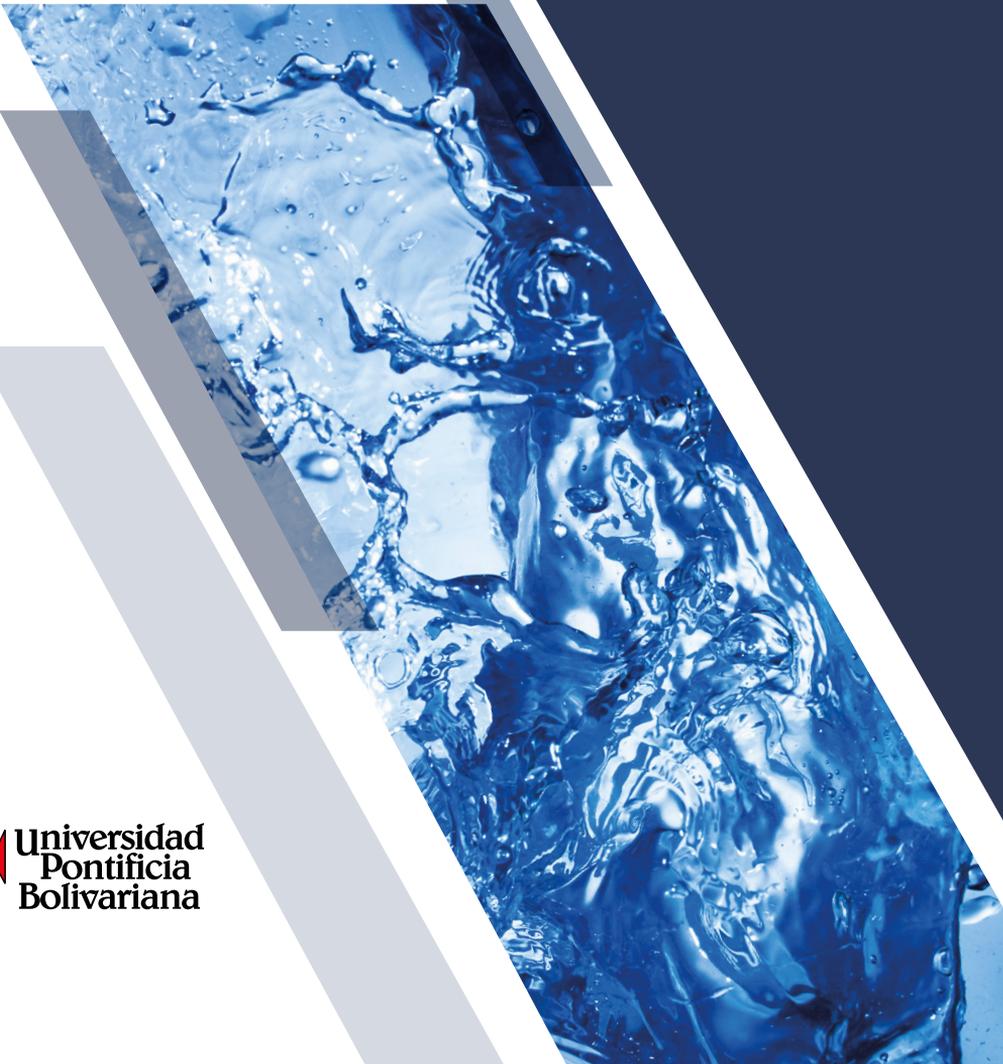


Mecánica de fluidos experimental

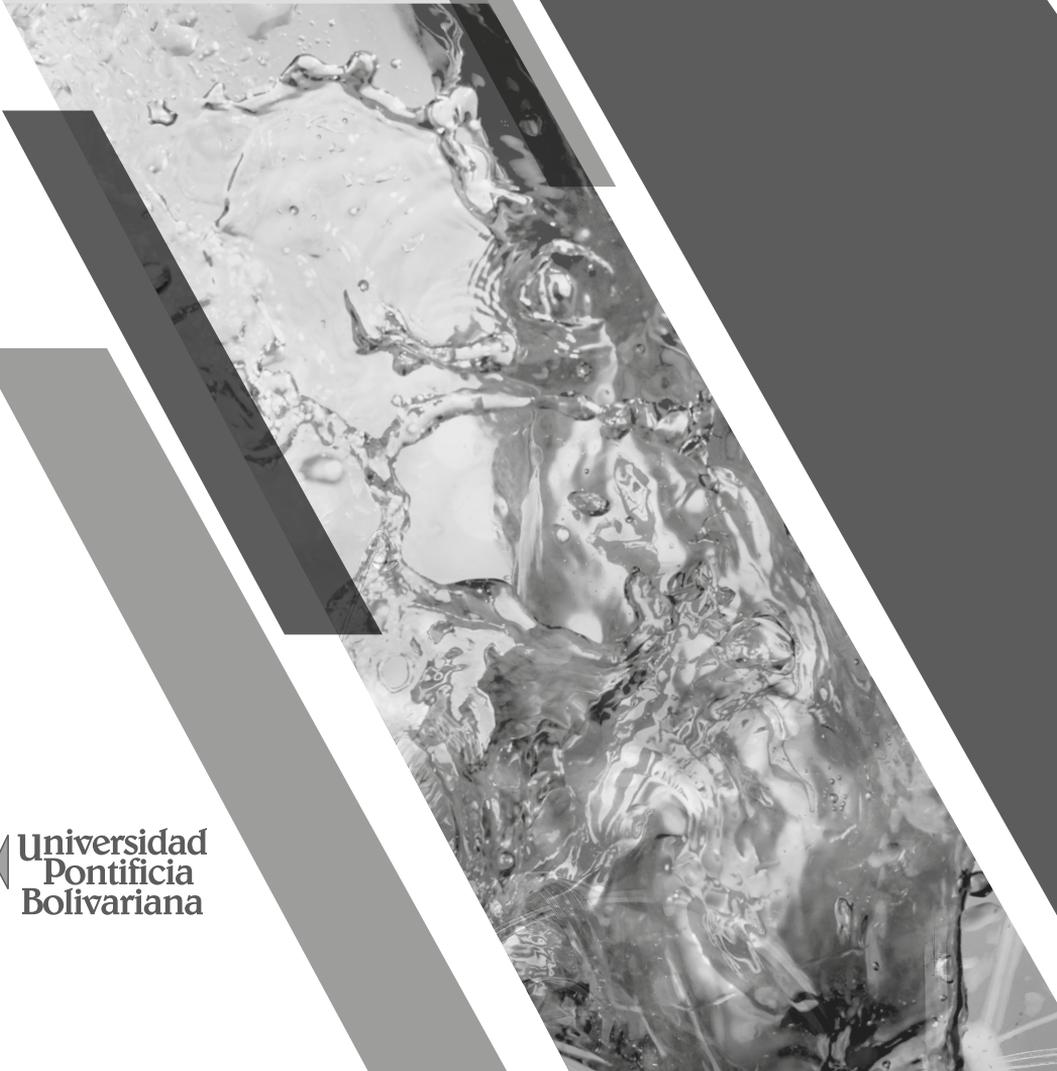
Tomás Ramón
Florville Alejandro



Universidad
Pontificia
Bolivariana

Mecánica de fluidos experimental

Tomás Ramón
Florville Alejandro



Universidad
Pontificia
Bolivariana

532

Florville Alejandro, Tomás Ramón, autor

Mecánica de fluidos experimental/ Tomás Ramón Florville Alejandro -- 1 edición--
Medellín: UPB, Seccional Montería. 2022 -- 73 páginas.

ISBN: 978-628-500-076-8 (versión digital)

1. Ingeniería: mecánica de fluidos aplicada 2. Ingeniería sanitaria y municipal
3. Ingeniería hidráulica

CO-MdUPB / spa / RDA / SCDD 21 /

© Tomás Ramón Florville Alejandro
© Editorial Universidad Pontificia Bolivariana
Vigilada Mineducación

Mecánica de fluidos experimental

ISBN: 978-628-500-076-8 (versión digital)

Primera edición, 2022

Escuela de Ingenierías y Arquitectura
Facultad de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
Seccional Montería

Arzobispo de Medellín y Gran Canciller UPB: Mons. Ricardo Tobón Restrepo

Rector General: Pbro. Julio Jairo Ceballos Sepúlveda

Rector Seccional Montería: Pbro. Jorge Alonso Bedoya Vásquez

Vicerrector Académico Sede Medellín: Álvaro Gómez Fernández

Vicerrector Académico Seccional Montería: Roger Góez Gutiérrez

Coordinadora (e) Editorial: Maricela Gómez Vargas

Gestora Editorial Seccional Montería: Flora del Pilar Fernández Ortega

Coordinación de Producción: Ana Milena Gómez Correa

Diseño y diagramación: María Isabel Arango Franco

Imagen portada: Freepik

Corrección de Estilo: Editorial UPB

Dirección Editorial:

Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 2022

Correo electrónico: editorial@upb.edu.co

www.upb.edu.co

Telefax: (57)(4) 354 4565

A.A. 56006 - Medellín - Colombia

Radicado: 2020-31-08-20

Prohibida la reproducción total o parcial, en cualquier medio o para cualquier propósito sin la autorización escrita de la Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.

Tabla de contenido

Presentación	6
Experiencia No. 1	
Determinación de viscosidad dinámica de fluidos	7
Experiencia No. 2	
Determinación de fuerzas hidrostáticas sobre superficies planas	14
Experiencia No. 3	
Aforo de caudal en tuberías	21
Experiencia No. 4	
Calibración de aforadores de caudal para tuberías	34
Experiencia No. 5	
Aplicación del análisis dimensional al flujo permanente en tuberías	41
Experiencia No. 6	
Determinación de pérdidas de carga por fricción y sus coeficientes asociados en tuberías	51
Experiencia No. 7	
Determinación de pérdidas de carga por accesorios y sus coeficientes asociados en tuberías	59
Anexo I	
Balanza hidrostática	68
Anexo II	
Banco de tuberías	69
Bibliografía	71

Lista de figuras

Figura 1. Viscosímetro de bola en caída libre:	
a) Esquema del instrumento _____	8
b) Diagrama de cuerpo libre para la esfera que cae _____	8
Figura 2. Equilibrio de momentos en una balanza hidrostática para una superficie sumergida plana vertical _____	15
Figura 3. Equilibrio de momentos en una balanza hidrostática para una superficie sumergida plana inclinada _____	16
Figura 4. Tubo de Pitot estático _____	22
Figura 5. Tubo de Venturi _____	24
Figura 6. Balance de energía entre dos puntos de interés en una tubería horizontal _____	52
Figura 7. Balance de energía entre dos puntos de interés en una tubería horizontal con accesorio acoplado _____	60
Figura 8. Balanza hidrostática G.U.N.T. (Modelo HM 150.05): Partes principales _____	68
Figura 9. Banco de tuberías G.U.N.T. (Modelo HM 112):	
a) Partes principales _____	69
b) Descripción de trayectos de tubo _____	69



Presentación

Este trabajo se realizó en la Escuela de Ingenierías y Arquitectura de la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Montería, por el profesor Tomás Ramón Florville Alejandre. En él se presenta una serie de experiencias prácticas del autor, consideradas como ejemplos para la orientación de cursos básicos de Mecánica de fluidos, en ingeniería, con enseñanza basada en la experimentación. Se realizaron esfuerzos por exponer, en cada una de ellas, su fundamento de manera simple sin perder rigor académico, así como su procedimiento experimental en forma detallada. El dominio de los conceptos teóricos para su comprensión se consideró adquirido con antelación, por lo que no se detalla al respecto en este documento. Antes de iniciar su implementación se recomienda revisar cuidadosamente las partes principales de los bancos de ensayo correspondientes, reportadas en los anexos. El trabajo aborda temas relacionados con la viscosidad y densidad de los fluidos, fuerzas hidrostáticas sobre superficies, aforo y calibración de aforadores en tuberías, análisis dimensional así como pérdidas de carga por fricción y accesorios en tuberías. Versiones futuras tratarán aspectos relacionados con seguridad y equipamiento en el laboratorio, manometría, flotabilidad/estabilidad de cuerpos sumergidos y diseño de redes de tuberías. Asimismo, se implementará la adquisición de datos por computador. Este trabajo se complementará con un texto, donde se presentará la solución a las actividades propuestas al finalizar cada una de las experiencias que este documento detalla.



Experiencia No. 1

Determinación de viscosidad dinámica de fluidos

(Método: bola en caída libre)

Objetivo:

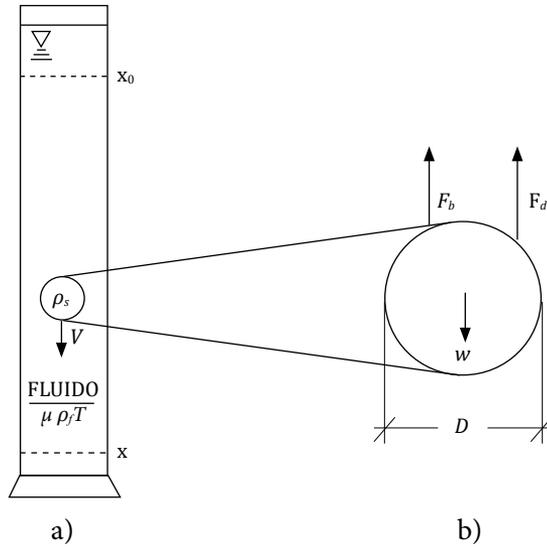
Determinar la viscosidad dinámica de diferentes fluidos mediante el método de bola en caída libre.

Fundamento:

Cuando un cuerpo cae en un fluido, por influencia de la fuerza de gravedad, se acelera hasta que la fuerza descendente –su peso– se equilibra con la fuerza de flotación y la de arrastre viscoso que actúan en dirección opuesta. La velocidad que se alcanza en ese tiempo se denomina velocidad de sedimentación terminal.

En el viscosímetro de bola que cae se hace uso de este principio. En él se mide el tiempo que toma, a una esfera de densidad conocida, recorrer una distancia en caída libre a través de un fluido. Así, es posible calcular la velocidad terminal, v , y con ella la viscosidad dinámica del fluido, μ .

Figura 1. Viscosímetro de bola en caída libre: a) Esquema del instrumento; b) Diagrama de cuerpo libre para la esfera que cae.



La Figura 1 muestra un diagrama de cuerpo libre de la esfera que cae: donde w es el peso de la esfera, F_b la fuerza de flotación y F_d la fuerza de arrastre viscoso sobre la esfera. En tal caso, la ecuación de movimiento es

$$\sum F_v = ma = F_b + F_d - w$$

Cuando la esfera alcanza su velocidad terminal, la resultante de las fuerzas que actúan sobre ella es nula y se encuentra en equilibrio. Entonces la aceleración es cero

$$F_b + F_d - w = 0$$

Si γ_s es el peso específico de la esfera, γ_f el peso específico del fluido, V el volumen de la esfera y D el diámetro de la esfera, se tiene

$$w = \gamma_s V = \gamma_s \pi \frac{D^3}{6}$$

$$F_b = \gamma_f V = \gamma_f \pi \frac{D^3}{6}$$

Para fluidos viscosos y una velocidad pequeña el flujo es laminar, y la fuerza de fricción o de arrastre sobre la esfera es proporcional a la velocidad, v , -Ley de Stokes-

$$F_d = 3\pi\mu vD$$

Con base en lo anterior la viscosidad dinámica puede representarse como

$$\mu = \frac{(\gamma_s - \gamma_f)D^2}{18v}$$

$$\mu = \frac{(\rho_s - \rho_f)gD^2}{18v}$$

donde g es la aceleración local de la gravedad, ρ_s y ρ_f son la densidad de la esfera y del fluido, respectivamente.

Equipo y material:

- Esferas de diferente material -vidrio, hierro y acero inoxidable- y diámetro nominal -1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm-.
- Pie de rey
- Vidrio de reloj
- Probeta de vidrio -100 mL-
- Vaso de precipitado -100 mL-
- Balanza analítica -precisión mínima 0.1 mg-
- Cinta adhesiva coloreada
- Cronómetro
- Termómetro
- Columna de sedimentación de vidrio -2000 mL-
- Flexómetro -graduación mínima mm-
- Fluidos de diferente viscosidad 2000 mL -glicerina, jabón industrial, aceite comestible-
- Toallas de papel

Procedimiento:

A. Determinación del diámetro de la esfera

1. Llenar una probeta de 100 mL con el fluido al que se determinará la viscosidad. Soltar sobre su superficie, una a una, varias esferas de diferente material y diámetro. Elegir aquella cuyo movimiento sea el más lento.
2. Poner la esfera seleccionada para realizar la determinación de viscosidad entre las mordazas para medidas internas del pie de rey.
3. Liberar el freno del instrumento y acercar las mordazas hasta lograr que la esfera quede perfectamente ajustada entre ambas.
4. Poner el freno del instrumento y registrar el diámetro, D , de la esfera con ayuda de la escala auxiliar de Vernier del instrumento.

B. Determinación de la densidad de la esfera

5. Ubicar un vidrio de reloj sobre el plato de la balanza analítica. Tararlo.
6. Poner la esfera sobre el vidrio de reloj tarado. Registrar la masa indicada en el visor de la balanza, m_s .
7. Determinar el volumen de la esfera, V_s , a partir de su diámetro, D .

$$V_s = \pi \frac{D^3}{6}$$

8. Determinar la densidad de la esfera, ρ_s , a partir de su masa, m_s , y su volumen, V_s .

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

C. Determinación de la densidad del fluido

9. Poner una probeta de 100 mL sobre el plato de la balanza analítica. Tararla.
10. Verter en la probeta un volumen conocido cualquiera del fluido – glicerina, jabón industrial, aceite comestible– al que se le determinará la viscosidad, V_f . Registrar la masa indicada en el visor de la balanza, m_f .
11. Determinar la densidad del fluido, ρ_f , a partir de su masa, m_f , y su volumen, V_f .

$$\rho_f = \frac{m_f}{V_f}$$

D. Determinación de la velocidad de sedimentación terminal

12. Marcar con cinta adhesiva coloreada la parte superior e inferior de la columna de sedimentación. Poner las marcas a una distancia mínima de 10 cm a partir de cada uno de sus extremos.

Nota: La marca superior debe asegurar que se alcanza movimiento rectilíneo uniforme antes de iniciar el registro de la velocidad de sedimentación terminal y, la marca inferior, evitar la interferencia a tal velocidad por el fondo de la columna antes de concluir dicho registro.

13. Medir con precisión la distancia, x , entre las dos marcas.
14. Llenar totalmente la columna de sedimentación con el fluido al que se determinará la viscosidad.
15. Liberar una esfera sobre la superficie del fluido que se puso en la columna de sedimentación. Con ayuda de un cronómetro, registrar el tiempo, t , que tarda en recorrer la distancia, x , entre las dos marcas ubicadas en los extremos de la columna de sedimentación.
Nota: Iluminar la parte posterior de la columna de sedimentación en caso de que la coloración del fluido impida observar con claridad el descenso de la esfera.
16. Medir la temperatura, T , del fluido contenido en la columna de sedimentación con un termómetro.
17. Determinar la velocidad de sedimentación terminal de la esfera, v , a partir del tiempo, t , que tarda en recorrer la distancia, x .

$$v = \frac{x}{t}$$

18. Determinar la velocidad de sedimentación terminal por triplicado con una esfera de diferente diámetro en cada réplica.
19. Repetir el procedimiento descrito en los puntos anteriores –A, B, C, y D–, con un fluido diferente en cada réplica.

E. Cálculos

20. Determinar la viscosidad dinámica del fluido

$$\mu = \frac{(\rho_s - \rho_f)gD^2}{18v}$$

donde:

- μ Viscosidad dinámica del fluido a la temperatura T , $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.
- ρ_s Densidad de la esfera a la temperatura T , kg m^{-3} .
- ρ_f Densidad del fluido a la temperatura T , kg m^{-3} .
- g Aceleración local de la gravedad, m s^{-2} .
- D Diámetro de la esfera, m.
- v Velocidad de sedimentación de la esfera a la temperatura T , m s^{-1} .

21. Presentar los cálculos en forma detallada. Resumir de manera tabular en la siguiente forma:

No. Experimento	No. Réplica	ESFERA				FLUIDO 1									
		D (mm)	m_s (kg)	V_s (m^3)	ρ_s (kg m^{-3})	m_f (kg)	V_f (m^3)	ρ_f (kg m^{-3})	x (m)	t (s)	v (m s^{-1})	T ($^{\circ}\text{C}$)	μ ($\text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$)	μ_{Promedio} ($\text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$)	
1	1														
	2														
	3														
FLUIDO 2															
2	1														
	2														
	3														
FLUIDO 3															
3	1														
	2														
	3														

Actividades:

- a. Explicar la importancia y aplicación en ingeniería hidráulica y mecánica de fluidos de la viscosidad y la densidad de los fluidos.
- b. Describir detalladamente tres métodos diferentes al del viscosímetro de bola en caída libre para determinar la viscosidad dinámica.
- c. Investigar en la literatura la magnitud de la viscosidad dinámica de los fluidos estudiados a 20°C . Corregir los resultados experimentales por efecto de la temperatura. Calcular el error relativo entre los resultados experimentales corregidos por efecto de la temperatura y el valor teórico de la viscosidad a 20°C . Comparar y discutir.
- d. Determinar la viscosidad cinemática y el peso específico de los fluidos estudiados con base en los resultados experimentales de

- viscosidad corregidos por temperatura. Calcular el error relativo entre la magnitud de estos parámetros y su valor teórico reportado en la literatura a 20°C. Comparar y discutir.
- e. Diseñar un experimento cuyo objetivo sea obtener una expresión matemática que permita modelar el comportamiento de la viscosidad con respecto a la temperatura. Describir detalladamente.



Experiencia No. 2

Determinación de fuerzas hidrostáticas sobre superficies planas

(Método: equilibrio de momentos de torsión)

Objetivo:

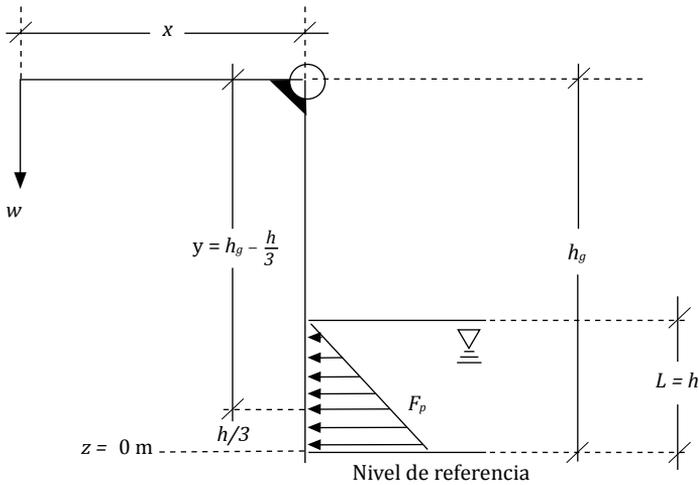
Determinar fuerzas hidrostáticas sobre superficies planas sumergidas mediante equilibrio de momentos de torsión.

Fundamento:

Dos momentos de torsión referidos a un centro de giro común se equilibran cuando el producto de las fuerzas que los producen multiplicados por los brazos de fuerza que les corresponden se igualan.

En la balanza hidrostática se hace uso de este principio. En ella se equilibra el momento de torsión producido por un peso conocido con el que ejerce una fuerza de presión hidrostática desconocida sobre una superficie plana sumergida –superficie activa–. Los brazos de fuerza correspondientes a los momentos de torsión involucrados se establecen de antemano, por lo que son también conocidos y permiten calcular la magnitud de la fuerza de presión hidrostática que se desconoce (Figura 2).

Figura 2. Equilibrio de momentos en una balanza hidrostática para una superficie sumergida plana vertical.



Balace de momentos

$$F_p = \frac{wx}{h_g - \frac{h}{3}}$$

Precisando, si x e y son los brazos de fuerza correspondientes al peso, w , y a la fuerza de presión hidrostática, F_p , respectivamente, el equilibrio de momentos de torsión toma la forma

$$\sum M_o = 0$$

$$wx - F_p y = 0$$

$$wx = F_p y$$

Puesto que el centro de presión se ubica en el centroide del triángulo de distribución de la presión hidrostática a una distancia medida desde la base de la superficie activa igual a un tercio del tirante hidráulico, h , el equilibrio de momentos de torsión para una superficie activa vertical puede expresarse como

$$F_p = \frac{wx}{\underbrace{h_g - \frac{h}{3}}_y}$$

donde h_g es la distancia desde el centro de giro hasta la base de la superficie activa; o bien, como en este caso la longitud de la superficie activa, L , iguala al tirante hidráulico, h , se tiene

$$F_p = \frac{wx}{\underbrace{h_g - \frac{L}{3}}_y}$$

La ecuación anterior puede generalizarse a superficies activas verticales o inclinadas expresando la longitud de la superficie activa, L , en términos de los niveles de la superficie libre del agua y de la base de la superficie activa respecto a un mismo nivel de referencia, así como del ángulo de inclinación de la superficie activa respecto a la vertical, α

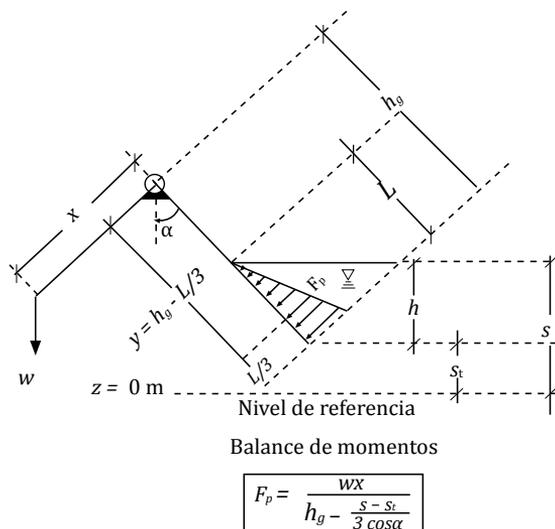
$$L = \frac{\frac{h}{s - s_t}}{\cos\alpha}$$

donde s es el nivel de la superficie libre del agua respecto al nivel de referencia, y s_t el nivel de la base de la superficie activa respecto al mismo nivel de referencia (Figura 3).

En esta forma

$$F_p = \frac{wx}{\underbrace{h_g - \frac{s - s_t}{3\cos\alpha}}_y}$$

Figura 3. Equilibrio de momentos en una balanza hidrostática para una superficie sumergida plana inclinada.



Equipo y material:

- Balanza hidrostática –con accesorios: jinete, porta pesas, pesas de magnitud variable (0.5 N, 1.0 N, 2.0 N y 2.5 N)–
- Vaso de precipitado plástico de 500 mL
- Vaso de precipitado plástico de 100 mL
- Flexómetro –graduación mínima mm–
- Frasco lavador
- Paño de tela suave
- Toallas de papel

Procedimiento:

A. Nivelación y tara de la balanza hidrostática

1. Poner la balanza hidrostática sobre una superficie horizontal, plana e impermeable.
2. Nivelar la base del instrumento con ayuda de la burbuja de nivel y la variación de la altura de sus soportes.
3. Ubicar el depósito de agua (1) en un ángulo, α , igual a cero grados respecto a la vertical ajustando el perno de retención (2) en la posición correspondiente indicada por la escala de inclinación.
4. Seleccionar una longitud para el brazo de fuerza correspondiente al peso. Evitar que se encuentre fuera de la escala indicada en el brazo de la balanza.
5. Ajustar a la longitud seleccionada el brazo de fuerza correspondiente al peso, x , poniendo el jinete (6) en la posición indicada por la escala de medida del brazo de la balanza. Registrar el brazo de fuerza, x .
6. Tarar la balanza hidrostática alineando su brazo horizontalmente con ayuda de los pesos corredizos giratorios (3). Asegurar el alineamiento verificando que el perno de tope (4) se ubique justo en el centro del orificio que lo rodea.

B. Equilibrio de momentos de torsión con superficie plana vertical

7. Acoplar al jinete (6) el portapesas calibrado -1.0 N -. Evitar variar la longitud del brazo de fuerza correspondiente al peso, x . Registrar el peso, w .
8. Verter agua en el depósito de la balanza hidrostática (1) hasta que el instrumento se equilibre y recupere la horizontal. Asegurar que el perno de tope (4) se ubique justo en el centro del orificio que lo rodea cuando esto ocurra.
9. Registrar el nivel del agua, h , indicado por la escala de medida (5) localizada sobre el depósito de agua (1).
10. Añadir al portapesas un peso (3) igual a 0.5 N . Registrar el nuevo peso, w .
11. Repetir los pasos 8, 9 y 10 incrementando el peso (3) entre 0.5 N y 1.0 N en cada repetición. Suspender cuando el nivel del agua, h , exceda un valor igual a 100 mm . Descartar esa medida.
12. Vaciar el equipo y secarlo con un paño suave.

C. Equilibrio de momentos de torsión con superficie plana inclinada

13. Nivelar y tarar la balanza hidrostática como se describe en el punto A.
14. Poner el depósito de agua (1) en un ángulo, α , igual a 30 grados respecto a la vertical ajustando el perno de retención (2) en la posición correspondiente indicada por la escala de inclinación.
15. Equilibrar los momentos de torsión, como se describe en el punto B. Notar que en este caso el tirante hidráulico, h , se expresa en términos de la diferencia de nivel entre la superficie libre del agua respecto al nivel de referencia, s , y de la base de la superficie activa respecto al mismo nivel de referencia s_r .
16. Repetir los pasos 14 y 15 con ángulos, α , iguales a 45 y 60 grados.
17. Vaciar el equipo y secarlo con un paño suave.

D. Cálculos

18. Determinar la fuerza de presión hidrostática ejercida por el fluido sobre la superficie plana

$$F_p = \frac{wx}{h_g - \frac{s - s_t}{3\cos\alpha}}$$

donde:

- F_p Fuerza de presión hidrostática ejercida por el fluido sobre la superficie activa, N.
 w Peso, N.
 x Brazo de fuerza correspondiente al peso, m.
 h_g Distancia desde el centro de giro hasta la base de la superficie activa -0.2 m-, m.
 s Nivel de la superficie libre del agua respecto al nivel de referencia, m.
 s_t Nivel de la base de la superficie activa respecto al nivel de referencia, m.
 α Ángulo de inclinación de la superficie activa respecto a la vertical, °.

19. Presentar los cálculos en forma detallada. Resumir de manera tabular en la siguiente forma:

Superficie Plana	Ángulo de inclinación respecto a la vertical	No. Experimento	w (N)	x (m)	y $(h_g - \frac{s - s_t}{3\cos\alpha})$ (m)	h (m)	F_p experimental (N)	\bar{F}_p teórica (N)	\bar{F}_p experimental (N)	F_p teórica (N)	Error relativo (%)
	$\alpha = 0^\circ$	1									
2											
3											
4											
$\alpha = 30^\circ$	1										
	2										
	3										
	4										
$\alpha = 45^\circ$	1										
	2										
	3										
	4										
$\alpha = 60^\circ$	1										
	2										
	3										
	4										

Actividades:

- a. Explicar la importancia y aplicación en ingeniería hidráulica y mecánica de fluidos de las fuerzas hidrostáticas sobre superficies sumergidas.
- b. Calcular la media aritmética de la fuerza de presión experimental para cada ángulo de inclinación. Determinar el error cuadrático, Δx , asociado con cada uno de los valores medios. Expresar los resultados como: valor medio $\pm \Delta x$ unidad de medida. Resumir de manera tabular. Comparar y discutir.
- c. Calcular la fuerza de presión teórica para cada uno de los experimentos. Determinar su media aritmética para cada ángulo de inclinación. Calcular el error cuadrático, Δx , asociado con cada uno de los valores medios. Expresar los resultados como: valor medio $\pm \Delta x$ unidad de medida. Resumir de manera tabular. Comparar y discutir.
- d. Calcular el error relativo porcentual entre resultados experimentales promedio y fuerza de presión teórica media. Comparar y discutir.
- e. Graficar en forma tridimensional el prisma de presiones para cada uno de los siguientes casos: 1) Superficie activa sin inclinación, 2) Superficie activa inclinada 30° , 3) Superficie activa inclinada 45° , 4) Superficie activa inclinada 60° . Realizar esta tarea usando los resultados experimentales. Tener en cuenta que el ancho de la superficie activa, A , es igual a 7.5 mm.



Experiencia No. 3

Aforo de caudal en tuberías

(Método: caída de presión)

Objetivo:

Determinar el flujo volumétrico en tuberías mediante el uso de aforadores de caudal a través del método de registro de caída de presión.

Fundamento:

Numerosos aforadores de caudal para tuberías –Tubo de Pitot, Tubo de Venturi, Placa de Orificio, Tobera– se diseñan de manera que el flujo en la estructura de medida del aforador mantenga una diferencia de presión respecto al flujo existente en la corriente de fluido no perturbada.

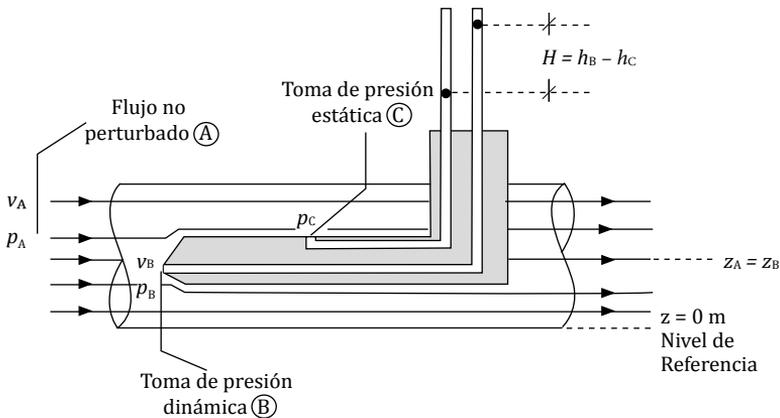
En el banco de tuberías se hace uso de este principio. En él la diferencia de presión se cuantifica con la ayuda de un manómetro diferencial conectado, por un extremo, a la estructura de medida del aforador –tubo en contraflujo (Tubo de Pitot), tubo reducido en diámetro (Tubo de Venturi), corriente de fluido inmediata posterior a una restricción de flujo (Placa de Orificio), etc.– y, por el otro, a la corriente de fluido no perturbada. Puesto que el fluido que circula tiene propiedades conocidas –densidad, peso específico– es posible emplear la cuantificación de esta diferencia de presión para determinar el caudal teórico que circula dentro de la tubería, con base en la ecuación de Bernoulli. En casos reales existe pérdida de energía, por lo que el caudal real difiere del caudal teórico. Un factor de corrección empírico, denominado con frecuencia coeficiente de descarga, se introduce para cuantificar este hecho.

El balance de energía para un flujo unidimensional incompresible en ausencia de fricción entre los puntos en que el manómetro diferencial se conecta a un Tubo de Pitot (Figura 4) conduce a

$$\frac{p_A}{\gamma} + \frac{v_A^2}{2g} + z_A = \frac{p_B}{\gamma} + \frac{v_B^2}{2g} + z_B$$

donde γ es el peso específico del fluido a la temperatura T ; g es la aceleración local de la gravedad; v_A , z_A , p_A y v_B , z_B , p_B son la velocidad, elevación y presión registradas en la corriente de fluido no perturbada y en la estructura de medida del Tubo de Pitot, respectivamente.

Figura 4. Tubo de Pitot estático.



Puesto que los puntos en que la presión se mide se encuentran al mismo nivel y la velocidad en el punto de estancamiento, v_B , es nula, el balance de energía se simplifica

$$\frac{v_A^2}{2g} = \frac{p_B - p_A}{\rho g}$$

La presión estática, p_A , es la misma en la línea de corriente adyacente al punto A y es detectada por el orificio C del manómetro normal al flujo, por lo que $p_A = p_C$; en consecuencia, la igualdad anterior toma la forma

$$\underbrace{\frac{\rho v_A^2}{2}}_{\text{Presión dinámica}} = \underbrace{p_B}_{\text{Presión total}} - \underbrace{p_C}_{\text{Presión estática}}$$

Esta expresión permite estimar la velocidad en la corriente de fluido no perturbada, v_A , a partir de medidas experimentales de la presión total del fluido, p_B , y de su presión estática, p_C

$$v_A = \sqrt{\frac{2(p_B - p_C)}{\rho}}$$

y, con base en ella, determinar el caudal teórico que fluye en la tubería a partir de la definición básica de flujo volumétrico

$$Q_{\text{Teórico}} = A_A \underbrace{\sqrt{\frac{2(p_B - p_C)}{\rho}}}_{v_A}$$

donde $Q_{\text{Teórico}}$ es el caudal teórico que fluye en la tubería y A_A es el área de la sección transversal del Tubo de Pitot en la corriente de fluido no perturbada por la estructura de medida.

Expresando la diferencia de presión entre los puntos de medida, $(p_B - p_C)$, en términos de la altura del nivel del agua en dos tubos manométricos

$$H = \frac{\overbrace{\Delta p = \rho g(h_B - h_C)}^{(p_B - p_C)}}{\rho g} = h_B - h_C$$

la expresión del caudal teórico, $Q_{\text{Teórico}}$, se transforma en

$$Q_{\text{Teórico}} = A_A \underbrace{\sqrt{2gH}}_{v_A}$$

donde h_B y h_C son, respectivamente, las alturas del nivel del agua en los tubos manométricos conectados a las tomas de presión total y de presión estática.

Introduciendo el coeficiente de descarga, C_d , para corregir por la desviación entre comportamiento real e ideal, es posible estimar el caudal real o de referencia, Q_{Real}

$$Q_{Real} = C_d A_A \sqrt{2gH}$$

$$\underbrace{Q_{Real}}_y = \underbrace{C_d}_m \underbrace{Q_{Teórico}}_x$$

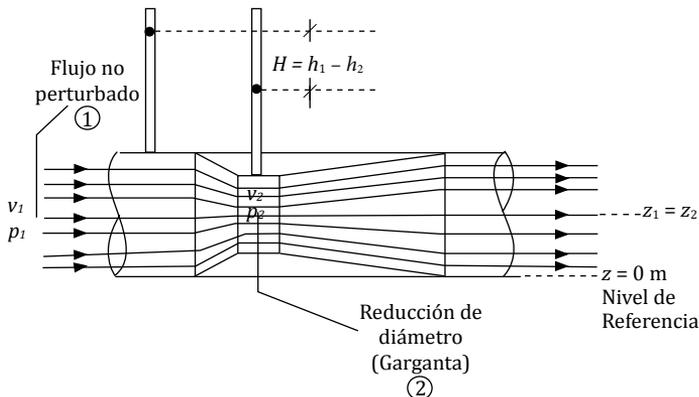
y demostrar la factibilidad de establecer experimentalmente la magnitud de tal coeficiente para cada instrumento. En esta forma, su magnitud corresponde a aquella que presenta la pendiente de la línea recta obtenida a partir de un gráfico de caudal real o de referencia observado contra caudal teórico. Esta operación constituye, en rigor, una calibración básica del Tubo de Pitot.

De manera análoga, la aplicación de la ecuación de Bernoulli a un flujo unidimensional incompresible en ausencia de fricción entre los puntos en que el manómetro diferencial se conecta a un Tubo de Venturi (Figura 5) conduce a

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

donde γ es el peso específico del fluido a la temperatura T ; g es la aceleración local de la gravedad; v_1, z_1, p_1 y v_2, z_2, p_2 son la velocidad, elevación y presión registradas en la estructura de medida del Tubo de Venturi de mayor, A_1 , y menor, A_2 , área de sección transversal, respectivamente.

Figura 5. Tubo de Venturi.



Nuevamente los puntos en que la presión se mide se encuentran al mismo nivel, por lo que la ecuación anterior se escribe como

$$2g \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho g} \right) = v_2^2 - v_1^2$$

A partir de la ecuación de continuidad

$$v_1 = \frac{v_2 A_2}{A_1}$$

es posible modificarla

$$v_2 = \frac{2g \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho g} \right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}}$$

y relacionar la diferencia de presión con el caudal teórico que fluye en la tubería, $Q_{Teórico}$, con base en la definición básica de flujo volumétrico

$$Q_{Teórico} = A_2 \underbrace{\frac{2 \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho} \right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}}}_{v_2 A_2}$$

En este caso, la introducción del coeficiente de descarga conduce a

$$Q_{Real} = C_d A_2 \underbrace{\frac{2 \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho} \right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}}}_{Q_{Teórico}}$$

o bien

$$Q_{Real} = C_d \underbrace{\frac{2 \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho} \right)}{\sqrt{\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2}}}}_{Q_{Teórico}}$$

que se representa como

$$Q_{Real} = C_d \underbrace{\sqrt{\frac{2gH}{\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2}}}}_{Q_{Teórico}}$$

al utilizar la notación

$$H = \frac{\overbrace{(p_1 - p_2)}^{\Delta p = \rho g (h_1 - h_2)}}{\rho g} = h_1 - h_2$$

donde h_1 y h_2 son, respectivamente, las alturas del nivel del agua en los tubos manométricos conectados a las secciones del Tubo de Venturi de mayor y menor área transversal.

De nuevo, la magnitud del coeficiente de descarga corresponde a aquella que presenta la pendiente de la línea recta obtenida a partir de un gráfico de caudal real o de referencia observado contra caudal teórico

$$\frac{Q_{real}}{y} = \frac{C_d}{m} \frac{Q_{Teórico}}{x}$$

Equipo y material:

- Banco de tuberías –con accesorios: mangueras de unión, válvulas, dispositivos de aforo, etc.–
- Flexómetro –graduación mínima mm–
- Manguera plástica de 3 m –con acople roscado a válvula de globo–
- Paño de tela suave
- Toallas de papel

Procedimiento:

A. Preparación del banco de tuberías

1. Poner el banco de tuberías sobre una superficie plana. Asegurarlo para evitar su desplazamiento fijando los frenos ubicados en los extremos inferiores frontales de su base móvil.
2. Llenar el depósito de agua (17).
3. Conectar el cable de alimentación eléctrica a la toma de corriente eléctrica. Energizar el equipo girando su interruptor principal (3) en sentido horario.
4. Eliminar la posible suciedad que impida o dificulte el cierre automático de las tubuladuras. Verificar el buen funcionamiento de su sistema de cierre.

B. Verificación de ausencia de fugas

5. Conectar los tubos flexibles de admisión (13) y retorno (1) al sexto tramo de tubo de medición (16) –tubo para intercambio de objetos de medida–. Acoplar al mismo el dispositivo de aforo de caudal (18) –Tubo de Pitot–, asegurando que el tubo de medida de presión total se ubique en contraflujo.
6. Abrir al máximo la válvula de retorno (7) y asegurar que la válvula reguladora de entrada (12) se encuentre completamente cerrada.
7. Poner en funcionamiento la bomba (14) activando su interruptor (4).
8. Abrir lentamente la válvula reguladora de entrada (12) y purgar de aire el tramo de tubo de medición (16). Continuar hasta alcanzar su máxima apertura.
9. Aumentar la presión en el tramo de tubo de medición (16) cerrando lentamente la válvula de retorno (7), hasta alcanzar su cierre total.
10. Verificar la ausencia de fugas en tuberías, mangueras y empalmes.
11. Cerrar completamente la válvula reguladora de entrada (12).
12. Apagar la bomba (14) desactivando su interruptor (4).

C. Conexión y puesta en marcha del manómetro de tubo doble

13. Asegurar que los tubos flexibles de admisión (13) y retorno (1) se encuentren conectados al sexto tramo de tubo de medición (16) – tubo para intercambio de objetos de medida–, y que el dispositivo de aforo de caudal (18) –Tubo de Pitot– se encuentre correctamente acoplado al mismo. Registrar su diámetro, D_A .
14. Conectar mangueras de unión a las tubuladuras ubicadas en los extremos del dispositivo de aforo de caudal (18) –Tubo de Pitot–. Acoplar el extremo libre de las mangueras con las conexiones del manómetro de tubo doble (9), asegurando que la manguera con mayor presión se acople a la tubuladura izquierda y la de menor presión a la tubuladura derecha.
15. Cerrar al máximo la válvula de purga de aire del manómetro de tubo doble (9) ubicada en su parte superior, girándola cuidadosamente en sentido antihorario.
16. Abrir al máximo la válvula de retorno (7) y las válvulas de desagüe inferiores girándolas cuidadosamente en sentido horario.
17. Poner en funcionamiento la bomba (14) activando su interruptor (4).
18. Abrir lentamente la válvula reguladora de entrada (12). Un fuerte chorro de agua atravesará el tramo de tubo de medición (16) y el dispositivo de aforo de caudal (18) –Tubo de Pitot–. Permitir que el agua fluya hasta que dejen de aparecer burbujas de aire en las mangueras que unen el dispositivo de aforo de caudal (18) –Tubo de Pitot– con las tubuladuras del manómetro de tubo doble (9).
19. Cerrar las válvulas de desagüe inferiores lentamente y, al mismo tiempo, girándolas en sentido anti horario. Asegurar que las columnas de agua en los tubos de nivel asciendan de forma uniforme y que no se produzcan derrames de un tubo de nivel a otro.

D. Ajuste del punto cero

20. Cerrar al máximo la válvula de retorno (7). Cuando esto ocurra la altura de la columna de agua en ambos tubos de nivel del manómetro será la misma.
21. Abrir ligeramente la válvula de purga de aire y permitir un lento ascenso de la columna de agua en ambos tubos de nivel. Cerrar la

válvula de purga de aire cuando la columna de agua alcance en ambos tubos el centro de la escala del manómetro.

Nota: La válvula de purga de aire sólo regula el nivel del fluido hacia la parte superior de los tubos del manómetro, por lo que si el nivel llega a ser excesivo deberá vaciarse la red de tubos y realizarse una nueva purga de aire.

22. Abrir al máximo la válvula de retorno (7).

E. Medida de la presión diferencial (Tubo de Pitot)

23. Cerrar la válvula reguladora de entrada (12) hasta alcanzar en el rotámetro (10) un caudal igual a $1.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, manteniendo la válvula de retorno (7) totalmente abierta. Registrar la magnitud del caudal, Q .

24. Registrar la altura del agua en cada una de las columnas de nivel del manómetro de tubo doble (9). En caso de observarse una indicación fluctuante registrar el valor medio.

Nota: Al experimentar con grandes caudales la presión diferencial puede aumentar hasta tal punto que el agua rebose por la tubería de conexión superior al tubo de medida con la menor presión. En ese caso tendrá que ajustarse nuevamente el punto cero.

25. Registrar la temperatura, T , a la que se realiza la medida.
26. Repetir los pasos 23 a 25 para los caudales siguientes: 1.3, 1.1, 0.9 y $0.7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

F. Despresurización del banco de tuberías

27. Cerrar completamente la válvula de retorno (7).
28. Apagar la bomba (14) desactivando su interruptor (4).
29. Abrir completamente la válvula reguladora de entrada (12) así como la válvula de purga de aire y las válvulas de desagüe del manómetro de tubo doble (9), para despresurizar y vaciar el equipo.
30. Abrir completamente la válvula de retorno (7).

G. Medida de la presión diferencial (Tubo de Venturi)

31. Repetir los pasos 13 a 26 acoplando al sexto tramo de tubo de medición (16) un dispositivo de aforo de caudal diferente (18) –Tubo de Venturi–. Asegurar que, en este caso, las mangueras de unión se conecten en las tubuladuras en las que se ubican las secciones transversales de mayor y menor área –primera y tercera tubuladuras– del dispositivo de aforo de caudal (18) –Tubo de Venturi–. Registrar los diámetros que les corresponden – D_1 , mayor diámetro y D_2 , menor diámetro–.
32. Repetir los pasos 27 al 30 para despresurizar y vaciar el equipo.

H. Cálculos

33. Calcular el diferencial de presión entre los puntos de medida

$$\Delta p_{\text{pitot}} = (p_B - p_C) = \rho g(h_B - h_C) \quad \text{Tubo de Pitot}$$

$$\Delta p_{\text{venturi}} = (p_1 - p_2) = \rho g(h_1 - h_2) \quad \text{Tubo de Venturi}$$

34. Calcular el área de la sección transversal de los dispositivos de aforo

$$A_A = \pi \frac{D_A^2}{4} \quad \text{Tubo de Pitot}$$

$$A_1 = \pi \frac{D_1^2}{4} \quad \text{Tubo de Venturi}$$

$$A_2 = \pi \frac{D_2^2}{4}$$

35. Calcular la velocidad media de flujo

$$v_A = \sqrt{\frac{2(p_B - p_C)}{\rho}} \quad \text{Tubo de Pitot}$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \quad \text{Tubo de Venturi}$$

36. Calcular el caudal teórico

$$Q_{Teórico} = v_A A_A \quad \text{Tubo de Pitot}$$

$$Q_{Teórico} = v_2 A_2 \quad \text{Tubo de Venturi}$$

donde:

Δp_{Pitot} Diferencia entre presión total, p_B , y presión estática, p_C , del Tubo de Pitot estático, Pa.

$\Delta p_{Venturi}$ Diferencia de presiones entre la sección transversal de mayor área, p_1 , y la sección transversal de menor área, p_2 , del Tubo de Venturi, Pa.

ρ Densidad del fluido a la temperatura T , kg m^{-3} .

g Aceleración local de la gravedad, m s^{-2} .

h_B Altura del nivel del agua en el tubo manométrico conectado a la tubuladura de presión total del Tubo de Pitot estático, m.

h_C Altura del nivel del agua en el tubo manométrico conectado a la tubuladura de presión estática del Tubo de Pitot estático, m.

h_1 Altura del nivel del agua en el tubo manométrico conectado a la sección transversal de mayor área del Tubo de Venturi, m.

h_2 Altura del nivel del agua en el tubo manométrico conectado a la sección transversal de menor área del Tubo de Venturi, m.

A_A Área de la sección transversal del Tubo de Pitot estático, m^2 .

A_1 Área de la sección transversal mayor del Tubo de Venturi, m^2 .

A_2 Área de la sección transversal menor del Tubo de Venturi, m^2 .

D_A Diámetro interno del Tubo de Pitot estático, m.

D_1 Diámetro interno en la sección transversal de mayor área del Tubo de Venturi, m.

D_2 Diámetro interno en la sección transversal de menor área del Tubo de Venturi, m.

v_A Velocidad de flujo en el Tubo de Pitot estático, m s^{-1} .

v_2 Velocidad de flujo en la sección transversal de menor área del Tubo de Venturi, m s^{-1} .

$Q_{Teórico}$ Caudal teórico, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

Q_{Real} Caudal real o de referencia, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

37. Presentar los cálculos en forma detallada. Resumir de manera tabular en la siguiente forma:

	No. Experimento	$Q_{Real\ observado}$ ($m^3\ s^{-1}$)	h_B (m)	h_C (m)	Δp_{Pitot} (Pa)	A_A (m)	v_A ($m\ s^{-1}$)	$Q_{Teórico}$ ($m^3\ s^{-1}$)	$Q_{Real\ calculado}$ ($m^3\ s^{-1}$)	Error relativo (%)
Tubo de Pitot	1									
	2									
	3									
	4									
	5									

	No. Experimento	$Q_{Real\ observado}$ ($m^3\ s^{-1}$)	h_1 (m)	h_2 (m)	$\Delta p_{Venturi}$ (Pa)	A_1 (m)	A_2 (m)	v_2 ($m\ s^{-1}$)	$Q_{Teórico}$ ($m^3\ s^{-1}$)	$Q_{Real\ calculado}$ ($m^3\ s^{-1}$)	Error relativo (%)
Tubo de Venturi	1										
	2										
	3										
	4										
	5										

Actividades:

- Explicar la importancia y aplicación en ingeniería hidráulica y mecánica de fluidos del aforo de caudal en conductos a presión.
- Describir detalladamente el funcionamiento y la aplicación de los siguientes instrumentos en ingeniería hidráulica y mecánica de fluidos: i) Rotámetro, ii) Tubo de Pitot, iii) Tubo de Venturi, iv) Placa de Orificio, iv) Tobera. Apoyar cada descripción con una figura.
- Obtener una expresión matemática que permita calcular el caudal real utilizando como instrumento de aforo al Tubo de Venturi en conductos a presión orientados en posición vertical.
- Expresar en términos del diámetro de la tubería la ecuación que permite calcular el caudal real utilizando como instrumento de aforo al Tubo de Venturi.
- Determinar el coeficiente de descarga mediante un gráfico de caudal real o de referencia observado contra caudal teórico, para cada uno de los instrumentos de aforo utilizados. Desarrollar esta tarea considerando como caudal real o de referencia observado al obtenido mediante el uso del rotámetro como instrumento de aforo.

- Presentar en el gráfico la ecuación que permite calcular el caudal real o de referencia para cada uno de los experimentos realizados.
- f. Calcular el caudal real o de referencia para cada uno de los experimentos realizados con el uso del coeficiente de descarga que corresponda, de conformidad con el instrumento de aforo utilizado. Resumir los resultados en forma tabular en conjunto con aquellos empleados para el cálculo del caudal teórico.
 - g. Determinar el error relativo porcentual entre el caudal real o de referencia observado y el caudal real o de referencia calculado. Resumir los resultados en forma tabular en conjunto con aquellos usados para el cálculo del caudal teórico.
 - h. Graficar el caudal real o de referencia observado contra el caudal real o de referencia calculado para cada instrumento de aforo. Comparar y discutir.
 - i. Graficar en una misma figura el error relativo porcentual contra el caudal real o de referencia calculado para cada instrumento de aforo. Comparar y discutir.
 - j. Identificar el instrumento de aforo que presenta el menor error relativo porcentual en la determinación del caudal. Explicar este hallazgo.
 - k. Discutir ampliamente las semejanzas y diferencias en las medidas de caudal obtenidas experimentalmente con los tubos de Venturi y Pitot.



Experiencia No. 4

Calibración de aforadores de caudal para tuberías

(Método: caída de presión)

Objetivo:

Calibrar instrumentos de aforo ampliamente utilizados en la determinación de flujo volumétrico en tuberías mediante el método de registro de caída de presión.

Fundamento:

El caudal dentro de una tubería con flujo unidimensional e incompresible sigue un comportamiento que puede representarse matemáticamente en términos de una función potencial dependiente de la diferencia de presión entre el flujo en la estructura de medida del instrumento de aforo y en la corriente de fluido no perturbada.

En el banco de tuberías se hace uso de este principio. En él las diferencias de presión asociadas con caudales específicos se cuantifican con la ayuda de un manómetro diferencial conectado, por un extremo, a la estructura de medida del instrumento de aforo y, por el otro, a la corriente de fluido no perturbada. Las parejas de datos caudal–diferencia de presión registradas de este modo, se ajustan matemáticamente mediante el método de mínimos cuadrados a una función potencial. Este ajuste permite determinar los parámetros de calibración, que se utilizan para estimar nuevos caudales en la tubería de interés exclusivamente a partir de nuevos registros de presión

diferencial. Cuando la disponibilidad de equipo de cómputo para realizar el ajuste es una limitante, o se requiere una rápida estimación, pueden obtenerse aproximaciones de tales parámetros mediante la linealización del comportamiento potencial de las parejas de datos experimentales por transformación logarítmica y su ajuste por mínimos cuadrados con una calculadora manual; o bien, ellos pueden estimarse mediante aplicación de herramientas de geometría analítica a la línea recta que resulta del ajuste visual de los datos experimentales transformados logarítmicamente. Para estimar el caudal dentro de una tubería utilizando como instrumento de aforo al Tubo de Pitot o al Tubo Venturi, se tiene

$$Q_{Real} = C_d Q_{Teórico}$$

donde Q_{Real} y $Q_{Teórico}$ son el caudal real y caudal teórico en la tubería, y C_d es el coeficiente de descarga que corrige por la desviación entre el comportamiento real e ideal. Puesto que

$$Q_{Teórico} = A_A \sqrt{\frac{2(p_B - p_C)}{\rho}} \quad \text{Tubo de Pitot}$$

$$Q_{Teórico} = \sqrt{\frac{2 \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho} \right)}{\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2}}} \quad \text{Tubo de Venturi}$$

se tiene

$$Q_{Real} = C_d A_A \sqrt{\frac{2(p_B - p_C)}{\rho}} \quad \text{Tubo de Pitot}$$

$$Q_{Real} = C_d \sqrt{\frac{2 \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho} \right)}{\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2}}} \quad \text{Tubo de Venturi}$$

donde ρ es la densidad del fluido a la temperatura T ; p_B y p_C son las presiones registradas en la corriente de fluido no perturbada y en aquella presente en la estructura de medida del Tubo de Pitot; p_1 y p_2 son las presiones registradas en la estructura de medida del Tubo de Venturi de mayor, A_1 , y menor, A_2 , área de sección transversal; y A_A es el área

de la sección transversal del Tubo de Pitot en la corriente de fluido no perturbada por su estructura de medida.

El reordenamiento de las expresiones anteriores conduce a

$$Q_{Real} = C_d A_A \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(p_B - p_C)^2}{\Delta p}} \quad \text{Tubo de Pitot}$$

$$Q_{Real} = C_d \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(p_B - p_C)^2}{\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \Delta p}} \quad \text{Tubo de Venturi}$$

y permite generalizar

$$\underbrace{Q_{Real}}_y = \alpha \underbrace{\Delta p^\beta}_x$$

siendo α y β un coeficiente y exponente de calibración determinados por ajuste potencial de las parejas de datos experimentales, Δp - Q_{Real} , mediante el método de mínimos cuadrados.

La linealización de esta expresión

$$\ln \underbrace{Q_{Real}}_y = \underbrace{\ln \alpha}_b + \underbrace{\beta}_m \underbrace{\ln(\Delta p)}_x$$

permite estimar los parámetros de calibración a partir de una transformación logarítmica de las parejas de datos experimentales, $\ln \Delta p$ - $\ln Q_{Real}$, y su ajuste por mínimos cuadrados a una línea recta; correspondiendo la pendiente de la misma a la magnitud del exponente de calibración, β , y la magnitud del coeficiente de calibración, α , a la exponencial natural de la ordenada al origen.

La representación gráfica de la transformación logarítmica de las parejas de datos experimentales y su ajuste visual a la línea recta que minimiza el error entre observaciones y predicciones constituye una alternativa simple, pero menos precisa, para estimar los parámetros de calibración.

El exponente de calibración, β , presenta también aquí una magnitud igual a la de la pendiente de la línea recta ajustada, cuya expresión en la forma Punto-Pendiente es

$$\beta = \frac{\overbrace{[\ln Q_{Real}]_2}^{y_2} - \overbrace{[\ln Q_{Real}]_1}^{y_1}}{\underbrace{[\ln(\Delta p)]_2}_{x_2} - \underbrace{[\ln(\Delta p)]_1}_{x_1}}$$

donde los subíndices 1 y 2 denotan parejas de datos ($\ln \Delta p$, $\ln Q_{Real}$) determinados visualmente en dos puntos diferentes sobre la recta. El coeficiente de calibración, α , adquiere aquí una magnitud igual a la exponencial natural de la ordenada al origen, b

$$\alpha = e^b$$

quien se determina de manera visual sobre la misma recta.

Equipo y material:

- Computadora personal –con MS Excel® instalado–
- Calculadora científica manual
- Regla plástica –con longitud de 30 cm–
- Papel milimetrado

Procedimiento:

A. Recopilación de datos experimentales

1. Recopilar la siguiente información para cada uno de los experimentos que fueron realizados en la experiencia anterior –“Aforo de caudal en tuberías”–: Δp , $Q_{Real\ observado}$ y $Q_{Real\ calculado}$.

B. Cálculos

2. Calcular el logaritmo natural de los siguientes datos:
 Δp , $Q_{Real\ observado}$.

3. Calcular los parámetros de calibración –coeficiente de calibración α y exponente de calibración β – para cada uno de los instrumentos de aforo de caudal y métodos de ajuste como se indica a continuación. En todos los casos considerar como $Q_{Real\ observado}$ al obtenido mediante el uso del rotámetro como instrumento de aforo.

- **Ajuste potencial** (mínimos cuadrados):

Ajuste potencial de las parejas de datos $\Delta p - Q_{Real\ observado}$ mediante el método de mínimos cuadrados. Realizar el ajuste con apoyo en el software MS Excel®.

- **Ajuste lineal** (mínimos cuadrados):

Ajuste lineal de las parejas de datos $\ln \Delta p - \ln Q_{Real\ observado}$ mediante el método de mínimos cuadrados. Realizar el ajuste con calculadora científica o apoyo en el software MS Excel®

$$\beta = \frac{n \cdot \sum(\ln \Delta p \cdot \ln Q_{Real\ observado}) - \sum(\ln \Delta p) \cdot \sum(\ln Q_{Real\ observado})}{n \cdot \sum(\ln \Delta p)^2 - |\sum(\ln \Delta p)|^2}$$

$$\alpha = e^{\ln \left[\frac{\sum(\ln Q_{Real\ observado}) \cdot \sum(\ln \Delta p)^2 - \sum(\ln \Delta p) \cdot \sum(\ln \Delta p \cdot \ln Q_{Real\ observado})}{n \cdot \sum(\ln \Delta p)^2 - |\sum(\ln \Delta p)|^2} \right]}$$

- **Ajuste lineal** (visual):

Ajuste lineal, en forma visual, de las parejas de datos $\ln \Delta p - \ln Q_{Real\ observado}$. Realizar el ajuste sobre un gráfico en papel milimétrico. Determinar visualmente sobre el gráfico una pareja de datos $(\ln \Delta p, \ln Q_{Real})$ en dos puntos diferentes sobre la recta ajustada; a continuación, calcular:

$$\beta = \frac{[\ln Q_{Real}]_2 - [\ln Q_{Real}]_1}{[\ln(\Delta p)]_2 - [\ln(\Delta p)]_1}$$

Determinar visualmente sobre el gráfico la ordenada al origen, b; posteriormente calcular:

$$\alpha = e^b$$

4. Para cada uno de los experimentos determinar $Q_{Real\ calculado}$ con los parámetros de calibración α y β que correspondan, de conformidad con el instrumento de aforo y el método de ajuste de datos utilizado.

donde:

Q_{Real} Caudal real, $m^3 s^{-1}$.

Δp Diferencia de presión entre el flujo en la estructura de medida del instrumento de aforo y en la corriente de fluido no perturbada, Pa.

β Exponente de ajuste potencial.

α Coeficiente de ajuste potencial.

n Cantidad total de parejas de datos experimentales.

1 y 2 Subíndices que denotan parejas de datos ($\ln \Delta p, \ln Q_{Real}$) determinados en dos puntos diferentes sobre la línea recta de mejor ajuste determinada visualmente.

b Ordenada al origen de la línea recta ajustada visualmente.

- Presentar los cálculos en forma detallada. Resumir de manera tabular en la siguiente forma:

	No. Experimento	$Q_{Real\ observado}$ ($m^3 s^{-1}$)	Δp (Pa)	$\ln(Q_{Real\ observado})$ ($m^3 s^{-1}$)	$\ln(\Delta p)$ (Pa)
Tubo de Pitot	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
Tubo de Venturi	1				
	2				
	3				
	4				
	5				

		MÉTODO								
		Coeficiente de Descarga			Ajuste Potencial Mínimos Cuadrados		Ajuste Lineal Mínimos Cuadrados		Ajuste Lineal Visual	
	No. Experimento	$Q_{Real\ observado}$ ($m^3 s^{-1}$)	$Q_{Real\ calculado}$ ($m^3 s^{-1}$)	Error relativo (%)	$Q_{Real\ calculado}$ ($m^3 s^{-1}$)	Error relativo (%)	$Q_{Real\ calculado}$ ($m^3 s^{-1}$)	Error relativo (%)	$Q_{Real\ calculado}$ ($m^3 s^{-1}$)	Error relativo (%)
Tubo de Pitot	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
Tubo de Venturi	1									
	2									
	3									
	4									
	5									

Actividades:

- a. Explicar la importancia y aplicación en ingeniería hidráulica y mecánica de fluidos que tiene la calibración de instrumentos de aforo de caudal para conductos a presión.
- b. Indicar qué otros instrumentos de aforo de caudal, para conductos a presión, pueden calibrarse con los procedimientos de calibración aquí estudiados. Explique con detalle su respuesta.
- c. Presentar gráficamente cada uno de los ajustes realizados para obtener los parámetros de calibración. Incluir en cada gráfico la ecuación que permita determinar $Q_{Real\ calculado}$ para cada uno de los experimentos, así como el coeficiente de determinación que le corresponde. Comparar, discutir y concluir.
- d. Determinar el error relativo porcentual en cada uno de los experimentos realizados. Resumir los resultados en forma tabular. Comparar, discutir y concluir.
- e. Graficar $Q_{Real\ observado}$ contra $Q_{Real\ calculado}$ para cada instrumento de aforo. Comparar y discutir.
- f. Graficar, en una misma figura, el error relativo porcentual contra $Q_{Real\ calculado}$ para cada instrumento de aforo. Comparar y discutir.
- g. Identificar el instrumento de aforo que presenta el menor error relativo porcentual en la determinación del caudal. Explicar este hallazgo.



Experiencia No. 5

Aplicación del análisis dimensional al flujo permanente en tuberías

(Método: análisis dimensional de unidades)

Objetivo:

Determinar la forma de la ecuación de gobierno para el coeficiente de pérdida de carga por fricción en tuberías rectas de sección transversal cilíndrica con flujo permanente mediante el método de análisis dimensional de unidades.

Fundamento:

En tuberías rectas de sección transversal cilíndrica con flujo permanente, existe una relación funcional entre el diámetro y rugosidad de la pared de la tubería, la densidad y viscosidad del fluido, el gradiente de presión por unidad de longitud de tubería y la velocidad media de flujo que puede reducirse, mediante análisis dimensional de unidades, a una nueva relación funcional que representa al fenómeno físico con igual fidelidad que la función original, pero depende de un menor número de parámetros. La forma de la ecuación de gobierno para el coeficiente de pérdida de carga por fricción en tales tuberías se obtiene fácilmente cuando se reconoce que uno de los parámetros adimensionales de los que depende la nueva relación funcional es el número de Reynolds y otro, precisamente, el coeficiente de pérdida de carga por fricción, cuya forma se requiere conocer. La determinación experimental de estos parámetros adimensionales mediante

el registro de medidas apareadas de diferencia de presión y caudal, permite conocer la forma de la ecuación de gobierno para el coeficiente de pérdida de carga por fricción, a partir de su gráfica bivariada.

En el banco de tuberías se hace uso de este principio. En él las diferencias de presión asociadas con caudales específicos determinados mediante instrumentos de aforo se cuantifican con la ayuda de un manómetro diferencial conectado a los extremos de un tramo de tubo horizontal de longitud conocida. Puesto que el fluido que circula tiene propiedades conocidas –densidad, viscosidad– y las características del tubo que conduce al fluido son también conocidas –diámetro interno, rugosidad, longitud– es posible determinar experimentalmente la forma de la ecuación de gobierno para el coeficiente de pérdida de carga por fricción, a partir de los parámetros adimensionales.

Precisando, en tuberías rectas de sección cilíndrica por las que circula fluido en estado permanente como consecuencia de una diferencia de presión, Δp , se ha encontrado que existe una relación funcional entre el diámetro de la tubería, D , su rugosidad, ε , la densidad del fluido, ρ , y su viscosidad, μ , la velocidad media de flujo, v , y la diferencia de presión por unidad de longitud, $\Delta p' = \frac{\Delta p}{L}$

$$F = \left(\frac{\Delta p}{L}, D, \varepsilon, \rho, \mu, v \right) = 0$$

La forma de la ecuación de gobierno para el coeficiente de pérdida de carga por fricción en tuberías –coeficiente de fricción de Darcy Weisbach– se obtiene, en forma útil y elegante, a partir de la función F aplicando análisis dimensional de unidades.

De conformidad con el Teorema π de Buckingham, para este caso se tienen $n= 6$ variables físicas y $k= 3$ dimensiones fundamentales – M , L , T –, por lo que el máximo número de grupos adimensionales requeridos para describir a la función F es igual a $m= n - k= 3$.

Expresando el total de los parámetros y variables físicas involucrados en la función anterior en términos de las dimensiones fundamentales se tiene

$$[\Delta p'] = \left[\frac{\Delta p}{L} \right] = [ML^{-2}T^{-2}]$$

$$[D] = [M^0LT^0]$$

$$[\epsilon] = [M^0LT^0]$$

$$[\rho] = [ML^{-3}T^0]$$

$$[\mu] = [ML^{-1}T^{-1}]$$

$$[v] = [M^0LT^{-1}]$$

de donde es posible seleccionar a las variables físicas ρ , V y D como las $k=3$ variables de escalamiento por tener la mayor generalidad posible, contener en conjunto las k dimensiones y ninguna combinación de ellas ser adimensional; en consecuencia los $m=3$ grupos adimensionales formados con las $m=3$ variables restantes $-\mu$, ϵ , y $\Delta p'$ toman la forma

$$\pi_1 = \rho^{x_1} v^{y_1} D^{z_1} \mu$$

$$\pi_2 = \rho^{x_2} v^{y_2} D^{z_2} \Delta p'$$

$$\pi_3 = \rho^{x_3} v^{y_3} D^{z_3} \epsilon$$

Con apego al Teorema π de Buckingham la determinación algebraica de las potencias asociadas con las variables físicas que hacen adimensional al grupo π_1 , mediante la condición de que la suma de las potencias de cada dimensión sea igual a cero, conduce a

$$[\pi_1] = [ML^{-3}T^0]^{x_1} [M^0LT^{-1}]^{y_1} [M^0LT^0]^{z_1} [ML^{-1}T^{-1}]$$

$$M: 0 = x_1 + 1$$

$$L: 0 = -3x_1 + y_1 + z_1 - 1$$

$$T: 0 = -y_1 - 1$$

donde la solución del sistema de ecuaciones es $(x_1, y_1, z_1) = (-1, -1, -1)$; por tanto, el parámetro adimensional π_1 toma la forma

$$\pi_1 = \frac{\mu}{\rho v D} = \frac{1}{Re}$$

donde Re es el número adimensional conocido con el nombre de número de Reynolds.

En forma análoga, para el grupo π_2 se tiene

$$[\pi_2] = [ML^{-3}T^0]^{x_2}[M^0LT^{-1}]^{y_2}[M^0LT^0]^{z_2}[ML^{-2}T^{-2}]$$

$$M: 0 = x_2 + 1$$

$$L: 0 = -3x_2 + y_2 + z_2 - 2$$

$$T: 0 = -y_2 - 2$$

por lo que, en este caso, las potencias de las variables físicas son $(x_2, y_2, z_2) = (-1, -2, 1)$; en consecuencia, el parámetro adimensional π_2 toma la forma

$$\pi_2 = \frac{\Delta p' D}{\rho v^2}$$

En la misma forma, para el grupo π_3 se tiene

$$[\pi_3] = [ML^{-3}T^0]^{x_3}[M^0LT^{-1}]^{y_3}[M^0LT^0]^{z_3}[M^0LT^0]$$

$$M: 0 = x_3$$

$$L: 0 = -3x_3 + y_3 + z_3 + 1$$

$$T: 0 = -y_3$$

de donde se desprende que, en este caso, las potencias de las variables físicas son $(x_3, y_3, z_3) = (0, 0, -1)$; entonces, el parámetro adimensional π_3 toma la forma

$$\pi_3 = \frac{\epsilon}{D} = e_r$$

donde e_r es el número adimensional conocido con el nombre de coeficiente de rugosidad relativa.

En consecuencia, la nueva relación funcional, Φ , que representa al fenómeno de manera equivalente a la función original F es

$$\Phi = \left(\frac{1}{Re}, \frac{\Delta p' D}{\rho v^2}, e_r \right) = 0$$

o bien

$$\frac{\Delta p' D}{\rho v^2} = \left(\frac{1}{Re}, e_r \right)$$

y en forma más útil

$$\frac{\Delta p' D}{\rho v^2} = (Re, e_r)$$

A partir de estos hallazgos la forma de la ecuación de gobierno para el coeficiente de pérdida de carga por fricción en tuberías –coeficiente de fricción de Darcy–Weisbach–, f , se determina fácilmente si se reconoce que

$$\pi_2 = \frac{\Delta p' D}{\rho v^2} = \frac{f}{2}$$

por lo que

$$2 \frac{\Delta p' D}{\rho v^2} = \frac{\pi_2}{f} = 2(Re, e_r)$$

lo que indica que el graficado de $2 \frac{\Delta p' D}{\rho v^2}$ contra Re , manteniendo e_r constante generará una curva con la forma de la ecuación de gobierno que corresponde al coeficiente citado; la repetición del procedimiento de graficado para diferentes valores de e_r proporcionará una visión más completa del comportamiento.

Al trabajar con fluidos de propiedades conocidas – ρ , μ –, y tuberías de características también conocidas – L , D , ε –, la curva anterior se genera fácilmente obteniendo medidas experimentales apareadas de velocidad media del flujo y diferencia de presión, donde la velocidad media del flujo se estima a partir del caudal

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

Equipo y material:

- Banco de tuberías –con accesorios: mangueras de unión, válvulas, dispositivos de aforo, etc.–
- Flexómetro –graduación mínima mm–
- Manguera plástica de 3 m –con acople roscado a válvula de globo–
- Paño de tela suave
- Toallas de papel

Procedimiento:

A. Preparación del banco de tuberías

1. Poner el banco de tuberías sobre una superficie plana. Asegurarlo para evitar su desplazamiento fijando los frenos ubicados en los extremos inferiores frontales de su base móvil.
2. Llenar el depósito de agua (17).
3. Conectar el cable de alimentación eléctrica a la toma de corriente eléctrica. Energizar el equipo girando su interruptor principal (3) en sentido horario.
4. Eliminar la posible suciedad que impida o dificulte el cierre automático de las tubuladuras. Verificar el buen funcionamiento de su sistema de cierre.

B. Verificación de ausencia de fugas

5. Conectar los tubos flexibles de admisión (13) y retorno (1) al primer tramo de tubo de medición (16) –tubo de acero galvanizado $\frac{1}{2}$ ”–.
6. Abrir al máximo la válvula de retorno (7) y asegurar que la válvula reguladora de entrada (12) se encuentre completamente cerrada.
7. Poner en funcionamiento la bomba (14) activando su interruptor (4).
8. Abrir lentamente la válvula reguladora de entrada (12) y purgar de aire el tramo de tubo de medición (16). Continuar hasta alcanzar su máxima apertura.
9. Aumentar la presión en el tramo de tubo de medición (16) cerrando lentamente la válvula de retorno (7), hasta alcanzar su cierre total.
10. Verificar la ausencia de fugas en tuberías, mangueras y empalmes.
11. Cerrar completamente la válvula reguladora de entrada (12).
12. Apagar la bomba (14) desactivando su interruptor (4).
13. Repetir los pasos 5 a 12 para el segundo y tercer tramo de tubo de medición (16) –tubo de cobre, 18 x 1 y tubo de PVC, 20 x 1.5–.

C. Conexión y puesta en marcha del manómetro de tubo doble

14. Asegurar que los tubos flexibles de admisión (13) y retorno (1) se encuentren conectados al primer tramo de tubo de medición (16) –tubo de acero galvanizado $\frac{1}{2}$ ”–. Registrar su diámetro, D.

15. Conectar mangueras de unión a las tubuladuras ubicadas en los extremos del tramo de tubo de medición (16). Registrar la distancia entre las tubuladuras, *L*.
16. Acoplar el extremo libre de las mangueras con las conexiones del manómetro de tubo doble (9). Asegurar que la manguera con mayor presión se acople a la tubuladura izquierda y la de menor presión a la tubuladura derecha.
17. Cerrar al máximo la válvula de purga de aire del manómetro de tubo doble (9) ubicada en su parte superior, girándola cuidadosamente en sentido antihorario.
18. Abrir al máximo la válvula de retorno (7) y las válvulas de desagüe inferiores girándolas cuidadosamente en sentido horario.
19. Poner en funcionamiento la bomba (14) activando su interruptor (4).
20. Abrir lentamente la válvula reguladora de entrada (12). Un fuerte chorro de agua atravesará el tramo de tubo de medición (16). Permitir que el agua fluya hasta que dejen de aparecer burbujas de aire en las mangueras que unen al primer tramo de tubo de medición (16) –tubo de acero galvanizado– con las tubuladuras del manómetro de tubo doble (9).
21. Cerrar las válvulas de desagüe inferiores lentamente y al mismo tiempo girándolas en sentido anti horario. Asegurar que las columnas de agua en los tubos de nivel asciendan de forma uniforme y que no se produzcan derrames de un tubo de nivel a otro.

D. Ajuste del punto cero

22. Cerrar al máximo la válvula de retorno (7). Cuando esto ocurra la altura de la columna de agua en ambos tubos de nivel del manómetro será la misma.
23. Abrir ligeramente la válvula de purga de aire y permitir un lento ascenso de la columna de agua en ambos tubos de nivel. Cerrar la válvula de purga de aire cuando la columna de agua alcance en ambos tubos el centro de la escala del manómetro.

Nota: La válvula de purga de aire sólo regula el nivel del fluido hacia la parte superior de los tubos del manómetro, por lo que si el nivel llega a ser excesivo deberá vaciarse la red de tubos y realizarse una nueva purga de aire.

24. Abrir al máximo la válvula de retorno (7).

E. Medida de la presión diferencial

25. Cerrar la válvula reguladora de entrada (12) hasta alcanzar en el rotámetro (10) un caudal igual a $1.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, manteniendo la válvula de retorno (7) totalmente abierta. Registrar la magnitud del caudal, Q .
26. Registrar la altura del agua, h , en cada una de las columnas de nivel del manómetro de tubo doble (9). En caso de observarse una indicación fluctuante registrar el valor medio.

Nota: Al experimentar con grandes caudales la presión diferencial puede aumentar hasta tal punto que el agua rebose por la tubería de conexión superior al tubo de medida con la menor presión. En ese caso tendrá que ajustarse nuevamente el punto cero.

27. Registrar la temperatura, T , a la que se realiza la medida.
28. Repetir los pasos 25 a 27 para los caudales siguientes: 1.3, 1.1, 0.9 y $0.7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

F. Despresurización del banco de tuberías

29. Cerrar completamente la válvula de retorno (7).
30. Apagar la bomba (14) desactivando su interruptor (4).
31. Despresurizar y vaciar el equipo abriendo completamente la válvula reguladora de entrada (12) así como la válvula de purga de aire y las válvulas de desagüe del manómetro de tubo doble (9).
32. Repetir los pasos 14 a 31 para tramos de tubo de medición (16) de cobre, 18×1 y PVC, 20×1.5 .
33. Abrir completamente la válvula de retorno (7).

G. Cálculos

34. Calcular la velocidad media de flujo

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

35. Calcular el número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

36. Calcular el diferencial de presión entre los puntos de medida

$$\Delta p = \rho g (h_1 - h_2)$$

37. Calcular el diferencial de presión por unidad de longitud

$$\Delta p' = \frac{\Delta p}{L}$$

38. Calcular el segundo parámetro adimensional

$$\pi_2 = \frac{\Delta p' D}{\rho v^2}$$

39. Calcular la rugosidad relativa

$$e_r = \frac{\epsilon}{D}$$

donde:

- A Área de la sección transversal del tramo de tubo de medición, m^2 .
- D Diámetro interno del tramo de tubo de medición, m .
- v Velocidad media de flujo, $m\ s^{-1}$.
- Q Caudal medio de flujo, $m^3\ s^{-1}$.
- g Aceleración local de la gravedad, $m\ s^{-2}$.
- ρ Densidad del fluido a la temperatura T , $kg\ m^{-3}$.
- μ Viscosidad dinámica del fluido a la temperatura T , $kg\ m^{-1}\ s^{-1}$.
- Re Número de Reynolds, adimensional.
- h_1 Altura del nivel del agua en el tubo manométrico conectado a la primera tubuladura del tramo de tubo de medición, m .
- h_2 Altura del nivel del agua en el tubo manométrico conectado a la segunda tubuladura del tramo de tubo de medición, m .
- Δp Diferencia de presión entre los puntos de medida en el tramo de tubo de medición, Pa .
- $\Delta p'$ Diferencia de presión por unidad de longitud en el tramo de tubo de medición, $Pa\ m^{-1}$.
- L Distancia entre tubuladuras del tramo de tubo de medición, m .
- π_2 Segundo parámetro derivado de análisis dimensional de unidades, adimensional.
- e_r Coeficiente de rugosidad relativa del tramo de tubo de medición, adimensional.
- ϵ Rugosidad del tramo de tubo de medición, m .

40. Presentar los cálculos en forma detallada. Resumir de manera tabular en la siguiente forma:

Tubo	No. Experimento	Q (m ³ s ⁻¹)	v (m s ⁻¹)	$\frac{\rho v D}{\mu} = Re$	h ₁ (m)	h ₂ (m)	Δp (Pa)	Δp' (Pa m ⁻¹)	$\frac{\Delta p' D}{\rho v^2} = \pi_2$	$2 \frac{\Delta p' D}{\rho v^2} = f$	$\frac{\epsilon}{D} = e_r$
Acero galvanizado ½"	1										
	2										
	3										
	4										
	5										
Cobre 18 x 1	1										
	2										
	3										
	4										
	5										
PVC 20 x 1.5	1										
	2										
	3										
	4										
	5										

Actividades:

- Explicar la importancia y aplicación en ingeniería hidráulica y mecánica de fluidos del análisis dimensional de unidades.
- Graficar $f = 2 \frac{\Delta p' D}{\rho v^2}$ contra $Re = \frac{\rho v D}{\mu}$, manteniendo $\frac{\epsilon}{D} = e_r$ constante. Repetir el procedimiento de graficado para diferentes valores de e_r . Contrastar la figura obtenida con el diagrama de Moody. Analizar, discutir y concluir.
- Proponer una ecuación que permita predecir el coeficiente de fricción de Darcy–Weisbach con base en los resultados experimentales y el uso de técnicas estadísticas. Establecer el error de la predicción. Analizar, discutir y concluir.



Experiencia No. 6

Determinación de pérdidas de carga por fricción y sus coeficientes asociados en tuberías

(Método: caída de presión)

Objetivo:

Determinar pérdidas de carga por fricción y sus principales coeficientes asociados en tuberías cilíndricas totalmente llenas mediante el método de registro de caída de presión.

Fundamento:

Al circular un fluido a través de una tubería ocurre pérdida de energía como consecuencia de la fricción que se presenta entre el fluido en movimiento y la tubería. Esta pérdida de energía se manifiesta como una disminución de la presión del fluido, denominada caída de presión.

En el banco de tuberías se hace uso de este principio. En él la caída de presión se cuantifica con la ayuda de un manómetro diferencial conectado en los extremos de un tramo de tubo horizontal de longitud conocida. Puesto que el fluido que circula tiene propiedades conocidas –densidad, peso específico– es posible transformar, mediante un balance de energía, la caída de presión en pérdida de carga de magnitud también conocida y,

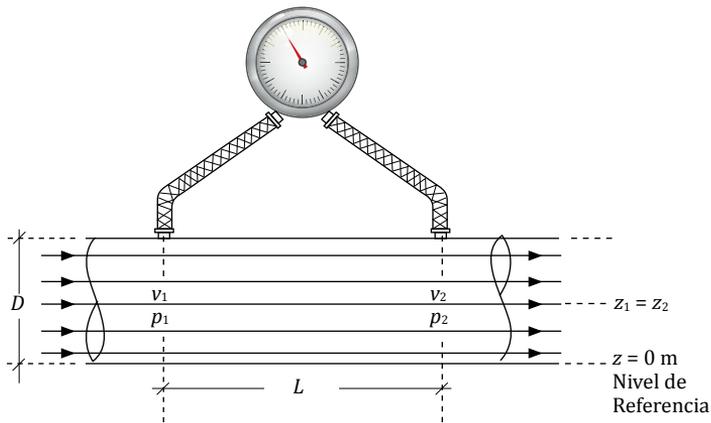
con base en ella, determinar los coeficientes de fricción y rugosidad que corresponden a la tubería.

Precisando, un balance de energía entre los puntos en que el manómetro diferencial se conecta a la tubería (Figura 6) conduce a

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_L$$

donde h_L es la pérdida de carga hidráulica por fricción; γ es el peso específico del fluido; g es la aceleración local de la gravedad; v_1 , z_1 , p_1 y v_2 , z_2 , p_2 son la velocidad, elevación y presión medidas en el primero y segundo punto en que el manómetro diferencial se conecta a la tubería, respectivamente.

Figura 6. Balance de energía entre dos puntos de interés en una tubería horizontal.



Puesto que los puntos en que la presión se mide se encuentran al mismo nivel y el cambio en la velocidad media del flujo entre ellos es despreciable, el balance de energía se simplifica y la pérdida de carga se expresa como

$$h_L = \frac{p_1 - p_2}{\gamma}$$

$$h_L = \frac{\Delta p}{\rho g}$$

donde Δp es la diferencia de presión registrada por el manómetro diferencial y ρ es la densidad del fluido a la temperatura T .

Entre las ecuaciones empíricas más comunes que relacionan la pérdida de carga, h_L , con la velocidad media del flujo se encuentran la ecuación de Darcy-Weisbach

$$h_L = f \frac{L v^2}{D 2g}$$

h_L Pérdida de carga hidráulica por fricción, m
 f Coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach, adimensional
 L Longitud de la tubería, m
 D Diámetro interno de la tubería, m
 v Velocidad media de flujo, m s⁻¹
 g Aceleración local de la gravedad, m s⁻²

y la ecuación de Hazen-Williams

$$h_L = L \left[\frac{Q}{0.85 A C_h R^{0.63}} \right]^{1.852}$$

h_L Pérdida de carga hidráulica por fricción, m
 L Longitud de la tubería, m
 Q Caudal medio, m³ s⁻¹
 A Área de la sección transversal de la tubería, m²
 R Radio hidráulico de la tubería, m
 C_h Coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams, adimensional

Los coeficientes de fricción y rugosidad que corresponden a estas ecuaciones se determinan con facilidad en tuberías con características conocidas –longitud, L , diámetro interno, D – si la pérdida de carga que ellas involucran se suministra a partir de medidas experimentales basadas en la ecuación simplificada de balance de energía presentada anteriormente. Así

$$f = \frac{D 2g h_L}{L v^2}$$

$$C_h = \frac{L Q}{0.85 A R^{0.63} h_L^{0.54}}$$

donde la velocidad media de flujo, v , se determina con base en la ecuación de continuidad a partir del caudal experimental correspondiente, Q

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

Equipo y material:

- Banco de tuberías –con accesorios: mangueras de unión, válvulas, dispositivos de aforo, etc.–
- Flexómetro –graduación mínima mm–
- Paño de tela suave
- Toallas de papel

Procedimiento:

A. Preparación del banco de tuberías

1. Poner el banco de tuberías sobre una superficie plana. Asegurarlo para evitar su desplazamiento fijando los frenos ubicados en los extremos inferiores frontales de su base móvil.
2. Llenar el depósito de agua (17).
3. Conectar el cable de alimentación eléctrica a la toma de corriente eléctrica. Energizar el equipo girando su interruptor principal (3) en sentido horario.
4. Eliminar la posible suciedad que impida o dificulte el cierre automático de las tubuladuras. Verificar el buen funcionamiento de su sistema de cierre.

B. Verificación de ausencia de fugas

5. Conectar los tubos flexibles de admisión (13) y retorno (1) al primer tramo de tubo de medición (16) –tubo de acero galvanizado ½”–.
6. Abrir al máximo la válvula de retorno (7) y asegurar que la válvula reguladora de entrada (12) se encuentre completamente cerrada.
7. Poner en funcionamiento la bomba (14) activando su interruptor (4).
8. Abrir lentamente la válvula reguladora de entrada (12) y purgar de aire el tramo de tubo de medición (16). Continuar hasta alcanzar su máxima apertura.

9. Aumentar la presión en el tramo de tubo de medición (16) cerrando lentamente la válvula de retorno (7), hasta alcanzar su cierre total.
10. Verificar la ausencia de fugas en tuberías, mangueras y empalmes.
11. Cerrar completamente la válvula reguladora de entrada (12).
12. Apagar la bomba (14) desactivando su interruptor (4).
13. Repetir los pasos 5 a 12 para los tramos de tubo de medición (16) de cobre, 18 x 1 y PVC, 20 x 1.5.

C. Conexión y puesta en marcha del manómetro diferencial digital

14. Conectar los tubos flexibles de admisión (13) y retorno (1) al primer tramo de tubo de medición (16) –tubo de acero galvanizado, $\frac{1}{2}$ "–. Registrar su diámetro, *D*.
15. Abrir al máximo las válvulas de purga de aire del manómetro diferencial digital (6) ubicadas sobre las conexiones de unión a las tubuladuras del tramo de tubo de medición (16).
16. Conectar mangueras de unión a las tubuladuras ubicadas en los extremos del tramo de tubo de medición (16). Acoplar el extremo libre de las mangueras con las conexiones del manómetro diferencial digital (6). Para evitar daños al mismo asegurar que no se exceda una lectura superior a 200 mbar, y que en la conexión marcada como P1 (+) se conecta la manguera con la presión más alta y en la conexión P2 (-) la manguera con la presión más baja.
17. Abrir al máximo la válvula reguladora de entrada (12) y la válvula de retorno (7).
18. Poner en funcionamiento la bomba (14) activando su interruptor (4).
19. Presurizar el equipo cerrando ligeramente la válvula de retorno (7). Un fuerte chorro de agua atravesará el tramo de tubo de medición (16). Permitir que el agua fluya hasta que dejen de aparecer burbujas de aire en las mangueras que unen el tramo de tubo de medición (16) con las conexiones del manómetro diferencial digital (6).
20. Cerrar las válvulas de purga de aire girándolas en sentido anti horario.

D. Medida de la presión diferencial

21. Cerrar la válvula reguladora de entrada (12) hasta alcanzar en el rotámetro (10) un caudal igual a $1.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, manteniendo la válvula de retorno (7) totalmente abierta. Registrar la magnitud del caudal, *Q*.

22. Registrar la presión diferencial, Δp , mostrada por el indicador digital de presión (5) correspondiente al manómetro diferencial digital (6). En caso de observarse una indicación fluctuante registrar el valor medio.
23. Repetir los pasos 21 y 22 para los caudales siguientes: 1.3, 1.1, 0.9 y $0.7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.
24. Registrar la temperatura, T , a la que se realiza la medida.

E. Despresurización del banco de tuberías

25. Cerrar completamente la válvula de retorno (7).
26. Apagar la bomba (14) desactivando su interruptor (4).
27. Abrir completamente la válvula reguladora de entrada (12) así como las válvulas de purga de aire del manómetro diferencial digital (6), para despresurizar y vaciar el equipo.
28. Repetir los pasos 14 a 27 para tramos de tubo de medición (16) de cobre, 18×1 y PVC, 20×1.5 .
29. Abrir completamente la válvula de retorno (7).

F. Cálculos

30. Calcular la pérdida de carga hidráulica

$$h_L = \frac{\Delta p}{\rho g}$$

31. Calcular la velocidad media de flujo

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

32. Calcular el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach

$$f = \frac{D 2g h_L}{L v^2}$$

33. Calcular el coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams

$$C_h = \frac{LQ}{0.85AR^{0.63}h_L^{0.54}}$$

donde:

- h_L Pérdida de carga hidráulica por fricción, m.
- Δp Diferencia de presión entre los extremos del tramo de tubo de medición, Pa, $[N\ m^{-2}]$.
- ρ Densidad del fluido a la temperatura T , $kg\ m^{-3}$.
- g Aceleración local de la gravedad, $m\ s^{-2}$.
- f Coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach, adimensional.
- D Diámetro interno de la tubería, m.
- L Longitud de la tubería, m.
- v Velocidad media de flujo, $m\ s^{-1}$.
- C_h Coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams, adimensional.
- Q Caudal medio, $m^3\ s^{-1}$.
- A Área de la sección transversal de la tubería, m^2 .
- R Radio hidráulico de la tubería, m.

34. Presentar los cálculos en forma detallada. Resumir de manera tabular en la forma siguiente:

Tubo	No. Experimento	Q ($m^3\ s^{-1}$)	D (m)	v ($m\ s^{-1}$)	Δp (Pa)	h_L (m)	Re	$f_{experimental}$	$f_{teórica}$	Error relativo (%)	$C_{h\ experimental}$	$C_{h\ teórica}$	Error relativo (%)
PVC 20 x 1.5	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
Cobre 18 x 1	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
Acero galvanizado $\frac{1}{2}''$	1												
	2												
	3												
	4												
	5												

Actividades:

- a. Explicar la importancia y aplicación en ingeniería del concepto pérdida de carga y de los coeficientes de fricción de Darcy Weisbach y rugosidad de Hazen-Williams.
- b. Calcular el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach para cada uno de los experimentos en que el régimen de flujo sea turbulento $-Re > 4000-$ con la ecuación de Swamee-Jain. Determinar el error relativo entre resultados experimentales y valores calculados. Resumir de manera tabular. Comparar y discutir.
- c. Calcular el coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams para cada uno de los experimentos con una expresión que lo relacione tanto con el número de Reynolds como con el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach. Determinar el error relativo entre resultados experimentales y valores calculados. Resumir de manera tabular. Comparar y discutir.
- d. Graficar la pérdida de carga contra el caudal para cada uno los experimentos y mostrar el comportamiento en cada tipo de tubería. Identificar tendencias de comportamiento. Interpretar su significado. Comparar y discutir.
- e. Graficar los resultados experimentales como se indica a continuación: 1) Coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach *versus* número de Reynolds para cada tipo de tubería; 2) Coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams *versus* número de Reynolds para cada tipo de tubería. Identificar tendencias de comportamiento. Interpretar su significado. Comparar y discutir.
- f. Graficar coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach *versus* coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams para cada tipo de tubería. Identificar tendencias de comportamiento. Interpretar su significado. Comparar y discutir.



Experiencia No. 7

Determinación de pérdidas de carga por accesorios y sus coeficientes asociados en tuberías

(Método: caída de presión)

Objetivo:

Determinar pérdidas de carga por accesorios y sus coeficientes asociados en tuberías cilíndricas totalmente llenas mediante el método de registro de caída de presión.

Fundamento:

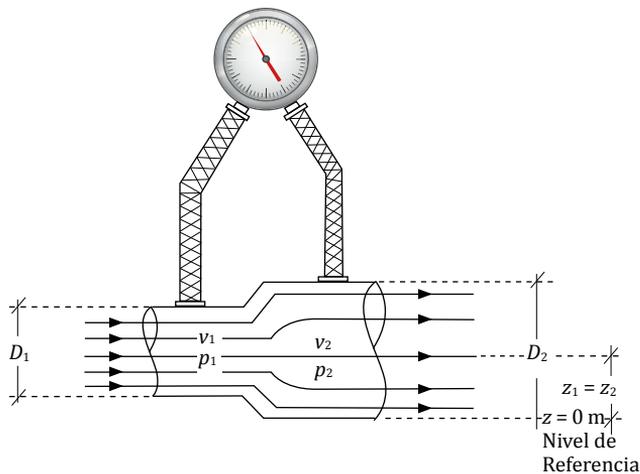
Al circular un fluido a través de una tubería que contiene accesorios –válvulas, codos, dilataciones, contracciones, entradas y salidas, entre otros– ocurren pérdidas de energía adicionales a las ocasionadas por la fricción. Ellas son consecuencia del cambio en la magnitud o la dirección de los vectores de velocidad del flujo causado por estos elementos. Al igual que la pérdida de energía por fricción, la pérdida de energía por accesorios se manifiesta como una disminución de la presión del fluido, denominada caída de presión. La presencia simultánea de ambas pérdidas de energía conduce simplemente a una caída de presión total.

En el banco de tuberías se hace uso de este principio. En él la caída de presión total se cuantifica con la ayuda de un manómetro diferencial conectado en los extremos de un tramo de tubo horizontal de longitud conocida al que se acopla el accesorio de interés. Puesto que el fluido que circula tiene propiedades conocidas –densidad, peso específico– es posible transformar la caída de presión total en una pérdida de carga hidráulica de magnitud también conocida y, con base en ella, determinar los coeficientes de pérdida por accesorios que corresponden a la tubería. Precisando, para el caso de accesorios con cambio de sección transversal (e. g. contracción brusca, dilatación brusca) un balance de energía entre los puntos en que el manómetro diferencial se conecta a la tubería (Figura 7) conduce a

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_L + h_{La}$$

donde h_L y h_{La} son la pérdida de carga hidráulica por fricción y pérdida de carga hidráulica por accesorios; g es la aceleración local de la gravedad; γ es el peso específico del fluido; v_1 , z_1 , p_1 y v_2 , z_2 , p_2 son, respectivamente, la velocidad, elevación y presión medidas en el primero y segundo punto en que el manómetro diferencial se conecta a la tubería.

Figura 7. Balance de energía entre dos puntos de interés en una tubería horizontal con accesorio acoplado.



Puesto que los puntos en que la presión se mide se encuentran al mismo nivel, y considerando que es posible expresar la pérdida de carga hidráulica por fricción en términos de la ecuación de Darcy Weisbach –longitud, diámetro y coeficiente de fricción de la tubería–, la pérdida de carga hidráulica total toma la forma

$$\underbrace{\frac{p_1 - p_2}{\rho g}}_{h_{L_{total}}} = -\frac{v_1^2}{2g} + \frac{v_2^2}{2g} + \underbrace{f_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{v_1^2}{2g} + f_2 \frac{L_2}{D_2} \frac{v_2^2}{2g}}_{h_{La}} + K \frac{v_2^2}{2g}$$

siendo $h_{L_{total}}$ la pérdida de carga hidráulica total; ρ la densidad del fluido a la temperatura T ; K el coeficiente de pérdida de carga hidráulica por accesorios; L_1, D_1, f_1 y L_2, D_2, f_2 la longitud, diámetro y coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach medidos en el primero y segundo punto en que el manómetro diferencial se conecta a la tubería, respectivamente.

Considerando velocidades medias de flujo la ecuación anterior puede expresarse en términos del diámetro de la tubería, a partir de la ecuación de continuidad

$$\begin{aligned} v_1 A_1 &= v_2 A_2 \\ v_1 \frac{\pi D_1^2}{4} &= v_2 \frac{\pi D_2^2}{4} \\ v_1 D_1^2 &= v_2 D_2^2 \\ v_1 &= v_2 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \\ v_1^2 &= v_2^2 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4 \\ \frac{v_1^2}{2g} &= \frac{v_2^2}{2g} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4 \end{aligned}$$

y sustituyendo en la ecuación de pérdida de carga hidráulica total

$$h_{L_{total}} = \frac{v_2^2}{2g} \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4 + f_1 \frac{L_1}{D_1} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4 + f_2 \frac{L_2}{D_2} + K \right]$$

Los coeficientes de pérdida por accesorios, K , se determinan con facilidad en tuberías con características conocidas –longitud, L , diámetro interno,

D , coeficiente de fricción, f – si la pérdida de carga hidráulica total se suministra a partir de medidas experimentales

$$\frac{2gh_{Ltotal}}{v_2^2} = 1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4 + f_1 \frac{L_1}{D_1} \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4 + f_2 \frac{L_2}{D_2} + K$$

$$K = \frac{2gh_{Ltotal}}{v_2^2} - \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4\right] - \left[f_1 \frac{L_1}{D_1} \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4 + f_2 \frac{L_2}{D_2}\right]$$

donde la velocidad media de flujo después del cambio de sección transversal de la tubería, v^2 , se estima a partir del caudal experimental correspondiente, Q ,

$$v_2 = \frac{4Q}{\pi D_2^2}$$

y los coeficientes de pérdida de carga hidráulica por fricción, f , a partir de cualquiera de las múltiples expresiones empíricas disponibles en la literatura –Colebrook-White, Swamee-Jain, Blasius, Barr, Haaland, Moddy, entre otras–.

Cuando el accesorio acoplado a la tubería no presenta cambio de sección transversal ($D_2/D_1 = 1$; $v_1 = v_2 = v$) (e. g. codos, válvulas, colectores de fango) la ecuación anterior se simplifica

$$K = \frac{2gh_{Ltotal}}{v^2} - f \frac{L}{D}$$

En casos en los que las tubuladuras para medida de la presión diferencial se ubiquen justo antes y después del accesorio ($L \cong 0$) el coeficiente de pérdida que le corresponde puede aproximarse entonces como

$$K = \frac{2gh_{Ltotal}}{v^2}$$

donde

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

siendo v y D la velocidad media de flujo y el diámetro interior de la tubería.

Equipo y material:

- Banco de tuberías –con accesorios: mangueras de unión, válvulas, dispositivos de aforo, etc.–
- Flexómetro –graduación mínima mm–
- Paño de tela suave
- Toallas de papel

Procedimiento:

A. Preparación del banco de tuberías

1. Poner el banco de tuberías sobre una superficie plana. Asegurarlo para evitar su desplazamiento fijando los frenos ubicados en los extremos inferiores frontales de su base móvil.
2. Llenar el depósito de agua (17).
3. Conectar el cable de alimentación eléctrica a la toma de corriente eléctrica. Energizar el equipo girando su interruptor principal (3) en sentido horario.
4. Eliminar la posible suciedad que impida o dificulte el cierre automático de las tubuladuras. Verificar el buen funcionamiento de su sistema de cierre.

B. Verificación de ausencia de fugas

5. Conectar los tubos flexibles de admisión (13) y retorno (1) al tramo de tubo de medición con conectores para acople de accesorios (16) –tramo de tubo 7–.
6. Abrir al máximo la válvula de retorno (7) y asegurar que la válvula reguladora de entrada (12) se encuentre completamente cerrada.
7. Poner en funcionamiento la bomba (14) activando su interruptor (4).
8. Abrir lentamente la válvula reguladora de entrada (12) y purgar de aire el tramo de tubo de medición (16). Continuar hasta alcanzar su máxima apertura.

9. Aumentar la presión en el tramo de tubo de medición (16) cerrando lentamente la válvula de retorno (7), hasta alcanzar su cierre total.
10. Verificar la ausencia de fugas en tuberías, mangueras y empalmes.
11. Cerrar completamente la válvula reguladora de entrada (12).
12. Apagar la bomba (14) desactivando su interruptor (4).

C. Conexión y puesta en marcha del manómetro diferencial digital

13. Conectar los tubos flexibles de admisión (13) y retorno (1) al tramo de tubo de medición con conectores para acople de accesorios (16) –tramo de tubo 7–. Registrar su diámetro, D .
14. Acoplar a la tubería el accesorio de interés (18) –válvula de retención de esfera–.
15. Abrir al máximo las válvulas de purga de aire del manómetro diferencial digital (6) ubicadas sobre las conexiones de unión a las tubuladuras del accesorio.
16. Conectar mangueras de unión a las tubuladuras situadas en los extremos del accesorio de interés (18) –válvula de retención de esfera–. Registrar su longitud, L . Acoplar el extremo libre de las mangueras con las conexiones del manómetro diferencial digital (6). Para evitar daños al mismo asegurar que no se exceda una lectura superior a 200 mbar, y que en la conexión marcada como P1 (+) se conecta la manguera con la presión más alta y en la conexión P2 (-) la manguera con la presión más baja.
17. Abrir al máximo la válvula reguladora de entrada (12) y la válvula de retorno (7).
18. Poner en funcionamiento la bomba (14) activando su interruptor (4).
19. Presurizar el equipo cerrando ligeramente la válvula de retorno (7). Un fuerte chorro de agua atravesará el tramo de tubo de medición (16). Permitir que el agua fluya hasta que dejen de aparecer burbujas de aire en las mangueras que unen el accesorio de interés (18) –válvula de retención de esfera– con las conexiones del manómetro diferencial digital (6).
20. Cerrar las válvulas de purga de aire girándolas en sentido anti horario.

D. Medida de la presión diferencial

21. Cerrar la válvula reguladora de entrada (12) hasta alcanzar en el rotámetro (10) un caudal igual a $1.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, manteniendo la válvula de retorno (7) totalmente abierta. Registrar la magnitud del caudal, Q .
22. Registrar la presión diferencial, Δp , mostrada por el indicador digital de presión (5) correspondiente al manómetro diferencial digital (6). En caso de observarse una indicación fluctuante registrar el valor medio.
23. Repetir los pasos 21 y 22 para los caudales siguientes: 1.3, 1.1, 0.9 y $0.7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.
24. Registrar la temperatura, T , a la que se realiza la medición.
25. Cerrar completamente la válvula de retorno (7).
26. Apagar la bomba (14) desactivando su interruptor (4).
27. Abrir completamente la válvula reguladora de entrada (12) así como las válvulas de purga de aire del manómetro diferencial digital (6), para despresurizar y vaciar el equipo.
28. Repetir los pasos 14 a 28 para los siguientes accesorios: válvula de membrana, válvula de asiento inclinado, colector de lodo.
29. Abrir completamente la válvula de retorno (7).

E. Cálculos

30. Calcular la pérdida de carga hidráulica total

$$h_{L_{total}} = \frac{\Delta p}{\rho g}$$

31. Calcular la velocidad media de flujo

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad \begin{array}{l} \text{Accesorios sin cambio en área de sección transversal} \\ \text{(e. g. codos, válvulas, colectores de fango)} \end{array}$$

32. Calcular el coeficiente de pérdida de carga por accesorios que corresponda

$$K = \frac{2gh_{L_{total}}}{v^2} - f \frac{L}{D} \quad \begin{array}{l} \text{Accesorios sin cambio en área} \\ \text{de sección transversal} \\ \text{(e. g. codos, válvulas, colectores de fango)} \end{array}$$

donde:

- $h_{L_{total}}$ Pérdida de carga hidráulica total, m.
 Δp Diferencia de presión entre los extremos del accesorio, Pa, $[\text{N m}^{-2}]$.
 ρ Densidad del fluido a la temperatura T , kg m^{-3} , $[\text{N m}^{-3}]$.
 g Aceleración local de la gravedad, m s^{-2} .
 v Velocidad media de flujo, m s^{-1} .
 v_2 Velocidad media de flujo después del cambio de sección transversal de la tubería, m s^{-1} .
 Q Caudal medio, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.
 D Diámetro interno de la tubería, m.
 L Longitud de la tubería entre tubuladuras de medida de presión diferencial, m.
 f Coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach, adimensional.
 K Coeficiente de pérdida de carga hidráulica por accesorios, adimensional.

33. Presentar los cálculos en forma detallada. Resumir de manera tabular en la siguiente forma:

Accesorio	No. Experimento	Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Δp (Pa)	$h_{L_{total}}$ (m)	v^2 (m s^{-1})	L (m)	D (m)	Re	$K_{experimental}$	$K_{teórica}$	Error relativo (%)
Válvula de retención de esfera	1										
	2										
	3										
	4										
	5										
Válvula de membrana	1										
	2										
	3										
	4										
	5										
Válvula de asiento inclinado	1										
	2										
	3										
	4										
	5										
Colector de lodo	1										
	2										
	3										
	4										
	5										

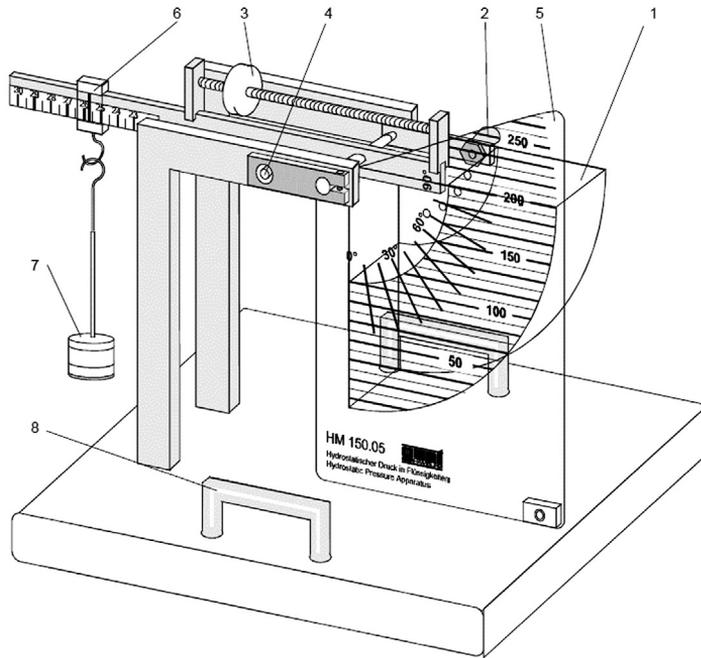
Actividades:

- a. Explicar la importancia y aplicación en ingeniería de la pérdida de carga por accesorios en tuberías y sus coeficientes asociados.
- b. Representar, mediante un dibujo, la estructura interna y externa de cada uno de los siguientes accesorios: a) válvula de membrana, b) válvula de asiento inclinado, c) colector de lodo, d) válvula de retención de esfera.
- c. Ordenar los siguientes accesorios de manera descendente respecto a la pérdida de carga esperada: a) válvula de membrana, b) válvula de asiento inclinado, c) colector de lodo, d) válvula de retención de esfera. Fundamentar la respuesta en la estructura interna de cada uno de los accesorios. Explicar ampliamente.
- d. Calcular el coeficiente de pérdida de carga por accesorios para cada uno de los experimentos realizados y graficarlo contra el número de Reynolds. Comparar, discutir y concluir.
- e. Determinar el error relativo entre resultados experimentales y valores teóricos reportados en la literatura. Resumir de manera tabular. Comparar, discutir y concluir.

Anexo I

Balanza hidrostática

Figura 8. Balanza hidrostática G.U.N.T. (Modelo HM 150.05): Partes principales.



- | | |
|-----------------------|----------------------------|
| 1. Depósito de agua | 5. Escala de nivel de agua |
| 2. Perno de retención | 6. Jinete |
| 3. Peso corredizo | 7. Pesos |
| 4. Perno de tope | 8. Asa |

Fuente: G.U.N.T. Gerätebau GmbH. 1996. Manual de Experimentos, HM 150.05 Presión Hidrostática.

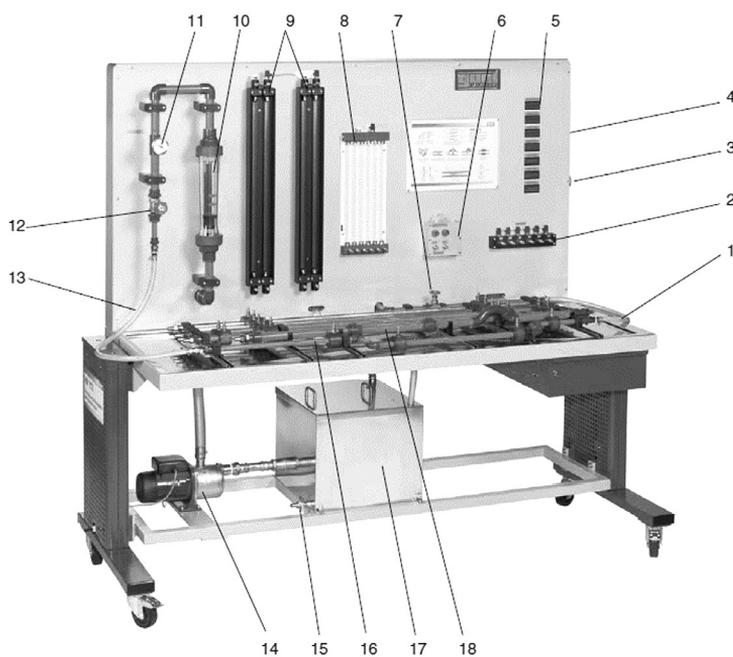
Publicación No. 917.00005A15022. Barsbüttel, Alemania. 18 pp.

Anexo II

Banco de tuberías

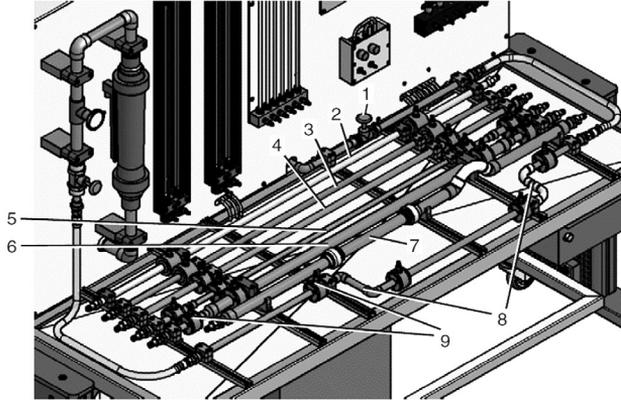
Figura 9. Banco de tuberías G.U.N.T. (Modelo HM 112);

a) Partes principales, b) Descripción de trayectos de tubo.



a

- | | |
|---|---|
| 1. Tubo flexible de retorno | 10. Rotámetro |
| 2. Sensor de presión electrónico | 11. Termómetro |
| 3. Interruptor principal | 12. Válvula reguladora, entrada |
| 4. Interruptor para bomba (enmascarado) | 13. Tubo flexible de amisión |
| 5. Indicaciones digitales de presión | 14. Bomba |
| 6. Sensor de presión diferencial | 15. Grifo de desagüe |
| 7. Válvula de retorno | 16. Diversos trayectos de medición |
| 8. Manómetro de 6 tubos | 17. Depósito de agua |
| 9. Manómetro de tubo doble | 18. Objetos de medición intercambiables |



b

1. Válvula de retorno con ingreso al depósito de reserva
2. Tubo de acero galvanizado, 1/2"
3. Tubo de cobre, 18 x 1
4. Tubo de PVC, 20 x 1.5
5. Estrechamiento de sección de PVC, 20 - 16
6. Ampliación de sección de PVC, 20 - 32
7. Espacio para objetos de medición
8. Arco de tubo, ángulo de tubo de PVC, 20 x 1.5
9. Tubuladura de medición de presión con cierre automático

Fuente: G.U.N.T. Gerätebau GmbH, Barsbüttel. 2016. Manual de Experimentos, HM 112 Banco de Ensayos de Mecánica de Fluidos. Publicación No. 917.000 00 A 112 22 (A). Barsbüttel, Alemania. 74 pp.

Bibliografía

- Batchelor, G. K. (1967). *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Cervantes, L. M., Lagarza, Ch., Esquivel, D. y García, J. (2018). *Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos 1*. México, D. F.: Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Termofluidos. Universidad Nacional Autónoma de México.
- G.U.N.T. Gerätebau GmbH, Barsbüttel. (2016). *Manual de Experimentos, HM 112 Banco de Ensayos de Mecánica de Fluidos*. Publicación No. 917.000 00 A 112 22 (A). Barsbüttel, Alemania: Autor.
- G.U.N.T. Gerätebau GmbH. (1996). *Manual de Experimentos, HM 150.05 Presión Hidrostática*. Publicación No. 917.00005A15022. Barsbüttel, Alemania: Autor.
- Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H. & Huebsch, W. W. (2009). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (6ta. ed.). Hoboken, EE.UU.: John Wiley & Sons, Inc.
- Nakayama, Y. & Boucher, R. F. (2000). *Introduction to Fluid Mechanics*. Oxford, Great Britain: Butterworth-Heinemann.
- Potter, M. C., Wiggert, D. C., Ramadan, B. y Shih, T. (2012). *Mechanics of Fluids* (4ta. Ed.). Stamford, EE.UU.: Cengage Learning.
- Pritchard, P. J. (2011). *Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics* (8va. ed.). Hoboken, EE.UU.: John Wiley & Sons, Inc.
- Sotelo, G. (1997). *Hidráulica General*, Vol. 1. México, D.F.: Limusa, S.A. de C.V.
- White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics* (7ma. ed.). New York, EE.UU.: McGraw-Hill.



**Universidad
Pontificia
Bolivariana**

SU OPINIÓN



Para la Editorial UPB es muy importante ofrecerle un excelente producto.
La información que nos suministre acerca de la calidad de nuestras publicaciones será muy valiosa en el proceso de mejoramiento que realizamos.
Para darnos su opinión, comuníquese a través de la línea (57)(4) 354 4565
o vía correo electrónico a editorial@upb.edu.co
Por favor adjunte datos como el título y la fecha de publicación,
su nombre, correo electrónico y número telefónico.



*El autor dedica
este trabajo a la memoria
de su padre, Dr. Tomás Ramón
Florville Andrade (1938-2006).*

En el aprendizaje y entendimiento de la Mecánica de fluidos son indispensables tres aspectos: teoría, laboratorio y observación cuidadosa de los fenómenos naturales; posteriormente, lo que se continúa aprendiendo en la práctica profesional.

En la etapa universitaria, la combinación de la teoría con una práctica de laboratorio cuidadosa y ordenada es fundamental; más aún, al reconocer que en este campo del conocimiento se estudia un medio continuo bivaluado, donde pequeñas causas pueden producir grandes efectos, o condiciones simétricas pueden corresponder a resultados asimétricos. Además, en muchos casos, el fluido de interés es el agua; un recurso vital que siempre ha presentado al hombre grandes retos, resueltos frecuentemente con apoyo en la experimentación, y que en las circunstancias actuales seguramente serán cada vez más críticos y complejos.

Una gran ventaja que tiene la enseñanza de la Mecánica de fluidos es que usualmente es un tema atractivo y entretenido para los estudiantes. Así, en mi experiencia personal, después de mostrar una serie de modelos de presas funcionando a un grupo de niños de primaria, uno de ellos se me acercó, me jaló de la manga y dijo -Oye, ¿tú en qué trabajas?- a lo que conteste -Yo, aquí, en esto.-; de inmediato él puso una cara de sorpresa, pues apenas le parecía posible que me pagaran por hacer algo tan divertido.

Este completo y cuidadoso texto, donde se presentan siete experiencias que cubren el programa del curso Mecánica de fluidos en ingeniería, es un excelente complemento a la clase teórica respectiva. Además, viene a desempeñar un importante papel en la necesidad de equipamiento de muchos laboratorios universitarios; donde es común encontrar equipo de origen extranjero, que además de costoso tiene, muchas veces, una orientación de tipo demostrativo, y no permite realizar ni repetir mediciones que ayuden a entender el fenómeno e, inclusive, imposibilitan probar nuevas ideas de los educandos; lo que en un equipo más orientado al fenómeno físico y de mayor tamaño, como él que en este texto se capacita, si es posible realizar. Espero que los lectores aprecien trabajos como este.

Gabriel Echávez Aldape

Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional Autónoma de México

