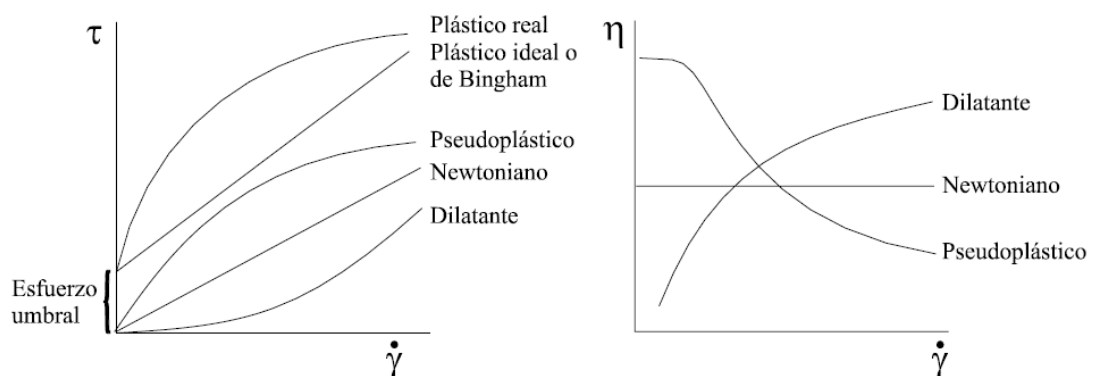
## 2. Fluidos no newtonianos

La viscosidad real se puede ver afectada significativamente por factores como la velocidad de cizalla, la temperatura, presión y tiempo de aplicación de la cizalla.

### 2.1. Variación de la viscosidad con la velocidad de deformación

Una gran cantidad de fluidos (muchos de interés industrial) presentan desviaciones con respecto al comportamiento newtoniano, pues su viscosidad es función de la velocidad de cizalla aplicada. En este caso, la diferencia entre el comportamiento newtoniano y el no newtoniano es la longitud de la molécula del fluido: los fluidos con moléculas de pequeño tamaño (agua, etanol...) presentan comportamiento newtoniano, al contrario que otras (por ejemplo, disoluciones de polímeros), que poseen moléculas de mayor tamaño.

Como el rango de velocidades de deformación es muy amplio, se suelen usar **curvas de flujo** que relacionan el esfuerzo de cizalla (o la viscosidad) frente a la velocidad y se usan para estudiar el comportamiento de los fluidos.



*Curvas de flujo para distintos tipos de comportamientos.*

- **Comportamiento dilatante:** lo presentan aquellos fluidos cuya viscosidad crece al aumentar la velocidad de cizalla. Esto es debido a reorganización en su microestructura. Por ejemplo, suspensión de almidón en agua (“Maizena”).
- **Comportamiento plástico:** ciertas sustancias se comportan de forma elástica, almacenando una cierta cantidad de energía, cuando los esfuerzos son menores de un cierto valor umbral (esfuerzo de rendimiento), y a partir de dicho esfuerzo se deforman como un fluido, siendo el esfuerzo una función (lineal o no) de la velocidad de deformación. Ejemplos: dentífrico, mayonesa, mermelada...
- **Comportamiento pseudoplástico:** materiales que reducen su viscosidad al aumentar la velocidad de deformación. Es el comportamiento más común y se ve en sustancias en emulsión, suspensión o dispersión. Por ejemplo, cremas cosméticas.

Son muchos los modelos matemáticos de descripción de los diferentes comportamientos de flujo. Uno de los más usados es la **ley de la potencia**:

$$\tau = \eta |\dot{\gamma}|^n$$

Donde  $\tau$  es el esfuerzo de corte o fuerza por unidad de área y  $\dot{\gamma}$  la deformación o cizalladura.

Este modelo puede explicar el comportamiento newtoniano, dilatante y pseudoplástico dependiendo del valor de  $n$ .

Otro modelo interesante es la **ley de la potencia con esfuerzo umbral** (Modelo de Herschel-Bulkley):

$$\tau - \tau_0 = \eta |\dot{\gamma}|^n$$

## 2.2. Variación de la viscosidad con el tiempo de aplicación de la cizalla

En ocasiones sucede que los valores de viscosidad encontrados para unos determinados valores de velocidad de cizalla no se mantienen constantes cuando aumenta el tiempo de aplicación de la deformación.

- Fluidos **tixotrópicos:** el valor de la viscosidad **disminuye**. Ejemplos: gelatinas, pinturas, adhesivos, etc. Experimentalmente es difícil ver la diferencia entre la pseudoplasticidad y la tixotropía, debido a los efectos combinados de la cizalla y el tiempo de actuación, que pueden

superponerse a la hora de hacer medidas. Además, la mayoría de los fluidos tixotrópicos son pseudoplásticos.

- Fluidos **reopéticos**: el valor de la viscosidad aumenta. Ejemplos: algunos lubricantes, pastas de yeso y algunas tintas de impresora. La reopexia es más difícil de encontrar, pero existe investigación muy activa para la creación de materiales reopéticos para uso militar, de automoción y deportivo.

En ambos casos, el comportamiento depende de la “historia” del fluido y puede ocurrir que para una misma muestra se obtengan diferentes curvas según el estudio que se haga.

### 2.3. Variación de la viscosidad con la temperatura

Aparte de la velocidad de cizalla y del tiempo de aplicación, la viscosidad depende fuertemente de la temperatura. La mayoría de los materiales disminuyen su viscosidad con la temperatura. Esta dependencia es exponencial, siendo la expresión más común la **ecuación de Arrhenius**:

$$\eta = A e^{B/T}$$

Donde A y B son constantes del fluido y T es la temperatura absoluta.

Las variaciones pueden ser de hasta un 10% por cada °C modificado.

### 2.4. Variación de la viscosidad con la presión

La viscosidad de los líquidos aumenta exponencialmente con la presión. El agua por debajo de 30 °C es la excepción, porque disminuye en un primer momento, y luego el comportamiento es normal.

Para presiones cercanas a la presión atmosférica, los cambios son bastante pequeños. Por ello, en los usos de la mayoría de los fluidos este factor apenas influye. En otros casos, como en la industria de los lubricantes para maquinaria, las medidas de viscosidad se toman a altas presiones. Por ejemplo, la presión soportada por un lubricante de una perforadora que opera a profundidad es del orden de 20 MPa.

De forma general, podemos expresar la viscosidad como una función de la presión y la temperatura:

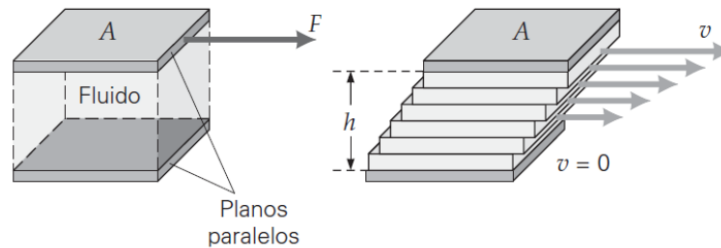
$$\eta(P, T) = f(T)e^{\Gamma P}$$

Donde  $\Gamma$  tiene valores típicos entre  $2 \cdot 10^{-8}$  y  $6 \cdot 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$ .

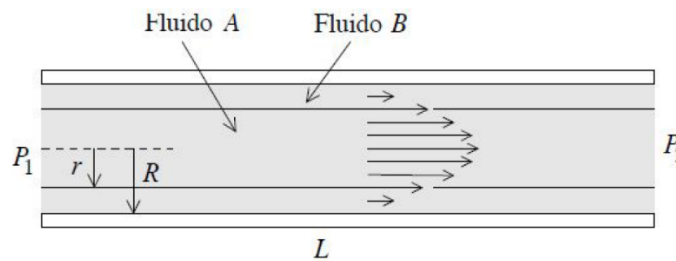
### 3. Régimen laminar. Ley de Poiseuille

Existen dos tipos de flujos permanentes en el caso de los fluidos reales: el flujo laminar y el turbulento. Ambos flujos son gobernados por distintas leyes.

Como hemos visto, la viscosidad hace que las distintas capas de un fluido se muevan con distinta velocidad en respuesta a un esfuerzo cortante. Este movimiento relativo de capas se conoce como flujo laminar y es característico del flujo estable de fluidos viscosos a baja velocidad.



Cuando un fluido viscoso se mueve en un tubo, su velocidad de flujo es diferente en distintos puntos de una misma sección transversal. La capa más externa del fluido se adhiere a las paredes del tubo, y su velocidad es cero. Para el caso de un flujo laminar la velocidad es máxima en el centro del tubo y disminuye hasta anularse en las paredes.



Analizando las fuerzas que actúan sobre un elemento de fluido, la velocidad en función de una distancia radial  $r$  es:

$$v(r) = \frac{P_1 - P_2}{4\eta L} (R^2 - r^2)$$

La **ley de Poiseuille** (o de Hagen- Poiseuille) nos da la expresión que permite determinar el volumen por unidad de tiempo (caudal):

$$\frac{dV}{dt} = \frac{(P_1 - P_2) \pi R^4}{8\eta L} = \frac{\pi R^2}{2} v_m$$

Integrada:

$$V = \frac{(P_1 - P_2) \pi R^4}{8\eta L} t = \frac{\pi R^2}{2} v_m t$$

### 3.1. Ley de Stokes

Sea una esfera de radio  $R$  que se mueve sumergida en un fluido con velocidad  $\vec{v}$ . El fluido tiene un coeficiente viscoso  $\eta$ . Entonces, la esfera experimenta una fuerza de resistencia debida a la viscosidad del fluido dada por:

$$|\vec{F}| = 6\pi R\eta|\vec{v}|$$

### 4. Régimen turbulento. Número de Reynolds

Se conoce como flujo turbulento al movimiento de un fluido que se da en forma caótica, es decir, aquel flujo en el que las partículas del fluido se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas forman pequeños remolinos aperiódicos (no coordinados o relacionados). Debido a ello, la trayectoria de una partícula se puede predecir hasta una cierta escala a partir de la cual la trayectoria de la misma es caótica.

Cuando la velocidad de flujo de un fluido resulta suficientemente grande, se rompe el flujo laminar y se establece la turbulencia. La **velocidad crítica** por encima de la cual el flujo que fluye a través de un tubo resulta turbulento **depende de la densidad del fluido  $\rho$ , la viscosidad  $\eta$  y del radio  $R$  del tubo.**

Podemos definir el **número de Reynolds** ( $Re$ ), adimensional, de la siguiente manera:

$$Re = \frac{2R\rho v_m}{\eta}$$

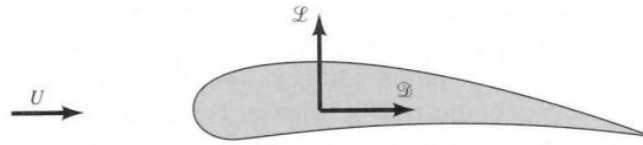
Donde  $v_m$  es la velocidad media del fluido.

Se considera **flujo laminar** si  $Re < 2000$ , y **flujo turbulento** si  $Re > 3000$ . Entre estos dos valores el flujo es inestable y puede variar de un tipo de flujo a otro.

### 5. Noción de capa límite

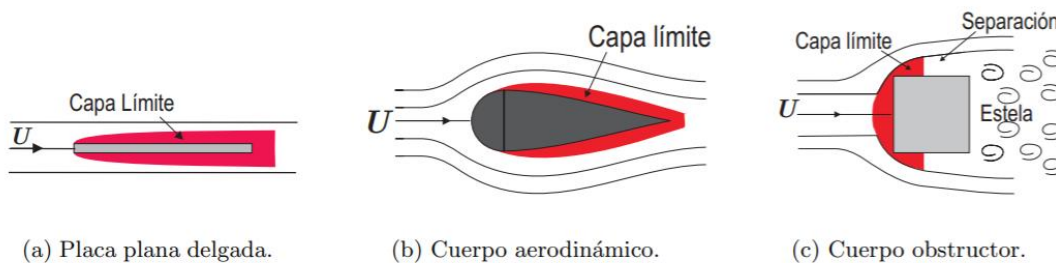
Un cuerpo que esté inmerso en un flujo experimenta una fuerza resultante debido a la acción entre el flujo y el cuerpo. Esta es la fuerza resultante de los esfuerzos de corte en la pared del cuerpo y los esfuerzos normales a la superficie.

La resultante de las fuerzas horizontales se denomina **arrastre** y la de las fuerzas con dirección vertical se denomina empuje o **sustentación**.



Resultante de fuerzas horizontal y vertical sobre un perfil alar.

La magnitud de estas fuerzas dependerá de la forma del objeto y por lo tanto, de la forma del flujo alrededor de dicho objeto. Por ejemplo, como podemos ver en las figuras siguientes:



En el caso (a), la influencia sobre el flujo es mínima y las líneas de corriente tienden a ser paralelas a la placa. En el caso (b), el flujo es de tal forma que las líneas de corriente se “cierran” detrás del cuerpo. En un objeto obstructor, como es el caso (c), las líneas de corriente no son capaces de cerrarse detrás del cuerpo generando detrás lo que se conoce como **estela**.

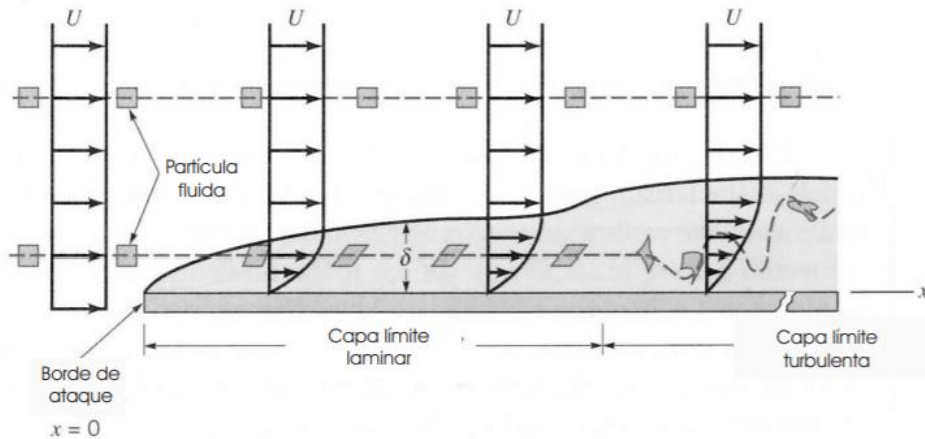
El concepto de **capa límite** fue inicialmente introducido por Prandtl en 1904. Se denomina **capa límite** a la región alrededor de un cuerpo en la cual **los efectos viscosos no se pueden despreciar**.

Se debe recordar que las partículas fluidas en contacto con un cuerpo tienen la misma velocidad del cuerpo. La existencia de la capa límite indica que existe una diferencia de velocidades entre el contorno del cuerpo y el flujo libre lejos del cuerpo. Fuera de la capa límite, se puede considerar el flujo como ideal,

## 5.1. Desarrollo de la capa límite

En la figura siguiente podemos ver el desarrollo de la capa límite sobre una placa plana inmersa en un flujo para un número de Reynolds elevado.  $\delta$  es el espesor de la capa límite, es decir, el límite de la región donde los esfuerzos cortantes no son despreciables.





### Desarrollo de la capa límite sobre una placa plana.

En una primera parte se desarrolla la capa límite laminar ( $x$  pequeño y número de Reynolds  $Re$  pequeño). En esta región el flujo es laminar y no hay mezcla entre capas.

El espesor de la capa límite va aumentando según aumenta  $x$  porque el flujo entra desde la parte libre de la corriente. Para una placa dada y una velocidad de la corriente libre  $v$  siempre se alcanzará el régimen turbulento si la placa es lo suficientemente larga.

Existirá una zona de transición donde el régimen se vuelve turbulento, y la capa límite aumenta notablemente de espesor. En esta zona las partículas de fluido estarán sometidas a deformaciones en todas las direcciones y existirá mezcla o difusión entre las distintas capas de fluido.

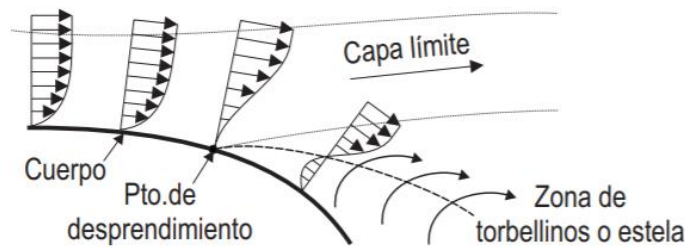
En la zona cercana a la placa las velocidades relativas entre el flujo y la placa son pequeñas, generando una zona donde el flujo es laminar (subcapa laminar).

Las partículas que pasan fuera de la capa límite no se encuentran sometidas a deformaciones ni esfuerzos cortantes.

### 5.2. Pérdida de capa en una conducción.

En cuerpos curvados existe una aceleración de las partículas fluidas en la parte anterior del cuerpo hasta el punto donde las líneas de corriente se juntan. Pasado este punto, las líneas se abren, aumenta la presión y el flujo se desacelera.

Si la curvatura del objeto es muy grande, y dependiendo de las condiciones del flujo, se puede generar un flujo inverso y lo que se denomina **desprendimiento de la capa límite**. Detrás del cuerpo se genera una zona llamada **estela**.



Desprendimiento y flujo inverso en un cuerpo curvo.

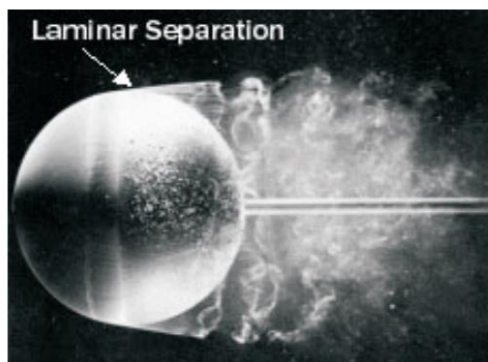
La **disminución de la presión** en la dirección del flujo se denomina **gradiente de presión favorable**. En cambio, el **aumento de la presión** se denomina **gradiente de presión adverso** ya que **tiende a frenar el flujo**.

Por otro lado, los esfuerzos cortantes dentro de la capa límite también tienden a frenar el flujo. Las partículas fluidas tienden a fluir a regiones donde el gradiente de presión sea menos adverso, generando de esta forma la separación de la capa límite. Entonces, la estela será la reestructuración del flujo detrás de la zona de separación.

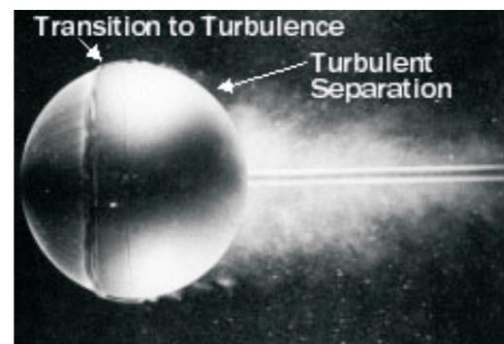
Como efecto de dicha separación, se produce una **aumento del arrastre** y una **disminución de la sustentación**.

En la capa límite turbulenta, las partículas fluidas tienen mayor cantidad de movimiento que en la laminar. Entonces, pueden resistir mejor un gradiente de presión adverso y por tanto, también resistirán mejor la separación. Por ejemplo, si se adelanta la transición a la turbulencia de la capa límite, se retrasará la separación de esta, disminuyendo el arrastre y aumentando la sustentación.

Esto puede verse en la siguiente figura:



(a) Laminar



(b) Turbulento

Desprendimiento de la capa límite sobre una esfera con y sin generadores de vórtices.

donde para una misma velocidad de la corriente libre, se ha producido mediante un alambre en la parte posterior de la esfera la transición adelantada a la turbulencia de forma artificial, produciendo un retraso en la separación de la capa límite. Este fenómeno se utiliza en la práctica, por ejemplo, en pelotas de golf y algunos perfiles alares.

## 6. Viscosímetros

Para estudiar las propiedades de flujo de un fluido debe usarse un aparato adecuado: el viscosímetro. En el mercado existen diversidad de ellos adecuados a las necesidades, y en algunos casos, los menos, habrá que diseñar y construir uno.

La mayoría de los viscosímetros dan un único valor de la viscosidad (trabajan a una única velocidad de cizalla). Esto es correcto si el fluido es newtoniano, pero no siempre lo es para los no newtonianos.

Los instrumentos más ampliamente usados en la medida de viscosidades se pueden dividir en tres tipos: capilares, rotacionales y de cuerpo móvil.

### 6.1. Viscosímetros capilares

El viscosímetro capilar es quizá el instrumento para la determinación de viscosidad más empleado, y también el más antiguo. En este tipo de viscosímetros un fluido es obligado a pasar a través de un tubo observándose una distribución de velocidades en el tubo de tipo parabólico, de forma que la porción del fluido que está en contacto con las paredes del capilar tiene una velocidad nula y la porción del fluido que se encuentra en el centro del tubo tiene una velocidad máxima.

En este tipo de viscosímetros la viscosidad se mide a partir del flujo medio y la presión aplicada. La ecuación básica es la ecuación de Hagen-Poiseuille, vista con anterioridad.

Ejemplos de estos viscosímetros: el de vidrio (Ostwald), de orificio o viscosímetros de copa y de pistón o de extrusión.



## 6.2. Viscosímetros rotacionales

Los viscosímetros rotacionales constan básicamente de dos partes que se encuentran separadas por el fluido a estudiar. Dichas partes pueden ser dos cilindros, dos superficies paralelas, una superficie y un cono de pequeño ángulo, un rotor en el interior de un cilindro. El movimiento de una de estas partes provoca la aparición de un gradiente de velocidades a lo largo del fluido. Para determinar la viscosidad del fluido se mide el esfuerzo necesario para producir una determinada velocidad angular. Este tipo de viscosímetros son mucho más versátiles que los estudiados anteriormente y pueden ser utilizados para fluidos no Newtonianos; sin embargo, su principal inconveniente es el precio.

Tipos de viscosímetros rotacionales más empleados: viscosímetros de cilindros concéntricos, de placas paralelas y de cono-placa.



## 6.3. Viscosímetros de cuerpo móvil

En los viscosímetros de cuerpo móvil la movilidad de una esfera, burbuja, disco, etc., en el fluido da medida de la viscosidad del fluido. Los viscosímetros más conocidos son los de caída de esferas, los cuales se basan en la ley de Stokes, que relaciona la viscosidad de un fluido con la velocidad de caída. Normalmente se utilizan para fluidos muy viscosos con los que se pueden tener medidas de velocidades bastante precisas; por otra parte, también se emplean en fluidos newtonianos, ya que para fluidos no newtonianos no se ha desarrollado ninguna ecuación.

Ejemplos de este tipo de viscosímetros es el Høeppler o el Paar AMV 200, de Paar Physica.

