

DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES DE VIENTOS HURACANADOS SOBRE TANQUES CORTOS MEDIANTE ESTUDIOS DE TÚNEL DE VIENTO

Genock Portela-Gautier¹, Luis A. Godoy² y Raúl Zapata-López²

RESUMEN: La información sobre el patrón de distribución de presiones de viento en estructuras especiales es un problema vital para su análisis estructural. Este es el caso de tanques metálicos de pared cilíndrica localizados en islas del Caribe, los cuales han presentado tanto daños leves como severos durante azotes de diversos huracanes. En respuesta a estas necesidades se realizó una inspección de distintos tanques localizados en fábricas y refinerías de la zona sur y noreste de Puerto Rico, con el fin de determinarse geometrías de techo y razones de esbeltez típicas usadas en la práctica constructiva. Una vez establecidas, se construyeron modelos a escala que se sometieron a pruebas experimentales en el laboratorio del túnel de viento. Finalmente, se muestran las distribuciones resultantes de las pruebas de tanques aislados y tanques escudados, discutiéndose comparaciones con estudios previos relacionados al tema.

INTRODUCCIÓN

El colapso de tanques metálicos utilizados para almacenar diversos fluidos, como agua, aceite, petróleo, gasolina y kerosén, es una preocupación tanto para compañías privadas como para agencias gubernamentales de mitigación de daños, debido al impacto económico y ambiental producido por derrames de este tipo. Pero el problema es además serio para las compañías que manejan esos tanques, debido a que se pierde capacidad de almacenamiento. La mayor causa de colapso de tanques en el Caribe se debe a la acción de huracanes como Hugo (1989), Marilyn (1995) y Georges (1998), los cuales afectaron la estabilidad de tanques localizados en las islas de St. Croix, St. Thomas y Puerto Rico, observándose daños estructurales en tanques cortos metálicos de geometría circular (ver, por ejemplo Flores y Godoy 1998, Godoy 2000). Los daños observados variaron dependiendo de la geometría del techo, la topografía y de la localización de un tanque rodeado por un grupo de tanques. En el caso de tanques metálicos de pared delgada, el colapso bajo cargas de viento es ocasionado por un proceso de inestabilidad del equilibrio, comúnmente conocido como pandeo de la lámina.

Una dificultad que encuentran los ingenieros estructurales para analizar este problema es que no existe información adecuada sobre la distribución de presión de viento para tanques cortos, especialmente en la zona del techo. Existen básicamente dos formas de atender este problema: Una es recurriendo a experimentos en túneles de viento y otra empleando modelos de elementos finitos para el fluido sobre un tanque de paredes rígidas, tal como se reporta en Falcinelli *et al.* (2002).

El trabajo que se presenta a continuación es parte de una investigación más amplia sobre “Pandeo de tanques metálicos” (Godoy *et al.* 2002) cuya componente más importante es el pandeo bajo acción de viento durante huracanes. La primera etapa de esta investigación está orientada a evaluar distribuciones de presión de viento en los tanques y en la segunda se analizan las respuestas no lineales mediante simulación computacional.

DESCRIPCIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO

El túnel de viento del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez (UPRM) es considerado un túnel corto y fue construido en el año 1985. Es práctica común definir como un túnel de viento corto a aquel que posee secciones experimentales con longitud menor a 5m (16.4 pies). Este tipo de túnel presenta limitaciones en la transición necesaria para desarrollar perfiles de velocidad de viento

¹ Estudiante Doctoral, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico 00681-9041.

² Profesor, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico 00681-9041.

que representen adecuadamente condiciones reales. La utilización de artefactos pasivos, como por ejemplo un generador de vórtices, arreglos de espirales y mallas entre otros, no siempre permiten que se logre adquirir la altura de capa límite deseada. El túnel de la UPRM mide en su totalidad 12 m (39.37 pies) de longitud y cuenta con unas cuatro secciones principales de transición, como se ilustra en la Figura 1. La entrada de aire se logra por una sección de 2.44 m (8 pies) de altura que posee una geometría cónica y convergente hacia el interior del túnel. Luego sigue su trayectoria longitudinal hacia la sección designada para colocar modelos experimentales, la cual tiene dimensiones de 2.7 m (105.5 pulgadas) de largo, 91.4 cm. (36 pulgadas) de ancho y 79.4 cm. (31.25 pulgadas) de altura. Las paredes del túnel en esta sección experimental fueron construidas con un material acrílico de 1.27 cm (0.5 pulgadas) de espesor que permiten visibilidad hacia su interior y agregan poca rugosidad, la cual ayuda en la reducción de vórtices en esta zona. Los efectos de pared que generan distorsiones en las propiedades del flujo en la dirección transversal del túnel están limitados a unos 7.7 cm (3 pulgadas), aunque como factor preventivo es práctica común no colocar modelos a una distancia menor de 15.2 cm (6 pulgadas). Finalmente el viento pasa por una región cónica divergente en dirección al flujo hasta llegar a las ventanas utilizadas para regular la velocidad y eventualmente salir por la parte posterior del túnel. La entrada de aire es producida por un abanico con rotación operacional de 1379 revoluciones por minuto movido por un motor de 30 caballos de fuerza, ambos localizados en la parte posterior del túnel. La capacidad de este motor y las dimensiones de la sección transversal del túnel limitan la velocidad del viento a un valor máximo de 22.4 m/s (50 mph). Sin embargo, modificándose la sección transversal con diversos elementos, esta velocidad puede incrementarse hasta aproximadamente 26 m/s (58 mph).

La Figura 2 muestra un esquema de la secuencia utilizada para adquirir los datos experimentales en el túnel. Durante los procesos de calibración se utilizaron tubos Pitot conectados a manómetros de aceite y medidores manuales de velocidad para verificar las lecturas monitoreadas con transductores de voltaje. Se utilizó el programa LABVIEW v.5.1 (National Instruments, 2000), con el cual se procesaron datos hasta lograrse una correlación lineal de presión versus voltaje.

TANQUES TÍPICOS EN ESCALA REAL Y MODELOS EN ESCALA REDUCIDA

Durante la investigación se realizaron inspecciones a fábricas y refinerías de las zonas sur y noreste de Puerto Rico, con el propósito de identificar propiedades geométricas comunes de tanques con techo. Existen básicamente tres tipos de configuraciones geométricas de techos en los tanques de pared cilíndrica: techos cónicos, techos en forma de domo y techos planos (fijos o flotantes). Además de los tanques visitados en Puerto Rico, se estudiaron tanques localizados en St. Thomas, St. Croix y Aruba, los cuales mostraban características muy similares a los ya vistos. Las razones de esbeltez (H:D) varían mayormente en un rango entre 0.25:1 y 0.75:1. Los diámetros de techos cónicos y planos flotantes existentes varían en su mayoría de 18.3 m (60 pies) a 36.6 m (120 pies) y las alturas de 6.1 m (20 pies) a 18.3 m (60 pies). El ángulo de inclinación de los techos cónicos está en un rango de 3 a 12 grados aproximadamente.

En general, los tanques con techos curvos tienen dimensiones menores debido a que el peso propio de su techo es soportado en su totalidad por la cáscara, a diferencia del techo cónico y el plano ajustable en los cuales el techo se apoya en un sistema secundario de cerchas y estas a su vez en una columna central. Las dimensiones de los diámetros comunes en techos curvos van desde los 9.1 m (30 pies) hasta 21.3 m (70 pies), mientras que las alturas aumentan de 4.9 m (16 pies) a 14.6 m (48 pies) aproximadamente. Las alturas centrales de los techos domos son variables, diferenciándose éstos como domos y domos rebajados.

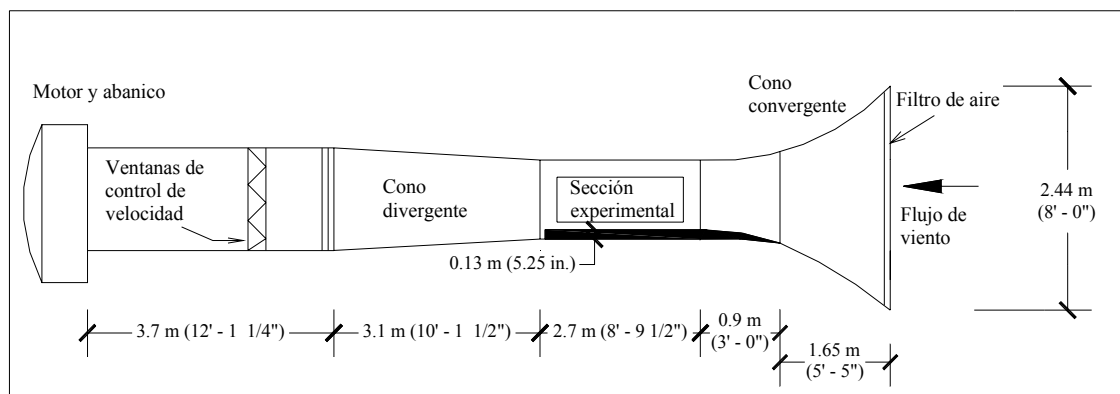


Figura 1: Vista lateral del túnel de viento de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez.

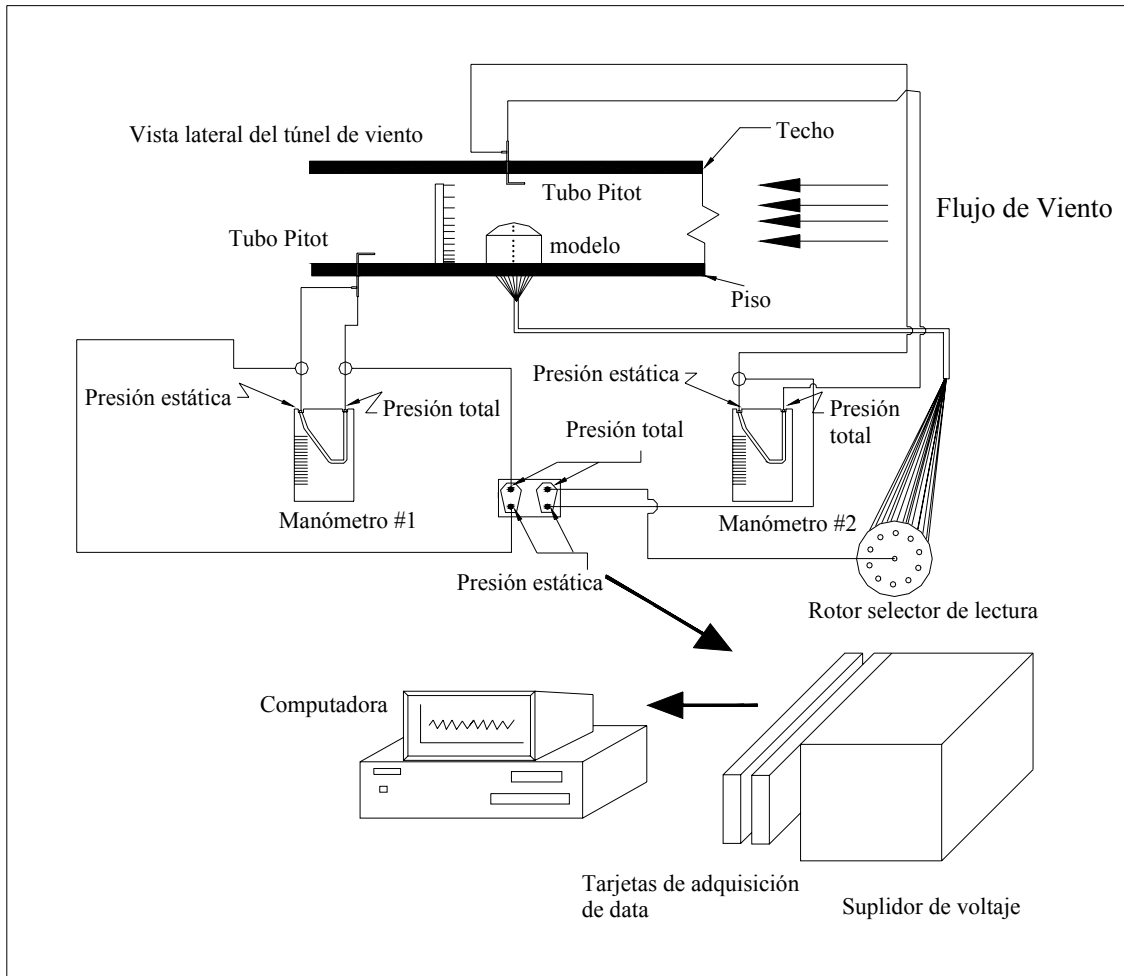


Figura 2: Diagrama conceptual del sistema de adquisición de datos.

Las Figuras 3 a 5 muestran los prototipos seleccionados como base para la construcción de modelos escalados. Los parámetros necesarios para reducir de escala los prototipos fueron los siguientes: las propiedades del flujo de aire en contacto con el modelo, las condiciones de bloqueo, la similitud geométrica, la escala de longitud de rugosidad y el perfil de velocidades escalado.



Figura 3: Tanque cilíndrico con techo cónico, Aruba.



Figura 4: Tanque cilíndrico con techo en forma de domo. Planta “Peerless Oil and Chemicals” en Peñuelas, Puerto Rico.



Figura 5: Tanque cilíndrico con techo en forma de domo rebajado. Planta Bacardí en Cataño, Puerto Rico.

Bajo condiciones reales existen básicamente dos regiones generales de capa límite, conocidas como la atmosférica (ABL) y la planetaria (PBL). La altura divisora de ambas capas es variable, ya que depende del tipo de rugosidad del terreno, cambios en temperatura, cambios en presión y localización geográfica (fuerzas de Coriolis), entre otros factores. La mayoría de los casos de interés para la ingeniería civil se encuentran dentro de la capa límite atmosférica. La capa atmosférica contiene una subcapa conocida como la capa atmosférica de superficie (ASL), la cual posee propiedades altamente influenciadas por la corteza terrestre. Los casos de tanques se consideran estructuras de poca altura, localizadas dentro de la capa atmosférica de superficie.

Existen varios modelos establecidos para el perfil de velocidades que gobierna esta región, entre ellos se destacan el modelo de potencia y el modelo logarítmico. El primer modelo mencionado se define como:

$$\frac{V(Z)}{V(Z_r)} = \left(\frac{Z}{Z_r} \right)^{1/\alpha} \quad (1)$$

donde Z = elevación desde la superficie del terreno, Z_r = altura de referencia, establecida como el límite de altura de la capa atmosférica ($Z_g = 275$ m (900 pies)), V = velocidad del viento en la altura Z , $1/\alpha$ = exponente empírico.

En el modelo logarítmico se usa la relación:

$$V(z) = \frac{1}{\kappa} u_* \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2)$$

donde κ = constante de von Kármán = 0.4, τ_0 = esfuerzo cortante promedio de superficie, ρ = densidad del aire, u_* = velocidad friccional, definida como

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (3)$$

Inicialmente se estableció el número de Reynolds en el túnel, debido a que estudios pasados recomiendan usar números de $Re > 2.5 \times 10^5$ para asegurar que efectos inerciales dominan sobre efectos viscosos. Recordemos que el número de Reynolds se define como:

$$Re = \frac{\rho V^2 D^2}{\mu V D} = \frac{VD}{\nu} \quad (4)$$

donde: ρ = densidad del aire, μ = viscosidad absoluta del aire, V = velocidad del viento, D = diámetro del tanque, ν = viscosidad cinemática.

La experiencia de otros investigadores controlando el estado de flujo de aire interactuando con su modelo (Megson *et al.*, 1987) fue de ayuda para establecer condiciones adecuadas. Es imprescindible generar un balance adecuado entre la dimensión característica del modelo y la velocidad del flujo de aire en el túnel, ya que las propiedades cinemáticas del fluido no pueden alterarse. Modelos con una dimensión de techo pequeña generarían problemas, mientras que utilizar modelos con dimensiones grandes produciría efectos de bloqueo y correcciones posteriores. Por otro lado, la velocidad del viento dentro del túnel se convirtió en un factor limitante ya que no podía exceder los 22.4 m/s (50mph) sin reducirse su sección de prueba transversal. Reducciones en esta sección podían generar un aumento en velocidad pero disminuirían eventualmente la profundidad de la capa límite escalada. Esta reducción no resultaría favorable en nuestro caso, debido a que la altura del túnel está limitada a 0.80 m (31.25 pulgadas) sin contar efectos de una capa límite que se desarrolla también desde el techo hacia el piso.

De esta forma se llevó a cabo un proceso iterativo para conseguir dimensiones en el modelo que cumplieren con el mínimo número de Reynolds establecido, que no excediera el bloqueo límite de 5% (ASCE, 1999) que fuese viable en altura para modelar un perfil de velocidades todavía no definido en esta parte inicial. Además fue necesario cumplir similitudes de escala geométrica (ecuación 5), longitud de rugosidad (ecuación 6) y elevación de la capa límite de superficie (ecuación 7) entre los prototipos y los modelos.

$$S_G = \frac{D_{\text{especimen}}}{D_{\text{prototipo}}} (100\%) \quad (5)$$

$$\left(\frac{D}{Z_0}\right)_{\text{prototipo}} = \left(\frac{D}{Z_0}\right)_{\text{especimen}} \quad (6)$$

$$\left(\frac{D}{Z_S}\right)_{\text{prototipo}} = \left(\frac{D}{Z_S}\right)_{\text{especimen}} \quad (7)$$

donde: S_G = escala geométrica, $D_{\text{especimen}}$ = diámetro del espécimen, $D_{\text{prototipo}}$ = diámetro del espécimen, Z_0 = elevación de rugosidad aerodinámica en el terreno, Z_S = elevación de la capa atmosférica de superficie.

Utilizándose los requisitos de similitud mencionados, se construyeron tres tanques escalados de geometría circular con techos en forma de cono, domo y domo rebajado, los que se muestran en la Figura 6. La parte cilíndrica de los tres especímenes consiste de tubos de material PVC al igual que los techos en forma de domo y domo rebajado, mientras que el techo cónico fue construido con fibra de vidrio. Las propiedades de altura y

diámetro de los tanques además del porcentaje de bloqueo con respecto a las dimensiones del túnel se muestran en la Tabla 1.



Figura 6: Especímenes con techos en forma de domo, cono y domo rebajado, sometidos a pruebas experimentales en el túnel de viento.

La Tabla 2 muestra los valores finales obtenidos de los parámetros utilizados para reproducir las condiciones existentes en la escala real de los tanques prototipos seleccionados. Los valores de escala geométrica cumplen con requisitos recomendados por el ASCE 67 (1999) al encontrarse comprendidos en un rango entre 1% y 10%. El valor estimado de la elevación de rugosidad a escala total en el terreno, se seleccionó usando la clasificación de terreno abierto uniformemente rugoso con un valor de 0.02 m. Este valor se encuentra incluido dentro del rango de valores recomendados por Davenport (1960) y Wieringa (1992) para superficies de terreno con bajos niveles de vegetación. El valor escalado fue de aproximadamente 0.24 mm para los tres modelos, lo que facilitó el uso de un solo perfil de velocidad común para todos los casos.

Tabla 1: Propiedades de los especímenes y verificación de efectos de bloqueo para un área seccional del túnel de 7258.1 cm².

Techo	Altura de la pared [cm]	Altura del techo [cm]	Diámetro [cm]	Razón de esbeltez H:D	Porcentaje de bloqueo
Cónico	11.57	2.54	26.92	0.43:1	4.76%
Domo rebajado	11.55	3.67	23.81	0.48:1	4.59%
Domo	11.55	5.50	23.81	0.48:1	4.99%

Tabla 2: Factores aplicados para establecer las dimensiones de los modelos.

Configuración del techo	Cónico	Domo y domo rebajado
Escala geométrica [%]	1.179	1.183
$D_{\text{prototipo}}$ [m]	22.860	20.117
$D_{\text{especimen}}$ [m]	0.2696	0.2380
Igualdad de Jensen D/Z_0	1143	1006
Z_0 prototipo [m]	0.02	0.02
Z_0 espécimen [m]	0.0002358	0.0002366
Igualdad en capa de superficie D/Z_S	1.667	1.467
Z_S prototipo [m]	13.75	13.75
Z_S espécimen [m]	0.1621	0.1627

Una vez conocidos los valores de Z_0 , se estableció el perfil de velocidades escalado dentro del túnel de viento. Para lograr el perfil adecuado se intentaron configuraciones con artefactos pasivos (Simiu,1986) los cuales no brindaron buenos resultados. Finalmente, se logró establecer el perfil deseado colocándose diversos obstáculos a separaciones establecidas sobre una alfombra como se muestra en la Figura 7. Este arreglo permitió el desarrollo del perfil de velocidades que se ilustra en la Figura 8, establecido para una velocidad de referencia a escala total de 64.8 m/s (145 mph) a una altura de referencia de 10 m (32.8 pies) (ASCE, 1998) equivalentes a 19.8 m/s (44.4 mph) y 11.6 cm (4.57 pulgadas) en el modelo experimental.

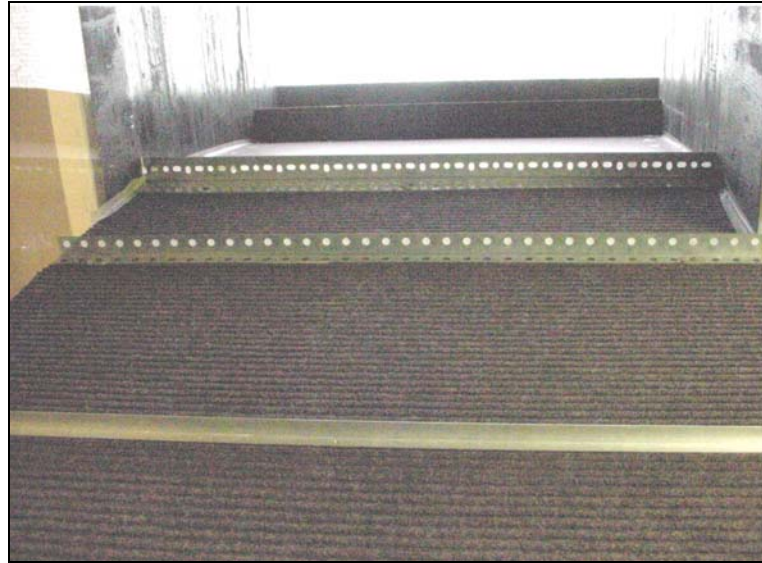


Figura 7: Vista longitudinal de la sección de prueba del túnel de viento mirando desde el área de prueba hacia la entrada.

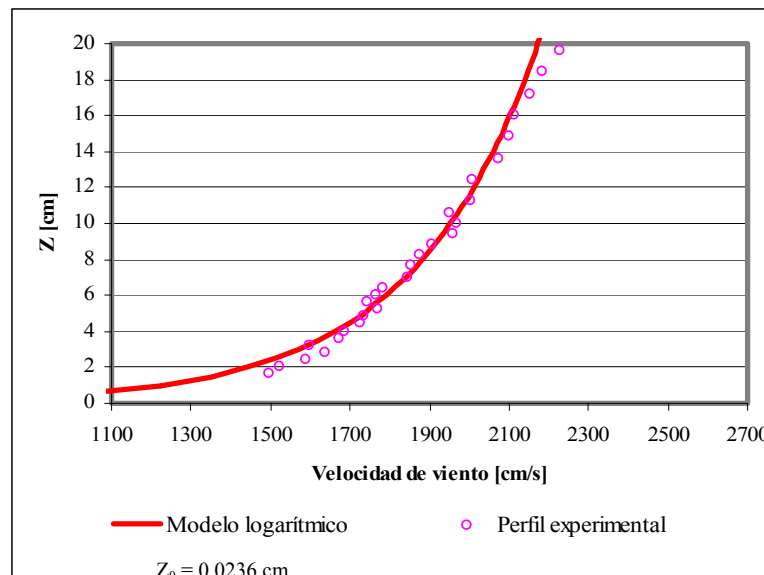


Figura 8: Perfil de velocidades escalado para el túnel de viento.

PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

Se realizaron pruebas experimentales de tanques aislados con techo cónico, techo en forma de domo y domo rebajado. Además se sometió a prueba el tanque con techo cónico, escudado por otro tanque de techo plano pero con iguales dimensiones de diámetro y altura de la pared, como se muestra en la Figura 9. Los modelos en escala reducida representan modelos rígidos que exceden la capacidad necesaria para evitar comportamientos aerodinámicos al ser sometidos a cargas de viento.

En las pruebas experimentales se colocaron instrumentos de medición localizados a 90 grados de separación, tanto en el techo como en la pared de los tanques. Para evaluar presiones en las otras secciones, los tanques fueron rotados con intervalos de 22.5 grados hasta completarse la toma de datos en toda la circunferencia. Para hallar las presiones de velocidad en cada punto establecido, fue necesario conocer la presión total en ese lugar y las presiones estáticas en el túnel. La presión de velocidad de aire se calculó como la diferencia entre la presión total en un punto y la estática a una altura considerable sobre el techo del tanque. La velocidad del viento durante las pruebas fue monitoreada y verificada usándose medidores de presión de aire en unidades de pulgadas de agua, valores que fueron posteriormente traducidos a velocidad del aire en m/seg. por medio de la siguiente ecuación:

$$V = 5.573 \sqrt{\frac{h_v}{\rho_a}} \quad (8)$$

donde h_v = presión de velocidad [pulgadas de agua (col. H₂O)], ρ_a = densidad del aire [libras por pie cúbico].

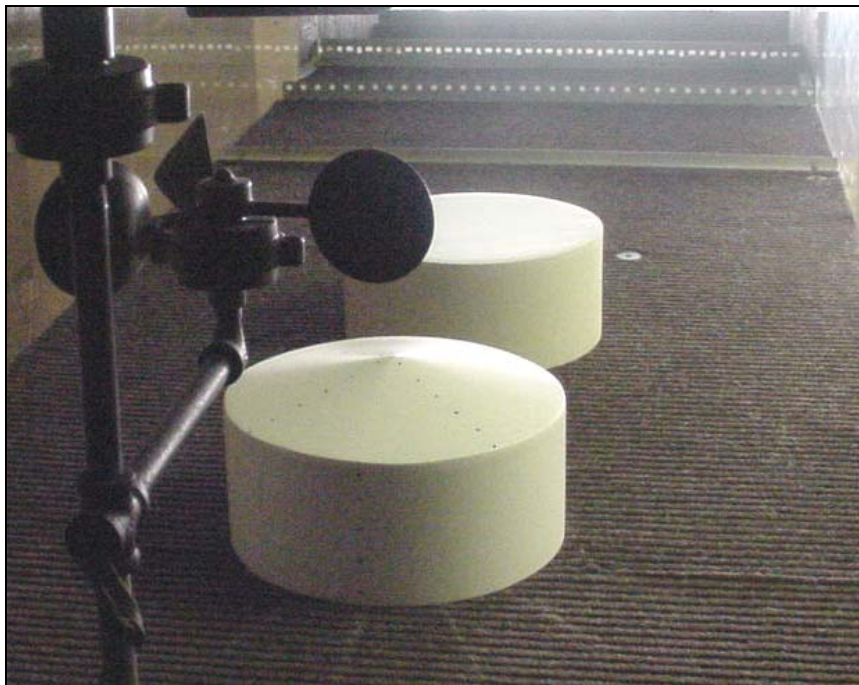


Figura 9. Vista interior del túnel que muestra el tanque de techo plano escudando al tanque de techo cónico mirando desde el área de prueba hacia la entrada del viento.

Debido a que la densidad del aire es influenciada por factores termodinámicos, es necesario calcularla tomando en cuenta variaciones de humedad relativa y temperatura del ambiente. Tanto la humedad como la temperatura fueron monitoreadas durante todo el proceso experimental, utilizándose relaciones psicométricas (Moran y Shapiro, 2000) para el ajuste correspondiente.

Los valores de los coeficientes de presión externa C_p , han sido definidos de varias maneras por diferentes autores debido a que estos emplean puntos de referencia distintos. Maher (1966) reporta estudios de túnel de viento en los que define este coeficiente como:

$$C_p = \frac{P_L}{P_d} \quad (9)$$

donde P_L = presión local en un punto particular y P_d = presión dinámica sobre la capa atmosférica.

Sin embargo, el autor recomienda multiplicar estos coeficientes de presión por una presión dinámica apropiada que dependa de las propiedades existentes en ese lugar, la localización y las normas de diseño establecidas. Por otro lado, Macdonald *et al.* (1988) utiliza una altura de referencia correspondiente a la altura del cilindro al igual que Sabransky *et al.* (1987). Las normas del ASCE (1998) para el caso de estructuras cilíndricas utilizan los coeficientes de presión establecidos por Macdonald *et al.* Otros autores que reportan resultados experimentales en túneles de viento no aclaran su altura de referencia como es el caso de Cermak (1975), Ressinger *et al.* (1982) y Megson *et al.* (1987) entre otros.

En este trabajo, las presiones de velocidad halladas experimentalmente fueron normalizadas con respecto a la presión dinámica referenciada a una altura equivalente a 10 m de altura (altura del cilindro), para determinar los coeficientes de presión (C_p) en distintas regiones del techo y la pared del tanque. Cada dato que se adquiría por instrumento era el promedio de muestras registradas en un periodo de 10 segundos. Luego se repitió la prueba un mínimo de tres veces, se seleccionaron valores consistentes, se corrigieron considerándose factores ambientales y se promediaron para obtener el dato final a usarse en ese instrumento particular. De la misma manera y simultáneamente se procedía con los datos hallados en los demás instrumentos.

RESULTADOS PARA TANQUES AISLADOS

Presiones en el techo

La Figura 10 muestra contornos con los coeficientes de presión obtenidos en el techo cónico del tanque aislado con relación H:D = 0.43 y ángulo de inclinación del techo de 10.7°. Debido a la simetría de los resultados con respecto al meridiano de incidencia del viento, los valores de ambos lados del eje fueron promediados. Sólo se hallaron valores negativos, los cuales representan succiones o presiones ejercidas hacia fuera del techo. Los valores máximos ocurren en el borde de la zona de entrada de flujo de aire al techo. En esta zona se esperan valores altos debido a la separación de flujo que provoca el cambio abrupto entre la superficie de la pared y la del techo. Este comportamiento también fue observado por Sabransky y Melbourne (1987) quienes hallaron valores similares a los del presente estudio en la zona de entrada de viento al techo. Sin embargo, su estudio se basaba en silos con razón de esbeltez de 0.66:1 y ángulo de inclinación del techo de 27°. Una diferencia notable con los resultados del presente estudio es que la zona de entrada de viento al techo no es la que experimenta la mayor succión, sino la parte más alta del techo (zona central). Este mismo comportamiento se observa en estudios realizados por Macdonald *et al.* (1988) en silos con razón H:D = 1:1 y ángulo de inclinación del techo de 25°. Estos resultados demuestran cuán influyente es el ángulo de inclinación del techo en la magnitud de las presiones halladas en su zona central.

Los techos con geometría de domos esféricos no poseen una pendiente constante, pero también desarrollan mayor succión en su zona central cuando su altura de techo (Y) incrementa. Esto puede observarse comparando los resultados de las Figuras 11 y 12, las cuales representan techos en forma de domo rebajado (Y:D = 0.15) y domo (Y:D = 0.23), ambos con razones de esbeltez de 0.48. Con la diferencia de altura de techo entre estas dos configuraciones, ocurre un aumento en presión en esta región central, cercano a un 30%. Sin embargo, a diferencia de los resultados hallados en los tanques con techo cónico, en éstos no se observan succiones altas en el contorno de incidencia de viento al techo. Esto se debe mayormente a que la transición entre la pared y el techo no es abrupta, demostrando cuán sensibles son estos valores a diferencias geométricas en esta región. También, puede notarse que en esta zona de entrada, las succiones disminuyen con un aumento en la altura del techo. Este comportamiento muestra similitud con el patrón de presiones halladas por Maher (1966) en su estudio de techos hemisféricos.

En términos de las presiones halladas en la salida del techo, se observaron valores de $C_p = -0.2$ para todos los tanques (H:D = 0.43, 0.48) aunque el domo en una corta región experimentó valores cercanos a -0.15. Los

coeficientes hallados en esta zona para $H:D = 1.0$ (Macdonald *et al.* 1998) y $H:D = 1.16$ (Sabransky, 1987) en silos con techos cónicos es de -0.5 , mientras que Maher (1966) en techos hemisféricos ($H:D = 0.5$) obtuvo $C_p = -0.2$. No se podría atribuir la diferencia observada en los techos cónicos a la razón de esbeltez debido a que esta sección también es influenciada por la altura central del techo.

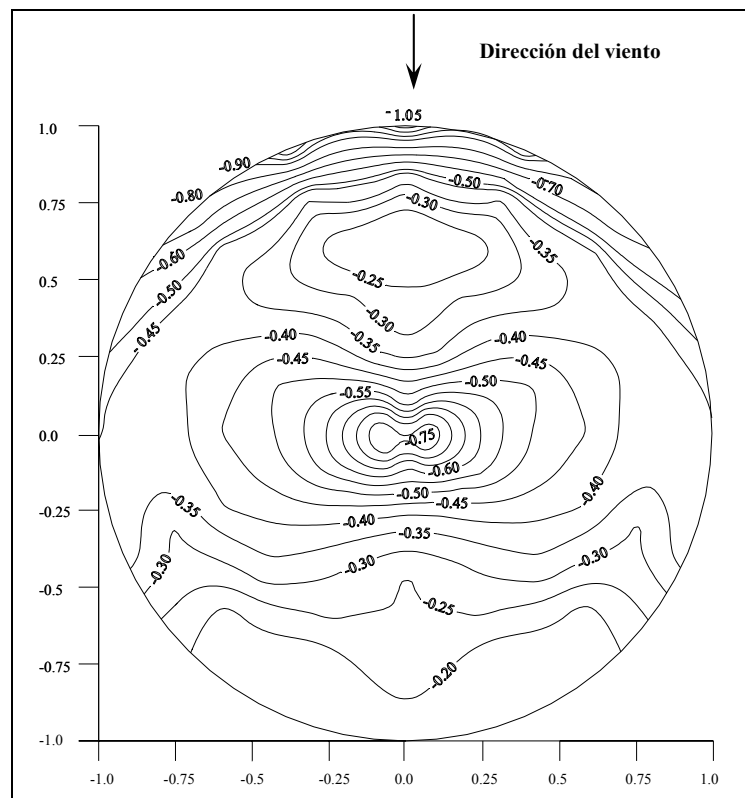


Figura 10: Coeficientes de presión hallados en el techo del tanque con techo cónico. $Y:D = 0.094$, $Re = 3.3 \times 10^5$, $H:D = 0.43$.

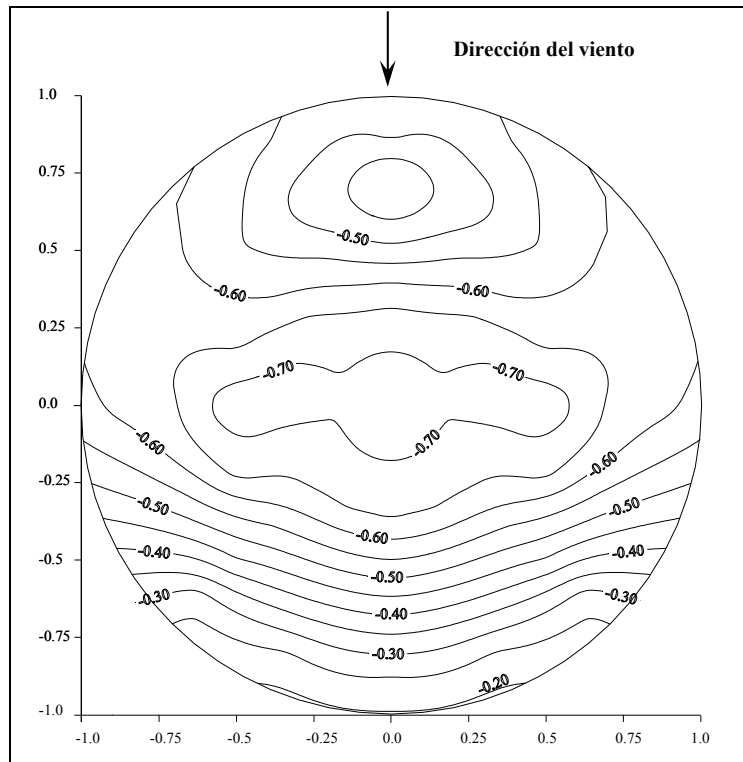


Figura 11: Coeficientes de presión hallados en el techo del tanque con techo en forma de domo rebajado ($Y:D = 0.15$, $H:D = 0.48$, $Re = 3.0 \times 10^5$).

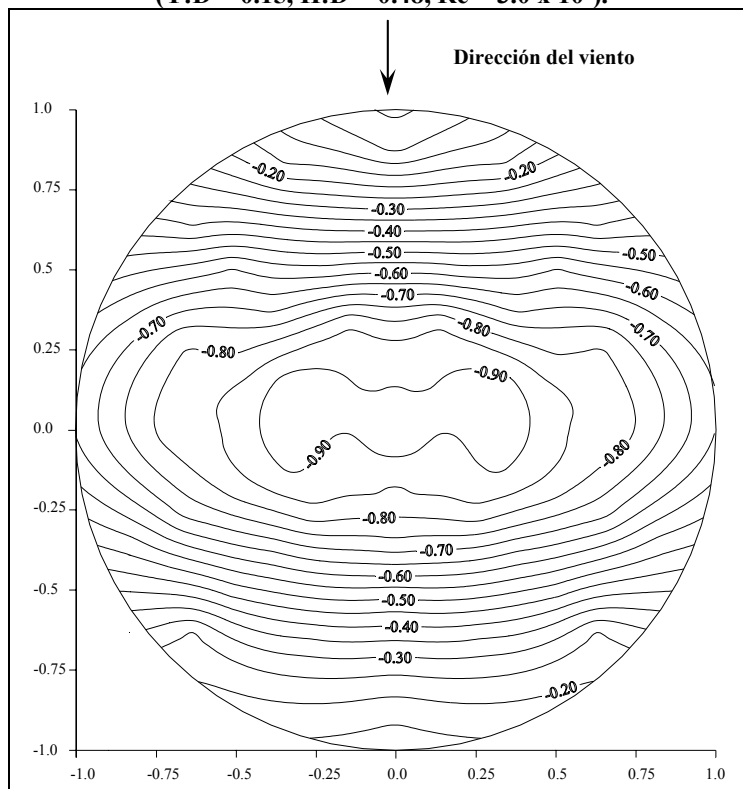


Figura 12: Coeficientes de presión hallados en el techo del tanque con techo en forma de domo ($Y:D = 0.23$, $H:D = 0.48$, $Re = 3.0 \times 10^5$).

Presiones en el cilindro

A diferencia de las distribuciones halladas en el techo, las de la pared no presentan cambios considerables, sino que son mayormente las magnitudes las que establecen diferencias. Se graficaron contornos de coeficientes de presión a través de la circunferencia del cilindro de los tanques. Las zona donde se hallaron los valores máximos de presión (+) es aquella localizada a un ángulo de cero grados con respecto al eje de incidencia del viento, mientras que las succiones (-) máximas se hallaron en ángulos cercanos a los 90 grados. Para todos los casos de estudio, se encontraron distribuciones bastante simétricas con respecto al eje de incidencia del viento. La Figura 13 a la 15 muestran las distribuciones de presión halladas en la pared de los tanques. La altura en que se producen valores máximos varía entre 45% a 75% de la profundidad de la pared, tomándose como referencia la base del tanque.

Dentro de los valores máximos de presión (+) hallados, se observaron variaciones entre los tres modelos. El tanque con techo en forma de domo rebajado experimentó el mayor coeficiente de presión con un valor de $C_p = +0.75$. Por otra parte, el valor máximo hallado en el cónico y el domo representan un 87% y 93% de ese valor. En términos de la succión máxima hallada, los tanques con techo en forma de domo y domo rebajado presentaron valores similares de $C_p = -0.8$, mientras que el tanque de techo cónico experimentó un 81% (-0.65) de ese valor. Finalmente los valores hallados en la salida de la pared (180 grados) eran muy similares a los hallados en la salida del techo con valor de $C_p = -0.15$ para el tanque de techo cónico y $C_p = -0.20$ para el domo y domo rebajado.

Resultados hallados por Sabransky (1987) con $H:D = 0.66$, muestran un valor máximo de presión (+) (0 grados) poco mayor a los del presente estudio con $C_p = +0.78$. Sin embargo, la succión máxima incrementa a -1.28, diferencia que representa un 50% el valor obtenido en el presente estudio. Otros resultados hallados para distintas geometrías y razones de esbeltez fueron presentados por Ressinger *et al.* (1982). Los valores hallados por Maher (1966) en los tanques con techos planos presentan diferencias considerables con los hallados por Gretler (1978), aun cuando estos poseen igual razón de esbeltez. Este comportamiento podría deberse al desarrollo de distintos perfiles de velocidad y alturas de referencia. La influencia del perfil de velocidad en los resultados obtenidos es una de las condiciones de estudio futuro en esta investigación que por ahora no ha sido considerada.

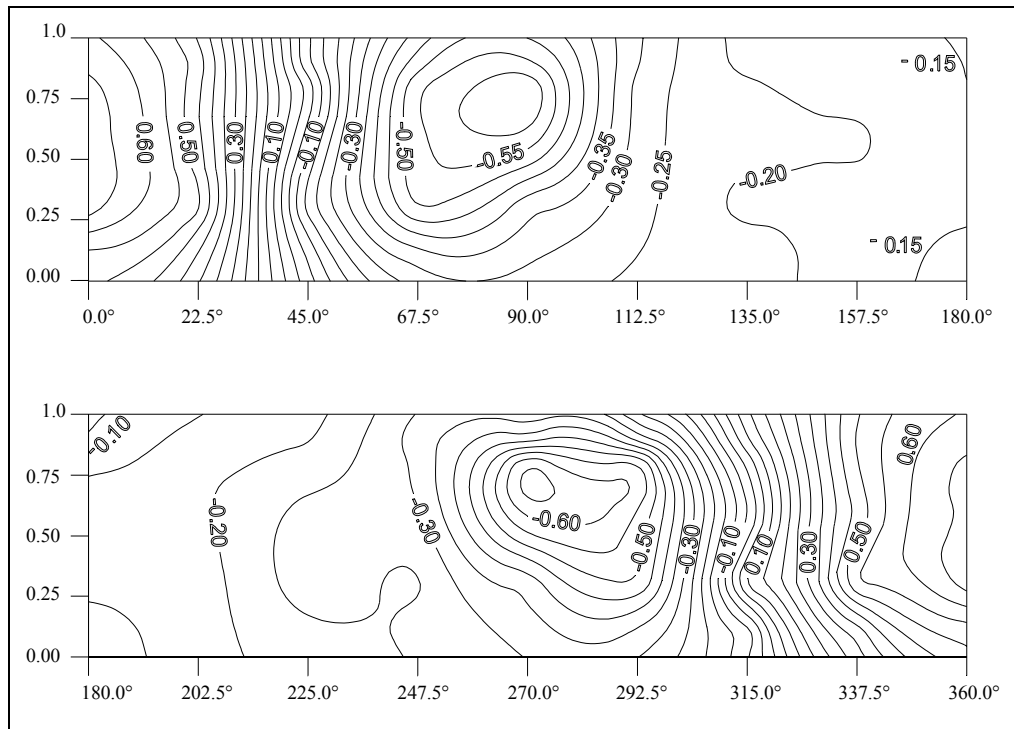


Figura 13: Coeficientes de presión hallados en el cilindro del tanque con techo cónico. $Y:D = 0.094$, $Re = 3.3 \times 10^5$, $H:D = 0.43$.

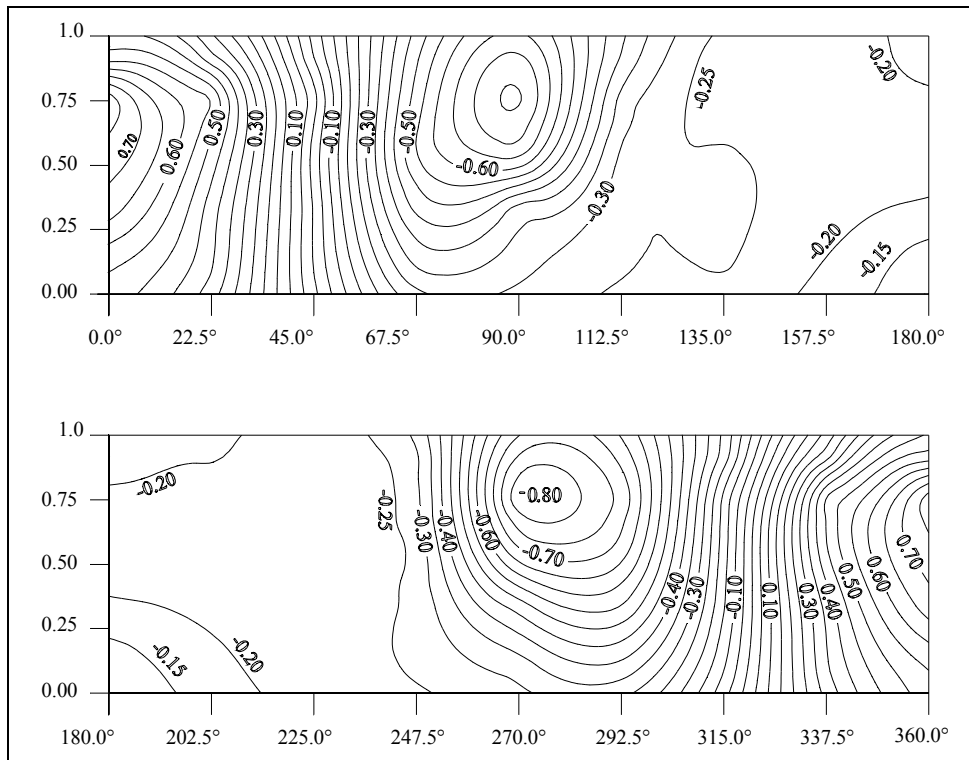


Figura 14: Coeficientes de presión hallados en el cilindro del tanque con techo en forma de domo rebajado. $Re = 3.0 \times 10^5$, $H:D = 0.48$.

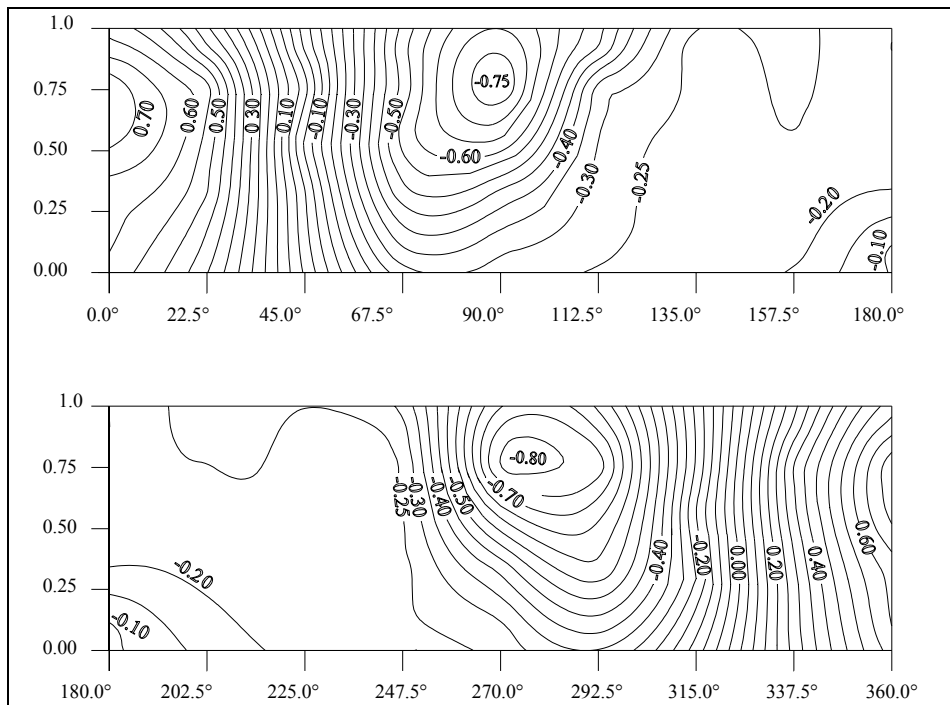


Figura 15: Coeficientes de presión hallados en el cilindro del tanque con techo en forma de domo. $Re = 3.0 \times 10^5$, $H:D = 0.48$.

RESULTADOS PARA TANQUES BLOQUEADOS

Presiones en el techo

Las propiedades de altura de pared y diámetro del tanque de techo plano utilizado como escudo son las mismas del tanque de techo cónico. El modelo con techo plano sólo se utilizó como obstáculo, por lo que no fue instrumentado. Para estudiar efectos de escudo, se utilizó la configuración ilustrada en la Figura 16, en la cual se localizó el tanque de techo plano a un diámetro y a medio diámetro de separación del tanque con techo cónico.

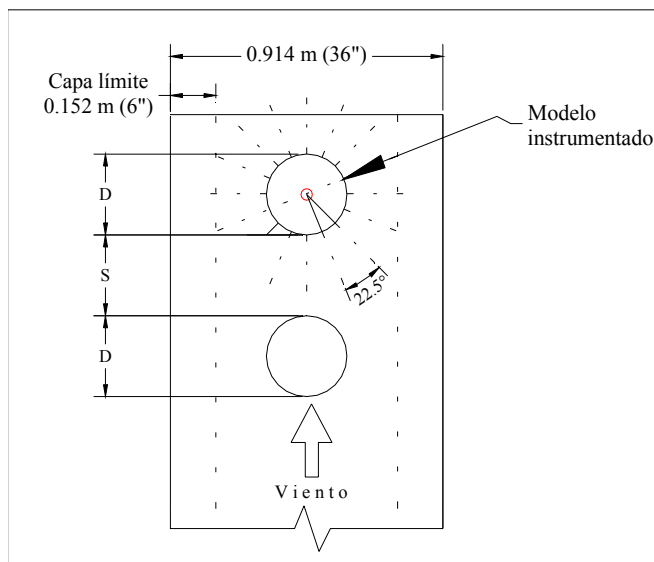


Figura 16: Configuración utilizada para determinar presiones locales en un tanque escudado.

La Figura 17 muestra los contornos de presiones que se hallaron con el obstáculo colocado a un diámetro de separación. Se puede apreciar que aunque el contorno es parecido al hallado con el tanque aislado, ocurrió una disminución significativa en los coeficientes de presión especialmente en la zona de entrada al techo. De hecho, para esta configuración las succiones máximas halladas no se encuentran en la zona de entrada al techo sino en su parte central. En la zona de entrada de viento, la reducción en succión con respecto al tanque aislado fue de un 86%, en la parte más alta del techo el porcentaje de diferencia fue de un 27% y en la región de salida un 50%.

El patrón de distribuciones de presión de la configuración del tanque cónico obstaculizado por otro a una separación de medio diámetro se muestra en la Figura 18. La reducción en las succiones halladas en la zona de entrada al techo es más apreciable que en el arreglo anterior, ya que inclusive se observan valores positivos de presión ($C_p = +0.2$). Además puede verse como la distribución cambia en esta región, reduciéndose las presiones (cambios de valores positivos a negativos) en dirección hacia la parte central del techo. Sin embargo, desde el centro del techo hasta la región de salida se observan valores que exceden los hallados en la configuración anterior (1 D). Este comportamiento es interesante, ya que se tiende a pensar que mientras más cerca se encuentre un obstáculo de un tanque, menores serán las presiones encontradas y esto no es totalmente aplicable en todas las regiones.

Los valores de succión máximos se observan en la parte central del techo representando una reducción de sólo un 13% con respecto al tanque aislado.

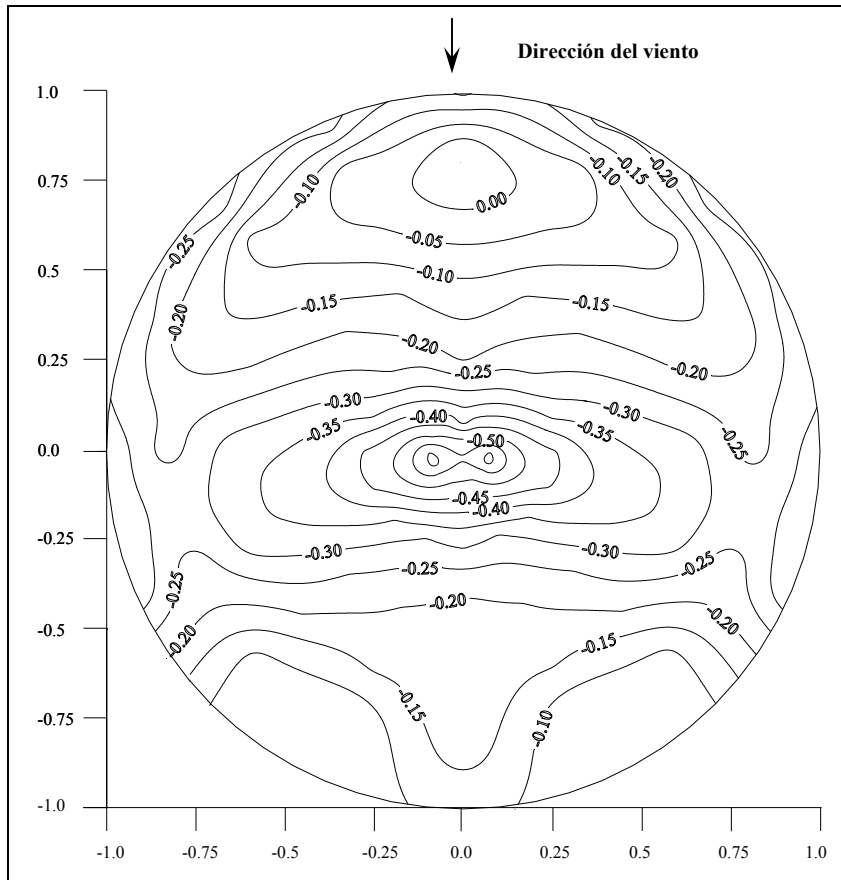


Figura 17: Coeficientes de presión hallados en el techo cónico del tanque escudado por un tanque de techo plano localizado a 1 D de separación. $Y:D = 0.094$, $Re = 3.3 \times 10^5$, $H:D = 0.43$.

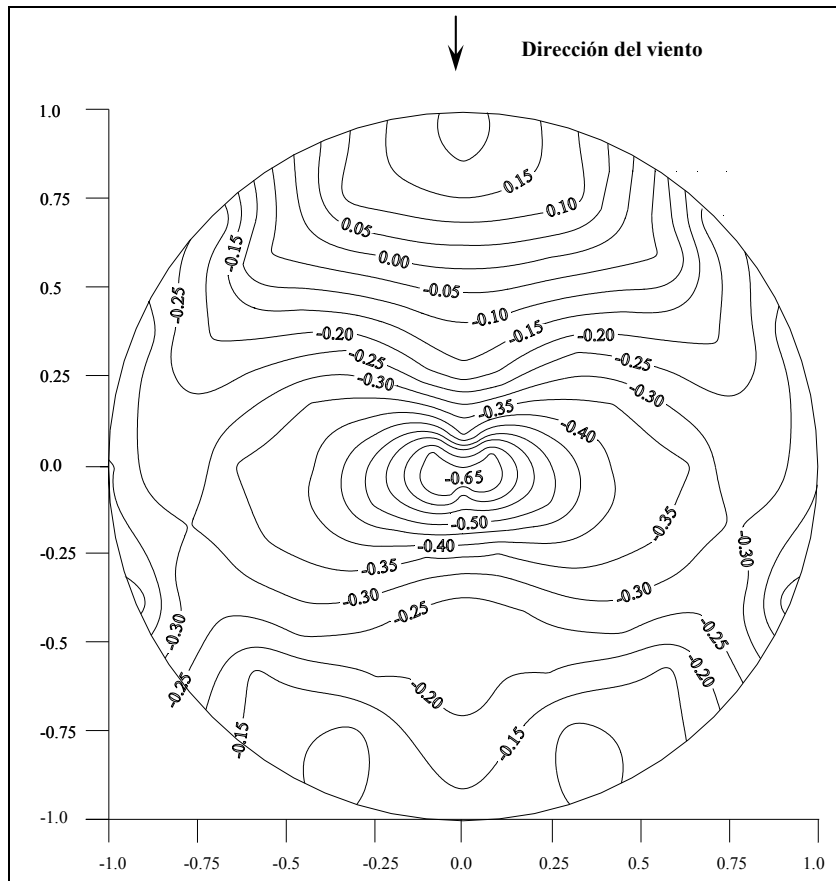


Figura 18: Coeficientes de presión hallados en el techo cónico del tanque escudado por un tanque de techo plano localizado a $\frac{1}{2} D$ de separación. $Y:D = 0.094$, $Re = 3.3 \times 10^5$, $H:D = 0.43$.

Presiones en el cilindro

Para la configuración a un diámetro de separación, las regiones donde se encontraron las presiones y succiones más altas en el cilindro coinciden con aquellas de los tanques aislados a ángulos de 0 grados y 90 grados, respectivamente. Sin embargo, los valores máximos positivos están localizados en la región más alta del cilindro (1H) y los valores de succión máxima a 0.75H, como se ilustra en la Figura 19. Puede notarse una reducción en presión, siendo la máxima positiva y la máxima negativa un 23% y 30% menor a la encontrada en el tanque aislado.

La Figura 20 muestra los contornos resultantes en el cilindro para el arreglo con bloqueo a medio diámetro de separación, donde puede apreciarse la falta de simetría con respecto al eje de incidencia del viento. El patrón de distribuciones de presión presenta diferencias con los hallados tanto en los tanques aislados como en el otro arreglo de bloqueo. Aunque un comportamiento similar al observado en la configuración a un diámetro de separación es que las presiones (+) máximas también ocurren a 1H y las succiones (-) a 0.75H, tomándose como referencia la base del tanque. En ciertas zonas de la pared, las magnitudes máximas de presión y succión obtenidas con esta configuración son mayores a las encontradas en el arreglo a un diámetro de separación. Este es el caso de coeficientes en la zona de incidencia (0 grados) y a 90 grados que aumentaron un 20% y 11% respectivamente en comparación con el otro arreglo. Todos los coeficientes a 22.5 grados muestran presiones mayores a los hallados a 0 grados, excepto en la zona más alta del cilindro donde éste mantiene un valor relativamente constante como se muestra en la Figura 21. Un comportamiento parecido a éste fue observado por Esslinger *et al.* (1971) en su estudio de efectos de grupo en silos con techos esféricos y razón de esbeltez mayor a 1. Algunas de las diferencias notadas, es que este comportamiento fue identificado para un arreglo de bloqueo a 1 D de separación en vez de $\frac{1}{2} D$ y además que las succiones máximas ocurrían a ángulos entre los 65 y 80 grados en vez de 90 grados con respecto al punto de entrada del viento.

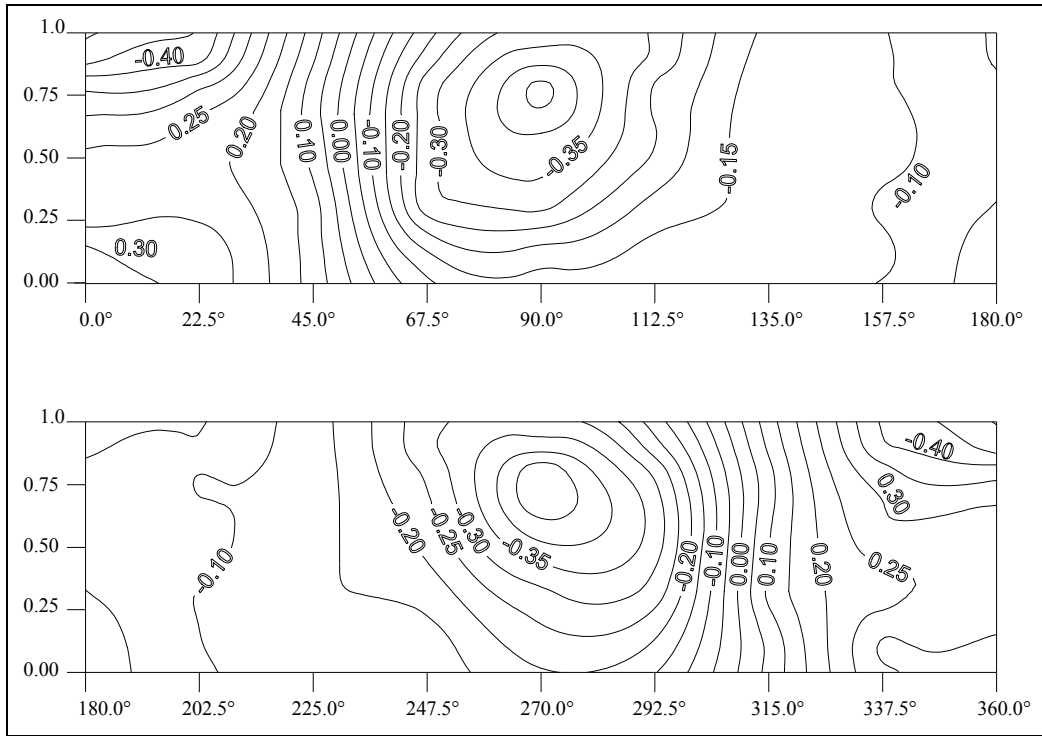


Figura 19: Coeficientes de presión hallados en el cilindro del tanque con techo en forma de domo escudado por un tanque de techo plano localizado a 1 D de separación. $Re = 3.3 \times 10^5$, $H:D = 0.43$.

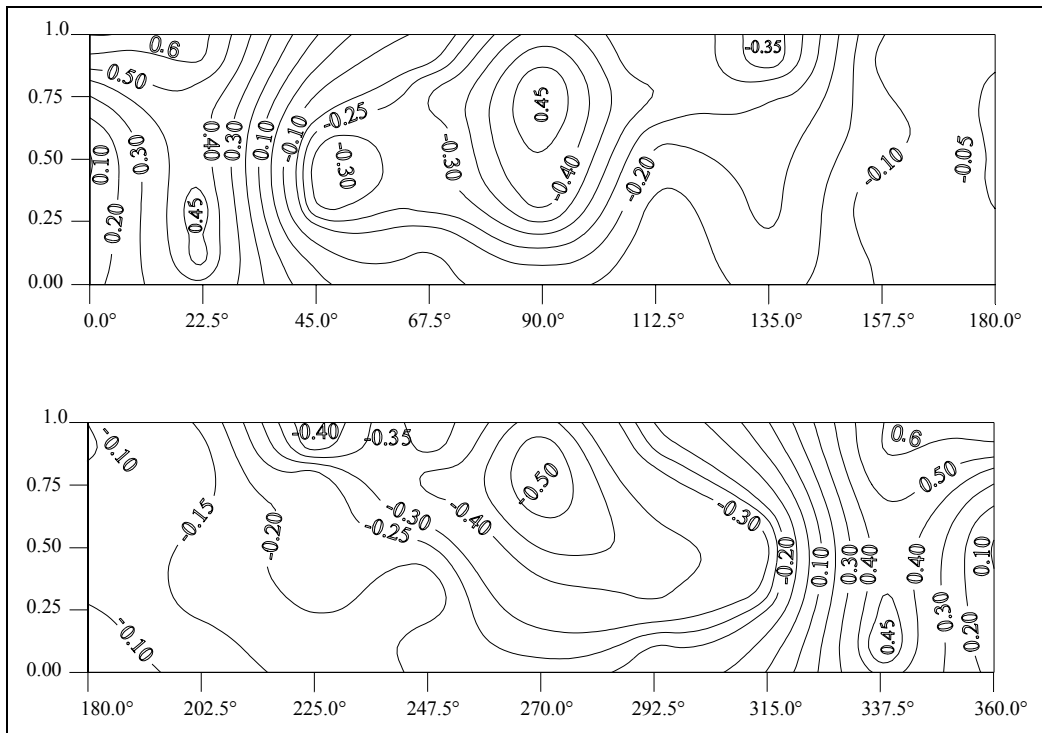


Figura 20: Coeficientes de presión hallados en el cilindro del tanque con techo en forma de domo escudado por un tanque de techo plano localizado a $\frac{1}{2}$ D de separación. $Re = 3.3 \times 10^5$, $H:D = 0.43$.

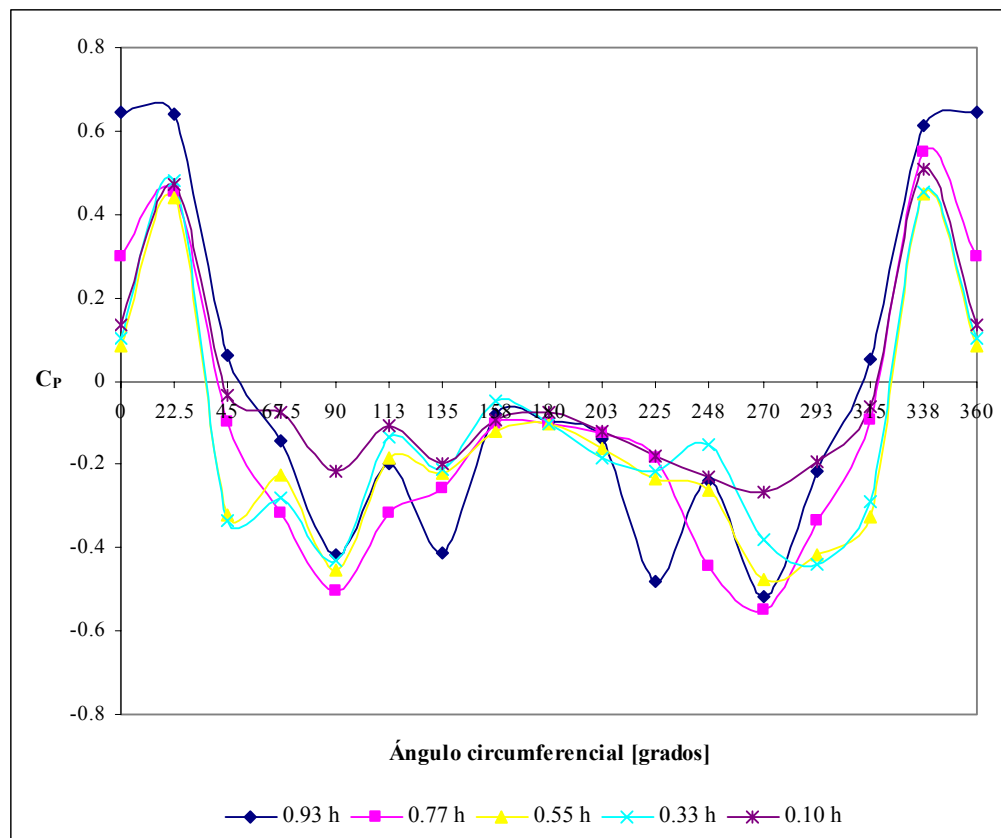


Figura 21: Coeficientes de presión en la pared del tanque cónico escudado por otro plano localizado a $\frac{1}{2}D$ de separación. $Re = 3.3 \times 10^5$, $H:D = 0.43$.

CONCLUSIONES

En este trabajo se informa acerca de resultados de experimentos llevados a cabo en un túnel de viento con la finalidad de evaluar presiones en diversas configuraciones de tanques. Este es parte de una investigación en progreso, que intenta identificar presiones asociadas a distintas configuraciones de tanques con el fin de estudiar la inestabilidad de la estructura. Del análisis de los resultados reportados en este trabajo se pueden extraer patrones de presiones para algunas configuraciones típicas, y algunas conclusiones:

- La geometría característica del techo de un tanque corto influye en el patrón de presiones que se desarrolla en éste, especialmente en la región del techo. Conocer las distribuciones reales cobra importancia para evaluar la respuesta estructural. Godoy y Méndez (2001) notaron cuán sensible es la respuesta no lineal de un tanque a la distribución de presiones que se utilice en el techo. Al cumplirse con este requisito, la simulación analítica utilizándose valores reales permite obtener respuestas más realistas del comportamiento de estabilidad de un tanque.
- La altura de la parte central del techo juega un papel importante en la magnitud de succiones que experimentará el tanque en esta región. Tanto en tanques de techo cónico como esféricos un incremento en altura de techo produce un aumento en la succión experimentada en esta zona.
- Si la transición de la pared del cilindro al techo cambia de una forma hemisférica a un gradiente constante, se producen cambios de presiones a succiones en la región de entrada del viento al techo del tanque.
- Las distribuciones de presión halladas en el cilindro de un tanque corto aislado muestra cambios cuando éste es bloqueado por otro tanque, con igual altura. Las presiones máximas ocurren a alturas distintas y dependiendo de la cercanía entre ambos tanques cambia la forma tradicional de la curva que define el patrón a una altura establecida.

- (e) La reducción en presión de viento de un tanque escudado por otro no parece depender significativamente de la distancia entre ambos tanques, al considerarse una separación de un diámetro a medio diámetro. Al variar la distancia de separación en ese rango, hay zonas donde se reducen las presiones mientras que en otras se incrementan.

RECONOCIMIENTOS

Este proyecto fue subsidiado por la Federal Emergency Management Agency (FEMA) Grant PR0060-A, por la National Science Foundation (NSF) Grant CMS-9907440, y por el Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez. Los autores agradecen el apoyo de los estudiantes Ledwin Mercury y Raúl Enrique Zapata, quienes colaboraron en tareas del laboratorio de viento, y al Dr. Carlos A. Prato, por sus recomendaciones en las etapas finales de este trabajo.

REFERENCIAS

- ASCE (1999). *Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures*, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 67, New York, USA, pp. 1-214.
- ASCE (1998). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ASCE 7-98 Standard, American Society of Civil Engineers, New York, USA.
- Cermak, J. E. (1975). "Applications of Fluid Mechanics to Wind Engineering – A Freeman Scholar Lecture", *Journal of Fluids Engineering*, 97(1), pp. 9-33.
- Davenport A. G. (1960). "Rationale for Determining Design Wind Velocities", *Journal of Structural Engineering*, 86, pp. 39-68.
- Esslinger M., Ahmed S., Schroeder H. (1971). "Stationary Wind Loads of Open Topped and Roof-topped Cylindrical Silos (in German). *Der Stahlbau*, pp. 1-8.
- Falcinelli, O., Elaskar, S. A., Godoy, L. A., Tamagno, J. (2002). "Efectos de Viento sobre Tanques y Silos mediante CFD", *Mecánica Computacional*, 21, pp. 256-273.
- Flores, F. G. y Godoy, L. A. (1998). "Buckling of Short Tanks due to Buckling", *Engineering Structures*, 20(8), pp. 752-760.
- Godoy, L. A. (2000). "Catastrofes Produzidas por Furacoes no Mar do Caribe, Capitulo 26 en Acidentes Estruturais na Construcao Civil", vol. 2 (Ed. A. J. P. da Cunha, N. A. Lima, V. C. M. de Souza), Editora Pini, Sao Paulo, Brasil, pp. 255-262.
- Godoy L. A., Portela, G., Sosa, E., Suárez, L.E., Virella, J. C. y Zapata, R. E. (2002). "Damage due to Buckling in Aboveground Storage Tanks", en *Proceedings of the Int. Conf. on the Behavior of Structures with Damage, DAMSTRUC 2002* (Ed. P. Castro), Universidad Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Brasil.
- Gretler, W. (1978). "Beulversuche an Zylindrischen Modellen im Windkanal" (en alemán). Institut für Strömungslehre und Gasdynamik, TU Graz.
- Macdonald P. A., Kwok K. C. S., Holmes J. H. (1988). "Wind Loads on Circular Storage Bins, Silos and Tanks: I. Point Pressure Measurements on Isolated Structures". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 31, pp. 165-188.
- Maher, F.J. (1966). "Wind Loads on Dome-cylinders and Dome-cone Shapes". *Journal of Structural Division*, ASCE, 91(3), pp. 79-96.
- Megson T.H.G., Harrop J., Miller M. N. (1987). "The Stability of Large Diameter Thin-walled Steel Tanks Subjected to Wind Loading". ECCS Colloquium on Stability of Plates and Shell Structures, Ghent University, pp. 529-536.
- Moran M. J. y Shapiro H. N. (2000). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 4th edition. John Wiley & Sons.
- National Instrument (2000). *LabVIEW software, version 5.1*. National Instruments, Austin, Texas, USA.
- Purdy D. M., Maher P. E. and Frederick D. (1967). "Model Studies of Wind Loads on Flat-top Cylinders". *Journal of Structural Division*, ASCE, 93, pp. 379-395.
- Resinger F., y Greiner R. (1982). "Buckling of Wind-loaded Cylindrical Shells-application to Unstiffened and Ring-stiffened Steel Tanks", en *Buckling of Shells*, Ramn E. (ed.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 217-281.
- Sabransky I. J., Melbourne W. H. (1987). "Design Pressure Distribution on Circular Silos with Conical Roofs". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 26, pp. 65-84.

- Simiu E., Scanlan R. H. (1986). *Wind Effects on Structures. An Introduction to Wind Engineering*. John Wiley & Sons.
- Wieringa, J. (1992). "Updating the Davenport Roughness Classification". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 44, pp. 357-368.