

## CARGAS EÓLICAS SOBRE UNA ESTRUCTURA CON PANELES

Ana Scarabino<sup>a,b</sup>, Federico Bacchi<sup>a,b</sup>, Mariano García Sainz<sup>bd</sup>, J. Sebastián Delnero<sup>a,b,c</sup>,  
Gonzalo Alasia<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Grupo de Fluidodinámica Computacional, Universidad Nacional de La Plata, Calle 116 e/47 y 48,  
1900 La Plata, Argentina, gfc@ing.unlp.edu.ar, <http://www.gfc.ing.unlp.edu.ar>

<sup>b</sup>Laboratorio de capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, Universidad Nacional de La Plata, Calle  
116 e/47 y 48, 1900 La Plata, Argentina, laclfyfa@ing.unlp.edu.ar, <http://www.laclfyfa.ing.unlp.edu.ar>

<sup>c</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Avda. Rivadavia 1917, CP C1033AAJ,  
Cdad. de Buenos Aires, Argentina.

<sup>d</sup>Comisión de Investigaciones Científicas de la Pcia. De Bs. As., 526 y 10, CP 1899, La Plata.

**Palabras clave:** Nro. de Strouhal, interacción fluidodinámica, resistencia aerodinámica

**Abstract.** Se analiza numérica y experimentalmente el flujo de aire en el entorno de un conjunto de paneles rectangulares de relación  $L/h = 5.1$  en una estructura de soporte compuesta por perfiles de relación  $L/h = 0.5$ . En el presente trabajo se presentan resultados numéricos de un conjunto de 10 paneles y su estructura de soporte y se miden presiones sobre un modelo físico a escala del conjunto tridimensional compuesto por estos paneles con ángulo de inclinación de 10 grados y su estructura de soporte. Esta configuración se presenta con frecuencia en casos como barreras eólicas, barreras antichorro en aeropuertos, paneles solares, antenas, persianas, bandejas de secado tanto a la intemperie como en túneles de viento especiales, y otras estructuras similares con paneles orientables para optimizar su eficiencia.

Se presentan los coeficientes globales de fuerzas tangencial y normal sobre los paneles, así como también la distribución de presiones sobre el conjunto de la estructura, con un perfil de velocidad del viento de capa límite atmosférica, se determinan los coeficientes de carga aerodinámica instantáneos de cada panel, y el número de Strouhal de los mismos, con el que es posible determinar la frecuencia de las fuerzas aerodinámicas no estacionarias. La fuerte interacción fluidodinámica entre los paneles y la estructura de soporte, que se visualiza en resultados numéricos a través del acoplamiento de vórtices desprendidos por los distintos elementos, produce cargas eólicas fluctuantes sobre los paneles mucho mayores y con frecuencias muy distintas que las que tendrían en caso de estar fluidodinámicamente aislados. Esto invalida su diseño estructural bajo esta última hipótesis y hace necesario el estudio del conjunto completo.

## 1 INTRODUCCIÓN

Cuando un cuerpo romo aproximadamente bidimensional está sumergido en una corriente de flujo, se originan desprendimientos periódicos de vórtices que inducen sobre el cuerpo un campo de fuerzas fluctuantes, el que puede ocasionar vibraciones mecánicas, incluso autoexcitadas, si el obstáculo es o está montado elásticamente (Paidoussis, 1982; Fitzpatrick et al., 1988; Price and Zahn 1991; Oengoren and Ziada, 1998). Un caso emblemático es la destrucción del puente de Tacoma Narrows (Billah y Scanlan, 1991). El caso de cilindros de sección circular, como los conductores en líneas de transmisión, intercambiadores de calor, pilares de estructuras, es probablemente el más usado y estudiado, por ejemplo en Fox and West (1993a–c), Szepessy and Bearman (1992) and Blackburn and Melbourne (1996).

Además de investigaciones experimentales, se llevan a cabo estudios numéricos para obtener información más detallada sobre la estructura del flujo y los distintos mecanismos de interacción fluido-estructura involucrados, por ejemplo en (So et al., 2001; Blackburn and Henderson, 1999; Freitas, 1995).

En cuanto a la estructura del flujo en torno a conjuntos de cilindros, las visualizaciones de Lam y Lo (1992) y Lam et al (2003) revelaron que el flujo en torno a cuatro cilindros en una configuración cuadrada es mucho más complicado que en un conjunto de dos cilindros. Los coeficientes de fuerzas y números de Strouhal se modifican debido a la presencia de los cuerpos adyacentes, siendo influidas por la distancia entre ellos, su diámetro, orientación del conjunto con respecto al flujo y por el número de cilindros. Por ello, la interacción no lineal entre múltiples cilindros es mucho más complicada que el flujo oscilatorio generado por sólo uno. Debido a su importancia práctica en múltiples problemas de la ingeniería, esta interacción ha sido y es estudiada en numerosos casos particulares, por ejemplo Price and Paidoussis (1984), Zdravkovich (1987), Kim y Durbin (1999), Sumner et al (2000).

Más recientemente, el campo de flujo en el entorno de un cuerpo de sección rectangular con relación de aspecto 5:1 a incidencia nula fue analizado numéricamente con un modelo de Detached Eddy Simulation por Mannini et al (2009) y los distintos mecanismos de interacción entre dos cilindros rectangulares fueron estudiados en forma numérica y descriptos por Chatterjee et al (2010).

En trabajos previos del grupo, se determinaron cargas aerodinámicas sobre elementos de sección rectangular, con una fuerte interferencia fluidodinámica entre ellos (Bacchi et al, 2011). Este tipo de combinación aparece en configuraciones de barreras eólicas y barreras antichorro en aeropuertos, en paneles solares, persianas, bandejas de secado y otras estructuras similares con paneles orientables. En el caso en estudio, el análisis numérico se realiza para el flujo bidimensional en un conjunto de paneles rectangulares de relación de aspecto aproximadamente 5:1 en un marco estructural de perfiles también rectangulares, de relación 0.5:1, con el objeto de identificar la interacción de desprendimientos vorticosos de eje paralelo a las mismas. Pero se añade también un estudio experimental de distribución de cargas tangenciales en un modelo 3D en flujo de capa límite atmosférica, para evaluar la influencia en las cargas aerodinámicas de la proximidad a los bordes de la estructura, así como la interferencia de la columna central de soporte. Se analiza una condición operativa con una inclinación de 10 grados. La velocidad de la corriente libre es de 11 m/s, lo que da un número de Reynolds de 165000 basado en la mayor longitud del panel y 32266 basado en la altura.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Cálculo numérico

Se realizó una simulación numérica bidimensional de un corte vertical de la estructura, compuesta por paneles rectangulares y perfiles estructurales. La relación de aspecto de los primeros es 5.1136:1 y la de los segundos, 0.5:1. Debido al elevado número de volúmenes necesarios para la discretización de las capas límite y espacio entre paneles y barras estructurales, el número de los primeros se redujo a 10, más los elementos estructurales presentes en el entorno. La simulación contempló la evolución temporal del flujo, para identificar cargas dinámicas provocadas por la turbulencia o por los posibles desprendimientos de vórtices de los elementos radiantes y estructurales. Los parámetros del modelo fueron:

- Malla híbrida de aproximadamente 400000 elementos con densificación en el entorno de paneles y elementos estructurales y en sus respectivas capas límite y estelas.
- Modelo de flujo incompresible no estacionario, implícito de segundo orden.
- Modelo de turbulencia  $k-\omega$  SST.

El modelo de turbulencia fue elegido como el más adecuado dentro de los modelos RANS para simular flujos desprendidos (Catalano y Amato, 2003) y por la experiencia previa del grupo con el mismo en problemas similares (Bacchi et al, 2008), para poder correr el modelo no estacionario y simular en un tiempo razonable un número adecuado de ciclos de desprendimientos vorticosos con la potencia de cómputo destinada al problema.

Para simplificar los cálculos estructurales, las fuerzas aerodinámicas sobre cada elemento radiante fueron descompuestas en las direcciones de los ejes principales de los elementos radiantes (horizontal y vertical en las figuras 1 y 2), y no en las direcciones paralela y normal a la corriente incidente, de 10 grados (flecha en figura 1), como es usual en estudios aerodinámicos. Las figuras 1 y 2 muestran el mallado del campo fluidodinámico con distintos niveles de aproximación.

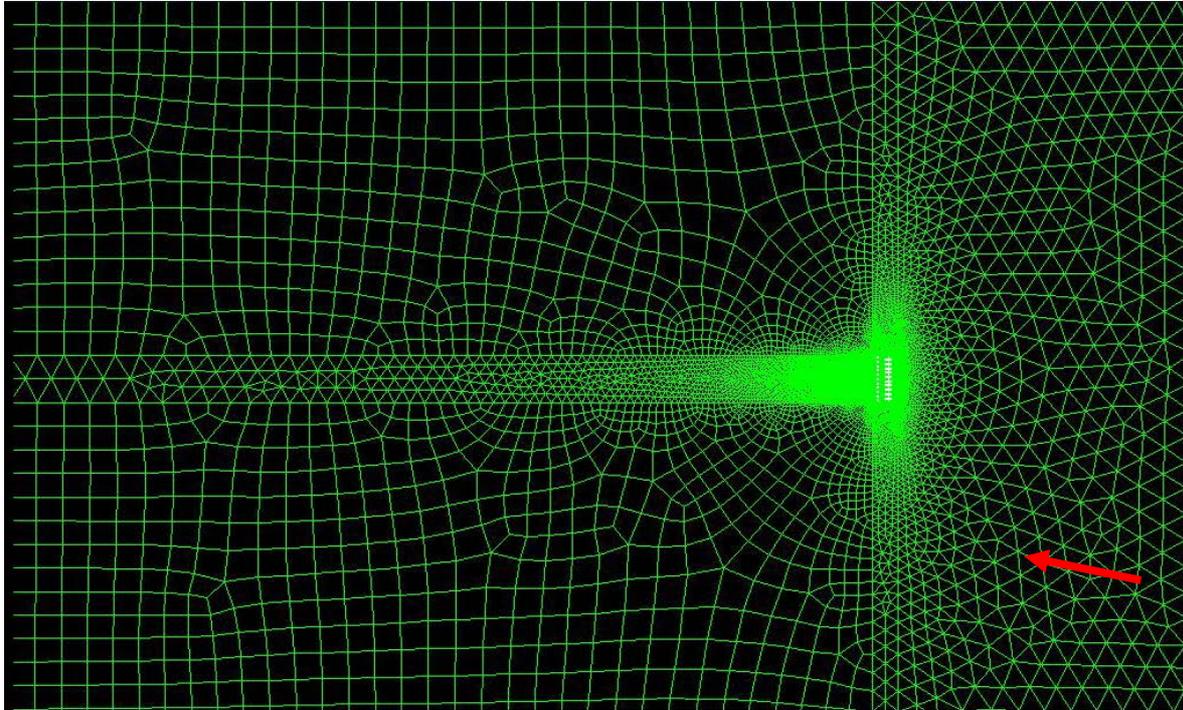
Para validar la calidad de la simulación numérica, se construyó un modelo físico de tres paneles y cuatro elementos estructurales en escala geométrica 1:1 y se midieron las cargas de viento normal y tangencial en el túnel, y por otra parte se simuló numéricamente ese mismo caso, con las mismas condiciones de velocidad del modelo físico y la misma calidad de malla, discretización espacial y temporal y modelo de turbulencia aplicadas al caso de la antena en escala real, obteniéndose buena concordancia entre los valores medidos y los calculados: tanto para frecuencias de desprendimientos vorticosos como para las fuerzas resultantes, las diferencias entre los resultados numéricos y los experimentales se encontró por debajo del 10%. Los resultados de este estudio inicial fueron publicados en Bacchi et al, 2011.

A partir de los campos de presión y tensiones sobre los paneles, se calculan y reportan coeficientes de fuerzas aerodinámicas tangencial ( $C_x$ ) y normal ( $C_y$ ), en el plano del elemento y en la dirección perpendicular, respectivamente. Estos coeficientes se definen como:

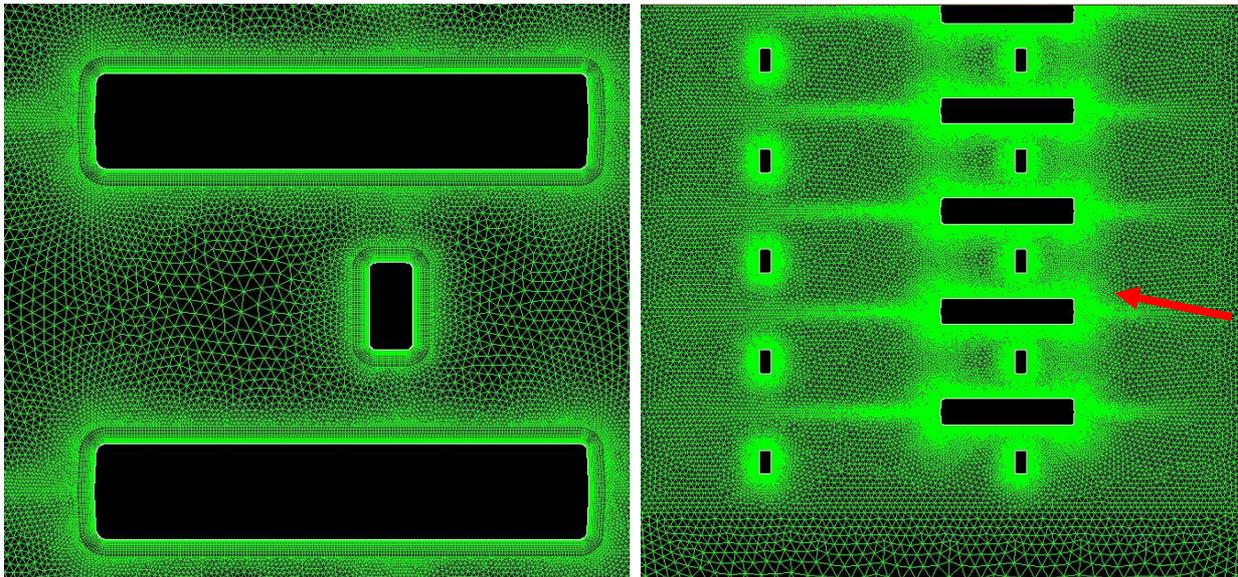
$$C_x = \frac{F_x}{0.5\rho V^2 A}; \quad C_y = \frac{F_y}{0.5\rho V^2 A} \quad (1)$$

Donde  $F_x$  y  $F_y$  son las fuerzas aerodinámicas resultantes por unidad de longitud sobre el elemento radiante, en su plano y en la dirección normal,  $\rho$  y  $V$  son la densidad del aire y velocidad del viento respectivamente, y  $A$  el área de referencia, tomada igual a la longitud

del elemento en la dirección del flujo por un metro de longitud perpendicular al plano del estudio.



**Figura 1:** Mallado del dominio de cálculo. La flecha indica la dirección del viento incidente.



**Figura 2:** Detalles del mallado del dominio de cálculo.

## 2.2 Ensayos del modelo en túnel de viento

Para considerar los efectos tridimensionales se construyó y ensayó en el túnel de viento un modelo a escala de la estructura con 20 niveles de paneles. Algunos elementos convenientemente distribuidos cuentan con tomas de presión que permitieron calcular los coeficientes de fuerza de arrastre,  $C_x$ . En el túnel de viento se modeló un perfil de velocidades y turbulencia representativo de la baja capa límite atmosférica con elementos de rugosidad superficial y apertura variable de aletas en la entrada de la sección de prueba. La velocidad media de la corriente fue medida con un termo-anemómetro Dantec Flowmaster, a una altura de referencia igual a la del modelo. La sección de prueba del túnel de viento del Departamento Aeronáutica de la Facultad de Ingeniería de la UNLP es de 1.4 m de ancho por 1 m de alto. La figura 3 muestra el perfil de velocidades medias reproducido en el túnel, que se ajusta a un “modelo de la potencia” de exponente 0.21, correspondiente a un terreno semiurbano o rural con obstáculos como montes, árboles y arbustos, edificaciones aisladas (Sachs,1978).

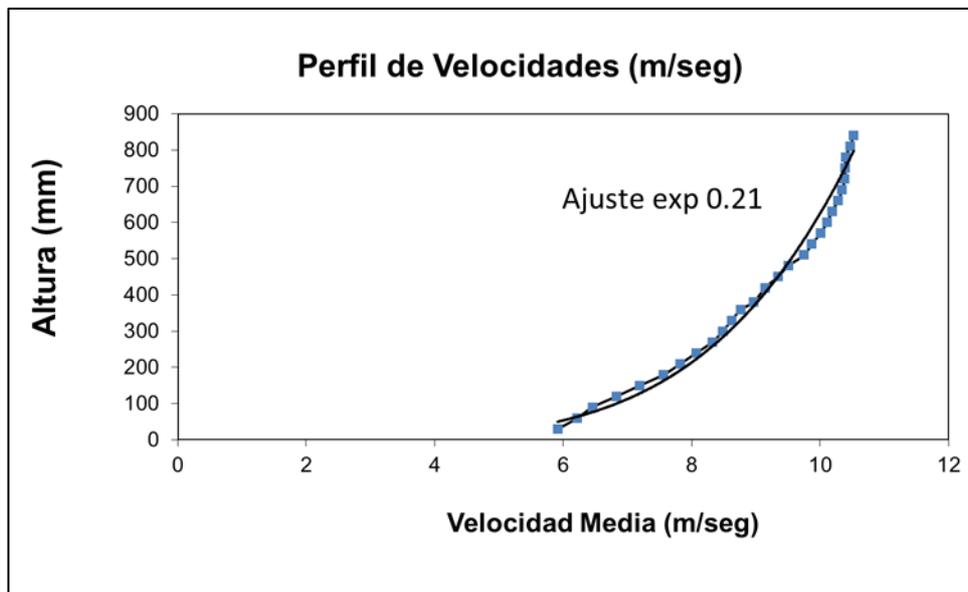
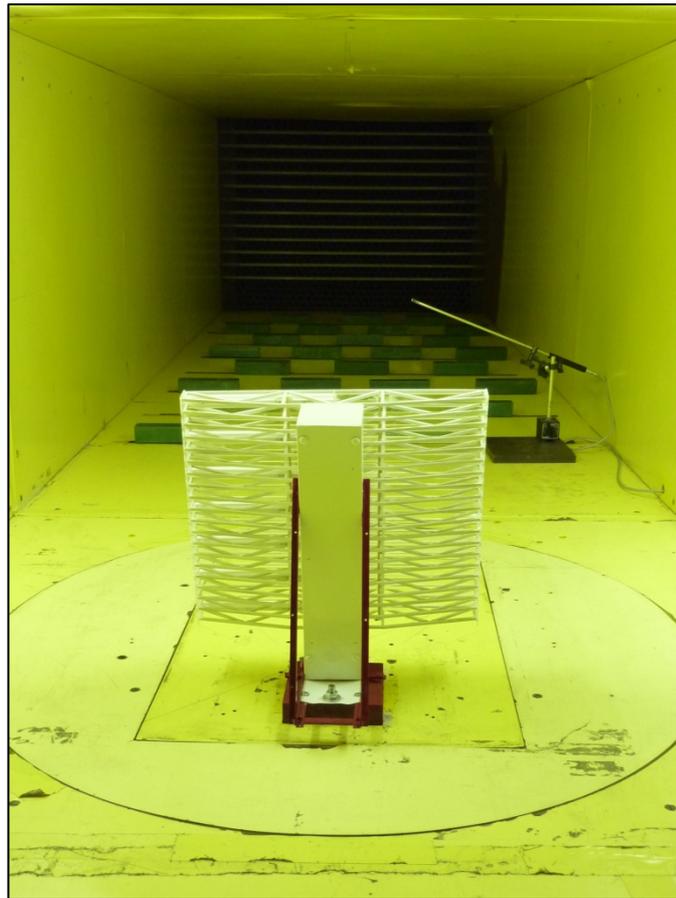


Figura 3: Perfil de velocidades medias en el túnel de viento

La figura 4 muestra el modelo en el túnel de viento, los elementos de rugosidad utilizados para generar el perfil de velocidades y el sensor del anemómetro Dantec Flowmaster que monitoreó la velocidad de referencia del viento durante los ensayos.

Las presiones en algunos puntos sobre los paneles, puntos indicados en la sección Resultados, fueron medidas con un multimanómetro Pressure Systems.



**Figura 4:** Modelo a escala en el túnel de vientos. Anemómetro de hilo caliente, aletas de apertura variable y bloques de rugosidad para simular el perfil de velocidades de viento de superficie.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Análisis numérico

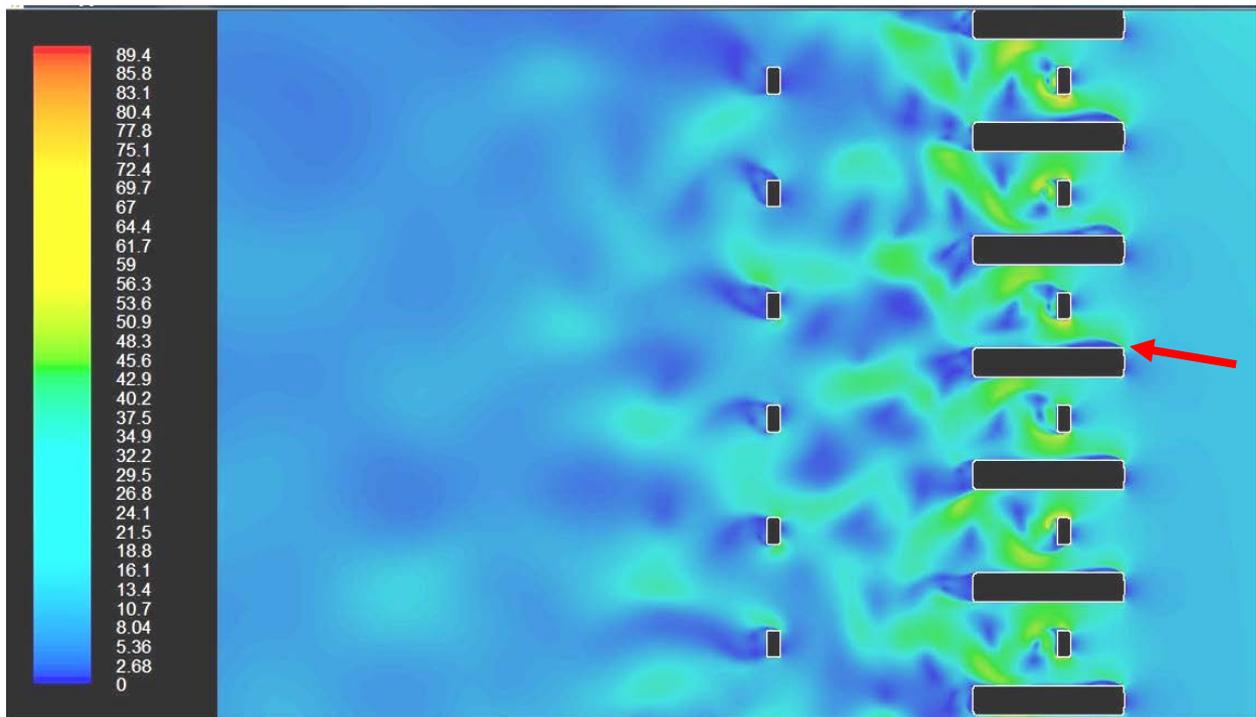
Una vez que el patrón general del flujo y la estela se estabilizaron en una configuración periódica, se analizaron campos instantáneos de las distintas variables para comprender la estructura del flujo y las cargas no estacionarias que el mismo genera. Las figuras 5 y 6 ilustran la estructura del campo de velocidades y el de presiones en el entorno de los paneles.

La intensidad de turbulencia  $It$  en este modelo se calcula a partir de la energía cinética turbulenta local,  $k$ , obtenida en la simulación con el modelo de turbulencia usado y la velocidad media  $u_{avg}$  (igual en este caso a la velocidad de la corriente libre) desde la ecuación

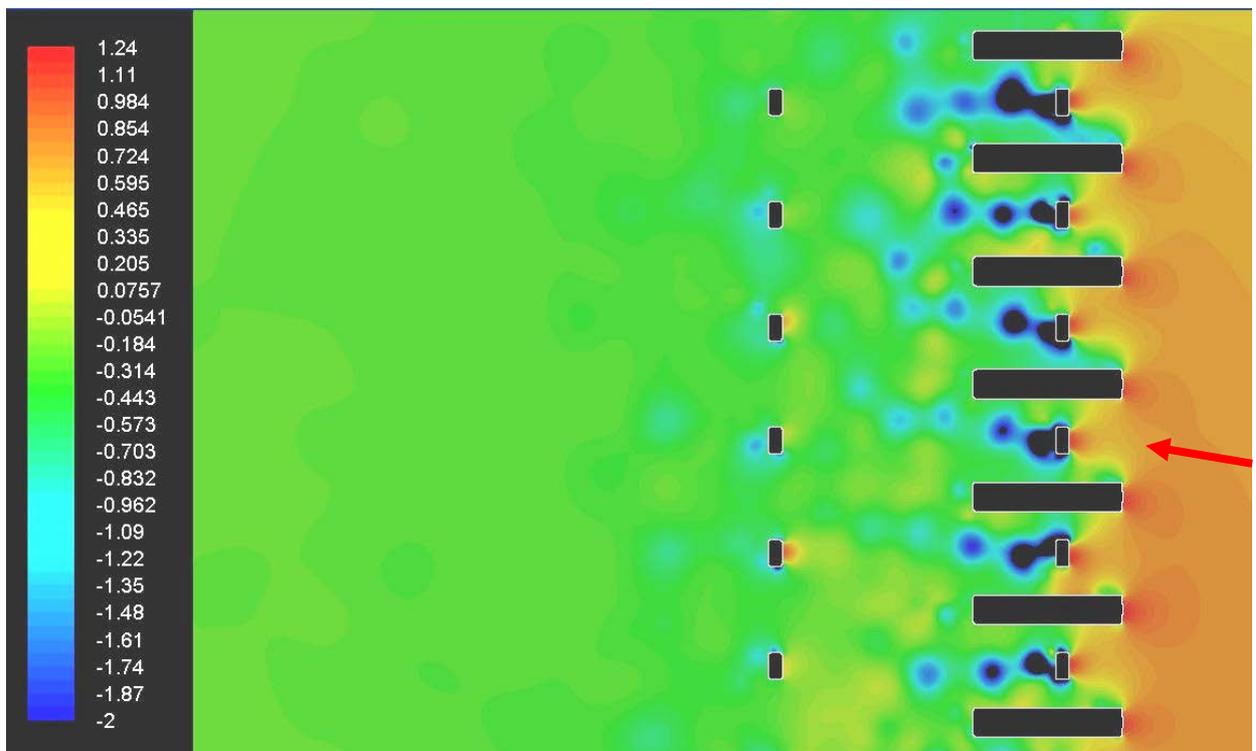
$$k = \frac{3}{2}(u_{avg} It)^2 \quad (2)$$

Los coeficientes de presión,  $C_p$ , toman como referencia la presión de la corriente libre,  $P_\infty$ , y la presión dinámica media de la misma:

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{0.5\rho V_\infty^2} \quad (3)$$



**Figura 5:** Imagen instantánea del campo de velocidades. En escala de colores,  $V$  en m/s. La flecha indica la velocidad incidente del viento.

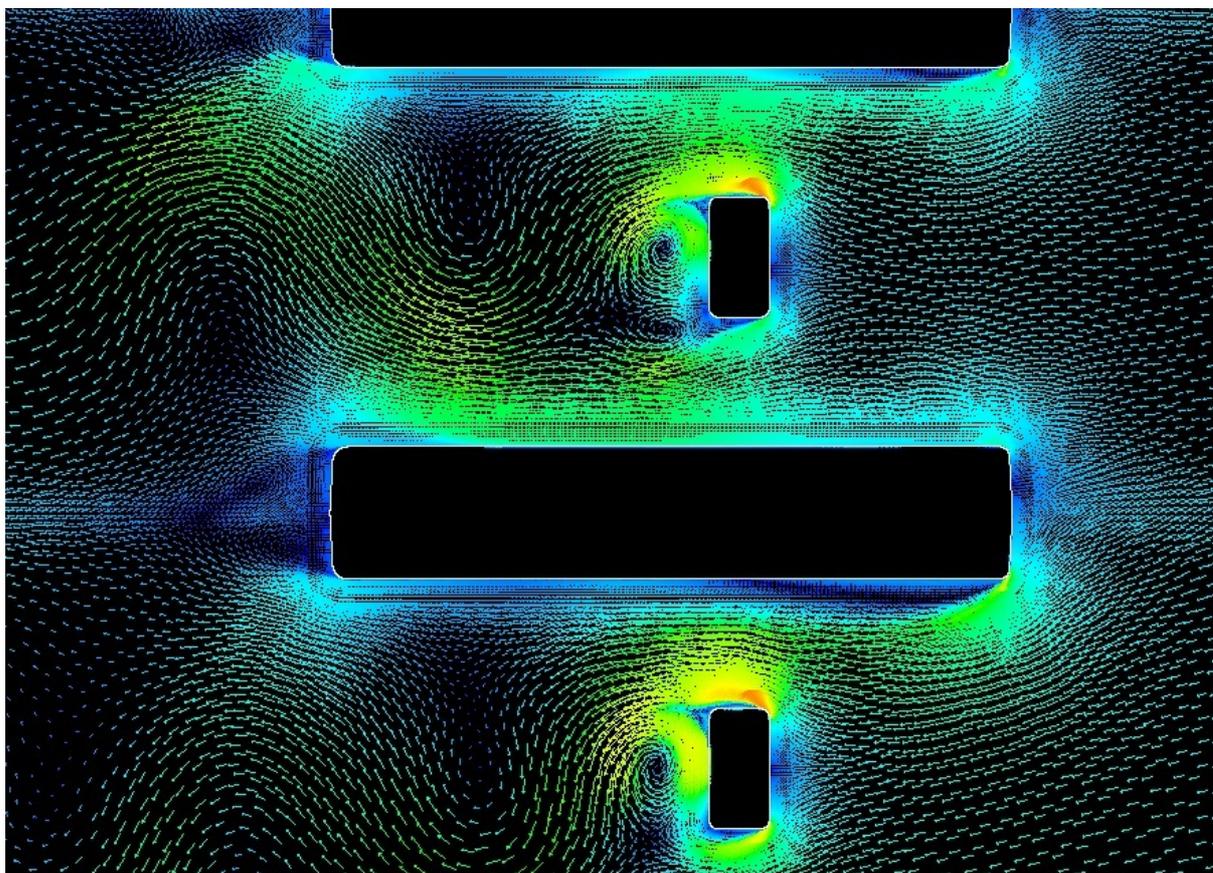


**Figura 6:** Imagen instantánea del campo de coeficientes de presión. En escala de colores,  $C_p$ . Valores inferiores a  $-2$  se muestran en color negro y constituyen núcleos de vórtices generados en los obstáculos.

El análisis de los valores instantáneos de velocidad (figura 5) y presión (figura 6) permite apreciar la complejidad del campo fluidodinámico. Los refuerzos estructurales más pequeños entre los paneles generan calles de vórtices que modifican sustancialmente el campo de presiones sobre los paneles rectangulares mayores, imponiendo localmente su propia frecuencia. Sin embargo, los vórtices desprendidos interactúan a su vez con otros formados en la parte posterior de los paneles, de modo que en la estela del conjunto los sistemas vorticosos se acoplan parcialmente.

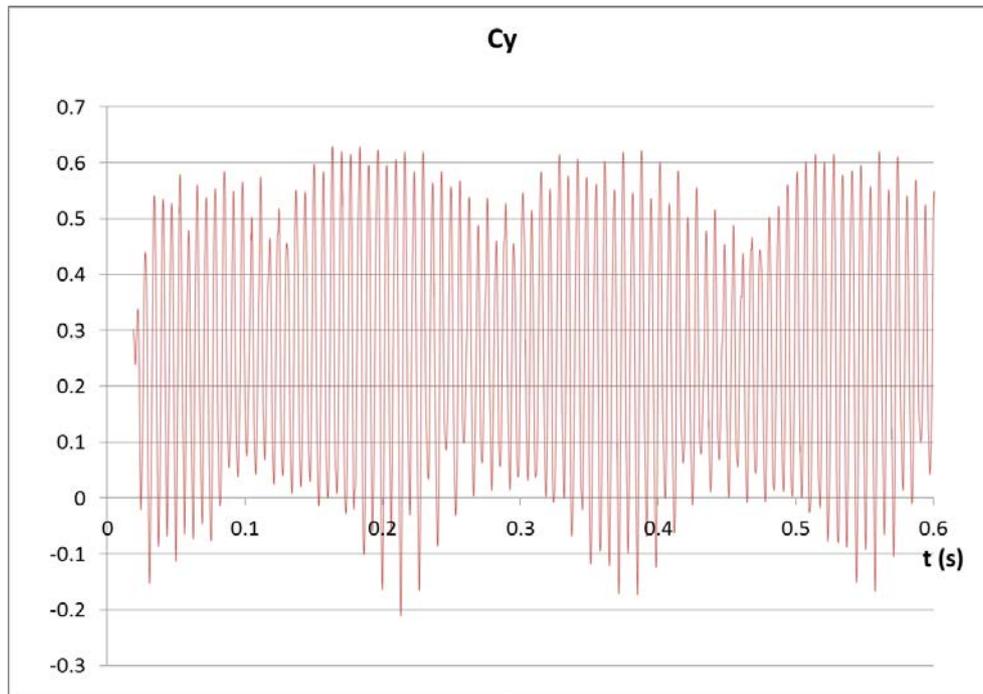
La figura 5 muestra la compleja estructura del flujo, en la que interactúan las estelas no estacionarias de los distintos cuerpos bañados por la corriente de aire. En la figura 6 se identifican claramente los vórtices desprendidos de los elementos estructurales, como núcleos de baja presión, y puede verse la distribución instantánea de presiones, distinta y variable sobre cada elemento.

Un análisis detallado de la figura 5 muestra, por ejemplo, que los campos de vórtices generados en los perfiles estructurales arriba y abajo del tercer panel (contando desde arriba), están acoplados en contrafase, generando una estela simétrica detrás del panel, mientras que para el panel inmediato inferior (cuarto desde arriba), los vórtices de elementos estructurales a ambos lados están acoplados en fase. Esto produce una intensificación de los picos de carga que debe soportar ese panel. La figura 7 muestra un mayor detalle del campo de velocidades, mostrando claramente los remolinos que se desprenden en fase de los elementos estructurales arriba y abajo del panel.

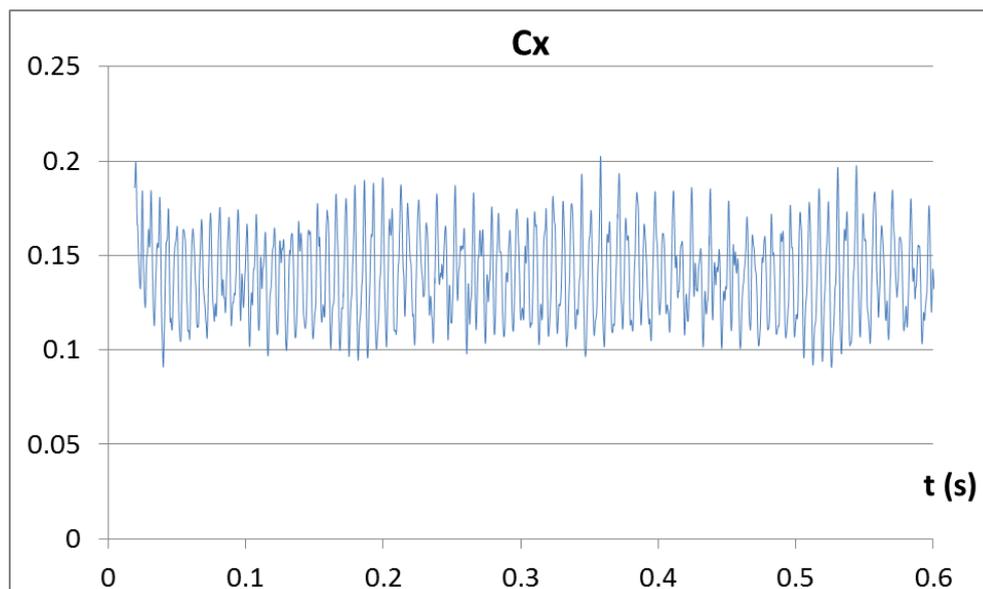


**Figura 7:** Imagen instantánea del campo de velocidades.

La integración de presión y tensiones de corte permiten obtener los coeficientes de fuerzas sobre los paneles. Las cargas eólicas fluctuantes que se observan son inducidas principalmente por los desprendimientos periódicos de remolinos en los elementos rectangulares de la estructura de soporte, y en menor medida por los desprendimientos propios de los elementos radiantes y el acoplamiento dinámico de las estelas de estos y las de los refuerzos estructurales.



**Figura 8:** Variación en el tiempo del coeficiente de fuerza normal a un panel representativo.



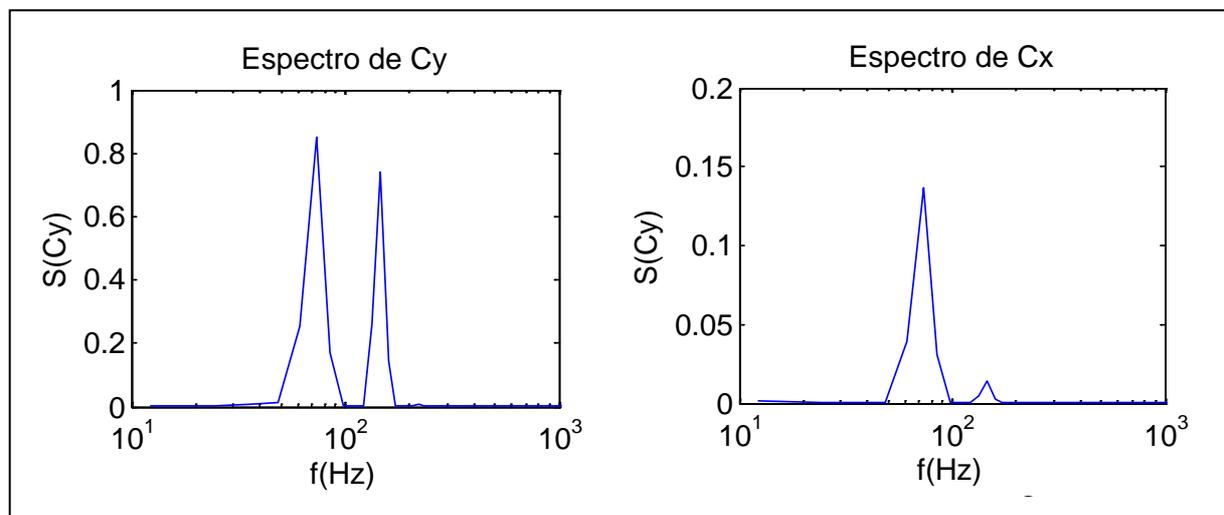
**Figura 9:** Variación en el tiempo del coeficiente de fuerza tangencial a un panel representativo.

Las figuras 8 y 9 muestran respectivamente la evolución en el tiempo de los coeficientes de carga normal y tangencial a un elemento representativo. Puede observarse que hay importantes fluctuaciones periódicas de carga, las que se deben principalmente a las oscilaciones locales de presión y velocidad causadas por los vórtices generados en los elementos estructurales. Oscilaciones de menor frecuencia, tipo “batido” aparecen probablemente debido a pequeñas diferencias en las frecuencias de desprendimientos vorticosos en elementos cercanos.

A partir del periodo de fluctuación de cargas normales a los paneles, se puede obtener el número de Strouhal, o frecuencia adimensional característica de las fluctuaciones de carga sobre los mismos debidas a los vórtices periódicos presentes en el flujo.

Si se observan las figuras 8 y 9, se puede ver que las fluctuaciones de carga presentan picos de intensidad alternada, intercalándose un máximo de menor magnitud entre dos de mayor intensidad. Esta particularidad se refleja en un espectro de cargas con dos picos significativos, como muestra la figura 10 (obtenida a partir de la simulación del modelo 2D en el túnel utilizada para validar nuestro modelo).

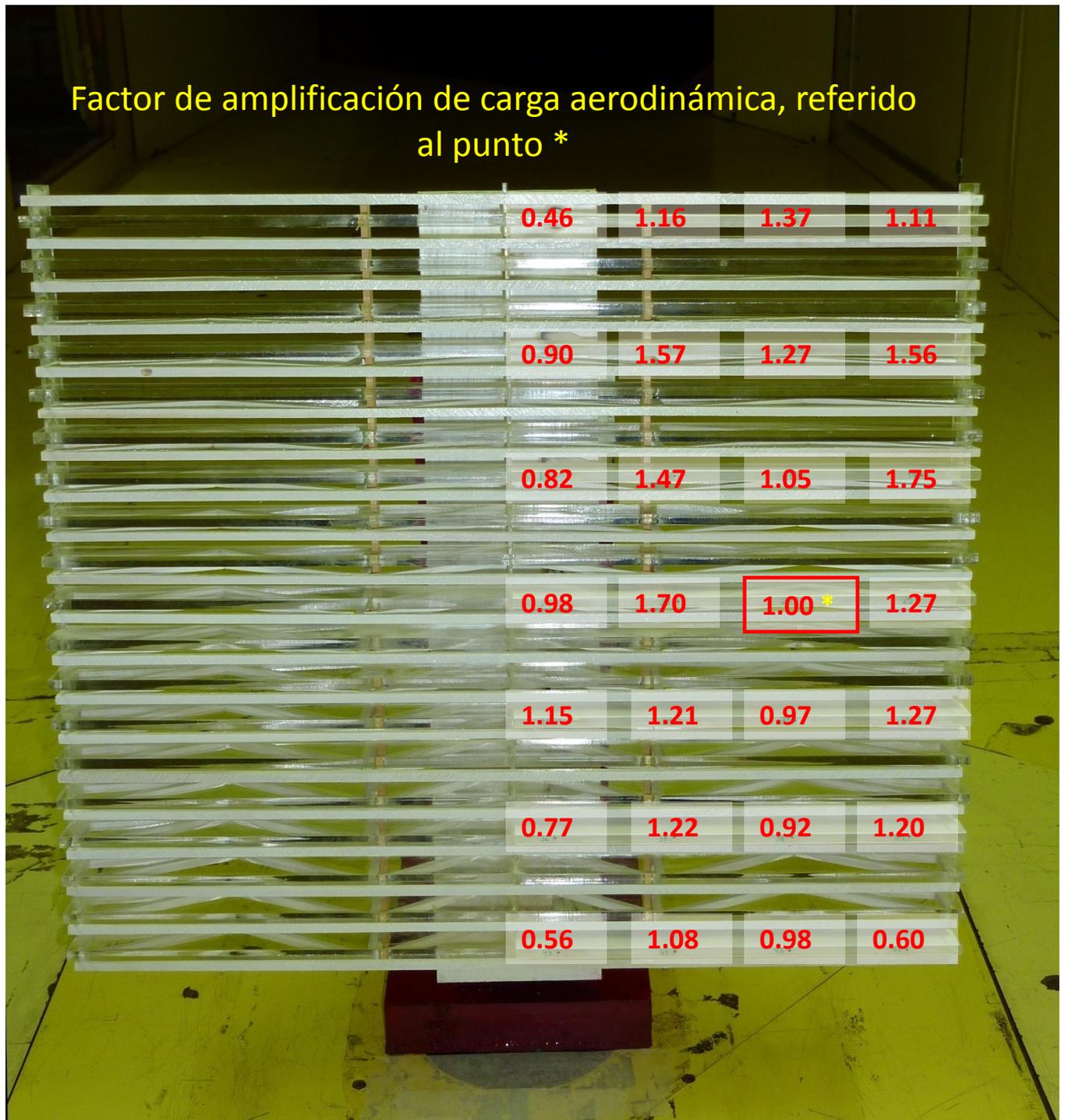
Ambas frecuencias pueden excitar vibraciones del panel si coinciden con la frecuencia de resonancia estructural del mismo. Como la frecuencia de excitación depende de la velocidad del viento incidente, es usual reportar el Número de Strouhal, o frecuencia normalizada, definida como  $St = \frac{f h}{V}$ , donde  $h$  es la altura o ancho de la sección perpendicular al viento,  $f$  la frecuencia de las fluctuaciones de carga, y  $V$  la velocidad incidente. En este caso, el número de Strouhal para los distintos paneles se halló entre 0.21 y 0.26.



**Figura 10:** Espectros de carga típicos de los paneles en la estructura.

### 3.2 Distribución de presiones medida en el modelo 3D.

Las tomas de presión se distribuyeron uniformemente en el frente y en la cara posterior de algunos elementos, abarcando las distintas regiones de la antena. Por simetría, sólo se instrumentó la mitad del modelo. Las fuerzas aerodinámicas en la dirección tangencial se calcularon a partir de la diferencia de presión entre ambas caras. En los elementos centrales no se pudo medir la presión detrás, por la presencia de la columna de soporte de la estructura.



**Figura 11:** Factor de incremento de carga debido a efectos tridimensionales y la presencia del prisma de soporte estructural. Elemento de referencia recuadrado \*.

Esta columna provoca aceleraciones importantes del aire a ambos lados, lo que hace que las cargas aerodinámicas aumenten en forma considerable. La figura 11 muestra la ubicación de las tomas frontales de presión (las traseras quedan justo detrás de estas). Se tomó un punto de referencia (recuadrado en la figura) en el elemento central de la tercera columna de tomas de presión, contando desde el centro hacia afuera y se dividieron las diferencias de presión

medidas en cada uno de los otros puntos por la medida en el punto de referencia. Así se obtuvieron los factores de amplificación de carga medidos en cada par de tomas, tomando como referencia la diferencia de presiones medida en el punto mencionado. Para las tomas centrales se supuso un coeficiente de presiones nulo (presión igual a la atmosférica sin perturbar) en la parte posterior.

Se considera que el corte vertical de la estructura que pasa por ese punto es el que presenta un flujo más semejante al caso bidimensional simulado numéricamente.

Los coeficientes de incremento, que tienen en cuenta la influencia de la columna de soporte y los efectos de borde a los costados, se aplican a los máximos coeficientes de fuerzas calculados en la simulación numérica. Se observa que en algunos elementos, las fuerzas aerodinámicas muestran un incremento de hasta un 75% por encima de las medidas en el elemento de referencia. Se considera este incremento sobre las máximas cargas calculadas en la simulación numérica 2-D.

Para el caso de viento incidente desde atrás, se esperan coeficientes de carga similares, pero las de mayor magnitud perpendiculares a los paneles serán hacia abajo, ya que en esa condición el ángulo de incidencia de los elementos respecto a la corriente será negativo.

#### 4 CONCLUSIONES

Se llevó a cabo en este trabajo un estudio numérico y experimental sobre las variaciones en coeficientes instantáneos de carga y frecuencias de desprendimientos periódicos de cuerpos bidimensionales de sección rectangular y distinta relación de aspecto en fuerte interacción fluidodinámica, así como una evaluación experimental de cuánto pueden cambiar estas cargas en una estructura tridimensional rectangular, en un flujo de capa límite atmosférica. Los resultados demuestran que la interacción y el acoplamiento fluidodinámico de las distintas estelas puede modificar en forma importante la frecuencia de cargas periódicas en estructuras esbeltas, en comparación con los valores predichos para cuerpos similares aislados, un efecto poco tenido en cuenta a la hora de diseñar elementos expuestos al viento como barreras eólicas, persianas, bandejas de secado, barreras antichorro para aeropuertos, paneles solares, antenas y otras estructuras de este tipo. En el caso estudiado, el número de Strouhal calculado para las cargas sobre los paneles rectangulares ha sido entre 0.21 y 0.26. Estos números son muy altos si se los compara con otros valores reportados para elementos rectangulares aislados (Okajima 1982), pero se explican por el efecto de "túnel" que ejercen los paneles sobre los elementos estructurales situados entre ellos, y por la interferencia entre las estelas de los elementos de distinta relación de aspecto. Se calcularon picos de carga normal hasta cinco veces mayores que los valores medios, y cargas tangenciales instantáneas de valor casi el doble que el de las cargas medias.

Se demuestra la necesidad de profundizar el estudio de la influencia de factores como el ángulo de incidencia de los elementos rectangulares, espaciado, etc., para el caso de estructuras como barreras que desvían el flujo o paneles que por necesidades operativas requieren cierta inclinación (por ejemplo, bandejas de secado para obtener una mejor exposición al sol).

El trabajo futuro incluye el procesamiento más exhaustivo del conjunto de datos adquiridos y el estudio de la influencia de parámetros como la distancia, forma y distribución de elementos, en la búsqueda de una distribución que permita minimizar las cargas dinámicas introducidas por los mismos.

## 5 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue llevado a cabo en el marco del convenio de cooperación INVAP – UNLP. Los autores agradecen a la Dirección General de Fabricaciones Militares y a la Fuerza Aérea Argentina por permitir la difusión de la información presentada.

## REFERENCIAS

- Bacchi, F., Marañón Di Leo, J., Delnero, J. S., Giacopinelli, P, Estudio numérico y experimental del flujo a sotavento de un modelo de barrera eólica porosa. *XVII Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones ENIEF 2008*, 10-13 de noviembre de 2008 San Luis, Argentina.
- Bacchi F., Scarabino A., García Sainz A., Delnero J.S.: “Fluid-dynamic interaction of rectangular cylinders of different aspect ratio”, *Proceedings of the 13th International Conference on Wind Engineering*, Amsterdam, Holanda, julio de 2011.
- Billah K. and Scanlan R., Resonance, Tacoma Narrows Bridge failure, and undergraduate Physics textbooks. *American Journal of Physics*, Vol 59, 2: 118-124, 1991.
- Blackburn, H.M., Melbourne, W.H.. The effect of free-stream turbulence on sectional lift forces on a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics* 306, 267–292, 1996.
- Blackburn, H.M., Henderson, R.D., A study of two-dimensional flow past an oscillating cylinder. *Journal of Fluid Mechanics* 385, 255–286, 1999.
- Catalano P, Amato M.: An evaluation of RANS turbulence modelling for aerodynamic applications. *Aerospace Science and Technology*, Vol. 7, Issue 7, October 2003, 493:509
- Chatterjee D., Biswas G., Amiroudine S., Numerical simulation of flow past row of square cylinders for various separation ratios. *Computers & Fluids* 39, 1: 49-59, 2010.
- Fitzpatrick, J.A., Donaldson, I.S., Mcknight, W.. Strouhal numbers for flows in deep tube array models. *Journal of Fluids and Structures* 2, 145–160, 1988.
- Fox, T.A., West, G.S., Fluid-induced loading of cantilevered circular cylinders in a low turbulence uniform flow. Part 1: mean loading with aspect ratios in the range 4–30. *Journal of Fluids and Structures* 7, 1–14, 1993a.
- Fox, T.A., West, G.S., Fluid-induced loading of cantilevered circular cylinders in a low turbulence uniform flow. Part 2: fluctuating loads with aspect ratios in the range 4–30. *Journal of Fluids and Structures* 7, 15–28, 1993b.
- Fox, T.A., West, G.S., Fluid-induced loading of cantilevered circular cylinders in a low turbulence uniform flow. Part 3: fluctuating loads with aspect ratios in the range 4–30. *Journal of Fluids and Structures* 7, 375–386. 1993c.
- Freitas, C.J., Perspective: selected benchmarks from commercial CFD codes. *ASME Journal of Fluids Engineering* 117, 208–218, 1995.
- Kim, H.J., Durbin, P.A. Investigation of the flow between a pair of circular cylinders in the flopping regime. *Journal of Fluid Mechanics* 196, 431–448, 1988.
- Lam, K., Lo, S.C., A visualization study of cross-flow around four cylinders in a square configuration. *Journal of Fluids and Structures* 6, 109–131, 1992.
- Lam, K., Li, J.Y., Chan, K.T., So, R.M.C. Flow pattern and velocity field distribution of cross-flow around four cylinders in a square configuration at a low Reynolds number. *Journal of Fluids and Structures* 17, 665–679, 2003.
- Mannini C., Weinman K., Soda A., Schewe G., Three-dimensional numerical simulation of flow around a 1:5 rectangular cylinder. *Proc. of EACWE 5* Florence, Italy, 19th – 23rd July 2009.

- Oengoren, A., Ziada, S. An in-depth study of vortex shedding, acoustic resonance and turbulent forces in normal triangle tube arrays. *Journal of Fluids and Structures* 12, 717–758, 1998.
- Okajima, A., Strouhal numbers of rectangular cylinders. *J. Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, 123: 379-398, 1982.
- Paidoussis, M.P., A review of flow-induced vibrations in reactors and reactor components. *Nuclear Engineering and Design* 74, 31–60, 1982.
- Price, S.J., Zahn, M.L., Fluidelastic behavior of a normal triangular array subject to cross-flow. *Journal of Fluids and Structures* 5, 259–278, 1991.
- Price, S.J., Paidoussis, M.P., The aerodynamic forces acting on groups of two and three circular cylinders when subjected to a cross-flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 17, 329–347, 1984.
- Sachs P. (1978) *Wind Forces in Engineering*. Pergamon Press.
- So, R.M.C., Liu, Y., Chan, S.T., Lam, K. Numerical studies of a freely vibrating cylinder in a cross-flow. *Journal of Fluids and Structures* 15, 845–866., 2001.
- Sumner, D., Price, S.J., Paidoussis, M.P. Flow-pattern identification for two staggered circular cylinders in cross flow. *Journal of Fluid Mechanics* 411, 263–303, 2000.
- Szepessy, S., Bearman, P.W. Aspect ratio and end plate effects on vortex shedding from a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics* 234, 191–217, 1992.
- Zdravkovich, M.M. The effects of interference between circular cylinders in cross flow. *Journal of Fluids and Structures* 1, 239–261, 1987.