

# COMPORTAMIENTO AERODINAMICO DE ESTRUCTURAS AISLADAS CON TECHO CURVO

**Bruno Natalini<sup>a</sup>, Claudia Morel<sup>a</sup>, Mario B. Natalini<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Av. Las Heras 727, 3500 Resistencia, Argentina, <http://ing.unne.edu.ar/tunel/pagina%20tunel.htm>*

**Palabras clave:** Cargas, Viento, Estructuras, Aisladas, Bóvedas.

**Resumen.** En los últimos diez años se han reportado una variedad de resultados de coeficientes de carga aerodinámicos de estructuras aisladas con techo curvo provenientes de ensayos en túnel de viento y de modelos computacionales. Aún con estas contribuciones es poco lo que se sabe de la aerodinámica de estas estructuras. Todos los resultados existentes corresponden a coeficientes promediados en el tiempo, lo que hace necesario aplicar la teoría cuasi-estacionaria para poder hacer una valoración de carga. El único marco conceptual completo que describe la aerodinámica de estructuras aisladas con techo curvo fue formulado por Cook. En este trabajo se presentan algunos datos no publicados de ensayos en túnel de viento y se discute el marco conceptual de Cook a la luz de los nuevos resultados disponibles.

## 1 INTRODUCCION

Las estructuras aisladas, sin paredes, con techo abovedado (VCR, siglas en inglés de Vaulted Canopy Roof) son muy usadas en Sudamérica, especialmente en zonas de Argentina, Brasil y Paraguay donde el clima es cálido. Las cargas de viento sobre estas estructuras no están codificadas en ningún reglamento actualmente en uso. En el pasado, había dos reglamentos que incluían recomendaciones para ellas: el código Francés NV 65 (1970) y el Argentino CIRSOC 102 (1983). El primero fue virtualmente reemplazado por el Eurocode EN 1991-1-4, y el segundo por una versión actualizada en 2005. Ambos reglamentos sugerían usar los mismos coeficientes de presión de las estructuras aisladas planas (PCR, siglas en inglés de Planar Canopy Roof) que tuviesen la misma relación flecha/luz; una sugerencia que además de no tener ninguna base en la literatura, fue señalada como incorrecta por Marighetti *et al.* (2002).

Poco se conoce sobre la aerodinámica de VCRs, principalmente por falta de datos. Cook (1990) formuló el único marco conceptual existente hasta ahora para caracterizar las cargas de viento sobre VCRs, explotando tanto como fue posible la información disponible en aquel tiempo, la que desafortunadamente era muy escasa. Cook (1990) sintetizó la situación al escribir “Hay sólo un pequeño conjunto de datos para VCRs y son todos datos muy tempranos obtenidos en flujo uniforme y suave... La validez de los coeficientes de carga está abierta a cuestionamientos, aunque las características generales de carga aun pueden ser útiles.”. Veinte años después de la publicación de este comentario, la situación ha cambiado

poco. En contraposición, los PCR son una morfología que se estudió en varias instituciones durante los últimos treinta años. Aun cuando el número de estudios es relativamente pequeño en términos absolutos, la aerodinámica de PCR está hoy en día bien establecida en relación al estado del arte de la aerodinámica de edificios. Tomados en conjunto, los ensayos a escala natural de Dryton y Silsoe, a comienzos de los '80 (Robertson *et al.*, 1985), y los estudios de Oxford (Gumley and Wood, 1980; Gumley, 1981, 1982, 1984; Belcher and Wood, 1983), Queensland (Ginger and Letchford, 1991), Clemson (Altman, 2001) y Concordia and Tohoku (Uematsu *et al.*, 2007), cubren un amplio rango de geometrías, efectos de bloqueo y técnicas de medición. Los resultados de estos estudios se incorporaron en muchos códigos, entre ellos el Eurocode EN 1991-1-4, el ASCE 7, el Australiano/Neo Zelandés, el Canadiense y el Argentino.

En lo concerniente a VCRs, hoy en día, aparte de los datos pioneros aportados por Irminger y Nokkentved en 1936, los únicos estudios en túnel de viento reportados provienen de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), Argentina. Estos ensayos se hicieron en el túnel de viento de capa límite "Jacek P. Gorecki", usando simulación de viento natural. Natalini *et al.* (2001) estudiaron la sensibilidad de los modelos de VCR a la variación del número de Reynolds, a la rugosidad del techo y a la turbulencia del flujo incidente. Para ello ensayaron tres modelos de VCRs y dos modelos de edificios cerrados usando diferentes simulaciones de viento, y mostraron que en el túnel de viento de la UNNE se pueden obtener condiciones adecuadas de modelado adhiriendo arena sobre el techo, para forzar el régimen transcrito, y usando una simulación de viento suburbana. Marighetti *et al.* (2002) compararon los coeficientes de presión medidos en la parte superior de modelos de un VCR y un PCR de similares relaciones de aspecto y mostraron que son diferentes. Natalini *et al.* (2002) ensayaron modelos de un VCR y un edificio cerrado de techo abovedado para mostrar las diferencias en las distribuciones de presiones. Natalini *et al.* (2005) presentaron resultados de ensayos sobre tres modelos de VCRs y mostraron que las cargas netas más severas se manifiestan bajo direcciones de viento de 90°, 75° y 60° relativos a la línea de la cumbrera. Balbastro y Sonzogni (2006, 2007) ensayaron cuatro modelos de VCRs usando una técnica novedosa para construirlos que eliminaba toda posible interferencia del flujo que pudiese ser causada por el sistema de conexiones neumáticas de las tomas de presión. En ese trabajo también se presentaron resultados de modelos numéricos de similares dimensiones que fueron comparados con los resultados experimentales. En cuanto a modelado computacional, hay dos trabajos previos de Balbastro, Sonzogni y Frank (2004, 2005) donde se reprodujeron algunos de los experimentos de la UNNE con éxito parcial usando un modelo LES (siglas en inglés de Large Eddy Simulation). En 2006 el modelo estaba calibrado y se produjeron una variedad de resultados que fueron reportados por Balbastro y Sonzogni (2006, 2007) y Balbastro (2009). Todos estos trabajos se refieren a techos sin bloqueo en la parte inferior. A estos se le debe sumar un artículo que reporta resultados de CFD abordando la simulación de bloqueo (Balbastro y Sonzogni, 2011).

Todos los datos aportados por estos estudios se limitan a coeficientes promediados en el tiempo, lo que fuerza al uso de la teoría cuasi-estacionaria. Esto está lejos de ser el mejor modelo de valoración de carga, pero hasta tanto no existan datos sobre fluctuaciones de presión, la teoría cuasi-estacionaria es la única opción posible. No obstante, no es el propósito de este trabajo aportar coeficientes de diseño, sino mejorar nuestro conocimiento de la aerodinámica de VCRs tomando el marco conceptual de Cook como punto de partida. En este trabajo se presentan algunos datos no publicados de los experimentos realizados en la UNNE y se discute la aerodinámica de VCRs a la luz de los resultados obtenidos en los últimos diez años.

## 2 ENSAYOS EN TUNEL DE VIENTO DE LA UNNE

### 2.1 Procedimiento experimental

Se ensayaron seis modelos en escala 1:75 de estructuras de un rango de dimensiones usuales en el norte de Argentina. La flecha,  $f$ , y la luz transversal,  $b$ , se mantuvieron idénticas en todos los modelos. Básicamente se construyeron dos tipos de modelos: los modelos profundos (A, B y C) y los modelos cortos (D, E y F), lo que permitió valorar la influencia de la profundidad. Variando la altura de alero,  $h$ , (2, 4 y 6 cm), se obtuvieron los seis casos.

Para obtener flujo en condiciones transcíticas se agregó arena sobre la cara superior de los techos de los modelos, de una rugosidad relativa,  $k/d$ , igual a  $3,30 \times 10^{-3}$ , siendo  $k$  el diámetro medio de los granos de arena y  $d$  dos veces el radio de curvatura del techo. Los ensayos se hicieron en el túnel de viento “Jacek P. Gorecki” de la Universidad Nacional del Nordeste. Este es un túnel de viento de capa límite de circuito abierto con una cámara de ensayos de 22,4 m de largo  $\times$  2,4 m de ancho  $\times$  1,8 m de alto.

Los modelos se ensayaron bajo una simulación de espesor parcial de la capa límite atmosférica correspondiente a una rugosidad de terreno de categoría suburbana. Se midieron presiones promediadas en el tiempo (presiones medias) en 15 puntos sobre los techos de modelos cortos y 30 puntos sobre los modelos largos, tanto en la cara inferior como en la superior. Se usó un transductor de presión Micro Switch Honeywell 163 PC y una llave secuencial Scanivalve 48 D9-1/2. El conexionado de las tomas de presión a la llave secuencial se hizo con tubos de PVC de 1,5 mm de diámetro y 400 mm de longitud. Se ensayaron tres direcciones de viento incidente:  $90^\circ$ ,  $75^\circ$  y  $60^\circ$  en relación a la línea de la cumbrera, dado que como fue demostrado por Natalini *et al.* (2005), estas son las direcciones que producen las cargas más severas. Una descripción más detallada de los modelos utilizados y las condiciones de ensayo se puede encontrar en Natalini (2005).

### 2.2 Resultados

Natalini (2005) reportó todos los resultados obtenidos en estos experimentos en forma de isocurvas de coeficientes de presión y tablas y gráficos de coeficientes de fuerza. A continuación se presentan algunos datos complementarios que no están en la fuente citada, junto a otros reploteados en un formato diferente a fin de extraer algunas conclusiones.

Se obtuvieron coeficientes de presión neta,  $c_p$ , substrayendo el valor de los coeficientes de presión sobre la cara inferior (intradós),  $c_{pD}$ , a los valores de los coeficientes de presión sobre la cara superior (extradós),  $c_{pU}$ . Los dos últimos coeficientes son la relación entre la presión en la toma de presión,  $p$ , la cual puede ser tanto una presión sobre el intradós como sobre el extradós, y  $q_{ref}$ , que es la presión dinámica de referencia medida a la altura del alero. Aquí, las presiones en las tomas son relativas a la presión estática de referencia,  $p_{ref}$ , que se obtiene de la toma de presión estática del mismo tubo de Pitot-Prandtl usado para medir  $q_{ref}$ . Siguiendo la convención usual, valores negativos tanto de  $c_{pU}$  como de  $c_{pD}$ , indican acciones dirigidas en direcciones que se alejan de las superficies (succiones). De acuerdo a esto, valores positivos de  $c_p$  indican acciones dirigidas hacia abajo.

Luego se obtuvieron coeficientes de fuerza por integración de los coeficientes de presión sobre el techo. La Fig. 1 muestra los coeficientes de arrastre y sustentación que afectan a todo el techo Independientemente de la dirección de viento, los valores de coeficiente de sustentación resultaron entre 0,2 y 0,4 y los de arrastre entre 0,8 y 1,05. La relación de aspecto

altura de alero/luz transversal,  $h/b$ , mostró tener poca influencia sobre el coeficiente global. Las máximas variaciones observadas con  $h/b$  fueron del orden de magnitud 0,1 y no se observó una tendencia clara en las variaciones. En cuanto a la relación  $b/a$  (luz transversal/profundidad), el orden de magnitud de las máximas variaciones entre modelos cortos y largos fue 0,1 para la sustentación y 0,2 para el arrastre. Se observó una tendencia a tener mayor arrastre sobre los modelos cortos que sobre los largos.

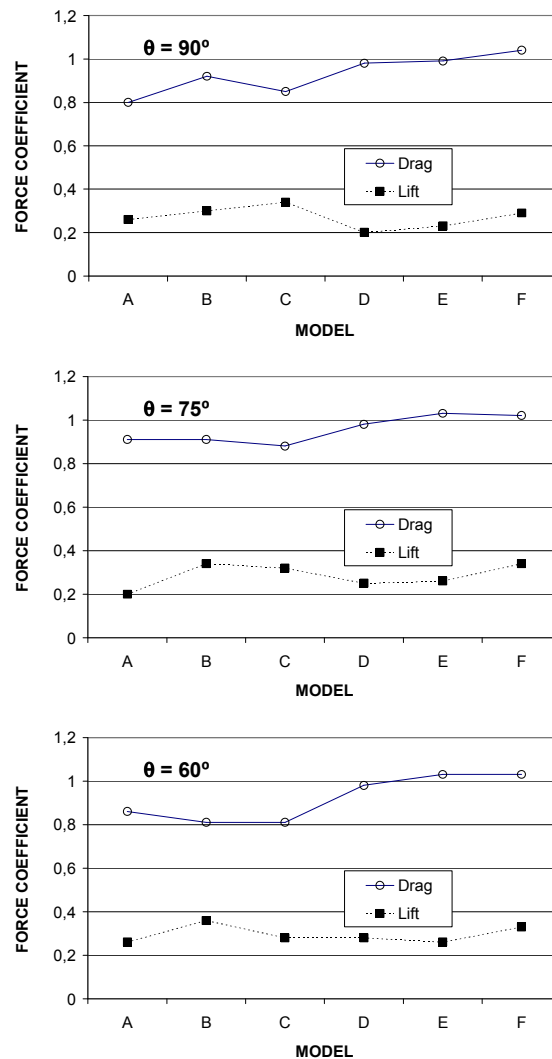


Fig. 1: Coeficientes de arrastre y sustentación sobre todo el techo

Tanto la relación  $h/b$  como la relación  $b/a$  juegan un rol fundamental sobre los coeficientes de carga de techos abovedados de edificios cerrados (Blessmann, 1998; Blackmore and Tsokri, 2006). Por ello, es conveniente detenerse a ver qué es lo que causa las diferencias observadas en la sustentación y el arrastre antes de entrar en detalles sobre las distribuciones de presión. Consideremos por ejemplo los modelos A y D bajo viento incidente de 90° (normal a la cumbrera). Note que ambos modelos tienen idénticas dimensiones, salvo que el Modelo A es dos veces más profundo que el modelo D. La sustentación y el arrastre en estos casos difieren en 0,1 y 0,2, respectivamente. La Fig. 2 compara los valores de  $c_{pU}$ ,  $c_{pD}$  y  $c_p$  medidos en puntos análogos. En la figura se graficó también una recta ajustada por

regresión lineal. La correspondencia entre los coeficientes de presión en el extradós es mejor que las correspondientes al intradós, aunque la recta de regresión está corrida hacia la izquierda, lo que significa que los valores absolutos de  $c_{pU}$  del Modelo D son más grandes en un valor alrededor de 0,1. La correlación entre valores de  $c_{pU}$ , que se cuantifica por el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson ( $R^2$  en la figura), llega a 0,979, mientras que es 0,83 para  $c_{pD}$ .

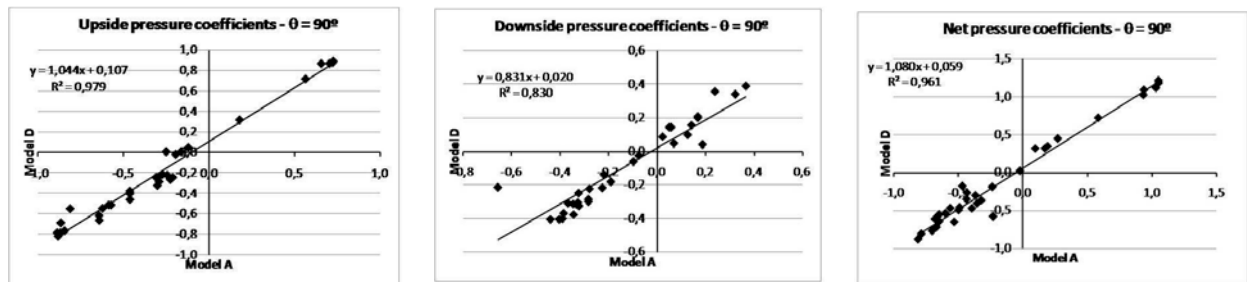
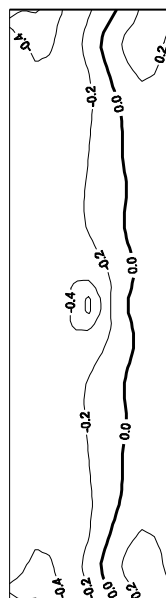
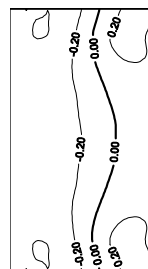


Fig. 2: Comparación de coeficientes de presión sobre modelos A y D con viento incidentando a 90°.

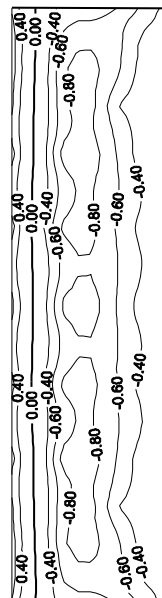
Es ilustrativo confrontar la Fig. 2 con las curvas de isóneas de coeficientes de presión sobre ambos modelos, que se muestran en las figuras 3 y 4. Las diferencias entre las presiones en el intradós que se aprecian fácilmente en la Fig. 2 no son tan obvias en los gráficos de isóneas, que lucen muy parecidas. Como podría haberse esperado, las presiones en el extradós son virtualmente idénticas.



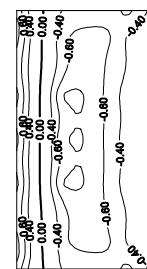
Model A



Model D



Model A



Model D

Fig. 3: Curvas de isóneas de coeficientes de presión en el intradós – Viento incidente a 90°.

Fig. 4: Curvas de isóneas de coeficientes de presión en el extradós – Viento incidente a 90°.

Si se hace el mismo análisis para los mismos modelos pero bajo viento a 60°, se puede ver en la Fig. 5 que la diferencia de 0,12 observada entre los valores de arrastre se explica por variaciones en la distribución de presiones en el intradós. En este caso, la diferencia entre las isóneas de  $c_{pD}$  (Fig. 6) es evidente: el flujo que se desarrolla en el tercio central del Modelo

A no tiene lugar para desarrollarse en el modelo D.

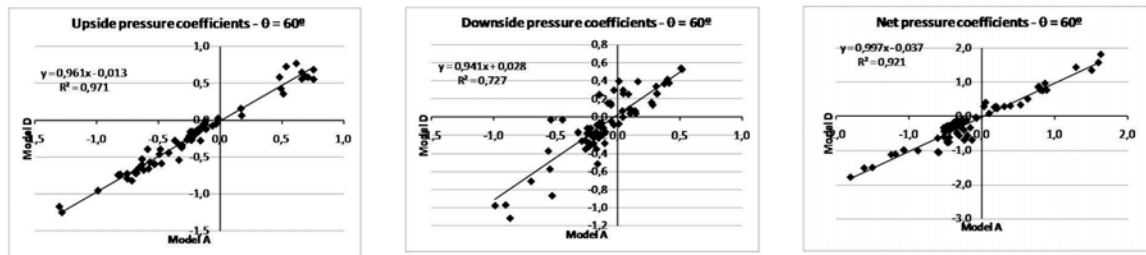
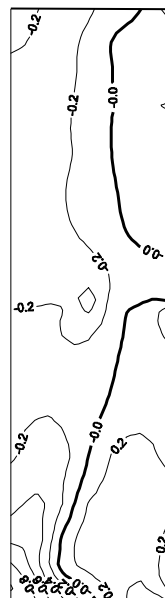
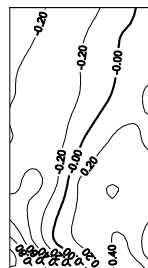


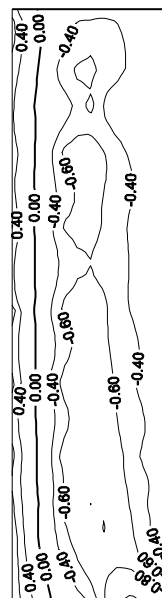
Fig. 5: Comparación de coeficientes de presión sobre modelos A y D con viento incidiendo a 60°.



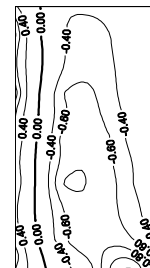
Model A



Model D



Model A



Model D

Fig. 6: : Curvas de isóneas de coeficientes de presión en el intradós – Viento incidente a 60°.

Fig. 7: Curvas de isóneas de coeficientes de presión en el extradós – Viento incidente a 60°.

Las distribuciones de coeficientes locales de presión, que se pueden consultar en Natalini (2005), confirman que la relación de aspecto  $h/b$  no juega un rol relevante. Los modelos cortos (A, B y C) producen valores del mismo orden de magnitud con similares patrones de distribución. Lo mismo se puede decir de los modelos largos (D, E y F) cuando se comparan entre ellos. En cambio, algunas diferencias, aunque no dramáticas, se observaron entre modelos cortos y largos. Por esta razón, a continuación se presentan resultados de distribuciones de coeficientes de presión correspondientes a sólo dos modelos: el modelo largo A y el modelo corto D. Los perfiles de distribución de coeficientes de presión sobre dos secciones transversales diferentes se muestran en las figuras 8 a 13. La Sección I está a 5 mm del borde a barlovento (para viento oblicuo) mientras que la Sección II está en el medio del techo. En cada sección transversal se superponen los perfiles correspondientes a  $c_{pU}$ ,  $c_{pD}$  y  $c_p$ .

En las figuras 8 a 13 se puede ver que la única diferencia apreciable entre los dos modelos es que hay un bulbo de presiones negativas en el intradós en la cumbre del Modelo A (largo), pero sólo en la sección II. Como las presiones en el extradós son similares en ambos modelos, el coeficiente de presión neta resultante es menos negativo en el modelo largo.

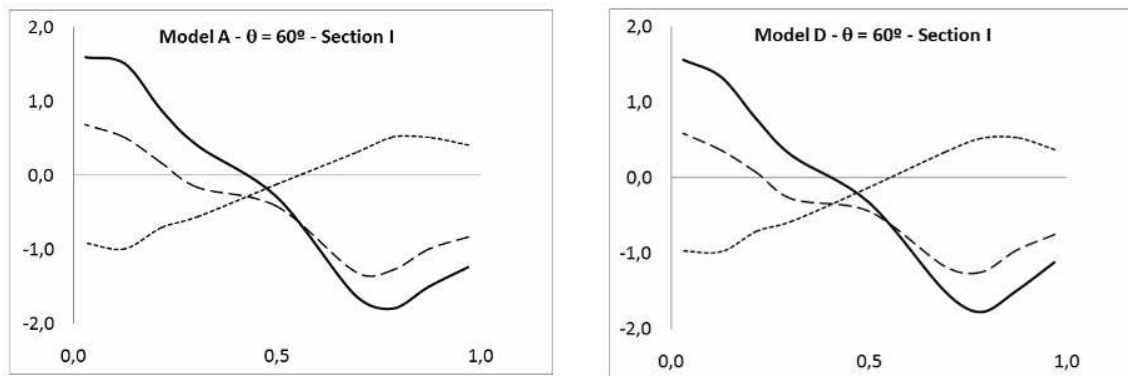


Fig. 8: Perfiles de coeficientes de presión sobre el extradós (línea de guiones), intradós (línea de puntos) y neta (línea continua).  $\theta=60^\circ$ . Borde a barlovento.

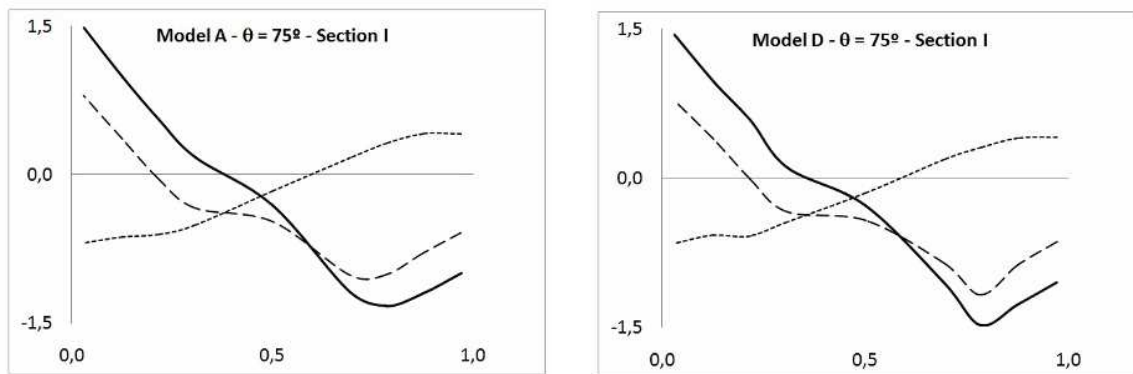


Fig. 9: Perfiles de coeficientes de presión sobre el extradós (línea de guiones), intradós (línea de puntos) y neta (línea continua).  $\theta = 75^\circ$ . Borde a barlovento.

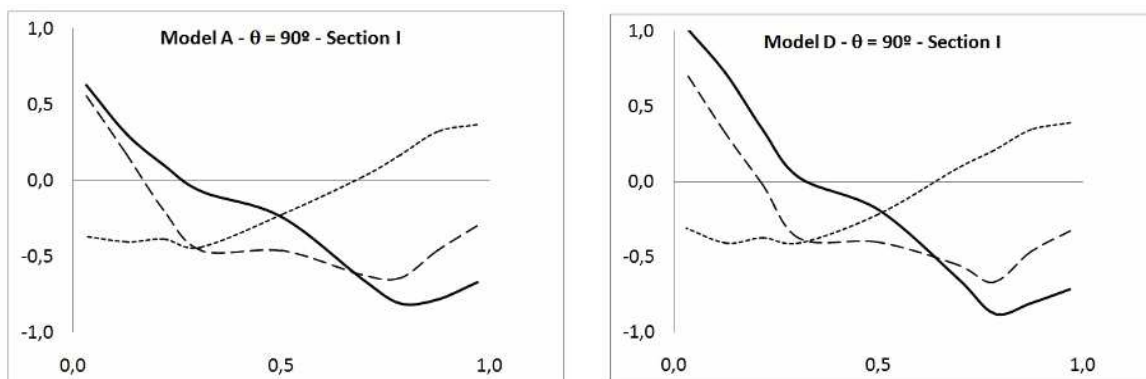


Fig. 10: Perfiles de coeficientes de presión sobre el extradós (línea de guiones), intradós (línea de puntos) y neta (línea continua).  $\theta = 90^\circ$ . Borde a barlovento.

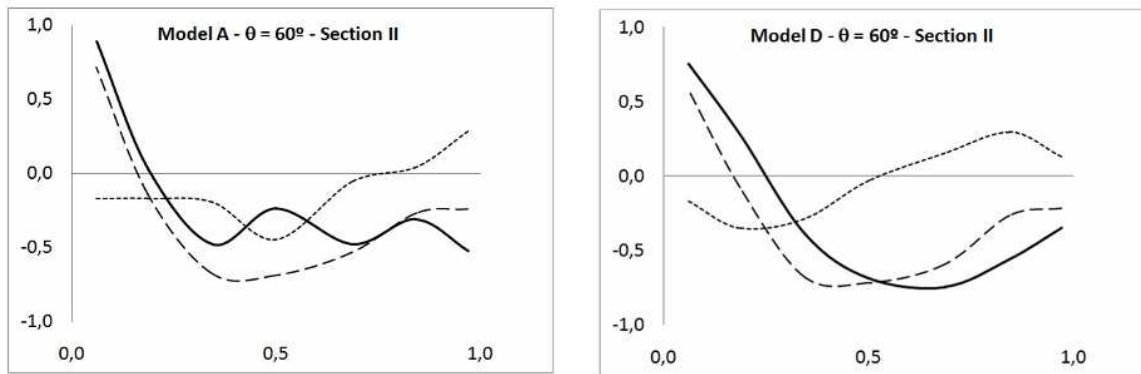


Fig. 11: Perfiles de coeficientes de presión sobre el extradós (línea de guiones), intradós (línea de puntos) y neta (línea continua).  $\theta=60^\circ$ . Sección central.

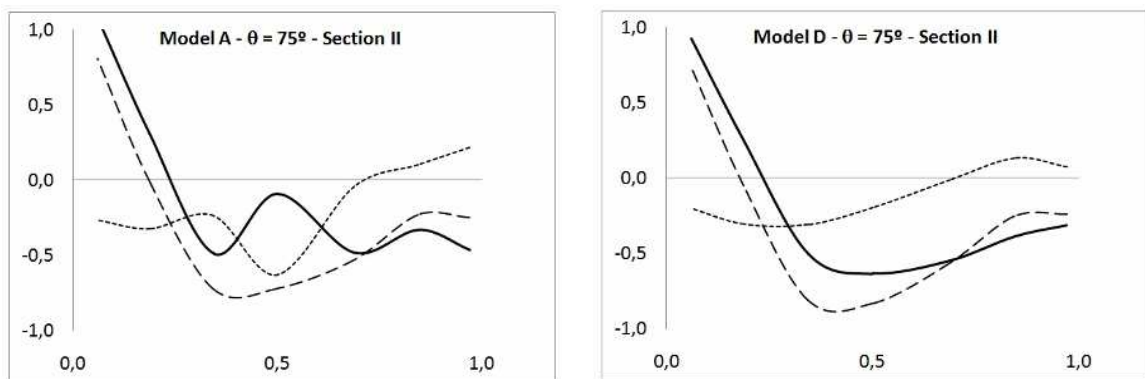


Fig. 12: Perfiles de coeficientes de presión sobre el extradós (línea de guiones), intradós (línea de puntos) y neta (línea continua).  $\theta = 75^\circ$ . Sección central.

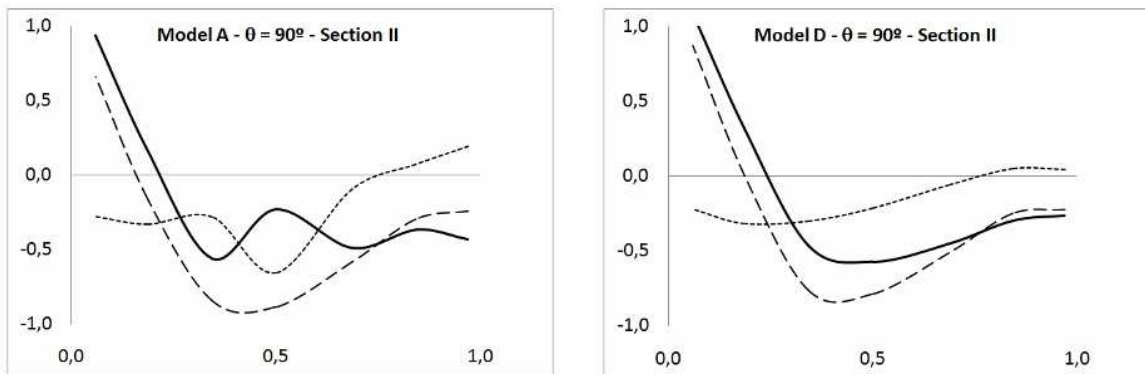


Fig. 13: Perfiles de coeficientes de presión sobre el extradós (línea de guiones), intradós (línea de puntos) y neta (línea continua).  $\theta = 90^\circ$ . Sección central.

Note el rol que juegan las presiones en el intradós sobre las presiones netas resultantes. La contribución de ellas van del 29% al 69% de las presiones netas. Las presiones en el intradós son altamente dependientes de las condiciones de bloqueo, y como los resultados presentados hasta aquí corresponden a modelos sin bloqueo, se puede esperar tener cargas significativamente diferentes bajo cualquier condición de bloqueo. La forma en que esto puede ocurrir se discute en la próxima sección.



### 3 MARCO CONCEPTUAL DE COOK

Al leer saber y entender de los autores de este trabajo, Cook (1990) propuso el único marco conceptual existente hasta el momento para describir completamente la aerodinámica de VCRs. Cook consiguió producir un cuadro de las características generales de las cargas medias sobre VCRs analizando cuidadosamente unos pocos datos sobre un modelo ensayado en flujo uniforme y suave por Irminger and Nokkentved (1936) y contrastándolos con la masa de datos producida en Gran Bretaña por el National Institute of Agricultural Engineering (NIAE) y Oxford University sobre PCR durante la primera mitad de los ochenta (Robertson *et al.*, 1985; Gumley and Wood, 1980; Gumley, 1981, 1982, 1984; Belcher and Wood, 1983).

En esta sección se hace una discusión de las afirmaciones de Cook a la luz de los datos presentados en este trabajo y los de las siguientes fuentes: Natalini *et al.* (2001, 2002, 2005) Balbastro (2009) y Balbastro y Sonzogni (2006, 2007, 2011).

#### 3.1 Patrón general de carga

*“En todos los casos hay un pequeño lóbulo de carga positiva (hacia adentro) cerca del frente del techo, pero la mayoría del techo tiene carga normal negativa (hacia afuera)”*

Todas las fuentes confirman esta afirmación, aunque la interpretación del adjetivo “pequeño” y el sustantivo “lóbulo” podría dar lugar a confusión. Se puede hablar más bien de que en todos los casos hay una franja a barlovento de alrededor de 1/4 de la superficie del techo que está bajo la acción de cargas positivas.

#### 3.2 Separación de flujo

*“Para  $\theta = 0^\circ$  (flujo incidente transversal a la cumbrera), la distribución (de presiones) muestra el pico característico de succión cerca de la cresta seguida por una caída a un valor constante, indicando separación de flujo similar al de un cilindro circular”. “En las otras direcciones sesgadas, para las cuales la relación efectiva flecha/luz transversal se reduce, no hay separación de flujo. Esto indica que la relación flecha/luz transversal  $f/b = 0,25$  es cercana a la crítica, con mayores flechas dando separación y una distribución de carga similar a la de un cilindro circular, y menores flechas manteniendo el flujo atacado y comportándose como un ala de contornos suaves.”*

En términos generales esta afirmación es válida, pero la Fig. 13 muestran que para  $f/b = 0,2$  el flujo también se separa, como en el caso de los cilindros circulares. Balbastro (2009) presentó visualizaciones del flujo pasando la sección transversal de techos de  $f/b = 0,126$  y  $f/b = 0,07$ . El flujo se separaba para  $f/b = 0,126$  pero no lo hacía para  $f/b = 0,07$ , lo que indica que el valor crítico para la separación no es 0,25 sino que está alrededor de 0,1.

#### 3.3 Altas cargas locales

*“Para los techos abovedados, se pueden usar las regiones locales de un techo a dos aguas equivalente, con la excepción de la región de la cumbrera, que no existe porque no hay un cambio abrupto de pendiente y la distribución de carga es continua sobre el arco”*.

Todas las fuentes confirman que la distribución de carga es continua sobre el arco. En cuanto a los valores de los coeficientes, la Tabla 1 compara el peor caso de presión local para todas las direcciones de viento entre un VCR de  $f/b = 0,2$  y un PCR de dos aguas con pendiente de  $15^\circ$ , ambos sin bloqueo. Los valores del VCR se tomaron de Natalini (2005), y los valores del PCR se extractaron del Apéndice I del reglamento CIRSOC 102 (2005). Esta última fuente hace un tratamiento de las cargas similar al que hace el Eurocode EN-1-4, el que

a su vez se basa en los estudios del NIAE y Oxford. La Tabla 1 confirma que cerca de la cumbrera las cargas locales son menos severas en los VCRs, y que tienen el mismo orden de magnitud cerca de los bordes. Se necesita más investigación sobre este tema para explicar las diferencias menores que se observan en el último caso. La comparación directa tiene sus límites puesto que los valores del CIRSOC 102 son coeficientes pseudo-estáticos, que se derivan de análisis de valores extremos de los picos de las fluctuaciones de presión.

	Cerca de los bordes		Cerca de la cumbrera	
	Max.	Min.	Max.	Min.
VCR de acuerdo a Natalini (2005)	1,8	-2,0	-	-1,3
PCR de acuerdo a CIRSOC 102 (2005)	1,9	-1,7	0,4	-1,8

Tabla 1: comparación del peor caso de coeficientes de presiones locales para todas las direcciones de viento entre un VCR de  $f/b = 0,2$  y un PCR a dos aguas con pendiente de  $15^\circ$ .

### 3.4 Bloqueo debajo del techo

Cook formuló un conjunto de reglas a partir de experimentos realizados en Gran Bretaña sobre PCRs. Hablando estrictamente, las reglas son aplicables a PCRs. Dada la importancia decisiva del bloqueo sobre la carga neta, se discute a continuación si estas reglas podrían ser válidas para VCRs.

#### 3.4.1 Bloqueo total

La primera regla concierne a techos con bloqueo total, es decir, cuando la relación de solidez,  $s$ , (que es la relación entre el área total proyectada o “sombra” de los objetos almacenados y el área proyectada de la envolvente de la estructura) es igual a 1. En este caso la regla es: “... la carga de un techo aislado completamente bloqueado se puede determinar de la misma manera que para un edificio parcialmente abierto, que es tomando las presiones exteriores para un edificio equivalente a una o dos aguas, en combinación con una presión interna adecuada”. La presión adecuada en el intradós recomendada por Cook está en la Tabla 2.

Disposición del bloqueo	$C_{pD}$
Bloqueo en una cara	
<b>bloqueo</b> en cara a barlovento	-0,3
<b>bloqueo</b> en cara a sotavento	+0,5
Bloqueo en tres caras	
<b>abierto</b> en cara a barlovento	+0,6
<b>bloqueado</b> en cara a barlovento	-0,3
Bloqueado en las cuatro caras	-0,1

Tabla 2: coeficientes de presión en el intradós para techos aislados con bloqueo total (extractado de Cook, 1990).

Para techos aislados a dos aguas la validez de esta regla se basa en los siguientes fenómenos observados:

- Cuando no hay bloqueo, la presión sobre el cuarto más a barlovento del extradós es positiva (hacia abajo) y se vuelve negativa en el resto del techo.

- b) Bajo condición de bloqueo total, la distribución de presiones en el extradós es idéntica a la de presiones externas sobre el techo de un edificio cerrado a dos aguas.
- c) Bajo cualquier disposición de bloqueo total, la presión sobre el cuarto más a barlovento del extradós cambia de positiva a fuertemente negativa, pero la presión en el resto del techo permanece sin cambios.
- d) Bajo cualquier disposición de bloqueo total, las presiones en el intradós se vuelven aproximadamente uniformes y sus valores variarán de acuerdo a la Tabla 2.

Si algo similar ocurriera tratándose de VCRs, se podría esperar que la regla sea también aplicable a ellos. La condición a) es similar sobre VCRs; todas las fuentes lo confirman. Desafortunadamente no es posible confirmar ni rechazar las condiciones b) y c) si se las considera individualmente. Como nadie ha reportado todavía resultado de distribuciones de presión sobre VCRs en condiciones de bloqueo total, no hay datos para hacerlo. Pero hay evidencia de que no pueden ser satisfechas completamente las dos condiciones a la vez. La distribución de presiones en los dos tercios del extradós más a sotavento de los VCRs, donde la presión es negativa, no es idéntica a las presiones exteriores sobre el techo de edificios cerrados con techos curvos; y la ocurrencia simultánea de las condiciones b) y c) requieren la coincidencia de ambas distribuciones en esa área. La Fig. 14 muestra un ejemplo de comparación de esas distribuciones. Se puede ver que las presiones negativas, aunque no son muy diferentes, tienen picos en diferentes posiciones y difieren en un valor alrededor de 0,2.

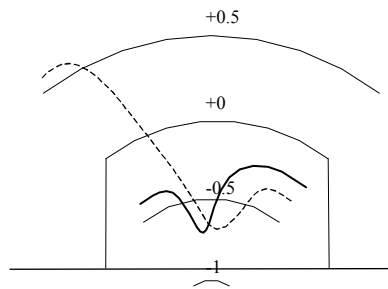


Fig. 14: distribución de coeficientes de presión en el extradós de la sección central de un VCR (línea de puntos) y distribución de coeficientes de presión externa sobre un edificio cerrado con similar envolvente (línea llena).

El ejemplo de la Fig. 14, que corresponde a ensayos en túnel de viento reportados por Natalini *et al.* (2002), es representativo del caso general. Hay dos fuentes principales de datos para edificios cerrados (Blessmann, 1998; Blackmore and Tsokri, 2006) de los cuales se puede confirmar que este patrón se cumple para otras relaciones de aspecto. Por otra parte, no hay evidencia para confirmar la condición d), aunque es probable que las presiones en el intradós se comporten de la misma manera en VCRs, dado que habiendo bloqueo sobre la cara más a sotavento, se puede esperar tener un área de estancamiento debajo del techo, y para bloqueo sobre la cara más a barlovento, un flujo de estela. En conjunto, hasta tanto no se disponga de otra recomendación con bases más firmes, se puede aplicar esta recomendación para obtener un valor de referencia, pero se debe usar con debida precaución.

### 3.4.2 Bloqueo parcial

La segunda regla se refiere a techos parcialmente bloqueados: “No se necesitan correcciones por bloqueo para techos bloqueados hasta el 30% desde el piso. Para mayores grados de bloqueo, la carga se puede interpolar linealmente entre los valores correspondientes a bloqueo total (relación de solidez  $s = 1$ ) y sin bloqueo (asignando este valor a  $s = 3$ ).”. Balbastro y Sonzogni (2011) reportaron resultados de cargas medias obtenidas mediante CFD sobre un VCR parcialmente bloqueado. Modelaron un techo con relaciones de aspecto  $f/b =$

0,125,  $h/b = 0,46$  y  $b/a = 0,5$ . Debajo del techo colocaron un obstáculo prismático de las dimensiones de un camión, provocando un bloqueo parcial de relación de solidez  $s = 0,53$ . Para el arrastre y la sustentación obtuvieron valores de 0,49 y 0,25, respectivamente. Si se aplica la regla enunciada al principio de esta sección, se obtienen valores de 0,22 y 0,21 respectivamente para el arrastre y la sustentación. Aun cuando la precisión de la estimación del coeficiente de arrastre es discutible, este ejemplo es una indicación positiva en apoyo a la regla de Cook. Note que la efectividad de la regla para bloque parcial requiere necesariamente el cumplimiento de la regla para bloqueo total. Sin embargo no es posible ser concluyente sobre una regla afectada por tantas hipótesis basándose sólo en este caso particular, que podría estar distorsionado por una cantidad de factores sobre los cuales los autores de este trabajo no tienen control.

#### **4 INFLUENCIA DE LA RELACION F/B**

A partir de los resultados presentados en la Fig. 1 es posible formular una regla simple para estimar las cargas globales sobre un VCR: los valores de 1,05 y 0,35 para los coeficientes de arrastre y sustentación, respectivamente, son límites superiores para todas las direcciones de viento. En tanto y en cuanto la relación  $f/b$  sea 0,2 la regla se puede aplicar a cualquier relación de aspecto comprendida entre los límites de las comprendidas en los casos presentados en la sección 2.

Para otras relaciones de aspecto  $f/b$ , se intentó calcular los coeficientes globales de los resultados presentados por Balbastro (2009), quien dio distribuciones de coeficientes de presión para valores de  $f/b$  iguales a 0,181; 0,128 y 0,071. Los resultados presentaron inconsistencias que impidieron alcanzar alguna conclusión. Sin embargo, los valores de arrastre y sustentación de 0,7 y 0,12 correspondientes a un VCR de  $f/b = 0,125$  que Balbastro (2011) publicó sin mediar ningún recálculo son consistentes con los presentados anteriormente. Lamentablemente se necesitarán más datos para conformar una regla aplicable a otros valores de  $f/b$ .

Otro problema que se debe tener en foco es que para hacer uso de estos coeficientes, dado que son coeficientes medios, se los debe aplicar en combinación con el modelo de valoración de ráfaga estacionaria equivalente (equivalent steady gust model, Cook, 1990). En adelante nos referiremos a este modelo como modelo cuasi-estacionario, aunque estrictamente el modelo de ráfaga estacionaria equivalente es uno de los casos particulares (el más usado) de modelo cuasi-estacionario. Existe consenso en la literatura de que el modelo cuasi-estacionario puede representar adecuadamente las cargas globales. Si se tiene en cuenta que no se disponen coeficientes derivados de modelos más sofisticados, la regla formulada es la única opción posible. Normalmente, en nuestra región el sistema principal resistente de los VCR están compuestas por pórticos, y la verificación de los mismos se hace tomando un estado bidimensional de carga. Los valores globales de coeficiente de arrastre y sustentación son útiles por lo tanto para conocer las acciones sobre las columnas.

#### **5 CONCLUSIONES**

Si bien se han hecho significativos avances en el conocimiento de las cargas medias de viento sobre VCRs, que se han presentado y discutido en este trabajo, todavía faltan muchos elementos para poder llegar a un cuadro completo. Haciendo una síntesis, faltan datos sobre cargas para muchas relaciones  $f/b$  y especialmente sobre la influencia del bloqueo, que se sabe será un factor determinante en la manifestación de los estados de carga más severos; dejando en claro además que no hay todavía ninguna información en la literatura sobre las

fluctuaciones de carga, ni sobre resultados de mediciones a escala natural, lo que deja abundante campo para desarrollo de futuras investigaciones.

## REFERENCIAS

- Altman, D.R., *Wind uplift forces on roof canopies*. M.Sc. Thesis., Clemson University, Clemson, South Carolina, 2001.
- Balbastro, G.S., *Coeficientes de presión en cubiertas abovedadas aisladas sometidas a la acción del viento*. Tesis de Doctorado, Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Santa Fe, 2009.
- Balbastro, G., Sonzogni, V., Coeficientes de presión en cubiertas abovedadas aisladas. *XIX Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*, Mar del Plata, 5-7 octubre, 2006.
- Balbastro, G., Sonzogni, V., Simulación de un ensayo en túnel de viento aplicando CFD. *Mecánica Computacional*, 26:3779-3787, 2007.
- Balbastro, G.S., Zonsogni, V.E., Efecto del viento en cubiertas curvas aisladas con obstrucciones. *Mecánica Computacional*, 30:2599-2607, 2011.
- Balbastro, G., Sonzogni, V., Franck, G., Acción del viento sobre cubiertas abovedadas aisladas: simulación numérica. *Mecánica Computacional*, 23:2079-2095, 2004.
- Balbastro, G., Sonzogni, V., Franck, G., Simulación numérica del viento sobre una cubierta abovedada. *Mecánica Computacional*, 24:1261-1278, 2005.
- Belcher, R.E., Wood, C.J., Further Design Extreme Pressures on Canopy Roofs, *Uni. of Oxford Dept. of Eng. Sc.*, OUEL report No.1481/83, 1983.
- Blackmore, P.A., Tsokri, E., Wind loads on curved roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94:(11)833-844, 2006.
- Blessmann, J., Wind load on isolated and adjacent industrial pavilion curved roof. In: *Wind Effects on Buildings and Structures*, Balkema, Rotterdam, 137-171, 1998.
- CIRSOC 102: Acción del viento sobre las construcciones. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Buenos Aires, 1983.
- CIRSOC 102: Reglamento Argentino de acción del viento sobre las construcciones. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Buenos Aires, 2005.
- Cook, N.J., *The designer's guide to wind loading of building structures, part 2: static structures*. Building Research Establishment Report, London, 1990.
- Ginger, J.D., Letchford, C.W., Wind loads on canopy roofs. Department of Engineering Science, University of Qld., Research Report No. CE132, 1991.
- Gumley, S.J., Panel loading mean pressure study for canopy roofs. Uni. of Oxford Dept. of Eng. Sc., OUEL report No.1380/81, 1981.
- Gumley, S.J., Design extreme pressures - a parametric study for canopy roofs. Uni. of Oxford Dept. of Eng. Sc., OUEL report No.1394/82, 1982.
- Gumley, S. J., A parametric study of extreme pressures for the static design of canopy structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 16:43-56, 1984.
- Gumley, S.J., Wood, C.J., Mean and extreme pressure study on model Dutch barns. Uni. of Oxford Dept. of Eng. Sc., OUEL report No.1333/80, 1980.
- Irminger, J.O.V, Nokkentved, C., *Wind pressure on buildings. Experimental Researches (Second Series)*. Danmarks Naturvidenskabelige Samfund, Copenhagen, 1936.
- Marighetti, J.O, Canavesio, O., Natalini, B., Natalini, M.B, Comparación entre coeficientes de presión media en cubiertas aisladas planas y curvas. *XVII Jornadas Argentina de Ingeniería Estructural*, Rosario, Argentina, 2002.
- Natalini, M.B., *Acción del viento sobre cubiertas curvas aisladas*. Tesis de Doctorado,

- Universidad Nacional del Nordeste, Argentina, 2005.
- Natalini, B., Marighetti, O., Natalini, M.B., Wind tunnel test of planar canopy roof model. *XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, Punta del Este, Uruguay, 2000.
- Natalini, M.B., Canavesio, O., Natalini, B., Paluch, M.J., Wind tunnel modelling of mean pressures on curved canopy roofs. *Americas Conference on Wind Engineering*, Clemson, USA, 2001.
- Natalini, M.B., Canavesio, O., Natalini, B., Paluch, M.J., Pressure distribution on curved canopy roof. *Second International Symposium on Advances in Wind and Structures*, Pusan, Korea, 2002.
- Natalini, M.B., Morel, C., Natalini, B., Mean wind loads on vaulted canopy roofs under different wind directions. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estructural*, 2:29-40, 2005.
- NV 65 Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions et annexes. Société de Diffusion des Techniques du Bâtiment et des Travaux Publics, France, 1970.
- Robertson, A.P., Hoxey, R.P., Moran, P., A full scale study of wind loads on agricultural ridged canopy roof structures and proposal for design. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 21:167-205, 1985.
- Uematsu, Y., Izumi E. and Stathopoulos T., Wind force coefficients for designing free-standing canopy roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95: 1486-1510, 2007.