

## DETERMINACIÓN DE VIBRACIONES TRANSVERSALES EN UN EDIFICIO, A PARTIR DE ENSAYOS EN TÚNEL DE VIENTO

Jorge Lässig<sup>1</sup>, Ubaldo Jara<sup>2</sup>, Anabel Apcarian<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Prof. Dr. Ingeniero, Universidad Nacional del Comahue, Bs.As. 1400, (8300) Neuquén, Argentina, [jorge.lässig@fain.uncoma.edu.ar](mailto:jorge.lässig@fain.uncoma.edu.ar)

<sup>2</sup> Docente Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Bs.As. 1400, (8300) Neuquén, Argentina, [ubaldo.jara@fain.uncoma.edu.ar](mailto:ubaldo.jara@fain.uncoma.edu.ar)

<sup>3</sup> Prof. Ingeniera, Universidad Nacional del Comahue, Bs.As. 1400, (8300) Neuquén, Argentina, [apcarian@gmail.com](mailto:apcarian@gmail.com)

### RESUMEN

Se estudiaron las vibraciones inducidas por viento en un edificio con un modelo en escala 1:400 que se ensayó en túnel de viento. El edificio es un prisma de 101 m de alto y sección transversal rectangular, con una asimetría del lado norte debido a la presencia del ascensor. Esta asimetría produce que el viento incidente se acelere más en ese lado que en el opuesto, causando vibraciones laterales debido a desprendimientos de vórtices. Se realizaron ensayos a un número de Reynolds de 30 000 para medir la frecuencia de desprendimientos de vórtices en los vértices noroeste y suroeste del edificio y la frecuencia de oscilación del modelo. Los resultados determinaron que la frecuencia de separación de vórtices del lado sur es de 30 Hz y la del lado norte de 48 Hz obteniendo números de Strouhal de 0,172 y 0,275 respectivamente. Para cuerpos de secciones con bordes agudos el número de Strouhal se mantiene prácticamente constante con el número de Reynolds, por lo que las vibraciones inducidas serán menores en el prototipo que en el modelo. Es decir que las vibraciones que ocurrirán en el edificio para una intensidad del viento de por ejemplo 20 m/s serán de 0,19 Hz para el lado sur, y de 0,24 Hz para el lado norte. Estos datos deberían ser considerados en el análisis dinámico de la estructura, para determinar si las frecuencias de las vibraciones inducidas por el viento se encuentran alejadas de la frecuencia natural del edificio.

**Palabras claves:** edificios, vibraciones eólicas, vórtices.

### DETERMINATION OF TRANSVERSE VIBRATIONS IN A BUILDING BASED ON WIND TUNNEL TESTS

#### ABSTRACT

A building scale model (1:400) was constructed and subjected to tests in a wind tunnel. Since it was made with plastic materials, it is flexible thus sensitive to deformations if forcing vibrations, such as the eolic ones, occur. The building features a rectangular-based prism, but it presents an asymmetry on its north side where the elevator is, which causes phenomena such as vortex flow separation at different frequencies on each side, causing lateral vibrations. We conducted two tests: one to determine the vortex separation frequency in northwestern and southwestern vertexes of the building, and the other one to calculate the oscillating frequency of the model. Both tests applied a Reynolds number of 30 000.

Results showed that the vortex separation frequency on the Southern side was 30Hz and the one on the Northern side was 48 Hz, giving Strouhal numbers of 0.172 and 0.275 respectively.

For acute-angle shaped bodies, Strouhal number remains constant along with Reynolds number. When Strouhal number increases due to the real size of the building, induced vibrations are lower in the prototype (real building) than in the tested model. Therefore, the wind vibrations that will apply on the real building for a wind intensity of 20m/s will be 0.19 Hz on its Southern side and 0.24 Hz on its Northern side. This data should be considered when analyzing Dynamics on structures to make sure their natural vibrations are largely different from these ones.

**Keywords:** buildings, wind vibrations, vortices.

**Nota Editorial:** Recibido: septiembre 2019; Aceptado: diciembre 2020

## 1. INTRODUCCIÓN

La utilización de túneles de viento en el estudio aerodinámico de edificios lleva varias décadas, podemos remontarnos a 1960 con Scruton [1] quien describe la utilización de los mismos en aerodinámica industrial, más adelante se puede citar a Cermak (1975) [2] donde ya se identifican los túneles de viento de capa límite atmosférica. En la actualidad hay avances no solo en el estudio de edificios súper altos como los mencionados por Wonsul Kim et all (2018) [3] y Lei Wang et all (2018) [4] entre otros, sino también en el estudio de efectos de interferencias con otros edificios (Long Doan Sy et all, 2019) [5].

En la predicción de vibraciones en edificios hay trabajos en CFD como los de YueZhang et all (2015) [6], y nuevos métodos usando el túnel de viento como los de Mingfeng Huang et all (2018) [7].

Ferrareto (2018) [8] relaciona vibraciones con confort y propone criterios para el diseño de las estructuras en este tipo de edificios.

Por lo que determinar las posibles frecuencias de vibración inducidas por el viento es un tema de interés para el ingeniero encargado del proyecto como para el estructuralista.

En el caso de construcciones muy rígidas suele asumirse que los desplazamientos de la estructura son despreciables y realizarse un análisis cuasi estático. Se consideran valores de presión y velocidad promediados o integrados en el tiempo, y cargas máximas de diseño con baja probabilidad de ocurrencia en un tiempo mayor que el de la vida útil de la estructura.

Si la rigidez de la estructura es baja pueden ocurrir tres situaciones diferentes pero relacionadas:

1) La frecuencia natural más baja de la estructura (el primer modo fundamental) es del orden de las frecuencias de la turbulencia en su estela. En este caso se producen mecanismos de resonancia y realimentación.

2) La estructura admite desplazamientos no despreciables y las cargas sobre la estructura desplazada son distintas de las actuantes en la posición original. Esto origina fenómenos aeroelásticos (flutter) [9].

3) Ambos fenómenos están acoplados con un tercero: a menor rigidez, mayor amplitud del movimiento y mayores aceleraciones, por lo que las fuerzas inerciales pueden incluso superar a las aerodinámicas.

En Argentina el reglamento para el cálculo de acciones de viento es la norma CIRSOC 102 [12].

### 1.1 Separación de la capa límite

La capa de fluido en la que las fuerzas viscosas son importantes, cuando es adyacente a una superficie, es denominada "capa límite". En el desarrollo de configuraciones de viento alrededor de los edificios, juega un papel importante el fenómeno llamado "separación de capa límite". El flujo de aire en la capa límite pierde cantidad de movimiento debido a las fuerzas de fricción. Cuando se tiene un cuerpo inmerso en una corriente, si el gradiente externo de presiones es favorable, las capas exteriores de fluido transfieren continuamente cantidad de movimiento a las capas adyacentes al obstáculo. De esta forma, el aire en la capa límite mantiene una velocidad positiva. En un gradiente adverso de presiones esta transferencia es menor, y se llega a un punto en que las capas inferiores han perdido todo su ímpetu y se detienen. Las capas adyacentes a estas deben fluir sobre aire estacionario, y en consecuencia se separan de la superficie (Figura 1).

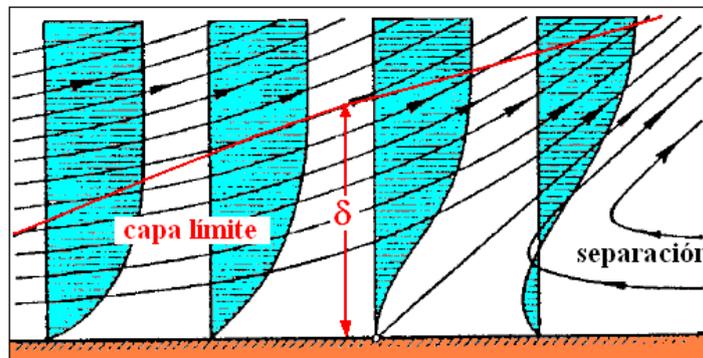
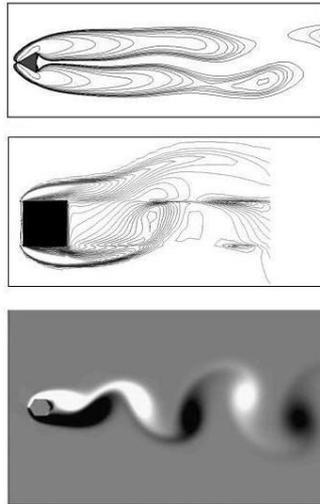


Figura 1: Esquema de separación de la capa límite

El punto de separación depende entre otras cosas, de si la capa límite es laminar o turbulenta, y esto está determinado por tres factores: el número de Reynolds, la turbulencia del viento, y la rugosidad de la superficie. El valor crítico del Reynolds en el que se desencadena la transición laminar a turbulenta es aproximadamente  $3,5 \times 10^5$  para cilindros en aire sin turbulencia y una superficie sin rugosidad. Si el viento contiene turbulencia

y la superficie del objeto es rugosa, entonces el Reynolds crítico se reduce a valores del orden de  $10^4$ .

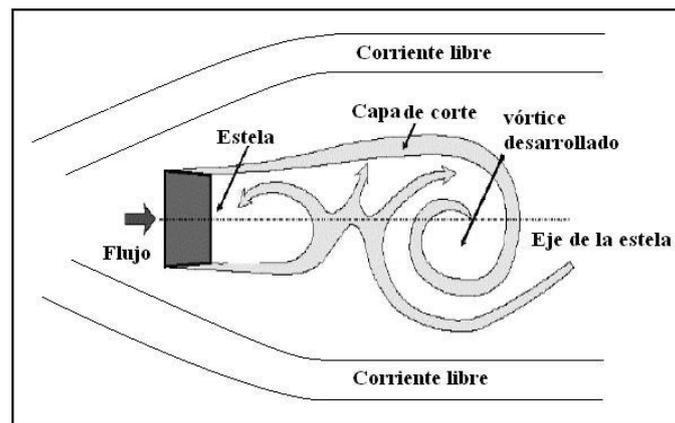
En los ensayos en túneles de viento, deben reproducirse sobre el modelo las configuraciones del viento alrededor del prototipo. Esto es difícil de conseguir debido a que el número de Reynolds del prototipo es de uno a dos órdenes de magnitud mayor al que se puede obtener en el modelo. Esta dificultad se subsana en el caso de que la sección transversal del cuerpo en estudio tenga bordes agudos (no redondeados). Para estas secciones, la separación ocurre en el primer borde que debe rodear el flujo, independientemente del número de Reynolds, de la rugosidad superficial y de las características del viento [9] (Figura 2). Es por ello que la acción del viento sobre estas construcciones puede ser investigada en el túnel con resultados confiables.



**Figura 2:** Ejemplo de distintos cuerpos con bordes agudos, donde se observa que el desprendimiento ocurre en el primer borde

### 1.2 Estela de un edificio

Aguas abajo del punto de separación la capa límite se mueve hacia dentro de la corriente libre y se denomina "capa de corte" (Figura 3). Ésta divide la estela del cuerpo de la corriente libre que la circunda. Una característica importante de las capas de corte es que incorporan fluido tanto de la corriente como de la estela.

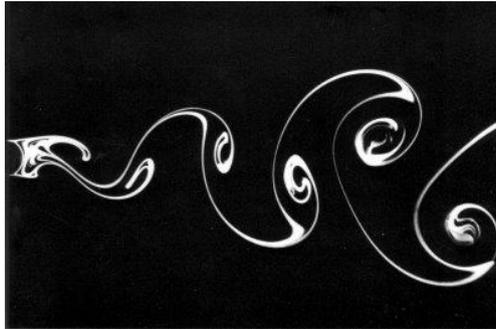


**Figura 3:** Esquema de separación de vórtices en un cuerpo tipo paralelepípedo

### 1.3 Desprendimiento de vórtices

Con su crecimiento, un grupo de vórtices llega a incorporar gradualmente vórtices de la capa opuesta que tienen distinto sentido de rotación, y por consiguiente tienden a reducir la vorticidad del grupo. Cuando la tasa de aumento de vorticidad del vórtice adyacente a la pared del cuerpo se anula, éste se desprende y viaja corriente abajo. Esto origina en la zona inmediata a la superficie el crecimiento de un vórtice de la capa opuesta, que crece hasta que su vorticidad deja de aumentar y se desprende, repitiéndose el ciclo. Para que

la configuración del fluido a sotavento del cuerpo sea estable es necesario que los vórtices principales desprendidos se alternen entre ambas capas (Figura 4). A esto se lo denomina "calle de vórtices de Von Karman".



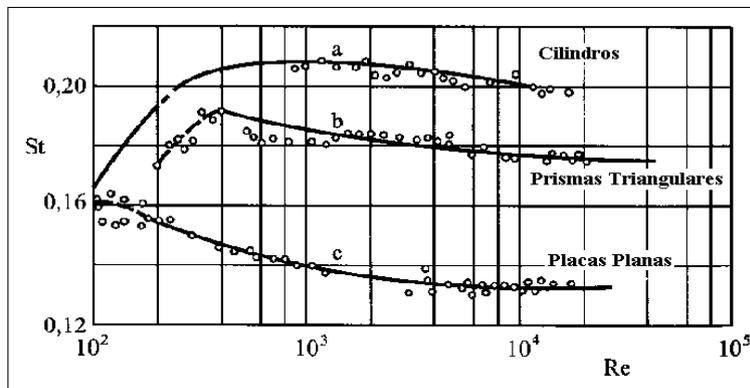
**Figura 4:** Calles de Von Karman generadas detrás de un cilindro, consistente en vórtices desprendidos en forma alternada

#### 1.4 Frecuencia de oscilación y número de Strouhal

El número de Strouhal (1) es un parámetro adimensional que relaciona vibraciones con inercia. Se lo define como:

$$St = \frac{L \cdot F_c}{V} \tag{1}$$

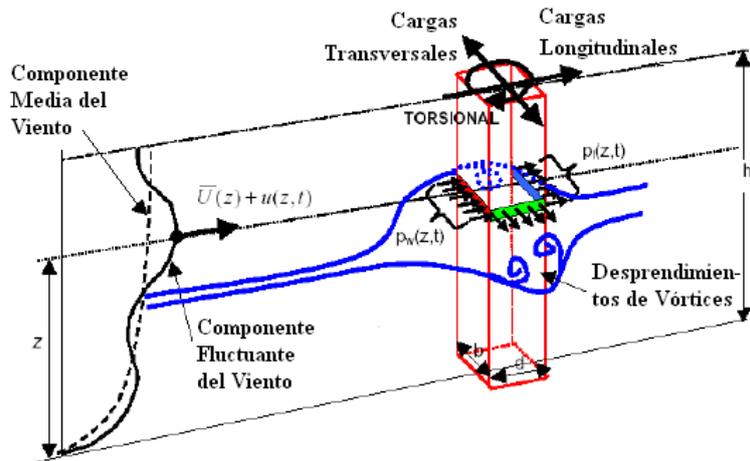
donde St es el número de Strouhal, L es la distancia entre los bordes donde se produce la separación, V la velocidad del viento, y  $F_c$  la frecuencia de desprendimiento de los vórtices. El St para desprendimientos vorticosos es función de la forma de la sección de la estructura, y en casos de secciones redondeadas, también depende del número de Reynolds (Figura 5), de la turbulencia atmosférica y de la rugosidad superficial.



**Figura 5:** Variación del número de Strouhal con el número de Reynolds para tres cuerpos distintos

#### 1.5 Cargas Eólicas en Edificios

Una estructura sometida al viento natural se verá sometida a tres tipos de cargas eólicas: una en el sentido de la dirección del viento debido a las fuerzas de arrastre (cargas longitudinales), otra debida a los desprendimientos alternativos de los vórtices que generarán cargas perpendiculares a la dirección del viento y oscilantes (cargas transversales), y una tercer carga debida a los efectos de torsión sobre la estructura (Figura 6).



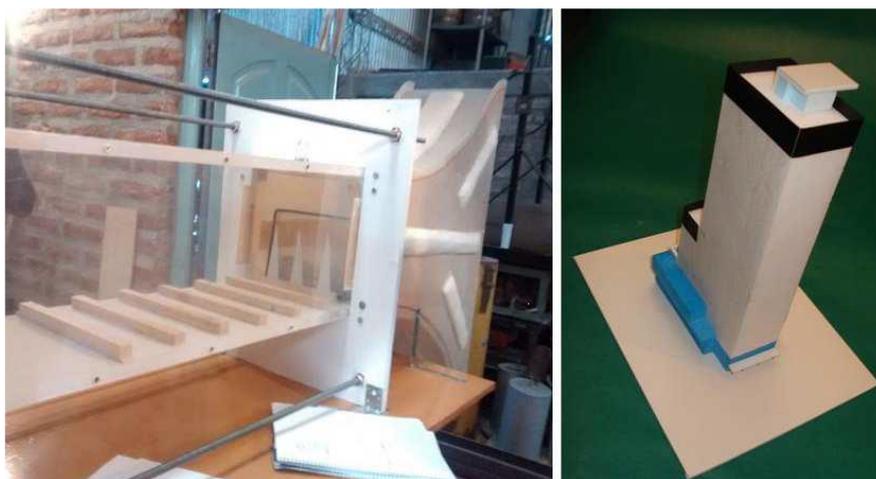
**Figura 6:** Esquema de las cargas de origen eólico actuando sobre una estructura

## 2. EN TÚNEL DE VIENTO

En este trabajo se estudiaron las vibraciones inducidas por viento en un edificio de 28 pisos con 110 m de altura en total. La planta rectangular de 70 m x 30 m hasta el piso 10 y de 30 m x 30 m en los restantes. El edificio se construyó en la ciudad de Neuquén, en el sur de Argentina, con orientación al sur. En el sitio de emplazamiento la dirección predominante de viento es oeste-suroeste, con velocidad media aproximada de 4 m/s, velocidades extremas de 48 m/s, vientos muy turbulentos, presentando ráfagas que cambian constantemente de intensidad y dirección.

La estructura del edificio es de hormigón armado y presenta una asimetría en el lado norte debido a la presencia de la caja del ascensor. En este tipo de estructuras rígidas pueden aparecer cargas oscilantes debido a la variación del viento, o un patrón de flujo fluctuante producido por la geometría del edificio o por una combinación de ambas causas.

Para realizar los ensayos se construyó un modelo del edificio en escala 1:400 y se la ensayó en un túnel de viento. Al ser el modelo construido en materiales plásticos, el mismo es flexible, por lo tanto sensible a deformarse si existen vibraciones inducidas por viento. El túnel es de capa límite atmosférica, del tipo abierto, con una sección de prueba de 0,90 m x 0,90 m x 2,00 m.



**Figura 7:** (izquierda) Túnel de Viento, (derecha) modelo escala 1:400

Además de la semejanza geométrica y cinemática, en el caso de túneles de viento de capa límite atmosférica, se debe cumplir con igualdad en el número de Jensen, este se define como la relación entre la longitud del objeto (L) y la rugosidad del terreno ( $Z_0$ ).

$$J_e = \frac{L}{Z_0} \tag{2}$$

Se realizaron dos ensayos: uno para medir la frecuencia de desprendimientos de vórtices en los vértices Noroeste y Suroeste del edificio, y otro para medir la frecuencia de oscilación del modelo. Ambos ensayos se realizaron a un número de Reynolds de 30 000.

En principio se observó que la asimetría del edificio (del lado norte) hace que la velocidad del viento incidente se acelere más en el lado norte que en el lado sur, esto se puede apreciar en la Figura 8, donde el valor de la velocidad está adimensionalizada de la siguiente forma:

$$V_{adimensionalizada} = V_{media} / V_{delvientosdesdeedificio} \tag{3}$$

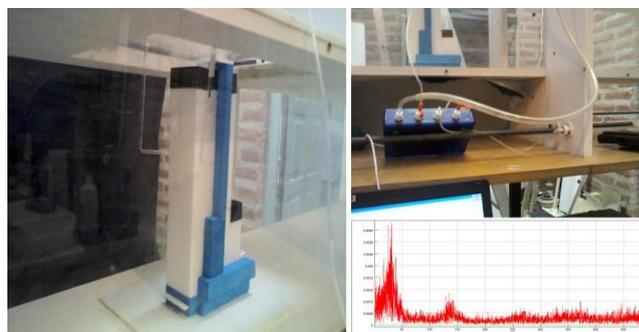
Si el valor es mayor a 1, entonces hay aumento de la intensidad del viento, si es menor que 1 entonces hay disminución en la intensidad del viento. Este efecto produce varios fenómenos como el desprendimiento de vórtices a distintas frecuencias en cada lado induciendo vibraciones laterales.



**Figura 8:** (izquierda) la intensidad del viento se incrementa un 41% sobre el lado norte y se reduce al 85% en el lado sur; (derecha) vista norte de la maqueta donde se incrementa la velocidad del viento

### 2.1 Determinación de la Frecuencia de Desprendimiento de Vórtice

Para este ensayo se utilizaron tubos Pitot conectados a sensores piezo-eléctricos y se registraron los datos por medio de un data logger (Figura 9). La frecuencia de adquisición de datos fue de 1000 Hz durante 10 segundos. Con la información obtenida se realizó un análisis espectral para obtener las frecuencias de desprendimiento de los vórtices



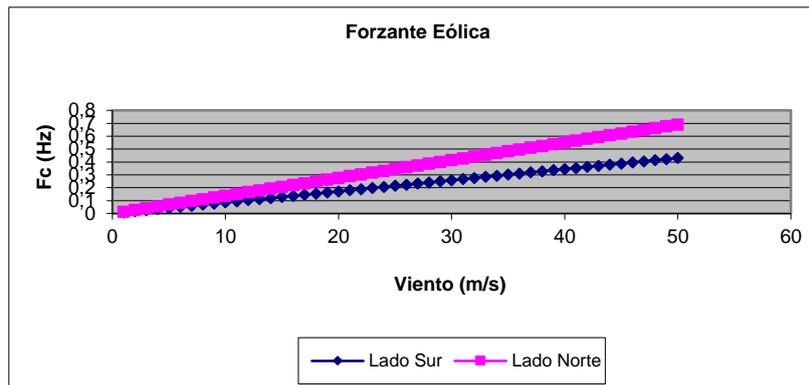
**Figura 9:** Ensayo 1 con tubos Pitot y registro con sensores piezo eléctricos, y análisis del espectro de frecuencias para la determinación de la frecuencia de desprendimiento de vórtices como forzantes de las cargas transversales en el edificio

Los resultados se indican en la tabla 1.

**Tabla 1:** Frecuencias principales y números de Strouhal correspondientes obtenidos

	Fc (Hz)	Strouhal
Lado Sur	30	0,172
Lado Norte	48	0,275

Como para cuerpos de secciones de bordes agudos el número de Strouhal se mantiene prácticamente constante con el número de Reynolds [10], al aumentar dicho número debido al tamaño real del edificio, las vibraciones inducidas serán menores en el prototipo (edificio real) que en el modelo ensayado. Por lo tanto las vibraciones forzantes que se aplicarán sobre el edificio real serán las indicadas en la Figura 10.

**Figura 10:** Frecuencia de desprendimientos de vórtices a ambos lados del edificio real

Estos datos deberían ser considerados en el análisis dinámico de la estructura del edificio y comparados con la frecuencia natural del edificio.

## 2.2 Determinación de las frecuencias de vibración del modelo

El objetivo fue determinar si el modelo del edificio oscilaba con alguna de las frecuencias de desprendimiento de vórtices calculadas en el ensayo anterior.

Para encontrar las frecuencias de vibración del modelo, se utilizó una cámara GoPro 4, y se filmó a 120 cuadros por segundo (Figura 11). De esta forma fue posible determinar frecuencias hasta 60Hz.

**Figura11:** Ejemplo de las imágenes tomadas desde la cámara GoPro 4, a 120 cuadros por segundo

Los resultados arrojaron que la mayor oscilación fue a 30 Hz, 48 Hz, y se observó otra oscilación a 6 Hz. La frecuencia de 6 Hz es consecuencia de la suma algebraica de las ondas, habiendo fases que se anulan y otras que se amplifican.

## 3. CONCLUSIONES

Como el viento preponderante en el sitio del futuro emplazamiento del edificio es de la dirección Oeste, se

realizó un ensayo en túnel de viento para determinar las vibraciones de origen eólico inducidas al edificio.

Por un lado se midieron la frecuencia de desprendimientos de vórtices en las esquinas Noroeste y Suroeste computando la velocidad del viento en la estela de dichas esquinas.

Por otra parte se determinó visualmente la vibración del modelo ensayado por medio de una cámara de video a 120 cuadros por segundo.

Ambas mediciones coincidieron en las frecuencias halladas: 30 Hz y 48 Hz. Además con la cámara de video se pudo detectar una tercera frecuencia de 6 Hz que coincide con los picos de la superposición de ambas ondas.

A partir de los datos del ensayo, y por mantenerse constante el número de Strouhal con el aumento del número de Reynolds para edificios de base rectangular, es posible inferir por escala dimensional, la frecuencia de vibraciones forzantes por viento en el edificio real.

El método empleado es bastante sencillo y permite determinar adecuadamente las vibraciones transversales sobre un edificio debido al viento.

#### **4. AGRADECIMIENTOS**

Los autores desean agradecer a la Secretaría de Investigación de la Universidad Nacional del Comahue por el aporte de subsidio al proyecto PI-04-I228 que hizo posible el presente trabajo.

#### **5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] Scruton, C.; "The Use of Wind Tunnels in Industrial Aerodynamics Research". National Physical Laboratories, Great Britain, NPL/Aero/411, 1960.
- [2] Cermak, J.E.; "Application of Fluid Mechanics to Wind Engineering". A Freeman Scholar Lecture, Journal of Fluids Engineering, American Society of Mechanical Engineers, Vol. 97, N°1, 1975.
- [3] Wonsul Kim, Akihito Yoshida, Yukio Tamura, and Jin-Hak Yi; "Experimental study of aerodynamic damping of a twisted supertall building"; Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics; vol. 176, pp. 1–12, 2018.
- [4] Lei Wang, Shuguo Liang, Guoqing Huang, Jie Song, and Lianghao Zou; "Investigation on the instability of vortex induced resonance of high-rise buildings"; Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics; vol.175, pp. 17–31, 2018.
- [5] Long Doan Sy, Hitoshi Yamada, and Hiroshi Katsuchi; "Interference effects of wind-over-top flow on high-rise buildings"; Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics; vol.187, pp. 85–96, 2019.
- [6] YueZhang a,n, WagdiG.Habashi a, RoohA.Khurrarn; "Predicting wind-induced vibrations of high-rise buildings using unsteady CFD and modal analysis"; Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics; vol.136, pp.165–179, 2015.
- [7] Mingfeng Huang, Baiyan Zhang, and Wenjuan Lou; "A computer vision-based vibration measurement method for wind tunnel tests of high-rise buildings"; Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics vol.182, pp. 222–234, 2018.
- [8] Ferrareto A. Johann; "Impact of structural design criteria on the comfort assessment of tall buildings"; Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics; vol.180, pp. 231–248, 2018.
- [9] Flay, Richard; Chapter Bluff Body Aerodynamics, In book: Advanced Structural Wind Engineering; DOI: 10.1007/978-4-431-54337-4\_3 , pp.59-84; December 2012.
- [10] C. W. KNISELY; "Strouhal Numbers of Rectangular Cylinders at Incidence: a Review and New Data"; Journal of Fluids and Structures; vol. 4, pp. 371-393, 1990.
- [11] Tom Lawson; Building Aerodynamic; chapter 3, pp.102; Imperial College Press; ISBN 1-86094-187-7; Singapore, 2001
- [12] CIRSOC 102, "Reglamento Argentino de Acción del Viento Sobre las Construcciones"; Editado por INTI, INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL, 2005.