

# 1. GENERALIDADES

## SOBRE MECANICA DE FLUIDOS

### 1.1 CONCEPTOS SOBRE LA VISCOSIDAD Y SUS EFECTOS

Se llama viscosidad el efecto producido sobre los fluidos en movimiento, por la acción combinada de la cohesión intermolecular y el cambio de momento lineal de las capas vecinas de partículas en movimiento. La viscosidad se manifiesta como una fuerza de fricción entre las capas de partículas en movimiento. Cohesión es la fuerza de atracción entre grupos de moléculas vecinas debida a la atracción de sus masas y a fuerzas electroquímicas de las mismas.

La viscosidad es una propiedad física de los fluidos y varía con la temperatura en forma diferente para los líquidos y los gases. En los líquidos la cohesión es una fuerza importante y su magnitud disminuye al aumentar la temperatura, esto hace que la viscosidad disminuya al aumentar la temperatura en este estado físico de la materia. En los gases la cohesión es muy baja y la actividad molecular aumenta con la temperatura incrementando el cambio de momento lineal de las partículas de capas vecinas. En los gases la viscosidad aumenta con el incremento de temperatura.

El esfuerzo unitario de fricción desarrollado entre capas de fluido en movimiento es una función creciente con el gradiente de velocidad " $dv/dy$ ". Al llamar " $\mu$ " a la constante de viscosidad se puede establecer la siguiente ecuación:

$$\tau = \mu dv/dy \quad (1)$$

En donde:

- $\tau$  = esfuerzo unitario de fricción.
- $dv/dy$  = gradiente de velocidad.
- $\mu$  = constante de proporcionalidad llamada viscosidad absoluta del fluido.

La ecuación (1) fue propuesta por Isaac Newton y a los fluidos que obedecen a ella se les denomina Newtonianos.

## 1.2 FLUJO LAMINAR Y FLUJO TURBULENTO.

Cuando entre dos partículas vecinas en movimiento existe un gradiente de velocidad o sea que una se mueve más rápido que la otra, se desarrollan fuerzas de fricción que actúan tangencialmente a las mismas. Las fuerzas de fricción tratan de inducir rotación sobre las partículas en movimiento, pero simultáneamente la viscosidad trata de impedir la rotación. Dependiendo del valor relativo de estas fuerzas se pueden producir diferentes estados de flujo.

Cuando el gradiente de velocidad es bajo la fuerza de viscosidad es mayor que la de fricción, las partículas se desplazan pero no rotan o lo hacen con muy poca energía, el resultado final es un movimiento en el cual las partículas siguen trayectorias definidas y todas las partículas que pasan por un punto en el campo de flujo siguen la misma trayectoria. Este tipo de flujo fue identificado por Osbold Reynolds y se denomina "laminar", queriendo significar con ello que las partículas se desplazan en forma de capas o láminas.

Al aumentar el gradiente de velocidad se incrementa la fricción entre partículas vecinas de flujo, éstas adquieren una energía de rotación apreciable, la viscosidad pierde su efecto y debido a la rotación las partículas cambian de trayectoria. Al pasar de unas trayectorias a otras las partículas chocan entre sí y cambian de rumbo en forma errática. Este tipo de flujo se denomina "turbulento".

El flujo turbulento se caracteriza porque: 1) las partículas de fluido no se mueven siguiendo trayectorias definidas 2) la acción de la viscosidad es despreciable 3) las partículas de fluido poseen energía de rotación apreciable y se mueven en forma errática chocando unas con otras 4) al entrar las partículas de fluido a capas de diferente velocidad su momento lineal aumenta o disminuye y el de las partículas vecinas lo hacen en forma contraria.

Cuando las fuerzas de inercia del fluido en movimiento son muy bajas la viscosidad es la fuerza dominante y el flujo es laminar. Cuando predominan las fuerzas de inercia el flujo es turbulento. Las fuerzas de inercia y viscosidad se pueden expresar en forma general con las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} F_i &= Ma = \rho \ell^3 (V^2/\ell) = \rho V^2 \ell^2 \\ F_v &= \tau A = \mu (dv/dy)A = \mu (V/\ell)\ell^2 = \mu V \ell \end{aligned}$$

En donde:

$$\begin{aligned} \rho &= \text{densidad del flujo} \\ V &= \text{velocidad} \\ \ell &= \text{una longitud característica.} \end{aligned}$$

Sea  $R = F_i/F_v$  la relación entre las fuerzas de inercia y viscosidad, al reemplazar y simplificar se obtiene:

$$R = \rho V \ell / \mu \quad (2)$$

La relación anterior denominada número de Reynolds permite conocer el tipo de flujo que se posee en un determinado problema. Para números de Reynolds bajos el flujo es laminar y para valores altos el flujo es turbulento. Osbold Reynolds mediante un aparato sencillo cuya descripción aparece en la mayoría de los textos de mecánica de fluidos fue el primero en demostrar experimentalmente la existencia de estos dos tipos de flujo. Mediante un colorante agregado al agua en movimiento demostró que en el flujo laminar las partículas de agua y colorante se mueven siguiendo trayectorias definidas sin mezclarse, en cambio en el flujo turbulento las partículas de tinta se mezclan rápidamente con el agua.

En conductos de sección circular se acostumbra tomar como dimensión característica el diámetro y el número de Reynolds toma la forma:

$$R = \rho VD / \mu = VD / \nu \quad (3)$$

En donde:

$D$  = diámetro del tubo.

$\nu$  = viscosidad cinemática del fluido  $\nu = \mu / \rho$

$V$  = velocidad media del fluido.

El número de Reynolds se puede expresar como una función del gasto  $Q$  mediante las ecuaciones siguientes:

$$V = Q/A = 4Q/\pi D^2 \quad R = 4Q/\pi D \nu \quad (4)$$

Experimentalmente se ha encontrado que cuando el número de Reynolds pasa de 2.400 se inicia turbulencia en la zona central del tubo, sin embargo este límite es muy variable y depende de las condiciones de quietud del conjunto. Para números de Reynolds mayores de 4.000 el flujo es turbulento. Al descender la velocidad se encuentra que para números de Reynolds menores de 2.100 el flujo es siempre laminar y cualquier turbulencia que se produzca es eliminada por la acción de la viscosidad. El paso de flujo laminar a turbulento es un fenómeno gradual inicialmente se produce turbulencia en la zona central del tubo donde la velocidad es mayor, pero queda una corona de flujo laminar entre las paredes del tubo y el núcleo central turbulento. Al aumentar la velocidad media el espesor de la corona laminar disminuye hasta desaparecer totalmente. Esta última condición se consigue a altas velocidades cuando se tiene turbulencia total en el flujo.

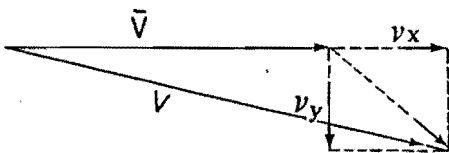
Para flujo entre placas paralelas al tomar como dimensión característica el espaciamiento de éstas, el número de Reynolds máximo que garantiza flujo laminar es 1.000. Para canales rectangulares anchos con la profundidad como dimensión característica este límite es 500. Para una esfera en movimiento dentro de un fluido al tomar su diámetro como dimensión característica, el número de Reynolds límite que garantiza flujo laminar es 1.

### 1.3 ESFUERZOS TANGENCIALES GENERADOS POR EL MOVIMIENTO DEL FLUIDO.

Cuando grupos de partículas vecinas se mueven a diferente velocidad, se generan fuerzas tangenciales a la dirección del movimiento. Los esfuerzos unitarios debidos a estas fuerzas son una función del gradiente de velocidad. Para el flujo laminar los esfuerzos tangenciales o de corte se rigen por la ecuación (1) establecida por Isaacs Newton.

Para flujo turbulento el problema es más complejo porque debido al choque entre partículas, éstas rebotan en forma errática tomando direcciones variables con el tiempo y entrando en zonas de mayor o menor velocidad que la poseída por ellas antes del choque. El cambio de momento lineal de las partículas y de las nuevas capas a donde ellas ingresan se manifiesta como el efecto de una fuerza tangencial.

La velocidad en un punto cualquiera del campo de flujo varía con el tiempo aunque el estado del flujo sea permanente. El vector velocidad de un punto cualquiera del campo de flujo puede descomponerse en un vector constante  $\bar{v}$  representativo de la velocidad media y un vector variable con el tiempo, el cual a su vez tiene una componente  $\vec{v}_x$  en la dirección del movimiento y otra  $\vec{v}_y$  en el plano normal al movimiento.



$$\vec{V} = \bar{V} + \vec{v}_x + \vec{v}_y$$

Figura 1

Las velocidades  $v_x$  y  $v_y$  se denominan componentes de turbulencia y varían con el tiempo. Para un flujo homogéneo sus valores promedios son iguales.

$$\bar{v}_x = \bar{v}_y \quad (5)$$

Basado en la suposición anterior Osbold Reynolds demostró que el esfuerzo cortante puede expresarse por la ecuación:

$$\tau = \rho \bar{v}_x \bar{v}_y \quad (6)$$

L. Prandtl supuso que al chocar las partículas de fluido rebotan y avanzan dentro de las capas de diferente velocidad una longitud "ℓ" la cual denominó "longitud de mezclado". Las componentes de turbulencia son iguales al cambio de velocidad Δv que se produce con este movimiento luego:

$$\bar{v}_x = \bar{v}_y = \Delta v = \ell \left( dv/dy \right) \quad (7)$$

En donde:

ℓ = longitud de mezclado.  
 dv/dy = gradiente de velocidad.

Al reemplazar la ecuación (7) en (6) se obtiene la ecuación:

$$\tau = \rho \ell^2 \left( dv/dy \right)^2 \quad (8)$$

Esta ecuación presenta la dificultad para su aplicación de que ℓ = f(y) siendo "y" la distancia desde la pared sólida hasta el punto de estudio. Para algunos problemas Prandtl hizo ℓ = κy en donde "κ" es una constante.

Th. Von Kármán basado en los trabajos de L. Prandtl propuso para "ℓ" la ecuación:

$$\ell = \kappa (dv/dy) / (d^2v/dy^2) \quad (9)$$

En donde:

d<sup>2</sup>v/dy<sup>2</sup> = derivada del gradiente de velocidad con respecto a y.

κ = constante de turbulencia adimensional.

Al reemplazar (9) en (8) se obtiene la ecuación:

$$\tau = \rho \kappa^2 (dv/dy)^4 / (d^2v/dy^2)^2 \quad (10)$$

La ecuación (10) se conoce como la ecuación para flujo turbulento de Von Kármán - Prandtl y es la que más se aplica en la actualidad para el cálculo de este fenómeno.

Medidas cuidadosas han demostrado que "κ" varía pero la ecuación (10) da resultados satisfactorios.

Para flujo en tubos de sección circular  $\kappa \simeq 0,40$ .

#### 1.4 INTRODUCCION AL ESTUDIO DE LA CAPA LIMITE.

Consideremos un tubo de sección circular alimentado por un tanque de gran tamaño en cuyo interior el flujo es laminar y de velocidad constante. En una sección 0-0 antes de la entrada al tubo la distribución de velocidad es constante con valor  $v_0$ . Al acercarse el flujo a la sección 1-1 de entrada al tubo las partículas de fluido en contacto con las paredes del tubo toman velocidad cero y sus vecinas toman velocidades que varían desde cero cerca a las paredes hasta un máximo constante en la zona central.

En la sección 5-5 de la figura No. 2 se tiene una corona exterior de fluido de espesor  $\delta$  con velocidad variable desde cero en las paredes del tubo hasta un máximo  $v_1$  en su límite interior y un núcleo circular interior con velocidad constante  $v_1$ .

Debido al retardo del flujo en la corona exterior la velocidad en el núcleo central aumenta a lo largo del tubo y  $v_1 > v_0$ .

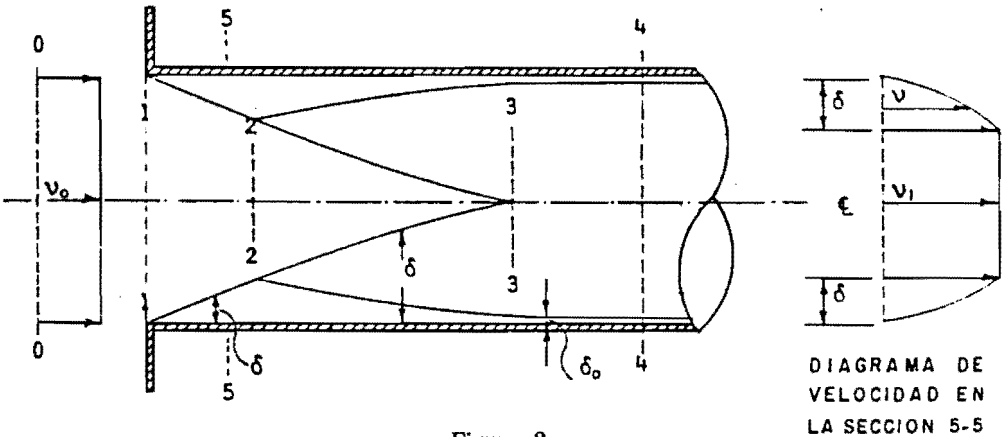


Figura 2

En la zona inicial del tubo las velocidades en la corona exterior y el núcleo central son bajas lo cual permite que el flujo sea laminar. La corona de flujo exterior detallada anteriormente se denomina "capa límite" y su espesor se designa por el valor " $\delta$ ".

Al comienzo del tubo la velocidad máxima dentro de la capa límite es muy

baja y el flujo en esta zona es laminar. Esta situación ocurre en la figura No. 2 entre entre las secciones 1-1 y 2-2. De la sección 2 en adelante la velocidad máxima dentro de la capa límite es suficientemente alta y se produce flujo turbulento dentro de la capa límite.

El espesor de la capa límite  $\delta$  crece a lo largo del tubo hasta llegar a su valor máximo en la sección tres de la figura 2. A partir de la sección tres desaparece el núcleo central de velocidad constante y la capa límite cubre toda la sección del tubo. Entre las secciones uno y tres de la figura 2 se efectúa el desarrollo de la capa límite y  $\delta$  es variable. De la sección tres en adelante  $\delta$  es constante igual al radio del tubo y la capa límite está desarrollada.

Cerca a las paredes la velocidad del flujo es muy baja y puede producirse una pequeña capa de flujo laminar de espesor  $\delta_s$  llamada "subcapa laminar". La existencia o no de la subcapa laminar depende de la magnitud de la rugosidad absoluta "e" de las paredes del tubo. El límite superior de la subcapa laminar corresponde a la transición entre flujo laminar y turbulento y por esta razón no corresponde a una posición exacta. La subcapa laminar desempeña un papel muy importante. El concepto de subcapa laminar permite explicar el efecto de la rugosidad de las paredes sobre el flujo. Al mirar en el microscopio una sección transversal de las paredes del conducto se puede tener un panorama como el de la figura tres.

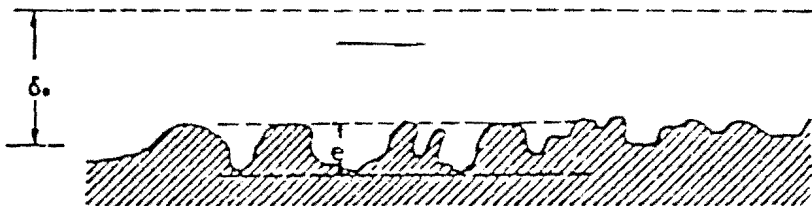


Figura 3

La altura de las irregularidades de la pared "e" o rugosidad absoluta es variable así como su distribución en el área.

El efecto de la rugosidad absoluta sobre el flujo depende de su magnitud y distribución. La medición directa de estas variables para superficies muy pulidas es imposible con los medios de que se dispone en la actualidad. Pero por medidas indirectas es posible calcular un valor para la rugosidad absoluta "e" de dimensión lineal que tenga en consideración el efecto combinado de la magnitud y distribución de las irregularidades de la superficie.

Las irregularidades de la superficie generan pequeños remolinos y vórtices.

Cuando la rugosidad absoluta “e” es apreciablemente menor que el espesor de la subcapa laminar  $\delta_0$ , los vórtices son eliminados por la viscosidad dentro de la subcapa laminar y su efecto desaparece, en caso contrario estos vórtices alcanzan a sobrepasar la subcapa laminar y contribuir a la formación de turbulencia. En el primer caso la rugosidad absoluta no ejerce ningún efecto en la formación de turbulencia y se dice que la superficie del material actúa como “hidráulicamente lisa”, en el segundo caso los vórtices generados en las irregularidades del material destruyen la subcapa laminar y generan turbulencia apreciable en este caso se dice que la superficie del material actúa como “hidráulicamente rugosa”.

Con base en experimentaciones en tuberías y placas planas con flujo paralelo Herman Schlichting demostró que para que una superficie actúe como hidráulicamente lisa se debe cumplir la condición:

$$V_{te}/\nu < 5 \tag{11}$$

En donde:

- $V_f$  = velocidad de fricción =  $\sqrt{gRS}$
- $g$  = aceleración de la gravedad
- $R$  = radio hidráulico
- $S$  = gradiente de la línea de energía
- $e$  = rugosidad absoluta de la pared
- $\nu$  = viscosidad cinemática del fluido

## 1.5 CLASIFICACION DEL FLUJO EN CONDUCTOS.

Cuando el fluido se mueve dentro de un conducto se pueden presentar dos circunstancias diferentes:

1. El fluido llena totalmente el conducto y se dice que el flujo es confinado.
2. El fluido sólo llena parcialmente el conducto y se dice que el flujo es libre.

El flujo libre implica una cara superior en contacto con la atmósfera y por esta circunstancia sólo se presenta en los líquidos.

En el flujo confinado el conducto debe ser cerrado, ejemplo un tubo. En el flujo libre el conducto puede ser cerrado, ejemplo una alcantarilla o abierto por su parte superior, ejemplo un canal. En el flujo confinado un aumento o disminución de la presión en un punto del conducto se transmite a lo largo de éste como una onda de presión de alta velocidad y magnitud constante. En el flujo



libre un aumento o disminución de presión en un punto del conducto se transmite a lo largo de éste como una onda caracterizada por aumento o disminución en el área transversal del flujo y su velocidad media.

En el flujo confinado al aumentar o disminuir el gradiente de la línea de energía la velocidad aumenta o disminuye pero el área transversal permanece constante. En el flujo libre al variar el gradiente de la línea de energía varían las velocidades y el área transversal. En ambos casos se puede tener flujo laminar o turbulento.