

# Medición de presiones aerodinámicas en una estructura de membrana

Gamboa-Marrufo M.<sup>1</sup>, Hincz K.<sup>2</sup>, Tun Cruz V.<sup>3</sup>

*Fecha de recepción: 29 de abril de 2011 – Fecha de aprobación: 29 de diciembre de 2011*

**Resumen:** Para determinar las cargas a las que queda sometida una estructura debido al viento se requieren las presiones que se generan sobre la estructura debido al embate de este fluido. Los códigos de diseño proporcionan coeficientes de presión para el cálculo de estas fuerzas únicamente para estructuras con las geometrías más sencillas; para el caso de geometrías complejas, como las que tienen las estructuras de membrana, se sugiere el uso de experimentos en túnel de viento para validar los valores que se utilizarán para el diseño de las mismas. En este artículo se presentan los coeficientes de presión media obtenidos en una estructura de membrana, al ser modelada y ensayada, bajo un flujo de aire laminar, en el túnel aerodinámico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán. Estos coeficientes de presión podrían incluirse en códigos como referencia para diseños cuasi-estáticos.

**Palabras clave:** Cargas de viento, presiones de viento, túnel de viento, estructuras de membrana, tenso-estructuras.

## Wind pressure measurements on a membrane structure

**Abstract:** To determine the wind loads for a structure it is necessary to obtain the pressures which are generated over the structure due to the impingement of this fluid. Design codes give pressure coefficients to obtain these loads only for structures with simple geometries; for more complex geometries, as those presented by membrane structures, they suggest wind tunnel tests to validate the pressure coefficient values used for the design. This article presents the pressure coefficients obtained on a model of a membrane structure when subjected to a laminar flow of air in the wind tunnel of the College of Engineering at the Autonomous University of Yucatán. These pressure coefficients could be included as quasi-static reference values in design codes.

**Keywords:** Wind loads, wind pressures, wind tunnel, membrane structures, tensile structures.

---

<sup>1</sup> Profesor de Carrera, Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería. E-mail: gmarrufo@uady.mx

<sup>2</sup> Profesor Investigador, Budapest University of Technology and Economics, Department of Structural Mechanics.

<sup>3</sup> Pasante de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería.

Nota: El período de discusión está abierto hasta el 1° de julio de 2012. Este artículo de investigación es parte de **Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán**, Vol 15, No. 3, 2011, ISSN 1665-529X

## **INTRODUCCIÓN**

Las estructuras de membrana o tenso-estructuras, son estructuras ligeras muy utilizadas recientemente debido a la facilidad que proporcionan para cubrir grandes claros, a su ligereza que permite un fácil ensamblaje de la estructura, a que son económicas al permitir un consumo mínimo de materiales y a su versatilidad al permitir atractivos y novedosos diseños, entre otras razones.

En el cálculo de estructuras ligeras, las acciones del viento y de la nieve son las cargas predominantes que rigen el diseño de este tipo de estructuras. Las acciones debido a la nieve imponen un cierto ángulo de inclinación con respecto a la horizontal de las superficies de las cubiertas. En cuanto a las acciones del viento, para estructuras con geometrías simples, los códigos de diseño proporcionan coeficientes de presión que pueden ser utilizados para el cálculo de las cargas que se generan sobre éstas como efecto del viento incidente.

Sin embargo, la determinación de las cargas de viento en estructuras de membrana es particularmente complicada debido a las geometrías que adoptan las superficies de este tipo de estructuras y a los grandes claros para los cuales generalmente son diseñados. Los códigos sugieren que el diseño de este tipo de estructuras se realice: mediante resultados obtenidos en estructuras semejantes, bajo las recomendaciones de expertos en la materia y/o realizando pruebas en túnel de viento (CFE 2008).

Los daños producidos en estructuras livianas debido al viento son variables y van desde daños a los acabados hasta la destrucción total de las mismas (Balbastro y Sonzogni 2008); y las causas de estos daños se pueden encontrar en todas las etapas: algunos se generan durante el diseño o cálculo de ingeniería, otros se producen durante el proceso de fabricación de la estructura, cables o membranas, o durante el montaje (Maldonado 2009).

Para evitar errores durante los cálculos de estas estructuras, hay que tener en cuenta que las presiones a las que quedan sujetas éstas dependen primordialmente de la geometría que tienen y adquieren debido a las fuerzas de succión y compresión que experimentan debido al viento incidente y a la turbulencia característica del tipo de terreno en que se encuentra la estructura en estudio y aquella generada por el rebote del viento en las superficies de las mismas estructuras.

En este trabajo los resultados de la modelación y ensaye de una estructura de membrana en el túnel

aerodinámico o túnel de viento de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán se presentan como coeficientes de presión que pueden ser utilizados para el cálculo de fuerzas a las que queda sujeta esta estructura debido a la acción del viento sin considerar la turbulencia atmosférica y la capa límite característica del tipo de terreno en que se encuentre la estructura. Los resultados obtenidos pueden ser utilizados como referencia en diseños cuasi-estáticos de estructuras con una geometría similar.

Aunque el comportamiento de las estructuras de membrana depende también, como se mencionó con anterioridad, del cambio de la geometría de las mismas al estar sujetas a los esfuerzos generados como efecto de la acción del viento, con los resultados obtenidos en el presente trabajo se calcularon las fuerzas a las que quedarían sujetos los cables de suspensión (Hinkz y Gamboa-Marrufo 2010) y se encontró que la geometría de la estructura variaba mínimamente, haciendo de los resultados obtenidos en el presente trabajo (para la estructura en estudio), los definitivos para el cálculo de una estructura estable geoméricamente cuando es sujeta a cargas de servicio cuasi-estáticas.

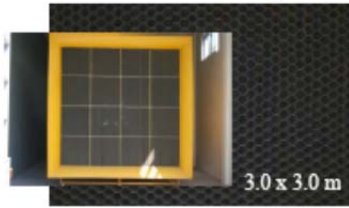
## **METODOLOGÍA.**

Los coeficientes de presión en este trabajo fueron determinados mediante la modelación y ensaye, bajo un flujo de aire laminar, de una estructura de membrana en el túnel de viento corto del Laboratorio de Estructuras y Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán. Este túnel cuenta con una sección de trabajo de 1.5 m de longitud y sección transversal de 1 m<sup>2</sup> (Fig. 1).

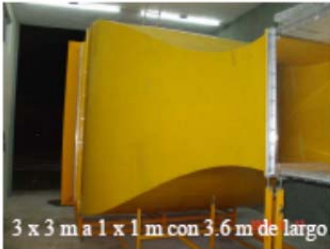
La estructura analizada en el presente trabajo consiste en una red de cables soportada por un arco y cubierta con una membrana. Los detalles de esta estructura se muestran en las Figuras 2, 3 y 4.

El modelo de la estructura de membrana fue construido a una escala 1:260 utilizando una impresora láser 3-D (3 dimensiones) de la marca Z-Corporation modelo Spectrum z510. La precisión de la impresora es menor o igual a 0.1 mm (espesor de las capas de plaster superpuestas para formar el modelo). Las dimensiones resultantes del modelo de plaster son de 385 mm diagonalmente y 71 mm de altura. Los orificios para medir las presiones en la superficie hiperbólica de la estructura fueron distribuidos convenientemente como se muestra en la Figura 5.

Acometida, Rectificadores y Mallas



Zona de Contracción



3 x 3 m a 1 x 1 m con 3.6 m de largo

Zona de Pruebas



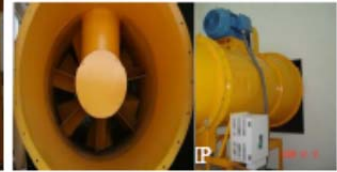
1.0 x 1.0 m con 1.5 m de largo

Difusor



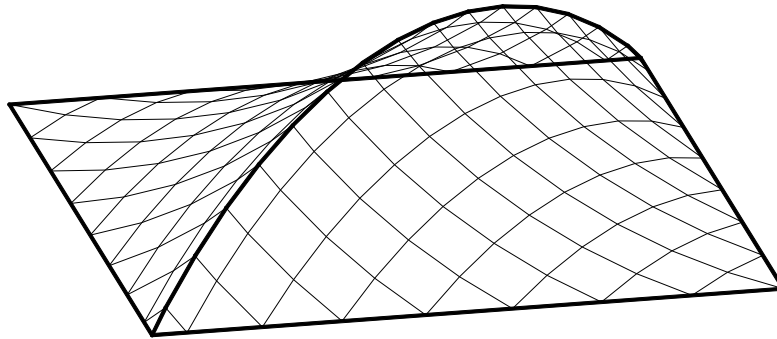
1 x 1 m a D=1.378 m con 3.102 m de largo

Ventilador

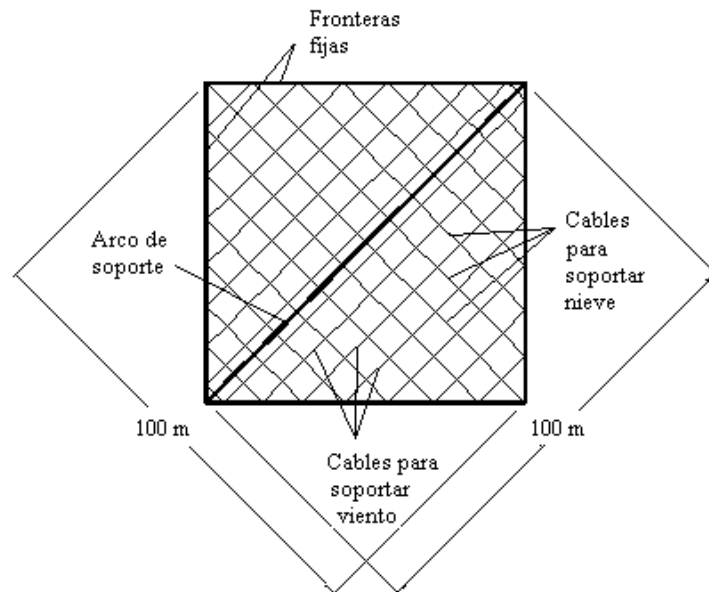


Acometida de 3 x 3 m, Zona de pruebas de 1 x 1 x 1.5 m, Ventilador de 125 HP y 1.378 m de diámetro Longitud total aprox. de 12.5 m, permitiendo velocidades en la zona de pruebas de 35m/s (126 km/hr)

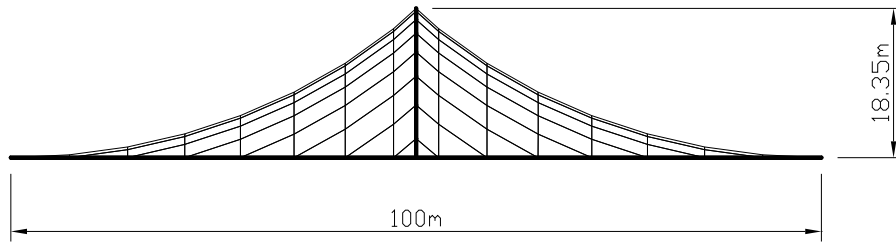
**Figura 1.** Túnel aerodinámico del Laboratorio de Estructuras y Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán.



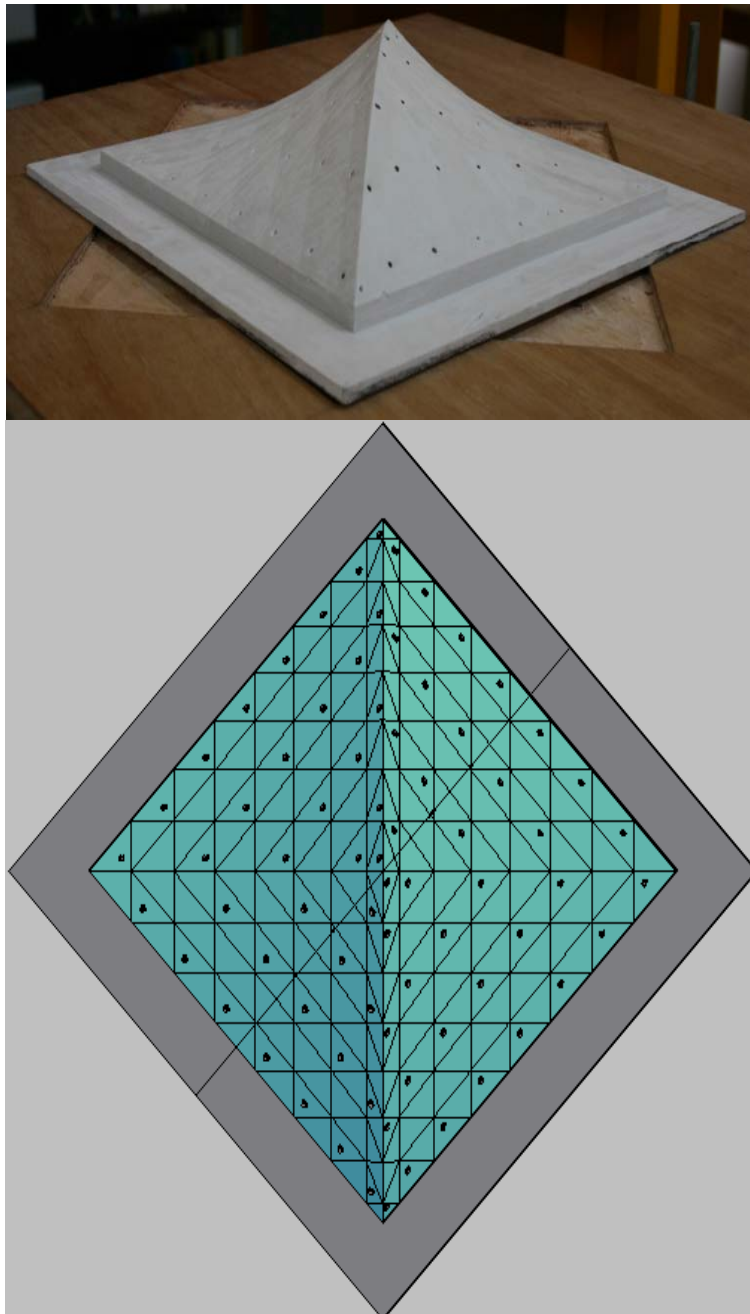
**Figura 2.** Isométrico de la estructura en estudio.



**Figura 3.** Planta de la estructura en estudio.



**Figura 4.** Vista lateral de la estructura en estudio.



**Figura 5.** Modelo a escala 1:260 utilizado en el presente trabajo y distribución de los 72 orificios utilizados para medir presiones en el modelo.

Los orificios para medir presiones se conectaron a un multi-sensor de presiones de 16 canales marca Esterline, modelo 9116 por medio de un sistema de tubos. De esta manera, durante cada ensaye, se registró simultáneamente la presión en 16 puntos del modelo. En cada ensaye, entre 4 y 6 puntos fueron

utilizados como control para verificar que en los puntos aledaños al área ensayada se registrarán los mismos coeficientes obtenidos con anterioridad. Las presiones en este trabajo se presentan como coeficientes de presión,  $C_p$ , que se definen como:

$$C_p = \frac{\text{Registro de Presión } (p)}{\text{Presión Dinámica de Referencia } (p_r)} = \frac{p_0 - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}_r^2}$$

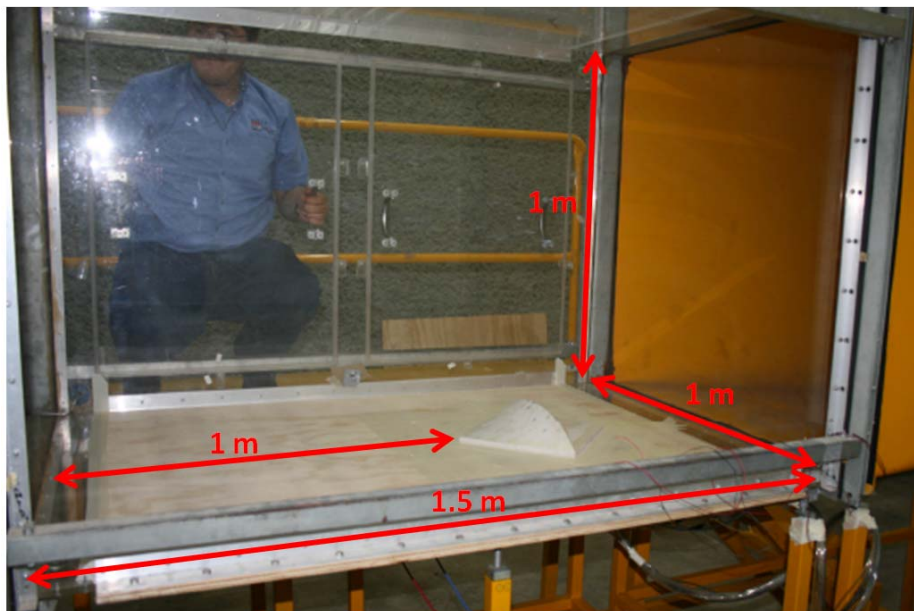
en donde:  $p_0$  es la presión local en la superficie del modelo,  $p_\infty$  es la presión estática del flujo nominal sin interferencia aplicada al reverso del diafragma del transductor,  $\rho$  es la densidad del aire, y  $\bar{u}_r$  es la velocidad media del flujo sin interferencia medida en un punto distante de donde se encuentra el modelo.

Durante cada experimento el modelo fue colocado a 1000 mm de la entrada del área de trabajo del túnel de viento y centrado transversalmente (Fig. 6) mientras era sujeto a un flujo de viento en régimen laminar.

Cada ensaye se realizó durante 120 segundos con lecturas de presiones a razón de 2 Hz ya que frecuencias más altas de lectura de datos proporcionaban el mismo valor medio de la presión. Se hicieron ensayes con el viento golpeando al modelo en tres direcciones diferentes: con el viento

golpeando al modelo en dirección perpendicular a la arista del arco de soporte del modelo, con el viento en dirección paralela a la arista del arco de soporte del modelo y con el viento a 45 grados de la dirección perpendicular a la arista del arco de soporte del modelo, como se muestra en las Figuras 7, 8 y 9, respectivamente. En todos los casos, se midieron las presiones en los 72 orificios, pero dada la proximidad de las lecturas –centésimas de diferencia- en secciones simétricas de los dos primeros casos (flujo paralelo y perpendicular a la cresta del modelo) se consideró la simetría de la estructura y los valores fueron promediados respectivamente para la obtención de las presiones en las áreas tributarias.

Cada experimento se repitió 2 ó 3 veces usando velocidades de viento de 20 m/s y 25 m/s para verificar la estabilidad de los resultados.



**Figura 6.** Localización del modelo en el área de trabajo del túnel de viento.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Las Figuras 7, 8 y 9 muestran los resultados de las presiones medias obtenidas, e interpolaciones

correspondientes, resultantes de someter el modelo a flujos de viento en las tres direcciones que fueron ensayadas en el presente trabajo.

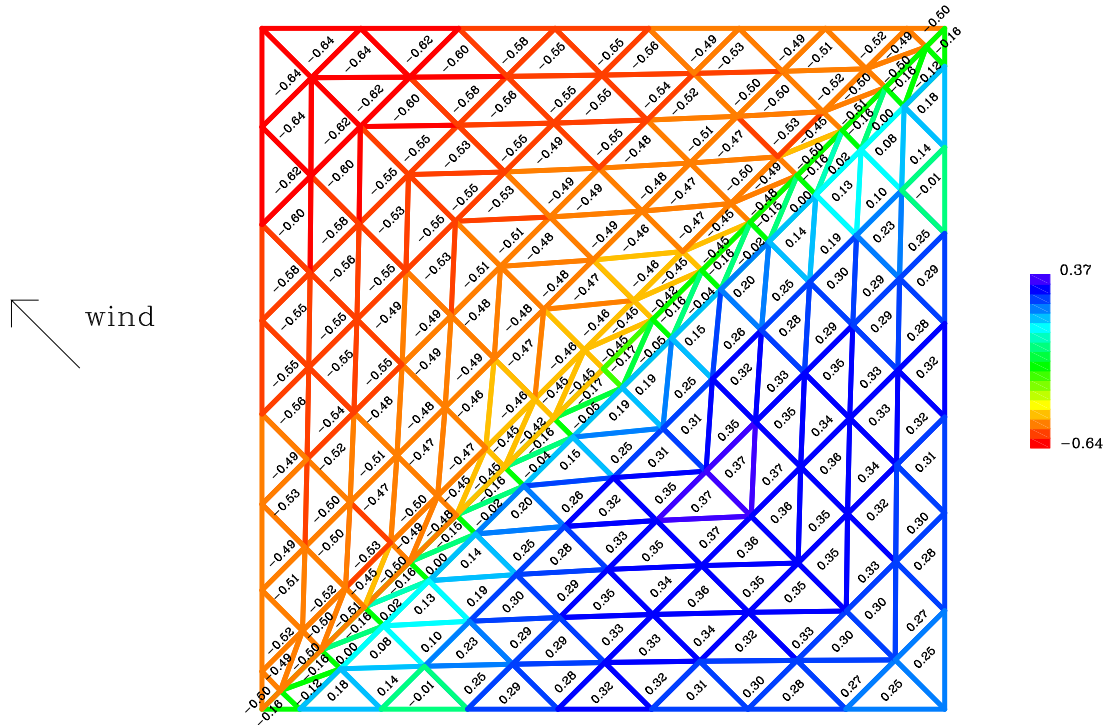


Figura 7. Coeficientes de presión obtenidos con el viento en dirección perpendicular a la arista del arco de soporte del modelo.

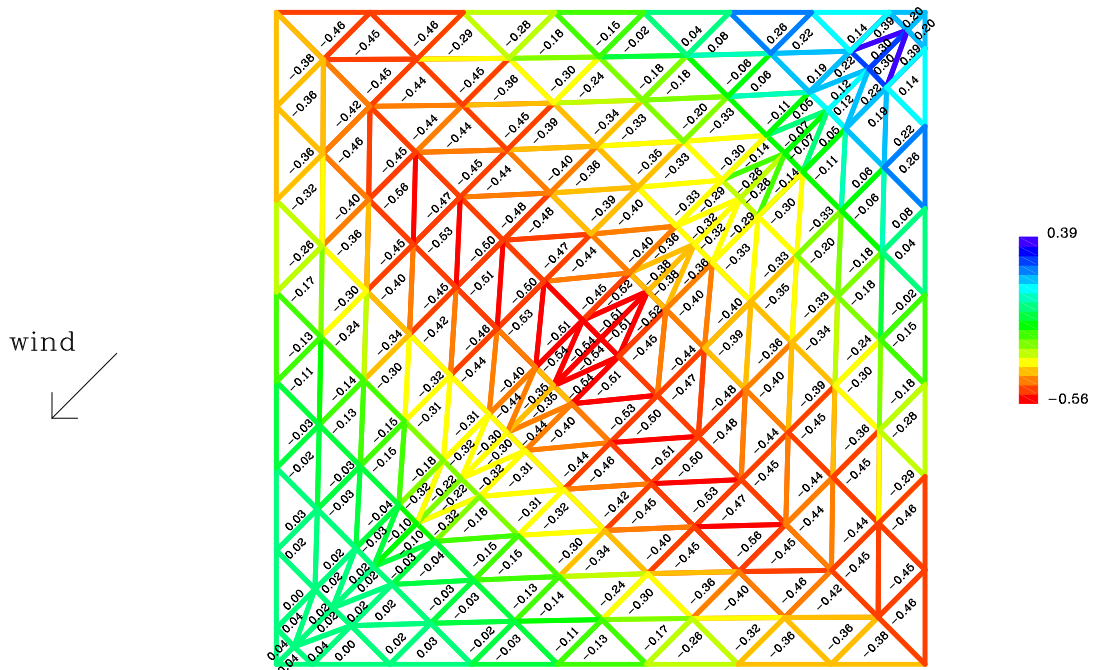
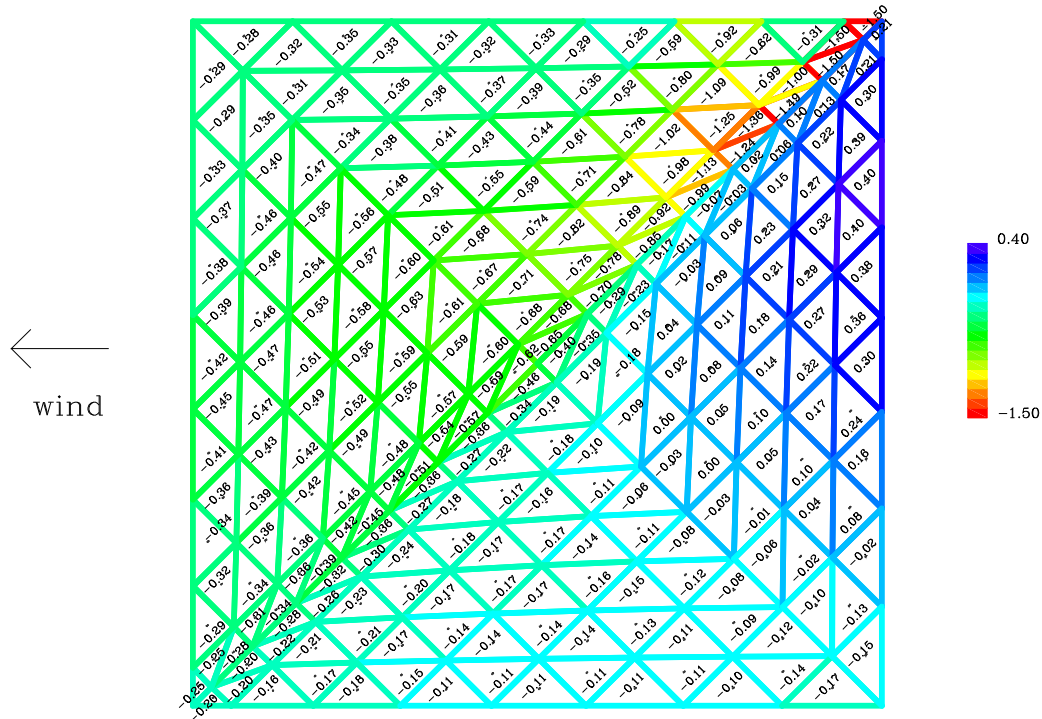


Figura 8. Coeficientes de presión obtenidos con el viento en dirección paralela a la arista del arco de soporte del modelo.



**Figura 9.** Coeficientes de presión obtenidos con el viento a 45 grados de la dirección perpendicular a la arista del arco de soporte del modelo.

Como puede observarse en la Figura 7, en la que se presentan los coeficientes de presión obtenidos con el viento en dirección perpendicular a la arista del arco de soporte del modelo, prácticamente toda la superficie del modelo a barlovento queda sujeta a presiones positivas con coeficientes de presión de hasta 0.37 salvo en el área cercana a la arista del arco de soporte del modelo en la que se tienen succiones con valores de hasta -0.17; los coeficientes de presión positivos más altos se encuentran en la sección central del área a sotavento.

En la misma Figura 7 también puede observarse que la superficie a sotavento completa queda sujeta a succiones con coeficientes de presión que van desde -0.45 hasta -0.64; en esta sección a sotavento los coeficientes de succión mayores se encuentran en secciones cercanas a la esquina del modelo más lejana a la arista del arco de soporte. La presencia de la curvatura cóncava en cada una de las secciones a barlovento y sotavento influye en los valores de los coeficientes de presión obtenidos en cada una ellas, generando un eje de simetría en los valores de los coeficientes de presión.

En la Figura 8 se presentan los coeficientes de presión obtenidos con el viento en dirección paralela a la arista del arco de soporte del modelo; en este gráfico

puede advertirse que por simetría, ambos lados, a partir de la arista del arco de soporte del modelo, quedan sujetos a los mismos coeficientes de presión los cuales tienen valores que van desde 0.39 hasta -0.56; en esta figura se distinguen claramente tres secciones, la primera, cercana a la arista del modelo a barlovento, presenta los coeficientes de presión positivos más altos cerca de la arista del arco de soporte del modelo y estos coeficientes van decreciendo rápidamente con el aumento de la distancia a la arista del arco de soporte; la segunda, abarca la porción central del área entre barlovento y sotavento en la que se encuentran los coeficientes de succión mayores (entre -0.30 y -0.56) y la tercera sección, cercana a la esquina del modelo a sotavento, presenta coeficientes de presión negativos pequeños que aumentan hasta positivos muy cercanos a cero. Nuevamente, es la presencia de la curvatura cóncava perpendicular a la arista del arco de soporte del modelo la que define estas marcadas secciones en los valores de los coeficientes de presión; sólo que en esta ocasión la cresta de esta curvatura cóncava funciona como una línea de desprendimiento del flujo que genera las succiones medias más altas en su proximidad del lado de sotavento.

Los coeficientes de presión obtenidos con el viento a 45 grados de la dirección perpendicular a la arista del

arco de soporte del modelo se presentan en la Figura 9. En ésta se puede apreciar que los coeficiente de presión toman valores que van desde 0.40 hasta -1.50; los coeficientes de presión positivos más altos de esta sección se encuentran en la arista lateral del modelo a barlovento y éstos van disminuyendo conforme se aproximan a la arista del arco del modelo y como esta arista lateral del modelo a barlovento se va alejando de su esquina concurrente con la arista del arco del modelo. Las succiones más altas en este lado del modelo (barlovento a partir de la arista del arco del modelo) se encuentran a partir de la cima del arco del modelo disminuyendo éstas cuando se alejan de la cima hacia sotavento y mucho más rápidamente como se van alejando del arco del modelo hacia la arista a barlovento.

En el lado del modelo a sotavento (a partir de la arista del arco del modelo) se tienen únicamente presiones negativas, las mayores succiones se encuentran muy cercanas a la arista del arco del modelo en la parte más próxima a la esquina a barlovento; estas succiones van disminuyendo a lo largo de toda la arista del arco del modelo conforme se van alejando de la esquina a barlovento y no tan notoriamente como en el otro lado del modelo, las succiones disminuyen conforme se van alejando del arco del modelo hacia las aristas laterales opuestas a la arista del arco del modelo en ese mismo lado. En este caso, la presencia de la arista del arco del modelo en su extremo a barlovento es la que genera las succiones más altas obtenidas en cualquiera de las direcciones en estudio; la distribución de las presiones en el resto de la estructura queda definida por la presencia de la curvatura cóncava perpendicular a la arista del arco de soporte del modelo funcionando como una línea de desprendimiento del flujo que genera el cambio de presiones positivas o negativas muy pequeñas a succiones en el lado de sotavento y un aumento de las succiones medias en su proximidad del lado de sotavento, cuando se pierde el efecto de la presencia del arco del modelo.

#### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

- CFE (2008). *Manual de diseño de obras civiles-diseño por viento*, Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones Eléctricas, México.
- Balbastro G. C. y Sonzogni V. E. (2008). *Colapso de estructuras de galpones durante tormentas severas*. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructuras Civil. 8 (1) 37-56.
- Hinkz K. y Gamboa-Marrufo M. (2010). *Wind analysis of an arch supported tensile roof*. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2010. Spatial Structures – Permanent and Temporary. Shanghai, China.

#### **CONCLUSIONES**

La presencia, tanto de la arista del arco de soporte de la estructura como de la curvatura cóncava perpendicular a ésta, definen las distribuciones de presiones y succiones a todo lo largo de la estructura. La dirección de estudio más desfavorable (tanto para presiones positivas como para succiones) resultó ser en todos los casos en estudio cuando el viento golpea a la estructura a 45 grados de la dirección perpendicular a la arista del arco de soporte de la estructura.

Las áreas de la superficie más cercanas a los extremos de la arista del arco de soporte pueden quedar sujetas a las succiones más altas ( $C_p = -1.50$ ) mientras que las succiones en las áreas próximas al resto de ella van disminuyendo hasta un 50% aproximadamente ( $-0.71 < C_p < -1.50$ ); las superficies que conforman la curvatura cóncava perpendicular a ésta, y las zonas de la membrana cercanas a las aristas laterales de la estructura, pueden quedar sujetas a succiones menores a un 50% del valor máximo que se puede alcanzar en la estructura ( $C_p$  de hasta -0.66).

Las presiones positivas son bastante menores ( $C_p$  de hasta 0.40) que los valores absolutos de las succiones y pueden ser cercanas a 0.30 en cualquier punto de la superficie dependiendo de la dirección en la que el viento golpea la estructura.

Los valores de las presiones medias obtenidas en este trabajo son aquellas obtenidas únicamente cuando la estructura se encuentra sujeta a un flujo laminar, y por lo tanto no considera los efectos de la capa límite correspondiente dependiente de la localización de la misma (variación de la velocidad con la altura, topografía o rugosidad del terreno), pero que pueden ser compensados por medio de factores incluidos en manuales de diseño en sus métodos cuasi-estáticos de diseño.



Maldonado P. (2009). *Soluciones Constructivas: Membranas Estructurales, Tensión Creativa*. Revista BIT. Corporación de Desarrollo Tecnológico. Cámara Chilena de la Construcción. No. 64, 102-106.

---

Este documento debe citarse como:

M. Gamboa-Marrufo, K. Hincz, V. Tun Cruz (2011). **Medición de presiones aerodinámicas en una estructura de membrana**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 15-3, pp 167-175, ISSN: 1665-529-X.