

Guiones de prácticas de laboratorio de Mecánica de Fluidos

Aplicación del tubo de Venturi y del tubo de Pitot

Calibración de un manómetro

Curva característica de una bomba centrífuga

Estudio del golpe de ariete

Medida de caudal por medidor de impacto

Pérdidas de carga

Presión hidrostática sobre una superficie plana

Medida de una capa límite turbulenta

Experimento de Reynolds

Caracterización de la inestabilidad de Couette-Taylor

Aerodinámica de cuerpos romos

Flujo compresible en toberas

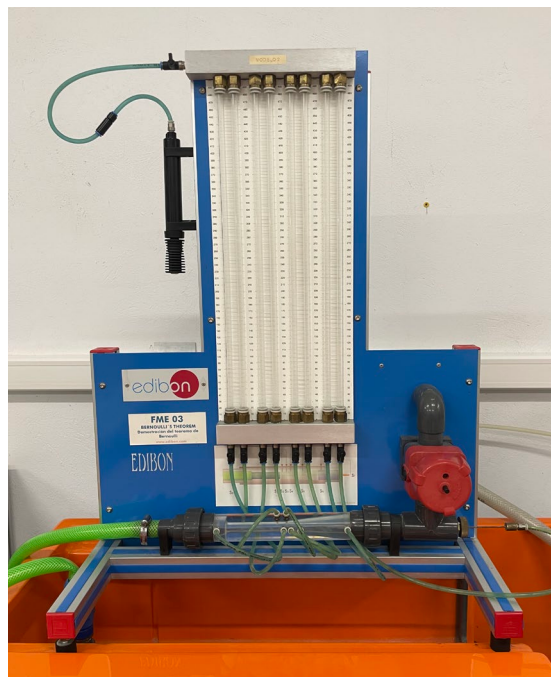
Perfiles de velocidad en un chorro de aire

Coefficientes de arrastre y sustentación

Semejanza en bombas hidráulicas

Aplicación del tubo de Venturi y del tubo de Pitot

Práctica de laboratorio de Ingeniería Fluidomecánica



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y FLUIDOMECÁNICA
ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Aplicación del tubo de Venturi y del tubo de Pitot

Práctica de laboratorio de Ingeniería Fluidomecánica

Introducción

El objetivo de esta práctica es el manejo de algunos de los dispositivos más comunes utilizados para medir el caudal o la velocidad de una corriente líquida: un tubo de Venturi y un tubo de Pitot.

Se utilizará un sistema volumétrico para determinar el caudal real (patrón). Se hace pasar el mismo caudal por los dos sistemas a la vez para medir el caudal por diferentes métodos. El sistema de trabajo consistirá en ajustar los ceros de todos los sistemas en reposo, abrir la válvula del agua y anotar las medidas de los diferentes sistemas, rellenando las correspondientes tablas.

Medida del caudal con tubo de Venturi y tubo de Pitot

Fundamentos

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre dos secciones de diferente diámetro del tubo Venturi, en posición horizontal:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2}$$

Por la ecuación de continuidad, el caudal viene dado por:

$$Q = \frac{\pi D_1^2}{4} v_1 = \frac{\pi D_2^2}{4} v_2$$

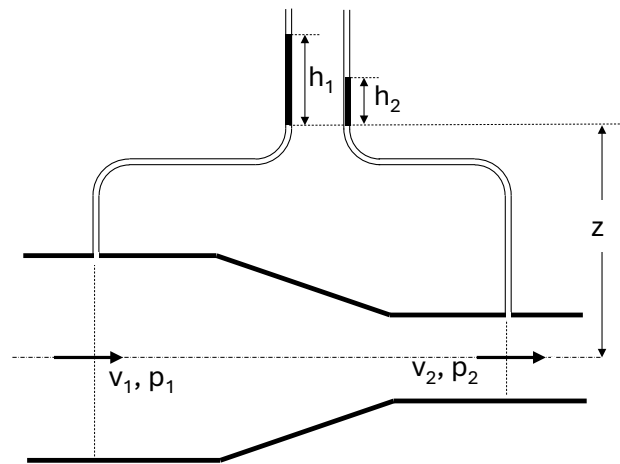


FIGURA 1: ESQUEMA DE UN VENTURI.

Considerando que la presión es uniforme en cada sección transversal y se puede calcular mediante la altura de agua en el tubo vertical, siendo: $P_i = P_{atm} + \rho_{agua} \cdot g \cdot h_i + \rho_{agua} \cdot g \cdot z$ (se utiliza ρ_{agua} , porque es el fluido de los tubos). La distancia z desde la base de cada tubo hasta el eje del Venturi es la misma para todos los tubos.

Sustituyendo las expresiones del caudal y de la presión en la ecuación de Bernoulli, se obtiene el caudal teórico que atraviesa el tubo de Venturi en función de la diferencia de alturas entre dos secciones:

$$Q_t = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot (h_1 - h_2)}{1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4}}$$

Por lo tanto, midiendo las alturas de presión estática h_1 y h_2 , se puede conocer el caudal que atraviesa el tubo de Venturi, suponiendo que no existen pérdidas de energía y que el fluido se comporta como ideal.

Considerando que pueden existir pérdidas de carga en el tubo, se define un coeficiente de descarga C_v para cuantificarlas, de forma que el caudal real que atraviesa el tubo será:

$$Q_{\text{real}} = C_v \cdot \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_2)}{1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4}}$$

Aunque C_v varía con el número de Reynolds, a partir de un cierto valor de dicho número se puede suponer constante.

Otra forma de determinar la velocidad del fluido es utilizar un tubo de Pitot que permite determinar la velocidad del fluido aguas arriba del tubo, midiendo la altura de presión que produce. En la Figura 2 se muestra un tubo de Pitot colocado en el interior de la sección de ensayo.

La velocidad del fluido en A es cero. Aplicando la ecuación de Bernoulli en la línea de corriente que muere en A:

$$\frac{P_6}{\rho} + \frac{v_6^2}{2} + gz_6 = \frac{P_A}{\rho} + gz_A$$

Como el fluido dentro del Pitot está en reposo se puede aplicar fluidostática y obtener la presión total o de remanso P_A :

$$P_A = P_{\text{atm}} + \rho_{\text{agua}}gh_8 + \rho_{\text{agua}}gz$$

Sustituyendo la expresión anterior y la de P_6 en la ecuación de Bernoulli y despejando v_6 :

$$v_6 = \sqrt{2g(h_8 - h_6)}$$

El caudal que mide el tubo de Pitot es:

$$Q_{\text{pitot}} = \frac{\pi D_6^2}{4} v_6$$

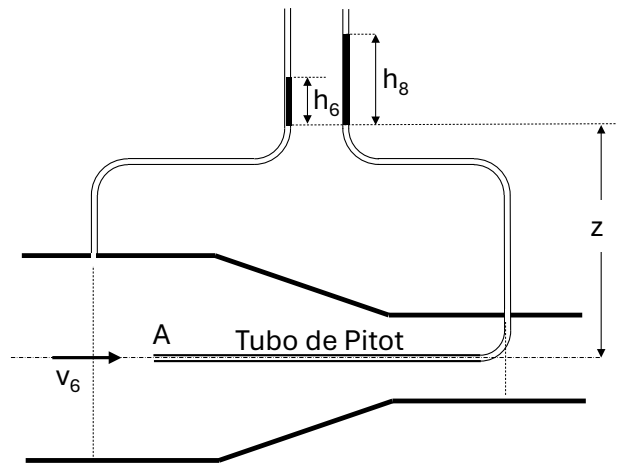


FIGURA 2: TUBO DE PITOT

Práctica Modelo 1

- 1) Comprobar que el sistema está horizontal y la válvula de la bomba cerrada.
- 2) Llenar de agua los tubos de los manómetros poniendo la bomba en marcha y abriendo la válvula.
- 3) Variar la apertura de la válvula de la bomba para variar el caudal suministrado, midiendo las alturas de los tubos para cada caudal suministrado. Realizar la toma de datos para 3 caudales diferentes. Los caudales reales se determinan por medida del volumen acumulado de líquido en un intervalo de tiempo.

Para cada caudal real de agua, existirán 7 medidas de alturas de presión, las 6 primeras de altura de presión estática en cada sección de ensayo (secciones 1 a 6), y la medida del punto 8 que es la altura de presión de remanso realizada en el tubo de Pitot.

TUBO N°	D (mm)	h_i (mm)		
		medida 1	medida 2	medida 3
1	25.0			
2	14.6			
3	12.4			
4	11.3			
5	10.6			
6	10.0			
8	-			
Caudal real	V (l)			
	t (s)			
	Q_{real}			

Resultados

Para cada medida de caudal con el Venturi, hacen falta, como se ha visto, las medidas en dos secciones distintas, por lo tanto para cada caudal se obtienen cinco medidas diferentes, usando los tubos 1 y 6; 2 y 6; 3 y 6; 4 y 6; 5 y 6.

- Calcular el coeficiente de descarga C_v del tubo de Venturi. Rellenar el cuadro siguiente:

TUBOS	$Q_{\text{teórico}}$		
	medida 1	medida 2	medida 3
1 y 6			
2 y 6			
3 y 6			
4 y 6			
5 y 6			
tubo Pitot (6 y 8)			
$Q_{\text{teórico medio}}$			
Q_{real} (volumétrico)			
C_v medio			

C_v Venturi

- Realizar la calibración del tubo de Pitot. Representar gráficamente el Q_{pitot} frente al Q_{real} .

- Representar gráficamente $C_v = f(Re)$ donde Re viene dado por: $Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{4 \rho Q_{real}}{\mu \pi D}$

Práctica Modelo 2

- 1) Comprobar que el sistema está horizontal y la válvula de la bomba cerrada.
- 2) Llenar de agua los tubos de los manómetros poniendo la bomba en marcha y abriendo la válvula.
- 3) Variar la apertura de la válvula de la bomba para variar el caudal suministrado, midiendo las alturas de los tubos para cada caudal suministrado. Realizar la toma de datos para 3 caudales diferentes. Los caudales reales se determinan por medida del volumen acumulado de líquido en un intervalo de tiempo.

Para cada caudal real de agua, existirán 7 medidas de alturas de presión, las 6 primeras de altura de presión estática en cada sección de ensayo (secciones 1 a 6), y la medida del punto 7 que es la altura de presión de remanso realizada en el tubo de Pitot.

TUBO N°	D (mm)	h _i (mm)		
		medida 1	medida 2	medida 3
1	10.4			
2	10.5			
3	10.6			
4	11.2			
5	13.6			
6	18.2			
7	-			
Caudal real	V (l)			
	t (s)			
	Q _{real}			

Resultados

Para cada medida de caudal con el Venturi, hacen falta, como se ha visto, las medidas en dos secciones distintas, por lo tanto, para cada caudal se obtienen cinco medidas diferentes, usando los tubos 1 y 2; 1 y 3; 1 y 4; 1 y 5; 1 y 6.

- Calcular el coeficiente de descarga C_v del tubo de Venturi. Rellenar el cuadro siguiente:

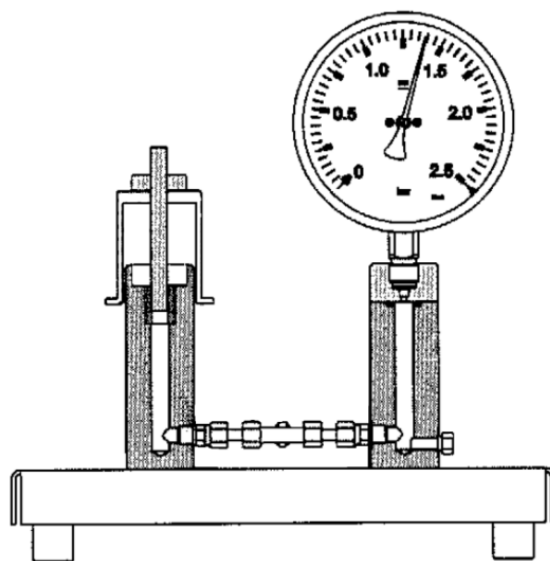
TUBOS	$Q_{teórico}$		
	medida 1	medida 2	medida 3
1 y 2			
1 y 3			
1 y 4			
1 y 5			
1 y 6			
tubo Pitot (1 y 7)			
$Q_{teórico}$ medio			
Q_{real} (volúmetrico)			
C_v medio			

C_v Venturi

- Realizar la calibración del tubo de Pitot. Representar gráficamente el Q_{pitot} frente al Q_{real} .
- Representar gráficamente $C_v = f(Re)$ donde Re viene dado por: $Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{4 \rho Q_{real}}{\mu \pi D}$

Calibración de un manómetro

Práctica de laboratorio de Ingeniería Fluidomecánica



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y FLUIDOMECÁNICA
ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Calibración de un manómetro

Práctica de laboratorio de Ingeniería Fluidomecánica

Objetivos

Comprender el principio de funcionamiento de un manómetro tipo Bourdon y calibrarlo.

MANÓMETRO DE ACEITE

Descripción y funcionamiento del aparato

El calibrador de manómetros consta en lo esencial de dos unidades: la unidad de medición de presión y la unidad de generación de presión. La unidad de medición de presión es un manómetro tipo Bourdon que se debe de calibrar. La unidad de generación de presión consta de un portapesos y varios pesos.

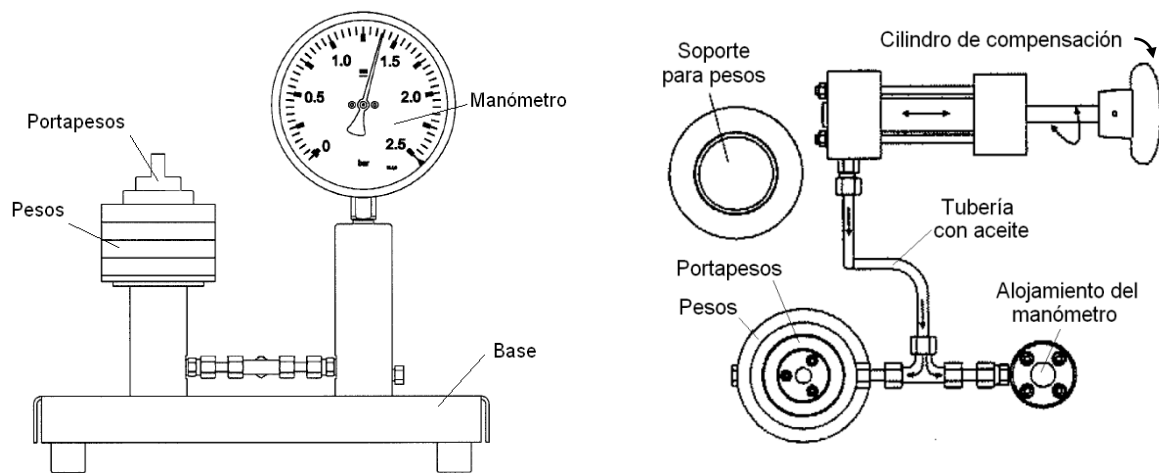


FIGURA 1: VISTAS FRONTAL Y SUPERIOR DEL EQUIPO.

La unidad de generación de presión se comunica con la unidad de presión a través de una tubería llena de aceite. Un aumento de la carga tiene como consecuencia un aumento de la presión del aceite y por tanto un aumento de la presión en el manómetro.

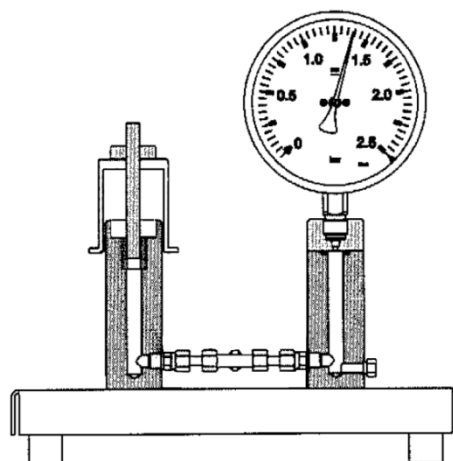


FIGURA 2: CONEXIÓN HIDRÁULICA.

El portapesos tiene en su parte inferior un émbolo de diámetro $d=12$ mm que se aloja en un cilindro lleno de aceite. La estanqueidad entre el émbolo y el cilindro tiene lugar de forma

mecánica gracias a un ajuste que permite que el cilindro se desplace prácticamente sin rozamiento y con unas pérdidas de aceite mínimas.

El sistema consta además de un cilindro de compensación (Figura 1) que permite controlar y el nivel de aceite inicial así como subir y bajar el portapesos. Para la medición hay que evitar que el portapesos haga tope en el fondo.

Las masas sobre el portapesos y el propio portapesos ejercen una presión sobre el aceite $p=mg/A$ donde m es la masa total, g es la gravedad y $A=\pi d^2/4$ es el área del émbolo. Gracias al circuito hidráulico esta presión es transmitida hasta el manómetro a calibrar. Para minimizar errores debidos al rozamiento de adherencia se somete al portapesos a un ligero movimiento de giro antes de efectuar la lectura sobre el manómetro.

Procedimiento para la toma de datos

1. Comprobar que el cilindro portapesos, colocado en el cilindro de la unidad de presión, hace tope en el fondo. Si no es así, girar la manivela del cilindro de compensación en sentido antihorario hasta que el cilindro portapesos haga tope.

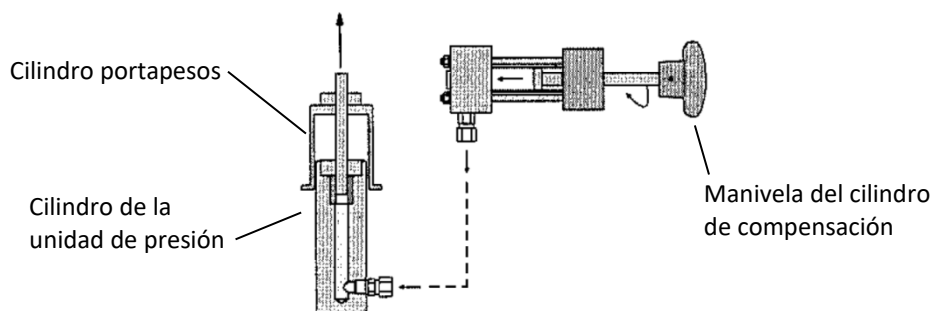


FIGURA 3: RETIRAR EL PORTAPESOS.

2. Girar la manivela del cilindro de compensación en sentido horario hasta que el cilindro portapesos deje de hacer tope en el fondo. Anotar la lectura del manómetro. La masa del portapesos es de 385 g.
3. Colocar el anillo de 193 g sobre el portapesos. Téngase cuidado de encajar la espiga guía del portapesos en el taladro del anillo. De lo contrario, los demás pesos quedarían inclinados y las mediciones falseadas debido a diferencias en el rozamiento. Antes de tomar la lectura hay que asegurarse de que el émbolo no hace tope. Si lo hace, girar la manivela del cilindro de compensación en sentido horario hasta que deje de hacerlo. Anotar el valor de la presión del manómetro.
4. Añadir el resto de anillos uno a uno con suavidad repitiendo el paso anterior. Los anillos restantes son todos de 578 g. En cada anillo asegurarse de que el émbolo no hace tope.
5. **Finalizar la práctica.** Retirar suavemente el último anillo. Girar la manivela del cilindro de compensación en sentido antihorario hasta que el cilindro portapesos haga tope en el fondo. Retirar el siguiente anillo repitiendo la operación hasta el último.

Presentación de resultados

1. A partir de los datos experimentales completar la tabla siguiente.

	Masa (g)	Presión medida (bar)	Presión teórica (bar)
Sólo portapesos	385		
+ anillo de carga pequeño	385+193=578		
+ anillo de carga	578+578=1156		
+ anillo de carga	1156+578=1734		
+ anillo de carga	1734+578=2312		
+ anillo de carga	2312+578=2890		

2. Representar gráficamente la presión teórica (eje de abscisas) frente a la presión medida (eje de ordenadas).
3. Un manómetro es de Clase 1.0 cuando el error máximo admisible es $\pm 1\%$ del valor final de la escala. Como el rango es de 0 a 2,5 bar el error máximo admisible sería de 0,025 bar para todo el campo. ¿Se puede considerar el manómetro de clase 1.0? razona la respuesta.

MANÓMETRO DE AGUA

Descripción y funcionamiento del aparato

La cadena de medida que se utiliza (ver Figura 5) consta básicamente de un cilindro, un émbolo y un manómetro tipo Bourdon. Sobre la plataforma del émbolo, de masa $m_p = 0,5 \text{ kg}$ y área $A_p = 245 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, se añadirán sucesivamente masas para obtener diferentes puntos de medida. El valor real de la presión debajo del émbolo, vendrá dado por la expresión:

$$P_{\text{real}} = \frac{W_p + W}{A_p}$$

donde W_p es el peso de la plataforma del émbolo y W el de las masa colocadas sobre la citada plataforma. El medidor de presión Bourdon se encuentra conectado a la cámara de agua a la que el émbolo transmite la presión, por lo que la lectura del Bourdon se corresponderá con la presión real calculada.

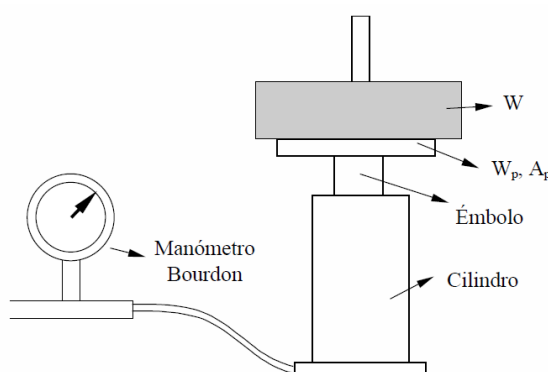


FIGURA 5: ESQUEMA DE LA CADENA DE MEDIDA

Procedimiento para la toma de datos

Es necesario verificar en todo momento que el émbolo no está haciendo tope con la base de la cámara, en ese caso, extraer el pistón, introducir agua en el interior de la cámara y volver

a colocar el pistón. Verificar asimismo que no hay burbujas de aire en el tubo que une el manómetro con la cámara.

Realizar la calibración del manómetro, es decir, hallar la curva de la p_{real} frente a la p_{medida} , para diferentes pesos ejercidos sobre el émbolo. Para ello colocar las masas una a una y anotar en la tabla cada vez el valor total de la masa y la lectura del manómetro.

Presentación de resultados

1. A partir de los datos experimentales completar la tabla siguiente.

Nº	Masa (g)	Presión medida (bar)	Presión teórica (bar)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

2. Representar gráficamente la presión teórica (eje de abscisas) frente a la presión medida (eje de ordenadas).
3. Un manómetro es de Clase 1.0 cuando el error máximo admisible es $\pm 1\%$ del valor final de la escala. Como el rango es de 0 a 2,5 bar el error máximo admisible sería de 0,025 bar para todo el campo. ¿Se puede considerar el manómetro de clase 1.0? razona la respuesta.

Curva característica de una bomba centrífuga

Práctica de laboratorio de Ingeniería Fluidomecánica



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y FLUIDOMECÁNICA
ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Curva característica de una bomba centrífuga

Práctica de laboratorio de Ingeniería Fluidomecánica

Objetivos

Se pretende la obtención de la curva característica de una bomba centrífuga, es decir, determinar la variación de la altura manométrica en función del caudal.

Descripción y funcionamiento

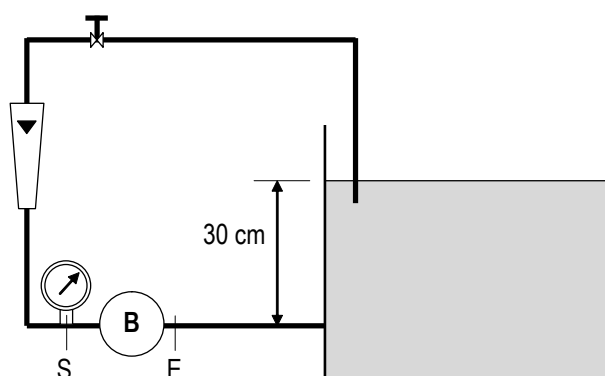
Se conoce como altura manométrica, la diferencia de energías (en términos de altura) entre la impulsión y la aspiración de una bomba.

$$H_m = \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z \right)_S - \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z \right)_E$$

Si la diferencia de cotas entre la entrada y la salida se considera despreciable y las tuberías de aspiración e impulsión tienen los mismos diámetros (y velocidades iguales), entonces:

$$H_m \approx \frac{P_S - P_E}{\rho g}$$

Se necesita medir experimentalmente la diferencia de presión entre la entrada y la salida de la bomba. También se necesita la medida del caudal con la ayuda de un rotámetro.



Asumiendo despreciables las pérdidas entre la superficie libre del líquido y la entrada de la bomba, se puede calcular la presión de entrada (P_E)

La presión a la salida (impulsión) se mide con un manómetro.

Procedimiento para la toma de datos

Puesta en marcha del experimento:

1. Asegurarse de que la válvula de impulsión está cerrada
2. Poner en marcha la bomba
3. Abrir la válvula de regulación hasta obtener el caudal señalado en la tabla inferior (superficie superior del cono dentro del rotámetro).
4. Tomar nota de la presión de impulsión de la bomba. Rellenar la tabla.
5. Una vez finalizada la medición, cerrar la válvula regulador y apagar la bomba.

Q (litros/h)	ΔP (bar)	H_m (m)
1700		
1600		
1400		
1200		
1000		
800		
700		
600		
500		
400		
0		

Presentación de resultados

1. Calcular la altura manométrica para cada caudal.
2. Representar la gráfica de la curva característica: $H_m = f(Q)$.

Estudio del golpe de ariete

Práctica de laboratorio de Ingeniería Fluidomecánica



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y FLUIDOMECÁNICA
ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Estudio del golpe de ariete

Práctica de laboratorio de Ingeniería Fluidomecánica

Objetivo

Se pretende estudiar la sobrepresión producida por el golpe de ariete en la instalación para diferentes caudales y tiempos de cierre.

Fundamento teórico

El golpe de ariete es un fenómeno que se produce por el cambio brusco en el movimiento de un fluido que circula por el interior de un conducto cerrado. Dicho cambio, puede deberse al cierre brusco de una válvula en algún punto de la conducción.

Como consecuencia de ello, se produce una onda de presión que viaja aguas arriba a lo largo del conducto a una velocidad c , transmitiendo la información del cierre. Dicha velocidad c , cuando el módulo de elasticidad de la tubería y el inverso de la compresibilidad del fluido son comparables, viene dada por la ecuación 1. Sólo es válida para el caso en el que la tubería sea circular.

$$c = \sqrt{\left[\frac{1}{\rho a^2} + \frac{\rho}{E} \left(\frac{2R}{e} \right) \right]^{-1}} \quad \text{ECUACIÓN 1}$$

Siendo: a la velocidad del sonido

ρ la densidad del fluido de trabajo

E el módulo de elasticidad de la tubería

R el radio de la tubería

e el espesor de la tubería

Si se toma un volumen de control que englobe a la onda y se mueva solidario a ella, se demuestra, aplicando las ecuaciones de conservación de la masa y cantidad de movimiento, que el incremento de presión teórico producido **por un cierre instantáneo** es el calculado mediante la ecuación 2:

$$\Delta P = \rho c \Delta v \quad \text{ECUACIÓN 2}$$

Siendo: ρ la densidad del fluido de trabajo

c la velocidad de propagación de la onda

Δv la diferencia de velocidades a ambos lados de la onda de presión

Es práctica común definir como cierre **instantáneo** o brusco todo aquel que se lleve a cabo en un tiempo menor que el crítico, que está definido por la ecuación 3:

$$t_{\text{crí}} = \frac{2L}{c} \quad \text{ECUACIÓN 3}$$

En el caso de tener un **cierre lento**, es decir, con una duración superior tiempo crítico, el incremento de presión estimado vendrá dado por la ecuación 4:

$$\Delta P = \rho \frac{2L}{t_{\text{cierre}}} \Delta v \quad \text{ECUACIÓN 4}$$

Descripción de la instalación

La instalación consta de una bomba, cuya aspiración está conectada a un depósito mediante una tubería y cuya impulsión va unida a una tubería de diámetro 22 mm enrollada en espiral, con el fin de poder tener una longitud de 64 m de tubería en poco espacio.

El fluido asciende por el serpentín hasta llegar a un captador de presión. A continuación existe una válvula de esfera, que será la responsable de producir el golpe de ariete. Aguas abajo de la misma, se sitúa una válvula reguladora de caudal, que permitirá ajustar el caudal, y un rotámetro. Éste último está conectado con la base superior del depósito.

Procedimiento para la toma de datos

1. Comprobar que la válvula reguladora de caudal está completamente abierta.
2. Poner en funcionamiento la bomba, pulsando el botón verde del cuadro de mandos, y encender la pantalla. En la pantalla aparecerá el mensaje “Por favor. Pulse en los puntos”, aparecerán 3. Pulsar sobre ellos.
3. Ajustar el caudal deseado, que deberá estar comprendido entre 160l/h y 800l/h, mediante la válvula de compuerta, visualizando el mismo en la escala del rotámetro.
4. Realizar un cierre brusco mediante la válvula de esfera. Anotar el valor de la presión inicial que aparecerá en la pantalla. Acto seguido, aparecerá el tiempo de cierre y la presión máxima producida, anotarlos. Tocar la pantalla, mostrará el mensaje “Coloque antes la válvula en OPEN”. Abrir la válvula de esfera, se visualizará la onda.
5. Repetir el experimento para tres caudales diferentes y cuatro tiempos de cierre, probando con cierres más lentos y más rápidos, y rellenar la siguiente tabla:

Q (l)												
t _{cierre} (ms)												
P _{inicial} (bar)												
P _{final} (bar)												

TABLA 1

Presentación de resultados

Datos: $a=1400\text{m/s}$ $L=63.66\text{m}$
 $\rho=1000\text{kg/m}^3$ $R=11\text{mm}$
 $E_{\text{Cu}}=1.1 \times 10^5\text{MPa}$ $e=1\text{mm}$

Calcular el tiempo crítico y comparar el tiempo de los cierres llevados a cabo. Clasificar cada cierre en función de si ha sido rápido o lento. Rellenar la tabla 2.

$t_{\text{cri}}=$

Tiempo de cierre (s)	Tipo de cierre

TABLA 2

Calcular los incrementos de presión teóricos producidos para los diferentes caudales, en función del tipo de cierre, y compararlos con la medida experimental. Completar la tabla 3 con los valores obtenidos.

Q (l)													
t_{cierre} (ms)													
ΔP_{exp} (bar)													
$\Delta P_{\text{teórico}}$ (bar)													

TABLA 3

Representar en una misma gráfica $\Delta P_{\text{teórico}}$ y ΔP_{exp} en función del tiempo de cierre, para cada uno de los caudales.

¿Qué conclusión se puede extraer de la gráfica anterior?

Datos: $a=1400\text{m/s}$ $L= 63.66\text{m}$
 $\rho =1000\text{kg/m}^3$ $R=11\text{mm}$
 $E_{\text{Cu}}=1.1 \times 10^5\text{MPa}$ $e=1\text{mm}$

Medida de caudal por medidor de impacto

Práctica de laboratorio de Ingeniería Fluidomecánica



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y FLUIDOMECÁNICA
ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Medida de caudal por medidor de impacto

Práctica de laboratorio de Ingeniería Fluidomecánica

Objetivo

Determinar teóricamente el caudal de un chorro de agua mediante la medida de la fuerza de impacto ejercida por el chorro sobre una superficie. Comparar este valor con el obtenido experimentalmente con un caudalímetro.

Descripción de la instalación

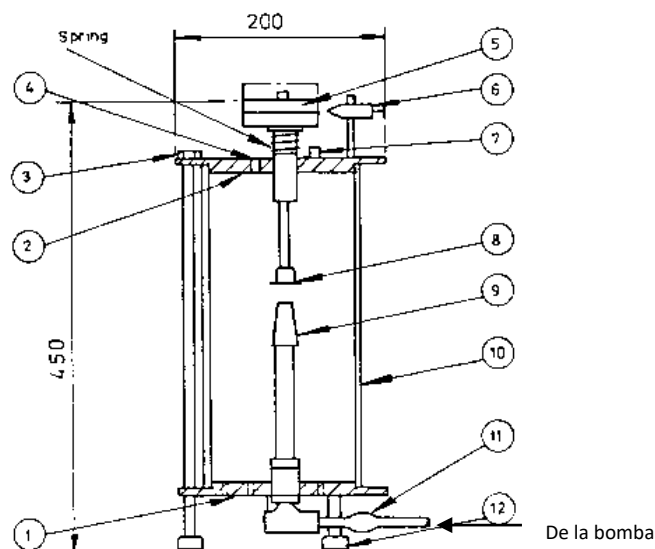


FIGURA 1: MEDIDOR DE IMPACTO

El equipo experimental (Figura 1) consiste en un **cilindro de metacrilato** (10) provisto de tornillos de nivelación y nivel de burbuja en la tapa superior. Una bomba introduce el agua por una **tubería** (11), la cual atraviesa la tapa inferior del cilindro (1) y termina en una **tobera** (9) que origina un chorro de gran velocidad. El chorro incide sobre una **superficie de impacto** (8) montada en el extremo inferior de un vástago que pasa a través de la tapa superior del cilindro (2). En el extremo superior del vástago va montado un **disco** (5) sobre el que se colocan las **pesas** que equilibran la fuerza ejercida por el chorro sobre la superficie de impacto. La posición inicial del disco se fijará mediante una **aguja indicadora** (6).

Teoría

En la Figura 2 se muestra la forma teórica que tiene el chorro dentro del elemento de medida de caudales. Como se muestra, al chocar contra la superficie de impacto, el flujo describe un cambio de dirección de 120° .

La ecuación a utilizar para la determinación del caudal del chorro será la de conservación de cantidad de movimiento. Esta ecuación se aplicará para un volumen de control VC cuyas paredes se encuentran lejos de la zona de cambio de dirección del flujo. Para el eje y, la ecuación toma la forma:

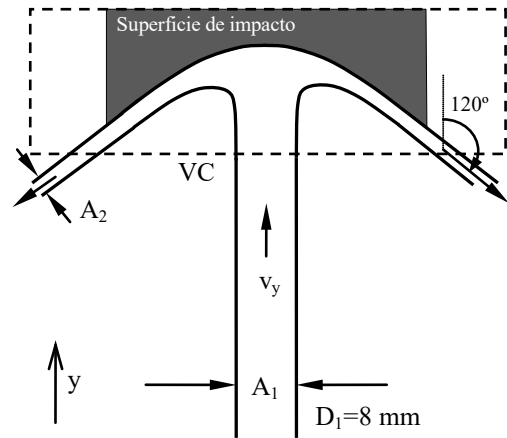


FIGURA 2: ESQUEMA DEL CHORRO.

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho v_y dV + \int_{S_c} \rho v_y (\bar{v}_r \cdot \bar{n}) dS = \sum F_y \quad (1)$$

Considerando que el flujo es estacionario y haciendo la hipótesis de que la sección de salida A_2 es igual a la sección de entrada A_1 , ($A_1 = A_2 = A$), el desarrollo de Ec. 1 conduce a:

$$\rho v_y (-v_y) A - \sin(30) \rho v_y (v_y) A = -F_y \quad (2)$$

Teóricamente, la fuerza que ejerce el chorro de agua sobre la superficie de impacto debe ser igual al peso de todas las pesas ubicadas sobre el disco: $F_y = m \cdot g$. Teniendo en cuenta que $v_y = Q/A$, sustituyendo en la expresión de la fuerza, se obtiene:

$$Q_t = \sqrt{\frac{2 \cdot A \cdot g \cdot m}{3 \cdot \rho}} \quad (3)$$

donde Q_t es el caudal teórico, A es el área de la tobera de salida del chorro, g es la aceleración de la gravedad, m es la masa de las pesas y ρ es la densidad del agua.

Práctica

1. En reposo, hacer coincidir la aguja indicadora con la línea de equilibrio del disco, cuidando de que la aguja no interfiera con el movimiento vertical de éste (ver Figura 3).

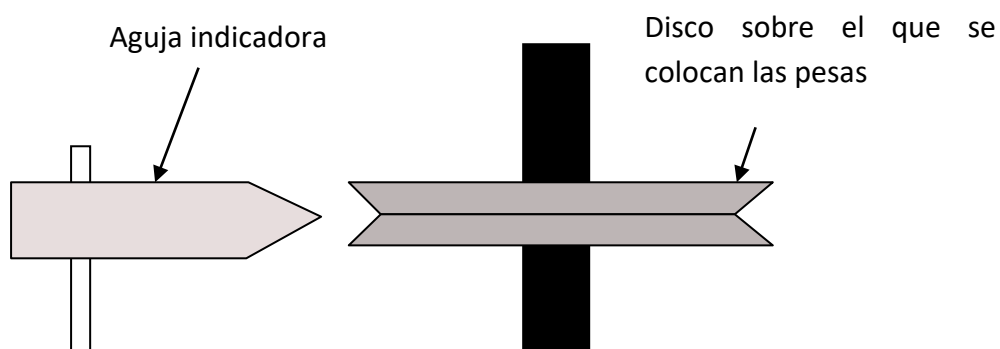


FIGURA 3: POSICIÓN DE EQUILIBRIO

2. **Colocar pesas calibradas sobre el disco.** La línea indicadora de equilibrio debe descender ligeramente por debajo de la aguja.
3. Al **abrir la válvula de la bomba**, un chorro de 8 mm de diámetro impacta sobre la superficie. Haciendo uso de la válvula, **regular el caudal** hasta conseguir que el disco vuelva a su posición original (de equilibrio). En ese momento, apuntar el caudal.
4. Repetir los puntos 2 y 3 **variando la masa total depositada sobre el disco** hasta **completar 6 medidas diferentes**.

Rellenar la siguiente tabla:

Nº de medida	Medidor de impacto		Caudal volumétrico real (caudalímetro)
	m (g)	Q_t (l/h)	Q_{real} (l/h)
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Resultados

Hallar la curva de calibración del aparato, es decir, representar gráficamente Q_t frente a Q_{real} , estando los dos expresados en l/h, y obtener un coeficiente medio de ajuste experimental, k:

$$Q_{real} = kQ_t$$

Pérdidas de carga

Práctica de Laboratorio de Ingeniería Fluidomecánica



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y FLUIDOMECÁNICA
ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Pérdidas de carga

Práctica de Laboratorio de Ingeniería Fluidomecánica

Objetivo

Determinar de forma experimental las pérdidas de carga en un sistema de tuberías: El coeficiente de pérdidas locales en un estrechamiento-ensanchamiento y en una válvula de compuerta, además del cálculo del factor de fricción en una tubería recta. Bajo ciertas condiciones de flujo aparece cavitación en el estrechamiento-ensanchamiento.

Descripción de la instalación

La bomba (2) aspira el agua desde el depósito (1) y la suministra en circuito cerrado al sistema de tuberías objeto de medida. El caudal bombeado en cada instante se mide con el rotámetro (3). Los manómetros P_1 y P_2 miden respectivamente las presiones aguas arriba y aguas abajo del estrechamiento-ensanchamiento (4) de tamaño característico $d_e = 20 \text{ mm}$. Los manómetros P_2 y P_3 miden respectivamente las presiones aguas arriba y aguas abajo de la válvula (4) de diámetro $d_v = 20 \text{ mm}$. El manómetro diferencial ΔP_{tub} mide la caída de presión en el tramo de tubería recta (5) de longitud $L = 800 \text{ mm}$ y diámetro $d = 20 \text{ mm}$.

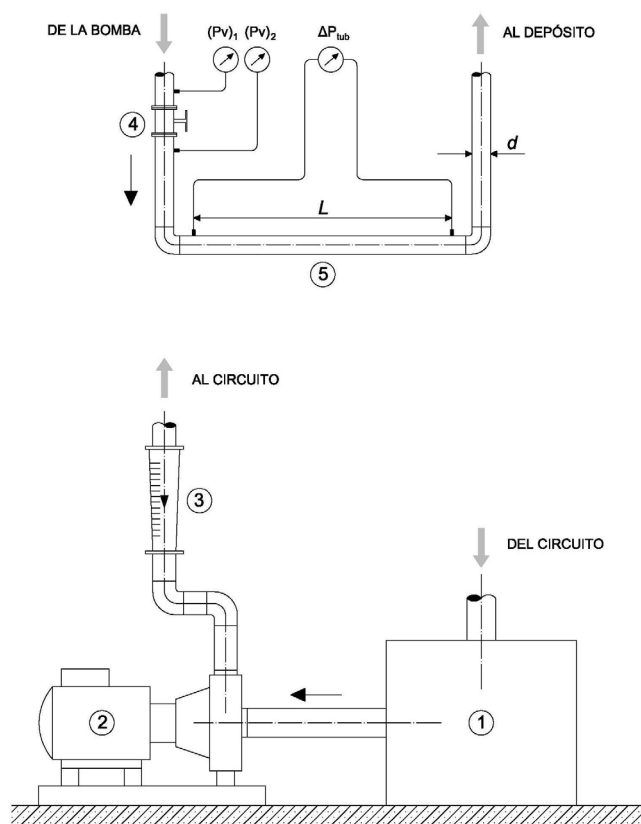


FIGURA 1: ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN

Funcionamiento

ANTES DE PONER EN MARCHA LA BOMBA asegurarse de que la válvula roja 4 se encuentra **CERRADA**

Al poner en funcionamiento la bomba (2), por la instalación circula un determinado caudal Q que se mide con el rotámetro (3). La regulación del caudal se realiza con la variación del grado de apertura de la válvula (4). Para cada valor de caudal se generan unas pérdidas de presión en el estrechamiento, en la válvula (4) y en el tramo de tubería recta (5).

Las diferencias de presiones ΔP medidas con los manómetros se relacionan con las pérdidas de carga expresadas como alturas h de la columna de líquido del siguiente modo:

$$\Delta P = \rho gh \quad (1)$$

Las pérdidas de carga en componentes de tubería expresadas como alturas (m) se relacionan con el coeficiente de pérdida de carga local k de la siguiente manera:

$$h_L = k \frac{1}{d^4} \frac{8Q^2}{\pi^2 g} \quad (2)$$

Las pérdidas de carga en tubería recta expresadas como alturas (m) se relacionan con el factor de fricción f a través de la siguiente expresión:

$$h_f = f \frac{L}{d^5} \frac{8Q^2}{\pi^2 g} \quad (3)$$

En las expresiones anteriores:

ΔP – diferencia de presiones (Pa)

ρ – densidad del fluido (kg/m^3)

g – aceleración de la gravedad (m/s^2)

Q – velocidad del flujo (m^3/s)

$h = h_f$ – pérdidas por fricción (m); ó $h = h_L$ - pérdidas locales (m)

k – coeficiente de pérdidas locales

f – factor de fricción

Procedimiento para la toma de datos

1. **Arrancar la bomba. COMPROBAR QUE LA VÁLVULA (4) ESTÁ CERRADA** y acto seguido pulsar el botón verde de puesta en marcha de la bomba en la botonera de arranque/parada.
2. **Variar el grado de apertura de la válvula (4).** Girar suavemente el volante de la válvula (4) y comprobar que circula el caudal adecuado por el rotámetro (3). Se realizarán mediciones

para los caudales indicados en la tabla de datos. Los valores medidos de caudal en el rotámetro se multiplicarán por el factor de corrección 0.85 para su uso en el cálculo de los coeficientes. Este factor tiene en cuenta las desviaciones en la medida debido a que la longitud de tubería recta aguas arriba del rotámetro es menor que la recomendada por el fabricante ya que el espacio de instalación disponible es insuficiente para cumplir con este requisito.

Una vez aparezca la cavitación en el estrechamiento-ensanchamiento se continuará abriendo la válvula para conseguir las presiones P_2 indicadas en la tabla de datos y se continuará con las medidas.

3. **Anotar las mediciones de los instrumentos.** Anotar las mediciones de presión en cada uno de los manómetros (P_1 , P_2 , P_3 y ΔP_{tub}) y el caudal que mide el rotámetro Q .
4. **Cambiar el grado de apertura de la válvula (4).** Modificar el grado de apertura de la válvula (4) y repetir el paso 3.
5. **Finalizar la práctica. CERRAR VÁLVULA (4)** y luego pulsar el botón rojo de parada de la bomba en la botonera de arranque/parada.

Presentación de resultados

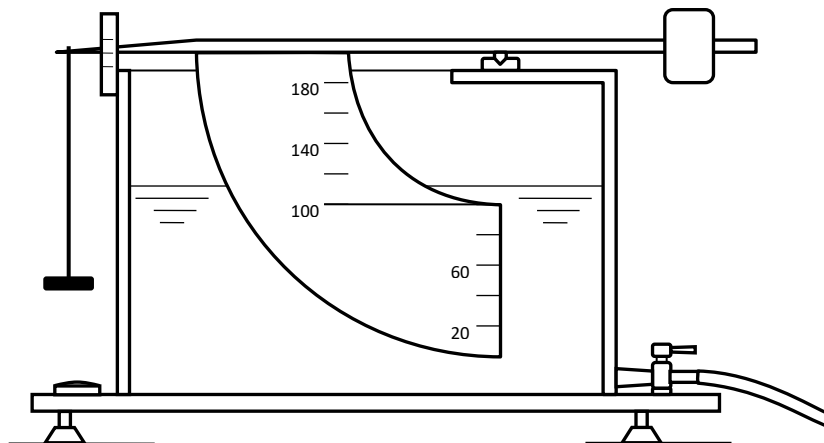
1. Calcular el número de Reynolds para los diferentes grados de apertura de la válvula.
2. Calcular el coeficiente de pérdidas del estrechamiento-ensanchamiento, con el uso de las ecuaciones (1) y (2), para diferentes números de Reynolds.
3. Calcular el coeficiente de pérdidas de la válvula, con el uso de las ecuaciones (1) y (2), para diferentes grados de apertura de la misma.
4. Calcular el factor de fricción en tubería recta, con el uso de las ecuaciones (1) y (3), para diferentes números de Reynolds
5. Representar el coeficiente de pérdidas del estrechamiento-ensanchamiento, el coeficiente de pérdidas de la válvula y el factor de fricción frente al número de Reynolds.

TABLA DE DATOS

MEDIDAS					CALCULADAS			
Q	P ₁	P ₂	P ₃	ΔP	Re	k _e	k _v	f
l/h	bar	bar	bar	kPa				
0								
600								
1000								
1400								
1800								
2200								
2400								
2600								
2700								
		1						
		0.9						
		0.8						
		0.7						
		0.6						
		0.5						
		0.4						

Presión hidrostática sobre una superficie plana

Práctica de laboratorio de Ingeniería Fluidomecánica



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y FLUIDOMECÁNICA
ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Presión hidrostática sobre una superficie plana

Práctica de laboratorio de Ingeniería Fluidomecánica

Objetivo

Determinar experimental y numéricamente el momento ejercido por la presión hidrostática sobre una superficie plana rectangular y vertical. Se compararan los dos valores.

Descripción del aparato

En un depósito se sumerge un cuadrante tórico de sección rectangular. Un brazo adosado al cuadrante permite suspenderlo para que pivote libremente en torno a un eje. El par ejercido por el peso del cuadrante tórico se puede equilibrar gracias a un contrapeso ajustable en un extremo del brazo. En el otro extremo se coloca una varilla con diferentes masas para contrarrestar el par ejercido por la presión hidrostática. Una escala sobre el cuadrante permite determinar su profundidad de inmersión. El depósito se vacía a través de la llave de descarga. Un nivel de burbuja y un pie ajustable permiten nivelar el conjunto.

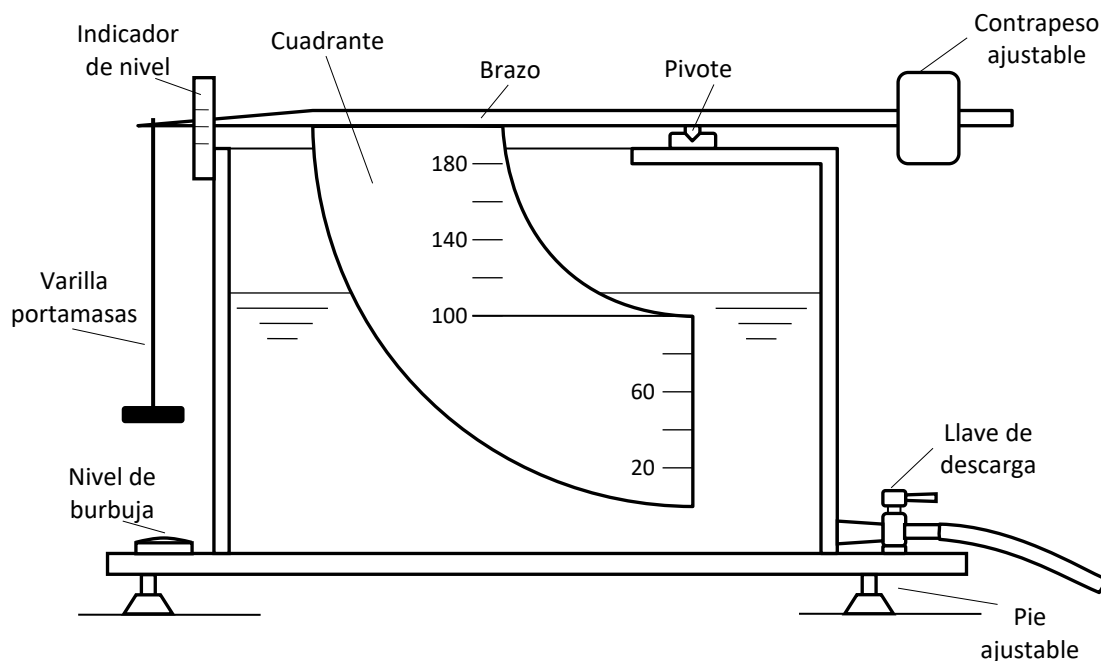


FIGURA 1: ESQUEMA

Funcionamiento

Cuando el cuadrante se encuentra sumergido la presión hidrostática del agua actúa sobre todas sus caras mojadas.

Las fuerzas de presión sobre las caras planas anterior y posterior son iguales y de sentidos contrario, por lo que se anulan mutuamente. Además, estas fuerzas son paralelas al eje de

giro por lo que no ejercen momento. El cuanto a las dos caras curvas, su centro coincide con el eje de giro, por lo que la línea de acción de las fuerzas de presión sobre estas caras pasa por el eje de giro A y tampoco ejercen momento respecto de A. La única fuerza de presión que ejerce momento respecto de A es la ejercida sobre la cara plana rectangular vertical, superficie la sombreada de la Figura 2. Si el brazo está nivelado este momento se contrarresta con el ejercido por las masas que cuelgan de su extremo.

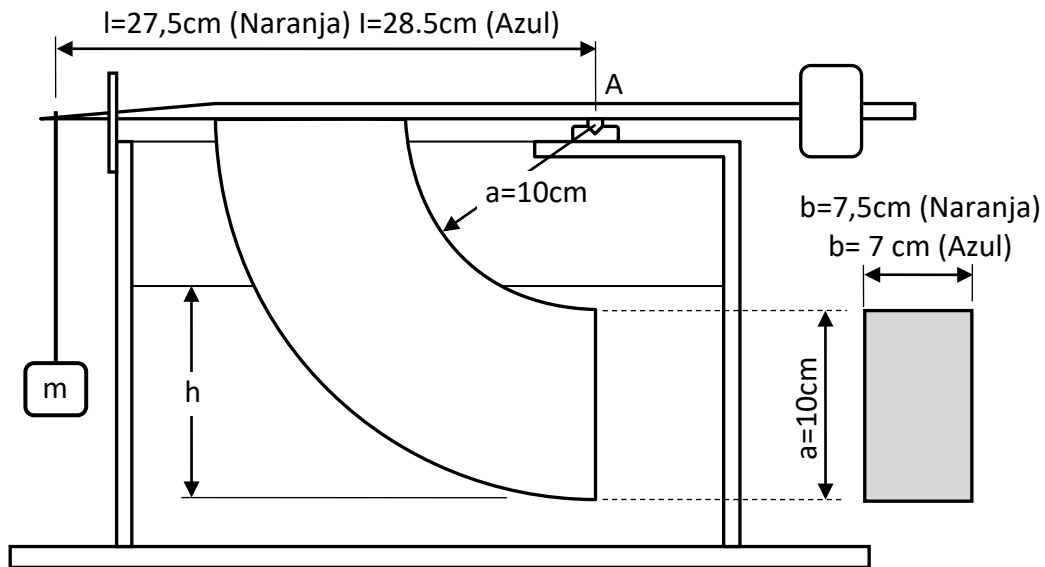


FIGURA 2: DIMENSIONES PARA LOS DOS MONTAJES (NARANJA Y AZUL)

El momento ejercido por las masas que cuelgan será su peso por la distancia de la línea de acción al pivote A. El módulo de la fuerza hidrostática es el volumen del prisma de presiones. Su línea de acción es perpendicular a la superficie sobre la que actúa (horizontal en este caso) y pasa por el centro de gravedad de dicho prisma. Conocido el módulo de la fuerza y su punto de aplicación se calcula el momento ejercido respecto de A. Habrá que distinguir dos casos:

- Cuando la superficie vertical del cuadrante se encuentra completamente sumergida ($h > a$).
- Cuando el agua no cubre completamente la superficie vertical del cuadrante ($h < a$).

Procedimiento para la toma de datos

- Nivelar el tanque.** Girar el tornillo del pié ajustable hasta que el nivel de burbuja indique la horizontalidad. Para no perder la horizontalidad evitar mover el aparato en el transcurso de la práctica.
- Equilibrar el momento ejercido por el peso del cuadrante.** Con el depósito vacío y sin masas ni varilla portamasas en el extremo del brazo pivotante, girar el contrapeso hasta que el brazo pivotante quede horizontal. La parte plana del extremo del brazo pivotante debe estar en enrasada con la línea central del indicador de nivel. No volver a tocar el contrapeso en el transcurso de la práctica.

3. **Cargar el brazo pivotante.** Colocar la varilla en la ranura del extremo del brazo y encajar en ella discos de 50 g hasta alcanzar una masa total de 450 g. Téngase en cuenta que la varilla portamasas tiene una masa de 50 g. El brazo quedará inclinado hacia abajo, haciendo tope en el extremo inferior del indicador de nivel.
4. **Llenar el depósito.** Cerrar la llave de descarga y verter agua en el depósito hasta llenarlo completamente. El brazo deberá inclinarse hacia arriba hasta hacer tope con el extremo superior del indicador de nivel.
5. **Equilibrar.** Vaciar lentamente el depósito abriendo la llave de descarga hasta que el brazo recupere la horizontalidad. Cuando el brazo está nivelado, la fuerza sobre la cara vertical del cuadrante y el peso del extremo del brazo pivotante ejercen momentos iguales y opuestos sobre el eje A. Apuntar la masa total del extremo del brazo m_e y la profundidad de inmersión h_e que marca la escala impresa sobre la pared frontal del cuadrante.
6. Quitar un disco de 50 g de la varilla y repetir el paso anterior hasta eliminar todas las masas.
7. **Finalizar la práctica.** Quitar la varilla-soporte. Dejar abierta la llave de descarga. Girar aleatoriamente el contrapeso y el tornillo del pié.

Presentación de resultados

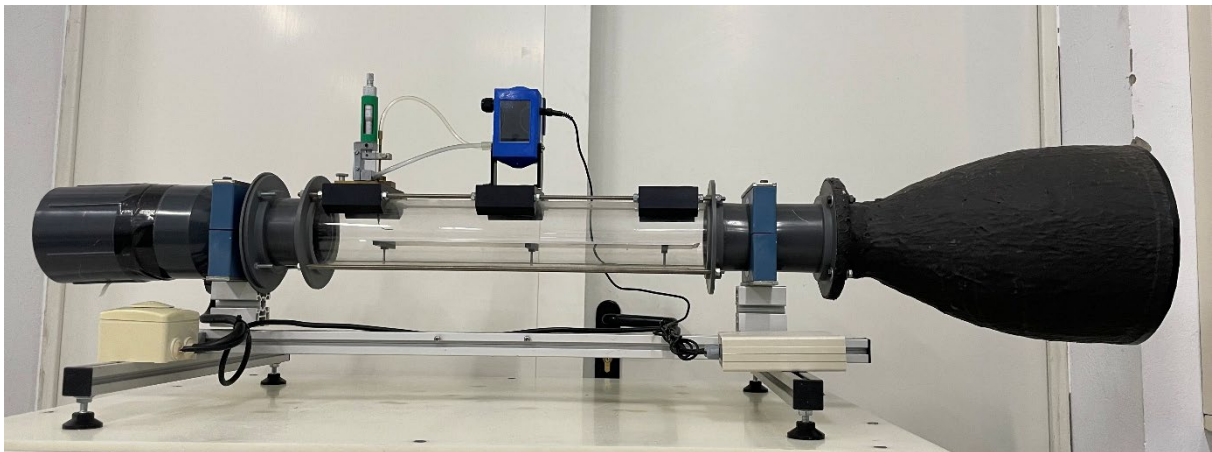
1. Calcular teóricamente la expresión de la fuerza F ejercida por el agua sobre la cara vertical del cuadrante en función de la profundidad h en las dos situaciones siguientes:
 - c) Cuando la superficie vertical del cuadrante se encuentra completamente sumergida ($h > a$).
 - d) Cuando el agua no cubre completamente la cara vertical del cuadrante ($h < a$).
2. Calcular la expresión de la distancia $y_F(h)$ desde el punto de aplicación de F hasta A en función de la profundidad h para las dos situaciones.
3. Calcular teóricamente la expresión del momento $M_t(h)$ producido por el agua respecto de A en función de la profundidad de inmersión h para las dos situaciones.
4. A partir de los datos experimentales, calcular el momento M_e ejercido por el agua respecto de A para cada profundidad h_e y rellenar la siguiente tabla.

Masa (g) m_e	Profundidad (m) h_e	Momento (N·m) M_e
400		
350		
300		
250		
150		
50		

5. Representar el momento calculado a partir de los datos experimentales M_e frente al momento calculado teóricamente M_t .

Medida de una capa límite turbulenta

Práctica de Laboratorio de Mecánica de Fluidos



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y FLUIDOMECÁNICA
ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Medida de una capa límite turbulenta

Práctica de Laboratorio de Mecánica de Fluidos

Objetivo

Se pretende caracterizar la capa límite de una corriente uniforme de aire que circula a lo largo de una placa plana paralela a la corriente no perturbada. La placa se considera de espesor despreciable y envergadura infinita.

Descripción de la instalación

La instalación consta de un cilindro transparente de plástico con la placa en su interior. El aire es aspirado mediante un ventilador colocado en la parte posterior. Las medidas de velocidad se realizarán por medio de un tubo de Pitot cuya posición vertical puede variarse de forma precisa.

Funcionamiento

Para la realización de la práctica, debe ajustarse la velocidad del ventilador por medio de su variador hasta obtener las medidas detalladas en la Tabla 1. Para ajustar la distancia a la que se encuentra el tubo de Pitot se cuenta con un micrómetro. El micrómetro es un aparato destinado a la medida precisa de longitudes. El empleado para la medida de longitudes consta de una regla dividida en partes iguales, sobre la que desliza una reglilla graduada (nonius). El aparato con el que contamos en el laboratorio tiene una **precisión de 0,5 mm por vuelta**.

Procedimiento para la toma de datos

1. Anotar los datos de presión ambiente y temperatura ambiente utilizando el barómetro y el termómetro de pared del laboratorio.
2. Ajustar la velocidad del ventilador **hasta leer 10 Pa** en el manómetro del Pitot a una distancia de la placa de al menos 15 mm. Tener en cuenta que la dinámica del proceso es relativamente lenta.
3. Completar las **columnas 2 y 3** de la Tabla 1. La primera columna de la tabla es la resolución espacial, la segunda es la distancia “y” vertical, la tercera es la presión que mide el Pitot. La primera fila corresponde a la medida más alejada a la placa, la última a la más próxima. La medida del Pitot para la posición más alejada es (como se ha dicho en el punto 1) 10 Pa.

Presentación de resultados

Los datos conocidos son los siguientes:

- Distancia al borde de ataque de la placa = 0,4 m
- Viscosidad del aire = $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$

Los datos a calcular son los siguientes:

- Densidad ambiente
- Perfil experimental de velocidades (columna 5) calculado usando la siguiente ecuación:

$$V_{x,exp} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{amb}}}$$

- Calcular el número de Reynolds local $Re_x = \frac{\rho U_{\infty} x}{\mu}$

- Calcular el espesor de capa límite turbulenta: $\delta_t = 0,37 \frac{x}{\text{Re}_x^{1/5}}$
- Calcular el perfil teórico de velocidades (columna 6): $V_{x,teo} = U_\infty \left(\frac{y_{exp}}{\delta_t} \right)^{1/7}$
- Rellenar la tabla 2 con los valores $\bar{V}_x$ y $(U_\infty - \bar{V}_x)$. Siendo $\bar{V}_x$ el valor medio de dos medidas consecutivas

Gráficas

Representar gráficamente los perfiles de velocidad experimental y teórico frente a y_{exp}

Otros cálculos

Determinar el espesor de desplazamiento de la capa límite. El área de la superficie que tiene por frontera las líneas $(U_\infty - \bar{V}_x)$ y el eje y está definido por la expresión:

$$\delta_1 U_\infty = \int_0^\delta (U_\infty - V_x) dy$$

Luego el cálculo del espesor de desplazamiento se realizará mediante la fórmula:

$$\delta_1 = \frac{1}{U_\infty} \sum_i (U_\infty - \bar{V}_{x,i}) \Delta y_i$$

TABLA 1. ADQUISICIÓN DE DATOS Y PERFILES DE VELOCIDAD

Δy (mm)	y_{exp} (mm)	Δp (Pa)	$V_{x,exp}$ (m/s)	$V_{x,teo}$ (m/s)
2 mm (4 vueltas)	15,00	10		
	13,00			
	11,00			
1 mm (2 vueltas)	9,00			
	8,00			
	7,00			
	6,00			
	5,00			
0,5 mm (1 vuelta)	4,00			
	3,50			
	3,00			
	2,50			
	2,00			
	1,50			
0,25 mm (1/2 vuelta)	1,00			
	0,75			
	0,50			
	0,25			

TABLA 2. CÁLCULO DEL ESPESOR

Y_{exp} (mm)	Δy (mm)	V_x (m/s)	$\bar{V}_x$ (m/s)	$(U_{\infty} - \bar{V}_x)$
0,25				
0,50	0,25			
0,75	0,25			
1,00	0,25			
1,50	0,50			
2,00	0,50			
2,50	0,50			
3,00	0,50			
3,50	0,50			
4,00	0,50			
5,00	1,00			
6,00	1,00			
7,00	1,00			
8,00	1,00			
9,00	1,00			
11,00	2,00			
13,00	2,00			
15,00	2,00			

Experimento de Reynolds

Práctica de Laboratorio de Mecánica de Fluidos



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y FLUIDOMECÁNICA
ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Experimento de Reynolds

Práctica de Laboratorio de Mecánica de Fluidos

Objetivo

El objetivo de esta práctica es la observación experimental de un flujo laminar y uno turbulento en una tubería.

Descripción de la instalación



La instalación (ver figura) consta de un tubo vertical montado sobre un soporte. Dicho tubo vertical se alimenta a través de una tubería conectada a un pequeño depósito de agua ubicado en la parte superior. Justo por encima de éste último depósito, se encuentra otro relleno de tinta y conectado al primero. El depósito de agua dispone de un rebosadero y una tobera de entrada de plástico donde se inyecta un hilo de tinta en el tubo principal sobre el que se hace la observación.

Funcionamiento

Para la realización de la práctica será necesario abrir la válvula que se encuentra en la pared, de manera que podamos dotar de caudal al sistema. Posteriormente, regularemos el caudal que circula por el tubo con la válvula situada a la salida del tubo. El flujo de tinta será regulado con la válvula fijada en el depósito superior. El caudal que circula por el tubo se medirá con ayuda de la cubeta graduada y un cronómetro.

Procedimiento para la toma de datos

1. Fijar un caudal de agua en el tubo muy pequeño.
2. **Abrir** la válvula del depósito de tinta para que descargue el colorante. Observar el comportamiento del colorante en el interior del tubo. **Cerrar** la válvula de colorante
3. Determinar el caudal. Para obtener dicho caudal, cronometrar el tiempo que tarda en llenarse un determinado volumen de agua en la cubeta graduada. (Véase Tabla 1)
4. Repetir los pasos 1, 2 y 3 fijando ahora un caudal ligeramente superior hasta que se observe un flujo turbulento.

Presentación de resultados

Rellenar la tabla 1. Explicar razonadamente los resultados obtenidos en cada caso.

TABLA 1. TOMA DE DATOS

Δ Volumen (mL)	Tiempo (s)	Nº Reynolds	Tipo de flujo observado

Datos:

$$D_{\text{tubo}} = 1 \text{ cm}$$

$$\rho_{\text{agua}} = 1000 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\mu_{\text{agua}} = 0,001 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

Caracterización de la inestabilidad de Couette-Taylor

Práctica de Laboratorio de Mecánica de Fluidos



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y FLUIDOMECÁNICA
ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS

CARACTERIZACIÓN DE LA INESTABILIDAD DE COUETTE- TAYLOR

Práctica de Laboratorio de Mecánica de Fluidos

Objetivo

Caracterizar experimentalmente la inestabilidad de Couette - Taylor

Fundamento Teórico

El flujo establecido entre dos cilindros coaxiales, donde cualquiera de ellos puede estar girando, es conocido con el nombre de Flujo de Couette.

El perfil de la velocidad tangencial, v_θ , correspondiente a un flujo estacionario de un fluido de densidad ρ y viscosidad μ , situado entre dos cilindros coaxiales de radios R_0 y R_1 , que giran a velocidades de rotación ω_0 y ω_1 , está dado por la expresión:

$$\frac{v_\theta}{R_0 \omega_0} = \frac{\frac{r}{R_0}}{\frac{R_1^2}{R_0^2} - 1} \left(\frac{\omega_1 R_1^2}{\omega_0 R_0^2} - 1 \right) - \frac{\frac{R_0}{r}}{1 - \frac{R_0^2}{R_1^2}} \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} - 1 \right)$$

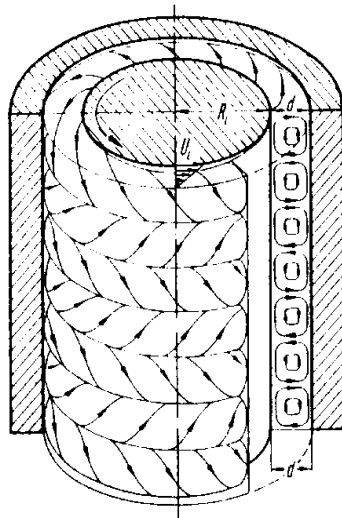


FIGURA 1: TORBELLINOS DE TAYLOR ENTRE CILINDROS COAXIALES

Para unas determinadas condiciones de velocidad de rotación y separación entre cilindros este perfil de velocidad se desestabiliza apareciendo una configuración relativamente estable de vórtices de Taylor. La Figura 1 muestra una imagen esquemática de esta corriente con torbellinos celulares, que llenan por completo todo el espacio comprendido entre ambos cilindros. Los torbellinos, con sus ejes en dirección angular, alternan regularmente su sentido de giro y su tamaño característico coincide con e (holgura entre cilindros). Conviene destacar que este flujo no es en

absoluto turbulento. Para estas condiciones, la turbulencia aparecería sólo a velocidades de rotación muy altas.

Lord Rayleigh, en 1916, dedujo un criterio de estabilidad para un flujo ideal entre dos cilindros rotantes en base a consideraciones energéticas: “un flujo rotante ideal es inestable si el cuadrado de su circulación decrece con el radio”, es decir: $\omega_1 R_1^2 < \omega_0 R_0^2$

Este criterio significa que, bajo condiciones de inestabilidad, una partícula fluida radialmente desplazada no encontraría el gradiente de presiones suficiente para regresar a su posición inicial.

De este criterio se puede establecer que:

Cilindro Interior	Cilindro Exterior	Estado
Rotando	Reposo	INESTABLE
Reposo	Rotando	ESTABLE
Rotando	Rotando	INESTABLE

Realmente, la viscosidad tiende a estabilizar y por lo tanto, suaviza los criterios anteriores. Taylor (1923) desarrolló, mediante el método de las perturbaciones, un criterio de estabilidad para los fluidos viscosos, obteniendo unas ecuaciones sumamente complejas. Sin embargo, cuando se puede admitir que $e \ll R_0$, el problema se simplifica y la estabilidad del flujo sólo depende de un parámetro denominado número de Taylor:

$$Ta^2 = R_0 e^3 \frac{\omega_0^2 - \omega_1^2}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)^2}$$

Las inestabilidades, que realmente originan una corriente secundaria, dan lugar a un aumento del par de rozamiento respecto al teórico (dado por la teoría de flujo laminar) necesario para el mismo número de Reynolds.

Para el flujo particular que se va a simular en esta práctica, correspondiente al que se origina en el espacio anular entre dos cilindros concéntricos, en el que el interior gira [$\omega_0 = \omega$] y el exterior se mantiene en reposo [$\omega_1 = 0$], el perfil de velocidades para el flujo estable será:

$$v_\theta = \frac{\omega r}{\left(1 + \frac{e}{R_0}\right)^2 - 1} \left[\frac{\left(1 + \frac{e}{R_0}\right)^2}{\left(\frac{r}{R_0}\right)^2} - 1 \right]$$

El número de Taylor crítico para el cual aparece la primera inestabilidad de Taylor es:

$$Ta = Re \sqrt{\frac{e}{R_0}} = \frac{\rho e \omega_0 R_0}{\mu} \sqrt{\frac{e}{R_0}} \approx 42$$

La aparición de este tipo de torbellinos con números de Taylor algo mayores, no significa que tenga lugar un flujo turbulento, sino que la corriente permanece laminar y ordenada después de haber rebasado considerablemente el límite de estabilidad. La

turbulencia se desencadena con números de Taylor (y por tanto números de Reynolds) muy por encima del límite de estabilidad.

En resumen, existen tres dominios distintos caracterizados por los siguientes números de Taylor:

Nº de Taylor	Tipo de Corriente	Nombre Específico
$Ta < 42$	Laminar	COUETTE
$42 < Ta < 400$	Laminar	Torbellinos de Taylor
$Ta > 400$	Turbulenta	Turbulencia

Este tipo de flujos tiene gran importancia en los cojinetes de las máquinas, ya que los flujos estudiados son análogos a los que se producen en los soportes lisos de los árboles de las máquinas rotantes. Las situaciones de funcionamiento que dan lugar a las inestabilidades son habituales en las aplicaciones industriales.

Descripción de la instalación

El simulador de Couette-Taylor muestra diferentes regímenes de giro entre dos cilindros concéntricos. Como líquido se utiliza una mezcla de agua y glicerina sembrada con polvo de aluminio con el único objeto de visualizar los vórtices circulares.

A medida que se aumenta la velocidad de rotación a partir del reposo, se observa la formación de una serie de franjas claras y oscuras dispuestas alternativamente según la dirección axial. Estas franjas son consecuencia de la migración de las partículas sólidas formando zonas de mayor o menor concentración, causada por las fuerzas centrífugas asociadas a los torbellinos toroidales superpuestos. La dimensión axial característica de esta estructura es la separación entre cilindros.

Si aumenta la velocidad de rotación, se puede ver una perturbación acimutal que recibe el nombre de segunda inestabilidad de Taylor. El aumento de la velocidad de rotación lleva al flujo a una situación turbulenta desarrollada, donde es difícil distinguir estructuras coherentes organizadas

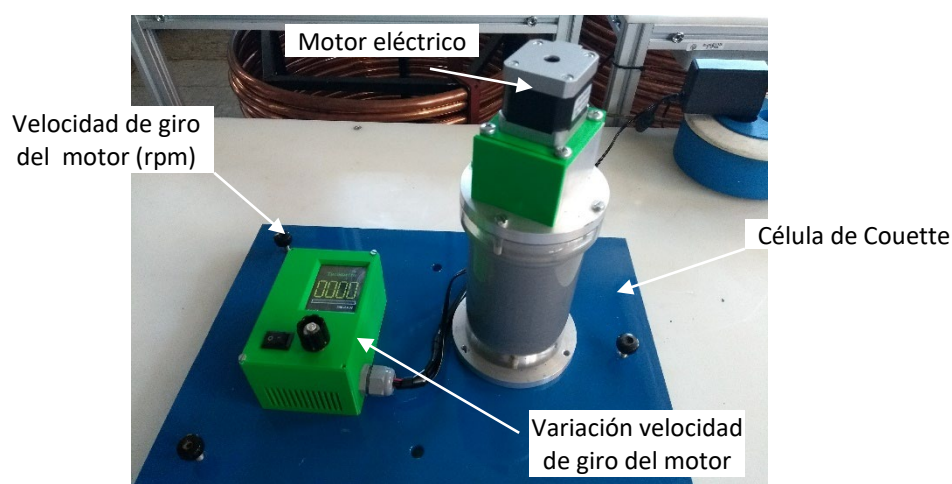


FIGURA 2: EXPERIMENTO DE COUETTE - TAYLOR

Funcionamiento

El aparato (Figura 2) está formado por un cilindro interior de 30 mm de radio exterior y de un cilindro exterior de 35 mm de radio interior. Por tanto, la holgura entre ambos cilindros es $e = 5$ mm.

El cilindro interior está sujeto a un motor, cuya velocidad de rotación puede ser fijada fácilmente.

Fluido empleado

El fluido empleado es una mezcla de agua y glicerina (30-70%), conteniendo también unas partículas de aluminio de dimensión característica del orden de micras. Debido a la elevada densidad del fluido en suspensión y a la dimensión despreciable de las partículas, los efectos de decantación debidos a la gravedad son despreciables durante la experiencia. Sin embargo, si el aparato se deja en reposo durante períodos de tiempo largos, las partículas se depositan en el fondo. Entonces es necesario poner el sistema a la máxima velocidad durante un minuto con el fin de que se restablezca la dispersión homogénea.

Procedimiento para la toma de datos

Comprobar que la dispersión de las partículas sólidas en el flujo es homogénea (en caso contrario, poner el sistema en movimiento a la máxima velocidad durante un minuto con el fin de reestablecer la dispersión homogénea).

Hacer girar el cilindro interior a baja velocidad. Observar que las partículas aparecen dispersas de una forma homogénea y que su trayectoria describe círculos concéntricos característicos de un flujo laminar entre caras paralelas.

Aumentar la velocidad de giro lentamente, por medio del potenciómetro de la fuente de alimentación, hasta observar la aparición de las primeras franjas claras y oscuras. Mantener esta velocidad. Las franjas claras y oscuras van a ir apareciendo poco a poco a lo largo de toda la altura del cilindro, figura 3a.

Medir la velocidad de giro con el fin de calcular el nº de Taylor correspondiente a la primera inestabilidad. El valor del nº de Taylor obtenido no será igual al valor correspondiente al caso bidimensional (longitud del cilindro mucho mayor que el radio) y dependerá esencialmente de la precisión de la medida de la velocidad de rotación y de las propiedades del fluido.

Datos de interés:

$$\rho = 1077 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 25,34 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$e = 5 \text{ mm}$$

$$R_0 = 30 \text{ mm}$$

Se puede demostrar experimentalmente que el flujo con torbellinos sigue siendo laminar. Para ello, cortar la corriente de alimentación del motor por medio del interruptor de alimentación (y no del potenciómetro). El cilindro interior se detiene instantáneamente, pero las franjas persisten en el primer momento. La difusión de las partículas es entonces muy lenta, de tipo molecular.

Determinar el tiempo T , entre la detención del cilindro y la formación de la mezcla homogénea, y calcular el orden de magnitud del coeficiente de difusión, D , por medio de:

$$D = \frac{e^2}{T}$$

puesto que la distancia máxima que deben recorrer las partículas es del orden de la separación entre los cilindros.

Poner nuevamente en marcha el sistema y aumentar la velocidad de giro hasta que se formen anillos. Se procede entonces al aumento de la velocidad de giro hasta que se produzca la aparición de las inestabilidades acimutales, figura 3b.

Medir la velocidad de giro y calcular el n° de Taylor correspondiente. Detener bruscamente el motor y mostrar que las franjas permanecen fijas: la segunda inestabilidad de Taylor tiene todavía un carácter laminar.

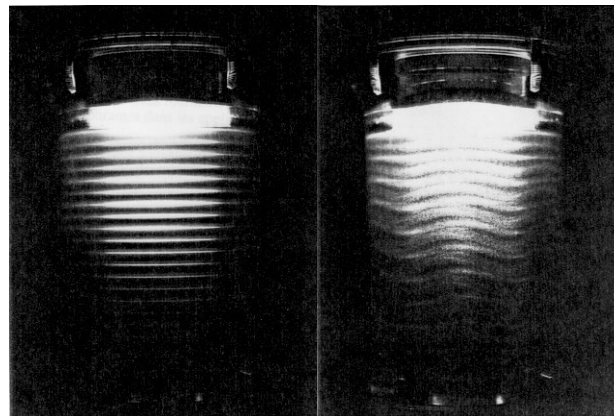


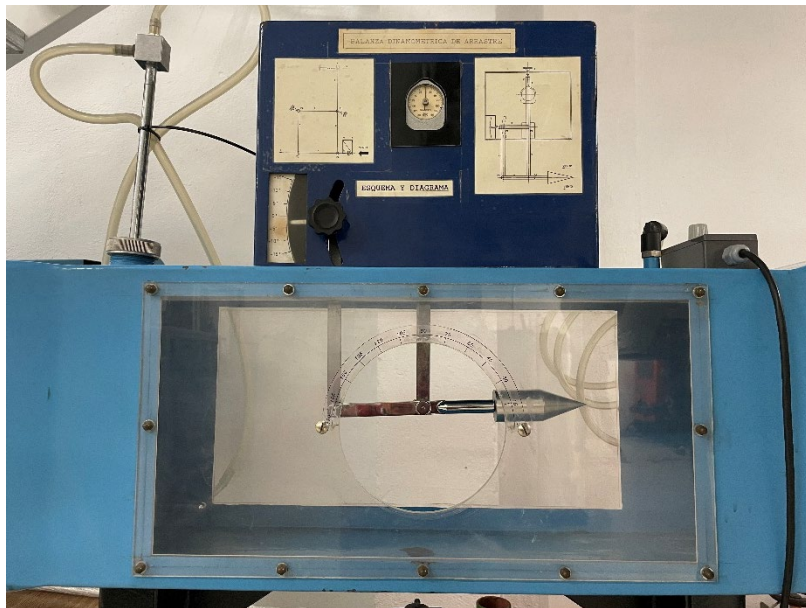
FIGURA 3: TORBELLINOS DE TAYLOR ENTRE DOS CILINDROS CONCÉNTRICOS GIRATORIOS: (A) SE INICIA LA FORMACIÓN DE TORBELLINOS. (B) APARECEN PERTURBACIONES ACIMUTALES

Presentación de resultados

Calcular el n° de Taylor correspondiente a cada inestabilidad. Comentar los resultados en función del valor de éste último.

Aerodinámica de cuerpos romos

Práctica de Laboratorio de Mecánica de Fluidos



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y FLUIDOMECÁNICA
ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Aerodinámica de cuerpos romos

Práctica de Laboratorio de Mecánica de Fluidos

Objetivo

El objetivo de esta práctica es determinar la relación entre el coeficiente de arrastre de diversos cuerpos romos y el número de Reynolds.

Descripción de la instalación

La práctica se realizará en un túnel de viento equipado con dos ventiladores colocados en serie, seguidos de un diafragma conectado a un manómetro diferencial. Aguas abajo se encuentra la sección de ensayo, donde se dispone de un accesorio que permite conectar los cuerpos a estudiar a la balanza donde se miden las fuerzas.

Funcionamiento y toma de datos

Los sólidos que se van a estudiar son los mostrados en la figura 1.

- a) Esfera lisa ($D = 42,5 \text{ mm}$)
- b) Esfera rugosa ($D = 42,5 \text{ mm}$)
- c) Cono con un cilindro corto fino adosado ($D = 35 \text{ mm}$)
- d) Cilindro largo fino ($D = 35 \text{ mm}$)
- e) Cilindro corto grueso ($D = 50 \text{ mm}$)
- f) Semiesfera con un cilindro largo grueso adosado ($D = 50 \text{ mm}$)

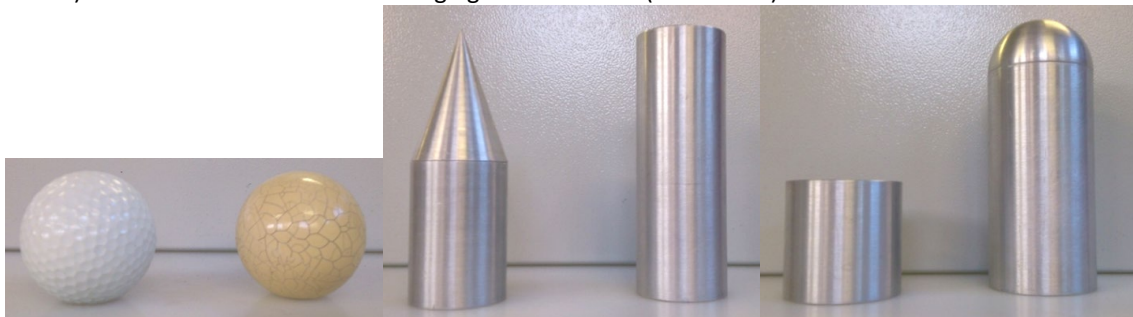


FIGURA 1. CUERPOS A ESTUDIAR

Para determinar el caudal de aire, el túnel dispone de un diafragma con dos tomas de presión estática (aguas arriba y aguas abajo del diafragma) conectadas a un manómetro diferencial. Se puede relacionar la caída de presión a través del diafragma con la velocidad del aire en la sección aguas abajo del diafragma mediante la siguiente expresión:

$$\Delta p_{\text{diafragma}} = K \cdot \frac{1}{2} \rho_{\text{aire}} v^2$$

donde K es la constante del diafragma (en este caso $K \cong 5$), ρ_{aire} es la densidad del aire ($= p_{\text{amb}}/RT_{\text{amb}}$), v es la velocidad en la sección aguas abajo del diafragma ($D = 480 \text{ mm}$). La velocidad se puede despejar porque se conoce el salto de presiones en el diafragma a través del salto de alturas proporcionado por el manómetro:

$$\Delta p = \rho_w g \Delta h$$

donde ρ_w es la densidad del agua e Δh es la diferencia entre los niveles de agua del manómetro (el valor, en cm, es la suma de los valores de cada rama dividido entre 2).

Pasos a seguir

1. Colocar el elemento a estudiar atornillado en el soporte de la balanza. **No** es necesario **apretar** demasiado.
2. A continuación, se conecta el interruptor general del ventilador y se regula la velocidad hasta que la balanza alcance un valor de la fuerza de arrastre de 25 grf. Se anota el Δh del manómetro (tercera columna de la tabla). Repetir esta operación para una fuerza de 50 grf y 75 grf.

Cálculos y presentación de resultados

Presentar la tabla rellena, en la que se recogen los siguientes cálculos:

- la velocidad en la sección de ensayo (sección rectangular $a = 197$ mm y $b = 292$ mm). Para calcularla se debe considerar que el caudal de aire que atraviesa el diafragma es el mismo que pasa por la sección cuadrada de ensayo.

- el número de Reynolds: $Re = \frac{\rho_{\text{aire}} \cdot v_{\text{ensayo}} \cdot D}{\mu_{\text{aire}}}$

donde $\mu_{\text{aire}} = 1,8 \cdot 10^{-5}$ m²/s; D: diámetro del cuerpo perpendicular al eje del túnel).

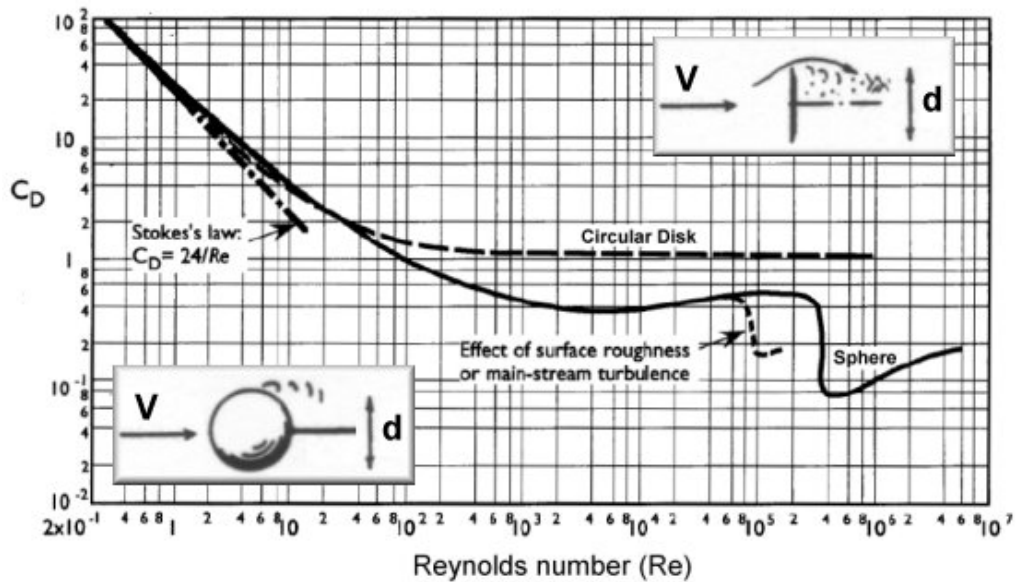
- la fuerza de arrastre, F_D , en N.

- Coeficiente adimensional de arrastre, C_D , definido: $C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{aire}} \cdot v_{\text{ensayo}}^2 \cdot \frac{\pi D^2}{4}}$.

TABLA 1. RECOGIDA DE DATOS Y CÁLCULOS

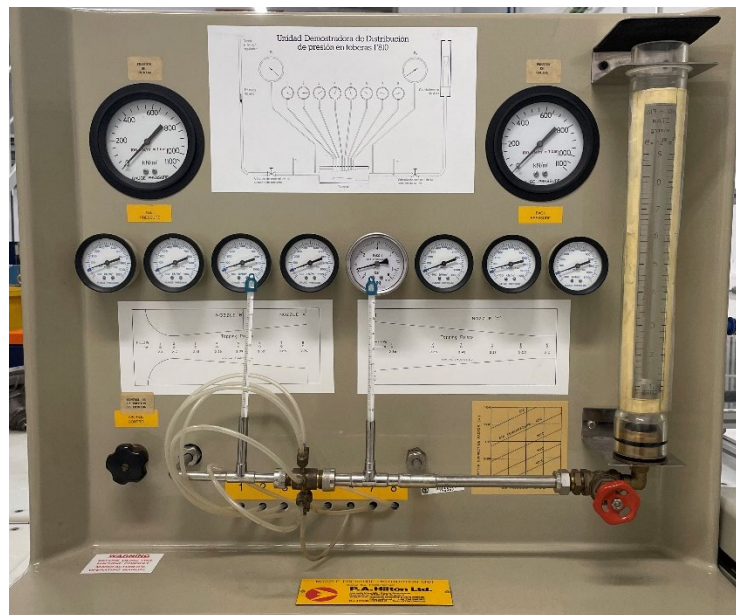
Elemento	F_D (grf)	h (cm H ₂ O)	v_{ensayo} (m/s)	Re_{ensayo}	F_D (N)	C_D
Esfera lisa	25					
	50					
	75					
Esfera rugosa	25					
	50					
	75					
Cono con un cilindro corto fino adosado	25					
	50					
	75					
Cilindro largo fino	25					
	50					
	75					
Cilindro corto grueso	25					
	50					
	75					
Semiesfera con un cilindro largo grueso adosado	25					
	50					
	75					

Complementando a la tabla, realizar una única gráfica en escala logarítmica (ambos ejes) de C_D como función del Re con todos los elementos, comentando y razonando las diferencias del comportamiento de los diferentes casos que se estudian. A modo de ejemplo se muestra a continuación una gráfica del coeficiente de arrastre de una esfera lisa y de un disco circular frente al número de Reynolds.



Flujo compresible en toberas

Práctica de Laboratorio de Mecánica de Fluidos



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y FLUIDOMECÁNICA
ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Flujo compresible en toberas

Práctica de Laboratorio de Mecánica de Fluidos

Objetivo

El objetivo de esta práctica es el estudio del flujo de aire a través de una tobera convergente – divergente.

Descripción de la instalación

La instalación está específicamente diseñada para el estudio de flujo compresible a través de toberas. Está compuesta por los siguientes dispositivos mostrados en el esquema 1:

1. Dos manómetros que miden la presión manométrica entre 0 y 1100 kPa. Están conectados antes $P_{ref,e}$ y después $P_{ref,s}$ de la tobera.
2. Dos válvulas que permiten regular las presiones $P_{ref,e}$ (V1) y $P_{ref,s}$ (V2) de la tobera, medidas por los manómetros anteriores.
3. Ocho pequeños manómetros de hasta 1100 kPa, conectados a lo largo de la tobera convergente-divergente P1 a P8.
4. Dos termómetros de mercurio de 0 a 50°C, para determinar la temperatura antes $T_{ref,e}$ y después $T_{ref,s}$ de la tobera.
5. Un rotámetro que mide el gasto de aire entre 0 y 9 gr/s en condiciones ambiente estándar ($T_{amb} = 298K$ y $P = 101325 Pa$). Para otras condiciones de presión y temperatura ambiente, se aplica un factor de corrección cuya gráfica está en las proximidades del rotámetro. Dependiendo del valor de estas condiciones puede ser necesario extrapolar en la gráfica de la figura 3.
6. Tobera convergente divergente mostrada en el esquema 2, cuyas características geométricas se encuentran en la tabla 1.

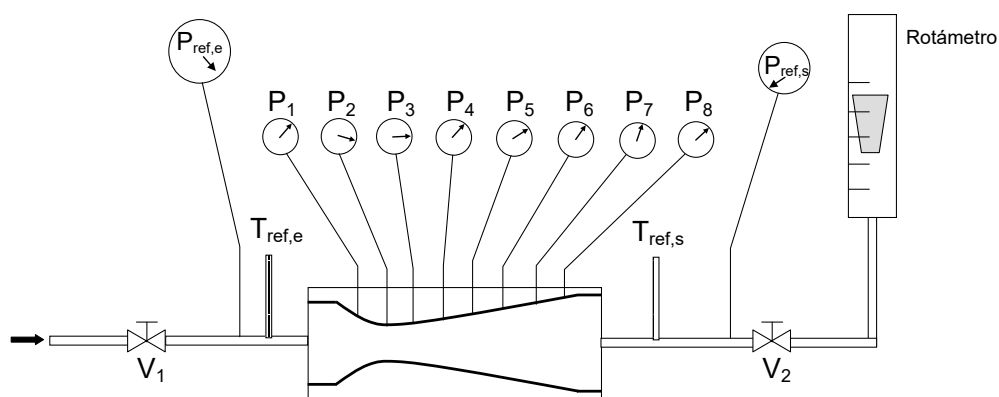
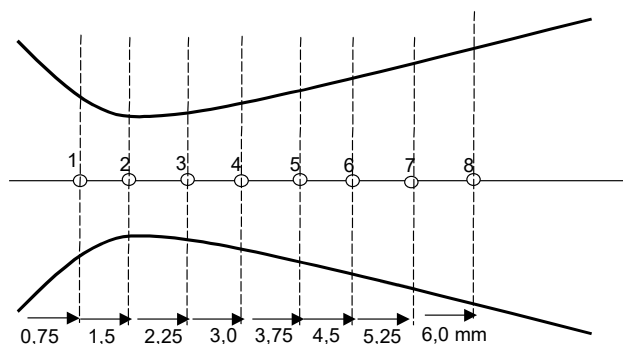


FIGURA 1. INSTALACIÓN



Sección	D (mm)
1	2,40
2	2,00
3	2,13
4	2,26
5	2,39
6	2,52
7	2,66
8	2,79

FIGURA 2. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA TOBERA CONVERGENTE-DIVERGENTE

Funcionamiento y toma de datos

Se pretende observar la evolución de la presión sobre la tobera convergente divergente, para lo cual hay que seguir los siguientes pasos:

1. Tomar la presión y temperatura ambientes.
2. Abrir completamente la válvula de salida de aire y con la de entrada conseguir una $P_{ref,e} = 300$ kPa en la entrada.
3. Cerrar la válvula de aire de la salida, hasta obtener $P_{ref,s} = 25$ kPa (el primer punto de la tabla)
4. Completar la primera columna de la tabla tomando los datos de las temperaturas $T_{ref,e}$ y $T_{ref,s}$, las presiones de los manómetros de las secciones 1 a 8 y del gasto de aire.
5. Comprobar que la presión $P_{ref,e}$ no ha variado. En caso de que haya variado, ajustarla y volver a tomar todos los datos de los manómetros y el gasto.
6. Aumentar la presión de salida al siguiente valor (tabla 1, cuarta fila) y repetir desde el paso 4.

$P_{amb} =$	$T_{amb} =$
-------------	-------------

TABLA 1. ADQUISICIÓN DE DATOS (PRESIONES MANOMÉTRICAS)

$P_{ref,e}$ (kPa)	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
$P_{ref,s}$ (kPa)	25	75	100	125	150	175	200	225	250	275
$T_{ref,e}$ (°C)										
$T_{ref,s}$ (°C)										
P1 (kPa)										
P2 (kPa)										
P3 (kPa)										
P4 (kPa)										
P5 (kPa)										
P6 (kPa)										
P7 (kPa)										
P8 (kPa)										
G (gr/s)										

Presentación de resultados

Para realizar el análisis de los resultados operar SIEMPRE con PRESIONES ABSOLUTAS.

1. Calcular el factor de corrección K del rotámetro con ayuda de la figura 3

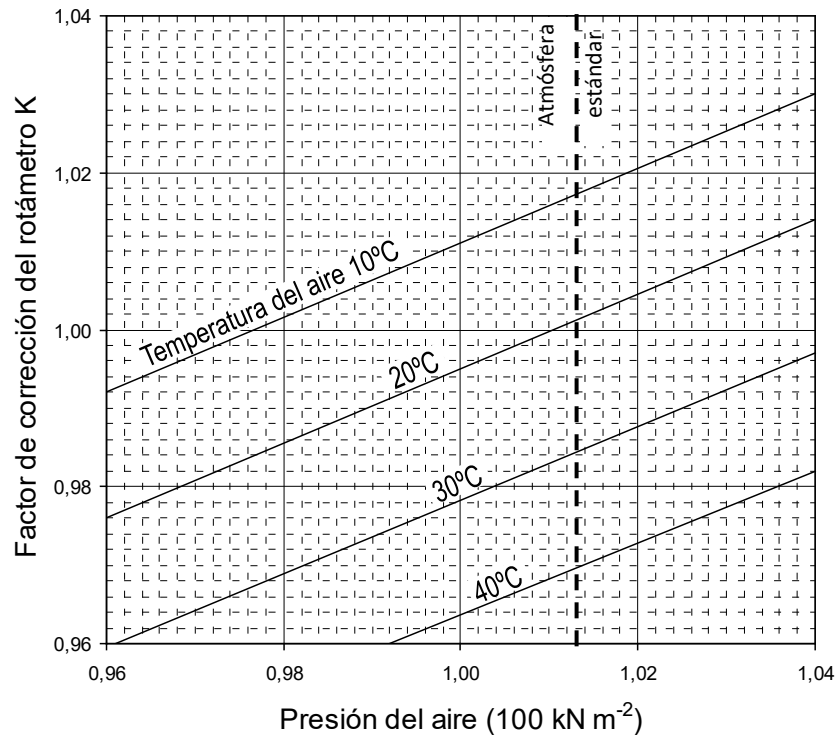


FIGURA 3: CÁLCULO DEL FACTOR DE CORRECCIÓN DEL ROTÁMETRO

2. Obtener la presión de remanso $(P_0)_1$, para cada serie de medidas. Para ello se debe tener en cuenta que en aquellas series en las que la tobera está bloqueada el Mach en la garganta (sección 2) es la unidad. En las series en que la tobera no está bloqueada puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$P_{01} = P_2 \left[\frac{1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}}{1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{2/\gamma}} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

donde los subíndices 1 y 2 en este caso se refieren a dos secciones diferentes cualesquiera de la tobera. Se propone, como ejercicio, tratar de obtener esta relación (utilizar las expresiones de la relación entre una sección y la sección crítica y la relación entre una presión y la de remanso).

3. Completar la tabla 2

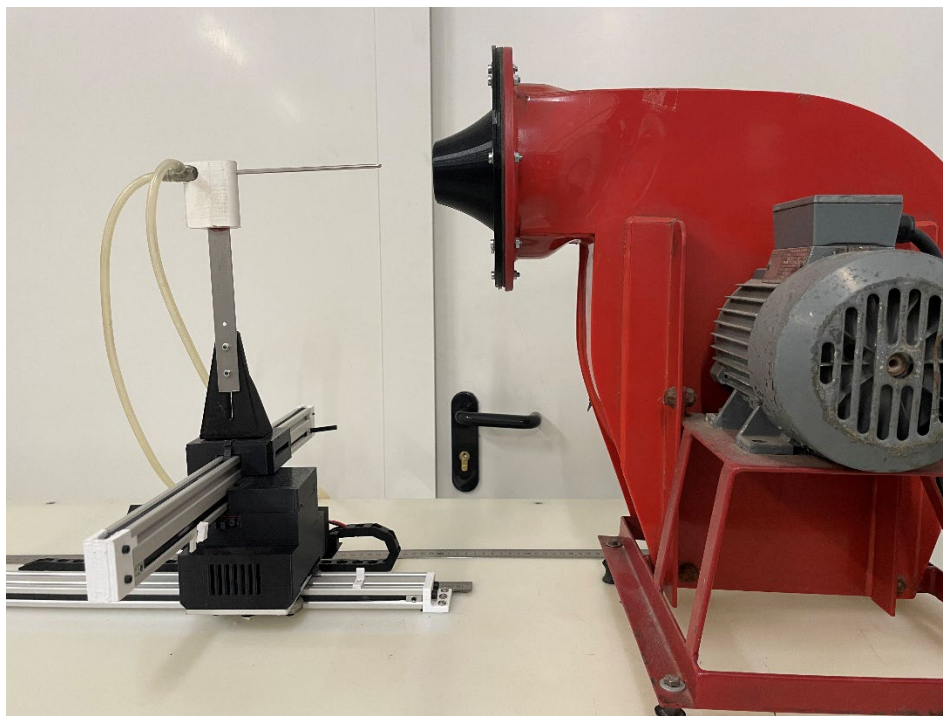
TABLA 2. PROCESADO DE DATOS

Factor de corrección del flujo de aire:										
$G_{\text{corregido}} \text{ (g/s)}$										
$P_{\text{ref},s} \text{ (KPa)}$	25	75	100	125	150	175	200	225	250	275
$(P0)_1$										
$P_{\text{ref},s}/(P0)_1$										
$P1/(P0)_1$										
$P2/(P0)_1$										
$P3/(P0)_1$										
$P4/(P0)_1$										
$P5/(P0)_1$										
$P6/(P0)_1$										
$P7/(P0)_1$										
$P8/(P0)_1$										

- Representar en un gráfico la evolución de $P_i/(P0)_1$ ($i=1,2,\dots,8$) frente a la longitud.
- Calcular la temperatura de remanso $(T0)_1$ a partir de la condiciones en la entrada ($P_{\text{ref},e}$ y $T_{\text{ref},e}$) y la presión de remanso $(P0)_1$ asumiendo un proceso isoentrópico.
- Evaluar el gasto teórico en condiciones de bloqueo sónico (usando $(P0)_1$ y $(T0)_1$ calculadas en los dos apartados anteriores) y determinar la diferencia respecto a los resultados experimentales.

Perfiles de velocidad en un chorro de aire

Práctica de Laboratorio de Mecánica de Fluidos



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y FLUIDOMECÁNICA
ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Perfiles de velocidad en un chorro de aire

Práctica de Laboratorio de Mecánica de Fluidos

Objetivo

En esta práctica se pretende caracterizar de forma experimental la evolución de un chorro, así como reconocer las diferentes regiones que se observan en dicha evolución, mediante la medida de la velocidad en distintas localizaciones.

Fundamento teórico

Desarrollo de un chorro libre sumergido

Cuando una corriente sale por un orificio se forma un chorro de fluido libre. Cuando el fluido del chorro es idéntico al de la fase continua (medio externo) recibe el nombre de chorro sumergido. El chorro libre se hace completamente turbulento a medida que se va alejando de su salida. A consecuencia de esta turbulencia y de la cantidad de movimiento con que sale el chorro, éste arrastra al fluido ambiente. Así el caudal del chorro y su sección transversal crecen aguas abajo.

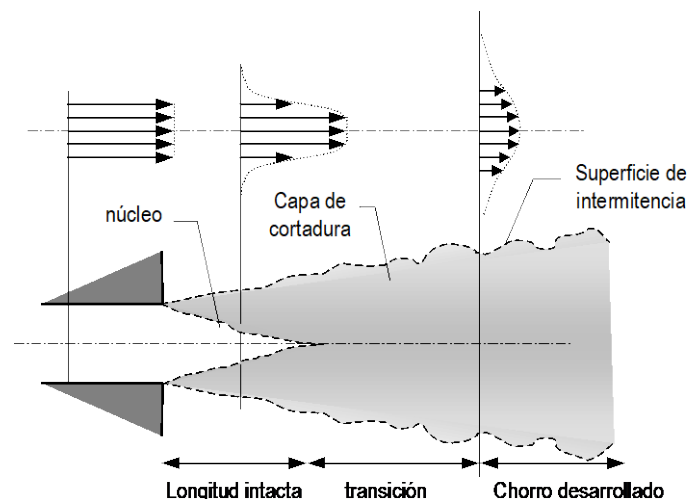


FIGURA 1: CHORRO RADIAL TURBULENTO

El perfil de velocidad resultante en cada sección transversal es cuasi-uniforme a poca distancia de la tobera, pero a medida que se mezcla con el fluido en reposo, comienzan a visualizarse diferentes zonas:

- Núcleo o región inicial: área donde la velocidad del chorro no está perturbada. Tiene una longitud axial x_1 que puede ser calculada empíricamente. La velocidad del fluido en todo el núcleo es la misma que la velocidad del fluido a la salida del orificio. El flujo dentro del núcleo está libre de esfuerzos cortantes por lo que se puede utilizar el término de núcleo potencial. El núcleo se encuentra rodeado por una capa cortante turbulenta, también llamada capa de mezcla, que limita la región ocupada por el flujo del chorro y el fluido del medio ambiente que lo rodea.
- Zona de discontinuidad o de transición: zona muy estrecha que se desarrolla paralelamente a la anterior desde la salida del chorro. Se caracteriza por existir un

gradiente en el perfil de velocidad como consecuencia del intercambio de cantidad de movimiento con el fluido externo. El área de esta zona se incrementa aguas abajo hasta que su espesor es tal que desaparece la zona del núcleo potencial.

- Zona desarrollada: aparece aguas abajo de la zona de discontinuidad. El fluido en ella se comporta de forma dinámicamente semejante, es decir, el perfil de velocidad se mantiene semejante al moverse aguas abajo. Esta zona también se puede hallar experimentalmente. Después de un análisis teórico y experimental se obtiene que el perfil de velocidad para un chorro sumergido axilimétrico viene dado por:

$$U(x,r) = 12 (r_0 / x) \cdot U_0 \cdot \exp[-94(r/x)^2] \quad \text{para } x > x_1$$

De la última ecuación se desprende que la velocidad del flujo se atenúa exponencialmente. Por otro lado, el volumen de flujo arrastrado por un chorro aumenta con la distancia axial a la tobera de salida. La cantidad de fluido en reposo arrastrado por el chorro es:

$$Q(x) = \int_A U(x,r) dA_r$$

Y la velocidad de entrada transversal viene dada por:

$$V_\theta = \frac{1}{2\pi B} \frac{dQ}{dx}$$

Para el caso de chorro axilimétrico, 'V_θ' es la componente de la velocidad perpendicular a la capa de cortadura. 'B' se puede calcular mediante una relación teórico-experimental como B = 2.5 b, siendo 'b' la distancia radial desde el eje del chorro hasta el punto en donde la velocidad decae a la mitad.

La ecuación de conservación de la masa aplicada al chorro es:

$$V_\theta A_s + U_0 A_0 = \int U dA$$

donde el primer término de la ecuación (V_θA_s) es el flujo lateral que se incorpora al chorro.

La ecuación de conservación de cantidad de movimiento en la dirección del eje del chorro queda:

$$U_0^2 A_0 = \int U^2 dA = \text{Constante}$$

Como se ha dicho anteriormente, en la zona desarrollada se puede suponer un comportamiento dinámicamente semejante de los perfiles de velocidad, es decir, en varias posiciones axiales los perfiles de velocidad se superponen cuando las magnitudes espaciales y temporales están adimensionalizadas. Se demuestra para un chorro axilimétrico que:

$$\frac{U}{U_0} = \text{Cte} \cdot \left(\frac{A_0^{1/2}}{X} \right)$$

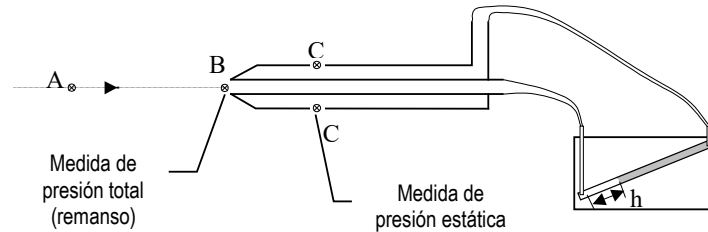
siendo 'U₀' y 'A₀' una velocidad y una sección de referencia respectivamente.

Descripción de la instalación

El módulo para realizar esta experiencia de laboratorio, consta de las siguientes partes: Un **ventilador centrífugo** que produce un chorro de aire. Funciona a un régimen de giro de 1375 r.p.m., con una tensión de la fuente de alimentación de 220. Dicho ventilador tiene en su

salida un tronco de cono con un **orificio de diámetro D = 50 mm**. Este equipo consta asimismo de un desplazador 2D que soporta un **tubo de Pitot** y un **manómetro diferencial** de columna de líquido, para medir la diferencia entre la presión de remanso y la presión estática y con ella calcular la velocidad de la corriente.

Como recordatorio se describe a continuación el funcionamiento del tubo de Pitot.



Aplicando la ecuación de Bernoulli entre A y B, se obtiene:

$$\frac{P_A}{\rho_{\text{aire}}} + \frac{v_A^2}{2} + gZ_A = \frac{P_B}{\rho_{\text{aire}}} + \frac{v_B^2}{2} + gZ_B$$

$P_A = P_C$ presión estática

P_B presión total o de remanso

v_A velocidad de la corriente

Sabiendo que la diferencia de presiones viene dada por el manómetro como: $P_B - P_A = \rho_{\text{agua}} \cdot g \cdot h$, se puede despejar la velocidad como:

$$v = \sqrt{2 \frac{P_B - P_A}{\rho_{\text{aire}}}} = \sqrt{2 \frac{\rho_{\text{agua}} g h}{\rho_{\text{aire}}}}$$

Funcionamiento y toma de datos

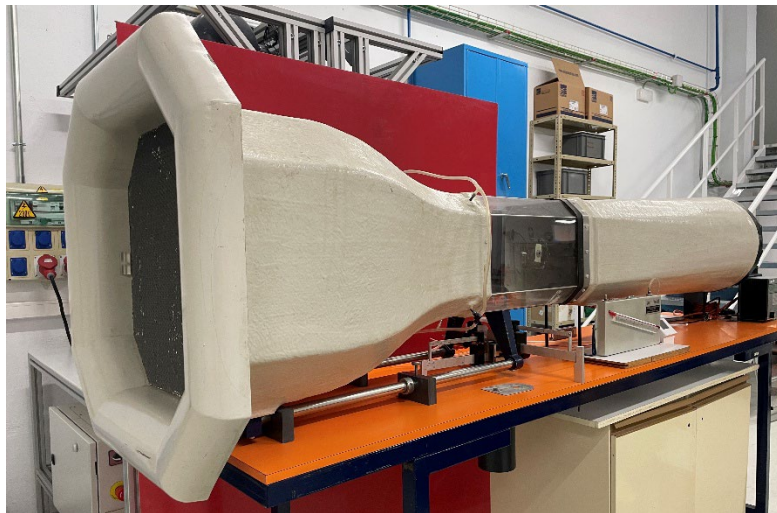
La práctica consiste en medir los perfiles horizontales de velocidad del chorro en diferentes secciones transversales al eje del chorro.

El diámetro de la tobera empleada **es de 50 mm**. En la posición **Origen** del sistema de posicionamiento el tubo de Pitot queda exactamente en la sección de salida del chorro en el centro del orificio de salida.

- Realización de medidas a distintas distancias
 - Encender el ventilador
 - Pulsar “origen” en la pantalla del sistema de desplazamiento.
 - Situar el tubo de Pitot a la distancia Y requerida (1D, 10D) de la salida de la tobera
 - Desplazar el Pitot a X= -30 mm pulsando “X-” en la pantalla.
 - Desplazando radialmente el tubo de Pitot, realizar las medidas necesarias para rellenar las tablas siguientes. La posición radial se incrementa cada 5 mm pulsando la coordenada “X+” en la pantalla del sistema de posición. La posición radial inicial será X= -30 y la última aquella donde la velocidad del aire sea despreciable.

Coeficientes de arrastre y sustentación

Práctica de Laboratorio de Mecánica de Fluidos



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y FLUIDOMECÁNICA
ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Coeficientes de arrastre y sustentación

Práctica de Laboratorio de Mecánica de Fluidos

Objetivo

Esta práctica tiene como objetivo el estudio del comportamiento de un perfil aerodinámico de uso real en aviación. Para ello se ensaya un modelo a escala del ala de un avión en un túnel de viento

Fundamento teórico

El mecanismo de interacción entre fluido y sólido es la **capa límite**. Supóngase una corriente fluida formada por 'capas' superpuestas, que antes de entrar en contacto con una placa se desplazan produciendo un perfil de velocidad uniforme. Al alcanzar la superficie de la placa, la 'capa de fluido' en contacto con ella se ve frenada, cumpliendo la condición de adherencia, esto es, la velocidad del fluido relativa a la placa es nula.

Se genera un perfil de velocidad que varía desde la velocidad nula en la superficie de la placa hasta la velocidad sin perturbar que mantienen las 'capas' más alejadas de la placa, al no haber sido afectadas por la presencia de ésta. Estas 'capas' en realidad no existen, sin embargo ayudan a comprender la existencia de esfuerzos tangenciales, debidos al rozamiento viscoso entre ellas, que inducen una variación progresiva de la velocidad del fluido. Este gradiente de velocidad genera sobre la placa una fuerza de arrastre en la dirección del flujo.

Fuerza de arrastre

Supóngase ahora un perfil simétrico sumergido en una corriente fluida ideal (no existen efectos viscosos), con su eje de simetría paralelo a la dirección del flujo. En la Figura 1 se representan las líneas de corriente, que son simétricas respecto de un eje A-B, donde A y B son puntos de remanso.

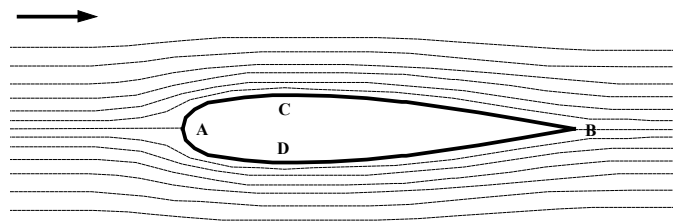


FIGURA 1: LÍNEAS DE CORRIENTE ALREDEDOR DE UN PERFIL AERODINÁMICO

Aplicando la ecuación de Bernoulli a una línea de corriente se obtiene: $\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial s} = -v \cdot \frac{\partial v}{\partial s}$

('s' es la coordenada curvilínea tangente a la línea de corriente y P la presión reducida). El fluido se acelera en las zonas A-C y A-D disminuyendo su presión según la ecuación anterior ($\frac{\partial v}{\partial s} > 0 \Rightarrow \frac{\partial P}{\partial s} < 0$). A su vez, en las zonas C-B y D-B el fluido pierde velocidad recuperando de nuevo presión.

Si se considera que en el fluido no se producen pérdidas de energía por rozamiento viscoso, la energía de presión que se transforma en energía cinética en las zonas A-C y A-D se transforma de nuevo en su totalidad en energía de presión en las zonas C-B y D-B con lo que se tiene una distribución de presión simétrica respecto de un eje paralelo a la dirección del flujo. Las fuerzas resultantes del campo de presión son nulas tanto en la dirección del movimiento del fluido como en la dirección transversal (Figura 2).

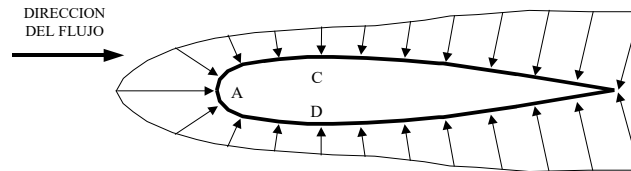


FIGURA 2: CAMPO IDEAL DE PRESIÓN ALREDEDOR DE UN PERFIL AERODINÁMICO

Sin embargo, en realidad existe una capa límite y se produce una fuerza de arrastre (F_A) en la dirección del flujo debida al esfuerzo cortante en la superficie del cuerpo. La distribución de presión sigue siendo simétrica respecto de un eje paralelo a la dirección del flujo (Figura 3).

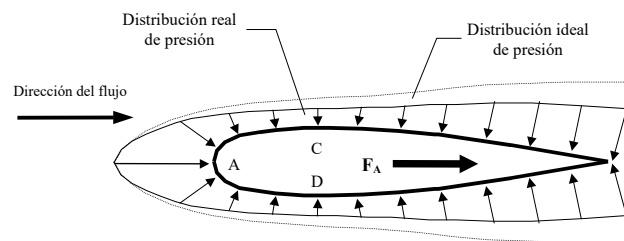


FIGURA 3: CAMPO DE PRESIÓN REAL

Fuerza de sustentación

Si se varía el ángulo de incidencia de la corriente fluida se modifica la distribución de las líneas de corriente. La distribución mostrada en la Figura 4, en la que los nuevos puntos de remanso son A y B, sólo es posible en el caso ideal.

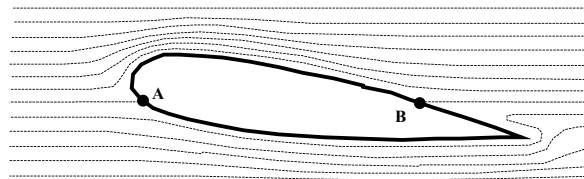


FIGURA 4: LÍNEAS DE CORRIENTE IDEALES ALREDEDOR DE UN PERFIL AERODINÁMICO

La nueva posición del punto A no influye significativamente en el flujo. Sin embargo la nueva posición del punto B obligaría al fluido que se mueve por la parte inferior del perfil a realizar un giro brusco cuando llega al borde de salida, alcanzando velocidades altísimas en dicho punto, que producirían el desprendimiento de la capa límite.

En realidad, el punto de remanso B se traslada desde su posición teórica hasta el borde de salida (Figura 5). El fluido de la parte inferior del perfil recorre una longitud menor a la que le correspondería en el caso ideal y por consiguiente lleva una velocidad menor. Además, al desprenderse la capa límite superior se crea una succión del fluido en la cara superior, acelerándolo para que recorra una distancia mayor a la que tendría que recorrer en el caso ideal.

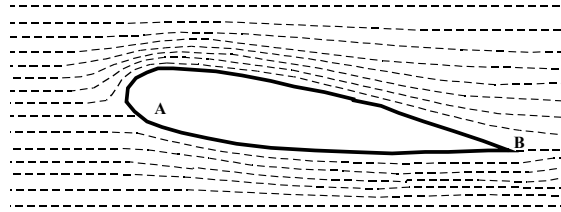


FIGURA 5: LÍNEAS DE CORRIENTE REALES

El resultado final equivale a sumar a la distribución inicial de velocidad (flujo ideal), el movimiento de un fluido que gire alrededor del perfil, por lo que se dice que se crea una circulación alrededor del cuerpo sólido que se suma al flujo ideal (Figura 6).

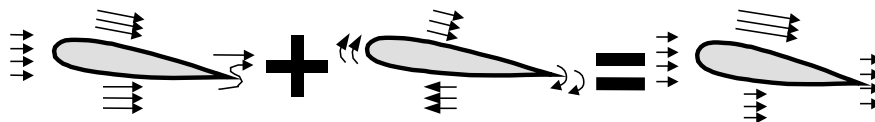


FIGURA 6: MOVIMIENTO DEL FLUIDO ALREDEDOR DEL PERFIL

Aplicando la ecuación de Bernoulli a una línea de corriente, como se hizo anteriormente, se puede calcular el campo de presión. La fuerza resultante del campo de presión ideal tiene componentes nulas. En el caso del fluido real, la presión en la parte superior es menor y en la inferior es mayor que en el caso ideal por lo que existe una fuerza resultante no nula (Figura 7). Esta fuerza se suma a la producida por el esfuerzo cortante. La fuerza total se puede descomponer en dos, una paralela y otra normal al flujo.

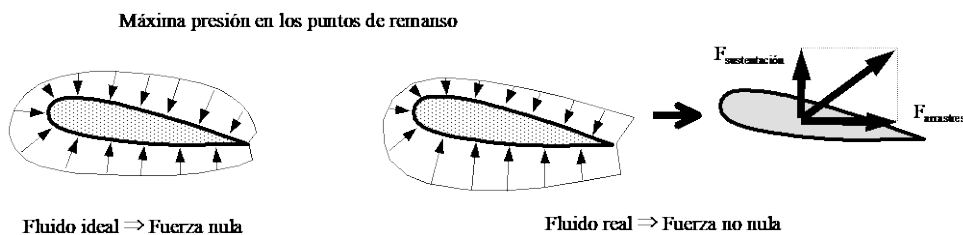


FIGURA 7: DISTRIBUCIÓN IDEAL Y REAL DE PRESIÓN Y FUERZAS RESULTANTES

Desprendimiento

Una característica fundamental de los perfiles es que sólo se comportan como tales para ángulos de ataque menores de un cierto límite, denominado “ángulo de barrena” o “ángulo de pérdida de sustentación”. A partir de dicho ángulo se desprende la capa límite y el cuerpo pasa a comportarse como un cuerpo romo (Figura 8).

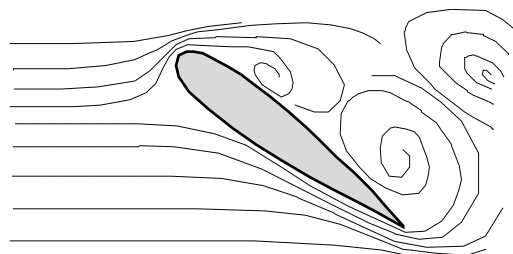


FIGURA 8: PERFIL CON DESPRENDIMIENTO DE LA CAPA LÍMITE

Al intentar rodear el obstáculo el fluido se acelera (zonas donde las líneas de corriente se juntan), ganando energía cinética a costa de perder energía de presión. Si el fluido fuese ideal, después de rodear el obstáculo se recuperaría la energía de presión. Sin embargo, en

el caso real se produce un desprendimiento de la corriente en la parte posterior del cuerpo antes de que el fluido haya recuperado la energía de presión, formándose un flujo turbulento en el que se disipa energía cinética.

El resultado es que sobre el sólido se tiene una distribución de presión con valores muy pequeños en la parte posterior, con lo que la componente de la fuerza resultante en la dirección del flujo sufre un aumento considerable. Así mismo, este desprendimiento de la capa límite modifica radicalmente el campo fluido alrededor del perfil, por lo que produce una disminución considerable de la sustentación.

Por tanto, la conclusión es que un perfil actúa como un cuerpo aerodinámico mientras no se desprenda la capa límite y se comportará como un cuerpo romo cuando ésta se desprenda y por tanto presente una resistencia importante al flujo.

Se ha visto que existe una zona de alta presión (intradós) y otra de baja (extradós) separadas por el ala (Figura 9).

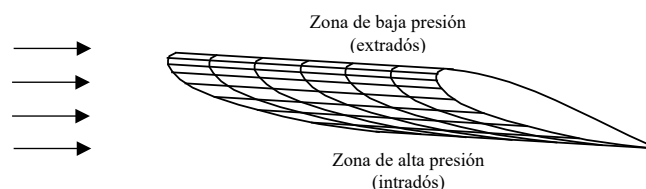


FIGURA 9: EXTRADÓS E INTRADÓS DE UN PERFIL

Un fluido se mueve de una zona de mayor presión a otra de menor. En este caso no es posible porque el perfil está en medio. Sin embargo, en el extremo del perfil ambas zonas están muy próximas y se establece un movimiento de fluido desde la zona de alta a la zona de baja presión rodeando el borde lateral del ala (Figura 10).

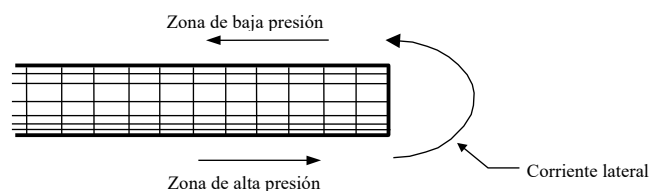


FIGURA 10: FLUJO SECUNDARIO

Si a este movimiento alrededor del borde del ala se suma el movimiento relativo del fluido respecto del ala, el resultado es la formación de un torbellino helicoidal en el extremo (Figura 11). La consecuencia fundamental de este torbellino es la formación de corrientes laterales y una pérdida de sustentación en el extremo, disipando la energía en el torbellino.

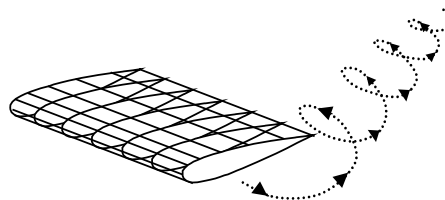


FIGURA 11: VÓRTICE DEL BORDE MARGINAL DEL ALA

Es interesante buscar soluciones que minimicen este efecto. Se describen dos posibilidades:

- Reducción progresiva de la diferencia de presiones cerca del borde lateral del ala, reduciendo el espesor del perfil, con lo que disminuye la circulación y por tanto la sustentación al acercarse al extremo.

Esta reducción progresiva de la circulación produce una variación de la presión a lo largo del ala en ambas superficies (superior e inferior), y se crean unas corrientes parásitas longitudinales (Figura 12).

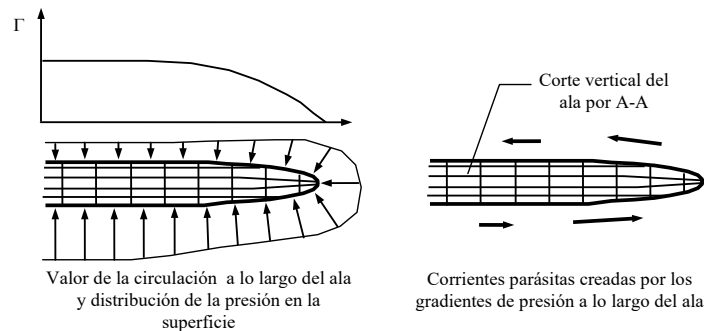


FIGURA 12: ALA CON BORDE MARGINAL PROGRESIVO

- Separación de las zonas de alta y baja presión mediante una barrera, que puede ser una placa plana normal al plano del ala y situada en su extremo (Figura 13).

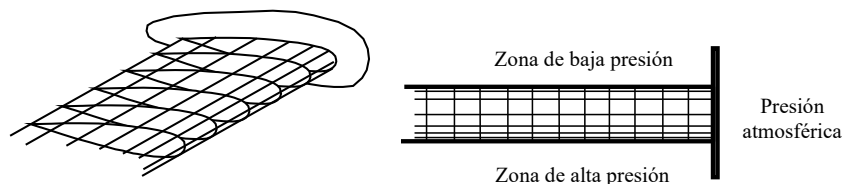


FIGURA 13: ALA CON PLACA EN EL BORDE MARGINAL

Descripción de la instalación

El material del que se dispone para la realización de la práctica es el siguiente:

- Un **túnel de viento** de aspiración con tomas de presión aguas arriba de la sección de ensayo para medir la velocidad del aire en dicha sección.

Para medir la velocidad del viento dentro del túnel, éste dispone de una serie de tomas de presión estática aguas arriba de la sección de ensayo (Figura 14). El manómetro de columna de agua mide la diferencia de presiones entre la sección de ensayo y la presión atmosférica (presión de remanso). A partir de este dato se puede obtener la velocidad del flujo de aire mediante ecuación de Bernoulli:

$$P_{\text{atm}} = P_e + \frac{1}{2} \rho_{\text{aire}} v^2.$$

La diferencia de presiones viene dada por el manómetro diferencial: $P_{\text{atm}} - P_e = \rho_{\text{agua}} \cdot g \cdot h$. Por tanto despejando la velocidad:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_{\text{agua}} \cdot g \cdot h}{\rho_{\text{aire}}}}$$

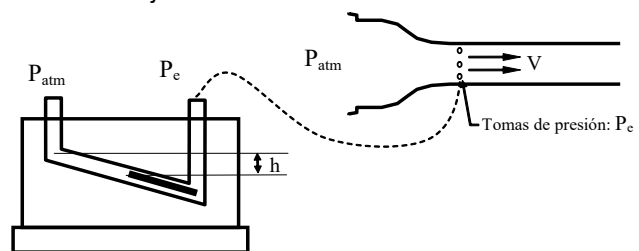


FIGURA 14: TOMAS DE PRESIÓN DE LA SECCIÓN DE ENSAYO DEL TÚNEL Y CONEXIÓN DEL MANÓMETRO

Nota: La escala del manómetro es proyectada, por lo que cada 5 rayas pequeñas es 1 mm H₂O.

- Un **manómetro** diferencial de columna de agua para medir la velocidad del aire en la sección de ensayo del túnel. Tiene una tuerca en la toma derecha para ponerlo a cero.
- Una **balanza** para medir las fuerzas de sustentación y arrastre sobre el perfil. La fuerza se obtiene directamente en Newton, equilibrando dicha balanza con las pesas prismáticas.
- Un **perfil aerodinámico** simétrico con una envergadura $L = 254 \text{ mm}$ y una cuerda $c = 63 \text{ mm}$. Se puede suponer en primera aproximación un comportamiento bidimensional. Posee un pequeño 'flap' que puede extenderse para variar la sustentación y el arrastre. En esta práctica no se utilizará.

Funcionamiento

El primer paso es poner a punto los instrumentos que se van a utilizar:

- Puesta a cero del manómetro (poner el líquido en el cero).
- Situar el perfil con ángulo de incidencia cero. **No** es necesario **apretar demasiado** el tornillo de fijación.
- Puesta a cero de la balanza (poner las pesas prismáticas en sus ceros y equilibrar la balanza con las pesas cilíndricas).

Procedimiento para la toma de datos

Se estudiará el comportamiento del perfil para una velocidad de aire fija correspondiente a la potencia 8 del regulador del túnel de viento.

Una vez el túnel en marcha orientar el perfil hasta que la fuerza de sustentación sea nula. En esa posición se considerará que el ángulo de incidencia del flujo es 0° .

Medir las fuerzas de sustentación y arrastre para ángulos de incidencia del aire que varían entre 0 y 16° (variar la posición del perfil 2° cada vez).

Para cada ángulo anotar los siguientes valores:

α ($^\circ$)	$h_{\text{manómetro}}$ (mmca)	F_D (N)	F_L (N)
0			
2			
4			
6			
8			
10			
12			
14			
16			

Anotar los valores de presión y temperatura del laboratorio.

$P_{\text{amb}} =$

$T_{\text{amb}} =$

Presentación de resultados

Los coeficientes de sustentación (C_L) y de arrastre (C_D) se definen mediante las siguientes expresiones:

$$C_L = \frac{F_L / L}{\frac{1}{2} \rho v^2 c}$$

$$C_D = \frac{F_D / L}{\frac{1}{2} \rho v^2 c}$$

donde: F_L fuerza de sustentación (balanza transversal).
 F_D fuerza de arrastre (balanza longitudinal).
 ρ densidad del aire del laboratorio (p/RT)
 v velocidad del aire.
 L envergadura del ala ($L = 254 \text{ mm}$).
 c cuerda del perfil ($c = 63 \text{ mm}$).

Representar: C_D vs. α° y C_L vs. α° .

Semejanza en bombas hidráulicas

Práctica de laboratorio de Ingeniería de Fluidos

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y FLUIDOMECÁNICA
ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Semejanza en bombas hidráulicas

Práctica de laboratorio de Ingeniería de Fluidos

Objetivo

El objetivo de esta práctica es determinar la curva característica de una bomba centrífuga a distintas velocidades de giro y analizar el funcionamiento en condiciones de semejanza.

Descripción de la Práctica

La instalación consta de un circuito cerrado de tuberías en el que se pueden identificar los siguientes elementos: Depósito; Dos bombas; Válvulas de corte para situar los circuitos en serie o paralelo; Manómetros en la aspiración e impulsión de cada bomba; Válvula de regulación principal; Dos rotámetros en paralelo para medir un amplio rango de caudales; Lectores de la potencia consumida y la velocidad de giro del rodete de cada bomba.

Realización de la práctica

Primero se realizará la curva de una bomba individual a un régimen de giro determinado y posteriormente se repetirá el experimento incrementando la velocidad de giro.

1. Realización de la curva de una bomba individual

Para realizar la toma de datos, proceder de la siguiente manera:

- Anotar los diámetros de las tuberías de aspiración e impulsión de la bomba (rótulo en cada tubería).
- Con las bombas apagadas y la válvula de regulación cerrada (situada aguas abajo de los rotámetros), configurar las válvulas de corte para que todo el caudal pase por la **bomba derecha**.
- Accionar el interruptor de la bomba derecha. Ajustar el régimen de giro del rodete $\omega = 1600$ rpm.
- Abriendo la válvula de regulación principal se obtienen los diferentes caudales. Para cada caudal vigilar que el régimen de giro se mantiene constante. Rellenar la siguiente tabla:

$\omega = 1600$ rpm									
Q [m ³ /h]	0	1	2	3	4	5	6	7	Q _{max} =
P _{asp} [bar]									
P _{imp} [bar]									
W [W]									

- Una vez terminado, cerrar la válvula de regulación principal.

- f) Repetir todos los pasos anteriores del a) al d), para velocidades de 2000 y 2400 rpm. Rellene en cada caso una tabla como la siguiente:

$\omega = 2.000 \text{ rpm}$									
Q [m ³ /h]	0	1	2	3	4	5	6	7	Q _{max} =
P _{asp} [bar]									
P _{imp} [bar]									
W [W]									

$\omega = 2400 \text{ rpm}$									
Q [m ³ /h]	0	1	2	3	4	5	6	7	Q _{max} =
P _{asp} [bar]									
P _{imp} [bar]									
W [W]									

- g) Una vez terminado, cerrar la válvula de regulación principal. Apagar la bomba.

Resultados

Cálculo de la altura manométrica. Asumiendo despreciable la diferencia de cotas entre la aspiración y la impulsión, la altura manométrica de una bomba queda:

$$H_m = \frac{P_{imp} - P_{asp}}{\rho g} + \frac{v_{imp}^2 - v_{asp}^2}{2g}$$

- Representar en un primer gráfico las **curvas experimentales** (altura manométrica, rendimiento y potencia) obtenidas **para las tres velocidades de giro** en un mismo gráfico

Relaciones de semejanza. A partir de los datos experimentales obtenidos a $\omega = 1600 \text{ rpm}$, es posible determinar la altura y potencia a otra velocidad de giro ω' utilizando las relaciones de semejanza:

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{\omega}{\omega'} \quad \frac{H}{H'} = \frac{\omega^2}{\omega'^2} \quad \frac{W}{W'} = \frac{\omega^3}{\omega'^3} \quad \eta = \eta'$$

- Representar en un segundo gráfico las curvas (altura manométrica, rendimiento y potencia) obtenidas **por semejanza** a velocidades de 2000 y 2400 rpm junto con las obtenidas **experimentalmente** anteriormente.