



Prácticas de Laboratorio

CAPA LÍMITE



Universidad
de Oviedo
1608-2008

1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA.
2. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS.
3. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN.
4. TRABAJO A REALIZAR.
5. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS.
6. CONCLUSIONES.
7. BIBLIOGRAFÍA.

ANEXO I. TOMA DE DATOS EN EL LABORATORIO Y RESULTADOS FINALES.

1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

La viscosidad es el parámetro del fluido que controla el transporte de la cantidad de movimiento, es decir, determina la relación entre el esfuerzo o tensión local en un fluido en movimiento con la velocidad con que se produce la deformación del fluido, a lo que se denomina proceso de fluir.

Para flujos muy ordenados en los cuales las partículas se mueven en trayectorias rectas y paralelas, **Newton** en sus "Principia" ("*Philosophia naturalis principia mathematica*", 1687) enunció lo que se denomina la *ley de Newton de la viscosidad*: "el esfuerzo cortante en cualquier interfase tangente a la dirección del flujo es proporcional a la variación de la velocidad en la dirección normal al movimiento"; matemáticamente, se expresa:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1)$$

Durante el siglo XVIII se propusieron soluciones a flujos en los que se despreciaba la viscosidad: **Daniel Bernoulli** ("*Hydrodynamica sive de viribus et motibus fluidorum comentarii*", 1738), **Jean d'Alambert** ("*Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides*", 1744), **Leonhard Euler** ("*Principia motus fluidorum*" 1756),... Estas teorías eran útiles para describir el movimiento de los fluidos en regiones del flujo para las cuales los gradientes de velocidad eran pequeños, pero estaban en completa contradicción con la experimentación en cuanto a las fuerzas que se oponían al movimiento, es decir, fuerzas de arrastre sobre los cuerpos. Las consideraciones de flujo no viscoso llevaba a la conclusión de que el arrastre sobre un cuerpo inmerso en un fluido era nulo (paradoja de d'Alembert), y además eran incapaces de determinar las fuerzas perpendiculares al flujo (sustentación).

En 1904 **Ludwing Prandtl** publicó uno de los más importantes artículos de la Mecánica de Fluidos, consiguiendo enlazar la teoría clásica con los resultados sobre fricción de cuerpos sumergidos. Prandtl introdujo el concepto de **capa límite**, una delgada zona de fluido cercana a la superficie de los cuerpos, en la cual se presentan grandes variaciones de la velocidad y donde se concentran los efectos viscosos.

En términos generales se puede decir que, puesto que la viscosidad es bastante pequeña en casi todos los fluidos, los esfuerzos cortantes deben ser apreciables únicamente en las regiones en donde existan grandes gradientes de velocidad; el flujo en otras regiones se podría describir con gran exactitud por medio de las ecuaciones para flujo no viscoso. Las características más sobresalientes de la capa límite pueden describirse a través del caso del flujo sobre una superficie plana y fija, sobre la que se hace incidir una corriente uniforme de velocidad U_0 como la de figura 1.

Por efecto de la viscosidad, las partículas de fluido que están en contacto con una pared se hallan a la velocidad de la pared. En el caso del experimento propuesto en esta práctica, las partículas en contacto con la placa fija tendrán velocidad nula (**Figura 1**). En el borde de entrada de la placa hay una discontinuidad de la velocidad, puesto que antes del borde de ataque la velocidad es la del flujo uniforme e inmediatamente después la velocidad de las partículas que tocan la placa es nula. A partir del borde de ataque, la velocidad pasa gradualmente desde cero en la superficie de la placa hasta el valor de flujo uniforme (U_0) a una altura δ a partir de la cual la velocidad no varía ($du/dy=0$) siendo esta distancia δ el **espesor de la capa límite**; es decir la zona afectada por la viscosidad va desde la placa plana hasta el borde de la capa límite. Fuera de la capa límite el fluido, aunque sea viscoso, no se produce intercambio de cantidad de movimiento entre las distintas partículas porque el gradiente de velocidades es nulo.

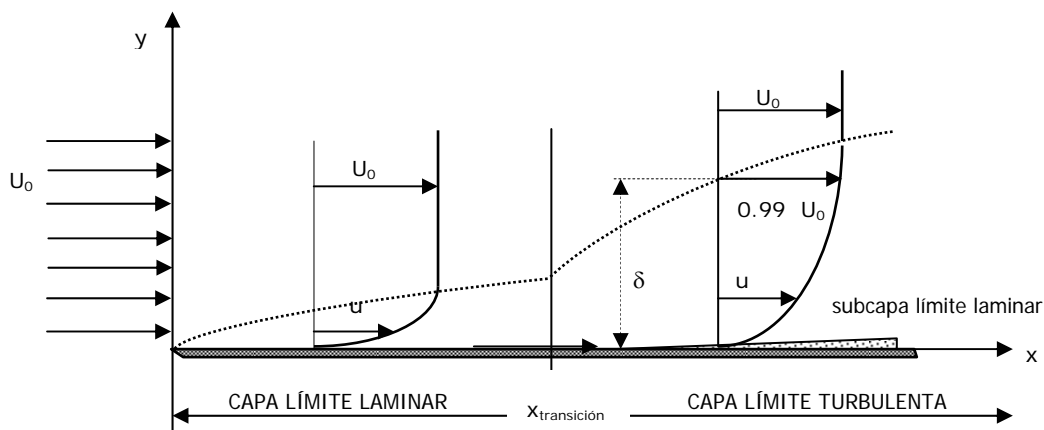


Figura 1. Perfiles del campo de velocidades en la capa límite (flujo en placa plana).



Dado que, en la práctica, es difícil situar el punto en donde se anula el gradiente de velocidad, se suele definir el espesor de la capa límite, como la distancia desde el punto de contacto con la placa plana al punto vertical para el cual la velocidad es el 99% de la velocidad de flujo uniforme, U_0 .

A medida que se avanza en la dirección x , más y más partículas son frenadas y por lo tanto el espesor δ de la zona de influencia viscosa va aumentando, con las partículas alineadas direccionalmente en lo que se denomina *capa límite laminar* hasta que, en un cierto punto el flujo se hace inestable, dando lugar a un crecimiento más rápido de la capa límite acompañado de un aumento de la turbulencia, es la zona denominada *capa límite turbulenta*. De todas formas, aún dentro de la región turbulenta, existe una delgada capa pegada a la superficie, en la cual las partículas están ordenadas direccionalmente en un flujo laminar, es lo que se denomina *subcapa límite laminar*.

Prandtl estableció las ecuaciones para el flujo en la capa límite laminar, a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes, con las siguientes hipótesis: el espesor de la capa límite es pequeño en comparación con otras dimensiones geométricas, el flujo es estacionario y bidimensional, y la presión es constante a través de cualquier sección transversal.

Un discípulo de Prandtl, **Blasius**, resolvió analíticamente las ecuaciones para la capa límite laminar sobre una placa plana sin gradiente de presión ($\partial p / \partial x = 0$), condición similar a la de esta práctica; Blasius obtuvo la siguiente expresión del espesor de la capa límite en la zona laminar, que se adapta bastante bien a los resultados obtenidos de forma experimental:

$$\delta = \frac{4.91 x}{\sqrt{Re_x}} \quad (2)$$

donde Re_x es el número de Reynolds asociado a la distancia x desde el borde de ataque a la sección considerada:

$$Re_x = \frac{U_0 x}{\nu} \quad (3)$$

2. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS.

En esta práctica se pretende estudiar la capa límite sobre una superficie plana horizontal, sobre la que se hace incidir una corriente uniforme de aire a una velocidad U_0 sin gradiente de presión. Se realiza en una instalación preparada al efecto en el laboratorio de Mecánica de Fluidos.

Los objetivos de la práctica son los siguientes:

- Determinar el perfil de velocidades sobre la placa $u = u(y)$ para distintas posiciones longitudinales.
- Determinar el espesor de la capa límite para distintas posiciones longitudinales, es decir, encontrar la posición y para la cual $u(y) = 0.99 U_0$.

3. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN.

La práctica propuesta se realizará en un banco de ensayos preparado para estudiar el fenómeno de la capa límite (**Figuras 2 y 3**). En él un ventilador centrífugo proporciona un flujo de aire, que previo paso por una geometría convergente, es acelerado y da lugar a una corriente uniforme. Además la velocidad del flujo de aire puede regularse mediante una compuerta que deriva lateralmente el flujo del ventilador.

La medida de la velocidad se realiza a través de un tubo de Pitot conectado a un manómetro inclinado. En la boca del tubo de Pitot el aire está detenido, con lo que la presión en esa boca es la presión de estancamiento: suma de la presión estática (que en este caso es la atmosférica, por estar la corriente uniforme de aire descargada al ambiente) y la presión dinámica, es decir:

$$p_0 = p_{at} + \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (4)$$



Figura 2. Banco de capa límite.

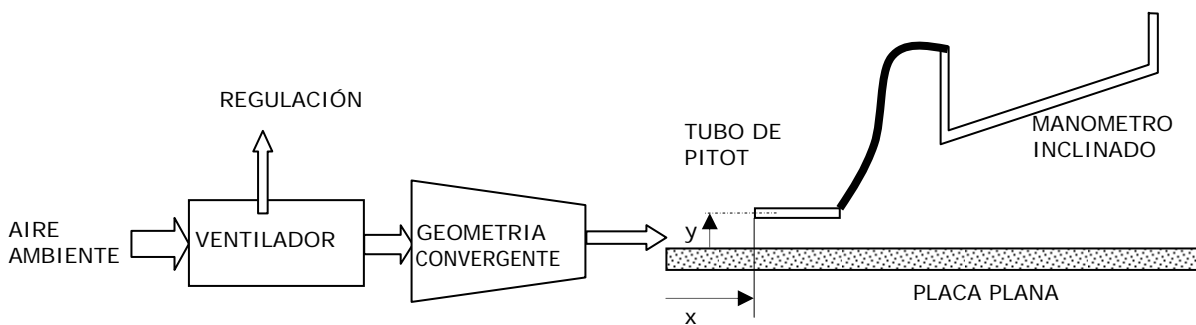


Figura 3. Esquema del banco de ensayos de capa límite

El tubo de Pitot¹ se conecta a uno de los extremos de un tubo inclinado de columna de líquido, cuyo otro extremo está a la presión atmosférica, es decir la diferencia de presiones entre los dos meniscos del líquido será:

$$\Delta p = p_0 - p_{at} = \left(p_{at} + \frac{1}{2} \rho u^2 \right) - p_{at} = \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (5)$$

A su vez los dos meniscos del líquido manométrico están separados verticalmente por una diferencia de cotas h , con lo que también se puede expresar su medida por: $\Delta p = (\rho_{\text{líquido}} - \rho_{\text{aire}}) g h = \rho_{\text{líquido}} g h$, al ser la densidad del aire despreciable frente a la del líquido manométrico. Con todo lo anterior se tiene:

$$\frac{1}{2} \rho_{\text{aire}} u^2 = \rho_{\text{líquido}} g h \quad (6)$$

$$u = \sqrt{2 \frac{\rho_{\text{líquido}}}{\rho_{\text{aire}}} g h} = \sqrt{\frac{2 g \rho_{\text{líquido}}}{\rho_{\text{aire}}} h} \quad (7)$$

¹ La boca de la sonda es un tubo de diámetro exterior 0.7 mm por lo que el punto vertical más cercano a la placa en que se puede medir corresponde a $y=0.35$ mm.



4. TRABAJO A REALIZAR.

4.1. Imposición de la velocidad U_0 para la corriente de aire procedente del ventilador.

Para ello, se situará la sonda a una altura media de la salida de aire por la geometría convergente, y se regulará el paso de aire hacia el exterior, accionando la compuerta lateral, hasta obtener la velocidad deseada. Se debe tener en cuenta que la lectura del manómetro inclinado h se realiza en mm de columna de líquido, con lo que la presión dinámica será:

$$p_d = \frac{1}{2} \rho_{\text{aire}} u^2 = \frac{\rho_{\text{liquido}} g h}{1000} \quad (8)$$

La densidad del líquido utilizado en este caso es: $\rho_{\text{liquido}} = 824 \text{ kg/m}^3$, y la densidad del aire es: $\rho_{\text{aire}} = 1.2 \text{ kg/m}^3$ aproximadamente.

4.2. Obtención de los datos en ciertas posiciones longitudinales.

Se realizarán medidas en 2 de las siguientes posiciones longitudinales: $x = 5, 10, 25, 40, 70$ y 90 mm . En cada una de estas posiciones longitudinales debe fijarse la altura inicial, que corresponderá, debido a la geometría de la sonda, al punto $y = 0.35 \text{ mm}$. Esta altura inicial se fija colocando la sonda en contacto con la placa, sin forzarla, para evitar que se deforme.

Para cada posición longitudinal se van tomando valores de h (diferencia de cotas entre los meniscos del líquido manométrico) a distintas alturas (y), hasta que se no se tengan variaciones, es decir se esté fuera de la capa límite con corriente uniforme. Se tomarán valores cada $\Delta y = 0.1 \text{ mm}$.

NOTA IMPORTANTE: se debe acercar la sonda con cuidado a la superficie de la placa y sin doblarla.

5. EXPOSICIÓN DE RESULTADOS.

Una vez finalizadas la clase práctica, cada grupo de alumnos elaborará un informe, que debe contener obligatoriamente la siguiente información, según el modelo que se adjunta en el Anexo I de este documento:

-Tabla de datos obtenidos en el laboratorio partida y resultados finales.

-Representación gráfica de los perfiles de velocidades: curvas u frente a y para cada posición longitudinal.

-Obtención del espesor de la capa límite en ambas posiciones longitudinales, a partir de los perfiles anteriores, y comparación con el valor obtenido según la expresión teórica. Recuérdese que Re_x , viene dado por la expresión: $Re_x = U_0 x / \nu$, siendo ν la viscosidad cinemática cuyo valor, en las condiciones del ensayo es, aproximadamente $1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

6. BIBLIOGRAFÍA.

Fox, R.W.; McDonald, A.T. "Introducción a la Mecánica de Fluidos". McGraw-Hill.

Schlichting, H. "Teoría de la capa límite", Ed. Urmo, Bilbao.

Shames, I.H. "La Mecánica de los Fluidos". McGraw-Hill.

Streeter, E.B.; Wylie, E.B. "Mecánica de los fluidos". McGraw-Hill.

White, F.M. "Mecánica de Fluidos". McGraw-Hill.

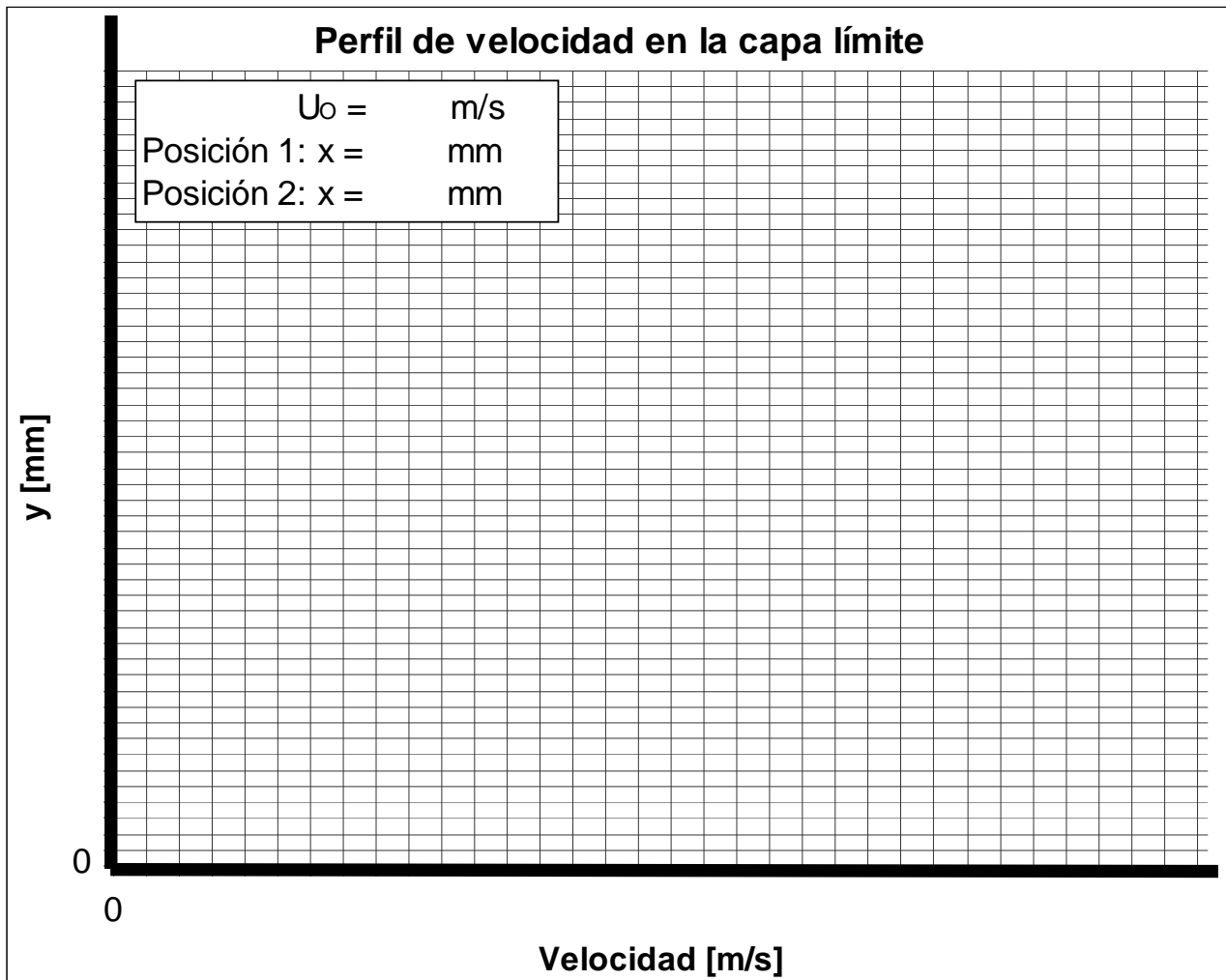


Anexo I. TOMA DE DATOS EN EL LABORATORIO Y RESULTADOS FINALES.

APELLIDOS, NOMBRE	FIRMA
1	
2	
3	
4	
5	
6	

4.1. Perfiles de velocidad.

U ₀ = m/s					
Posición longitudinal 1: x = mm			Posición longitudinal 2: x = mm		
y [mm]	Altura en el manómetro, h [mm]	Velocidad [m/s]	y [mm]	Altura en el manómetro, h [mm]	Velocidad [m/s]
0.35			0.35		



4.2. Espesor de la capa límite.

$U_0 =$ m/s			
<u>Posición longitudinal 1: $x =$ mm</u>		<u>Posición longitudinal 2: $x =$ mm</u>	
δ (experimental) [mm]	δ (teórico) [mm]	δ (experimental) [mm]	δ (teórico) [mm]