

Práctica: Fuerzas de sustentación y arrastre

Objetivo

Determinar las fuerzas de sustentación y de arrastre que actúan sobre un objeto en el seno de una corriente laminar de aire en función de parámetros como la velocidad del flujo de aire, el área del objeto y el ángulo de incidencia.

Material necesario

- Tubo de Pitot
- Tubo piezométrico
- Generador de flujo laminar de aire de intensidad regulable
- Pivote x/y soportado por dinamómetros
- Objetos de diferente geometría y rugosidad (coeficiente de arrastre)
- Voltímetro
- Elementos de soporte: base, varilla, nuez, poleas e hilo de sujeción



Figura 1. Montaje experimental.

Introducción teórica

Uno de los problemas básicos de la aerodinámica es la determinación de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo sólido que se desplaza a través de un fluido (aire). El objeto en movimiento se encuentra sometido a la acción de fuerzas viscosas, originadas por la fricción del fluido con la

superficie del cuerpo; y también fuerzas asociadas a la presión, tanto del fluido que circunda al objeto, así como las resultantes de su movimiento relativo respecto al fluido. El tensor de esfuerzos τ contempla la contribución de todas las fuerzas superficiales aplicadas sobre el cuerpo, tanto en la dirección normal a su superficie (consecuencia de la presión), como en las direcciones tangenciales (esfuerzos de cizalla originados por la fricción viscosa). Así, la fuerza F que actúa sobre un objeto alrededor de cual está circulando un fluido puede escribirse en la forma:

$$F = \int_S \tau \cdot dS$$

estando la integral extendida a toda la superficie S del cuerpo. La proyección de la fuerza F sobre la dirección de la velocidad del flujo incidente es la fuerza de arrastre F_a mientras que su proyección sobre la dirección perpendicular a la del flujo incidente es la fuerza de sustentación F_b .

Considerando el caso de un objeto de superficie S_o que circula a través de un fluido incompresible, las fuerzas de arrastre F_a y de sustentación F_b pueden expresarse en función de la presión dinámica q ,

$$F_a = C_a S_o q$$

$$F_b = C_b S_o q$$

donde S_o es la superficie del objeto, C_a y C_b son los coeficientes de arrastre y sustentación respectivamente, mientras que q es la presión dinámica, que recoge la contribución de la energía cinética del fluido por unidad de volumen:

$$q = \frac{1}{2} \rho_f v^2$$

siendo ρ_f la densidad del fluido y v su velocidad.

En el caso de un fluido no viscoso, incompresible, que circula en régimen estacionario, la presión dinámica puede determinarse a partir de la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + P + \rho g z = cte$$

Rescribiendo esta ecuación en función de las presiones dinámica q (que tiene en cuenta la energía cinética del fluido) y estática p (que agrupa los términos de presión P y de energía potencial por unidad de volumen asociada al cambio de altura del fluido, z) se obtiene:

$$q + p = cte$$

Experimentalmente, la presión dinámica puede determinarse a partir de un tubo de Prandtl que consiste en un tubo de Pitot acoplado a un tubo piezométrico (ver figura 2).



Figura 2. Tubo de Prandtl.

El tubo de Pitot presenta un orificio de entrada frontal inconexo con dos orificios laterales interconectados. El orificio frontal constituye el extremo de un conducto interno que permite poner en comunicación la entrada del tubo de Pitot con una de las cámaras del tubo piezométrico. Los orificios laterales ponen en comunicación la superficie exterior del tubo de Pitot con la otra cámara del tubo piezométrico. Las cámaras del tubo piezométrico se encuentran unidas por su extremo inferior y rellenas parcialmente con un líquido que impide la comunicación entre los espacios libres de líquido de ambas cámaras (ver figura 2). En condiciones de equilibrio, es decir, en ausencia de flujo a la entrada del tubo de Pitot, la altura de la columna de líquido en ambas cámaras del tubo piezométrico es la misma y la presión sobre cada columna de líquido es la atmosférica. Cuando el tubo de Pitot se interpone en un flujo, de tal forma que la dirección del tubo es paralela a la dirección de las líneas de corriente, la presión en el orificio frontal se transmite a la cámara del tubo piezométrico correspondiente, aumentando así la presión en ésta respecto a la que presentaba en el equilibrio. Como las líneas de corriente son paralelas a los orificios laterales, la presión en estos orificios, y por tanto en su cámara asociada, es la atmosférica. Se establece entonces una diferencia de presión entre ambas cámaras y como consecuencia, el líquido de relleno, con libertad de movimiento, se desplazará a una nueva situación de equilibrio en la que el peso del volumen de líquido desplazado es soportado por el exceso de presión en la cámara que origina su desplazamiento.

La presión en la entrada del orificio frontal, y por ende en la cámara asociada, es la presión dinámica del fluido, pues, en virtud de la ecuación de Bernoulli, el fluido lejos del orificio frontal posee una energía cinética por unidad de volumen mientras que en una región cercana a la entrada de éste la velocidad decrece hasta anularse justo en la entrada. Luego, aplicando la ecuación de Bernoulli a un punto alejado del orificio frontal y en la propia entrada, se puede determinar la presión en la cámara que comunica con el orificio frontal:

$$P = \frac{1}{2} \rho_f v^2 + P_{atm}$$

Se puede relacionar la velocidad del fluido con el desplazamiento Δh experimentado por el líquido de relleno en las cámaras del tubo piezométrico consecuencia de la diferencia entre la presión dinámica y la atmosférica, a partir de la nueva situación de equilibrio.

Como la presión en el tramo horizontal del tubo piezométrico que comunica ambas cámaras es constante, se puede escribir, en virtud de la ecuación de Bernoulli:

$$P + \rho_l g(h^{eq} - \Delta h) = P_{atm} + \rho_l g(h^{eq} + \Delta h)$$

donde h^{eq} corresponde a la altura de la columna de líquido en el equilibrio y ρ_l la densidad del líquido. P representa la presión en la cámara que conecta con la entrada del tubo de Pitot mientras que P_{atm} es la presión atmosférica en la cámara que conecta con los orificios laterales de dicho tubo.

Introduciendo la expresión de la presión, P , en el interior de la cámara que conecta con la entrada del tubo de Pitot, se obtiene:

$$\frac{1}{2} \rho_f v^2 + P_{atm} + \rho_l g(h^{eq} - \Delta h) = P_{atm} + \rho_l g(h^{eq} + \Delta h)$$

con lo que la velocidad del fluido resulta:

$$v = 2 \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_f} \cdot g \cdot \Delta h}$$

y la presión dinámica del fluido:

$$q = \frac{1}{2} \rho_f v^2 = 2 \rho_l \cdot g \cdot \Delta h$$

Método experimental I: Calibración del generador de flujo laminar

El generador de flujo laminar puede dar lugar a flujos laminares con diferente velocidad. El control de la velocidad se lleva a cabo ajustando la potencia eléctrica de entrada al generador de flujo laminar mediante la consigna de una diferencia de potencial en una fuente de alimentación de corriente alterna. El objetivo es conocer la presión dinámica en función de la diferencia de potencial consignada a la fuente ac. De esta forma se puede prescindir del tubo de Prandtl en experiencias posteriores pues la presión dinámica se puede obtener a partir de la diferencia de potencial aplicada a la fuente ac.

Procedimiento:

1. Conectar el tubo de Pitot con el tubo piezométrico de tal forma que los orificios laterales del tubo de Pitot comuniquen con la cámara que permite medir alturas (i.e., aquella que

contiene una punta de medida unida a un tornillo micrométrico) y el orificio frontal con la otra cámara.

2. Colocar el tubo de Pitot a una distancia del generador de flujo laminar tal que el efecto de la rejilla de salida sobre el flujo sea despreciable (aproximadamente a 10 cm de la rejilla).
3. Regular la altura del tubo de Pitot para que se sitúe aproximadamente a una altura correspondiente al centro del generador de flujo laminar.
4. Alinear el tubo de Pitot con el generador de flujo laminar para asegurarse que cuando se encuentre en funcionamiento las líneas de corriente sean paralelas a los orificios laterales y perpendiculares a la superficie del orificio frontal del tubo de Pitot.
5. Comprobar que en el tubo piezométrico, en condiciones de equilibrio, es decir, sin flujo aplicado, el líquido de relleno (agua) entra en contacto con la punta de medida cuando la escala graduada del tornillo micrométrico marca 0 μm .
Si la escala marca 0 μm y la punta no entra en contacto con el líquido, rellenar cuidadosamente, con ayuda de una jeringa, hasta que líquido y punta se pongan en contacto.
6. Conectar el generador de flujo laminar y seleccionar una diferencia de potencial con ayuda del voltímetro (el ventilador del generador no arranca hasta que se alcanzan aproximadamente 50 V ac.).
7. Para la diferencia de potencial seleccionada, medir en el tubo piezométrico la diferencia de altura alcanzada por el líquido respecto a la situación de equilibrio. Para ello, desenroscar el tornillo micrométrico hasta que la punta de medición quede liberada del líquido. Posteriormente, enroscar el tornillo micrométrico hasta que la punta de medición entre en contacto con el líquido (hasta que se observa la formación de un menisco). Registrar la medida (Δh) que muestra la escala graduada del tornillo micrométrico.
8. Repetir los pasos 6 y 7 para valores de diferencia de potencial aplicada distribuidas (mínimo 10 valores) entre el mínimo (aprox. 50 V ac.) y el máximo (aprox. 220 V ac.).
9. Representar la presión dinámica p frente a la diferencia de potencial V_{ac} y realizar un ajuste por mínimos cuadrados de los datos para obtener la ecuación que relaciona la presión dinámica con la diferencia de potencial consignada al generador.

Método experimental II: Determinación de las fuerzas de arrastre y sustentación

Las fuerzas de arrastre y sustentación que experimenta un cuerpo en el seno de una corriente de aire tienen una componente paralela y perpendicular al flujo de aire que las origina. Estas fuerzas se van a medir mediante dos dinamómetros conectados al eje que soporta el cuerpo de tal forma que reaccionen a las fuerzas paralelas y perpendiculares que éste experimenta.

1. Insertar el eje del objeto bajo estudio en el sistema de pivote x/y, elegir el ángulo de inclinación del objeto respecto a la horizontal y fijar su posición mediante el tornillo de sujeción en la parte inferior del pivote.
2. Equilibrar el peso del objeto respecto al pivote que lo soporta con ayuda de la pesa deslizante que existe sobre el eje que conecta con el cuerpo. Después del equilibrado el eje debe quedar centrado respecto al anillo que sirve como referencia. Fijar la pesa al eje mediante la tuerca de sujeción.
3. Ajustar la posición del dinamómetro que mide la fuerza vertical (sustentación) de modo que el hilo que une eje y dinamómetro sea vertical. El dinamómetro pende de una polea sujeta a la base (ver figura 1). Liberar la polea y desplazarla horizontalmente hasta observar la verticalidad del hilo que une dinamómetro y eje del cuerpo. Tensar levemente el hilo (justo lo necesario para que se observe recto) rotando el eje al que se encuentra amarrado. La leve tensión que muestre el dinamómetro tras esta operación se tomará como origen y por tanto debe descontarse de las medidas posteriores.
4. Ajustar la posición del dinamómetro que mide la fuerza horizontal (de arrastre) de forma que el hilo que une eje y dinamómetro sea horizontal. Liberar de la base la polea que une el hilo con el dinamómetro y desplazarla verticalmente hasta observar la horizontalidad del hilo. Tensar levemente el hilo (justo lo necesario para que se observe recto) rotando el eje al que se encuentra amarrado. La leve tensión que muestre el dinamómetro tras esta operación debe descontarse de las medidas posteriores.
NOTA: En este punto verificar que el eje se encuentra centrado respecto al anillo de referencia.
5. Ajustar la altura del objeto bajo estudio de forma que el centro de la rejilla del generador de flujo laminar quede alineado con la superficie del objeto. Ajustar la separación entre la rejilla de salida del generador de flujo laminar y el objeto, aproximadamente 10 cm. Conectar el generador de flujo laminar y seleccionar una diferencia de potencial con ayuda del voltímetro. El eje que conecta con el objeto se desplazará de la posición de equilibrio (centro del anillo) a una nueva posición, resultado de la combinación de las fuerzas de arrastre y sustentación que actúan sobre el objeto.

6. En presencia del flujo de aire, retornar el eje a la posición de equilibrio (centro del anillo) tensando el hilo, conectado a un dinamómetro, que corresponda. Esta operación se consigue liberando el eje donde se encuentra anclado el hilo y enrollando este último. Registrar la fuerza que marcan los dinamómetros una vez alcanzada la posición de equilibrio. Desconectar el flujo de aire y ajustar nuevamente la posición de equilibrio anotando la fuerza que marcan los dinamómetros para ser descontada en la siguiente medida.
7. Seleccionar un nuevo valor de la diferencia de potencial aplicada al generador y repetir el paso 6.
8. Repetir los pasos 6 y 7 para diferencias de potencial aplicada al generador distribuidas (12 - 15 valores) entre el mínimo ($V_{ac}=50$ V) y el máximo ($V_{ac}=220$ V). Nota: la máxima fuerza que pueden medir los dinamómetros es de 113 mN.

Resultados experimentales

- Para la placa plana de área 17.5 cm^2 , colocada de modo que el haz incida con un ángulo de 20° respecto de la horizontal, representar gráficamente la fuerza de arrastre F_a y la fuerza de sustentación F_b en función de la presión dinámica. Realizar un ajuste por mínimos cuadrados de los datos experimentales para determinar el coeficiente de arrastre C_a y de sustentación C_b . Discutir los resultados.
- Para una presión dinámica fija de 43 Pa, representar gráficamente la fuerza de arrastre F_a y la fuerza de sustentación F_b obtenidos con la placa plana de área 17.5 cm^2 en función del ángulo de incidencia, desde un ángulo inicial nulo hasta el ángulo crítico de entrada en pérdida de la placa, determinar dicho ángulo. Discutir los resultados.
- Representar gráficamente la fuerza de arrastre F_a y la fuerza de sustentación F_b en función del área de placa para un ángulo de incidencia de 20° y una presión dinámica de 43 Pa. A partir de los coeficientes C_a y C_b determinados en un apartado anterior y conocido el área de cada placa, así como la presión dinámica consignada, comparar los resultados experimentales obtenidos (F_a, F_b) con los valores que se obtienen a partir de las expresiones teóricas de la fuerza de arrastre y sustentación. Discutir los resultados.

Bibliografía

1. Batchelor, G. K.: *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press, 2000 third ed., 1967.
2. Landau, L. D. y E. M. Lifshitz: *Fluid Mechanics*, vol. 6 de Course of Theoretical Physics. Pergamon Press, 1987 second ed., 1959 (tema IV, §39, pág. 168).

3. Landau, L. D. y E. M. Lifshitz: *Mecánica de Fluidos*, vol. 6 de *Curso de Física Teórica*. Reverté, primera ed., 1991. Traducción de la primera edición inglesa.

NOTA MUY IMPORTANTE

- Tome nota de las incertidumbres de todos los equipos de medida que utilice.
- **Realice la propagación de incertidumbre para medidas indirectas (mostrando las derivadas parciales calculadas así como la expresión de la incertidumbre en función de las magnitudes), requisito imprescindible para que el informe de la práctica sea evaluado.**
- Aunque no se exija explícitamente en el guion de prácticas, incluya una tabla de datos para cada representación gráfica que realice. Añada las columnas correspondientes a las incertidumbres de medida y propagación de incertidumbres.
- En las representaciones gráficas consigne las magnitudes representadas en cada eje, así como sus unidades correspondientes. Incluya barras de incertidumbre en los puntos de datos representados.
- Lea los documentos “Presentación de informes” y “Cálculo de incertidumbres” disponibles en el curso virtual.