

## INTERACCIÓN FLUIDODINÁMICA DE ELEMENTOS RECTANGULARES DE DISTINTA RELACIÓN DE ASPECTO

**Federico Bacchi<sup>a,b</sup>, Ana Scarabino<sup>a,b</sup>, Mariano García Sainz<sup>b</sup>, Sebastián Delnero<sup>a,b,c</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, laclyfa@ing.unlp.edu.ar, <http://www.laclyfa.ing.unlp.edu.ar>*

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

**Palabras clave:** flujo de estela, interacción fluidodinámica, fuerzas no estacionarias

**Abstract.** Se analiza numérica y experimentalmente el flujo de aire en el entorno de un conjunto bidimensional de elementos rectangulares de relación  $L/h$  aproximadamente igual a 5 intercalados con elementos de relación  $L/h = 0.5$ . En trabajos anteriores (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., *ENIEF 2008*) se validó el modelo  $k-\omega$  SST (Shear Stress Transport) como apto para el modelado del flujo en el entorno de barreras eólicas formadas por elementos similares a los de baja relación  $h/L$  estudiados aquí. En el presente trabajo se calculan numéricamente el campo fluidodinámico y las fuerzas resultantes sobre cada elemento rectangular de un conjunto distribuido verticalmente en el que alternan elementos de distinta relación de aspecto, para viento con ángulos de incidencia 0 y 10 grados. En el túnel de viento se miden cargas y se relevan velocidades instantáneas en distintos puntos de la estela y se comparan estos resultados con los obtenidos en la simulación numérica. Se analiza la interacción entre estelas de los distintos elementos estructurales, las variaciones del nro. de Strouhal causadas por su interacción y el efecto del acoplamiento de las estelas en las cargas dinámicas sobre dichos elementos.

## 1 INTRODUCCIÓN

Es un hecho conocido que cuando un cuerpo como aproximadamente bidimensional está sumergido en una corriente perpendicular a su eje, se originan desprendimientos periódicos de vórtices que inducen sobre el cuerpo un campo de fuerzas fluctuantes, el que puede ocasionar vibraciones mecánicas si el obstáculo es o está montado elásticamente. Otros fenómenos como "buffeting", "flutter" y resonancias acústicas ocasionan también cargas no estacionarias importantes, en estructuras de distintas secciones (Paidoussis, 1982; Fitzpatrick et al., 1988; Price and Zahn 1991; Oengoren and Ziada, 1998).

Estas vibraciones tienen un impacto significativo en la vida a fatiga de las estructuras y pueden ocasionar su colapso, siendo un caso emblemático 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 entorno 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. Price and Paidoussis (1984) investigaron las fuerzas medias de sustentación y resistencia sobre dos y tres cilindros en un amplio rango de relaciones distancia/diámetro y sugirieron que el principio de superposición podría aplicarse en los coeficientes de fuerzas medias. Zdravkovich (1987), después de un minucioso trabajo de revisión de numerosos experimentos, propuso clasificar la interferencia del flujo entre dos cilindros en tres categorías y trazó "mapas" de coeficientes medios de fuerza y número de Strouhal para dos cilindros en régimen subcrítico. Kim y Durbin (1999) y Sumner et al (2000) llevaron a cabo estudios de la interacción fluido-estructura y su efecto en la configuración del flujo, flujos biestables y variaciones del Strouhal.

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 este caso el problema físico a resolver es la determinación de cargas eólicas sobre paneles de sección rectangular de relación de aspecto 5.1136:1, con un ángulo de incidencia no nulo, montados sobre una estructura reticulada de caños tubulares de sección rectangular, con una fuerte interferencia fluidodinámica de ambos tipos de elementos. Este tipo de estructura puede aparecer en configuraciones de barreras eólicas y barreras antichorro en aeropuertos, en paneles solares, persianas, bandejas de secado y otras estructuras similares con paneles orientables. Se analizaron dos casos: con un ángulo de incidencia de 10 grados, correspondiente a la situación normal de uso, y a 0 grados, para evaluar la interacción de las estelas en una configuración simétrica. Este último caso solamente se estudió el problema en forma numérica. 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 y 32266 basado en la altura.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Simulación Numérica

Se realizó una simulación numérica 2D con el software Fluent 6.3, con una malla de aproximadamente 180000 elementos triangulares, y una discretización de la capa límite de los distintos obstáculos adecuada para el modelo de turbulencia  $k-\omega$  SST. Este 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. En el estudio experimental, por otra parte, se buscó mantener la bidimensionalidad del flujo medio con placas laterales que impiden efectos de borde en los elementos rectangulares.

Se utilizó un solver implícito de segundo orden en el tiempo y el espacio para cantidad de movimiento y los parámetros turbulentos  $k$  y  $\omega$ , con un paso temporal de  $5e-5$  s. La figura 1 muestra detalles de la malla en el entorno de los paneles y refuerzos estructurales.

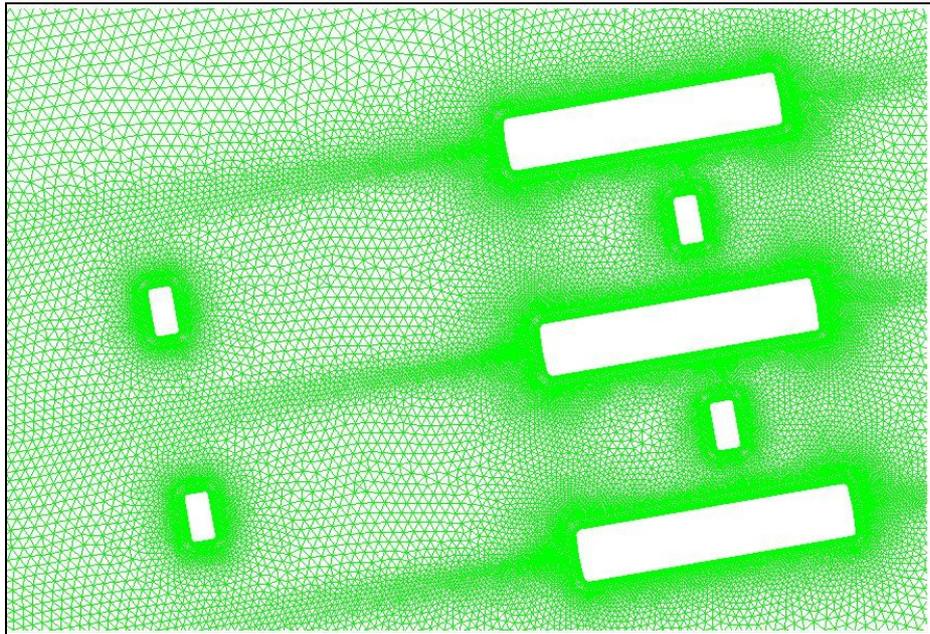


Figura 1: Detalle del mallado en el entorno de los elementos estructurales

## 2.2 Experimentos

Se construyó un modelo físico de tres paneles de madera de sección rectangular, de 0.8 m de envergadura, 0.225 m de cuerda y 0.044 m de espesor. El panel central cuenta con un larguero metálico ubicado al 50% de la cuerda, necesario para la implementación de la medición de cargas mediante celdas de cargas de dos componentes. Los refuerzos estructurales que interactúan fluidodinámicamente con los paneles miden 0.02 m x 0.04 m y están en la posición que se muestra en el esquema de la malla correspondiente al modelo numérico, figura 1. Se colocan a los costados dos placas verticales laterales con el fin de mantener un flujo bidimensional entorno a los elementos.

La velocidad media de la corriente fue medida con un termo-anemómetro Dantec Flowmaster, cuyo sensor está a la altura del panel central al cual se relevan las cargas y 1.5 metros por delante de su ubicación. Para medir las fuerzas aerodinámicas se utilizó una balanza aerodinámica de dos componentes, con doble puente de Wheatstone. Las señales correspondientes son acondicionadas con amplificadores Vishay serie 2310 y adquiridas en una PC. La balanza se encontraba únicamente vinculada al elemento rectangular central.

La medición del campo de velocidades instantáneas en la estela se realizó empleando un sistema de anemometría de hilo caliente de seis canales Dantec Streamline (CTA 90C10), con sensores tipo X- Probe - 51R51, y se utilizó un mecanismo de posicionamiento de la punta de medición, el cual es comandado desde la PC.



Figura 2: Maqueta instalada, balanza aerodinámica y poste-posicionador de punta de medición de velocidades. Se observan las placas laterales para mantener la bidimensionalidad del flujo medio.

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. Para la determinación de las cargas aerodinámicas es necesario generar una curva de calibración para cada eje de la celda de carga. Este proceso se realiza in situ y con el modelo montado. Para la velocidad de viento de 11 m/s se repitieron tres veces las adquisiciones de cargas verticales, horizontales y temperatura. También se realizaron mediciones a otras velocidades entre 5 y 17 m/s para verificar la independencia de los coeficientes del número de Reynolds en un rango razonable. Se adimensionalizaron los valores de cargas y se corrigieron por densidad para obtener los coeficientes aerodinámicos.

Siguiendo una metodología empleada anteriormente por el grupo de trabajo (Scarabino *et al* 2005), se calcularon las frecuencias de desprendimientos a partir de mediciones anemométricas en la estela del obstáculo, tanto para los experimentos como para los valores adquiridos en la simulación numérica.

La medición del campo de velocidades se realizó para dos posiciones según el eje-x, a 1h (Posición 1) y 2h (Posición 2) detrás del borde de fuga del elemento radiante central, siendo h su espesor (44mm) Se cubrió una zona comprendida entre 0.40 m y 0.65 m desde el piso del túnel (0.134 m por debajo hasta 0.116 m por encima del elemento central), con un intervalo de 5 mm, buscando una buena caracterización de la estela. El procedimiento es igual para las dos posiciones consideradas. La frecuencia de adquisición fue de 2000 Hz por canal, filtrada a 1000 Hz. Los tiempos característicos determinados a partir de los picos espectrales obtenidos confirman que estos valores

fueron adecuados.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Campo de flujo obtenido por CFD

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.

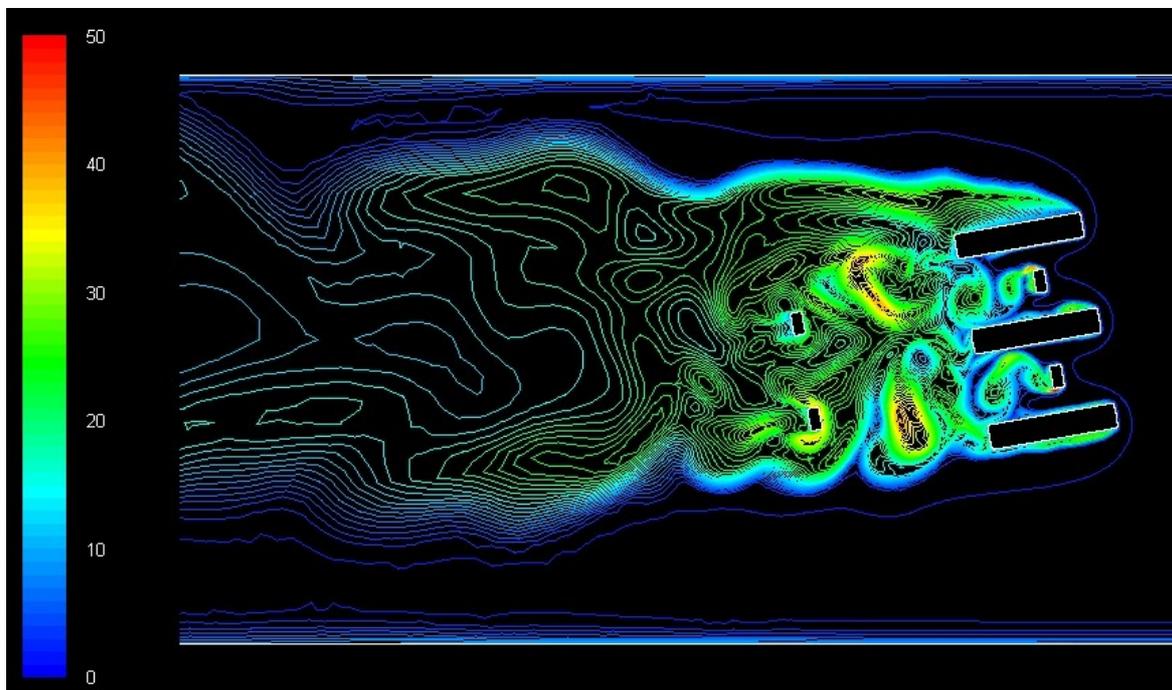


Figura 3: Estructura general del flujo: contornos instantáneos de intensidad de turbulencia

El programa calcula la intensidad de turbulencia  $It$  a partir de la energía cinética turbulenta,  $k$ , y la velocidad media  $u_{avg}$  como

$$k = \frac{3}{2} (u_{avg} It)^2 \quad (1)$$

Los coeficientes de presión,  $C_p$ , toman como referencia la presión dinámica en la entrada del túnel de viento.

El análisis de los valores instantáneos de intensidad de turbulencia (figuras 3 y 4) y los vectores velocidad (figura 5) 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.

Por otra parte, todo el conjunto actúa como un único obstáculo a distancias del orden de algunas veces su escala, y la estela contiene oscilaciones a frecuencias propias, aunque en este caso, con una influencia considerable de las paredes del túnel de viento (figura 4). En este caso, el estudio se enfocó en el panel central, ya que es frecuente que configuraciones de este tipo estén formadas por un número importante de paneles superpuestos, y no se analizó en detalle el flujo en los paneles exteriores.

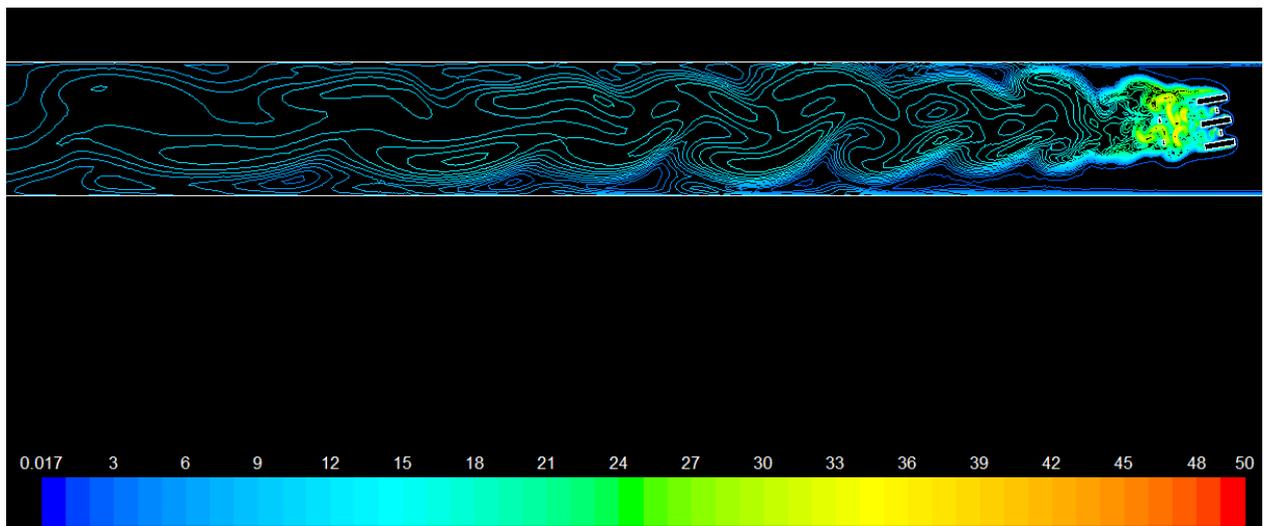


Figura 4: Campo de Intensidad de Turbulencia, incidencia 10 grados

El gráfico de los vectores de velocidad instantánea permite apreciar claramente que los vórtices desprendidos por los pequeños elementos de refuerzo estructural están en contrafase, lo que también se observa a cero grados de incidencia. La figura 6 muestra el campo de coeficiente de presiones entre los distintos elementos y la figura 7, en particular, la distribución del coeficiente de presión instantánea sobre la superficie del elemento rectangular central. Son evidentes los cambios de signo de la presión y de su gradiente en la capa límite, que producen el desprendimiento y readherencia periódicos del flujo, con la consiguiente fluctuación de fuerzas netas. Los núcleos de los vórtices se identifican fácilmente por ser centros de muy bajo  $C_p$ .

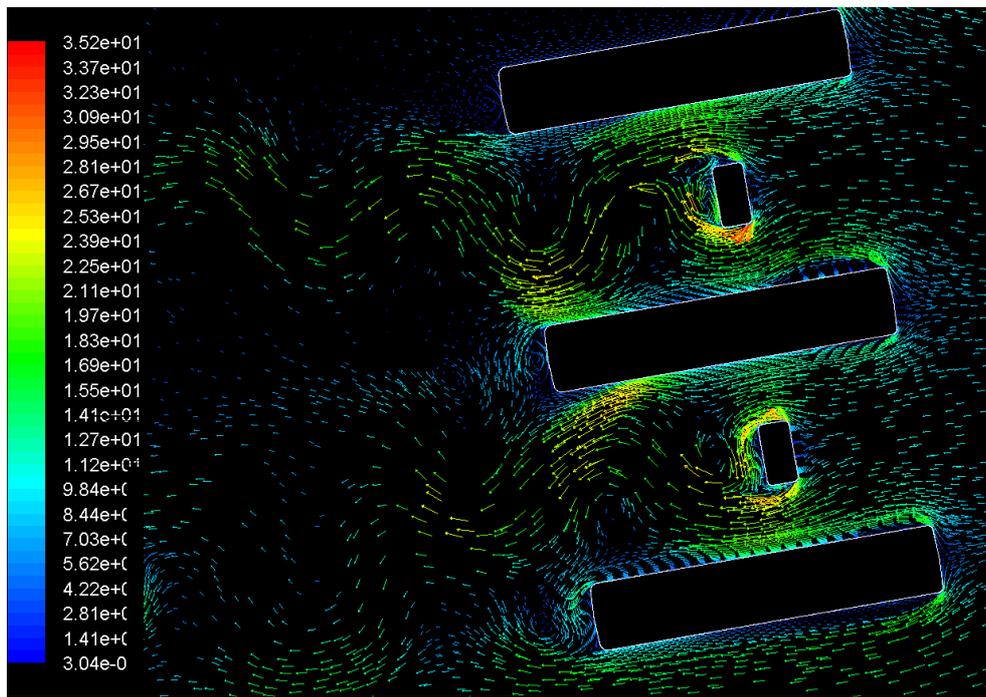


Figura 5: Campo de velocidades instantáneas, incidencia 10 grados

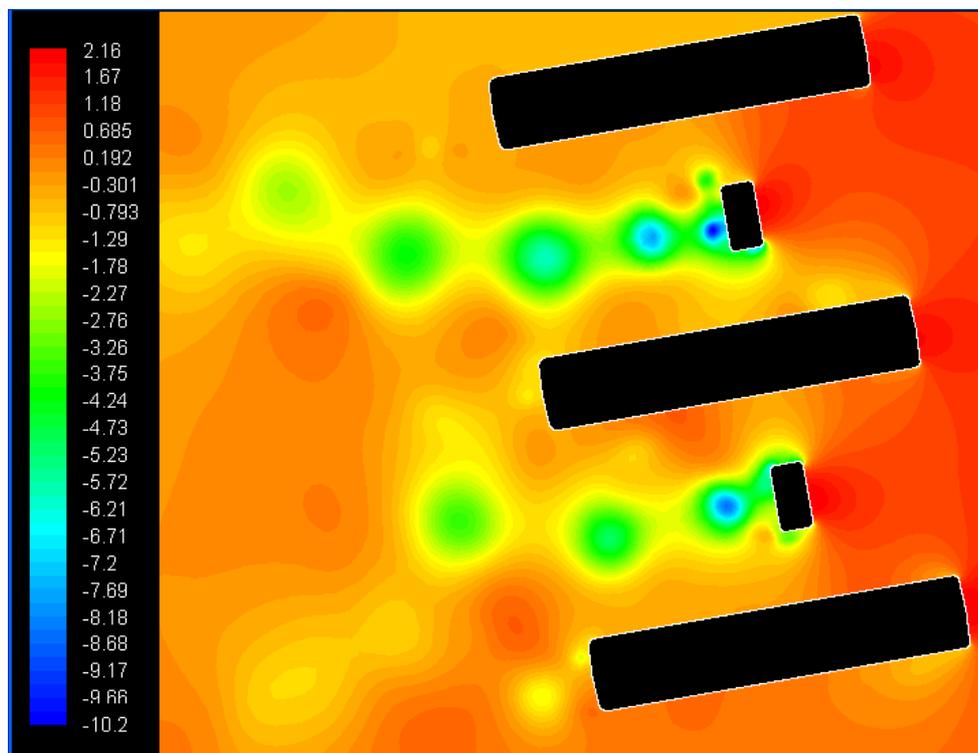


Figura 6: Campo de coeficiente de presión instantáneo, incidencia 10 grados.

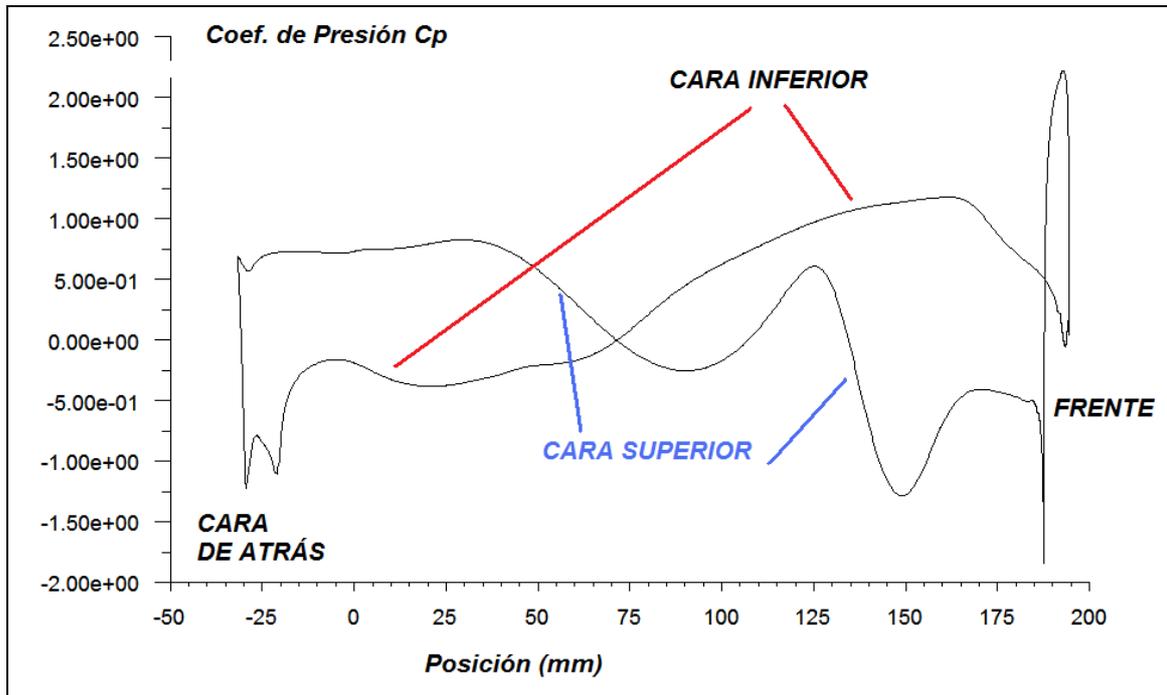


Figura 7: Distribución de Cp sobre el elemento rectangular central, incidencia 10 grados.

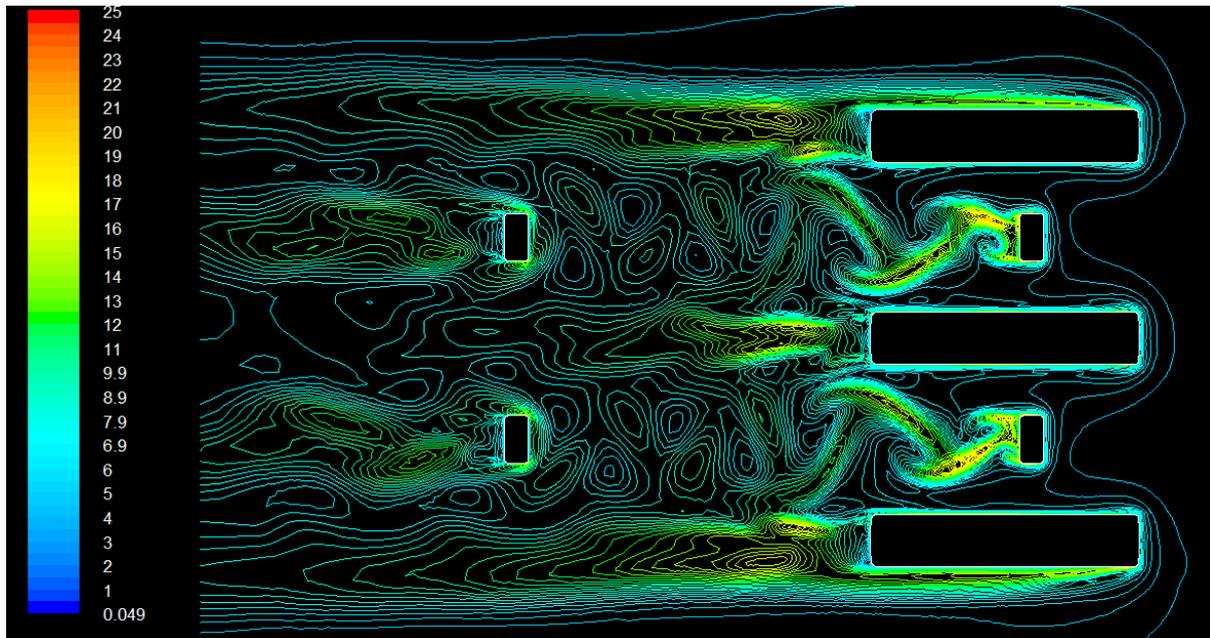


Figura 8: Intensidad de turbulencia con incidencia 0 grados.

Para el flujo alrededor de los paneles con su dimensión mayor orientada en dirección de la corriente (figura 8), se observa la misma tendencia al acoplamiento en contrafase de las estelas de los elementos pequeños y su efecto de introducir simetría en la estela del elemento central. Este hecho neutraliza parcialmente los desprendimientos de vórtices propios del extremo del panel rectangular, y explica la relativamente pequeña amplitud de las fluctuaciones de fuerzas netas en este caso.

### 3.2 Velocidades instantáneas en la estela

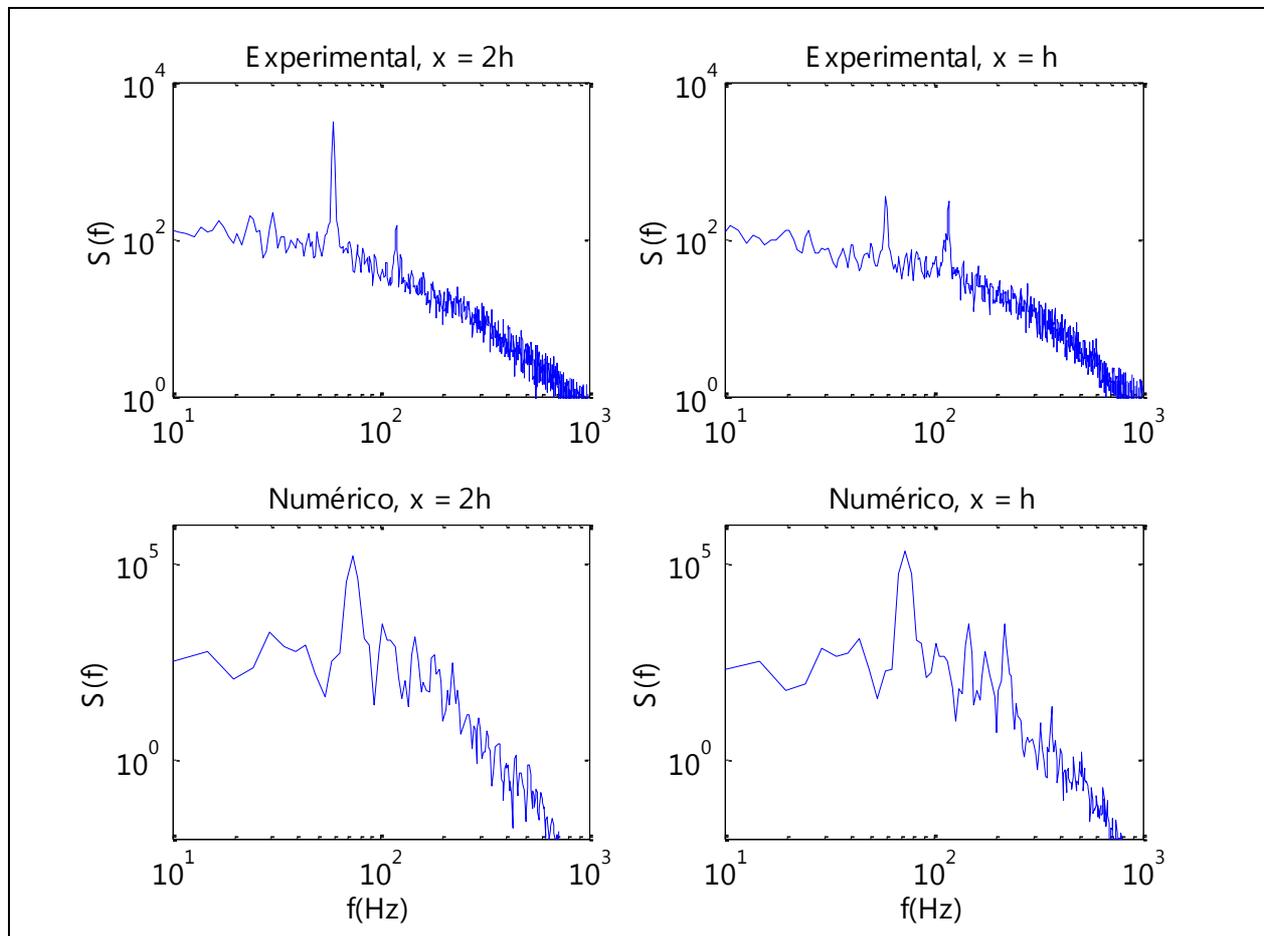


Figura 9: Espectros de la componente vertical de la velocidad instantánea. Arriba: datos experimentales adquiridos a distancias  $h$  y  $2h$ . Abajo: datos numéricos en los mismos puntos.

La figura 9 muestra los espectros de las fluctuaciones de velocidad vertical,  $v$ ,

medidos o calculados a distancias  $h$  y  $2h$  en la estela del panel rectangular central, siendo  $h$  la altura de los elementos rectangulares mayores. El primer pico de energía se obtuvo a 60 Hz en los experimentos y 70 Hz en la simulación, correspondiendo a números de Strouhal de 0.254 y 0.218 respectivamente. La diferencia está dentro del error esperable. 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 interferencia entre las estelas de los elementos de distinta relación de aspecto.

Los experimentos muestran un segundo pico de energía a una frecuencia de aproximadamente 120 Hz, que se atenúa a la distancia  $2h$ . Este máximo aparece en la simulación numérica con menor intensidad.

### 3.3 Coeficientes de fuerzas

En todos los casos se 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:

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

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 (0.225 m) por un metro en las simulaciones numéricas y el ancho del elemento en las mediciones en túnel de viento. Estas fuerzas son fluctuantes en el tiempo, debido a la turbulencia y los desprendimientos de vórtices en las estelas de ambos tipos de elementos. Debe destacarse que el sistema de coordenadas de referencia fue el estructural y no el de la corriente libre, como es usual en pruebas aerodinámicas en las que se reportan los coeficientes de sustentación y resistencia. La razón para esta elección fue la mayor simplicidad a la hora de analizar las tensiones y deformaciones de la estructura, teniendo las cargas referidas a los ejes principales de la sección.

#### 3.3.1 Valores medios

En el estudio experimental, el equipamiento disponible permitió obtener solamente coeficientes medios de fuerza. Estos fueron medidos a distintos valores de velocidad de

viento para verificar su independencia del número de Reynolds. La figura 10 muestra los resultados para incidencia 10 grados, donde se verifica que no hay una tendencia a variar con la velocidad.

La tabla 1 sintetiza los valores medios medidos y calculados numéricamente, y los máximos y mínimos instantáneos obtenidos en la simulación, para incidencia de 10 grados. La diferencia entre los valores medidos y los calculados no llega al 10 %, lo cual vuelve a confirmar la calidad de la simulación.

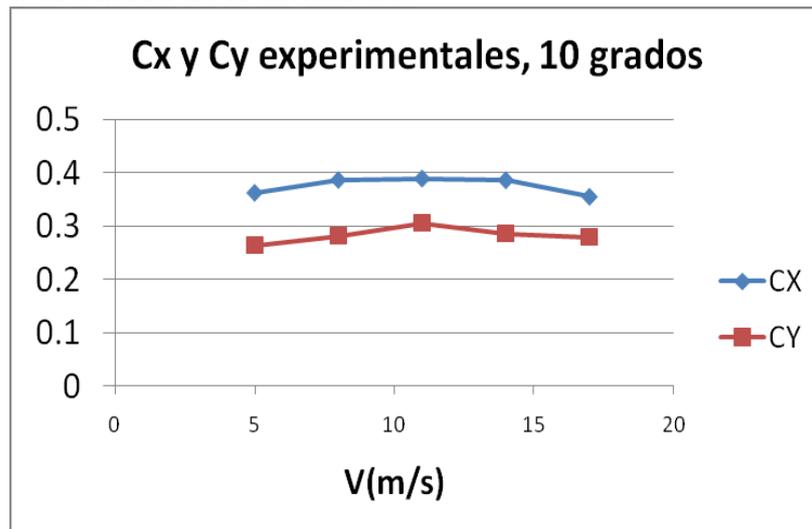


Figura 10: Coeficientes de carga tangencial (Cx) y normal (Cy) para el elemento rectangular central, medidos en túnel de viento

NUMÉRICO (V = 11 m/S), 10 grados				EXPERIMENTAL		DIF % CX	DIF% CY
CX		CY		CX	CY		
MEDIO	0.429639	MEDIO	0.280642	0.390	0.306	9.34	9.07
MÁXIMO	<b>0.739682</b>	MÁXIMO	<b>1.476264</b>				
MÍNIMO	0.161021	MÍNIMO	-0.78924				

Tabla 1: coeficientes de carga tangencial y normal a 10 grados de incidencia

Es para destacar que los valores instantáneos de los coeficientes de carga pueden ser tan altos como 1.47, es decir casi cinco veces más que los coeficientes medios, algo para tener en cuenta a la hora del diseño estructural de estos sistemas.

### 3.3.2 Valores instantáneos

La simulación numérica a 0 y 10 grados permitió obtener las fluctuaciones de carga tangencial y normal para el elemento central y sus respectivos espectros, ilustrados en la figuras 11 y 12.

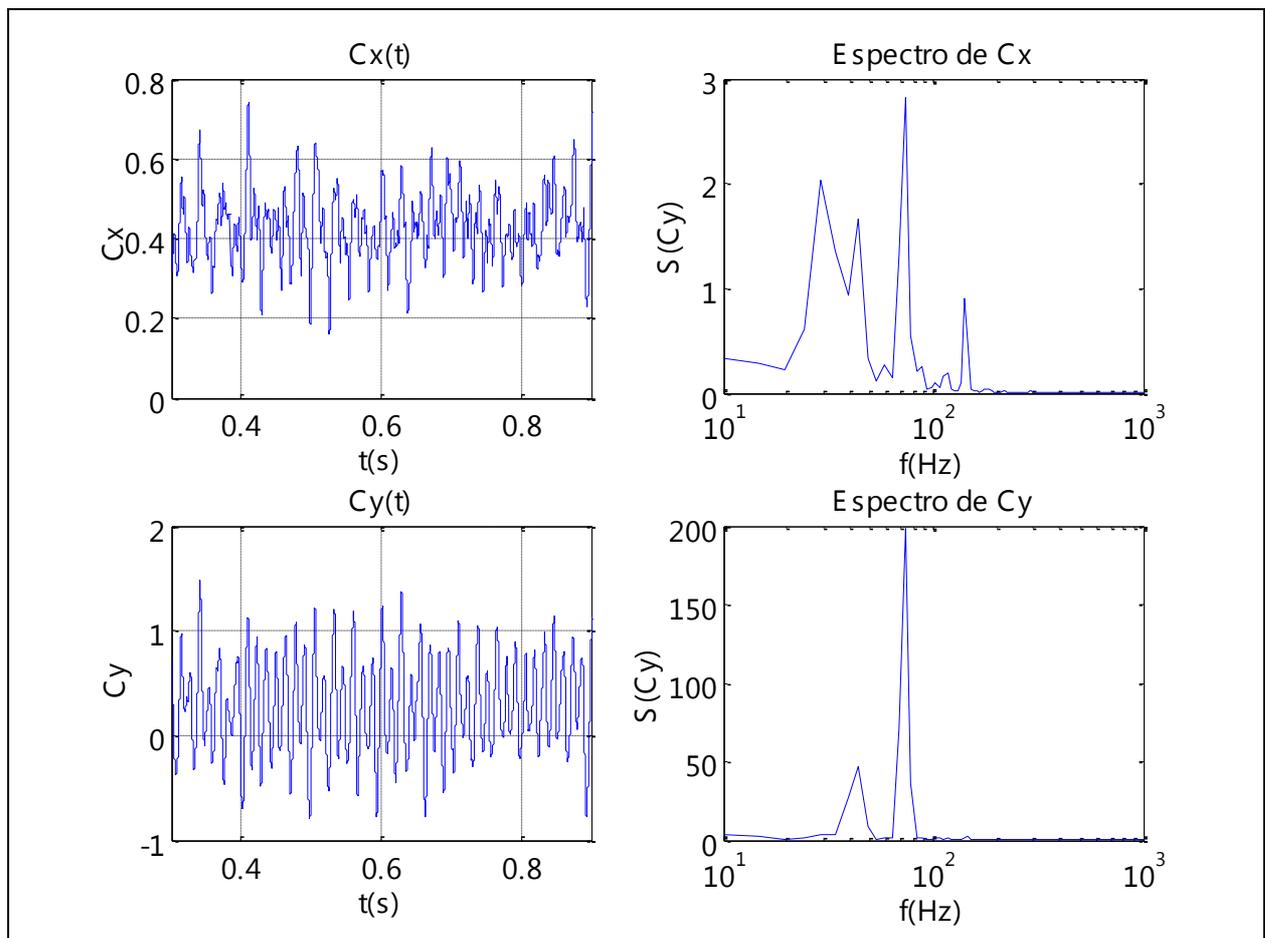


Figura 11: Variación temporal de coeficientes de fuerza sobre el elemento rectangular central, y espectros de las mismas, para 10 grados de incidencia (cálculo numérico).

Para 10 grados (figura 11), la frecuencia principal de cargas dinámicas coincide con los 70 Hz detectados en el análisis de la velocidad vertical en la estela (Número de Strouhal 0.254). La frecuencia más alta de fluctuaciones, de 120 Hz es más significativa en las cargas tangenciales que en las normales. Aparece también un máximo en una

frecuencia menor, alrededor de 40 Hz. Las fluctuaciones de carga en este rango de frecuencias, aproximadamente la mitad de la dominante, pueden deberse a las fluctuaciones de presión producidas por todo el conjunto, y merece un estudio posterior.

A cero grados los espectros de carga muestran la frecuencia de 70 Hz como dominante, aunque las fluctuaciones de carga tienen una intensidad mucho menor. Es posible que la simetría de las estelas de los elementos pequeños, que se sincronizan en fase opuesta, contribuya a amortiguar las fluctuaciones. El segundo pico a 120 Hz contribuye con intensidad menor, pero comparable.

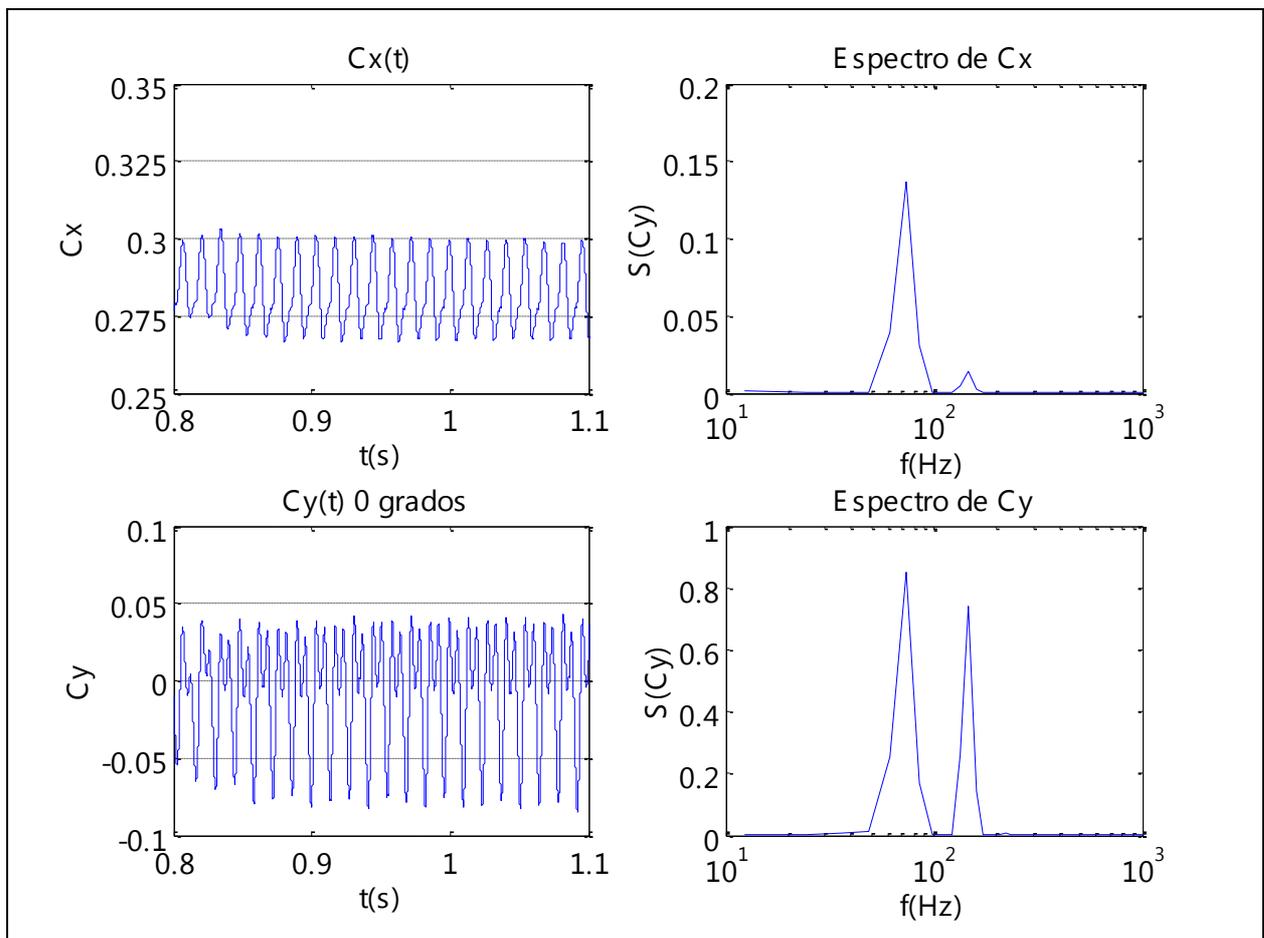


Figura 12: Variación temporal de coeficientes de fuerza sobre el elemento rectangular central, y espectros de las mismas, para 0 grados de incidencia (cálculo numérico).

#### 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. Los resultados numéricos fueron comparados con resultados experimentales de coeficientes medios de fuerza y espectros de velocidad instantánea de señales anemométricas. La diferencia entre resultados numéricos y experimentales en los coeficientes de fuerza normal y tangencial fue en ambos menor al 10% y la diferencia en el número de Strouhal detectado en la estela a partir de mediciones de velocidad instantánea y cálculos de la misma fue del orden del 15%. 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. 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. Son diferencias muy considerables a la hora del diseño estructural, sobre todo si éste se basa en valores de coeficientes medios o cuasi-estáticos.

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 y distribución de elementos, en la búsqueda de una distribución que permita minimizar las cargas dinámicas introducidas por los mismos.

## 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.
- 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.

- Scarabino A., Marañon di Leo, J., Delnero J. S., Bacchi, F.: Drag Coefficients and Strouhal Number of a Port Crane Boom Girder Section, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 93/6, 451-460, 2005.
- 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