

ESTUDIO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO A SOTAVENTO DE UN MODELO DE BARRERA EÓLICA POROSA

Federico A. Bacchi^{a,b,*}, Julio Marañón Di Leo^{a,b,c}, Juan S. Delnero^{a,b}, Pablo
Giacopinelli^{a,b}

^aGrupo de Fluidodinámica Computacional, Universidad Nacional de La Plata, Calle 116 e/47 y 48,
1900 La Plata, Argentina, fbacchi@ing.unlp.edu.ar, <http://www.gfc.ing.unlp.edu.ar>

^bLaboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, Universidad Nacional de La Plata, Calle
116 e/47 y 48, 1900 La Plata, Argentina, laclyfa@ing.unlp.edu.ar, <http://www.laclyfa.ing.unlp.edu.ar>

^cInvestigador adjunto, CONICET

Palabras Clave: Barreras eólicas, Turbulencia, K-omega, Strouhal.

Resumen.- En este trabajo se analiza en forma numérica y experimental el flujo a sotavento de una barrera eólica porosa en el túnel de viento de capa límite del Área Departamental Aeronáutica. Se miden y calculan numéricamente las velocidades instantáneas y se comparan distribuciones espaciales de velocidad media y frecuencias de desprendimientos periódicos entre los experimentos y los resultados de simulaciones con dos modelos de turbulencia de dos ecuaciones: k-omega y k-epsilon. Se demuestra que el modelo k-omega es capaz de reproducir con muy buena aproximación las características del flujo detrás de la barrera, mientras que los resultados del modelo k-epsilon presentan discrepancias significativas en algunos puntos.

1 INTRODUCCION

El objetivo de este tipo de barreras es obtener una protección adecuada en cultivos, de forma tal de mantener una buena circulación del flujo sobre las plantas para un mejor crecimiento de las mismas. Estos estudios fueron realizados oportunamente, con el fin de comparar los resultados de mamparas de madera para la protección de cultivos, con diferentes distribuciones de porosidad óptica, pero una misma porosidad total. Estas barreras generan distribuciones de flujo turbulento de diferentes características, influyendo en el crecimiento de las especies vegetales a proteger (principalmente cultivos de maíz), al modificar de forma favorable las condiciones de intercambio de gases, vapor de agua, calor, etc.

En este trabajo se pretende modelar y validar el comportamiento del flujo aguas abajo de una barrera eólica porosa, conformada por elementos horizontales de sección rectangular, a partir de metodologías de cálculo numérico. Para dicha tarea, y con el fin de poder validar los resultados obtenidos mediante el cálculo, se realizó un ensayo experimental en túnel de viento. Se obtuvieron datos del flujo de aire a una distancia a sotavento de la barrera de una y dos veces la altura H de la misma ($H= 22\text{cm.}$), mediante los cuales se pudo determinar el perfil de velocidades medias en un plano vertical perpendicular a la barrera. Se referirán todas las medidas de longitud como fracciones de la altura de la barrera, H .

Se estableció una configuración particular de flujo turbulento, determinando para la misma una escala de turbulencia basada en datos experimentales obtenidos de ensayos de campo en barreras similares.

De la caracterización del flujo incidente se obtuvo un valor del número de Reynolds de 80.000 obtenido a partir de la velocidad media del flujo medida a la altura H de 5,5 m/seg.

Por otra parte, se comparan los resultados del análisis numérico con los valores de velocidad media medidos a las distancias correspondientes a una y dos alturas de la barrera.

2 MEDICION EXPERIMENTAL

El perfil de la distribución de velocidades medias se obtuvo midiendo la velocidad instantánea en varios puntos siguiendo una vertical al túnel, mediante el uso de un anemómetro de hilo caliente (DANTEC Streamline), utilizando sensores del tipo X con film de cuarzo modelo 55R51 (DANTEC), que permiten la determinación de las dos componentes instantáneas de la velocidad en las direcciones horizontal y vertical (Bruun, 1955); (Barlow et al., 1999).

La sección de prueba del túnel de viento de capa límite en el cual se desarrollaron los ensayos consta de una longitud de 7.5 m, un ancho de 1.4 m y una altura de 1m.

En disposición experimental se utilizaron 30 prismas de madera de 20 cm x 6.5 cm x 6.5 cm distribuidos adecuadamente aguas arriba de la barrera, frenando el flujo en las cercanías del piso del túnel con el objeto de modelar las características de una capa límite turbulenta adecuada para el estudio en cuestión (Hinze, 1975).

El valor de referencia para las velocidades fue la medida a $3H$ de altura (aguas arriba).

Se construyó una barrera de madera, dispuesta de pared a pared interior del túnel de viento, con una porosidad del 50 %. Para ello se estableció un esquema de varillas de 2 cm de alto con vanos intermedios de igual medida que las mismas, resultando en 6 listones y 5 espacios vacíos, siendo las dimensiones finales del dispositivo de 1.4 m de ancho y 22 cm de altura, incluyendo superpuesto al primer listón, un refuerzo al ras del piso de 2 cm de altura.

Se realizaron mediciones sucesivas, a las distancias una y dos veces H en la dirección longitudinal al túnel de viento aguas abajo de la barrera. En lo que respecta a la medición en la dirección vertical, se realizaron mediciones cada 3 cm, desde el suelo del túnel de viento hasta una altura de 78 cm., tratando de obtener una adecuada información del campo fluidodinámico.

3 ANÁLISIS NUMÉRICO

3.1 Dominio de cómputo

Se empleó un dominio de cómputo bidimensional rectangular, reproduciendo la sección transversal de prueba del túnel de viento de capa límite del Área Departamental Aeronáutica. Por tratarse de una barrera conformada por listones de sección rectangular (Fig.2) se optó por una malla estructurada con un número inicial de $1,6 \cdot 10^5$ elementos distribuidos convenientemente en las cercanías de la barrera y en la estela para así obtener una descripción más detallada del flujo en dichas zonas, aprovechando al máximo los recursos computacionales disponibles.

Las condiciones de contorno empleadas se muestran en la Fig. 1. El perfil de velocidades empleado en las simulaciones a la entrada se obtuvo al ajustar numéricamente (mediante un polinomio de grado 10) los valores medios de la velocidad obtenidos experimentalmente.

Finalmente, los residuos para verificar la convergencia de la solución se definieron en el orden de 10^{-9} .

El número de elementos se fue incrementando hasta verificar la independencia de la solución con la malla (Figs. 3, 4 y 5).

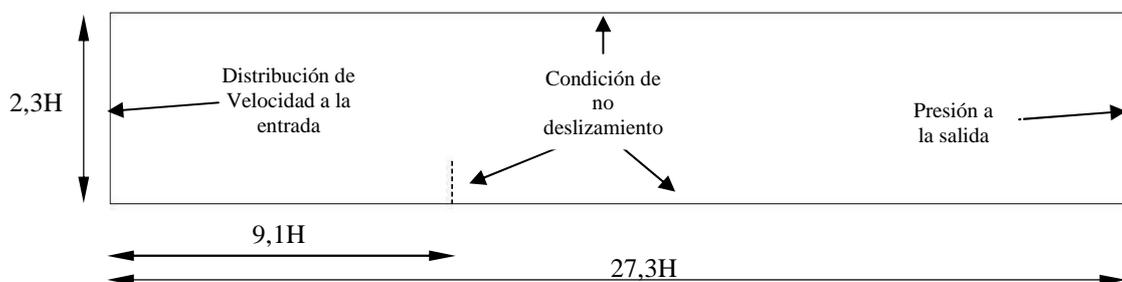


Figura 1. Dominio de cómputo y condiciones de contorno.

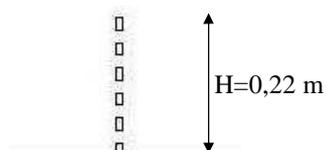


Figura 2. Sección transversal de la barrera.

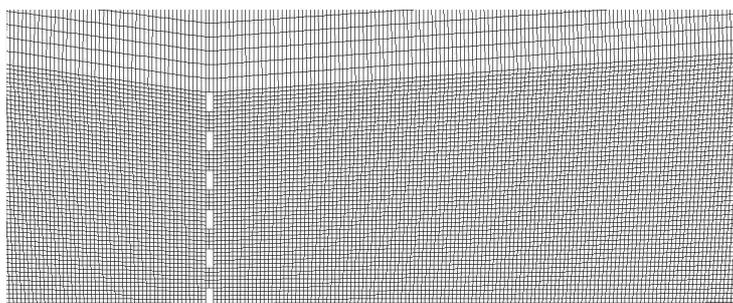


Figura 3. Dominio de cómputo inicial.

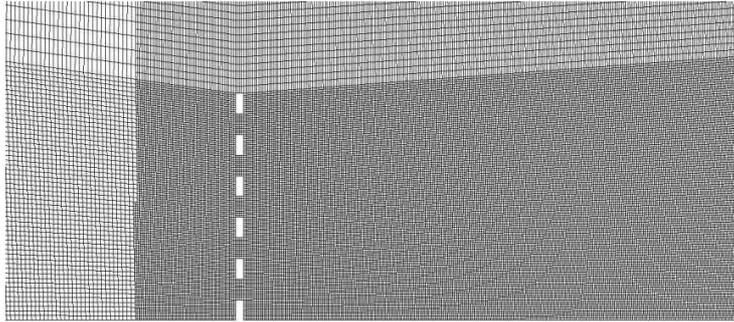


Figura 4. Primer refinamiento de malla.

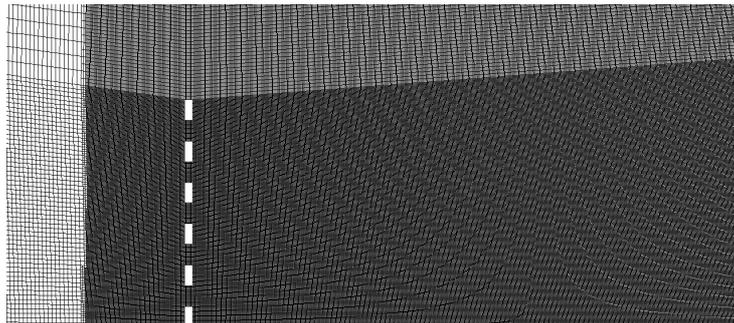


Figura 5. Segundo refinamiento de malla.

3.2 Ecuaciones de gobierno

La simulación se basó en las ecuaciones RANS “Random Averaged Navier Stokes” usando los modelos de turbulencia de dos ecuaciones $k-\varepsilon$ RNG y el $k-\omega$ SST (Wilcox, 1993).

Las ecuaciones que se resuelven en cada caso son:

- La ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$

- Las ecuaciones de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{u_i' u_j'} \right) + g_i$$

Donde u_j es la componente j de la velocidad, t es el tiempo, ρ es la densidad del aire, μ es la viscosidad dinámica y g_i es la fuerza debida a la gravedad y

$$\overline{u_i' u_j'} = \frac{1}{\rho} \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \text{ es el tensor de tensiones de Reynolds}$$

- Los modelos de turbulencia:

k-epsilon RNG “Re-Normalization Group”, (Yakhot, 1986)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \frac{G_k}{\rho} - \varepsilon \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{1}{\rho} C_{1\varepsilon} G_k - \left(C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_o} \right)}{1 + \beta \eta^3} \right) \frac{\varepsilon^2}{k} \end{array} \right.$$

Donde μ_{eff} es la viscosidad turbulenta efectiva; α_k y α_ε son la inversas del número de Prandtl efectivo para k y ε ; $\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}$; S es la medida escalar del tensor velocidad de deformación y, finalmente, $\eta_o = 4,38$; $\beta = 0,012$; $C_\mu = 0,0845$; $C_{\varepsilon 1} = 1,42$; $C_{\varepsilon 2} = 1,68$ son constantes del modelo.

K-omega SST “Shear Stress Transport”, (Menter, 1994)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \end{array} \right.$$

Donde \tilde{G}_k representa la generación de energía cinética turbulenta debido al gradiente de velocidades medias, G_ω representa la generación de disipación, Γ_k y Γ_ω representan la difusividad efectiva de k y ω respectivamente. Y_k e Y_ω representan la disipación de k y ω debidas a la turbulencia y D_ω representa el término de “difusión cruzada”.

Para completar el modelo de turbulencia se calcularon los valores de la intensidad y escala de la turbulencia mediante técnicas estadísticas aplicadas a los datos experimentales.

Se optó por modelos de turbulencia de 2 ecuaciones en lugar del modelo de 5 ecuaciones RSM “Reynolds Stress Model” debido al mayor costo computacional de este último.

Finalmente, se empleó una metodología de cálculo no estacionario con formulaciones de segundo orden, a fin de evitar los errores numéricos inherentes a los métodos de primer orden (Blazek, 2001). El algoritmo PISO “Pressure-Implicit with Splitting of Operators” se empleó para resolver el acoplamiento velocidad-presión, ya que resulta adecuado para flujos no estacionarios.

El paso de tiempo para el cálculo se eligió menor a 1/100 de la frecuencia de desprendimientos obtenida en los ensayos, mediante la identificación del pico de frecuencias en el espectro de las fluctuaciones de velocidad instantánea (Scarabino et al, 2005). Con el

valor adimensionalizado se obtiene el nro. de Strouhal, definido como $St = \frac{fH}{V}$

Donde f es la frecuencia de desprendimientos, H la altura de la barrera y V la velocidad de la corriente libre.

Para dicho valor se fijó el paso de tiempo en $1,1 \cdot 10^{-3}$ segundos y se adquirieron valores instantáneos de la velocidad para 4000 pasos de tiempo completando aproximadamente cuatro segundos y medio de simulación.

3.3 Resultados

La distribución de las velocidades medias de la estela en función de la altura, a una distancia de una y dos veces H , se muestran en las Figuras 6 y 7. En ambos gráficos se comparan los perfiles de velocidades obtenidos numérica y experimentalmente.

En la distribución de velocidades correspondiente al modelo $k-\omega$ SST a la distancia $1H$ aguas abajo medida desde la barrera (Fig. 6), se aprecia una leve diferencia entre los 30 y 40 cm de altura ($1.36H$ y $1.82H$), donde el modelo numérico predice velocidades un 5% inferiores a las experimentales; y a partir de los 60 cm ($2.72H$) debido a que en esa zona el polinomio de ajuste de los datos experimentales a la entrada presentaba la menor precisión. En la zona comprendida entre el piso y la altura de la barrera, las velocidades concuerdan aceptablemente con las experimentales exceptuando los puntos que se encuentran inmersos en el vórtice cuasi-estacionario (Fig. 9) entre el suelo y los 5 cm aproximadamente donde debido a las muy bajas velocidades la confiabilidad de los datos experimentales es baja.

Además se aprecia en la simulación una ligera tendencia a aumentar las velocidades en la zona cercana al límite de la barrera medidas a $1H$ de distancia, para luego disminuir al sumergirse en la estela, algo que no se observa en los resultados experimentales. Similar comportamiento se observa en la distribución de velocidades a $2H$ de distancia (Fig. 7).

Por el contrario, al realizar la simulación empleando el modelo $k-\epsilon$ RNG la distribución de velocidades a $1H$ de distancia no reproduce correctamente la obtenida experimentalmente, mostrando una tendencia a suavizar dicha distribución, lo que se acentúa a $2H$ de distancia.

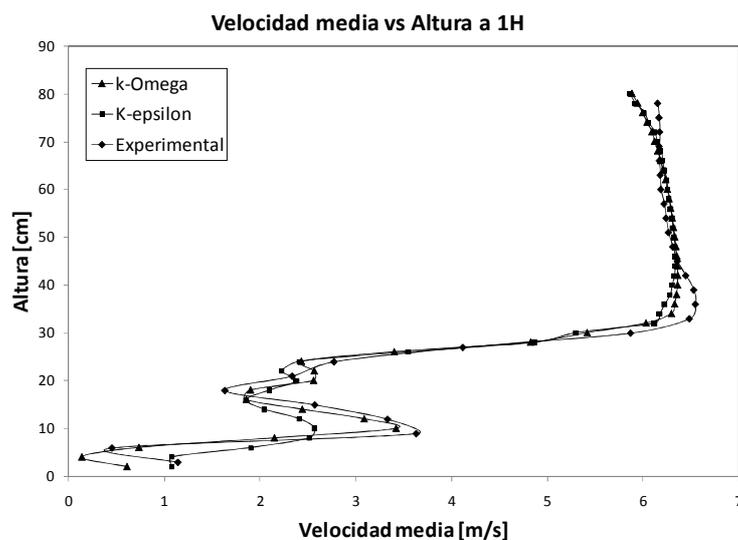


Figura 6: Perfil de velocidades medias a 1H.

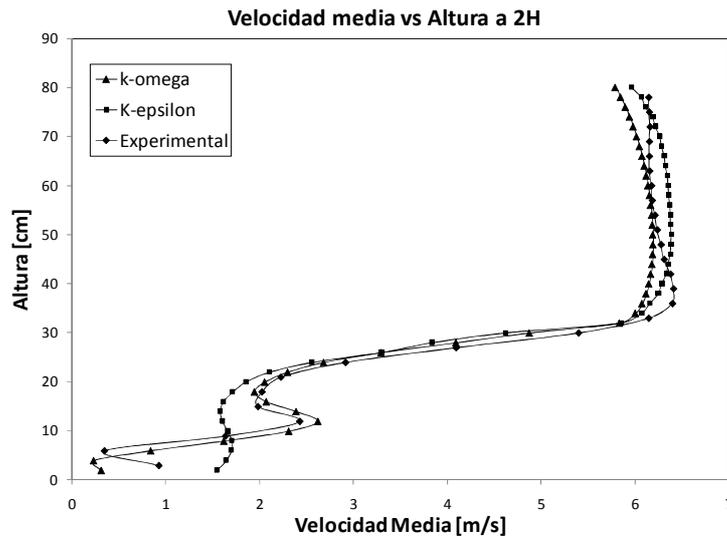


Figura 7: Perfil de velocidades medias a 2H.

Las simulaciones empleando el modelo $k-\epsilon$ RNG, en cambio, mostraron que el modelo ajustó bien las velocidades fuera de la zona de influencia de la barrera, a alturas de $2H$ y superiores arrojando resultados similares a los obtenidos mediante el modelo $k-\omega$.

Para la obtención del número de Strouhal numéricamente se obtuvo el período de las fluctuaciones en el tiempo de las cargas aerodinámicas sobre la barrera (Roshko, 1954). Dichos valores y los experimentales se presentan en la Tabla 1.

Número de elementos	Numérico				Experimental
	$k-\epsilon$ RNG		$k-\omega$ SST		
	Strouhal	Error [%]	Strouhal	Error [%]	
160000	0,184	19,5	0,205	7,3	0,22
257000	0,186	18,3	0,207	6,2	
625000	0,189	16,4	0,207	6,2	

Tabla 1: Números de Strouhal numéricos y experimentales.

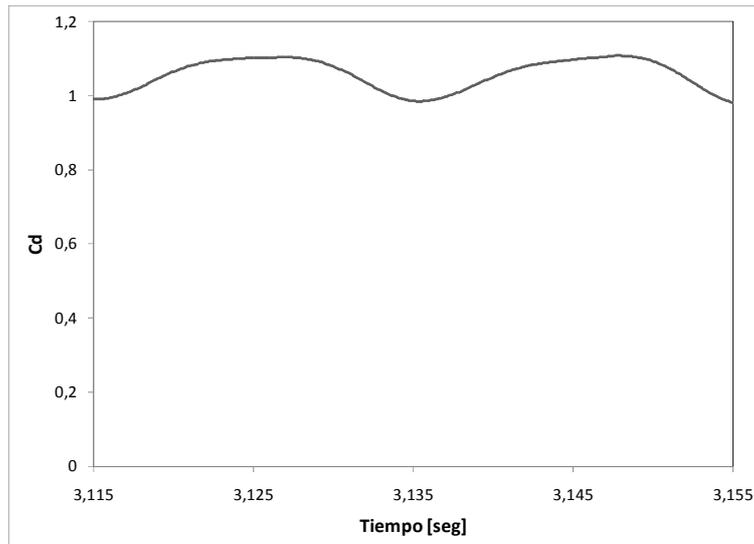


Figura 8: variación del coeficiente de resistencia en el tiempo.

En la Figura 9 se representan las líneas de trayectoria en la estela de la barrera para el modelo $k-\omega$ SST y en la Figura 10 el contorno de velocidades medias.

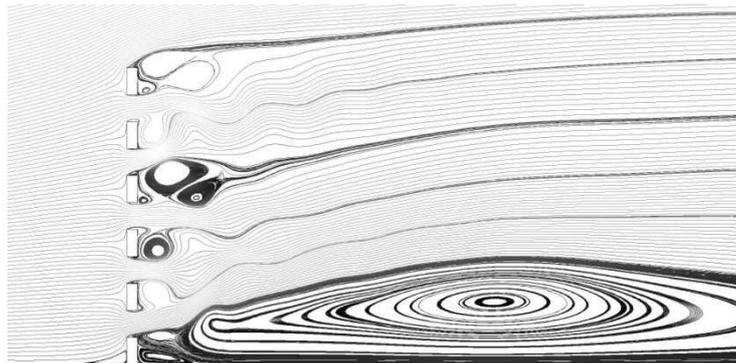


Figura 9: Líneas de trayectoria, modelo $k-\omega$ SST

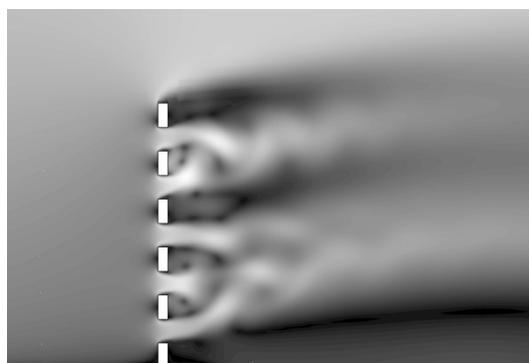


Figura 10: Contorno de velocidades medias

Se observa que el primer elemento de la barrera genera en su estela una importante zona de recirculación con baja velocidad, la que fue identificada en los experimentos. Esta recirculación local desaparece si la barrera está abierta sobre el piso.

4 CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo es estudiar el flujo y evaluar la capacidad predictiva de modelos numéricos en la estela de una barrera eólica de porosidad de 50% empleando modelos de turbulencia de dos ecuaciones y comparando los resultados con las mediciones en túnel de viento.

La barrera empleada tiene un elemento de bloqueo al flujo sobre el piso, lo que produce una zona de recirculación que se extiende aguas abajo hasta 3 H, o una distancia igual a aproximadamente 15 veces la altura del elemento. Las velocidades medias a media altura de la barrera a 1H y 2H de distancia presentan un máximo secundario con un valor igual a aproximadamente el 50% de la velocidad de la corriente libre. Este máximo en la distribución de velocidades parece asociado a la presencia de la zona de recirculación inferior. En la capa de corte que separa al flujo de estela del flujo libre por arriba de la barrera aparecen fluctuaciones de velocidad, de frecuencia característica correspondiente a un nro. de Strouhal de 0.22. Esas fluctuaciones producen a su vez cargas aerodinámicas variables sobre la barrera con la misma frecuencia. Estas fueron calculadas en la simulación y la frecuencia obtenida con el modelo $k-\omega$ logró reproducir el valor experimental con un error del 7% o menos. Por otra parte, el modelo $k-\varepsilon$, si bien detectó las fluctuaciones de carga, predijo la frecuencia con un error de entre 16% y 19.5 %

Empleando para el análisis el modelo de dos ecuaciones $k-\varepsilon$ RNG no se obtuvieron predicciones satisfactorias del flujo en la estela de la barrera, mientras que el modelo $k-\omega$ SST se aproximó, en general, bastante bien a los resultados experimentales. Esto puede deberse a que el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ no predice correctamente flujos con gradientes de presiones adversos (Wilcox, 1994), (Hargreaves et al., 2006) algo que el modelo $k-\omega$ SST realiza en forma más satisfactoria.

Por otra parte, se obtuvo el número de Strouhal para ambos modelos, y nuevamente fue el modelo $k-\omega$ SST quien arrojó valores cuya diferencia es aceptable con el obtenido experimentalmente.

Futuros trabajos incluirán el modelos de turbulencia más completos como el RSM (Reynolds Stress Model) y modelos en 3-D empleando LES "Large Eddy Simulation" y DES "Detached Eddy Simulation"

5 REFERENCIAS

- Barlow B. J.; Rae W. H.; Pope A., *Low-Speed Wind Tunnel Testing*, 1999.
- Blazek J., *Computational Fluid Dynamics: Principles and applications*, Elsevier science, Oxford UK, 2001.
- Bruun H. H. , 1955. *Hot - Wire Anemometry. Principles and signal analysis*.
- Ferziger J., Peric M., 1999. *Computational methods for fluid dynamics*. Springer –Verlag, Berlin Heidelberg.
- Hargreaves D.M., Wright N.G., *On the use of the $k-\varepsilon$ model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer*, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2006.
- Hinze J. O., *Turbulence*, 1975.

Hoerner S.F., *Fluid Dynamics Drag*, 1957.

Menter F. R, *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications*, AIAA Journal, Vol.32, 1994

Roshko A, *On the development of turbulent wakes from vortex streets*, NACA Report 1191, 1954.

Scarabino, A., Marañón Di Leo, Delnero S., Bacchi, F., *Drag coefficients and Strouhal numbers of a port crane boom girder section*, J. of Wind Eng. and Ind. Aerodynamics, 93/1, pp. 451-460, 2005

Wilcox D.C., *Turbulence modelling for CFD*, DCW Industries Inc., California, 1993.

Yakhot,V.,Orszag,S.A., *Renormalization group analysis of turbulence: I. Basic theory*, Journal of Scientific Computing1,1-5, 1986.