

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	1/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
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 I

Elaborado por:	Revisado por:	Autorizado por:	Vigente desde:
Dr. Rafael Chávez Martínez Dr. Christian Lagarza Cortés M.I Daniel Esquivel Velázquez Dr. José Fernando García Puertos M.I. Servando Ruiz Rodríguez Dr. Edgar Ali Ramos Gómez	Dr. Ian Guillermo Monsivais Montoliu M.I. Mauricio Iván Escalante Camargo M.I. Alejandro Cortés Eslava	Dr. José Melesio Sánchez Huerta	13 de febrero de 2023

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	2/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Índice de prácticas

Práctica 1. Presión y manometría.....	3
Práctica 2. Propiedades de los fluidos.....	15
Práctica 3. Viscosimetría.....	24
Práctica 4. Fuerzas sobre superficies sumergidas.....	33
Práctica 5. Medición de velocidad.....	40
Práctica 6. Medición de gasto.....	53
Práctica 7. Vertederos.....	66
Práctica 8. Pérdidas primarias de tuberías.....	79
Práctica 9. Pérdidas secundarias de tuberías.....	89
Práctica 10. Flujo Compresible.....	94

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	3/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 1

Presión y manometría



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 I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	4/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
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.
Pesas	Posibles lesiones en los dedos de los pies por caída de las pesas.

2. Objetivos

- ✓ Estudiar el comportamiento de la presión en un fluido en reposo y los diferentes dispositivos que se utilizan para medirla.
- ✓ Calibrar un manómetro tipo Bourdon utilizando pesas como patrones en una balanza de pesos muertos.

3. Conceptos básicos y definiciones

Definición de fluido

Para comprender la transferencia de momento en un fluido es preciso estudiar el movimiento de los fluidos y de las fuerzas que producen dichos movimientos. Por la segunda ley de Newton, se sabe que la fuerza está directamente relacionada con la razón de cambio del momento de un sistema con respecto al tiempo. Si se excluyen las fuerzas que actúan a distancia o fuerzas de cuerpo, como la gravedad, puede demostrarse que las fuerzas que actúan sobre un fluido (fuerzas superficiales), como la presión y el esfuerzo cortante, son el resultado de una transferencia microscópica (molecular) de momento. Por lo tanto, se puede llamar también a la mecánica de fluidos como transferencia de momento.

Un **fluido** se define como una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo cortante. Una consecuencia importante de esta definición es que cuando un fluido se encuentra en reposo, no existen esfuerzos cortantes. Tanto los líquidos como los gases son fluidos. Algunas sustancias como el vidrio se clasifican técnicamente como fluidos. Sin embargo, la razón o escala de tiempo de la deformación de un vidrio a temperaturas normales es tan pequeña que es impráctico considerarle como un fluido.

Estática de fluidos

En un fluido que se encuentra sin movimiento sobre la superficie de la Tierra, se presenta con frecuencia una situación estática. Aunque la Tierra tiene cierto movimiento propio, puede dentro de los límites normales de exactitud, despreciarse la aceleración absoluta del sistema de coordenadas que, en este caso, estaría fijo en relación con la Tierra. Se dice que tal sistema de coordenadas es una referencia inercial. Si, por otra parte, un fluido es estacionario con respecto a un sistema de coordenadas que tiene cierta aceleración absoluta significativa propia, se dice que

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	5/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

la referencia es no inercial. Un ejemplo de esta última situación sería el fluido en un carro tanque de ferrocarril cuando viaja en una parte curva de las vías.

La aplicación de la segunda ley de Newton del movimiento a una masa fija de fluido se reduce a la expresión de que la suma de las fuerzas externas es igual al producto de la masa por su aceleración. En el caso de una referencia inercial se tendría, naturalmente, la relación $\Sigma F = 0$, mientras que en el caso no inercial debe utilizarse el postulado más general $\Sigma F = ma$.

La **presión** se define como una fuerza normal ejercida por un fluido por unidad de área. Se habla de presión sólo cuando se trata de un gas o un líquido. La contraparte de la presión en los sólidos es el esfuerzo normal. Puesto que la presión se define como fuerza por unidad de área, tiene la unidad de newtons por metro cuadrado (N/m^2), la cual se llama pascal (Pa); es decir,

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

La unidad de presión Pascal es demasiado pequeña para las presiones que se encuentran en la práctica ingenieril; por lo tanto, son de uso común sus múltiplos kilopascal ($1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$) y el megapascal ($1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$). Otras unidades de presión utilizadas en el campo de la ingeniería son el bar, la atmosfera estándar y el kilogramo fuerza por centímetro cuadrado.

La máxima rapidez de cambio de la presión ocurre en la dirección de la vector gravedad; el cual, siempre es perpendicular a las líneas de presión constante, las cuales representan las direcciones en donde el cambio de la presión es nulo. Por lo tanto, la variación de presión de un punto a otro se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$\rho g = \nabla P$$

Medición de la presión

Los instrumentos que se utilizan para medir la presión se llaman manómetros y pueden ser de diferentes tipos. Uno de ellos es el manómetro de tubo en U, el cual, mide la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica. Esta diferencia se llama presión manométrica cuando la presión absoluta es mayor que la presión atmosférica. La presión absoluta es la presión real que se encuentra en una posición dada y se mide en relación con el vacío absoluto (es decir, presión cero absoluta). La mayoría de los instrumentos para medir la presión se calibran para que den una lectura de cero en la atmósfera, de modo que indican la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica local. Las presiones por debajo de la atmosférica se conocen como presiones de vacío y se miden con instrumentos de vacío que indican la diferencia entre la presión atmosférica y la absoluta. Las presiones absoluta, manométrica y de vacío son todas cantidades positivas y están relacionadas por

$$P_{man} = P_{abs} - P_{atm}$$

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	6/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$P_{vac} = P_{atm} - P_{abs}$$

Este concepto se ilustra en la Fig. 1.1.

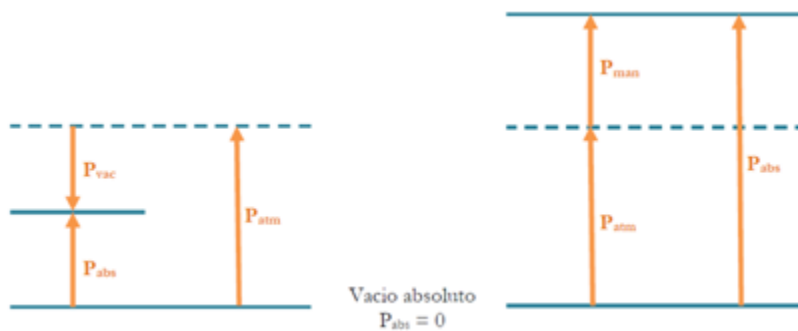


Figura 1.1 Presión absoluta, manométrica y de vacío.

Otro tipo de dispositivo mecánico que comúnmente se utiliza para medir la presión es el tubo de Bourdon, nombrado así en honor del ingeniero e inventor francés Eugene Bourdon (1808-1884). Consta de un tubo metálico hueco, doblado como un gancho, cuyo extremo se cierra y se conecta a la aguja de un indicador de carátula (Figura 1.2). Cuando el tubo se abre a la atmósfera, el tubo queda sin cambiar de forma y, en este estado, la aguja de la carátula se calibra para que marque una lectura de cero (presión manométrica). Cuando se presuriza el fluido que está en el tubo, éste tiende a enderezarse y mueve el agua en proporción a la presión aplicada.

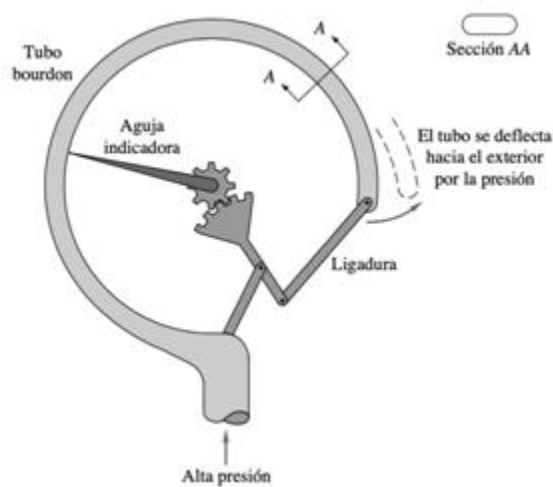


Figura 1.2. Esquema de tubo de Bourdon.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	7/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

La Figura 1.2 muestra el esquema básico de la sección transversal de un tubo de Bourdon convencional; sin embargo, existe una gran diversidad de tubos de Bourdon con diferentes secciones transversales, Figura 1.3.

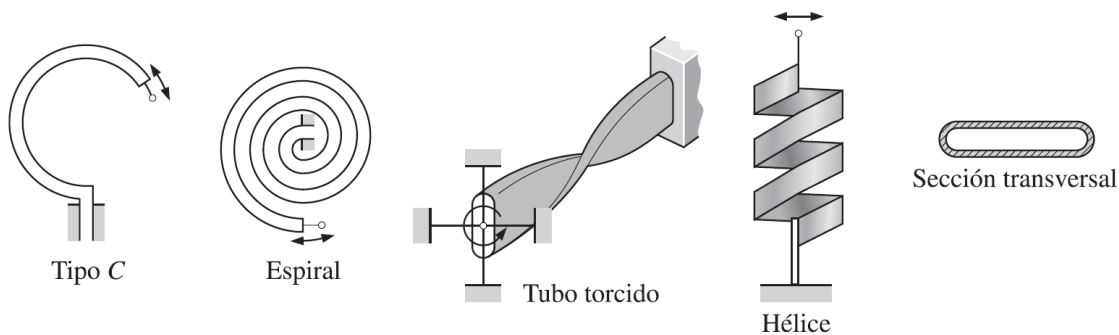


Figura 1.3. Varios tipos de tubo de Bourdon usados para medir la presión.

En los sensores modernos de presión, llamados transductores de presión, se aplican varias técnicas para convertir el efecto de presión en un efecto eléctrico, como un cambio en la tensión, la resistencia o la capacitancia. Los transductores de presión son más pequeños y más rápidos, y pueden ser más sensibles, confiables y precisos que sus contrapartes mecánicas. Pueden medir presiones desde un millonésimo de 1 atm hasta varios miles de atm.

Existe una amplia variedad de transductores de presión para medir presiones manométricas, absolutas y diferenciales, en una numerosa gama de aplicaciones. En los transductores de presión manométricos se usa la presión atmosférica como un valor de referencia fijo, generalmente cero, sin importar la altitud. Los transductores de presión absoluta están calibrados para tener una salida de señal cero al pleno vacío. Los transductores de presión diferencial miden de manera directa la diferencia de presión entre dos lugares, en lugar de usar dos transductores de presión y tomar su diferencia.

Los transductores de presión elásticos (de medición de deformación) emplean la deformación que la presión produce sobre una membrana o diafragma, conforme la membrana se estira en respuesta al cambio en la diferencia de presión de un lado a otro de ella. La presión se puede medir directamente o a través de un dispositivo conectado. Un transductor de capacitancia funciona en respuesta a un cambio en la capacitancia conforme la membrana se estira.

Los transductores piezoeléctricos, también conocidos como transductores de presión de estado sólido, funcionan con base en el principio de que se genera un potencial eléctrico en una sustancia cristalina cuando se le somete a una presión mecánica. Este fenómeno descubierto primero por los hermanos Pierre y Jacques Curie en 1880, se llama efecto piezoeléctrico (o presión-eléctrico). La respuesta de los transductores piezoeléctricos de presión es mucho más rápida en comparación

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	8/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

con las unidades de membrana, y son muy adecuados para aplicaciones a presiones altas pero, en general, no son tan sensibles como los de membrana.

Exactitud, precisión, calibración y resolución de un instrumento

La exactitud es el grado de concordancia entre el resultado de las medidas y el valor verdadero de la magnitud que se pretende medir. No puede determinarse cuando el valor verdadero es desconocido, pero sí tiene sentido cuando este se conoce o cuando se comparan las medidas con la que proporciona un método del que se sabe de antemano que tiene un alto grado de exactitud, y se emplea como referencia para la calibración.

La precisión, por su parte, es el grado de concordancia entre diferentes medidas realizadas en las mismas condiciones, al nivel en que pueden ser controladas por el método experimental en cuestión; si el conjunto de medidas presenta mucha dispersión, el método es impreciso, mientras que si están muy concentradas en torno a un valor, el método es preciso.

La calibración es el cálculo y la documentación de la desviación de un instrumento en comparación con otro dispositivo correspondiente con una mayor exactitud bajo condiciones predefinidas. Este dispositivo se denomina patrón.

La resolución de un instrumento es el menor incremento de la variable bajo medición que puede ser detectado.

Balanza de pesos muertos

Una balanza de pesos muertos es un estándar de calibración que utiliza el principio de un equilibrio de presiones para calibrar instrumentos de medición de presión. Las balanzas de pesos muertos utilizan pesos calibrados que sirven como patrones para aplicar presiones conocidas a un dispositivo sometido a prueba con el fin de brindar una solución simple y rentable que abarca un rango amplio de calibraciones de presión, Figura 1.4.

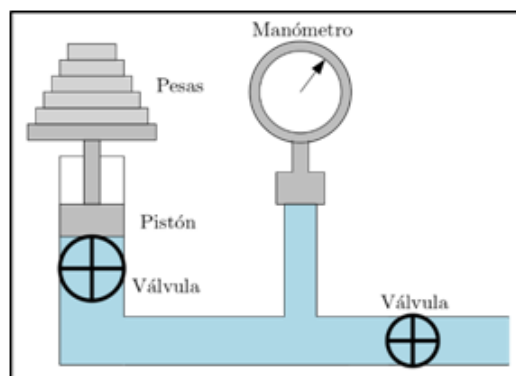


Figura 1.4. Esquema general de una balanza de pesos muertos.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	9/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

4. Equipo y Material

1. Balanza de pesos muertos.
2. Manómetro tipo Bourdon.
3. Pesas de diferentes masas.
4. Balanza granataria.
5. Calibrador vernier.

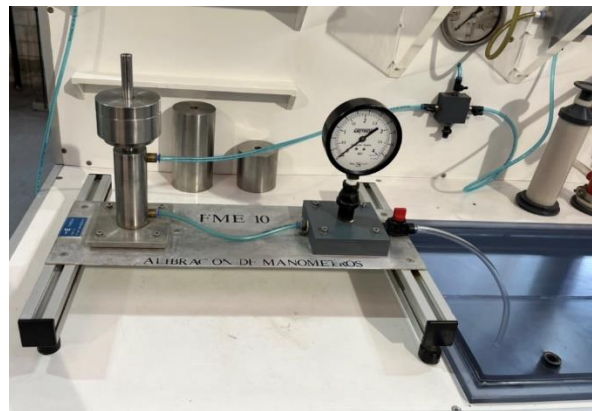


Figura 1.5. Balanza de pesos muertos que se encuentra en el Laboratorio de Termofluidos.

5. Desarrollo

Actividad 1. Calibración de un manómetro de tipo Bourdon.

El dispositivo se opera de la siguiente manera:

1. Obtener la masa de cada una de las pesas patrón, incluyendo el émbolo, utilizando la balanza granataria, Figura 1.6.



Figura 1.6. Balanza granataria, émbolo y pesas patrón.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	10/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- Medir el diámetro del émbolo para calcular el área, A , sobre la que se ejerce la fuerza, Figura 1.7.



Figura 1.7. Medición del diámetro del émbolo.

- Para purgar el equipo, abrir las válvulas de alimentación y de desagüe hasta que se elimine todo el aire posible, y después cerrar la llave de desagüe, Figura 1.7.



Figura 1.7. Válvula de alimentación y válvula de desagüe.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	11/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

4. Esperar a que se llene la cámara con agua y cerrar la válvula de alimentación, Figura 1.8.



Figura 1.8. Apertura de la válvula de alimentación para llenado de la cámara con agua.

5. Introducir con precaución el pistón (émbolo) en la cámara, Figura 1.9 a Figura 1.10



Figura 1.9. Colocación del émbolo en la cámara de la balanza de pesos muertos. Sujetar el émbolo para evitar su caída fuera de la cámara y soltar hasta que se detenga el deslizamiento.

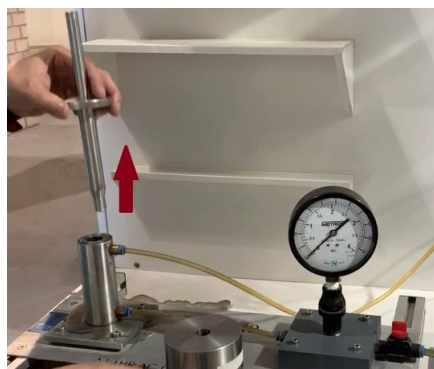


Figura 1.10. Retiro del émbolo de la cámara de la balanza de pesos muertos con válvula de desagüe abierta.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	12/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

6. Con la válvula de desagüe cerrada, abrir la válvula de alimentación y esperar a que se llene la cámara, Figura 1.11.



Figura 1.11. Apertura de la válvula de alimentación para rellenar nuevamente la cámara con agua.

7. Colocar el émbolo con una pesa, Figura 1.12, y anotar la lectura del manómetro en la Tabla 1.1.



Figura 1.12. Colocación de las pesas en el émbolo.

Tabla 1.1. Tabla de datos experimentales.

Masa [kg]	Presión del manómetro [kg _f /cm ²]

8. Retirar la pesa del émbolo.
9. Retirar el émbolo con válvula de desagüe abierta, Figura 1.13.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	13/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

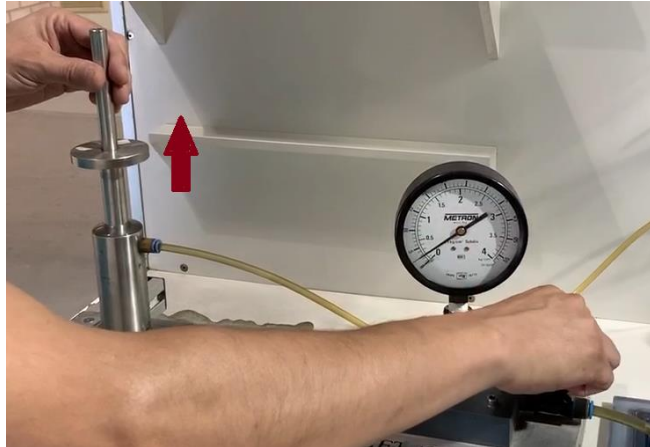


Figura 1.13. Válvula de desagüe abierta y retiro del émbolo de la cámara.

10. Con la válvula de desagüe abierta, abrir la válvula de alimentación hasta que se elimine todo el aire posible, y después cerrar la llave de desagüe.
11. Repetir el procedimiento a partir del punto 6 con distintas pesas. Se recomienda realizar al menos 10 mediciones.
12. Precaución: No colocar las pesas de manera brusca para evitar una desconfiguración y malas mediciones en el equipo.

6. Resultados

1. Obtener el valor de la fuerza que ejerce cada una de las masas patrón:

$$F_{patrón} = W_{patrón} = m_{patrón}g \quad (\text{Ec. 1.1})$$

2. Obtener el valor de la presión para cada uno de los patrones:

$$P_{patrón} = \frac{F_{patrón}}{A} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

3. Calcular los errores absoluto y relativo que se presentan al tomar las lecturas de presión con el manómetro de Bourdon, los cuales, se calculan con las siguientes expresiones:

$$E_{rel} = \frac{|P_{patrón} - P_{manómetro}|}{P_{patrón}} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

4. Completar la siguiente Tabla con los valores obtenidos:

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	14/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla 1.2. Tabla de resultados.

Masa del émbolo [Kg]	Presión patrón [N/m ²]	Presión del manómetro de Bourdon [N/m ²]	Error Relativo %

5. Con los resultados obtenidos, realizar las siguientes gráficas:
- Error relativo contra presión del manómetro.
 - Presión del manómetro contra peso de cada patrón y Presión patrón contra peso de cada patrón en una misma gráfica.

7. Cuestionario

- Tomando como referencia la gráfica de la presión del manómetro contra el peso de cada patrón, realizar una regresión lineal e interpretar el significado de la pendiente y la ordenada al origen.
- ¿Cómo influye la resolución de los instrumentos de medición en la toma de lecturas?
- Mencionar al menos tres manómetros diferentes al tubo de Bourdon, y explique el funcionamiento de cada uno de ellos.
- ¿Cuáles considera que sean los puntos más importantes que le permitan decidir el tipo de manómetro a utilizar en alguna aplicación industrial?

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

- White, F. M. (2011). Fluid Mechanics. 7th Edition. McGraw-Hill EUA.
- Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2019). Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. 4ª edición en español. McGraw-Hill México.
- Welty J. R., Wicks, C. E. y Wilson R. E. (1994). Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa. 2a edición. Ed. Limusa.
- Edibon, S.A (1995). Banco Hidrostático BHI: Manual de prácticas. España.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	15/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 2

Propiedades de los fluidos

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 I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	16/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

Instrumentos de vidrio	Riesgo de ruptura de los instrumentos debido a un manejo inadecuado.
------------------------	--

2. Objetivos

- ✓ Determinar la densidad de diversos fluidos con un picnómetro.
- ✓ Determinar la densidad de algunos fluidos con un densímetro y comparar con la obtenida con el picnómetro.
- ✓ Repasar brevemente el concepto de tensión superficial y el fenómeno de capilaridad.
- ✓ Repasar brevemente el concepto de viscosidad, la clasificación en fluidos newtonianos y no newtonianos y la importancia de esto en diferentes aplicaciones.

3. Conceptos básicos y definiciones

Existen diferentes propiedades de los fluidos de interés en la mecánica de fluidos y se pueden clasificar en: propiedades cinemáticas, aquellas que están en función de la velocidad, siendo esta la más importante; propiedades termodinámicas, siendo la densidad, la temperatura y la presión las principales, así como los calores específicos, la entalpía, la entropía y la energía interna; propiedades de transporte, coeficiente de viscosidad dinámica y la conductividad térmica, importantes en los procesos donde se tiene flujo másico o de calor, respectivamente; se tienen además diversas propiedades secundarias como la tensión superficial o la presión de vapor. En esta sesión se trabajará con tres de estas propiedades, las otras se verán en otras sesiones (práctica de presión) o en otras asignaturas:

3.1 Densidad, ρ .

Relación de la masa, m , al volumen, V , de una sustancia, $\rho = \frac{m}{V}$. Varía directamente con la presión e inversamente con la temperatura (con la excepción de agua y el silicio en ciertos intervalos). La densidad de los gases presenta una gran variación con la temperatura y la presión y es casi lineal con respecto a esta última (White, 2011); en el caso del aire y otros gases, se puede utilizar la expresión para gas ideal. Por otro lado, la densidad de los líquidos es prácticamente constante con la presión, por lo que se consideran incompresibles y solamente se toman en cuenta, si se requiere de mayor precisión, los cambios con respecto a la temperatura aunque estos tampoco suelen ser muy grandes. Por ejemplo, a 20°C el agua aumenta su densidad de 998 kg/m³ a 1 atm a 1003 kg/m³ a 100 atm, lo que representa un aumento de alrededor del 0.5%; además, a 1 atm, su densidad pasa de 1000 kg/m³ a 0°C a 958 kg/m³ a 100°C (Cengel, 2006), menos de 5%.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	17/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

La densidad relativa (adimensional) es la relación de la densidad de una sustancia de interés a la densidad de una sustancia de referencia, la cual es, generalmente, agua a 1 atm y 4°C (1000 kg/m^3) para líquidos y aire para gases (1.205 kg/m^3).

Existen diversas formas de medir la densidad de un líquido (**queda como trabajo del estudiante investigarlas**) de las cuales, se utilizarán dos en este laboratorio:

3.1.1. Densímetro o aerómetro.

El aerómetro (en inglés *hydrometer* o *areometer*) se utiliza para medir la densidad relativa de un líquido sin previamente medir su masa y su volumen, aunque hay algunos que dan la lectura también de densidad absoluta. Consta de un tubo hueco de vidrio con una masa pesada en el fondo y graduado en su parte superior (el principio de funcionamiento quedará mejor comprendido en la práctica de 'Fuerzas sobre superficies sumergidas').



Imagen 1. Aerómetro utilizado en el laboratorio.

3.1.2. Picnómetro.



Imagen 2. Picnómetro utilizado en el laboratorio.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	18/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Generalmente hecho de vidrio, es un recipiente cuyo volumen está calibrado y puede ser conocido de manera exacta y junto con una balanza granataria permite obtener la masa del líquido dentro de él, y con ello, la densidad. Cuenta con un tapón esmerilado que permite un ajuste perfecto al recipiente y que cuenta, además con un tubo capilar que permite la salida de las burbujas de aire que pudieran quedar atrapadas. Tiene la ventaja de permitir la medición de densidad de polvos, pinturas, recubrimientos y demás. Para líquidos muy viscosos o polvos, existen de otros tipos, tamaños de boquilla y materiales. La ASTM cuenta con varios documentos con el proceso a seguir para medir la densidad de líquidos comunes, pinturas, polvos o suelos, barnices, etcétera; ASTM D854 - 14, ASTM D1475 - 98, ASTM D1217 - 15, ASTM D1963 - 85. Debido a que no se cuenta con todo el material necesario, se seguirá un proceso de medición basado en estos documentos sin seguirlos totalmente, esto con la finalidad de obtener lecturas lo más exactas posibles.

3.2 Tensión Superficial.

Se presenta cuando hay interfases de líquidos con sólidos o gases y se debe a las fuerzas de atracción/repulsión entre las moléculas de una sustancia y otra. Se observa como una membrana elástica en la superficie del líquido que impide que esta aumente. Esta fuerza depende de las interfases que se tengan y de la temperatura; puede además verse afectado por las impurezas de las sustancias lo cual es aprovechado por los detergentes y jabones para lograr un mejor lavado aunque esto mismo puede afectar situaciones de aparatos que dependen de este fenómeno (algunos intercambiadores de calor y partes de aparatos de aire acondicionado utilizan tubos capilares). Se puede apreciar cuando pequeños insectos u objetos quedan en la superficie del líquido, cuando se llena un envase a tope y este no se derrama, en la formación de burbujas y gotas y en un fenómeno conocido como la capilaridad. La capilaridad es la capacidad que tienen los líquidos por fluir a través de tubos capilares (tubos muy delgados). Entre más delgado es un tubo capilar, el fluido se desplaza más con la siguiente relación:

$$h = \frac{2\sigma_i}{\rho g R} \cos \theta$$

Donde h es la altura que sube el líquido, σ_i es el coeficiente de tensión superficial que depende de las interfases y la temperatura, ρ es la densidad, g es el valor de la gravedad local, R es el radio del tubo capilar y θ es el ángulo que forman las interfases. Si este último es menor a 90° se dice que moja la superficie (la mayoría de los líquidos) y si es mayor se dice que no la moja (como el mercurio). En la práctica, se desprecian los efectos para tubos mayores de medio centímetro de radio; se debe tener cuidado de utilizar tubos suficientemente grandes en manómetros para poder despreciar estos efectos, (Cengel, 2006).

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	19/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

3.3 Viscosidad, μ .

La viscosidad es una medida de la resistencia de los fluidos al movimiento y depende de las fuerzas. Es la responsable que sea más difícil moverse en el agua que en el aire. La densidad de los fluidos puede variar considerablemente por muchos órdenes de magnitud. La viscosidad prácticamente no varía con la presión pero sí con la temperatura como se verá la siguiente práctica. Debido a su naturaleza, la viscosidad es de vital importancia en cualquier aplicación en que haya flujo y afecta fuertemente su comportamiento pues representa la cantidad de fricción, siendo así, una propiedad que se encarga de disipar energía.

Matemáticamente se calcula con la relación que hay entre el esfuerzo cortante a un fluido, τ , y la tasa a la que este se deforma debido a él, $\dot{\gamma}$.

$$\tau = \mu \dot{\gamma}$$

A esta relación lineal se le llama la 'Ley de Viscosidad de Newton' y a los fluidos que la siguen se les conoce como newtonianos (agua, aire, miel, gasolina) y en ellos, la viscosidad no depende de la tasa de deformación. A los fluidos que no la siguen se les conoce como no newtonianos y se subdividen, entre otros, en pseudoplásticos (disminuye la viscosidad cuando aumenta la tasa de deformación), dilatantes (aumenta la viscosidad cuando aumenta la tasa de deformación), plásticos de Bingham (requieren un esfuerzo mínimo para empezar a fluir, llamado de cedencia) y viscoelásticos (presentan viscosidad y elasticidad).

La medición de la viscosidad se abarcará en la siguiente práctica.

4. Equipo y Material

1. Densímetro o aerómetro
2. Probeta de 500 ml o 1 litro
3. Picnómetro
4. Balanza granataria
5. Franela, papel para limpieza y sacado.
6. Líquidos diversos (shampoo, geles, detergentes, miel, salsas, aceites, glicerina, etcétera)
7. Tubos capilares
8. Recipientes

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	20/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

5. Desarrollo

5.1 Medición de densidad con el picnómetro

1. Lavar y secar perfectamente el picnómetro cuidando que no quede ningún residuo.
2. Ajustar a cero la balanza granataria.
3. Colocar el picnómetro en la balanza; cuidar que no contenga ningún residuo, incluso la presencia de huellas dactilares podría variar el resultado. Registrar el valor de la masa del picnómetro vacío, m_p .
4. Llenar el picnómetro hasta el tope con agua destilada.
5. Colocar el tapón al picnómetro, las burbujas deberían salir por el tubo capilar, de no ser así, se debe retirar la tapa, vaciar un poco de líquido del recipiente, volver a llenar y tapar.
6. Secar la parte exterior del picnómetro cuidado de que no queden residuos del material con que se realiza el secado.
7. Colocar nuevamente el picnómetro en la balanza granataria y registrar la medida de la masa del picnómetro con el agua destilada, m_{p+ad} .
8. Registrar la temperatura del fluido de trabajo.
9. En el anexo del presente documento se encuentra una tabla con los valores de densidad del agua destilada a diversas temperaturas. El valor exacto del volumen del picnómetro será calculado con $V = \frac{m_{p+ad}-m_p}{\rho_{ad}}$. Recordar que el volumen marcado en el recipiente del picnómetro puede variar.
10. Realizar tres veces la medición del volumen del picnómetro.
11. Vaciar y secar el picnómetro.
12. Llenar el picnómetro al tope con el fluido que se vaya a estudiar.
13. Colocar el tapón teniendo las mismas consideraciones mencionadas anteriormente.
14. Colocar el picnómetro en la balanza y registrar la masa del picnómetro con el fluido de trabajo, m_{p+f} .
15. La densidad del fluido de trabajo se calculará con $\rho_f = \frac{m_{p+f}-m_p}{V} = \left(\frac{m_{p+f}-m_p}{m_{p+ad}-m_p} \right) \rho_{ad}$. Tener cuidado con las unidades en que se trabaja.
16. Se recomienda medir al menos tres veces el valor para una misma sustancia y realizar un promedio de las mediciones.
17. Repetir el procedimiento con algún otro fluido de trabajo.

5.2 Medición de densidad con el aerómetro

- Limpiar y secar la probeta (el tamaño de la probeta depende del viscosímetro que se ocupe, existen dos de diferente tamaño en el laboratorio).
- Llenar la probeta con el fluido de trabajo.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	21/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- Colocar el densímetro con cuidado y siempre con la parte donde está concentrada la masa por debajo.
- Esperar unos segundos a que deje de oscilar el instrumento y hacer la lectura de densidad relativa.
- Registrar la temperatura, vaciar el fluido de trabajo a su contenedor, limpiar la probeta, secarla y repetir con algún otro fluido de trabajo.

Actividad 3. Observación de tensión superficial (cualitativa).

Las siguientes actividades son de carácter puramente cualitativo y se pueden realizar mientras el profesor realiza la explicación del tema.

- Llenar un recipiente (como un vaso de precipitados) con agua y observar como objetos pequeños permanecen en su superficie.
- Llenar al borde un vaso con agua y agregar agua de gota en gota; observar qué sucede en la superficie.
- Llenar a la mitad un vaso con agua, conectar, con la ayuda de una franela, este vaso a otro vacío, esperar un tiempo y observar lo que sucede.
- Introducir en el agua los distintos tubos capilares que se tienen en el laboratorio y observar el fenómeno de capilaridad.

Actividad 4. Observación de la viscosidad (cualitativa).

Las siguientes actividades son de carácter puramente cualitativo y se pueden realizar mientras el profesor realiza la explicación del tema.

- Observar las características de las distintas sustancias con que cuenta el laboratorio.
- Dentro de su mismo recipiente, mover los fluidos o introducir palillos pequeños y moverlos dentro de ellos y comprobar como con alguno es más fácil mover el objeto que con otros; observar cómo unos fluyen más que otros.
- Tratar de averiguar de qué tipo de sustancia (de acuerdo a la clasificación de viscosidad) se trata y si tiene alguna ventaja o aplicación.

6. Resultados

Reportar los valores obtenidos de la densidad (reportar aquí solamente el valor promedio y la desviación) para los fluidos de trabajo con el picnómetro y el aerómetro. Para este último, indicar el error relativo obtenido con respecto a la medición realizada con el picnómetro.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	22/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Fluido	Densidad con Picnómetro	Densidad con aerómetro	Error del aerómetro	Temperatura de medición

Comentar, además, lo que se observó en los experimentos de tensión superficial y con las observaciones de viscosidad.

7. Cuestionario

1. ¿Qué tanto varía la densidad medida con ambos métodos y a qué se debe dicha variación?
2. ¿Cuándo se justificaría el uso del picnómetro para medir la densidad de una sustancia y cuándo el aerómetro? Justifica tu respuesta.
3. ¿Cómo podría llevar a cabo la medición de la densidad con el picnómetro a una temperatura diferente a la ambiental?
4. Si la humedad en las casas se debe al fenómeno de la capilaridad, ¿qué se podría hacer para evitarlo o, en caso de que ya exista, eliminarlo?
5. ¿Qué otro fenómeno podría verse afectado o influido por la tensión superficial? Justifícalo.
6. ¿A qué se debe la viscosidad en los fluidos y qué importancia tiene la viscosidad en los fenómenos de mecánica de fluidos?
7. Imagina escenarios como la lubricación de máquinas, la inyección de plásticos, bombeo de sustancias, ¿cómo influye el tipo de sustancia con el que se esté trabajando?
8. A lo largo del día, ¿qué fluidos no newtonianos utilizas cotidianamente? ¿Se justifica el estudio de estos o son fluidos con los que casi no se tiene contacto? Clasifícalos.

8. Conclusiones

9. Bibliografía

- White, Frank. *Mecánica de fluidos*. 7a edición. EUA: McGraw-Hill, 2011. 862 p. ISBN 978-0-07-352934-9
- Çengel, Yunus; Cimbala, John. *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. EUA: McGraw-Hill, 2006. 959 p. ISBN-10: 970-10-5612-4

10. Anexos

10.1 Memoria de cálculo.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	23/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Incluir aquí los datos experimentales obtenidos, todas las ecuaciones utilizadas con su análisis de unidades así como la forma en que se realizaron todos los cálculos para llegar a los resultados obtenidos. **Se deja aquí libre al profesor para dar algún otro material complementario de acuerdo al enfoque que se quiera dar.**

10.2 Densidad del agua respecto a la temperatura.

Temperatura, °C	Densidad, g/ml	Temperatura, °C	Densidad, g/ml	Temperatura, °C	Densidad, g/ml
0	0.999840	21	0.997991	40	0.992212
3	0.999964	22	0.997769	45	0.990208
4	0.999972	23	0.997537	50	0.988030
5	0.999964	24	0.997295	55	0.985688
10	0.999699	25	0.997043	60	0.983191
15	0.999099	26	0.996782	65	0.980546
15.56	0.998012	27	0.996511	70	0.977759
16	0.998943	28	0.996231	75	0.974837
17	0.998774	29	0.995943	80	0.971785
18	0.998595	30	0.995645	85	0.968606
19	0.998404	35	0.994029	90	0.965305
20	0.998203	37.78	0.993042	100	0.958345

Tabla 1. Densidad del agua. Estos valores de la Escala Internacional de Temperatura 1990 (ITS 90, por sus siglas en inglés) fueron tomadas del Apéndice G del 'Standard Methods for Analysis of Petroleum and Related Products 1991' del Instituto del Petróleo, Londres.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	24/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 3

Viscosimetría



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 I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	25/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
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.
Parrilla eléctrica y líquidos a alta temperatura.	Quemaduras.
Instrumentos de vidrio	Cortaduras debido a la ruptura de los instrumentos por un manejo inadecuado.

2. Objetivos

- ✓ Calcular la viscosidad de algunas de las sustancias más utilizadas en la ingeniería con un viscosímetro de Stokes.
- ✓ Obtener los coeficientes de alguno de los modelos matemáticos existentes en la literatura que permitan predecir el comportamiento de la viscosidad con respecto a la temperatura.
- ✓ Obtener la viscosidad de diversos líquidos con un viscosímetro Stokes y compararlo con el resultado obtenido con el viscosímetro comercial.

3. Conceptos básicos y definiciones

La viscosidad es un parámetro muy importante en la mecánica de fluidos, principalmente en aplicaciones donde el fluido este en movimiento, por lo tanto, su medición es de una importancia vital. Para ello se cuentan con diversos métodos de medición de viscosidad, en los cuales se utilizan los instrumentos de medición llamados viscosímetros, aunque también se pueden utilizar los reómetros; los primeros se utilizan para fluidos newtonianos, pues solamente miden el valor de la viscosidad, los segundos se utilizan tanto para fluidos newtonianos como no newtonianos, pues se pueden obtener curvas de viscosidad contra tasa de deformación para los distintos fluidos, así como diversos parámetros reológicos. De estos métodos, se utilizarán dos de ellos en el laboratorio.

Viscosímetro de Stokes

Se basa en medir la velocidad de la caída de una esfera de diámetro pequeño, usualmente del orden de milímetros para garantizar que el número de Reynolds sea pequeño. Haciendo un diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan sobre la esfera, se tiene lo siguiente:

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	26/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

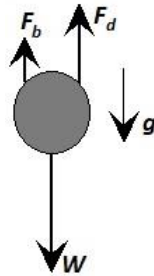


Figura 3.1. Diagrama de cuerpo libre de una esfera cayendo en un fluido.

Donde F_d es la fuerza de arrastre hidrodinámico, F_b es la fuerza de flotación, W es el peso de la esfera y g es la aceleración de la gravedad. Usando la ley de Stokes, la cual indica que:

$$F_d = 6\pi R\mu v$$

Por otro lado

$$F_b = \rho_f \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) g$$

$$W = mg = (\rho_b) \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) g$$

Realizando el balance de fuerzas se obtiene finalmente la ecuación de Stokes, que cuando se tiene un movimiento rectilíneo uniforme, la viscosidad, μ , se obtiene con:

$$\mu = \frac{2gR^2}{9v} (\rho_b - \rho_f) \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde ρ_b es la densidad de la esfera, ρ_f es la densidad del fluido, v es la velocidad de la esfera y R es el radio de la esfera.

De las variables anteriores la mayoría se pueden obtener de tablas del fabricante o medir con un flexómetro, excepto la velocidad. El material y tamaño del balón son decisión del usuario, teniendo en cuenta que el Re tiene que ser pequeño. La metodología por seguir es realizar varias pruebas en las que se mide la velocidad de caída de un balón en un fluido. La distancia recorrida es un parámetro determinado por el usuario y solo hay que medir el tiempo que tarda en recorrer dicha distancia. Otro parámetro que se puede modificar es la temperatura.

Viscosímetro rotacional.

En este tipo de viscosímetros/reómetros se cuenta con un cuerpo inmerso en un fluido (un husillo, cilindros concéntricos, cono y plato, platos paralelos, etc.) que gira a velocidades preestablecidas,

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	27/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

deformando así el fluido a estudiar. Se mide la velocidad angular que se utiliza para calcular la tasa de deformación, $\dot{\gamma}$; por otro lado, por medio de un sensor se mide el par de torsión aplicado al cuerpo, τ . Finalmente, recordando que $\tau = \mu \dot{\gamma}$, se despeja la viscosidad.

Dependencia de la viscosidad con la temperatura.

La viscosidad es una propiedad que depende de la temperatura. Para los gases esta propiedad aumenta al incrementarse la temperatura, mientras que para los líquidos disminuye. Lo anterior se debe al efecto de la temperatura en los enlaces e interacción molecular de los fluidos.

Existen diversas fórmulas para modelar la viscosidad de un líquido con respecto a la temperatura, entre ellas se encuentran las siguientes:

$$\mu = a \cdot 10^{\left(\frac{b}{T-c}\right)} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

$$\ln\left(\frac{\mu}{\mu_0}\right) = a + b\left(\frac{T_0}{T}\right) + c\left(\frac{T_0}{T}\right)^2 \quad (\text{Ec. 3.3})$$

$$\mu = a \cdot e^{b/T} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Esta última ecuación se puede modificar y presentarse como:

$$\ln(\mu) = \ln(a) + \frac{b}{T} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Por mencionar algunos ejemplos, se tiene: En general cualquier sistema de lubricación, motor de combustión interna, aceites multigrado. Se deja al estudiante el investigar a qué se debe dicho comportamiento y qué sucede con la viscosidad de los gases. En clase, el profesor dará ejemplos prácticos, los que considere adecuados, en los cuales la dependencia de la viscosidad con respecto a la temperatura sea de suma importancia.

4. Equipo y Material

1. Probetas de vidrio de diferentes tamaños.
2. 3 esferas de diferentes tamaños.
3. Calibrador pie de rey o vernier.
4. Balanza granataria.
5. Densímetro o picnómetro.
6. Cinta adhesiva.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	28/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

7. Cronómetro.
8. Termómetro.
9. Viscosímetro rotacional marca Brookfield modelo RVT.
10. Parrilla eléctrica.
11. Pinzas.
12. Guantes de carnaza o asbesto.
13. Líquidos obligatorios: aceite automotriz, agua, glicerina.
14. Líquidos optativos: aceite comestible, alcohol, miel, chamoy, shampoo, etc.

5. Desarrollo

Actividad 1. Viscosímetro de bola en caída libre.

1. Medir la densidad del líquido de trabajo con el picnómetro y la balanza granataria.
2. Medir el diámetro (con el calibrador vernier y la masa (con la balanza) de las esferas a utilizar para calcular la densidad de estas.
3. Medir el diámetro (con el calibrador vernier y la masa (con la balanza) de las esferas a utilizar para calcular la densidad de estas.
4. Llenar la probeta con el fluido a estudiar, preferentemente hasta el tope.
5. Seleccionar uno de los balines que se encuentren en la lista de materiales
6. Depositar el balín sobre la superficie del líquido para observar qué tan rápido cae.
7. Se recomienda realizar el experimento con, al menos, dos esferas diferentes para observar cómo varía el resultado de la viscosidad a diferentes números de Reynolds.
8. Identificar dos puntos, cuya distancia sea conocida, la cual determinará la distancia recorrida por la esfera. **(el profesor será el encargado de recomendarla, de forma analítica o empírica)** para que se tenga movimiento rectilíneo uniforme.
9. Soltar una esfera y, con la ayuda del cronómetro, medir el tiempo que tarda la esfera en recorrer la distancia considerada para obtener la velocidad de caída.
10. Se recomienda repetir al menos cuatro veces el experimento y tomar el promedio de las lecturas.
11. Si el fluido no es totalmente transparente, se puede utilizar una luz puesta al fondo para que se pueda observar el movimiento de la esfera.
12. Medir la temperatura del fluido con ayuda del termómetro de alcohol.
13. Realizar el experimento con cada uno de los fluidos recomendados.

Actividad 2. Viscosímetro Rotacional.

1. Conectar el viscosímetro a la alimentación eléctrica por medio del eliminador.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	29/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

2. Nivelar el viscosímetro, utilizar para ello los tornillos que se encuentran en la base del dispositivo.
3. Elevar hasta la altura máxima el viscosímetro girando la perilla que se encuentra en la parte posterior del viscosímetro.
4. Llenar uno de los vasos metálicos del viscosímetro con el fluido de estudio.
5. Elegir un husillo, colocarlo en el viscosímetro, colocar el vaso bajo el cabezal y bajar el cabezal con el husillo.
6. Verificar que el fluido de estudio cubra la marca del husillo, de no ser así, agregar más fluido del mismo para que lo haga.
7. Encender el viscosímetro y esperar unos segundos (entre 15 y 30 dependiendo del fluido de trabajo y la velocidad de rotación) a que pase el estado transitorio.
8. Hacer la medición de la lectura; si la velocidad de rotación es muy alta, bajar el pequeño "embrague" que tiene el viscosímetro y el botón de pausa (en ese orden y casi simultáneamente) para realizar la lectura. Si al hacerlo la lectura no se pudo leer en el dial, repetir desde el paso anterior.
9. Leer el factor de corrección en la tabla del viscosímetro tomando en cuenta el número de medidor (husillo) y la velocidad de rotación.
10. Si la lectura es muy grande o pequeña, modificar la velocidad de rotación; si el problema continúa, cambiar el medidor.
11. Una vez hecha la lectura, apagar el viscosímetro, subir el cabezal y registrar la temperatura.
12. Calentar en la parrilla eléctrica el fluido de trabajo, posteriormente colocarlo en el viscosímetro, registrando el valor de la viscosidad obtenido y enseguida registrar el valor de la temperatura. Repetir este procedimiento para diferentes valores de temperatura (los intervalos de temperatura los decidirán los alumnos junto con el profesor) y volver a tomar la viscosidad, registrando la temperatura después de medirla.
13. Repetir hasta alcanzar temperaturas altas, dependerán del fluido de trabajo y el tiempo disponible. Utilizar los guantes de carnaza o las pinzas para manipular el vaso metálico cuando se encuentre a altas temperaturas.
14. Si el tiempo lo permite, utilizar algún otro fluido de trabajo. Para hacerlo hay que vaciar la sustancia de regreso a su envase original y lavar el vaso metálico y los husillos del viscosímetro para evitar contaminación de las sustancias.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	30/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

6. Resultados

Realizar las siguientes actividades: Trazar una gráfica de viscosidad dinámica contra temperatura en la cual se incluirá lo siguiente:

1. Resultados de la viscosidad tomados con el viscosímetro Brookfield.
2. Viscosidad medida con el viscosímetro de bola en caída libre. Debido a que se realizó el experimento en diversas ocasiones, incluir solamente el promedio de los valores obtenidos; si se utilizaron más de una bola, graficar el valor obtenido con cada una.
3. Ajuste de curva con la ecuación que mejor se adapte a los datos experimentales, utiliza uno de los modelos presentados (Ec. 3.2 a Ec. 3.4). Tener cuidado de realizar el ajuste de curva utilizando solamente los datos del viscosímetro rotacional y temperatura absoluta.

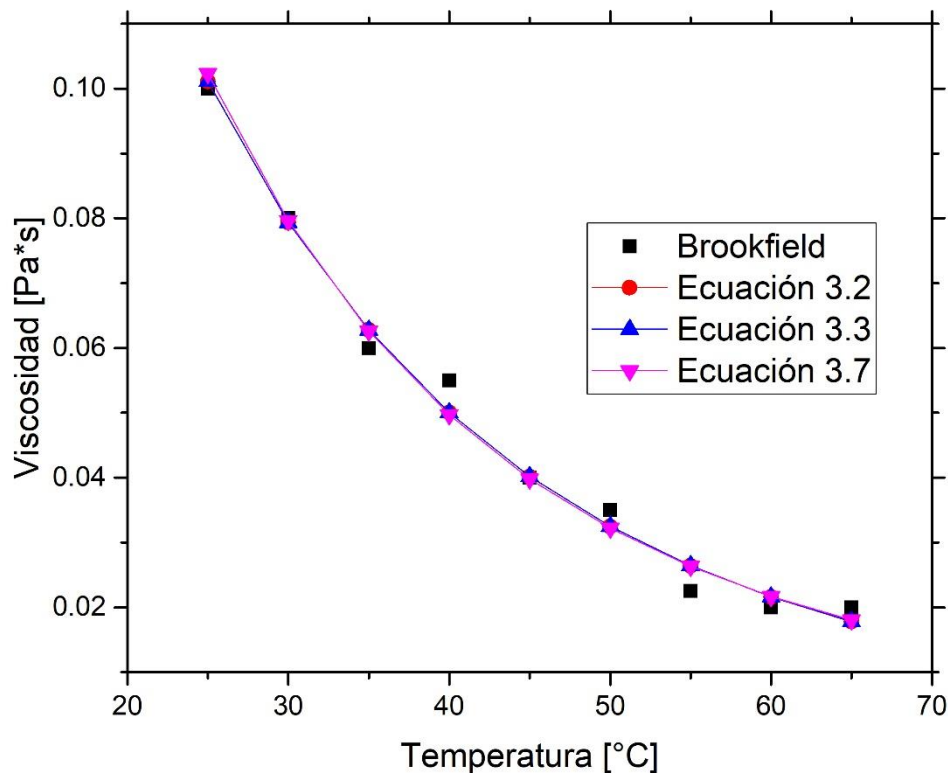


Figura 3.2. Gráfica de viscosidad contra temperatura.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	31/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- Calcular el número de Reynolds que se tiene con el viscosímetro de bola en caída libre, utilizando la medida de viscosidad hecha con el viscosímetro Brookfield, y comparar ambos valores de viscosidad. Observar cómo influye el número de Reynolds obtenido con cada tipo de esfera utilizada en el resultado de la viscosidad.

7. Cuestionario

- ¿Cuál es la importancia de la viscosimetría? Investiga los diferentes métodos que existen para medir la viscosidad de las sustancias, explicando en que se basan cada uno de ellos
- ¿Con qué medirías la viscosidad de un shampoo, de vaselina, de salsas, etcétera? ¿Se puede utilizar un viscosímetro como los utilizados en el laboratorio? Justifica tu respuesta.
- ¿Cómo se comporta la viscosidad con respecto a la temperatura y a qué se debe dicho comportamiento en líquidos y en gases?
- ¿Cómo influye la temperatura en el comportamiento de la viscosidad en procesos como, el bombeo de sustancias a lo largo de una tubería o en la extrusión de plásticos o algún otro proceso? Justifica tu respuesta de manera lógica.
- ¿Qué importancia tiene el conocer el comportamiento de la viscosidad con respecto a la temperatura en, por ejemplo, los aceites para lubricación de motor o máquinas?
- ¿Qué debes tener en cuenta para que el viscosímetro de bola en caída libre genere resultados confiables y por qué?

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

- White F. M. (2011). *Mecánica de fluidos*. 7a edición. EUA: McGraw-Hill.
- Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2019). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. 4ª edición en español. McGraw-Hill México.

10. Anexos

Memoria de cálculo.

Incluir aquí los datos experimentales obtenidos, todas las ecuaciones utilizadas con su análisis de unidades, así como la forma en que se realizaron todos los cálculos para llegar a los resultados obtenidos. También incluir aquí el desarrollo de la ecuación para obtener la viscosidad (Ec. 3.1). Se

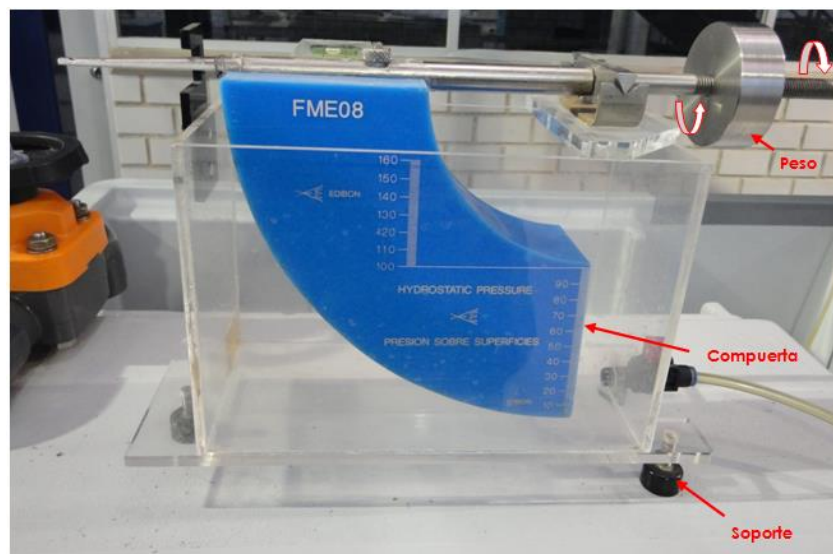
	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	32/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

deja aquí libre al profesor para dar algún otro material complementario de acuerdo con el enfoque que se quiera dar.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	33/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 4

Fuerzas Sobre Superficies Sumergidas



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 I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	34/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

Tanque de Acrílico	Riesgo de ruptura al golpearlo con el dispositivo que funciona como compuerta o con el contrapeso del tornillo sin fin.
--------------------	---

2. Objetivos

- ✓ Localizar el centro de presión de una superficie sumergida parcial y totalmente.

3. Conceptos básicos y definiciones

El diseño de estructuras de contención requiere el cálculo de las fuerzas hidrostáticas sobre las superficies adyacentes al fluido. Estas fuerzas están relacionadas con el efecto del peso del fluido sobre las superficies que lo contienen. Por ejemplo, un depósito con una base plana y horizontal de área **A** que contenga una altura **H** de agua soportará una fuerza vertical hacia abajo igual a **F = γHA**, donde **γ** es el peso específico del agua. Si la superficie no es horizontal, se requerirían cálculos adicionales para determinar las componentes de la fuerza hidrostática.

Si despreciamos las variaciones en la densidad del fluido, la ecuación de la hidrostática nos dice que la presión sobre cualquier superficie sumergida varía linealmente con la profundidad. El caso de una superficie plana es análogo al problema de flexión y compresión combinadas en resistencia de materiales, ya que en ambos se presenta una distribución lineal de esfuerzos. El problema hidrostático se reduce pues, a fórmulas simples que atañen al centroide o centro de gravedad y a los momentos de inercia de la sección plana.

Por ejemplo, la fuerza total en una pared plana vertical sumergida, es igual a la presión aplicada en el centroide de la pared multiplicada por el área total de la misma. Sin embargo, para equilibrar la contribución del momento de flexión producido por la distribución de fuerzas de presión ejercidas sobre toda la superficie de la pared, la línea de acción de la fuerza resultante no pasa por el centroide sino debajo de éste, hacia la zona de presiones más elevadas. A este punto de la pared en donde se aplica la fuerza resultante se le conoce como **Centro de Presión**.

4. Equipo y Material

1. El laboratorio cuenta con un aparato para simular una compuerta que se va sumergiendo (**Foto 1**).
2. Porta pesas y masas estándar.
3. Flexómetro.

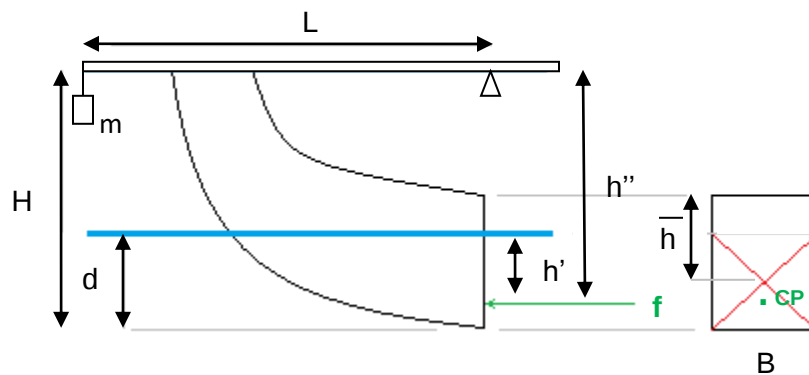
	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	35/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

5. Desarrollo

Procedimiento

1. Nivelar la base del equipo variando la altura de los soportes en sus esquinas. Es importante hacer esto antes de agregar agua al dispositivo (**Foto 1.**).
2. Equilibrar el vástago de la compuerta con la horizontal, en un extremo debe colocarse el porta pesas y en el otro se modifica la distancia entre las masas y el apoyo (**Foto 1.**).
3. Se mide la longitud del vástago (L) y las dimensiones de la compuerta (B y D).
4. Se agrega una masa de 30 gr, lo cual desnivelará la horizontal lograda en el punto anterior.
5. Se va llenando el depósito con agua hasta recuperar la horizontal del vástago de la compuerta.
6. Se registra el valor de la masa utilizada.
7. Se miden las distancias H, d, h', h'' y h (revisar diagramas).
8. Se repite los puntos del 4. al 7. hasta alcanzar una masa de 450 gr.

5.1 Inmersión Parcial



$f = PA = \rho g \bar{h}(Bd)$; esta es la magnitud de la fuerza sobre la cara plana de la compuerta cuya base es B.

$$f = \rho g \frac{d}{2}(Bd) = \frac{\rho g B d^2}{2}$$

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	36/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$M = Fh'' = mgL$; Momento con respecto al eje X (perpendicular al plano de esta hoja de papel). Esto es porque el momento producido por el peso de la masa m (en sentido positivo), debe ser compensado por el momento producido por la fuerza F debida a la presión ejercida por el agua sobre la superficie (en sentido negativo).

$$h'' = \frac{mgL}{F} = \frac{2mL}{\rho B d^2} \quad \text{Experimental}$$

(La anterior es la distancia al centro de presiones calculada de forma experimental).

Teoría de compuertas:

$$h' = \frac{I_x}{Ah}; \text{ donde } I_x = 2^\circ \text{ momento de área o momento de inercia con respecto al eje X.}$$

Teorema de ejes paralelos:

$$I_x = I_C + Ah^2 = \frac{Bd^3}{12} + Bd \left(\frac{d}{2} \right)^2 = \frac{Bd^3}{3}$$

$$h'' = H - d + h'$$

$$h'' = H - \frac{d}{3} \quad \text{Teórica}$$

(La anterior es la distancia al centro de presiones calculada teóricamente).

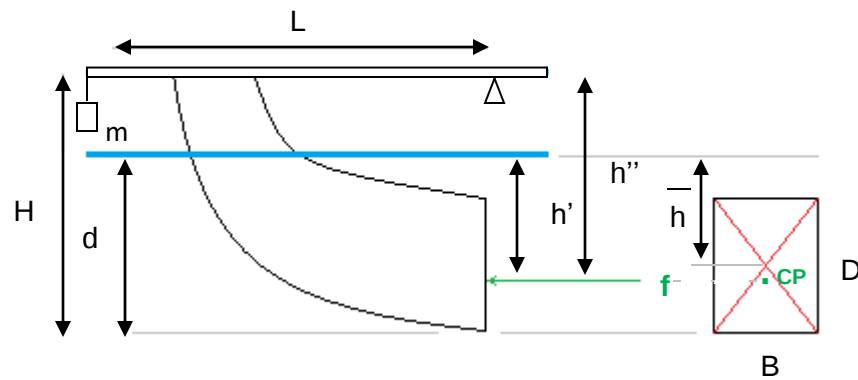
Datos

L, B

m	h'' _{EXPERIM}	h' _{EXPERIM}	h	H	d
30 gr					
60 gr					
90 gr					
...					

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	37/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

5.2 Inmersión Total



$$f = PA = \rho g \bar{h}(BD) = \rho g BD \left(d - \frac{D}{2} \right)$$

$$M = Fh'' = mgL$$

$$h'' = \frac{mL}{\rho BD \left(d - \frac{D}{2} \right)} \quad \text{Experimental}$$

$$h'' = \frac{\frac{D^2}{12} + \left(d - \frac{D}{2} \right)^2}{d - \frac{D}{2}} + H - d \quad \text{Teórica}$$

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	38/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Datos

L, B, D,

m	h''_{EXPERIM}	h'_{EXPERIM}	$\bar{h}$	H	d
...					
390 gr					
420 gr					
450 gr					

6. Resultados

Inmersión parcial

f	$h''_{\text{TEÓRICO}}$	h''_{EXPERIM}

Inmersión total

f	$h''_{\text{TEÓRICO}}$	h''_{EXPERIM}

Trazar una gráfica de profundidad del centro de presión (h'') vs. la profundidad de inmersión (d).

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	39/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

7. Cuestionario

- 1.- Definir centro de gravedad y centro de presiones.
- 2.- ¿A qué se debe que el centro de presiones siempre se encuentra por debajo del centro de gravedad en una superficie sumergida?
- 3.- ¿Cómo es la distribución de fuerzas si la superficie es plana?
- 4.- ¿Cómo será la distribución de fuerzas si la superficie es curva?
- 5.- Comentar acerca de la variación del empuje con la profundidad.
- 6.- Comentar y explicar cualquier discrepancia entre los resultados del experimento y los teóricos, con respecto a la profundidad del centro de presión.

8. Conclusiones

9. Bibliografía

- White, Frank. *Mecánica de fluidos*. 7a edición. EUA: McGraw-Hill, 2011. 862 p. ISBN 978-0-07-352934-9
- Çengel, Yunus; Cimbala, John. *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. EUA: McGraw-Hill, 2006. 959 p. ISBN-10: 970-10-5612-4

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	40/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 5

Medición 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 I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	41/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
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.
Operar a más de 40 Hz	Vibración excesiva en el túnel de viento.
Hilo caliente	Ruptura del hilo debido a manejo inadecuado.
Velómetro	Ruptura debido a manejo inadecuado.
Ventilador del túnel de viento	Daños físicos en manos y brazos al operar a una distancia muy corta entre el alumno y conjunto motor eléctrico-ventilador.

2. Objetivos

- ✓ Medir la velocidad puntual de un flujo de aire al interior del túnel de viento (zona de prueba), con diferentes instrumentos.
- ✓ Medir la presión dinámica con un tubo de Prandtl para el cálculo posterior de la velocidad promedio del flujo de aire en la sección de prueba del túnel de viento.
- ✓ Obtener una ecuación para correlacionar la velocidad del aire a diferentes frecuencias del motor del túnel de viento.

3. Conceptos básicos y definiciones

La velocidad de un flujo es una de las propiedades cinemáticas más importantes en la mecánica de fluidos. Esta puede ser medida de forma puntual por medio de diversos instrumentos que actúan bajo diferentes principios físicos, la mayoría de estos, midiéndola de forma indirecta. Dos de estas formas de medir la velocidad son el tubo de Pitot/Prandtl y el anemómetro de hilo caliente.

Tubo de Pitot/Prandtl.

Las sondas de Pitot (figura 5.1.a) y de Pitot estática (figura 5.1.b, está última también llamada tubo de Prandtl) son dos instrumentos que miden en forma indirecta la velocidad de un flujo mediante una diferencia de presión. Constan de un tubo delgado con un orificio de borde redondeado que se encuentra alineado con el flujo de velocidad V .

Fue inventado por el ingeniero Henri Pitot en 1732 y modificado en el siglo XIX por Henry Darcy, dando origen al tubo de Pitot estático o tubo de Prandtl, el cual es un tubo de Pitot que tiene orificios en la pared exterior del tubo. Se utiliza para medir la velocidad del viento en aparatos aéreos y para medir las velocidades de aire y gases en aplicaciones industriales, midiendo la velocidad en un punto dado de la corriente de flujo y no la media de la velocidad del flujo.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	42/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

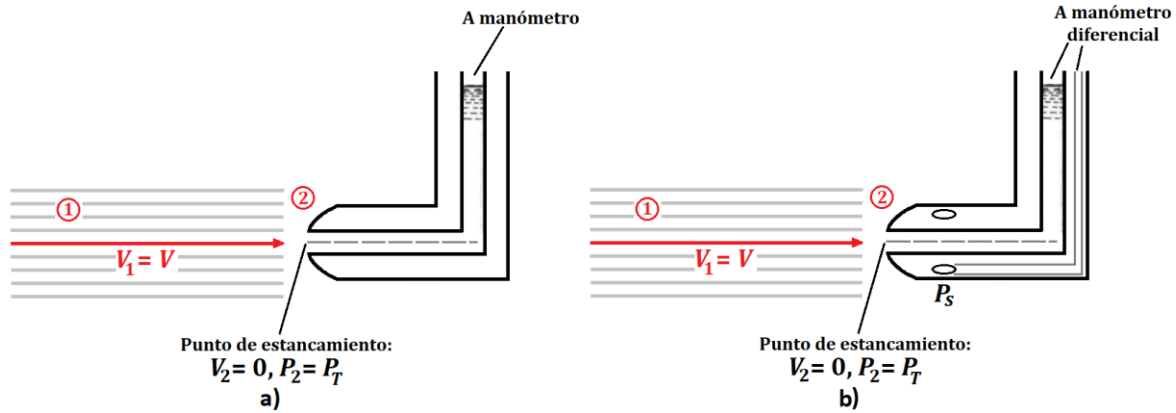


Figura 5.1. a) Tubo de Pitot. b) Tubo de Prandtl (Pitot estático).

Como se puede observar en la figura 5.1, por un lado, en el punto 1, se tiene al flujo con velocidad $V_1 = V$, densidad ρ y presión $P_1 = P_s$, que es la **presión estática**. Por otro lado, en el punto 2 se tiene un punto de estancamiento, en el cual el flujo se frena, por lo que la velocidad es de $V_2 = 0$, y el flujo junto a este punto se divide y circula alrededor del tubo. En este punto el tubo mide la **presión total**, $P_2 = P_T$ (también llamada **presión de estancamiento**, presión o de remanso) y que es igual a la suma de la presión estática P_s y de la presión dinámica, P_D .

$$P_T = P_s + P_D \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Si se considera flujo incompresible y no viscoso se puede aplicar la ecuación de Bernoulli,

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Tomando en cuenta que $z_1 \approx z_2$, sustituyendo y despejando V se puede demostrar que

$$V = \sqrt{\frac{2(P_T - P_s)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2P_D}{\rho}} \quad (\text{Ec. 5.3})$$

En el caso de utilizar un tubo de Prandtl, este se conecta a un manómetro diferencial para obtener directamente la presión dinámica (diferencia entre la total y la estática) y, con ella, la velocidad, figura 5.2.a. Mientras que en el caso tubo del tubo de Pitot, se mide la presión total o de estancamiento y la presión estática es medida en algún otro punto en el flujo como se observa en la figura 5.2.b.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	43/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 5.2. a) Tubo Pitot estático o Prandtl. b) Tubo de Pitot y tomas estáticas de presión independientes.

Además de ser un instrumento sencillo, barato y confiable por no tener partes móviles. También provoca una caída pequeña de presión y no perturba de forma considerable al flujo siempre y cuando el diámetro sea pequeño comparado con el lugar donde se está midiendo; por ejemplo, al medir el flujo en una tubería, el diámetro del tubo de Pitot debe ser pequeño comparado con el diámetro de esta. Sin embargo, deben tenerse consideraciones para su correcto funcionamiento, por ejemplo: debe llevar un correcto mantenimiento para evitar que se “tape” el tubo provocando lecturas incorrectas, debe estar alineado adecuadamente con el flujo para evitar errores significativos, figura 5.2.

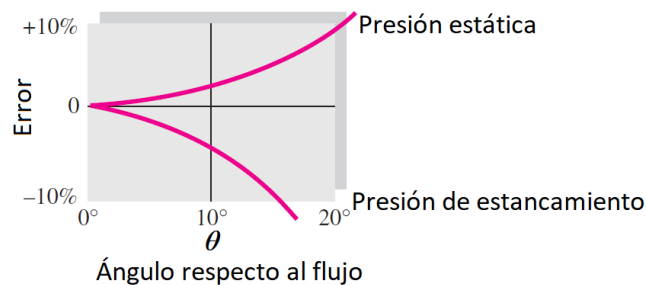


Figura 5.3. Error en las presiones en función del ángulo entre el tubo y el flujo (tomado y modificado de White, 2011).

Finalmente, se debe recordar que su funcionamiento se basa en la ecuación de Bernoulli, que considera un flujo no viscoso. Para esto se debe tomar en cuenta la definición del número de Reynolds para el tubo de Pitot.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho \cdot V \cdot D_p}{\mu} \quad (\text{Ec. 5.4})$$

Donde D_p es el diámetro del tubo de Pitot y μ la viscosidad del fluido. Así pues, se debe asegurar un alto número de Reynolds (altas velocidades y/o fluidos poco viscosos) para que sea válida la ecuación de Bernoulli; White indica que para Reynolds mayores a 1000 se puede considerar válido,

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	44/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

sin embargo, algunos fabricantes sugieren números de Reynolds mayores a 20,000 para mediciones adecuadas (An Introduction to Pitot Tubes and Probes, s.f. <https://www.omega.com/en-us/resources/pitot-tube>). También se recomienda utilizar un manómetro adecuado, con buena resolución y velocidad de respuesta. Adicionalmente, se deben evitar mediciones donde en zonas donde las fuerzas viscosas dominan, por ejemplo, en la capa límite, aunque, cabe mencionar, hay factores y procedimientos para la corrección de la velocidad medida con un tubo de Pitot a bajos números de Reynolds o en capa límite (Spelay *et al*, 2015 y Bailey *et al*, 2013, respectivamente).

Anemómetro de Hilo Caliente.

Otra sonda de velocidad es el Hilo Caliente (HC). Este instrumento puede medir la velocidad de forma puntual y está basado en el principio del enfriamiento por convección de un cuerpo a alta temperatura.

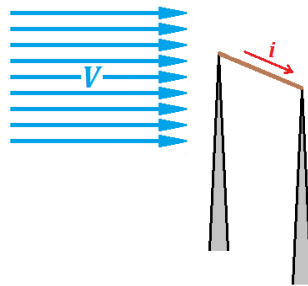


Figura 5.3. Principio del anemómetro de Hilo Caliente.

Esta sonda consta de un hilo metálico delgado (10 μm o menos) que puede ser de platino o níquel de resistencia, R , sujetado en dos soportes metálicos entre los que hay una diferencia de potencial, provocando que por el hilo circule una corriente eléctrica, i , generándose calor por efecto Joule (I^2R). Cuando se encuentra en equilibrio, el calor generado es el mismo que se pierde principalmente por convección debido al flujo. Si hay un cambio en la velocidad, cambia la tasa de transferencia de calor y la temperatura del hilo hasta alcanzar un nuevo equilibrio. Los soportes están conectados a un circuito eléctrico que amplifica y controla al anemómetro dando como resultado un voltaje de salida para cada valor de velocidad. De esta forma, el calor perdido se puede modelar con la Ley de King (en honor a L. V. King, quien ideó este procedimiento)

$$q = I^2R \approx (T_W - T_f)(a + b \cdot V^n) \quad (\text{Ec. 5.5})$$

Donde T_W y T_f son las temperaturas del hilo y del fluido, respectivamente, mientras que a , b y n son coeficientes que se obtienen mediante una calibración.

El anemómetro se puede operar de dos formas: a temperatura constante, CTA (*Constant Temperature Anemometer*) o a corriente constante, CCA (*Constant Current Anemometer*), siendo

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	45/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

la primera la más común debido a su mayor facilidad de uso, la alta velocidad de respuesta y el bajo ruido, a pesar de que necesita un circuito electrónico más complejo. De esta forma se tiene una sonda capaz de realizar mediciones para flujo laminar o turbulento, sin embargo, debido a su fragilidad, no se debe utilizar en líquidos. Para ello se utiliza una película metálica delgada, normalmente de platino y que tiene una operación similar al hilo caliente. También permite la medición de flujos bidimensionales y tridimensionales cambiando la probeta (figura 5.4).



Figura 5.4. Probetas para flujos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales y anemómetro de película caliente. Dantec Dynamics (2001) [Diapositiva de Power Point]. Dantec Dynamics.
<https://www.dantecdynamics.com>.

Este tipo de anemómetro puede ser más o menos sofisticado, de acuerdo con el uso que se le vaya a dar: investigación (hilo y probeta más pequeña provocando menos perturbación en el flujo, mayor resolución temporal y sensibilidad) o mediciones de campo (hilo más robusto y mayor facilidad de ajuste y transporte).



Figura 5.5. Hilo caliente para investigación (izquierda) y para mediciones de campo (derecha). Equipo del laboratorio de termofluidos.

Velocidad promedio y flujo volumétrico.

El flujo volumétrico es la cantidad de volumen de un fluido que atraviesa un área por unidad de tiempo. En términos de la velocidad de un flujo:

$$Q = \int (\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) dA \quad (\text{Ec. 5.6})$$

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	46/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Donde $\mathbf{V}$ es el vector velocidad del flujo y $\mathbf{n}$ es el vector normal a la superficie a través de la cual se da el flujo. Si dividimos el flujo volumétrico entre el área por donde fluye, obtenemos la velocidad promedio, o bien

$$V_{prom} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (\text{Ec. 5.7})$$

Debido a la condición de no deslizamiento en paredes y a perturbaciones que pudiera haber en un flujo, rara vez se puede obtener flujo uniforme estacionario, por lo que se suele utilizar el valor de la velocidad promedio. Algunos parámetros, como el Número de Reynolds o el flujo volumétrico, se calculan a partir de este, de ahí la importancia de su medición.

En el caso de ductos, se debe tomar la velocidad puntual en varias zonas de la sección transversal y obtener el promedio aritmético de dichas mediciones para obtener la velocidad promedio. La **ASTM International** recomienda dividir imaginariamente al ducto (circular o rectangular) en diversas secciones de acuerdo con el área de la sección transversal, figura 5.6, y tomar mediciones puntuales de velocidad en ellas para el posterior cálculo de la velocidad promedio y el flujo (ASTM D3464-96 Y ASTM D3154-96). Esa medida debe hacerse en un punto al menos 8 diámetros equivalentes internos aguas abajo y al menos 2 aguas arriba de cualquier cambio en la geometría, o en un punto donde sea lo más cercano a esta condición, si es que resulta impráctica.

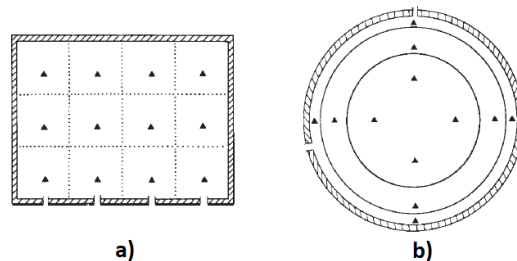


Figura 5.6. Segmentación del área para toma de mediciones de velocidad para el cálculo de la velocidad promedio para ductos a) rectangulares y b) circulares.

El mismo procedimiento proporciona, además, el número mínimo de mediciones a realizarse de acuerdo con el tamaño del ducto, sugiriendo tomar un promedio temporal en cada punto en caso de que la velocidad no sea estacionaria y cuidando que el diámetro del tubo de Pitot no sea mayor que 1/30 del diámetro del ducto para minimizar perturbaciones en el flujo.

Tabla 5.1. Número mínimo de mediciones para el cálculo de la velocidad promedio de acuerdo con el tamaño del área de la sección transversal para ductos rectangulares.

Área de la sección transversal en m ²	Número de mediciones
Menor de 0.2	4
Entre 0.2 y 2.3	12
Mayor de 2.3	20

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	47/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

4. Equipo y Material

1. Túnel de viento con accesorios.
2. Tubos de Prandtl.
3. Manómetro digital.
4. Velómetro.
5. Anemómetro de hilo caliente.
6. Flexómetro.
7. Transportador con nivel de burbuja.

5. Desarrollo

Preparación de los anemómetros. Antes de comenzar con la actividad, se debe preparar adecuadamente los instrumentos de medición para corroborar que funcionen correctamente.

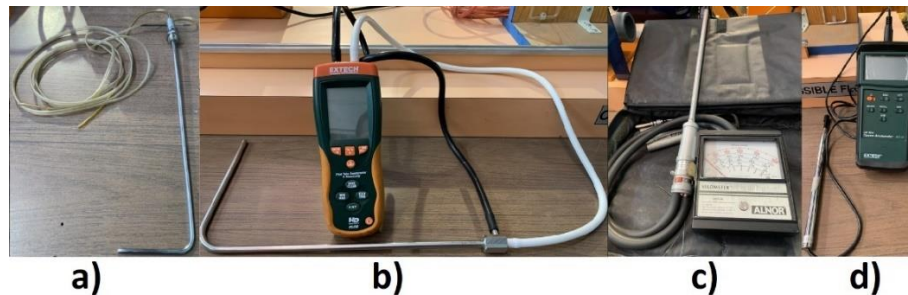


Figura 5.7. Anemómetros a utilizar en la práctica de laboratorio. a) Tubo de Prandtl de columna de agua, b) Tubo de Prandtl digital, c) Velómetro, d) Hilo Caliente.

Tubo de Prandtl de columna de agua (figura 5.7.a).

1. Comprobar que las mangueras no se encuentren tapadas y conectarlas en el banco de tubos con agua que se encuentra junto al túnel de viento.
2. Medir el ángulo del banco de tubos con agua (inclinado previamente con la ayuda del tornillo de sujeción) con el transportador con nivel de burbuja.

Tubo de Prandtl digital (figura 5.7.b).

1. Conectar las mangueras en el manómetro que viene con la sonda, teniendo en cuenta que la medición estática es la que se encuentra perpendicular a la base del tubo.
2. Prender el manómetro, elegir las unidades (m/s) y si el instrumento no marca 0, dejar apretado el botón HOLD/ZERO para su ajuste. El manómetro de este tubo de Prandtl, a diferencia del de columna de agua, es un manómetro de diafragma.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	48/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Velómetro (figura 5.7.c).

1. Conectar las mangueras en la parte posterior de la carátula y en la probeta adecuada guiándose con los signos + y – que se encuentran marcados para su correcta colocación. La sonda viene con diversas probetas, se aconseja utilizar la probeta roja con la escala hasta 5000 ft/min.
2. No mover la carátula mientras se realiza una medición pues esto provoca que la aguja se desplace y se tenga una lectura incorrecta.

Hilo caliente (figura 5.7.d).

1. Conectar la probeta con el hilo en el dispositivo y encenderlo, asegurándose previamente que el hilo se encuentre cubierto con su tapa.
2. Elegir las unidades adecuadas (m/s) y, en caso de que no marque cero, dejar apretado el botón aproximadamente 3 segundos ZERO para que se ajuste.

Actividad 1. Medición de la velocidad puntual de un flujo de aire en un túnel de viento.

1. Abrir el túnel de viento para remover tuercas y tapones laterales para insertar instrumentos de medición.
2. Cerrar el túnel viento, apretando el tornillo de cierre y tapando parte inferior para no afectar las mediciones de velocidad.
3. Conectar el túnel de viento al suministro eléctrico y encender el interruptor principal. El túnel debe ser operado presionando únicamente cuatro botones del panel de control: iniciar (START), parar (STOP), subir y disminuir frecuencia (flechas arriba y abajo, respectivamente), figura 5.8.
4. Encender el motor del túnel viento (botón START) y colocarlo a una frecuencia (usando las flechas), f ; se sugiere comenzar con un valor de frecuencia entre 15 y 22 Hz.
5. Introducir los instrumentos por los orificios laterales de la zona de visualización del túnel alineándolos en sentido del flujo (eje axial del túnel) y registrar las mediciones con todos los anemómetros en la Tabla 5.2: velocidad para el tubo de Prandtl digital, el velómetro y el hilo caliente, diferencia de alturas, $\Delta h_{Prandtl}$, para el tubo de Prandtl de columna de agua (medir el ángulo).
6. Aumentar la frecuencia del motor (se sugiere aumentos de 2 o 3 Hz) y volver a medir la velocidad con los instrumentos.
7. Repetir los pasos 5 y 6 hasta obtener 5 o 6 mediciones totales dando incrementos constantes a la frecuencia y procurando no sobrepasar los 40 Hz.
8. Apagar el Hilo Caliente y desmontarlo. Desmontar también el tubo de Prandtl de columna de agua y el velómetro; no olvidar regresar el banco de tubos a su posición vertical.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	49/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 5.8. Túnel de viento del laboratorio.

Tabla 5.2. Datos experimentales

f [Hz]	$\Delta h_{Prandtl}$ [mm _{agua}]	$V_{Prandtl\ digital}$ [m/s]	$V_{Velómetro}$ [ft/min]	$V_{HiloCaliente}$ [m/s]

Actividad 2. Medición de la velocidad promedio de un flujo de aire en un ducto con el tubo de Prandtl digital.

Para esta actividad se tomó en cuenta el área de la sección transversal de la zona de visualización del túnel de viento y el procedimiento marcado por la ASTM (ASTM D3464-96), considerando la Tabla 5.1 y la figura 5.6. Se medirá entonces la velocidad del flujo de aire en 4 puntos de la sección transversal del túnel de viento, mostradas en la figura 5.9, para calcular la velocidad promedio y el flujo volumétrico de aire en el túnel de viento (cuya área de sección transversal es de $A = 0.08843 \text{ m}^2$) con el siguiente procedimiento:

1. Sin apagar el túnel de viento, fijar el motor en una frecuencia entre 15 y 40 Hz, a elección del grupo.
2. Marcar con cinta adhesiva una distancia de 23 centímetros en el tubo medidos a partir de la toma de presión total.
3. Introducir el tubo de Prandtl digital con un ángulo de 64° en el orificio lateral de la zona de visualización del túnel de viento como se muestra en la figura 5.9 hasta donde se realizó la

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	50/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

marca en el tubo y registrar las mediciones en la tabla 5.3; utilizar el transportador con nivel de burbuja o con la herramienta auxiliar para ello.

4. Repetir el procedimiento en el lado opuesto de la zona de visualización del túnel de viento, tapando previamente el orificio del lado opuesto.
5. Apagar el tubo de Prandtl digital, desmontar las mangueras, disminuir la frecuencia, apagar el motor del ventilador (botón STOP), desconectar equipo del suministro eléctrico, regresar el banco de tubos a su posición vertical, colocar los tapones del túnel y entregar el equipo.

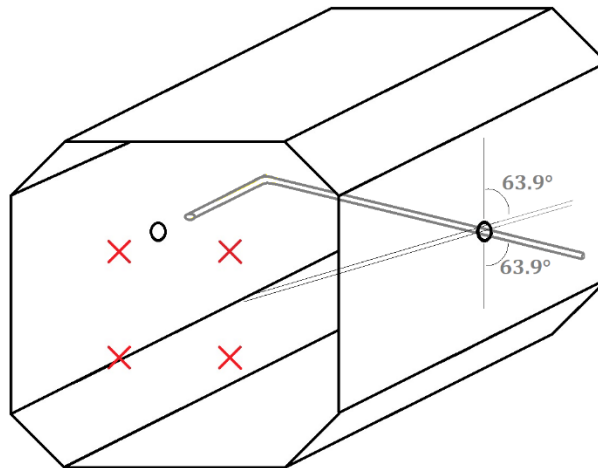


Figura 5.9. Diagrama de la posición del tubo de Prandtl digital para las mediciones de velocidad.

Tabla 5.3. Datos experimentales para obtener la velocidad promedio del flujo de aire en la sección de prueba del túnel de viento.

V [m/s]				

6. Resultados

Para la actividad 1. Obtener la presión dinámica, P_D , con la diferencia de alturas $\Delta h_{Prandtl}$, así como la velocidad respectiva en el tubo de Prandtl; el valor de la velocidad del tubo de Prandtl digital, del velómetro y del hilo caliente en unidades del SI. Completar la Tabla 5.4.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	51/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla 5.4. Tabla de resultados de la actividad 1.

f [Hz]	P_D [Pa]	$V_{Prandtl}$ [m/s]	$V_{Velómetro}$ [m/s]	$V_{HiloCaliente}$ [m/s]	$V_{Prandtl\ digital}$ [m/s]

Graficar los resultados y obtener, mediante regresión lineal, una curva de ajuste para cada instrumento que modele la velocidad en función de la frecuencia.

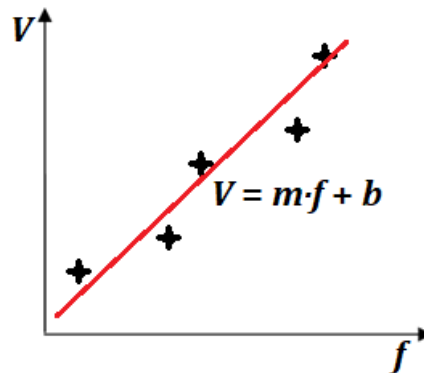


Figura5.8. Gráfica de velocidad contra frecuencia con datos experimentales y ajuste de curva.

Para la actividad 2. Calcular la velocidad promedio, V_{prom} con los datos de la tabla 5.3, y el flujo volumétrico, $\dot{Q}$, en el ducto con la ecuación 5.7.

7. Cuestionario

1. ¿Cuál es la relevancia del valor mínimo de frecuencia del motor? ¿Qué pasa si el valor seleccionado es más pequeño?
2. ¿Dentro del túnel las presiones manométricas generadas son positivas o negativas? Explique su respuesta.
3. ¿Es aconsejable conectar las mangueras del manómetro digital de cierta manera, o eso no importa para obtener una lectura?
4. ¿Qué medidor de velocidad presentó los valores más grandes? Explique dicho comportamiento.
5. ¿Qué medidor de velocidad presentó los valores más pequeños? explique dicho comportamiento

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	52/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

6. Si tuvieras que elegir uno de los anemómetros utilizados para realizar el tipo de medición que se llevó a cabo (flujo uniforme, estacionario a número de Reynolds moderado), ¿cuál sería y por qué?

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

1. White, F. M. (2011). Fluid Mechanics. 7th Edition. McGraw-Hill EUA.
2. Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2019). Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. 4ª edición en español. McGraw-Hill México.
3. D3154. *Standard Test Method for Average Velocity in a duct (Pitot Tube Method)*. ASTM International (2000), USA.
4. D3464. *Standard Test Method for Average Velocity in a duct using a Thermal Anemometer*. ASTM International (2001), USA.

Fuentes complementarias

5. Spelay, R. B., Adane, K. F., Sanders, R. S., Sumner, R. J., Gillies, R. G. (2015). The effect of low Reynolds number flows on pitot tube measurements. *Flow Measurement and Instrumentation*, Volume 45, 247-254,
6. Bailey, S.C.C., Hultmark, M, Monty, J.P., Alfredsson, P.H. (2013). Obtaining accurate mean velocity measurements in high Reynolds number turbulent boundary layers using Pitot tubes. *Journal of fluid mechanics*, 2013-670.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	53/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 6

Medición de gasto



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 I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	54/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
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.
Manómetro de Mercurio	Intoxicación por contacto del mercurio con la piel o ingestión accidental.

2. Objetivos

- ✓ Calcular tanto el gasto volumétrico real (volumen y tiempo) como el obtenido a través de la caída de la presión y comparar dichas mediciones.
- ✓ Obtener el coeficiente de descarga correspondiente a cada medidor por obstrucción utilizando los valores medidos.

3. Concepto básicos y definiciones

La medición de flujo es la cantidad de volumen de fluido que pasa a través de un área en un intervalo de tiempo. La medición precisa del flujo resulta esencial para el control de procesos industriales, la evaluación del rendimiento de motores, sistemas de enfriamiento, etc. Existen muchos tipos de medidores de flujo disponibles en el mercado. La elección del tipo básico de medidor de fluido y su sistema indicador dependen de varios factores, algunos importantes son el rango y el tipo de fluido.

Rango: Los medidores disponibles comercialmente pueden medir flujos desde unos pocos mililitros por segundo [mL/s] para experimentos precisos de laboratorio hasta varios miles de metros cúbicos por segundo [m^3/s] para el agua de riego y los sistemas de agua y alcantarillado municipales. Entonces, para la selección de un medidor particular, es necesario conocer el orden de magnitud general de la rapidez de flujo y el rango de las variaciones esperadas.

Tipo de fluido: El desempeño de algunos medidores de flujo se ve afectado por las propiedades y la condición del fluido. Una consideración básica es si el fluido es un líquido o gas. Otros factores importantes son; la viscosidad, temperatura, corrosividad, conductividad eléctrica entre otros. Los lodos y fluidos con fases múltiples requieren medidores especiales.

Existe un tipo de dispositivos (Venturi, placa de orificio y tobera) que a través de la caída de presión permiten calcular el flujo volumétrico. En esta práctica se utilizarán el Venturi y placa de orificio.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	55/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tubo venturi

El Tubo venturi, Fig. 6.1, es un dispositivo que provoca cambios en la presión del fluido que pasa por él. En esencia, éste es una tubería de menor diámetro entre dos tramos cónicos. La presión varía en la proximidad de la sección estrecha; el flujo proveniente de la tubería principal se acelera mediante una sección estrecha llamada garganta, donde se disminuye la presión del fluido. Enseguida, el flujo se expande a través de la porción divergente hasta el mismo diámetro de la tubería principal llamada sección 2. Estas tomas de presión van unidas a los dos lados de un manómetro diferencial de manera que la altura h es una indicación de la diferencia de presión ($P_1 - P_2$).

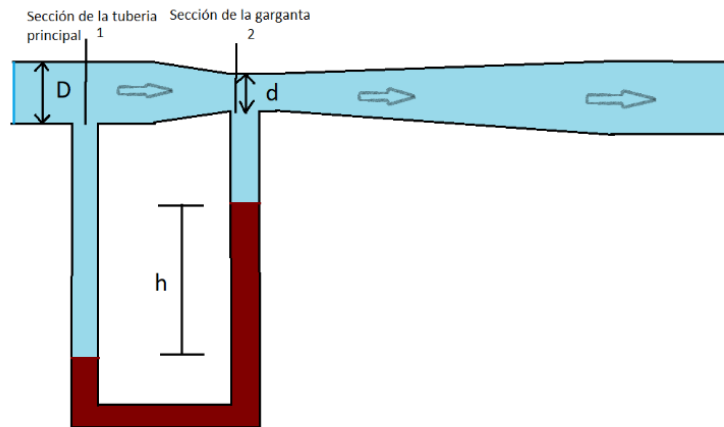


Figura 6.1. Tubo venturi.

Placa de orificio

Una placa plana con un agujero de bordes rectos, maquinados de forma precisa, se refiere como un orificio, Fig. 6.2. Cuando se colocan orificios concéntricos en una tubería, provoca que el flujo se contraiga súbitamente a medida que se acerca al orificio y después se expande de nuevo repentinamente hasta el diámetro de la tubería principal. La corriente que fluye a través del orificio forma una vena contracta (sección 2) y la velocidad de flujo resulta en una disminución de la presión aguas abajo del orificio.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	56/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

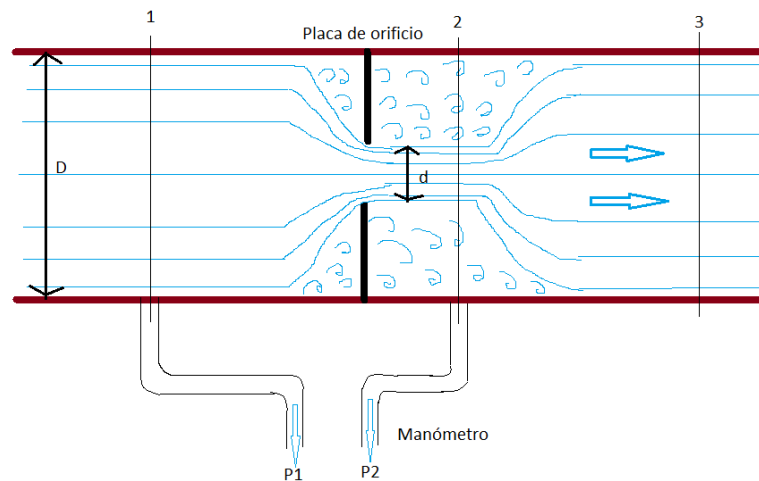


Figura 6.2. Placa de orificio

4. Equipo y Material

El equipo a utilizar en esta práctica está compuesto por:

1. Banco de pruebas para medidores de gasto.
2. Sección de tubería con placa de orificio.
3. Sección de tubería con tubo venturi.
4. Cronómetro.

5. Desarrollo

Actividad 1. Medición del gasto volumétrico con placa de orificio.

El diámetro interior de la tubería principal es de 39 mm y el diámetro del orificio de la placa es de 22 mm.

1. Colocar la sección de tubería que tiene la placa de orificio en el banco de pruebas, poniendo especial atención en que los empaques de cada uno de los extremos de la sección de tubería se encuentren en su lugar (1).

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	57/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 6.1. Equipo. Ubicación de zona de interés (1).

- Conectar las mangueras que van al manómetro de mercurio en cada una de las válvulas (2) que se encuentran en la placa de orificio, teniendo cuidado que dichas válvulas se encuentren totalmente cerradas al igual que las válvulas de purga del manómetro (3).

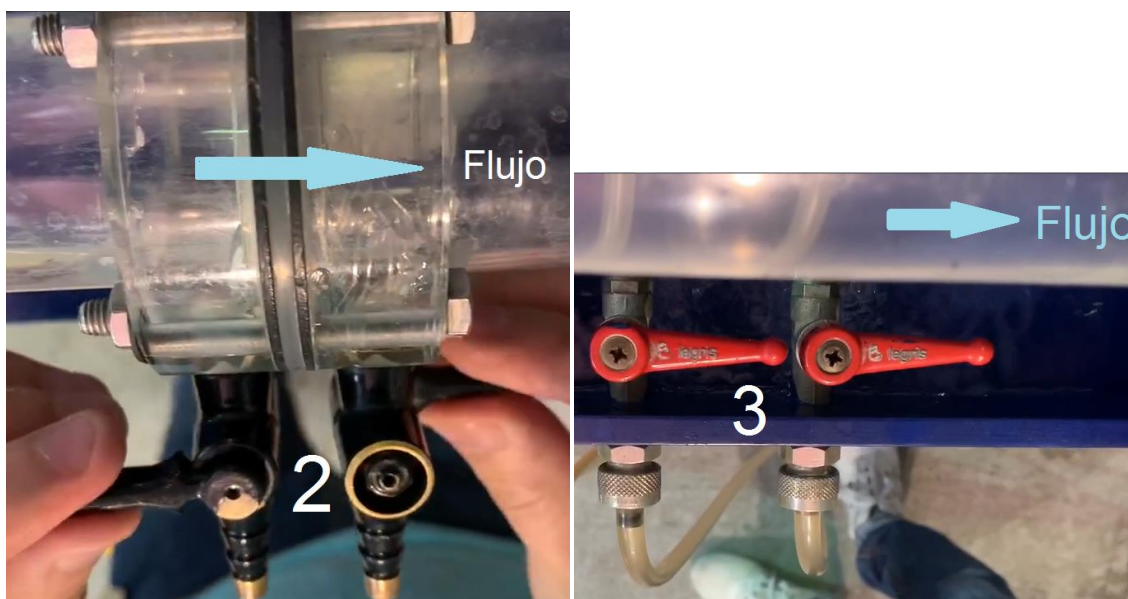


Figura 6.2. Ubicación de zona de interés (2) y (3).

- Abrir gradualmente la válvula que regulará el gasto a lo largo del experimento (4) y encender el equipo (5) apretando el botón negro para que el agua (fluido de trabajo), inicie a circular por el sistema.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	58/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 6.3. Ubicación de zona de interés (4) y (5).

4. Abrir las válvulas (2) que se encuentran en la placa de orificio para que el agua pase y expulse el aire que tienen las mangueras por la zona en las que se encuentran las válvulas de purga, dejando dichas mangueras totalmente purgadas de aire.
5. Una vez purgadas las mangueras se debe de abrir al mismo tiempo y lentamente las dos válvulas de purga para evitar fuertes cambios de presión que puedan hacer que el manómetro de mercurio se dañe. Abiertas totalmente las válvulas de purga (3) se tendrá en el manómetro una diferencial de presión la cual se utilizará como la primera medición.

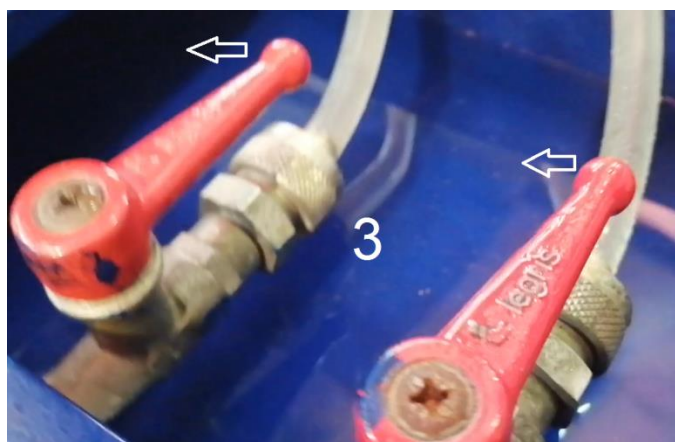


Figura 6.4. Ubicación de zona de interés (3) purga de aire en mangueras.

Medición del gasto real con el tanque volumétrico. Con la primera diferencia de presiones se tomará el gasto que se tiene en el tanque volumétrico donde se descarga el agua, dicha medición se realizará de la siguiente manera:

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	59/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

6. Se obstruirá el flujo del agua dejando caer una esfera en el orificio (6) por donde esta se evacua.



Figura 6.5. Ubicación de zona de interés (6).

7. En la zona de medición del volumen (7) se dejará que el agua pase a la segunda escala de medición y marque 5 litros, momento en el que se iniciará a tomar el tiempo con el cronometro.

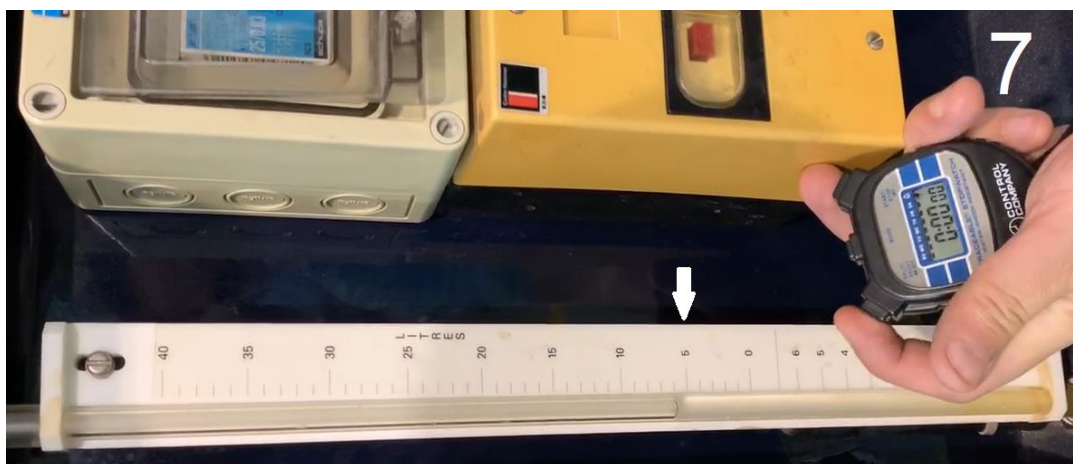


Figura 6.6. Ubicación de zona de interés (7).

8. Se tomará el tiempo que tarda en llenarse cierta cantidad de volumen en el medidor de volumen (7), se recomienda usar volúmenes altos para minimizar errores en el accionamiento del cronómetro (iniciar y detener) en el conteo del tiempo. Para gastos

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	60/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

bajos se recomienda 10 litros, y para gastos altos 20 litros. Después de realizar las mediciones, quitar la esfera para liberar el fluido del tanque volumétrico.

Se sugiere realizar la medición de gasto al menos 5 veces, variando el gasto con la válvula del equipo (4). Llenar la siguiente Tabla de datos.

Tabla 6.1: Datos experimentales, actividad 1.

Evento	Volumen [l]	Tiempo [s]	Δh [mm]
1			
2			
3			
4			
5			

Los datos obtenidos de volumen y tiempo serán utilizados para calcular el gasto real del agua, Q_{real} .

Actividad 2. Medición del gasto volumétrico con el tubo venturi.

El diámetro interior de la tubería principal es de 39 mm y el diámetro de la garganta del tubo venturi es de 18 mm.

Efectuar el procedimiento descrito en la actividad 1 (incisos 1 a 8), pero ahora con el tubo venturi.

Se sugiere realizar la medición de gasto al menos 5 veces, variando el gasto con la válvula del equipo (4). Llenar la siguiente Tabla de datos.

Tabla 6.2: Datos experimentales, actividad 2.

Evento	Volumen [l]	Tiempo [s]	Δh [mm]
1			
2			
3			
4			
5			

Los datos obtenidos de volumen y tiempo serán utilizados para calcular el gasto real del agua, Q_{real} .

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	61/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

6. Resultados

Adicionalmente se tendrán que desarrollar cálculos para determinar el gasto real, la velocidad promedio, el número de Reynolds, la diferencia de presiones, el gasto ideal, el coeficiente de descarga y el gasto real del equipo para la placa de orificio y para el tubo de Venturi. Los resultados obtenidos se anotarán en las Tablas 6.3 y 6.4.

Tabla 6.3: Resultados para la placa de orificio.

Lectura	Q_{real} [m ³ /s]	V_{prom} [m/s]	Re [1]	Δh [m]	ΔP [Pa]	Q_I [m ³ /s]	C_d [1]	$Q_{r\ equipo}$ [m ³ /s]	Error [%]
1									
2									
3									
:									
n									

Tabla 6.4: Resultados para el tubo de Venturi.

Lectura	Q_{real} [m ³ /s]	V_{prom} [m/s]	Re [1]	Δh [m]	ΔP [Pa]	Q_I [m ³ /s]	C_d [1]	$Q_{r\ equipo}$ [m ³ /s]	Error [%]
1									
2									
3									
:									
N									

Graficar el coeficiente de descarga C_d contra el número de Reynolds para el tubo venturi y para la placa de orificio.

7. Cuestionario

1. ¿Qué representa físicamente el coeficiente de descarga?
2. ¿Cómo varía el coeficiente de descarga con el número de Reynolds? ¿Qué pasa a bajos y a altos valores de este último y por qué?

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	62/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- Una vez considerando el coeficiente de descarga, ¿consideras que alguno de los instrumentos utilizados tiene una mayor exactitud o precisión?
- ¿Cuándo considerarías conveniente utilizar la placa de orificio y el tubo venturi?

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

- Mott, R.L. y Untener, J. A. (2015), Applied Fluid Mechanics. 7th. Edition. Pearson.
- White, F. M. (2011). Fluid Mechanics. 7th Edition. McGraw-Hill EUA.
- Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2019). Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. 4ª edición en español. McGraw-Hill México.

10. Anexos

El gasto real (Q_{real}) se obtiene con la división del volumen medido en el tanque volumétrico y el tiempo que tardo en llenarse dicho volumen:

$$Q_{real} = \text{Volumen} / \text{tiempo} \quad (\text{Ec. 6.1})$$

La velocidad promedio (V_{prom}) se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_{prom} = \frac{Q_{real}}{\text{Area}_{transversal \text{ sección } 1}} \quad (\text{Ec. 6.2})$$

Para el cálculo del número de Reynolds (Re), se realiza de la siguiente manera:

$$Re = \frac{V_{prom} * \rho * D_1}{\mu} \quad (\text{Ec. 6.3})$$

Donde ρ y μ son la densidad y viscosidad del fluido de trabajo, y D_1 es el diámetro en la sección 1.

El gasto ideal (Q_I) se calculará por medio de la ecuación de Bernoulli (figura 6.1 o figura 6.2) y continuidad de la siguiente manera:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \quad (\text{Ec. 6.4})$$

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	63/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

El subíndice 1 denota que el valor de la propiedad es en la *sección 1* y el subíndice 2 denota que el valor de la propiedad es en la *sección 2*. P representa la presión, V la velocidad, z la altura y g la gravedad.

Donde $z_1 = z_2$, entonces:

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} (V_2^2 - V_1^2) = \frac{\rho V_2^2}{2} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right] \quad (\text{Ec. 6.5})$$

De la continuidad $V_1 A_1 = V_2 A_2$, por lo que:

$$\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 = \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \quad (\text{Ec. 6.6})$$

Sustituyendo la ecuación (6.6) en (6.5) se obtiene:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} \quad (\text{Ec. 6.7})$$

El gasto volumétrico ideal sería:

$$Q_I = A_2 V_2 \quad (\text{Ec. 6.8})$$

Donde $(P_1 - P_2)$ es igual a la diferencial de presión, ΔP , obtenida en cada uno de los experimentos con el fluido manométrico.

$$\Delta P = (\rho_M - \rho_f) * g * \Delta h \quad (\text{Ec. 6.9})$$

Donde ρ_M es la densidad del fluido manométrico (mercurio), ρ_f es la densidad del fluido de trabajo (agua) y Δh es la diferencia de altura entre las columnas del fluido manométrico.

Estos cálculos se realizarán para la placa de orificio y para el tubo de Venturi utilizados y se obtendrá un coeficiente de descarga, C_d , para cada uno por medio de la relación del gasto real e ideal que se presenta en la siguiente ecuación:

$$C_d = \frac{Q_{real}}{Q_I} \quad (\text{Ec. 6.10})$$

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	64/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

El fabricante del equipo suministra valores fijos del coeficiente de descarga para el tubo venturi y la placa de orificio.

Venturi:

$$C_{d \text{ fabricante}} = 0.98 \quad (\text{Ec. 6.11})$$

Placa de orificio:

$$C_{d \text{ fabricante}} = 0.60 \quad \text{Ec. 6.12})$$

Existe en la literatura técnica correlaciones experimentales y gráficas que presentan el C_d contra el número de Reynolds (y de la geometría del medidor). Examinando las correlaciones y/o las gráficas, vemos que el coeficiente de descarga permanece casi constante en el rango de trabajo (número de Reynolds) con valores típicos de la práctica.

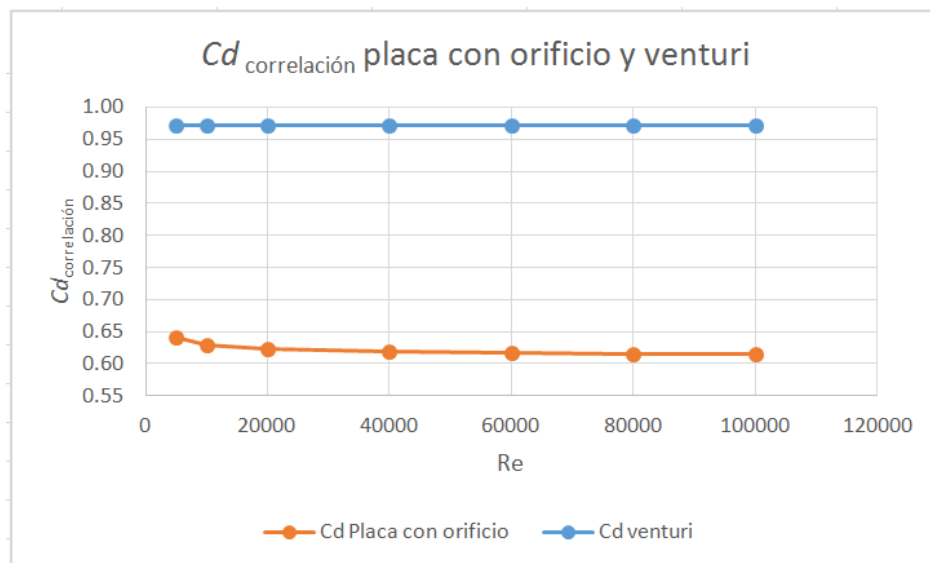


Figura 6.7. Gráficas obtenidas a partir de correlaciones experimentales utilizando valores obtenidos de la práctica, C_d correlación vs Re .

El gasto real (ecuación práctica para el cálculo del flujo) también se puede obtener utilizando el coeficiente de descarga que nos da el fabricante ($C_{d \text{ fabricante}}$) y el gasto ideal (Q_i), a este gasto real le llamaremos $Q_{r \text{ equipo}}$, el cual calcularemos de la siguiente manera:

$$Q_{r \text{ equipo}} = Q_i * C_{d \text{ fabricante}} \quad (\text{Ec. 6.13})$$

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	65/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

También se calcula el error:

$$\%Error = |(Q_{real} - Q_{equipo})| / Q_{real} \times 100 \quad (Ec. 6.14)$$

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	66/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 7

Vertederos



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 I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	67/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
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.
Enchufe de bomba	Riesgo de electrocución al estar instalada dentro del depósito de almacenamiento de agua del banco de medición de gasto.
Limnómetro	Riesgo de caída y daño físico al usuario por incisión.

2. Objetivos

- ✓ Medir el gasto experimental, y calcular el gasto teórico para cada uno de los vertederos a estudiar.
- ✓ Calcular el coeficiente de descarga para cada uno de los vertederos empleados.

3. Concepto básicos y definiciones

El flujo volumétrico o flujo másico es tal vez la variable más importante a medir en la Mecánica de Fluidos después de la velocidad. Este parámetro es de vital importancia en cualquier actividad industrial en la que se transporten fluidos como aceites, bebidas carbonatadas, etc. Sin esta medida el balance de materia, el control de calidad y la operación misma de un proceso continuo serían casi imposibles de realizar.

Existen muchos métodos confiables para la medición de flujo, uno de los más comunes se basa en la caída de presión causada por un mecanismo que reduce la sección en la línea de flujo; al pasar el fluido a través de la reducción aumenta su velocidad y su energía cinética, esto para flujo en tuberías.

En particular para el transporte, control y distribución de agua, ya sea para consumo humano o agrícola, se ha realizado desde las civilizaciones antiguas por medio de canales naturales o artificiales. Para medir la cantidad de agua transportada se han desarrollado diferentes dispositivos, por su facilidad de construcción e instalación los vertederos son los más populares. Ofrecen grandes ventajas como larga duración, no se obstruyen por materiales transportados por la corriente, se les puede dar un carácter decorativo, entre otras.

Se define como vertedero a una estructura que sirve para desalojar, regular y medir el flujo de agua en canales abiertos. Las partes principales de un vertedero son la cresta, que es la base horizontal por la que fluye el agua, y su ancho b . Las dimensiones importantes son la carga H y la altura Y . Todas se presentan en la Figura 7.1

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	68/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

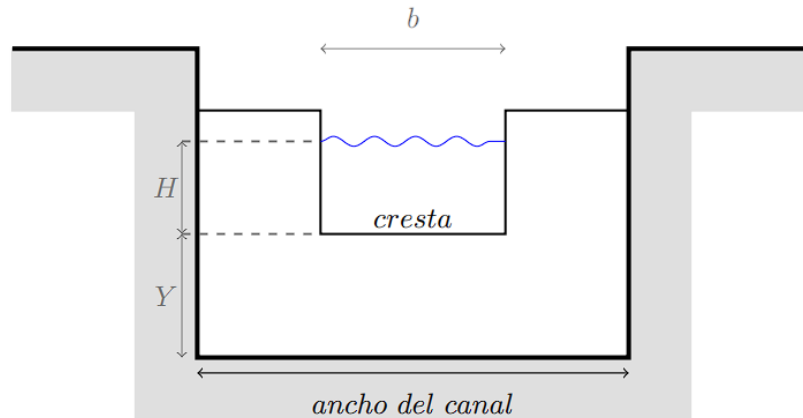


Figura 7.1. Partes principales de un vertedero.

Estos se pueden clasificar de acuerdo a la forma de su cresta o el espesor de la obstrucción. De acuerdo con la última se pueden clasificar en vertederos de pared delgada y de pared gruesa, para esta última el espesor del vertedero debe ser mayor a $0.66H$.

Análisis de vertederos

Para calcular el flujo volumétrico que pasa por un vertedero se utiliza la ecuación $Q = V \times A$, donde V es la velocidad del fluido al pasar por el vertedero y A es el área del vertedero ocupado por el fluido. El primero se puede determinar con la ecuación de Bernoulli, mientras que el segundo depende de la geometría del vertedero y del nivel del agua en el canal.

Para calcular la velocidad aplicamos la ecuación de Bernoulli

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 \quad (\text{Ec. 7.1})$$

En los puntos que se muestran en la Figura 7.2. La ecuación se simplifica dado que el punto 1 se encuentra en la superficie del agua, y el punto 2 en la zona de aireación, por lo que $P_1 = P_2 = P_{\text{atm}}$. Por otro lado se puede considerar que la velocidad en el punto uno es pequeña, de tal forma que $V_1 \approx 0$. Para Z_1 y Z_2 se considera la base del canal como el origen del sistema coordenado, por lo que $Z_1 = Y + H$, mientras que $Z_2 = Y$. Reordenando las variables se tiene que la velocidad se calcula como:

$$V_2 = \sqrt{2gH} \quad (\text{Ec. 7.2})$$

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	69/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

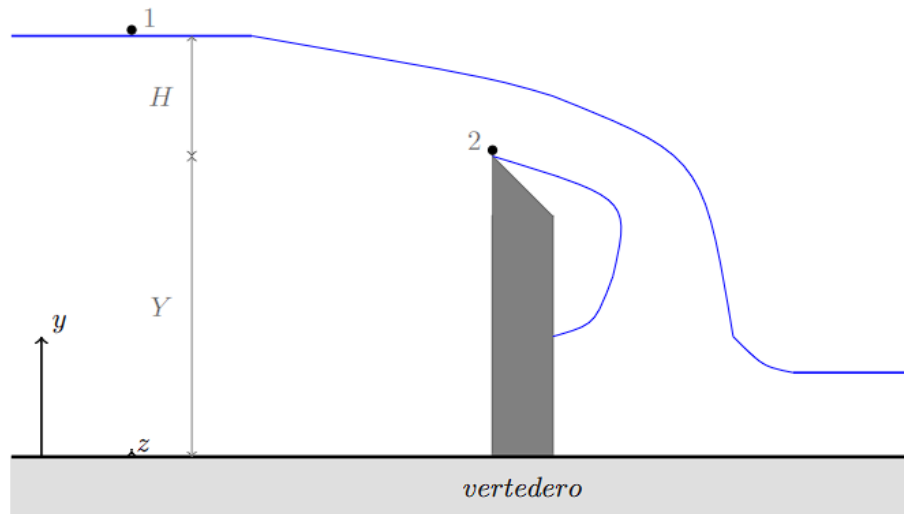


Figura 7.2. Análisis de un vertedero.

Para calcular el flujo volumétrico consideremos que se trabaja con un vertedero rectangular de ancho b . En este caso el área se calcula como el ancho del vertedero por la altura del nivel del agua; el primero es constante, mientras que el segundo es aproximadamente $2/3H$, por lo que sustituyendo se tiene que el flujo volumétrico se calcula como:

$$Q = CbH^{3/2}\sqrt{2g} \quad (\text{Ec. 7.3})$$

Donde C es una constante que depende de la geometría de la cresta. Para la mayoría de los vertederos el flujo volumétrico es proporcional a $H^{3/2}$.

Las simplificaciones realizadas a la ecuación de Bernoulli nos permiten obtener la velocidad para un flujo ideal sin pérdidas Q_I , calculado con la Ecuación 7.2. Para obtener el valor para un flujo real Q_R es necesario corregir la velocidad multiplicando la Ecuación 7.3 por un factor llamado coeficiente de descarga, definido como

$$C_{d,exp} = \frac{Q_R}{Q_I} \quad (\text{Ec. 7.4})$$

La velocidad real será menor que la velocidad ideal por lo que C_d siempre es menor a 1.

Cálculo del gasto ideal y coeficiente de descarga teórico

El fabricante del equipo proporcionó ecuaciones analíticas para el cálculo de Q_I y $C_{d,teo}$ de los vertederos a utilizar en la práctica.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	70/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Vertedero rectangular

$$Q_I = \frac{2}{3} b H^{3/2} \sqrt{2g} \quad (\text{Ec. 7.5})$$

$$C_{d,teo} \approx 0.611 + \frac{0.075H}{Y} \quad (\text{Ec. 7.6})$$

Vertedero triangular

$$Q_I = \frac{8}{15} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H^{5/2} \sqrt{2g} \quad (\text{Ec. 7.7})$$

$$C_{d,teo} \approx 0.44 \quad (\text{Ec. 7.8})$$

Vertedero de pared gruesa

$$Q_I = 1.705 b H^{3/2} \quad (\text{Ec. 7.9})$$

$$C_{d,teo} \approx \frac{0.65}{\left(1 + \frac{H}{Y}\right)^{0.5}} \quad (\text{Ec. 7.10})$$

4. Equipo y Material

6. Banco de medición de gasto.
7. Vertederos de pared delgada: rectangular y triangular.
8. Vertedero de pared gruesa y canal adicional.
9. Medidor de flujo digital.
10. Limnómetro de aguja con escala Vernier.
11. Desarmador plano y llave mixta de 11 mm.
12. Cronómetro.
13. Flexómetro.

5. Desarrollo

Preparación del equipo

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	71/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

El banco de medición de gasto cuenta con una bomba sumergible que hace circular el fluido de trabajo en un circuito cerrado. Este consta de una sección de tubería, un canal, un depósito de almacenamiento y otro para la medición del gasto. El último se compone de un tubo de vidrio graduado en el que sube el nivel del agua a medida que se llena el depósito de medición. En la Figura 7.3 se muestra un esquema del banco de medición de gasto. En esta práctica se utilizarán únicamente la sección del canal y el depósito de medición de gasto.

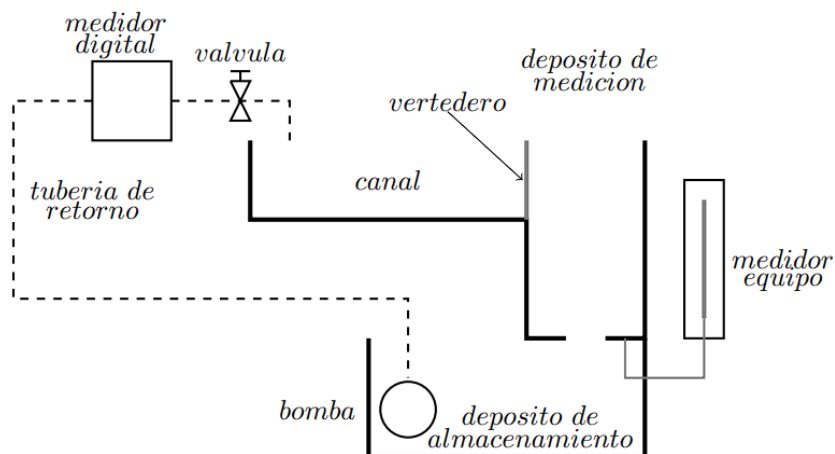


Figura 7.3. Esquema del banco de medición de gasto.

Antes de realizar las mediciones se tiene que preparar el banco de medición de gasto, que consta de los siguientes pasos.

1. Verificación de vertederos. En específico el estado del empaque de los vertederos.
2. Instalación de los vertederos. Los vertederos de pared delgada se instalan a uno de los extremos del canal por medio de cinco tornillos con sus respectivas tuercas, que se colocan con los dedos hasta llegar al tope como se ilustra en la Figura 7.4. Apretar media vuelta más con ayuda de la llave mixta y el desarmador plano.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	72/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

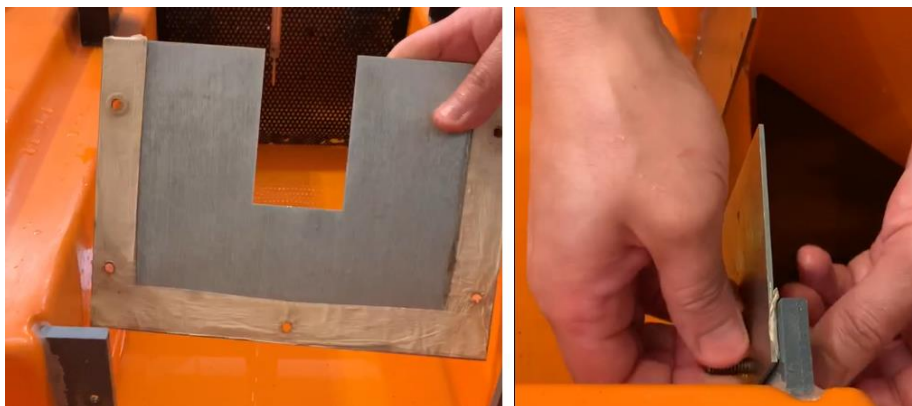


Figura 7.4. Izquierda: empaque del vertedero rectangular de pared delgada. Derecha: instalación del vertedero.

- Para el vertedero de pared gruesa es necesario instalar un canal adicional, que se fija al canal principal de forma similar a los vertederos de pared delgada. El vertedero se fija al canal secundario por medio de un gancho ubicado en su superficie inferior, ver Figura 7.5.



Figura 7.5. Veredero de pared gruesa y canal adicional.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	73/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

4. Dimensiones de los vertederos. Con el flexómetro se mide la altura H desde la base del canal a la cresta del vertedero, así como el ancho b . Para el vertedero triangular se mide el ángulo de apertura del vertedero con un transportador. Con los datos obtenidos llenar la Tabla 7.1.

Tabla 7.1. Parámetros del vertedero

Parámetro	Dato
Y (m)	
b (m)	
θ (°)	

5. Medición del gasto real, Q_R . Uno de los datos a medir es el flujo volumétrico de agua que circula por el canal. Esta medición se puede realizar utilizando: (A) el medidor de flujo digital o (B) el medidor de flujo del banco de medición. Ambos se presentan en la Figura 7.6.



Figura 7.6. Izquierda: Medidor de flujo digital. Derecha medidor de flujo del banco de medición de gasto.

6. Calibración y posicionamiento del limnómetro. La medición del nivel de agua H se realiza con el limnómetro. Este se debe calibrar tomando como cero la cresta del vertedero, como se muestra en la Figura 7.7. Para realizar la medición de H , el

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	74/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

instrumento se debe desplazar aguas arriba del vertedero, se recomienda a una distancia de al menos $4Y$. Para más información del instrumento [DA CLICK AQUÍ](#).



Figura 7.7. Calibración del limnómetro.

7. Verificación de fugas. Conectar y encender la bomba para verificar fugas en todas las secciones de la unidad de demostración. En caso necesario ajustar el apriete de las uniones o tornillos.

Tabla 7.1. Parámetros del vertedero

Parámetro	Dato
Y (m)	
b (m)	
θ (°)	

Actividad 1. Medición del flujo volumétrico.

Para realizar la medición de H para diferentes flujos volumétricos se recomienda el siguiente procedimiento.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	75/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Abrir la válvula de control de flujo hasta alcanzar la altura máxima del vertedero, sin que se desborde el agua.
2. Medir la altura H con el limnómetro, cuyo funcionamiento es similar al de un calibrador Vernier. Es importante que solo la punta del medidor toque la superficie del agua, para ello se puede apoyar del tornillo de ajuste en la parte superior del instrumento.
3. Seleccionar la metodología para medir el flujo volumétrico, Q_R .
 - 3.A.- El medidor de flujo digital se instala en la sección de tubería y la lectura es directa. Se debe tener cuidado en la manipulación del medidor ya que tiene un peso considerable. Conectar el suministro de energía con la bomba apagada, ya que el contacto se encuentra dentro de la tina de almacenamiento.
 - 3.B.- Para medir el flujo volumétrico con el depósito de medición se utilizan un cronómetro y el tapón esférico, que desvía el flujo de agua al medidor del equipo, como se muestra en la Figura 7.8. Se recomienda tomar el tiempo que tardan en llenarse al menos 5 l. Al finalizar cada lectura quitar el tapón esférico para estabilizar el nivel del agua en el depósito de almacenamiento.
4. Anotar los datos en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2. Mediciones de los experimentos para diferentes gastos.

Lectura	Volumen (m^3)	Tiempo (s)	H(m)

5. Reducir el flujo de agua con la válvula y esperar a que se estabilice el nivel del agua en el canal antes de medir H .
6. Se repite el procedimiento desde el paso 2 de acuerdo al número de lecturas solicitadas por el profesor. Se recomienda realizar al menos 3 lecturas para el vertedero triangular, 5 para el rectangular y 10 para el de pared gruesa. Genera para cada vertedero una Tabla similar a la Tabla 7.2.
7. Al finalizar las lecturas, se apaga la bomba y se instala el siguiente vertedero de acuerdo a los pasos indicados en la Sección “Preparación del equipo”.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	76/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

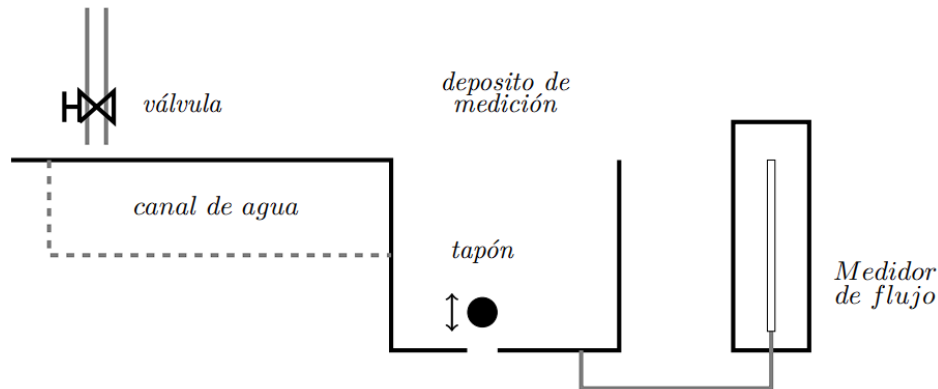


Figura 7.8. Esquema del medidor de flujo del banco de medición de gasto.

Apagado del equipo

Al finalizar las mediciones se deben seguir los siguientes pasos para asegurar el correcto apagado del equipo:

1. Apagar la bomba y esperar a que se decante el agua de la tubería.
2. Quitar el tapón esférico para que se vierta el agua al depósito de almacenamiento.
3. Desconectar el medidor de flujo digital.
4. Desinstalar el vertedero del canal y colocar todos los vertederos en el estante correspondiente.
5. Desajustar el limnómetro, teniendo cuidado que la punta este protegida por la base del instrumento. Colocar el medidor en el estante correspondiente.

6. Resultados

Los datos de las Tablas 7.1 y 7.2 se utilizarán para calcular el gasto real, Q_R , el gasto ideal, Q_I , así como el coeficiente de descarga experimental y teórico. Para ello se generará una Tabla similar a la Tabla 7.3 para cada vertedero utilizado en la práctica.

Para cada Con los resultados obtenidos se generará una gráfica C_d vs Q_R , como la mostrada en la Figura 7.9.

Tabla 7.3. Cálculo del coeficiente de descarga.

Lectura	$Q_R(m^3/s)$	$Q_I(m^3/s)$	$C_{d,exp}$	$C_{d,teo}$	Error

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	77/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

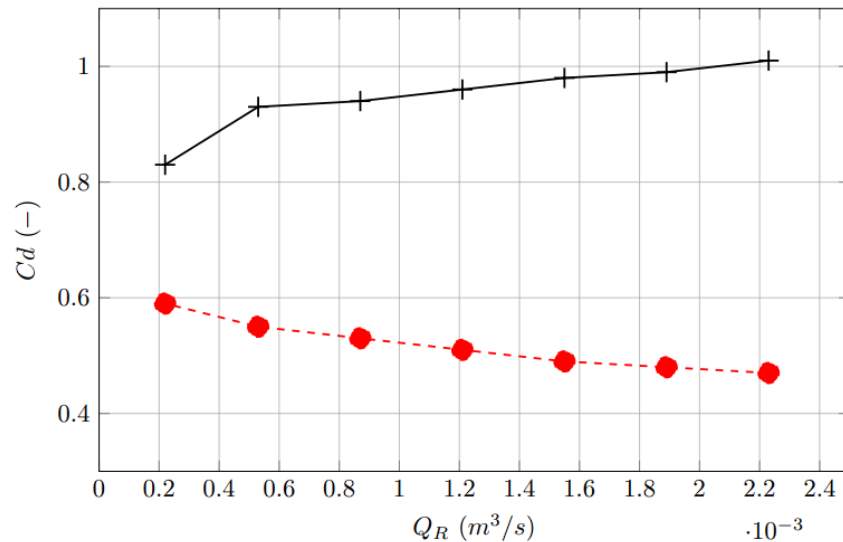


Figura 7.9. Resultados del cálculo del coeficiente de descarga teórico $C_{d,teo}$ (—) y experimental $C_{d,exp}$ (+).

7. Cuestionario

- ¿Qué ventajas ofrecen los vertederos en la medición del agua?
- ¿Cuál es el principio de funcionamiento de los vertederos y en qué se diferencian de los medidores de flujo en conductos cerrados?
- ¿Cuándo se utiliza un vertedero de pared delgada y cuándo uno de pared gruesa?
- Entre dos vertederos de pared delgada, uno rectangular y otro triangular, ¿cuál presenta mayor carga para el mismo caudal?
- ¿Cómo influye la velocidad del flujo en el vertedero a utilizar?
- ¿Qué tipo de flujo se presenta en una sección aguas arriba del vertedero y en otra justo encima de la cresta del mismo?

8. Conclusiones

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	78/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

9. Bibliografía

Fuentes básicas

- Mott, R.L. y Untener, J. A. (2015), Applied Fluid Mechanics. 7th. Edition. Pearson.
- White, F. M. (2011). Fluid Mechanics. 7th Edition. McGraw-Hill EUA.
- Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2019). Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. 4a edición en español. McGraw-Hill México.
- Streeter, V.L., Wylie, E.B. y Bedford, K. W. (2000). Mecánica de los fluidos. 9a Edición. McGraw-Hill Colombia.
- Armfield Ltd (1995). Manual C9: Flowmeter demonstration unit, Armfield (8), England.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	79/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 8

Pérdidas primarias en tuberías



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 I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	80/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
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.
Energía eléctrica y fluido de trabajo	Posible corto circuito en el banco de trabajo.
Manómetro	Ruptura de manómetro y fuga de mercurio.

2. Objetivos

- ✓ Calcular la pérdida de carga por fricción en tuberías de diferente diámetro, para diferentes gastos de forma experimental y teórica.
- ✓ Calcular y comparar la pérdida de carga en una tubería lisa con una rugosa.

3. Concepto básicos y definiciones

El transporte de fluidos en ductos o tuberías es un proceso común en la industria, utilizando para ello dispositivos como bombas o ventiladores, dependiendo si es un líquido o gas, respectivamente. Dimensionar la potencia de estos dispositivos es una tarea importante, para ello es necesario conocer diversos parámetros de la tubería o ducto, como son el diámetro, la longitud, la velocidad del fluido, etc.

En general, cuando se desplaza un fluido sobre una superficie se genera una capa límite hidrodinámica en la que los efectos de la viscosidad son importantes. Aplicando este principio al flujo en una tubería, donde el fluido está confinado por las paredes de la tubería, la capa límite crece desde cero en la entrada de la tubería hasta un punto en el que se unen, que se conoce como distancia de desarrollo hidrodinámica.

A partir de este punto se tiene un flujo desarrollado hidrodinámicamente, en el que el perfil de velocidad depende del tipo de flujo que se tenga en la tubería. Para un flujo laminar ($Re < 2300$) el perfil de velocidad es parabólico, mientras que para un flujo turbulento ($Re > 4000$) la curvatura del perfil es menos pronunciada debido a la interacción entre las partículas de fluido, y por ende mayor intercambio de energía cinética entre ellas.

El desplazamiento del fluido en una tubería tiene un efecto de disipación de energía debido a la viscosidad del fluido resultado de una conversión irreversible de energía mecánica a térmica, denominada “pérdida de carga”. Para calcular esta pérdida de carga se utiliza la ecuación de la energía, que en su forma general se escribe como:

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	81/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho e dV + \int_{SC} \rho e (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (\text{Ec. 8.1})$$

donde $\dot{Q}$ es el calor transferido, $\dot{W}$ es el trabajo efectuado por unidad de tiempo, mejor conocido como potencia, e es la energía existente en el sistema, que se compone de la energía interna, cinética, potencial $u + \frac{v^2}{2} + gz$, y $\vec{V}$ es el vector de velocidad normal a la superficie de control.

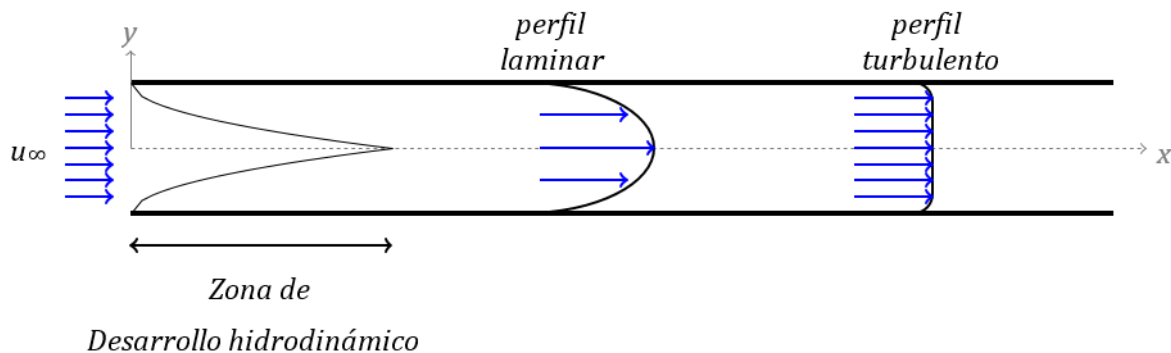


Figura 8.1. Flujo al interior de una tubería.

Para la mayoría de las aplicaciones en mecánica de fluidos $\dot{W}$ está compuesta por el trabajo efectuado por un eje a través de la frontera del volumen de control W_{eje} , que puede ser una bomba (se agrega energía al sistema) o una turbina (se extrae energía del volumen de control), y el trabajo efectuado por la presión en la superficie de control del sistema W_p , este último se calcula como:

$$\dot{W}_p = \int_{SC} P (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (\text{Ec. 8.2})$$

Esta forma de la ecuación es muy complicada de resolver, por lo que se aplican las siguientes simplificaciones:

- Considerar que el sistema (flujo en la tubería) se encuentra en estado permanente.
- Flujo incompresible ($\rho = \text{cte.}$).
- Un sistema con una entrada y una salida.

Bajo estas simplificaciones la ecuación 8.1 se reduce a:

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	82/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$q - w_{eje} = \frac{p_2}{\rho} + u_2 + gz_2 + \frac{V_2^2}{2} - \frac{p_1}{\rho} - u_1 + gz_1 + \frac{V_1^2}{2} \quad (\text{Ec. 8.3})$$

Donde el término u es la energía interna, q es el flujo de calor por unida de masa, y w_{eje} es el trabajo de eje efectuado por unida de masa.

Reordenando términos, dividiendo entre la gravedad, y definiendo a la pérdida de carga h_l como:

$$h_l = u_2 - u_1 - q \quad (\text{Ec. 8.4})$$

La ecuación 8.3 queda como:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + w_{bomba} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + w_{turbina} + h_l \quad (\text{Ec. 8.5})$$

Cabe destacar que las unidades de todos los términos de esta ecuación son *metros*.

Finalmente, para una tubería horizontal, de sección constante en la que no se realiza trabajo de o hacia el sistema, la ecuación se simplifica a

$$h_l = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \quad (\text{Ec. 8.6})$$

Esta ecuación es la que se utilizará para calcular la pérdida de carga en la tubería en forma experimental, es decir $h_{l,exp}$.

Por otro lado, a partir de la solución exacta para el flujo laminar de un fluido en una sección circular de radio r_0 (tubo), se encuentra que la caída de presión Δp a lo largo del tubo por unidad de longitud L es igual a

$$\Delta p = \frac{32\mu L \bar{V}}{D^2} \quad (\text{Ec. 8.7})$$

Donde μ es la viscosidad del fluido, $\bar{V}$ es la velocidad promedio en la tubería, y D es el diámetro interno. Si se expresa a Δp en términos del factor de fricción f se tiene

$$\Delta p = f \frac{L}{D} \frac{\rho \bar{V}^2}{2} \quad (\text{Ec. 8.8})$$

Recordando que la ecuación 8.6 se puede escribir como:

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	83/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$h_l = \frac{\Delta p}{\rho g} \quad (\text{Ec. 8.9})$$

Entonces tenemos que la pérdida de carga en la tubería se calcula como:

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{\rho \bar{V}^2}{2g} \quad (\text{Ec. 8.10})$$

Todos los términos en la ecuación 8.10 se pueden medir directamente de la tubería, excepto f . Este parámetro representa la altura adicional que el fluido necesita para elevarse por medio de una bomba con la finalidad de superar las pérdidas por fricción en la tubería. Es función de las características de la tubería como: la rugosidad de las paredes, el diámetro interno, y la velocidad a la que se desplaza el fluido. Se puede determinar utilizando el diagrama de Moody y o por medio de correlaciones, la más utilizada es la ecuación de Colebrook. Ambas se pueden encontrar en todos los libros de Mecánica de Fluidos y publicados en diversas páginas de Internet. De forma particular, para un flujo laminar

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{Ec. 8.11})$$

La ecuación 8.10 se conoce como la ecuación de Darcy-Weizbach, y se utilizará para determinar la pérdida de carga de forma analítica $h_{l,Darcy}$ a partir de los parámetros de cada una de las tuberías a utilizar en los experimentos.

4. Equipo y Material

El equipo a utilizar en esta práctica está compuesto por:

1. Banco de demostración de pérdidas en tuberías.
2. Manómetro diferencial de mercurio-agua.
3. Cronómetro.
4. Calibrador Vernier.
5. Flexómetro.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	84/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

5. Desarrollo

A continuación se detallan las actividades a realizar para medir los parámetros necesarios para calcular la pérdida de carga en 4 tuberías horizontales de sección constante, cada una de diferente diámetro. El esquema de cada una se presenta en la Fig. 8.2.

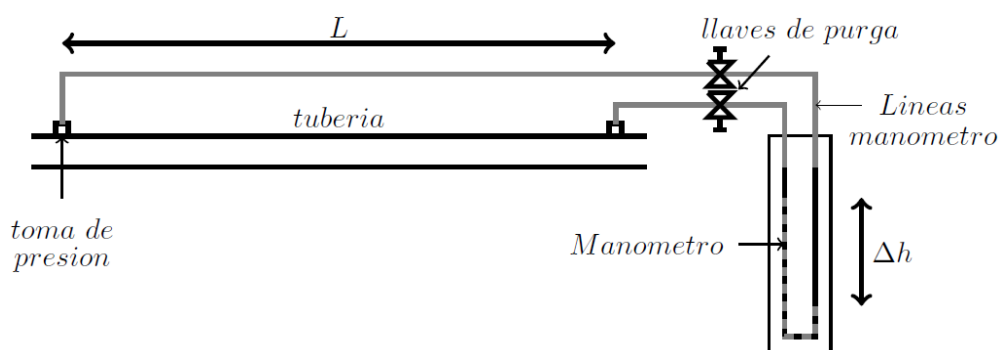


Figura 8.2. Esquema de una tubería y la conexión del manómetro diferencial.

Actividad 1. Medición de parámetros del experimento.

Medir el diámetro interno y la longitud de las tuberías a utilizar con el calibrador Vernier y el flexómetro, respectivamente. Con los datos obtenidos llenar la Tabla 8.1.

Tabla 8.1: Parámetros de la tubería.

Parámetro	Dato
Diámetro interno (m)	
Longitud (m)	
Rugosidad (m)	

NOTA: Para el tubo liso la rugosidad es aproximadamente cero. La rugosidad específica (e/D) para el tubo rugoso es igual a 0.1.

Actividad 2. Toma de lecturas.

2.1 Preparación del equipo

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	85/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Antes de realizar las mediciones es necesario preparar el banco de demostración de pérdidas de carga en tuberías, los elementos a manipular muestran en la Fig. 8.2, de acuerdo a los siguientes pasos:

1. Revisar que todas las válvulas del banco se encuentren abiertas.
2. Conectar las líneas del manómetro mercurio-agua a las tomas de presión de la tubería que se quiere estudiar. Las llaves de purga tienen que estar cerradas.
3. Conectar el equipo a la electricidad y encender la bomba sumergible. Esperar a que las tuberías estén llenas de agua.
4. Cerrar todas las válvulas del banco de demostración, excepto el de la tubería a estudiar
5. Abrir las llaves de purga y esperar a que se haya eliminado todo el aire de las líneas del manómetro.

2.2 Toma de lecturas

Los elementos a manipular durante los experimentos se representan en la Fig. 8.3. Para cada una de las cuatro tuberías se analizará el efecto de la velocidad del fluido de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Colocar la llave de salida de agua en posición totalmente abierta.
2. Medir Δh en el manómetro diferencial.
3. Medir el flujo volumétrico utilizando el cronómetro y el medidor de flujo (tanque volumétrico). Colocar previamente la pelota para que al agua se dirija a éste último
4. Escribir los datos obtenidos en la Tabla 8.2
5. Cerrar un poco la llave. Se recomienda tomar como referencia Δh en el manómetro, para tener una variación uniforme de éste parámetro.
6. Se repite el procedimiento dependiendo del número de lecturas solicitadas por el profesor.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	86/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

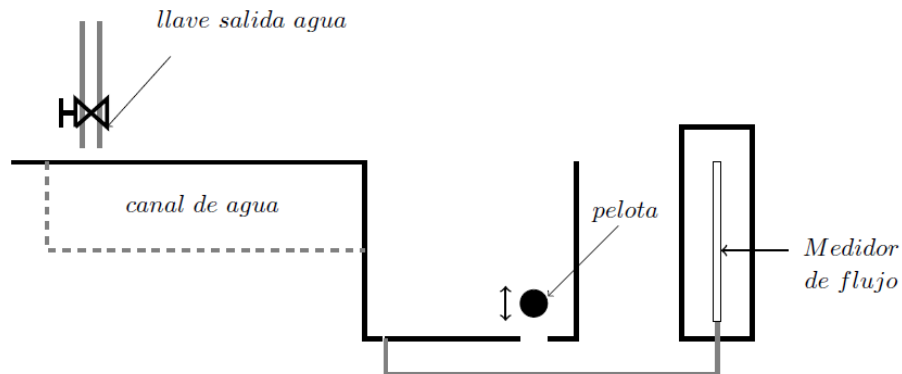


Figura 8.3. Medición del flujo volumétrico.

Tabla 8.2: Mediciones de los experimentos para diferentes gastos.

lectura	Volumen (m^3)	tiempo (s)	Δh (m)
1			
2			
3			
⋮			
n			

2.3 Cambio de tubo

Para realizar mediciones en una tubería diferente de debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Cerrar las llaves de purga del manómetro
2. Abrir todas las válvulas del banco. Es opcional apagar la bomba sumergible.
3. Cambiar las líneas del manómetro a las tomas de presión del tubo seleccionado.
4. Cerrar las válvulas, excepto la del tubo a estudiar.
5. Para la toma de lecturas seguir el procedimiento desarrollado en la sección 2.2.

2.4 Apagado del equipo

Al finalizar las mediciones se deben seguir los siguientes pasos para asegurar el correcto apagado del equipo, evitando así el desajuste del manómetro:

1. Cerrar las llaves de purga.
2. Abrir todas las válvulas del banco de trabajo.
3. Apagar la bomba sumergible.
4. Desconectar las líneas del manómetro de las tomas de presión.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	87/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- Desconectar el equipo de la toma de corriente.

6. Resultados

- Los resultados obtenidos se anotarán en las Tablas 8.1 y 8.2, la primera con los parámetros de cada tubo y la segunda con las mediciones realizadas.
- Adicionalmente, tendrán que desarrollar cálculos para determinar la pérdida de carga en cada tubería (h_l). Para ello utilizarán como ejemplo la Tabla 8.3.

Tabla 8.3: Cálculo de la pérdida de carga.

lectura	Gasto (m^3/s)	ΔP (Pa)	$\bar{V}$ (m/s)	Re	f	$h_{l,exp}$ (m)	$h_{l,Darcy}$ (m)
1							
2							
3							
$\vdots$							
n							

- Con los cálculos de pérdida de carga se generará una gráfica Re vs Q , tomando como ejemplo la Fig. 8.4.

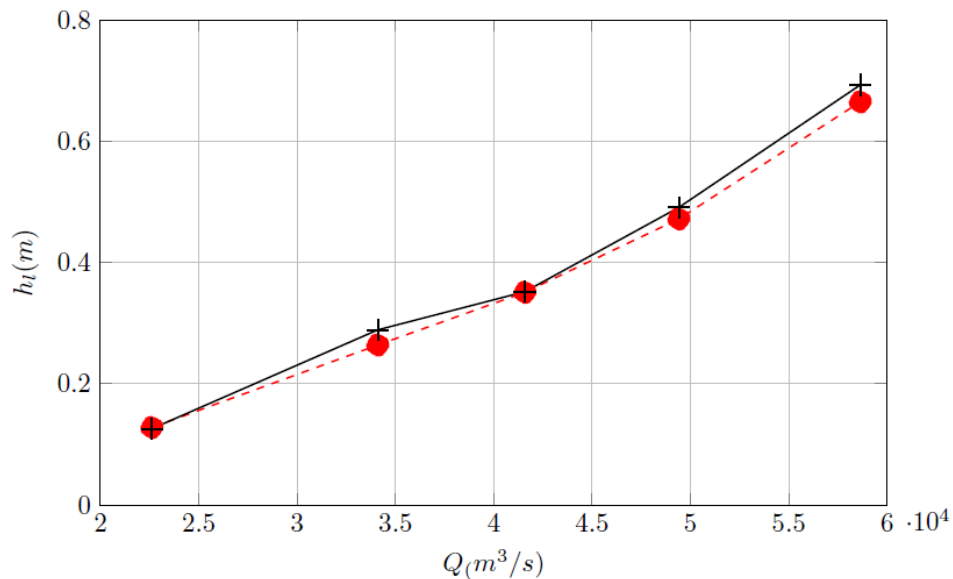


Figura 8.4: Resultados del cálculo de pérdidas de carga en tuberías horizontales de sección constante con la ecuación de la energía $h_{l,exp}$ (+) y la ecuación de Darcy-Weisbach $h_{l,Darcy}$ (—).

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	88/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

7. Cuestionario

1. ¿A qué se debe la caída de presión en un fluido al ser transportado en un ducto horizontal?
2. ¿Qué efecto tiene el aumento de la velocidad del fluido en la pérdida de carga en la tubería?
3. ¿Cómo afecta la rugosidad de la tubería a la pérdida de carga?
4. ¿Qué efecto tiene el envejecimiento de la tubería en la caída de presión? Argumente su respuesta.
5. De las tuberías estudiadas en la práctica, ¿Cuál tubería utilizaría si se desea tener la mínima caída de presión?

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

1. Mott, R.L. y Untener, J. A. (2015), Applied Fluid Mechanics. 7th. Edition. Pearson.
2. White, F. M. (2011). Fluid Mechanics. 7th Edition. McGraw-Hill EUA.
3. Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2019). Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. 4ª edición en español. McGraw-Hill México.
4. Streeter, V.L., Wylie, E.B. y Bedford, K. W. (2000). Mecánica de los fluidos. 9ª. Edición. McGraw-Hill Colombia.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	89/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 9

Pérdidas secundarias en tuberías

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 I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	90/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

Peligro o fuente de energía	Riesgo asociado
Electricidad y manejo de agua	Corto.
Manómetro	Ruptura de manómetro y fuga de mercurio.

2. Objetivos

- ✓ Obtener la pérdida de carga por fricción en tuberías debida a accesorios y su relación con la velocidad del fluido.

3. Conceptos básicos y definiciones

El fluido en un sistema de tubería típico pasa a través de varios accesorios como son: uniones, válvulas, flexiones, codos, ramificaciones en forma de T (conexiones en T), entradas, salidas, ensanchamientos y contracciones además de los tubos. Dichos accesorios interrumpen el flujo del fluido provocando pérdidas adicionales debido al fenómeno de separación y mezcla del flujo que producen. En un sistema típico, con tubos largos, estas pérdidas son menores en comparación con la pérdida de carga por fricción en los tubos (las pérdidas mayores) las cuales se vieron en la práctica 8.

En algunos casos excepcionales las pérdidas menores pueden ser más grandes que las pérdidas mayores. Éste es el caso, por ejemplo, en los sistemas con varias vueltas y válvulas en una distancia corta. Las pérdidas de carga que resultan de una válvula totalmente abierta, por ejemplo, pueden ser despreciables, pero una válvula cerrada parcialmente puede provocar la pérdida de carga más grande en el sistema.

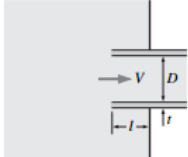
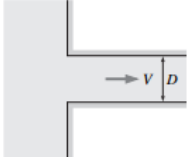
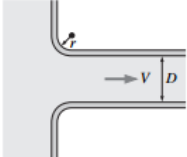
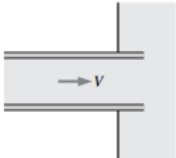
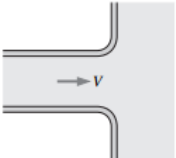
Comúnmente los fabricantes de los accesorios determinan las pérdidas menores de manera experimental proporcionándolas al vender su producto en sus respectivos manuales de usuario. Las tablas a continuación (9-1 y 9-2) muestran los valores de K para diferentes accesorios. Las pérdidas menores se expresan en términos del coeficiente de pérdida K (también llamado coeficiente de resistencia), que se define como (9-1):

$$K = \frac{h_s}{v^2/2g} \quad (9-1)$$

donde h_s es la pérdida de carga irreversible adicional en el sistema de tuberías provocado por la inserción del accesorio, y se define como (9-2)

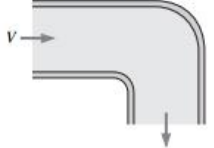
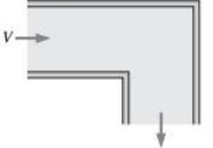
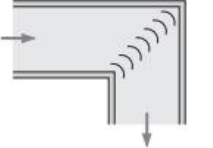
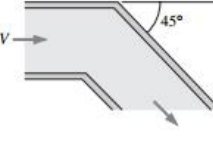
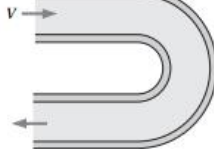
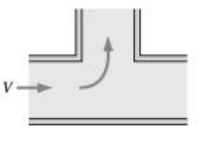
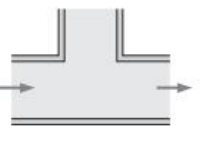
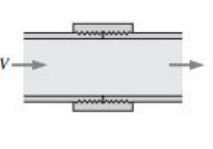
$$h_L = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (9-2)$$

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	91/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Entrada de la tubería Reentrante: $K_L = 0.80$ ($t \ll D$ e $l \approx 0.1D$)	De borde agudo: $K_L = 0.50$	Redondeada ($r/D > 0.2$): $K_L = 0.03$ Ligeramente redondeada ($r/D = 0.1$): $K_L = 0.12$ (véase figura 8-36)
		
Salida de la tubería Reentrante: $K_L = \alpha$	De borde agudo: $K_L = \alpha$	Redondeada: $K_L = \alpha$
		

Nota: el factor de corrección de energía cinética es $\alpha = 2$ para flujo laminar totalmente desarrollado, y $\alpha \approx 1$ para flujo turbulento totalmente desarrollado.

Tabla 9.1. Coeficientes de pérdida K de varios accesorios de tubería para flujo turbulento.

Codos y ramificaciones Codo suave de 90°: Embridado: $K_L = 0.3$ Roscado: $K_L = 0.9$	Codo esquinado de 90° (sin álabes directores): $K_L = 1.1$	Codo esquinado de 90° (con álabes directores): $K_L = 0.2$	Codo roscado de 45°: $K_L = 0.4$
			
Codo de retorno de 180°: Embridado: $K_L = 0.2$ Roscado: $K_L = 1.5$	Conexión en T (flujo deriv.): Embridado: $K_L = 1.0$ Roscado: $K_L = 2.0$	Conexión en T (flujo en línea): Embridado: $K_L = 0.2$ Roscado: $K_L = 0.9$	Unión roscada: $K_L = 0.08$
			
Válvulas Válvula de globo, totalmente abierta: $K_L = 10$ Válvula de ángulo, totalmente abierta: $K_L = 5$ Válvula de bola, totalmente abierta: $K_L = 0.05$ Válvula de charnela: $K_L = 2$			
Válvula de compuerta, totalmente abierta: $K_L = 0.2$ ↓ cerrada: $K_L = 0.3$ ↓ cerrada: $K_L = 2.1$ ↓ cerrada: $K_L = 17$			

* Esos son valores representativos para coeficientes de pérdida. Los valores reales dependen principalmente del diseño y la fabricación de los accesorios y pueden diferir considerablemente de los valores dados (en especial para las válvulas). En el diseño final se deben usar los datos reales del fabricante.

Tabla 9.2. Coeficientes de pérdida K de varios accesorios de tubería para flujo turbulento.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	92/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Mientras que la mayoría de las pérdidas de carga irreversibles ocurren localmente cerca de la válvula, parte de ellas ocurre corriente abajo de la válvula, debido a los remolinos turbulentos inducidos que se producen en la válvula y continúan corriente abajo. Dichos remolinos “desperdician” energía mecánica porque, a final de cuentas, se disipan en calor mientras que el flujo en la parte corriente abajo de la tubería finalmente regresa a condiciones del flujo totalmente desarrollado.

Cuando está disponible el coeficiente de pérdida para un accesorio, la pérdida de carga para este accesorio se determina a partir de (9-3):

$$h_L = \frac{\Delta P}{\rho} = K \frac{v^2}{2g} \quad (9-3)$$

Para conocer la diferencia de presión empleando el manómetro de mercurio se utiliza la siguiente ecuación (9-4):

$$h_L = \frac{P_1 - P_2}{\rho_{\text{agua}} g} = \frac{(\rho_{\text{mercurio}} - \rho_{\text{agua}}) g \Delta h}{\rho_{\text{agua}} g} = \frac{(\rho_{\text{mercurio}} - \rho_{\text{agua}}) \Delta h}{\rho_{\text{agua}}} \quad (9-4)$$

4. Equipo y Material

1. Unidad de demostración de pérdidas en tuberías y accesorios.
2. Manómetro diferencial de mercurio.
3. Manómetro diferencial de agua
4. Cronómetro.

5. Desarrollo

1. Conectar los manómetros a los extremos del accesorio a estudiar
2. Encender el equipo y purgar el manómetro.
3. Tomar las lecturas de caída de presión con el manómetro de mercurio en el caso de válvulas y el de manómetro de agua para las desviaciones.
4. Para la determinación del caudal se medirá el volumen y el tiempo.
5. Repetir la actividad para diferentes caudales y accesorios.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	93/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

6. Resultados

Volumen (L)	Tiempo (s)	Δh (mm _{Hg})	Caudal (m ³ /s)	ΔP (Pa)	Velocidad promedio (m/s)	K	h_L (exp) (m _{agua})	h_L (teo) (m _{agua})

7. Cuestionario

1. ¿A qué se debe que el fluido pierda presión al pasar por un accesorio?
2. ¿Qué le pasa a la pérdida de carga al aumentar la velocidad del fluido?
3. ¿Qué le pasa a la pérdida de carga al abrir o cerrar una válvula?
4. ¿Las pérdidas en tuberías cambian al pasar el tiempo? Argumente su respuesta.

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Cengel Yunus A, Cimbala John M., 2006, *Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones*, Mcgraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V, México, 929 pg.

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	94/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 10

Flujo Compresible



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 I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	95/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

	<i>Peligro o fuente de energía</i>	<i>Riesgo asociado</i>
1	No manipular la banda de transmisión del equipo	El usuario es vulnerable a sufrir algún tipo de lesión
2	Conexión eléctrica	Antes de encender el equipo verificar que está conectado a una fuente de energía trifásica.
3	Manómetro digital	Antes de utilizarlo verificar que las unidades de medición se encuentren en unidades de presión [ba,Pa,mmHg]

2. Objetivos

Analizar los fenómenos inherentes a un flujo compresible.

- ✓ Estudiar los efectos que tiene la compresibilidad en la ecuación de flujo para una tobera convergente.
- ✓ Observar el fenómeno de bloque que se presenta en la tobera convergente.

3. Conceptos básicos y definiciones

Un flujo compresible es comúnmente definido como un flujo con densidad variable. Lo contrario, es el flujo incompresible, donde la densidad permanece constante. Este tipo de flujos no existe, ya que el flujo de cualquier fluido es compresible en mayor o menor medida. Bajo ciertas condiciones, un flujo se puede considerar como incompresible con una precisión razonable. La simple definición de flujo compresible como un flujo en el que la densidad es variable no es suficiente por lo que se requiere algunas especificaciones. Considere ahora un pequeño elemento de fluido con un volumen específico v . La presión ejercida en las caras del elemento por el fluido circundante es p . Asuma ahora que la presión es incrementada una cantidad infinitesimal dp . El elemento es entonces comprimido una cierta cantidad dv . Ya que el volumen se reduce, dv es negativo. Así, la compresibilidad del fluido se define como

$$\tau = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dp}$$

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	96/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Físicamente, la compresibilidad se define como la fracción de cambio del volumen por unidad de cambio en la presión en el fluido. Cuando un gas se comprime tiende a incrementar su temperatura pero si esta se mantiene constante, se define la compresibilidad isotérmica

$$\tau_T = -\frac{1}{v} \left(\frac{dv}{dp} \right)_T$$

Por otro lado, si no hay flujo de calor hacia o desde el elemento de fluido (compresión adiabática) y no hay efecto alguno debido a mecanismos de transporte (viscosidad o conductividad térmica), la compresibilidad del elemento se lleva a cabo de manera isentrópica.

$$\tau_s = -\frac{1}{v} \left(\frac{dv}{dp} \right)_s$$

Así, la compresibilidad se define como una propiedad del fluido. Los líquidos, tienen bajos valores de compresibilidad y los gases, altos valores. En términos de densidad la ecuación anterior se define como

$$\tau = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp}$$

Por lo tanto, siempre que el fluido experimenta un cambio en la presión, le corresponderá un cambio en la densidad $d\rho$. Donde $d\rho$, es definida por

$$d\rho = \rho \tau dp$$

Hasta este punto solo hemos considerado al fluido. Ahora, considere un fluido en movimiento. Tal flujo es iniciado y mantenido por fuerzas sobre el fluido, las cuales usualmente generan o van acompañadas de cambios en la presión. En esta práctica, veremos que flujos con alta velocidad genera grandes cambios de presión y, a su vez, de densidad (particularmente para el aire). Dado un cambio de presión, esperaríamos pequeños cambios en la densidad para líquidos y altos para gases debido principalmente sus los valores de compresibilidad τ .

El establecer el régimen de compresibilidad flujo no es algo sencillo. Sin embargo, haciendo uso de un número adimensional es posible lograrlo. Este es el número de Mach (Ma). Este número se define como

$$Ma = \frac{v}{a} = \frac{\text{fuerzas de inercia}}{\text{fuerzas elásticas}}$$

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	97/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Donde v , es la velocidad del flujo y a , representa la velocidad del sonido en el fluido de trabajo. Aunque se observa simplemente como una relación de velocidad nos dice cuando alguna de las fuerzas mencionadas es dominante, similar al número de Reynolds (Re). La velocidad del sonido definida se define de la siguiente manera

$$a^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s$$

Retomando la definición de compresibilidad isotrópica

$$a = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s} = \sqrt{(\rho \tau_s)^{-1}}$$

De esta forma se observa que la velocidad del sonido está asociada a la compresibilidad del fluido. Cuando un fluido interactúa con cuerpos sólidos, como secciones convergentes, se generan cambios de velocidad y consecuentemente cambios de presión. A números de Ma altos, el flujo en una sección convergente tiende a desacelerarse debido a la reducción de la sección transversal. Las moléculas se comprimen incrementando la densidad del fluido. En este caso, se considera que las fuerzas de inercia son predominantes sobre las fuerzas elásticas del fluido. A bajos números de Ma , las moléculas del fluido se acomodan y cruzan la sección convergente con leves variaciones en su densidad. Aquí las fuerzas elásticas son predominantes. Experimentalmente, se ha demostrado que para números de menores a 0.3 la densidad varía alrededor del 3%. Con estas variaciones de densidad, el flujo se considera incompresible. Como se menciona, en esta práctica se demostrara se abordan dos fenómenos relacionados con la compresibilidad de los fluidos.

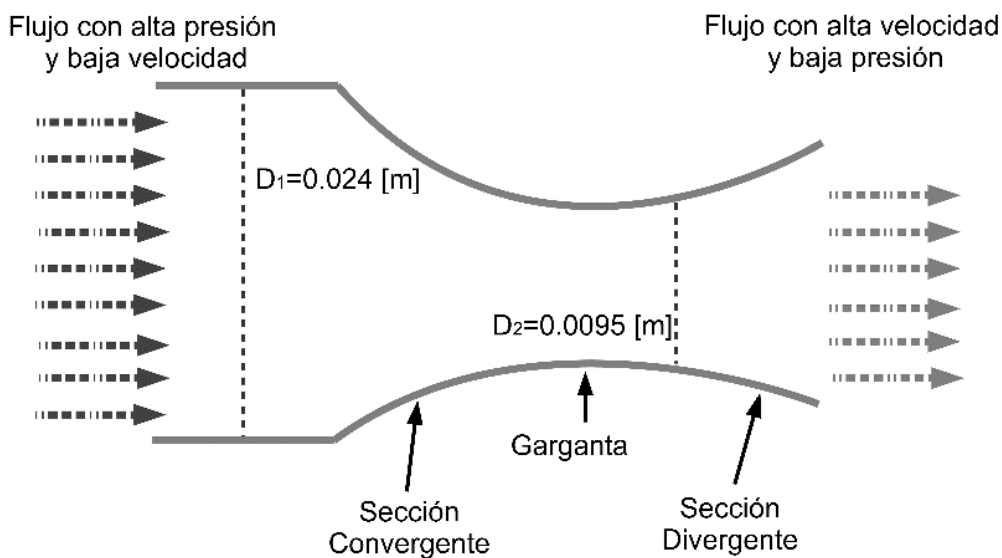
4. Equipo y Material

- Banco de pruebas para flujo compresible
- Tobera convergente divergente
- Manómetros (aceite, mercurio o digitales)
- 2 mangueras para tomar Presiones en el dispositivo

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	98/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

5. Desarrollo

Esquema de la tobera convergente- divergente



Con el fin de analizar los efectos que tiene el flujo compresible se realizara el experimento que se describe a continuación:

- ✓ Tomar la lectura del barómetro y termómetro que se tienen en el laboratorio para así conocer la presión y la temperatura en éste, para determinar densidad del aire por medio de la ecuación del gas ideal.
- ✓ Colocar el manómetro de aceite (el cual se encontrará en la posición más alta de inclinación), a la entrada de la tobera, para así tomar lectura de la diferencia de presiones $P_0 - P_1$.
- ✓ Conectar el manómetro de mercurio en la zona donde se ubica la garganta de la tobera para conocer la diferencia de presión $P_0 - P_2$.
- ✓ Conectar y encender el motor (teniendo cuidado en que éste se encuentre con el mínimo de revoluciones en el panel de mando), elevar la velocidad del motor al máximo de revoluciones paulatinamente, obstruyendo la salida del aire hasta que el manómetro de aceite marque el valor de 0.1 [KPa].

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	99/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- ✓ Una vez que se llegue al valor antes mencionado se tomara éste como primera lectura para $P_0 - P_1$ y la que se presente en el manómetro de mercurio como $P_0 - P_2$, posteriormente se abrirá la entrada del aire de tal forma que se obtengan cambios de 0.1 [KPa], hasta llegar al valor de 2.0 [KPa] en dicho manómetro.
- ✓ Con los valores obtenidos se llenará la siguiente tabla:

$P_0 - P_1$ [kPa]	$P_0 - P_2$ [mmHg]
0.1	
0.2	
0.3	
0.4	
0.5	
0.6	
0.7	
0.8	
0.9	
1.0	
1.1	
1.2	
1.3	
1.4	
1.5	
1.6	
1.7	
1.8	
1.9	
2.0	

Nota: Para la toma de las diferencias de presión pueden ser obtenidas por medio de los manómetros digitales con que cuenta el laboratorio de tal forma que:

- ✓ Colocar el manómetro digital con mayor resolución a la entrada de la tobera para así obtener la diferencia de presiones $P_0 - P_1$.
 - ✓ Conectar el manómetro digital con menor resolución en la zona donde se ubica la garganta de la tobera para conocer la diferencia de presión $P_0 - P_2$.
- Con los datos

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	100/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Los datos obtenidos se usarán, primeramente, considerando al flujo como incompresible de tal manera que aplicando la ecuación de Bernoulli entre el exterior y la entrada de la tobera así como el exterior y la garganta de la tobera se tiene las siguientes ecuaciones:

$$\frac{P_0}{\rho_0} + \frac{V_0^2}{2} + Z_0 = \frac{P_1}{\rho_0} + \frac{V_1^2}{2} + Z_1 \quad ; \quad \frac{P_0}{\rho_0} + \frac{V_0^2}{2} + Z_0 = \frac{P_2}{\rho_0} + \frac{V_2^2}{2} + Z_2$$

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(P_0 - P_1)}{\rho_0}}$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2(P_0 - P_2)}{\rho_0}}$$

Utilizando la ecuación de continuidad igualamos el gasto másico de la entrada a la que se tiene en la salida de tal forma que:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

$$P_0 - P_2 = (P_0 - P_1) \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2$$

Esta última diferencia de presiones será comparada con la lectura obtenida del manómetro de mercurio, para así realizar el análisis requerido y cumplir con el primer objetivo de este trabajo.

Para alcanzar el segundo objetivo de la práctica es necesario calcular el flujo másico que se da en la garganta considerando al flujo como incompresible, m_I , y aquel en el que se considera la ecuación de estado del aire, m_C , Como se muestra a continuación.:

$$m_I = A_2 \sqrt{2\rho_0(P_0 - P_2)}$$

$$m_C = \rho_0 A_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_0}{\rho_0} \left(r^{\frac{2}{k}} - r^{\frac{k+1}{k}} \right)}$$

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	101/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
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 I

Facultad de Ingeniería

La impresión de este documento es una copia no controlada

Donde k es el coeficiente de dilatación adiabática cuyo valor para el aire es de 1.4 y r es la relación de presiones entre la garganta y la presión atmosférica ($r = \frac{P_2}{P_0}$). Por último se calculará la velocidad en la garganta y el número de Mach, Ma , con las siguientes dos ecuaciones.

$$C = \sqrt[2]{kRT}$$

6. Resultados

[illegible]

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	102/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Para el observar el fenómeno de taponamiento se llenará la siguiente tabla:

$(P_0 - P_2)[Pa]$	$P_2 [Pa]$	$r = \frac{P_2}{P_0}$	m_I	m_C	V_2	Ma	ρ_2

Para esta última tabla se graficarán los valores de la relación de presiones y el número de Mach.

7. Cuestionario

Contestar tomando en cuenta, los resultados obtenidos y su análisis de respuesta a las siguientes cuestiones:

1. ¿Cuál es el comportamiento de las diferencias de presiones, $P_0 - P_2$, leídas con el manómetro de mercurio y aquella calculada?
2. ¿Las diferencias de presiones calculadas y las leídas con el manómetro son iguales? (argumente su respuesta).
3. Si existe una diferencia entre los valores calculados y los medidos, ¿a qué se deben dichas discrepancias?

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	103/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

4. ¿Qué parámetro utilizaría usted para determinar hasta qué punto se puede considerar a un flujo como incompresible?

Para la segunda parte

5. ¿Cuál es el comportamiento de la gráfica r vs Ma ?
6. ¿El comportamiento de la gráfica es correcto?
7. En función del número de Mach, ¿qué tipo de flujo se presenta en la garganta de la tobera?
8. ¿Se ha observado el fenómeno de taponamiento de la tobera? (argumente respuesta).
9. ¿Qué sucede con los gastos máxicos calculados?

8. Conclusiones

9. Bibliografía

- Yunus A. Çengel; “Transferencia de calor”; Mc GrawHill; sexta edición; México 2009
- White FM, “Mecánica de Fluidos”; Mc GrawHill; quinta edición; España 2004

10. Anexos

- Banco de pruebas

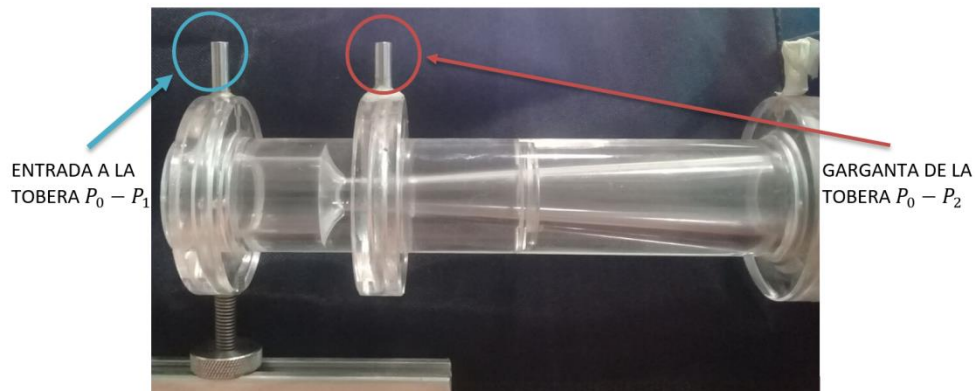


	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	104/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- Instrumentación de encendido y control de velocidad del equipo



- Tobera convergente divergente



- Manómetros (aceite, mercurio o digitales)

	Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I	Código:	MADO-56
		Versión:	03
		Página	105/105
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	13 de febrero de 2023
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Manómetro de Aceite



Manómetros de Digitales