

## Simulación Física del flujo turbulento a sotavento de un edificio tipo monoblock con cubierta a dos aguas

### Physical simulation of the turbulent flow to the leeward of a monoblock building with a gable roof

#### Jorge Lassig

Universidad Nacional del Comahue  
Bs.As. 1400 – (8300) Neuquén - Argentina  
jorge.lassig@fain.uncoma.edu.ar

#### Mariano Lastra

Universidad Nacional del Comahue  
Bs.As. 1400 – (8300) Neuquén - Argentina  
Correo: marianomlastra@outlook.com

#### Juan Valle Sosa

Universidad Nacional del Comahue  
Bs.As. 1400 – (8300) Neuquén - Argentina  
Correo: jjvscosmo@yahoo.com

**Código del manuscrito: 08\_002**

**Fecha de aceptación: 04/10/2019**

#### Resumen

Todos los cuerpos investidos por el viento generan a sotavento una estela que contiene un espectro de vórtices desprendidos desde las partes salientes del edificio. Los vórtices se desprenden a una frecuencia determinada y dependen de la velocidad del viento y de la geometría del cuerpo.

Los problemas posibles de producir son dos: que la frecuencia de desprendimiento de estos vórtices actúen como forzante en el sistema, y si coinciden con la frecuencia natural del edificio, entonces puede entrar la estructura en resonancia con graves problemas estructurales; lo otro es que la estela impacte sobre otro cuerpo e induzca vibraciones y cargas variables sobre el mismo, incluso podría producir un bateo.

Para investigar estos fenómenos sobre edificios con techos a dos aguas (tipo “monoblock”), se realizó una serie de simulaciones físicas utilizando modelos a escala en un túnel de viento.

Como resultado de estos ensayos, se determinaron que las principales dimensiones geométricas del edificio (largo, alto y ancho) son las causantes de desprendimientos de vórtices que producen vibraciones eólicas.

Los números de Strouhal calculados a partir de los ensayos fueron: de 1,50 para los desprendimientos originados por el largo del edificio, de 1,30 debido a su ancho y de 1,00 por el efecto del alto, con pequeñas variaciones según la pendiente del techo.

**Palabras claves:** Vórtices, Edificios, Viento, Strouhal, Estela

#### Abstract

All the bodies surrounded by the wind generate leeward a wake that contains a spectrum of vortices detached from the projecting parts of the building. The vortices are detached at a certain frequency and depend on the speed of the wind and the geometry of the body.

The possible problems of producing are two: that the frequency of detachment of these vortices act as forcing in the system, and if they coincide with the natural frequency of the building, then the structure can enter in resonance with serious structural problems; the other thing is that the wake impacts on another body and induces vibrations and variable loads on it, it could even produce a batting.

To investigate these phenomena on buildings with gable roofs (type "monoblock"), a series of physical simulations were carried out using scale models in a wind tunnel.

As a result of these tests, it was determined that the main geometric dimensions of the building (length, height and width) are the cause of vortex detachments that produce wind vibrations.

The numbers of Strouhal calculated from the tests were: 1.50 for vortex shedding caused by the length of the building, 1.30 due to its width and 1.00 for the effect of the height, with small variations according to the roof slope.

**Keywords:** Vortexes, Buildings, Wind, Strouhal, Wake

## Introducción

En las simulaciones de la dinámica de las estructuras de edificios, dos son las forzantes que se analizan: los sismos y las vibraciones de origen eólico.

En estas últimas, los estudios se han encaminado a determinar la frecuencia de desprendimiento de vórtices generados por edificios generalmente altos o de varios pisos. Estos edificios al ser altos la principal forzante eólica son los vórtices que se desprenden en un plano horizontal tanto en ancho como largo del mismo, no teniéndose en cuenta los desprendimientos por sobre el techo.

Por el contrario los edificios bajos padecen un vacío en la información de este tipo de fenómenos, y en particular de aquellos que tienen un ancho significativamente mayor que su alto.

El objetivo de este trabajo consiste en estudiar la frecuencia de desprendimientos de vórtices en un edificio bajo de base rectangular con techo a dos aguas, variando la pendiente de la cubierta, y tratando de distinguir las principales frecuencias que aparecían en el análisis espectral con el origen de las mismas (debido al largo, ancho y alto del edificio).

## Estado del arte del problema

Knisely (1990) ensaya diferentes cilindros de base rectangular y determina el número de Strouhal del desprendimiento de vórtices, con valores bajos de intensidad de turbulencia, de relación ancho/largo de 10 y obtiene un número de Strouhal de 1,15, para números de Reynolds inferiores a  $5 \times 10^4$ .

Sarioglu y Yavuz (2000) analizan las frecuencias de desprendimiento de vórtices detrás de cilindros rectangulares largos, pero usan como variable la relación largo/alto, obteniendo para una relación de 0,50 una frecuencia de 70 Hz correspondiendo a un Stouhal de 0.15 para números de Reynolds cercanos a  $10^5$ .

Liang et all (2002) analizan el espectro de desprendimientos de vórtices en cilindros rectangulares bajos y techos planos, para una relación ancho/largo entre 1 y 4 obteniendo un strouhal de 0,094.

Otros autores como Hayashida and Iwasa( 1990), y Kawai (1992) estudiaron la frecuencia de desprendimientos de vórtices en edificios altos.

Los estudios antes mencionados, indican la variación de resultados según la relación ancho/largo, el número de Reynolds del ensayo, y han sido realizados para relaciones alto/ancho superiores a 5, además todos fueron con techos planos.

En el presente trabajo se analiza el efecto que produce el techo a dos aguas en edificios de baja altura, de base rectangular con relación ancho/largo de 6.

## Instrumentación y Metodología

### Túnel de Viento

Se utilizó un túnel de viento perteneciente al Laboratorio de Dinámica de Fluidos Ambientales (LaDiFA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue. El mismo tiene 7,40 m de largo con una sección de prueba de 0,90 x 0,90 m, es abierto (tipo capa límite atmosférica) con un motor eléctrico de 6 CV de potencia, con regulador/estabilizador de velocidad.

La medición de velocidad del viento dentro del túnel se realizó con un anemómetro de film caliente (CEM DT-8880), y para medir la turbulencia en la estela del edificio, se utilizó un tubo Pitot conectado a sensores de presión piezo-eléctrico, y este a un data logger que registró las mediciones a una frecuencia de 1000 Hz.



Figura 1: Túnel de viento utilizado en este trabajo.

El perfil de capa límite simulado fue para un exponente de la ley de Sutton de  $P= 0,1389$  corresponde a una exposición Clase C de la Norma CIRSOC 102 (2005); por lo que el perfil de velocidades resultante se muestra en la figura 3, como también la intensidad de turbulencia IT.

Ley de Sutton:

$$u(z) = u_1 \left( \frac{z}{z_1} \right)^P \quad (1)$$

Siendo  $u(z)$  la velocidad a la altura  $z$ , y  $u_1$  la velocidad a la altura  $z_1$  conocida.

El perfil de capa límite se logra a través de aumentar la rugosidad en el piso del túnel de viento, y la intensidad de turbulencia con generadores de vórtices triangulares, la figura 2 ilustra esquemáticamente como se los instala en un túnel de viento que simula la capa límite atmosférica (como el utilizado en el presente trabajo).

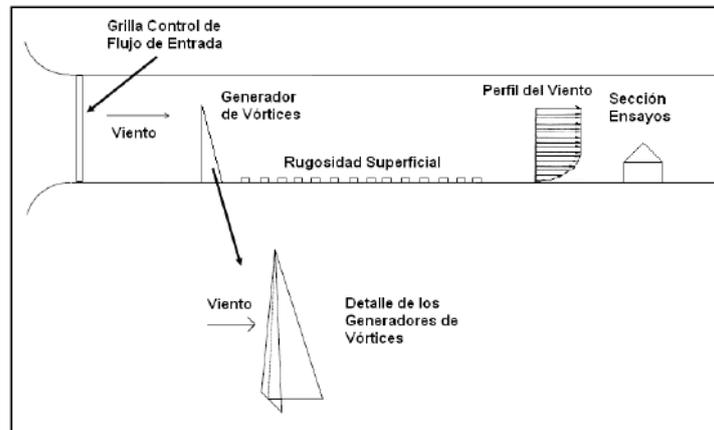


Figura 2: Esquema de un túnel de viento de capa límites donde los generadores de vórtices y la rugosidad se ajustan para reproducir la capa límite atmosférica.

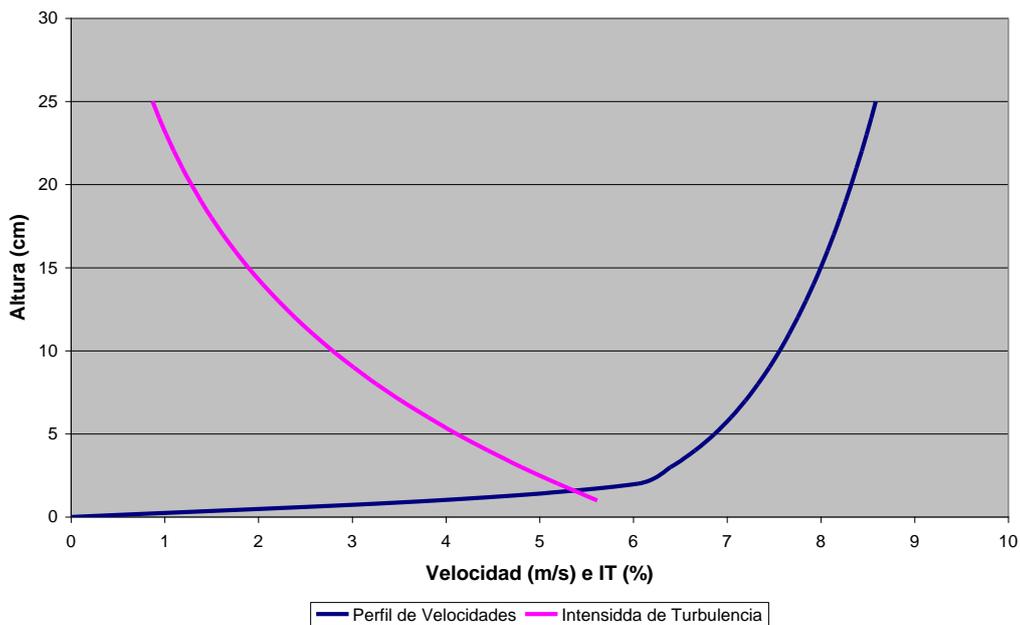


Figura 3: Variación de la Velocidad y la Intensidad de Turbulencia con la altura dentro del túnel de viento.

### Los Modelos

Se construyó un modelo de edificio de base rectangular tipo “monoblock” en una escala 1:100. Las dimensiones del modelo fueron 60 cm de ancho, 10 cm de largo y alto total variable con la pendiente del techo, con techo a dos aguas, con cuatro pendientes: 15°, 30°, 45° y 65°.

En las figuras 4, se pueden observar los modelos de edificios con techos a dos aguas, y en la figura 5 se indica el punto de medición del Pitot aguas abajo a 3 largos del edificio a la altura del alero.



Figura 4: Modelos a escala 1:100 de los edificios ensayados en el Túnel de Viento.

## Metodología

Con un tubo Pitot se midió la velocidad en la estela del edificio para las cuatro configuraciones de techo. La adquisición de datos fue a una tasa de 1.000 Hz, y con esa información se procedió a realizar un análisis espectral por medio de la transformada inversa de Fourier con un software específico. No se usaron filtros, y se analizó cada espectro desechando los armónicos, y las frecuencias originadas por “ruidos” propios del túnel de viento, al compararlos a un ensayo “limpio” sin modelos.



Figura 5: Ubicación del Pitot a sotavento del edificio donde se realizaron las mediciones para el posterior análisis de frecuencias.

## Resultados y Análisis

Los ensayos se realizaron a una velocidad de 6 m/s, obteniendo un Reynolds de  $2 \times 10^5$ , tomando como longitud característica el ancho del edificio.

Los resultados de indican en las figuras 6 (15°, 30°, 45° y 65°), mostrando los mencionados espectros de frecuencias obtenidos desde los modelos ensayados.

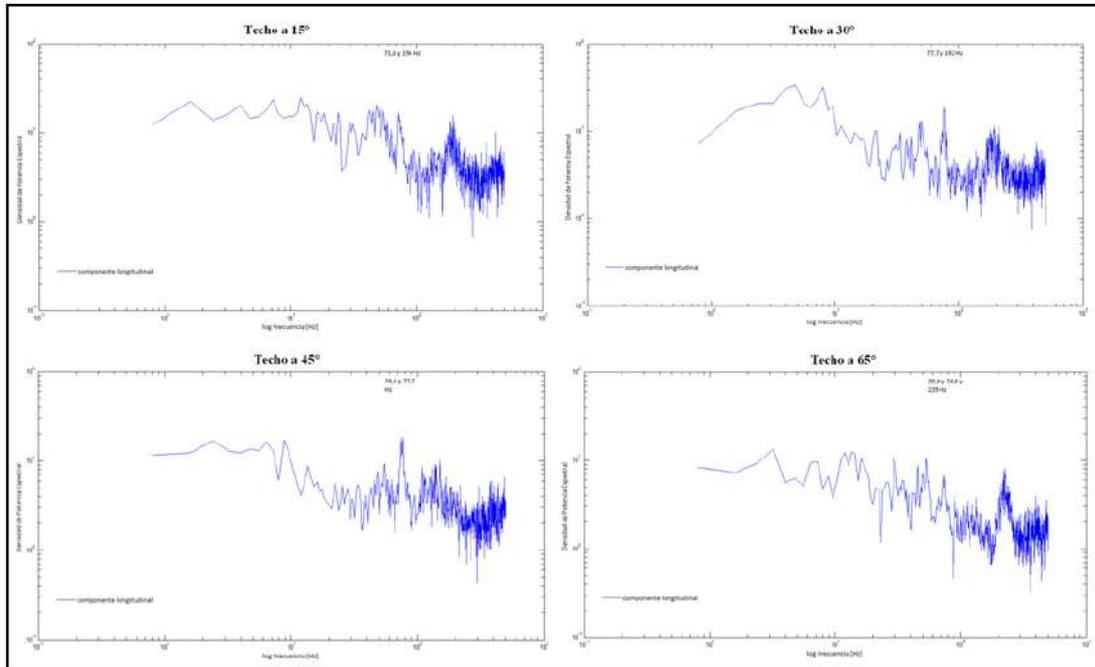


Figura 6: Espectros de densidad de potencia para cada pendiente de techo.

Se analizó cada espectro de frecuencias obtenido, en función de las longitudes de ondas que se asumió proporcionales a los tamaños de los vórtices, clasificando su presencia según la longitud característica del edificio: largo, ancho y alto total.

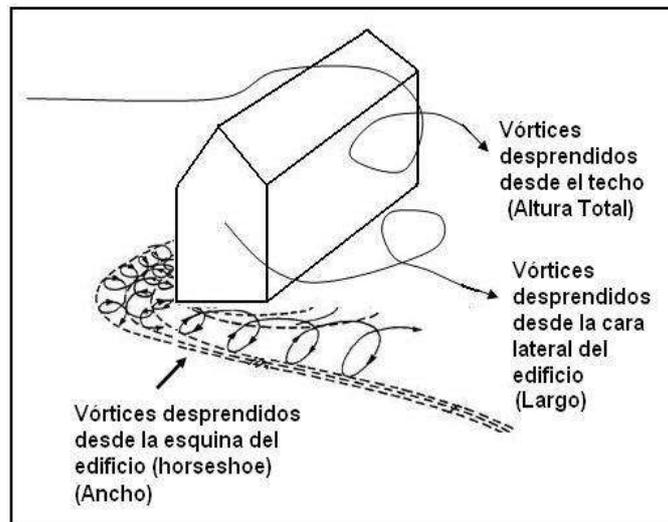


Figura 7: Dibujo esquemático del origen de los desprendimientos de vórtices.

La figura 7 esquematiza el origen de los vórtices: los desprendidos desde el techo (asociados al alto total del edificio), los vórtices desprendidos desde las paredes laterales del edificio (asociados al largo del mismo), y los vórtices desprendidos desde las esquinas del edificio (asociados al ancho del mismo).

En la figura 8 se sintetizan los resultados obtenidos en el modelo, en los cuales se indican como varían las frecuencias de desprendimiento de vórtices de cada longitud característica del edificio, en función de la pendiente del techo.

Podemos apreciar que los vórtices desprendidos desde las esquinas (ancho) están en el orden de los 15 Hz y crecen a medida que aumenta la pendiente del techo.

Por el contrario el efecto del techo sobre los vórtices que se desprenden del mismo, decrecen a medida que la pendiente aumenta y están entre los 30 y 40Hz.

Para los vórtices que se desprenden desde las paredes laterales (largo) prácticamente no son afectados por la pendiente del techo, y la frecuencia se ubica alrededor de los 80Hz.

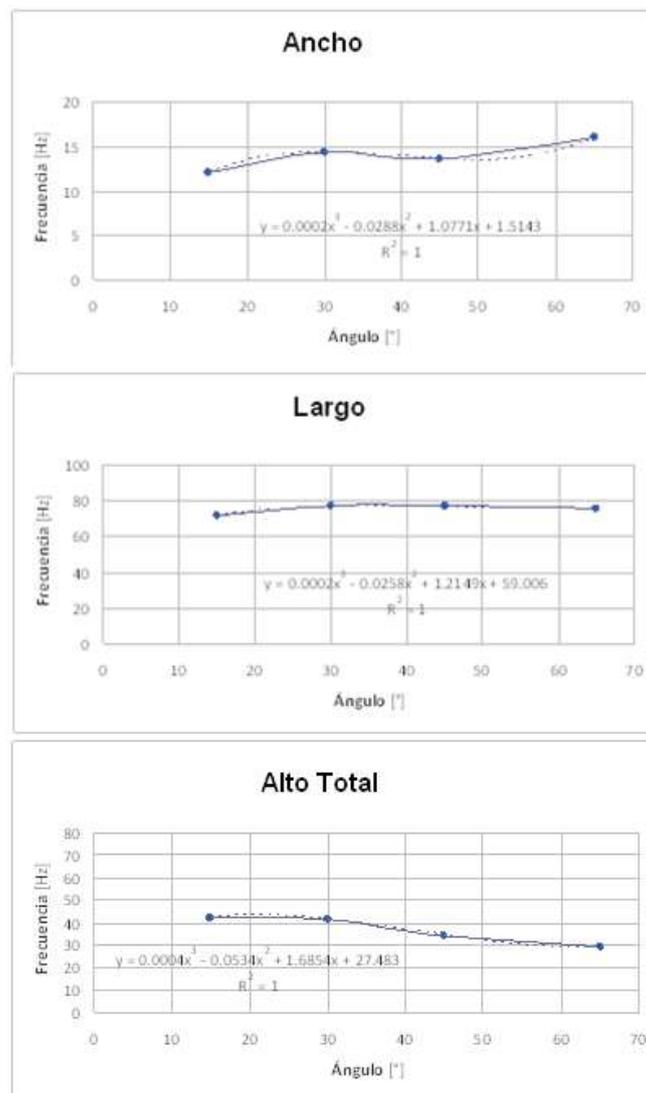


Figura 8: Frecuencias obtenidas desde el análisis espectral en la estela generada por el edificio.

## Número de Strouhal

Recordando que el número de Strouhal ( $St$ ) relaciona la frecuencia ( $F_c$ ) de desprendimiento de vórtices con la inercia del viento, siendo su expresión:

$$St = F_c \cdot L / V \quad (2)$$

donde  $L$  es una longitud característica del objeto estudiado, y  $V$  la velocidad del viento.

Calculando el número de Strouhal para cada frecuencia y longitud característica del edificio, obtenemos los gráficos de la figura 9.

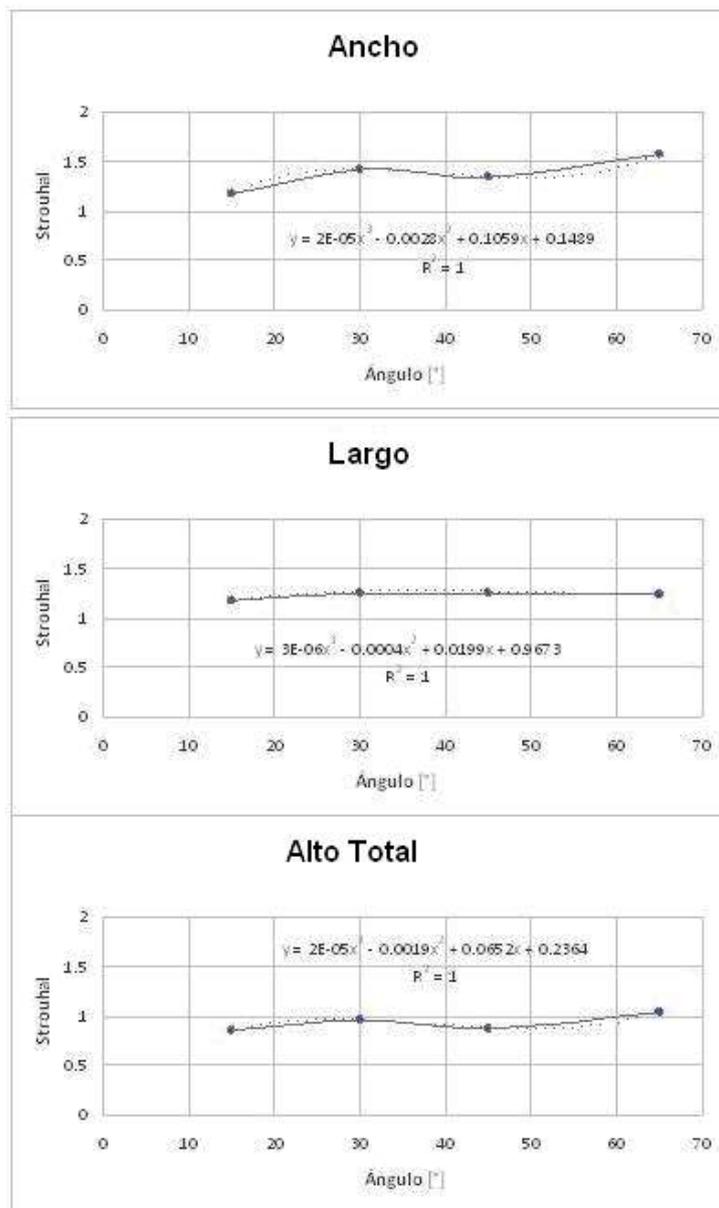


Figura 9: Número de Strouhal generado desde cada dimensión principal del edificio.

De la figura 9 podemos observar que el número de Strouhal debido a los vórtices desprendidos desde las paredes laterales (asociados al largo del edificio), son levemente afectados por la pendiente del techo, el número de Strouhal para la pendiente de 15° es de 1,18 y aumenta a 1,25 entre 30° y 45°, luego desciende levemente a 1,23 para la pendiente de 65°.

La pendiente del techo afecta más al número de Strouhal debido a los vórtices desprendidos en las esquinas (asociados al ancho del edificio), a medida de aumenta la pendiente del techo aumenta el número de Strouhal (para la pendiente de 15° el Strouhal es de 1,18 y a 65° creció a 1,57). Si bien la causa de este efecto no es clara, podríamos asociarla a que a medida que aumenta la pendiente del techo se eleva la solera, haciendo que para un ancho constante del edificio la superficie frontal al viento aumente obteniendo mayor caudal de vórtices.

El efecto de sobre el alto total del techo tiene un comportamiento similar al antes mencionado pero menos intenso, crece a medida que aumenta la pendiente del techo (para 15° de pendiente el número de Strouhal es de 0,85, y para 65° es de 1,04).

### Aplicando los Resultados a un Prototipo:

Asumiendo que el número de Strouhal permanece constante con el número de Reynolds (Davenport, 2007), y aplicando a un prototipo 100 veces mayor que el modelo analizado (aumento de la longitud característica en la fórmula del número de Strouhal ecuación (2)), entonces las frecuencias que se inducirían desde la estela del edificio serían cien veces mas bajas que las obtenidas en el modelo, y si tuviéramos vientos entre 36 Km/hs (10 m/s) y 72 Km/hs (20 m/s), las frecuencias de origen eólicas serían como las indicadas en la siguientes tres tablas:

Desde el Largo del Edificio: la Tabla 1 indica que las frecuencias inducidas desde la estela debido al largo del edificio oscilarían entre 0,19 y 0,52 Hz para vientos entre 10 y 20 m/s.

Tabla 1: frecuencias generadas por el viento, debido al largo del edificio, según la pendiente del techo.

Viento 10 [m/s]	Ángulo (°)	Largo Edificio (m)	Strouhal	Frecuencia [Hz]
	15	60	1.18032787	0.19672131
30	60	1.41639344	0.23606557	
45	60	1.33770492	0.22295082	
65	60	1.57377049	0.26229508	
Viento 20 [m/s]	Ángulo (°)	Largo Edificio (m)	Strouhal	Frecuencia [Hz]
	15	60	1.18032787	0.39344262
30	60	1.41639344	0.47213115	
45	60	1.33770492	0.44590164	
65	60	1.57377049	0.52459016	

Desde el Alto Total del Edificio: la Tabla 2 indica que las frecuencias inducidas desde la estela debido al alto total del edificio oscilarían entre 0,48 y 1,38 Hz para vientos entre 10 y 20 m/s.

Tabla 2: frecuencias generadas por el viento, debido al alto total del edificio, según la pendiente del techo.

Viento 10 [m/s]	Ángulo (°)	Alto Edificio [m]	Strouhal	Frecuencia [Hz]
	15	12.3	0.85091803	0.69180328
30	14	0.9547541	0.68196721	
45	15.5	0.87409836	0.56393443	
65	21.5	1.04327869	0.4852459	
Viento 20 [m/s]	Ángulo (°)	Alto Edificio [m]	Strouhal	Frecuencia [Hz]
	15	12.3	0.85091803	1.38360656
30	14	0.9547541	1.36393443	
45	15.5	0.87409836	1.12786885	
65	21.5	1.04327869	0.9704918	

Desde el Ancho del Edificio: la Tabla 3 indica que las frecuencias inducidas desde la estela debido al ancho del edificio oscilarían entre 1,18 y 2,51 Hz para vientos entre 10 y 20 m/s.

Tabla 3: frecuencias generadas por el viento, debido al ancho del edificio, según la pendiente del techo.

Viento 10 [m/s]	Ángulo (°)	Ancho Edificio (m)	Strouhal	Frecuencia [Hz]
	15	10	1.18032787	1.18032787
30	10	1.25901639	1.25901639	
45	10	1.25901639	1.25901639	
65	10	1.23278689	1.23278689	
Viento 20 [m/s]	Ángulo (°)	Ancho Edificio (m)	Strouhal	Frecuencia [Hz]
	15	10	1.18032787	2.36065574
30	10	1.25901639	2.51803279	
45	10	1.25901639	2.51803279	
65	10	1.23278689	2.46557377	

Si los vórtices generados en la estela del edificio llegan a impactar en otro edificio (como se ilustra en la figura 10), entonces estas frecuencias actuarían como forzantes sobre el otro edificio.

Las frecuencias naturales de los edificios se determinan a través de un complejo análisis dinámico de las estructuras. Sin embargo hay una regla simple que estima el período de oscilación de los edificios (T) en relación con el número de pisos (n) del mismo:

$$T = 0.1 n \quad (3)$$

Podemos estimar que nuestro prototipo puede tener unos 3 pisos, aplicando la fórmula anterior, da como periodo 0,30, lo que representa una frecuencias naturales de 3,330 Hz, por arriba de las frecuencias forzantes por viento indicadas en el ítem anterior.

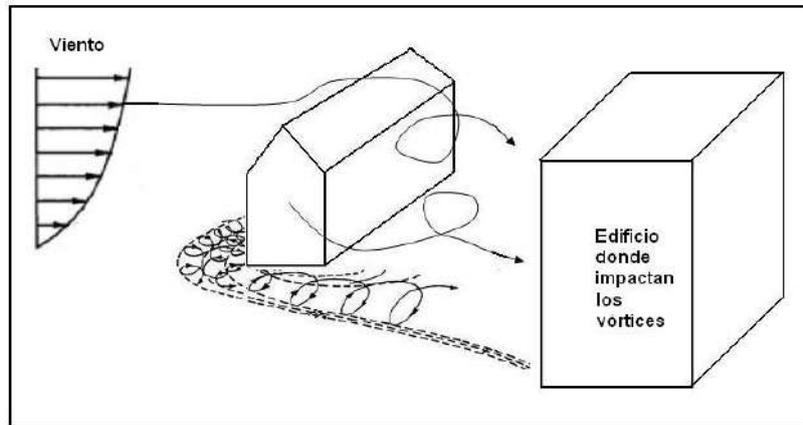


Figura 10: Esquema donde los vórtices desprendidos del monoblock con techo a dos aguas impactan en otro edificio, por lo que los vórtices generados actuarán como cargas forzantes sobre el segundo edificio.

En la tabla 4 se indican las posibles frecuencias naturales de edificios con distintas cantidades de pisos, y se puede observar que a partir de edificios con más de 4 pisos, si la estela de este monoblock impacta sobre el mismo puede inducir frecuencias que lo lleven a la resonancia.

Tabla 4: Frecuencia natural estimada para un edificio según la cantidad de pisos.

Cantidad de Pisos (n)	Periodo (T) (T)	Frecuencia Natural (Hz)
1	0.1	10.00
2	0.2	5.00
3	0.3	3.33
4	0.4	2.50
5	0.5	2.00
6	0.6	1.67
7	0.7	1.43
8	0.8	1.25
9	0.9	1.11
10	1	1.00

Como las frecuencias de desprendimientos de vórtices (forzante) varían con la velocidad del viento, esto puede ocasionar que para cierta velocidad del viento, la misma coincida con la frecuencia natural del edificio.

## Conclusiones

Si bien el presente trabajo es una primer investigación para determinar las características de los vórtices generador en la estela de un edificio bajo tipo monoblock con techo a dos aguas, los datos obtenidos a partir de los ensayos de un modelo a escala en el túnel de viento, son muy interesantes pues al llevarlo a escala del prototipo, estas frecuencias podrían actuar como forzantes en el edificio donde impactan y podrían estar cercanas a las frecuencias naturales del mismo pudiendo ocasionar cargas adicionales si son cercanas a las de resonancia.

## 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.

## Referencias

- Kawai, H. (1992); Vortex induced vibration of tall buildings; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*; 41-44; 117-128.
- Sakamoto, H. and Haniu, H. (1988); Aerodynamic Forces Acting on Two Square Prisms Placed Vertically in a Turbulent Boundary Layer; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 31; 41-66.
- Hayashida, H. and Iwasa, Y. (1990); Aerodynamic Shape Effects of Tall Building for Vortex Induced Vibration; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*; 33; 237-242.
- Sarioglu, M. and Yavuz, T. (2000); Vortex Shedding from Circular and Rectangular Cylinders Placed Horizontally in a Turbulent Flow; *Turk J Engin Environ Sci*; 24 , 217- 228.
- Knisely, C.W. (1990); Strouhal Numbers of Rectangular Cylinders at Incidence: a Review and New Data; *Journal of Fluids and Structures*; 4, 371-393.
- Liang, S. , Liua, S. , Lib, Q.S., Zhanga,L. , Gud, M. (2002); Mathematical Model of Across Wind Dynamic Loads on Rectangular Tall Buildings; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*; 90; 1757-1770.
- Davenport, Alan G; Wind Tunnel Testing: A General Outline; The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory The University of Western Ontario, Faculty of Engineering Science London, Ontario, Canada, May 2007.