

INFLUENCIA DE LA TOPOGRAFIA SOBRE PRESIONES POR VIENTO EN TANQUES USANDO CFD

Oscar A. Falcinelli^{*}, Sergio A. Elaskar^{*} y Luis A. Godoy[&]

^{*} Departamento de Aeronáutica, FCEFYN, Universidad Nacional de Córdoba
Av. Velez Sarfield 1601. Córdoba 5000, Argentina.
selaskar@efn.uncor.edu

[&] Departamento de Estructuras, FCEFYN, Universidad Nacional de Córdoba y CONICET
Casilla de Correo 916, Correo Central, Córdoba 5000, Argentina.
lgodoy@com.uncor.edu

Key words: CFD, Finite Elements, NASTRAN, Tanks, Wind-pressures.

Resumen. *En este trabajo se presenta un modelo computacional de flujo de viento alrededor de tanques de almacenamiento de petróleo o de agua, ubicados en terrenos accidentados. El trabajo tiene dos objetivos: (a) determinar la distribución de presiones sobre las paredes de la estructura. (b) determinar posiciones favorables y no favorables de emplazamiento de la estructura en relación al accidente geográfico considerado. El campo de aplicación del estudio esta asociado al comportamiento estructural no lineal de tanques superficiales. El modelo usa las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento según los tres ejes, y energía acopladas con las ecuaciones de energía cinética turbulenta y disipación de energía cinética turbulenta provenientes del modelo $k-\varepsilon$ utilizado. El modelo se resuelve mediante el código NASTRAN CFDdesign. Se supone flujo turbulento, estacionario, incompresible e isotérmico. El modelo de tanque utilizado para los cálculos es un tanque de techo cónico con una pendiente de 3/16 en escala real, con relación de altura / diámetro de 0.4. La topografía considerada es bidimensional (no varía su forma en la dirección normal a la corriente incidente).*

1 INTRODUCCION

El problema de evaluar las presiones debidas a viento que actúan sobre un tanque puede ser estudiado mediante técnicas experimentales (simulaciones en túnel de viento) o técnicas computacionales (simulaciones de CFD). Sin embargo, cuando se intenta modelar situaciones más complejas, los estudios experimentales pueden resultar limitados por las dimensiones del túnel o sus características, y en ese caso las técnicas computacionales son las únicas posibles de llevarse a cabo con costos razonables. En este trabajo se aborda un problema de este tipo, en el que interesa evaluar la influencia de la topografía sobre las presiones debidas a viento en tanques cilíndricos.

La influencia de la topografía sobre las presiones de viento ha sido reconocida por bastante tiempo en el campo de la ingeniería civil, de modo que las normas más empleadas en la actualidad (normas ASCE 7-95¹) incluyen factores para considerar la ubicación de la estructura en accidentes topográficos, como sierras o lomadas. Los llamados factores topográficos trasladan las velocidades de terreno abierto al lugar de interés y la modifican mediante multiplicadores que contemplan la posición del punto considerado^{2, 3}; esos factores aparecen como independientes del objeto estructural que se estudia. Para situaciones más complejas, la norma en sus comentarios recomienda emplear el juicio del ingeniero, el consejo de experto o estudios de túnel de viento. Este trabajo explora una alternativa más racional a las dos primeras, que es la simulación numérica del problema mediante técnicas apropiadas.

La segunda sección de este trabajo contiene aspectos generales del modelado físico del problema. La Sección 3 trata de la modelación computacional del problema usando un código de elementos finitos para representar el flujo de aire alrededor de la sierra y la estructura. El modelado del flujo sobre la sierra sin incluir el tanque, se trata en la Sección 4, mientras que en la Sección 5 se ve el flujo sobre un tanque aislado en el llano, y en la Sección 6 se incluyen resultados de flujo considerando la sierra y el tanque en distintas ubicaciones. Finalmente se presentan las conclusiones en la Sección 7.

2 MODELO FISICO DE FLUJO TURBULENTO

Para el modelado de los flujos analizados se supusieron en todos los casos las siguientes hipótesis: (a) Flujo medio estacionario, (b) Viscoso, (c) Incompresible, (d) Adiabático, (e) Turbulento.

Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de estos flujos son las de Navier-Stokes y la ecuación de continuidad promediadas en el tiempo más las ecuaciones que surgen del modelo de turbulencia utilizado. En este caso se utilizó el modelo $K-\epsilon$. La explicación de las ecuaciones utilizadas puede encontrarse en un trabajo anterior de los autores⁴ del cual, el presente, es continuación.

Para la resolución de las ecuaciones que gobiernan el problema se ha usado el programa de elementos finitos CFDesign, mientras que, para la generación de las mallas se utilizó el programa FEMAP (finite element modeling and postprocessing), ambos pertenecientes a NASTRAN.

3 DESCRIPCION DE LOS MODELOS ANALIZADOS

El objetivo del presente trabajo es el modelado del flujo atmosférico sobre tanques de almacenamiento ubicados en distintas posiciones relativas a un accidente geográfico bidimensional similar a una sierra. Para alcanzarlo, se debió primero ajustar los parámetros necesarios para estabilizar la capa límite atmosférica, cosa que se hizo con modelos bidimensionales y luego se realizaron discretizaciones tridimensionales.

Los resultados arrojados por las mallas bidimensionales fueron contrastados con perfiles extraídos de norma ASCE 7-02¹.

Una vez encontrados los parámetros necesarios para la estabilización del perfil de velocidades atmosférico, se analizaron cuatro modelos tridimensionales. En todos ellos se modeló el mismo tanque y se lo emplazó en distintas posiciones respecto de la sierra.

Todos los volúmenes de control tridimensionales utilizados son rectangulares. Sus dimensiones aproximadas son de 1000 m hacia delante y detrás de la cima de la sierra; se modeló la mitad del flujo aprovechando la simetría del problema por lo que, teniendo mallas de 800 m de ancho, se modeló la solución en una zona de 1600 m; el alto es de 1100 m.

En todos los casos se fijó a la entrada del volumen de control un perfil de velocidades logarítmico extraído de norma ASCE 7-02¹ de la forma:

$$u = u_{ref} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

donde u es la componente de la velocidad según la dirección de incidencia; u_{ref} es un parámetro que ajusta la intensidad de la corriente incidente; z es la altura respecto del piso y z_0 es una constante. Para este caso, a las constantes se les dieron los siguientes valores:

$$u_{ref} = 7.64 \frac{m}{s} \quad (2)$$

$$z_0 = 0.0021m \quad (3)$$

Las condiciones de contorno impuestas en las mallas tridimensionales fueron velocidad en el frente y techo del volumen de control, presión en el fondo, no deslizamiento en el piso y no penetración en ambos laterales.

La presentación de resultados en este trabajo se hace siempre en forma dimensional y en unidades del sistema internacional. Se hace notar que para este tipo de flujos no hay una velocidad característica con la cual hacer las adimensionalizaciones sino que ésta es función de la altura. Las presiones presentadas son relativas y la presión de referencia es distinta de un modelo a otro; sin embargo esto no resulta inconveniente ya que, por ser el flujo incompresible, el valor absoluto de la presión no es relevante sino que lo importante es la variación de la misma admitiéndose cualquier cambio de presión de referencia para facilitar la comparación inmediata de resultados.

Como los resultados se presentan en forma dimensional, se hace necesario adjuntar la información de las características del fluido utilizado. Para todos los modelos se utilizó la

hipótesis de incompresibilidad, es decir densidad constante de $1.2047 \frac{Kg}{m^3}$, el perfil de velocidades indicado en las ecuaciones 1 a 3 y viscosidad dinámica de $0.00035 \frac{N.s}{m^2}$.

4 MODELADO DEL FLUJO SOBRE LA SIERRA

En el software CFXDesign, cuando se utiliza el modelo de turbulencia K- ϵ , la distribución de velocidades dentro de las capas inferiores de la capa límite no se calcula sino que se impone según una ley preestablecida (logarítmica en este caso). Esta ley llamada “ley de pared” modela las capas inferiores de la capa límite y se impone en el primer elemento adyacente a los contornos sólidos. De este modo, el alto que el usuario del programa le da al primer elemento adyacente al cuerpo es el alto que tendrán las capas inferiores de la capa límite. Una vez obtenida una solución, ciertos indicadores muestran si el alto elegido de antemano era correcto o no.

El flujo atmosférico es el flujo interior de una capa límite (la capa límite atmosférica), por ende, para el modelado de estos flujos, el elemento adyacente al piso tendría que tener un alto comparable al del volumen de control. Esto imposibilitaría el modelado de cualquier objeto inmerso en este. La solución que se ha encontrado a este problema es modelar todo el flujo atmosférico como un flujo externo y alcanzar la estabilidad del perfil de velocidades modificando la tensión cortante en la superficie del piso a través de la modificación del alto del primer elemento adyacente al mismo.

Como primera etapa del trabajo se buscó entonces el alto de elementos adyacentes al piso que produjera perfiles de velocidad estables en las zonas de piso plano y similares a los extraídos de norma ASCE 7-02¹ alrededor de la sierra.

Cuando se trataron de comparar los resultados arrojados por el programa y por la norma, apareció el inconveniente que en la norma de referencia se explica la perturbación que un objeto genérico produce, pero no se aclara la forma del mismo sino sólo su relación $\frac{\text{alto}}{\text{largo}}$, mientras que el programa CFXDesign resulta altamente sensible a la forma del accidente geográfico. Además, la geometría del accidente geográfico que se quería analizar caía fuera de los valores tabulados en la referencia¹. La norma aclara un procedimiento para calcular un perfil de velocidades para geometrías con valores del parámetro $\frac{\text{alto}}{\text{largo}}$ fuera de rango, pero el resultado arrojado por este procedimiento resulta ser igual al de una geometría con una base mucho mayor ($\frac{\text{alto}}{\text{largo}}$ muy distinto). Todo esto hace que los resultados arrojados por la norma de referencia¹ sean tenidos en cuenta como un simple indicador del orden de magnitud pero de ningún modo del valor exacto que debe tener la velocidad a cada altura.

Se modelaron entonces varios perfiles de sierras y se encontró que la única curva predicha por la norma quedaba comprendida entre las curvas arrojadas por los distintos modelos analizados, cosa que hace suponer que algún modelo intermedio entre los estudiados podría llegar a coincidir con la referencia. Se encontró también que, para ciertas geometrías en particular, los valores de norma eran muy similares a los computados por el programa.

Como la cantidad de parámetros que se pueden variar en el perfil de una sierra dan lugar a un gran número de posibilidades para una misma relación $\frac{\text{alto}}{\text{largo}}$, no se buscó la forma que

produjera un perfil de velocidades exactamente coincidente con el de la referencia sino que se contrastó solamente el orden de magnitud y las características generales del perfil (como alto de la sobrevelocidad máxima y magnitud de la misma). Por otra parte, no era objeto del trabajo el modelar específicamente la sierra que reprodujera el perfil de velocidades de norma, sino que el modelo de accidente geográfico de interés ya estaba especificado de antemano. Un esquema de este puede verse en la Figura 1. Para esta geometría en particular, en la Figura 2 se muestra la distribución de velocidades como función de la altura predicha por la norma ASCE 7-02¹ y por el programa sobre la cima de la sierra.

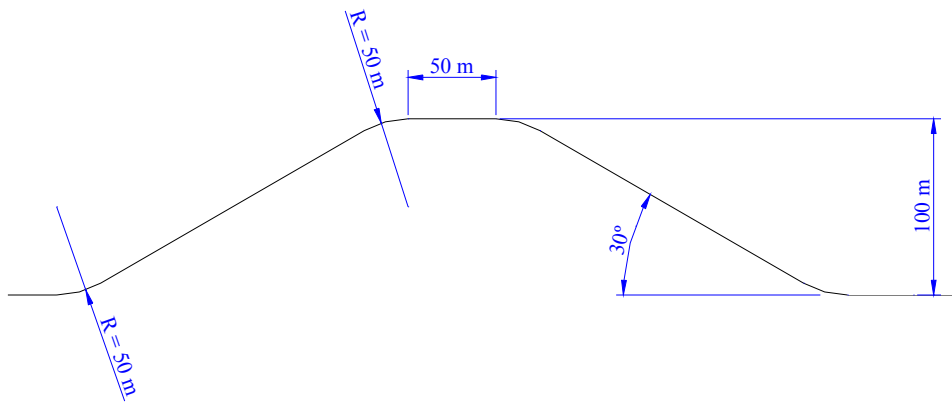


Figura 1. Esquema del accidente geográfico modelado.

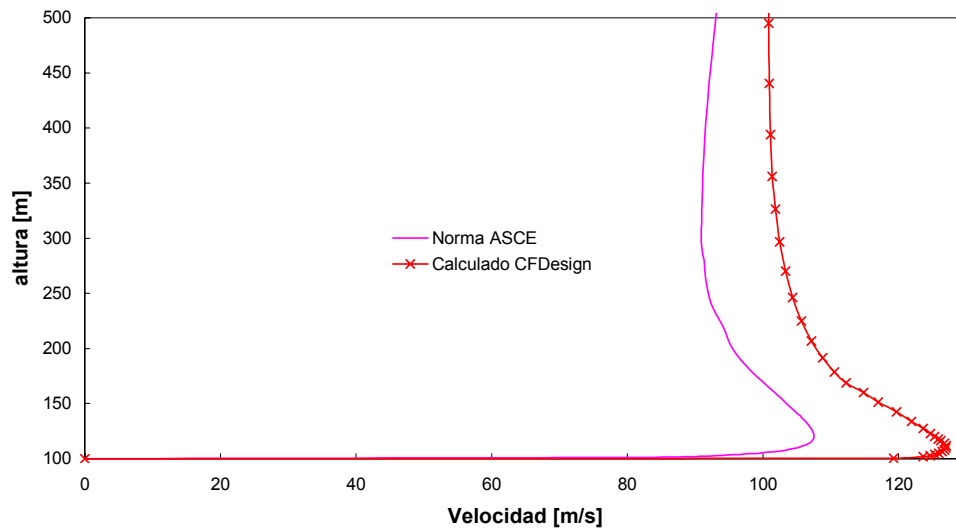


Figura 2. Comparación de curvas de velocidad como función de la altura en la cima de la sierra.

Para esta geometría en particular, la mayor diferencia con la referencia de ASCE es del 19%. Para otras geometrías analizadas se llegó a diferencias máximas del orden del 5%; sin embargo, estas geometrías no presentaban ningún interés más que la validación del método de trabajo utilizado. Se consideró de este modo al método como válido y se pasó entonces al desarrollo de los modelos tridimensionales.

5 MODELADO DEL FLUJO SOBRE EL TANQUE AISLADO

La geometría del tanque analizado fue elegida por ser frecuente en este tipo de estructuras. Se trata de un tanque cilíndrico de 30.48m de diámetro, 12.192m de alto, con un techo cónico con una pendiente de $3/16$. En la Figura 3 puede verse un esquema del mismo.

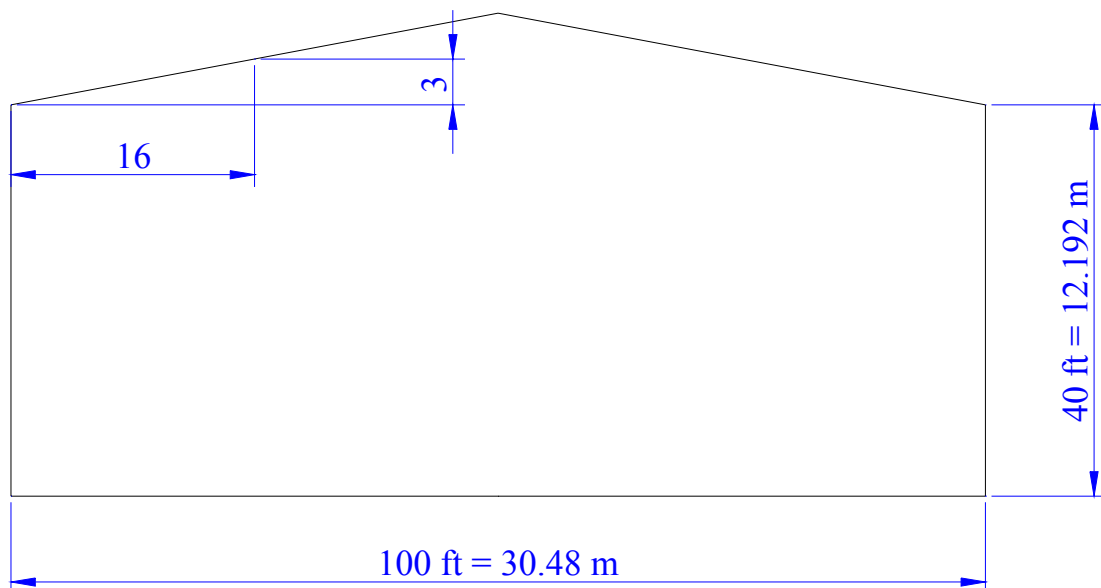


Figura 3. Esquema del tanque modelado.

Como se mencionó anteriormente, no hay en la bibliografía datos experimentales con los que contrastar los resultados obtenidos para el modelo de escala completa y mucho menos para el caso del tanque emplazado en las proximidades de un accidente geográfico. Los únicos datos experimentales disponibles para la validación del presente análisis son los obtenidos por MacDonald *et al.*,⁵ y la reproducción numérica de estos resultados puede verse en el trabajo⁴.

El flujo sobre el tanque aislado (o sea considerado sobre terreno plano) se analizó en primer lugar, para luego poder cuantificar en forma relativa el efecto favorable o desfavorable de las distintas posiciones de emplazamiento.

El modelo utilizado fue construido con elementos en forma de tetraedros y cuñas. Tiene en total 29088 nodos y 28320 elementos. En las Figuras 4 y 5 puede observarse la distribución de presiones obtenida para este modelo.

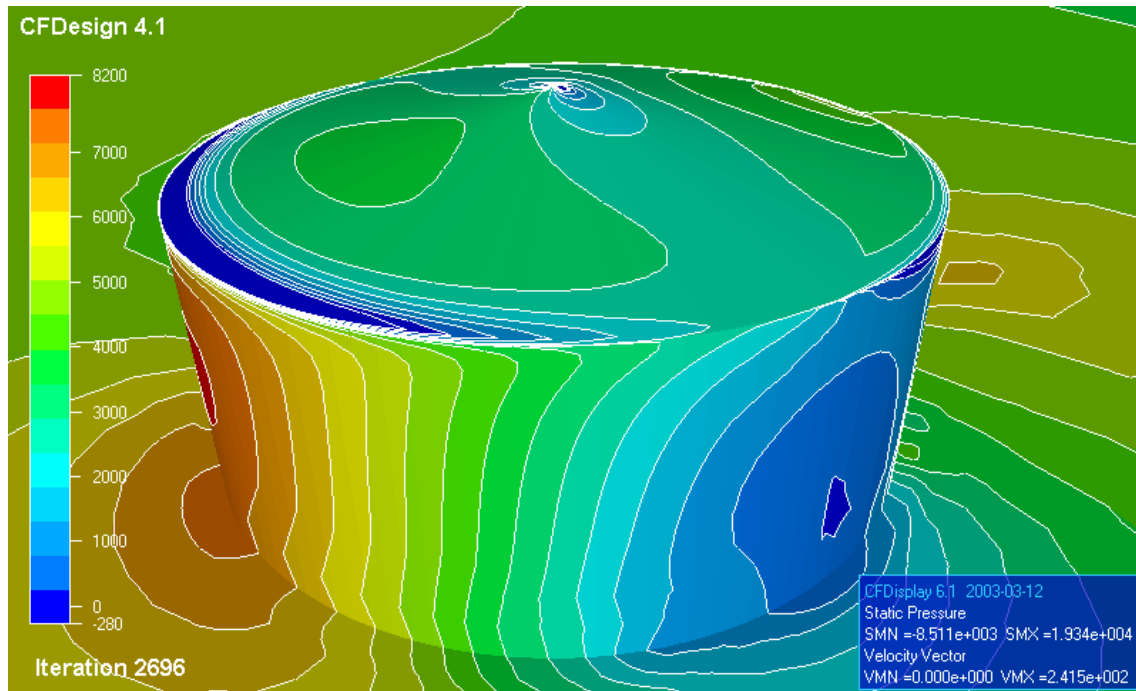


Figura 4. Distribución de presiones obtenida para el modelo de tanque aislado vista de arriba y a 45° respecto de la velocidad incidente. Presiones en Pa.

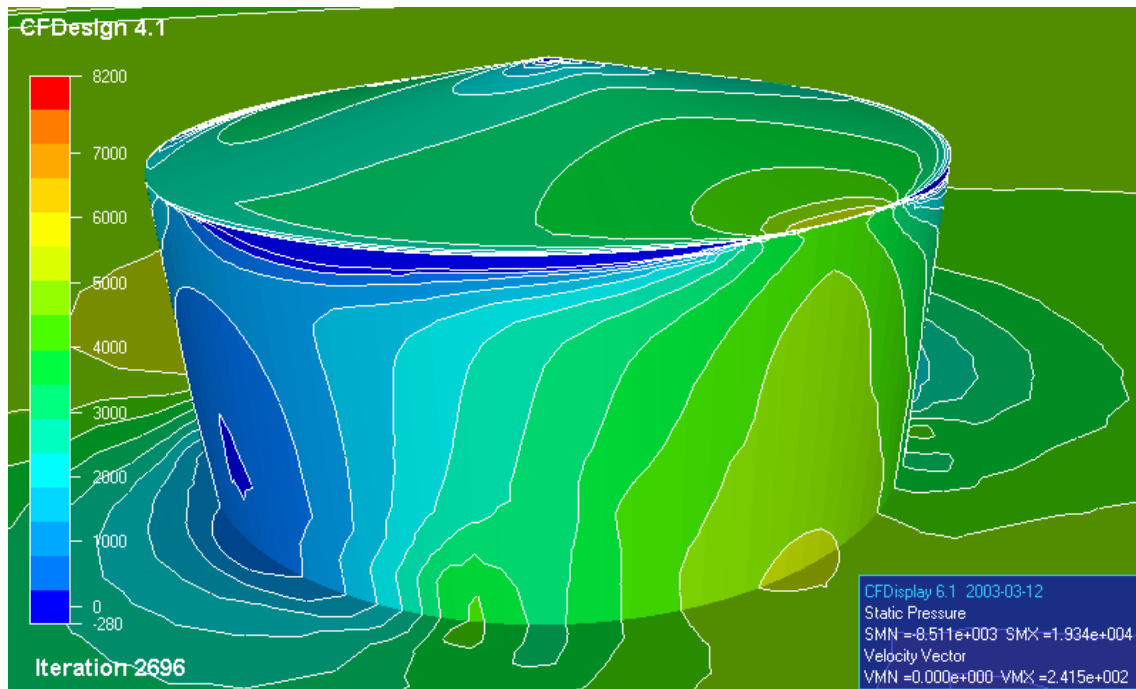


Figura 5. Distribución de presiones obtenida para el modelo de tanque aislado vista de arriba y a 135° respecto de la velocidad incidente. Presiones en Pa.

La distribución de presiones es similar a la obtenida por MacDonald *et al.*⁵ a diferencia que, por tener estos tanques una altura mucho menor en relación a su diámetro, la presión en una dada estación de la pared, no presenta tanta variación en la altura. Otra diferencia destacable es la aparición de las zonas de baja presión en la parte trasera del tanque (opuesta a la zona de impacto), debajo del filo formado por la unión del techo y la pared. Esta diferencia puede deberse a que la curva de menor altura que registran MacDonald *et al.*⁵ es al 94% de la altura de su tanque (equivalente al 85% de la altura en este tanque) y a esa altura, en la Figura 5 se puede ver que no se registran bajas presiones.

6 MODELADO DEL FLUJO SOBRE EL TANQUE EMPLAZADO EN DISTINTAS PARTES DE LA SIERRA

Una vez obtenida la distribución de presiones para el tanque aislado, se realizaron tres modelos tridimensionales con el tanque de la Figura 3 emplazado en las siguientes posiciones:

1. Tanque en la base de la sierra.
2. Tanque en la ladera de la sierra.
3. Tanque en la sima de la sierra.

En la Figura 6 se muestra un esquema de las tres posiciones relativas de emplazamiento, con la sierra y el tanque dibujados a escala.

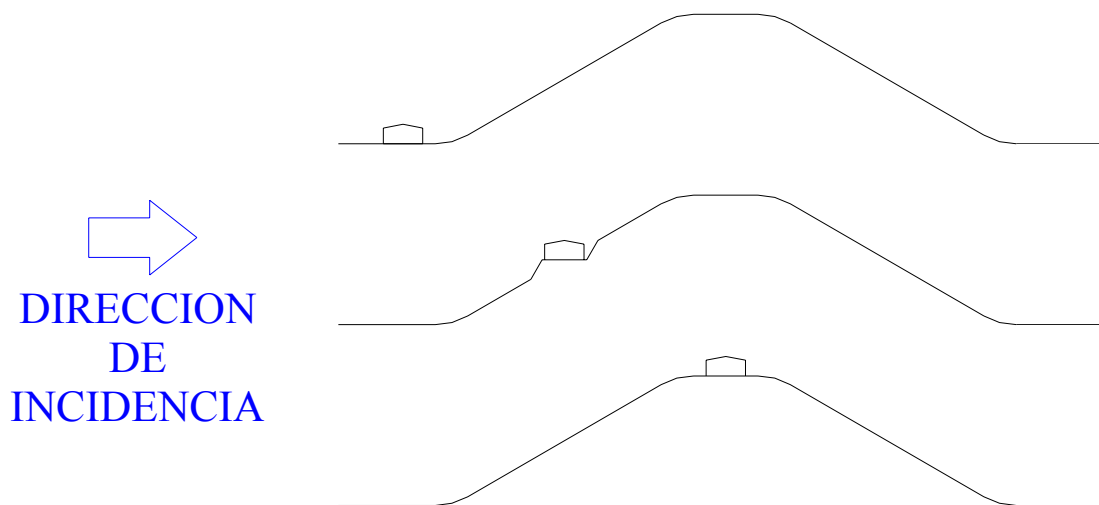


Figura 6. Esquema de las distintas posiciones de emplazamiento.

En el modelo con el tanque emplazado en la ladera de la sierra se hizo una superficie plana circular sobre la que se asentó el tanque y esa superficie se empalmó con el plano de la

ladera con conos de 30° de ángulo respecto de la vertical. Esto puede verse en las Figuras 9 y 10.

Las mallas utilizadas en todos los casos cuentan con elementos en forma de tetraedros y cuñas y tienen en total:

- 30445 nodos y 71938 elementos (tanque en la sima)
- 17935 nodos y 59781 elementos (tanque en la ladera)
- 22062 nodos y 47689 ladera (tanque en la base)

La distribución de presiones obtenida para el modelo de tanque emplazado en la sima de la sierra se muestra en las Figuras 7 y 8. La distribución de presiones obtenida para el modelo de tanque emplazado en la ladera de la sierra se muestra en las Figuras 9 y 10. La distribución de presiones obtenida para el modelo de tanque emplazado en la base de la sierra se muestra en las Figuras 11 y 12.

Es importante destacar la diferencia de escalas entre las Figuras 7 a 12. No obstante, puede verse que el emplazamiento que produce una mayor sollicitación sobre la estructura es el de la sima, mientras que el que más resguardo proporciona a la estructura es el de la base. Esto puede verse analizando el rango de variación de las presiones definido como la diferencia entre la máxima presión registrada en la zona de impacto menos la mínima registrada en la zona lateral. Para los cuatro emplazamientos analizados el parámetro así definido tomó los siguientes valores:

Sima	26724.48 Pa
Ladera	5243.02 Pa
Base	2699.47 Pa
Aislado	7562.20 Pa

Otra diferencia destacable es la que se presenta entre el flujo alrededor del tanque emplazado a media altura y el resto de los modelos. En este caso, el flujo se desprende al comenzar el techo y no vuelve a readherirse como ocurre en los otros. Esto puede apreciarse mejor observando las líneas de corriente del plano de simetría graficadas en la Figura 13.

Se observa también en la Figura 12 que en el modelo de tanque emplazado en la base de la sierra no aparecen los desprendimientos vorticosos señalados en la Figura 5. En realidad si se producen pero quedan confinados a una zona más pequeña que no llega a apreciarse en la figura. En el caso del tanque en la ladera no se producen ya que el flujo en el techo no está adherido en esa zona.

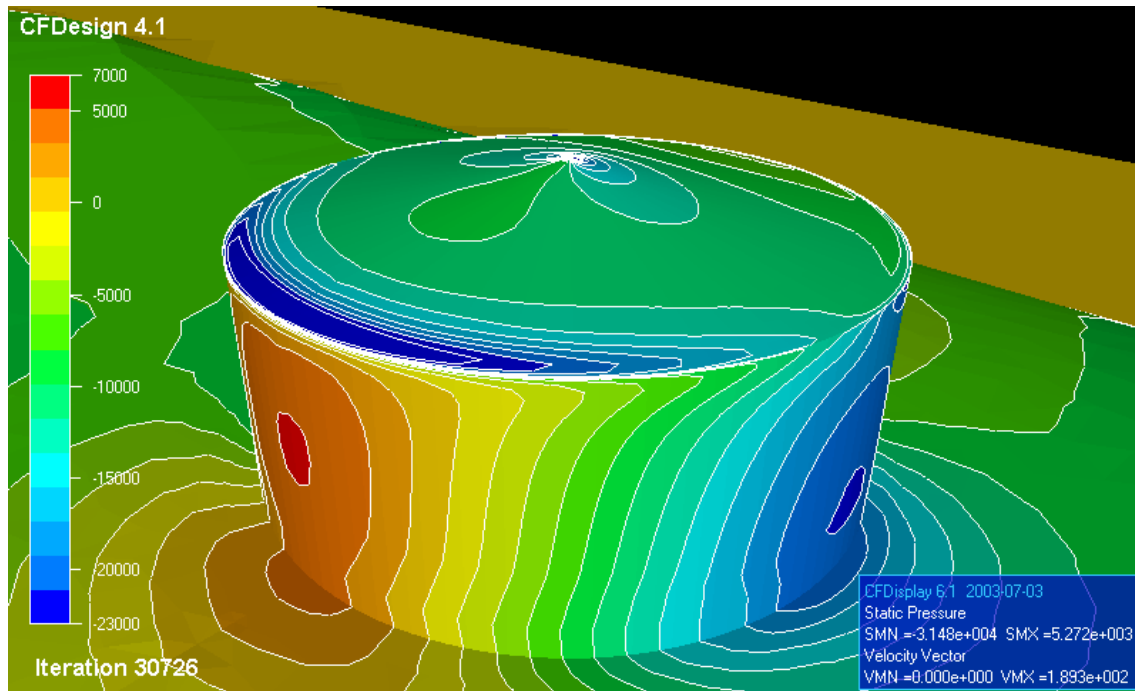


Figura 7. Distribución de presiones obtenida para el modelo de tanque emplazado en la cima de la sierra vista de arriba y a 45° respecto de la velocidad incidente. Presiones en Pa.

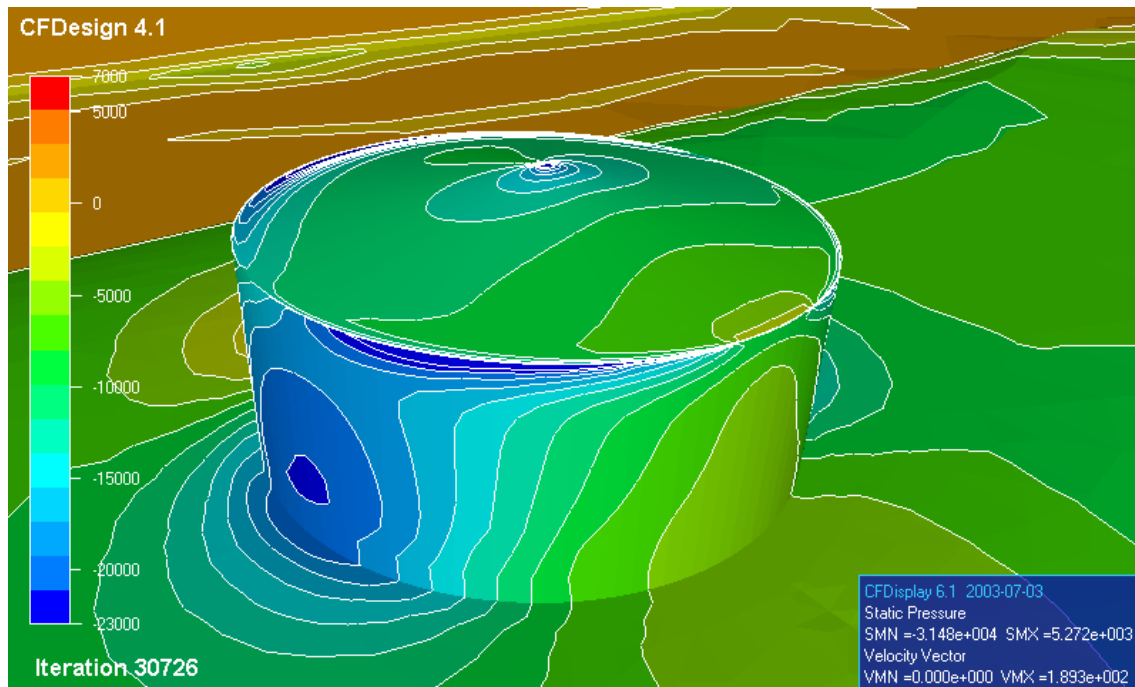


Figura 8. Distribución de presiones obtenida para el modelo de tanque emplazado en la cima de la sierra vista de arriba y a 135° respecto de la velocidad incidente. Presiones en Pa.

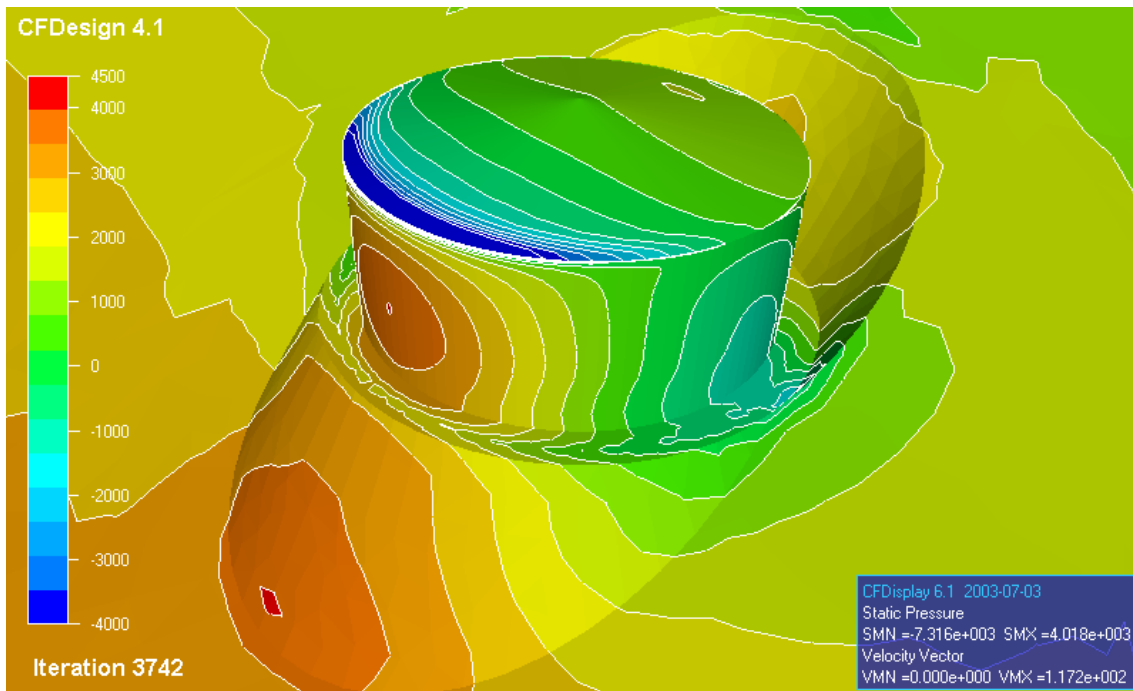


Figura 9. Distribución de presiones obtenida para el modelo de tanque emplazado en la ladera de la sierra vista de arriba y a 45° respecto de la velocidad incidente. Presiones en Pa.

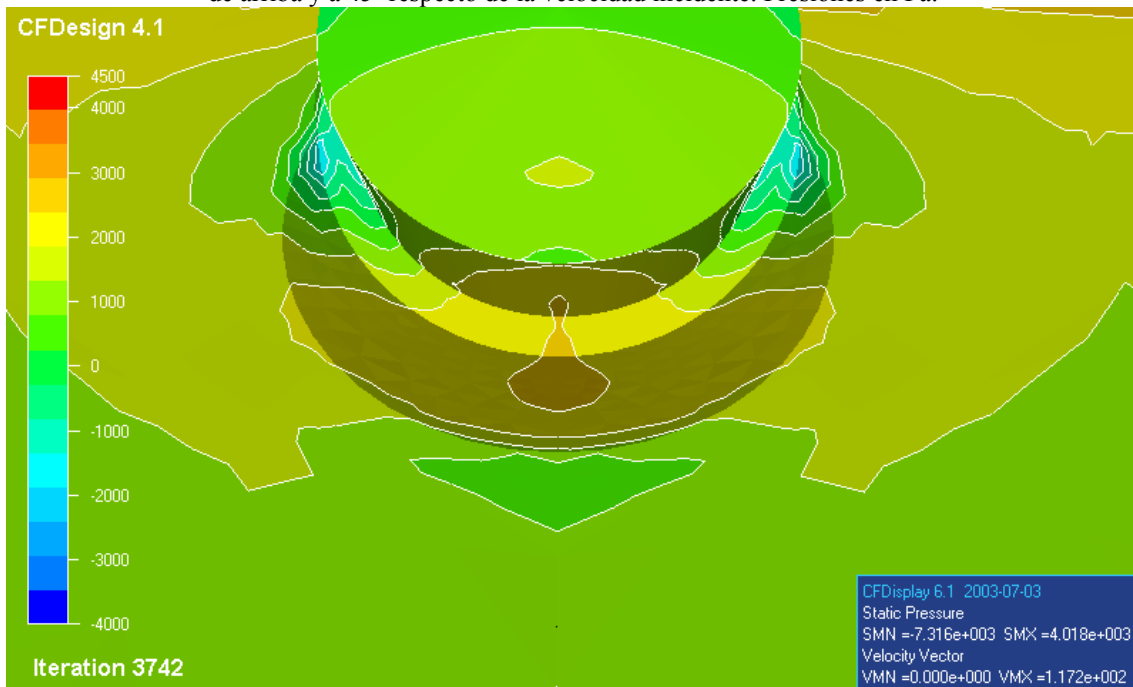


Figura 10. Distribución de presiones obtenida para el modelo de tanque emplazado en la ladera de la sierra vista de arriba y a 180° respecto de la velocidad incidente. Presiones en Pa.

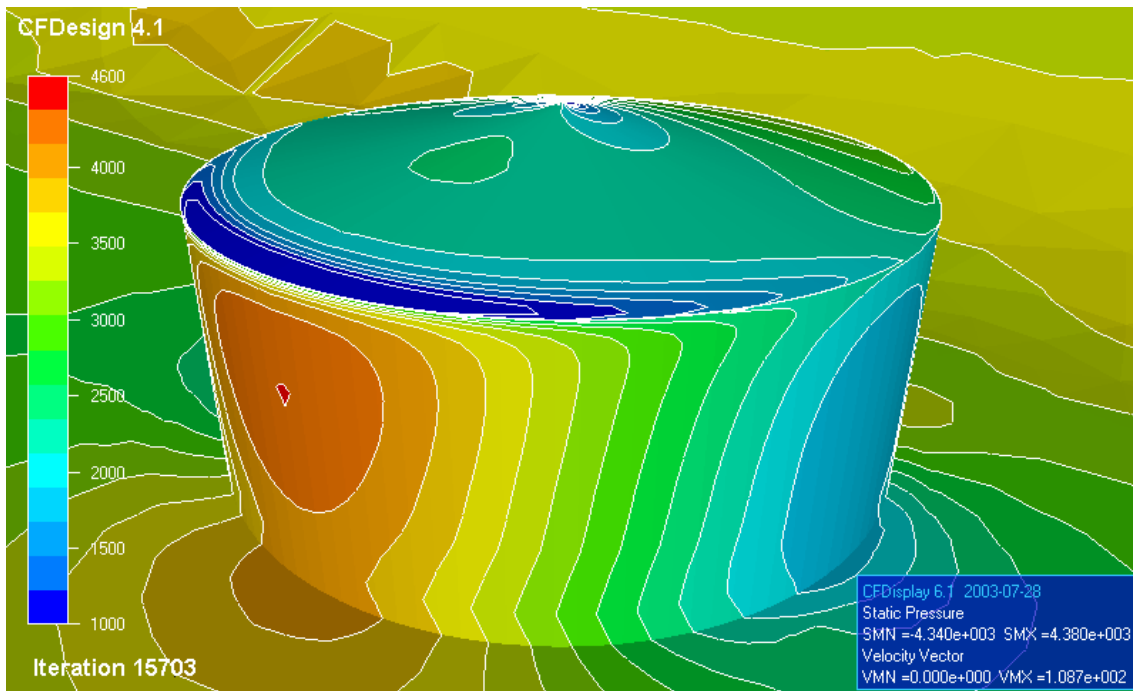


Figura 11. Distribución de presiones obtenida para el modelo de tanque emplazado en la base de la sierra vista de arriba y a 45° respecto de la velocidad incidente. Presiones en Pa.

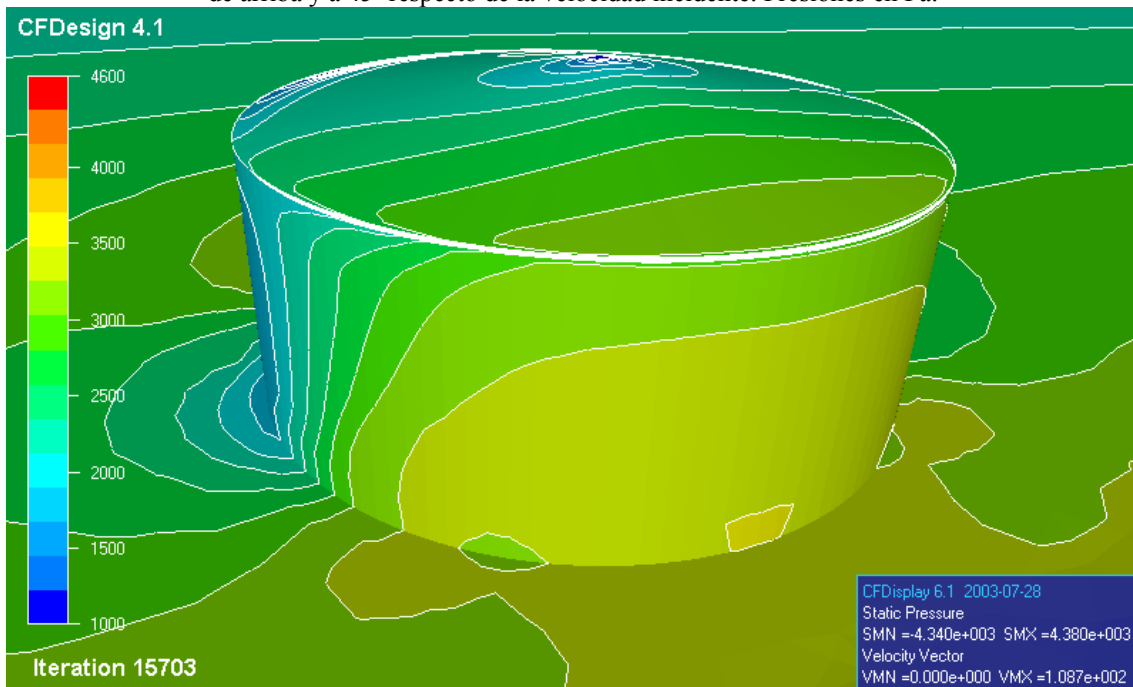


Figura 12. Distribución de presiones obtenida para el modelo de tanque emplazado en la base de la sierra vista de arriba y a 135° respecto de la velocidad incidente. Presiones en Pa.

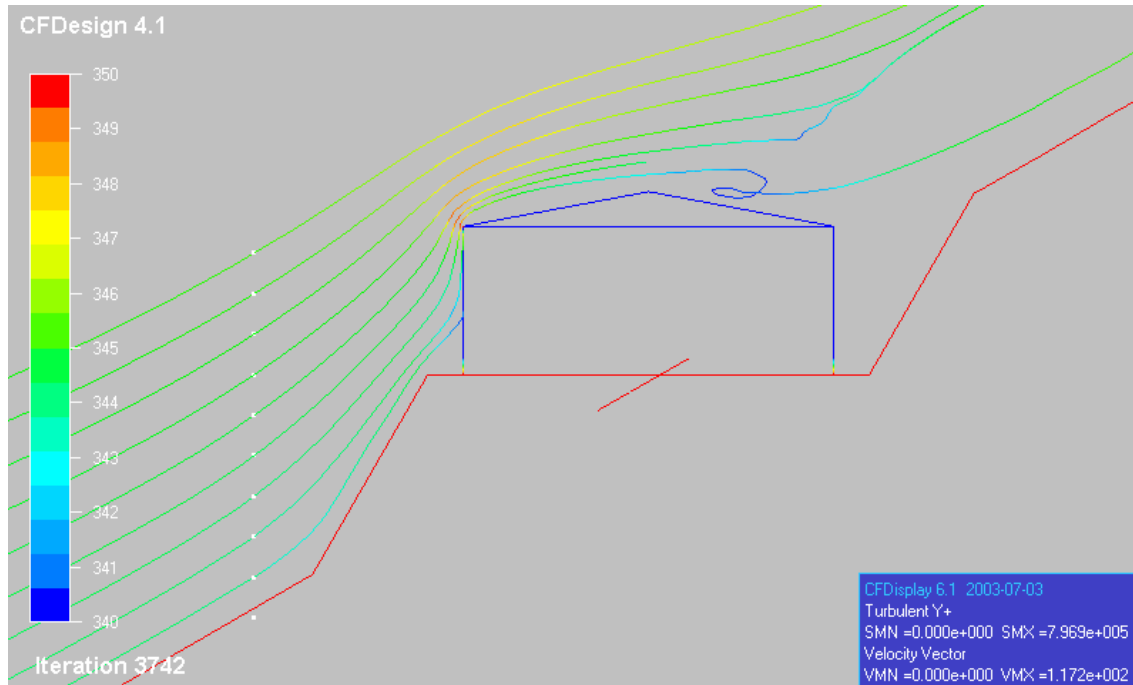


Figura 13. Líneas de corriente en el plano de simetría del modelo emplazado en la ladera de la sierra.

7 CONCLUSIONES

El tanque ubicado en la cima de la sierra se ve sometido a las corrientes más fuertes. Estas sobrevelocidades se deben a dos factores: uno es que la capa límite atmosférica toma más velocidad a medida que aumenta la altura (en ausencia de sierra) y otra es la forma de la sierra. La forma hace que la presión estática de toda la cima baje, por lo que las presiones absolutas a las que se ve sometido el tanque en la cima no son tanto mayores que en los otros tipos de emplazamiento. Sin embargo, la presión absoluta no tiene importancia en este caso ya que la fuerza sobre las paredes dependen de la diferencia de presiones entre la interior y la exterior. El parámetro más importante para la cuantificación de las cargas es la diferencia entre la presión externa máxima y mínima, que es independiente de la presión de referencia utilizada.

Hay una gran diferencia entre las presiones registradas en el modelo emplazado en la cima de la sierra y el resto de los analizados. Se destaca que el rango de variación de las presiones para este resulta ser 3.53 veces mayor al que se registra en el modelo de tanque aislado. La localización de tanques en la cima de una sierra es fuertemente desfavorable para la estructura y debe ser evitado en la medida de las posibilidades. Por el contrario, el emplazamiento en la base de la sierra produce el menor rango de variación de las presiones analizado, por lo que resulta sin dudas el más favorable.

Agradecimientos. Los autores agradecen a la Agencia Córdoba Ciencia y a CONICET por los subsidios otorgados para la ejecución de este proyecto. El primer autor tuvo una beca de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Córdoba durante el período de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] ASCE 7-02, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2002.
- [2] P. S. Jackson y J. C. R. Hunt, "Turbulent wind flow over a low hill", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **101**, pp. 929-955, (1975).
- [3] D. R. Lemelin, D. Surry y A. G. Davenport, "Simple approximations for wind speed-up over hills", *J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. **28**, pp. 117-127, (1988).
- [4] O. A. Falcinelli, S. A. Elaskar, L. A. Godoy y J. P. Tamagno, "Efecto de Viento Sobre Tanques y Silos Mediante CFD", *Mecánica Computacional*, vol **XXI**, pp. 256-273, (2002).
- [5] P. A. Macdonald, K. C. Kwok y J. D. Holmes, "Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: I. Point pressure measurements on isolated structures", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. **31**, pp. 165-188 (1998).