

DESARROLLO DE UNA EXPERIENCIA ACADÉMICA DE VISUALIZACIÓN DE VIBRACIONES INDUCIDAS POR VÓRTICES

G. di Pasquo ^a, C. G. Varrenti ^b, P. A. Caron ^a, W. A. Gazek ^a

^a Grupo de mecánica de fluidos - Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Haedo - Haedo, Buenos Aires.

^b Cátedra de Aeroelasticidad - Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Haedo - Haedo, Buenos Aires.

París 532 - (1706) Haedo – Buenos Aires - Argentina

Email: gdipasquo@frh.utn.edu.ar

RESUMEN

Se desarrolló una experiencia de laboratorio para la materia electiva Aeroelasticidad que consiste en la visualización del fenómeno de vibraciones inducidas por vórtices (VIV) en un cilindro montado en un túnel de viento y su comparación con los resultados teóricos calculados en clase. Se observó que la frecuencia de vibración del cilindro coincide con la frecuencia natural calculada analíticamente y su amplitud es máxima cuando la frecuencia de desprendimiento de vórtices es aproximadamente igual a la frecuencia natural. Con esta comparación, se demostró a los alumnos la utilidad de los conceptos y metodologías de cálculo vistos en clase y la importancia de tener en cuenta las vibraciones inducidas por vórtices al diseñar una estructura sometida a un flujo en determinado rango de velocidades característico.

Palabras clave: VIBRACIONES INDUCIDAS POR VÓRTICES, EXPERIENCIA ACADÉMICA, AEROELASTICIDAD

INTRODUCCIÓN

Las vibraciones inducidas por vórtices (VIV) son un fenómeno aeroelástico causado por el desprendimiento de vórtices, de forma alternada en dos caras opuestas de una estructura, que inducen cargas aerodinámicas periódicas. Para el caso de una estructura rígida, la frecuencia de desprendimiento de vórtices sigue la Ley de Strouhal y varía cuasi-linealmente con la velocidad del flujo libre para un amplio rango de números de Reynolds. En cambio, cuando la estructura es flexible o elástica, y cuando la frecuencia de desprendimiento de vórtices coincide con la frecuencia natural de la estructura, se produce la resonancia y el sistema entra en el rango de sincronización (*lock-in*). En el estado de sincronización, la frecuencia de desprendimiento de vórtices deja de seguir la ley de Strouhal y se sincroniza con la frecuencia de vibración del sistema [1, 2].

Cuando una estructura opera en el rango de sincronización, puede fallar catastróficamente o experimentar una reducción considerable de su vida a la fatiga, por lo que es de vital importancia entender el fenómeno. El más claro ejemplo de la importancia del estudio de las VIV es el colapso del puente de Tacoma Narrows en 1940, donde el desprendimiento alternado de vórtices sobre la cara superior e inferior del puente generaron una oscilación autoexcitada que lo destruyó. Por lo tanto, las VIV se extienden más allá de la industria aeronáutica como tal y el ingeniero aeronáutico debe ser consciente de su existencia incluso si trabaja en otro ámbito.

Por estas razones, se consideró necesario introducir el tema de VIV en el programa de la materia Aeroelasticidad y complementarlo con un trabajo práctico de laboratorio. El trabajo práctico consiste en la comparación entre la teoría y la práctica sobre un modelo simplificado y unidimensional, que permita a los alumnos visualizar claramente el fenómeno de las VIV y comparar entre lo calculado y lo observado sin la necesidad de introducir complejos modelos matemáticos ni casos específicos de la realidad. Al momento de diseñar la experiencia se utilizó lo mostrado en el documental de Rouse [3].

METODOLOGÍA

El túnel de viento que se utiliza es de baja velocidad, de retorno abierto y con una sección de prueba de 127x127cm. La velocidad del flujo se mide con un tubo Pitot montado aguas arriba del modelo. Para esto, se utiliza la función de medición de velocidad del equipo *Air flux meter 922* de *Fluke*. El túnel está motorizado por un ventilador industrial de 25 HP.

El dispositivo de prueba consiste en un cilindro plástico de PVC, de 50mm de diámetro, sostenido por cuatro resortes de extensión helicoidales en un marco de madera reforzado con perfiles de hierro. Los resortes se sostienen del marco utilizando cuatro pitones atornillados con tuerca y contratuerca a cuatro ménsulas atornilladas al marco. Los resortes se unen al cilindro colocando sus extremos en un tornillo atornillado a dos tapas de PETG impresas en 3D, insertadas a presión en los extremos del cilindro.

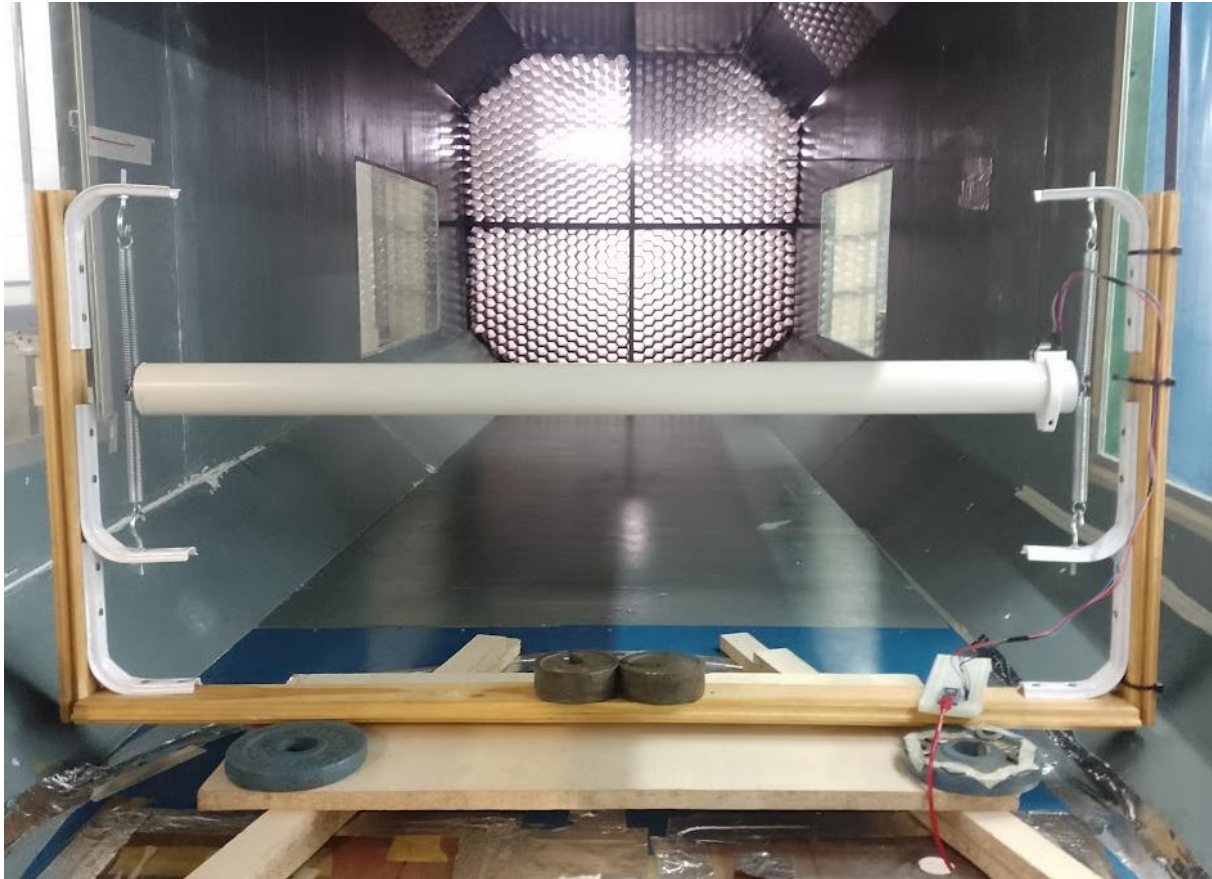


Figura 1. Dispositivo colocado en el túnel de viento.

Tabla 1. Características físicas del dispositivo.

Parámetro	Valor
Diámetro del cilindro	0.05 m
Ancho del cilindro	0.805 m
Masa del cilindro	0.596 kg
Rigidez total	420 N/m

La caracterización de la frecuencia y amplitud de las oscilaciones se realizó con un acelerómetro montado sobre el cilindro. Cabe destacar que los cables que conectan el acelerómetro al Arduino incrementaron el amortiguamiento del sistema, por ende, la amplitud de la oscilación y la velocidad a la cual se produce la oscilación de amplitud máxima son distintas con y sin el acelerómetro conectado. Dado que el foco del trabajo es demostrativo, se descartó este efecto en los resultados.

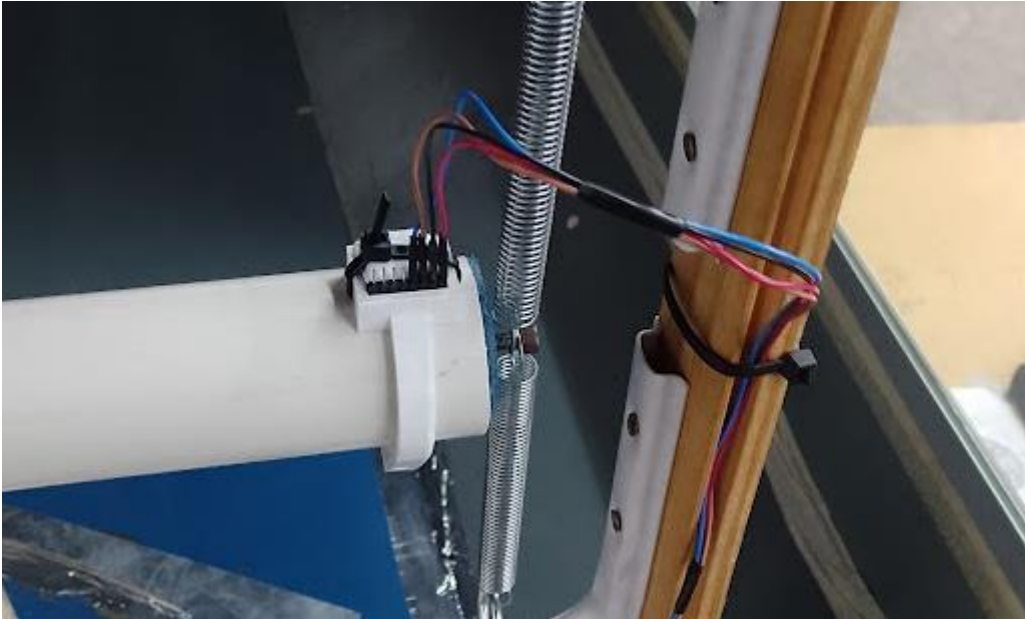


Figura 2. Detalle del acelerómetro y la organización de los cables para reducir el amortiguamiento que estos producen.

Como la frecuencia de vibración es casi constante, se asumió que la amplitud de esta es proporcional a la aceleración medida, que es también lo que se observa a simple vista.

Se realizaron mediciones con el túnel apagado, excitando el cilindro manualmente, para medir la frecuencia de resonancia y comparar con la teoría.

Luego, se realizaron mediciones a diferentes velocidades, cada vez mayores, y se recolectaron los datos del acelerómetro unos minutos después del cambio de velocidad para que las vibraciones se estabilicen. Cada medición estaba compuesta por un valor de tiempo (en microsegundos), y los valores de la aceleración en los ejes X, Y, y Z locales del acelerómetro. El eje Z del acelerómetro estaba alineado con la dirección de la vibración, por lo que es la única que se usó en los cálculos. La frecuencia de muestreo fue de 4.5 milisegundos.

La frecuencia y amplitud de la vibración se obtuvieron realizando un análisis espectral sobre los datos recolectados.

La solución teórica se obtiene utilizando el modelo analítico expuesto en la Figura 3.

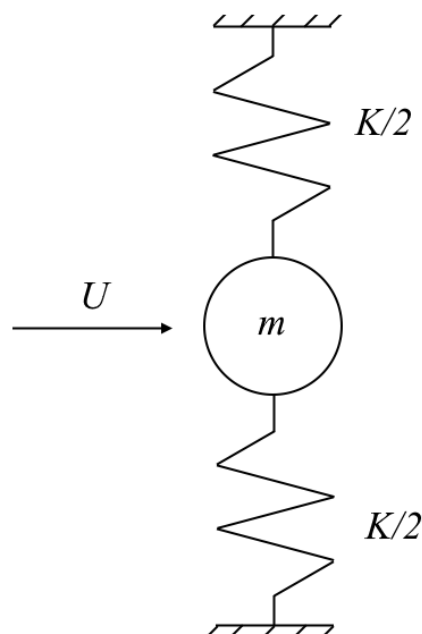


Figura 3. Esquema del modelo analítico.

La frecuencia natural se calcula como:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} = 4.2 \text{ Hz} \quad (1)$$

Y la frecuencia de desprendimiento de vórtices como,

$$f_{vor} = St * \frac{U}{D} \quad (2)$$

Donde St es el número de Strouhal, U es la velocidad y D el diámetro del cilindro.

El número de Strouhal que se utiliza es 0.2, ya que el Re es de aproximadamente 3500 [4].

La velocidad a la cual se espera que el sistema resuene se obtiene igualando la $f_n = f_{vor}$ y resolviendo por U.

$$U = f_n * \frac{D}{St} = 1.05 \text{ m/s} \quad (3)$$

Tabla 2. Características aeroelásticas del dispositivo.

Parámetro	Valor
Número de Reynolds	3500
Número de Strouhal	0.2
Frecuencia de Resonancia	4.2 Hz
Velocidad de Resonancia por VIV	1.05 m/s

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante la experiencia de laboratorio, los alumnos calcularon la frecuencia de resonancia del conjunto resorte-cilindro utilizando el método analítico expuesto en la ecuación (1). Luego encontraron la velocidad del flujo libre a la cual la frecuencia de desprendimiento de vórtices coincide con la frecuencia de resonancia. Posteriormente, los alumnos fueron al laboratorio y observaron el comportamiento del cilindro al incrementar la velocidad del flujo libre desde cero hasta 2.2 m/s. Observaron que la amplitud era muy pequeña a velocidades menores a la calculada y se incrementaba rápidamente al acercarse a la velocidad de resonancia. Al aumentar un poco más la velocidad, la amplitud disminuía considerablemente, pero sin desaparecer, estado en el que permanecía por un rango de velocidades notable, y posteriormente desaparecía para mayores velocidades.

Finalmente, los alumnos graficaron de forma cualitativa la amplitud de la vibración en función de la velocidad y lo compararon con la teoría.

Utilizando los datos obtenidos por el acelerómetro, se observó que la velocidad a la cual la amplitud es máxima es aproximadamente igual a la velocidad calculada analíticamente. Así mismo, se observó la gran amplitud de la oscilación cuando la frecuencia de desprendimiento de vórtices coincide con la frecuencia de resonancia, seguida de un rango de velocidades donde la amplitud de la oscilación es casi constante y mucho menor a la máxima (Figura 4). En todo este rango de velocidades, de 1 m/s a 1.4 m/s, la frecuencia de la vibración no se modificó (Figura 5), lo que muestra el fenómeno del *lock-in* que se quiere visualizar en la experiencia. Se observó también que el modelo tiene dos modos de vibración en frecuencias cercanas. El primero, que corresponde al movimiento en el plano transversal del cilindro, es de 4.4 Hz y el segundo de 6.8 Hz. En la Figura 4 se observa como el fenómeno de las VIV y el *lock-in* se repite también para el segundo modo. En la Figura 6 se observa la forma senoidal de la vibración, que coincide con la solución teórica de un sistema de masa resorte como el expuesto en la Figura 3.

Respuesta del cilindro

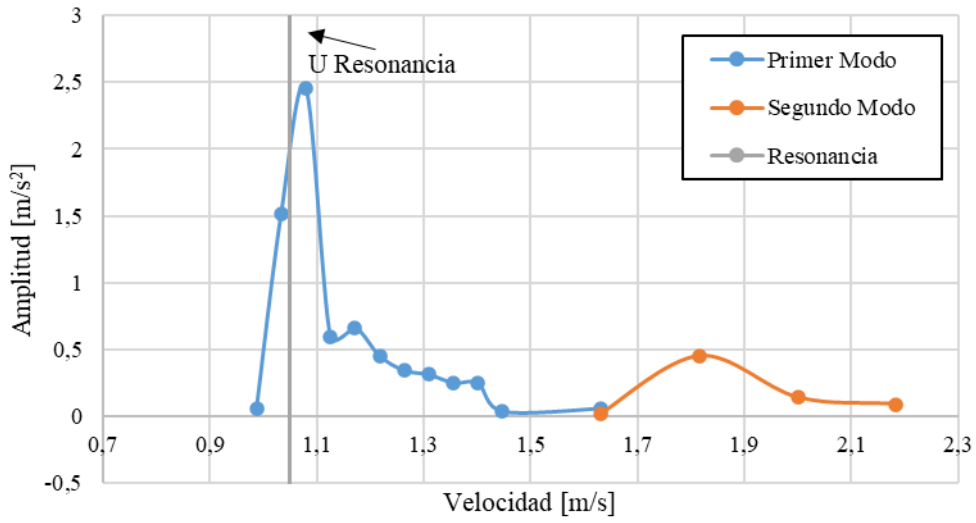


Figura 4. Amplitud de las oscilaciones medidas con el acelerómetro en función de la velocidad del flujo libre.

Respuesta del cilindro

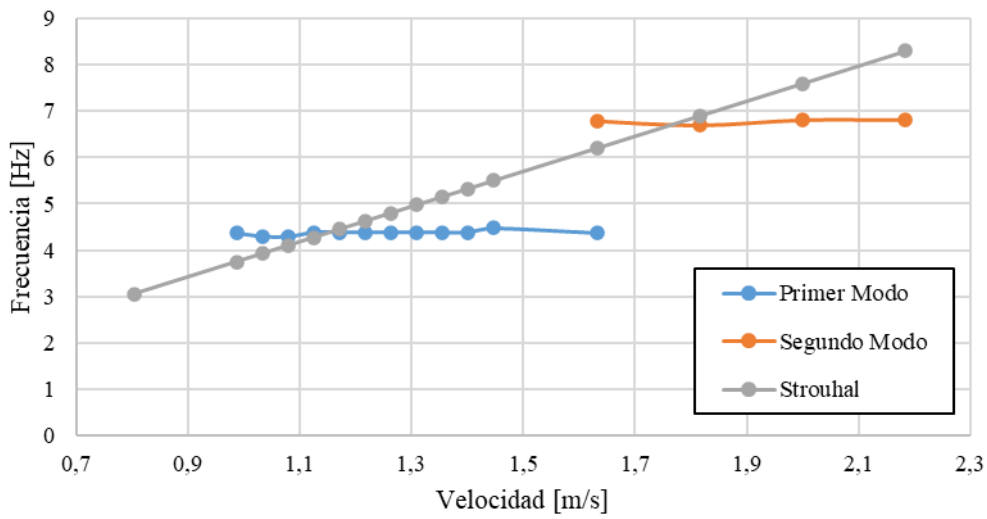


Figura 5. Frecuencia de la vibración medida en función de la velocidad del flujo libre, se observa como el lock-in se repite para el segundo modo de vibración del modelo.

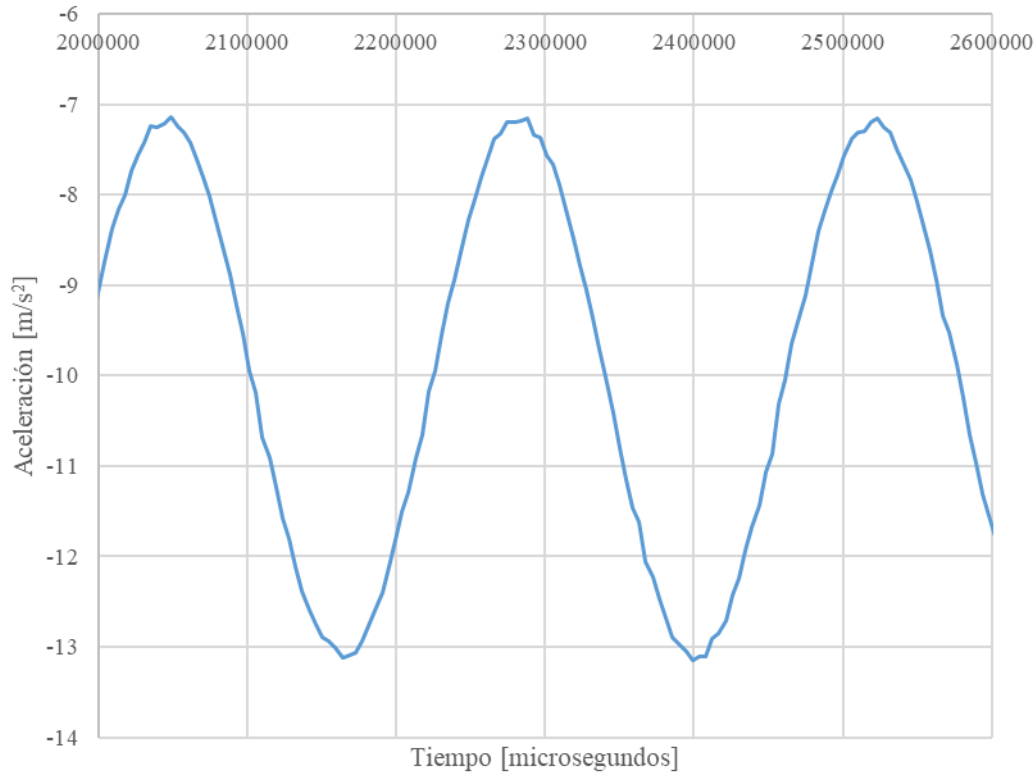


Figura 6. Amplitud de las oscilaciones medidas con el acelerómetro en función del tiempo, para la velocidad de amplitud máxima de $U = 1.1$ m/s.

CONCLUSIONES

Se desarrolló una experiencia de laboratorio para analizar el fenómeno de *lock-in* y las vibraciones inducidas por vórtices para la materia Aeroelasticidad. Se obtuvieron los resultados esperados, siendo estos la visualización de oscilaciones sostenidas producidas por el acoplamiento fluido estructura, y como estas vibraciones no cambian en frecuencia, pero sí en amplitud, al cambiar la velocidad del flujo libre.

Así mismo, los alumnos pudieron observar de forma directa la importancia de estudiar las VIV, al ver de primera mano, como para un pequeño rango de velocidades la estructura oscila con una amplitud capaz de generar daños permanentes o reducir materialmente la vida a la fatiga esperada originalmente. Por lo tanto, se lograron los objetivos didácticos de realizar una comparación simple entre métodos teóricos y la práctica, así como el entendimiento de primera mano del fenómeno.

REFERENCIAS

1. V. Strouhal. Über eine besondere Art der Tonerregung (On an unusual sort of sound excitation), *Annalen der Physik und Chemie*, 1878, **3rd** series, pp 216–251. (*Paper*)
2. M. Chunhui, W. Decheng, Y. Zhiming: Three-Dimensional Numerical Simulation of Vortex-Induced Vibration of a Rigid Cylinder. *International Ocean and Polar Engineering Conference*, 2020, Vol **30**, pp 2360-2362. (*Paper*)
3. H. Rouse: *Form Drag, Lift, and Propulsion*. Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa. (*Documental*)
4. J. H. Lienhard: “Synopsis of lift, drag, and vortex frequency data for rigid circular cylinders”; 1966, Technical Extension Service, Washington State University. (*Libro*)