

PRÁCTICA V

DINÁMICA DE FLUIDOS

El objetivo de la práctica es verificar de forma experimental las principales leyes que rigen el comportamiento de fluidos prácticamente incompresibles (es decir, líquidos) en movimiento como consecuencia de principios básicos de conservación de masa y conservación, salvo pérdidas de disipación por rozamiento, de la energía mecánica.

1. Rendimiento de la bomba de impulsión

El agua que se mueve, en circuito cerrado, por distintos conductos correspondientes a diferentes experimentos (ver esquema de la instalación), es impulsada por una bomba movida por un motor eléctrico. En régimen estacionario, la potencia que desarrolla la bomba se dedica íntegramente a compensar las *pérdidas de carga* en el circuito, debidas a rozamientos en el fluido (viscosidad) y del fluido con las paredes de los conductos. La bomba de impulsión se encarga de producir la diferencia de presión Δp entre la salida de la bomba y el depósito reservorio al final del circuito, necesaria para que el fluido venza las fuerzas de rozamiento que se oponen a su movimiento.

La potencia total que se invierte en mover el fluido se puede calcular como $P_m = \Delta p Q$, donde $Q = \Delta V / \Delta t$ representa el caudal de líquido en el circuito, es decir, el volumen de líquido que atraviesa cualquier sección completa del circuito en la unidad de tiempo. Ahora bien, la pérdida total de carga Δp para un circuito dado depende, por una parte, de determinadas características geométricas de la tubería y, por otra, del caudal que circula, incrementándose cuando aumenta éste. Así pues, al poner en marcha la bomba, el caudal y la pérdida de carga se incrementan durante el transitorio de arranque hasta alcanzar el valor de equilibrio que iguala las pérdidas por rozamiento con la potencia librada por la bomba.

En el primer experimento de esta práctica se obtendrán los valores de potencia suministrada por la bomba de impulsión para distintos valores de resistencia y, por tanto, de caudal en un circuito cerrado. De la comparación entre los valores de potencia obtenidos y la potencia eléctrica consumida por el motor de la bomba se

puede estimar el *rendimiento* en el proceso de transferencia de energía mecánica entre el motor y el fluido.

Método operativo

1.- Verificar que las válvulas V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 y V8, válvulas de entrada a los distintos circuitos del montaje, están cerradas. Así como que la V9, que comunica directamente la salida de la bomba con el depósito de reserva, y las V10, V11, V12 y V13, válvulas de desagüe de los diferentes circuitos, se encuentran abiertas.

2.- Introducir los bornes del polímetro en el enchufe contiguo al interruptor (IR) y preparar el polímetro para medida de intensidad en alterna en la escala de 10 A.

3.- Poned en marcha la bomba y anotar la presión, correspondiente a caudal nulo, que produce en su salida, según la indicación del manómetro M1.

4.- Abrir progresivamente las válvulas V1, y después la V2, a fin de aumentar gradualmente el caudal, en incrementos de 10 litros/minuto, y tomar los datos de

- caudal Q , indicado por los caudalímetros C1 y C2 (lectura en la parte **inferior** del indicador),
- presión manométrica Δp en M1,
- intensidad I en el polímetro.

5.- Obtened los valores de potencia mecánica ($P_m = \Delta p Q$), suministrada por la bomba y potencia eléctrica consumida ($P_e = V I$, con $V = 220 V$).

6.- Representar los valores de potencia P_m y P_e , así como el rendimiento P_m/P_e , frente a caudal Q . ¿Cómo se puede explicar la dependencia entre el rendimiento y el caudal?

7.- **Finalmente**, se apaga la bomba, se desconecta el polímetro, se conecta el enchufe-puente, y se cierran las válvulas V1, V2 y V9.

2. Presiones en el tubo de Venturi

El *tubo de Venturi* es un dispositivo que se puede utilizar para la medida de caudales o velocidades de fluidos, haciendo uso de la relación entre velocidad y presión en diferentes puntos del conducto correspondientes a secciones con diferente sección transversal.

El balance de energía por unidad de volumen en diferentes puntos, 1 y 2, de un tubo de sección variable, se puede escribir en la forma

$$\left(p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 \right)_1 - \left(p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 \right)_2 = R \quad (1)$$

donde ρ representa la densidad del fluido, y R expresa las pérdidas de carga, por disipación de energía, en el flujo desde 1 hasta 2. Para unas condiciones de flujo ideal, sin pérdidas de energía, la ecuación (1) expresa el conocido *teorema de Bernoulli*,

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{cte.}$$

Por otra parte, la conservación de la masa a lo largo del tubo, para un fluido incompresible ($\rho = \text{cte}$), implica conservación del volumen y, por tanto, de caudal en diferentes secciones del tubo. Así,

$$Q_1 = A_1 v_1 = A_2 v_2 = Q_2 \quad (2)$$

expresión conocida como ecuación de continuidad y que relaciona el área de secciones transversales A y la velocidad media v .

Para un tubo horizontal, el término de energía potencial gravitatoria en (1) no cambia ($\rho gh = \text{cte}$), por lo que variación de la presión en un punto genérico i a lo largo del tubo, con respecto a la de un punto de referencia 0 , puede expresarse como

$$p_o - p_i = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Q}{A_i} \right)^2 - \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Q}{A_o} \right)^2 + R_i \quad (3)$$

Se puede deducir, por argumentos dimensionales, que la pérdida de carga R_i debe ser de la forma

$$R_i = c Q^2 \quad (4)$$

Por tanto, para dos puntos prefijados de secciones conocidas, la expresión (3) permite obtener el caudal Q por el tubo en función de la diferencia de presiones Δp ,

$$Q = C\sqrt{\Delta p} \quad (5)$$

donde C representa una constante de calibración del dispositivo dada por

$$C = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2}\rho(A_i^{-2} - A_o^{-2}) + c}} \quad (6)$$

En el segundo experimento de la práctica, se pretende estudiar experimentalmente el comportamiento de un tubo de Venturi de dimensiones estándar para distintos valores del caudal, verificando la relación (3).

Método operativo.

1.- En primer lugar, se comprueba que la llave de descarga, V12, correspondiente al circuito del tubo de Venturi se encuentre abierta (esta comprobación es **IMPORTANTE** para evitar derrames de agua por exceso de presión en los conductos que comunican el tubo de Venturi con los columnas del manómetro de agua).

2.- Verificar que la válvula V14 de desagüe de los manómetros de columna se encuentra abierta (en caso de exceso de presión en el circuito el agua fluirá a través de esta llave al depósito de reserva, sin derrames accidentales), y abrir completamente la válvula V4 de entrada al circuito con el tubo de Venturi.

3.- Se conecta la bomba y se abre la válvula V1 hasta ajustar un caudal de 1000 litros/hora, medido en el caudalímetro principal del montaje C3. En este caudalímetro el caudal corresponde con la lectura de la parte superior del indicador.

4.- Cerrar poco a poco la llave de descarga, V12, para que se vaya incrementado la presión y llenándose los conductos que comunican diferentes puntos del tubo con las columnas manométricas. Es imprescindible que no haya burbujas de aire ni en los tubos de conexión del tubo de Venturi, ni en el manómetro de columna. Si las hubiera, pueden eliminarse cerrando y abriendo la llave de descarga V12 hasta conseguir que desaparezcan.

5.- Cuando las columnas manométricas tengan el nivel suficiente para que todas las columnas sean visibles y se encuentren aproximadamente centradas en el panel, cerrar la llave de salida de las columnas manométricas V14 para mejorar la estabilidad del nivel en las columnas y abrir completamente la válvula de descarga V12 para trabajar en la instalación a una presión inferior a la atmosférica.

6.- Anotar los valores de la presión (cm de agua) en las diferentes columnas manométricas.

7.- Se ajusta el caudal en el tubo para valores desde 200 litros/hora hasta 1200 litros/hora, en incrementos de 200 litros/hora, midiendo, para cada valor, la diferencia de nivel de las columnas manométricas correspondientes al punto de entrada del tubo de Venturi y al punto de máximo estrechamiento.

8.- Representar los valores obtenidos en el apartado 7, comprobando la dependencia de la expresión (5) y determinando la constante C.

9.- Con los valores obtenidos en el apartado 6, deducir a partir de la expresión (3) el valor de pérdida de carga R_i producida en los distintos puntos del tubo de Venturi, observando en qué zona se produce principalmente la pérdida de carga. Los diámetros de las diferentes secciones del tubo en las que se toma la medida de la presión son los siguientes: 28.4mm, 22.88mm, 14mm, 17.4 mm, 24.5mm y 28.4 mm.

10.- **Finalmente**, y por este orden, se apaga la bomba, se abren las válvulas V12 y V14 y se cierran las válvulas V1 y V4.

3. Pérdida de carga en un orificio

La pérdida de carga causada por el flujo de un fluido a través de un orificio se puede utilizar, al igual que el tubo de Venturi, para la medida de caudales o velocidades de fluidos, haciendo uso de la relación entre la velocidad del fluido y la pérdida de presión a ambos lados del orificio. La pérdida de presión a ambos lados del orificio, al igual que la pérdida de carga en el tubo de Venturi, tiene dependencia cuadrática con el caudal que circula, es decir,

$$Q = K\sqrt{\Delta p} \quad (7)$$

En esta parte de la práctica, se pretende estudiar experimentalmente el comportamiento de las pérdidas de carga en un orificio de dimensiones estándar para distintos valores del caudal, verificando el cumplimiento de la relación anterior y obteniendo el valor de la constante K.

Método operativo

1.- Se comprueba, en primer lugar, que la llave de descarga, V13, correspondiente al circuito del orificio se encuentre abierta (esta comprobación es **IMPORTANTE** para evitar derrames de agua por exceso de presión en los conductos que comunican el tubo que contiene el orificio con las columnas del manómetro de agua).

2.- Verificar que la válvula V15 de desagüe de los manómetros de columna se encuentra abierta (en caso de exceso de presión en el circuito el agua fluirá a través de esta llave al depósito de reserva, sin derrames accidentales), y abrir completamente la válvula V3 de entrada al circuito del tubo con el orificio.

3.- Conectar la bomba y abrir la válvula V1 hasta ajustar un caudal de 1000 litros/hora medido en el caudalímetro principal del montaje C3.

4.- Se va cerrando poco a poco la llave de descarga, V13, correspondiente al circuito del tubo con el orificio para que se vaya incrementado la presión y llenándose los conductos que comunican diferentes puntos del tubo con las columnas manométricas. Es imprescindible que no haya burbujas de aire ni en los tubos de

conexión, ni en el manómetro de columna. Si las hubiese, pueden eliminarse cerrando y abriendo la llave de descarga hasta que desaparezcan.

5.- Cuando las dos columnas manométricas tengan el nivel suficiente para que sean visibles y estén centradas, se cierra la llave de salida de las columnas manométricas V15 para mejorar la estabilidad del nivel en las columnas, y se abre completamente la válvula de descarga V13 para trabajar en la instalación a una presión inferior a la atmosférica.

6.- Ajustar el caudal en el tubo para valores desde 200 litros/hora, hasta 1400 litros/hora, en incrementos de 200 litros/hora anotando, para cada valor, la diferencia de nivel de las dos columnas manométricas correspondientes a ambos lados del orificio.

7.- Representar los valores obtenidos, comprobando la dependencia dada en la expresión (7) y determinando la constante de dicha expresión.

8.- **Finalmente**, se apaga la bomba, se abren las válvulas V13 y V15 y se cierran las válvulas V1 y V3.

4. Pérdida de carga en régimen laminar y turbulento: determinación del número de Reynolds

En esta parte de la práctica se estudia la pérdida de carga que se produce cuando un fluido circula en un tubo de diámetro constante y se calcula el *número de Reynolds* de ese fluido en diferentes condiciones. A partir del número de Reynolds y de la pérdida de carga se va a establecer si el flujo es *laminar* o *turbulento*.

El número de Reynolds (Re) del flujo de un fluido viene dado por

$$Re = \frac{v D}{\nu} \quad (8)$$

donde v es la velocidad del fluido, D el diámetro interior del tubo y ν la *viscosidad cinemática* del fluido (viscosidad / densidad).

La velocidad del fluido está relacionada con el caudal Q como

$$v = \frac{Q}{A} \quad (9)$$

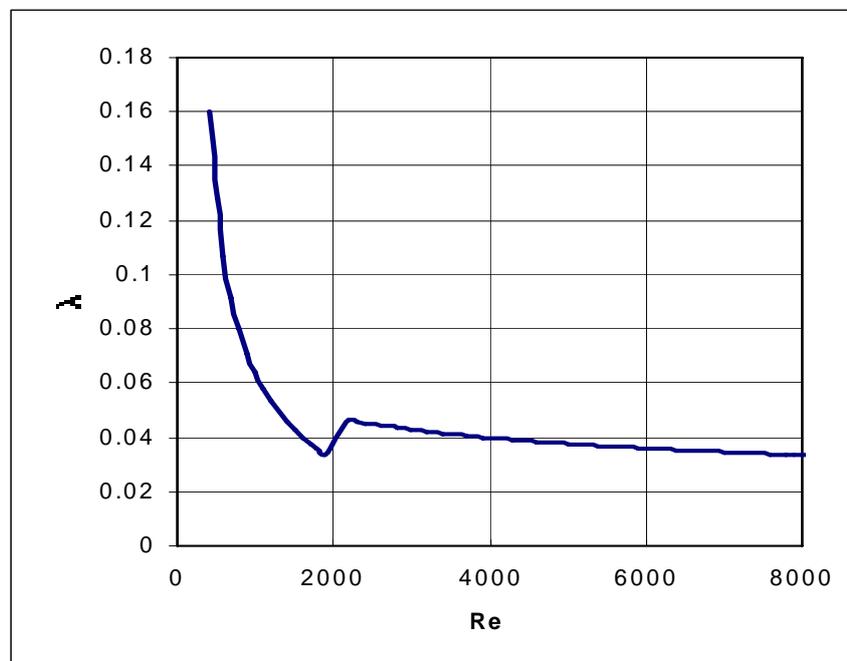
donde $A = \pi r^2$ es la sección del tubo.

A partir de la pérdida de carga Δp que se produce en la circulación del fluido se obtiene el coeficiente (adimensional) de fricción λ_t del tubo a partir de la ley de Darcy-Weisbach, en la forma

$$\lambda_t = \frac{2 \Delta p D}{\rho L v^2} \quad (10)$$

donde L es la longitud del tubo y ρ es la densidad del fluido.

La representación del coeficiente de fricción en función del número de Reynolds, nos permite determinar cuando el régimen es laminar o turbulento, ya que, cuando $Re < 2000$ el régimen es laminar, si $Re > 2500$ entonces el régimen es turbulento y la zona $2000 < Re < 2500$ corresponde a la transición entre los regímenes laminar y turbulento. En la figura se representan ambas tendencias, y la zona de transición es donde se produce el salto en la gráfica.



Coefficiente de fricción (λ) frente al N° de Reynolds (Re)

El cálculo teórico del coeficiente de fricción, en régimen laminar, permite obtener (ley de Poiseuille)

$$\lambda_t = \frac{64}{\text{Re}} \quad (11)$$

En régimen turbulento, para tubo liso, el coeficiente de fricción se puede estimar, aproximadamente, a partir de la ley de Blasius

$$\lambda_t = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{\text{Re}}} \quad (12)$$

Método operativo

a) Flujo laminar

1.- Se conecta la bomba y se abre la válvula V1 ligeramente (1 vuelta aproximadamente). Se abre lentamente la válvula V5 de entrada al depósito hasta que circule un caudal de 1 litro/minuto aproximadamente por el caudalímetro C4. El agua entra en el depósito y se va llenando hasta que alcanza el tubo rebosadero. De esta forma, manteniendo la válvula de entrada abierta se mantiene el agua a presión constante. Comprobar que la llave de vaciado del vaso medidor V17 y la válvula V16 de cierre del manómetro de columna M2 están abiertas.

2.-Abrir las válvulas V7 y V7' de entrada y salida del tubo dejando circular agua para purgar el circuito. Cerrar las válvulas V7 y V7' consecutivamente. Abrir ligeramente la válvula V7 hasta que las columnas de agua del manómetro de columna M2 sean visibles y cerrar la válvula de cierre V16 cuando las marcas de las dos columnas estén centradas. A continuación, se abre completamente la válvula V7' y se regula la válvula de entrada V7 hasta que la diferencia de presión sea de 1 mbar. Conseguida esta diferencia de presión, cerrar la válvula V17 de vaciado del vaso medidor, y medir el tiempo Δt que tarda en llenar un volumen ΔV de 200 cm^3 . Una vez medido, volved a abrir la válvula de vaciado para que se vacíe el vaso.

3.- Repetir el proceso, ajustando las válvulas para que la diferencia de presiones sea 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10 y 12 mbar, y en cada una de ellas se mide el tiempo necesario para llenar 200 cm^3 .

4.- Medir la temperatura del agua introduciendo un termómetro en el vaso medidor.

5.- Determinar el caudal Q como $\Delta V/\Delta t$ y el número de Reynolds para las diferentes situaciones usando la expresión (8) y tomando como valor de viscosidad dinámica el que corresponde a la temperatura medida en la Tabla 1. El diámetro interior del tubo es 3 mm y la longitud entre manómetros es 40 cm.

6.- Determinar el coeficiente de fricción de acuerdo con la expresión (10).

7.- **Finalmente**, se cierra la válvula V5 de entrada al depósito.

b) Flujo turbulento

1.- Comprobar que la válvula de vaciado del circuito V11 esté abierta. Abrir la válvula V6 de forma que el caudal en el caudalímetro C4 sea 1 litro/minuto (lectura a la izquierda del indicador). Se va cerrando poco a poco la llave V11 de vaciado hasta que la presión en el manómetro M3' sea del orden de 10 mbar y se mide la diferencia de presiones entre los manómetros M3 y M3'.

2.- Repetir el proceso para caudales de 1,25, 1,5, 1,75 y 2 litros/minuto.

3.- Determinar el número de Reynolds, tomando los valores anteriores, y el coeficiente de fricción de acuerdo con la expresión (10).

4.- Representar los valores del coeficiente de fricción obtenidos en régimen laminar y en régimen turbulento frente al número de Reynolds y comprobar la validez de las expresiones (11) y (12).

5.- Observar el cambio de régimen y determinar cuál es la región de flujo laminar, flujo turbulento y cambio de régimen.

6.- **Finalmente**, se apaga la bomba, se cierra la válvula V6 de entrada al circuito, la válvula V1 general y se abre la válvula V11 de desagüe.

5. Pérdida de carga en una tubería

Finalmente, se pretende determinar la pérdida de carga que se produce en una tubería por la que circula un cierto caudal de agua en régimen turbulento. Las condiciones de flujo en este experimento son las que habitualmente se dan en instalaciones comunes de transporte de líquidos. De nuevo, la relación entre pérdida de carga y caudal se puede expresar como

$$Q = K\sqrt{\Delta p} \quad (13)$$

donde K es una constante que depende de las características del fluido y de las dimensiones y rugosidad en las paredes de la conducción.

En esta parte de la práctica, se pretende determinar experimentalmente el comportamiento de las pérdidas de carga en una conducción estándar para distintos valores del caudal, verificando el cumplimiento de la relación anterior y obteniendo el valor de la constante K.

Método operativo

1.- En primer lugar, se comprueba que la llave V8 de entrada al circuito de la tubería está cerrada y que la de descarga, V10, está abierta.

2.- Se conecta la bomba y se abre la válvula V1 una vuelta aproximadamente. Abrir la válvula V8 de forma que el caudal en el caudalímetro C5 sea de 2 litros/minuto (lectura a la izquierda del indicador). Cerrar poco a poco la llave V10 de vaciado hasta que la presión en el manómetro M4' sea del orden de 10 mbar y medir la diferencia de presiones Δp entre los manómetros M4 y M4'.

3.- Repetir el proceso para caudales de 3, 4, 5 y 6 litros/minuto.

4.- Representar los valores obtenidos, comprobando la dependencia dada por la expresión (13) y deduciendo la constante de dicha expresión.

5.- **Finalmente**, se apaga la bomba, se cierra la válvula V8 y se abre la válvula V10.

Tabla 1.- Valores de densidad (ρ) y viscosidades dinámica (μ) y cinemática (ν) del agua, en función de la temperatura.

T (°C)	ρ (kg/m ³)	$\mu \times 10^3$ (Pa.s)	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)
0	1000	1,788	1,788
10	1000	1,307	1,307
20	998	1,003	1,005
30	996	0,799	0,802
40	992	0,657	0,662
50	988	0,548	0,555
60	983	0,467	0,475
70	978	0,405	0,414
80	972	0,355	0,365
90	965	0,316	0,327
100	958	0,283	0,295

