

## CARGAS EN CUBIERTAS CURVAS CON OBSTRUCCIONES PARA VIENTO INCIDIENDO OBLÍCUAMENTE

Gustavo C. Balbastro<sup>a</sup>, Victorio E. Sonzogni<sup>b</sup>

<sup>a</sup>UTN, Facultad Regional Paraná, Facultad Regional Santa Fe, Lavaise 610, 3000 Santa Fe, Argentina, [gbalbastro@yahoo.com](mailto:gbalbastro@yahoo.com)

<sup>b</sup>CIMEC, INTEC, UNL-CONICET, Güemes 3450, 3000 Santa Fe, Argentina. Tel: 54-342-4511594, [sonzogni@intec.unl.edu.ar](mailto:sonzogni@intec.unl.edu.ar)

**Palabras clave:** Viento, CFD, cubiertas aisladas.

**Resumen.** Se simula el viento natural sobre construcciones de cubierta curva sin paredes laterales, incidiendo en forma oblicua a la generatriz, cuando bajo las mismas se ubican obstrucciones debidas a objetos diversos. Este tipo de situación resulta bastante común en la práctica y no siempre es considerada en el proyecto de tales estructuras. A pesar de las diferencias aerodinámicas evidentes entre la situación con y sin obstrucciones no se dispone de especificaciones que permitan evaluar las cargas en estos casos en los códigos de diseño. Los resultados reportados se obtuvieron mediante dinámica de fluidos computacional (CFD, por *computational fluid dynamics*), tratando la turbulencia a través de un modelo de simulación de grandes vórtices (LES, por *large eddy simulation*).

## 1 INTRODUCCIÓN

Con gran frecuencia se pueden ver en la República Argentina construcciones cuya cubierta tiene directriz circular o parabólica, casi siempre formadas por arcos metálicos de celosía que reciben correas livianas, las cuales a su vez soportan chapas de acero galvanizado, de conformación sinusoidal. Su bajo peso propio las hace especialmente vulnerables a los vientos fuertes, eventos en los que sufren daños que van desde arrancamiento de chapas hasta el colapso total, según se ha podido constatar en reiteradas oportunidades ([Balbastro y Sonzogni, 2008a](#)).

Estas construcciones pueden encontrarse con o sin cerramiento lateral según su uso, siendo en este último caso las denominadas cubiertas aisladas, comunes tanto en zonas urbanas como rurales y de las cuales se ocupa este trabajo.

El ingeniero estructural se vale del auxilio de tablas de coeficientes de presión o de fuerzas para evaluar las acciones sobre las estructuras, las cuales están contenidas usualmente en los códigos. En el caso de la República Argentina el reglamento específico ([CIRSOC, 2005](#)) no aporta datos apropiados para el cálculo de acciones sobre las cubiertas abovedadas aisladas, dando solamente valores para edificios con cubierta curva cerrados total o parcialmente, que resultan inadecuados ya que el flujo alrededor de este tipo de construcciones es diferente del correspondiente a la cubierta aislada, según muestran los trabajos sobre este tema realizados por [Natalini et al. \(2001\)](#) y [Natalini \(2005\)](#) mediante ensayos sobre modelos en túnel de viento de capa límite.

Las cubiertas curvas aisladas fueron también estudiadas mediante simulación computacional ([Balbastro, 2009](#); [Balbastro y Sonzogni, 2012](#)), aunque en todos casos mencionados se trató de la cubierta en configuración limpia, es decir, sin obstrucciones ajenas a la propia geometría de la estructura.

Los trabajos mencionados habían encontrado que para algunos casos las cargas más desfavorables ocurren cuando el viento incide en forma normal a la generatriz de la cubierta, mientras que en otros sucedía cuando lo hace en forma oblicua.

Resulta bastante evidente que la presencia de un objeto que se ubique bajo la cubierta constituye un obstáculo al flujo que puede alterar las cargas que se produzcan sobre la estructura por acción del viento, lo que fue corroborado para viento incidiendo en forma normal ([Balbastro y Sonzogni, 2011](#); [2012b](#)). En este trabajo se estudia el mismo problema pero cuando el viento incide en forma oblicua. Ejemplos típicos del problema en estudio se muestran en las Figuras 1 y 2. En esta última se puede ver un colapso de una cubierta aislada con viento incidiendo en forma oblicua y con un acoplado ubicado bajo la misma.



Figura 1: Ejemplo de cubierta aislada con obstrucciones.



Figura 2: Cubierta aislada colapsada, tormenta 05-4-2012.

## 2 DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN

Se realizó la simulación computacional del problema antes descrito, para lo cual se empleó el código de elementos finitos Tdyn (<http://www.compassis.com>), el cual resuelve las ecuaciones de Navier – Stokes que gobiernan el problema en régimen incompresible.

Debido a que los problemas de acción del viento sobre estructuras están siempre caracterizados un número de Reynolds muy elevado es necesario tratar el fenómeno de la turbulencia para conseguir resultados adecuados. Existen varias formas de hacerlo, pero para el estado del arte actual la simulación de grandes vórtices (LES, por *large eddy simulation*) (Sagaut, 2004) resulta un compromiso conveniente entre demanda de poder de cómputo y objetivo del estudio.

Para este trabajo se generó un dominio de sección rectangular, realizando primero una serie de corridas con el volumen vacío, a fin de ajustar las condiciones de contorno para reproducir las características del viento natural en la capa límite atmosférica, para una situación de vientos extremos en atmósfera en estabilidad neutra, como los que corresponden los sistemas meteorológicos denominados EPS (*extended pressure systems*). Este tipo de flujos están bien estudiados y existen modelos aceptados para representar el perfil de velocidades medias, las características de la turbulencia, etc. (Davenport, 1961; Harris, 1970) los cuales se adoptan para los ensayos en túneles de viento (Cook, 1978; Counihan, 1969) y que en líneas generales se tratan de reproducir en las simulaciones computacionales (Balbastro y Sonzogni, 2007).

Luego de ajustadas las condiciones de la simulación se llevaron a cabo dos simulaciones del viento soplando sobre una cubierta curva aislada, con y sin la presencia de un obstáculo colocado bajo la misma.

La geometría del modelo se eligió de manera tal que represente una situación de un camión con acoplado, de las dimensiones previstas en la reglamentación de tránsito, estacionado bajo una cubierta con relaciones dimensionales comprendidas dentro del rango usual encontrado por Balbastro y Sonzogni (2008b). El modelo simulado entonces representa, en una escala geométrica 1:50, una cubierta de 24 m de generatriz, 12 m de cuerda, 1,5 m de flecha, ubicada a 5,5 m del suelo. La obstrucción está dada por un paralelepípedo de 20 m de largo, 2,6 m de ancho y 4,1 m de altura, que representa en forma simplificada el volumen ocupado por un camión, el cual está ubicado a 2 m del borde a sotavento. En la Figura 3 se ve el dominio con la cubierta y el obstáculo, la sección de entrada es la que está a la izquierda, en primer plano).

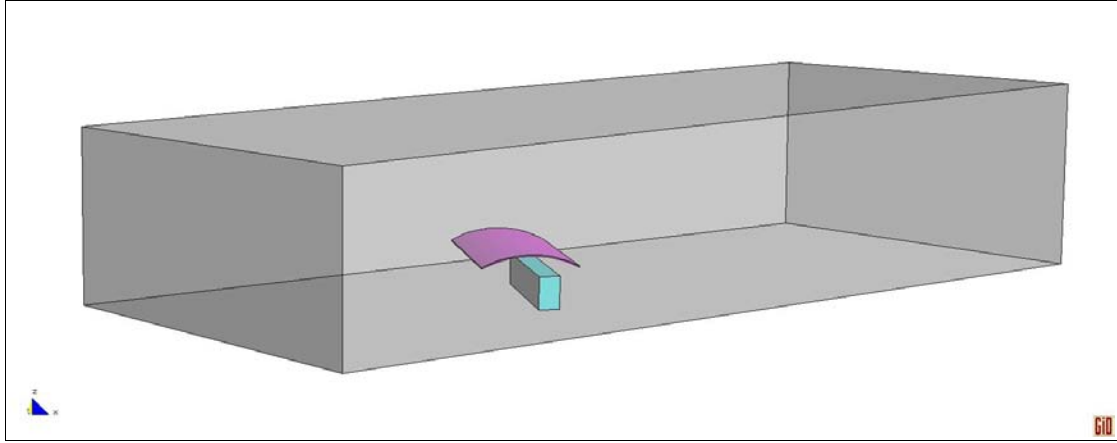


Figura 3: Ejemplo de cubierta aislada con obstrucciones.

El número de Reynolds que caracteriza el flujo en la simulación es definido según la ecuación (1), donde  $V_{ref}$  es una velocidad de referencia, en este caso se tomó igual a 20 m/s a una altura de 10 m en el prototipo, lo cual equivale a 0,2 m en el modelo a escala,  $d$  es el diámetro de la cubierta y  $\nu$  la viscosidad cinemática del aire.

$$Re = \frac{V_{ref} d}{\nu} . \quad (1)$$

Con estos valores el  $Re$  alcanzado es de  $5,7 \times 10^5$ , con lo cual el flujo se encuentra en la zona ultracrítica (Blessmann, 1990) y puede considerarse cumplida la semejanza dinámica entre el modelo a escala y el prototipo.

La discretización espacial se llevó a cabo con mallas de tetraedros, que en adyacencias a la superficie de los modelos tienen un paso  $h$  de 2,5 mm, aproximadamente. Con esta discretización el paso de la malla es semejante al orden de magnitud de la microescala de Taylor, definida esta como  $\lambda = (15/A)^{1/2} Re^{-1/2} d$ , con  $A$  una constante del orden de la unidad.

La integración temporal se hizo mediante un esquema implícito tipo *backward – Euler*, el paso de tiempo adoptado fue de  $10^{-3}$ s. El tiempo total de cada simulación, una vez inicializado el flujo en el dominio, representa 120 s en el prototipo.

En la entrada del dominio se aplicó un perfil de velocidades que sigue una ley potencial, la cual resulta apropiada para representar el viento en exposición abierta (CIRSOC, 2005).

Los detalles del modelo y la simulación son semejantes a los descritos en trabajos anteriores (Balbastro y Sonzogni, 2011; 2012b), los cuales también fueron considerados para elegir la posición y tamaño relativo del obstáculo.

### 3 RESULTADOS

Las simulaciones descritas en los párrafos anteriores dan como resultado las velocidades y presiones en cada nodo del dominio en cada paso de tiempo, calculándose a partir de estas últimas las fuerzas resultantes sobre los modelos de la cubierta y el obstáculo. Las resultantes obtenidas se promedian en el tiempo y son las habituales en los estudios aerodinámicos, a saber, la fuerza de arrastre,  $F_D$ , y la fuerza de sustentación,  $F_L$ . Se calcularon también las fuerzas  $F_x$  y  $F_y$ . Las fuerzas calculadas fueron a su vez adimensionalizadas en la forma de coeficientes de arrastre y sustentación, designados  $c_D$  y  $c_L$ , respectivamente, y definidos según (2) y (3)

$$c_D = \frac{F_D}{A_D q_{ref}} , \quad (2)$$

$$c_L = \frac{F_L}{A_L q_{ref}} \quad (3)$$

donde  $A_D$  y  $A_L$  son, respectivamente, las áreas vertical y horizontal, tomadas como referencia para cada fuerza (Figura 4), mientras que, siendo  $\rho$  la densidad del aire,  $q_{ref}$  es la presión dinámica de referencia, calculada como (4)

$$q_{ref} = \frac{1}{2} \rho V_{ref}^2 \quad (4)$$

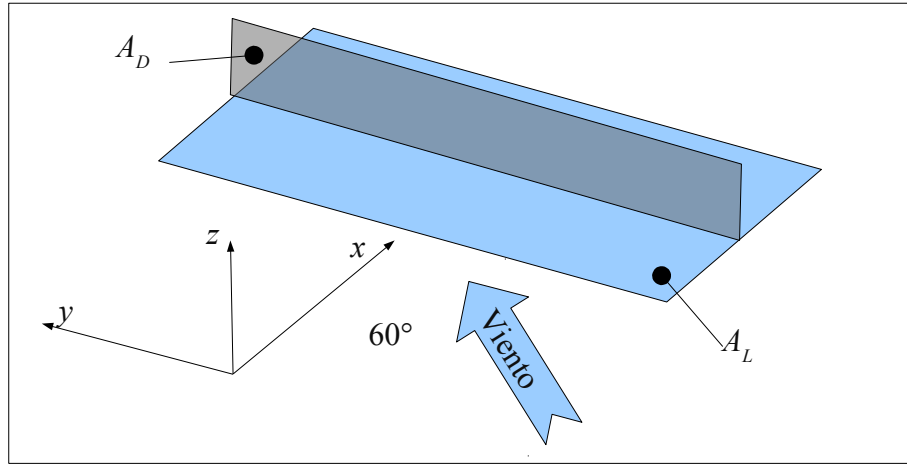


Figura 4: Convenciones y denominaciones.

Los coeficientes  $c_x$  y  $c_y$  se calculan mediante (2) para las fuerzas respectivas.

Los resultados así expresados se muestran en la Tabla 1.

Modelo viento a 60°	$c_x$	$c_y$	$c_D$	$c_L$
solo	0,633	0,009	0,633	0,128
con obstáculo	0,547	0,011	0,547	0,486

Tabla 1: Coeficientes aerodinámicos para la cubierta sola y con obstáculo, viento a 60°.

Además se encuentra que la relación entre la fuerza de sustentación y la de arrastre que experimenta la cubierta,  $F_L/F_D$ , es de 1,63 para la configuración limpia y 7,11 cuando está presente el objeto bajo la misma. En las figuras 5 a 8 se muestran los campos de velocidades en el plano vertical paralelo a la corriente y en un plano horizontal a nivel del arranque de la bóveda, para los dos casos, es decir, la cubierta sola y la cubierta con el obstáculo.

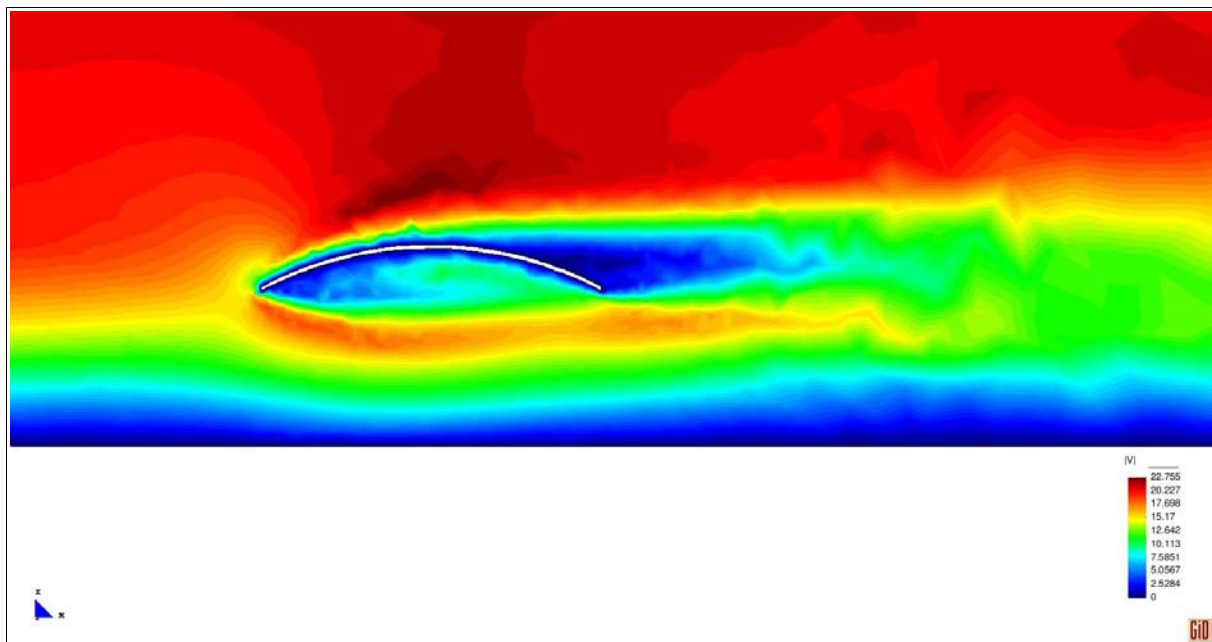


Figura 5: Isovalores de velocidad en el plano paralelo a la corriente, cubierta sola,  $t = 2,5$ s.

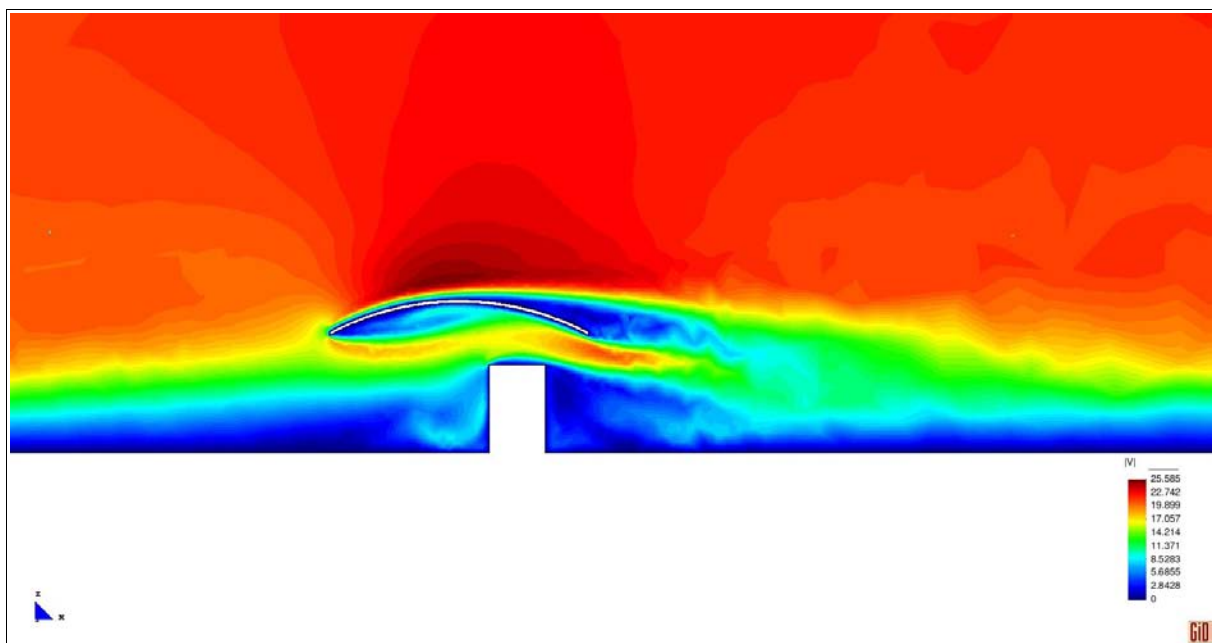


Figura 6: Isovalores de velocidad en el plano de simetría longitudinal, cubierta más obstáculo,  $t = 2,5$ s.



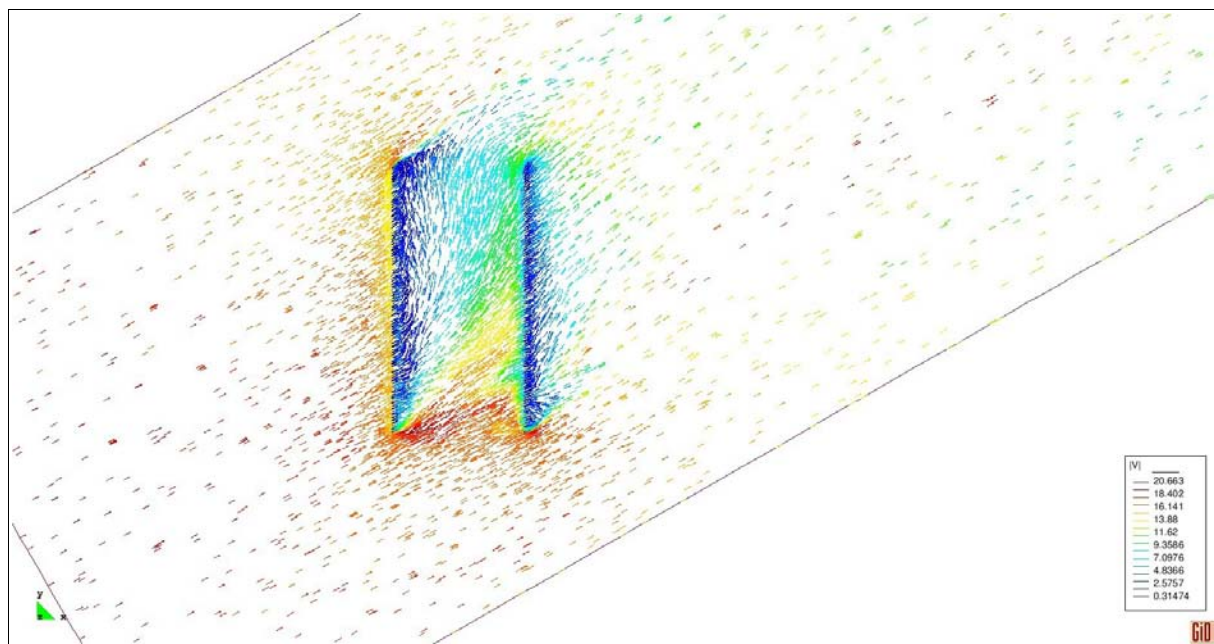


Figura 7: Velocidades en el plano horizontal en el nivel de arranque de la bóveda, cubierta sola.

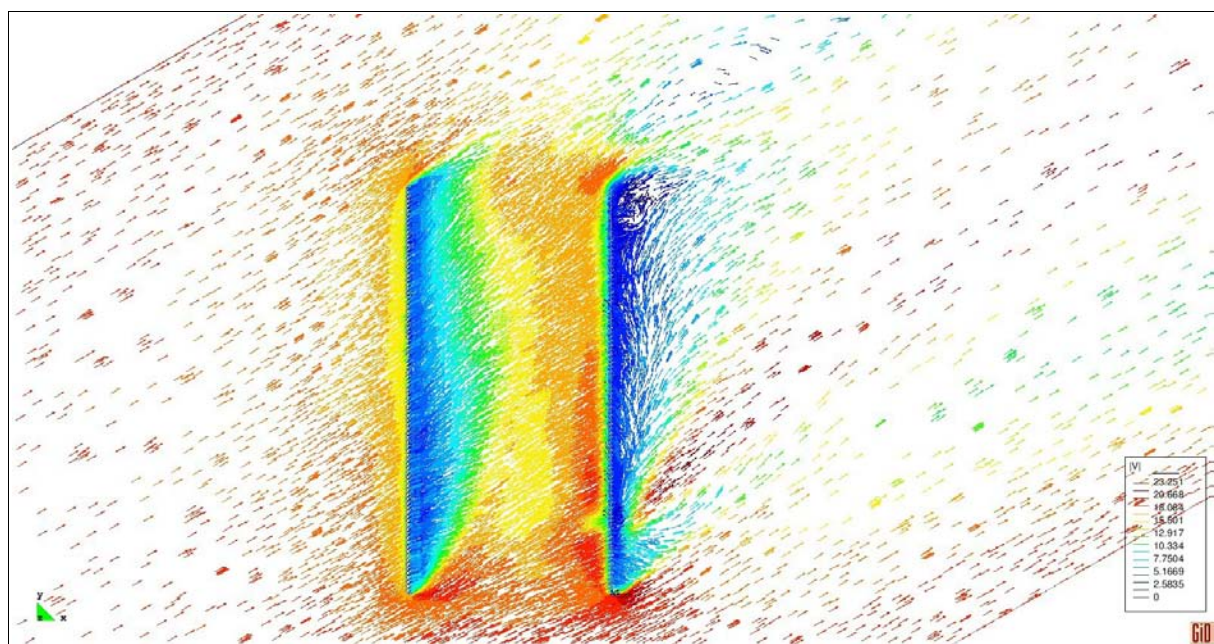


Figura 8: Velocidades en el plano horizontal en el nivel de arranque de la bóveda, cubierta con obstáculo.

En el caso de la cubierta sola se produce el desprendimiento de la capa límite en la parte superior a sotavento de la cumbre, formándose un vórtice a sotavento. A su vez también se aprecia una recirculación bien organizada bajo la cubierta que ocupa casi toda el área. Esta recirculación canaliza una corriente que se desarrolla aproximadamente paralela a la generatriz.

En cambio, cuando se encuentran la cubierta y el obstáculo sometidos al viento en conjunto, el punto de separación de la capa límite se desplaza algo a barlovento y se forma un vórtice más aplanado que en el caso anterior, mientras que la recirculación en el intradós se reduce y desplaza a barlovento, debido a una fuerte canalización de la corriente en el espacio

que queda entre el obstáculo y la cubierta. En el plano horizontal se aprecia que la corriente paralela a la generatriz adquiere mayores velocidades. Al pie del obstáculo se organiza también un vórtice bien definido a barlovento, con recirculaciones también a sotavento.

#### 4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran que la influencia que la presencia de un objeto bajo la cubierta tiene en las cargas aerodinámicas es notoria también para el viento incidiendo en forma oblicua, como lo había sido para el viento normal a la generatriz (Balbastro y Sonzogni, 2012b). Tomando como valores nominales de los coeficientes aerodinámicos para la cubierta los que se obtienen del flujo en configuración limpia, puede verse que el que resulta más afectado es el  $c_L$ , ya que la presencia del objeto bajo esta hace que la sustentación sea 3,8 veces la nominal.

Por su parte el  $c_D$  experimenta una reducción del 13,7%. De todas maneras, teniendo en cuenta el peso relativo de la sustentación frente al arrastre dado por  $F_L/F_D$  debe decirse que la presencia del objeto bajo la cubierta provoca un notorio incremento de las cargas debidas al viento.

#### 5 CONCLUSIONES

Se estudió la influencia que tiene en las cargas debidas al viento sobre una cubierta curva aislada la presencia de un obstáculo bajo la misma, como es por ejemplo un vehículo de gran porte, cuando el viento incide en forma oblicua a la generatriz.

Esta situación es un problema que reviste importancia habida cuenta de que dichas estructuras son bastante comunes, no se encuentran adecuadamente contempladas en la reglamentación. Estudios previos habían mostrado tal influencia para viento incidiendo en forma normal.

Se encontró que la fuerza de arrastre que experimenta la cubierta cuando tiene el objeto ubicado bajo la misma, resulta algo inferior a la que se produce cuando está libre. No obstante, la fuerza de sustentación es mucho mayor que la que se genera cuando no está el obstáculo, lo cual supera incluso los factores de seguridad habituales de las normas de diseño de estructuras.

Teniendo en cuenta esto, los valores que se usen para el diseño de este tipo de estructuras deberían contemplar la posibilidad de las obstrucciones bajo las mismas, a los efectos de brindar una adecuada seguridad frente a la acción del viento.

Además resulta conveniente señalar que los resultados reportados son valores medios, que como se dijo provienen de promedios temporales de las fuerzas aerodinámicas, por lo cual resulta conveniente también profundizar los estudios para hallar valores de pico.

#### 6 AGRADECIMIENTOS

Para la realización de este trabajo se recibió apoyo de los proyectos que se mencionan a continuación: PICT 2006/1506 y PICT 2010-2492 de la ANPCYT, PIP 112-200801-2956 del CONICET, CAI+D 2009-III-4-2 de la Universidad Nacional del Litoral y PID UTI1257 de Universidad Tecnológica Nacional.

#### REFERENCIAS

- Balbastro, G., *Coeficientes de presión en cubiertas abovedadas aisladas sometidas a la acción del viento*. Tesis de doctorado. Universidad Tecnológica Nacional, Santa Fe, 2009.
- Balbastro, G., y V. Sonzogni, V., Colapso de estructuras de galpones durante tormentas severas. *Rev. Int. Desastres Naturales e Infraestructura Civil*, Vol. 8, N° 1:37-56, 2008a.
- Balbastro, G., y V. Sonzogni V., Relaciones dimensionales características de galpones de



- cubierta curva. *Proc. XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*. (CD-ROM). ASAAE, Santiago de Chile, 2008b.
- Balbastro, G., y V. Sonzogni V., Simulación de un ensayo en túnel de viento aplicando CFD. *Mecánica Computacional XXVI*, pp. 3779-3787, Proc. ENIEF 2007.
- Balbastro, G., y V. Sonzogni, V., Uso de CFD para estudio de presiones del viento en cubiertas curvas aisladas. *Rev. Int. Met. Num. Cál. Dis. Ing.* Vol. 28, N°1, 2012.
- Balbastro, G., y V. Sonzogni V., Cargas de viento en cubiertas curvas aisladas con obstrucciones. *Proc. XXXV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*. (CD-ROM). ASAAE, Río de Janeiro, 2012b.
- Blessmann, J., *Aerodinâmica das construções*. SAGRA. 2a ed. Porto Alegre, 1990.
- CIRSOC, *Reglamento Argentino de acción del viento sobre las construcciones CIRSOC 102*. INTI. Buenos Aires, 2005.
- Cook, N., Wind tunnel simulation of the adiabatic atmospheric boundary layer by roughness, barrier and mixing-device methods, *J. Wind Eng. Ind. Aer.* 3:157-176, 1978.
- Counihan, J., An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel, *Atmos. Environ.* 3:197-214, 1969.
- Davenport, A., The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, London, v.87, n.372:194-211, 1961.
- Harris, I., The nature of the wind. In: *Modern design of wind sensitive structures*, London, Construction Industry Research and Information Association, paper 3:29-55, 1970.
- Natalini, M., *Acción del viento sobre cubiertas curvas aisladas*. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, 2005.
- Natalini, M., Canavesio, O., Natalini, B., Paluch, M., Wind tunnel modelling of mean pressures on curved canopy roofs. *Proc. American Conference on Wind Engineering*, CD-ROM, Clemson, 2001.
- Sagaut, P., *Large Eddy Simulation for Incompressible Flows*. 2nd ed. Springer, Berlín, 2004.