

EVALUACIÓN NUMÉRICA DE DISEÑOS DE CORTAVIENTOS PARA TORRES DE EXPLOTACIÓN PETROLÍFERA

**Horacio Nakabayashi^a, Nicolás Rojo^a, Diego Schister^a,
Germán Guido Lavalle^c, Axel E. Larreteguy^b**

^a*Alumnos de Grado, Carrera de Ingeniería Electromecánica*

^b*Director, Instituto de Tecnología*

*Facultad de Ingeniería y Ciencias Exactas, Universidad Argentina de la Empresa,
Lima 717, C1073AAO Ciudad de Buenos Aires, Argentina, alarreteguy@uade.edu.ar*

^c*GL&A Consultores, Cuba 2778 1 D,*

1428 Ciudad de Buenos Aires, Argentina, gguidolavalle@glya.com.ar

Palabras clave: large eddy simulation, cortavientos, torres petrolíferas

Resumen. Se analizó la utilización de barreras cortaviento para reducir localmente la velocidad del viento sobre equipos de torre y así permitir el trabajo de operarios aún con velocidades de viento relativamente altas. Se consideraron dos modelos de barrera, piramidal y plano, propuestos por una empresa del sector. Se evaluaron los diseños mencionados con modelos computacionales tridimensionales, de manera de predecir en detalle velocidades y presiones en toda la zona que rodea a la torre y la propia pantalla. Se obtuvieron también las fuerzas aerodinámicas actuantes sobre la pantalla y las frecuencias típicas de desprendimiento de vórtices, para alimentar eventuales cálculos estructurales posteriores. Se utilizó un software abierto de simulación (OpenFOAM) basado en Volúmenes Finitos, empleando Large Eddy Simulation con un modelo de Smagorinsky.

Se obtuvieron resultados numéricos que muestran que detrás de los cortavientos se desarrolla un flujo tridimensional, variable en el tiempo, con desprendimiento de vórtices, y se compararon estos resultados con los de ensayos experimentales previos realizados por otros autores con modelos a escala en túnel de viento. Las simulaciones permitieron concluir que los experimentos realizados eran correctos, en particular en lo que concierne al escalado, pero que no brindan resultados conservadores por dos razones: se midieron sólo valores medios en flujos que son pulsados, y se midieron sólo velocidades axiales en flujos que son tridimensionales.

En el caso de la barrera piramidal, las simulaciones predicen que la velocidad promedio en la región a proteger se reduce a menos de la mitad de la incidente pero, como fuera dicho, es variable en el tiempo y su valor máximo es sólo un 20% inferior. Por otra parte, se generan velocidades hasta un 50% superiores a los costados de la pantalla, lo que podría requerir cuidados especiales para el tránsito por esa zona.

En el caso de la barrera plana, la perturbación que introduce en el flujo es mucho mayor, resultando en mayores fuerzas de arrastre y velocidades que fluctúan más violentamente. En general, su desempeño es mucho peor que el anterior, por lo que debe descartarse.

La conclusión general es que los modelos ensayados no ofrecen suficientes ventajas para el uso que se pensó darles. Se recomendó el análisis de otros diseños, tales como la utilización de pantallas que dejen pasar parte del caudal incidente (barreras porosas) y/o la colocación de pantallas por delante y por detrás de la zona a proteger, lo cual es práctica común en, por ejemplo, las barreras forestales de protección de cultivos delicados.

1 INTRODUCCIÓN

Los procesos de exploración y explotación petrolífera involucran en general el uso de torres de perforación y extracción. En zonas ventosas como la Patagonia argentina, por ejemplo, la velocidad del viento es un factor importante de riesgo a tener en cuenta aún en las operaciones a nivel del suelo, y se vuelve crítico cuando se consideran las operaciones realizadas en posiciones de altura en las torres.

Una empresa del sector petrolero considera la utilización de cortavientos para reducir la velocidad del aire en sus equipos de torre y así permitir el trabajo de operarios aún con velocidades de viento relativamente altas. A estos efectos, la empresa ha diseñado estructuralmente dos modelos de barreras y los ha ensayado en un túnel de viento.

El objetivo de este trabajo es evaluar los diseños mencionados utilizando modelos computacionales tridimensionales, de manera de predecir en detalle velocidades y presiones en toda la zona que rodea a la torre y la propia pantalla. Se busca obtener también las fuerzas aerodinámicas actuantes sobre la pantalla y las frecuencias típicas de desprendimiento de vórtices, para poder alimentar eventuales cálculos estructurales posteriores.

En la sección siguiente se presentan los modelos provistos por la empresa para su evaluación y una síntesis de los resultados obtenidos en un túnel de viento. Finalmente, en la tercera sección se describen las simulaciones realizadas y se discuten las comparaciones con los resultados experimentales.

2 ANTECEDENTES

2.1 Diseños

Los cortavientos bajo análisis son los que se muestran en la Figura 1: el Modelo 1 es de tipo piramidal, mientras que el Modelo 2 es una placa plana inclinada.

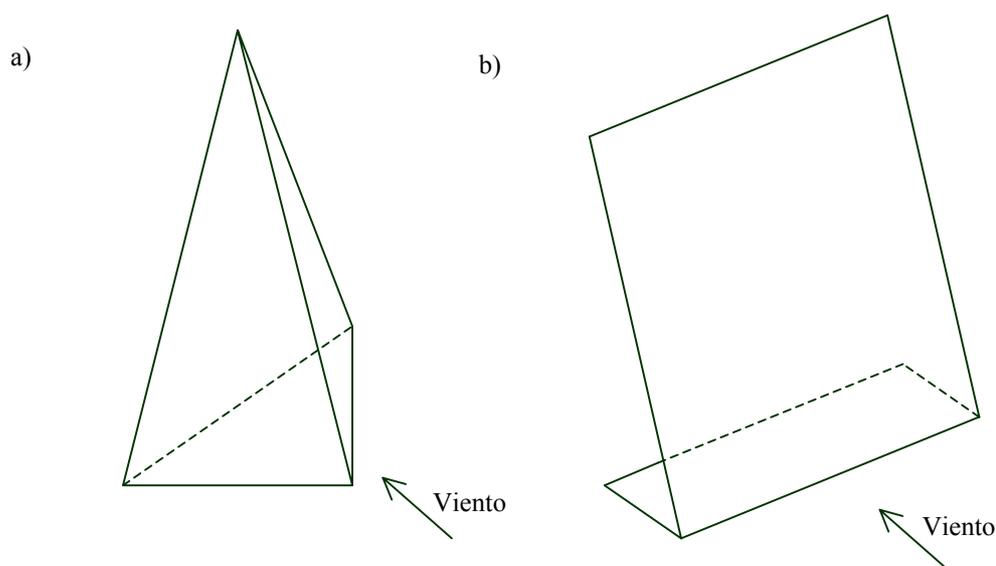


Figura 1. Cortavientos analizados: a) Modelo 1; b) Modelo 2

La altura real de ambos cortavientos es de 11 metros, superando por un metro a la zona de la torre que se desea proteger.

2.2 Ensayo experimental

Estos modelos fueron ensayados en un trabajo independiente en el túnel de viento del Laboratorio de Mecánica de los Fluidos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (Vignolo, 2007).

Los estudios experimentales fueron realizados manteniendo el fluido de trabajo, aire, utilizando modelos a escala 1/25 para el primero de los ensayados y 1/35 para el segundo. El instrumento utilizado para medir la velocidad del viento fue un anemómetro de hilo caliente Lutron am-4204, el que se posicionó en distintos puntos corriente abajo de los cortavientos.

En las páginas siguientes se muestran algunos de los principales resultados experimentales. Los mismos muestran una zona de baja velocidad detrás de las pantallas, como puede verse en la Figura 2 en la que se graficaron curvas de velocidad constante sobre el plano vertical de simetría. Notar que las dimensiones se reportan en referencia al prototipo a escala real. El mismo efecto puede verse si se grafica sobre planos horizontales. Como ejemplo, se muestran en la Figura 3 el obtenido para el Modelo 1 a una altura de 1,25 m y en la Figura 4 el correspondiente al Modelo 2 a una altura de 1,76 m.

Los resultados también se presentan en términos de perfiles de velocidad, como por ejemplo se muestra en la Figura 5, aunque cabe hacer notar que se trata de la magnitud de la variable y no de la dirección según aclara el autor del estudio.

Los resultados experimentales dejan varios puntos abiertos para el análisis:

- a) Variación de los resultados con el número de Reynolds. Los experimentos fueron realizados con un Re dos órdenes de magnitud inferior al esperado en la realidad, considerándose que los coeficientes adimensionales son independientes de Re por tratarse de un cuerpo con aristas.
- b) Variación temporal de la velocidad. Es bien sabido que este tipo de flujos es pulsado; es decir, varía con el tiempo debido al desprendimiento de vórtices. Las frecuencias características de este patrón oscilatorio deben ser conocidas para evitar efectos de resonancia en el diseño de la estructura.
- c) Velocidad máxima vs. velocidad promedio. Debido a la fluctuación recién mencionada, la velocidad máxima del viento en cualquier punto es mayor a la media. En los experimentos se utilizó un sistema de medición que no permite observar la velocidad en función del tiempo sino que sólo entrega valores medios, lo cual resulta en evaluaciones no conservadoras.
- d) Velocidad axial vs. velocidad. El anemómetro utilizado mide sólo la componente de velocidad perpendicular a su eje y en la dirección de la estructura de tipo canal que presenta en su extremo, según fuera confirmado por el propio fabricante. Los cortavientos generan componentes de la velocidad en las dos direcciones perpendiculares a las del viento incidente (se asume que el instrumento fue posicionado de manera de medir velocidades axiales, aunque el informe correspondiente no lo aclara), por lo que la magnitud de la velocidad será siempre superior a la medida experimentalmente.
- e) Fuerza resultante. En los experimentos no se reportan mediciones de presión, necesarias para obtener la fuerza resultante sobre los cortavientos ensayados.

Con el objeto de clarificar estas cuestiones, se realizaron las simulaciones que se describen en la siguiente sección.

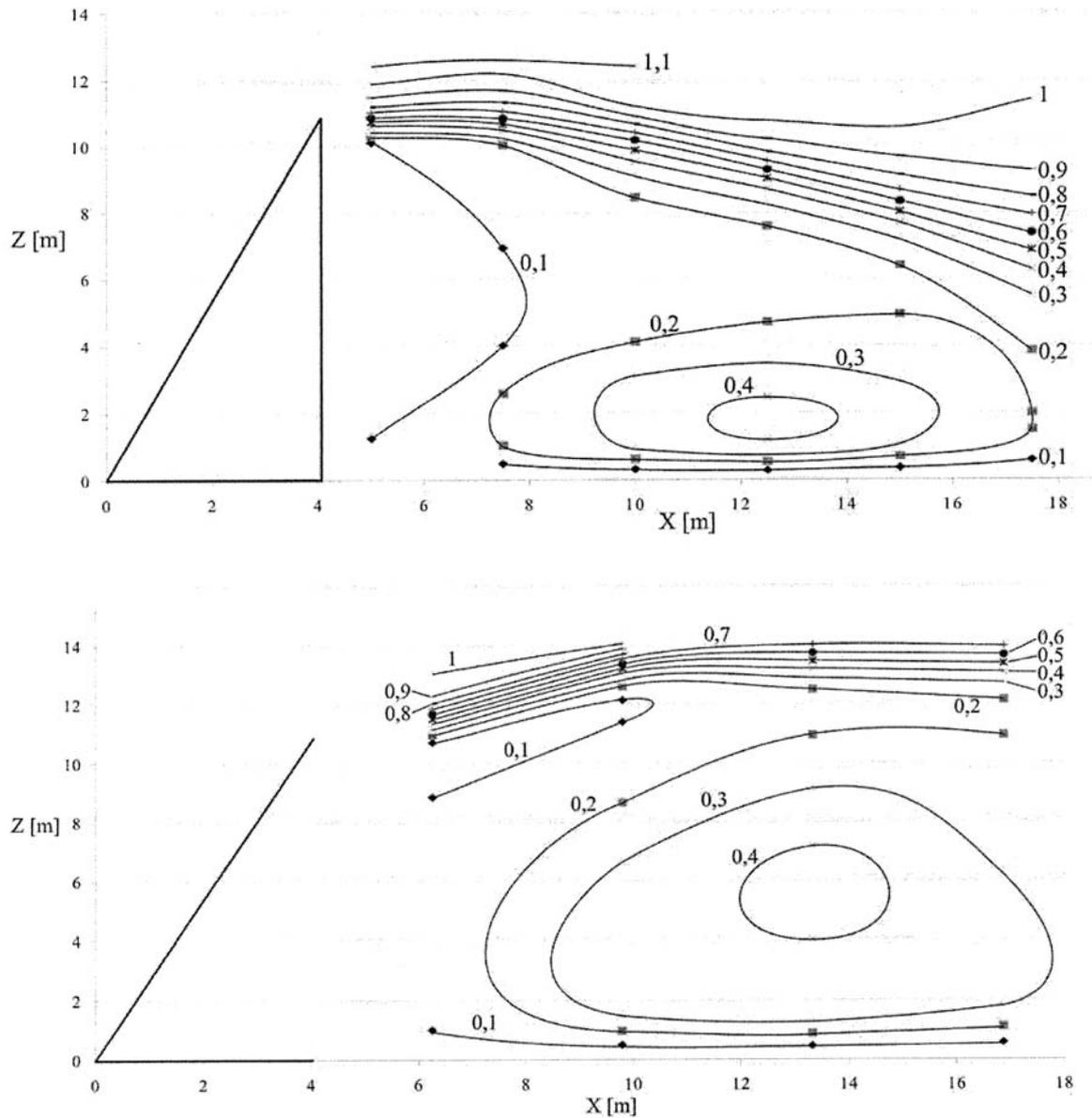


Figura 2. Curvas experimentales de velocidad V_x constante en el plano de simetría, Modelos 1 (arriba) y 2 (abajo)

(Vignolo 2007, Figs. 10 y 11).

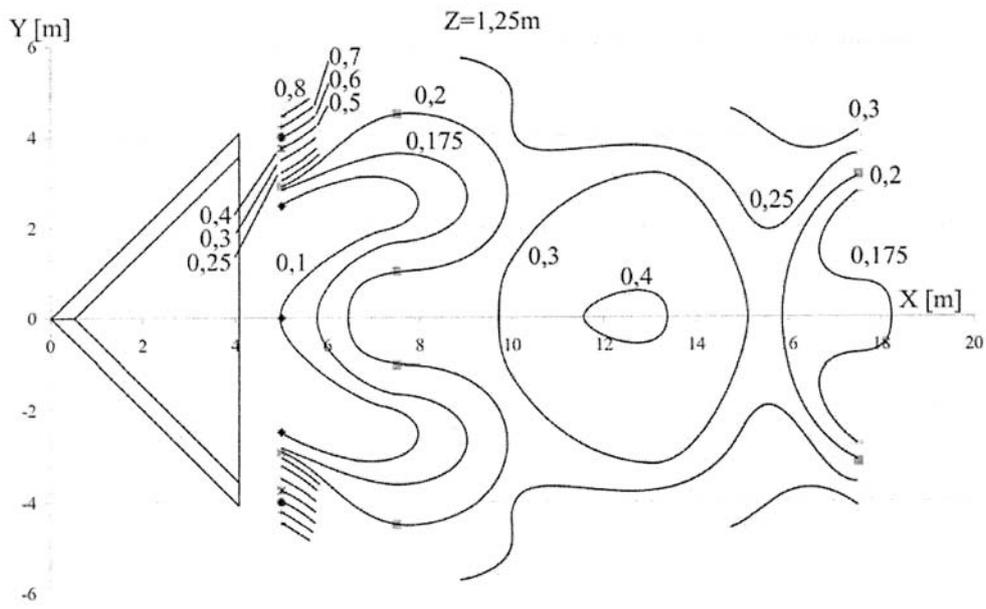


Figura 3. Curvas experimentales de velocidad constante sobre el Modelo 1 en el plano horizontal en $z=1,25$ m (Vignolo 2007, Fig. 15)

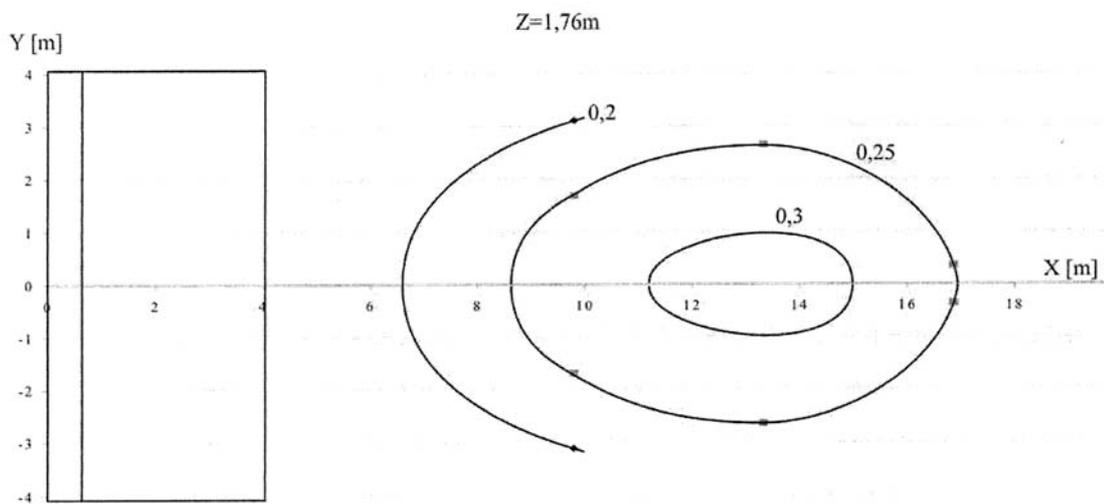


Figura 4. Curvas experimentales de velocidad constante sobre el Modelo 2 en el plano horizontal en $z=1,76$ m (Vignolo 2007, Fig. 19)

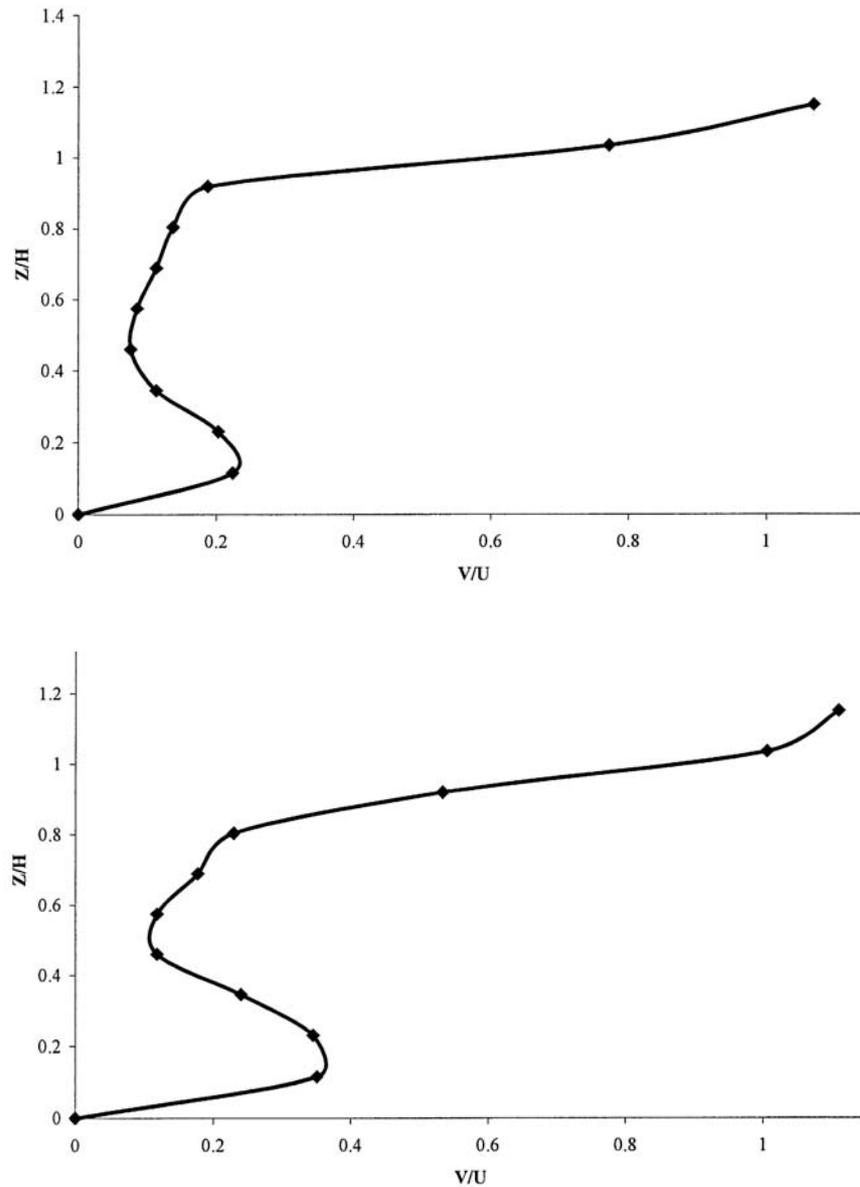


Figura 5. Ejemplo de perfiles de velocidad V_x experimentales, Modelo 1, puntos $X=-7.5 - Y=0$ (arriba) y $X=10, Y=0$ (abajo) (Vignolo 2007, Figs. A2 y A3).

3 SIMULACIONES

3.1 Herramientas de Simulación

En este trabajo se utilizó el código *OpenFoam* (OpenCFD Ltd., 2007) corriendo bajo una plataforma Linux. Este programa utiliza un método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes sobre cualquier malla tridimensional no estructurada de elementos poliédricos.

Para generar las mallas y discretizar el dominio para cada uno de los modelos, se utilizó el

NETGEN (Schöberl, 2004), un generador automático de mallas tetraédricas tridimensionales, con la posibilidad de realizar refinamientos locales.

Para post-procesar los resultados del cálculo se utilizó el graficador *ParaView* (Kitware, Sandia National Laboratories and CsimSoft), además de utilitarios varios desarrollados en lenguaje C por los autores.

El código *OpenFoam* es ampliamente utilizado en todo el mundo, y ha sido validado como herramienta de cálculo y desarrollo de ingeniería en innumerables casos. Previo a la utilización de este código en el presente trabajo, los autores realizaron validaciones internas contra casos disponibles en la literatura, a saber *flujo turbulento alrededor de una esfera* (Jindal et al, 2004), *alerón NACA 0012* (Komurasaki, 2003), y *modelo de Ahmed* (Franck et al, 2003).

3.2 Discretización y Método de Resolución

Se utilizó el método de volúmenes finitos sobre mallas no-estructuradas de tetrahedros. La Figura 6 muestra como ejemplo la malla utilizada para el cortavientos plano, resultando análoga para el modelo piramidal. Consta de cerca de 400.000 elementos, densificados cerca de las superficies sólidas, tanto del suelo como del cortavientos, y en la zona corriente abajo de este último, con el objeto de resolver más adecuadamente los altos gradientes de velocidad y los vórtices turbulentos presentes en estas zonas.

El método de cálculo seleccionado es el llamado *LES*, por *Large Eddy Simulation*, o simulación de grandes remolinos. Este método “resuelve”, es decir, calcula directamente, todos los efectos turbulentos (vórtices) hasta la escala espacial que le permite la malla utilizada, y “modela” de alguna manera el efecto de los vórtices menores que no es capaz de simular directamente. Esta modelización se logra calculando en forma automática en cada instante de simulación y en cada elemento de la malla una pseudoviscosidad que se suma a la real del fluido, y representa de esta manera el efecto integrado de todos los pequeños vórtices que la malla, por razones de limitación en la capacidad de cálculo disponible, no es capaz de capturar directamente.

En este trabajo, esta generación de pseudoviscosidad se realizó con el llamado *modelo de Smagorinsky* (Smagorinsky 1963 & 1993). Una medida de qué tan apropiada es la malla utilizada viene dada justamente por la generación de esta pseudoviscosidad (ν_{Sgs}) dentro de cada elemento. La Figura 7 muestra un corte instantáneo de los valores de ν_{Sgs} en el plano vertical de simetría (vista lateral) de una de las simulaciones realizadas para el modelo del cortavientos plano, el cuál puede verse debajo y hacia la izquierda de la figura. Se observa que la generación de pseudoviscosidad es despreciable en gran parte del dominio y sólo alcanza valores apreciables en las zonas de alta turbulencia, indicando que la malla es adecuada aunque podría refinarse aún más cerca del suelo y de la arista superior del cortavientos en caso de requerir cálculos más detallados.

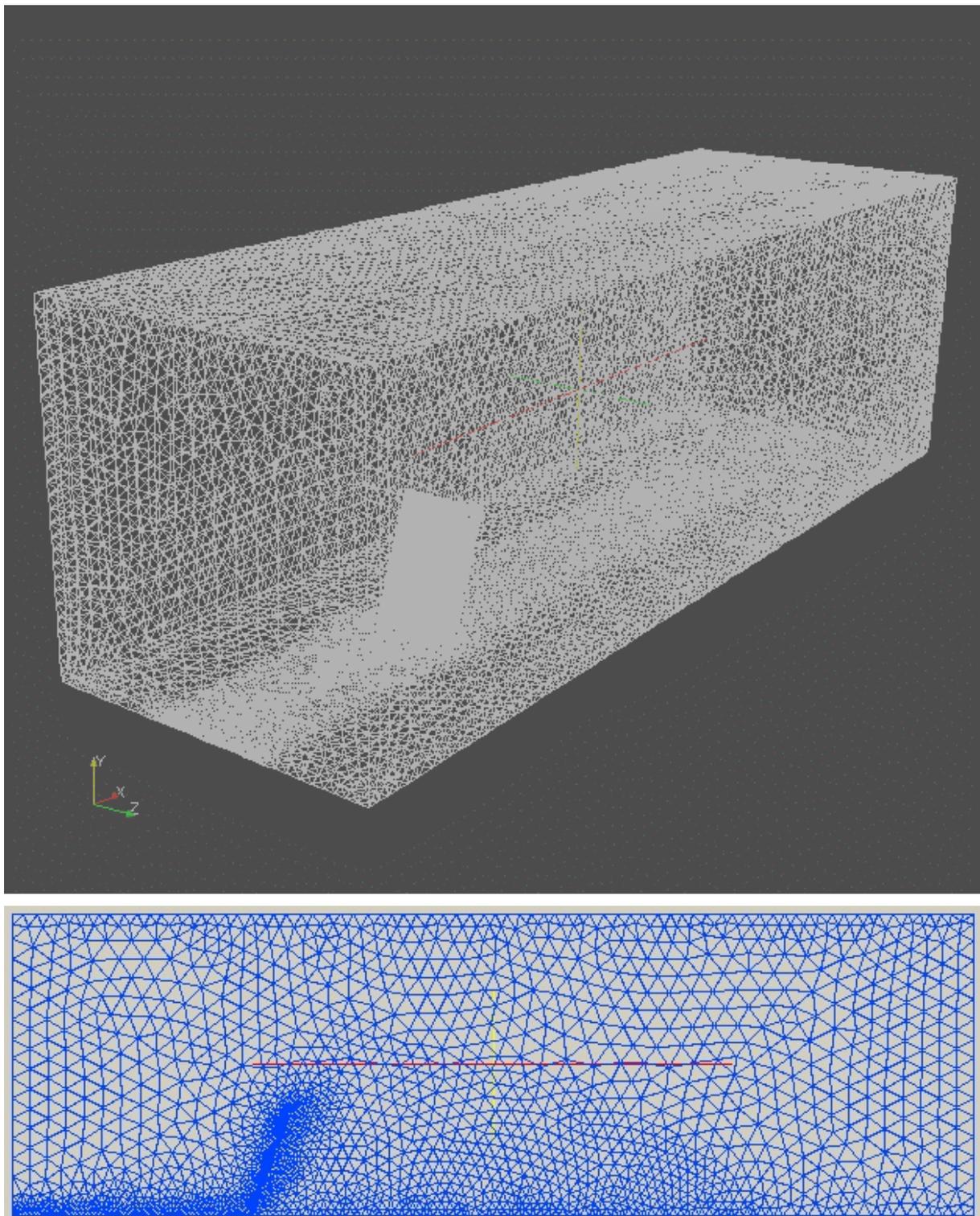


Figura 6. Malla utilizada para el cortavientos plano.

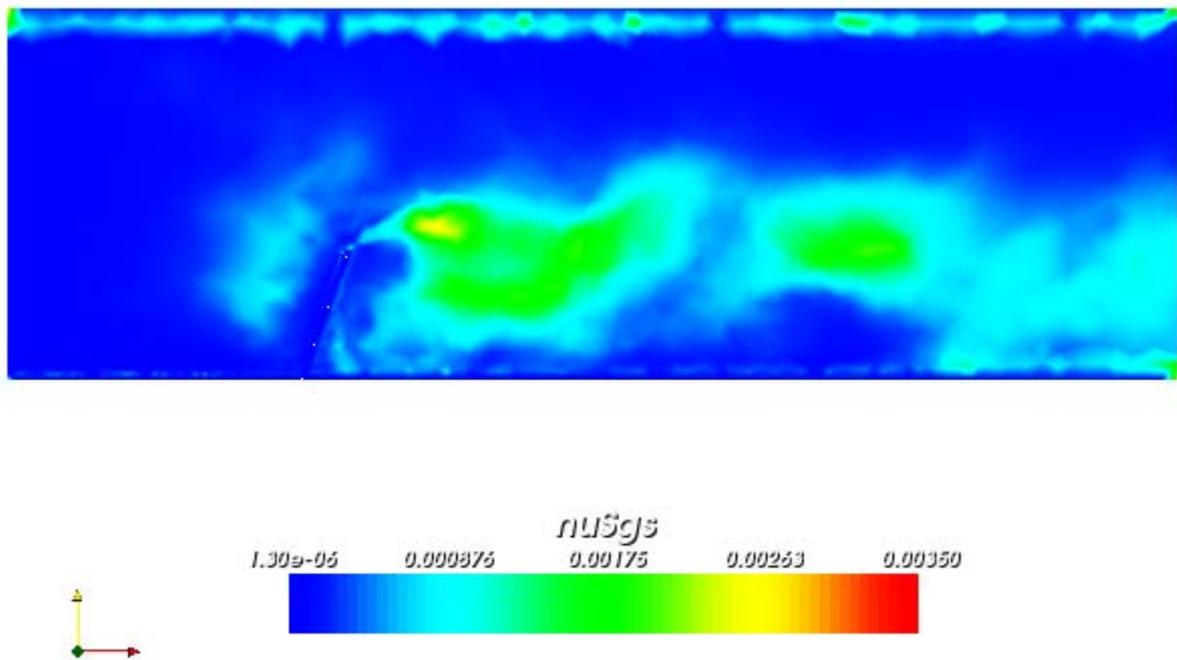


Figura 7. Instantánea del campo de viscosidad turbulenta en el plano de simetría, generada por el modelo de Smagorinsky.

3.3 Descripción de los casos simulados

Se simularon cuatro casos, considerando dos geometrías (piramidal y plana) y dos condiciones de flujo (experimental y real). La denominación de *experimental* se refiere a las condiciones del experimento realizado por la UNPSJB (Vignolo 2007), y la de *real* a las de operación en campo.

Dado que las velocidades de los casos tanto experimental como real son del orden de unas decenas de m/s, no hay efectos apreciables de compresibilidad, y por lo tanto el fenómeno depende sólo del número de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{U_{\infty} L}{\nu} \quad (1)$$

donde U_{∞} es en este caso la velocidad del viento incidente, L la raíz cuadrada del área frontal del cortavientos (por consistencia con Vignolo 2007), y ν la viscosidad cinemática del aire, tomada en este trabajo como $1.47 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (a 15°C).

Los cuatro casos simulados son:

- **M1e:** modelo 1, condiciones experimentales
 $U_{\infty}=13\text{m/s}$, $A=0.0711\text{m}^2$, $L=\sqrt{A}=0.266\text{m}) \Rightarrow \text{Re}=2.35 \times 10^5$
- **M2e:** modelo 2, condiciones experimentales
 $U_{\infty}=13\text{m/s}$, $A=0.0711\text{m}^2$, $L=\sqrt{A}=0.266\text{m}) \Rightarrow \text{Re}=2.35 \times 10^5$
- **M1r:** modelo 1, condiciones reales
 $U_{\infty}=28\text{m/s}$, $A=44.44\text{m}^2$, $L=\sqrt{A}=6.666\text{m}) \Rightarrow \text{Re}=1.28 \times 10^7$
- **M2r:** modelo 2, condiciones reales
 $U_{\infty}=20\text{m/s}$, $A=88.88\text{m}^2$, $L=\sqrt{A}=9.428\text{m}) \Rightarrow \text{Re}=1.28 \times 10^7$

Para simular las condiciones reales se siguió por consistencia el mismo criterio del experimento: simular el mismo Re en ambos modelos. Debido a esto, y a que las áreas frontales reales de los diseños propuestos son diferentes, las velocidades del viento incidente son también diferentes, siendo de unos 100km/h en el piramidal y de 70km/h en el plano.

En todos los casos, las simulaciones comenzaron a partir de un estado inicial arbitrario, y se dejó correr el tiempo hasta que se alcanzó un comportamiento de las variables de velocidad y presión que se puede considerar independiente de aquel estado inicial.

Con respecto a las condiciones del viento incidente, se utilizó para las condiciones *experimentales* un perfil plano, consistente con el del experimento de la UNPSJB, y no se consideró turbulencia. Las mismas suposiciones se utilizaron para simular el caso en condiciones reales, simplificación no menor, pero que se consideró adecuada para el nivel de detalle de los resultados esperados en este estudio.

3.4 Resultados

Se presentan a continuación los resultados de las simulaciones para los cuatro casos descriptos. Cuando corresponde, se grafican y comentan comparaciones entre casos, y también con respecto a las mediciones experimentales mencionadas.

3.4.1 Caso M1e: cortavientos piramidal en condiciones experimentales

La Figura 8 muestra líneas de humo alrededor del cortavientos piramidal, pudiendo observarse claramente la perturbación del flujo aguas abajo del cortavientos, así como la zona de baja velocidad (los colores indican la magnitud de la velocidad, siendo menor para los colores fríos y mayor para los cálidos) y recirculación detrás del mismo. Por detrás y arriba de la pantalla se observan líneas de corriente de color rojo, las que corresponden a velocidades mayores a las incidentes.

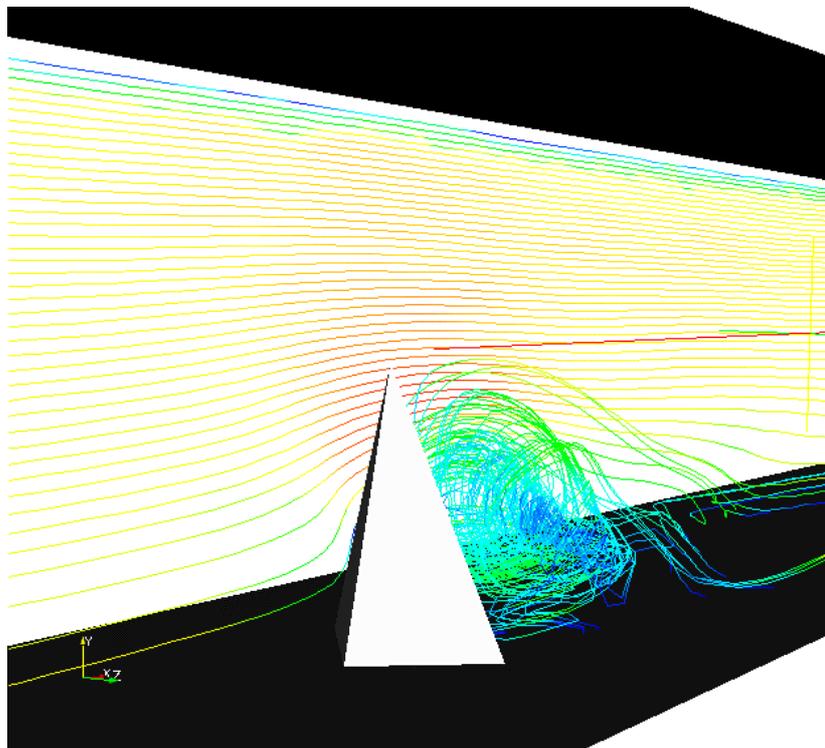


Figura 8. Caso M1e: líneas de corriente alrededor del cortavientos piramidal.

La Figura 9, a su vez, muestra a modo cualitativo las presiones medias (promediado temporal) en el plano de simetría, siendo los colores cálidos presiones altas y los fríos bajas, observándose el esperable incremento respecto de la presión del flujo incidente delante de la pantalla y el decremento por detrás. La diferencia entre ambos valores genera la mayor parte de las fuerzas de arrastre y sustentación, las que se evaluarán cuantitativamente más adelante.

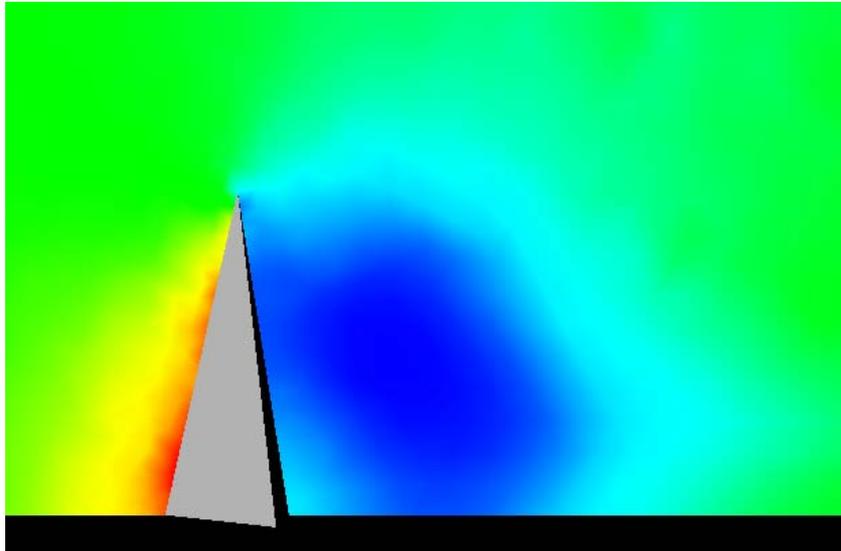


Figura 9. Caso M1e: presiones medias en el plano de simetría.

Pasando al análisis cuantitativo, se agregan en las Figuras 10 a 13, una serie de comparaciones con los resultados experimentales para este modelo.

Se muestran en las figuras perfiles de velocidades en función de la altura z sobre el piso, adimensionalizada con la altura H del cortavientos, en las mismas posiciones axiales y transversales donde se reportan resultados experimentales. Se presentan valores simulados del promedio de la magnitud U de la velocidad pero también de la componente axial U_x de la misma ya que, como fuera dicho, se considera que en el trabajo experimental (Vignolo, 2007) se reportan sólo mediciones de esta última.

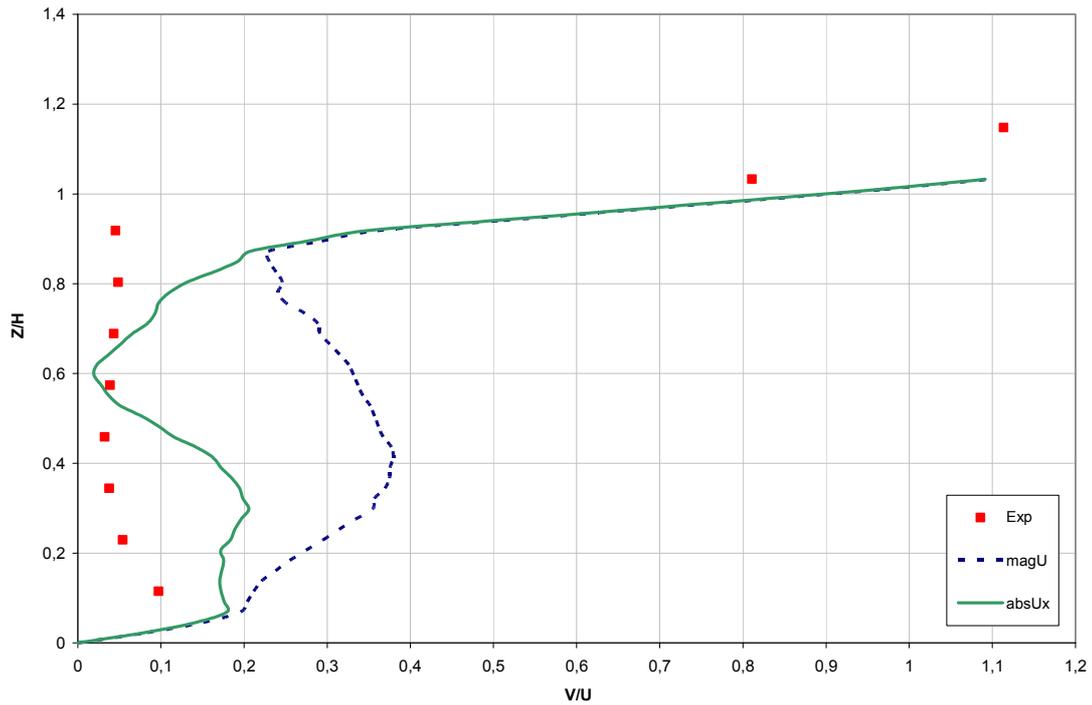


Figura 10. Perfil de velocidades, Modelo 1, $x=5$ m, $y=0$. Los cuadrados rojos son los puntos experimentales, la línea llena verde el cálculo del promedio temporal del valor absoluto de la velocidad en la dirección axial y la línea punteada azul el cálculo del módulo de la velocidad.

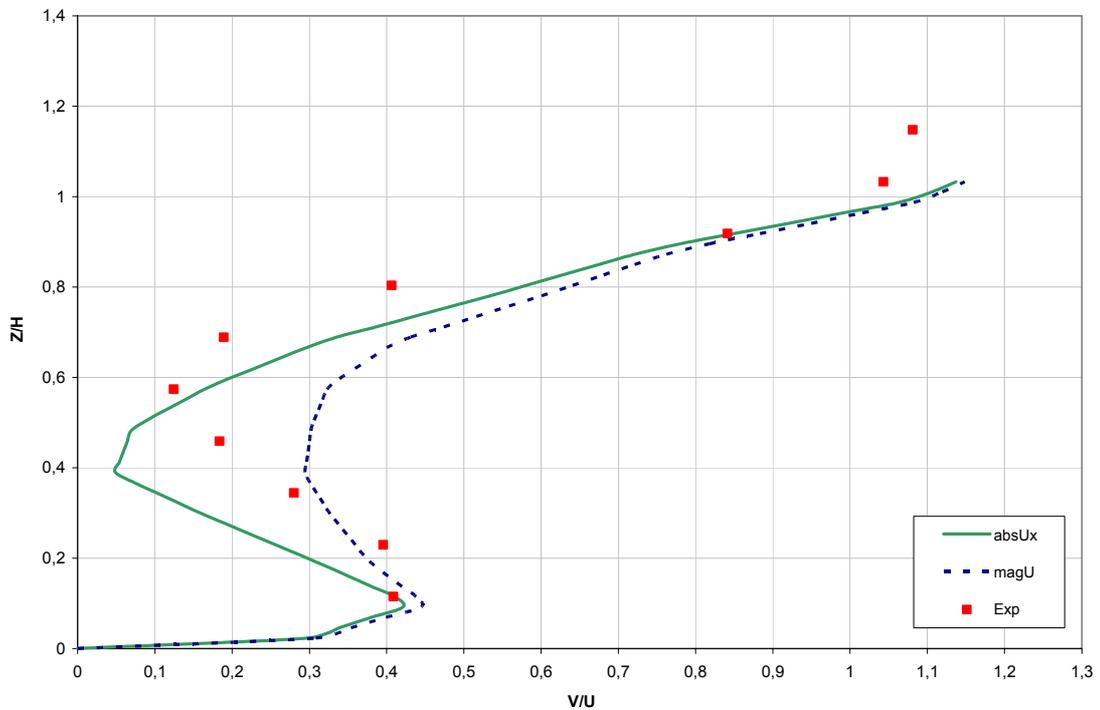


Figura 11. Perfil de velocidades, Modelo 1, $x=12,5$ m, $y=0$

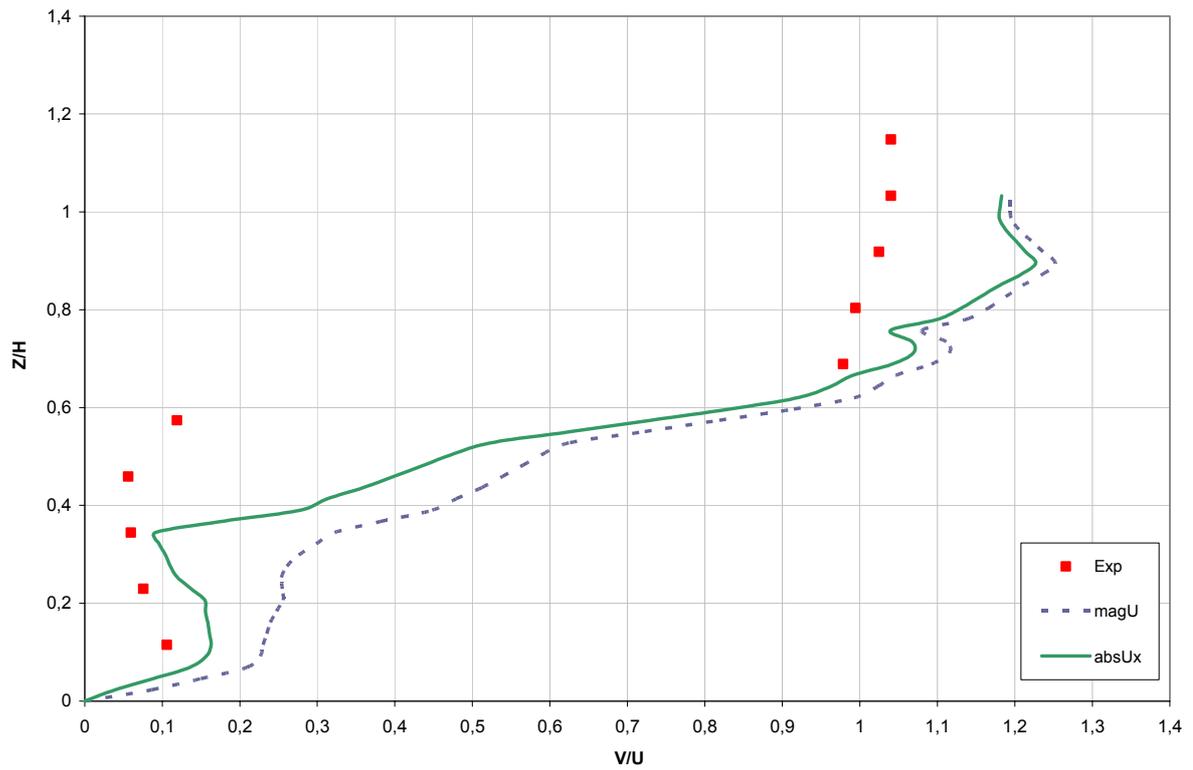


Figura 12. Perfil de velocidades, Modelo 1, x=5 m, y=2,5 m

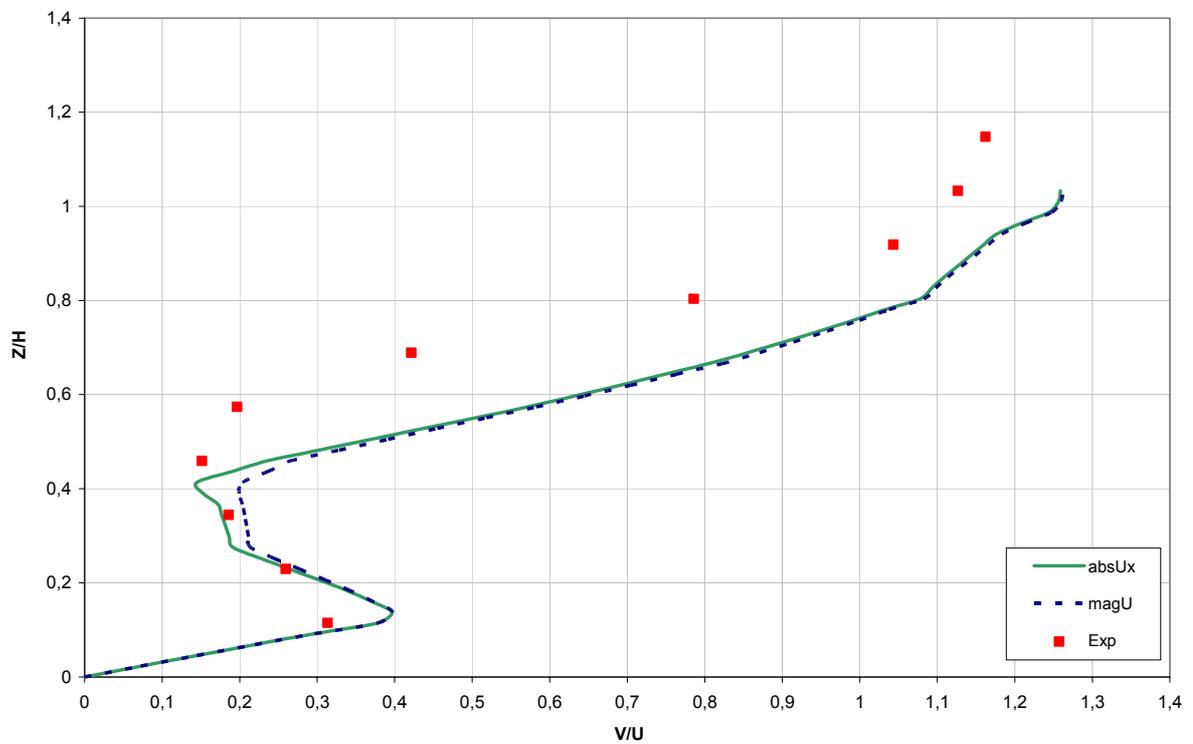


Figura 13. Perfil de velocidades, Modelo 1, x=12,5 m, y=2,5 m

Pueden realizarse las siguientes observaciones:

- existe un acuerdo cualitativo entre simulaciones y mediciones experimentales en los perfiles de velocidades axiales,
- las velocidades axiales difieren más de la magnitud de la velocidad en posiciones cercanas al cortavientos, ya que es allí donde se producen las mayores recirculaciones con componentes de velocidad perpendiculares a la anterior,
- en las posiciones sobre el eje de simetría las variaciones de velocidad experimentales son más suaves que las numéricas, probablemente debido a un promediado espacial producido por las dimensiones del anemómetro.
- El acuerdo es bastante bueno para los distintos planos de $y=2,5\text{m}$, aunque los experimentos aparentemente no determinaron la velocidad en posiciones superiores, que es donde se obtienen los máximos de velocidad.

3.4.2 Caso M1e: cortavientos plano en condiciones experimentales

En la Figura 14, se muestra un corte en un plano horizontal, a una altura de 1 m, de la magnitud de la velocidad en m/s para un instante dado. Se observan velocidades de hasta 18m/s, un 40% mayor que la incidente, a los costados del cortavientos.

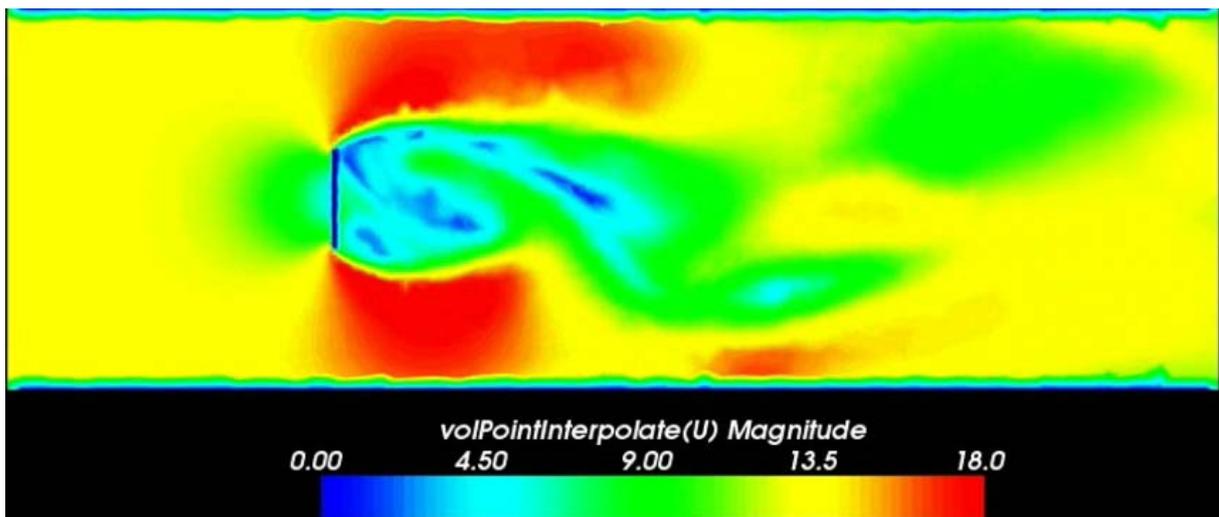


Figura 14. Magnitud del campo de velocidades instantáneo en un corte horizontal del cortavientos plano.

A continuación, en la Figura 15, se grafica una secuencia temporal de cortes en el plano vertical de simetría de la magnitud (módulo) del campo de velocidades para el cortavientos plano. Puede observarse el aumento respecto de la velocidad incidente en posiciones por arriba de las cubiertas por la placa y el desprendimiento de vórtices que ocurre detrás de la arista superior. Estos vórtices provocan un flujo pulsado detrás del cortavientos, con velocidades máximas por arriba de las incidentes en posiciones muy cercanas a la placa. Esto último es particularmente problemático, ya que afecta negativamente a la zona que se quiere proteger.

con el Modelo 2 (Figuras 16 a 19). Se observaron pocas diferencias entre los resultados que se obtienen con el Re experimental y el real. Se presentan también como referencia las mediciones experimentales (Vignolo, 2007).

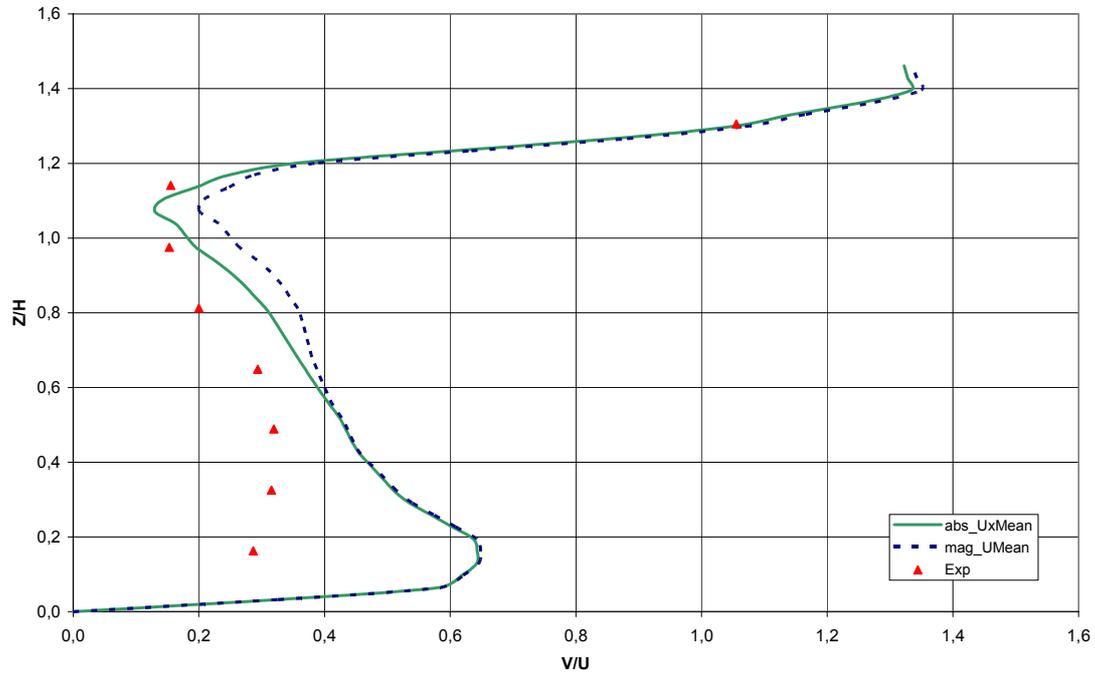


Figura 16. Perfil de velocidades, Modelo 2, Re real, $x=9,79$ m, $y=0$

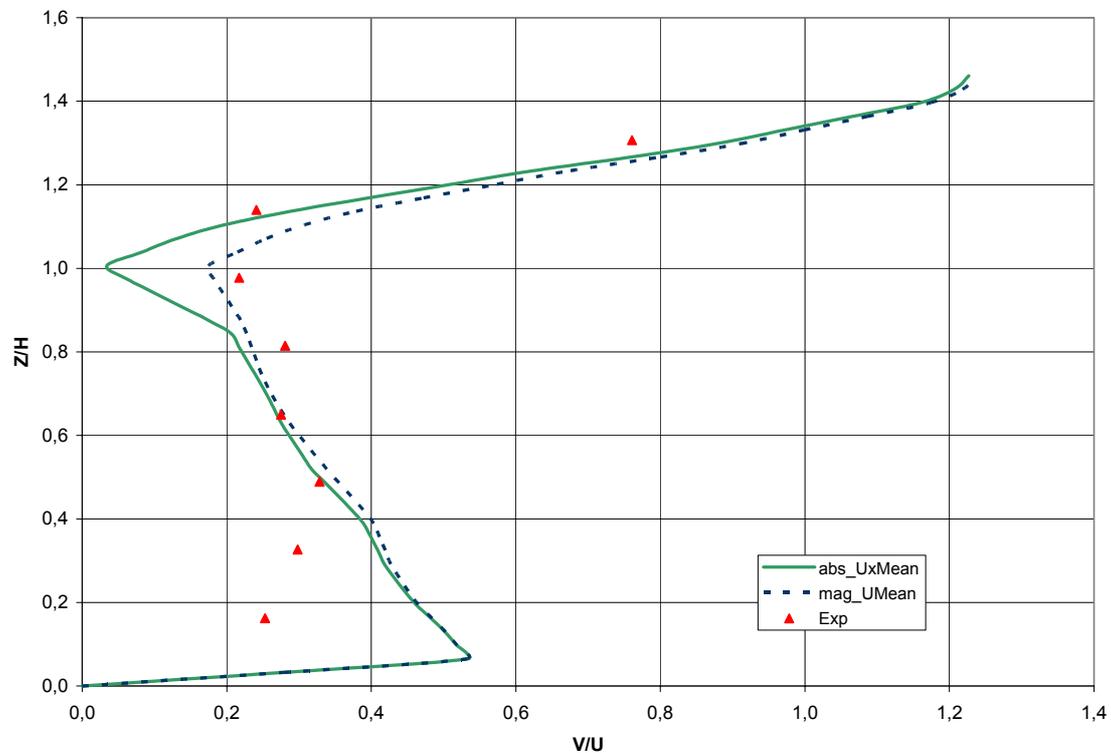


Figura 17. Perfil de velocidades, Modelo 2, Re real, $x=16,86$ m, $y=0$

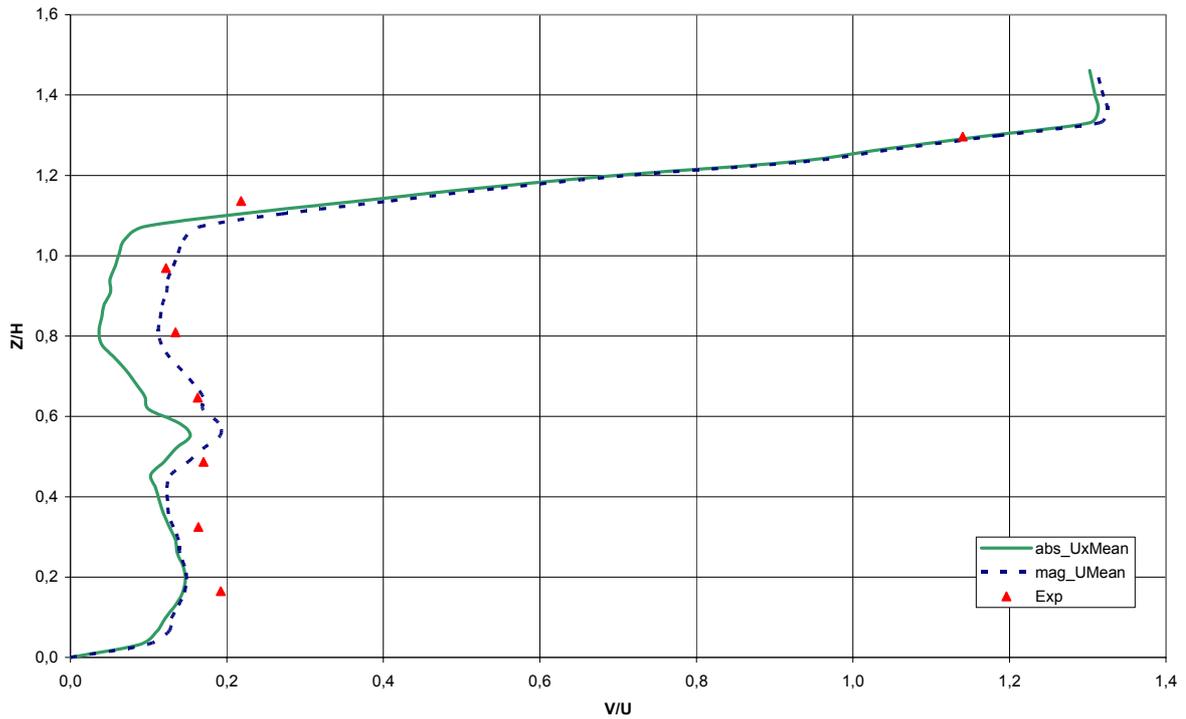


Figura 18. Perfil de velocidades, Modelo 2, Re real, $x=9,79$ m, $y=3,53$ m

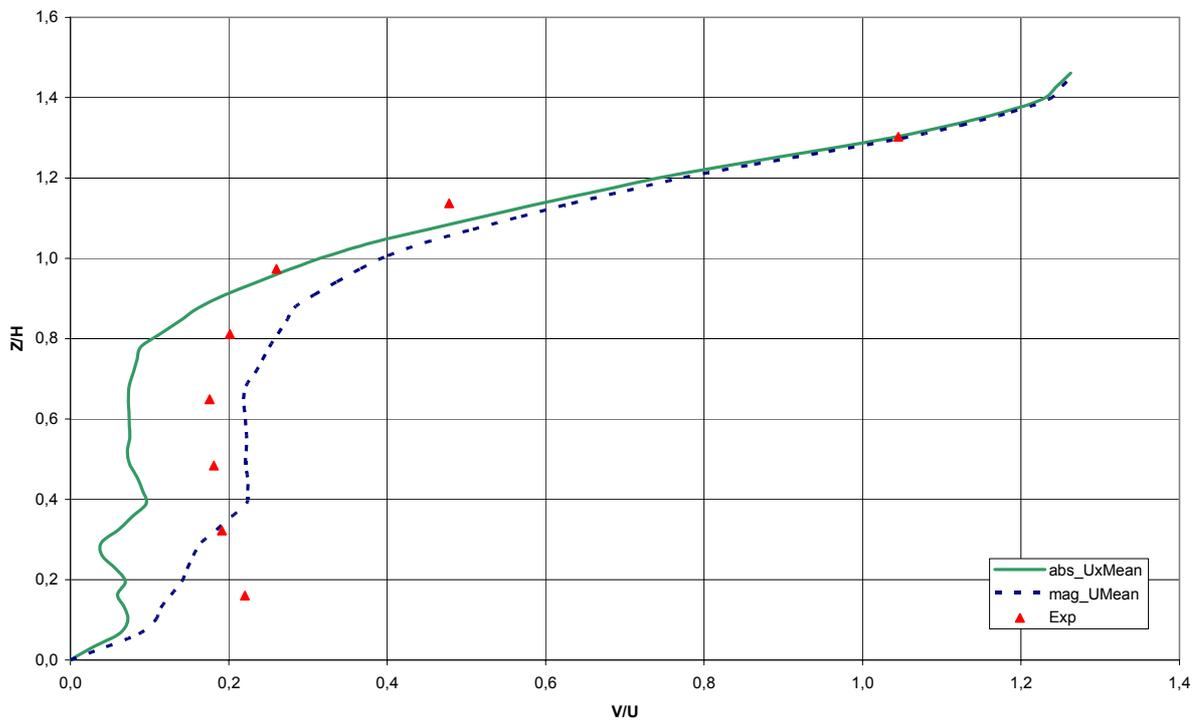


Figura 19. Perfil de velocidades, Modelo 2, Re real, $x=16,86$ m, $y=3,53$ m

A partir de los resultados obtenidos se pueden sacar las siguientes conclusiones.

- Nuevamente, hay un buen acuerdo cualitativo y, en términos generales, cuantitativo.

- Numéricamente aparece un pico de velocidad a alturas bajas (para $Y/H=0,1-0,2$) que no se observa en los experimentos. Este pico es habitual en este tipo de situaciones (ver por ejemplo simulaciones en Yoder 2005) y de hecho se ve incluso en los resultados experimentales para la barrera triangular. En los experimentos el pico de velocidad se ubicó más arriba y era más suave. Una posible explicación de este fenómeno es que el soporte de la barrera alteró el flujo experimental en esa zona.

3.4.3 Caso M1r: cortavientos piramidal en condiciones reales

Se presentan a continuación algunos perfiles de velocidad adimensional promedio axial y de promedio de magnitud de velocidad en función de la altura adimensional para las condiciones reales y experimentales de operación, a modo de comparación. Los gráficos correspondientes se hallan en las Figuras 20 y 21.

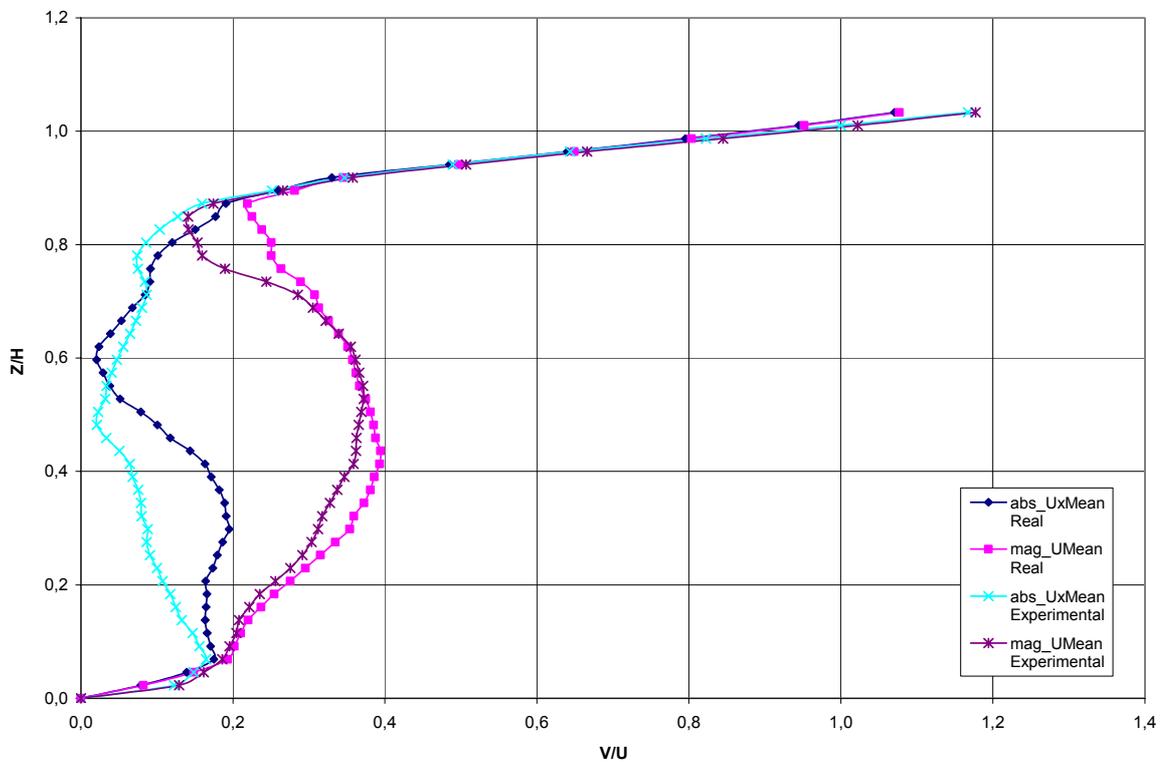


Figura 20. Comparación de los perfiles de velocidades axial y total para Re experimental (celeste y violeta) y real (azul y rosa), Modelo 1, en $x=7,5$ m, $y=0$.

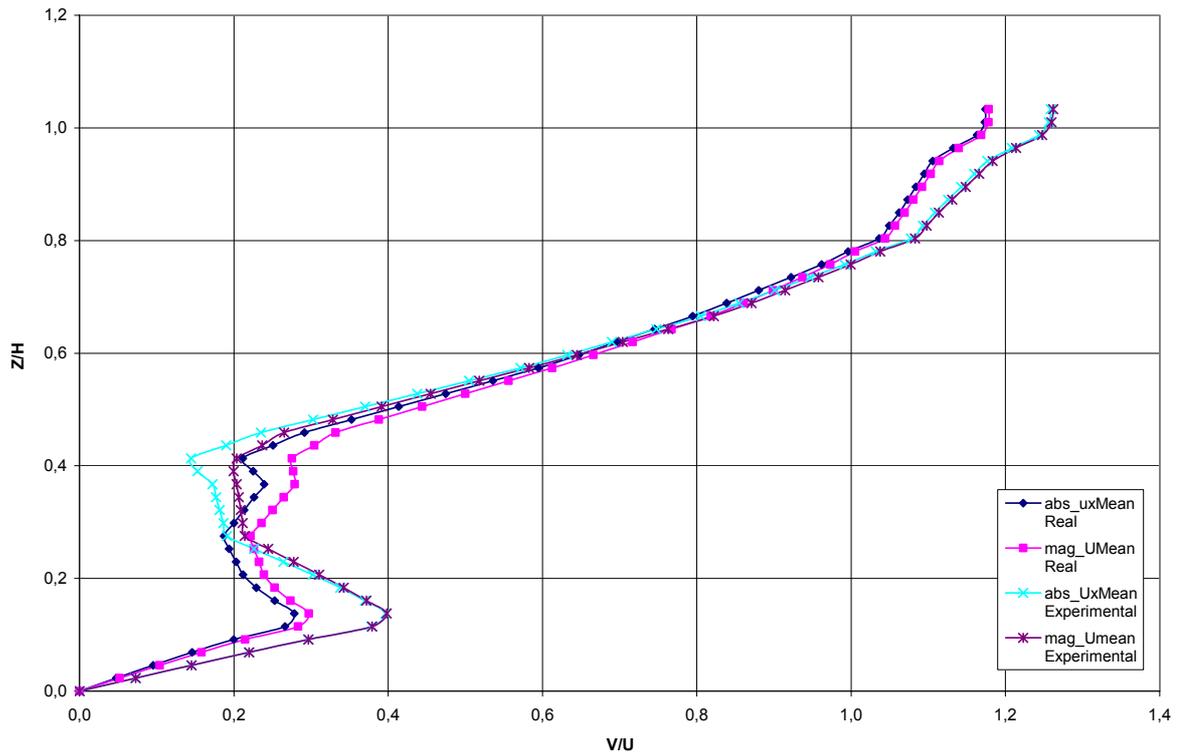


Figura 21. Comparación de los perfiles de velocidades axial y total para Re experimental (celeste y violeta) y real (azul y rosa), Modelo 1, en $x=7,5$ m, $y=0$

A partir de estos gráficos, se puede sacar la conclusión de que los perfiles de velocidad adimensional no difieren significativamente entre las condiciones experimentales y reales, lo que confirmaría lo expuesto en el estudio experimental (Vignolo, 2007) acerca de que el patrón general del flujo no depende mucho del Re para estos casos.

Como fuera dicho, lo anterior representa sólo el promedio; en las figuras siguientes (22 y 23) se muestran las velocidades mínimas y máximas alrededor de este cortavientos. Se puede ver que las máximas se encuentran a aproximadamente un 80% del valor incidente y también que a los costados de la pantalla se generan velocidades máximas bastante superiores (alrededor del 50%), lo que deberá evaluarse si constituye un inconveniente para la operación. Algo similar ocurre por arriba de la barrera.

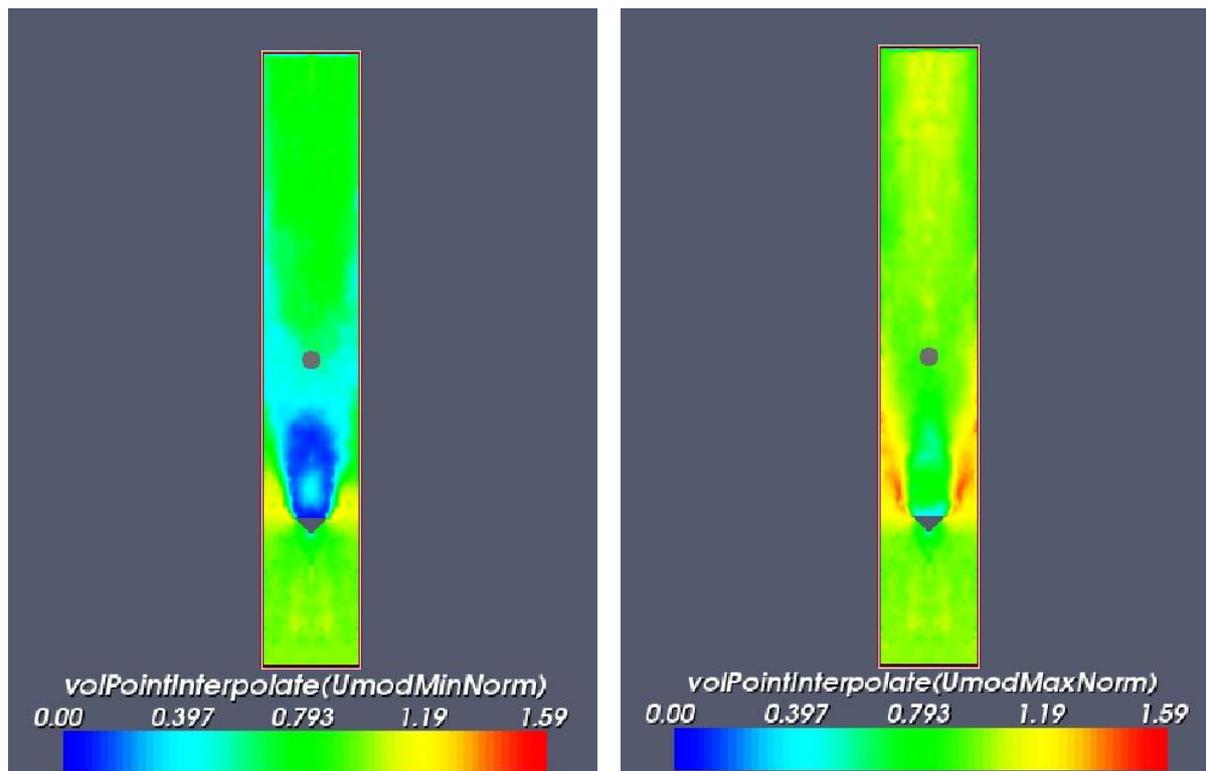


Figura 22. Velocidades mínima (izquierda) y máxima (derecha) alrededor del Modelo 1 de cortavientos en un plano horizontal a una altura de 1 m.

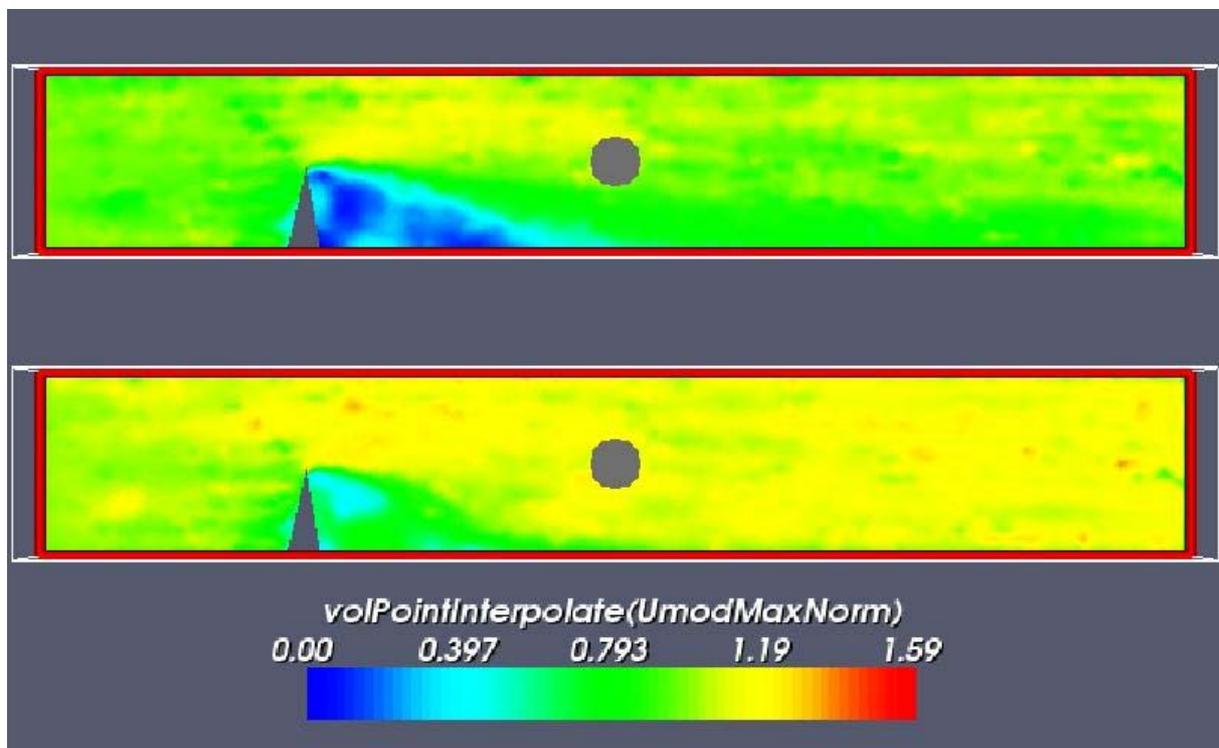


Figura 23. Velocidad mínima (superior) y máxima (inferior) alrededor del Modelo 1 de cortavientos en el plano vertical de simetría.

De los resultados numéricos en condiciones reales se puede calcular también el arrastre en

la dirección del viento incidente (*drag*), el cual se muestra en la Figura 24. Se puede observar que varía en función del tiempo dado el desprendimiento de vórtices. El valor medio es de 0,508 y el valor máximo de 0,535; es decir, este último es alrededor de un 5% superior al promedio. Dimensionalizando el coeficiente se obtiene la fuerza de arrastre total sobre la pantalla; por ejemplo, para una velocidad del viento incidente de 19.44 m/s (70 Km/h) resulta un valor máximo de $F_{max} = 4500$ N. Para una velocidad de 27.78 m/s (100 Km/h) el valor es de $F_{max} = 9200$ N. La pantalla también debe resistir una fuerza en sentido descendente (*lift*), la que sería de 980 N para la velocidad de 19.44 m/s.

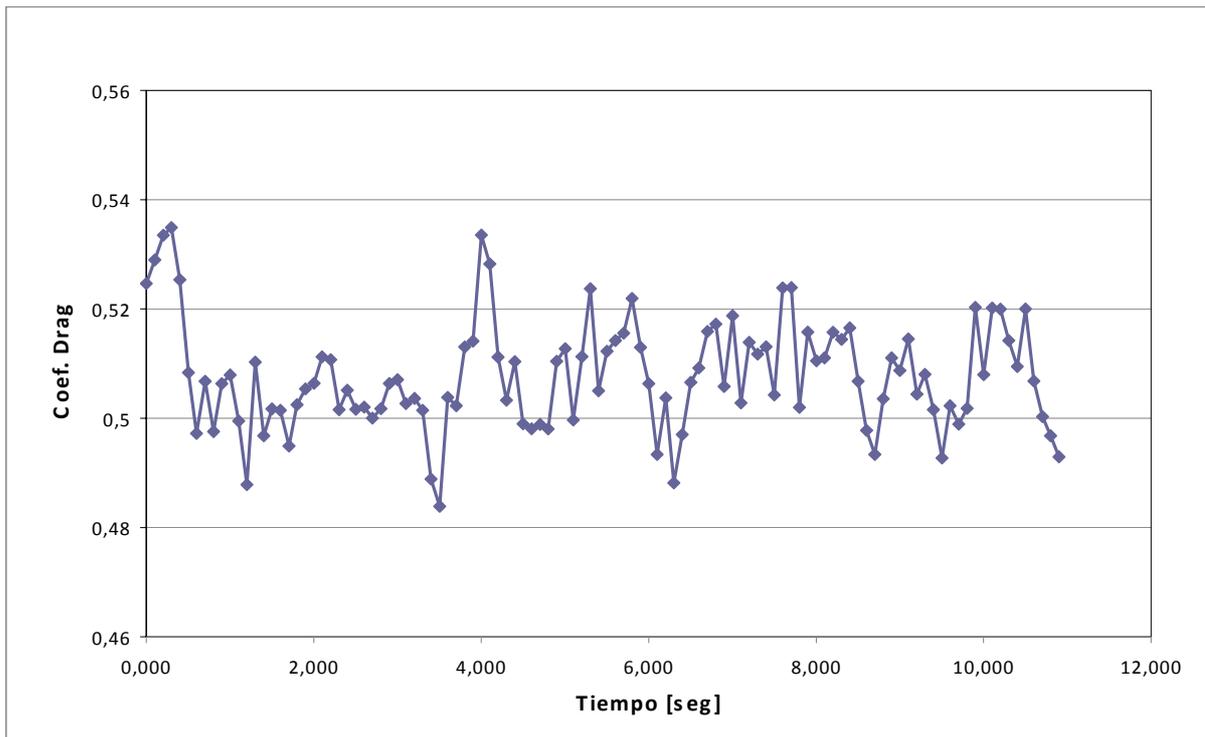


Figura 24. Coeficiente de arrastre en función del tiempo, Modelo 1, Re real

El otro resultado de interés es la frecuencia de desprendimiento de vórtices; para la velocidad de viento estudiada, la más lenta es de 0,35 seg.

3.4.4 Caso M1r: cortavientos plano en condiciones reales

En los gráficos siguientes (Figs. 25 y 26) se observan la magnitud relativa de las velocidades máximas y mínimas registradas durante la simulación en el plano vertical de simetría y en un plano horizontal situado a 1m de altura sobre el piso.

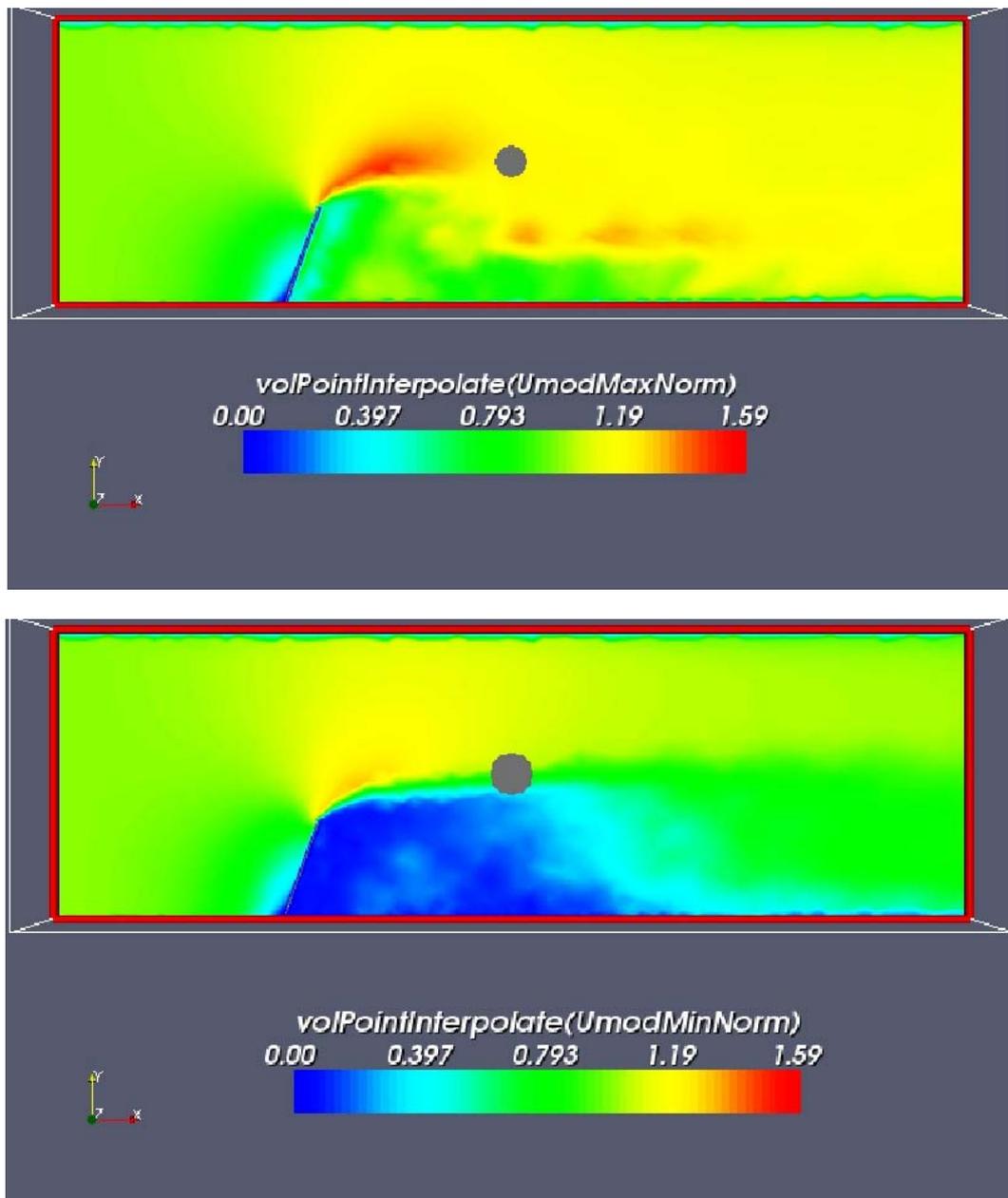


Figura 25: magnitudes adimensionales máximas y mínimas de la velocidad observadas en el plano vertical de simetría

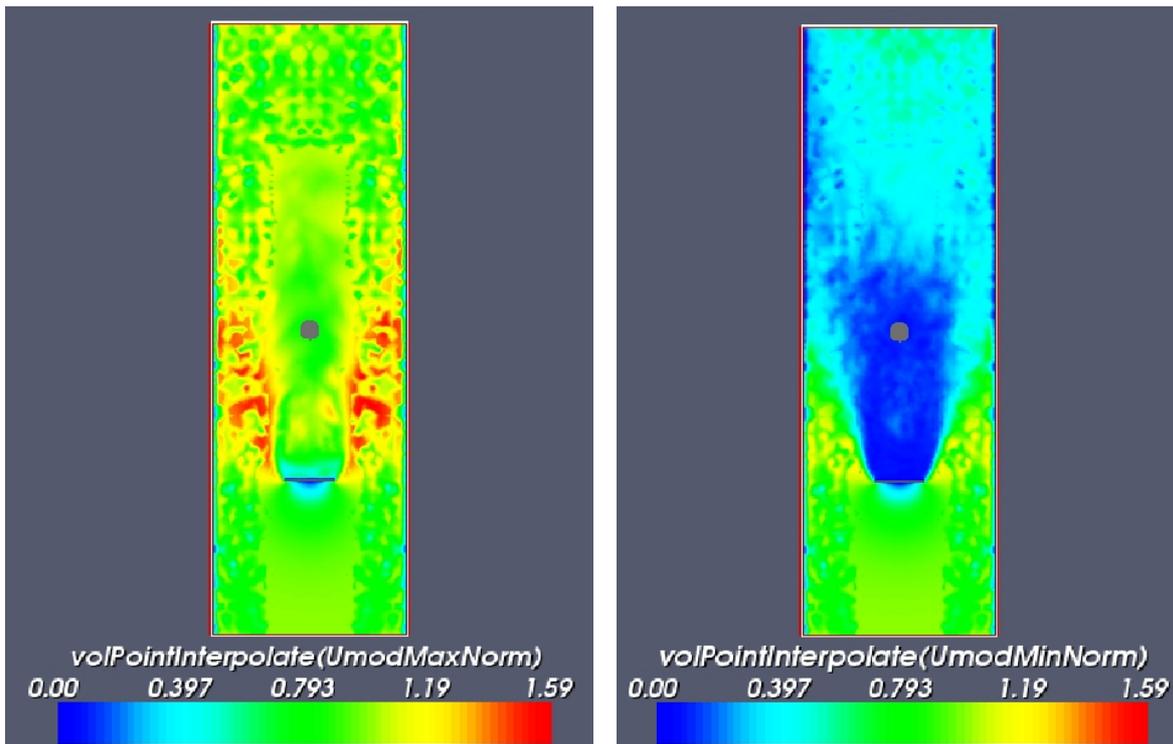


Figura 26: magnitudes adimensionales máximas y mínimas de la velocidad observadas en un plano horizontal a 1m de altura sobre el piso.

En la Figura 27, se observa la evolución temporal del coeficiente de drag de la placa plana en condiciones reales.

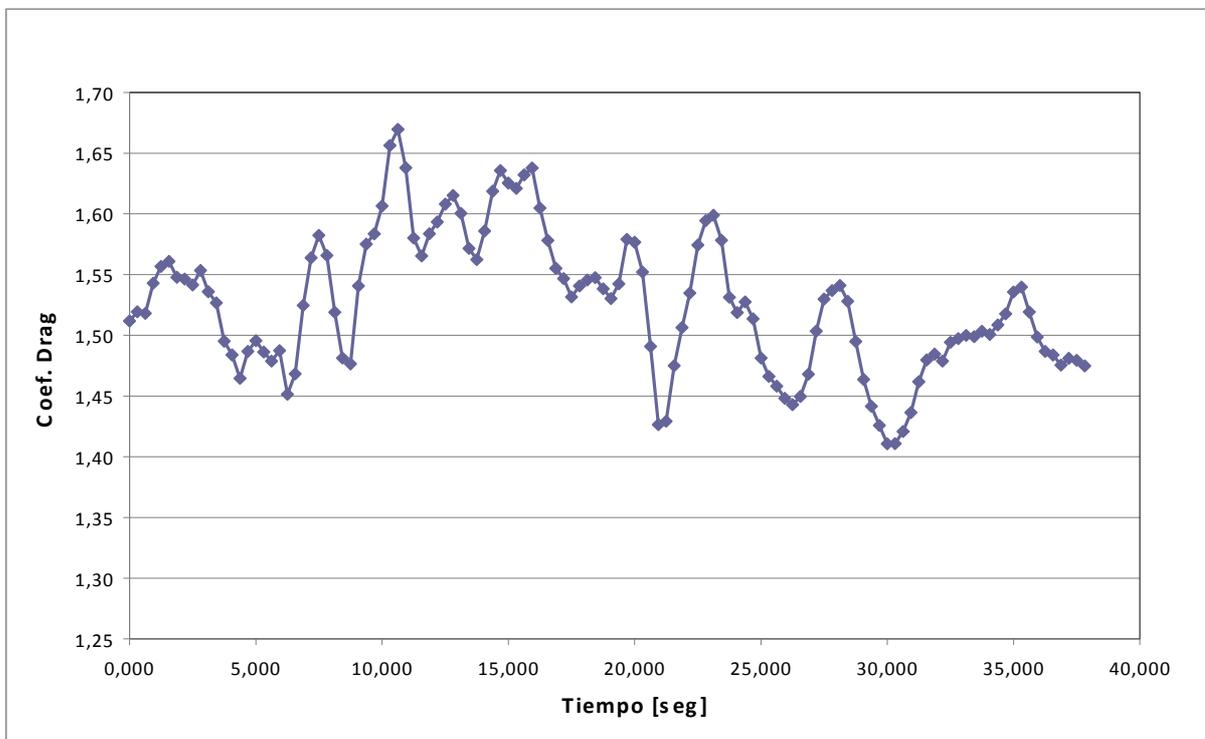


Figura 27. Coeficiente de arrastre en función del tiempo, Modelo 2, Re real

Del análisis de estos resultados, se puede concluir lo siguiente.

- En los contornos de velocidades máximas y mínimas se observa que si bien las velocidades promedio se reducen, las máximas son similares a la del flujo incidente, y a veces superiores, detrás de la mampara.
- También se observa que a los costados de la mampara las velocidades máximas registradas son muy altas, llegando a ser 60% superiores a la del viento incidente. Lo mismo ocurre por arriba del obstáculo.
- La frecuencia de desprendimiento de vórtices más lenta es de 2,4 seg.
- Al ser “menos aerodinámico” que el anterior, el coeficiente promedio de arrastre es tres veces mayor al modelo anterior (1,526) y, además, las fluctuaciones son mayores, registrándose una diferencia entre valor máximo y promedio del 9,4%.
- La fuerza de arrastre máxima para una velocidad del viento incidente de 70 Km/h es de cerca de 3 Ton.

4 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de la simulación numérica de los cortavientos propuestos son las siguientes.

Respecto de los resultados experimentales:

- Los resultados son correctos, particularmente la hipótesis de que el flujo no cambia significativamente con el número de Reynolds.
- El anemómetro utilizado sólo mide la velocidad en una dirección perpendicular a su eje y en la dirección del canal que tiene en su extremo. Esto resulta en una subestimación de la velocidad, particularmente en las zonas de mucha recirculación, en las que el flujo se aparta bastante de esta dirección.
- El sistema de medición utilizado brinda valores promedio y no información sobre las velocidades máximas para cada punto. Numéricamente se observan vórtices en posiciones detrás del cortavientos y no muy lejanas, en los que se llega a velocidades máximas superiores a las del flujo incidente en el Modelo 2.

Respecto del Modelo 1 de cortavientos propuesto:

- Las velocidades promedio se reducen a menos del 50% del valor incidente en la región estudiada, pero las velocidades máximas se reducen sólo un 20%.
- La velocidad por encima y a los costados del cortavientos, alcanzan valores alrededor de un 50% superiores a los que habría sin él.
- La frecuencia de desprendimiento de vórtices más lenta es de 0,35 seg.
- La fuerza total máxima de arrastre sobre el cortavientos es de 0,5 Ton.

Respecto del Modelo 2 propuesto:

- Produce fluctuaciones más severas y sufre fuerzas de arrastre mayores.

La conclusión de este estudio computacional es que los modelos propuestos no son efectivos para el objetivo que se pretende, por la recirculación que se produce detrás de ellos, la que puede ser relativamente intensa. El camino recomendado a seguir es ensayar con barreras porosas, como las utilizadas por ejemplo en la protección de cultivos delicados, ya que es un hecho conocido que las mismas se comportan en general mejor que las sólidas. Este tipo de barreras deja pasar parte del flujo, alterando el campo incidente de manera no tan significativa, disminuyendo o eliminando la recirculación. También pueden probarse otros diseños, con barreras por detrás de la zona a proteger, como se hace generalmente para proteger cultivos.

REFERENCIAS

- Cottet, G-H., Vasilyev, O. V., Comparison of dynamic Smagorinsky and anisotropic subgrid-scale models, Center for Turbulent Research, *Proceedings of the Summer Program*, <http://ctr.stanford.edu/Summer98/cottet.pdf>, 1998.
- Franck G., Nigro N., Storti M.y D'Elía J., Modelización del flujo de viento sobre el modelo de Ahmed, *Mecánica Computacional Vol. XXII*, Noviembre 2003.
- OpenFOAM: The open source CFD toolbox, <http://www.opencfd.co.uk/openfoam/>, OpenCFD Ltd., 2007.
- ParaView – open-source, multi-platform application designed to visualize data sets, developed by Kitware, Sandia National Laboratories and CsimSoft, <http://www.paraview.org/>.
- Satoko Komurasaki, Simulation of a Subsonic Flow around a NACA0012 near its Stall Angle, *JSFM*, <http://www.fsis.iis.u-tokyo.ac.jp/cfd17/paper/PD1-2.pdf>, 2003.
- Schöberl, J., NETGEN – automatic mesh generator, <http://www.hpfem.jku.at/netgen/>, Johannes Kepler University Linz, 2004.
- Shailesh Jindal, Lyle N. Long, Paul E. Plassmann, and N. Sezer-Uzol, Large eddy simulations around a sphere using unstructured grids, *AIAA paper 2004-2228*, 2004.
- Smagorinsky, J., General Circulation Experiments With The Primitive Equations, *Mont. Weather Rev.*, 91, 99–164, 1963.
- Smagorinsky, J., Some Historical Remarks on the Use of Nonlinear Viscosities. In *Galperin, B., and Orszag, S. A. (ed.), Large Eddy Simulation of Complex Engineering and Geophysical Flows*, Cambridge University Press, New York, pp. 3–36, 1993.
- Vignolo, G. G., Determinación de características aerodinámicas de barreras cortavientos para equipos de pulling. *Informe de Laboratorio de Mecánica de los Fluidos N° 01/2007*, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.
- Yoder, D.A., Driver-Seegmiller Incompressible Backward-Facing Step, *CFD Verification & Validation, NPARC Alliance*, <http://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/>, 2005.