

# COEFICIENTES AERODINÁMICOS DE CUBIERTAS CÓNICAS DE TENSO-ESTRUCTURAS APLICANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Juan Antonio Álvarez Arellano<sup>1</sup>, Emilio Sordo Zabay<sup>2</sup> y Juan Gerardo Oliva Salinas<sup>3</sup>

Resumen: Se estudió el comportamiento ante acciones de viento de una cubierta cónica típica de las tenso-estructuras, mediante Dinámica de Fluidos Computacional y considerando un perfil de velocidades medias obtenido de pruebas experimentales de túnel de viento. La estructura estudiada consiste en una cubierta de base circular y altura (H) variable. Se consideraron tres alturas desde la base hasta el anillo superior. Se observa que la presencia del anillo ocasiona un cambio dramático en los coeficientes de presión cerca del centro de la cubierta, lo que conduce que la cubierta esté sujeta a levantamiento. Los resultados sugieren que para valores grandes de H, las succiones en la cubierta disminuyen cerca del anillo superior y aumentan del lado de barlovento; presentándose los valores más altos a medida que la altura H disminuye. Los efectos aeroelásticos no se incluyen en los modelos numéricos realizados.

**Palabras clave:** coeficiente de presión, cubierta cónica, Dinámica de Fluidos Computacional, Ingeniería de Viento Computacional, tenso-estructuras.

## AERODYNAMIC COEFFICIENTS OF CONICAL ROOFS OF TENSILE STRUCTURES APPLYING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Abstract: The behavior of typical conical tensile structures under wind forces was studied by computational fluid dynamics and experimental wind tunnel tests. The target structure consists of a roof with circular base and variable height (H). Three heights from the base to the top ring were considered. It was observed that the presence of the ring causes a dramatic change in the pressure coefficients near the center of the roof, which generates uplift. The results suggest that for large values of H, the suction decreases near the top ring and increase at the windward region, showing the highest values as H decreases. Aeroelastic effects there are not included in numerical models.

**Keywords:** conical roofs, Computational Fluid Dynamic, Computational Wind Engineering, pressure coefficient, tensile-structures.

## INTRODUCCIÓN

Debido a las características geométricas tan particulares de las tenso-estructuras, no existen hasta el momento recomendaciones suficientes que permitan diseñar tales estructuras de manera racional. Hay diversas razones que dificultan el estudio experimental, como los problemas de escala, instrumentación y costos computacionales. Existe poca información técnica que permita incluir recomendaciones en Normas y/o Reglamentos. Por ejemplo, Baskaran y Savage (2003) realizaron estudios experimentales de una cubierta

---

<sup>1</sup>Estudiante de Doctorado en Ingeniería Estructural, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Carmen, Campeche, México. E-mail:

[jalvarez@pampano.unacar.mx](mailto:jalvarez@pampano.unacar.mx)

<sup>2</sup>Profesor, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Col. Reynosa Tamaulipas, Delegación Azcapotzalco, México, D.F. E-mail: [esz@correo.azc.uam.mx](mailto:esz@correo.azc.uam.mx)

<sup>3</sup>Investigador, Facultad de Arquitectura, UNAM. Laboratorio de Estructuras, CIEP, Ciudad Universitaria. México, D.F., México. E-mail: [jgos@servidor.unam.mx](mailto:jgos@servidor.unam.mx)

plana considerando membranas de dos materiales con propiedades mecánicas muy diferentes; la membrana M1 elaborada a base de Polivinil Reforzado (PVC) y la membrana M2 a base de Propinil no Reforzado (EPDM). Las pruebas se realizaron en el túnel de viento de la National Research Council of Canada, que cuenta con una sección transversal de prueba de 9m x 9m. La cubierta, con dimensión en planta de 3m x 3m; estaba apoyada sobre muros continuos de 1.37 m de altura y 3 m de longitud. La estructura se sometió a viento normal a la cubierta ( $\alpha = 0^\circ$ ) y en dirección diagonal ( $\alpha = 45^\circ$ ). Se estudió la influencia de la fijación de la membrana, tipo de material y ángulo de incidencia del viento. El estudio muestra mayores deflexiones para M2 que para M1, y patrones de distribución de presión totalmente diferentes a la configuración deformada de las membranas. Se obtienen valores de succiones mayores para la membrana M2 que para la M1. El coeficiente de succión medio máximo para la membrana M2 es de aproximadamente -4.5 y para la membrana M1 de -2.4. Sin embargo, la distribución global de la presión media no parece estar significativamente influenciada por los materiales, sino por las condiciones de apoyo y el ángulo de ataque del viento. Baskaran y Savage (2003) concluyen que se podría introducir una función de transferencia para tomar en cuenta los efectos dinámicos de las vibraciones de la membrana mediante un factor de corrección aplicable a modelos rígidos de cubiertaplana. Otro estudio de interés es el realizado por Sun et al. (2008), quienes desarrollaron pruebas en el túnel de viento de la Universidad de Togli, China, utilizando modelos aeroelásticos simplificados consistentes en cubiertas formadas por membrana en forma de paraboloides y en forma de rombo en planta, y apoyada en cables preforzados. Se observa en este estudio que la distribución de presión de viento es similar en ambos modelos. En  $\alpha = 0^\circ$ , la distribución de presión media en el modelo flexible resulta menor que en el modelo rígido, esto en un área pequeña de la cubierta. Sin embargo, en  $\alpha = 45^\circ$  y  $\alpha = 90^\circ$ , los valores observados en la distribución de presiones medias son 10% mayores que en el modelo rígido. Esto indica que la forma de la cubierta tiene más influencia en  $\alpha = 45^\circ$  y  $\alpha = 90^\circ$  que en  $\alpha = 0^\circ$ .

Respecto a la reglamentación existente en México, solo está en vigencia las recomendaciones incluidas en el Manual de Diseño de Obras Civiles 2008, Diseño por Viento (C.F.E. e I.I.E, 2008), el cual no tiene carácter legal. La versión más reciente de este Manual (2008), incorpora la sección 4.4.6 referente a la respuesta dinámica de cubiertas deformables con forma cónica, donde se recomienda considerar los efectos geométricos no lineales en los cables mediante factores de amplificación dinámica. Dentro de los valores básicos relacionados con la acción de viento a estimar se encuentra el cálculo de la presión media,  $p_m$ , que actúa sobre el área expuesta de cada nodo. En la expresión 4.4.37, aparece el  $C_p$  que representa el coeficiente de presión que puede obtenerse de la sección 4.3.2.9 referente a silos y tanques cilíndricos. Tales coeficientes de presión son aplicables a cubiertas con ángulo de inclinación de  $0^\circ$  a  $30^\circ$ , sin embargo, las cubiertas cónicas suelen tener inclinaciones mayores a treinta grados. También debe tomarse en cuenta que únicamente son aplicables si la cubierta está cerrada en su parte inferior, por lo que no se estaría considerando el levantamiento inducido por el viento en la cara inferior de la misma.

Debido a las características ya mencionadas no se han podido incluir recomendaciones en los códigos de diseño debido a diversas limitaciones reportadas en la literatura técnica. Se espera que estudios futuros puedan reportar información que permita ajustar los resultados obtenidos de modelos rígidos a modelos flexibles.

## **CARACTERÍSTICAS DE LAS CUBIERTAS CÓNICAS**

Las cubiertas cónicas están caracterizadas por un anillo superior y fronteras bien definidas que funcionan como apoyo. La base de las cubiertas cónicas puede tener diversas formas, las hay con base circular, rectangular o apoyada sobre cables. Si la base de la cubierta es rectangular, pueden entonces unirse varias estructuras y cubrir mayor área.

La principal característica de una cubierta cónica es que alrededor del anillo superior usualmente los esfuerzos son mayores que en su base. Por ello suele revisarse que dicha relación no supere límites en términos de esfuerzos que están en función de las características del material textil.

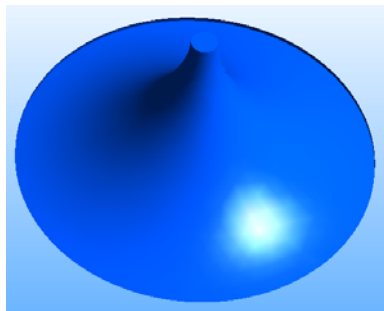
Dentro de las características mecánicas importantes es que las cubiertas cónicas necesitan más tensión radial que circunferencial para conservar su forma; por ello resulta conveniente incrementar el diámetro del

anillo y controlar los niveles de esfuerzos. También la altura del anillo respecto a la base de la cubierta (H) debería ser tal, que permita el escurrimiento de la lluvia y nieve.

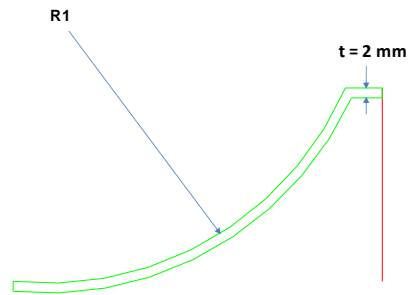
Se seleccionaron cubiertas cónicas con base circular (Figura 1a), considerando como parámetros de forma los indicados en la Tabla 1 y representados en la Figura 1, donde  $\beta$  es el ángulo de la pendiente de la cubierta medido desde su base hasta el borde del anillo superior (Figura 1d), H es la altura de la cubierta medida desde la base de la estructura hasta el anillo superior (Figura 1d), R1 es el radio del arco de círculo de la cubierta (Figura 1b),  $t = 2$  mm es el espesor de la cubierta considerado en el modelo numérico (Figura 1b), R2 es el radio de círculo de la base de la cubierta (Figura 1c), y r es el radio de anillo superior (Figura 1c y 1d), el subíndice p se refiere a la dimensión del prototipo, el subíndice e se refiere a la dimensión de la estructura a escala reducida o espécimen y  $S_G$  es la escala geométrica en porcentaje definida como  $S_G = (D_e/D_p) \times 100$ , donde D es la dimensión característica igual a H o la correspondiente al doble del radio de círculo de la cubierta. La distancia de la base de la cubierta a la base del túnel se consideró como  $k_d = 1.3$  cm. Las dimensiones consideradas fueron seleccionadas debido a que en la práctica profesional las cubiertas están cercanas al suelo, por lo que es

**Tabla 1: Parámetros geométricos de las cubiertas cónicas estudiadas.**

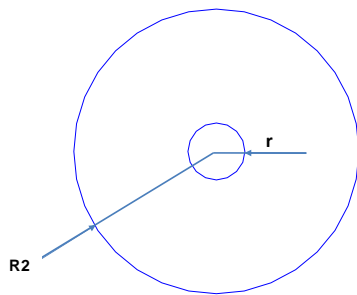
Característica	Identificación del modelo	$\beta$ (en grados)	H(m)		R1(m)		R2(m)		r (m)		$S_G$ (%)
			$H_p$	$H_e$	$R1_p$	$R1_e$	$R2_p$	$R2_e$	$r_p$	$r_e$	
Cubierta con lados abiertos	G14H1	20.32	2.5	0.025	9.5	0.095	7.5	0.075	1.5	0.015	1%
	G14H2	30.01	3.9	0.039	6.6	0.066	7.5	0.075	1.5	0.015	1%
	G14H3	40.17	5.7	0.057	7.2	0.072	7.5	0.075	1.5	0.015	1%



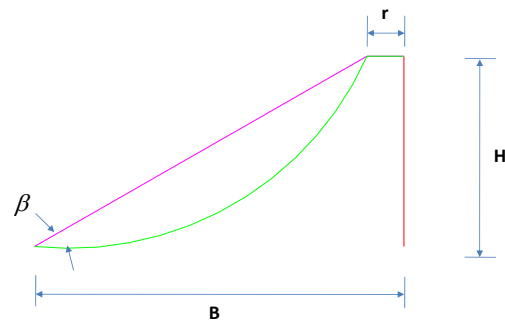
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 1: Esquema modelo G14. Estructuras cónicas. (a) Esquema de las cubiertas estudiadas; (b) Radio de círculo R1 y espesor de la cubierta t; (c) Radio de círculo de la base R2 y radio de círculo del anillo superior r; (d) Definición del ángulo  $\beta$ , altura de la cubierta H y radio r.**

## PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

Bridgens et al. (2009), realizaron estudios paramétricos de cubiertas de tenso-estructuras en forma cónica y de silla de montar mediante software comercial para diseño de cubiertas. El estudio consideró diversas propiedades de materiales como módulo de elasticidad, módulo al cortante así como parámetros geométricos. Dentro de las cargas aplicadas, la correspondiente al viento consiste en un valor de levantamiento constante aplicado en toda la superficie de cada caso estudiado. Bridgens et al. (2009) comentan que no fue posible considerar un valor racional de fuerzas de viento debido a la complicación para estimarlas.

Debido a que los valores reportados aquí forman parte de un conjunto de estudios realizados en el túnel de viento de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A), cuyos modelos a escala reducida se construyeron de acrílico de 2 mm de espesor, las propiedades de los materiales utilizadas en los modelos numéricos de las cubiertas son las correspondientes al Polimetilmetacrílico, con  $t = 2$  mm,  $\gamma = 1180$  kg/m<sup>3</sup>,  $\sigma_t = 1180$  Pa,  $\epsilon_u = 4.5\%$ ,  $E = 2.93 \times 10^9$  Pa,  $\sigma_f = 1.1 \times 10^8$  Pa,  $\nu = 0.4$ , donde  $t$  = espesor del material utilizado en la cubierta,  $\gamma$  = peso volumétrico,  $\sigma_t$  = esfuerzo en tensión,  $\epsilon_u$  = deformación unitaria,  $E$  = módulo de elasticidad,  $\sigma_f$  = esfuerzo en flexión,  $\nu$  = módulo de Poisson. Los estudios experimentales y numéricos realizados no incluyen efectos aeroelásticos.

## PRUEBAS EN TÚNEL DE VIENTO

El perfil de velocidades medias implementado (ecuación 1) en los estudios reportados fue obtenido de mediciones experimentales en el túnel de viento de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México. La sección transversal del túnel de referencia es de 1m x 1m, con longitud de sección de prueba de 1.2 m. El perfil representa rugosidad aerodinámica ( $z_0$ ) típica de zonas urbanas con gran densidad de edificios altos. El índice de turbulencia considerado fue de 5%.

$$U(z) = 1.435 \ln(z) + 8.76 \quad (1)$$

Los parámetros físicos fueron  $\rho = 1.185$  kg/m<sup>3</sup>,  $\mu = 1.795 \times 10^{-5}$  kg/ms y  $V_{med} = 5.437$  m/s, donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $\mu$  es la viscosidad absoluta del aire y  $V_{med}$  es la velocidad media del viento. El número de Reynolds alcanzado en el túnel considerando como longitud característica la longitud de la sección de prueba, fue de  $5.384 \times 10^5$ .

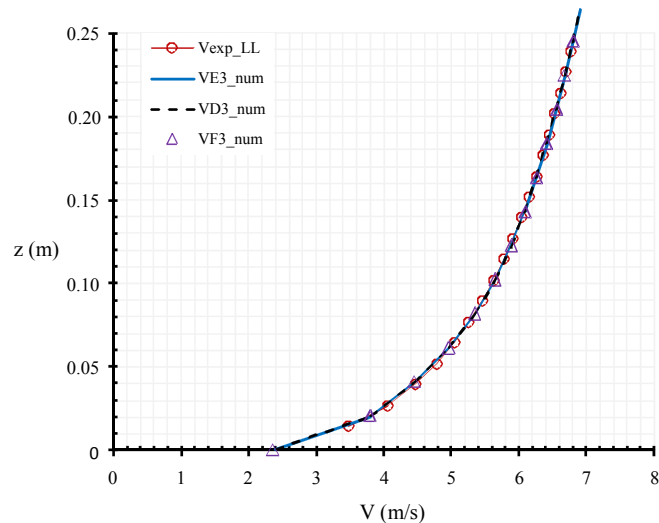
## ESTUDIOS PREVIOS DEL TÚNEL DE VIENTO VIRTUAL

Se ha observado que el problema fundamental en estudios de la Ingeniería de Viento Computacional es la simulación de la Capa Límite Atmosférica, dentro de la cual se encuentra el perfil de velocidad aplicado en la frontera ENTRADA, el cual se puede modificar antes de incidir con la estructura en estudio. Richards y Norris (2011), reportan diversas medidas correctivas para evitar que el perfil aplicado inicialmente se modifique a lo largo de la distancia previa al punto de análisis. La medida implementada en el presente estudio consiste en minimizar la longitud de entrada del dominio. La hipótesis considerada se justifica debido a que el túnel de viento de la UAM-A es corto y los perfiles de viento considerados fueron medidos a una distancia corta de la ubicación de los casos estudiados. Los perfiles mostrados en la Figura 2 corresponden al eje transversal a la dirección del viento previo al punto donde se colocó cada modelo estudiado. Se observa (Figura 2) que el perfil aplicado  $V_{exp\_LL}$  se conserva en la cercanía del modelo en el eje del dominio en los tres puntos transversales de la sección del modelo (ver perfil VE3\_num,  $x=0$  m,  $y = -0.20$  m) y hacia las paredes laterales del mismo (ver VDE3\_num, VF\_num, en  $x = 0.28$  m,  $x = -0.28$  m,  $y = -0.2$ ) a una distancia de 0.28 m. Lo anterior, permitió verificar que el perfil de viento aplicado inicialmente no se modifica.

## CORRECCIÓN POR BLOQUEO

Según el ASCE (1999), el porcentaje de bloqueo para evitar posteriores correcciones debidas a la interferencia ocasionada por el modelo en estudio debe ser menor de 5%. De acuerdo a las dimensiones de la

sección transversal de pruebas, se tiene un área total de  $0.98 \text{ m}^2$ , el área proyectada de la cubierta perpendicular a la dirección viento es de  $0.00225 \text{ m}^2$ , lo que conduce a un porcentaje de bloqueo de  $0.25 \%$ . De acuerdo a lo anterior, el porcentaje de bloqueo es menor de  $5\%$  por lo que no se requiere corrección por bloqueo.



**Figura 2: Comparación del perfil de velocidad en el eje E-3, D-E, F-3, en el modelo numérico del túnel. Modelo de turbulencia LRR.**

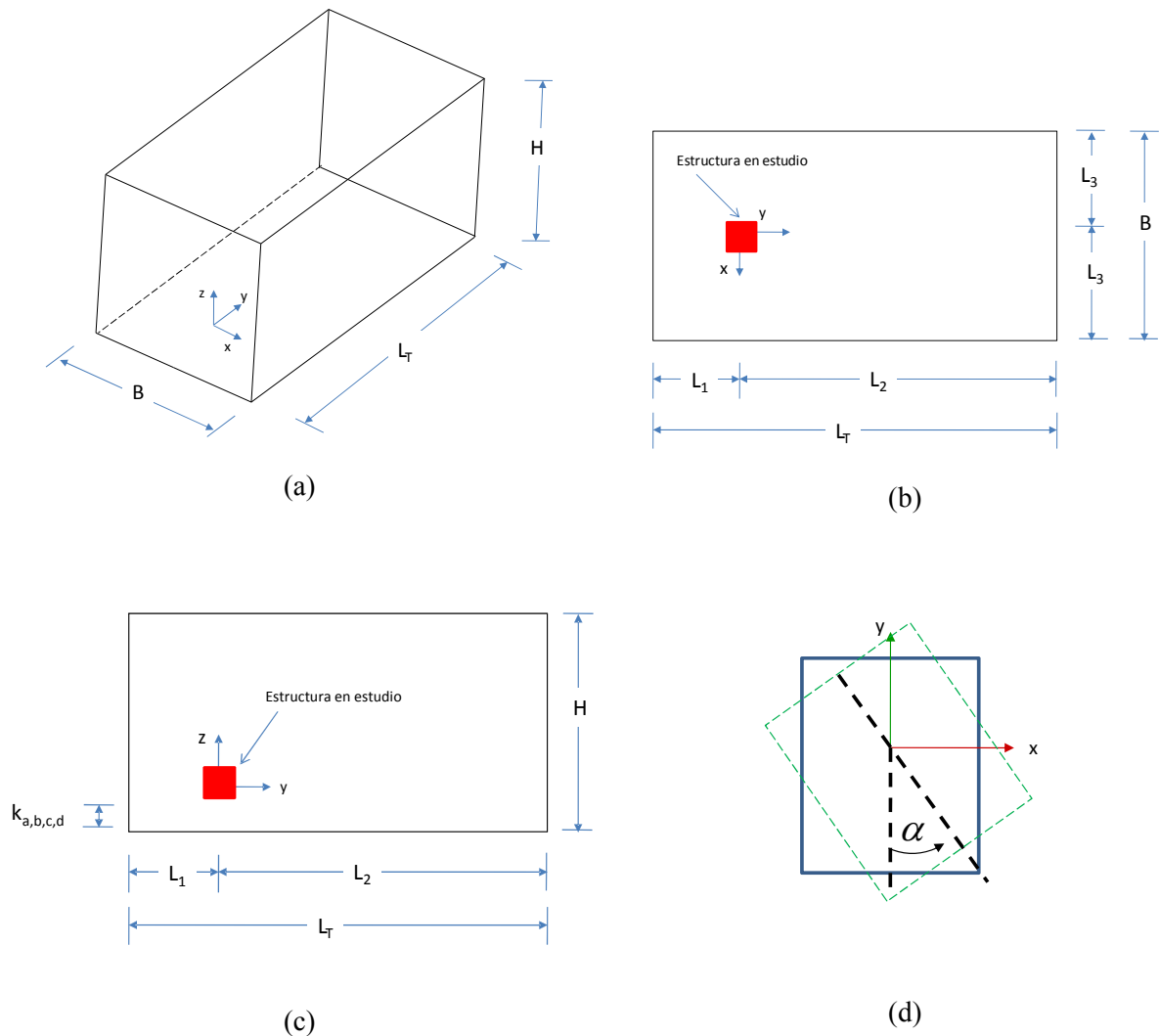
## DEFINICIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL DOMINIO COMPUTACIONAL

Otro aspecto importante en la simulación numérica en la Ingeniería de Viento Computacional es la definición de las dimensiones del dominio físico del problema. Franke et al.(2007) recomiendan definir como  $H_{\max}$  a la altura máxima de la estructura a estudiar. Posteriormente se calcula como  $5H_{\max}$  la distancia del borde de la estructura en estudio a las paredes laterales del dominio de cálculo,  $15H_{\max}$  la distancia del borde de la estructura del lado de sotavento a la frontera de salida y  $6 H_{\max}$  como la distancia de la base del túnel a la frontera de la cara superior.

En el presente estudio se consideró  $5H_{\max}$  del centro del dominio a las paredes laterales del mismo. Lo anterior, coincide con la colocación de los modelos en los ensayos realizados en el túnel de viento donde  $B = H = 1.0 \text{ m}$ ,  $L_1 = 0.5 \text{ m}$  y  $15H_{\max}=L_2=1.5 \text{ m}$ , cuyos valores se obtuvieron del estudio de modelos de mayor dimensión previamente estudiados en los que  $H_{\max} = 0.10 \text{ m}$ . La interpretación de las dimensiones anteriores, se muestran en la Figura 3; donde  $x,y,z$  son el sistema de referencia,  $B$  el ancho del dominio,  $L_T$  el largo del dominio y  $H$  la altura del mismo (Figura 3a);  $L_1, L_2, L_3$  son dimensiones para colocación de la estructura en estudio (Figura 3b);  $k_{a,b,c,d}$  indica la ordenada de la base de la cubierta en estudio a la base del dominio computacional (Figura 3c) y  $\alpha$  es la orientación de la estructura en estudio (Figura 3d).

## ELEMENTOS FINITOS IMPLEMENTADOS EN EL ANÁLISIS NUMÉRICO

Los elementos finitos incluidos en ANSYS 13 implementados en los modelos estructurales de las cubiertas estudiadas fueron el SOLID186, el cual es un elemento sólido de alto orden de 20 nodos que exhibe comportamiento de desplazamiento cuadrático. Los elementos están definidos por 20 nodos con tres grados de libertad por nodo: traslación nodal  $x, y$  y  $z$ . Los elementos permiten considerar grandes deflexiones y grandes deformaciones.

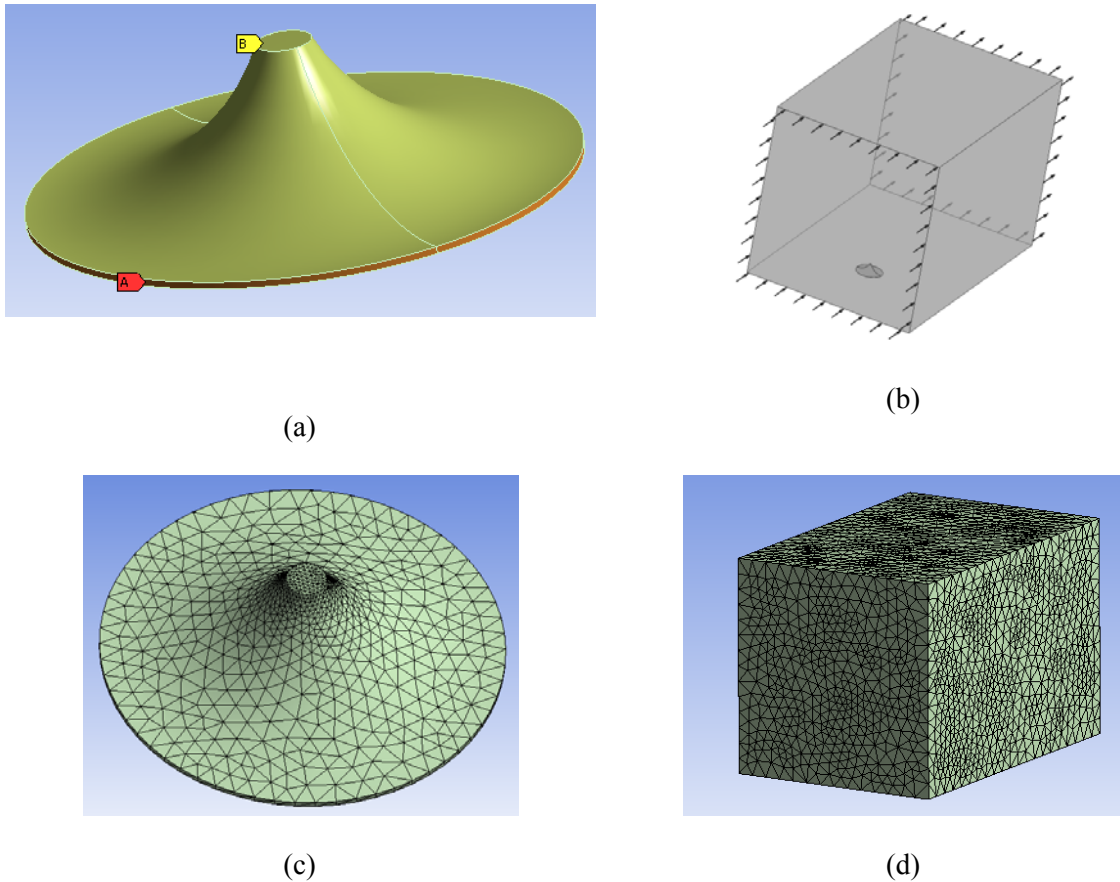


**Figura 3: Dimensiones para la ubicación de los modelos en el dominio de cálculo TN. (a) Definición del sistema de referencia del dominio de cálculo (x,y,z) y dimensiones del mismo; (b) Dimensiones  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  para colocación de la estructura en estudio; (c) Definición del parámetro  $k$ ; (d) Esquema general de orientación de la cubierta.**

El elemento SOLID186 utilizado fue el elemento sólido estructural homogéneo que permite modelar mallas irregulares; también es posible realizar modelos considerando materiales compuestos. La versión de bajo orden es el elemento SOLID185 con 8 nodos, en el que se pueden considerar presiones y fuerzas de cuerpo. El elemento SOLID187 es un elemento sólido de alto orden de 10 nodos que exhibe comportamiento de desplazamiento cuadrático. Las opciones seleccionadas en los elementos finitos implementados fueron sólidos homogéneos, con comportamiento de rigidez flexible que permite considerar deformaciones durante el proceso de solución. Para la definición de la interfaz en el análisis de interacción viento–estructura (indicado por la etiqueta B en la Figura 4 (a)), los elementos finitos utilizados fueron los elementos CONTA 173, CONTA 174, CONTA 175 y TARGE 170. El número de elementos fue de 189300 tetraedros, 50274 prismas y 228 pirámides, sumando un total de 239802 elementos. Para la solución del problema se consideró

formulación en desplazamiento. La simulación numérica se realizó mediante una estación de trabajo WS DELL PRECISION T7500, Intel Xeon de 8 procesadores.

Respecto a las condiciones de apoyo, la estructura se consideró fija en su base (indicado por la etiqueta A en la Figura 4 (a) y libre en otros bordes. El mallado de la cubierta y del dominio computacional se muestra en la Figura 4 (c) y Figura 4 (d), respectivamente. Se consideró una malla más fina en la cercanía entre la cubierta y la frontera BASE, para conservar continuidad entre ambas fronteras y cumplir con los requisitos discutidos por Blocken et al. (2007).



**Figura 4: Condiciones de frontera y discretización de las cubiertas estudiadas. (a) Asignación de superficie de contacto y de apoyo; (b) Esquema de la ubicación de la cubierta estudiada en el dominio de análisis; (c) Mallado implementado en la cubierta; (d) Esquema del mallado del dominio de análisis.**

## MODELOS DE TURBULENCIA IMPLEMENTADOS

Se realizaron estudios para identificar posibles variaciones al implementar diversos modelos de turbulencia. Existen antecedentes que indican diferencias significativas al implementar por ejemplo el modelo k- $\epsilon$  estándar, Grupo Renormalizado y Simulación de Grandes Torbellinos conocidos por sus siglas en inglés RNG (Re-normalization Group) y LES (Large Eddy Simulation) SMAGORINSKY (por ejemplo Michalsky et al. 2011; Reiter S., 2008; Kim y Yang, 2004). Se observa sobrestimación de presiones en puntos de controlde geometrías prismáticas de sección cuadrada, para el que existen gran cantidad de resultados experimentales. Dado que se asumió que el perfil es constante a lo largo de la sección de análisis, es necesario

cumplir con las condiciones de frontera para capa límite turbulenta horizontal homogénea descrita para diversos modelos de turbulencia.

El modelo que generalmente sobrestima el valor de la Energía Cinética Turbulenta (ECT) es el modelo  $k-\varepsilon$  estándar, el cual ha sido estudiado ampliamente para tratar de superar las diferencias mostradas. Según reporta Richard y Norris (2011), el modelo de Transporte de Esfuerzos de Reynolds quasi-isotrópico conocido como LRR por sus siglas en inglés (quasi-isotropic model of Launder, Reece and Rodi (1975) es el que proporciona mejores resultados cuando se modela viento incidiendo en una sección prismática bidimensional. No se encontró información referente al mejor modelo de turbulencia para estructuras de cubiertas como las estudiadas.

Los parámetros considerados en la implementación del modelo de turbulencia LRR fueron  $C_{\mu LRR} = 0.1152$ ,  $\sigma_{\varepsilon LRR} = 1.1$ ,  $C_{\varepsilon 1 LRR} = 1.45$ ,  $C_{\varepsilon 2 LRR} = 1.9$ . Los parámetros anteriores permiten verificar el valor de la constante de Von Karman a partir de la ecuación (2), la cual proporciona un valor de 0.404, cuyo valor se encuentra de los valores recomendados.

$$k_{LRR} = \sqrt{\frac{(C_{\varepsilon 2 LRR} - C_{\varepsilon 1 LRR}) s_{\varepsilon LRR}}{2.975^3 C_{\mu LRR}}} \quad (2)$$

$$k_{LRR} = \sqrt{\frac{(1.9 - 1.45) 1.1}{2.975^3 (0.1152)}} = 0.404$$

La expresión (2) se obtuvo al aplicar las condiciones de homogeneidad descritas por Richards y Hoxey (1993) y Richards y Norris (2011) a la ecuación de conservación.

Además de la revisión anterior para validar la aplicación del modelo de turbulencia LRR, se realizaron estudios de secciones prismáticas cuadradas y se obtuvieron valores a  $2H/3$  para verificar valores de interés como el punto de estancamiento en la cara de barlovento.

## CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA

En la Figura 4 (a) y 4 (b) se muestra el esquema de las condiciones de frontera, y la descripción correspondiente se indica en la Tabla 2. En relación a la condición inicial se aplicó el perfil de velocidades media PLN12, considerando un índice de turbulencia de 5% que corresponde a nivel de turbulencia media. Las condiciones de frontera consideradas en los modelos se resumen en la Tabla 2. En la frontera ENTRADA,  $u_y(z)$  corresponde a las velocidades medias PLN12 (ecuación 1). Respecto a la frontera BASE, se aplicó la rugosidad obtenida del estudio experimental e incluida en la ecuación (1) con valor de  $z_0 = 0.00223$  m. Todos los estudios se realizaron considerando una superficie de cubierta lisa.

## ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES AERODINÁMICOS MEDIANTE DFC

En la simulación numérica y experimentos en túnel de viento, el coeficiente de presión medio se estimó según la ecuación (3), la cual se aplica también a valores de pruebas experimentales de túnel de viento.

$$\overline{C_{pi}} = \frac{\overline{P_i} - P_E}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2} \quad (3)$$



donde  $\overline{P}_i$  es la presión promedio en el tiempo en cada punto de la cubierta analizada,  $q_{ref} = \frac{1}{2}\rho V_{ref}^2$ , es la presión dinámica en el punto de referencia,  $\rho$  es la densidad del viento, y  $V_{ref}$  es la velocidad en el punto de referencia respectivamente. Los coeficientes aerodinámicos que se presentan a continuación se obtuvieron a partir del análisis numérico de la interacción entre el modelo de cubierta y el perfil de viento aplicado como condición inicial PLN12. Se obtuvieron campos de velocidad y presión a partir de los cuales se estimaron distribuciones de presión sobre la superficie de la cubierta. La presión estática  $P_E$  se obtuvo de la simulación del flujo de viento considerando el túnel numérico vacío.

**Tabla 2: Condiciones de frontera consideradas en la simulación numérica.**

Superficie	Designación	Condición
Piso del túnel	BASE	$u_x = u_y = u_z = 0$
Paredes laterales	PARED1, PARED2	$u_x = u_z = 0$
Sección de salida	SALIDA	$P = 0$
Sección de entrada	ENTRADA	$u_y(z), u_x = u_z = 0$
Techo de túnel	TAPA	$u_x = u_z = 0$
Cubierta	CUBIERTA	$u_x = u_y = u_z = 0$

De manera semejante la presión dinámica de referencia  $q_{ref}$  se obtuvo de la misma simulación a la altura de referencia de cada modelo definida como el punto más alto del caso estudiado, por ejemplo para el modelo G14H1 (Ver Tabla 1) la altura de referencia es  $z_{ref} = 3.8$  cm para el caso G14H2,  $z_{ref} = 5.2$  cm. También se calcularon coeficientes de presión netos ( $C_{pn}$ ) sobre la cubierta definidos por la ecuación (4).

$$C_{pn} = C_{ps} - C_{pi} \quad (4)$$

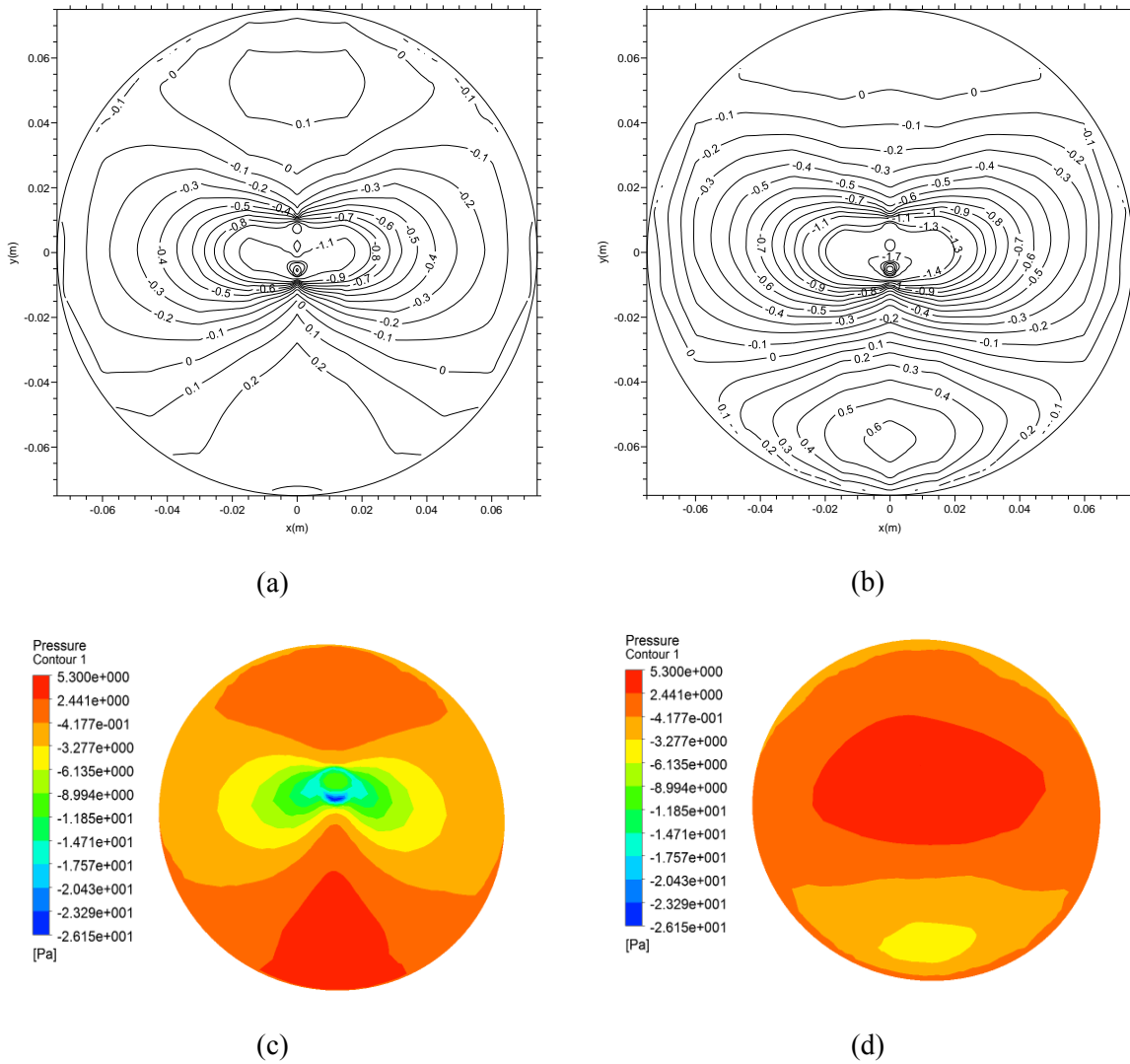
donde  $C_{ps}$  es el coeficiente de presión en la cara superior de la cubierta y  $C_{pi}$  el coeficiente de presión en la cara inferior.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se realizaron estudios de cubiertas de base circular, considerando lados abiertos y los parámetros indicados en la Tabla 1. Como se observa en la Figura 1, el ángulo  $\beta$  está en función de la altura  $H$ , dado que el radio  $R_2$  de la base y el radio  $r$  del anillo superior se consideraron constantes.

Los resultados mostrados en la Figura 5 corresponden a  $H = 2.5$  cm, la altura menor de los casos estudiados. El viento actúa ( $\alpha = 0^\circ$ ) a partir del borde inferior de las Figuras 5, 6 y 7 mostradas. Los empujes mayores se presentan en la cara superior del lado de incidencia del viento, Figura 5 (c). Sin embargo, en la cercanía del ápice se incrementan rápidamente hasta alcanzar los valores máximos observados en toda la cubierta. En la cara inferior del borde de impacto se presentan succiones, los cuales varían hasta generar empuje sobre la mayor parte de la superficie. Los coeficientes  $C_{ps}$  se muestran en la Figura 5 (a) y los  $C_{pn}$  en la Figura 5 (b).

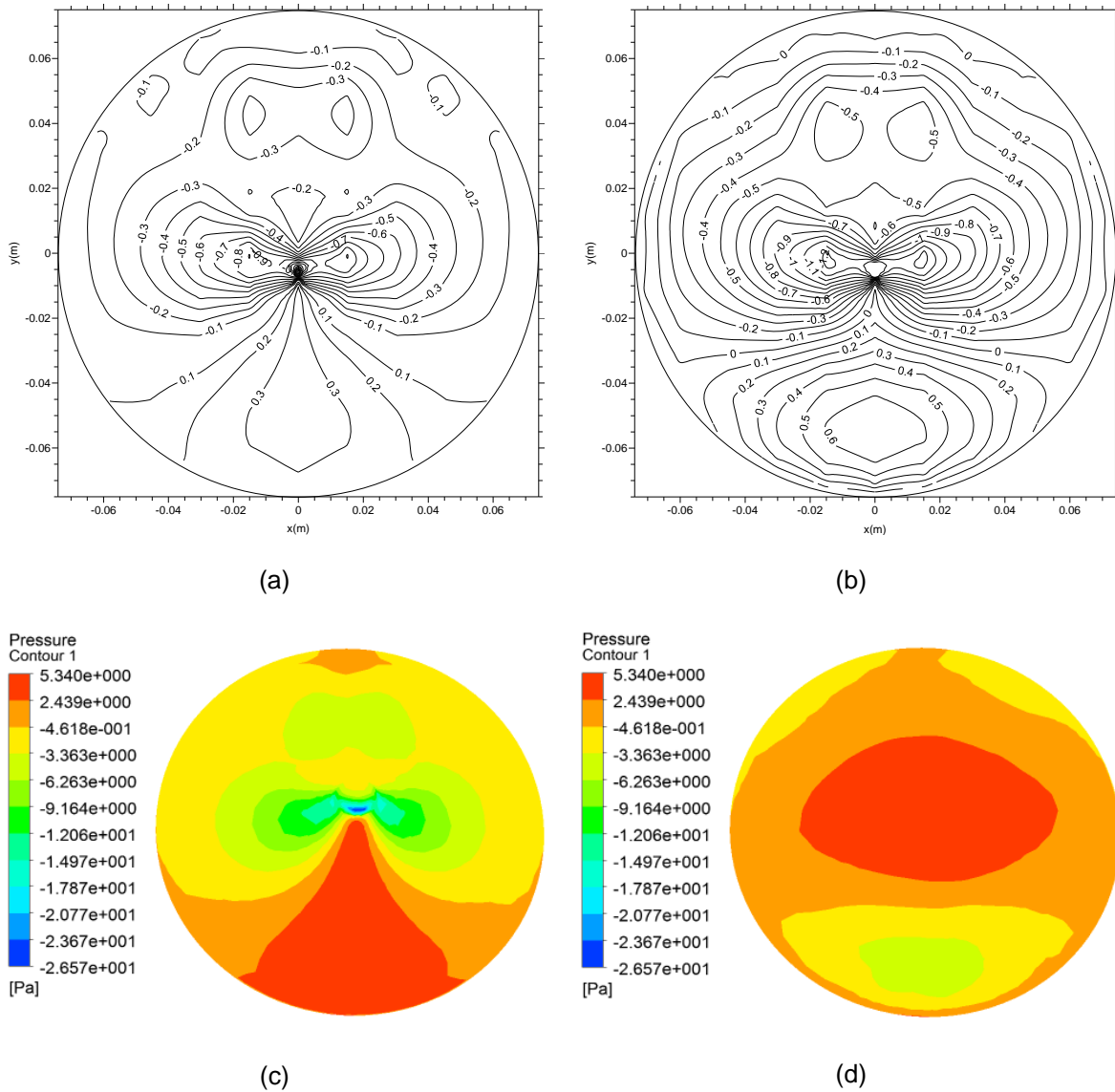
Se observa que en el borde de barlovento los valores de  $C_{pn}$  van de 0 a +0.6; sin embargo, en la mayor parte de la cubierta se presentan coeficientes negativos, lo que indica que la cubierta estará sujeta a levantamiento. Los correspondientes a  $H = 3.9$  cm se muestran en la Figura 6.



**Figura 5: Presiones y coeficientes de presión para cubierta cónica con H1 (G14H1), cuando  $\alpha = 0^\circ$ . (a) Coeficientes de presión  $C_{ps}$ ; (b) Coeficientes de presión netos  $C_{pn}$ ; (c) Presiones en cara superior de la cubierta; y (d) Presiones en cara inferior de la cubierta.**

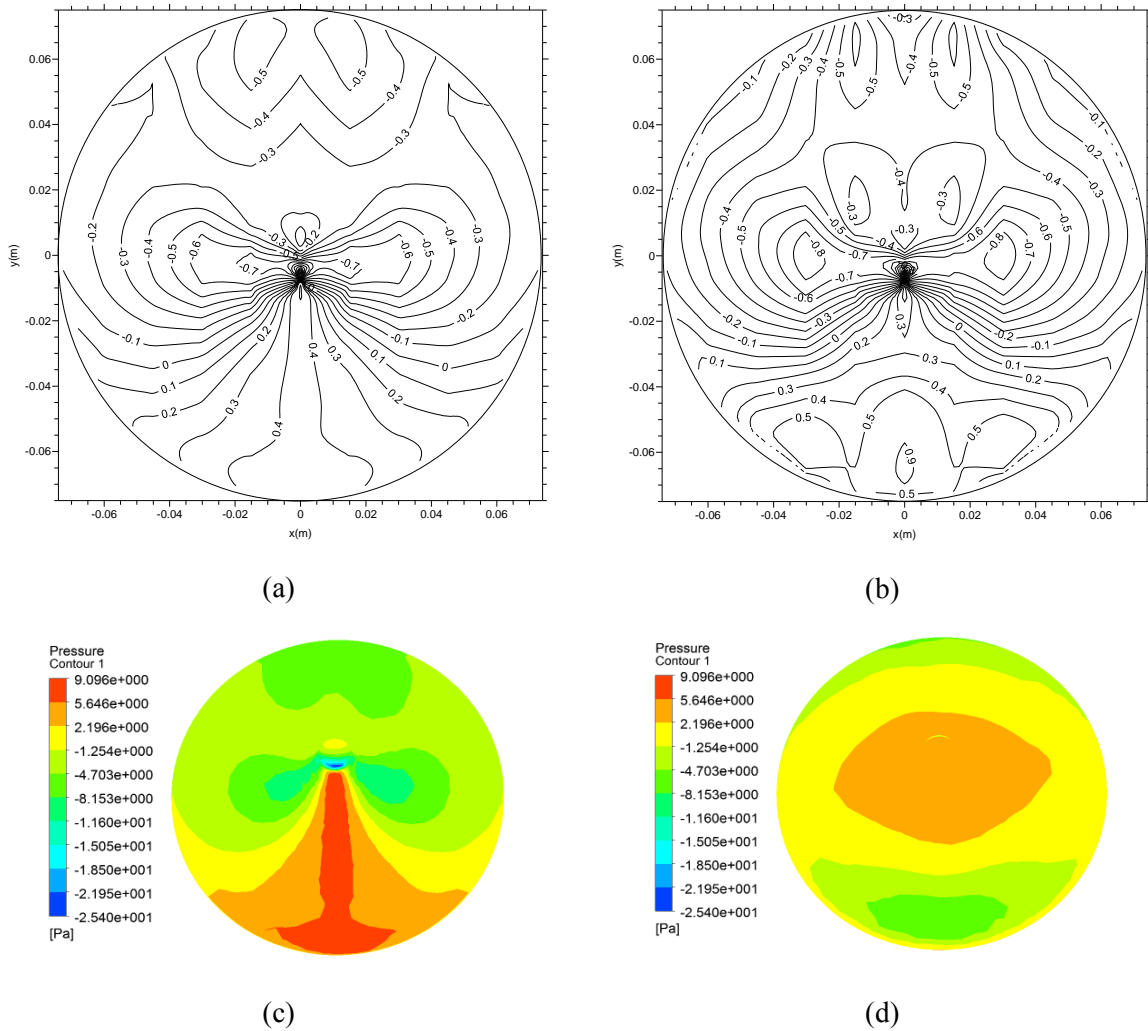
Se observa que el área sujeta a presiones de empuje (Figura 7c) aumentó en relación al caso G12H1, también ocurren succiones importantes del borde del lado sotavento cara superior. En la cara inferior la distribución es semejante para la Figura 5 (d), Figura 6 (d) y Figura 7 (d).

En la Figura 6 (a) se muestran las isobaras de los  $C_{ps}$  correspondientes a las presiones mostradas en la Figura 6 (c). Al comparar los  $C_{pn}$  del caso H1 (Figura 5b) y H2 (Figura 6b) en zona cercana al anillo superior, se observa disminución de  $C_{pn} = -1.7$  a  $C_{pn} = -1.2$ , lo cual es favorable. También se observa cambio importante en los valores hacia el borde de salida de -1.1 a -0.9, así como mayor dispersión en los  $C_{pn}$ . Para H3 ocurre disminución del área expuesta a empuje (Figura 7c) y reducción considerable en las succiones de la cara superior e inferior (Figura 7d).



**Figura 6: Presiones y coeficientes de presión para cubierta cónica con H2 (G14H2), cuando  $\alpha = 0^\circ$ . (a) Coeficientes de presión  $C_{ps}$ ; (b) Coeficientes de presión netos  $C_{pn}$ ; (c) Presiones en cara superior de la cubierta; y (d) Presiones en cara inferior de la cubierta.**

Se trazaron los coeficientes de presión a la largo de eje de la cubierta en dirección del viento para los casos estudiados según se muestra en la Figura 8. En el lado de sotavento, los coeficientes  $C_{ps}$  y  $C_{pi}$  para H1 ( $C_{ps\_H1}$  y  $C_{pi\_H1}$ ) y H2 ( $C_{ps\_H2}$  y  $C_{pi\_H2}$ ) son semejantes, pero los  $C_{ps}$  correspondientes a H3 se incrementan. En el borde del anillo superior de la cubierta los  $C_{ps}$  se incrementan drásticamente a valores de succión, debido a que la superficie cóncava se interrumpe por la presencia del anillo. Los  $C_{pi}$  correspondientes a la cara inferior se observan estables y corresponden a empuje de la cubierta desde la cara inferior, siendo los menores coeficientes los correspondientes a H3. Respecto a  $C_{pn}$ , los valores máximos cerca del borde de barlovento corresponden a H3 con valor de  $C_{pn} = +1.1$ . En el centro de la cubierta con  $C_{pn} = -2.7$  corresponden a H1 (Figura 8), lo que indica que si H se incrementa, disminuyen las succión debida a la presencia del anillo superior. Esto podría controlar el levantamiento de la cubierta, así como los esfuerzos alrededor del ápice.



**Figura 7: Presiones y coeficientes de presión para cubierta cónica con H3 (G14H3), cuando  $\alpha = 0^\circ$ . (a) Coeficientes de presión  $C_{ps}$ ; (b) Coeficientes de presión netos  $C_{pn}$ ; (c) Presiones en cara superior de la cubierta; y (d) Presiones en cara inferior de la cubierta.**

En puntos intermedios entre el ápice y el borde de salida los  $C_{pn}$  para H2 y H3 son semejantes. En dirección transversal a la dirección del viento (Figura 9), los  $C_{pn}$  mayores corresponden a H1. En esta región la cara inferior de la cubierta está sujeta a empuje y la superior a succión, lo que conduce a levantamiento, es decir, a  $C_{pn}$  negativos. También se observa que las succiones mayores ocurren en el borde del anillo superior. Las succiones mayores corresponden a H1 y las menores a H3.

Con base en lo anterior, se concluye que en cubiertas cónicas como las mostradas, el efecto predominante es el levantamiento de la misma, si H se incrementa disminuyen los  $C_{pn}$  cercanos al anillo superior disminuyen, lo cual es conveniente para controlar los esfuerzos que se generarían en la zona correspondiente al anillo superior.

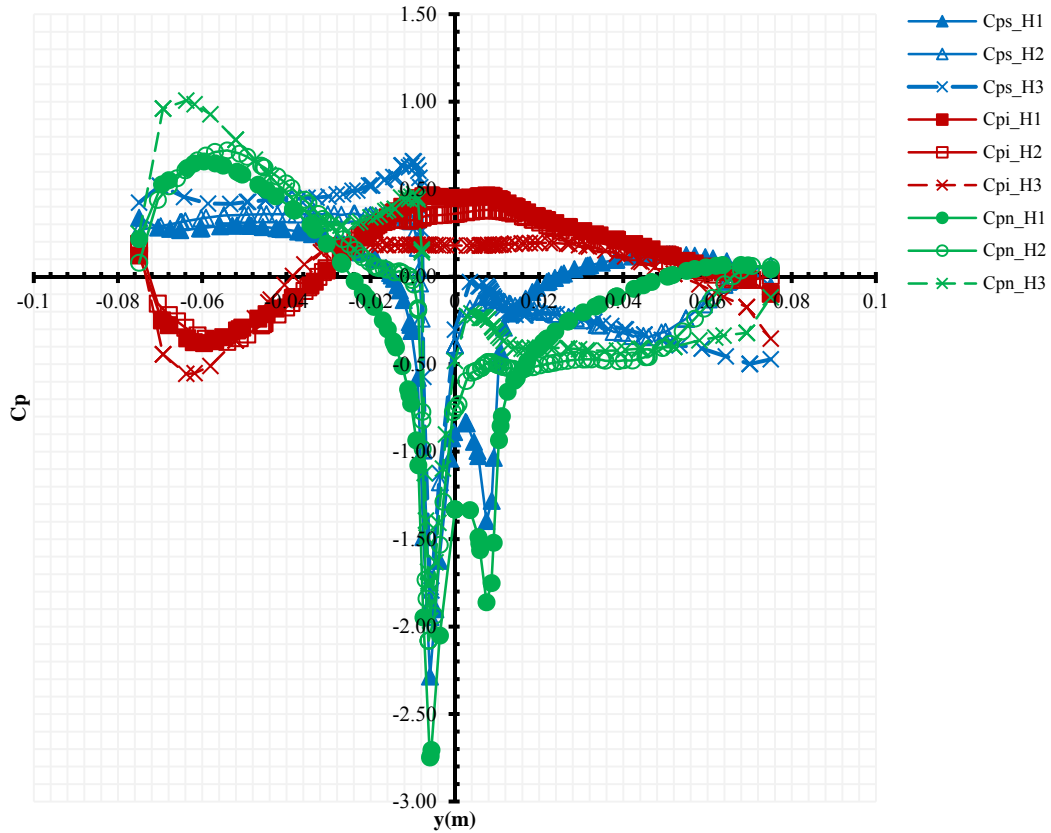


Figura 8: Comparación de coeficientes de presión medios  $C_p$ , eje central en la dirección del viento, modelo G14H1, G14H2 y G14H3, cuando  $\alpha = 0^\circ$ .

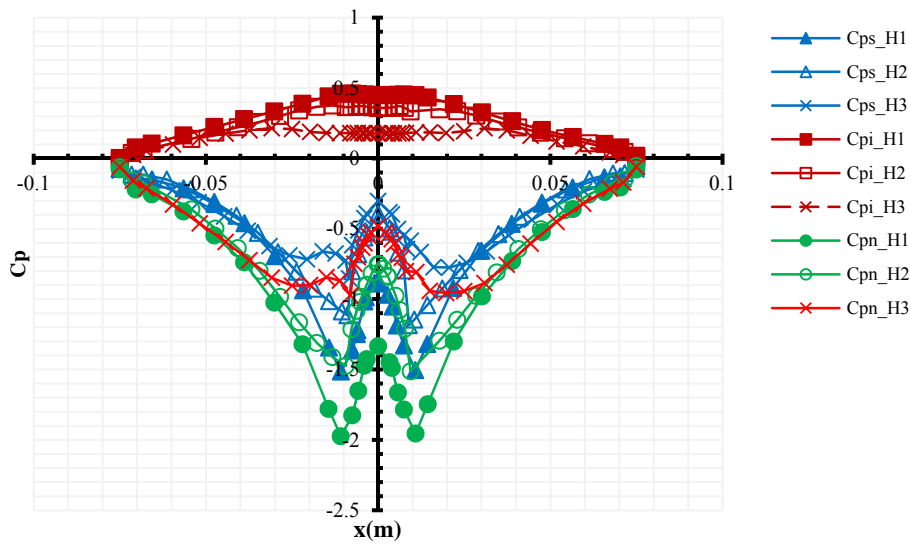


Figura 9: Coeficientes de presión medios  $C_p$ , eje transversal a la dirección del viento, Modelo G14H1, G14H2 y G14H3, cuando  $\alpha = 0^\circ$ .

## CONCLUSIONES

Respecto a las cubiertas cónicas estudiadas, se concluye que en el borde del anillo superior se incrementan drásticamente los valores de succión, debido a que la superficie cóncava se interrumpe por la presencia del anillo. Por tal razón, su dimensión resulta fundamental para controlar los esfuerzos que ocasionará la acción del viento en regiones cercanas a este.

Los  $C_{pi}$  correspondientes a la cara inferior se observan constantes en esta región y corresponden a empuje de la cubierta desde la cara inferior. Si  $H$  se incrementa, la succión cercana al anillo superior disminuye, lo cual es conveniente para controlar el levantamiento de la cubierta. Este resultado debe considerarse en la fijación de la membrana a los apoyos.

Con base en lo anterior, se concluye que en cubiertas cónicas como las mostradas, el efecto predominante es el levantamiento de la misma.

Los resultados reportados permitirán identificar las regiones de interés que debieran analizarse en pruebas experimentales cuando no se tienen antecedentes, y de esta manera disminuir costos y tiempo en la realización de pruebas experimentales.

## RECONOCIMIENTOS

Este trabajo forma parte de la investigación realizada por el autor, en el programa de Doctorado en Ingeniería Estructural en la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma Metropolitana – Unidad Azcapotzalco. El autor agradece el apoyo económico recibido durante la realización del Doctorado de parte del Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) y de la Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR).

## REFERENCIAS

- ASCE (1999). *Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures*, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 67, Task Committee on Manual of Practice for Wind Tunnel Testing of Buildings and Structures, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- Baskaran A. y Savage M.G. (2003). “Wind pressure measurements on full scale flat roofs”, *Interface (Journal of the Roof Consultants Institute, Canada)*, Vol. 21, No. 4, pp. 7-21.
- Blocken B., Stathopoulos T. y Carmeliet J. (2007). “CFD Simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems”, *Atmospheric Environment*, Vol. 41, pp. 238-252.
- Bridgens B.N., Gosling P.D., Patterson C.H., Rawson S.J., y Hove N. (2009). “Importance of material properties in fabric structure design & analysis”, *Proceedings of the Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures: Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures*, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- C.F.E. - Comisión Federal de Electricidad e I.I.E.- Instituto de Investigaciones Eléctricas (2008). *Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Viento*, México, D.F.
- Franke J., Hellsten A., Schünzen H. y Carissimo B., Eds. (2007). “Best practice guideline for the CFD simulation of flow in the urban environment”, *COST Action 732*, Meteorological Institute, University of Hamburg, Hamburg, Germany.
- Kim D. H. y Yang K.S. (2004). “Large eddy simulations of turbulent flow past a square cylinder confined in a channel”, *Computers and Fluids*, Vol. 33, Issue 1, pp. 81-96.
- Launder B.E., Reece G.J. y Rodi W. (1975). “Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 68, pp. 537-566.

- Reiter S. (2008). "Validation processes for CFD Simulations of wind around buildings", *European Built Environment CAE Conference*, ANSYS, Inc., London, U.K.
- Richards P.J. y Hoxey, R.P. (1993). "Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- $\epsilon$  turbulence model", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.46 and 47, pp. 145-153.
- Richards P.J. y Norris S.E (2011). "Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models revisited", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 99, pp. 257-266.
- Sun X.Y., Wu Y., Yang Q. y Shen S. (2008). "Wind tunnel test on the aeroelastic behavior of pretensioned saddle-shaped suspended roofs", BBAA VI, *International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics and Applications*, Milano, Italy, pp. 20-24.

