

Cargas medias de viento sobre tinglados parabólicos para diversas direcciones de viento incidente

M. B. Natalini ¹, C. Morel ², B. Natalini ³

Trabalho recebido em 07/12/2004 e aprovado para publicação em 23/06/2005.

Resumen

En el Laboratorio de Aerodinámica de la Universidad Nacional del Nordeste, Argentina, se esta llevando a cabo un programa de investigación referente a las cargas de viento sobre estructuras con cubiertas abovedadas sin paredes. La mayoría de los códigos de cargas de viento no contemplan a las estructuras con cubiertas abovedadas sin paredes, que son muy comunes en Argentina, sur de Brasil y Paraguay.

En una primera etapa se hicieron ensayos en túnel de viento para establecer cual es la dirección de viento incidente más desfavorable para este tipo de estructuras. Para ello se ensayaron tres modelos similares a escala 1:75 que tenían distintas alturas de alero. Se determinaron coeficientes medios de presión, sustentación y arrastre a partir de mediciones de presión bajo cinco direcciones de viento diferentes. Se encontró que las cargas más severas aparecen cuando el viento sopla a 60°, 75° y 90° con respecto a la línea de la cumbrera.

Palabras clave: ensayos en túnel de viento, cubiertas bajas, tinglados parabólicos, cargas de viento

¹ Prof. Dr. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste. Av. Las Heras 727 (3500) Resistencia, Chaco, Argentina. Tel: 54-3722-420076. Fax: 54-3722-428106. E-mail: mnatalini@ing.unne.edu.ar

² Becaria de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste. Av. Las Heras 727 (3500) Resistencia, Chaco, Argentina. Tel: 54-3722-420076. Fax: 54-3722-428106. E-mail: cmorel@ing.unne.edu.ar

³ Prof. Dr. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste. Av. Las Heras 727 (3500) Resistencia, Chaco, Argentina. Tel: 54-3722-439039. Fax: 54-3722-428106. E-mail: bnatalini_2000@yahoo.com.ar

1. Introducción

Las estructuras con cubiertas abovedadas sin paredes (VCR por sus siglas en inglés) son de uso muy extendido en Argentina, Sur de Brasil y Paraguay. Ni en los reglamentos de viento, ni en la literatura especializada se pueden encontrar coeficientes de carga de viento conforme al actual estado del arte. El Laboratorio de Aerodinámica de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), Argentina, ha emprendido un estudio sobre este tema basado en ensayos en túnel de viento con el objetivo de suplir esta omisión en el reglamento Argentino.

El modelado en un túnel de viento de las cargas de viento sobre VCRs requiere regímenes de flujo semejantes tanto en el modelo como en la estructura a escala natural. El régimen de flujo sobre estructuras con superficies curvas depende del nivel del número de Reynolds, Re , que típicamente esta por arriba de 10^7 en estructuras reales (régimen transcrítico de acuerdo a la nomenclatura de Niemann y Hölscher 1990). Pese a que este es un nivel imposible alcanzar en túneles de viento convencionales, la semejanza puede ser lograda agregando arena sobre el techo de los modelos. El agregado de rugosidad sobre superficies curvas expuestas al viento es una técnica ampliamente usada, por ejemplo Ogawa et al. (1991), Barre y Barnaud (1995) y Ribeiro (1991) lo aplicaron en ensayos sobre cilindros, mientras Blessmann (1998) lo aplicó a modelos de edificios con techos abovedados. Además, de acuerdo a lo que se sabe de estudios sobre estructuras con cubiertas planas sin paredes (Gumley y Wood 1980; Natalini, Marighetti y Natalini 2002), deben usarse una simulación de viento y un tamaño del modelo adecuados. Las condiciones de modelado de los ensayos presentados en este artículo fueron discutidas por Natalini et al. (2001).

Usualmente, para edificios cerrados con cubiertas abovedadas, se ensayan las direcciones de viento de 90° y 45° o 60° respecto de la línea de la cumbre. Para estructuras con cubiertas planas sin paredes las cargas más severas, cuando el viento es oblicuo, ocurren a 60° . Como se pretende hacer un estudio paramétrico, lo que implica muchas horas de ensayos en túnel de viento, es importante conocer cuales son los casos más severos para reducir el número de ensayos. En este trabajo se presentan coeficientes de presión, arrastre y sustentación para cinco direcciones de viento diferentes entre 30° y 90° sobre tres modelos con diferentes alturas de alero. El estudio se restringió a cargas medias porque el reglamento Argentino se basa en un modelo de valoración cuasi-estático.

2. Materiales y métodos

Los ensayos se hicieron en el túnel de viento “Jacek P. Gorecki” de la Universidad Nacional del Nordeste. Éste es un túnel de circuito abierto con una cámara de ensayos de 22.4 m de longitud $\times$ 2.4 m de ancho $\times$ 1.8 m de alto y una velocidad de flujo de 25 m/s cuando la cámara de ensayos está vacía (Wittwer y Möller 2000).

Se estudiaron tres VCRs mediante modelos a escala 1:75. La geometría de los mo-

delos se muestra en la Fig. 1. La dimensión h fue igual 6, 4 y 2 cm en los modelos 1, 2 y 3 respectivamente. Es evidente que el modelo 3, con una dimensión h que corresponde a 1.5 m en escala natural, no representa ninguna situación real y sólo se lo ha ensayado para manifestar las tendencias que siguen las presiones. El modelo 1 fue ensayado bajo 5 direcciones de viento diferentes mientras que los modelos 2 y 3 fueron ensayados solamente bajo tres direcciones. El ángulo que describe la dirección de viento se tomó con respecto a la línea de la cumbrera.

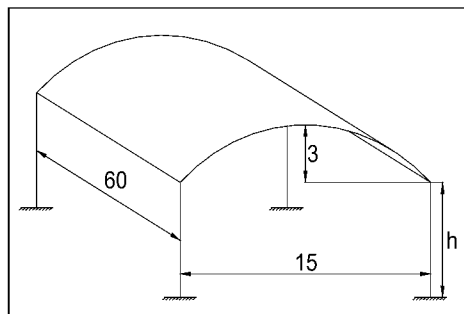


Figura 1: Geometría de los modelos. Las dimensiones están en cm.

El techo de los modelos se hizo con una chapa de aluminio de 2 mm de espesor y las columnas con barras de acero de 2.5 mm de diámetro. Se adhirió arena a la cara superior de los techos. La rugosidad relativa, k/d , siendo k la altura promedio de los granos de arena y d dos veces el radio de curvatura del techo, fue de 1.69×10^{-3} . Este valor estableció condiciones transcíticas en el modelo sin distorsiones excesivas causadas por la rugosidad misma (Natalini et al. 2001). El número de Reynolds durante los ensayos fue de 2.25×10^5 . La longitud de referencia adoptada para calcular este número fue d .

Para reproducir el flujo de capa límite atmosférica se usó rugosidad en el piso del túnel de viento y dos agujas ('spires' en inglés). Cada una de ellas consistía de una placa frontal trapezoidal reforzada con una placa transversal en su cara a sotavento. De esta manera se obtuvo una simulación de viento cuyo perfil de velocidades medias correspondía a un terreno suburbano. La intensidad local de la componente longitudinal de la turbulencia a la altura de los modelos fue de 0.26, y la escala integral a una altura de 0.23 m fue de 0.63 m. La escala de simulación, determinada de acuerdo al procedimiento propuesto por Cook (1977/1978) estuvo alrededor de 1:150. Mas detalles de la simulación fueron dados por De Bortoli et al. (2002).

Se dispusieron treinta tomas de presión sobre un cuarto del techo de cada modelo. Cada uno de los gráficos de isolinneas de coeficientes de presión media que aparecen en las Figuras 2 a 6 se hicieron a partir de valores en 106 puntos. Las mediciones de presión se hicieron con un transductor electrónico Micro Switch Honeywell 163 PC y una llave secuencial Scanivalve 48 D9-1/2. Las tomas de presión se conectaron al transductor, via llave secuencial, con mangueras de PVC de 1.5 mm de diámetro interno y

1.1 m de longitud. La señal de salida del transductor se leyó con un multímetro digital Keithley 2000. La presión dinámica de referencia, q_{ref} , se midió a la altura del alero con un tubo de Pitot-Prandtl conectado a un micromanómetro de Betz en forma simultánea a las mediciones de presión sobre el techo. La presión estática de referencia se obtuvo de la toma de presión estática del mismo tubo. El tubo de Pitot-Prandtl se colocó a 0.55 m del centro de la mesa de ensayo para evitar interferencias con el modelo.

3. Resultados

En las Figuras 2 a 6 se muestran isolíneas de coeficientes de presión media; definiéndose el coeficiente de presión como:

$$c_p = \frac{\Delta p}{q_{ref}} \quad (1)$$

en la cual Δp es la diferencia de presión estática entre la toma de presión y la presión estática de referencia. En estas figuras, la superficie del techo aparece desplegada sobre el plano de dibujo.

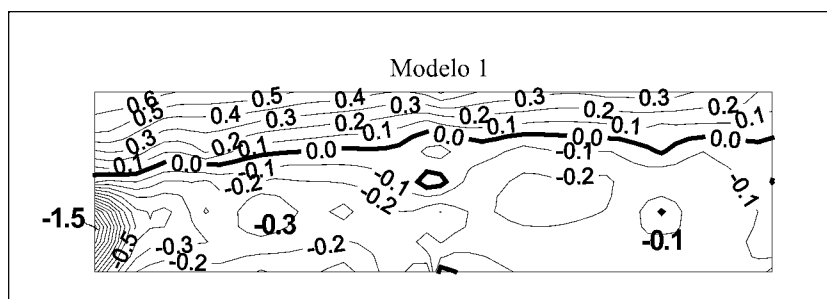


Figura 2: Distribución de coeficientes de presión total para dirección de viento = 30°.

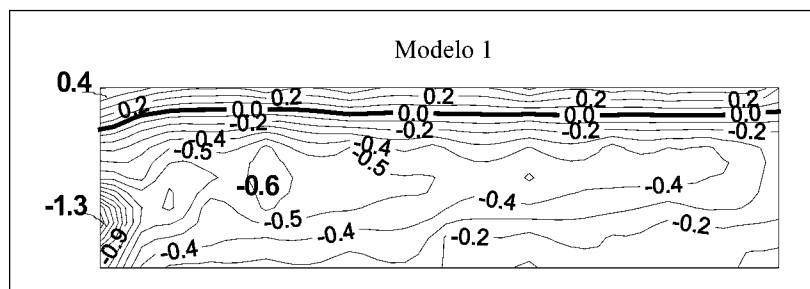


Figura 3: Distribución de coeficientes de presión total para dirección de viento = 45°.

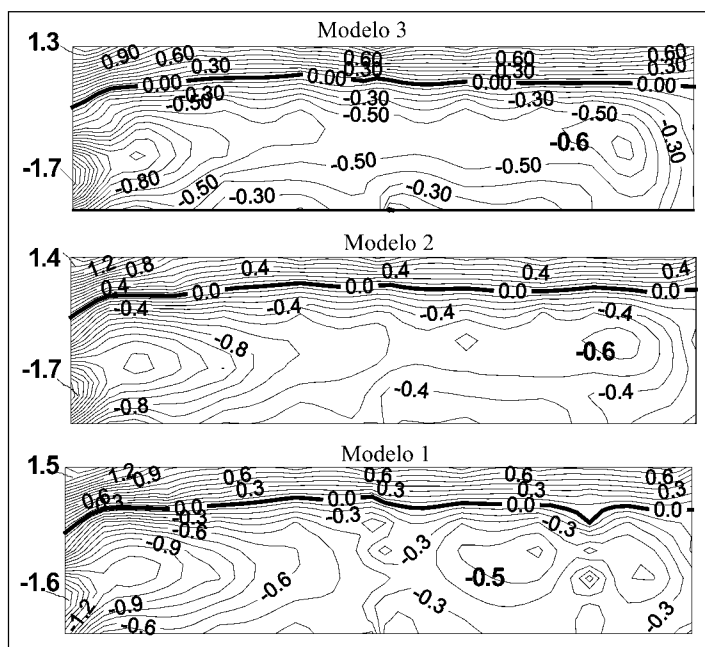


Figura 4: Distribución de coeficientes de presión total para dirección de viento = 60°.

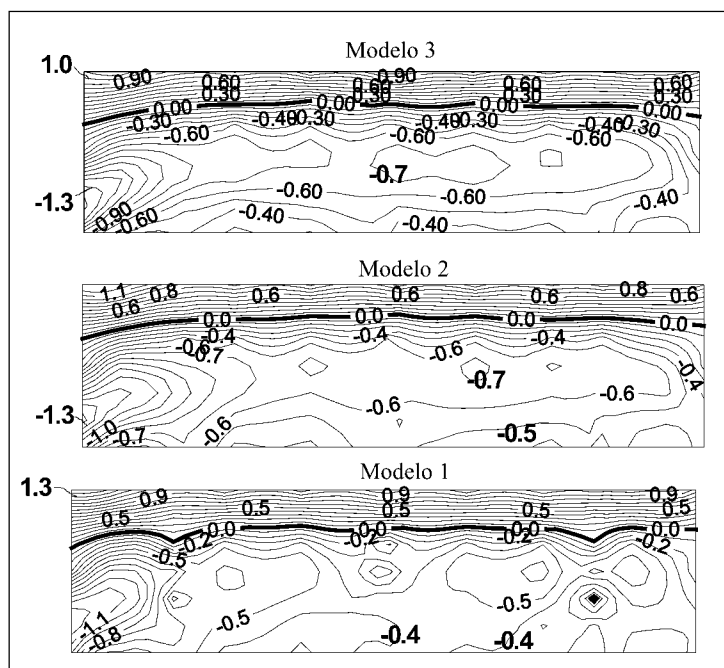


Figura 5: Distribución de coeficientes de presión total para dirección de viento = 75°.

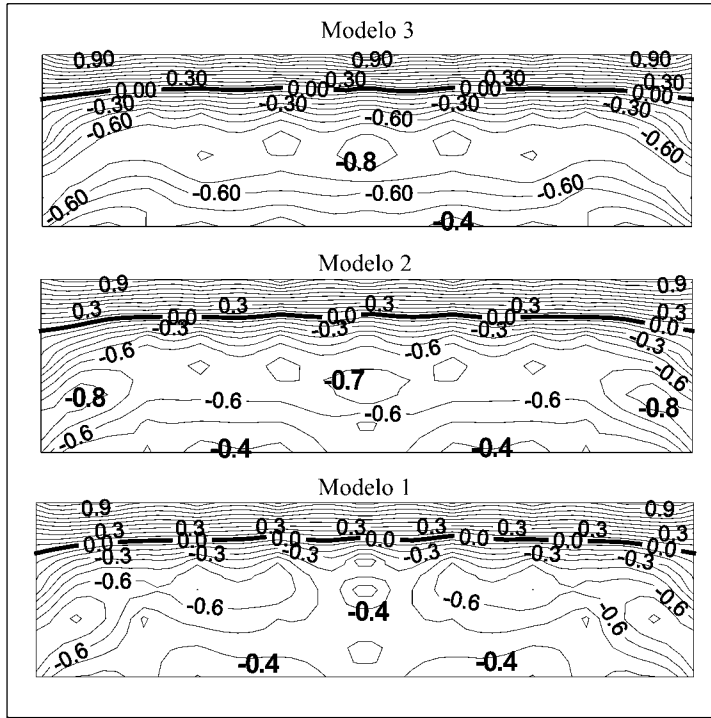


Figura 6: Distribución de coeficientes de presión total para dirección de viento = 90°.

La Tabla 1 presenta coeficientes de arrastre y sustentación. El coeficiente de arrastre se define como

$$C_d = \frac{1}{A_x} \sum_{i=1}^{106} \int_{A_i} c_p \cos \theta \, dA_i \quad (2)$$

y el coeficiente de sustentación como

$$C_l = \frac{1}{A_y} \sum_{i=1}^{106} \int_{A_i} c_p \sin \theta \, dA_i \quad (3)$$

en las cuales A_i es el área tributaria de la toma 'i'; θ es el ángulo entre el vector normal a la superficie del techo y el plano horizontal; A_x es la proyección de la superficie del techo sobre un plano vertical paralelo a la línea de la cumbrera y A_y es la proyección de la superficie del techo sobre un plano horizontal. Un valor negativo de C_l significa una fuerza hacia arriba y un valor positivo de C_d significa una fuerza hacia sotavento.

Tabla 1: Coeficientes de fuerza de sustentación y arrastre.

Angulo de viento	Modelo 3		Modelo 2		Modelo 1	
	C_d	C_l	C_d	C_l	C_d	C_l
30°	-	-	-	-	0.46	-0.1
45°	-	-	-	-	0.67	-0.23
60°	0.81	-0.32	0.89	-0.36	0.86	-0.26
75°	0.88	-0.32	0.91	-0.34	0.91	-0.20
90°	0.85	-0.34	0.92	-0.30	0.80	-0.26

Tabla 2: Coeficientes de presión media máximos y mínimos.

Angulo de viento	Modelo 3		Modelo 2		Modelo 1	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
30°	-	-	-	-	0.6	-1.5
45°	-	-	-	-	0.4	-1.3
60°	1.3	-1.7	1.4	-1.7	1.5	-1.6
75°	1.0	-1.3	1.1	-1.3	1.3	-1.1
90°	0.9	-0.8	0.9	-0.8	0.9	-0.7

Los gráficos de isolineas muestran que la configuración de la distribución de presiones es similar para las tres alturas de alero ensayadas. No obstante se puede ver que las succiones en el área a sotavento del Modelo1 son ligeramente menores que en los otros casos, lo que resulta en coeficientes de fuerza de sustentación más bajos que los correspondientes a los otros modelos (Tabla1). La Tabla 1 muestra que las cargas globales son ligeramente más altas sobre el Modelo 2.

En lo que hace a la dirección de viento, está claro que 30° y 45° no están entre los casos más severos. En cuanto a las otras direcciones (60°, 75° y 90°), no queda tan claro que una dirección sea peor que la otra. Los coeficientes de fuerza más severos están repartidos entre las tres direcciones, aunque muestran una tendencia a ser mas frecuentes a 90° y 75°. La discusión puede considerarse trivial considerando que el orden de magnitud es el mismo para las tres situaciones. En cuanto a los coeficientes de presión, los casos más severos ocurren cuando la dirección de viento es de 60°.

Para las direcciones de 60°, 75° y 90°, aproximadamente un tercio del techo en el área a barlovento está bajo presiones positivas mientras que el resto del techo esta sujeto a sustentación. Esto produce un momento respecto al eje de la cumbrera que resulta en cargas que actúan sobre las columnas que no están reflejadas en los coeficientes de fuerzas. Por otra parte, cuando el viento es oblicuo aparecen efectos torsionales debido a la asimetría de la las cargas. Para dar una visión completa del estado de carga se estima conveniente calcular los coeficientes de momento.

4. Conclusiones

Se presentaron coeficientes de presión y fuerza sobre VCRs obtenidos en ensayos en túnel de viento. Ellos muestran que las direcciones de viento de 90° y 60° con relación a la línea de la cumbrera causan algunos de las situaciones de carga de viento más severas, como ocurre en el caso de las estructuras con cubiertas planas sin paredes. La dirección de viento de 75° también es crítica y es aconsejable tomarla en cuenta en estudios sobre este tipo de estructuras. La dirección de viento de 45° no está entre los casos críticos.

La altura del alero mostró tener poca influencia sobre los coeficientes de carga, aunque el arrastre global fue menor sobre el modelo más alto.

Referencias

- Barré, C. and Barnaud, G. (1995). High Reynolds number simulation techniques and their application to shaped structures model test. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, v.57, p. 145-157.
- Blessmann, J. (1998) Wind loads on isolated and adjacent industrial pavilions curved roof. *Wind Effects on Buildings and Structures*, Eds.: J.D. Riera & A.G.Davenport, Balkema, Rotterdam, p. 137-171.
- Cook, N.J. (1977/1978). Determination of the model scale factor in wind-tunnel simulations of the adiabatic atmospheric boundary layer, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, v. 2, p. 311-321.
- De Bortoli, M.E., Natalini, B., Paluch, M.J. and Natalini, M.B. (2002) Part-depth wind tunnel simulations of the atmospheric boundary layer. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, v.90, p. 281-291.
- Gumley, S.J. and Wood, C.J. (1980). *Mean and extreme pressure study on model Dutch barns*. Uni. of Oxford Dept. of Eng. Sc., OUEL report No.1333/80.
- Niemann, H.J. and Hölscher, N. (1990). A review of recent experiments on the flow past circular cylinders. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, v.33, p. 197-209.
- Ogawa, T., Nakayama, M., Murayama, S. and Sasaki, Y. (1991). Characteristics of wind pressures on basic structures with curved surfaces and their response in turbulent flow. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, v. 38, p. 427-438.
- Natalini, M.B., Canavesio, O., Natalini, B. and Paluch, M.J. (2001). Wind Tunnel Modelling of Mean Pressures on Curved Canopy Roofs. *Proceeding of the Americas Conference on Wind Engineering*, Clemson, USA, June.
- Natalini, B., Marighetti, J.O. and Natalini, M.B. (2002). Wind Tunnel Modelling of Mean Pressures on Planar Canopy Roof. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, v. 90, p. 427-439.
- Ribeiro, J.L.D. (1991). Effects of surface roughness on the two-dimensional flow past circular cylinders. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, v. 37, p. 299-309.
- Wittwer, A.R. and Möller, S.V. (2000). Characteristics of the low-speed wind tunnel of the UNNE. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, v. 84, p. 307-320.

Mean wind loads on vaulted canopy roofs under different wind directions

Abstract

A research program on wind loads on vaulted canopy roofs is in progress in the Aerodynamic Laboratory of the Universidad Nacional del Nordeste, Argentina. Vaulted canopy roofs, which are commonly used in Argentina, South of Brazil and Paraguay, are not included in most wind loading codes of practice.

In a first stage, wind tunnel tests were done in order to establish the most adverse wind direction in this kind of structures. Three similar 1:75 scale models with different eaves heights were tested. Mean pressure, drag and lift force coefficients were determined from pressure measurements under five different wind directions. It was found that the most severe loads appear when the wind blows at 60°, 75° and 90° degrees relative to the ridge line.

Keywords: wind tunnel test, low-rise buidging, vaulted canopy roof, wind loads.

1. Introduction

Vaulted canopy roof (VCR) is a widespread kind of structure in Argentina, South of Brazil and Paraguay. State-of-the-art wind loading coefficients for them can be found neither in codes of practice nor in specialized literature. The Aerodynamic Laboratory of the Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), Argentina, has undertaken a wind-tunnel-based study on this subject in order to fill the gap in the Argentinean code of practice.

Modelling wind loads on VCRs in a wind tunnel requires similar flow regimes in both the model and the full-scale structures. On structures with curves surfaces, the flow regime depends on the Re level, typically above 10^7 in real structures (transcritical regime according Niemann and Hölscher 1990). Despite this is a level that is impossible to reach in conventional wind tunnels, similarity can be reached by adding sand on the roof of the models. Adding roughness to curve surfaces exposed to the wind is a technique widely used, for instance, Ogawa et al. (1991), Barre and Barnaud (1995) and Ribeiro (1991) applied it to tests on cylinders, while Blessmann (1998) did it to buildings models with vaulted roofs. In addition, both suitable wind simulation and size of the model have to be used according to what is known from planar canopy roof studies (Gumley and Wood 1980; Natalini, Marighetti and Natalini 2002). The modelling con-

ditions for the tests presented in this paper were discussed by Natalini et al. (2001).

Usually, wind directions at 90° and 45° or 60° relative to the ridge line are tested on cladding buildings with vaulted roof. For planar canopy roofs the most severe loads under oblique wind direction occur at 60°. As a parametric study is intended, which implies many hours of wind tunnel experiments, it is important to know what are the most severe cases in order to reduce the number of tests. In this work, mean pressures, drag and lift force coefficients on three models with different eave heights are presented for five different wind directions from 30° to 90°. The study has been restricted to mean loads because the Argentinean code of practice is based in a quasi-static assessment model.

2. Experimental arrangements

The tests were made in the “Jacek P. Gorecki” wind tunnel in the Universidad Nacional del Nordeste. This is an open return wind tunnel with a working section of 22.4 m in length $\times$ 2.4 m in width $\times$ 1.8 m in height and a maximum flow velocity of 25 m/s when the working section is empty (Wittwer and Möller 2000).

Three VCRs were tested by means of 1:75 scale models. The geometry of the models is shown in Figure 1. The h dimension was equal to 6, 4 and 2 cm for Models 1, 2 and 3 respectively. It is clear that Model 3, with an h dimension that corresponds to a 1.5 m at full scale, does not represent any real situation. It has been tried in order to manifest the trends that pressures follow. Model 1 was tested under five different wind directions while Models 2 and 3 were tested only under three directions. The angle that describes the wind direction was taken relative to the ridge line.

The models roof was made with a 2 mm thick aluminium plate, and the columns with 2.5 mm diameter steel rods. Sand was added to the upper side of the roof. Relative roughness values, k/d , k being the grain sand average height and d twice the radius of the curvature of the roof, was 1.69×10^{-3} . This value established transcritical conditions in the model without excessive distortions caused by the roughness itself (Natalini et al. 2001). The Reynolds number during the tests was around 2.25×10^5 . d was the reference length adopted to calculate this number.

In order to reproduce the atmospheric boundary layer flow roughness on the wind tunnel floor and two spires, each one consisting on a trapezoidal frontal plate reinforced with a transversal plate in its leeward face, were used. In this way, a wind simulation with a mean velocity profile corresponding to a suburban area was obtained. The local turbulence intensity of the longitudinal turbulence component at the models roof height was 0.26, and the integral scale at a height equal to 0.23 m was 0.63 m. The simulation scale was around 1:150 according to the procedure proposed by Cook (1977/1978). Further details of this simulation were given by De Bortoli et al. (2002).

Thirty pressure taps were spread in a quarter of the roof of every model. Each of the contour plots appearing in Fig. 2 to 6 were built from values on 106 points. Pressure measurements were made using an electronic transducer Micro Switch Honeywell

163 PC and a sequential valve Scanivalve 48 D9-1/2. Pressure taps were connected to the transducer, via sequential valve, with PVC tubes of 1.5 mm internal diameter and 1.1 m long. The transducer output was read with a Keithley 2000 digital multimeter. Simultaneously to the pressure measurements being taken on the roof, the reference dynamic pressure, q_{ref} , was measured at the eaves height with a Pitot-Prandtl tube connected to a Betz micromanometer. The probe stayed beside the model at a distance of 0.55 m from the centre of the turntable to avoid mutual interference with the model. The reference static pressure was obtained from the static pressure tap of the same Pitot-Prandtl tube.

3. Results

Mean pressure coefficient contour plots are shown in Fig. 2 to Fig. 6, the pressure coefficient being defined by eqn. (1), in which Δp is the static pressure difference between the pressure tap and the static reference pressure. In these figures the roof surface appears unbent over the drawing plane.

Table 1 presents drag and lift force coefficients. The drag force coefficient is defined by eqn. (2) and the lift force coefficient by eqn. (3), in which A_i is the tributary area of the i^{th} tap; θ is the angle between the upward vector normal to the surface of the roof and the horizontal plane; A_x is the projection of the roof surface on a vertical plane parallel to the ridge line and A_y is the projection of the roof surface on a horizontal plane. A negative value of C_l means upward lift and a positive value of C_d means leeward drag.

The contour plots show that the pattern of the pressure distribution is similar for the three eaves height tested. Still it can be noticed that for Model 1 the suction in the leeward area are slightly smaller than for the other cases. This results in lower lift force coefficients than those corresponding to the other models (Table 1). Table 1 shows that global loads are slightly higher on Model 2.

Regarding the wind direction, it is clear that 30° and 45° are not among the most severe cases. As for the other situations (60° , 75° and 90°), it is not so clear whether it can be said that one direction is worse than the other ones. The most severe force coefficients are spread across the three directions, although they show a trend to be more frequent at 90° and 75° . At any rate, the discussion can be considered trivial considering that the order of magnitude is the same in all three cases. As for the pressure coefficients, the most severe cases (see Table 2) occur when the wind direction is 60° .

For the directions of 60° , 75° and 90° , approximately one third of the roof in the windward area is under positive pressures while the remaining part is subject to lift. This produces a moment respect to the ridge axis that results in loads acting on the columns that are not reflected by the force coefficients. On the other hand, torsional effects appear due to the asymmetry of loads when the wind direction is oblique. It seems convenient to calculate the moment coefficients in order to give a full picture of the loading state.

4. Conclusions

Mean pressure and force coefficients on VCRs obtained in wind tunnel tests have been presented. They show that wind directions of 90° and 60° relative to the ridge line causes some of the most severe situations of wind loading, as it is the case on planar canopy roofs. The case when the wind direction is 75° is also critical and it seems advisable to consider it in any study of this kind of structures. The 45° wind direction is not among the critical cases.

Eaves height showed to have little influence on the loading coefficients, although global drag was smaller on the higher model.