



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA**

**PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE
EXPERIMENTACION PARA DETERMINAR EL
ESPEJOR DE CAPA LIMITE (PROYECTO
PAPIME EN112703).**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

P R E S E N T A N:

**CUEVAS HERNANDEZ JUSTINO
POBLANO PEREZ JUAN CARLOS**

ASESOR: I.Q. DOMINGA ORTIZ BAUTISTA



JUNIO

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

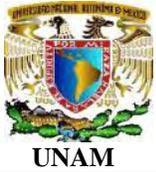


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



AGRADECIMIENTOS

A mis padres por el gran esfuerzo que han realizado por hacer de mí un hombre responsable. Es un orgullo ser su hijo, gracias Dios los bendiga.

A mis hermanas, por su ayuda y apoyo; les agradezco de todo corazón.

A mi esposa Sonia e hijos Dafne y Ángel, por los cuales sigo y seguiré luchando, no para ser el mejor, sino el número uno. Los amo y los llevo en el alma.

A mi hermano Inocencio, con mucho cariño: donde quiera que estés.

I.Q. Justino Cuevas Hernández

A mi Padre, quien siempre me dijo que las cosas llegan a su tiempo.

A mi Madre, mis hermanas y hermanos, por todo su apoyo.

A mi esposa Berenice y a mis hijos Ricardo y Natalia, que son mi principal motivación.

Y a todos aquellos que me han brindado su apoyo y fe.

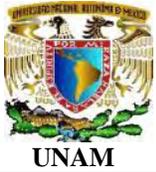
I.Q. Juan Carlos Poblano Pérez

Y especialmente agradecemos al IQ. Dominga Ortiz Bautista y I.I.Q Alejandro Rubio Martínez por su ayuda y guía para realizar este presente trabajo.

Justino Cuevas Hernández

Presentan
1

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA
'TESIS'
PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



RESUMEN	4
INTRODUCCIÓN	5
OBJETIVO GENERAL	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
ALCANCES DEL PROYECTO	6
DELIMITACIONES Y LIMITACIONES	6
NOMENCLATURA	7 - 8

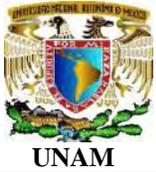
CAPÍTULO I

TEORIA DE CAPA LÍMITE

1. CONSIDERACIONES GENERALES DE LA CAPA LÍMITE	9
1.1 -Características Generales De Flujo Externo	10
1.2 -Características Generales De Flujo En Tuberías	10
1.3 -Concepto De Elevación Y Resistencia	13
1.4 -Flujo Que Pasa Por Un Objeto	15
1.5 -Concepto De Capa Limite	19
1.6 -Separación De La Capa Límite	20
1.7 -Espesor De La Capa Limite	23
1.8 -Flujo En La Capa Límite Turbulenta	25

CAPÍTULO II

2. CAPA LÍMITE LAMINAR EN FLUJO INCOMPRESIBLE	26
2.1 -Ecuaciones De Capa Límite Laminar	26



INGENIERÍA QUÍMICA
‘TESIS’
PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)

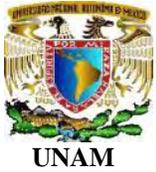


CAPÍTULO III

3. CAPA LÍMITE TURBULENTO EN FLUJO INCOMPRESIBLE	31
3.1 - Fundamentos De Flujo Turbulento	31
3.2 - Algunas Observaciones De Flujo Turbulento A Través De Tuberías	31
-.Características Y Desarrollo	31
-.Tipos De Turbulencia	31
-.Tubos Lisos	32
-.Factor De Fricción Para Tubos Rugosos	32
3.3 - Capa Límite Turbulenta: Forma De La Ley De La Potencia	35
3.4 - Capa Límite Turbulenta: Forma Empírica	38
3.5 - Capa Límite Turbulenta Con Gradiente De Presión Positiva Y Negativa	42
3.6 - Transición De Flujo Laminar A Turbulento	46

CAPÍTULO IV

4. PROPUESTA Y RECOMENDACIONES	
4.1 Propuesta Del Equipo	51
4.2 Comparación De Costos	55
4.3 Descripción De La Propuesta Para Su Instalación	57
4.4 Justificación De La Instalación	59
4.5 Metodología De Toma De Datos	68
4.6 Pasos Experimentales A Seguir	69
4.7 Presentación Y Tratamiento De Resultados	70
CONCLUSIONES	73
APENDICE A “COTIZACIONES”	74
APENDICE B “IMÁGENES MONTAJE DEL TUNEL”	82
BIBLIOGRAFÍA	89-90



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



RESUMEN

Para poder proponer el equipo se investigó y documentó con respecto a la Teoría De Capa Límite, para de esta manera resumirlo, y presentarlo en este trabajo, además se buscaron equipos parecidos ya existentes en la Universidad Nacional Autónoma de México los cuales fueron de mucha ayuda para poder hacer la propuesta del equipo.

Se localizaron proveedores que tienen diseñado este tipo de aparato, con los cuales se pudo comprobar que el costo del mismo es muy elevado, esto es muy importante, ya que si el equipo se diseña en la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza sería aun menor costo, además sería de mucha utilidad para los alumnos de la carrera de Ingeniería Química, y es que con la ayuda del equipo, podrán medir el espesor de la Capa Límite en forma indirecta y no en una forma teórica, además de que este tema maneja muchos parámetros que son muy importantes para el Ingeniero Químico, como son la viscosidad, densidad, presión, y otros, que estudiados de una manera teórica no es muy fácil su comprensión.

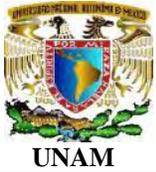
Se cotizaron los diferentes equipos que conformarían el túnel de viento, la compra y llegada a la facultad de Estudios Superiores Zaragoza fue muy tardada, lo cual retrasó demasiado el término de este presente trabajo.

Además se propone un protocolo de experimentación el cual puede ser modificado, de esta manera pueden participar otros alumnos, los cuales pueden hacerle mejoras al equipo.

Justino Cuevas Hernández

Presentan
5

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



INTRODUCCIÓN

El surgimiento de la Ingeniería Química, se debe esencialmente al hecho de haber reconocido que las operaciones unitarias constituyen un conjunto de acciones comunes al proceso de la transformación, y dentro de las cuales se presentan los Fenómenos de Transporte, estos tienen una importancia fundamental para el mecanismo de transporte ya que el pleno entendimiento de ellos es muy importante para el Ingeniero Químico.

La mecánica de fluidos es la disciplina del amplio campo de la mecánica aplicada que estudia el comportamiento de líquidos y gases en reposo o en movimiento. Dentro de ella se encuentra Capa Límite la cual es una delgada capa en donde se presentan mayormente los efectos de la viscosidad, la cual nos ocasiona que el flujo no fluya idealmente ocasionando que se vuelva un flujo laminar o turbulento, esto es de suma importancia el entendimiento pleno de estos conceptos ya que nos permite entender por que los aviones se fabrican en forma aerodinámica con superficies lisas para obtener vuelos más eficaces, en tanto que los autos cada día van siendo más eficientes al no consumir tanto combustible, ya no solo en el diseño de los intercambiadores de calor, turbinas, compresores.

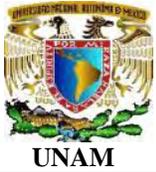
Una de las materias de más alto índice de reprobación en el ciclo intermedio de la carrera de Ingeniería Química en la FES ZARAGOZA son los Fenómenos De Transporte y flujo de fluidos, uno de los temas de mayor interés es la Teoría de Capa Límite, ya que es un tema abstracto y poco entendible, por que presenta dos problemas: el conceptual y el matemático.

Se propone un equipo de laboratorio el cual fue diseñado partiendo de la Teoría de Capa Límite con su protocolo de experimentación para medir el espesor de esta en una forma indirecta, para que se entienda de una manera clara y concisa, además de que el alumno podrá visualizar el concepto con la ayuda del equipo. El túnel de viento fue cotizado con proveedores que ya lo tienen diseñado, en los cuales sus costos de venta son muy altos, como se verá mas adelante en el cuadro comparativo.

Justino Cuevas Hernández

Presentan
5

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA
‘TESIS’
PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



OBJETIVO GENERAL

La finalidad que persigue este proyecto, es que el alumno adquiera conceptos fundamentales de fenómenos de transporte y flujo de fluidos, en este caso, sobre el concepto de capa límite en transferencia de movimiento.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

Proponer un equipo de laboratorio para medir el espesor de Capa Límite en una forma indirecta aproximada, esto se logrará en base a la Teoría de Capa Límite, para que de esta manera se entienda de una manera clara y concisa, además se podrá visualizar el concepto con la ayuda del equipo propuesto.

ALCANCES DEL PROYECTO

Mediante fundamentos que dan origen a la Capa Límite y a sus ecuaciones, se pretende mostrar en una forma resumida y generalizada las ecuaciones del espesor de Capa Límite. Además de que se buscaron equipos parecidos ya diseñados, que se asemejen en algunas características al equipo que se quiere proponer.

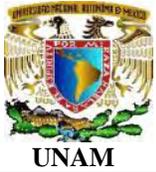
DELIMITACIONES Y LIMITACIONES

En base a las ecuaciones desarrolladas y al equipo propuesto se da el protocolo para la practica en la planta del equipo, el cual puede ser modificado; cabe resaltar que en este proyecto no se realizará ningún experimento.

Justino Cuevas Hernández

Presentan
6

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



NOMENCLATURA

B – Cualquier Anchura

C_f - Coeficiente De Fricción Superficial

c_f - Coeficiente De Fricción Superficial Local

c_p - Calor Específico A Presión Constante

c_v - Calor Específico A Volumen Constante

c – Constante de calor

D – Diámetro

$\frac{d}{dx}$ - Derivada Ordinaria

dx – Distancia Diferencial

F – Fuerza

g - Gravedad

f - Factor De Fricción

H – Altura, Distancia

K - Conductividad Térmica

M = Número De Mach

p – Presión

q - Flujo De Calor

R – Constante De Los Gases

Re – Número De Reynolds

r - Radio

T – Temperatura

T_∞ - Temperatura Externa

T_w - Temperatura De La Pared

U – Velocidad Promedio

U_∞ - Velocidad De Corriente Libre Que Se Aleja De Un Cuerpo

u_τ - Velocidad Cortante

u – x Velocidad De Componente

u_* - Velocidad De Esfuerzo cortante Ó velocidad De fricción

v - Velocidad

V - Velocidad

x – Variable De Coordenada

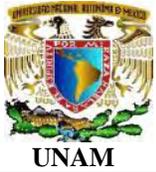
x_c - Distancia Desde El Borde De Ataque Hasta Un Punto Donde La Capa Límite Cambia A Ser Turbulenta.

Justino Cuevas Hernández

Presentan

7

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)

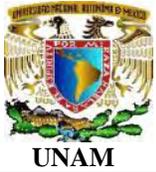


y – Variable de Coordenada
 w – Exponente De Viscosidad
 ℓ, L - Longitud
 ℓ_e - Longitud De Entrada
 τ_w - Esfuerzo Cortante
 μ - Viscosidad
 ν - Viscosidad Cinemática
 ρ - Densidad
 δ - Espesor De Capa Límite
 δ_d - Espesor De Desplazamiento
 δ_i - Espesor De Capa Límite De Transición En Flujo Turbulento
 δ_l - Espesor De La subcapa Viscosa En Flujo Turbulento
 θ - Espesor De Cantidad De Movimiento
 $\partial/\partial y$ - Derivada Parcial
 ψ - Función De Corriente
 η - Variable De Posición
 ξ - Vorticidad
 τ_0 - Esfuerzo Cortante En La Pared Ó Contorno
 e_c - Rugosidad Crítica
 λ - Conductividad

Justino Cuevas Hernández

Presentan
8

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



CAPITULO I

1.-CONSIDERACIONES GENERALES DE CAPA LÍMITE

La viscosidad es la propiedad del fluido que causa los esfuerzos cortantes en los fluidos en movimiento. La viscosidad también es uno de los medios mediante el cual se desarrollan las pérdidas. En flujos turbulentos, los movimientos aleatorios de fluidos superpuestos al promedio, crean esfuerzos cortantes aparentes que son más importantes que los creados por los esfuerzos cortantes viscosos.

El numero de Reynolds

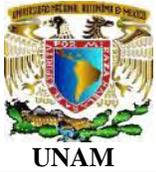
El flujo laminar se define como el flujo en el cual el fluido se mueve en capas, o láminas, que se deslizan suavemente una sobre otra adyacente, únicamente con intercambio molecular de momentum. Cualquier tendencia a la inestabilidad y turbulencia son atenuadas por las fuerzas cortantes viscosas que resisten el movimiento relativo de capas fluidas adyacentes. Sin embargo, en el flujo turbulento las partículas fluidas tienen un movimiento muy errático, con un intercambio de momentum transversal violento. La naturaleza del flujo, es decir, si es laminar o turbulento, y su posición relativa en una escala que muestra la importancia relativa de las tendencias turbulentas a laminares están indicadas por el numero de Reynolds.

El concepto de numero de Reynolds y su interpretación se desarrolla a partir de las ecuaciones de movimiento, y estas ecuaciones son diferenciales parciales no lineales complejas, para la cuales no se ha obtenido su solución general. En el siglo antepasado Osborne Reynolds las estudió para tratar de determinar cuando dos situaciones diferentes de flujo podrían ser similares.

Se dice que dos casos de flujo son dinámicamente similares cuando

1. estos son geoméricamente similares, es decir, que las dimensiones lineales correspondientes tienen una relación constante.
2. las correspondientes fuerzas son geoméricamente similares, o que las presiones en puntos correspondientes tienen una relación constante.

Al considerar dos situaciones de flujo geoméricamente similares, Reynolds dedujo que estos serian dinámicamente similares si las ecuaciones diferenciales generales que describían sus flujos fueran idénticas. Al cambiar las unidades de masa, longitud y tiempo en un conjunto de ecuaciones y al determinar la condición que debe ser satisfecha para hacerlas idénticas a las ecuaciones originales,



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Reynolds encontró que el grupo adimensional $UL\rho/\mu$ debe ser igual para ambos casos. La cantidad u es la velocidad característica, L es la longitud característica, ρ es la densidad y μ la viscosidad. Este grupo, o parámetro, hoy en día se conoce como el número de Reynolds R el cual es igual a

$$R = UL\rho/\mu$$

1.1- Características Generales Del Flujo Externo

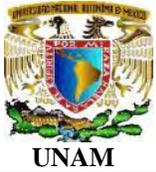
Un cuerpo inmerso en un flujo móvil experimenta una fuerza resultante debido a la interacción entre el cuerpo y el fluido que lo rodea. En algunos casos (como en un avión que vuela en aire no turbulento), el fluido lejos del cuerpo es estacionario y el cuerpo se mueve a través del fluido con velocidad U . En otros casos (como el aire que pasa por un edificio), el cuerpo es estacionario y el fluido circula en torno al cuerpo con velocidad U .⁽¹⁶⁾

Un fluido se define como una sustancia que se deforma de manera continua cuando sobre ella actúa un esfuerzo cortante de cualquier magnitud. Un esfuerzo cortante se crea siempre que una fuerza tangencial actúa sobre una superficie. Cuando sobre sólidos comunes como el acero u otros metales actúa un esfuerzo cortante, inicialmente se deforman (casi siempre la deformación es muy pequeña), aunque no lo hacen de manera continua (no fluyen). Sin embargo, fluidos comunes como agua, aceites o aire satisfacen la definición de fluido; es decir, fluyen cuando sobre ellos actúa un esfuerzo cortante⁽¹⁶⁾.

1.2- Características Generales De Flujo En Tuberías

Cualquier fluido a través de una tubería debe entrar a ésta por algún sitio. La región de flujo cerca del sitio en que el fluido entra al tubo se le denomina región de entrada y se ilustra en la figura (1-1) se puede tratar de los primeros pies de una tubería conectada a un depósito, o de la porción inicial de una gran longitud de un ducto de aire caliente proveniente de un horno⁽¹⁶⁾.

Como se muestra en la figura (1-1), el fluido, por lo general, entra a la tubería con un perfil de velocidad casi uniforme en la sección (1). A medida que el fluido se desplaza por la tubería, los efectos viscosos hacen que se adhiera a la pared de la tubería (la condición de no deslizamiento). Lo anterior se cumple sin importar que el fluido sea aire relativamente no viscoso o un aceite muy viscoso. Así, a lo largo de la pared de la tubería se produce una **Capa Límite** en donde los efectos viscosos son importantes, de modo que el perfil de velocidad inicial cambia con la



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



distancia a lo largo de la tubería, x , hasta que el fluido llega al final de la longitud de entrada, sección (2), más allá de la cual el perfil de velocidad no varía con x . el grosor de la Capa Límite ha aumentado hasta llenar por completo la tubería. Los efectos viscosos son considerablemente importantes dentro de la Capa Límite. Para el fluido fuera de la Capa Límite (dentro del núcleo no viscoso que rodea la línea central de (1) a (2), los efectos viscosos son insignificantes) ⁽¹⁶⁾.

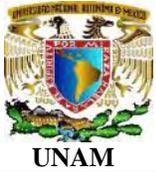
La forma del perfil de velocidad en la tubería y la región de entrada, l_e , depende de si el flujo es laminar o es turbulento. Así como con muchas otras propiedades del flujo en tuberías, la longitud de entrada adimensional, l_e / D , se correlaciona bastante bien con el número de Reynolds. Longitudes de entrada características están dadas por:

$$l_e / D = 0.06 \text{ Re para flujo laminar} \quad (1.1)$$

y

$$l_e / D = 4.4 (\text{Re})^{1/6} \text{ para flujo turbulento} \quad (1.2)$$

Para flujos con muy bajo número de Reynolds la longitud de entrada puede ser bastante corta ($l_e = 0.6D$ si $\text{Re} = 10$), en tanto que para flujos con alto número de Reynolds puede asumir una longitud igual a muchos diámetros de la tubería antes de llegar al final de la región de entrada ($l_e = 120D$ para $\text{Re} = 2000$) ⁽¹⁶⁾.



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)

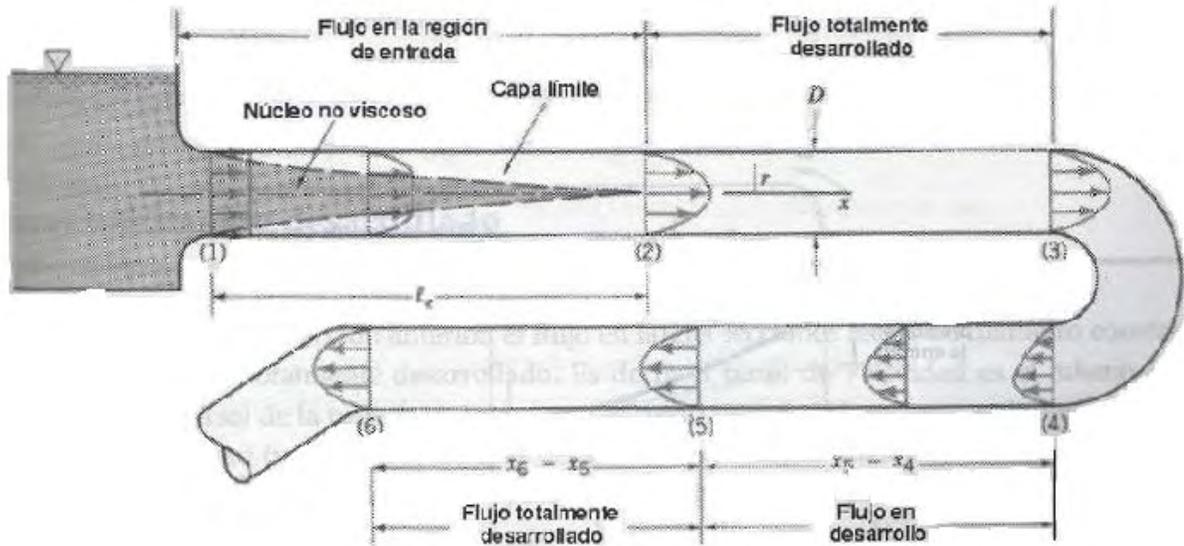
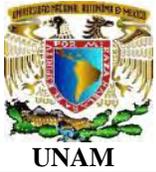


Figura (1.1): región de entrada, flujo en desarrollo y flujo totalmente desarrollado en un sistema de tubería (fundamentos de la mecánica de fluidos, munson)⁽¹⁶⁾.



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



1.3-Conceptos De Elevación Y Resistencia Al Avance (Arrastre)

Cuando un cuerpo se mueve a través de un fluido hay una interacción entre el cuerpo y el fluido, este efecto se puede describir en términos de las fuerzas que hay en la interfase fluido-cuerpo. Estas se pueden describir en términos de los esfuerzos; esfuerzos cortantes en la pared, τ_w , debidos a efectos viscosos y esfuerzos normales debidos a la presión, p . En las figuras (1-2a) y (1-2b) se muestran distribuciones características del esfuerzo cortante y la presión. Tanto τ_w como p varían en magnitud y dirección a lo largo de la superficie ⁽¹⁶⁾.

A menudo es útil conocer la distribución detallada del esfuerzo cortante y la presión sobre la superficie del cuerpo, aun que esta información es difícil de obtener. Sin embargo, muchas veces solo se necesitan los efectos integrados o resultantes de estas distribuciones. La fuerza resultante en la dirección de la velocidad corriente arriba se denomina arrastre o resistencia al avance, y la fuerza resultante normal a la velocidad corriente arriba se le denomina elevación. Como se indica en la figura (1-2c) ⁽¹⁶⁾.

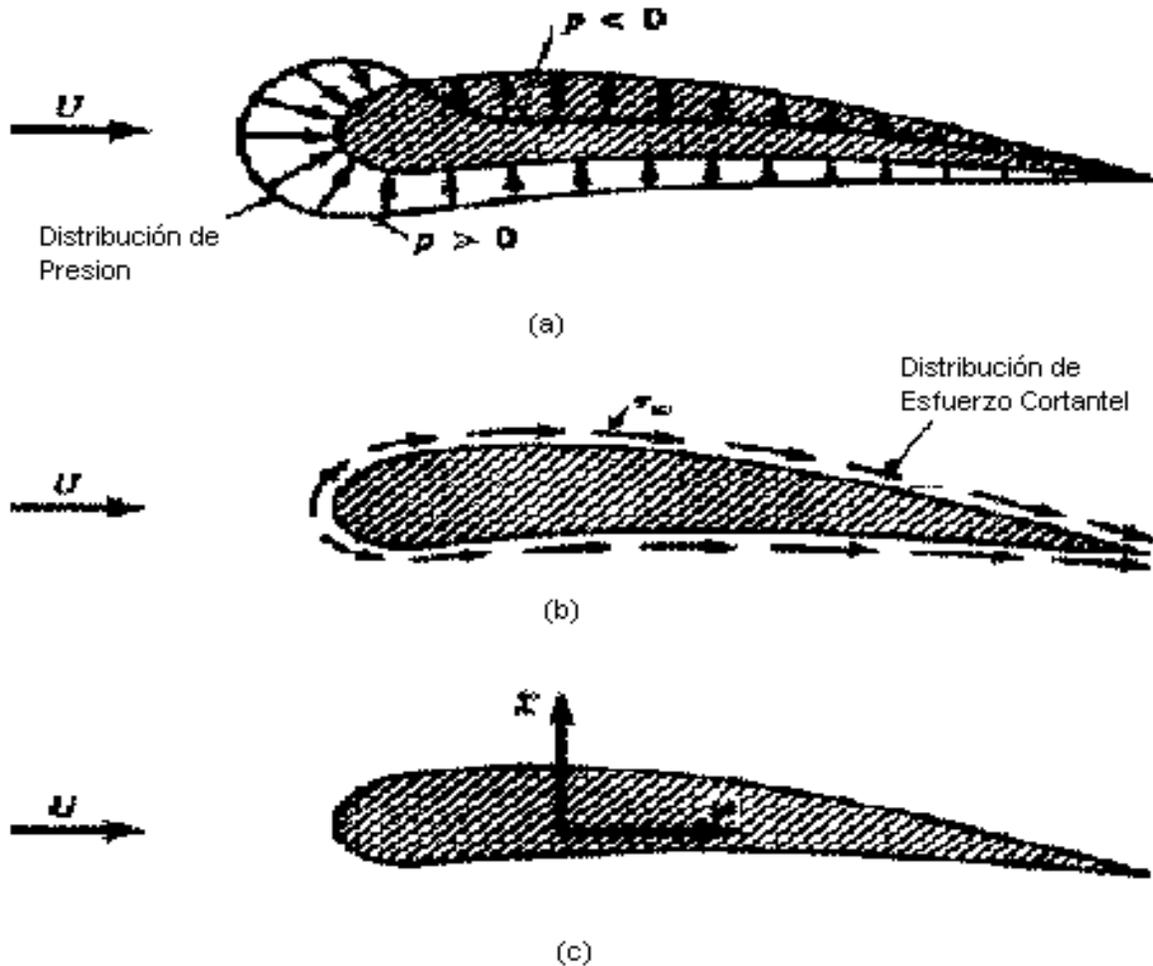
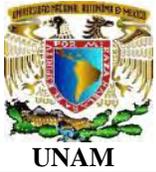


Figura (1.2): Fuerzas del flujo circundante sobre un objeto bidimensional: (a) fuerza de presión, (b) fuerza viscosa, (c) fuerza resultante (elevación ó resistencia) *(fundamentos de la mecánica de fluidos, munson)*⁽¹⁶⁾



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



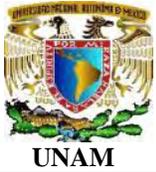
1.4- Flujo Que Pasa Por Un Objeto

Los flujos externos que pasan por un objeto comprenden una amplia variedad de fenómenos de mecánica de fluidos. Claramente, el carácter del campo de flujo es función de la forma del objeto. Es de esperar que los flujos que pasan por formas geométricas relativamente sencillas (por ejemplo, una esfera un cilindro circular) posean flujos menos complejos que los flujos que pasan por formas geométricas complejas, como un árbol o un avión. Sin embargo, inclusive los objetos de forma más simple producen flujos más bien complejos ⁽¹⁶⁾.

Para un objeto de una forma dada, las características de flujo dependen muy fuertemente de varios parámetros como tamaño, orientación, velocidad y propiedades del flujo, el carácter del flujo debe depender de los diversos parámetros adimensionales. Para flujos externos comunes, los más importantes de estos parámetros son el número de Reynolds, $Re = \rho U \ell / \mu = U \ell / \nu$, el número de Mach $M = U / c$, y para flujos con una superficie libre (es decir, flujos con un interfase entre dos fluidos, como el flujo que pasa por un barco), el número de Froude, $Fr = U \sqrt{g \ell}$ (donde ℓ es la longitud característica del objeto (Fr) y c es la velocidad del sonido (M)) ⁽¹⁶⁾.

Recuérdese que el número de Reynolds representa la razón de los efectos inerciales a los efectos viscosos. Cuando no hay ningún efecto viscoso ($\mu = 0$), el número de Reynolds es infinito, de otra parte, cuando no hay ningún efecto inercial (masa insignificante ó pequeña ó $\rho \neq 0$), el número de Reynolds es cero. Resulta evidente que cualquier flujo real tiene un número de Reynolds entre estos dos extremos. La naturaleza del flujo que pasa por un cuerpo depende fuertemente de si $Re > 1$ o $Re < 1$ ⁽¹⁶⁾.

Casi todos los flujos externos más conocidos están asociados con objetos de tamaño moderado cuya longitud característica es del orden de 0.01 m. Además, velocidades corriente arriba representativas son del orden de $0.01 \text{ m/s} < U < 100 \text{ m/s}$ y los fluidos suelen ser agua o aire. El intervalo resultante de números de Reynolds para flujos como estos es aproximadamente $10 < Re < 10^9$. Como regla práctica, flujos con $Re > 100$ son dominados por los efectos inerciales, mientras que flujos con $Re < 1$ son dominados por efectos viscosos. Así, los flujos externos más conocidos están dominados por la inercia ⁽¹⁶⁾.



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Hay muchos flujos externos en los que el número de Reynolds es considerablemente menor que 1, lo cual indica en cierto sentido que las fuerzas viscosas son más importantes que las inerciales. El asentamiento gradual de pequeñas partículas de polvo en un lago o corriente está regido por principios de flujo con un número de Reynolds bajo debido al pequeño diámetro de las partículas y su poca velocidad de asentamiento. De manera semejante, el número de Reynolds para objetos que se mueven a través de aceites altamente viscosos es pequeño porque μ es grande. Las diferencias generales entre flujo con número de Reynolds pequeño o grande que pasa por objetos aerodinámicos o romos se puede ilustrar considerando flujos que pasan por dos objetos; una placa lisa paralela a la velocidad corriente arriba y un cilindro circular ⁽¹⁶⁾.

En la figura (1.3) se muestran flujos que pasan por tres placas lisas de longitud ℓ con $Re = \rho V \ell / \mu = 0.1, 10$ y 10^7 . Si el número de Reynolds es pequeño, los efectos viscosos son relativamente fuertes y la placa afecta al flujo uniforme lejos corriente arriba enfrente, arriba, abajo y detrás de la placa. Para llegar a la porción del campo de flujo donde la velocidad ha sido modificada por menos del 1% de su valor sin perturbar (es decir, $U-u < 0.01 U$), es necesario desplazarse relativamente lejos de la placa. En flujos con número de Reynolds bajo los efectos viscosos se detectan lejos del objeto en todas las direcciones ⁽¹⁶⁾.

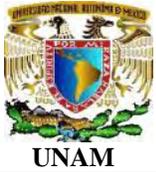
A medida que aumenta el número de Reynolds (incrementa U , por ejemplo), la región en que los efectos viscosos son importantes se reduce en todas las direcciones excepto corriente abajo, como se muestra en la figura (1.3b). No es necesario desplazarse muy lejos enfrente, arriba o debajo de la placa para llegar a áreas donde no son detectados los efectos viscosos de la placa. Las líneas de corriente están desplazadas de sus condiciones originales uniformes corriente arriba, pero el desplazamiento no es tan grande como para la situación $Re = 0.1$ que se muestra en la figura (1-3 a) ⁽¹⁶⁾.

Si el número de Reynolds es grande (pero no infinito), el flujo es dominado por efectos inerciales y los efectos viscosos son insignificantes en todas partes, excepto en una región muy próxima a la placa y en la región de estela relativamente delgada detrás de la placa, como se muestra en la figura (1.3c). Como la viscosidad del fluido es diferente de cero ($Re < \delta$), se concluye que el fluido se debe adherir a la superficie del sólido (la condición en la frontera sin deslizamiento). Hay una delgada región de la Capa Límite de espesor $\delta = \delta(x) < \ell$ (es decir, delgada respecto de la longitud de la placa) próximo a la placa en donde la velocidad del fluido cambia desde el valor corriente de $u = U$ hasta

Justino Cuevas Hernández

Presentan
16

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



velocidad cero sobre la placa. El espesor de esta aumenta en la dirección del flujo, comenzando desde cero en el borde delantero o principal de la placa. El flujo dentro de la capa límite puede ser laminar o turbulento, dependiendo de varios parámetros ⁽¹⁶⁾.

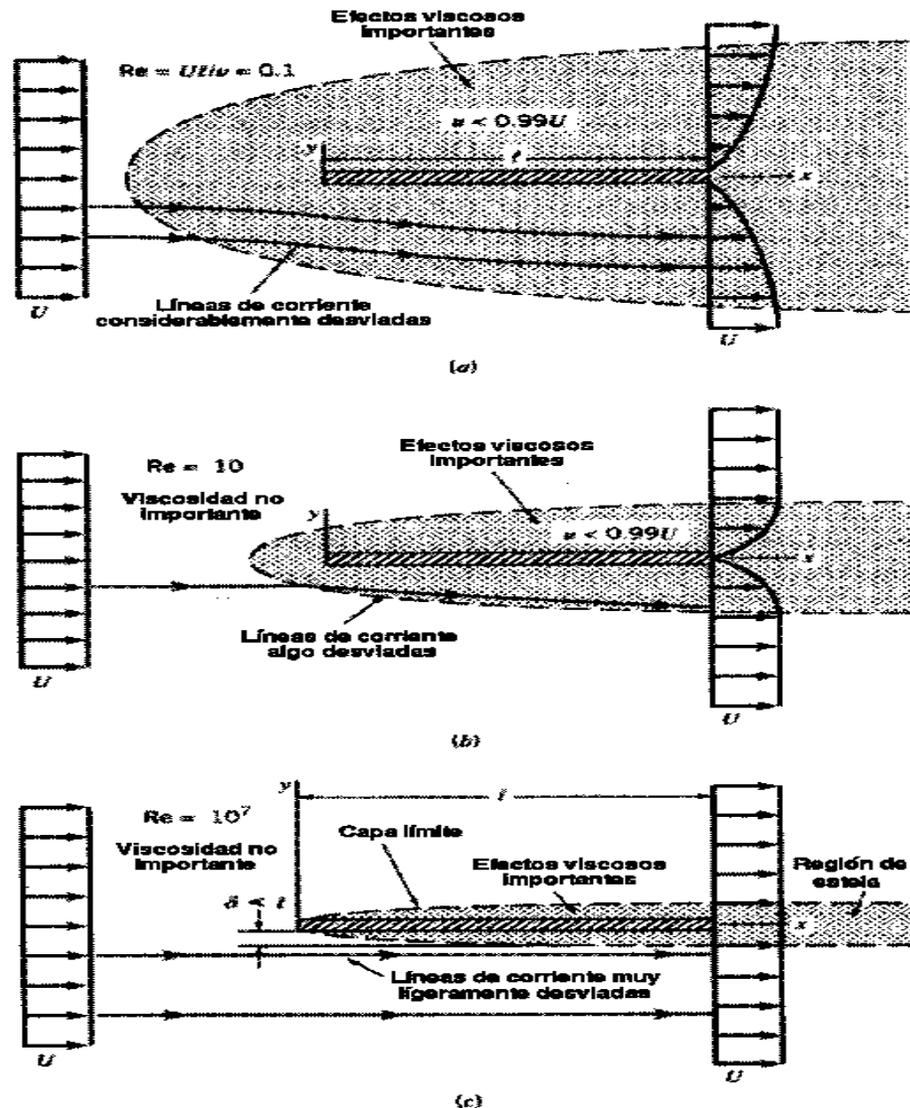
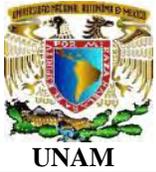


Figura (1.3): Carácter del flujo viscoso estable que pasa por una placa lisa paralela a la velocidad corriente arriba; (a) flujo con número de Reynolds bajo, (b) flujo con número de Reynolds moderado, (c) flujo con número de Reynolds grande (fundamentos de la mecánica de fluidos, munson)⁽¹⁶⁾.



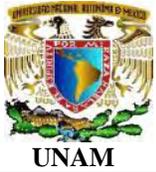
INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



1.5-Concepto De Capa Límite

Con los fluidos reales no existe «deslizamiento» en las fronteras rígidas. La velocidad del fluido con respecto a la frontera es cero. Como resultado de esto, el gradiente de la velocidad y el esfuerzo cortante tienen valores máximos en la frontera y disminuyen hacia el interior del fluido. Este es el caso, pero aún más marcado, para el extremo opuesto de una viscosidad muy baja y altas velocidades o aceleraciones del movimiento del fluido. En estos casos, cerca de la pared la pendiente del gradiente de la velocidad se hace muy grande, y el único esfuerzo tangencial viscoso de importancia se encuentra dentro de una capa relativamente delgada, próxima a la frontera. Fuera de esta capa, los gradientes de velocidad disminuyen rápidamente y el esfuerzo tangencial viscoso es pequeño. Esta estrecha zona es llamada **capa límite**. Dentro de esta capa, los efectos viscosos sobrepasan a los inerciales, determinando la deformación del fluido. Por fuera de esta capa, el flujo sufrirá solamente una influencia menor de las fuerzas viscosas y estará determinado principalmente por la relación entre la inercia, el gradiente de presión y las fuerzas de cuerpo que están en interacción con la geometría de las fronteras sólidas. En consecuencia, las líneas de corriente del flujo principal, más allá de la capa límite, corresponden esencialmente a un flujo con potencial de velocidades. Este concepto de capa límite está ilustrado en la figura (1.4), la cual muestra el flujo sobre una placa delgada. Si el fluido fuera completamente no viscoso y hubiera deslizamiento en las fronteras, las líneas de corriente y las distribuciones de la velocidad serían las mostradas por las líneas punteadas. Con una viscosidad pequeña y bajo condición de no deslizamiento (en las fronteras), las distribuciones de la velocidad se alterarían en la forma mostrada por las líneas continuas. Aguas arriba de la placa, el fluido tiene velocidad uniforme; sin embargo, al pasar sobre estos objetos, es cero en la superficie frontera y se transforma rápidamente en la velocidad de un flujo esencialmente no viscoso. La distancia dentro de la cual actúa la parte más importante de la viscosidad es el espesor de la llamada capa límite. Fuera de la capa límite de la placa, la única modificación que sufre el flujo uniforme es un ligero desplazamiento de las líneas de corriente. Debido a que el fluido es «frenado» dentro de la capa límite, este desplazamiento es necesario a fin de que se satisfaga la condición de continuidad Shames, I.H. "La Mecánica de Fluidos" ⁽³⁾.



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)

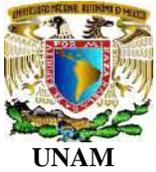


Figura (1.4) Espesor de la capa límite (elaborado por Juan Carlos Poblano y Justino Cuevas).

1.6-Separación De La Capa Límite

Así como con el flujo que pasa por la placa lisa anteriormente descrito, el flujo que pasa por un objeto romo (como un cilindro circular) también varía con el número de Reynolds. En general, mientras mayor sea el número de Reynolds, menor es la región de flujo donde son importantes los efectos viscosos. Sin embargo, para objetos que no son suficientemente aerodinámicos se observa una característica adicional del flujo denominado separación de flujo y que se ilustra en la figura (1.5) (16).

El flujo con número de Reynolds bajo ($Re = UD/v < 1$) que pasa por un cilindro circular se caracteriza por el hecho de que la presencia del cilindro y los efectos viscosos acompañantes se notan a través de toda una porción relativamente grande dentro del flujo. Como se indica en la figura (1.5a) para $Re = UD/v < 0.1$, los efectos viscosos son importantes varios diámetros en cualquier dirección desde el cilindro. Una característica algo sorprendente de este flujo es que las líneas de corriente son esencialmente simétricas con respecto al centro del cilindro: el patrón de las líneas de corriente es el mismo enfrente del cilindro que atrás de éste. A medida que aumenta el número de Reynolds, la región adelante del cilindro en donde los efectos viscosos son importantes se vuelven más



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



pequeños, con la región viscosa extendiéndose solo una corta distancia adelante del cilindro. Los efectos viscosos son llevados corriente abajo y el flujo pierde su simetría ⁽¹⁶⁾.

Otra característica de los flujos se vuelve importante cuando el flujo se separa del cuerpo en el **Punto de separación** como se indica en la figura (1.5b). Con el incremento en número de Reynolds, la inercia del fluido se vuelve más importante y en algún sitio sobre el cuerpo, denotado punto de separación, la inercia del fluido es tal que no puede seguir la trayectoria curva en torno a la parte trasera del cuerpo. El resultado es una burbuja de separación a trás del cilindro, donde algo del fluido realmente circula en sentido contrario, contra la dirección del flujo corriente arriba ⁽¹⁶⁾.

A números de Reynolds todavía mas grandes, la zona afectada por las fuerzas viscosas es forzada más aun corriente abajo hasta que solo incluye una delgada capa límite ($\delta < D$) sobre la porción frontal del cilindro y una región de estela irregular inestable (tal vez turbulenta) que se extiende lejos corriente abajo del cilindro. El fluido en la región fuera de la capa límite y de la región de estela circula como si fuese no viscosa. Por supuesto, la viscosidad del fluido es la misma en todo el cuerpo del flujo. El que los efectos viscosos sean importantes o no depende de que región de flujo se considere. Los gradientes de velocidad dentro de las regiones de la capa límite y de estela son mucho más grandes que en el resto del flujo. Como el esfuerzo cortante (es decir, el efecto viscoso) es el producto de la viscosidad del fluido y el gradiente de velocidad, se concluye que los efectos viscosos están confinados a las regiones de la capa límite y de estela ⁽¹⁶⁾.

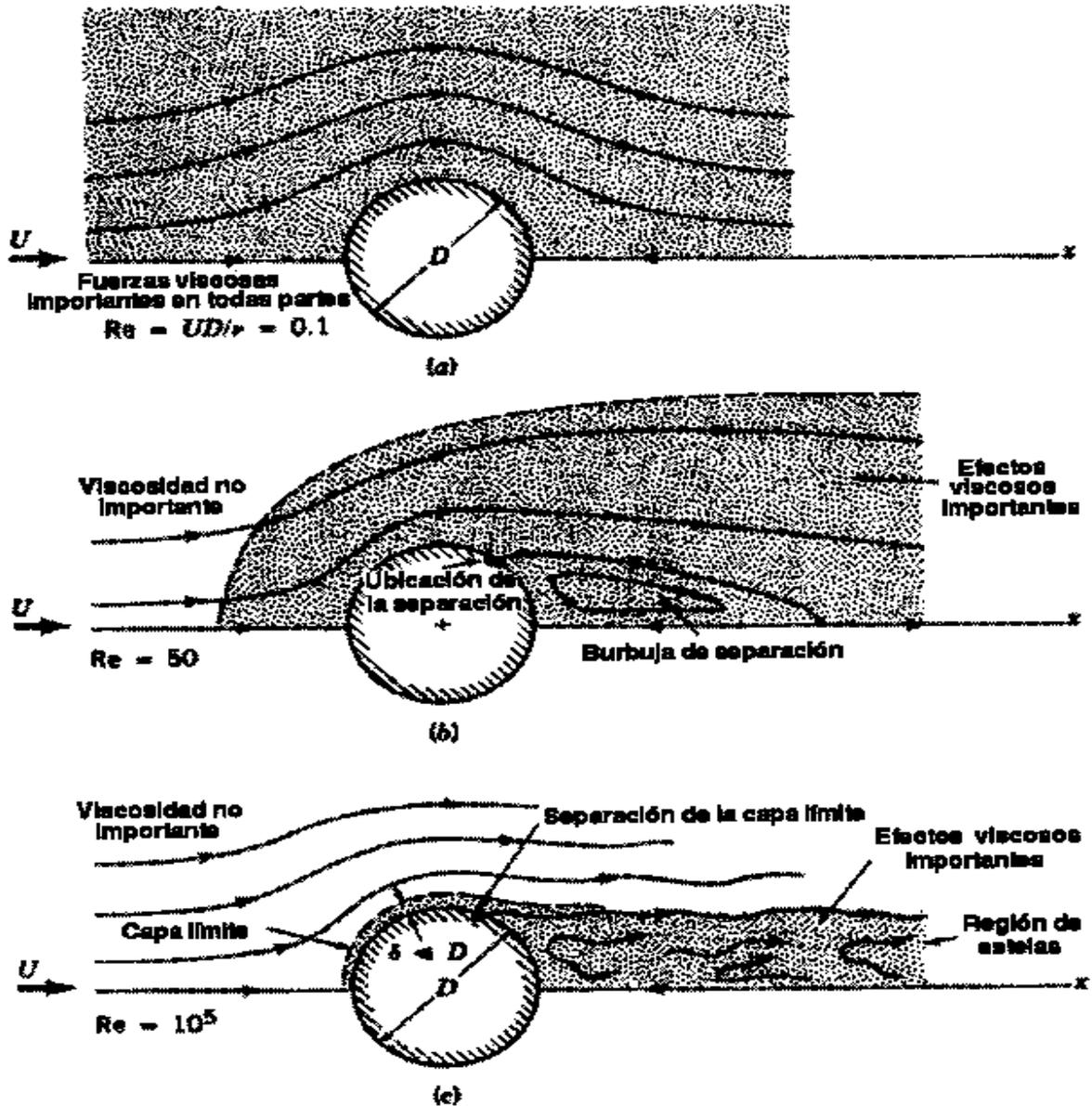
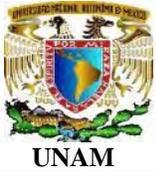


Figura (1.5): Carácter del fluido viscoso que pasa por un cilindro circular: (a) flujo con número de Reynolds bajo, (b) flujo con número de Reynolds moderado, (c) flujo con número de Reynolds grande (*fundamentos de la mecánica de fluidos, munson*)
 (16)



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



1.7- Espesor De La Capa Límite

El espesor δ no puede definirse con precisión, puesto que el punto que separa a la capa límite de la zona donde la influencia de la viscosidad puede ser despreciada, no es claro; por lo tanto es común definir δ como la distancia al punto donde la velocidad está dentro de algún porcentaje arbitrario (usualmente el 1 %) de la velocidad en la corriente libre. Como puede notarse, el gradiente de la velocidad en la capa límite causa una «disminución» o «defecto» de la cantidad de masa que fluye en la zona adyacente a la capa límite, con respecto a la masa que fluiría por la misma zona, en ausencia de la capa límite. Por continuidad, este defecto es equivalente a desplazar las líneas de corriente hacia afuera de la capa límite, en una distancia finita, conocida como el **espesor de desplazamiento** el cual está definido por ⁽³⁾:

$$pus^* = p \int_0^h (U - u) dy \quad (1.2)$$

$$\delta_d = \int_0^h \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (1.3)$$

Donde $h \geq \delta$. La ecuación (1.2) muestra que δ_d es el espesor de una capa imaginaria de fluido de velocidad U , y cuyo gasto en masa es igual al «defecto o disminución». El espesor de desplazamiento puede determinarse con mucha mayor precisión que el espesor total δ ⁽³⁾.

La disminución del gasto dentro de δ también da origen a una reducción de cantidad de movimiento de la masa que fluye por unidad de tiempo. Es útil definir un **espesor de cantidad de movimiento**, como el espesor de una capa imaginaria de fluido, de velocidad U , para la cual la cantidad de movimiento de la masa que fluye por unidad de tiempo es igual a la reducción causada por el perfil de la velocidad. Este espesor está definido por ⁽³⁾.

$$p\theta U^2 = p \int_0^h u(U - u) dy \quad (1.4)$$

o por

$$\theta = \int_0^h \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (1.5)$$

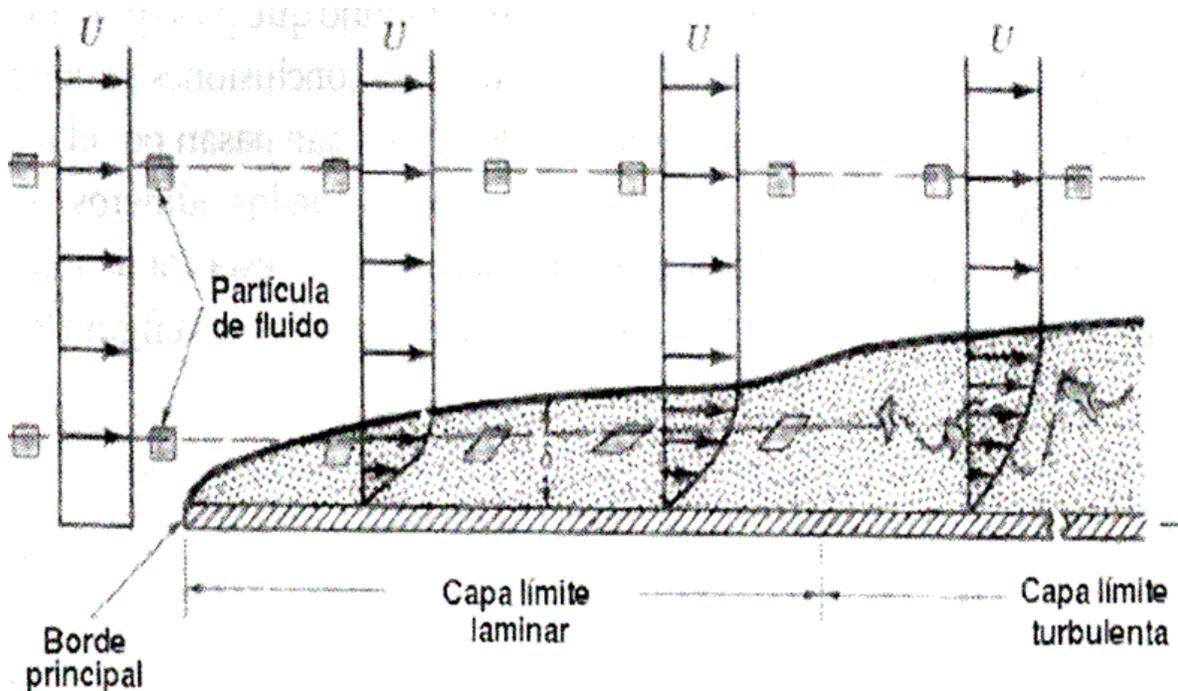
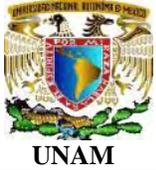


Figura (1.6): Espesor de la capa límite y distorsión de una partícula de fluido a medida que circula dentro de ella (Shames, I.H. "La Mecánica de Fluidos") ⁽³⁾.

1.8- Flujo En La Capa Límite Turbulenta

La estructura del flujo en la capa límite turbulenta es muy compleja, aleatoria e irregular. Comparte muchas de las características descritas para el flujo turbulento en tuberías. En particular, la velocidad en cualquier ubicación dada del flujo es inestable de manera aleatoria. Se puede considerar que el flujo es una mezcla de remolinos entrelazados de diferentes tamaños (diámetros y velocidades angulares). Las diversas cantidades de fluido (es decir, masa, cantidad de movimiento, energía) son transportadas corriente abajo en la dirección de la corriente libre como en una capa límite laminar. Para flujo turbulento también son transportadas a través de la capa límite (en dirección perpendicular a la placa) por el transporte aleatorio de partículas de fluido de tamaño finito asociadas con los remolinos turbulentos. Con estos remolinos de tamaño finito está asociado el mezclado: considerablemente más que el asociado con el que se encuentra en



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

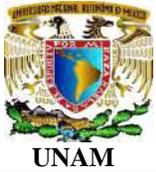
PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



flujo laminar, donde está el mezclado confinado a la escala molecular. Aunque hay mucho movimiento aleatorio de partículas de fluido perpendiculares a la placa, hay muy poco traspaso neto de masa a través de la capa límite; por mucho, el caudal es paralelo a la placa. Sin embargo, hay un traspaso neto considerable de la componente x de la cantidad de movimiento perpendicular a la placa debido al movimiento aleatorio de las partículas. Las partículas de fluido que se mueven hacia la placa (en la dirección y negativa) pierden algo del exceso en cantidad de movimiento (proviene de áreas de mayor velocidad). El resultado neto es que la placa actúa como un pozo de cantidad de movimiento extrayendo de manera continua cantidad de movimiento del fluido. Para flujos laminares, el traspaso en sentido transversal a la corriente de estas propiedades sólo se efectúa a escala molecular. Para flujo turbulento la aleatoriedad está asociada con el mezclado de las partículas de fluido. Por consiguiente, la fuerza cortante para flujo en la capa límite turbulenta es considerablemente mayor de lo que es para flujo en la capa límite laminar ⁽¹⁶⁾.

No existen soluciones exactas para flujo en la capa límite turbulenta, es posible resolver las ecuaciones de Prandtl para la capa límite de flujo laminar que pasa por una placa lisa a fin de obtener la solución de Blasius (que es exacta dentro del marco de referencia de la hipótesis establecidas en las ecuaciones de la capa límite). Como no hay ninguna expresión precisa para el esfuerzo cortante en flujo turbulento. No se cuenta con soluciones para flujo turbulento. Sin embargo, se ha avanzado bastante en la obtención de soluciones numéricas (por computadora) para flujo turbulento usando relaciones aproximadas de esfuerzo cortante. También se ha progresado en el área de la integración directa totalmente numérica de las ecuaciones básicas, las ecuaciones de Navier-Stokes ⁽¹⁶⁾.

Asimismo, es posible obtener resultados aproximados para flujo en la capa límite turbulenta usando la ecuación integral de la cantidad de movimiento, que es válida para flujo laminar o turbulento. Lo que se necesita para usar esta ecuación son aproximaciones razonables al perfil de velocidad $u=U g(Y)$, donde $Y=y/\delta$ y u es la velocidad media con respecto al tiempo, y una relación funcional que describe el esfuerzo cortante en la pared. Para flujo laminar el esfuerzo cortante en la pared se usa como $\tau_w = \mu(\partial u / \partial y)_{y=0}$. Teóricamente, este método debe funcionar también para capas límites turbulentas. Sin embargo los detalles del gradiente de velocidad en la pared no son bien comprendidos para flujo turbulento. Así, es necesario aplicar alguna relación empírica para el esfuerzo cortante en la pared ⁽¹⁶⁾.



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



CAPITULO II

2.-CAPA LÍMITE LAMINAR EN FLUJO INCOMPRESIBLE

2.1-Ecuaciones De Capa Límite Laminar

La ecuación de Navier-Stokes para la componente x cuando se trata de un flujo continuo, incompresible, plano es (se omite el término de la gravedad) ⁽¹⁷⁾;

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.1)$$

En la teoría de la capa límite se supone que esta es muy delgada, por lo que no hay variación en la dirección de la misma, es decir, $p = p(x)$. Además (éste es un punto muy importante), la presión $p(x)$ está dada por la solución de flujo inviscido lo mismo que la presión en la pared; por consiguiente se conoce la presión. Lo que deja sólo dos incógnitas, u y v . La ecuación anterior (2.1) proporciona una ecuación y la ecuación de continuidad ⁽¹⁷⁾:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.2)$$

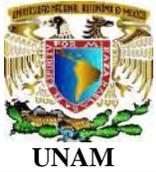
Da la otra. La ecuación de Navier-Stokes para la componente x no se utiliza en la teoría de la capa límite puesto que todos sus términos son extremadamente pequeños (obviamente $v \ll u$) ⁽¹⁷⁾.

Además de la simplificación que proporciona un gradiente de presión conocido, es obvio que $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ es mucho menor que los gradientes que existen en la dirección

“y” “por consiguiente, si se omite $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$, la ecuación para la capa límite que debe ser resuelta es:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{d p}{d x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.3)$$

Donde se supone que conocemos el gradiente de presión $\frac{d p}{d x}$ con la solución de flujo inviscido. Lo que a menudo se denomina como ecuación para la capa límite de Prandtl, nombrado así en honor de Ludwig Prandtl (1875-1953). Ningún término del lado izquierdo puede ser omitido; la componente “y” de v puede ser



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



pequeña, aunque el gradiente de velocidad $\partial u / \partial y$ obviamente es bastante grande; por consiguiente hay que conservar el producto ⁽¹⁷⁾.

Se presta atención al flujo sobre una placa plana con gradiente de presión cero. Además, se introduce la función de corriente:

$$\begin{aligned} u &= \frac{\partial \psi}{\partial y} \\ v &= -\frac{\partial \psi}{\partial x} \end{aligned} \quad (2.4)$$

La ecuación de capa límite se vuelve:

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \nu \frac{\partial^3 \psi}{\partial y^3} \quad (2.5)$$

En esta forma no se separa la dependencia de x y y. Si se transforma esta ecuación (tales transformaciones se realizan mediante prueba y error y experiencia) con ⁽¹⁷⁾:

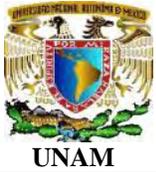
$$\begin{aligned} \xi &= x \\ \eta &= y \sqrt{\frac{U_\infty}{\nu x}} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Y el resultado es:

$$-\frac{1}{2\xi} \left(\frac{\partial \psi}{\partial \eta} \right)^2 + \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi \partial \eta} - \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi \partial \eta^2} = \nu \frac{\partial^3 \psi}{\partial \eta^3} \sqrt{\frac{U_\infty}{\nu \xi}} \quad (2.7)$$

Esta ecuación podría parecer más difícil de resolver que la ecuación (2.5), pero si se observa la posición de ξ en esta ecuación, las variables se separan por medio de ⁽¹⁷⁾:

$$\psi(\xi, \eta) = \sqrt{U_\infty \nu \xi} F(\eta) \quad (2.8)$$



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



En tal caso se comprueba que las componentes de la velocidad son, utilizando las ecuaciones (2.6) y (2.8) ⁽¹⁷⁾:

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} = U_{\infty} F'(\eta) \tag{2.9}$$

$$v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\nu U_{\infty}}{x}} (\eta F' - F)$$

Sustituyendo la ecuación (2.8) en la ecuación (2.7) y se obtiene una ecuación diferencial, no lineal, ordinaria, la cual es:

$$F \frac{d^2 F}{d\eta^2} + 2 \frac{d^3 F}{d\eta^3} = 0 \tag{2.10}$$

Esta ecuación la usamos en lugar de la ecuación diferencial parcial (2.5). A continuación se establecen las condiciones límite ⁽¹⁷⁾.

Las condiciones límite $u(x, 0) = 0$, $v(x, 0) = 0$ y $u(x, y \gg \delta) = U_{\infty}$ adoptan la forma

$$F = F' = 0 \text{ con } \eta = 0 \quad F' = 1 \text{ con } \eta \text{ grande} \tag{2.11}$$

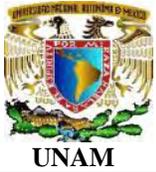
El problema de valor límite, que incluye la ecuación diferencial ordinaria (2.10) y las condiciones límite (2.11) ahora puede ser resuelto numéricamente por medio de una computadora. Los resultados se tabulan en la tabla (2.1) ⁽¹⁷⁾.

Si se define el espesor de la capa límite como el punto donde $u = 0.99 U_{\infty}$, en la tabla 2.1 se ve que éste ocurre donde $\eta = 5$. Por consiguiente, con $\eta = 5$ y $y = \delta$ en la ecuación (2.6), se obtiene ⁽¹⁷⁾:

$$\delta = 5 \sqrt{\frac{\nu x}{U_{\infty}}} \tag{2.12}$$

Con:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} = U_{\infty} F'' \sqrt{\frac{U_{\infty}}{\nu x}} \tag{2.13}$$



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



TABLA 2.1 Solución para la capa límite con $dp/dx = 0$ (Merle C. Potter, David C. Wiggert
"Mecánica de Fluidos"⁽¹⁷⁾).

$\eta = y \sqrt{\frac{U_\infty}{\nu x}}$	F	$F' = u / U_\infty$	$\frac{1}{2} (\eta F' - F)$	F''
0	0	0	0	0.3321
1	0.1656	0.3298	0.0821	0.3230
2	0.6500	0.6298	0.3005	0.2668
3	1.397	0.8461	0.5708	0.1614
4	2.306	0.9555	0.7581	0.0642
5	3.283	0.9916	0.8379	0.0159
6	4.280	0.9990	0.8572	0.0024
7	5.279	0.9999	0.8604	0.0002
8	6.279	1.0000	0.8605	0.0000

El esfuerzo cortante en la pared en una capa límite con $dp/dx = 0$ es:

$$\tau_o = \mu \frac{du}{dy} \Big|_{y=0} = 0.332 \rho U_\infty^2 \sqrt{\frac{\nu}{x U_\infty}} \quad (2.14)$$

El coeficiente de fricción local es ⁽¹⁷⁾:

$$c_f = \frac{0.664}{\sqrt{Re_x}} \quad (2.15)$$

Y el coeficiente de fricción superficial es:

$$C_f = \frac{1.33}{\sqrt{Re_L}} \quad (2.16)$$

Integrando numéricamente las ecuaciones de los espesores de desplazamiento y cantidad de movimiento son ⁽¹⁷⁾:

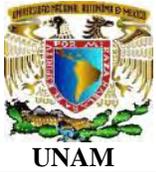


INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



$$\delta_i = 1.72 \sqrt{\frac{\nu x}{U_\infty}} \quad (2.17)$$
$$\theta = 0.664 \sqrt{\frac{\nu x}{U_\infty}}$$



CAPITULO III

3.-CAPA LÍMITE TURBULENTO EN FLUJO INCOMPRESIBLE

3.1.-Fundamentos De Flujo Turbulento

El flujo turbulento es más comúnmente desarrollado debido a que la naturaleza tiene tendencia hacia el desorden y esto en términos de flujos significa tendencia hacia la turbulencia. Este tipo de flujo se caracteriza por trayectorias circulares erráticas, semejantes a remolinos. El flujo turbulento ocurre cuando las velocidades de flujo son generalmente muy altas o en fluidos en los que las fuerzas viscosas son muy pequeñas.

La turbulencia puede originarse por la presencia de paredes en contacto con el fluido o por la existencia de capas que se muevan a diferentes velocidades. Además, un flujo turbulento puede desarrollarse bien sea en un conducto liso o en un conducto rugoso.

3.2.-Algunas Observaciones De Flujo Turbulento A Través De Tuberías

El estudio de flujo turbulento desarrollado en un tubo circular es de interés sustancial en flujos reales puesto que la mayoría de los flujos encontrados en aplicaciones prácticas son flujos turbulentos en tubos.

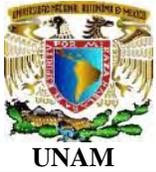
Características Y Desarrollo

En el flujo turbulento las partículas se mueven en trayectorias irregulares, que no son suaves ni fijas. El flujo es turbulento si las fuerzas viscosas son débiles en relación con las fuerzas inerciales.

La turbulencia según la definición de Taylor y Von Karman, puede producirse por el paso del fluido sobre superficies de frontera, o por el flujo de capas de fluido, a diferentes velocidades que se mueven una encima de la otra.

Tipos de turbulencia:

* Turbulencia de pared: generada por efectos viscosos debida a la existencia de paredes.



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



* Turbulencia libre: producida en la ausencia de pared y generada por el movimiento de capas de fluido a diferentes velocidades.

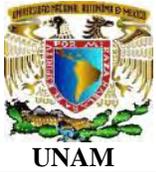
Diferentes teorías han tratado de explicar el origen y la estructura de la turbulencia. Algunas explican que la turbulencia es debida a la formación de vórtices en la capa límite, como consecuencia de los disturbios que se generan por discontinuidades bruscas existentes en la pared; mientras que otras teorías atribuyen la turbulencia a la influencia del esfuerzo cortante, cuando se presenta un gradiente de velocidades con discontinuidades bruscas. Sin embargo a pesar de las múltiples investigaciones, los resultados obtenidos sobre el desarrollo de la turbulencia no son totalmente satisfactorios, ya que solo pueden estudiarse experimental y teóricamente como un fenómeno estadístico.

El régimen de flujo depende de tres parámetros físicos que describen las condiciones del flujo. El primer parámetro es una escala de longitud del sistema de flujo, como el espesor de una capa límite o el diámetro de una tubería. Si dicha escala de longitud es lo bastante grande, una perturbación del flujo podría aumentar y el flujo podría volverse turbulento. El segundo parámetro es una escala de velocidad tal como un promedio de la velocidad; si la velocidad es lo bastante grande el flujo podría ser turbulento. El tercer parámetro es la viscosidad cinemática; si la viscosidad es lo bastante pequeña, el flujo puede ser turbulento.

Estos tres parámetros se combinan en un solo parámetro conocido como el número de Reynolds (Re), con el cual se puede predecir el régimen de flujo, si $Re > 4000$ el flujo será turbulento.

Cuando el flujo entra en régimen turbulento, se puede presentar el caso de que el conducto sea liso o el caso de que el conducto sea rugoso.

Para números de Reynolds inferiores a 2000, el flujo es laminar. Para números de Reynolds por encima de 4000, el flujo suele ser turbulento. Entre estos dos valores, hay una región de transición en que el flujo puede ser laminar o turbulento, como se ilustra en la fig. (3.1a, b, c).



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)

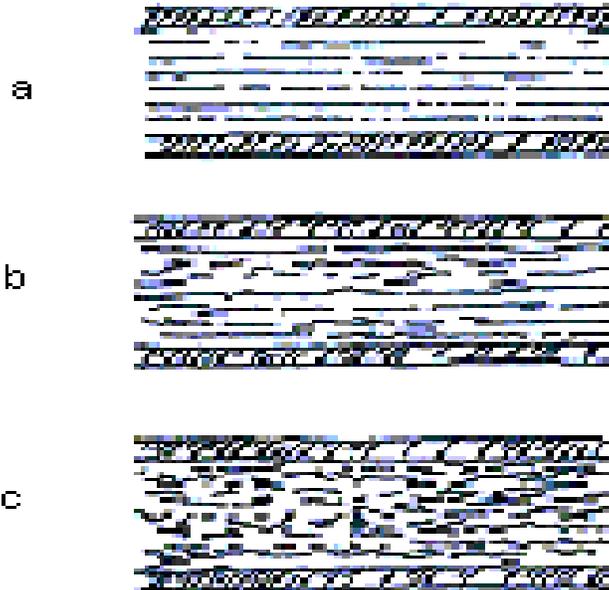


Figura (3.1): flujo laminar y turbulento: (a) flujo laminar sin alterar; (b) región de transición en que el flujo se está volviendo turbulento; (c) flujo turbulento.

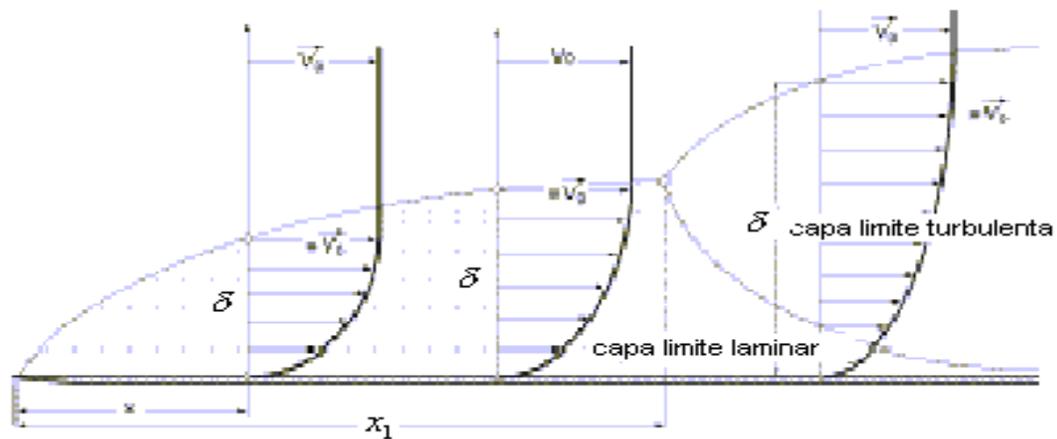
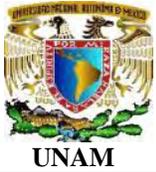


Figura (3.2): Desarrollo De La Capa Límite



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Tubos lisos:

En los tubos se presentan tres sub-capas:

- Subcapa viscosa: el movimiento es primariamente viscoso, aunque no es estrictamente laminar y la velocidad varía linealmente. Esta subcapa es muy difícil de observar bajo condiciones experimentales. Sin embargo su importancia es decisiva para la determinación de las fuerzas de arrastre.
- Capa de transición: el flujo es turbulento, pero la viscosidad todavía ejerce su influencia.
- Zona de turbulencia: se aplica la teoría de longitud de mezcla de Prandtl, asumiendo que el flujo turbulento en una tubería está fuertemente influenciado por el fenómeno del flujo cercano a la pared.

Factor de fricción para tubos lisos:

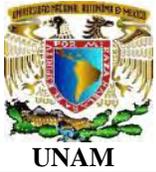
Donde los efectos de viscosidad predominan y el factor de fricción depende únicamente del número de Reynolds.

Tubos rugosos:

Se presentan dos casos, según que el tamaño de la rugosidad sea o no mayor que el espesor de las sub-capas viscosas y de transición.

Factor de fricción para tubos rugosos:

- Si el tamaño de la rugosidad es mayor que el espesor de la sub-capas viscosa y de transición: la viscosidad no tendrá ningún efecto apreciable sobre el factor de fricción, y este solo dependerá de la rugosidad relativa.
- Si el tamaño de la rugosidad es menor que el espesor de las sub-capas viscosas y de transición: se presenta el régimen de transición entre el movimiento turbulento liso y turbulento rugoso, donde el factor de fricción depende del número de Reynolds y de la rugosidad relativa.



3.3.- Capa Límite turbulenta: Forma de la ley de la potencia

Para flujo de capa límite turbulento se cuenta con dos métodos para obtener la información deseada. Ambos métodos utilizan datos experimentales pero el que se presenta en esta sección es el más simple de los dos. El segundo método, presentado en la siguiente sección, proporciona más información que la que por regla general se desea en la mayoría de las aplicaciones, sin embargo, es más precisa⁽¹⁷⁾.

En este método primero se adaptan los datos del perfil de velocidad con una ecuación de ley de potencia. La forma de la ley de potencia es:

$$\frac{\bar{u}}{U_{\infty}} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{i/n} \quad n = \begin{cases} 7 & \text{Re}_x < 10^7 \\ 8 & 10^7 < \text{Re}_x < 10^8 \\ 9 & 10^8 < \text{Re}_x < 10^9 \end{cases} \quad (3.1)$$

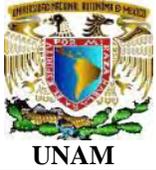
Donde

$$\text{Re}_x = \frac{U_{\infty} x}{\nu} \quad (3.2)$$

Ahora se puede aplicar la ecuación integral de Von Kármán siguiendo los pasos utilizados para flujo laminar, excepto cuando se evalúa el esfuerzo cortante en la pared. La forma de la ley de la potencia (3.1) da $(\partial u / \partial y)_{y=0} = \infty$; por consiguiente el perfil da resultados malos cerca de la pared, en especial cuando se trata del esfuerzo cortante. Así que en lugar de utilizar $\tau_0 = (\mu \partial u / \partial y)_{y=0}$, usamos una relación empírica; la fórmula de Blasius, nombrada así en honor de Paul R. H Blasius (1883-1970), la cual relaciona el coeficiente de fricción superficial local con el espesor de la capa límite, es⁽¹⁷⁾:

$$c_f = 0.046 \left(\frac{\nu}{U_{\infty} \delta}\right)^{1/4} \quad (3.3)$$

O, si se relaciona τ_0 con c_f y se utiliza la definición de c_f en la ecuación:



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



$$c_f = \frac{\tau_0}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} = \frac{0.646}{\sqrt{U_\infty x/\nu}} = \frac{0.646}{\sqrt{\text{Re}_x}}$$

La relación del esfuerzo cortante es:

$$\tau_0 = 0.023 \rho U_\infty^2 \left(\frac{\nu}{U_\infty \delta} \right)^{1/4} \quad (3.4)$$

La ecuación integral de Von Kármán proporciona una segunda expresión para τ_0 . Sustituya el perfil de velocidad de la ecuación (3.1) con $\text{Re}_x < 10^7$ en la ecuación ⁽¹⁷⁾:

$$\tau_0 = \frac{d}{dx} \int_0^\delta \rho u U_\infty dy - \frac{d}{dx} \int_0^\delta \rho u^2 dy = \frac{d}{dx} \int_0^\delta \rho u (U_\infty - u) dy$$

Y se obtiene

$$\tau_0 = \frac{d}{dx} \int_0^\delta \rho U_\infty^2 \left(\frac{y}{\delta} \right)^{1/7} \left[1 - \left(\frac{y}{\delta} \right)^{1/7} \right] dy = \frac{7}{72} \rho U_\infty^2 \frac{d\delta}{dx} \quad (3.5)$$

Si se combinan las dos expresiones anteriores para τ_0 , se encuentra que ⁽¹⁷⁾:

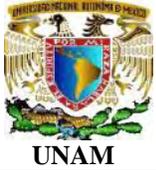
$$\delta^{1/4} d\delta = 0.237 \left(\frac{\nu}{U_\infty} \right)^{1/4} dx \quad (3.6)$$

Si se supone un flujo turbulento a partir del borde entrada (la parte laminar a veces es demasiado corta, es decir, L o $\ell \gg x_T$), se obtiene ⁽¹⁷⁾:

$$\delta = 0.38x \left(\frac{\nu}{U_\infty x} \right)^{1/5} = 0.38x \text{Re}^{-1/5} \quad (3.7)$$

$$\text{Re}_x = 10^7$$

Sustituyendo esta expresión de nuevo en la ecuación (3.3), se encuentra que:



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



$$c_f = 0.059 \text{Re}_x^{1/5} \quad \text{Re}_x < 10^7 \quad (3.8)$$

Y, realizando la integración requerida, se obtiene, con $n = 7$,

$$C_f = 0.073 \text{Re}_L^{-1/5} \quad \text{Re}_L < 10^7 \quad (3.9)$$

Donde

$$\text{Re}_L = \frac{U_\infty L}{\nu}$$

Las relaciones anteriores pueden ser extendidas hasta $\text{Re}_x \approx 10^8$ sin error sustancial⁽¹⁷⁾.

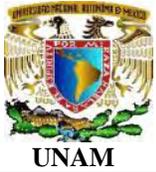
Si L no es mucho más grande que x_T , por ejemplo $L = 3x_T$, entonces hay una parte laminar significativa en la parte de entrada de una placa plana, y el coeficiente de fricción superficial se puede modificar como⁽¹⁷⁾:

$$C_f = 0.073 \text{Re}_L^{-1/5} - 1700 \text{Re}_L^{-1} \quad \text{Re}_L = 10^7 \quad (3.10)$$

La relación está basada en la transición que ocurre con $\text{Re}_{\text{crit}} = 5 * 10^5$. Si $\text{Re}_{\text{crit}} = 3 * 10^5$, la constante 1700 es remplazada por 1060; si $\text{Re}_{\text{crit}} = 6 * 10^5$, llega a ser 2080⁽¹⁷⁾.

Por último, el espesor de desplazamiento y el espesor de cantidad de movimiento se evalúan con $n=7$, como:

$$\begin{aligned} \delta_d &= 0.048x \text{Re}_x^{-1/5} \\ \theta &= 0.037x \text{Re}_x^{-1/5} \end{aligned} \quad (3.11)$$



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



3.4.- Capa límite turbulenta: Forma empírica

El segundo método de predecir cantidades de flujo turbulento sobre una placa plana con gradiente de presión cero esta basado por completo en los datos. Es más preciso que la forma de ley de potencia pero también más complicado. El perfil de velocidad turbulenta promediada con respecto al tiempo puede dividirse en dos regiones, la región interna y la región externa, como se muestra en la figura (3.3) ⁽¹⁷⁾:

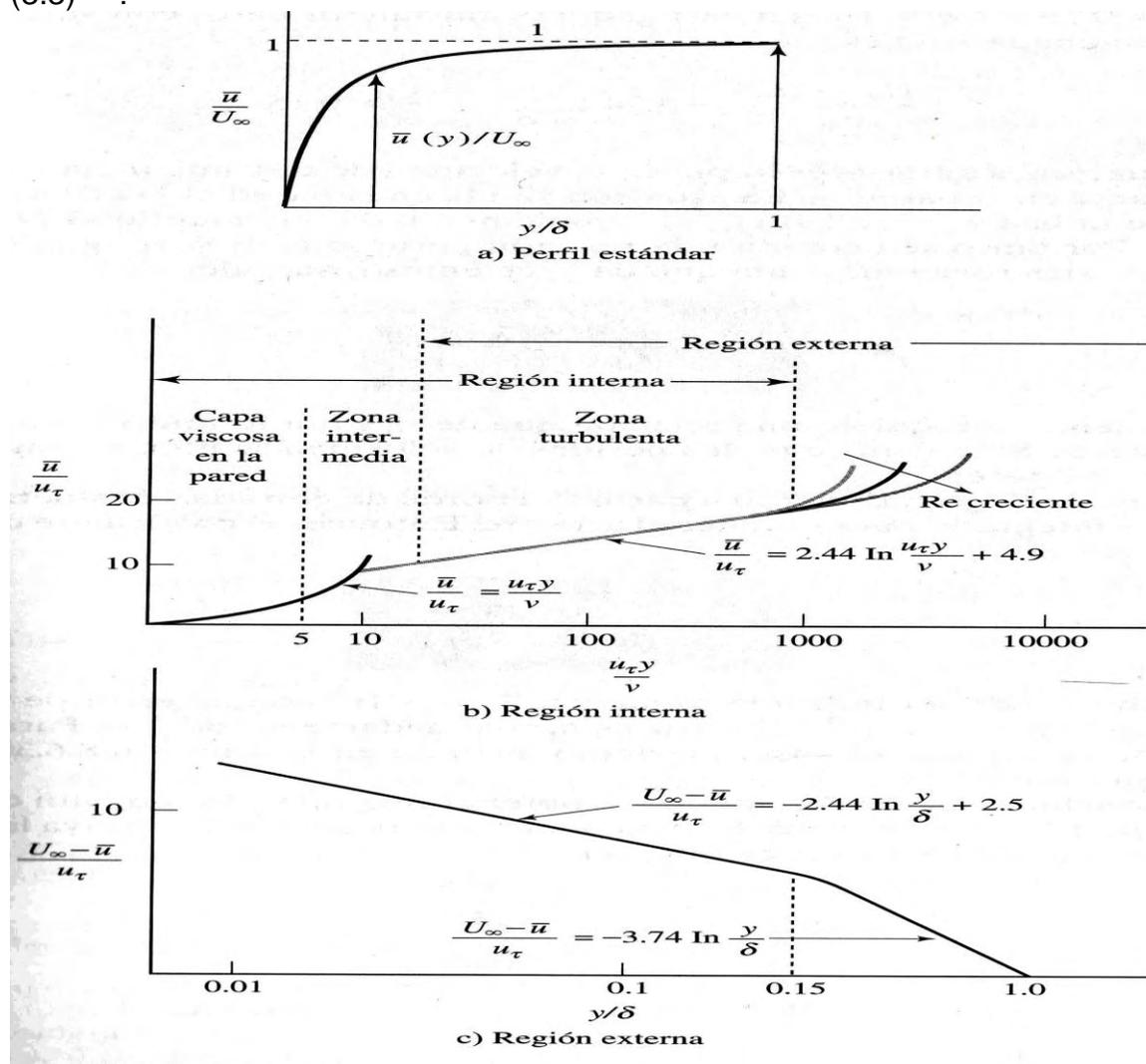
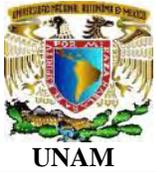


Figura (3.3): perfil de velocidad en una capa limite turbulenta (Merle C. Potter, David C. Wiggert "Mecanica de Fluidos") ⁽¹⁷⁾



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



La región interna se caracteriza por la relación auto similar (la variable independiente sin dimensiones depende sólo de una variable independiente sin dimensiones) ⁽¹⁷⁾.

$$\frac{\bar{u}}{u_\tau} = f\left(\frac{u_\tau y}{\nu}\right) \quad (3.12)$$

En la que u_τ es la velocidad cortante, dada por:

$$\frac{\bar{u}}{u_\tau} = f\left(\frac{u_\tau y}{\nu}\right) \quad (3.13)$$

El perfil de velocidad en la región externa está dada por:

$$\frac{U_\infty - \bar{u}}{u_\tau} = f\left(\frac{y}{\delta}\right) \quad (3.14)$$

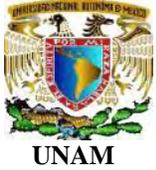
Donde $(U_\infty - \bar{u})$ se conoce como defecto de velocidad ⁽¹⁷⁾.

La región interna tiene tres zonas distintas; la capa viscosa en la pared, la zona intermedia y la zona turbulenta, como se muestra en la figura (3.3 b) La capa viscosa en la pared altamente fluctuante tiene un perfil promediado con respecto al tiempo dado por ⁽¹⁷⁾:

$$\frac{\bar{u}}{u_\tau} = \frac{u_\tau y}{\nu} \quad (3.15)$$

La cantidad ν/u_τ es la longitud característica en la región interna turbulenta; por consiguiente la distancia sin dimensiones desde la pared está dada por ⁽¹⁷⁾:

$$y^* = \frac{u_\tau y}{\nu} \quad (3.16)$$



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



La pared viscosa en la pared es muy delgada, y se extiende hasta $y^* \approx 5$. Desde $y^* \approx 50$ hasta $y/\delta \approx 0.15$. En esta zona turbulenta ⁽¹⁷⁾:

$$\frac{\bar{u}}{u_\tau} = 2.44 \ln \frac{u_\tau y}{\nu} - 4.9 \quad 50 < \frac{u_\tau y}{\nu} \quad \frac{y}{\delta} < 0.15 \quad (3.17)$$

La ubicación del borde externo de la zona turbulenta depende en gran medida del número de Reynolds. El valor de $u_\tau y/\nu$ que localiza el borde externo se incrementa conforme el número de Reynolds se incrementa. Una zona intermedia, sin perfil de velocidad especificado, conecta las zonas ⁽¹⁷⁾.

La región externa relaciona el defecto de velocidad con y/δ . En la zona turbulenta el perfil de velocidad se muestra en la figura (3.3 c) y es:

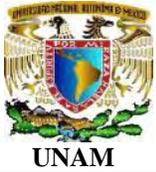
$$\frac{U_\infty - \bar{u}}{u_\tau} = -2.44 \ln \frac{y}{\delta} + 2.5 \quad 50 < \frac{u_\tau y}{\nu} \quad \frac{y}{\delta} < 0.15 \quad (3.18)$$

Entre $y/\delta = 0.15$ y $y/\delta = 1$ los investigadores ajustan los datos con varias relaciones; por lo tanto: ⁽¹⁷⁾:

$$\frac{U_\infty - \bar{u}}{u_\tau} = -3.74 \ln \frac{y}{\delta} \quad \frac{y}{\delta} > 0.15 \quad (3.19)$$

Las ecuaciones anteriores implican la velocidad cortante u_τ , la cual depende del cortante en la pared τ_0 . La ecuación válida en la pared es la ecuación (3.15) la cual, si se utiliza $\tau_0 = \mu \partial u / \partial y|_{y=0}$, simplemente da una identidad. No permite calcular τ_0 . Por tanto se necesita una relación para obtener τ_0 (o igualmente c_f). Se utilizan varias relaciones; una que da excelentes resultados es ⁽¹⁷⁾:

$$c_f = \frac{0.455}{(\ln 0.06 Re_x)^2} \quad (3.20)$$



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Por consiguiente se requiere una relación que dé τ_0 y por lo tanto u_τ en cualquier lugar de interés. Si se conoce u_τ , los perfiles de velocidad se utilizan para calcular cantidades de interés ⁽¹⁷⁾.

Si se supone flujo turbulento a partir del borde de entrada, el esfuerzo cortante puede ser integrado para obtener el arrastre. Entonces el coeficiente de fricción superficial es:

$$C_f = \frac{0.523}{(\ln 0.06 Re_x)^2} \quad (3.21)$$

Esta relación puede ser utilizada hasta con $Re_L = 10^9$ con error de 2% o menos. Incluso con $Re_L = 10^{10}$ el error es aproximadamente de 4%. Para tener en cuenta la parte laminar, el mismo término incluido en la ecuación (3.10) que es ⁽¹⁷⁾:

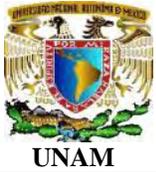
$$C_f = 0.073 Re_L^{-1/5} - 1700 Re_L^{-1} \quad Re_L < 10^7$$

Es restado en la ecuación (3.21)

Para concluir esta sección se puede obtener una relación muy útil combinando los perfiles logarítmicos de la zona turbulenta común. Sustituyendo la ecuación (3.17) en la ecuación (3.18) para obtener ⁽¹⁷⁾:

$$\frac{dp}{dx} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}; y = 0 \quad (3.22)$$

Esta ecuación permite un cálculo sencillo de δ si se conoce u_τ ⁽¹⁷⁾.



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



3.5.- Capa Límite Turbulento Con Gradiente De Presión Positiva Y Negativa

En las secciones anteriores se estudiaron las capas límite sobre placa planas con gradientes de presión cero. Éste es el flujo de capa límite más simple y permite modelar muchos flujos de interés en el campo de la ingeniería. La inclusión de un gradiente de presión, aun cuando sea relativamente bajo, altera marcadamente el flujo de capa límite. En realidad, un fuerte gradiente de presión (tal como un flujo a través de una contracción) puede volver laminar una capa límite turbulenta; es decir; la producción de turbulencia en la capa viscosa en la pared que mantiene la turbulencia cesa y se restablece la capa límite laminar. Un gradiente de presión positivo rápidamente hace que la capa límite se desarrolle y a la larga se separe. En las fotografías de la figura (3.4) se muestran estos efectos ⁽¹⁷⁾.

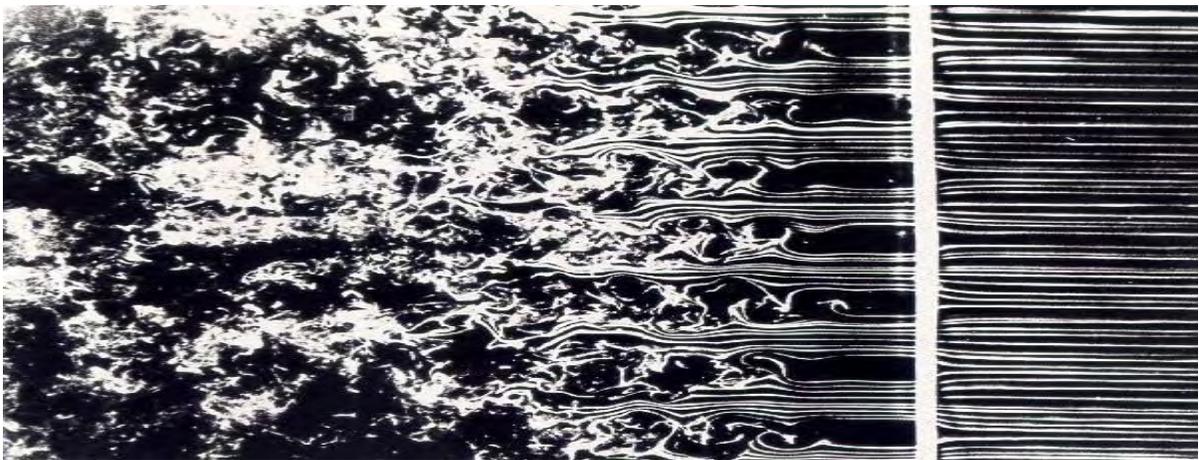
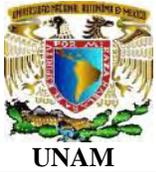


Fig.(3.4): Influencia de un fuerte gradiente de presión en un flujo turbulento: a) un fuerte gradiente de presión negativo puede relaminarizar un flujo; b) un fuerte gradiente de presión positivo hace que la capa límite se engruese (Merle C. Potter, David C. Wiggert "Mecánica de Fluidos") ⁽¹⁷⁾.

El flujo en torno a cualquier cuerpo plano con curvatura, tal como una superficie aerodinámica, es modelado como un flujo sobre una capa plana con un gradiente de presión no cero. El espesor de la capa límite es mucho más pequeño que el radio de curvatura de modo que los términos de curvatura adicionales desaparecen de la ecuaciones diferenciales. La solución de flujo inviscido en la pared proporcional el gradiente de presión dp / dx y la velocidad $U(x)$ en el borde de la capa límite. Para flujos asimétricos, tal como el flujo sobre la nariz de un



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



avión, se deben usar ecuaciones para la capa límite en coordenadas cilíndricas ⁽¹⁷⁾.

El gradiente de presión determina el valor de la segunda derivada $\partial^2 u / \partial y^2$ en la pared. De acuerdo con la ecuación para la capa límite (2.3) en la pared, $u = v = 0$, así que:

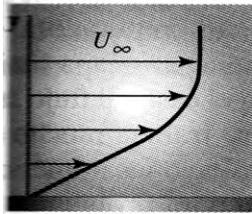
$$\frac{dp}{dx} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}; y = 0 \quad (3.22)$$

Para flujo de capa límite laminar o turbulenta. Con un gradiente de presión cero la segunda derivada es cero en la pared; luego, puesto que la primera derivada alcanza su valor máximo en la pared y disminuye conforme y disminuye, la segunda derivada debe ser negativa con y positiva. En la siguiente figura se muestran los perfiles ⁽¹⁷⁾.

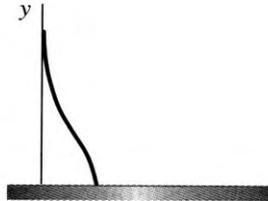


INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)

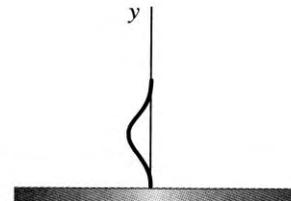


u

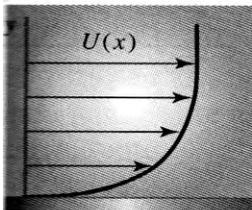


$\frac{\partial u}{\partial y}$

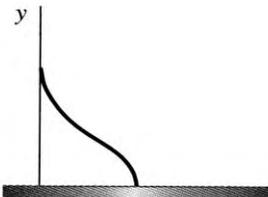
a) $dp/dx = 0$



$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$

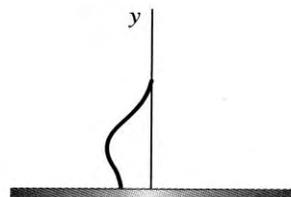


u

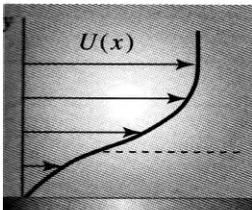


$\frac{\partial u}{\partial y}$

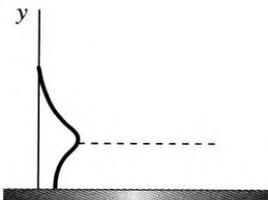
b) $dp/dx < 0$ (un gradiente favorable)



$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$

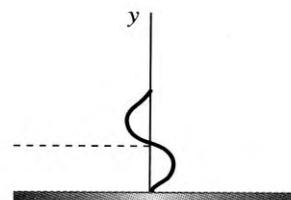


u

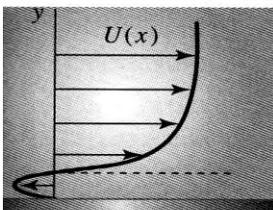


$\frac{\partial u}{\partial y}$

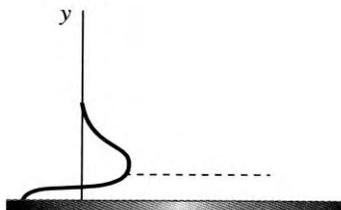
c) $dp/dx > 0$ (un gradiente desfavorable)



$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$

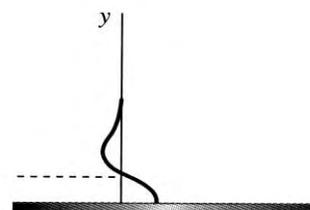


u



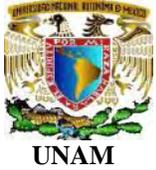
$\frac{\partial u}{\partial y}$

d) $dp/dx > 0$ (flujo separado)



$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$

Figura (3.5): Influencia del gradiente de presión (Merle C. Potter, David C. Wiggert "Mecánica de Fluidos")⁽¹⁷⁾



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

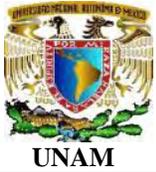
PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Con un gradiente de presión negativo (favorable) la pendiente del perfil de velocidad cerca de la pared es relativamente grande con una segunda derivada negativa en la pared y en toda la capa. La cantidad de movimiento cerca de la pared es mayor que aquella del flujo con gradiente de presión cero, como se muestra en la figura (3.5) y por lo tanto existe una tendencia reducida de que el flujo se separe. La producción de turbulencia disminuye y puede suceder la relaminarización con un gradiente de presión negativo suficientemente grande ⁽¹⁷⁾.

Si se impone un gradiente de presión positivo (desfavorable) en el flujo, la segunda derivada en la pared será positiva y el flujo como se muestra en la figura (3.5). Si el gradiente de presión desfavorable actúa a lo largo de una suficiente distancia, la pared probablemente representa la situación de flujo con el flujo separado de la superficie. Cerca de la pared la corriente abajo a presión más alta impulsa al flujo de baja cantidad de movimiento próximo a la pared en la dirección corriente arriba, lo que da por resultado una inversión del flujo, como se muestra. El punto en el cual $\partial u/\partial y = 0$ en la pared localiza el punto de separación ⁽¹⁷⁾.

El problema de una capa límite laminar con un gradiente de presión puede ser resuelto mediante técnicas numéricas convencionales con una computadora. En el caso de flujo turbulento se debe incluir el término de esfuerzo de Reynolds; se trabaja mucho en el desarrollo de modelos de cantidades turbulentas que den soluciones numéricas aceptables. A menudo se requieren resultados experimentales para problemas de flujo turbulento, una situación como la de flujos internos ⁽¹⁷⁾.



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



3.6.-Flujo Incomprensible Sobre Una Placa Plana Lisa Con Régimen De Transición

En los capítulos anteriores se han tratado por separado la resistencia de una capa límite laminar y de una capa límite turbulenta sobre una placa plana lisa. En esta sección queremos calcular la resistencia de fricción total cuando se produce la transición de una capa límite laminar a una turbulenta en algún punto de la superficie de la placa ⁽¹⁸⁾.

Sea en la figura (3.6) la distancia entre el borde de ataque y el punto donde la capa límite se vuelve turbulenta, lo que correspondería habitualmente a un número de Reynolds de aproximadamente 500. Se puede obtener un valor aproximado de la resistencia debido a la parte turbulenta de la capa límite turbulenta suponiendo que dicha capa cubre toda la placa, y restándole la resistencia de una capa límite turbulenta ficticia entre el borde de ataque y x_c . Es decir ⁽¹⁸⁾;

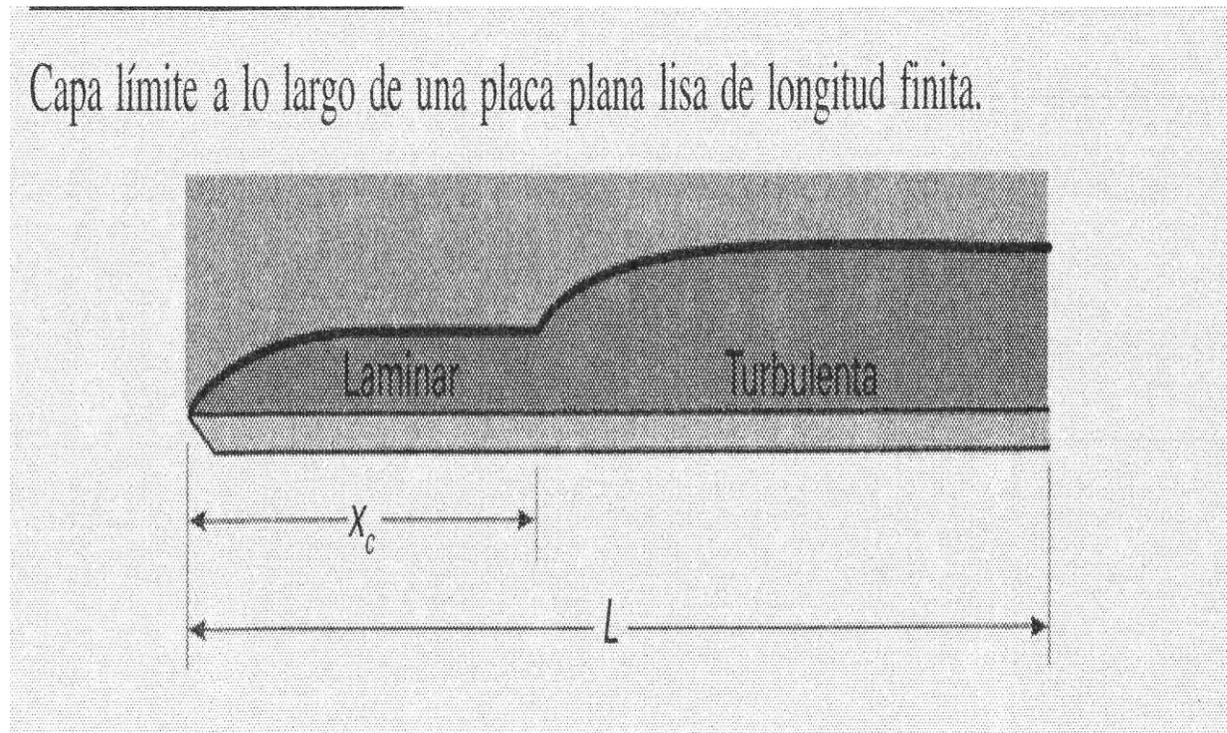
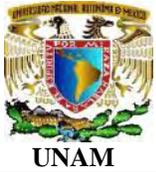


Figura (3.6): Capa límite a lo largo de una placa plana lisa de longitud finita (Joseph B. Franzini, E. John Finnemore "Mecánica de Fluidos con aplicación a la ingeniería") ⁽¹⁸⁾



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



$$F_{turb} = F_{completamente-turb} - F_{turb-hasta-x_c}$$

Sumando esta magnitud a la resistencia correspondiente a la capa límite laminar hasta x_c , obtenemos la siguiente expresión para la resistencia total, si se supone que la placa es suficientemente larga para que $Re > 10^7$ ⁽¹⁸⁾:

$$F_f = \rho \frac{U^2}{2} B \left[\frac{1.328x_c}{\sqrt{Re}} + \frac{0.455L}{(\log Re)^{2.58}} - \frac{0.0735x_c}{Re_c^{1/5}} \right]$$

Donde la longitud característica para Re_c es la distancia x_c hasta el punto de transición, mientras que la longitud total de placa L. A continuación observamos que ⁽¹⁸⁾:

$$\frac{Re_c}{Re} = \frac{x_c}{L}$$

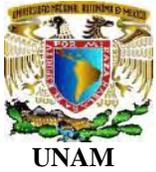
o

$$x_c = \frac{Re_c}{Re} L$$

Por lo que $F_f = \rho \frac{U^2}{2} BL \left[1.328 \frac{\sqrt{Re_c}}{Re} + \frac{0.455}{(\log Re)^{2.58}} - \frac{0.0735 Re_c^{4/5}}{Re_c^{1/5}} \right]$ y dado que la magnitud entre paréntesis es el coeficiente de resistencia de fricción C_f , para $Re_c = 500$ obtenemos ⁽¹⁸⁾:

$$\text{Con transición } C_f = \frac{0.455}{(\log Re)^{2.58}} - \frac{1.700}{Re} \quad (3.23)$$

La ecuación (3.23) y las ecuaciones respectivamente de la capa límite laminar y turbulenta se han trazado en la figura (3.7) para poder compararlas ⁽¹⁸⁾.



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Coefficientes de resistencia para una placa plana lisa.

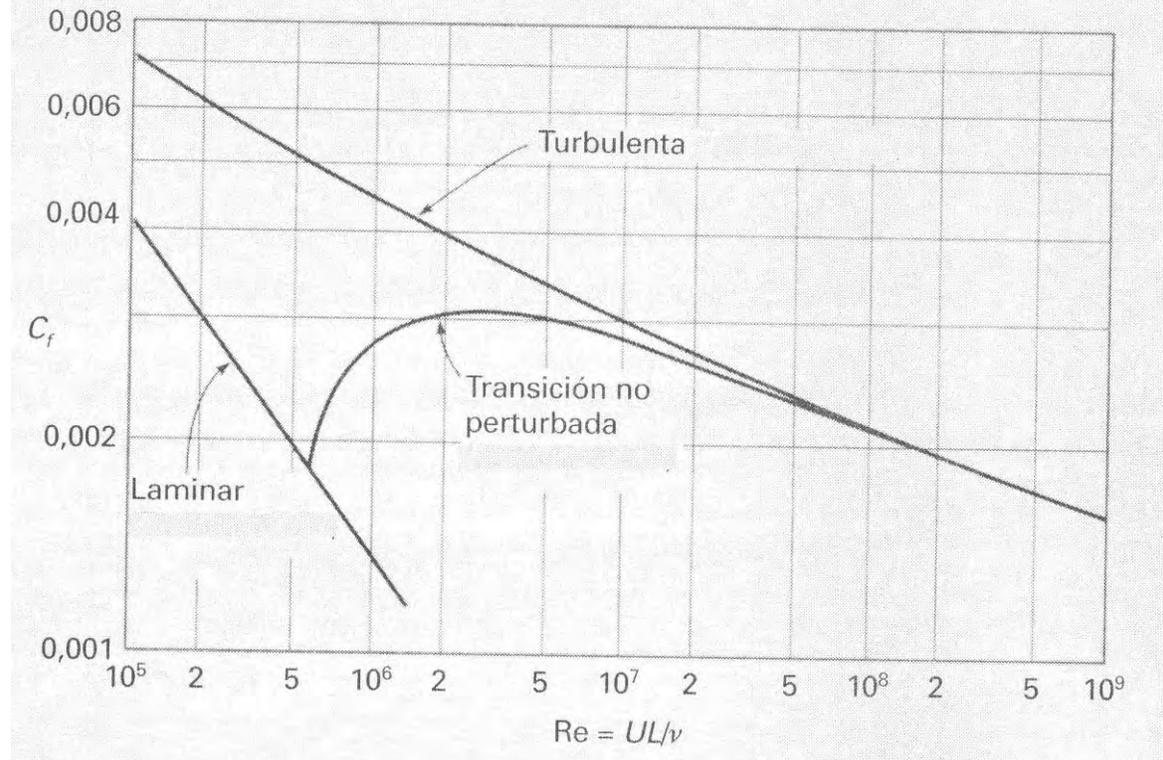
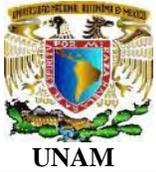


Figura (3.7): Coeficiente de resistencia para una placa plana lisa (Joseph B. Franzini, E. John Finnemore "Mecánica de Fluidos con aplicación a la ingeniería")⁽¹⁸⁾

Hasta este punto, todo el desarrollo sobre las capas límites laminar y turbulenta se ha basado en la suposición de que la superficie del cuerpo sumergido es lisa. Sin embargo, una zona localizada de rugosidad excesiva dentro de la zona laminar puede hacer que la capa límite se convierta en una capa turbulenta, aunque el valor del número de Reynolds esté por debajo de 500. La altura de la rugosidad que origina este efecto se denomina **rugosidad crítica**, y viene dada aproximadamente por⁽¹⁸⁾:

$$e_c = \frac{1.5\nu}{\sqrt{\tau_0/\rho}} = 26.0 \frac{\nu}{U} \text{Re}^{1/4} \quad (3.24)$$



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Donde τ_0 se determina a partir de la ecuación laminar (2.14), y no partiendo de la ecuación turbulenta (3.8).

Vemos que la altura de la rugosidad crítica depende de la distancia desde el borde de ataque. Al crecer la capa límite laminar a lo largo de la placa, debe aumentarse el tamaño de la rugosidad para afectar la estabilidad de la misma. Recuérdese que cuando Re_x se aproxima a un valor de 500 la propia capa laminar se vuelve inestable, independientemente de si la superficie es lisa o no, y cambia a una capa límite turbulenta con una sub-capa ⁽¹⁸⁾.

En la zona turbulenta el espesor de la sub-capa viscosa no es una magnitud claramente determinable, pero existe acuerdo para que el espesor de esta película predominantemente laminar venga dado de forma aproximada por ⁽¹⁸⁾:

$$u_\tau \delta_1 = \frac{5\nu}{u_\tau} \quad (3.25)$$

Mientras que la capa de transición se extiende hasta:

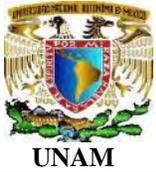
$$\delta_i = \frac{70\nu}{u_\tau} \quad (3.26)$$

Donde la velocidad del esfuerzo cortante o velocidad de fricción u_τ y τ_0 viene dado por la ecuación turbulenta (3.8), por lo que ⁽¹⁸⁾:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \frac{0.1713U}{Re_x^{0.1}} \quad (3.27)$$

Si la altura de la rugosidad es solamente del orden de δ_i , la superficie todavía se puede considerar lisa, pero si la altura de la rugosidad es mayor que δ_i , la superficie es verdaderamente rugosa y aumenta la resistencia materialmente ⁽¹⁸⁾.

Por último, se debe comentar que una placa o ala que tenga una resistencia mínima debe ser muy lisa cerca del borde de ataque, donde la capa laminar o sub-capa viscosa es más delgada; en cambio, se tolerará una mayor rugosidad cerca del borde de salida. Como el esfuerzo cortante en la pared es mucho mayor

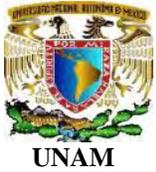


INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



en la capa límite turbulenta que una laminar, cualquier cosa que se pueda hacer para retrasar la transición de la capa límite de régimen laminar al turbulento reducirá enormemente la resistencia de fricción sobre un cuerpo. El ala de flujo laminar de avión tiene instalado ranuras de succión a lo largo del borde de ataque y un perfil de ala correctamente seleccionada ayudan a mantener un gradiente de presión favorable sobre la superficie superior del ala; este retrasa la transición de la capa límite laminar a turbulenta, por lo que tales alas tienen una resistencia mucho menor que las convencionales ⁽¹⁸⁾.



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



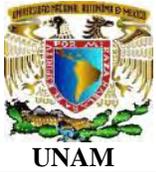
CAPITULO IV

4.1-Propuesta De Equipo

Antes que nada, para poder realizar una propuesta del túnel de viento para calcular el espesor de la Capa Límite (de una forma indirecta) en flujo laminar, se buscó si en la Universidad Nacional Autónoma de México había equipos ya diseñados de esta índole o parecidos, por lo cual se encontró que en la Facultad de Química hay un equipo que simula los diagramas de Mollier el cual tiene ciertas características que sirvieron para poder proponer el túnel una de los cuales es la forma del equipo.



Foto (4.1): Equipo De La Facultad De Química De La UNAM
Simulador De Diagramas De Mollier.



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)

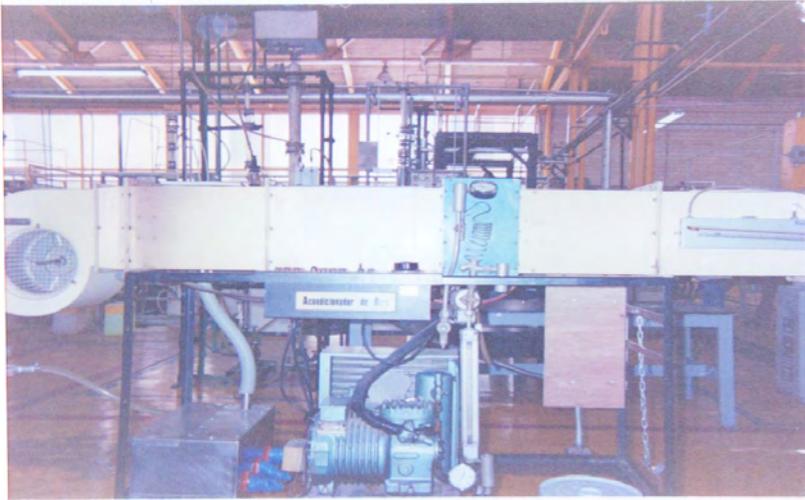
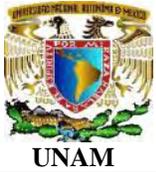


Foto (4.2): Equipo De La Facultad De Química De La UNAM Simulador De Diagramas De Mollier

También se localizó un equipo en la FES Cuautitlán, el cual es un equipo de aire acondicionado el cual no se pudo ver su funcionamiento, ya que en ese momento no estaba en operación, pero en este equipo en especial se observó que regulaban el flujo de aire con mamparas, del cual se tomó en cuenta este mecanismo para la propuesta de túnel de viento.



Foto (4.3): Equipo De La UNAM Fes Cuautitlan Simulador De Diagramas De Mollier



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

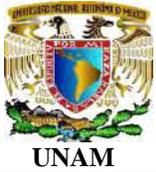
PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Foto (4.4): Equipo De La UNAM Fes Cuautitlan Simulador De Diagramas De Mollier.



Foto (4.5): Equipo De La UNAM Fes Cuautitlan Túnel De Viento.



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)

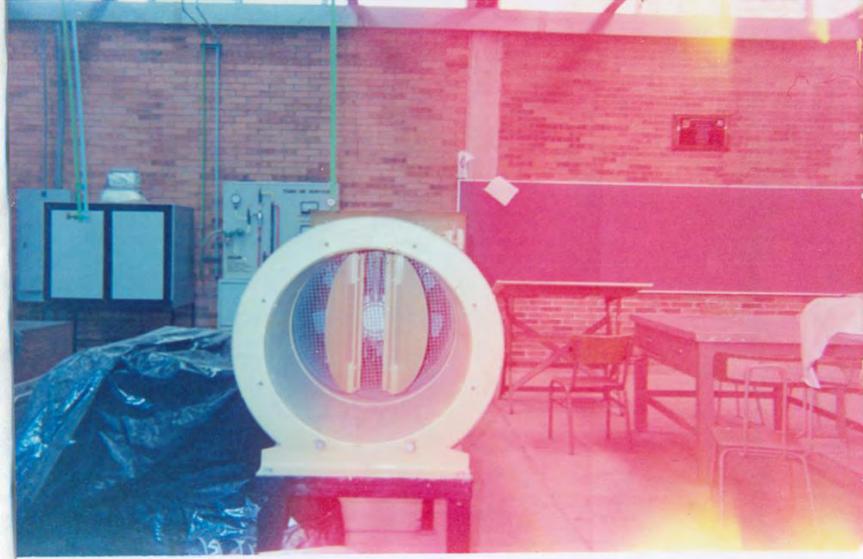


Foto (4.6): Equipo De La UNAM Fes Cuautitlan Túnel De Viento.

Además se localizaron proveedores que tienen el equipo ya fabricado para poder ver el costo de su tecnología, y así saber aproximadamente cuanto se ahorraría si el túnel se diseñara en la FES Zaragoza Campus II, en el siguiente cuadro comparativo se muestran los proveedores que venden el túnel ya diseñado y el costo de su equipo, contra el costo aproximado si se realiza el diseño del túnel de viento en la FES Zaragoza.



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



4.2-COMPARACION DE COSTOS

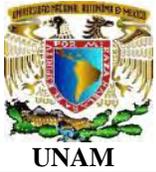
CUADRO DE COSTOS SI EL EQUIPO SE ADQUIERE YA DISEÑADO

PROVEEDOR	ESPECIFICACIONES	PRECIO
HARRY MAZAL, S.A. DE C.V. Laguna de Tamiahua 204 Col. Anáhuac Deleg. Miguel Hidalgo 11320 México, D. F. Tel. 53 96-1133 Fax: 53 96-8649 PROF. JUAN MANUEL RAMIREZ LOPEZ GERENTE DE VENTAS	APARATO DE CAPA LÍMITE MARCA: TQ MODELO: AF14	\$ 2,336.00 libras esterlinas \$ 53,728 pesos mas 15% en IVA Cantidad requerida 1 equipo
HARRY MAZAL, S.A. DE C.V. Laguna de Tamiahua 204 Col. Anáhuac Deleg. Miguel Hidalgo 11320 México, D. F. Tel. 53 96-1133 Fax: 53 96-8649 PROF. JUAN MANUEL RAMIREZ LOPEZ GERENTE DE VENTAS	BANCO DE FLUJO DE AIRE MARCA: TQ MODELO: AF10	\$ 9328.00 libras esterlinas \$ 214,544 pesos mas 15% en IVA Cantidad requerida 1 equipo
HARRY MAZAL, S.A. DE C.V. Laguna de Tamiahua 204 Col. Anáhuac Deleg. Miguel Hidalgo 11320 México, D. F. Tel. 53 96-1133 Fax: 53 96-8649 PROF. JUAN MANUEL RAMIREZ LOPEZ GERENTE DE VENTAS	MANOMETRO MULTI-TUBO MARCA: TQ MODELO: AF10A	\$ 2016.00 libras esterlinas \$ 46,368 pesos mas 15% en IVA Cantidad requerida 1 equipo
		COSTO TOTAL APROXIMADO \$ 361,836.00 pesos INCLUYENDO IVA

Justino Cuevas Hernández

Presentan
55

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



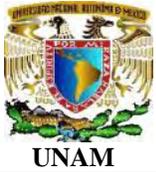
CUADRO DE COSTOS SI EL EQUIPO SE DISEÑA

PROVEEDOR	ESPECIFICACIONES	PRECIO
VENTDEPOT MÉXICO TEL:(52)(55)5822-1516, Fax:(52)(55)5825-0752 w.ventdepot.com.mx	NOMBRE: EXTRABLOWER CLAVE: MXECE-005	Precio: \$5,491.00 pesos Precio con descuento:\$5,161.54 pesos Cantidad requerida 1 equipo Precio: \$550 pesos
METALES DIAZ CALZ. IGNACIO ZARAGOZA No.1447 COL TEPALCATES C,P 09210 MEXICO DF TEL-5558-5044, 5763-4838	NOMBRE: PLASTICO ACRILICO CLAVE: CALIBRE 3 mm.	Cantidad requerida 1 equipo Precio: \$345 dólares \$ 3,795 pesos Gastos de envío \$ 4,000 pesos Cantidad requerida 1 equipo
DWYER INSTRUMENTS MICHIGANT CITY, INDIANA 46361 www.dwyer-inst.com	NOMBRE: AIR VELOCITY KIT CLAVE: 475-1-FM-AM "Incluye manómetro digital, tubo pitot y accesorios."	Precio: \$450 pesos mas 15% en IVA
METALES DIAZ CALZ. IGNACIO ZARAGOZA No.1447 COL TEPALCATES C,P 09210 MEXICO DF TEL-5558-5044, 5763-4838	NOMBRE: PLACA DE LATON CLAVE: CALIBRE 1/4	Precio: \$506 dólares \$ 6,072 pesos Gastos de envío \$ 4,500 pesos Cantidad requerida 1 equipo
DWYER INSTRUMENTS MICHIGANT CITY, INDIANA 46361 www.dwyer-inst.com	NOMBRE: MANOMETRO INCLINADO CLAVE: 400-23-T37R	Sé pedio al Jefe de la carrera que se done una mesa de la planta piloto para que sea el soporte del túnel.
TUBO DE SILICON VERNIER	NOMBRE: SILICON, ALUMINI NOMBRE: VERNIER	Precio: \$90 pesos Precio: \$450 pesos COSTO TOTAL APROXIMADO \$ 28,000.00 pesos

Justino Cuevas Hernández

Presentan
56

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

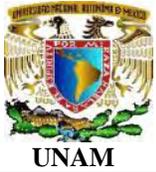
PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



4.3-Descripción De La Propuesta Para Su Instalación

La instalación para el estudio de la capa límite sobre una placa plana, consta de los siguientes elementos, la cual podrá ser instalada en la planta piloto de la FES Zaragoza Campus II:

- 1) Túnel de viento de flujo subsónico, de pequeñas dimensiones y constituido por:
 - Ventilador centrífugo radial.
 - Conducto de sección rectangular, de acero galvanizado o acrílico y cuyas dimensiones son 20 x 20 cm. por 2.5m de largo, ya que con estas medidas obtendremos el flujo laminar requerido, los cálculos se muestran mas adelante.
- 2) Sonda Pitot de 1mm de diámetro, necesitamos este diámetro del tubo Pitot para poder calcular los pequeños cambios de presión sobre la placa.
- 3) Manómetro inclinado (El cual se utilizara para hacer las mediciones que hagan los compañeros en las diferentes pruebas.)
- 4) Manómetro digital para medir presión (Por ser un instrumento muy delicado, con este aparato en especial solo se hará una sola corrida para todo el grupo para que así vean el funcionamiento del mismo y si difiere con los resultados obtenidos con el manómetro inclinado).
- 5) Se proponen 2 Placas planas de latón (rugosidad 0.9) con bordes de ataque diferentes de dimensiones: 250 x 100 Mm, ya que con estas podemos comparar los cambios de presión con diferentes bordes de ataque, y se utiliza este tipo de material por que la rugosidad que presentan es muy baja comparada con el del acero (rugosidad 1.1) u otros materiales.

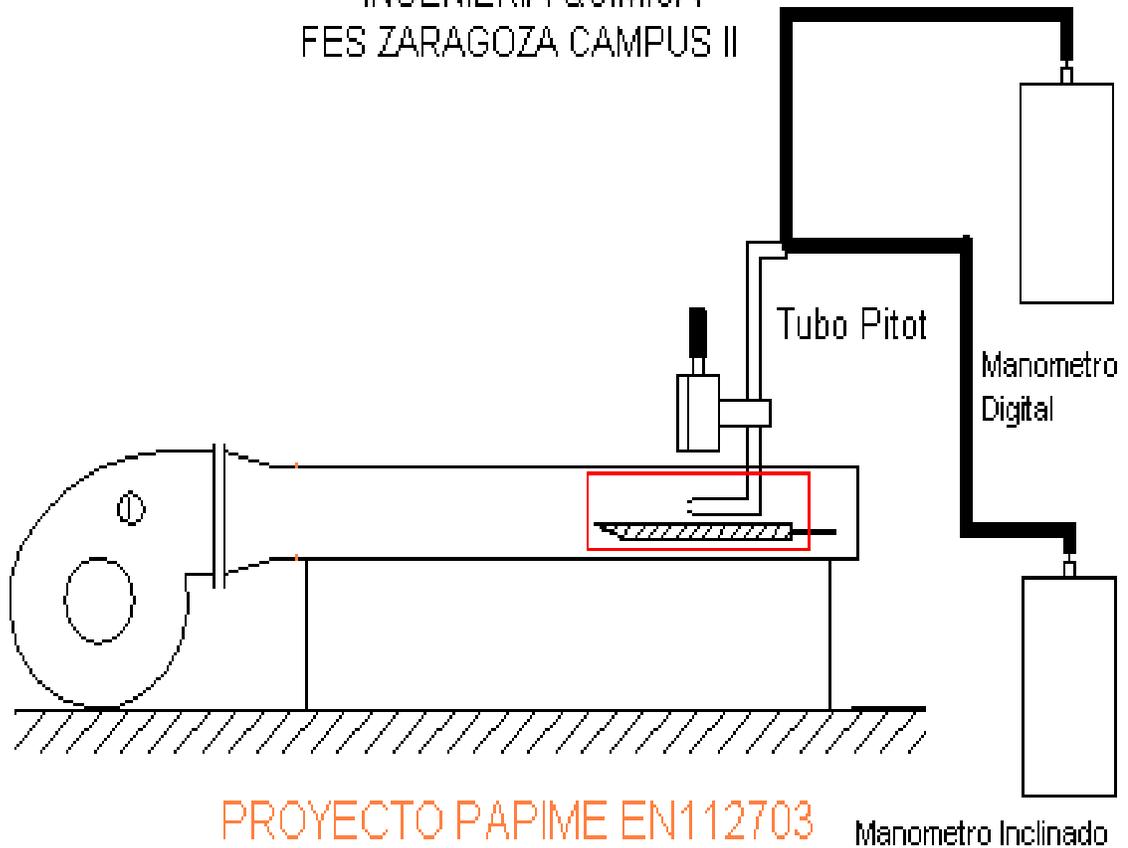


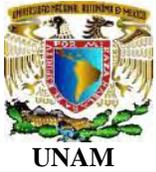
INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



TUNEL DE VIENTO PARA CAPA LÍMITE INGENIERÍA QUÍMICA FES ZARAGOZA CAMPUS II





INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

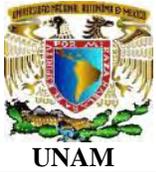
PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



4.4-Justificación De La Instalación:

- El ventilador centrífugo radial deberá ser de $\frac{1}{2}$ Hp, ya que necesitamos un flujo subsónico y este tipo de ventilador nos proporciona el flujo adecuado para poder llevar a cabo el fenómeno de capa límite laminar, pero además se propone colocar un par de mamparas (dentro del túnel) para poder regular el flujo. Además se deducirá el gasto al ventilador, todo esto se hará para mantener lo más posible el flujo laminar y poder medir el espesor de capa límite laminar en forma indirecta.





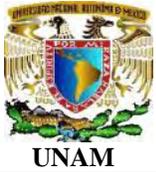
INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



- El conducto de sección rectangular de acero galvanizado o acrílico cuyas dimensiones son 20 x 20 cm., por 3 metros de largo, la sonda Pitot se colocara 1.8 metros de la boca del ventilador en donde el flujo esta completamente desarrollado dentro del cuadri-túnel.

Método de Cálculo Para la colocación de La Sonda Pitot:



INGENIERÍA QUÍMICA
‘TESIS’
 PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
 DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
 LIMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



ECUACIONES QUE SE UTILIZARAN PARA LOS CALCULOS

$$N_{Re} = \frac{De U \rho}{\mu} \text{ ----- (1)}$$

DONDE :

De = Diametro Equivalente

U = Velocidad

ρ = Densidad

μ = Viscosidad

$$De = 4\gamma_H \text{ ----- (2)}$$

$$\gamma_H = \frac{S}{Pm} = \frac{\text{Area De Flujo}}{\text{Perimetro mojado}} \text{ ----- (3)}$$

Donde :

γ_H = Radio Hidraulico

S = Area S = L² por que sus lados son iguales

Pm = Superficie de la tuberia inundado por el fluido

Sustituyendo la ec. (3) en (2)

$$De = \frac{4S}{Pm} \text{ ----- (4)}$$

Para conocer a que altura o longitud se colocara la sonda se utilizara la ecuacion de Langaar (1.1) para flujo la min ar del capitulo 1.

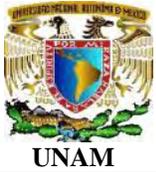
L / D = 0.06 Re para flujo la min ar

Donde :

Le = longitud de entrada

D = Diametro (en este caso equivalente)

Re = Número de Reynolds



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Datos que se utilizarán en las diferentes ecuaciones

$$\rho_{\text{aire } 20^{\circ}\text{C}} = 0.9286 \text{ kg} / \text{m}^3 \quad \text{a nivel del distrito federal}$$

$$\mu_{\text{aire } 20^{\circ}\text{C}} = 0.018 \text{ centipoises} = 1.2096 \text{ E} - 5 \text{ lb} / \text{fts} = 1.800 \text{ E} - 5 \text{ Kg} / \text{ms}$$

Nota: la variación de la viscosidad con la presión es pequeña para la mayor parte de los gases dados en esta página, la corrección de la viscosidad debida a la presión es inferior al 10% para presiones hasta 35 bar (500 libras / pulg²). Crane A-8

$$Q = 30 \text{ m}^3 / \text{h} = 0.0083 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Calculando área del túnel:

$$S = L^2$$

$$S = 0.20^2 = 0.04 \text{ m}^2$$

Calculando diámetro equivalente:

$$De = \frac{4S}{Pm} = \frac{4 * 0.04 \text{ m}^2}{3m} = 0.0533 \text{ m}$$

Calculando velocidad:

$$U = \frac{Q}{S} = \frac{0.0083 \text{ m}^3 / \text{s}}{0.04 \text{ m}^2} = 0.2075 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

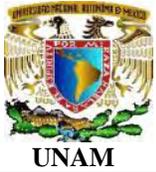
Calculando el número de Reynolds:

$$NRe = \frac{De U \rho}{\mu} = \frac{0.0533 * 0.2075 * 0.9286}{1.800 \text{ E} - 5} = 570.5602$$

Calculando la longitud donde se colocará la sonda Pitot con la ecuación de Langhaar.

$$L = 0.06 * 570.5602 * 0.0533 = 1.8246 \text{ m}$$

La sonda se colocará a partir de los 1.8m cuando el túnel sea de 20cm x 20cm con 3m de longitud.



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



- La sonda Pitot debe ser de 1 Mm. de diámetro para que pueda detectar los pequeños cambios de presión a lo largo de la placa de latón para esta práctica en especial se recomienda la sonda Pitot normal tipo (L).



Mark II Series Molded Plastic Manometers Specifications - Instructions and Operation

DWYER INSTRUMENTS, INC.

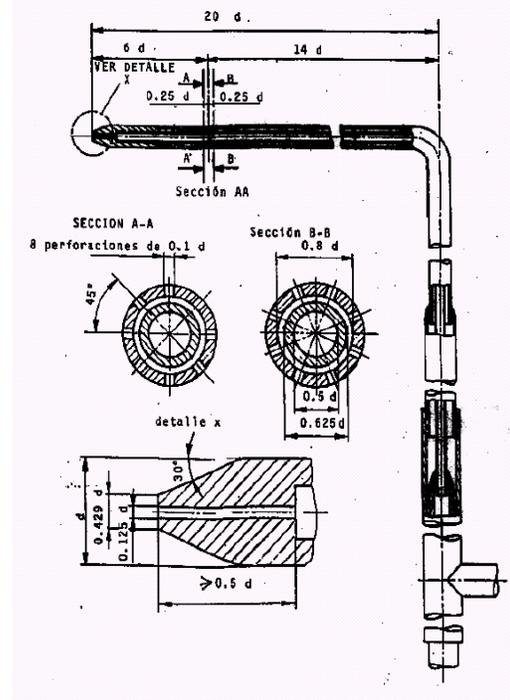
P.O. BOX 373 • MICHIGAN CITY, INDIANA 46361, U.S.A.

Phone: 219/879-8000

www.dwyer-inst.com

Fax: 219/872-9057

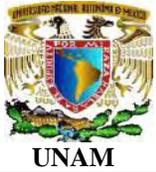
e-mail: info@dwyer-inst.com



Justino Cuevas Hernández

Presentan
63

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



- El manómetro inclinado se usará para medir presión y con ella hacer todas las corridas con los diferentes equipos (alumnos), se recomienda usar el manómetro digital para una sola corrida como ya se había mencionado antes.



Mark II Series Molded Plastic Manometers Specifications - Instructions and Operation

DWYER INSTRUMENTS, INC.

P.O. BOX 373 • MICHIGAN CITY, INDIANA 46361, U.S.A.

Phone: 219/879-8000

Fax: 219/872-9057

www.dwyer-inst.com

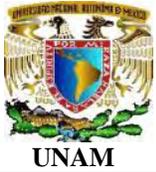
e-mail: info@dwyer-inst.com



Justino Cuevas Hernández

Presentan
64

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



- Las placas de latón recomendadas tendrán las siguientes dimensiones 250 x 100 Mm. con un borde de ataque afilado y uno aerodinámico ó borde redondeado.
- Se usa la placa de latón por que la rugosidad que presenta es muy poca comparada con la del acero u otro material, y es que usando la placa de latón dominarán las fuerzas viscosas de lo contrario con una rugosidad alta las fuerzas inerciales son las dominarán.

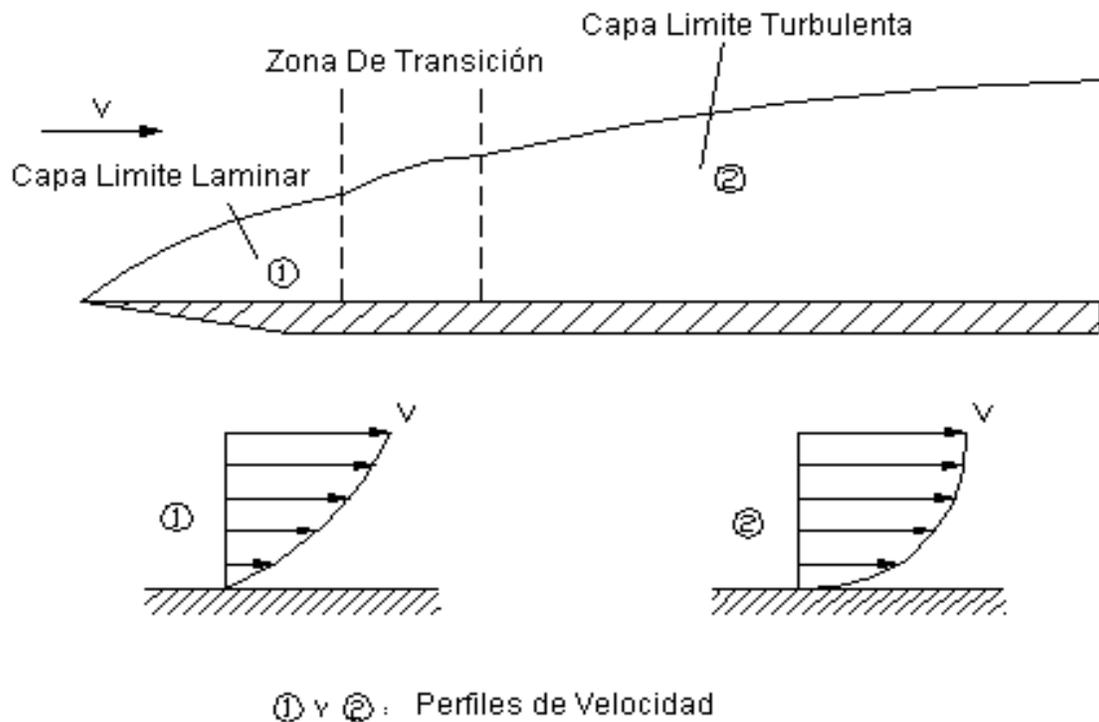
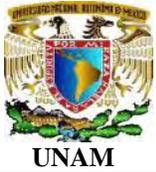


FIGURA (4.1): Placa Plana Con Borde De Ataque Afilado (elaborado por Juan Carlos Poblano y Justino Cuevas).

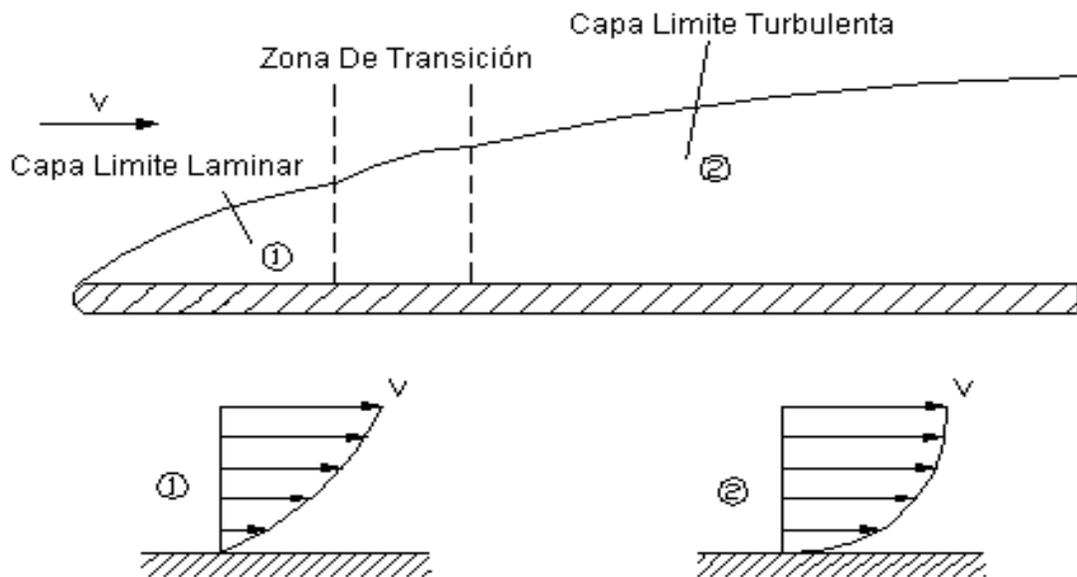


INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)

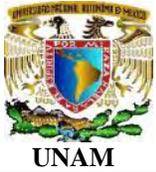


También recomendamos que en lugar de usar una sola placa de latón como se observo en la figura anterior se hagan uso de otra placa con borde aerodinámico con las mismas dimensiones que la anterior para que así los compañeros puedan ver el comportamiento de la capa límite con diferentes bordes de ataque.



Placa Plan con Perfiles de Velocidad con un borde aerodinámico

FIGURA (4.2): Placa Plana Con Borde De Ataque Aerodinámico (elaborado por Juan Carlos Poblano y Justino Cuevas).



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

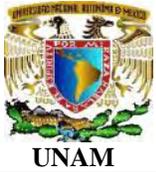
PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



4.5-Metodología De Doma De Datos

La determinación de las presiones se realizará según la sistemática siguiente:

- 1) Medir la temperatura y presión en el laboratorio.
- 2) Desplazar la placa de latón hacia fuera de la sección del túnel de tal forma que la sonda de Pitot pueda medir la velocidad del flujo sin la influencia de la placa.
- 3) Posicionar, la sonda de Pitot en el centro de la sección del túnel.
- 4) Poner en marcha el ventilador centrífugo.
- 5) Medir nuevamente la presión que marca el manómetro inclinado o digital dentro del túnel. Esta lectura, sirve para evaluar la velocidad del fluido no perturbado o velocidad.
- 6) Desplazar la placa de latón de tal forma que su extremo afilado y el extremo de la sonda Pitot estén en la misma vertical.
- 7) Hacer descender la sonda Pitot hasta que toque la placa de latón. Prestar atención en esta operación evitando que la sonda se pueda deformar al apretarla excesivamente.
- 8) A partir de este momento ya estamos en condiciones de hacer las mediciones necesarias para determinar el perfil de velocidades del flujo de un fluido a través de una placa de latón.



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



4.6-Pasos experimentales a seguir:

- Colocar el extremo de la sonda en el punto $x = 0$, $y = 0.5$ Mm., y proceder a leer la presión que mide el manómetro inclinado o digital.
- Mover la sonda de Pitot, situándola en el punto $x = 0$, $y = 0.75$ mm.
- Volver a leer lo que mide el manómetro inclinado o digital.
- Continuar levantando la sonda, manteniéndose en el mismo plano vertical.

Cuando la lectura del manómetro inclinado o digital coincida para dos posiciones verticales consecutivas, cambiar de plano vertical. Para ello tirar de la placa de latón y desplazarla 2.5 cm.

Repetir la rutina experimental expuesta en los últimos párrafos.

La disposición de la sonda de Pitot será la que aparece en la figura 4.3.

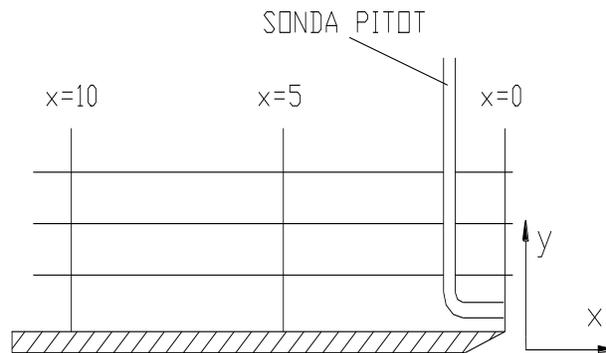


FIGURA. (4.3): Sistemática de toma de datos con la sonda Pitot (elaborado por Juan Carlos Poblano y Justino Cuevas).



**INGENIERÍA QUÍMICA
'TESIS'**

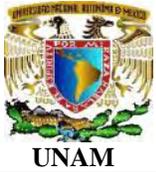
PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



4.7-Presentación y tratamiento de resultados

Los datos experimentales deberán tomarse siguiendo un esquema como el que aparece a continuación:

	(Y) ORDENADA A (Mm.)	LECTURA MANOMÉTRICA (P)	ΔP (m.c.aire)	VELOCIDAD D (m/s)	REYNOLDS CRÍTICO
ABCISA X=0 cm.	0.5 0.75 1 1.25 1.50				
ABCISA X = 2.5 cm.	0.5 0.75 1 1.25 1.50				
ABCISA X = 5 cm.	0.5 0.75 1 1.25 1.50				
ABCISA X = 7.5 cm.	0.5 0.75 1 1.25 1.50				



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Para calcular la velocidad en cada punto se usan las siguientes ecuaciones:

Para el manómetro inclinado:

$$v = \sqrt{2g \times (d - \epsilon) \times \sin \theta \times (\rho_{\text{aceite}} / \rho_{\text{aire}})}$$

Donde:

v = velocidad

g = gravedad

d = lectura del manómetro

ϵ = error de cero en el manómetro

ρ_{aceite} = densidad relativa del aceite

ρ_{aire} = densidad relativa del aire

Para el manómetro digital:

$$v = \sqrt{\frac{2P_{\text{dinamica}}}{\rho_{\text{aire}}}}$$

Donde:

u = velocidad

P = presión dinámica

ρ = densidad del aire

Para conocer aproximadamente el inicio de la capa límite turbulenta, se considera un número de Reynolds crítico igual a $3 \cdot 10^5$ y se calcula con la expresión:

$$Re_x = \frac{V_\alpha \cdot x}{\nu}$$

Donde:

V_α : velocidad de flujo no perturbada o fuera de la capa límite

x : Distancia sobre la placa

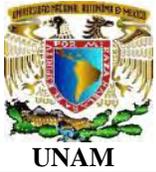
ν = viscosidad cinemática

Re_x = número de Reynolds crítico

Justino Cuevas Hernández

Presentan
70

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Con los datos recopilados en el cuadro anterior se puede empezar a calcular el espesor de Capa Límite en un flujo incompresible para cada punto leído en la placa, del capítulo 2 tenemos:

$$\delta = 5 \sqrt{\frac{\nu x}{U_{\infty}}} \quad \text{Espesor de Capa Límite} \quad (2.12)$$

Con:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} = U_{\infty} F'' \sqrt{\frac{U_{\infty}}{\nu x}} \quad (2.13)$$

El esfuerzo cortante en la pared en una capa límite con $dp/dx =$ diferente de cero es:

$$\tau_o = \mu \frac{du}{dy}_{y=0} = 0.332 \rho U_{\infty}^2 \sqrt{\frac{\nu}{x U_{\infty}}} \quad (2.14)$$

El coeficiente de fricción local es:

$$c_f = \frac{0.664}{\sqrt{Re_x}} \quad (2.15)$$

Y el coeficiente de fricción superficial es:

$$C_f = \frac{1.33}{\sqrt{Re_L}} \quad (2.16)$$

Integrando numéricamente las ecuaciones de los espesores de desplazamiento y cantidad de movimiento son:

$$\delta_d = 1.72 \sqrt{\frac{\nu x}{U_{\infty}}}$$

$$\theta = 0.664 \sqrt{\frac{\nu x}{U_{\infty}}}$$



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

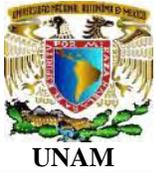
PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



El equipo propuesto podrá ser instalado en la planta piloto de la Fes Zaragoza Campus II para poder aumentar el número de equipos en la misma, de tal manera que en la planta los alumnos de la carrera puedan hacer uso de este equipo.



IMAGENES (4.4): Posibles Áreas Donde Se Montara El Túnel De Viento En La Planta Piloto.



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



CONCLUSIONES

De acuerdo con lo investigado, es de suma importancia para el ingeniero químico comprender el concepto de la teoría de capa límite, y es que depende de muchas variables algunas son velocidad, rugosidad, presión, temperatura viscosidad etc. Los cuales su comprensión y entendimiento pleno son fundamentales para el ingeniero químico, además de que nos ayuda a obtener mayor creatividad, espíritu crítico y valorar el conocimiento, la ciencia y la investigación pura y aplicada.

Sea comprobado que el costo del equipo con proveedores requiere de una gran inversión, y que si se diseña el túnel propuesto saldría en un costo menor como se observo en las tablas comparativas.

Una de los principales objetivos que se trazó en este trabajo, fue el de encontrar una propuesta viable para que los alumnos de la carrera de ingeniería química de la UNAM, y principalmente de la Fes Zaragoza, pudiesen comprender de una forma práctica el concepto de capa límite, además que nos permite ver la influencia en los procesos de transferencia energía, masa y momentum. Por lo tanto se concluye que el proyecto cumple con el objetivo propuesto desde un inicio.

Desafortunadamente con el equipo propuesto no se cumple con el objetivo de poder medir el espesor de capa límite de forma indirecta(hasta este momento), ya que el ventilador nos maneja un flujo muy turbulento, por lo que se propone reducir el gasto del ventilador, colocarle rejillas para regular el flujo, con lo cual pueden participar otros compañeros para instalar estas mejoras al equipo propuesto con lo cual beneficiaria a los alumnos de la carrera de Ingeniería Química, ya que en un solo equipo podrían ver varios fenómenos de transporte.

Será muy importante la instalación de este equipo en la planta piloto de la Fes Zaragoza Campus II, ya que durante la investigación teórica de esta propuesta se pudo constatar, que en muchas universidades extranjeras tienen este tipo de equipo en sus instalaciones y, que el concepto se esta utilizando de una manera importante para el cuidado del medio ambiente, ya no solo para el diseño de turbinas, compresores, y equipo aerodinámico.

Justino Cuevas Hernández

Presentan
73

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



APENDICE A "COTIZACIONES"

M A Z A L
EDUCACION INVESTIGACION INDUSTRIA

HARRY MAZAL, S.A. DE C.V.

Laguna de Tamiahua 204
Col. Anáhuac
Deleg. Miguel Hidalgo
11320 México, D. F.
México
Tel. 53 96-1133
Fax: 53 96-8649

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FES ZARAGOZA

AT'N. DOMINGA ORTIZ BAUTISTA

e-mail: domortiz@servidor.unam.mx

MES DIA AÑO

05 19 05

NUM. CANTIDAD

DESCRIPCIÓN

COTIZACIÓN N° S/N
LIBRAS ESTERLINAS
TOTAL

1	1	BANCO DE FLUJO DE AIRE MARCA: TQ MODELO: AF10	\$ 9,328.00 = 214,544 pesos
2	1	MANOMETRO MULTI-TUBO MARCA: TQ MODELO: AF10A	\$ 2,016.00 = 46,368 pesos
3	1	APARATO DE CAPA LIMITE MARCA: TQ MODELO: AF14	\$ 2,336.00 = 53,728 pesos

AUXILIARES: AF10, AF10A

CONDICIONES:

VALIDEZ DE LA COTIZACIÓN:

30 DIAS

PROCEDENCIA:

INGLATERRA

PRECIOS SE ENTIENDEN EN:

LIBRAS ESTERLINAS MAS 15% IVA PAGADEROS EN
MONEDA NACIONAL AL TIPO DE CAMBIO LIBRE
BANCARIO VIGENTE A LA FECHA DE PAGO DEL
EQUIPO

L.A.B.

SUS INSTALACIONES

TIEMPO DE ENTREGA:

120 DIAS A PARTIR DE SU PEDIDO ACOMPAÑADO
DE SU PAGO.

FORMA DE PAGO:

50% DEL VALOR DEL PEDIDO COMO DEPOSITO EN
GARANTIA, SALDO CONTRA ENTREGA DE LOS
BIENES, MEDIANTE CHEQUE O TRANSFERENCIA
BANCARIA.

A FAVOR DE:

HARRY MAZAL S.A. DE C.V.
LAGUNA DE TAMIAHUA 204
COL ANÁHUAC, 11320 MÉXICO D.F.

TRANSFERENCIA A:

BANCA SERFIN S.A.

SUCURSAL 04 BUENEVISTA

CUENTA N° 65501047373 (M.N.) CLABE: 003180655010473737

CUENTA N° 82500188153 (U.S. DLS) CLABE: 003180825001881537

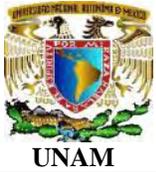
A T E N T A M E N T E

PROF. JUAN MANUEL RAMIREZ LOPEZ
GERENTE DE VENTAS

Justino Cuevas Hernández

Presentan
74

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



México/Centrífugos/ExtraBlower/MXECE-005

Nombre: ExtraBlower

Clave: MXECE-005

Precio: \$5,491.00

Precio con Descuento: \$5,161.54



Dimensiones y Peso con empaque de madera

Largo cm.	Alto cm.	Fondo cm.	Peso Kg.
33	48	40	15



[Ficha Técnica \(.html\)](#)



[AutoCAD \(.dwg\)](#)

Descripción Específica: Rotor ardilla 8"Ø,
1900m³/HR, 220/440V, 60Hz, 1/2HP, 2.0/1.0A,
60dB.



VentDepot.com

Características Generales

Esta línea de extractores TurboCentrífugos ExtraBlower VentDepot, cuenta con oído simple de aspiración y motor directamente acoplado, tiene una construcción ligera y robusta.

Boca de descarga posicionable en 4 ángulos.

Aplicaciones

Extrae o transporta: Humo, gases, vapor y polvos finos a través de nuestros TurboDuctos.

Para uso en: Procesos Industriales, instalaciones de ventilación, extracción y calefacción.

Garantía

1 (Un) año de Garantía certificado por escrito, sujeto a las cláusulas.

Copyright© desde 1996, VentDepot tiene todos los derechos reservados.

VentDepot México, Tel:(52)(55)5822-1516, Fax:(52)(55)5825-0752

VentDepot Perú, Tel:(51)(1)222-3037, Fax:(51)(1)222-3037

VentDepot USA, Tel:(626)279-5111, Call Toll Free:1(888)588-0077, Fax:(626)279-5911

México/Ductos Cuadrados/CuadriLarge/MXCLR-001

Justino Cuevas Hernández

Presentan
75

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Nombre: CuadriLarge

Clave: MXCLR-001

Precio: \$364.38

Precio con Descuento: \$342.52



Dimensiones y Peso con empaque de plástico

Largo cm.	Alto cm.	Fondo cm.	Peso k.o.
14	14	275	1.2



[Ficha Técnica \(.html\)](#)

Descripción Específica: 4x4 pulg., 274
cm. de longitud, reforzado, galvanizado,
cal. 24.

Características Generales

Nuestros TurboDuctos CuadriLarge VentDepot, han sido estructurados en varios tamaños y fabricados en lámina galvanizada, para ajustarse al uso más conveniente.

Diseñados para ensamblarse con mayor facilidad debido a su mayor longitud de 2 metros, logrando una mayor rapidez al momento del montaje.

Ensamblado fácil, tipo mecano, por medio de Tornillos a toda nuestra línea de TurboDuctos Cuadrados. Por medio de nuestros DuctoConectores se podrá ensamblar a nuestras TurboCampanas, TurboCentrífugos, TurboTubulares y TurboHelicoCentrífugos. Por medio de nuestros GabineteConectores se podrá ensamblar a nuestros TurboGabinetes porta TurboFiltros. Sellado a un 99%, recomendamos nuestra línea de selladores para mayor hermeticidad. Diseñado con normas internacionales y aprobado por la I.V.S. (Industrial Ventilation Society).

Aplicaciones

Para transportación de: Ácidos ligeros, vapores, olores, viruta, humo, polvo, gases, aire, etc.

Para uso en: Industrias, comercios y oficinas.

Garantía

1 (Un) año de Garantía certificado por escrito, sujeto a las cláusulas.

Copyright© desde 1996, VentDepot tiene todos los derechos reservados.

VentDepot México, Tel:(52)(55)5822-1516, Fax:(52)(55)5825-0752

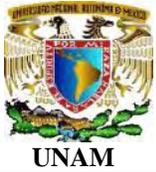
VentDepot Perú, Tel:(51)(1)222-3037, Fax:(51)(1)222-3037

VentDepot USA, Tel:(626)279-5111, Call Toll Free:1(888)588-0077, Fax:(626)279-5911

Justino Cuevas Hernández

Presentan
76

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Anemómetro con tubo de pitot PVM 100

Precio 930 euros

PCE group www.pce.iberica.es/tienda-online/index.html?target=dep

medidor de aire para una medición muy precisa de la velocidad de circulación del aire

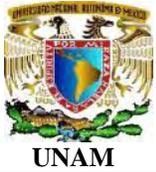
El medidor de aire con tubo de Pitot se utiliza para una medición precisa de la presión diferencial, pero también para la medición de la velocidad de circulación de aire y gases. De esta manera se conecta este medidor de aire con un tubo de Pitot – Prandtl, sobre todo para la determinación de velocidades muy altas de circulación. El medidor de aire ofrece una memoria de datos interna para 60 valores medidos. Dichos valores pueden aparecer de nuevo en la pantalla o bien ser transmitidos a un ordenador mediante el puerto de conexión RS-232 y el software adicional. De esta manera usted podrá realizar mediciones cómodamente en el lugar y más tarde evaluarlas con tranquilidad en el ordenador. Podrá encontrar bajo en el apartado de "Accesorios" el tubo de Pitot más apropiado para su empleo. O bien puede elegir uno de los juegos de tubos de Pitot ofertados.

Las principales ventajas del medidor de aire:

- visualización directa en unidades de presión [Pa] o velocidad de circulación [m/s]
- especialmente adecuado para una velocidad muy alta de circulación del aire
- óptimo con tubo de Pitot telescópico (disponible como accesorio)
- guarda datos de 60 puntos de medición
- calcula el valor medio
- puerto de conexión RS-232 para impresión directa o transmisión de datos a Windows™
- indicador de barra de las \pm oscilaciones
- económico y fiable
- incl. certificado de calibración de fábrica



Medidor de aire con tubo de Pitot



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



La pantalla LCD en el medidor de aire con tubo de Pitot con contraste regulable es alfanumérica y muestra el valor momentáneo en cifras digitales y las oscilaciones en forma de una barra LCD. El campo indicador se puede iluminar al presionar una tecla. El modo indicador se puede cambiar de posición a "Slow" o "Fast".

En el modo indicador "Slow" se transmiten cuatro valores que son mostrados a un ritmo de aproximadamente 3 segundos. Los datos medidos sólo pueden ser pasados "online" del medidor de aire a un ordenador en el modo "Slow".

Presión o corriente

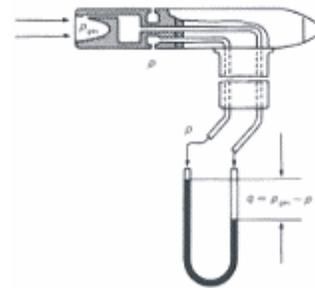
Al pulsar las teclas puede cambiar la posición del indicador de los valores medidos a presión o, si utiliza un tubo de Pitot adecuado u otro transductor de presión dinámica, a velocidad de corriente. El medidor de aire PVM-100 parte de condiciones normales para el cálculo de la velocidad (20 °C, 1013 mbares).

Diagrama esquemático del tubo de Pitot según Prandtl

Medición de la presión dinámica q como diferencia de la presión total p y de la presión estática ambiental p .

Este principio se aplica, sobre todo, cuando el aire que va a ser medido presenta una velocidad de corriente muy alta así como una alta temperatura.

El tubo de Pitot es un instrumento elemental para la determinación de la velocidad de circulación de aire o gases en tuberías y canales de ventilación. Es una combinación de tubo de Pitot para la medición de la presión total y una sonda para la determinación de la presión estática.



Prandtl-Rohr zur Messung des Staudrucks q als Differenz von Gesamtdruck p_{00} und statischem Druck p

Tubo de Pitot según Prandtl

La memoria de valores medidos

En la medición con tubo de Pitot se trata de determinar la velocidad media de corriente en el canal de corriente. Pulsando las teclas, se pueden guardar en la memoria hasta 60 valores individuales obtenidos durante la medición en red en el medidor de aire. Tras la medición se puede llevar a la pantalla el contenido de la memoria, o simplemente partes de ésta y el valor medio puede ser mostrado, impreso o transmitido a un ordenador.

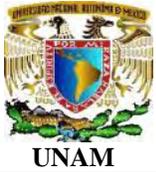
El puerto de conexión serial

El puerto de conexión RS-232 hace posible la comunicación entre el medidor de aire y el ordenador. Podrá transmitir los valores de presión medidos y guardados cuando usted desee. Pero gracias a la comunicación directa con un pc / portátil, también podrá transmitir los datos en sistema online a programas de Windows™ (Excel, Word...) para tratarlos con comodidad.

Justino Cuevas Hernández

Presentan
78

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Alimentación de corriente

Para el funcionamiento del medidor de aire se necesitan cuatro pilas redondas de consumo usual que tengan aprox. 35 horas de servicio. Por supuesto, se pueden emplear también baterías recargables.

Datos técnicos

Campos de medición	1,8 ... 76 m/s velocidad de circulación 0 ... 3500 Pa (0 ... 350 mbares) presión
Resolución (presión)	1 Pa
Precisión a 20°C	±1% del indicador ±1 digit en el área de sobre presión y de presión negativa
Temperatura ambiental	-5 ... +50 °C
Temperatura de almacenaje	-10 ... +50 °C
Puerto de conexión	serial RS 232
Límite de sobrecarga	17,5 kPa
Capacidad de memoria	60 valores de medición
Dimensión	185 x 92 x 30 Mm. (AxAxP)
Peso (sin baterías)	290 g
Alimentación de corriente	4 pilas redondas AA
Vida útil de las baterías	Aprox.35 horas en el modo de servicio "read" sin iluminación o transmisión de datos

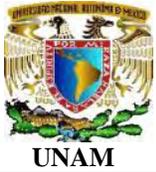
Contenido del envío

1 medidor de aire con tubo de Pitot PVM-100, 1 tubos de unión en rojo y azul, 2 adaptadores de conexión, 1 bolsa protectora, manual de instrucciones

Justino Cuevas Hernández

Presentan
79

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Accesorios disponibles a la venta

- Software incl. cable de datos para la transmisión de valores de medición del medidor de aire al ordenador
- Certificado de calibración DIN ISO (calibración de laboratorio, incluido certificado de revisión)

Tubo de Pitot:

La forma de cabeza elíptica modificada en el tubo de Pitot ofrece una disminución del error de medición que aparece durante ésta por distintos ángulos de soplado.

- Tubo de Pitot acero fino 483 x 8 Mm.
- Tubo de Pitot acero fino 795 x 8 Mm.
- Tubo de Pitot acero fino 1220 x 9,5 Mm.



Tubo de Pitot **Juego 1A**, se compone de:

- Tubo telescópico de Pitot (**máx. 100 °C**) extensible hasta aprox. 980 Mm.
- 2 tubos de PVC de 9 m (rojo y azul)
- Manómetro con válvula de ajuste para ajustar a cero y con ello aumentar la precisión de la medición
- Termómetro digital HL 600 (-200...+1200 °C)
- Sensor de aire para el termómetro digital
- Regla de cálculo para correcciones

Tubo de Pitot **Juego 1B**, se compone de:

- Tubo de Pitot de acero fino (**máx. 800 °C**) 483 x 8 Mm.
- 2 tubos de PVC de 9 m (rojo y azul)
- Manómetro con válvula de ajuste para ajustar a cero y con ello aumentar la precisión de la medición
- Termómetro digital HL 600 (-200...+1200 °C)
- Sensor de aire para el termómetro digital
- Regla de cálculo para correcciones

Justino Cuevas Hernández

Presentan
80

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Distribuidora Industrial Enterprise, S.A. DE C.V.
SUR 114 No. 17-B
Col Cove
Delegación Álvaro Obregón C.P. 01120 México D.F.
Email: dienterprise.com.mx
Phone: (55) 3003-0540 Fax: (55) 3003-0545

Comercializadora De Termómetros
S. A. de C. V. (C.D.T.)
Schumann No. 146 Col Vallejo
C P 07870 México D.F.
Email: famsosa@ri.redint.com
Phone: (52) 55 517-5369 Fax: (52) 55 517-7333

Ingeniería Y Representaciones
Integradas S A DE C V
Patricio Sanz 1747 102-B
Col Del Valle CP 03100
Email: info@irisa.com.mx
Phone: (011) 52 55 55247474 Fax: (011) 52 55 55240338

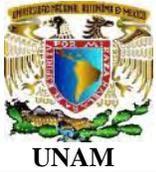
Equipos Refacciones Y Controles
Domicilio Calle Cenzontle
904 Fraac 8 De Julio
Guadalajara JAL CP 44910, México
Email: octavio@erco.com.mx
Phone: (52) 33 38110202 Fax: (52) 33 38101080

Controles Y Válvulas, S.A. De C.V.
Av. Paseo De Los Leones #1307 Cumbres
Monterrey N.L. 64610 C.P. 64610
Email: compritas@hotmail.com
Phone: (52) 81 83464440 Fax: (52) 81 83480594

Justino Cuevas Hernández

Presentan
81

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA
‘TESIS’
PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)

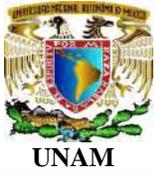


APENDICE B

IMÁGENES MONTAJE DEL TUNEL



Corte y pegado del acrílico para formar el quadri-túnel, el principal problema que se tuvo es que este tipo de material es muy frágil y al cortarlo se fracturaba muy fácilmente por lo que el corte de este se hizo de una manera muy lenta y lo más precisa posible, se pegó con benceno ya que este fue el que mejor en unir el túnel.



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Cuadri-túnel De Acrílico

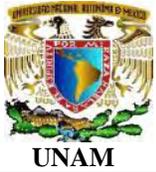


Cuadri-túnel De Acrílico

Justino Cuevas Hernández

Presentan
83

Juan Carlos Poblano Pérez



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Ventilador Para El Túnel De Viento

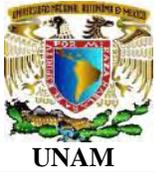


Ventilador y Cuadri-túnel Ensamblados

Justino Cuevas Hernández

Presentan
84

Juan Carlos Poblano Pérez



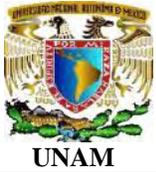
INGENIERÍA QUÍMICA
'TESIS'
PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



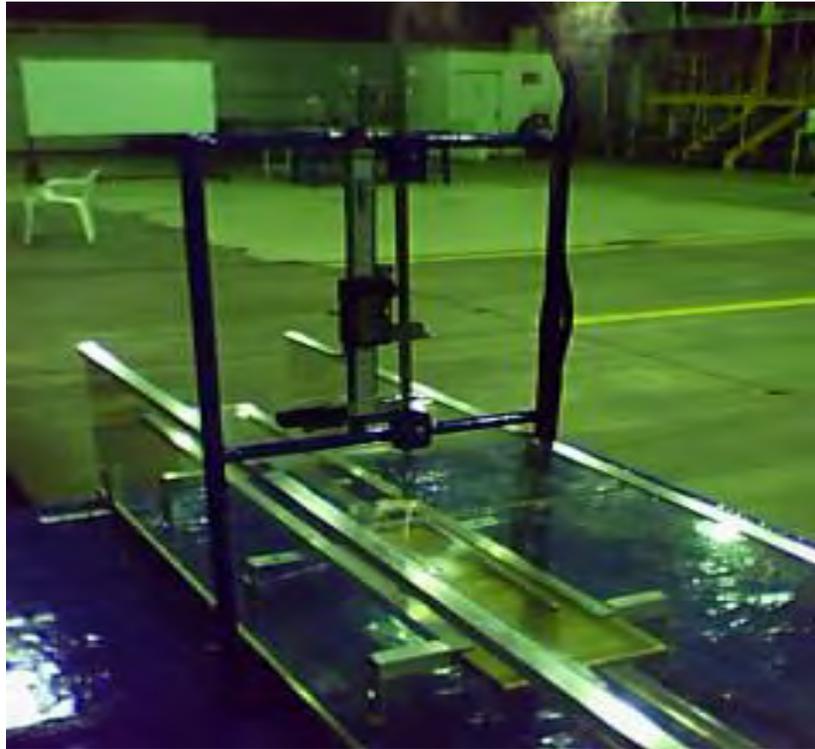
Manómetro inclinado conectado a la sonda pitot



Placa de latón y tubo pitot



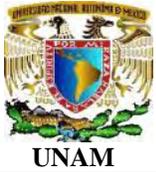
INGENIERÍA QUÍMICA
'TESIS'
PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Placa De Latón, Sonda Pitot, Vernier En Milímetros



Placa De Latón, Sonda Pitot, Vernier En Milímetros



INGENIERÍA QUÍMICA
'TESIS'
PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



**Placa De Latón, Sonda Pitot, Vernier En Milímetros
Frontal**

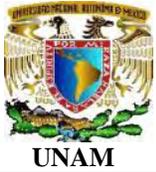


**Placa De Latón, Sonda Pitot, Vernier En Milímetros
Lateral**

Justino Cuevas Hernández

Presentan
87

Juan Carlos Poblano Pérez

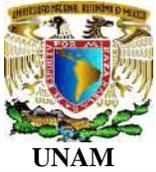


INGENIERÍA QUÍMICA
'TESIS'
PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



Uno de los principales problemas al montar el tubo pitot al que nos enfrentamos fue la manera en que esta debería funcionar, ya que tiene que bajar y subir además medir en milímetros, para poder ver los pequeños cambios de presión a diferentes alturas. Además el ventilador nos maneja un flujo turbulento y nosotros necesitamos un flujo laminar para poder medir el espesor de la capa límite.

Para tener un flujo laminar se bajo el gasto del ventilador además que se pretende colocar mallas para así poder bajar a un mas el gasto de y mantener lo mas posible el flujo laminar. Por lo que respecta al tubo pitot se compro un vernier que mide milímetros el cual es digital, con el cual se baja y sube según se requiera la sonda pitot.



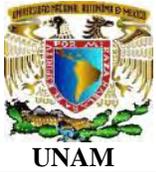
INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



BIBLIOGRAFÍA

- (1)-Fox, R. W.; Mc-Donald, A. T "Introducción a la Mecánica de Fluidos", cap. 8 parte C. McGraw-Hill 1995.
- (2)-Schlichting, H. "Teoría de la capa límite", sección 9 "Aerodynamische Versuchsanstalt, Gottingen, and Technical University, Braunschweig, West Germany".
- (3)-Shames, I.H. "La Mecánica de Fluidos", cap 13. Mc-Graw-Hill, 1995.
- (4)-Streeter, E. B.; Wylie, E. B "Mecánica de los fluidos", cap. 6, Mc-Graw-Hill, 1998.
- (5)-White, F.M. "Mecánica de Fluidos", cap. 7 McGraw-Hill,1996.
- (6)-Olson AT, KA shelstad "Introduction to fluid flow and the transfer of heat and mass" USA, 1987.
- (7)-Trihon, DJ "Phisical Fluid Dinamics" Clarendan press USA.
- (8)-Sherman Fredericks "Viscous Flow" Mc-Gram Hill publishing USA 1990 pp 746.
- (9)-Kay J M Fluid Mechanics and heat transfer 3 edicion Cambridge Universiti press Gran Bretaña 1974 pag 322.
- (10)-Jain G Currie "Fundamental Mechanics of fluids" MC-Graw Hill USA 1974 pag. 441.
- (11)-Landau LD "Mecanica de fluidos", Rerverte Barcelona 1991 pag 623.
- (12)-Janna William "Introducción to fluid Mechanics",PWS publising Company Boston USA 1993 pag 786.
- (13)-Roca, Vila R. "Introduccuión a la Mecanica de fluidos" Limusa 2 edicion México 1987 pag 498.
- (14)-Pore B Sthephen " Turbulent Flow" Cambrige University Press Gran Bretaña 1974 pag 322.
- (15)-Emanuel George " Analitical Fluid Dinamics", CRC Press, Inc. USA 1997 pag 424.
- (16)-Bruce R. Munson, Donald F. Young"Fundamentos de la Mecanica de Fluidos".Limusa , México 2004.
- (17)-Merle C. Potter, David C. Wiggert" Mecanica de Fluidos".Thomson tercera edición, México 2002.
- (18)-Joseph B. Franzini, E. John Finnemore "Mecanica de Fluidos con aplicación a la ingenieria" MC-Graw Hill novena edición, España 1999.
- (19)-L. Rosenhead "Laminar Boundary Layers" England 1988.
- (20)-Crane" fluidos en valvulas accesorios y tuberías "MC-Graw Hill.



INGENIERÍA QUÍMICA 'TESIS'

PROPUESTA DE EQUIPO Y PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN
DE LABORATORIO PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE CAPA
LÍMITE (PROYECTO PAPIME EN112703)



(Octubre 19 2005) Ingeniera de viento [www] Disponible en el URL : < [http // www.ingenieriadeviento .com/HTML/investigación.asp](http://www.ingenieriadeviento.com/HTML/investigación.asp).

(Enero 20 2006) Nociones [www] Disponible en el URL : < [http //vppx134.vp.ehu.es/met/html/nociones/turbu.htm](http://vppx134.vp.ehu.es/met/html/nociones/turbu.htm)

(Enero 30 2006) educación Tecnológica [www] Disponible en el URL : < [http //www.tecnoedu.com/armfield/c15.php](http://www.tecnoedu.com/armfield/c15.php)

(Junio 3 2006) Primeras Noticias [www] Disponible en el URL : < [http //www.educared.net/primerasnoticias/hemero/2007/octu/cien/viento/viento.htm](http://www.educared.net/primerasnoticias/hemero/2007/octu/cien/viento/viento.htm)

(Septiembre 20 2006) Informativos [www] Disponible en el URL : < [http //www.informativos.telecinco.es/va/dn_16470_.htm](http://www.informativos.telecinco.es/va/dn_16470_.htm)

(Febrero 15 2007) Túnel de Viento [www] Disponible en el URL : < [http //www..ing.unlp.edu.ar/aeron/laclyfa/Carpetas/tunelnuevo.htm](http://www..ing.unlp.edu.ar/aeron/laclyfa/Carpetas/tunelnuevo.htm)

(Marzo 24 2007) ciencias [www] Disponible en el URL : < [http //macul.ciencias.uchile.cl/~rferrer/aerotot/node32.html](http://macul.ciencias.uchile.cl/~rferrer/aerotot/node32.html)

(Abril 13 2007) Primeras Noticias [www] Disponible en el URL : < [http //www.iingen.unam.mx/c4/T%C3/Banel%20de%20Viento/default.aspx](http://www.iingen.unam.mx/c4/T%C3/Banel%20de%20Viento/default.aspx)