

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	1/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Manual de prácticas del laboratorio de Mecánica de Fluidos II

Elaborado por:	Revisado por:	Autorizado por:	Vigente desde:
M.I. Octavio Pastor Reyes García M.I. Gustavo Becerra Muñoz Dr. José Eduardo Pérez Mota M.I. Enrique Bernal Martínez M.I. Luis Fernando Donis Rabanales	M.I. Mauricio Iván Escalante Camargo Dr. Ian Guillermo Monsivais Montoliu M.I. Servando Ruiz Rodríguez M.I. Alejandro Cortés Eslava	Dr. Rafael Chávez Martínez	30 de agosto de 2021

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	2/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Índice de prácticas

Práctica 1. Experimento de Reynolds	3
Práctica 2. Burbujas de hidrógeno	15
Práctica 3. Hele-Shaw.....	21
Práctica 4. Túnel de humo.....	43
Práctica 5. Arrastre.....	52
Práctica 6. Arrastre y sustentación.....	64
Práctica 7. Distribución de presión.....	77
Práctica 8. Capa límite.....	96
Práctica 9. Curvas características.....	119
Práctica 10. Perfiles de velocidad.....	137

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	3/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 1

Experimento de Reynolds



Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir **experimentación** adecuada; analizar e interpretar **datos** y utilizar el **juicio ingenieril** para establecer conclusiones.

AE7. Trabajar **efectivamente en equipos** que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	4/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo.	Riesgo asociado.
Solución colorante Tinta	Intoxicación al ingerir accidentalmente el colorante. Evitar también el contacto con los ojos
Mangueras	Riesgo de caídas. Asegurarse que las mangueras estén dentro del drenaje. Si se derrama agua en el suelo, se podría generar resbalones.

2. Objetivo

- ✓ Observar mediante el aparato de Reynolds la diferencia entre flujo laminar, transición y turbulento.
- ✓ Visualizar los perfiles para flujo laminar y turbulento.

3. Concepto básicos y definiciones

La mecánica de fluidos es la ciencia que estudia el comportamiento de los fluidos y su interacción con sólidos u otros fluidos. Existen muchos tipos de flujo de fluidos que se encuentran en la práctica y generalmente se clasifican según ciertas características comunes que se presentan en algunos de ellos; por lo tanto, es conveniente estudiarlos en grupos. Aquí se mencionarán, de forma muy general, diferentes tipos de flujo y solamente se explicarán de mejor manera, aquellas características que se consideran convenientes analizar, previo al desarrollo de experimentos típicos realizados en la mecánica de fluidos, como lo son las técnicas de visualización, que se abordarán dentro de las primeras cuatro prácticas de este manual. Se invita atentamente al lector, en caso de que pretenda profundizar en estos conceptos teóricos, a que consulte las fuentes bibliográficas que se presentan al final de esta práctica.

En el estudio de los diferentes tipos de flujo, es común clasificarlos en regiones viscosas o no viscosas, flujo interno o flujo externo, flujo compresible o flujo incompresible, flujo laminar o flujo turbulento, flujo natural o flujo forzado, flujo estacionario o no estacionario y flujo unidimensional, bidimensional o tridimensional. A continuación, se darán las definiciones de algunos de estos flujos, de los cuales, consideramos que es necesario explicar con un poco de más detalle, ya que muchos de estos aspectos, están relacionados con los conceptos que el profesor explicará a los estudiantes durante el desarrollo de esta primera práctica.

Flujo interno: se presenta cuando el fluido queda por completo limitado por las superficies sólidas; por ejemplo, el flujo de agua en un tubo circular recto.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	5/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Flujo uniforme: Este tipo de flujo implica que no hay cambio en la velocidad del fluido con respecto a la posición, sobre una región especificada. No debe confundirse con el concepto de flujo estacionario, el cual, implica que no hay cambio de la velocidad en un punto con respecto al tiempo.

Flujo laminar: Es el movimiento ordenado caracterizado por capas contiguas de fluido que no se mezclan entre sí. La palabra laminar proviene del movimiento de partículas juntas adyacentes del fluido, que se conocen como “láminas”.

Flujo turbulento: Es el movimiento intensamente desordenado de un fluido, es común que se presente a velocidades altas y se caracteriza por fluctuaciones en la velocidad. Un flujo que se alterna entre laminar y turbulento se conoce como flujo en transición.

Fundamentos teóricos de visualización del flujo de fluidos

El estudio cuantitativo de la mecánica de fluidos exige matemáticas avanzadas; sin embargo, se puede aprender mucho con la visualización del flujo, la cual consiste básicamente en un examen visual de las características del campo de flujo. Por lo anterior, se presentarán los siguientes conceptos:

Línea de Corriente: es una curva que, en todas partes, es tangente al vector velocidad local instantáneo (figura 1.1).

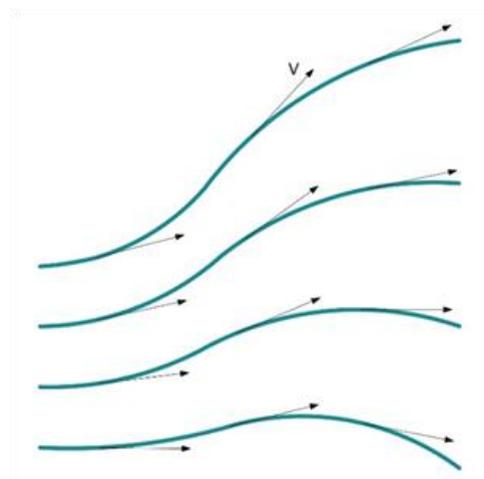


Figura 1.1. Líneas de Corriente.

NOTA: La figura 1.1 fue reconstruida por completo, tomando como referencia la figura 1.16 que aparece en la página 42 de: White F. M. (2011). Mecánica de Fluidos. Séptima edición. McGraw-Hill. New York, NY.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	6/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Línea de trayectoria: es la trayectoria real recorrida por una partícula de fluido durante algún periodo de tiempo (figura 1.2).



Figura 1.2. Línea de trayectoria.

NOTA: La figura 1.2 fue reconstruida por completo, tomando como referencia la figura 4.20 que aparece en la página 131 de: Cengel Y. A. and Cimbala J. M. (2006). Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones. McGraw-Hill. Impreso en México.

Línea de traza: es el lugar geométrico de las partículas de fluido que han pasado de manera secuencial por un punto específico en el flujo (figura 1.3).

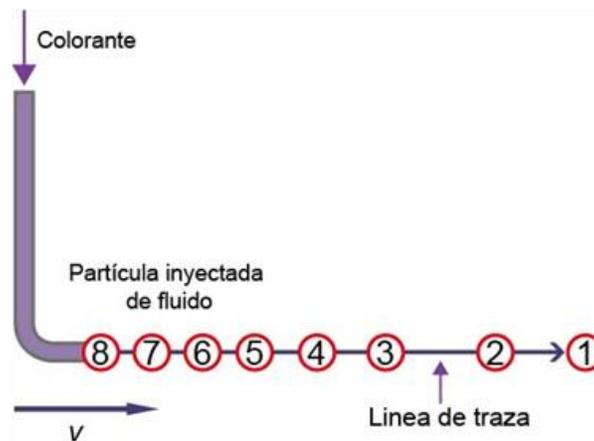


Figura 1.3. Línea de traza.

NOTA: La figura 1.3 fue reconstruida por completo, tomando como referencia la figura 4.23 que aparece en la página 132 de: Cengel Y. A. and Cimbala J. M. (2006). Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones. McGraw-Hill. Impreso en México.

La figura 1.3 muestra una línea de traza formada por la introducción continua de un colorante desde un punto determinado en el flujo. Las partículas trazadoras numeradas del 1 al 8 se introdujeron de manera secuencial.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	7/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Línea fluida o de tiempo: es un conjunto de partículas adyacentes de fluido que se marcaron en el mismo instante de tiempo (figura 1.4).

Las líneas fluidas se forman marcando una línea de partículas de fluido, con la finalidad de observar el movimiento y la deformación de esa línea a través del campo de flujo; en la figura 1.4 se muestran las líneas fluidas en $t=0$, t_1 , t_2 , y t_3 .

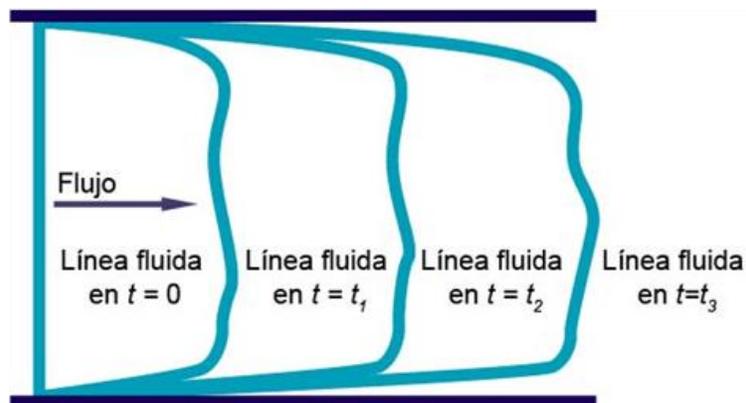


Figura 1.4. Línea fluida.

NOTA: La figura 1.4 fue reconstruida por completo, tomando como referencia la figura 4.27 que aparece en la página 135 de: Cengel Y. A. and Cimbala J. M. (2006). Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones. McGraw-Hill. Impreso en México.

Experimento de Reynolds y otros detalles acerca de los regímenes laminar y turbulento

La existencia de dos tipos distintos de flujo viscoso es un fenómeno universalmente aceptado. El humo que emana de un cigarrillo encendido parece fluir en forma suave y uniforme a corta distancia de donde se forma y después cambia en modo abrupto a un patrón muy irregular, formando una trayectoria inestable. En el agua que sale lentamente de una llave puede observarse un comportamiento similar.

El tipo de flujo bien ordenado ocurre cuando las capas adyacentes de fluido se deslizan en forma suave una sobre otra y el mezclamiento entre las capas o láminas sólo se produce a un nivel molecular. **Fue para este tipo de flujo para el que se derivó la relación de Newton para la viscosidad y, para que sea posible medir la viscosidad, μ , debe existir el flujo laminar.**

El segundo régimen de flujo, en el que se transfieren entre las capas pequeños paquetes de partículas de fluido, dándole una naturaleza fluctuante, se llama régimen de flujo turbulento.

La existencia del flujo laminar y turbulento, aunque ya se había reconocido antes, fue descrita por primera vez, en forma cuantitativa, por Reynolds en 1883. En la Fig. 1.5 se ilustra su experimento

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	8/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

clásico. Se permitió fluir agua a través de un tubo transparente, como el que se muestra, controlando su rapidez por medio de una válvula. En la abertura del tubo se introdujo un colorante cuyo peso específico es igual al del agua y se observó el patrón que forma al aumentar progresivamente la rapidez de flujo del agua. Si la rapidez de flujo era baja, el patrón del colorante era regular y formaba una sola línea de color como lo muestra la Fig. 1.5 a). Sin embargo, al incrementarse la rapidez del flujo, el colorante se dispersaba en la sección transversal de la tubería a causa del movimiento tan irregular del fluido como lo muestra la figura 1.5 b). La diferencia en la forma de la huella del colorante se debió, por supuesto, a la naturaleza ordenada del flujo laminar en el primer caso y al carácter fluctuante del flujo turbulento en el último.

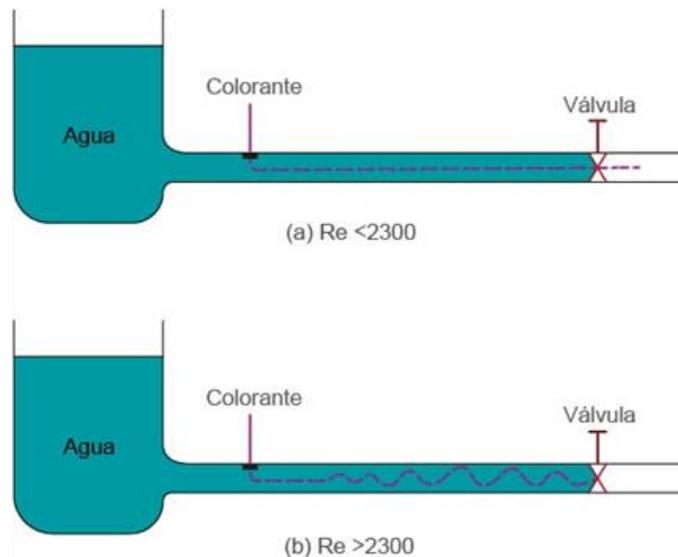


Figura 1.5. Experimento de Reynolds.

NOTA: La figura 1.5 fue reconstruida por completo, tomando como referencia la figura 12.1 que aparece en la página 204 de: Welty J. R., Wicks C. E. and Wilson R. E. (1994). Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa. Limusa. México, DF.

La transición de flujo laminar a flujo turbulento en las tuberías es, por lo tanto, una función de la rapidez del fluido. En realidad, Reynolds encontró que la rapidez del fluido (V) solamente era una de las variables que determinaban la naturaleza del flujo en la tubería, siendo las otras el diámetro del tubo (D), la densidad del fluido (ρ) y la viscosidad del fluido (μ). Estas cuatro variables combinadas en un solo parámetro adimensional, definido como:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	9/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Forman el número de Reynolds, representado como Re , en honor a Osborne Reynolds y de su importante contribución a la mecánica de fluidos. El número de Reynolds no solamente establece el límite en el que un flujo deja de ser laminar, sino que también, representa una relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas que actúan sobre el fluido.

Para el flujo en tuberías circulares se encuentra que, por debajo de un valor de Reynolds de 2300, el flujo es laminar. Por encima de este valor el flujo también puede ser laminar y sin duda se ha observado flujo laminar con números de Reynolds tan altos como 40 000 en experimentos en que las perturbaciones externas se redujeron a un mínimo. Por encima de un número de Reynolds de 2300, las pequeñas perturbaciones provocarán una transición al flujo turbulento, mientras que por debajo de este valor las perturbaciones se ven amortiguadas y prevalece el flujo laminar. Por lo tanto, el número de Reynolds crítico para el flujo en una tubería es 2300.

Con la finalidad de hacer una comparación entre los perfiles de velocidades laminar y turbulento, en la figura 1.6 se muestra un flujo laminar que entra a una tubería, el cual, después de superar la región de entrada, se vuelve completamente desarrollado, esto quiere decir, que la velocidad ya no depende de la coordenada radial del tubo, sino nada más de la coordenada longitudinal denotada por " x " en la figura 1.6.

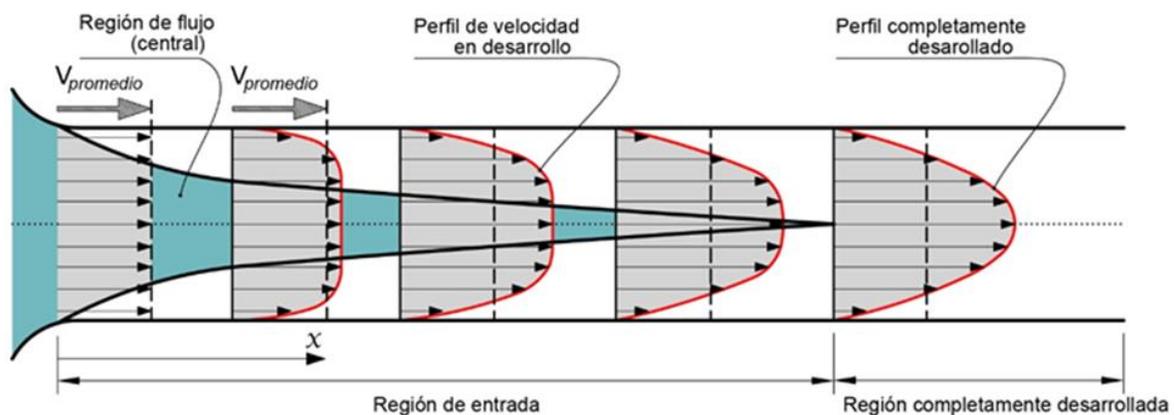


Figura 1.6. Desarrollo del perfil de velocidades en una tubería circular para flujo laminar.

NOTA: La figura 1.6 fue reconstruida por completo, tomando como referencia la figura 1.20 que aparece en la página 13 de: Cengel Y. A. and Cimbala J. M. (2006). Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones. McGraw-Hill. Impreso en México.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	10/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

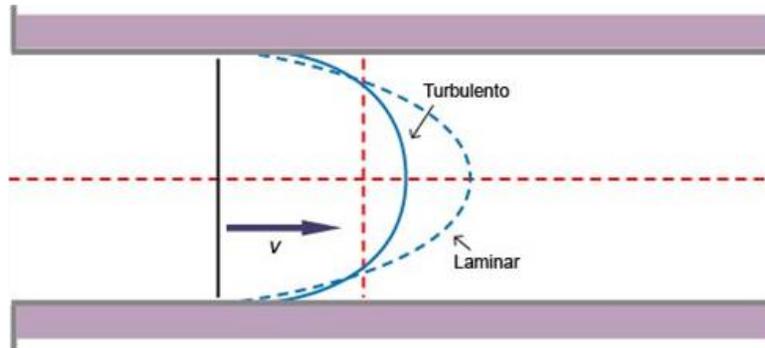


Figura 1.7. Perfil de velocidades de acuerdo al régimen de flujo.

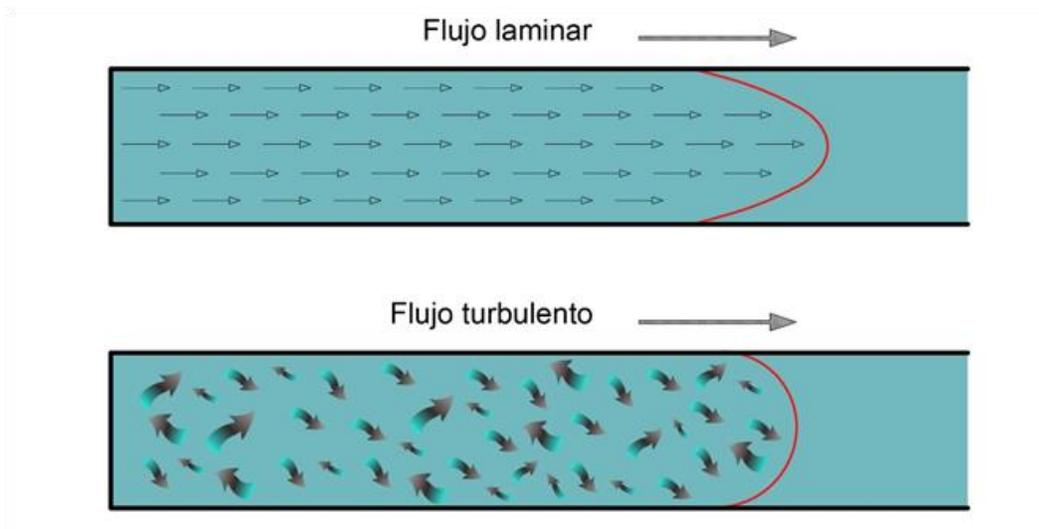


Figura 1.8. Diferencias entre los patrones de flujo laminar y turbulento.

4. Equipo y Material

- Aparato de Reynolds
- Cronómetro.
- Solución colorante.
- Probeta graduada.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	11/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

5. Desarrollo

Se invita al usuario a que el aparato de Reynolds se mantenga libre de vibraciones ya que hay flujos difíciles de determinar, y la línea de flujo se puede distorsionar fácilmente. Se recomienda seguir el siguiente procedimiento:

1. Llenar el tanque con agua (válvula 1).
2. Llenar una sexta parte del depósito de tinta.
3. Abrir la válvula del tanque (válvula 2).
4. Abrir la válvula del depósito de tinta (válvula 3).
5. Regular el flujo (válvula 2).
6. Fotografiar y documentar el patrón que adquiere la tinta.
7. Tomar el tiempo en que tarda en llenarse cierto volumen en la probeta.

Realizar este procedimiento mínimo para un flujo laminar y para uno flujo turbulento.

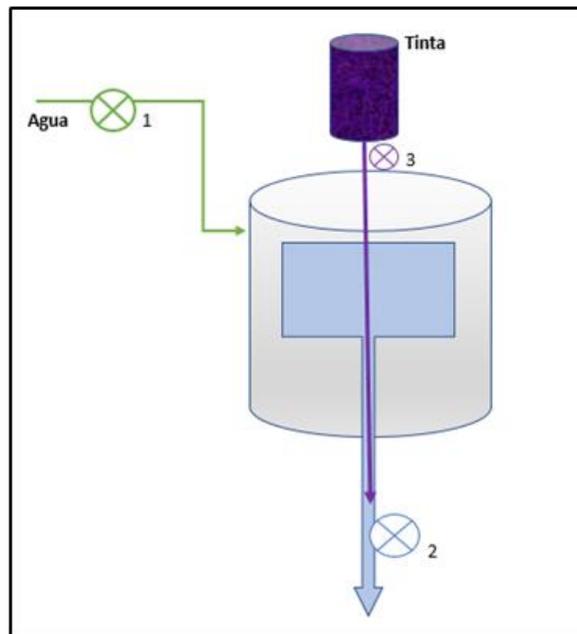


Figura 1.9. Esquema del aparato de Reynolds instalado en el laboratorio.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	12/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Equipo experimental

El aparato de Osborne Reynolds de Armfield está diseñado para permitir el flujo vertical de un líquido a través de un tubo de vidrio con diámetro interior de precisión. El sentido vertical del flujo compensa el efecto de posibles pequeñas desviaciones de la densidad de tinte con relación a la del fluido de trabajo

Datos iniciales.

$$T_{amb} = \quad ^\circ\text{C}$$

$$\Phi_{tubería} = 10 \text{ mm}$$

$$L_{tubería} = 65 \text{ cm}$$

V = volumen recolectado en la probeta.
 t = tiempo registrado para el volumen recolectado.
 A = área transversal del tubo.

$$\dot{V} = \frac{V}{t} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$V_{prom} = \frac{\dot{V}}{A} \quad [\text{m/s}]$$



Tabla de datos

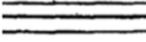
Línea de flujo	Evento	Volumen [ml]	Tiempo [s]
	1		
	2		
	3		
	4		
	5		
	6		

Tabla 1.1. Tabla de datos.

6. Resultados

El alumno adjuntará sus imágenes o esquemas, calculará el número de Reynolds que se está utilizando en cada caso, y describirá y analizará la información gráfica.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	13/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Imagen	Número de Reynolds	Descripción y análisis de la información gráfica.

Tabla 1.2. Tabla de resultados

El cálculo del número de Reynolds debe anexarse al reporte.

7. Cuestionario

1. ¿Qué representa el número de Reynolds?
2. ¿Qué le pasa a las perturbaciones cuando tenemos flujo laminar?
3. ¿Qué les pasa a las perturbaciones cuando tenemos flujo turbulento?
4. ¿Cuál es la diferencia entre flujo laminar y turbulento?
5. ¿Concuerdan los resultados experimentales con los rangos del número de Reynolds manejados en la literatura? Justifique su respuesta.

8. Conclusiones

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	14/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

9. Bibliografía

Fuentes básicas

- Cengel Y. A. and Cimbala J. M. (2006). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*. McGraw-Hill. Impreso en México.
- Welty J. R., Wicks C. E. and Wilson R. E. (1994). *Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa*. Limusa. México, DF.
- White F. M. (2011). *Mecánica de Fluidos*. Séptima edición. McGraw-Hill. New York, NY.

Fuentes electrónicas

- Osborne Reynolds' Demonstration.
<http://discoverarmfield.com/en/products/view/f1-20/osborne-reynolds-demonstration>
- Reynolds Apparatus.
<http://www.equipmentsexporters.com/product-details/reynolds-apparatus-776.html>

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	15/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 2

Burbujas de hidrógeno



Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir **experimentación** adecuada; analizar e interpretar **datos** y utilizar el **juicio ingenieril** para establecer conclusiones.

AE7. **Trabajar efectivamente en equipos** que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	16/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo.	Riesgo asociado.
Equipo	Riesgo de corto circuito. Evitar tocar los electrodos.
Fluidos de trabajo	Intoxicación por ingerir la solución de agua y sal de glouber.
Lámpara	Quemaduras en la piel de las manos. La lámpara alcanza temperaturas altas.

2. Objetivos

- ✓ Introducir al alumno en el método de visualización por medio de burbujas de hidrógeno.
- ✓ Observar y analizar el flujo generado al introducir en el seno del fluido diferentes modelos. Generar evidencias del flujo observado mediante la elaboración de dibujos esquemáticos o de la toma de fotografías.
- ✓ Analizar cómo influye la forma geométrica del objeto en su interacción con el flujo y en la aparición de las diferentes estructuras fluido-dinámicas.

3. Concepto básicos y definiciones

Electrólisis: Proceso químico por medio del cual una sustancia o un cuerpo inmersos en una disolución se descomponen por la acción de la una corriente eléctrica continua.

- Electrólisis: Proceso químico por medio del cual una sustancia o un cuerpo inmersos en una disolución se descomponen por la acción de la una corriente eléctrica continua.
- Electrólisis en el agua: Descomposición del agua en los elementos básicos que la componen, es decir, para el agua se generan gases oxígeno e hidrógeno por medio de una corriente eléctrica continua, que se genera a través de electrodos. Para disminuir la resistencia al paso de corriente a través del agua esta se suele acidular añadiendo un electrolito fuerte.
- Capa límite: Es una región pequeña que se genera en la cercanía de un objeto sólido cuando hay un movimiento relativo entre este objeto sólido y el fluido que lo rodea. Esta región se caracteriza por una fuerte variación de la velocidad del fluido en el espacio, y altos esfuerzos cortantes.
- La separación de la capa límite es el desprendimiento de una capa límite de la superficie en una estela más amplia. La separación de la capa límite se produce cuando la parte de la capa límite más cercano a la pared o al borde de ataque se invierte en la dirección del flujo. El punto de separación se define como el punto entre el flujo hacia adelante y hacia

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	17/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

atrás, donde el esfuerzo cortante es cero. La capa límite general inicialmente se espesa repentinamente en el punto de separación y luego es expulsada de la superficie por el flujo inverso en su parte inferior.

Visualización de flujos

La mayoría de los fluidos, gases o líquidos, son transparentes y su movimiento permanece invisible al ojo humano durante la observación directa. Para observar el movimiento del fluido es necesario emplear métodos para hacer visible el flujo.

Tales métodos se denominan técnicas de visualización de flujo; y deben suministrar información acerca del campo de flujo completo sin interferir físicamente con el flujo del fluido. En contraste, los instrumentos de medición simple suministran información puntual del campo de flujo y perturban en cierto grado el flujo.

Una técnica consiste en agregar partículas de material observable al fluido suficientemente pequeñas para asumir que el movimiento de las partículas es el mismo que las del fluido en dirección y magnitud de la velocidad. Esto constituye un método indirecto ya que observamos las partículas del material en lugar de las partículas del fluido en sí.

La diferencia entre el movimiento del fluido y las de las partículas observables puede ser minimizada pero no evitada totalmente, aún si la densidad de las partículas coincide con las del fluido. Estos métodos proporcionan excelentes resultados en flujos estacionarios.

Técnica de visualización con burbujas de hidrógeno

La técnica tiene como base la generación de pequeñas burbujas de hidrógeno en un alambre fino (cátodo) el cual se encuentra inmerso y colocado de forma normal al flujo del fluido.

El cátodo consiste de alambre fino de platino/iridio soportado, bajo tensión, por una horquilla. Las burbujas son arrastradas del cátodo por la corriente y, debido a su tamaño pequeño, siguen adecuadamente el flujo.

La electrólisis se realiza en una sección de trabajo de poca profundidad (regulable) y fondo de color negro, optimizando la visualización de los patrones de flujo. El tamaño de las burbujas de hidrógeno es muy importante. Si las burbujas son demasiado grandes, éstas tenderían a flotar hacia la superficie y no seguirían el patrón de flujo que se desea visualizar. Si las burbujas son demasiado pequeñas, éstas serían invisibles.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	18/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

El tamaño de las burbujas depende directamente del diámetro del cátodo y en menor proporción por el suministro de corriente en el electrodo y por la concentración de sulfato de sodio (Na_2SO_4 , sal de Glauber). Empleando un cátodo con 0.05 mm de diámetro, se podría generar burbujas de 0.025 a 0.037 mm de diámetro.

El equipo cuenta con un generador de pulsos que permite definir la duración de cada pulso y la duración entre pulsos en el rango de 10 a 1800 ms.

La línea de flujo generada en el equipo es una línea de tiempo o línea fluida y se define como un conjunto de partículas adyacentes de fluido que se marcaron en el mismo instante (anterior). Las líneas fluidas son particularmente útiles para situaciones en donde se va examinar la uniformidad de un flujo (o la falta de ello).

4. Equipo y Material

- Sistema avanzado de visualización de flujo por burbujas de hidrogeno.
- Modelos

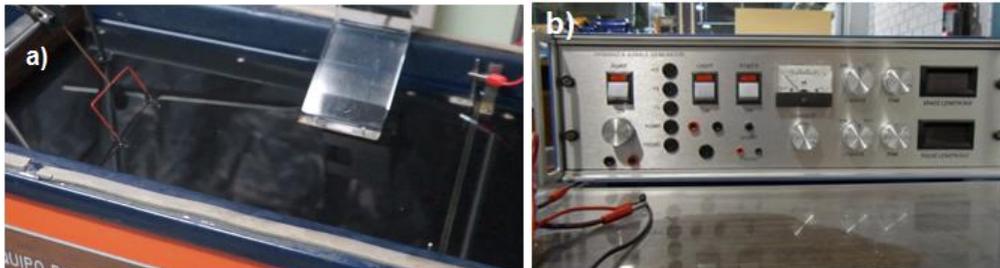


Figura 2.1. a) Depósito de agua para generar el flujo. b) Panel de control del equipo.

5. Desarrollo

Actividad 1. Generación de los Flujos.

1. El profesor colocará los diferentes objetos para generar los flujos.
2. El profesor realizará una descripción cualitativa general de cada flujo.
3. El alumno realizará esquemas de cada flujo.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	19/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Se realizará al menos las siguientes configuraciones.

A. Flujo sobre modelos. Visualización de patrones de flujo externo.

1. Flujo uniforme. Flujo sin modelo. Observar flujo uniforme y libre de turbulencia.
2. Flujo sobre un cilindro. El electrodo se desplazará en 3 ubicaciones:
 - 2.1. Antes del modelo (observación de flujo uniforme, zona desprendida, estela)
 - 2.2. Atrás del modelo (observación de la zona desprendida).
 - 2.3. Más atrás del modelo (observación de la longitud de la estela).
3. Flujo sobre un perfil aerodinámico (el espesor del cuerpo cambia gradualmente).
 - 3.1. Sin ángulo de ataque (observar si existe separación).
 - 3.2. Con ángulo de ataque (observar la zona desprendida y estela).
4. Flujo paralelo sobre un bloque cuadrado. Observar puntos de separación, tamaño de la separación para:
 - 4.1. Frente redondeado y salida plana.
 - 4.2. Frente plano y salida redonda.
5. Flujo normal sobre una placa plana delgada con extremos con borde redondeado y borde plano. Observar comparativamente, puntos de separación diferentes y tamaños diferentes de la zona desprendida, estancamiento del flujo.
6. Flujo normal sobre un bloque cuadrado, los dos extremos son planos. Observar la amplitud de la zona desprendida, vórtices en esquinas y en los lados.

B. Flujo entre modelos. Visualización de patrones de flujo interno.

Inicialmente establecer una generación continua de burbujas, después generar espaciamiento entre bloques de burbujas para observar la deformación del frente de burbujas, desplazar perilla de "space length". Observar el flujo entre las placas. Observar si existe separación y en donde ocurre.

7. Flujo entre placas planas paralelas (frente biselado).
8. Flujo entre placas planas convergentes.
9. Flujo entre placas divergentes.

6. Resultados

El alumno anexará a su reporte sus esquemas o fotografías y explicará qué sucede en cada flujo.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	20/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

7. Cuestionario

Contestar tomando en cuenta los resultados obtenidos y su análisis.

1. ¿Cuál es la diferencia entre los efectos de entrada curvada y entrada roma?
2. En el caso del perfil aerodinámico, indique las diferencias cuando se modifica el ángulo de ataque.
3. ¿Los vórtices de von Kármán ocurren únicamente en flujo alrededor de un cilindro?
4. ¿Por qué el flujo no se separa de las superficies del canal convergente?, ¿A qué se debe la separación del flujo en un canal divergente?

8. Conclusiones

9. Bibliografía

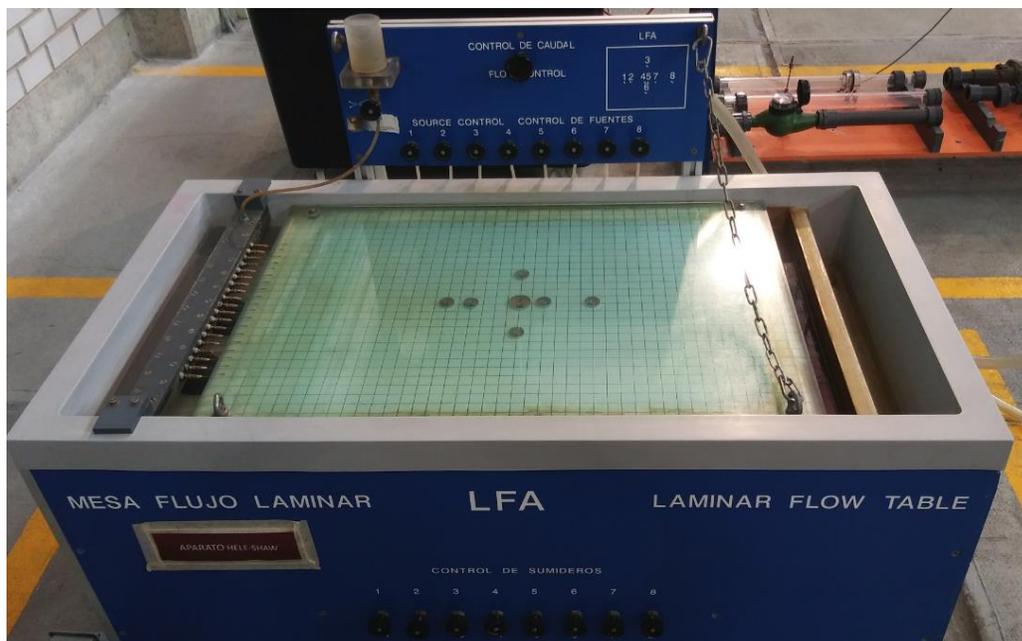
Fuentes básicas.

1. Holman Philip. Métodos Experimentales para Ingenieros Ed. Mc Graw Hill.
2. Merzkirch, W. Flow Visualization (1987). 2ª Ed. Orlando, Florida: Academic Press Inc.
3. Armfield Ltd. Instruction manual F14 Advance hydrogen bubble flow visualisation system (Issue 4, Nov. 1995). England.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	21/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 3

Hele-Shaw



Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir **experimentación** adecuada; analizar e interpretar **datos** y utilizar el **juicio ingenieril** para establecer conclusiones.

AE7. Trabajar **efectivamente en equipos** que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	22/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo.	Riesgo asociado.
Colorante.	Intoxicación. Evitar ingerir y evitar el contacto con ojos.
Placas de vidrio de la celda Hele-Shaw.	Cortaduras por rotura de las placas de vidrio. Manipular con precaución las placas de vidrio del equipo.
Manguera de descarga del depósito del equipo.	Riesgo de resbalones y caídas por derrame de agua. Manipular con precaución la manguera de descarga de agua del equipo.

2. Objetivos

- ✓ Visualización de líneas de flujo de traza, de trayectoria y de corriente.
- ✓ Visualización de flujos potenciales bidimensionales elementales, compuestos y en modelos utilizando la celda de Hele-Shaw.
- ✓ Descripción cualitativa de la velocidad y presión en diferentes regiones del campo de flujo, a partir del patrón de líneas de flujo observadas.

3. Concepto básicos y definiciones

El equipo Hele-Shaw está constituido por dos placas de vidrio planas y paralelas separadas por una distancia muy pequeña comparada con el largo y ancho, figura 3.1. Básicamente se tiene un flujo entre placas paralelas en reposo con un gradiente de presión aplicado al flujo. Si la separación entre placas es muy pequeña (infinitesimal, <0.5 mm) tenemos una celda de Hele-Shaw y el flujo resultante se denomina flujo de Hele-Shaw. En el caso del equipo del laboratorio, la separación entre placas es mayor a 0.5 mm y no podría analizarse como un flujo de Hele-Shaw.

A través de estas dos placas se hace circular agua en forma suficientemente lenta como para que el flujo sea laminar.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	23/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

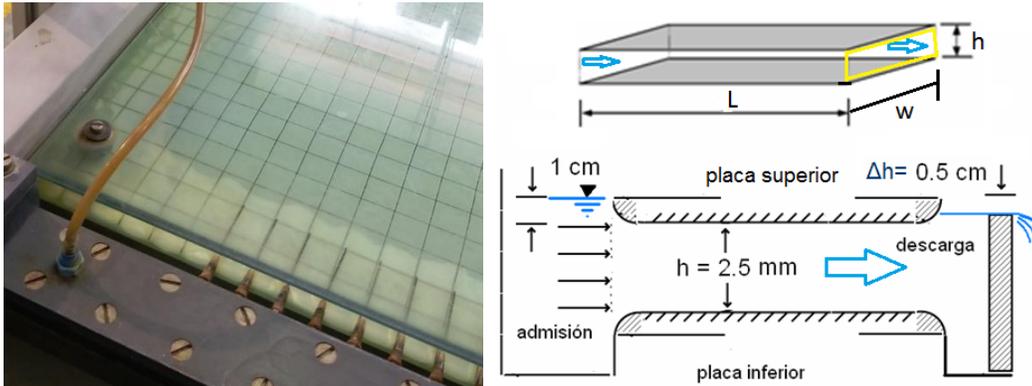


Figura 3.1. Fotografía y dibujo esquemático de la celda de Hele-Shaw del laboratorio. Elaboración propia, EP, Alejandro Cortés E. 2020.

Entre 1897 y 1900 Henri Selby Hele-Shaw desarrolló una técnica mediante la cual un flujo (interno) viscoso y laminar entre dos placas paralelas muy próximas, simula el flujo (externo) de un fluido ideal cuando se observa en dirección perpendicular a las placas. Si se consiguen velocidades promedio del fluido de 2 cm/s se pueden simular con gran exactitud muchos patrones de flujos externos bidimensionales de un fluido ideal. Un flujo incompresible, estacionario e irrotacional de un fluido ideal se le conoce como flujo potencial.

En el equipo del laboratorio típicamente se obtienen flujos internos con número de Reynolds alrededor de 200, que no se pueden considerar flujos a muy bajos números de Reynolds ($Re \ll 1$); los flujos con $Re \ll 1$ reciben el nombre de creeping-flow o flujo de Stokes [2, pág. 173] para flujos sobre cuerpos sumergidos. Notar que la inercia es también despreciable si no hay aceleración convectiva, tal como el flujo totalmente desarrollado en un ducto. En tal caso la aproximación de creeping-flow se mantiene sin la restricción del número de Reynolds.

El flujo interno en el equipo correspondería, por la separación entre placas, a flujos de película delgada [1, Pág. 238] cuando se colocan secciones de cuerpos entre las placas (modelos).

Conviene subrayar que se pretende representar algo ideal (flujo potencial, fluido sin viscosidad) a partir de una imitación (de lo que no es); realmente tenemos un flujo altamente viscoso.

En la práctica se utilizará la celda de Hele-Shaw para observar el flujo de agua alrededor de secciones de cuerpos. Stokes demostró que la función de corriente y la presión satisfacen la ecuación de Laplace en dos dimensiones. Así las líneas de corriente obtenidas en el Hele-Shaw podrían corresponder a líneas de corriente del flujo irrotacional y las isobaras podrían corresponder a las

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	24/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

equipotenciales. Las limitaciones son el Re del flujo y la separación de las placas que deberá ser pequeña comparada con las dimensiones de la sección del cuerpo a utilizar.

Se analiza el caso de un flujo muy viscoso cuando el término $(u \cdot \nabla)u$ es despreciable. Hay dos formas muy diferentes en que puede ocurrir.

El primero, el número de Reynolds puede ser muy pequeño

$$Re = \frac{UL}{\nu} \ll 1 \quad (\text{Ec. 3.1})$$

En este caso las ecuaciones de movimiento que suministran una buena descripción del flujo, en ausencia de fuerzas de cuerpo sería:

$$\begin{aligned} 0 &= -\nabla p + \mu \nabla^2 u, \\ \nabla \cdot u &= 0 \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Un segundo caso involucra movimiento en una película delgada de líquido, y en este caso el número de Reynolds convencional no es necesariamente pequeño. La idea principal es que los gradientes de velocidad en la película son tan intensos debido al pequeño grosor, que predominan las fuerzas viscosas. De tal forma, si L es la longitud de la película, y h es un espesor típico, el término $(u \cdot \nabla)u$ resulta ser insignificante si:

$$\frac{h^2}{L^2} \ll \frac{\nu}{UL} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Las ecuaciones de película delgada son aún más simples que la ecuación (3.2), y brindan la oportunidad de abordar algunos problemas que de otro modo serían inaccesibles por análisis elemental.

Un ejemplo de análisis de flujo de película delgada es la celda de Hele-Shaw. En este aparato simple es posible simular muchos patrones de flujo bidimensionales irrotacionales.

Antes de tratar el flujo de película delgada en la celda Hele-Shaw, conviene señalar que existen fotografías de visualización de flujo (Flow past a cylinder, Taneda 1998) a bajos números de Reynolds ($Re \ll 1$) para un cilindro que muestran una gran semejanza con las fotografías de flujo potencial logradas con la celda de Hele-Shaw. Ejemplo de estas fotos son las siguientes:

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	25/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

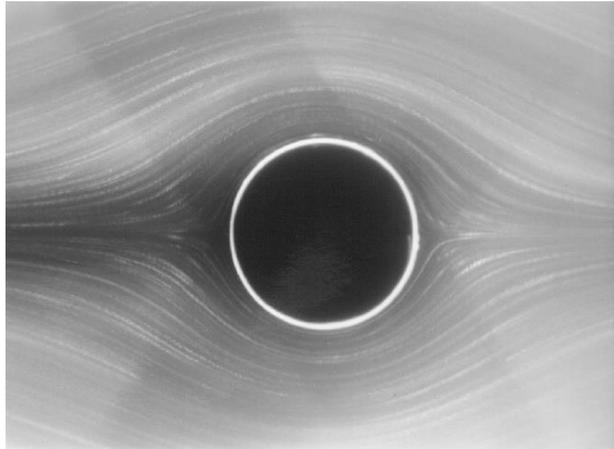


Figura 3.2. Flujo estacionario pasando por un cilindro ($Re=0.16$).

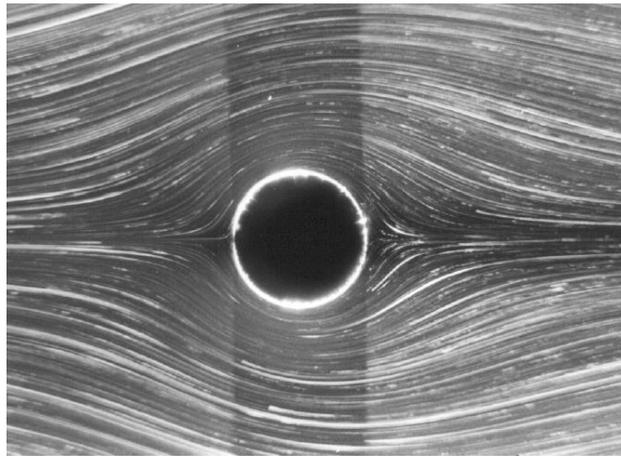


Figura 3.3. Flujo estacionario pasando por un cilindro ($Re=1.10$).

Flujo en una película delgada. Obtención de las ecuaciones de movimiento [1, pág. 238-240].

Sea un fluido viscoso en flujo estacionario entre dos fronteras rígidas $z = 0$ y $z = h(x,y)$. Donde U es la velocidad de un flujo horizontal, L es una escala la longitud horizontal típica del flujo. Adicionalmente se supone que

$$h \ll L \quad (\text{Ec. 3.4})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	26/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Ahora, la condición de no deslizamiento se deberá satisfacer en $z = 0$ y $z = h$, así que u podría cambiar por una cantidad del orden de U sobre una distancia z del orden de h . Así $\partial u/\partial z = U/h$, e igualmente $\partial^2 u/\partial z^2$ sería del orden U/h^2 . Los gradientes horizontales de u , por otro lado, serán mucho más débiles; $\partial u/\partial x$ serán del orden U/L y $\partial^2 u/\partial x^2$ será del orden U/L^2 . En vista de la ecuación (3.4), entonces el término viscoso en la ecuación de movimiento

$$(u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u + g \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Puede ser aproximada como sigue:

$$\nu \nabla^2 u \cong \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Se plantea la pregunta: ¿En qué circunstancias el término anterior (Ec. 3.6) excede el término $(u \cdot \nabla)u$ en la ecuación (3.5)? Es necesario conocer el orden de magnitud de los dos términos como sigue:

$$\begin{aligned} (u \cdot \nabla)u &\sim \frac{U^2}{L} \left(1, 1, \frac{h}{L}\right), \\ \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} &\sim \frac{\nu U}{h^2} \left(1, 1, \frac{h}{L}\right), \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

La componente z es más pequeña que otras porque la condición de incompresibilidad

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Implica que $\partial w/\partial z$ es de orden U/L y por lo tanto w es de orden Uh/L . Esta estimación muestra que el término $(u \cdot \nabla)u$ puede ser despreciable si

$$\frac{UL}{\nu} \left(\frac{h}{L}\right)^2 \ll 1 \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Esta ecuación (3.9) y la ecuación (3.4) forman la base de la teoría de película delgada. Conviene recordar que el número de Reynolds convencional (UL/ν) no necesita ser pequeño. A menudo (UL/ν) es muy grande en la práctica; sin embargo, la condición (3.9) todavía se puede cumplir, de modo que predominen las fuerzas viscosas, siempre que (h/L) sea suficientemente pequeño.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	27/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

La reducción de las ecuaciones de Navier-Stokes bajo las ecuaciones (3.4) y (3.9) es dramática; con el término $(u \cdot \nabla)u$ ausente y el término $\nu \nabla^2 u$ muy simplificado, las ecuaciones de movimiento se convierten, en ausencia de fuerzas de cuerpo, en:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}, \quad \frac{\partial p}{\partial z} = \mu \frac{\partial^2 w}{\partial z^2},$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (\text{Ec. 3.10})$$

Adicionalmente, ya que w es más pequeña que la velocidad del flujo horizontal por un factor de orden h/L , sigue de estas ecuaciones que $\partial p/\partial z$ es mucho más pequeña que el gradiente de presiones horizontal. Así p es, como primera aproximación, una función de x y y solamente. Esto significa que las dos primeras ecuaciones pueden ser integradas trivialmente con respecto a z (una circunstancia muy inusual) para dar:

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} z^2 + Az + B,$$

$$v = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} z^2 + Cz + D, \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Donde $\partial p/\partial x$, $\partial p/\partial y$, A , B , C , y D son todas función de x y y únicamente. A continuación se trata un ejemplo de flujo de película delgada investigada experimentalmente por Hele-Shaw en 1898.

Flujo en una celda de Hele-Shaw [1, pág. 241-242]

Suponemos que las fronteras superior e inferior son ambas planas y paralelas, por lo que h es constante. Si el fluido pasa en el espacio entre ellas, impulsado por gradientes de presión horizontales, y fluye por un objeto cilíndrico que tiene el eje z como generador, como se muestra en la figura 3.4.

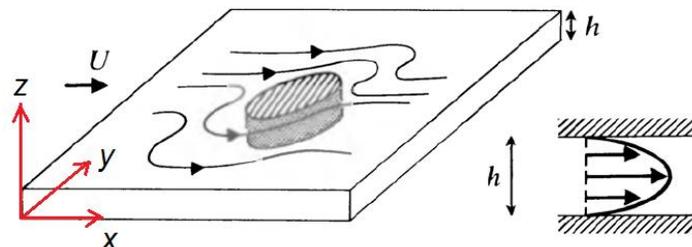


Figura 3.4. Flujo en una celda Hele-Shaw [1].

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	28/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Aplicando la condición de no deslizamiento en ambos $z=0$ y $z=h$ y las ecuaciones (3.11) se tiene

$$\begin{aligned}
 u &= -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} z(h-z), \\
 v &= -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} z(h-z),
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 3.12}$$

Lo más importante aquí es el hecho de que p es función de x y de y únicamente, mientras que la velocidad de flujo depende de z (siendo mayor a mitad de camino entre los planos), no la relación v/u . Esto significa que la dirección del flujo es independiente de z , así que el patrón de líneas de corriente es independiente de z . Adicionalmente, lo más notable, eliminando p de las ecuaciones (3.12), resulta:

$$\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = 0
 \tag{Ec. 3.13}$$

Así, en cualquier z el flujo pasado un cilindro de alguna sección transversal podría corresponder al flujo irrotacional bidimensional pasando por el cilindro (QED).

Líneas de flujo

Una línea de flujo es aquella línea identificada en el campo de flujo generada por el movimiento de las partículas del fluido en un instante o en un intervalo de tiempo.

En el equipo Hele-Shaw se pueden visualizar líneas de trayectoria, de emisión o de raza y líneas de corriente. El flujo potencial se visualiza de manera indirecta a partir de líneas de corriente y no de líneas equipotenciales.

El equipo genera líneas de traza que facilita la observación experimental del flujo, sin embargo, resulta más útil observar líneas de corriente dado que proporcionan información sobre la velocidad de las partículas de fluido. En el caso de un flujo estacionario, las líneas de traza, de corriente y de trayectoria coinciden. También resulta de más utilidad generar no una sino varias líneas de traza para lograr una observación completa del campo flujo. La figura 3.5 y 3.6 muestran la información cualitativa que se puede obtener a partir de la separación entre líneas de corriente.



**Manual de prácticas del
Laboratorio de Mecánica de
Fluidos II**

Código:	MADO-57
Versión:	04
Página	29/151
Sección ISO	8.3
Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021

Facultad de Ingeniería

Área/Departamento:
Laboratorio de Termofluidos

La impresión de este documento es una copia no controlada

Descripción comparativa de la velocidad a partir de las líneas de corriente observadas.

No hay flujo a través de una línea de corriente.

$$Q_1 = Q_2$$

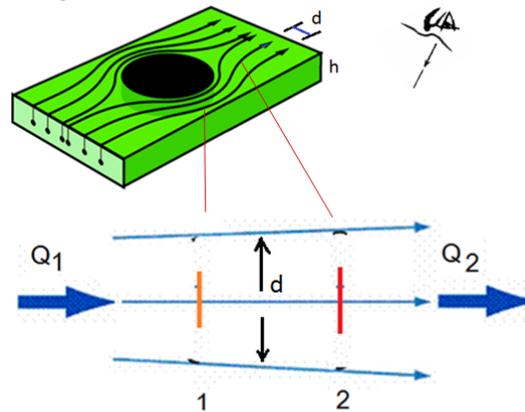
Velocidad:

$$Q = VA = Vdh$$

Q: gasto volumétrico.
d: separación entre líneas de corriente.
A: área transversal entre líneas de corriente (d h).
h: separación entre placas, constante.

$$V_1 d_1 h = V_2 d_2 h$$

Si $d_1 = d_2$ entonces $V_1 = V_2$



Si $d_1 < d_2$ entonces $V_1 > V_2$

$$V_1 = V_2 \frac{d_2}{d_1}$$

Figura 3.5. Relación entre separación de líneas de corriente y velocidad.

Descripción comparativa de la presión a partir de las líneas de corriente observadas.

Presión:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = const.$$

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2$$

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2}$$

Si $V_1 = V_2$ entonces $P_1 = P_2$

$$P_1 = P_2 + \rho \left(\frac{V_2^2}{2} - \frac{V_1^2}{2} \right)$$

Si $V_1 > V_2$ entonces $P_1 < P_2$

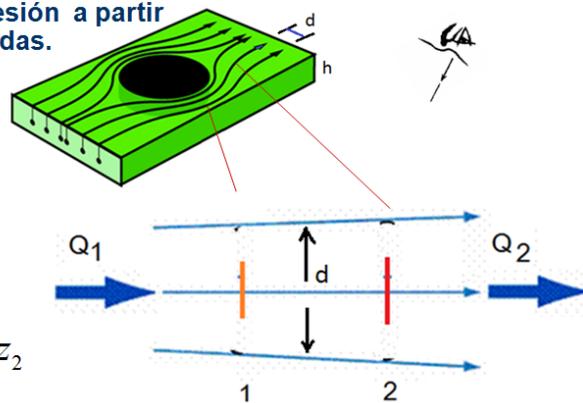


Figura 3.6. Relación entre separación de líneas de corriente, velocidad y presión.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	30/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

4. Equipo y Material

- Mesa de flujo laminar (Equipo Hele-Shaw).
- Modelos.
- Probeta de plástico graduada de 1,000 ml.
- Cronómetro.

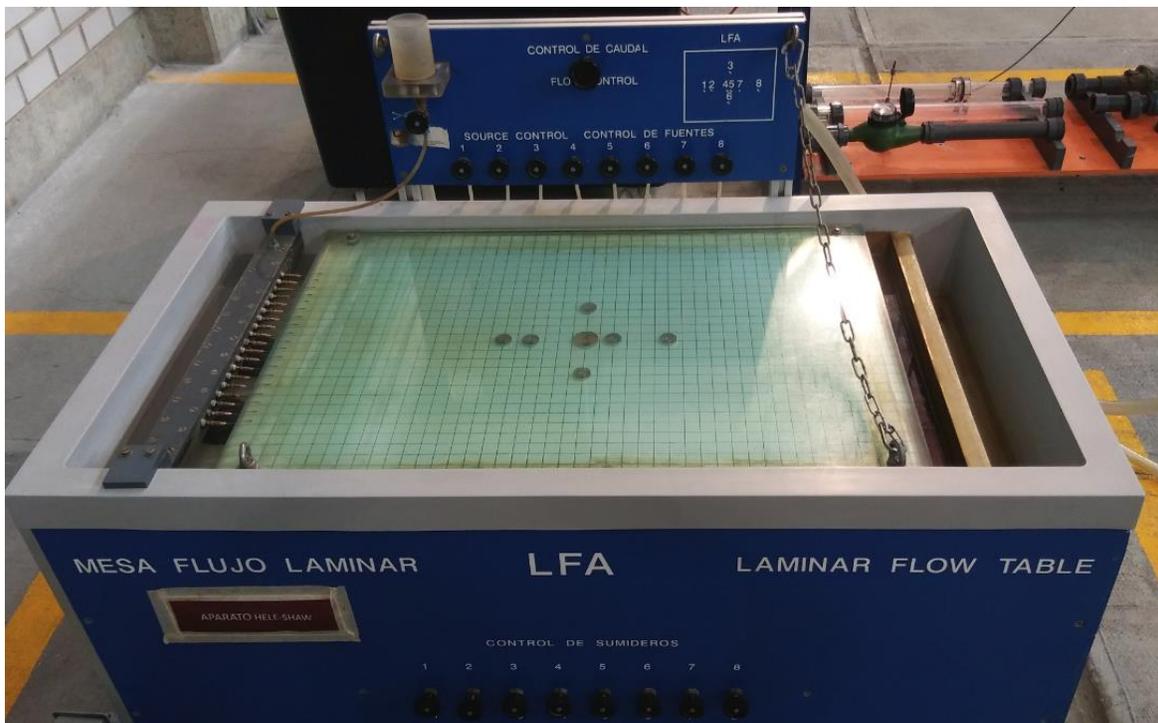


Figura 3.7. Equipo Hele-Shaw. EP, Alejandro Cortés E. 2020.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	31/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

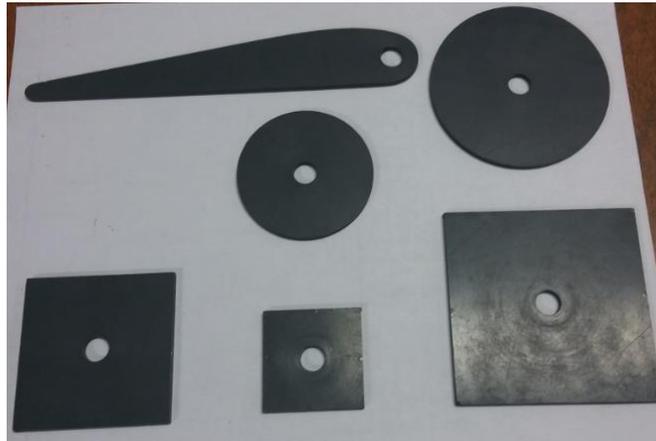


Figura 3.8. Modelos. EP, Alejandro Cortés E. 2020.

5. Desarrollo

Limpiar las superficies interiores de las placas de vidrio usando agua con detergente diluido; solicitar el apoyo del laboratorista para esta acción.

- 1 Colocar la manguera de descarga de agua del equipo en la rejilla amarilla de drenaje del laboratorio, Figura 3.9.



Figura 3.9. Descarga de agua del equipo Hele-Shaw. EP, Alejandro Cortés E. 2020.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	32/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- 2 Abrir la válvula principal de suministro de agua de la red al equipo; girar un cuarto de vuelta, Figura 3.10.



Figura 3.10. Válvula de suministro de agua. EP, Alejandro Cortés E. 2020.

- 3 Abrir la válvula secundaria de control de caudal del depósito de alimentación, Figura 3.11. La válvula se ubica en el panel vertical. Abrir la válvula pausadamente (aproximadamente una vuelta un cuarto) hasta oír un leve ruido en la misma generado por el paso del agua.



Figura 3.11. Válvula secundaria de control de caudal. EP, Alejandro Cortés E. 2020.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	33/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- 4 Esperar a que el agua llene el depósito de alimentación; verificar que el nivel de agua no exceda el nivel de la placa superior de la celda. Cerrar levemente la válvula secundaria de control de caudal en caso de que el agua del depósito rebase la placa superior de la celda.
- 5 Abrir y cerrar secuencialmente las válvulas de control de fuentes (1 a 8) para eliminar burbujas de aire atrapado en los ductos.
- 6 Acercar el sistema de 19 boquillas de inyección de líquido colorante entre las placas de vidrio a la entrada de la celda de Hele-Shaw entre uno o dos cuadros de la entrada de la celda, Figura 3.12.

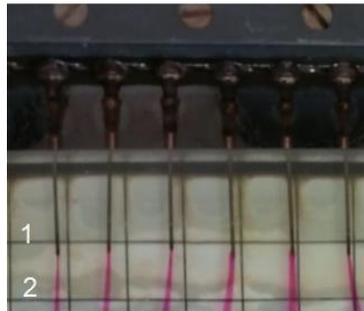


Figura 3.12. Boquillas de inyección de líquido colorante. EP, Alejandro Cortés E. 2020.

- 7 Verificar que la válvula de control de caudal del colorante inicialmente se encuentre cerrada. Agregar agua en el depósito del colorante hasta llenarlo, Figura 3.13.



Figura 3.13. Válvula de control de caudal del colorante. EP, Alejandro Cortés E. 2020.

- 8 Abrir la válvula de control de caudal del depósito de colorante para eliminar burbujas de aire atrapado en las boquillas.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	34/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- 9 Realizar la operación anterior hasta que no quede aire atrapado en las boquillas.
- 10 Cerrar la válvula de control de caudal del colorante dejando un poco de agua en el depósito y a continuación agregar colorante en el mismo.
- 11 Abrir la válvula de control de caudal del colorante hasta observar líneas de flujo en la celda de Hele-Shaw. El grosor de la línea de flujo se regula con esta válvula; el grosor también depende de la concentración del colorante diluido en agua. Se recomienda una línea de flujo delgada pero visible.
- 12 Cerrar la válvula de control de caudal del colorante. Finalmente el equipo está preparado para realizar las diferentes actividades de la práctica.

Actividad 1 - Obtención de la velocidad del flujo en una línea de corriente en tres diferentes tiempos.

- 1 Registre la temperatura ambiente para determinar la viscosidad y densidad del agua.

Tamb = [°C]

- 2 Seleccione una línea de flujo, y señale dos cuadros de la cuadrícula dibujada en la placa inferior de la celda; el primero se encuentra a dos o tres cuadros después de la entrada a la celda, Figura 3.14.

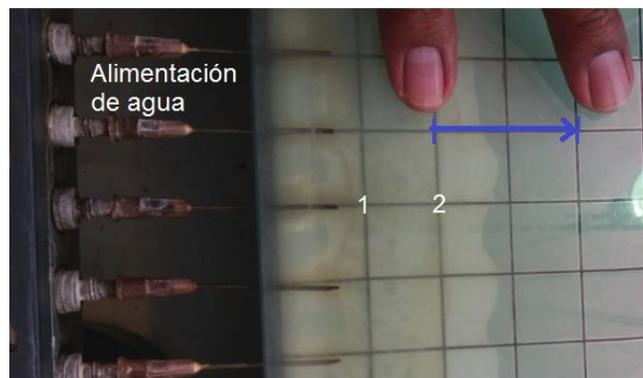


Figura 3.14. Cuadrícula en la placa inferior de la celda. EP, Alejandro Cortés E. 2020.

- 3 Genere un pequeño pulso de colorante para registrar el tiempo que demora en recorrer la distancia de dos cuadros la “partícula” de colorante generado, Figura 3.15.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	35/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

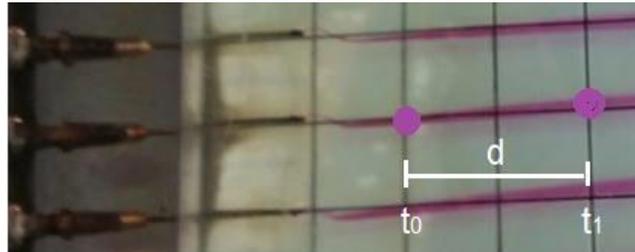


Figura 3.15. Separación entre “partículas” de colorante. EP, Alejandro Cortés E. 2020.

El pulso (acumulación de colorante a manera de “partícula”) se genera con un apretón momentáneo en la manguera que proviene del depósito de colorante y va a las boquillas inyectoras, Figura 3.16.



Figura 3.16. Manguera que proviene del depósito de colorante. EP, Alejandro Cortés E. 2020.

Registre los datos en la Tabla de datos A1.

Línea de flujo	Lectura	t [seg]	d [cm]
1	1		
	2		
	3		
2	4		
3	5		

Tabla 3.1. Tabla de datos A1.

- Para que el equipo simule adecuadamente el flujo potencial, el tiempo registrado se debe ubicar entre 3 y 2 segundos; de preferencia 3 segundos. Si no consigue estos tiempos, cierre poco a poco la válvula y verifique el tiempo de recorrido.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	36/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Actividad 2 – Obtención de la velocidad del flujo en dos líneas de corriente diferentes.

- 1 Seleccione dos líneas de flujo diferentes.
- 2 Realice el mismo procedimiento indicado en la actividad anterior, pero ahora en dos líneas de flujo diferentes y una sola vez para cada línea de flujo.

Actividad 3 - Obtención de la velocidad promedio del flujo a partir del gasto volumétrico.

- 1 Colocar la probeta de plástico graduada en el extremo de la manguera de descarga del equipo para registrar una cierta cantidad de agua y el tiempo que demora, Figura 3.17.



Figura 3.17. Medición del gasto volumétrico. EP, Alejandro Cortés E. 2020.

Actividad 4.- Visualización de flujos potenciales bidimensionales elementales y compuestos.

1. Levantar con precaución la placa de vidrio superior de la celda. Viendo de frente el equipo, levante el extremo de la placa, sujetando la argolla con la mano izquierda y la

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	37/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

cadena con la mano derecha, apoyando el otro extremo de la placa en el equipo, Figura 3.18.



Figura 3.18. Placa superior. EP, Alejandro Cortés E. 2020.

2. Retirar las burbujas de la placa inferior.
3. Si va visualizar fuentes, debe abrir primero la válvula de la fuente seleccionada para retirar posibles burbujas en el conducto; cerrar la válvula a continuación.
4. Bajar la placa con un descenso en diagonal. Comience el descenso de la placa lentamente iniciando en la esquina superior izquierda. Si se forman burbujas entre las placas, detenga el descenso y levante ligeramente la placa hasta eliminar las burbujas, continúe el descenso de la placa hasta concluir. Si persisten las burbujas, intente el descenso de la placa con un movimiento oscilante de arriba abajo hasta extinguir las burbujas.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	38/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

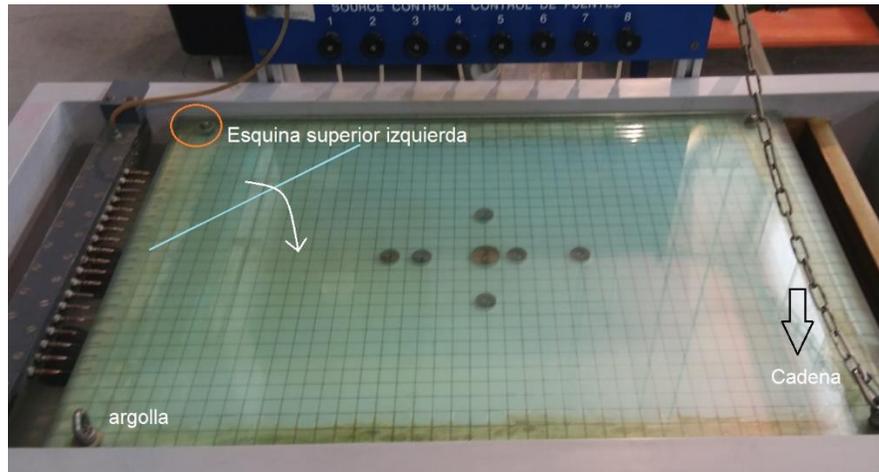


Figura 3.19. Descenso en diagonal de la placa superior. EP, Alejandro Cortés E. 2020.

5. Visualizar los siguientes flujos potenciales bidimensionales.
 - a. Flujo uniforme (flujo potencial elemental).
 - b. Flujo uniforme + fuente.
 - c. Flujo uniforme + sumidero.
 - d. Opcional. Flujo uniforme + fuente + sumidero (flujo que pasa por un cuerpo de Rankine)

Actividad 5- Visualización de flujo sobre secciones de modelos.

Observar el flujo que se genera alrededor de secciones de modelos sumergidos en la corriente uniforme.

1. Realizar el paso 1 de la actividad 4.
2. Colocar el centro del orificio del modelo en la intersección de la línea horizontal 12 y línea vertical 5. Tratando que la línea de flujo de la boquilla 7 forme la línea de estancamiento y de esta forma observar mejor la simetría del flujo. El origen de las líneas se ubica en la esquina superior izquierda de la cuadrícula de la placa inferior de la celda.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	39/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 3.20. Líneas de flujo. EP, Alejandro Cortés E. 2020.

3. Una vez ubicado el modelo en la placa inferior, presionar con dos dedos el modelo y frotarlo pausadamente contra la placa para lograr la adherencia.
4. Aplicar agua en la parte superior del modelo para evitar la formación de burbujas al momento en que la placa superior toque el modelo.
5. Realizar el paso 4 de la actividad 4.
6. Visualizar el flujo sobre la siguientes secciones de modelos:
 - a. Circunferencia de 6 cm de diámetro
 - b. Cuadrado de 8 cm de lado. Con un lado perpendicular al flujo.
 - c. Perfil aerodinámico sin ángulo de ataque.
 - d. Perfil aerodinámico con ángulo de ataque.

6. Resultados

1. Calcular la velocidad del flujo a partir del desplazamiento una acumulación de colorante en una línea de corriente.

$$d = 4\text{cm}$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	40/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$\text{Velocidad} = d/t \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Ecu. 3.14})$$

Línea de flujo	Lectura	v [m/s]
1	1	
	2	
	3	
2	4	
3	5	

Tabla 3.2. Resultados actividad 1 y 2.

$$V_{\text{promedio}} = \quad [\text{m/s}]$$

Calcular la velocidad promedio del flujo a partir de la medición del gasto volumétrico.

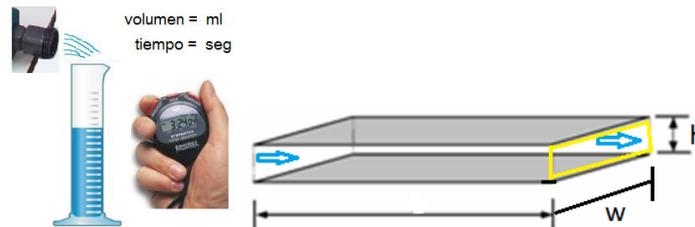


Figura 3.21. Dimensiones de la celda.

$$W = 60 \text{ cm.}, h = 2.5 \text{ mm}$$

$$A = wh \quad (\text{Ecu. 3.15})$$

$$\dot{V} = \frac{V}{t} \quad (\text{Ecu. 3.16})$$

$$V_{\text{prom}} = \frac{\dot{V}}{A} \quad (\text{Ecu. 3.17})$$

- 2 Calcular el número de Reynolds entre placas con la mejor estimación de la velocidad promedio del flujo. Indicar si el flujo es laminar. El número crítico es $Re = 2000$, valores menores es flujo laminar. La longitud característica de la celda es el diámetro hidráulico.

$$D_h = 2h \quad (\text{Ecu. 3.18})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	41/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$Re = \frac{\rho V_{prom} D_h}{\mu} \quad (\text{Ecu. 3.19})$$

- 3 Describir los 8 patrones de flujo potencial observados con base a las líneas de flujo. La descripción debe considerar la simetría en el flujo, puntos de estancamiento, descripción cualitativa de la velocidad y presión en base a la separación las líneas de flujo generada por la forma del modelo, región de gradientes de presión favorable y adverso, regiones de máxima y mínima velocidad.

7. Cuestionario

Responder a las siguientes preguntas con la información obtenida de la práctica, argumentando o justificando sus respuestas.

1. ¿Es posible verificar la condición de flujo estacionario?
2. ¿Es posible verifica la condición de flujo uniforme que se aproxima (corriente libre de obstáculos)?
3. Al colocar la sección circular o la cuadrada, ¿Por qué tiende a acumularse el colorante en la parte frontal o posterior del modelo?
4. A partir del patrón de flujo, interpretar la influencia del ángulo de ataque para el caso del perfil aerodinámico.
5. ¿Podría considerar la visualización de flujo en la celda de Hele-Shaw como una herramienta importante?
6. Si la viscosidad del agua en el equipo de Hele-Shaw es relativamente alta, ¿Por qué podemos obtener patrones de flujo similares al de un fluido ideal?

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

1. Acheson, D. (1990). Elementary Fluid Dynamics. USA: Oxford University Press.
2. White, F. (1991). Viscous Fluid Flow. USA: McGraw-Hill.
3. Edibon. Mesa de análisis de flujo laminar LFA, manual de prácticas. España. Edibon S.A.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	42/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Fuentes electrónicas

4. Small Re flows, $Re \ll 1$. Fecha de consulta 16/02/2020.
<http://www.lmm.jussieu.fr/~lagree/COURS/M2MHP/petitRe.pdf>.
5. Extensions of the Hele-Shaw Analogy. Fecha de consulta 16/02/2020.
<https://people.eng.unimelb.edu.au/imarusic/proceedings/2/Preston.pdf>
6. Equipo de visualización y análisis de flujo laminar. Fecha de consulta: 16/02/2020.
<https://www.edibon.com/es/files/equipment/LFA/catalog>
7. Viscosidad dinámica del agua líquida a varias temperaturas. Fecha de consulta: 16/02/2020.
http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/viscoh2o.pdf
8. Densidad del agua líquida entre 0 °C y 100 °C. Fecha de consulta: 16/02/2020
http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/denh2o.pdf
6. Flujos con efectos de viscosidad dominantes. Fecha de consulta 27/02/2020.
<https://www2.uned.es/ing-fluidos/IntroMF/node69.html#incomp-3>

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	43/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 4

Túnel De Humo



Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir **experimentación** adecuada; analizar e interpretar **datos** y utilizar el **juicio ingenieril** para establecer conclusiones.

AE7. **Trabajar efectivamente en equipos** que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	44/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo.	Riesgo asociado.
Humo	Intoxicación por inhalación prolongada del humo.
Lámpara	Riesgo de quemadura. La fuente de iluminación alcanza temperaturas muy altas, no tocar la caja que protege a la fuente.
Placa de acrílico	Fractura de la tapa de acrílico del túnel de humo al cambiar los modelos, si se deja caer

2. Objetivos

El alumno:

- ✓ Utilizará el túnel de humo para realizar visualizaciones de los patrones de flujo generados alrededor de diferentes modelos y realizará el análisis de sus características cualitativas.
- ✓ Visualizará y describirá el patrón de flujo externo generado por modelos en el túnel de humo, aplicando la técnica de visualización por inyección de humo.
- ✓ Identificará las diferencias del patrón de flujo de un fluido real del patrón de flujo de un fluido ideal en el caso de flujos externos.

3. Concepto básicos y definiciones

Existen diferentes técnicas para la visualización de flujos que permiten estudiar de forma cualitativa su comportamiento y características. Para la visualización de flujos en gases, existen técnicas que utilizan las variaciones de índice de refracción del aire, como las técnicas Shadowgraph, Schlieren a y la de Interferometría. Otras se basan en agregar trazadores al flujo. Estos trazadores consisten en partículas con un diámetro muy pequeño, regularmente oscila de entre 1 μm a 5 μm , generadas a partir de la combustión de material como el incienso, tabaco o viruta de madera, o atomizar fluidos como aceites minerales.

Los trazadores tienen que cumplir varios requerimientos, los más importantes son: no ser tóxico, tener flotabilidad neutra, y dispersar eficientemente la luz.

Todos los humos son tóxicos en algún grado, actualmente se pueden generar partículas de humo de baja toxicidad, y la tendencia actual es sustituir el humo por la atomización de fluidos inertes. Aun así, es recomendable evitar inhalar el humo por periodos largos.

En lo que respecta a la flotabilidad neutra, se refiere a que la densidad de las partículas a utilizar tiene que ser similar a la densidad del fluido que se quiere estudiar su comportamiento. Cumplir

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	45/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

con lo anterior es muy complicado, por lo que al utilizar diferentes materiales y/o fluidos para generar las partículas de visualización debemos garantizar que éstas se desplacen con el flujo, así como sus cambios de dirección y velocidad. Lo anterior estima calculando el tiempo de respuesta de una partícula, τ_p

$$\tau_p = d_p^2 \frac{\rho_p}{18 \mu} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

donde ρ_p es la densidad de la partícula, d_p es el diámetro de la partícula y μ es la viscosidad dinámica del fluido. Entre menor sea τ_p , mejor será la respuesta de las partículas a desplazarse con el flujo. Esta ecuación fue desarrollada considerando flujos de baja velocidad y partículas esféricas.

Referente a la visibilidad de las partículas, en los métodos de visualización se utiliza una fuente de luz que sirve para resaltar a las partículas del fondo de la imagen. Entre mejor sea la dispersión de luz, menor será la potencia de la fuente de luz a utilizar. Las fuentes de luz más utilizadas por su alta intensidad se encuentran las lámparas de mercurio y fuentes de luz láser, las últimas de un precio más elevado. Generalmente, la fuente de luz se acopla a una óptica especial que genera un plano de iluminación uniforme.

Desde el punto de vista de la seguridad se recomienda usar vapor o niebla, que humo generado en la combustión. La mayoría de los generadores de humo comerciales se basan en la evaporación de hidrocarburos. El Queroseno es la mejor elección desde el punto de vista del tamaño de la partícula, dispersión de la luz, temperatura de vaporización y flamabilidad. Este material es el utilizado por el generador de humo para realizar esta práctica, pero por su dificultad de adquisición se cambió a petróleo diáfano.

Flujo externo

El flujo de fluidos sobre cuerpos sumergidos en un fluido se caracteriza por la generación de una capa límite que crece a medida que se desplaza sobre el cuerpo, donde los efectos de la viscosidad son importantes, como se ejemplifica en la Fig. 4.1. Ésta se encuentra rodeada por una región de flujo exterior en la que existen pequeños gradientes de velocidad normales al flujo, y que se comporta como inviscido (no viscoso), no obstante que la viscosidad no es cero.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	46/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

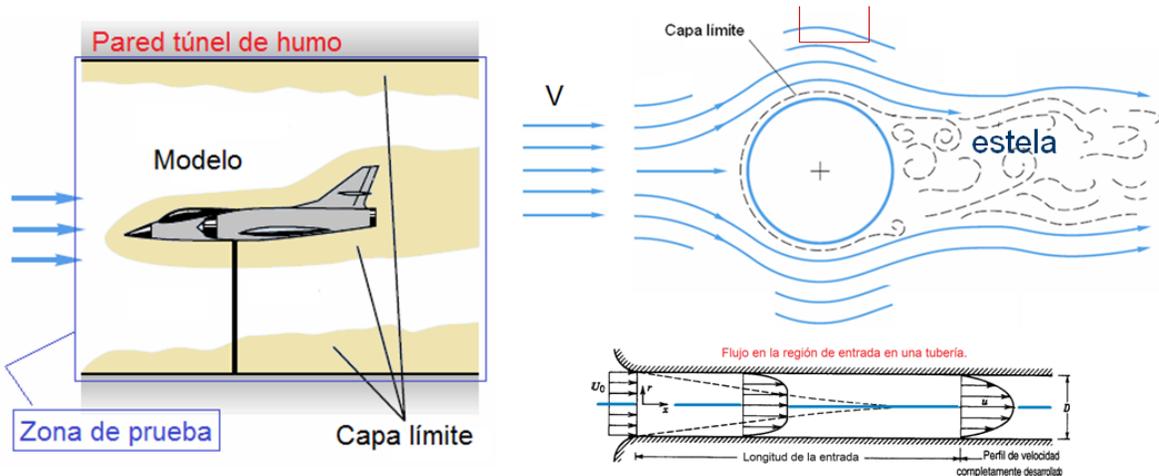


Figura. 4.1. Estudio del flujo externo sobre cuerpos.

Flujo ideal vs flujo real

La dinámica de fluidos se encarga de estudiar, entre otras cosas, el movimiento de un fluido alrededor de un cuerpo, y es una de las áreas más complejas de la mecánica. En estudios numéricos y analíticos es común utilizar modelos simplificados que aproximan en buena medida el comportamiento de flujos reales. De entre las simplificaciones más utilizadas se encuentran, considerar al flujo como:

- No viscoso. Todos los fluidos reales tienen viscosidad. Sin embargo, existen fluidos cuyo comportamiento se puede aproximar a un fluido ideal. Por otro lado, en fluidos en movimiento los efectos de la viscosidad son importantes en una pequeña capa conocida como capa límite, que se forma cuando un cuerpo y un fluido en movimiento interactúan. Lejos de esta capa, en la corriente libre, los efectos de la viscosidad pueden despreciarse.
- Incompresible. En palabras sencillas, la densidad del fluido se mantiene constante. Esta simplificación dependerá del tipo de fluido y de la velocidad a la que éste se desplace. En términos prácticos se considera a los líquidos como incompresibles, ya que se tienen que aplicar presiones muy elevadas para poder comprimir un fluido, se tienen que aplicar 500 *kPa* para incrementar la densidad del agua un 0.024 %. Mientras que los gases se pueden comprimir con relativa facilidad, con 500 *kPa* el incremento de la densidad del aire es del 250%. En la dinámica de los gases, no todos los flujos compresibles son gases ni todos los flujos de gases son compresibles. El número de *Mach* es el parámetro que indica la importancia de la compresibilidad de un gas en movimiento.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	47/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

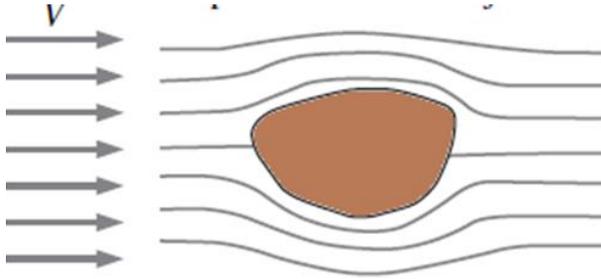


Figura. 4.2. Izquierda: aproximación de un flujo ideal. Derecha: estudio experimental de un flujo real.

4. Equipo y Material

- Túnel de humo
- Modelos para visualización
- Pantalla para el control de la iluminación

5. Desarrollo

Preparación del equipo:

Solicitar a los laboratoristas que preparen el túnel de humo, al menos diez minutos antes de iniciar las visualizaciones.

Consideraciones previas a realizar las actividades:

- Cerciorarse que la cantidad de humo suministrado sea el adecuado, así como el desplazamiento del peine de inyección.
- Verificar que encienda la fuente de iluminación.
- Verificar el funcionamiento del ventilador que activa el movimiento del flujo al interior del túnel de humo.
- Verificar la colocación de la placa de acrílico que sirve como ventana de visualización, limpiar de ser necesario.
- Verificar el estado de la tuerca de sujeción de los modelos; ésta se encuentra en la parte posterior del túnel de humo, a la altura de la pantalla de visualización.
- Cualquier anomalía en el funcionamiento del equipo reportarla a los laboratoristas.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	48/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Los modelos por estudiar:

- Placa circular, con las posiciones perpendicular y paralela al flujo
- Cilindro circular (flujo bidimensional) *
- Esfera lisa
- Esfera rugosa
- Perfil de ala NACA 2412, a diferentes ángulos de ataque *
- Placa curva (ala de longitud finita)
- Modelos de autos a escala: auto deportivo y camioneta
- Placa con orificio circular (flujo interno)

Los modelos marcados con el símbolo * fueron estudiados en la Práctica 3 “Hele Shaw”.

Visualización de flujos

Generación de los Flujos.

1. Colocar la pantalla de protección alrededor del túnel de humo, protegiendo la zona de visualización de reflejos de luz.
2. Bloquear la salida del humo con la pinza que se encuentra del lado derecho del túnel de humo.
3. Sujetar firmemente el modelo a estudiar en el túnel de humo con la ayuda de la tuerca de sujeción, y colocar la pantalla de visualización.
4. Abrir poco a poco la pinza hasta suministrar la cantidad de humo deseado.
5. Encender la fuente de iluminación.
6. Encender el ventilador y realizar las visualizaciones necesarias a diferentes velocidades.
7. El profesor describirá el comportamiento de los flujos generados.
8. El alumno realizará esquemas de los patrones de flujo en cada modelo y a diferentes velocidades. Podrá auxiliarse de fotografías y videos adquiridos con dispositivos digitales propios.
9. Al finalizar las visualizaciones se disminuye a cero la velocidad del ventilador, se apaga la fuente de luz y se bloquea el paso del humo. Posteriormente se coloca el siguiente modelo a estudiar.
10. El proceso se repite para cada uno de los modelos.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	49/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Apagado del equipo

Al finalizar las actividades de visualización, se deberá solicitar la ayuda de los laboratoristas para la correcta desactivación de los sistemas del túnel de humo.

6. Resultados

Apagado del equipo

- Adjuntar los esquemas realizados en la práctica para cada modelo utilizado, resaltando las estructuras presentes en los patrones de flujo observados.
- Realizar un análisis y descripción de la información gráfica.
- Presentar la información en forma tabular como se ejemplifica en la Tabla1.

Esquema del patrón de flujo, túnel de humo	Descripción y análisis del esquema.

Tabla 4.1. Esquemas de los patrones de flujo y su descripción

Comparación de resultados Hele Shaw

- Para los casos que también fueron estudiados en la Práctica 3 “Hele Shaw”. Comparar los patrones de flujo generados por ambas técnicas de visualización.
- En ambos casos realizar un análisis y descripción de cada

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	50/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Imagen túnel de humo	Imagen Hele Shaw	Descripción y análisis de las técnicas de visualización.

Tabla 4.2. Comparación de los patrones de flujo generados con las técnicas de visualización en túnel de humo y Hele-Shaw

7. Cuestionario

De acuerdo con los resultados y la experiencia obtenida en el desarrollo de los experimentos, responda las siguientes preguntas:

1. Desde tu punto de vista, ¿Cuáles son las ventajas y desventajas del túnel de humo para la visualización de los patrones de flujo?
2. A grandes rasgos, ¿cuáles son las diferencias entre las visualizaciones realizadas en el túnel de humo y en el Hele Shaw?
3. Con base a la explicación que dio el profesor durante la práctica, conteste:
 - a) ¿Qué es una estela en Mecánica de fluidos?
 - b) ¿Cuál es la diferencia entre el flujo en el carro deportivo y el flujo en la camioneta? ¿A qué se debe esa diferencia en el flujo y cuál sería el efecto que produciría?
 - c) ¿Cómo es el flujo sobre el perfil de ala cuándo no hay ángulo de ataque? ¿Qué cambia cuando hay ángulo de ataque? ¿Qué efecto produciría?
 - d) ¿De qué manera el patrón de flujo observado en el perfil NACA 2412 ayuda a explicar la sustentación?
 - e) ¿Qué se puede decir del flujo alrededor de un cilindro?
 - f) ¿En qué difiere el flujo alrededor de la esfera lisa y la esfera rugosa?

8. Conclusiones

9. Bibliografía

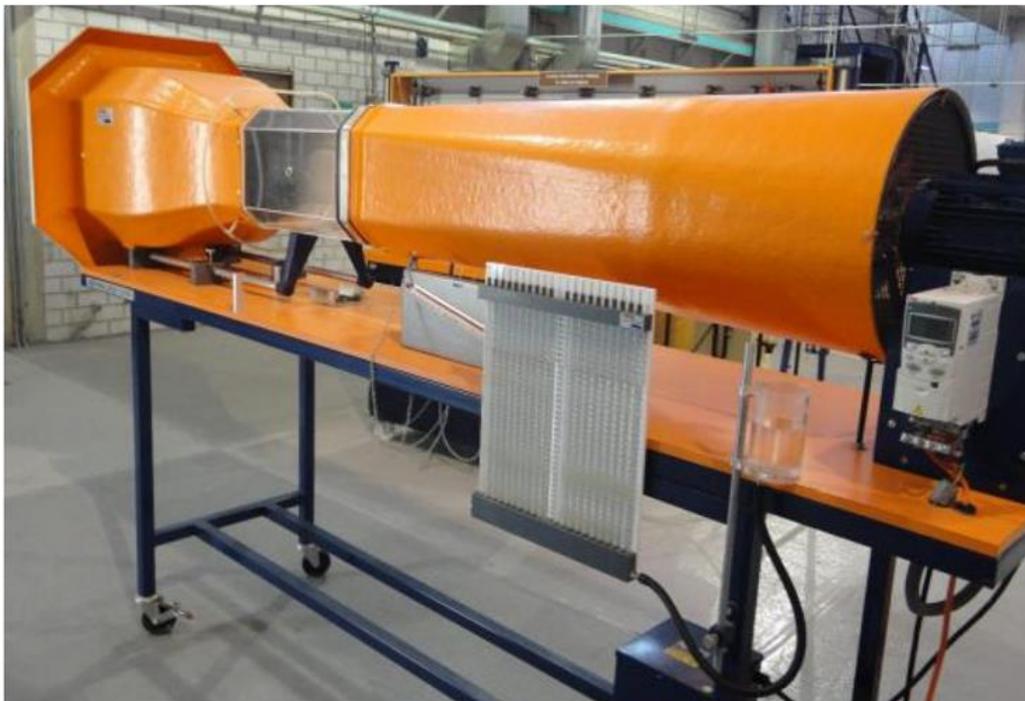
Fuentes básicas

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	51/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- Wolfgang, M. (1987). *Flow visualization*. 2a edición. Ed. Academic press, USA.
- Raffel, M., Willert, C.E., Wereley, S., Kompenhans, J. (2007). *Particle Image Velocimetry: A practical guide*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-540-72308-0.
- Granger, R. A. (1995). *Fluid Mechanics*. Dover Publications Inc. New York.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	52/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 5 Arrastre



Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir **experimentación** adecuada; analizar e interpretar **datos** y utilizar el **juicio ingenieril** para establecer conclusiones.

AE7. **Trabajar efectivamente en equipos** que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	53/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo.	Riesgo asociado.
Túnel de viento	No sujetar bien los objetos puede provocar que se suelten y choquen con los álabes.
Álabes del motor	Objetos colgantes como corbata, collares, etcétera o el cabello suelto se puede enredar en los álabes.
Modelo	Algunos modelos pueden terminar en punta.
Vernier	Tiene terminaciones en punta.

2. Objetivos

- ✓ Determinar experimentalmente la fuerza de arrastre en diferentes modelos en el túnel de viento del laboratorio.
- ✓ Calcular el coeficiente de arrastre de los modelos.
- ✓ Elaborar las gráficas de fuerza de arrastre contra velocidad y coeficiente de arrastre contra número de Reynolds.

3. Concepto básicos y definiciones

La fuerza de arrastre (o simplemente arrastre) es la resistencia al movimiento de un cuerpo a través de un fluido. Esta fuerza mecánica se presenta cuando existe un movimiento relativo entre un cuerpo y el flujo de un fluido (si no hay movimiento, no hay arrastre) y es una magnitud vectorial cuya dirección es opuesta al movimiento del cuerpo. La fuerza de arrastre por:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot C_D \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Donde F_D es la fuerza de arrastre, ρ es la densidad del fluido, V es la velocidad del flujo, A es un área de referencia y C_D es el coeficiente de arrastre. Se puede ver que la fuerza de arrastre es directamente proporcional a la densidad (razón por la cual los aviones comerciales vuelan a gran altitud), al cuadrado de la velocidad (por lo que se requiere un incremento muy grande en la potencia para aumentar la velocidad de un objeto en un flujo), al área (que puede ser el área frontal, el área de planta o el área mojada, de acuerdo a la aplicación), así como a un coeficiente de arrastre que engloba otros factores (forma, orientación del cuerpo, rugosidad, etcétera), para hacer más práctico su estudio, y que es el que se suele utilizar.

Esta fuerza se origina por la interacción entre el sólido y el flujo y es la componente de la fuerza de presión y de corte resultante en dirección al flujo. Así pues, podemos dividir a la fuerza y al coeficiente de arrastre en dos contribuciones, el **arrastre viscoso o por fricción** (*skin or friction drag*) debido a los esfuerzos cortantes en la pared que se originan por la viscosidad del fluido, y el

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	54/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

arrastre de forma o de presión (*form or pressure drag*), debida a los gradientes de presión que se originan por los factores geométricos.

$$F_D = F_{D,fricción} + F_{D,presión} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$C_D = C_{D,fricción} + C_{D,presión} \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Aunque puede haber otras contribuciones al arrastre como el arrastre inducido en las puntas de las alas de un avión o cuando se tiene flujo supersónico, estas quedan fuera del alcance de esta práctica.

La contribución de cada una depende de la forma del cuerpo, siendo el espesor el factor más importante; cuando se grafica del porcentaje de fricción viscosa y de presión con respecto a la relación del espesor a la cuerda del cuerpo, t/c , figura 5.1, se observa que a un espesor de cero, placa plana, el arrastre viscoso es solamente viscoso y no hay arrastre por presión. Este último se incrementa conforme aumenta el espesor.

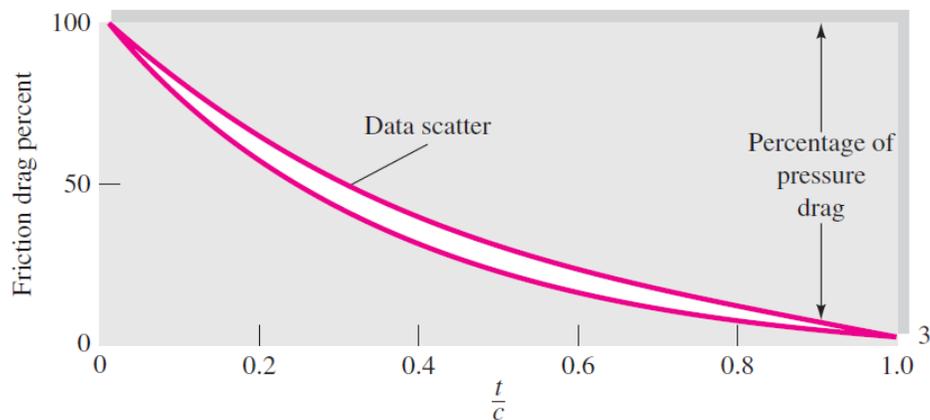


Figura 5.1. Porcentaje de arrastre viscosa en función del espesor del objeto.
Tomada de White, F. (2011) *Fluid Mechanics* (7th Ed.). New York: McGraw-Hill

Los efectos viscosos se dan en una región muy delgada cerca de la pared que se conoce como **capa límite**, cuyo espesor se va incrementando conforme el flujo recorre al cuerpo. Para un flujo ideal, el cuerpo es rodeado totalmente por el flujo y esta capa límite nunca se separa del mismo, Figura 5.2a. Sin embargo, para un flujo real esto no es así pues en la parte trasera del cuerpo la capa límite se enfrenta a un gradiente de presión adverso que provoca que se separe del cuerpo y se forme una estela y una zona de baja presión, Figura 5.2b.



**Manual de prácticas del
Laboratorio de Mecánica de
Fluidos II**

Código:	MADO-57
Versión:	04
Página	55/151
Sección ISO	8.3
Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021

Facultad de Ingeniería

Área/Departamento:
Laboratorio de Termofluidos

La impresión de este documento es una copia no controlada

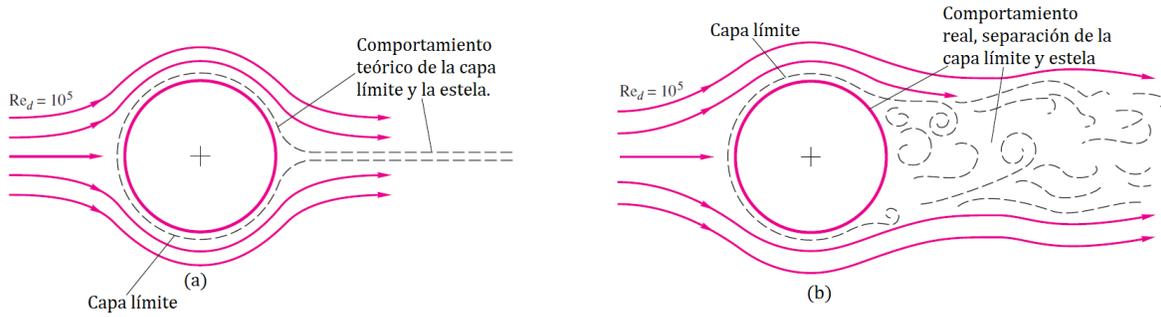


Figura 5.2. a) Comportamiento teórico de la capa límite y b) Comportamiento real. Modificada de White, F. (2011) *Fluid Mechanics* (7th Ed.). New York: McGraw-Hill

Esto provoca un gradiente entre la alta presión que se tiene en el punto de estancamiento frente al cuerpo y la baja presión en la parte posterior del cuerpo, siendo esta el origen del arrastre de forma.

El número de Reynolds, es la relación de las fuerzas inerciales a las viscosas

$$Re_D = \frac{\rho \cdot L_C \cdot V_C}{\mu_{aire}} \quad (\text{Ec. 5.4})$$

Donde ρ es la densidad del fluido, L_C es una longitud característica, V_C es una velocidad característica y μ es la viscosidad del fluido. El espesor y el punto de separación de la capa límite depende, además de la forma, de este número de Reynolds y dentro de esta capa límite se pueden presentar 3 regiones: la capa límite laminar, en transición y turbulenta, Figura 5.3.

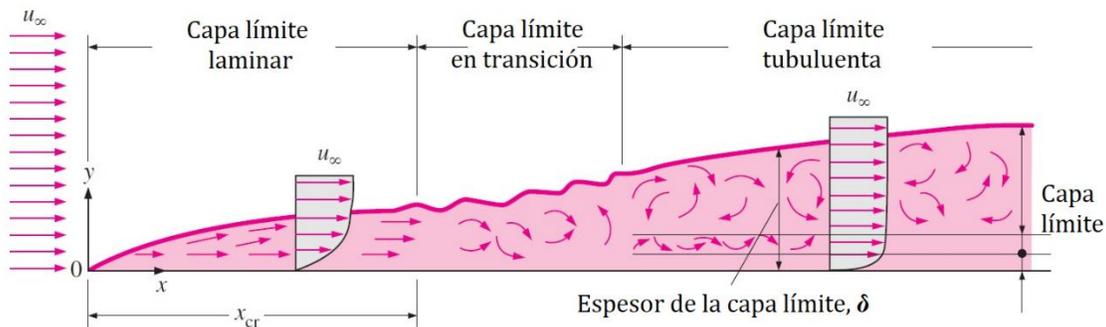


Figura 5.3. a) Comportamiento teórico de la capa límite y b) Comportamiento real. Modificada de Çengel, Y. (2011) *Heat Transfer* (5th Ed.). EUA: McGraw-Hill

La capa límite laminar es muy vulnerable a los gradientes adversos de presión, provocando una temprana separación, caso contrario a la capa límite turbulenta que tiende a resistir más estos gradientes adversos. Esto da como resultado que, si se desarrolla una capa límite turbulenta, esta

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	56/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

tienda a permanecer más tiempo sin separarse, disminuyendo la zona de baja presión y con ello el coeficiente de arrastre, figura 5.4.

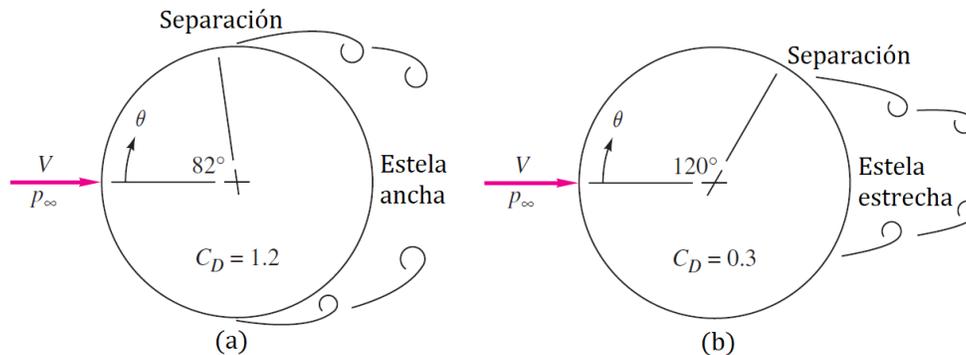


Figura 5.4. a) Pronta separación debido a capa límite laminar y b) Separación tardía debido al desarrollo de una capa límite turbulenta. Modificada de White, F. (2011) *Fluid Mechanics* (7th Ed.). New York: McGraw-Hill

En ocasiones, se provoca de forma intencional el desarrollo de una capa límite turbulenta para disminuir el arrastre mediante unas estructuras conocidas como **generadores de vórtices** (*vortex generators*). Ejemplos de estas estructuras son las superficies como las de las pelotas de golf, o las usadas en carros y aviones, figura 5.5.



Figura 5.5. Generadores de vórtices en el ala de un avión. Recuperada de <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2017/august/flight-training-magazine/vortex-generators> el 09/09/2020.

Para el estudio del arrastre se utilizan una gran cantidad de instrumentos y pruebas, siendo los túneles de viento uno de ellos y el que se usará en esta práctica. Un túnel de viento es un instrumento aerodinámico para estudiar la interacción entre un cuerpo y un flujo en el que está inmerso. Son muy utilizados cuando las técnicas teóricas o computacionales fallan por su complejidad o a la falta de recursos computacionales adecuados volviéndose el enfoque más

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	57/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

rentable, al considerar también las pruebas a gran escala (Cattafesta et al, 2017). La mayoría de los túneles de viento usan modelos a escala, debido a ello, se deben de cumplir con los criterios de semejanza geométrica, cinemática y dinámica.

Para ello se debe cumplir que los números adimensionales, además de los parámetros geométricos sean iguales, siendo los más importantes en el túnel de viento los números de Reynolds, de Mach y de Froude (Barlow et al, 1999). Este último sólo es importante en contadas ocasiones y el número de Mach cuando se tienen velocidades altas, por lo que para la práctica actual sólo se considera el número de Reynolds.

De acuerdo con Barlow et al (1999), los túneles de viento pueden ser clasificados de diversas formas; existen dos tipos principales: de circuito abierto y de circuito cerrado, figura 5.6. En los primeros el aire es empujado, por uno o varios ventiladores, en línea recta desde la entrada, a una contracción, a la zona de pruebas y a la salida del túnel. Por otro lado, en los de circuito cerrado el aire recircula de forma continua con muy poco o nulo intercambio de aire con el exterior.



Figura 5.6. Túneles de viento de circuito cerrado (izquierda) y de circuito abierto (derecha).
Recuperadas de <https://www.aerolab.com/products/open-circuit-wind-tunnels/> y <https://www.aerolab.com/products/closed-circuit-wind-tunnels/> el 09/09/2020.

También pueden ser clasificados de acuerdo con la velocidad del flujo como subsónicos o de baja velocidad, y de alta velocidad transónicos y supersónicos. Además, pueden variar de pequeños (con secciones de prueba de 1 metros aproximadamente) a grandes (capaces de contener automóviles o camiones a escala 1:1 en la sección de prueba). Pueden ser de sección de prueba abierta o cerrada. De acuerdo con la forma de la sección de prueba; circular, rectangular, hexagonal, etcétera. Es común clasificarlos también de acuerdo con su aplicación: Estabilidad, *Free-flight*, de propulsión, *icing*, de baja turbulencia, bidimensionales, de humo, etcétera.

En el caso del laboratorio, se utilizará un túnel de viento subsónico de circuito abierto con sección de prueba cerrada con ventilador de tiro inducido, figura 5.7.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	58/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 5.7. Túnel de viento del laboratorio con que se harán las pruebas.

Se pueden distinguir como partes principales, una entrada cónica, un arreglo de panel de abeja y una contracción (tobera) que tienen como objetivo reducir la turbulencia de entrada y tener un flujo desarrollado y lo más uniforme posible, la zona de pruebas, un difusor para reducir la velocidad del flujo lo más rápidamente posible para reducir las pérdidas de energía, y el ventilador que induce el flujo de aire a través del túnel.

4. Equipo y Material

- Túnel de viento.
- Modelos de arrastre.
- Anemómetro hilo caliente o Tubo de Prandtl.
- Calibrador Vernier.
- Flexómetro.



Figura 5.8. Modelos de arrastre.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	59/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

5. Desarrollo

ACTIVIDAD. Fuerza de arrastre en sólidos de revolución.

Medir la fuerza de arrastre en 5 diferentes modelos con la ayuda del túnel de viento y la balanza montada en el mismo para calcular el coeficiente de arrastre. Se sigue el siguiente procedimiento:

1. Medir el diámetro de cada uno de los modelos que se emplearán en el experimento usando el Vernier y anotarlo. Con el modelo de la gota se deberá medir, además el largo y demás dimensiones necesarias para obtener el área de planta.
2. Abrir el túnel de viento para montar uno de los perfiles suministrados sobre la báscula bidimensional, es muy importante sujetarlos mediante el tornillo de mariposa ya que si estuviera suelto puede dañar los álabes del ventilador.
3. Ajustar a 0 la componente de báscula bidimensional que corresponde a la fuerza de arrastre, el ajuste tendrá lugar cada vez que se cambie el perfil empleado.
4. Cerrar la zona de pruebas del túnel de viento y sellar con las placas suministradas (y el *maskin tape*, de ser necesario) para evitar la succión del túnel de viento y evitar la formación de corrientes no deseadas, también asegurar por medio del tornillo en los rieles para evitar que se abra el túnel de viento cuando esté en funcionamiento.
5. Se hace funcionar el Túnel de Viento encendiendo el motor del ventilador del túnel, mediante la consola de control (variador de velocidad por frecuencia), se recomienda utilizar las frecuencias sugeridas en la hoja pegada cerca del variador de frecuencia, sin embargo, el profesor es libre de elegir los intervalos de esta.
6. Medir, con la ayuda de alguna de las sondas de velocidad, la velocidad del flujo, abriendo uno de los orificios laterales del túnel de viento para ello y cerrándolo antes de medir la fuerza de arrastre; anotar la frecuencia del motor y la velocidad del flujo.
7. Cuando el aire comience a moverse las fuerzas de arrastre actuará sobre el perfil, desequilibrando la balanza de la báscula, por medio de las pesas debe volver a equilibrar la balanza y anotar el valor de la fuerza de arrastre.
8. Variar la frecuencia del motor, volver a medir la velocidad del flujo y a equilibrar la balanza para obtener la nueva fuerza de arrastre.
9. Continuar variando la frecuencia del motor hasta llegar al valor final sugerido (40 Hz) o al valor que se haya establecido, en cada evento anotar el valor de la fuerza de arrastre y la velocidad del flujo.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	60/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

10. Apagar el motor del túnel de viento para retirar el modelo.
11. Repetir los pasos 2 al 10 (excepto el 6) con cada uno de los otros modelos. Usar las mismas frecuencias (mismas velocidades) que se utilizaron con el primer modelo.
12. Desmontar el modelo que se encuentre puesto, cerrar el túnel, apagar el motor, desconectar el túnel de viento y entregar el material.
13. Medir la presión atmosférica y la temperatura ambiente con el barómetro y el termómetro del laboratorio.

Se llenará las siguientes tablas de DATOS EXPERIMENTALES.

FRECUENCIA f (Hz)	VELOCIDAD V (m/s)	FUERZA DE ARRASTRE F_D (N)				
		ESFERA	SEMIESFERA CONVEXA	SEMIESFERA CONCAVA	DISCO	GOTA

Tabla 5.1

	GOTA	ESFERA	SEMIESFERA CONVEXA	SEMIESFERA CONCAVA	DISCO
DIÁMETRO D (cm)					
CUERDA c (cm)					

Tabla 5.2

$$P_{amb} = \text{_____ cm}_{\text{HG}}$$

$$T_{amb} = \text{_____ } ^{\circ}\text{C}$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	61/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

6. Resultados

Se llenará la siguiente tabla de resultados.

	DISCO	ESFERA	SEMIESFERA CÓNCAVA	SEMIESFERA CONVEXA	GOTA	
Re	C_D	C_D	C_D	C_D	Re	C_D

Tabla 5.3

Se elaborarán las gráficas de fuerza de arrastre contra velocidad y coeficiente de arrastre contra número de Reynolds (Figura 5.9). Los resultados de todos los modelos deben ir en la misma gráfica.

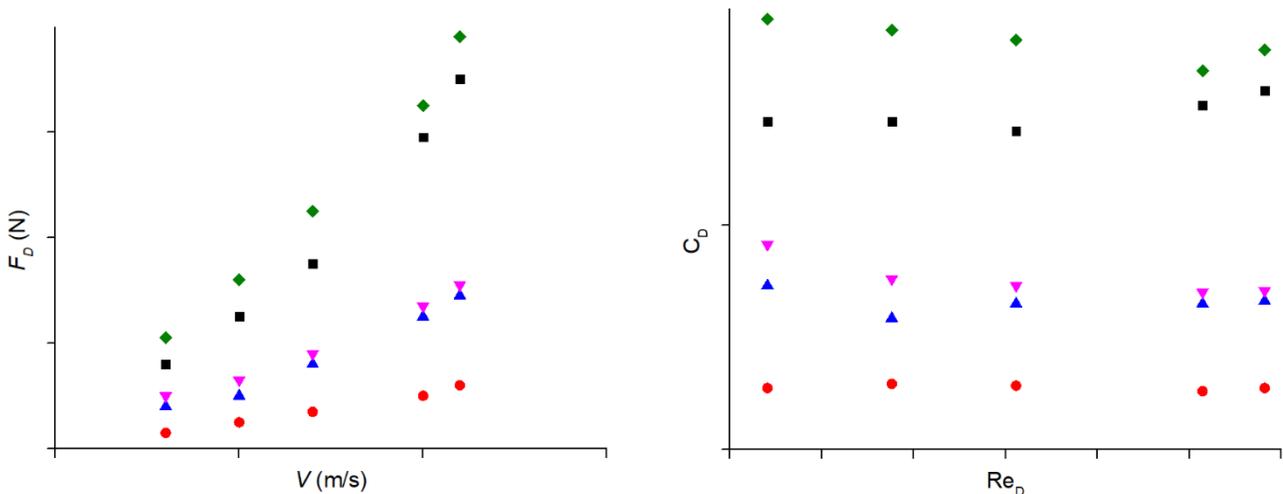


Figura 5.9 Gráficas de Fuerza de arrastre contra velocidad y Coeficiente de Arrastre contra número de Reynolds.

El coeficiente de arrastre será obtenido de la Ecuación 5.1; se usará el área frontal para los modelos (figura 5.10b), excepto para el de la gota para la que se usará el área de planta (figura 5.10a). Para el número de Reynolds se utilizará la Ecuación 5.2; la viscosidad del aire se obtendrá de la literatura con la temperatura ambiente, la densidad se obtendrá con la fórmula de gas ideal, la presión y la temperatura ambiente, la velocidad característica será la velocidad del flujo y la

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	62/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

longitud característica será el diámetro para todos los modelos, salvo para la gota para la que se usará la longitud de la cuerda (figura 5.10c).

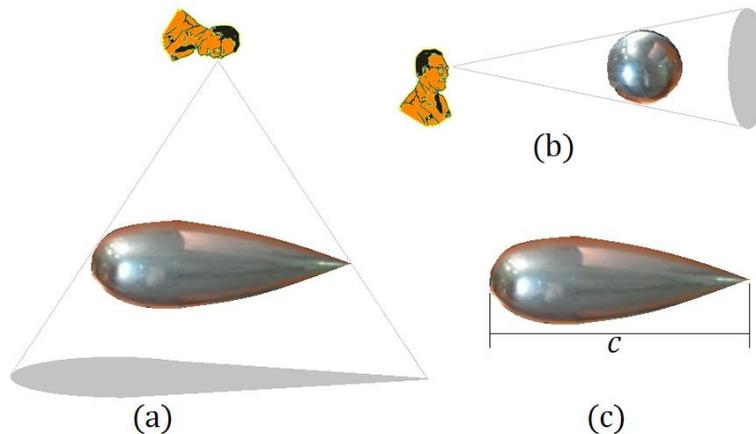


Figura 5.10. a) Área de planta para la gota. b) Área frontal para los modelos. c) Longitud de la cuerda para la gota.

7. Cuestionario

1. ¿Por qué en los perfiles utilizados en no hay fuerza de sustentación, ni fuerzas laterales?
2. ¿Para reducir las componentes de la fuerza nos interesa los planos de simetría? ¿Y planos de simetría con respecto a qué?
3. ¿Por qué cuando un automóvil o un avión se desplazan en el aire no le interesa la dirección del viento para tener los planos de simetría?
4. Describa, a grandes rasgos, las características geométricas que debe de tener un objeto aerodinámico para minimizar la fuerza de arrastre.
5. ¿Las características mencionadas en la pregunta anterior funcionan igual para muy bajos números de Reynolds? ¿Por qué?
6. Para un análisis más exacto de la fuerza de arrastre que se aplica a un objeto, ¿es conveniente analizar el conjunto (el objeto con el tubo sujetador) y restarle la fuerza que genera el tubo sujetador? Detalle respuesta.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	63/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básica

- Barlow, J., Rae, W. & Pope, A. (1999). *Low-speed wind tunnel testing*. (3rd ed.) USA: John Wiley & Sons.
- Cattafesta, L., Bahr, C. & Mathew, J. (2010). *Fundamentals of Wind-Tunnel Design*. Encyclopedia of Aerospace Engineering.
- Çengel, Y. (2011). *Heat Transfer* (5th Ed.). EUA: McGraw-Hill.
- Çengel, Y. & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. México: McGraw-Hill Interamericana.
- White, F. (2011). *Fluid Mechanics*. (7th ed.). New York. McGraw-Hill

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	64/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 6

Arrastre y sustentación



Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir **experimentación** adecuada; analizar e interpretar **datos** y utilizar el **juicio ingenieril** para establecer conclusiones.

AE7. **Trabajar efectivamente en equipos** que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	65/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo.	Riesgo asociado.
Túnel de viento	Evitar meter objetos que no estén bien sujetos.
Alabes del motor	No llevar objetos colgantes como corbata, collares, etc. Traer el cabello recogido.
Modelo	Algunos modelos pueden terminar en punta.
Vernier	Tiene terminaciones en punta.

2. Objetivos

- ✓ Determinar experimentalmente la fuerza de sustentación y la fuerza de arrastre en un modelo de perfil aerodinámico.
- ✓ Observar el comportamiento de la fuerza de sustentación en el modelo variando los siguientes parámetros: velocidad del flujo, ángulo de ataque y posición del flap.
- ✓ Elaborar las gráficas de las fuerzas de arrastre y sustentación contra velocidad, ángulo de ataque y posición del flap y de los coeficientes de arrastre y sustentación contra número de Reynolds, ángulo de ataque y posición del flap.

3. Conceptos básicos y definiciones

Como se vio en la práctica anterior, cuando hay movimiento relativo entre un cuerpo y el flujo de un fluido se presenta una fuerza de arrastre contraria al movimiento debida a la viscosidad del fluido, μ . Si el cuerpo es un sólido de revolución y el eje de simetría coincide con la dirección del flujo, el arrastre es la única fuerza que se produce en esta interacción. Sin embargo, si no se dan estas condiciones, se pueden provocar en el cuerpo fuerzas adicionales perpendiculares a la dirección del flujo (fuerza lateral y fuerza de sustentación), así como momentos provocados por ellas (*roll*, *pitch* o cabeceo, *yaw* o derrape), figura 6.1. Son estas fuerzas perpendiculares las que se contemplarán en esta práctica.

La fuerza de sustentación, como se puede ver en la figura 6.1, es la fuerza vertical perpendicular a la dirección del flujo. En algunos casos, como en la industria automotriz, se usa el término *downforce* a la fuerza vertical hacia abajo, sin embargo, se puede considerar como sustentación negativa (si el eje de referencia es positivo hacia arriba) además, la fuerza lateral también perpendicular al flujo, pero esta es horizontal. Si bien los mecanismos que producen estas fuerzas son similares (aunque no los únicos), pues sólo depende del eje en que se presentan, en esta práctica solamente se discutirá sobre la fuerza de sustentación, específicamente, de la fuerza de sustentación en perfiles delgados y ligeramente curvados a través de los cuales pasa el flujo de un fluido.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	66/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

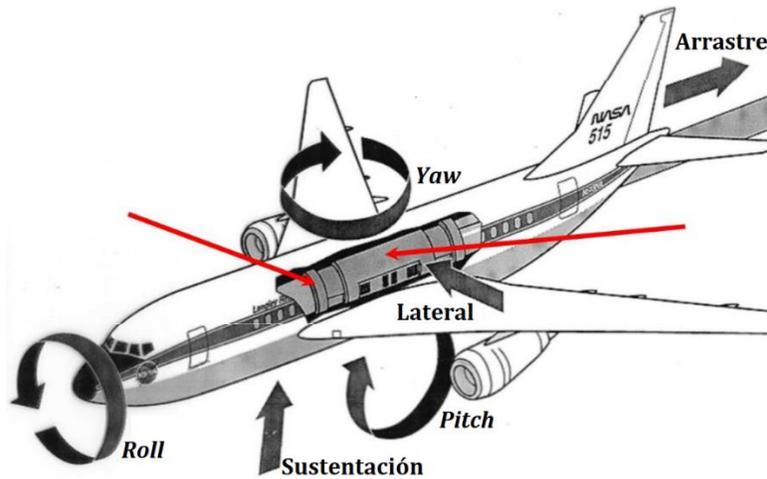


Figura 6.1. Fuerzas y momentos que pueden presentarse por el flujo alrededor de un fluido en un cuerpo no simétrico. Recuperada y modificada de <https://www.arnold.af.mil/News/Article-Display/Article/409392/design-of-experiments-plays-a-major-role-in-wind-tunnel-balance-calibration-at/el-12/02/2021>.

Para todos los cuerpos, las fuerzas aerodinámicas sólo tienen dos causas: la distribución de presión, p , y la distribución de esfuerzos cortantes, τ , en la superficie, s (figura 6.2a). Si se integran dichas distribuciones en el área de la superficie, se obtiene la fuerza resultante, R , que actúa sobre el cuerpo, misma que se puede descomponer en sus componentes vertical y horizontal, es decir, fuerza de sustentación, F_L , y fuerza de arrastre, F_D , respectivamente, figura 6.2b.

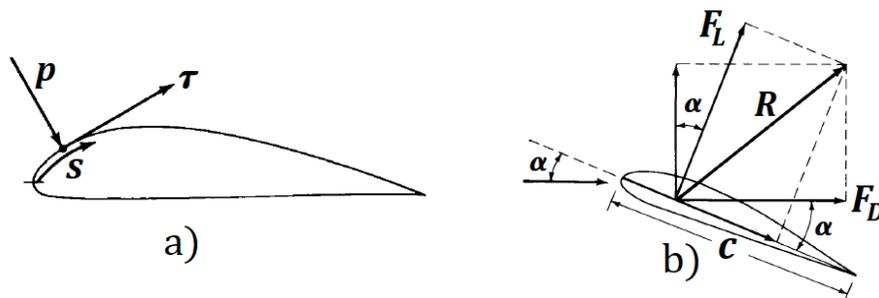


Figura 6.2. a) Presión y esfuerzo cortante en la superficie alar. b) Fuerzas de arrastre, F_D , y sustentación, F_L , para un perfil alar a un ángulo de ataque α . Modificada de Anderson, J. (2010). *Fundamentals of Aerodynamics* (5th Ed.). New York: McGraw-Hill.

En esta misma imagen (figura 6.2b) se aprecian dos parámetros geométricos básicos: la cuerda, c , y el ángulo de ataque, α , que es el que se forma entre la cuerda y el eje del flujo libre; este último de suma importancia porque las fuerzas de arrastre y sustentación dependen fuertemente de él.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	67/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Para un mejor estudio, se utilizan dos parámetros adimensionales para medir estas fuerzas, estos son los coeficientes de arrastre, C_D , y el coeficiente de sustentación, C_L , definidos como

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho \cdot A_P \cdot V^2} \quad (\text{Ec. 6.1})$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho \cdot A_P \cdot V^2} \quad (\text{Ec. 6.2})$$

Donde ρ es la densidad del fluido, A_P es el área de planta y V es la velocidad del flujo libre. Al ancho del perfil se le conoce como envergadura, L , y para perfiles cuya cuerda es constante a lo largo de la envergadura, el área de planta se calcula con

$$A_P = c \cdot L \quad (\text{Ec. 6.3})$$

Mientras, si la cuerda no es constante a lo largo de la envergadura, como sucede con las alas modernas, el área de planta se calcula con

$$A_P = \int c \, dL \quad (\text{Ec. 6.4})$$

Otras dimensiones importantes en el perfil alar se pueden observar en la figura 6.3.

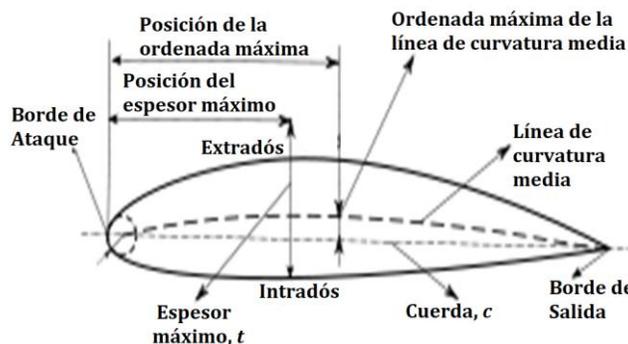


Figura 6.3. Dimensiones principales en un perfil aerodinámico.

Si la línea de cuerda entre el borde de ataque y el borde de salida no es una línea de simetría se dice que el perfil tiene curvatura. La línea de curvatura es la línea media entre la superficie superior y la superficie inferior del perfil.

En los perfiles aerodinámicos de los aviones se observa la aparición de un vórtice en el arranque y en la parada de estos, dicho vórtice se aleja del borde de salida a medida que la velocidad aumenta hasta que se encuentra lejos y permite la sustentación.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	68/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

En pequeños ángulos de ataque el perfil muestra un vórtice que no es capaz de desprender la capa límite y la fuerza de arrastre es baja y la sustentación muy favorable. Cuando se incrementa el ángulo de ataque aparece en la parte superior del perfil un gradiente adverso de presión y se forma una burbuja de separación que se extiende aguas arriba del flujo sobre el extradós del perfil; esto provoca un aumento en la sustentación prácticamente lineal. A un ángulo de ataque aproximadamente 20° , la corriente se encuentra totalmente desprendida del extradós, entonces el perfil entra en pérdida de sustentación (*stall*, en inglés), la cual comienza a disminuir rápidamente, y el arrastre aumenta significativamente, figura 6.4.

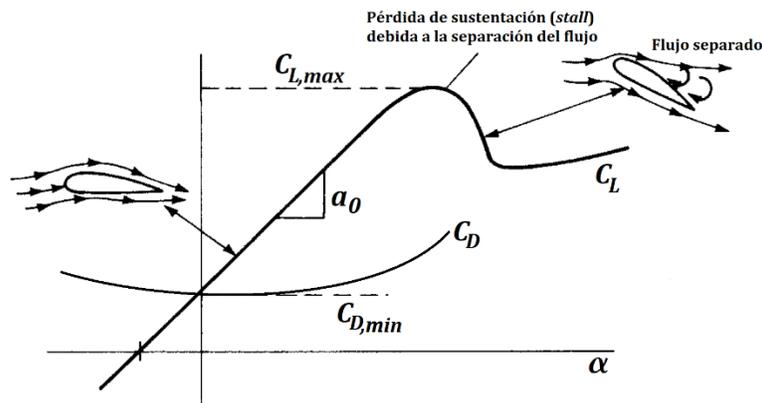


Figura 6.4. Comportamiento de los coeficientes de arrastre, C_D , y de sustentación, C_L , en función del ángulo de ataque α y de la separación del flujo debida a este último. Modificada de Anderson, J. (2010). *Fundamentals of Aerodynamics* (5th Ed.). New York: McGraw-Hill.

Los primeros perfiles fueron delgados inspirados en las alas de las aves, pero a partir de 1905, el ingeniero aerodinámico ruso N.E Joukowsky (1847-1921) desarrolló su teoría de la circulación lo que permite en la actualidad diseñar perfiles de espesor y curvatura arbitrarios. Hoy en día existen familias de perfiles casi todos desarrollados en EUA, bajo la tutela de NACA (ahora NASA). El perfil usado en esta práctica tiene un código NACA 0015; los dos primeros dígitos indican, básicamente, que se trata de un perfil simétrico respecto a la cuerda (para un ángulo de ataque de 0°) y los dos últimos dígitos indican el porcentaje del espesor respecto a la longitud de la cuerda. En este tipo de perfil el coeficiente de sustentación aumenta linealmente con una pendiente constante y es coherente con la expresión (tomando en cuenta que para valores no mayores de 20° la función seno se puede aproximar con una función lineal) de

$$C_L = 2\pi \quad (\text{Ec. 6.5})$$

Donde h es la curvatura y el ángulo de ataque está en radianes. Debido a que el perfil aerodinámico en esta práctica no tiene curvatura, se tiene que $C_L = 2\pi \sin \alpha$, lo cual es un acuerdo muy útil.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	69/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Para flujo a baja velocidad con una rugosidad dada, los coeficientes de arrastre y sustentación varían, además de con el ángulo de ataque, con el número de Reynolds basado en la cuerda, Re_c .

$$Re_c = \frac{c \cdot \rho \cdot V}{\mu} \quad (\text{Ec. 6.6})$$

En el despegue la sustentación debe aumentar considerablemente por lo que se debe aumentar considerablemente la velocidad y el ángulo de ataque aumentando también el arrastre. Por ello, para aumentar la fuerza de sustentación se utilizan a menudo estructuras hipersustentadoras como el *flap* y el *slat*, figura 6.5.

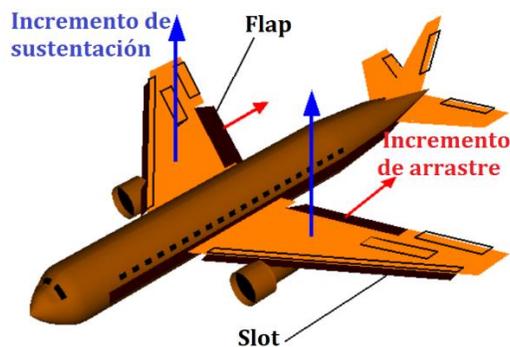


Figura 6.5. Flap y slat en un ala. Recuperada y modificada de <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/flap.html> el 12/02/2021.

El *flap* es un dispositivo que se coloca en la parte posterior del ala y que se puede desplegar hacia abajo manualmente a un ángulo, δ . Esto hace que el perfil, sea o no simétrico, cambie el ángulo de sustentación nula, el cual puede llegar a -12 grados, dependiendo del modelo, como se observa en la figura 6.6. Sin embargo, a causa de un flap de intradós, también aumenta la fuerza de arrastre, pero la reducción de distancias de despegue y aterrizaje justifican la necesidad de potencia adicional en los motores.



Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II

Código:

MADO-57

Versión:

04

Página

70/151

Sección ISO

8.3

Fecha de emisión

30 de Agosto de 2021

Facultad de Ingeniería

Área/Departamento:
Laboratorio de Termofluidos

La impresión de este documento es una copia no controlada

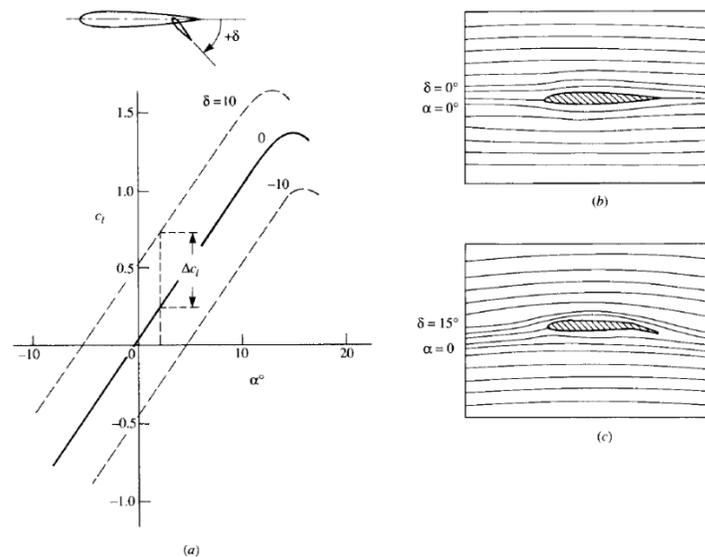


Figura 6.6. a) Coeficiente de sustentación, C_L , en función del ángulo de ataque α y del ángulo del flap. b) Líneas de flujo para un ángulo de ataque 0° y sin flap. c) Líneas de flujo para un ángulo de ataque 0° y con el flap a 15° . Tomada de Anderson, J. (2010). *Fundamentals of Aerodynamics* (5th Ed.). New York: McGraw-Hill.

El *flap*, además, permite volar a velocidades bajas sin entrar en pérdida y, dependiendo del tipo de flap, puede aumentar el área del perfil. Los aviones generalmente vuelan en ángulos de ataque pequeños, esto permite que la sustentación sea mucho mayor que el arrastre y que la relación entre sustentación y arrastre (*lift to drag ratio*, F_L/F_D) se encuentre en un intervalo de 20 y 50.

Los perfiles de la serie NACA 6 están diseñados para que el gradiente de presión sea favorable en gran parte de la superficie superior del perfil y en ángulos de ataque pequeños, con lo cual se consigue que la capa límite sea laminar e inclusive en altos números de Reynolds y se retrasa la aparición de la turbulencia. Una desventaja de estos perfiles laminares es que entran en pérdida para ángulos negativos y se reduce también el coeficiente de sustentación, además que es necesario tomar en cuenta la rugosidad del perfil. Por otra parte, en el diseño de perfiles aerodinámicos es necesario tomar en cuenta que las alas de los aviones no son infinitas y que el efecto del borde ocasiona también la aparición de vórtices (generando arrastre adicional conocido como arrastre inducido, *induced drag*) los cuales se contrarrestan con otros elementos.

4. Equipo y Material

- Túnel de Viento Subsónico.
- Modelo de perfil aerodinámico con flap.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	71/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- Balanza de dos componentes.
- Medidor de velocidad.
- Calibrador Vernier.

5. Desarrollo

Actividad 1. Toma de datos del perfil, de condiciones atmosféricas y prueba de variación de velocidad.

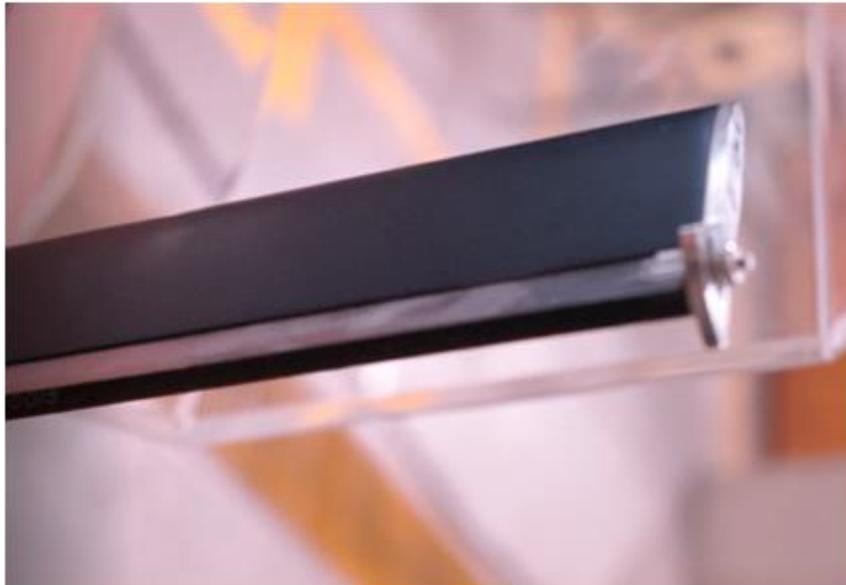


Figura 6.7. Perfil NACA 0015 con *flap* del laboratorio.

1. Medir cada una de las dimensiones principales del perfil aerodinámico (cuerda, espesor y ancho) usando el Vernier y anotarlos en la tabla de datos en los espacios correspondientes.

CUERDA	ANCHO	ESPESOR
(cm)	(cm)	(cm)

Tabla 6.1. Tabla de datos geométricos del Perfil NACA 0015.

2. Medir la presión atmosférica y la temperatura ambiente con el barómetro y el termómetro del laboratorio.

$$P_{amb} = \text{_____ cm}_{\text{HG}}$$

$$T_{amb} = \text{_____ } ^{\circ}\text{C}$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	72/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

3. Montar sobre la balanza de dos componentes el perfil aerodinámico con un ángulo de ataque de 4° . Es muy importante sujetarlo mediante el tornillo de mariposa ya que si se soltara puede dañar los álabes del ventilador.
4. Ajustar a cero los dos brazos de la balanza de dos componentes, figura 6.8, el brazo paralelo al túnel para medir la fuerza de arrastre y el otro, perpendicular, que medirá la fuerza de sustentación. El ajuste se debe realizar en cada cambio del ángulo de ataque o de la posición del flap del perfil.



Figura 6.8. Balanza de dos componentes.

5. Cerrar la zona de pruebas del túnel de viento y sellar con las placas suministradas para evitar la succión del túnel de viento e impedir la formación de corrientes no deseadas. Asegurar también el tornillo en los rieles para evitar que se abra el túnel de viento cuando esté en funcionamiento.
6. Hacer funcionar el Túnel de Viento encendiendo el motor del ventilador, mediante la consola de control (variador de velocidad por frecuencia). Se puede usar un tubo de Prandtl electrónico o conectado al banco de manómetros conectado junto a la consola de control del túnel de viento para medir la velocidad del flujo en el túnel.
7. Usar la consola de control para ajustar la velocidad al valor deseado. En la tabla 6.2 se proporcionan los valores de velocidad recomendados, para la prueba; se sugiere comenzar por el más bajo de ellos.
8. Cuando el aire comience a circular por el túnel, las fuerzas de arrastre y sustentación actuarán sobre el perfil, desequilibrando los dos brazos de la balanza. Por medio de las pesas, equilibrar los dos brazos de la balanza y anotar ambos valores en la tabla 6.2.
9. Aumentar la velocidad al siguiente valor sugerido en la tabla 6.2 y volver a equilibrar los brazos de la balanza para medir las fuerzas de arrastre y sustentación.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	73/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

10. Repetir el paso anterior con las velocidades marcadas en la tabla 6.2; se sugiere tomar entre 7 y 9 mediciones para obtener una gráfica aceptable. Parar el motor del ventilador con la consola de control del túnel.

VELOCIDAD (m/s)	FUERZA DE ARRASTRE (N)	FUERZA DE SUSTENTACIÓN (N)
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		

Tabla 6.2. Tabla de datos de arrastre y sustentación para distintas velocidades.

Actividad 2. Prueba a distintos ángulos de ataque.

1. Sin desmontar el perfil aerodinámico, modificar su orientación por medio de la platina giratoria para variar el ángulo de ataque y ajustar nuevamente los brazos de la balanza. Iniciar con el primer ángulo sugerido en la tabla 6.3.
2. Cerrar la zona de pruebas del túnel de viento, sellar con las placas suministradas para evitar la succión que provoque una formación de corrientes no deseadas y asegurar por medio del tornillo en los rieles para evitar que se abra el túnel de viento cuando esté en funcionamiento.
3. Hacer funcionar el Túnel de Viento encendiendo el motor del ventilador del túnel y ajustar la velocidad del flujo en el túnel al valor recomendado con la ayuda del tubo de Prandtl y de la consola de control. Se sugiere usar en esta prueba una velocidad constante de 12 m/s.
4. Cuando el aire comience a circular por el túnel, las fuerzas de arrastre y sustentación actuarán sobre el perfil, desequilibrando los dos brazos de la balanza. Por medio de las pesas, equilibrar los dos brazos de la balanza y anotar ambos valores en la tabla 6.3.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	74/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

5. Parar el ventilador del túnel de viento, y repetir los pasos 1 a 4 para medir las fuerzas de arrastre y sustentación con los ángulos sugeridos en la tabla 6.3.

ÁNGULO DE ATAQUE	FUERZA DE ARRASTRE	FUERZA DE SUSTENTACIÓN
(°)	(N)	(N)
8		
12		
16		
20		

Tabla 6.3. Tabla de datos de arrastre y sustentación en función del ángulo de ataque.

Actividad 3. Prueba variando la posición del *flap*.

1. Sin desmontar el perfil aerodinámico, girar el perfil aerodinámico a un ángulo de 4 grados y cambiar la posición del *flap*, ajustando de nuevo los brazos de la balanza.
2. Cerrar la zona de pruebas del túnel de viento, sellar con las placas suministradas para evitar la succión que provoque una formación de corrientes no deseadas y asegurar por medio del tornillo en los rieles para evitar que se abra el túnel de viento cuando esté en funcionamiento.
3. Hacer funcionar el Túnel de Viento encendiendo el motor del ventilador del túnel y ajustar la velocidad del flujo en el túnel al valor recomendado con la ayuda del tubo de Prandtl y de la consola de control. Se sugiere usar en esta prueba la misma velocidad que en la actividad 2.
4. Cuando el aire comience a circular por el túnel, las fuerzas de arrastre y sustentación actuarán sobre el perfil, desequilibrando los dos brazos de la balanza. Por medio de las pesas, equilibrar los dos brazos de la balanza y anotar ambos valores en la tabla 6.4.

POSICIÓN DEL FLAP	FUERZA DE	FUERZA DE
	ARRASTRE	SUSTENTACIÓN
	(N)	(N)
Retraído		
Extendido		

Tabla 6.4. Tabla de datos geométricos del Perfil NACA 0015.

5. Parar y desconectar el túnel, desmontar el perfil aerodinámico y los accesorios del túnel.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	75/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

6. Resultados

1. Calcular los coeficientes de arrastre y sustentación con las ecuaciones 6.1 y 6.2, usando la ecuación 6.3 para el cálculo del área proyectada (se usará el área proyectada máxima para todos los cálculos). Usar la ecuación 6.5 para calcular los números de Reynolds, usando los datos de presión y temperatura ambiente para calcular la densidad del aire.
2. Llenar la tabla de resultados de la actividad 1 (tabla 6.5). Con los datos de las tablas 6.2 y 6.5 graficar las curvas de las fuerzas de arrastre y sustentación contra velocidad y de los coeficientes de arrastre y sustentación contra número de Reynolds.

NÚMERO DE REYNOLDS	COEFICIENTE DE ARRASTRE	COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		

Tabla 6.5. Tabla de resultados de la Actividad 1.

3. Llenar la tabla de resultados de la actividad 2 (tabla 6.6). Con los datos de las tablas 6.3 y 6.6 graficar las curvas de las fuerzas y de los coeficientes de arrastre y sustentación contra ángulo de ataque del perfil.

ÁNGULO DE ATAQUE [°]	COEFICIENTE DE ARRASTRE	COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN
4		
10		
16		
20		

Tabla 6.6. Tabla de resultados de la Actividad 2.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	76/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- Llenar la tabla de resultados de la actividad 3 (tabla 6.7). Con los datos de las tablas 6.4 y 6.7, graficar las curvas de las fuerzas y de los coeficientes de arrastre y sustentación contra la posición del *flap*.

POSICIÓN DEL FLAP	COEFICIENTE DE ARRASTRE	COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN
Retraído		
Extendido		

Tabla 6.7. Tabla de resultados de la Actividad 3.

7. Cuestionario

- Cómo influye la velocidad en las fuerzas de sustentación.
- Cómo influye el número de Reynolds en el coeficiente de sustentación.
- ¿Cómo influye el ángulo de ataque de un perfil aerodinámico en los valores de las fuerzas de arrastre y sustentación?
- ¿Cómo influye el ángulo de ataque de un perfil aerodinámico en los valores de los coeficientes de arrastre y sustentación?
- ¿Qué sucede con las fuerzas de arrastre y sustentación cuando se despliega el *flap*?
- Cuál es el ángulo de ataque de entrada en pérdida de la fuerza de sustentación en el perfil aerodinámico de nuestro experimento.

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

- Anderson, John. (2011). *Fundamentals of Aerodynamics (5th ed.)*. New York. McGraw-Hill.
- Houghton, E.L. *et al* (2013). *Aerodynamics for engineering Students (6th ed.)*. Oxford. Elsevier.
- White, F. (2011). *Fluid Mechanics (7th ed.)*. New York. McGraw-Hill.

Fuentes electrónicas

- <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0015-il>

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	77/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 7

Distribución de presión



Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir **experimentación** adecuada; analizar e interpretar **datos** y utilizar el **juicio ingenieril** para establecer conclusiones.

AE7. **Trabajar efectivamente en equipos** que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	78/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo.	Riesgo asociado.
Túnel de viento	Impacto de objetos en la salida del túnel de viento al ser arrastrados por la corriente
Alabes del motor	Heridas o riesgo de asfixia. No llevar objetos colgantes como corbata, collares, etc. Traer el cabello recogido.

2. Objetivos

- ✓ Medir experimentalmente la distribución de presiones estáticas que se presenta alrededor de cuerpos de geometría simple sumergidos en el flujo.
- ✓ Calcular el coeficiente de presión con los datos obtenidos en el laboratorio y elaborar las gráficas correspondientes.
- ✓ Comparar la distribución de presiones ideal teórica con la real experimental.

3. Conceptos básicos y definiciones

Se denomina flujo externo al movimiento de un fluido sobre cuerpos sumergidos en su seno. Se distinguen dos regiones del flujo, una cercana a la superficie del cuerpo llamada capa límite y una región fuera de la capa límite donde las fuerzas viscosas netas son despreciables.

Presión en un fluido en movimiento en regiones fuera de la capa límite para flujo externo.

Para las condiciones de flujo del experimento, inicialmente fijamos la atención en la corriente de fluido libre de obstáculos (Fig. 7.1), fuera de la capa límite y antes de que ocurra desprendimiento de la capa límite (regiones del flujo donde los efectos de la viscosidad son despreciable y por eso suele llamarse región no viscosa del flujo o región invíscida de flujo de un fluido viscoso).

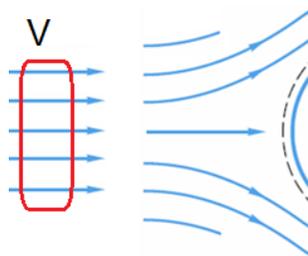


Figura 7.1. Líneas de corriente en regiones donde los efectos de la viscosidad son despreciables. Figura adaptada de la referencia [1].

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	79/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Deseamos conocer la presión en algún punto del flujo; en particular, en una posición en la línea de corriente **A** (Fig. 7.2)

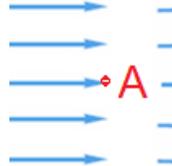


Figura 7.2. Líneas de corriente en la corriente libre que se aproxima. Figura adaptada de la referencia [1].

Para las condiciones del flujo se puede aplicar la ecuación de Bernoulli en un punto de la línea de corriente **A**:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{const.} \quad (\text{Ec. 7.1})$$

La ecuación (7.1) muestra que la energía cinética y la potencial del fluido pueden convertirse a energía de flujo (y viceversa) en el curso del flujo, lo cual hace que cambie la presión **P**. Este fenómeno se hace más visible cuando se multiplica la ecuación de Bernoulli por la densidad **ρ**:

$$P + \frac{\rho V^2}{2} + \rho gz = \text{const.} \quad (\text{Ec. 7.2})$$

De la ecuación (7.2), la presión **P** es la presión termodinámica a la que comúnmente se le llama presión estática. Es la misma que se utiliza en la termodinámica y las tablas de propiedades. Esta es la presión que se mediría con un instrumento que es estático con respecto al fluido, es decir, en movimiento con el fluido si éste se desplaza.

El término $(\rho V^2/2)$ es la presión dinámica asociada al movimiento (velocidad local) del fluido. Finalmente el término (ρgz) es la presión hidrostática; la cual no es presión en un sentido real, porque su valor depende del nivel de referencia.

La suma de la presión estática, la dinámica y la hidrostática se llama presión total. Por lo tanto, la ecuación de Bernoulli expresa que la presión total a lo largo de una línea de corriente es constante. Aunque la presión total es constante en una línea de flujo, la presión estática puede cambiar a lo largo de la línea de corriente por cambios en la presión dinámica (debido a cambios en la velocidad local) no obstante, la suma de las dos presiones es constante a lo largo de la línea de corriente.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	80/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Conviene subrayar, que en la presente práctica se medirá la presión estática del fluido en la superficie de los cuerpos sumergidos en la corriente.

Presión de Estancamiento

La presión de estancamiento está asociada a la línea de corriente de estancamiento y al punto de estancamiento que ocurre cuando el fluido en movimiento es obligado a detenerse debido a que se encuentra un objeto estacionario y se genera una presión mayor que la presión estática de la corriente libre del fluido (Fig. 7.3).

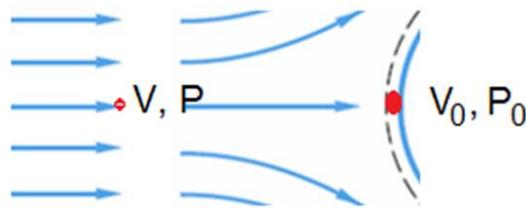


Figura 7.3. Línea de corriente y punto de estancamiento. Figura adaptada de la referencia [1].

La energía cinética de la corriente en movimiento se transforma en un tipo de energía en la forma de presión. En este proceso el fluido se desacelera hasta una velocidad cero mediante un proceso sin fricción, dando lugar a la presión de estancamiento. Las partículas de fluido que se encuentran cercanas al punto de estancamiento tienen velocidades cercanas a cero y presiones cercanas a la de estancamiento.

Si la presión estática de la corriente libre es P_∞ en un punto en el flujo donde la velocidad es V_∞ , entonces la presión de estancamiento, P_0 , donde la velocidad de estancamiento, $V_0 \approx 0$, puede calcularse a partir de la ecuación (7.3):

$$\frac{P_\infty}{\rho} + \frac{V_\infty^2}{2} + gz = \frac{P_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} + gz_0 \quad (\text{Ec. 7.3})$$

$$P_0 = P_\infty + \frac{1}{2}\rho V_\infty^2 \quad (\text{Ec. 7.4})$$

Presión de estancamiento = [presión estática + presión dinámica].

La presión estática en la superficie de los modelos se pueden conocer de manera cualitativa a partir del análisis del patrón de flujo visualizado en la práctica “Túnel de humo” fuera de la capa

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	81/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

límite y antes de la separación de la capa límite del cuerpo. Conviene subrayar que las condiciones del flujo son las mismas para esta práctica y para la del Túnel de humo.

Obviamente, se conocerá cuantitativa la presión estática a lo largo de la superficie de los modelos por medición; incluyendo la zona donde se ha separado la capa límite de la superficie del modelo.

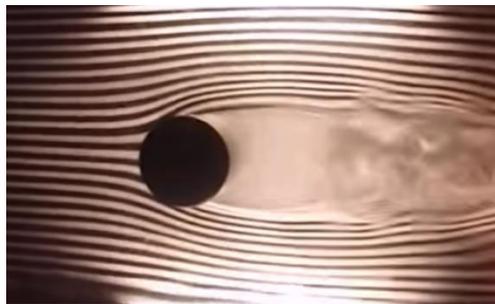


Figura 7.3. Líneas de corriente sobre un cilindro. Fotografía tomada de la práctica “Túnel de humo” FI, UNAM.

Campo de presiones en un flujo de fluido ideal (presión ideal teórica).

Ahora se buscará conocer el campo de presiones de forma analítica en la región del flujo donde los efectos de la viscosidad son despreciables; en esta región se considera que se tiene un flujo potencial bidimensional. Para flujos irrotacionales, se busca primero resolver la ecuación de Laplace ($\nabla^2\phi=0$) para encontrar la función potencial de velocidades $\phi(x,y,z)$ y calcular las componentes de velocidad. Posteriormente se puede calcular el campo de presiones utilizando la ecuación de Bernoulli ignorando los efectos de la gravedad. Sin embargo, conviene utilizar la función de corriente $\psi(x,y,z)$ (que también satisface la ecuación de Laplace) ya que las líneas de $\psi = \text{constante}$, representan las líneas de corriente en el flujo.

El flujo potencial equivalente al flujo sobre un cilindro circular se obtiene de la superposición de flujos potenciales elementales: flujo uniforme V_∞ más un doblete de intensidad K que se ubica en el origen. La deducción completa se deja como ejercicio al alumno.

Las componentes de velocidad sobre la superficie del cilindro son para la velocidad radial $u_r = 0$ y la velocidad tangencial $u_\theta = 2V_\infty \sin \theta$.

Dado que el flujo en la región de interés es irrotacional, se usa la ecuación de Bernoulli para calcular la presión en cualquier parte en el campo de flujo (distribución de presión). Cuando se ignoran los efectos de la gravedad:

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	82/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \text{const.} = \frac{P_{\infty}}{\rho} + \frac{V_{\infty}^2}{2} \quad (\text{Ec. 7.5})$$

La constante es la misma para todas las líneas de corriente en el caso de flujo irrotacional. Despejando $(P - P_{\infty})$ de la ecuación (7.5), obtenemos la distribución de presiones:

$$P - P_{\infty} = 1/2 \rho (V_{\infty}^2 - V^2) \quad (\text{Ec. 7.6})$$

Sustituyendo la velocidad tangencial u_{θ} y la diferencia de presiones $(P - P_{\infty})$ en la definición del coeficiente de presión se obtiene la distribución de presiones adimensional:

$$C_p = 1 - \frac{(-2V_{\infty} \sin\theta)^2}{V_{\infty}^2} = 1 - 4\sin^2\theta \quad (\text{Ec. 7.7})$$

La figura 7.4 muestra comparativamente el coeficiente de presión para el caso ideal y para el caso real (capa límite laminar o turbulenta).

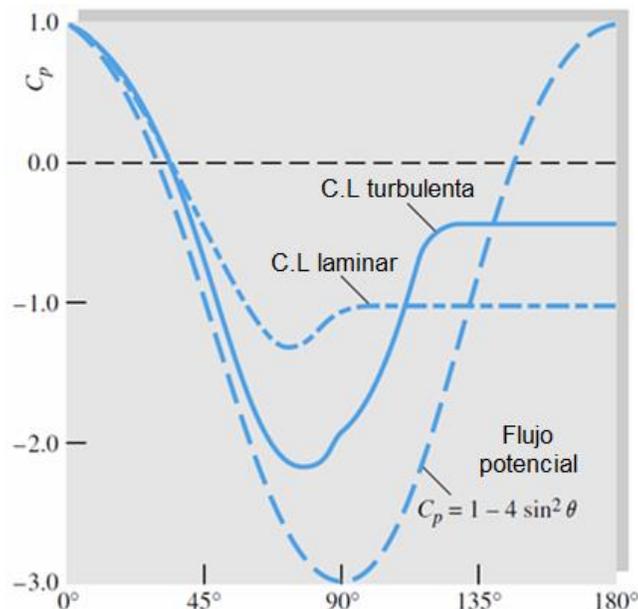


Figura 7.4. Coeficiente de presión para flujo sobre un cilindro. Figura adaptada de la referencia [1].

La distribución de presión ideal se puede conocer de manera cualitativa a partir del análisis del patrón de flujo visualizado en la práctica “Hele-Shaw”.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	83/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

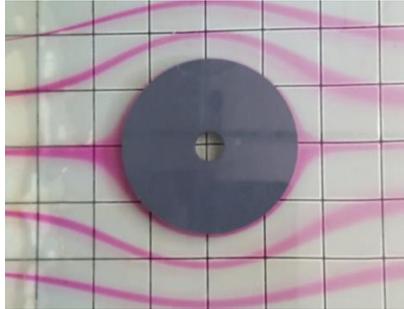


Figura 7.5. Líneas de corriente sobre un cilindro. Fotografía tomada de la práctica “Hele-Shaw” FI, UNAM.

Distribución de presiones adimensional, Coeficiente de presión.

En aerodinámica y en otras pruebas de modelos, es conveniente presentar los datos de la presión en forma adimensional. Se establece la razón:

$$E_u = \frac{\Delta p}{1/2\rho V^2} \quad (\text{Ec. 7.8})$$

Esta razón se denomina número de Euler, en honor a Leonard Euler. Se acredita a Euler como el primero en reconocer el papel de la presión en el movimiento de un fluido. El número de Euler es la razón entre las fuerzas de presión y de la inercia. El factor $\frac{1}{2}$ se introduce en el denominador para producir la presión dinámica. El número de Euler a menudo se llama el coeficiente de presión, C_p .

El coeficiente de presión es la razón de la presión estática a la presión dinámica. Cuando se multiplica por el área, es la relación entre la fuerza de presión y la fuerza inercial, $\frac{1}{2}\rho V^2$.

$$C_p = \frac{p-p_\infty}{1/2\rho V_\infty^2} \quad (\text{Ec. 7.8})$$

Donde

- p presión estática local (en la superficie del cuerpo).
- p_∞ presión estática de la corriente libre o no perturbada.
- V_∞ velocidad de la corriente libre.
- ρ densidad del fluido en movimiento.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	84/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Obtención experimental de la presión estática.

La presión a través de una capa límite (dirección y) es aproximadamente constante según la ecuación (7.10). La ecuación se deduce a partir de un estudio aproximado del orden de magnitud de los términos de las ecuaciones diferenciales de la ecuación de Navier-Stokes, componente y , en la capa límite. La deducción se verá en la práctica “Capa Límite”.

$$\frac{\partial p}{\partial y} \cong 0 \quad (\text{Ec. 7.10})$$

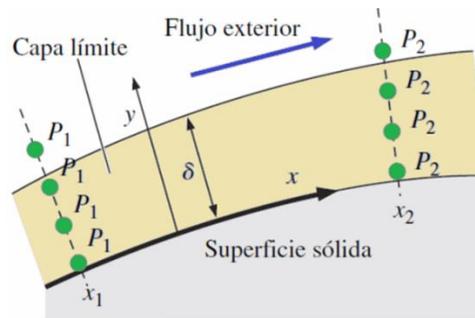


Figura 7.6. Presión a través de la capa límite. Figura adaptada de la referencia [3].

Una consecuencia inmediata de la ecuación (7.10) es que, en cualquier posición x a lo largo de la pared, la presión en el borde exterior de la capa límite ($y \approx \delta$) es la misma que la presión en la superficie ($y = 0$). Es decir, la presión en el borde exterior de una capa límite se puede medir de manera experimental mediante una sonda de presión estática en la superficie directamente abajo de la capa límite.

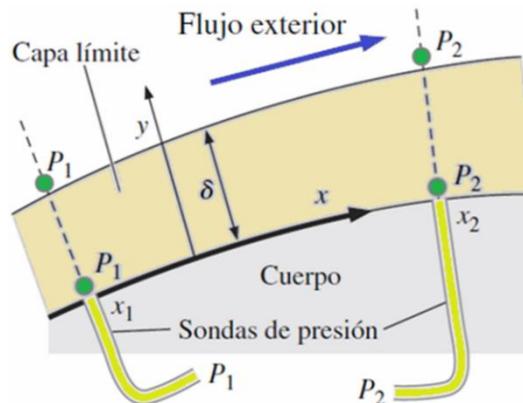


Figura 7.7. Medición experimental de la presión estática en la superficie de un objeto sumergido. Figura adaptada de la referencia [3].

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	85/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Los orificios realizados en los modelos (figura 7.8) son tomas piezométricas. Las tomas de presión deben estar libre de rebabas y alineadas al flujo de tal forma que la perpendicular del orificio sea también perpendicular a las líneas de corriente en el punto de medición, figura 7.9.

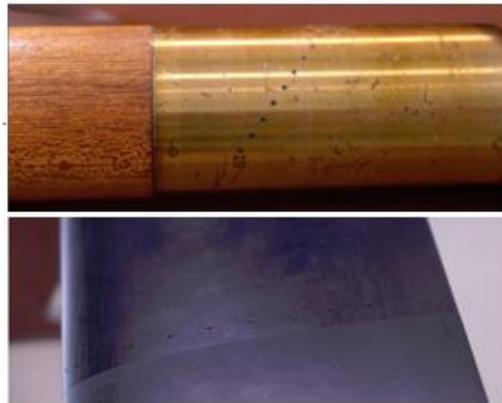


Figura 7.8. Tomas de presión en los modelos utilizados. FI, UNAM.

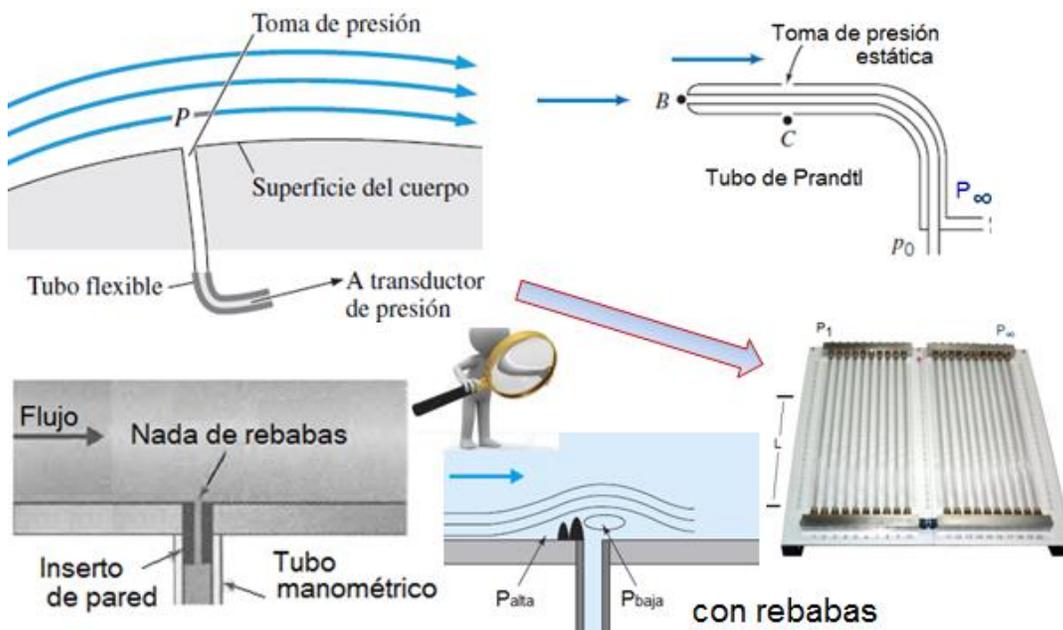


Figura 7.9. Medición de presión estática. Las dos primeras figuras fueron adaptadas de la referencia [1].

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	86/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

4. Equipo y Material

- Túnel de viento subsónico.
- Modelos de cilindro y ala.
- Tubo de Prandtl
- Vernier.

5. Desarrollo

Datos iniciales

Registre la temperatura ambiente y la diferencia de alturas del fluido del barómetro:

$T_{\text{ambiente}} =$ [°C]

$\Delta h_{\text{barómetro}} =$ [cmHg]

A partir del dato del barómetro se obtiene la presión atmosférica local, P_{atm} . El barómetro utiliza mercurio como fluido manométrico.

Medir el diámetro del cilindro utilizando el vernier y anotarlo. Medir la longitud de la cuerda del ala Naca 0015.

ACTIVIDAD 1. Distribución de presión en la superficie de un cilindro.

1. Colocar el tubo de Prandtl en la zona de prueba del túnel de viento. Utilizar únicamente la toma de presión estática del tubo de Prandtl y conectar mediante la manguera flexible al último tubo del banco de manómetros, L_{∞} .

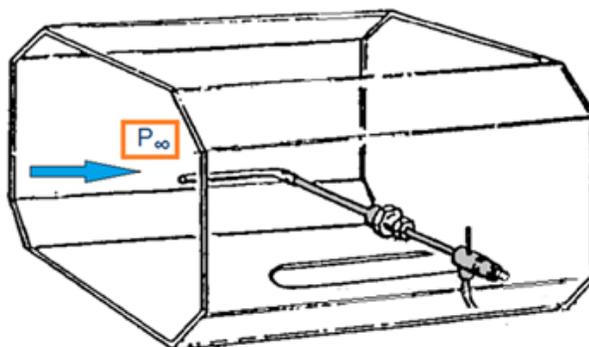


Figura 7.10. Figura adapta de la referencia [2].

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	87/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- Colocar con precaución el modelo de cilindro en la zona de prueba del túnel de viento. El modelo tiene 19 tomas piezométricas numeradas del 0 al 18, abarcando ángulos de 0 a 180 grados, en incrementos de 10 grados.
- Cada toma piezométrica se conecta a un banco de manómetros diferenciales en U mediante tubos flexibles para medir la presión estática. Introduzca aproximadamente 5 mm el tubo flexible en el porción de tubo metálico de cada manómetro; el fluido manométrico es agua.

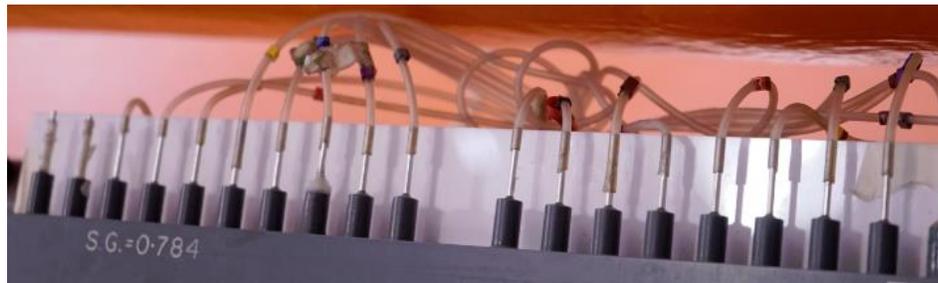


Figura 7.11. Banco de manómetros. FI, UNAM.

- Es importante que el orificio marcado con el número cero esté bien centrado con respecto al flujo y corresponda con la línea y punto de estancamiento del flujo.

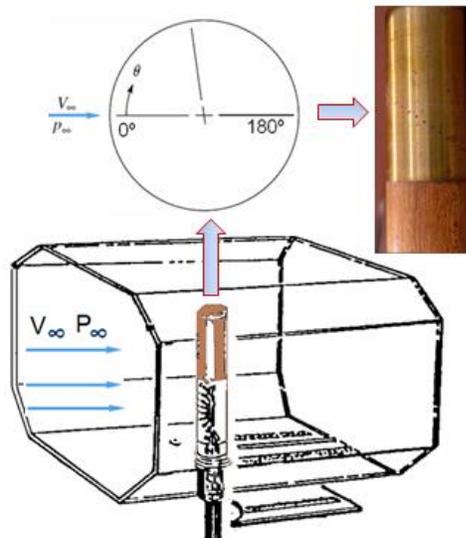


Figura 7.12. Figura adapta de la referencia [2].

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	88/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

5. En la posición vertical del banco de manómetros, afloje el seguro e incline el banco de manómetros (sujetándolo) en la ranura indicada con 3, en este punto se tiene una inclinación de 22 grados. Gire firmemente el seguro para fijar la posición inclinada.
6. Cubrir la ranura de la pared inferior de la zona de prueba para evitar la entra de aire del exterior y afecte al flujo. Utilice las tapas de acrílico negras según convenga.
7. Encienda el ventilador del túnel presionando el botón verde. Ajuste la velocidad de la corriente de aire presionando el botón del cursor superior y suelte hasta llegar al valor deseado. Se propone realizar dos eventos para velocidades de 8 y 16 m/s.
8. Registre la longitud, L , del fluido en los manómetros. No se apoye en el banco de manómetro ya que puede deslizarse y llegar a romperse los tubos de vidrio o la placa del banco. Puede auxiliarse de una escuadra metálica para leer la columna de los manómetros. Registre los datos en la Tabla siguiente:

Punto de medición	Ángulo θ	Evento 1 Lectura L_{E1} [mm]	Evento 2 Lectura L_{E2} [mm]
1	0°		
2	10°		
3	20°		
4	30°		
5	40°		
6	50°		
7	60°		
8	70°		
9	80°		
10	90°		
11	100°		
12	110°		
13	120°		
14	130°		
15	140°		
16	150°		
17	160°		
18	170°		
19	180°		

Tabla 7.1. Datos para el cilindro.

Registre la longitud del fluido del último manómetro correspondiente a la presión de la corriente libre (suministra por la toma de presión estática del tubo de Prandtl) en la siguiente tabla.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	89/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Evento	V_{∞} [m/s]	L_{∞} [mm]
1	8	
2	16	

Tabla 7.1B. Presión estática de la corriente libre.

- Retirar con precaución los tubos flexibles de los tubos metálicos del banco de manómetros una vez concluida la actividad. Sujete con los dedos el extremo de la manguera flexible y la parte metálica del tubo, a continuación tire hacia fuera el extremo de la manguera flexible.

ACTIVIDAD 2. Distribución de presión en el perfil aerodinámico NACA 0015 sin ángulo de ataque cambiando la velocidad de la corriente libre.

- Colocar con precaución el modelo de perfil aerodinámico sin ángulo de ataque en la zona de pruebas del túnel de viento. El modelo tiene 11 tomas piezométricas distribuidas a lo largo del perfil. La toma 6 se ubica en el punto de máximo espesor del perfil.

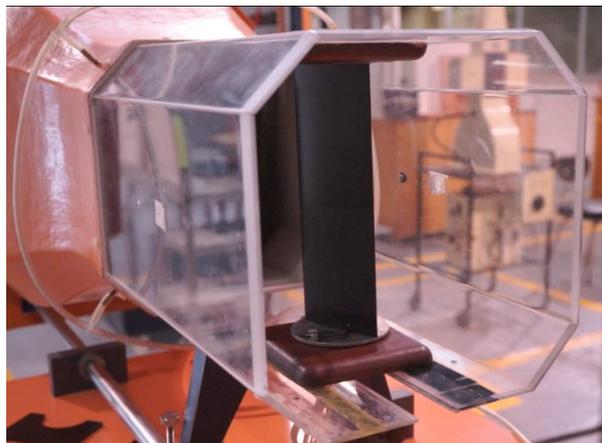


Figura 7.13. Perfil NACA 0015. FI, UNAM.

- Efectué los pasos 3, 5 y 6 de la actividad 1.
- Encienda el ventilador del túnel presionando el botón verde. Ajuste la velocidad de la corriente de aire presionando el botón del cursor superior y suelte hasta llegar al valor deseado. Se propone realizar tres eventos para velocidades de 8, 10 y 12 m/s.
- Registre la longitud de la columna de fluido de los manómetros correspondientes. No se apoye en el banco de manómetro ya que puede deslizarse y llegar a romper los tubos de vidrio o la placa del banco. Registre los datos en la Tabla siguiente:

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	90/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Velocidad	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L atm
m/s	mm	mm	mm									
8												
10												
12												

Tabla 7.2. Perfil aerodinámico sin ángulo de ataque.

- Efectué el pasos 8 de la actividad 1.

ACTIVIDAD 3. Distribución de presión en el perfil aerodinámico NACA 0015 a diferentes ángulos de ataque manteniendo una misma velocidad de la corriente libre.

- Colocar con precaución el modelo de perfil aerodinámico en la zona de pruebas del túnel de viento.
- Efectué los pasos 3, 5 y 6 de la actividad 1.
- Medir la distribución de presiones en el perfil aerodinámico variando el ángulo de ataque a -10, 5, 10 y 15 grados conservando una misma velocidad, se sugiere 12 m/s o una similar a la de la actividad 1.
- Registre la longitud de la columna de fluido de los manómetros correspondientes. No se apoye en el banco de manómetro ya que puede deslizarse y llegar a romperse los tubos de vidrio o la placa del banco. Registre los datos en la Tabla siguiente:

θ	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L atm
grados	mm	mm	mm									
-10												
5												
10												
15												

Tabla 7.3. Perfil aerodinámico a diferentes ángulos de ataque, manteniendo una misma velocidad de la corriente.

- Efectué el pasos 8 de la actividad 1.

6. Resultados

- Calcular la densidad del aire a condiciones locales del laboratorio.
- Calcular el coeficiente de presión del cilindro y el número de Reynolds. Elaborar la tabla de resultados y graficar C_p contra el ángulo θ .

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	91/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Ángulo θ°	Evento 1		Evento 2		Fluido ideal Cp
	(P-P ∞) [Pa]	Cp	(P-P ∞) [Pa]	Cp	
0					
10					
20					
30					
40					
50					
60					
70					
80					
90					
100					
110					
120					
130					
140					
150					
160					
170					
180					

Tabla 7.1R. Distribución de presiones y Cp del cilindro.

- Calcular la distribución de presiones en el ala para la actividad 2. Elaborar la tabla de resultados y graficar la distribución de presiones ($p-p_{atm}$) contra el punto de medición.

Velocidad	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
m/s	[Pa]										
8											
10											
12											

Tabla 7.2R. Distribución de presiones en la superficie del ala sin ángulo de ataque a diferentes velocidades de la corriente libre.

- Calcular la distribución de presiones en el ala para la actividad 3. Elaborar la tabla de resultados y graficar la distribución de presiones ($p-p_{atm}$) contra el punto de medición.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	92/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

θ	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
grados	[Pa]										
-10											
5											
10											
15											

Tabla 7.3R. Distribución de presiones en la superficie del ala a diferentes ángulos de ataque, manteniendo la misma velocidad de la corriente libre.

7. Cuestionario

1. Comentar como influye la velocidad de la corriente libre en la distribución de presiones para el cilindro y para el ala.
2. Describa que ocurre con la presión en la superficie del cilindro conforme el fluido se desplaza alrededor del cilindro para uno de los dos eventos y compare con el caso ideal.
3. Comentar como influye el ángulo de ataque en los valores de presión del perfil aerodinámico para una misma velocidad de la corriente libre. Ver los resultados de la *Tabla 7.2R* para una velocidad de 12 m/s y los resultados de la *Tabla 7.3R* para algún ángulo de ataque positivo.
4. Elija un evento de la *Tabla 7.2R* y describa que ocurre con la presión en la superficie del ala conforme el fluido se desplaza por el ala.
5. Analice los resultados de la *Tabla 7.3R* y la gráfica. Determine si existe separación de la capa límite del ala. Indique a que ángulo se presenta y cómo identifica que existe separación de la capa límite.
6. Comentar como influye el ángulo de ataque en la distribución de presiones alrededor del perfil aerodinámico para ángulo de ataque de -10 grados.

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

1. White, F. (2011). Fluid Mechanics. (7th Ed.). New York. McGraw-Hill.
2. Armfield Ltd. Instructions Manual C2 Subsonic wind tunnel (Issue 10, July 1997). England.
3. Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2006). Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones. 1ª. Ed. México: McGraw-Hill Interamericana.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	93/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

10. Anexos

Consideraciones que se asumen en la realización del experimento:

- Flujo incompresible ($Ma < 0.3$).
- Flujo externo.
- La velocidad de flujo libre que se aproxima se supone uniforme y libre de perturbaciones (para propósitos de análisis y diseño).
- Flujo bidimensional.
- Flujo estacionario.
- Fluido con $\mu \neq 0$.

Se establecen dos regiones en el campo de flujo:

- Región cercana a la superficie dónde el efecto de la viscosidad es predominante debido a la condición de no deslizamiento en las paredes sólidas.
- Región lejos de la superficie del cuerpo; denominada también región invícida de flujo de un fluido viscoso. En esta zona el efecto de la viscosidad es despreciable ya que las fuerzas viscosas netas son mínimas en comparación con otras fuerzas debida a la presión y/o a las fuerzas inerciales.

Memoria de cálculo

Densidad del aire a partir de la ecuación de gas ideal, ρ [kg/m³]

$$\rho = \frac{P_{atm}}{RT_{amb}}$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	94/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Medición experimental de presión estática, cilindro.

$$P - P_{\infty} = \rho_{man} g (h_{\infty} - h)$$

Donde

h columna del fluido manométrico a la presión local del punto de medición i .

h_{∞} columna de fluido manométrico a la presión de la corriente libre.

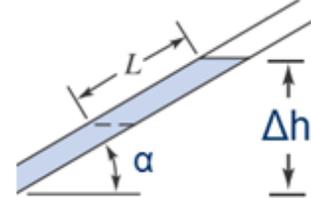
ρ_{man} densidad del fluido manométrico.

g aceleración de la gravedad.

P presión estática local del punto de medición i , cambia a lo largo del cuerpo.

Al tratarse de presiones pequeñas, es necesario inclinar el banco de manómetros en un ángulo $\alpha = 22^\circ$.

$$P - P_{\infty} = \rho_{man} g (L_{\infty} - L) \text{sen} \alpha$$



Donde

L desplazamiento fluido manométrico correspondiente a la presión local.

L_{∞} desplazamiento de fluido manométrico a la presión de la corriente libre.

Cálculo del régimen de flujo en el cilindro

$$Re = \frac{\rho V_{\infty} D_{cil}}{\mu}$$

$$Re_{x, crítico} = 5 \times 10^5$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	95/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Medición experimental de presión estática, P_{man} , perfil aerodinámico.

$$P - P_{atm} = \rho_{man} g (h_{atm} - h)$$

Donde

h columna del fluido manométrico a la presión local del punto de medición i .

h_{atm} columna de fluido manométrico a la presión atmosférica.

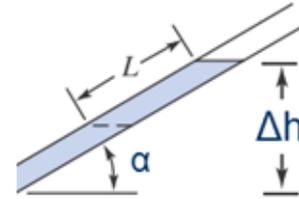
ρ_{man} densidad del fluido manométrico.

g aceleración de la gravedad.

P presión estática local del punto de medición i , cambia a lo largo del cuerpo.

Al tratarse de presiones pequeñas, es necesario inclinar el banco de manómetros en un ángulo $\alpha = 22^\circ$.

$$P - P_{atm} = \rho_{man} g (L_{atm} - L) \text{sen} \alpha$$



Donde

L desplazamiento fluido manométrico a la presión local.

L_{atm} desplazamiento de fluido manométrico a la presión atmosférica.

Cálculo del régimen de flujo en el perfil aerodinámico.

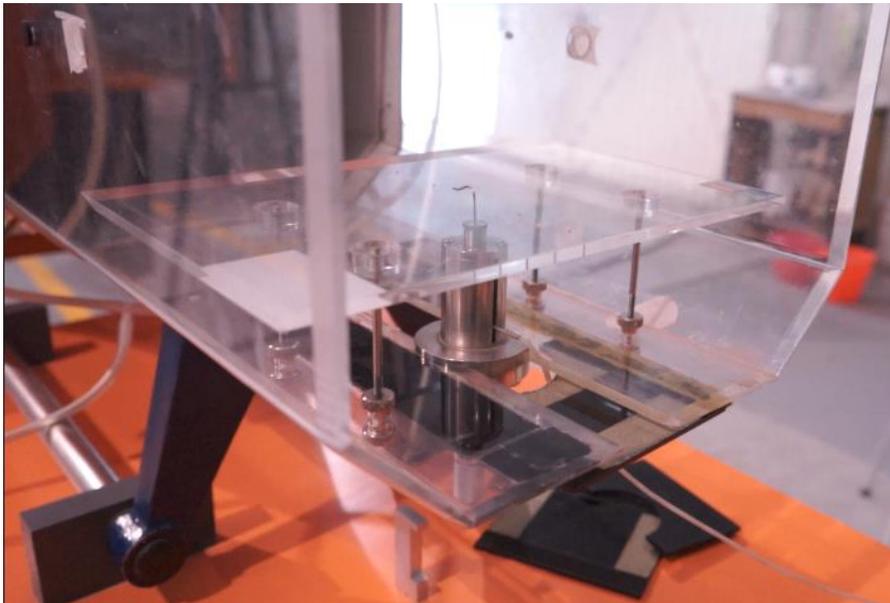
$$Re = \frac{\rho V_{\infty} L_{cuerda}}{\mu}$$

$$Re_{x,critico} = 5 \times 10^5$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	96/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 8

Capa límite



Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir **experimentación** adecuada; analizar e interpretar **datos** y utilizar el **juicio ingenieril** para establecer conclusiones.

AE7. Trabajar **efectivamente en equipos** que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	97/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo	Riesgo asociado
Ventilador del túnel de viento.	Daños físicos en manos y brazos. Preservar una separación de 30 cm entre alumno y conjunto motor eléctrico-ventilador.
Zona de prueba del túnel de viento.	Magulladura en dedos o manos. Precaución al cerrar la zona de prueba del túnel de viento.
Rieles guía del conjunto sección convergente-zona de prueba.	Laceración en dedos. Precaución al abrir y cerrar la zona de prueba del túnel de viento.
Conjunto sección convergente-zona de prueba	Golpes en cráneo y cuerpo. Precaución al abrir la zona de prueba del túnel de viento.

2. Objetivos

- ✓ Obtener el perfil de velocidades sobre una placa plana paralela a un flujo de aire a diferentes números de Reynolds.
- ✓ Determinar experimentalmente el espesor de la capa límite sobre la placa plana.

3. Concepto básicos y definiciones

En 1904 Ludwig Prandtl introdujo la aproximación de capa límite. La idea de Prandtl era dividir el flujo en dos regiones: (1) una región de flujo exterior que es invíscida y/o irrotacional, y (2) una región de flujo interior llamada capa límite: una región de flujo muy delgada cerca de una pared sólida donde las fuerzas viscosas y la rotacionalidad no pueden ignorarse.

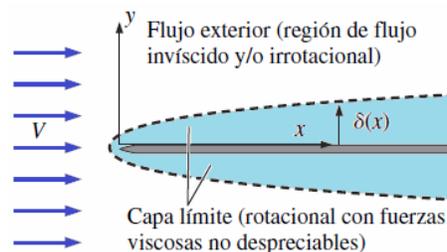


Figura 8.1. Capa límite sobre una placa plana. Figura adaptada de la referencia [1].

1)- En la región de flujo exterior se usa la continuidad y las ecuaciones de Euler para obtener el campo de velocidad de flujo exterior, y la ecuación de Bernoulli para obtener el campo de presión.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	98/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

2)- Dentro de la capa límite se resuelven las ecuaciones de capa límite (que son en sí aproximaciones de la ecuación de Navier-Stokes completa).

El ejemplo más sencillo de capa límite laminar es el correspondiente a la capa que se forma sobre una placa plana semiinfinita (en el eje z) e infinitesimalmente delgada alineada con una corriente libre uniforme de velocidad V_∞ paralela a la placa.

Para el caso de la placa plana $U = \text{constante}$ por lo que $dU/dx = 0$; en otras palabras, se elimina el gradiente de presión en la ecuación de cantidad de movimiento en x . Por esto, la capa límite sobre una placa plana con frecuencia se llama capa límite de gradiente de presión cero.

Las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento en x para la capa límite resultan en:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (\text{Ec. 8.1})$$

Existen cuatro condiciones de frontera necesarias:

$$\begin{array}{ll} u=0 \text{ en } y=0 & u=U \text{ cuando } y \rightarrow \infty \\ v=0 \text{ en } y=0 & u=U \text{ para toda } y \text{ en } x=0 \end{array} \quad (\text{Ec. 8.2})$$

La última de las condiciones de frontera es el perfil de velocidad de partida; se supone que la placa todavía no influye en el flujo en la posición de partida ($x = 0$). Estas ecuaciones y condiciones de frontera parecen suficientemente simples; pero, por desgracia, nunca se ha encontrado alguna solución analítica. Sin embargo, P. R. Heinrich Blasius (1883–1970) resolvió las ecuaciones numéricamente por primera vez en 1908.

La gráfica de la figura 8.2 es el Perfil de Blasius en variables de similitud para la capa límite que crece sobre una placa plana semi-infinita. Los datos experimentales (círculos) son a $Re_x = 3.64 \times 10^5$. Y la imagen de la figura 8.2 corresponde a una visualización experimental de la capa límite laminar sobre una placa plana. El flujo es de izquierda a derecha.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	99/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

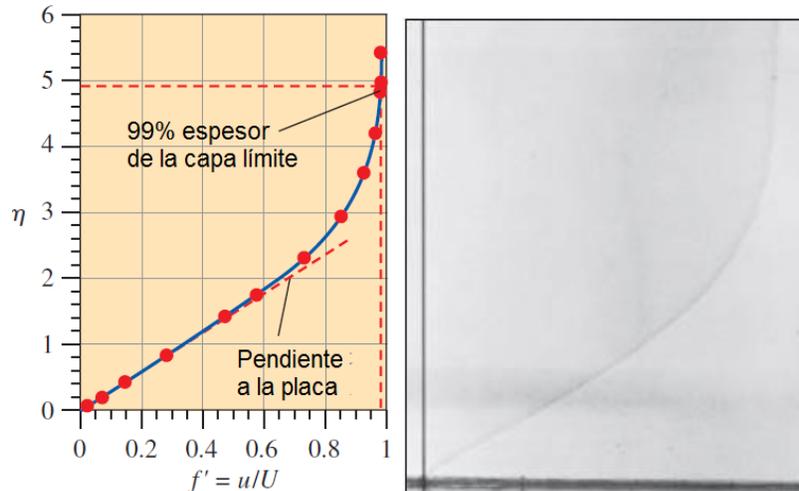


Figura 8.2. Capa límite sobre una placa plana, gráfica y foto de la visualización experimental de la capa límite. Tomado de la referencia [1].

Obtención experimental del perfil de velocidades en la capa límite

El espesor de la capa límite es del orden de milímetros por lo que es necesario utilizar un anemómetro adecuado al espesor de la capa límite y que no altere el flujo. El laboratorio de termofluidos cuenta con anemómetros que cumplen con los requerimientos para la medición en la capa límite tal como anemómetros de hilo caliente y laser doppler, sin embargo, no están disponibles para la docencia. Se utilizará un tubo de Pitot de pequeñas dimensiones (0.5 mm de diámetro) útil para propósitos de enseñanza y una adecuada aproximación a mediciones más exactas de la capa límite.

4. Equipo y Material

- Túnel de viento subsónico.
- Placa plana de acrílico.
- Micro tubo de Pitot.
- Micrómetro.
- Tubo de Prandtl.
- Vernier.
- Escuadra metálica.
- Cinta masking tape.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	100/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

5. Desarrollo

Preparación del equipo.



Figura 8.3. Túnel de viento subsónico del Laboratorio de Termofluidos, FI UNAM.

1. Conecte la clavija de la alimentación general del túnel de viento.
- 1.2 Accione el interruptor general de encendido (ON) del convertidor de voltaje.
- 1.3 Abra la zona de prueba del túnel sujetando los soportes azules y deslice, Figura 8.4.

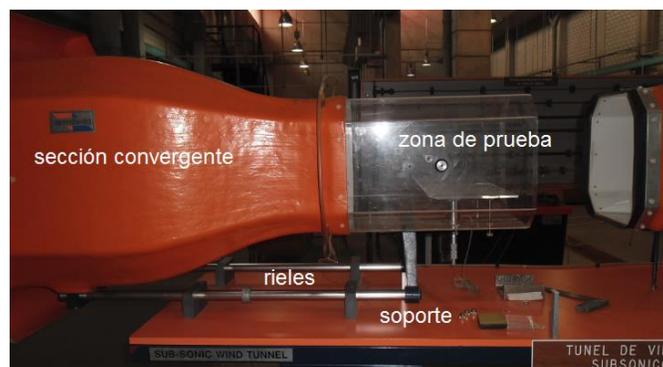


Figura 8.4. Partes del túnel de viento. Elaboración propia, EP, Alejandro Córtes E. 2018.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	101/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1.4 Preparación de la placa plana C2-12, Figura 8.5:

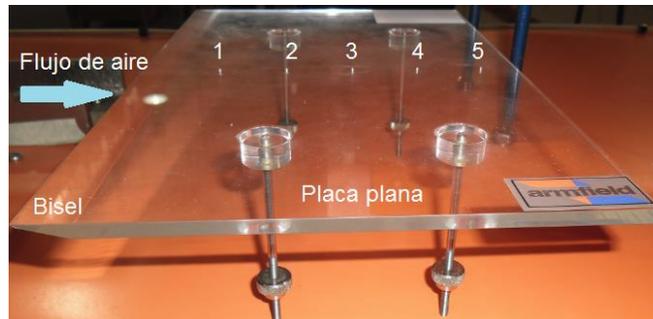


Figura 8.5. Placa plana. E.P, Alejandro Córtes E. 2018.

1.4.1 La placa tiene 5 orificios centrados a lo largo de ésta. Se sugiere utilizar el orificio dos ubicado a 7.5 cm del bisel de la placa. Cubrir los orificios 1, 3, 4 y 5 con cinta masking tape. La numeración de los orificios inicia a partir del bisel de la placa.

1.4.2 Con ayuda del vernier, Figura 8.6, (utilizando las patillas para medir diámetros internos), fije una separación de 5.1 cm entre la placa plana y las tuercas internas de sujeción de los soportes roscados. Esto es crítico para conseguir flujo paralelo entre la placa plana y la corriente de aire libre; cualquier variación en las distancias, provocará separación de la capa límite.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	102/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

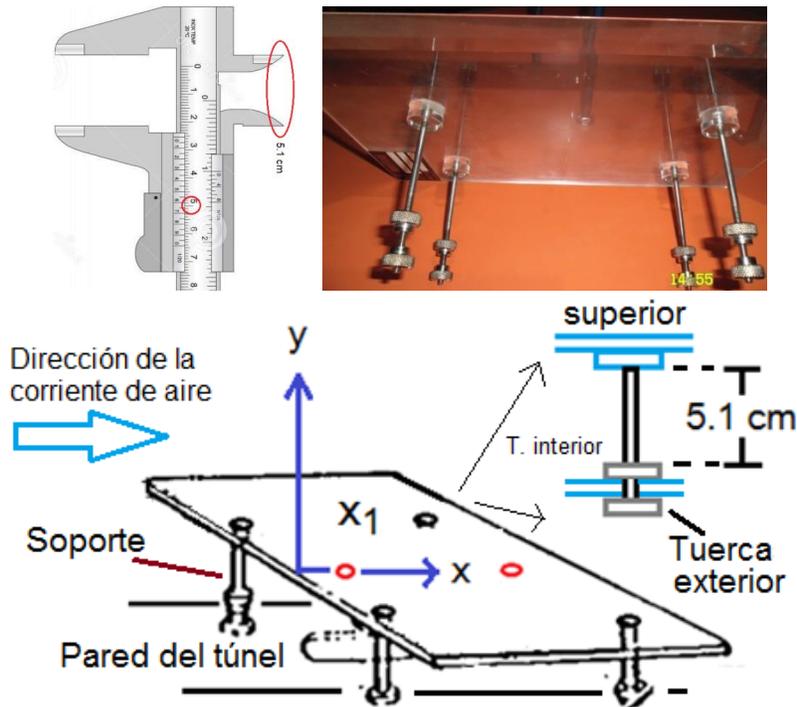


Figura 8.6. Colocación de la placa plana en la zona de prueba. Figura adaptada de la referencia [3].

1.4.3 Coloque la placa plana dentro de la zona de prueba del túnel de tal forma que el bisel de la placa mire al flujo, Figura 8.7.



Figura 8.7. Colocación de la placa plana. FI UNAM.

1.4.4 Ahora coloque las tuercas exteriores en los correspondientes soportes roscados de la placa plana y gírelos realizando un ligero apriete con los dedos, Figura 8.8.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	103/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

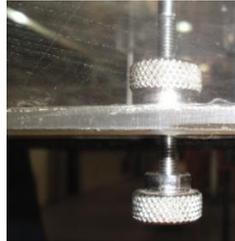


Figura 8.8. Soportes de la placa plana. FI UNAM.

1.4.5 Tome el micrómetro y gire el tambor hasta que se ubique en el eje en 5 cm, Figura 8.9.



Figura 8.9. Partes del micrómetro. E.P, Alejandro Córtes E. 2018.

1.4.6 Deslice el micrómetro por la ranura de la pared inferior de la zona de prueba del túnel hasta ubicar el soporte abajo del segundo orificio de la placa, Figura 8.10.

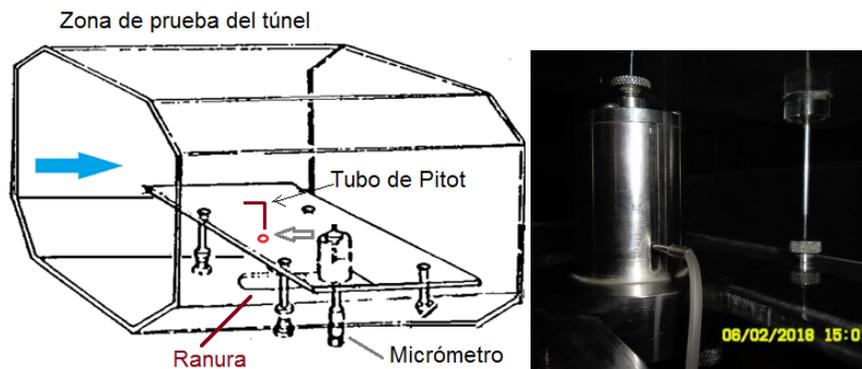


Figura 8.10. Colocación del micrómetro en la zona de prueba. Figura adaptada de la referencia [3].

1.4.7 Gire las dos tuercas de sujeción del micrómetro, Figura 8.11, (ubicadas en la parte inferior) ligeramente para evitar el movimiento del micrómetro de la pared del túnel.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	104/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 8.11. Vista inferior del micrómetro. FI UNAM.

1.4.8 Gire la tuerca-seguro en la dirección contraria a las manecillas del reloj (ubicada en el extremo superior del micrómetro) para colocar el micro tubo de Pitot, Figura 8.12.



Figura 8.12. Colocación del micro tubo de Pitot en el micrómetro. FI UNAM.

1.4.9 Colocar el micro tubo de Pitot; debe deslizarse y asentarse libremente por el orificio de la placa plana y por la tuerca-seguro del micrómetro. Realice esta operación con precaución para evitar doblar el micro tubo de Pitot, Figura 8.13.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	105/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 8.13. Colocación del micro tubo de Pitot en el micrómetro. FI UNAM.

1.4.10 Ahora gire las dos tuercas de sujeción del micrómetro (ubicadas en la parte inferior) firmemente para evitar el movimiento del micrómetro de la pared del túnel.

1.4.11 Deslice el micro tubo de Pitot hasta tocar la placa plana y oriéntelo paralelo al flujo de aire, utilice la escuadra metálica para evitar el movimiento del micro tubo de Pitot y continúe así hasta terminar de fijar el tubo de Pitot con la tuerca-seguro, Figura 8.14.



Figura 8.14. Alineación del tubo de Pitot con la corriente libre. FI UNAM. E.P, Alejandro Córtes E. 2018.

Conecte el extremo libre de la manguera del micrómetro a un tubo del banco de manómetros, L_0 , Figura 8.16.

1.4.12 Cierre la zona de prueba sujetando los soportes azules y deslice.

1.4.13 Coloque el tubo de Prandtl C2-16 en la pared de la zona de prueba del túnel de viento, Figura 8.15. En el extremo del tubo de Prandtl C2-16, utilice únicamente la manguera de la porción perpendicular al tubo (toma de presión estática) y conecte el otro extremo a un tubo del banco de manómetros, L_{est} .

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	106/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

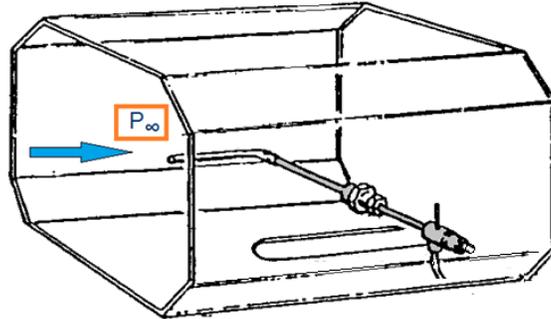


Figura 8.15. Colocación del tubo de Prandtl en la zona de prueba. Figura adaptada de la referencia [3].

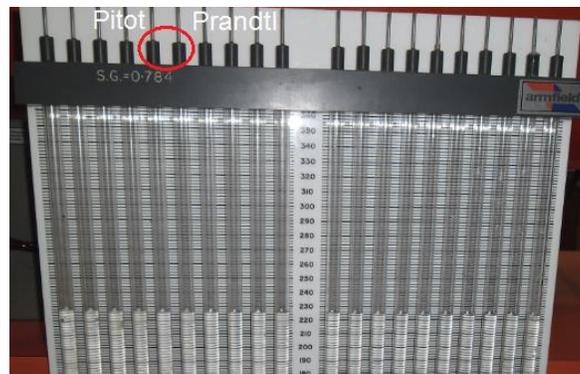


Figura 8.16. Banco de manómetros. FI UNAM. E.P, Alejandro Córtes E. 2018.

1.5 En la posición vertical del banco de manómetros, afloje el seguro e incline el banco de manómetros (sujetándolo) en la ranura indicada con 3, en este punto se tiene una inclinación de 22 grados. Gire firmemente el seguro para fijar la posición inclinada, Figura 8.17.



Figura 8.17. Inclinación del banco de manómetros. FI UNAM.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	107/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- 1.6 Cubra la ranura de la pared inferior de la zona de prueba para evitar la entra de aire del exterior y afecte al flujo. Utilice las tapas de acrílico negras según convenga, Figura 8.18. Finalmente el equipo está listo para realizar la práctica.



Figura 8.18. Tapas de acrílico. FI UNAM.

ACTIVIDAD 1.

Registre la temperatura ambiente y la diferencia de alturas del barómetro:

$$T_{\text{ambiente}} = T_0 = \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$\Delta h_{\text{barómetro}} = \quad [\text{cmHg}]$$

A partir del dato del barómetro se obtiene la presión atmosférica local, P_0 . El barómetro utiliza mercurio como fluido manométrico.

Con la ayuda del vernier mida la distancia, a partir del bisel de la placa, del orificio en la placa donde se colocará el tubo de Pitot, distancia x . Se sugiere utilizar el segundo orificio, $x = 7.5$ cm.

ACTIVIDAD 2. Velocidad de la corriente libre de 12 m/s

- 1.7 Retire el capuchón del anemómetro, Figura 8.19.



Figura 8.19. Anemómetro del túnel de viento. FI UNAM. E.P, Alejandro Córtes E. 2018.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	108/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- 1.8 Encienda el ventilador del túnel presionando el botón verde, Figura 8.20. Ajuste la velocidad de la corriente de aire presionando el botón del cursor superior y suelte hasta llegar al valor deseado.



Figura 8.20. Variador de frecuencia de alimentación del motor eléctrico del ventilador. FI UNAM.

- 1.9 Verifique que la altura del líquido manométrico de las columnas del par de manómetros utilizados sea la misma o ligeramente superior la columna correspondiente al tubo de Prandtl, L_{est} . En caso contrario debe revisar la preparación de la placa plana C2-12, punto 1.4 correspondiente a la preparación del equipo.
- 1.10 Gire (en sentido contrario a las manecillas del reloj) una vuelta completa el tambor del micrómetro, cada vuelta completa se desplaza el micro tubo de Pitot 0.5 mm. El proceso termina hasta que la tuerca-seguro del micrómetro toque la parte inferior de la placa plana; llegue a este evento sin forzar el giro del tambor del micrómetro.
- 1.11 Registre la altura del líquido manométrico de los manómetros correspondientes a L_0 y L_{est} . No se apoye en el banco de manómetro ya que puede deslizarse y llegar a romperse los tubos de vidrio o la placa del banco. Puede auxiliarse de la escuadra metálica para leer la columna de los manómetros. Registre los datos en la Tabla siguiente:

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	109/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

y [mm]	$V_{\infty} = 12 \text{ m/s}$		$V_{\infty} = 16 \text{ m/s}$	
	L_0 [mm]	L_{est} [mm]	L_0 [mm]	L_{est} [mm]
0.0				
0.5				
1.0				
1.5				
2.0				
2.5				
3.0				
3.5				
4.0				
4.5				
5.0				
5.5				
6.0				
6.5				
7.0				
7.5				
8.0				
8.5				
9.0				
9.5				
10.0				
10.5				
11.0				
11.5				
12.0				

Tabla 8.1. Tabla de datos.

- 1.12 Una vez terminada las lecturas; gire el tambor del micrómetro (en sentido a las manecillas del reloj) hasta llevar el micro tubo de Pitot a tocar la placa plana, realice con precaución está acción para evitar doblar el tubo.

ACTIVIDAD 3. Velocidad de la corriente de 16 m/s

- 1.13 Ajuste la velocidad de la corriente de aire presionando el botón del cursor superior y suelte hasta llegar al valor deseado.
- 1.14 Realice los pasos 1.9 hasta 1.11 de la actividad 2 para la velocidad de la corriente de aire actual.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	110/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- 1.15 Disminuya la velocidad de la corriente hasta cero, presionando sostenidamente el curso inferior. Apague el ventilador del túnel presionando el botón rojo.
- 1.16 Desmontar el arreglo experimental:
- Coloque en posición vertical el banco de manómetros, aflojando el seguro y sosteniendo el banco de manómetros.
 - Retire con precaución las mangueras de los manómetros, sujetando la parte metálica y con los dedos retire las mangueras sujetando el extremo de la manguera.
 - Retire el tubo de Prandtl del túnel de viento.
 - Retire las placas negras de la ranura de la pared inferior del túnel.
 - Abra el túnel de viento.
 - Afloje la tuerca-seguro del micrómetro para liberar el micro tubo de Pitot y retírelo con precaución para evitar doblarlo.
 - Afloje las tuercas de sujeción del micrómetro y retírelo.
 - Afloje las tuercas exteriores de los soportes roscados de la placa plana.
 - Retire la placa plana.
 - Finalmente cierre el túnel de viento.

6. Resultados

1. Calcular la densidad del aire, ρ , a condiciones locales del laboratorio.
2. Calcular la velocidad u a través de la capa límite para las dos diferentes velocidades de la corriente libre. Elaborar la siguiente tabla de resultados.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	111/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

y [mm]	$V_{\infty} = 12 \text{ m/s}$		$V_{\infty} = 16 \text{ m/s}$	
	ΔL [mm]	u [m/s]	ΔL [mm]	u [m/s]
0.0				
0.5				
1.0				
1.5				
2.0				
2.5				
3.0				
3.5				
4.0				
4.5				
5.0				
5.5				
6.0				
6.5				
7.0				
7.5				
8.0				
8.5				
9.0				
9.5				
10.0				
10.5				
11.0				
11.5				
12.0				

Tabla 8.2R1. Perfil de velocidades experimental.

3. Graficar el perfil de velocidades de la capa límite. En el eje de las abscisas ubicar los valores de velocidad, u .
4. A partir del perfil de velocidad, indicar el espesor de la capa límite experimental.
5. Calcular el número de Reynolds de la capa límite en el punto de medición e indicar el régimen de flujo de la capa límite.
6. Calcular el espesor teórico de la capa límite.
Presentar los anteriores resultados en la siguiente tabla de resultados.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	112/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

V_{∞} [m/s]	Espesor de la capa límite [mm]		Re_x	Régimen del Flujo
	Experimental	Teórico		
12				
16				

Tabla 8.3R2. Espesor de la capa límite.

7. Calcular el perfil de velocidades adimensional experimental en el punto de medición. Elaborar la siguiente tabla de resultados. El valor de U corresponde a la velocidad u que se consideró para definir el espesor experimental de la capa límite, δ .

y [mm]	$V_{\infty} = 12$ m/s		$V_{\infty} = 16$ m/s	
	y/δ	u/U	y/δ	u/U
0.0				
0.5				
1.0				
1.5				
2.0				
2.5				
3.0				
3.5				
4.0				
4.5				
5.0				
5.5				
6.0				
6.5				
7.0				
7.5				
8.0				
8.5				
9.0				
9.5				
10.0				
10.5				
11.0				
11.5				
12.0				

Tabla 8.4R3. Perfil de velocidades adimensional.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	113/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

8. Graficar el perfil de velocidades adimensional experimental. En las abscisas ubicar (u/U) y en las ordenadas ubicar (y/δ).

7. Cuestionario

1. A partir de las graficas de los perfiles de velocidad, ¿Se verifica que el lugar geométrico que describe el perfil de velocidades experimental corresponde con el perfil de Blasius? Explique.
2. A partir de los resultados obtenidos, ¿Se verifica que entre mayor es el número de Reynolds, más delgada será la capa límite? Explique.
3. A partir del régimen de flujo de la capa límite, comparar el perfil de velocidades experimental adimensional contra el adimensional teórico. Comente el resultado de la comparación.

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

1. Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2006). Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones. 1ª. Ed. México: McGraw-Hill Interamericana.
2. Shames, Irving H. Mecánica de Fluidos (1995). 3ª Ed. Colombia: McGraw-Hill Interamericana. Capítulo 10.7: Ecuaciones de Navier-Stokes simplificadas para una placa de flujo muy delgada, páginas 415 a 418.
3. Armfield Ltd. Instructions Manual C2 Subsonic wind tunnel (Issue 10, July 1997). England.

Fuentes electrónicas

1. Beneyto, Jaime. Notas del curso: Mecánica de Fluidos II (2012). Capítulo 1, sección 1.2: Ecuaciones de la capa límite, páginas 6 a 8. Universidad Politécnica de Madrid. <http://webserver.dmt.upm.es/zope/DMT/docencia/mecanica-de-fluidos-ii/>

10. Anexos

El túnel de viento genera una corriente de aire a una velocidad uniforme en la zona de prueba. La placa plana se orienta de forma paralela a la corriente de tal forma que ésta no genera gradientes de presión. Por consiguiente la placa plana no genera gradientes de presión adversos y por lo

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	114/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

tanto no debe presentarse la separación de la capa límite. De esta forma podemos seguir su desarrollo a lo largo de la placa.

Consideraciones que se asumen en la realización del experimento:

- Flujo incompresible ($Ma < 0.3$).
- Flujo externo.
- La velocidad de flujo libre que se aproxima se supone uniforme y libre de perturbaciones (para propósitos de análisis y diseño).
- Flujo bidimensional.
- Flujo estacionario.
- Fluido con $\mu \neq 0$.

Se establecen dos regiones en el campo de flujo:

- Región cercana a la superficie dónde el efecto de la viscosidad es predominante debido a la condición de no deslizamiento en las paredes sólidas.
- Región lejos de la superficie del cuerpo; denominada también región invícida de flujo de un fluido viscoso. En esta zona el efecto de la viscosidad es despreciable ya que las fuerzas viscosas netas son mínimas en comparación con otras fuerzas debida a la presión y/o a las fuerzas inerciales.

Calculo de la velocidad de la corriente cercana a la superficie de la placa

La velocidad u se puede obtener a partir de la presión dinámica una vez que se conoce la presión de estancamiento y la presión estática de la corriente. Para este propósito emplearíamos un tubo de Prandtl, sin embargo, las características del experimento impiden su utilización y se emplea el arreglo propuesto.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	115/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Arreglo experimental:

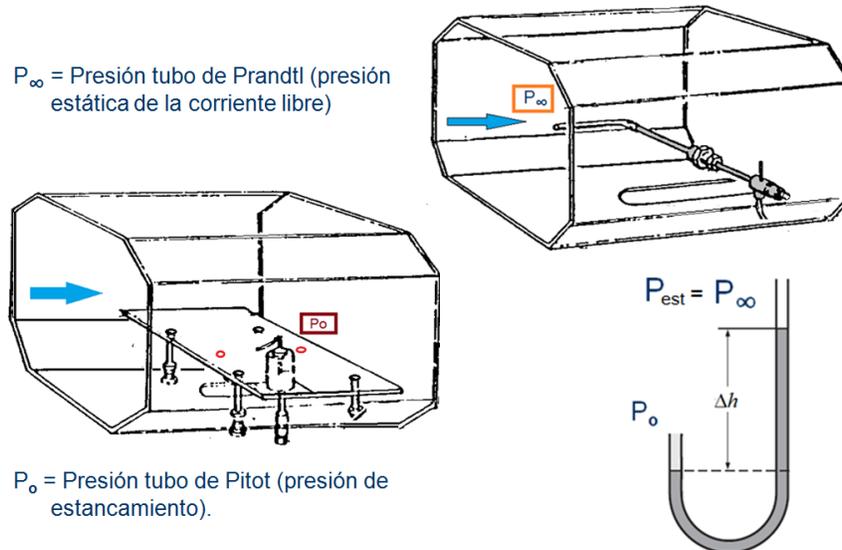


Figura 8.21. Arreglo experimental. Figura adaptada de la referencia [3].

Se considera que la presión estática en la vecindad de la superficie de la placa es la misma que la de la corriente libre porque la placa es paralela a la corriente libre y por lo tanto no genera gradientes de presión.

Para medir la presión de estancamiento se utiliza un tubo de Pitot de 0.5 mm de diámetro colocado en la placa plana. Para medir la presión estática se emplea un tubo de Prandtl lejos del punto de medición de la presión de estancamiento, se considera que la presión estática de la corriente medida en el tubo de Prandtl es la misma que en el punto de medición de la presión estática en la placa.

$$P_{din} = \frac{1}{2} \rho_{aire} u^2$$

$$P_o = P_{est} + P_{din}$$

$$P_{din} = P_o - P_{est}$$

$$P_{din} = \Delta P \quad \text{----- (1)}$$



**Manual de prácticas del
Laboratorio de Mecánica de
Fluidos II**

Código:	MADO-57
Versión:	04
Página	116/151
Sección ISO	8.3
Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021

Facultad de Ingeniería

Área/Departamento:
Laboratorio de Termofluidos

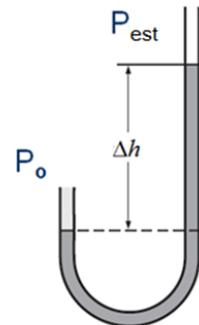
La impresión de este documento es una copia no controlada

$$\Delta P = P_0 - P_{est} = \rho_{man} g \Delta h \quad \text{----- (2)}$$

Igualando (1) y (2):

$$\frac{1}{2} \rho_{aire} u^2 = \rho_{man} g \Delta h$$

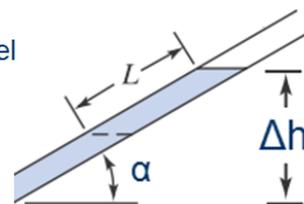
$$u = \sqrt{2 \frac{\rho_{man}}{\rho_{aire}} g \Delta h}$$



$$\rho_{man} = \rho_{agua}$$

Al tratarse de presiones pequeñas, es necesario inclinar el banco de manómetros un ángulo $\alpha = 22^\circ$.

$$\Delta h = \Delta L \text{sen } \alpha = (L_{est} - L_0) \text{sen } \alpha$$



La densidad del aire se obtiene a partir de las condiciones locales:

$$\rho_{aire} = \frac{P_0}{RT_0} \quad [\text{kg/m}^3]$$

El número de Reynolds asociado a la distancia x desde el borde frontal a la sección considerada:

$$\text{Re} = \frac{\rho U_\infty x}{\mu}$$

Donde

- U_∞ velocidad de la corriente libre.
- x distancia a partir del borde frontal
- ρ densidad del aire a la temperatura y presión local.
- μ viscosidad dinámica.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	117/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Número de Reynolds crítico

Para una placa plana lisa con flujo libre de perturbaciones (ruido acústico, vibraciones) y flujo uniforme, el proceso de transición comienza en un número de Reynolds crítico:

$$Re_x \approx 1 \times 10^5 \text{ y continua hasta } Re_{x, \text{transición}} \approx 3 \times 10^6$$

Sin embargo, en análisis de ingeniería, un valor generalmente aceptado para el número de Reynolds crítico es:

$$Re_{x, \text{crítico}} = 5 \times 10^5$$

Para determinar si una capa límite tiene más probabilidad de ser laminar ($Re_x < Re_{x, \text{crítico}}$) o turbulenta ($Re_x > Re_{x, \text{crítico}}$)

Espesor de la capa límite

Para una capa límite laminar, el espesor teórico es:

$$\delta = \frac{4.91x}{\sqrt{Re_x}}$$

Para una capa límite turbulenta, el espesor teórico es:

$$\delta = \frac{0.38x}{(Re)^{\frac{1}{7}}}$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	118/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Perfil de velocidad para flujo laminar y turbulento

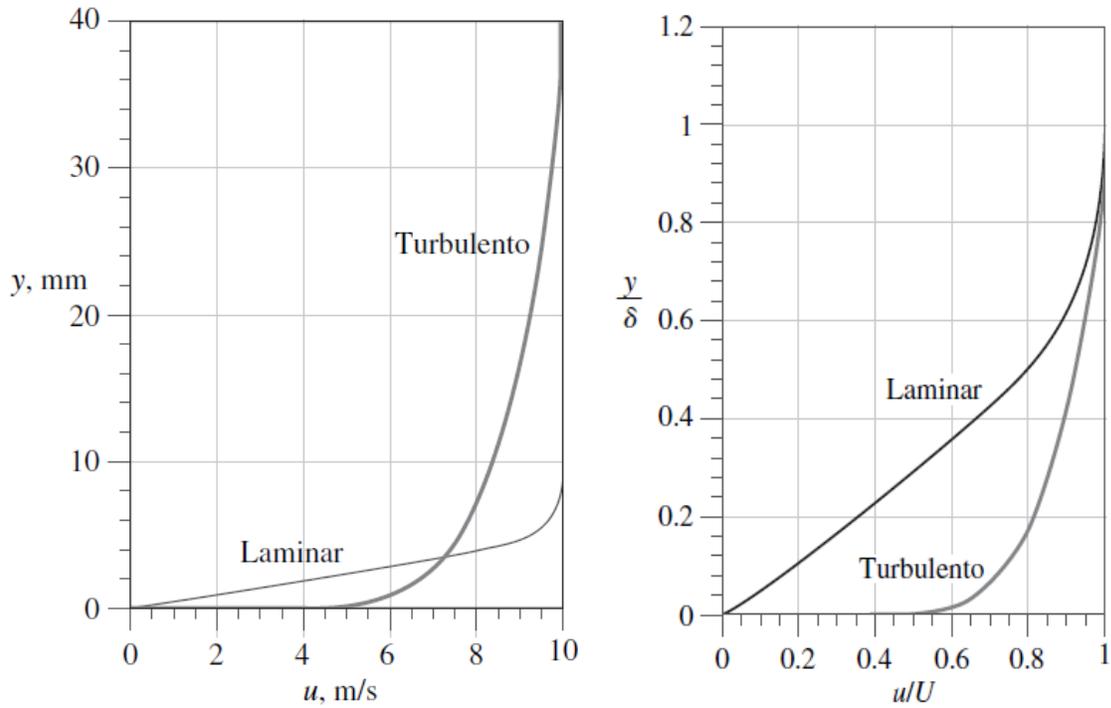
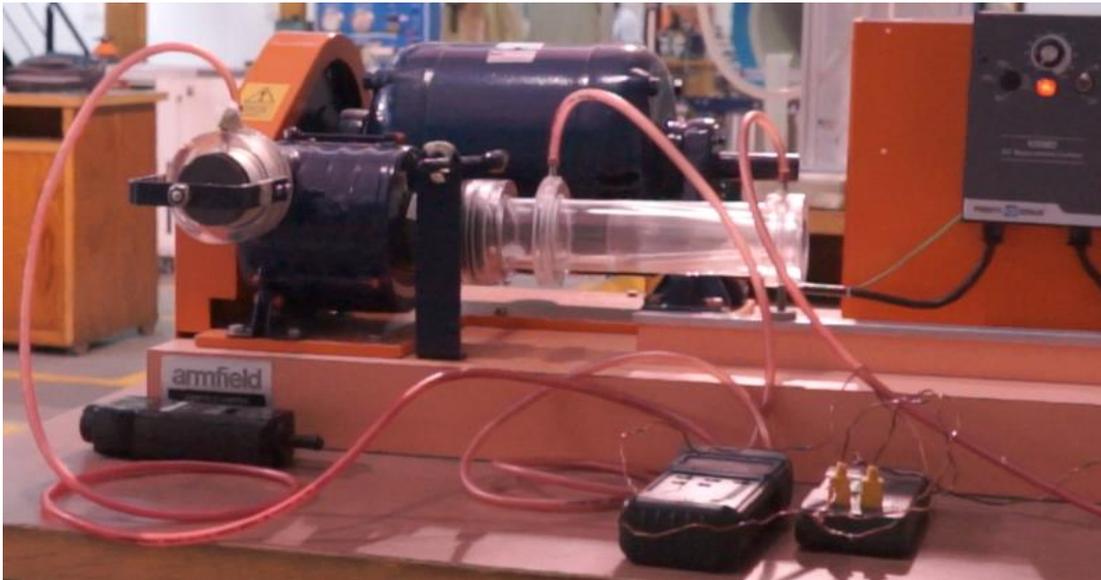


Figura 8.22. Perfil de velocidad de la capa límite de la referencia [1].

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	119/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 9

Curvas características



Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir **experimentación** adecuada; analizar e interpretar **datos** y utilizar el **juicio ingenieril** para establecer conclusiones.

AE7. **Trabajar efectivamente en equipos** que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	120/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

Fuentes de riesgos	Riesgo asociado
Transmisión mecánica motor eléctrico compresor.	Daños físicos en manos y brazos. Preservar una separación de 30 cm entre alumno y conjunto motor eléctrico-transmisión mecánica.
Eje del compresor.	Daño en dedos o manos. Evitar introducir los dedos en el acceso al eje del compresor.
Medición de rpm del eje del compresor.	Cortaduras en dedos. Precaución en la medición de las rpm del eje compresor.
Manómetro inclinado	Irritación de las vías respiratorias. Puede presentarse succión del líquido manométrico hacia el compresor y descarga del mismo al exterior.

2. Objetivo

- ✓ Obtener las curvas características o de rendimiento de un compresor centrífugo.

3. Concepto básicos y definiciones

Las curvas características son aquellas gráficas que se obtienen experimentalmente en un banco de pruebas, en dónde se ensaya una máquina en la cual se mantiene fijo el número de revoluciones y se modifica el gasto (másico o volumétrico).

Dichas gráficas presentan el comportamiento de la carga útil, H_u , o presión total útil, Δp_{tot} , (para gases), la potencia de accionamiento, \dot{W}_a , y la eficiencia total, η_{tot} , como función del gasto.

Máquina: Transformador de energía. Absorbe energía de una clase y restituye energía de otra clase o de la misma clase pero transformada.

Máquinas de fluido. En estas, el fluido suministra la energía que absorbe la máquina o el fluido es el receptor de energía suministrada por la máquina. Las máquinas de fluido se clasifican en máquinas hidráulicas y máquinas térmicas.

Una máquina hidráulica es aquella en que el fluido, que intercambia su energía, no varía significativamente su densidad en su paso a través de la máquina, por lo cual en el diseño y análisis se considera que $\rho = \text{cte}$.

Una máquina térmica es aquella en que el fluido, en su paso por la máquina, varía significativamente su densidad y volumen específico, por lo que en su análisis y diseño no es aceptable suponerlos constantes [4].

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	121/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

En un máquina de fluido en dónde el fluido es un gas, este puede ser muy compresible y por consiguiente su volumen específico puede varía grandemente.

Si el incremento de presión es pequeño (inferior a 100 mbar o la relación de compresión $r_c = 1.1$) el análisis de la máquina resulta satisfactorio bajo la hipótesis de que el volumen específico del gas es constante. En este caso la máquina es una máquina hidráulica.

Si el incremento de presión es grande (superior a 100 mbar) no puede despreciarse la variación del volumen específico del gas en su paso por la máquina. En este caso la máquina es una máquina térmica.

En una turbomáquina el intercambio de energía es consecuencia de la variación del momento angular del fluido en su paso por el elemento intercambiador de energía, el rodete, dotado de movimiento rotativo. La ecuación de Euler es la ecuación fundamental para el estudio de estas máquinas. Atendiendo a la dirección del flujo, será centrífugo (radial) si la trayectoria que sigue el fluido es principalmente normal al eje de rotación.

Un compresor centrífugo sería una máquina térmica que absorbe energía mecánica y restituye energía al fluido que lo atraviesa. Un compresor es capaz de comprimir el gas a presiones muy altas por reducción de su volumen.

4. Equipo y Material

- Banco de flujo compresible.
- Venturi de medición de gasto C1-20.
- Pesas de masa conocida.
- Tacómetro.
- Termómetro digital.
- Manómetro diferencial digital.
- Cinta adhesiva masking tape.

5. Desarrollo

EXPERIMENTO 1. Curvas características de un compresor centrífugo.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	122/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

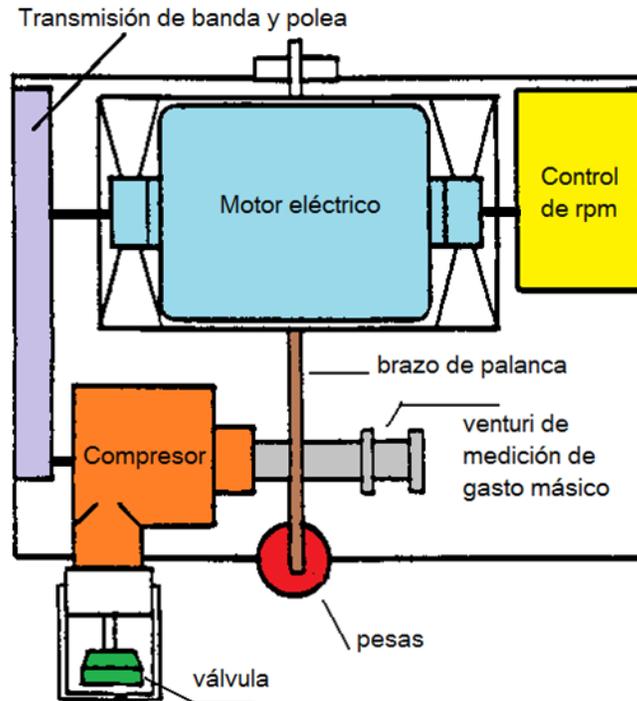


Figura 9.1. Banco de pruebas del compresor centrífugo. Adaptada de la referencia [5].

- I.1 Conecte la clavija de la alimentación general del equipo.
- I.2 Conecte el venturi de medición a la entrada del compresor, Figura 9.2.
- I.3 Conecte un extremo de las mangueras flexibles a la toma de presión (1), (2) y (3) del compresor, Figura 9.2; el otro extremo se conectan a lo manómetros diferenciales correspondientes, como se indica a continuación:

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	123/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

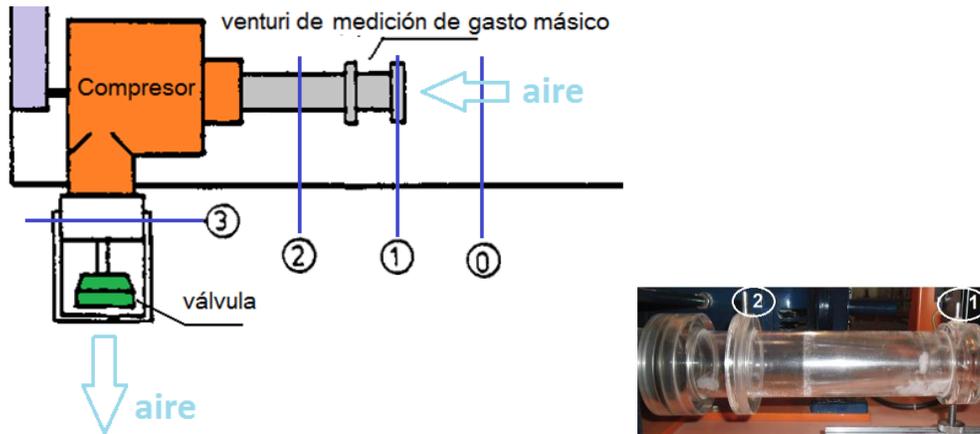


Figura 9.2. Compresor centrífugo y tubo Venturi de medición de gasto. Adaptada de la referencia [5].

I.3.a) Utilice dos mangueras para conectar las tomas de presión del compresor al manómetro diferencial. La lectura de mayor presión (punto de descarga del compresor, 3) se debe conectar a la toma de presión izquierda del manómetro, rotulada como P_1 . La toma de presión de admisión al compresor (punto de medición 2) se debe conectar a la toma de presión P_2 del manómetro. De esta forma, el manómetro diferencial digital indicará una diferencia positiva, Figura 9.3.



Figura 9.3. . Manómetro diferencial digital.

I.3.b) Conecte un extremo de una manguera en la toma de presión (1) del venturi de medición y el otro extremo a la toma de presión del manómetro inclinado, Figura 9.4; el manómetro se debe colocar en la posición vertical.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	124/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

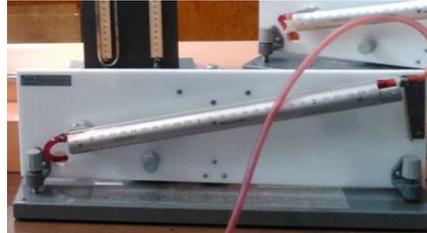


Figura 9.4. Manómetro diferencial Tipo 5.

- I.4 Cierre la válvula de descarga del compresor, Figura 9.5. Asegúrese que la perilla del control de *rpm* se encuentre totalmente en el extremo izquierdo, si no es así, gírela hasta está posición. Accione el interruptor de encendido.

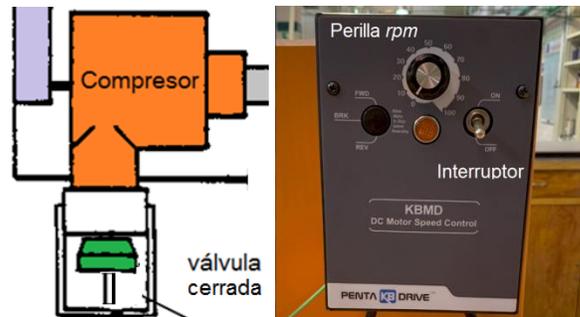


Figura 9.5. Válvula de descarga del compresor, adaptada de la referencia [5]. Control de encendido y de rpm.

De esta forma ya está preparado el equipo para la realización de la práctica.

ACTIVIDAD 1.

Registre la temperatura ambiente y la diferencia de alturas del barómetro:

$$T_{\text{ambiente}} = T_0 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$\Delta h_{\text{barómetro}} = \quad [\text{cmHg}]$$

A partir del dato del barómetro se obtiene la presión atmosférica local, P_0 . El barómetro utiliza mercurio como fluido manométrico.

ACTIVIDAD 2.

- I.5 Acerque con precaución el tacómetro (modalidad de medición por contacto) al eje del rotor del compresor, presione el botón blanco del tacómetro para iniciar la medición de las rpm, la pantalla del mismo debe indicar el valor actual.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	125/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- I.6 Gire la perilla del control de *rpm* hasta que el tacómetro registre aproximadamente 10,200 *rpm*, retire el tacómetro una vez obtenido las *rpm* deseadas. Anote el valor final de *rpm*.
- I.7 Abra la válvula de descarga del compresor (desde válvula completamente cerrada hasta válvula completamente abierta), pasando a los valores de presión $P_0 - P_1$ designado.
- I.8 Coloque las pesas de masa conocida, Figura 9.6, requeridas para equilibrar el brazo de palanca, comience agregando las pesas de mayor masa y disminuya gradualmente.

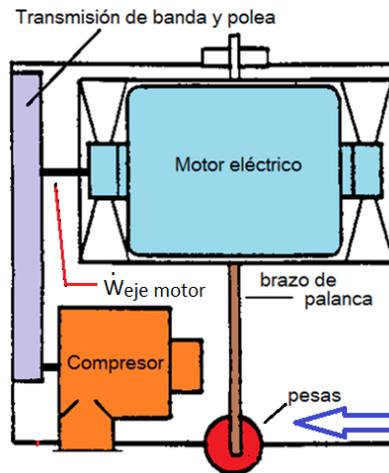


Figura 9.6. Colocación de las pesas de masa conocida en el brazo de palanca. Adaptada de la referencia [5].

- I.9 Llene la tabla de datos siguiente:

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	126/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla de datos

Manómetro diferencial en posición vertical (medición de gasto).

Evento	$(P_0 - P_1)$ [kPa]	kLectura	$(P_3 - P_2)$ [bar]	m _{pesas} [gr]
1	0	1		
2	0.1			
3	0.2			
4	0.3			
5	0.4			
6	0.5			
7	0.6			
8	0.7			
9	0.8			
10	0.9			
11	1.0			

Válvula cerrada

Válvula abierta

Tabla 9.1.

ACTIVIDAD 3.

I.10 Sin apagar el equipo, cierre la válvula casi totalmente (evento 2) y registre las temperaturas en las tomas de presión de la admisión y descarga del compresor, introduciendo el termopar del termómetro digital.

I.11 Ahora abra la válvula totalmente y nuevamente registre las temperaturas en las tomas de presión de la admisión y descarga del compresor.

Tabla de datos Registro de temperaturas

Evento	$(P_0 - P_1)$ [kPa]	T_2 [°C]	T_3 [°C]	$(P_3 - P_2)$ [bar]
2	0.1			
11	1.0			

Tabla 9.2

6. Resultados

Realice los cálculos necesarios para llenar la siguiente Tabla de resultados.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	127/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Evento	$(P_0 - P_1) \cdot k_{Lec}$ [kPa]	\dot{m} [Kg/s]	Δp_{tot} [kPa]	\dot{W}_u [W]	\dot{W}_a [W]	η compresor
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						

Tabla 9.3.

Obtenga las siguientes gráficas (curvas características del compresor):

- 1.- Graficar Δp_{tot} contra \dot{m} (gasto másico).
- 2.- Graficar \dot{W}_a contra \dot{m} (gasto másico).
- 3.- Graficar η compresor contra \dot{m} (gasto másico).

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	128/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

7. Cuestionario

1.- De acuerdo a la actividad 3, calcule el incremento de temperatura del aire entre la admisión y la descarga. ¿En qué evento es más grande el incremento de temperaturas? ¿El mayor incremento de temperatura debería corresponder a la mayor diferencia de presión del compresor? Justifique su respuesta.

2.- De acuerdo a la actividad 3, Compare la temperatura del aire en la admisión con la temperatura en la descarga, ¿Es apreciable el cambio de temperatura del aire en su paso por el compresor? ¿Puede considerarse el análisis del compresor como flujo incompresible?

3.- Indicar las condiciones de \dot{m} , Δp_{tot} y \dot{W}_a para el punto de máxima eficiencia de la máquina (punto de rendimiento máximo de la máquina). ¿Es deseable operar la máquina en este punto? Justifique su respuesta.

4.- Indique los valores de Δp_{tot} que superan los 100 mbar. De acuerdo a la frecuencia de eventos que superan la condición anterior, ¿Se justificaría el análisis de la máquina como máquina de flujo compresible? Justifique su respuesta.

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

1. Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2006). Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones. 1ª. Ed. México: McGraw-Hill Interamericana.
2. Franzini, Joseph B. y Finnemore E. John. (1999). Mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería. 9ª Ed. España: McGraw-Hill.
3. Fox, R. W. y Mc Donald A.T. Introducción a la mecánica de fluidos (1995). 4ª Ed. México: McGraw-Hill.
4. Mataix, Claudio. (1982). Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. 2ª Ed. México: Harla.
5. Armfield Ltd. Instruction Manual C1 Compressible Flow & multi-stage compressor bench (Issue 6, sept. 1996). England.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	129/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

10. Anexos

Arreglo experimental:

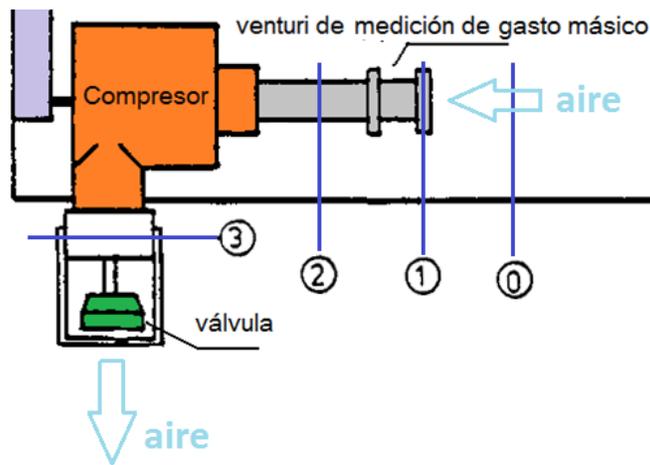


Figura 9.7. Arreglo compresor-venturi. Adaptada de la referencia [5].

En un venturi, Figura 9.7 y 9.8, el gasto másico se puede obtener a partir de las diferencias de presión entre el punto (0) y (1). Consideraciones:

- Flujo sin fricción, incompresible, estacionario, a lo largo de una línea de corriente.
- La suma de la energía cinética, la potencial y de flujo de una partícula de fluido es constante a lo largo de una línea de corriente en el transcurso del flujo estacionario.

Aplicando entre los puntos (0) y (1), $\rho = \rho_0 = \rho_1$ entonces:

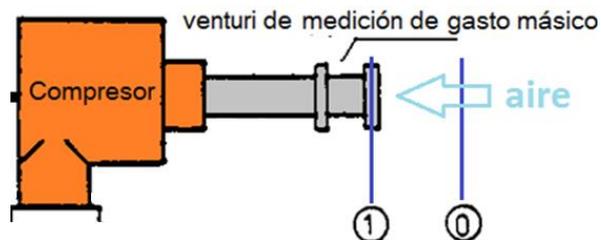


Figura 9.8. Cálculo del gasto másico utilizando un venturi. Adaptada de la referencia [5].

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	130/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$\frac{P_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} + gz_0 = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1$$

$V \approx 0$ y despreciando los efectos de la altura, $z_0 = z_1$:

$$\frac{P_0}{\rho} = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2}$$

Despejando V_1 :

$$V_1^2 = 2 \frac{(P_0 - P_1)}{\rho}$$

$$m = \rho_1 A_1 V_1 = \rho A_1 \sqrt{\frac{2(P_0 - P_1)}{\rho}} \quad [\text{kg/s}]$$

Introduciendo un coeficiente de corrección, C_t , que multiplica a $(P_0 - P_1)$ se obtienen valores más exactos de V afectada por los supuestos aplicados inicialmente:

$$m = \rho A_1 \sqrt{\frac{2(P_0 - P_1)C_t}{\rho}} \quad \longrightarrow \quad m = A_1 \sqrt{2\rho(P_0 - P_1)C_t} \quad [\text{kg/s}]$$

C_t depende del número de Reynolds en '1', de la diferencia de presiones ($p_0 - p_1$) y del tipo de Venturi empleado. Existen tablas (del manual) que muestra el valor de C_t en función de los rangos de medición de la presión ($p_0 - p_1$) y del diámetro de la garganta del Venturi (28.6 mm). Sin embargo, se puede emplear un valor promedio:

$$C_t = 0.9$$

La diferencia de presión se mide con un manómetro inclinado que involucra una constante de lectura indicada en el manómetro:

$$(P_0 - P_1) = (P_0 - P_1)k_{Lec}$$

La densidad del aire se obtiene a partir de las condiciones locales:

$$\rho = \frac{P_0}{RT_0} \quad [\text{kg/m}^3]$$



**Manual de prácticas del
Laboratorio de Mecánica de
Fluidos II**

Código:	MADO-57
Versión:	04
Página	131/151
Sección ISO	8.3
Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021

Facultad de Ingeniería

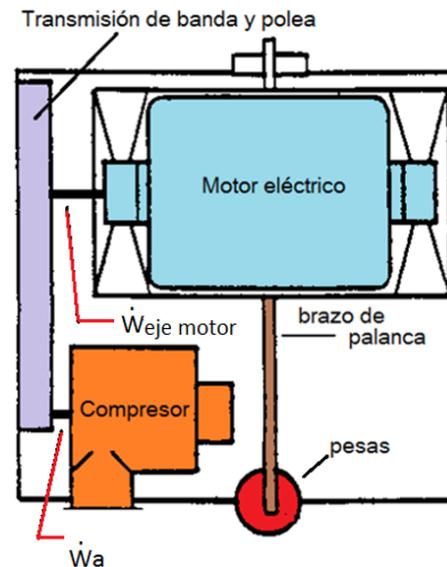
Área/Departamento:
Laboratorio de Termofluidos

La impresión de este documento es una copia no controlada

Cálculo de la potencia de accionamiento, W_a .

En realidad se obtuvo la potencia de la flecha del motor eléctrico midiendo el par de reacción en el estator del motor eléctrico.

- Se considera que la potencia en la flecha del compresor (W_a) es la misma que la potencia en el eje del motor ($W_{\text{eje motor}}$, ya que se tiene pérdida mínima en la transmisión banda-polea).
- La relación entre poleas es de 4:1. Es decir que la polea del compresor gira 4 veces más rápido que la polea del motor.
- La potencia de accionamiento del compresor se obtiene midiendo las revoluciones de la flecha del compresor y midiendo indirectamente el par de torsión en la flecha del motor eléctrico (midiendo el par de reacción con un motor de accionamiento basculante).



Cálculo de la potencia de accionamiento, W_a .

$$N_{\text{motor}} = \frac{N_{\text{compresor}}}{4}$$

(El banco de pruebas está adaptado para calcular la potencia del eje del motor por tanto T y ω son del motor eléctrico)

$$\dot{W}_a \approx \dot{W}_{\text{eje_motor}} = T_m \omega_m = Fd \omega_m \quad [\text{W}]$$

Dónde: T_m es el par de torsión (aplicado al eje del motor) a partir del par de reacción obtenido de la aplicación de una fuerza a un brazo de palanca fijo. La fuerza aplicada se determina por una serie de pesas conocidas.

$$F = mg \quad [\text{N}]$$

Dónde:

$m \Rightarrow$ pesas de masa conocida, kg (1X5g – nylon-, 1X10g, 1X20g, 8X50g)

g = aceleración de la gravedad = 9.81 m/s²

Brazo de palanca, $d = 0.342$ m

ω_m = velocidad angular del motor en rad/seg

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	132/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$\omega_m = \frac{2\pi N_m}{60} \quad [\text{rad/seg}]$$

$$N_m = \# \text{ de rpm del motor eléctrico} = N_{\text{compresor}} / 4$$

Cálculo de la eficiencia

La eficiencia del compresor se define como la relación entre la potencia útil y la potencia de accionamiento.

La potencia útil es el incremento de potencia que experimenta el fluido en el compresor (después de pérdidas volumétricas, hidráulicas y mecánicas). Será la potencia invertida en impulsar el gasto másico útil a la presión total útil (o carga útil, H).

$$\eta_{\text{compresor}} = \frac{W_u}{W_a}$$

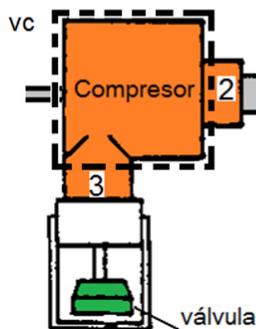
Esta eficiencia toma en cuenta todas las pérdidas en el compresor:

- Pérdidas mecánicas: pérdidas por rozamiento en cojinetes y en sellos, por accionamiento de accesorios.
- Pérdidas hidráulicas: pérdidas por rozamiento de superficie y de forma.
- Pérdidas volumétricas: pérdidas por caudal al exterior y por recirculación.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	133/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Cálculo de la potencia útil. Análisis de la energía suministrada al fluido de trabajo.

- Máquina de fluido.
- Finalidad de la máquina: incrementar la presión.
- Fluido de trabajo: aire
- Dependiendo del incremento de presión, el aire puede experimentar efectos de compresibilidad en su paso por la máquina. Si fuera agua, no existe efectos de compresibilidad del fluido.



Análisis de la operación de la máquina (no diseño), por lo que el volumen de control es el que se muestra. Consideraciones:

- Flujo estable.
- Sólo entrada de potencia en la flecha.
- Sólo una entrada (2) y una salida (3).
- Sin transferencia de calor hacia el sistema, sólo salida de calor del sistema.
- Irreversibilidades presentes en el proceso: fricción y transferencia de calor.

Ecuación de la energía en sistemas de flujo estacionario.

$$\dot{Q} + \dot{W}_{flecha} = \dot{m} \left(u_3 + \frac{P_3}{\rho_3} + \frac{V_3^2}{2} + gz_3 \right) - \dot{m} \left(u_2 + \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right)$$

Esta ecuación es aplicable a líquidos, gases y vapores, y tanto a fluidos ideales como a fluidos reales con fricción. El término P/ρ representa energía contenida en el fluido por unidad de peso de fluido, debido a la presión a que está sometida el fluido. En condiciones adecuadas, esta presión se liberará y se transformará en otras formas de energía, es decir energía cinética, potencial o interna. De la misma manera que estas últimas formas de energía se conviertan en energía de presión.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	134/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Flujo incompresible. (Máquina hidráulica)

De acuerdo a la ΔP registrada por la máquina, se puede analizar al fluido como incompresible. Por lo que la energía que recibe el fluido de la flecha será:

$$W_{flecha} = m \left(\frac{P_3}{\rho_3} + \frac{V_3^2}{2} + gz_3 \right) - m \left(\frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) + m[u_3 - u_2 - (-q_{salida})]$$

Como $\rho = \rho_3 = \rho_2$

Energía mecánica.

Energía térmica.

$$W_{flecha} = m \left(\frac{P_3}{\rho} + \frac{V_3^2}{2} + gz_3 \right) - m \left(\frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) + m[u_3 - u_2 - (-q_{salida})]$$

La **energía mecánica** se puede definir como la forma de energía que se puede convertir completamente en trabajo mecánico de modo directo mediante un dispositivo mecánico.

La energía interna producida por fricción es transmitida en forma de calor por conducción a partes de la máquina y por convección y radiación al exterior.

$$W_{flecha} = m \left(\frac{P_3}{\rho} + \frac{V_3^2}{2} + gz_3 \right) - m \left(\frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) + m[u_3 - u_2 - (-q_{salida})]$$

El término enmarcado es energía térmica. ¿Cómo surge este tipo de energía?
¿Este tipo de energía es mayor que la energía mecánica?

Si el fluido es incompresible, el incremento de energía interna es despreciable al igual que el calor. El ligero incremento de energía interna produce un ligero cambio en la temperatura del fluido.

Si se considera al flujo como incompresible, no existe variaciones reversibles entre energía mecánica e interna durante el procesos de compresión.

Solo existen pérdidas irreversibles como resultado de la disipación viscosa que convierte energía mecánica en energía interna, no recuperable, y transferencia de calor.

Por lo que la conversión de energía mecánica a térmica durante el procesos de compresión se considera una **PÉRDIDA DE ENERGÍA MECÁNICA**.



**Manual de prácticas del
Laboratorio de Mecánica de
Fluidos II**

Código:	MADO-57
Versión:	04
Página	135/151
Sección ISO	8.3
Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021

Facultad de Ingeniería

Área/Departamento:
Laboratorio de Termofluidos

La impresión de este documento es una copia no controlada

$$W_{flecha} = \dot{m} \left(\frac{P_3}{\rho} + \frac{V_3^2}{2} + gz_3 \right) - \dot{m} \left(\frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) + \dot{m} [u_3 - u_2 - (-q_{salida})]$$

$$\dot{W}_{flecha} = \dot{m} \left(\frac{P_3}{\rho_3} + \frac{V_3^2}{2} + gz_3 \right) - \dot{m} \left(\frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) + \dot{E}_{mec. pérdida}$$

Debido a factores irreversibles como la fricción y la transferencia de calor, el término $(u_3 - u_2 + q_{salida})$ es diferente de cero y se debe a la conversión irreversible de energía mecánica en energía interna y calor.

$\dot{E}_{mec. pérdida}$

Es la pérdida total de potencia mecánica: pérdida por conversión irreversible de energía mecánica en energía térmica + pérdidas en el interior de la máquina (recirculación del fluido en el impulsor, de impacto por desacoplamiento entre la velocidad relativa y el álabe del impulsor y otras).

$$\dot{W}_{flecha} - \dot{E}_{mec. pérdida} = \dot{m} \left(\frac{P_3}{\rho} + \frac{V_3^2}{2} + gz_3 \right) - \dot{m} \left(\frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right)$$

$$\dot{W}_{útil} = \dot{m} \left(\frac{P_3}{\rho} + \frac{V_3^2}{2} + gz_3 \right) - \dot{m} \left(\frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right)$$

Nota: También llamada potencia hidráulica.

$$\frac{\dot{W}_{útil}}{\rho g} = H_{útil} = \left(\frac{P_3}{\rho g} + \frac{V_3^2}{2g} + z_3 \right) - \left(\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \right)$$

multiplicando por ρg , agrupando términos:

$$H_{útil} \rho g = P_3 - P_2 + \frac{\rho}{2} (V_3^2 - V_2^2) + \rho g (z_3 - z_2) = \Delta p_{útil}$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	136/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Cálculo de la presión total útil, Δp_{tot}

$$\Delta p_{\text{útil}} = P_3 - P_2 + \frac{\rho}{2} (V_3^2 - V_2^2) + \rho g (z_3 - z_2)$$

El término $z_3 - z_2$ Puede despreciarse

$$\Delta p_{\text{útil}} = \Delta p_{\text{tot}} = (P_3 - P_2) \quad [\text{Pa}]$$

Cálculo de la potencia útil, W_u

La potencia útil, W_u que se entrega al fluido es proporcional a la presión útil:

$$W_u = \frac{\dot{m}}{\rho_0} \Delta p_{\text{tot}} \quad [\text{W}]$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	137/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 10

Perfiles de velocidad



Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir **experimentación** adecuada; analizar e interpretar **datos** y utilizar el **juicio ingenieril** para establecer conclusiones.

AE7. Trabajar **efectivamente en equipos** que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	138/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

Peligro	Riesgo asociado
Conexión eléctrica.	Posibles quemaduras. Evitar fugas de agua que pueda entrar en contacto con la toma eléctrica del equipo.
Agua del tanque volumétrico del equipo	Infección gastro intestinal. Evitar ingerir por accidente el agua que circula por el equipo.

2. Objetivos de aprendizaje

- ✓ Obtener los perfiles de velocidad que se desarrollan en una tubería para flujo laminar y flujo turbulento.
- ✓ Comparar los perfiles de velocidad experimentales contra los teóricos.

3. Conceptos básicos y definiciones

Los flujos completamente limitados por superficies sólidas reciben el nombre de flujos internos como es el caso de flujo a través de tuberías. Los flujos internos pueden ser laminares o turbulentos. Algunos casos de flujo laminar pueden resolverse analíticamente. En el caso de flujo turbulento, no son posibles las soluciones analíticas y se recurre a teorías semiempíricas y en datos experimentales.

El conocimiento del campo de velocidad permite el cálculo de los esfuerzos de corte, la caída de presión y el flujo volumétrico. Si el análisis lo permite, se puede tener una solución analítica integrando algunas ecuaciones diferenciales del movimiento para el flujo de un fluido viscoso, las ecuaciones de Navier-Stokes.

Obtención analítica del perfil de velocidades en un tubo para flujo laminar

Puesto que deseamos conocer el campo de velocidades, es necesario utilizar las ecuaciones diferenciales de continuidad y de Navier-Stokes. Se analizará el movimiento de un fluido en un tramo largo de un tubo de sección circular constante (radio R) en reposo por el que circula un gasto volumétrico (Q) de agua aplicando un gradiente de presión motriz constante en la dirección axial z inducido por una bomba, Figura 10.1.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	139/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

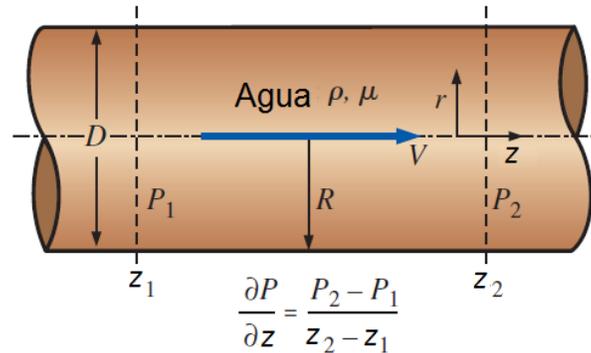


Figura 10.1. Flujo de agua en una tubería circular. Adaptada de la referencia [1].

El equipo y su operación permiten establecer las siguientes suposiciones del flujo por la tubería:

- 1) El flujo es laminar.
- 2) El fluido es incompresible y newtoniano con propiedades constantes.
- 3) La tubería es muy larga con respecto a su radio por lo que se considera que la longitud es infinita en z .
- 4) El flujo es estacionario por lo que todas las derivadas parciales respecto al tiempo son cero.
- 5) Se tiene un flujo paralelo a las paredes de la tubería por lo que la componente r de velocidad, u_r , es cero.
- 6) Existe un movimiento axial simétrico; el flujo es el mismo en cualquier r a lo largo de la coordenada θ lo que implica que u_θ es cero, así como todas las derivadas parciales respecto a θ .
- 7) La gravedad actúa en la dirección r , por lo que $g_z = 0$ al ser un tubo horizontal.

Si se cumplen las suposiciones anteriores, los términos no lineales (términos convectivos) desaparecen de la ecuación de Navier-Stokes que facilitan la obtención de la solución. Utilizando un sistema de coordenadas cilíndricas.

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho v_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\rho v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (\text{Ec. 10.1})$$

Aplicando las condiciones (4), (5) y (6), la ecuación (10.1) se reduce a:

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	140/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (\text{Ec. 10.2})$$

La ecuación (10.2) indica que v_z no es función de z , es decir, es constante a lo largo de la tubería. En otras palabras no importa donde se coloca el origen: el flujo es el mismo en cualquier posición z . Con frecuencia se usa la expresión flujo totalmente desarrollado, Figura 10.2, para describir esta situación. Esto también puede obtenerse directamente a partir de la suposición (3), que señala que la tubería es infinita en longitud. Más aún, dado que v_z no es función de z se llega a la conclusión de que v_z es solo función de r y se tiene un flujo unidireccional con solo una componente de velocidad.

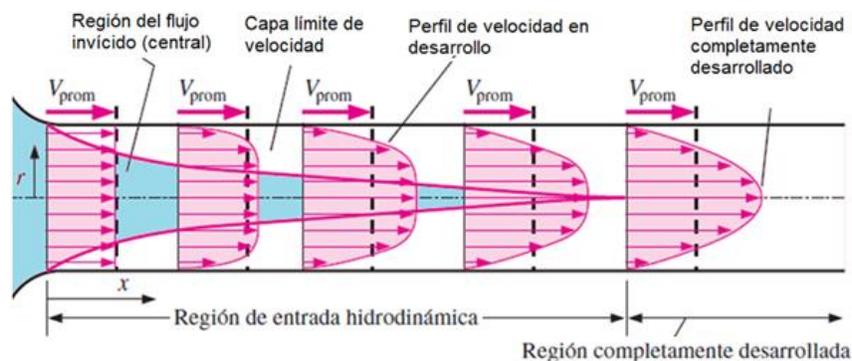


Figura 10.2. Perfil de velocidad completamente desarrollado. Adaptada de la referencia [1].

$$V = v_z(r) \quad \text{Resultado de continuidad} \quad (\text{Ec. 10.3})$$

Aplicando la ecuación de cantidad de movimiento, componente z de la ecuación de Navier-Stokes:

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right\}$$

Que de acuerdo a las condiciones (4), (5), (6) y la ecuación (10.2), la aceleración material (lado izquierdo) es cero; lo que implica que las partículas de fluido no aceleran en absoluto en este campo de flujo, ni por aceleración local (no-estacionaria) ni por aceleración convectiva. Por lo que los términos no lineales (términos convectivos) desaparecen de la ecuación de Navier-Stokes que facilitan la obtención de la solución.

Aplicando, en el lado derecho de la ecuación, las condiciones (6), (7) y la ecuación (10.2), la ecuación se reduce a:

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	141/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right\} \quad (\text{Ec. 10.3})$$

Se puede cambiar de una derivada parcial a una derivada ordinaria ya que la velocidad sólo es función de r :

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv_z}{dr} \right) \quad \text{Cantidad de movimiento } z \quad (\text{Ec. 10.4})$$

En forma similar, la ecuación de cantidad de movimiento, componente r de la ecuación de Navier-Stokes, todo término es cero excepto el término de gradiente de presión:

$$\frac{\partial P}{\partial r} = 0 \quad \text{Cantidad de movimiento } r \quad (\text{Ec. 10.5})$$

Por lo que el gradiente de presión no es función de r y solo puede ser, de acuerdo a las condiciones (4) y (6), solo puede ser función de z .

$$P = P(z) \quad \text{Resultado de la componente } r \text{ de cantidad de movimiento (Ec. 10.6)}$$

Por consiguiente en la ecuación (10.4) se puede sustituir la derivada parcial del gradiente de presión, resultando la ecuación:

$$\frac{dP}{dz} = \frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv_z}{dr} \right) \quad (\text{Ec. 10.7})$$

Agrupando términos e Integrando dos veces (notar que dP/dz es una constante), lo que resulta en:

$$v_z = \frac{r^2}{4\mu} \frac{dP}{dz} + C_1 \ln r + C_2 \quad (\text{Ec. 10.8})$$

La primera condición de frontera resulta de imponer la condición de no-deslizamiento en la pared de la tubería: (1) en $r = R$, $v_z = 0$. La segunda condición de frontera viene del hecho de que la línea central de la tubería es un eje de simetría: (2) en $r = 0$, $dv_z/dr = 0$. Aplicando las condiciones de frontera a la ecuación (10.8), se tiene la velocidad:

$$v_z = \frac{1}{4\mu} \frac{dP}{dz} (r^2 - R^2) \quad (\text{Ec. 10.9})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	142/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

La ecuación (10.9) describe un perfil de velocidad axial con la forma de un paraboloides que se denomina flujo de Hagen-Poiseuille. Otra forma de la ecuación (10.9) sería:

$$v_z = -\frac{1}{4\mu} \frac{dP}{dz} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (\text{Ec. 10.10})$$

Donde dP/dz es la caída de presión motriz, es necesario conocer la presión estática en dos puntos del fluido, o bien puede sustituirse por otro dato equivalente como el gasto volumétrico Q a través del tubo. Simplificando la ecuación (10.9) relacionando la caída de presión dP/dz con el gasto volumétrico, Figura 10.3.

$$Q = \int_0^R v_z dA = \int_0^R v_z 2\pi r dr = \frac{\pi R^4}{8\mu} \left(-\frac{dP}{dz} \right) \quad (\text{Ec. 10.11})$$

Por lo que la caída de presión motriz por unidad de longitud del tubo necesaria para mantener el gasto volumétrico dado es:

$$-\frac{dP}{dz} = \frac{8\mu Q}{\pi R^2} \quad (\text{Ec. 10.12})$$

El gradiente de presión es negativo ya que a lo largo de la dirección del flujo (aumento de z) la presión disminuye por la acción de la fricción (pérdidas viscosas). Esta última relación nos aseguran que existe una relación biunívoca y lineal entre el caudal Q y la caída de presión motriz (conocido un dato se tiene el otro), de modo que un mayor caudal exige una mayor caída de presión motriz.

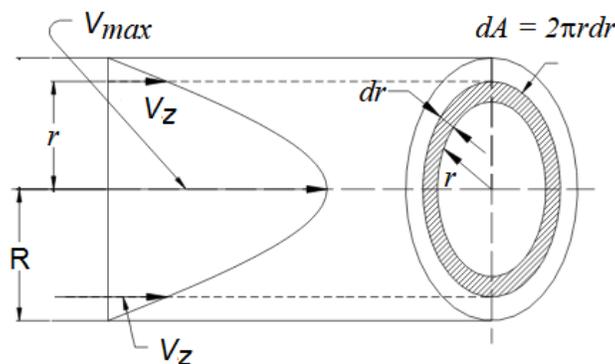


Figura 10.3. Cálculo del gasto a partir del perfil de velocidades [3].

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	143/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Puesto que el gasto volumétrico lo podemos conocer, es conveniente obtener el perfil de velocidades en función del gasto o de la velocidad axial promedio.

Sustituyendo la ecuación (10.12) en la (10.9):

$$v_z = \frac{2Q}{\pi R^2} (R^2 - r^2) \quad (\text{Ec. 10.13})$$

La velocidad axial media o promedio del flujo se relaciona con el gasto volumétrico y el área de la sección transversal del tubo por:

$$Q = v_{med} A = v_{med} \pi R^2 \quad (\text{Ec. 10.14})$$

Sustituyendo la ecuación (10.14) en la (10.13), obtenemos el perfil de velocidades en función de la velocidad media.

$$v_z = \frac{2v_{med}}{R^2} (R^2 - r^2) = 2v_{med} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (\text{Ec. 10.15})$$

El perfil del flujo laminar es un paraboloide con velocidad cero en la pared y valor máximo en $r = 0$, por lo que la máxima velocidad ocurre en la línea central del tubo. Al sustituir $r = 0$ en (10.15):

$$v_{z \max} = 2v_{med} \quad (\text{Ec. 10.16})$$

Perfil de velocidad para flujo turbulento

Excepto para flujos de fluidos muy viscosos en ductos de diámetro pequeño, los flujos internos son por lo general turbulentos y no hay relación universal entre el campo de esfuerzos y el campo de velocidad media. En consecuencia se recurre a datos experimentales.

El perfil de velocidad es muy diferente de la distribución parabólica correspondiente a un flujo laminar; la velocidad del fluido cerca de la pared del conducto cambia rápidamente de cero, en la pared, a una casi uniforme distribución de velocidad a través del resto de la sección transversal. La forma real del perfil de velocidad varía con el factor de fricción, f , el cual, a su vez varía con respecto del número de Reynolds y la rugosidad relativa del conducto. La ecuación correspondiente es [3]:

$$v_z = v_{med} \left[1 + 1.43\sqrt{f} + 2.15\sqrt{f} \log_{10} \left(1 - \frac{r}{R} \right) \right] \quad (\text{Ec. 10.17})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	144/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Una forma alternativa de esta ecuación se puede desarrollar mediante la definición de la distancia a partir de la pared de los conductos como $y = R - r$. Entonces, el argumento del término logarítmico queda:

$$1 - \frac{r}{R} = \frac{R-r}{R} = \frac{y}{R} \quad (\text{Ec. 10.18})$$

Entonces la ecuación (10.17) queda:

$$v_z = v_{med} \left[1 + 1.43\sqrt{f} + 2.15\sqrt{f} \log_{10} \left(\frac{y}{R} \right) \right] \quad (\text{Ec. 10.19})$$

Donde v_{med} es la velocidad media obtenida a partir del gasto volumétrico. El factor de fricción f se obtiene del diagrama de Moody para tubería lisa y con el número de Reynolds. Las ecuaciones anteriores sólo suministran la mitad del perfil, desde la pared hasta el centro de la tubería, Figura 10.4.

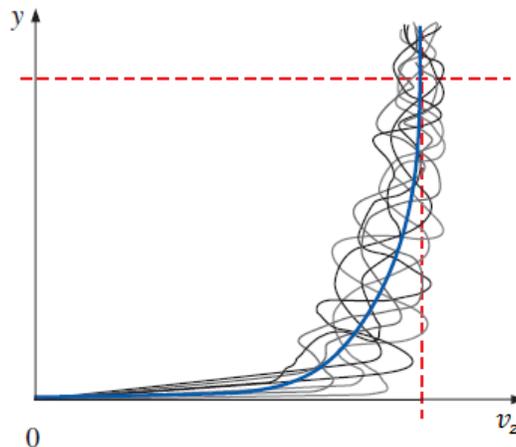


Figura 10.4. Perfil de velocidades para flujo turbulento, ecuación (10.19).

Cuando se evalúe la ecuación (10.19), recordar que el logaritmo de cero no está definido. Puede hacer que r se aproxime a R pero no que sean iguales. De manera parecida, y solamente puede aproximarse a cero. La máxima velocidad se presenta en el centro del conducto ($r = 0$ ó $y = R$), y su valor se puede calcular con:

$$v_{z \text{ máx}} = v_{med} \left[1 + 1.43\sqrt{f} \right] \quad (\text{Ec. 10.20})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	145/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

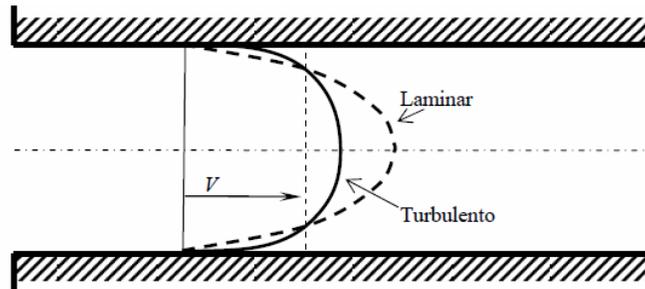


Figura 10.5. Perfil de velocidades para flujo laminar y turbulento.

4. Equipo y Material

- Unidad de demostración de medidores de flujo Armfield C9.
- Accesorio con tubo de Pitot estático C9-3.
- Vernier y escuadra metálica de 20cm.
- Cronómetro.

El tubo de Pitot estático C9-3 está alojado en un tramo de tubería lisa de 38 mm de diámetro interior (19 mm de radio) y una longitud de 750 mm.

5. Desarrollo

EXPERIMENTO I.

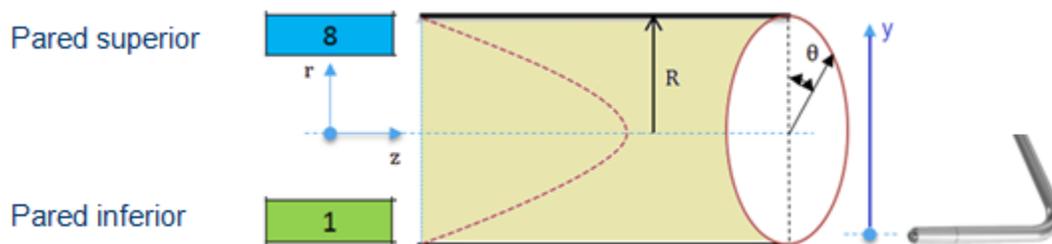
Preparativos.

- I.1 Conecte la clavija de la alimentación general del equipo.
- I.2 Conecte el accesorio con tubo de Pitot estático C9-3.
- I.3 Abra ligeramente la válvula.
- I.4 Encienda la bomba. En caso de existir fugas de agua, apague la bomba y ajuste el accesorio.
- I.5 Abra la válvula para tres gastos volumétricos diferentes.



	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	146/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- I.6 Se propone desplazar el tubo de Pitot estático en 8 diferentes posiciones en la sección de prueba del tubo.
- I.6.1 Coloque la escuadra metálica en la parte superior del tubo de acrílico, cerca del tubo de Pitot estático, utilice como referencia una porción del tubo de Pitot estático (perpendicular a este), deslice el tubo de Pitot estático hasta el fondo del tubo de acrílico y registre la longitud en la escuadra (aproximadamente es 7 cm) y después deslice hasta arriba del tubo de acrílico y registre la longitud en la escuadra (aproximadamente 10.5 cm).
- I.6.2 Sugerencia: comience el desplazamiento del tubo de Pitot estático desde 7 cm (punto de medición 1, pared inferior del tubo), en incrementos de 5 mm hasta llegar a 10.5 cm (punto de medición 8, pared superior).



ACTIVIDAD 1. Cálculo del gasto volumétrico.

- I.7 Registrar el volumen recolectado en el tanque volumétrico y el tiempo empleado. Se sugiere utilizar valores cercanos al volumen máximo del tanque.

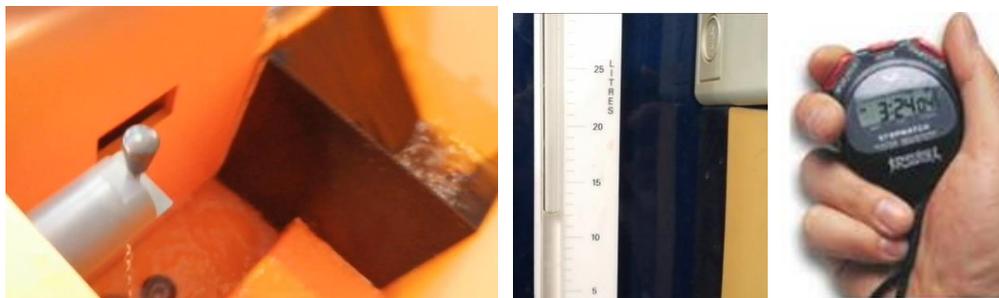


Figura 10.5. Registro del volumen recolectado en el tanque volumétrico y del tiempo empleado. Laboratorio de Termofluidos FI, UNAM.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	147/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla de datos		
Evento	Vol [lt]	t [seg]
1		
2		
3		

Tabla 10.1. Registro del volumen recolectado en el tanque volumétrico y del tiempo empleado.

ACTIVIDAD 2. Diferencia de alturas del manómetro diferencial (de agua o mercurio).

Registro de las alturas en los manómetros (o diferencias de alturas) de preferencia el de agua (si tiene problema de purga de aire de este manómetro, utilice el de mercurio, solo que podrá realizar un solo evento a máxima apertura de la válvula).

Es importante señalar que el tubo de Pitot estático tiene un diámetro exterior de 3 mm, por lo que no mide la velocidad exactamente en la pared del tubo. Se considera que la primera medición de velocidad se obtiene a la mitad del diámetro del tubo de Pitot estático, a 1.5 mm de distancia de la pared. La distancia de desplazamiento y , así como el radio r toman en cuenta el diámetro del tubo de Pitot estático.

Tabla de datos									
Punto de medición	Distancia escuadra [cm]	y [mm]	r [mm]	Evento 1		Evento 2		Evento 3	
				Lo [mm]	Lest [mm]	Lo [mm]	Lest [mm]	Lo [mm]	Lest [mm]
1	7	1.5	-17.5						
2	7.5	6.5	-12.5						
3	8	11.5	-7.5						
4	8.5	16.5	-2.5						
5	9	21.5	2.5						
6	9.5	26.5	7.5						
7	10	31.5	12.5						
8	10.5	36.5	17.5						

Tabla 10.2. Registro de las alturas en los manómetros (o diferencias de alturas).

6. Resultados

1. Realizar los cálculos necesarios para llenar la siguiente Tabla de resultados. El número de Reynolds se obtienen a partir de la velocidad media. Calcular el factor de fricción de Moody si el régimen de flujo es turbulento.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	148/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla de resultados					Moody f
Evento	Q [m ³ /s]	V _{med} [m/s]	Re	Régimen de flujo	
1					
2					
3					

Tabla 10.3. Tabla de resultados de la actividad 1.

2. Calcular el perfil de velocidad experimental.

Tabla de resultados					
Punto de medición	y [mm]	r [mm]	Evento 1	Evento 2	Evento 3
			Vz [m/s]	Vz [m/s]	Vz [m/s]
1	1.5	-17.5			
2	6.5	-12.5			
3	11.5	-7.5			
4	16.5	-2.5			
5	21.5	2.5			
6	26.5	7.5			
7	31.5	12.5			
8	36.5	17.5			

Tabla 10.4. Tabla de resultados de la actividad 2.

3. Obtener para cada evento la gráfica del perfil de velocidad experimental. Graficar la velocidad contra punto de medición contra. Ubicar en el eje de las ordenadas los valores de velocidad.
4. Calcular el perfil de velocidad teórico, v_z , correspondiente al régimen de flujo calculado en el tubo y graficar el perfil de velocidades.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	149/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Velocidades teóricas de acuerdo al régimen de flujo					
Punto de medición	y [mm]	r [mm]	Evento 1	Evento 2	Evento 3
			Vz [m/s]	Vz [m/s]	Vz [m/s]
1	1.5	-17.5			
2	6.5	-12.5			
3	11.5	-7.5			
4	16.5	-2.5			
5	21.5	2.5			
6	26.5	7.5			
7	31.5	12.5			
8	36.5	17.5			
Régimen de flujo					

Tabla 10.5. Tabla de velocidades teóricas

7. Cuestionario

1. Describa la forma del perfil de velocidad experimental y su relación con el régimen de flujo calculado.
2. De acuerdo a los perfiles experimentales de velocidad, ¿Estos concuerdan con los teóricos? Justifique su respuesta.
3. ¿Es adecuado medir la velocidad con el tubo de Pitot estático en una tubería? Justifique su respuesta.

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

1. Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2006). Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones. 1ª. Ed. México: McGraw-Hill Interamericana.
2. Fox, R. W. y Mc Donald A.T. Introducción a la mecánica de fluidos (1995). 4ª Ed. México: McGraw-Hill.
3. Mott, Robert. Mecánica de Fluidos Aplicada (1996). 4ª Ed. México: Prentice-Hall Hispanoamérica.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos II	Código:	MADO-57
		Versión:	04
		Página	150/151
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

4. Beneyto, Jaime. Mecánica de fluidos I (2012). 1ª Ed. España: UPM.
5. Armfield Ltd. Instruction Manual C9 Flowmeter demonstration unit (Issue 8, november 1995). England.

10. Anexos

Arreglo experimental

Obtención experimental de la velocidad V_z utilizando un tubo de Prandtl.

La velocidad V_z o u , se puede obtener a partir de la presión dinámica (P_{din}) una vez que se conoce la presión de estancamiento (P_0) y la presión estática (P_{est}) de la corriente. El tubo de Prandtl (o tubo de Pitot estático) permite la medición simultánea de las dos presiones.

La presión dinámica se define como:

$$P_{din} = \frac{1}{2} \rho_{fluido} u^2$$

Puesto que:

$$P_0 = P_{est} + P_{din} \quad \Rightarrow \quad P_{din} = P_0 - P_{est}$$

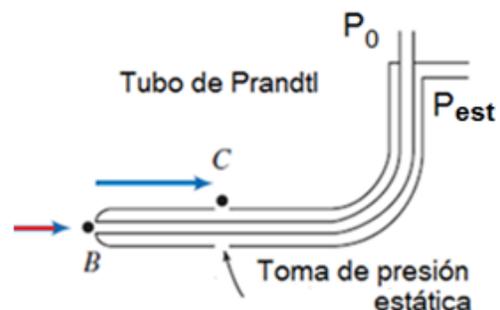
Entonces:

$$P_{din} = \frac{1}{2} \rho_{fluido} u^2 = P_0 - P_{est} = \Delta P \quad (1)$$

En dónde ΔP se obtiene de un manómetro diferencial. $P_0 - P_{est} = \Delta P$



P_{est} = Presión estática
 P_0 = Presión de estancamiento





Manual de prácticas del
Laboratorio de Mecánica de
Fluidos II

Código:	MADO-57
Versión:	04
Página	151/151
Sección ISO	8.3
Fecha de emisión	30 de Agosto de 2021

Facultad de Ingeniería

Área/Departamento:
Laboratorio de Termofluidos

La impresión de este documento es una copia no controlada

Medición de ΔP con un manómetro diferencial

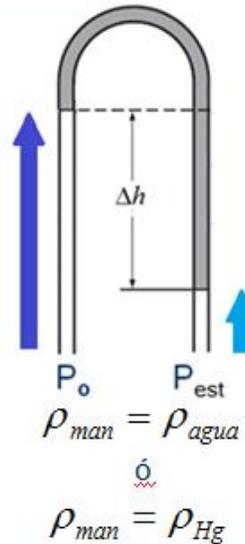
$$\Delta P = \rho_{man} g \Delta h \quad (2)$$

Sustituyendo (2) y (1):

$$\frac{1}{2} \rho_{fluido} u^2 = \rho_{man} g \Delta h$$

$$u = \sqrt{2 \frac{\rho_{man}}{\rho_{fluido}} g \Delta h}$$

$$\Delta h = \Delta L = (L_0 - L_{est})$$



Las tomas de presión se encuentran en la parte inferior del manómetro. Entonces la mayor columna corresponde a la presión de estancamiento.

En donde $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

El gasto volumétrico, Q , se puede conocer a través del tanque volumétrico del equipo. La bomba del equipo puede suministrar un gasto máximo de 2.3 Lt/s.

Número de Reynolds para una tubería circular:

$$Re = \frac{\rho v_{med} D}{\mu}$$

Donde ρ es la densidad del fluido, v_{med} es la velocidad media del flujo, D es el diámetro de la tubería y μ es la viscosidad dinámica del fluido.