

## ANÁLISIS TRANSITORIO DE LA INTERFERENCIA DE FLUJO ENTRE DOS CILINDROS CIRCULARES EN DISPOSICIÓN TÁNDEM

### TRANSIENT ANALYSIS OF THE FLOW INTERFERENCE BETWEEN TWO CIRCULAR CYLINDERS IN TANDEM ARRANGEMENT

Mauro Grioni<sup>a,b</sup>, Sergio A. Elaskar<sup>a,c</sup> y Anibal E. Mirasso<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)*

<sup>b</sup>*Instituto de Mecánica Estructural y Riesgo Sísmico, Fac. de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Centro Universitario, M5502JMA Mendoza, Argentina, maurogrioni15@gmail.com, aemirasso@uncu.edu.ar*

<sup>c</sup>*Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología, UNC-CONICET Fac. de Cs. Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarfield 1611, X5018JMX Córdoba, Argentina, selaskar@unc.edu.ar*

**Palabras Clave:** Cilindros circulares en tándem, Scale-Adaptive Simulation (SAS), Interferencia de estela.

**Resumen.** Conocer el comportamiento del flujo alrededor de pares de cilindros circulares es de gran importancia práctica en muchas áreas de la ingeniería. En este trabajo se investiga numéricamente la interferencia de flujo entre dos cilindros dispuestos uno detrás de otro (tándem) para un número de Reynolds  $Re=1.2e05$ . El flujo turbulento tridimensional y dependiente del tiempo alrededor de los cilindros es simulado numéricamente utilizando el modelo de turbulencia SAS (*Scale-Adaptive Simulation*) por medio del código Fluent, que implementa el método de volúmenes finitos. El solver empleado es el algoritmo SIMPLE (*Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations*) con un esquema *bounded second-order implicit* para resolver la formulación transitoria. La distancia de centro a centro entre los cilindros ( $L$ ) varía desde 1.2 a 6 diámetros ( $D$ ) del cilindro, a fin de identificar los efectos de interferencia de estela debido a la proximidad entre los cilindros. La dinámica de vórtices y las fuerzas actuando sobre los cilindros son comparadas con resultados experimentales informados en la literatura.

**Keywords:** Circular cylinders in tandem, Scale-Adaptive Simulation (SAS), Wake interference.

**Abstract.** Knowing the behavior of the flow around pairs of circular cylinders is of great practical importance in many areas of engineering. In this work, numerical simulation model are carried out to study the flow interference between two cylinders arranged in tandem for a Reynolds number  $Re=1.2e05$ . The three-dimensional transient turbulent flow around the cylinders is simulated numerically using the Scale-Adaptive Simulation (SAS) turbulence model by means of the Fluent code, which implements the finite volumes method. A Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations algorithm (SIMPLE) is used for the velocity-pressure coupling, while the unsteady formulation is based on a *bounded second-order implicit* scheme. The center-to-center space between the cylinders ( $L$ ) is varied from 1.2 to 6 cylinder diameter ( $D$ ), in order to identify the effects of wake interference due to the proximity between the cylinders. The dynamics behavior of vortices and the variation of the forces acting on the cylinders are compared with experimental results reported in the literature.

## 1 INTRODUCCIÓN

En muchos casos de actividades de ingeniería, los cuerpos cilindros son uno de los componentes estructurales mayormente utilizados y que a menudo se encuentran conformando grupos, como por ejemplo, grupos de chimeneas, cables aéreos de líneas eléctricas, tubos en intercambiadores de calor, torres de reacción química, plataformas marinas, tanques de almacenamiento, entre otros. Por lo tanto, resulta de gran interés conocer con precisión el comportamiento del flujo alrededor de cilindros circulares cuando existe interferencia entre ellos. Un caso típico de interferencia sucede cuando los cilindros se encuentran alineados uno detrás del otro (tándem). Esta interferencia tiene efectos significativos en los vórtices desprendidos y la distribución de presión sobre los cilindros, y como consecuencia de esto también ocurrirá lo mismo con las cargas resultantes sobre los cilindros.

Durante las últimas décadas, se han realizado numerosos estudios experimentales del problema de la interferencia de flujo cuando se colocan dos cilindros en tándem, por ejemplo Zdravkovich y Pridden (1977); Igarashi (1981); Arie et al. (1983) y Zhang y Melbourne (1992). Por otra parte, un enfoque más reciente ha sido estudiar el flujo alrededor de dos cilindros en configuración tándem usando simulaciones numéricas mediante la dinámica de fluidos computacional (en inglés, *Computational Fluid Dynamics*, CFD) como por ejemplo los estudios realizados por Meneghini et al. (2001); Akbari y Price (2005); Kitagawa y Ohta (2008) y Palau-Salvador et al. (2008). Sin embargo, muchos de los trabajos encontrados en la literatura son limitados para modelos bidimensionales (2D) y están restringidos a números de Reynolds menores a 300 (Ng y Ko, 1995; Meneghini et al. 2001; Akbari y Price, 2005; Liang et al. 2009).

Debido a que existen pocos trabajos de la interferencia entre cilindros para Reynolds altos ( $Re > 1 \times 10^4$ ) en este trabajo se propone estudiar la interferencia de flujo originada al ubicar un par de cilindros circulares estáticos, alineados uno tras otro (tándem) a distintas distancias de centro a centro entre los cilindros y para un número de  $Re$  igual a  $1.2 \times 10^5$  ( $Re = U_\infty D / \nu$ , donde  $U_\infty$  es la velocidad de la corriente libre,  $D$  es el diámetro de los cilindros, y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido). Teniendo en cuenta los flujos complejos que se desarrollan bajo esta configuración tándem, en este trabajo se utiliza el modelo de turbulencia denominado SAS (en inglés, *Scale-Adaptive Simulation*) propuesto por Menter et al., (2003). Este modelo provee una resolución RANS (en inglés, *Reynolds-Averaged Navier–Stokes*) para regiones de flujo estable, y puede cambiar a un modo similar a LES (en inglés, *Large Eddy Simulation*) para flujos en zonas con grandes e inestables separaciones, pero sin la dependencia explícita de la malla en el régimen RANS. Las simulaciones se llevan a cabo para un modelo tridimensional (3D) y para un flujo transitorio por medio del código Fluent (Ansys Fluent, 2014). Los resultados se comparan con datos disponibles experimentalmente en la literatura.

## 2 MODELO DE TURBULENCIA SAS

El método SAS se puede definir como un método URANS (en inglés, *Unsteady Reynolds-Averaged Navier–Stokes*) de segunda generación, que permite la resolución del espectro turbulento en condiciones de flujo inestable. El concepto de SAS se basa en la introducción de la escala de longitud de Von-Karman (Von-Karman scale,  $L_{vk}$ ) que permite que los modelos SAS se ajusten dinámicamente para resolver estructuras en una simulación RANS no estacionaria (URANS), lo que da como resultado un comportamiento similar al LES en regiones inestables del campo de flujo. Al mismo tiempo, el modelo proporciona capacidades RANS estándar en regiones de flujo estable. Esta nueva escala de longitud es implementada dentro del modelo de dos ecuaciones SST (en inglés, *Shear Stress transport*).

El modelo SST fue desarrollado por Menter (1994) para combinar las mejores características del modelo  $k-\omega$  y  $k-\varepsilon$ , y además controlar los niveles de viscosidad turbulenta en la región cercana a la pared. Los valores de  $k$  y  $\omega$  provienen directamente de las ecuaciones de la energía cinética turbulenta ( $k$ ) y de la tasa de disipación específica ( $\omega$ ). Cuando el modelo SST es usado en simulaciones transitorias, existe el problema que este modelo produce estructuras turbulentas demasiado grandes y consecuentemente viscosidades de turbulencia que son demasiadas elevadas (Menter y Egorov, 2005). En el modelo SAS, este inconveniente es superado, como se mencionó anteriormente, mediante la incorporación de la escala de estructuras de Von-Karman ( $L_{vK}$ ), la cual viene dada por:

$$L_{vK} = \kappa \sqrt{\frac{\left| \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \left( \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right|}{\left| \left( \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} \right) \left( \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_k^2} \right) \right|}} \quad (1)$$

donde  $\kappa$  es la constante de Von-Karman. Esta modificación se deriva del trabajo original de Rotta (Rotta 1972) y es discutido en detalle en Menter y Egorov (2004). Las ecuaciones de gobierno del modelo SST-SAS difieren de aquellas del modelo SST RANS por la adición de un término fuente SAS ( $Q_{SAS}$ ) en la ecuación de transporte para la tasa de disipación específica ( $\omega$ ). Es decir, el modelo SAS se deriva del modelo SST simplemente añadiendo el siguiente término extra:

$$Q_{SAS} = \max \left[ \rho \eta_2 \kappa S^2 \left( \frac{L}{L_{vK}} \right)^2 - C_{SAS} \frac{2\rho k}{\sigma_\Phi} \max \left( \frac{1}{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right), 0 \right] \quad (2)$$

donde los parámetros del modelo en la Ec. (2) son  $\eta_2 = 3.51$ ,  $\sigma_\Phi = 2/3$ , y  $C_{SAS} = 2$ . La escala de estructura turbulenta ( $L$ ) derivada del modelo SST resulta:

$$L = \frac{\sqrt{k}}{c_\mu^{0.25} \omega} \quad (3)$$

La viscosidad turbulenta para el modelo SAS viene dada por:

$$\mu_t = \rho \cdot \left( \sqrt{\left( \frac{\beta}{c_\mu} \right) - \alpha} / (\kappa \eta_2) \cdot L_{vK} \right)^2 S \quad (4)$$

donde  $\beta=0.075$ ,  $C_\mu=0.09$  y  $S$  es un invariante de la velocidad de deformación.

### 3 ESQUEMA NUMÉRICO

Las simulaciones se realizan mediante el uso del código comercial ANSYS FLUENT, que implementa el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de flujo turbulento incompresible. Las ecuaciones son espacialmente discretizadas con un esquema *second-order* para la presión y la turbulencia, un esquema *Bounded Central Differencing* para el momento, mientras que la discretización temporal de las ecuaciones está basada en un esquema *bounded second-order implicit*. Luego se resuelve iterativamente usando el solver *segregated*, en el que se usa el algoritmo SIMPLE (*Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation*) (Patankar, 1980) para derivar las ecuaciones de corrección de presión.

Para la mayoría de las simulaciones transitorias en este estudio, entre 5 y 15 iteraciones internas por paso de tiempo fueron suficiente para lograr la convergencia de la solución. El paso del tiempo computacional adoptado es  $\Delta t=0.00008$  [s], el cual asegura un valor de *CFL* (*Courant–Friedrichs–Lewy*, donde  $CFL=U\Delta t/\Delta x$ ) suficientemente pequeño (menor a 2) para la mayor parte del dominio computacional. El proceso de iteración se lleva a cabo hasta que se consigue un patrón de flujo periódico estacionario, y luego se continúa para obtener los datos promediados en el tiempo del campo de flujo. Se registraron alrededor de 20 a 30 ciclos de desprendimiento de vórtices para obtener datos promediados en el tiempo de forma tal que permitan estadísticas confiables.

Un diagrama esquemático del dominio computacional y de las condiciones de contorno empleadas en este trabajo son resumidas en la [Figura 1](#).

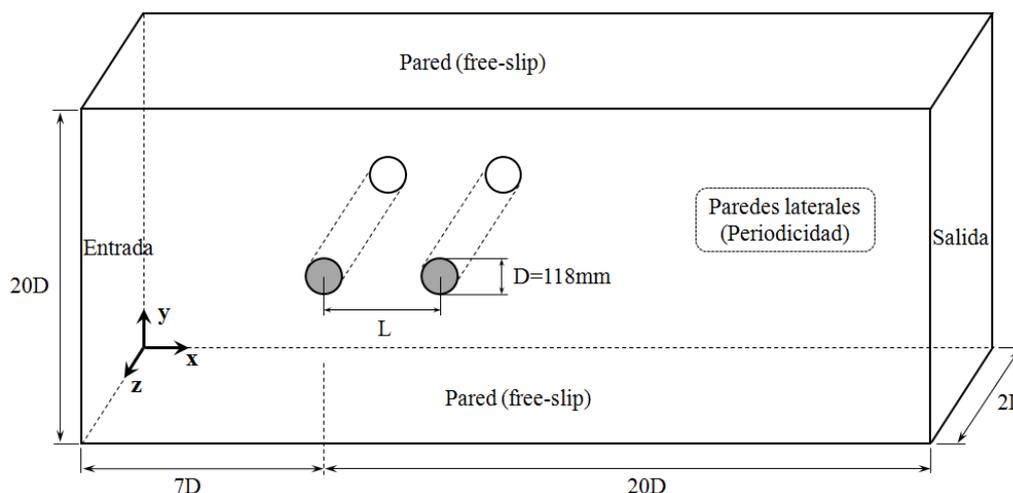


Figura 1: Diagrama esquemático del modelo de simulación.

### 3.1 Malla computacional

Las mallas estructuradas multibloques 3D utilizadas en este trabajo se crearon por medio del programa [ANSYS ICEM CFD \(2014\)](#) para ser usadas con el modelo SAS. La resolución espacial de la malla en la dirección "x" y "y" es similar a la malla utilizada en [Grióni et al. \(2017 y 2018\)](#) en donde se estudio el flujo alrededor de un cilindro cercano al suelo. Para la discretización del cilindro, se utilizaron 160 elementos equidistantes. La malla tridimensional simplemente es obtenida extendiendo la malla lograda en el plano "x-y" en la dirección "z". La longitud del dominio en la dirección "z" se define en 2 diámetros (D), el cual es el límite más bajo aceptable para los modelos que resuelven turbulencias ([Menter et al, 2003](#)), con 20 elementos localizados equidistantemente en la dirección "z". De esta manera, la malla tridimensional resulta en 811320 elementos hexaédricos.

El caso de  $L/D=3$  (siendo L la distancia entre los centros de los cilindros) es tomado como ejemplo para mostrar la malla utilizada en las simulaciones numéricas (ver [Figura 2](#)). Como se observa, aparece un refinamiento cerca del cilindro de tal manera de asegurar una resolución espacial de  $y^+ < 1$  con 20 y 30 elementos en la región de capa límite. Además, se realiza un refinamiento en el espacio (gap) entre los cilindros para capturar lo mejor posible las estructuras de flujo que se forman en dicha zona.

Con el fin de investigar la interferencia entre cilindros separados a distintas distancias se crearon 6 mallas diferentes, una para cada relación  $L/D = 1.2, 2, 3, 4, 5$  y 6, pero manteniendo aproximadamente la misma topología de malla. Esto se debe a que si bien la cantidad de

elementos en la dirección "x" es la misma (345 elementos), la cantidad de elementos entre los cilindros se va cambiando a medida que el cilindro de atrás se aleja o acerca al cilindro de adelante (en forma inversa ocurre con los elementos entre el cilindro de atrás y la parte aguas abajo de los cilindros) de tal forma que la relación de aspecto de los elementos en el espacio entre cilindros (gap) sea similar para cada relación L/D.

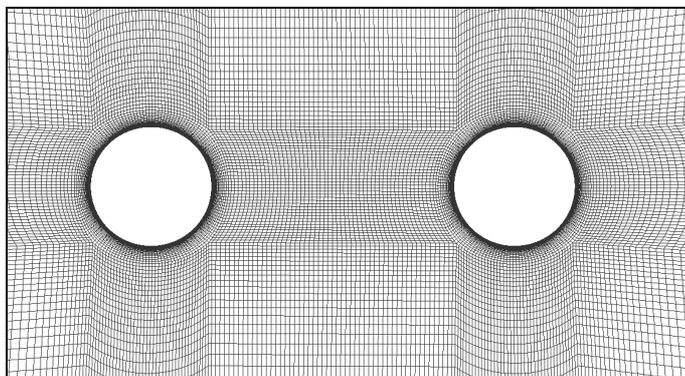


Figura 2: Malla computacional en la región alrededor de los cilindros para L/D=3.

### 3.2 Condiciones de borde

En la entrada del dominio se aplica un flujo constante y uniforme (15.35m/s) con bajo nivel de turbulencia (correspondiente a una intensidad de turbulencia de 0.1% y una relación de viscosidad turbulenta igual a la unidad). A la salida del dominio de simulación, se aplicó una condición de difusión del flujo nula para todas las variables. Esta condición es definida como condiciones de borde "outflow" en Fluent. Para el límite superior e inferior del dominio se especificó una condición de pared libre y para los contornos laterales una condición de periodicidad es impuesto en la dirección "z". En cuanto a la condición de pared del cilindro se consideró condición de no-deslizamiento, es decir, la velocidad nula sobre la pared.

## 4 RESULTADOS

La interferencia de flujo entre dos cilindros dispuestos en configuración tándem es simulado para varias relaciones de separación entre los cilindros L/D=1.2, 2, 3, 4, 5 y 6 para un número de Reynolds  $Re=1.2 \times 10^5$  correspondiente al régimen subcrítico. En este trabajo, se investiga la interferencia de estela por medio de analizar las estructuras de flujo alrededor de los cilindros, la fuerza de arrastre, las fluctuaciones de dichas fuerzas y la frecuencia con la cual los vórtices se desprenden de los cilindros. Los resultados obtenidos de las simulaciones se comparan con datos experimentales obtenidos por diferentes autores.

### 4.1 Coeficiente de arrastre y número de Strouhal

Uno de los parámetros determinados y analizados en este trabajo son el coeficiente de arrastre y el número de Strouhal obtenido para cada cilindro. El coeficiente de arrastre se define como  $CD=F_D/(0.5\rho U_\infty^2 A)$ , en donde  $F_D$  es la fuerza de arrastre ejercida sobre toda la superficie de cada cilindro promediada en el tiempo, y A es el área proyectada del cilindro. El número de Strouhal se define como  $St=fD/U_\infty$ , donde  $f$  es la frecuencia de desprendimiento de vórtices obtenida a partir de las fluctuaciones de la fuerza de sustentación en cada cilindro. El subíndice 1 se encuentra asociado al cilindro aguas arriba, mientras que el subíndice 2 se refiere al cilindro aguas abajo.

En la [Figura 3](#) se compara el coeficiente de arrastre promediado en el tiempo para el cilindro de adelante ( $CD_1$ ) y para el cilindro de atrás ( $CD_2$ ) en función de la distancia de separación entre los cilindros con resultados experimentales realizados a número de Reynolds similares ([Zdravkovich y Pridden \(1977\)](#) para  $Re=1.2 \times 10^5$  y [Biermann y Herrnstein \(1933\)](#) para  $Re=1.1 \times 10^5$ ).

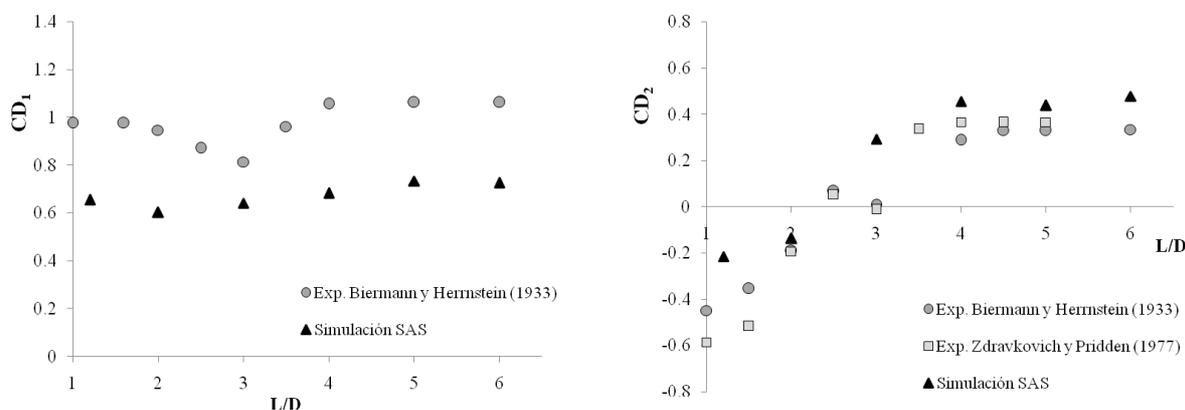


Figura 3: Coeficiente de arrastre promedio sobre los cilindros de adelante y atrás en función de  $L/D$ .

Como se puede ver en las figuras, en el caso del cilindro de adelante el coeficiente de arrastre predicho por las simulaciones numéricas muestra cierta diferencia con los datos experimentales, mientras que el comportamiento del coeficiente de arrastre para el cilindro de atrás muestran un mejor acuerdo con los datos experimentales, sobre todo cuando la separación entre los cilindros es mayor a  $L/D=4$ . Sin embargo, para cuando  $L/D=3$  aparecen en los ensayos experimentales, para el cilindro de atrás, un cambio brusco en la tendencia de  $CD_2$  que las simulaciones numéricas no lograron reproducir. Este efecto se intentó explicar en [Zdravkovich y Pridden \(1977\)](#) llegándose a que este cambio brusco en  $CD_2$  es causado por algún patrón de cambio de flujo en el espacio entre cilindros. Además se menciona que este efecto parece ser dependiente del  $Re$ , ya que para otros  $Re$  no se evidencia dicho cambio en el coeficiente de arrastre.

Otro aspecto que se puede observar en la [Figura 3](#) es que el comportamiento del coeficiente de arrastre del cilindro de adelante no se encuentra muy afectado por la presencia del cilindro de atrás. Mientras que el valor del coeficiente de arrastre del cilindro de atrás sufre cambios importantes debido a la presencia del cilindro de adelante e incluso llega a tomar valores negativos de arrastre. Además es importante mencionar que cuando los cilindros se encuentran alejados entre sí, el  $CD$  del cilindro de atrás logra establecerse en un valor que se encuentra por debajo del valor que se establece para el cilindro de adelante. Esto se podría explicar por el hecho que para un flujo subcrítico alto (como se consideró en este trabajo), la turbulencia de estela del cilindro aguas arriba induce un flujo supercrítico alrededor del cilindro de atrás y, por lo tanto, el arrastre en el cilindro de atrás se mantiene con un valor más chico incluso a una gran distancia de separación entre los cilindros.

En la [Figura 4](#) se indica el número de Strouhal en función de la separación relativa entre los cilindros  $L/D$  para el cilindro de adelante ( $St_1$ ) y para el cilindro de atrás ( $St_2$ ). Se puede observar que los resultados del número de Strouhal obtenidos por las simulaciones numéricas para ambos cilindros muestran un buen ajuste con los datos de los ensayos experimentales realizados por [Jendrzejcyk and Chen \(1986\)](#). Además se puede notar que para  $L/D > 3$  los valores de  $St$  para ambos cilindros son muy similares. Esto es de esperarse, ya que como se verá en la siguiente sección, para cuando  $L/D > 3$  la formación de vortices se produce desde

ambos cilindros. En el caso de  $L/D < 3$  aparece una diferencia en los valores de  $St$  entre el cilindro de adelante y el de atrás debido a que la proximidad entre los cilindros impide la formación alternada de vórtices desde el cilindro de adelante y esto sólo ocurre desde el cilindro de atrás.

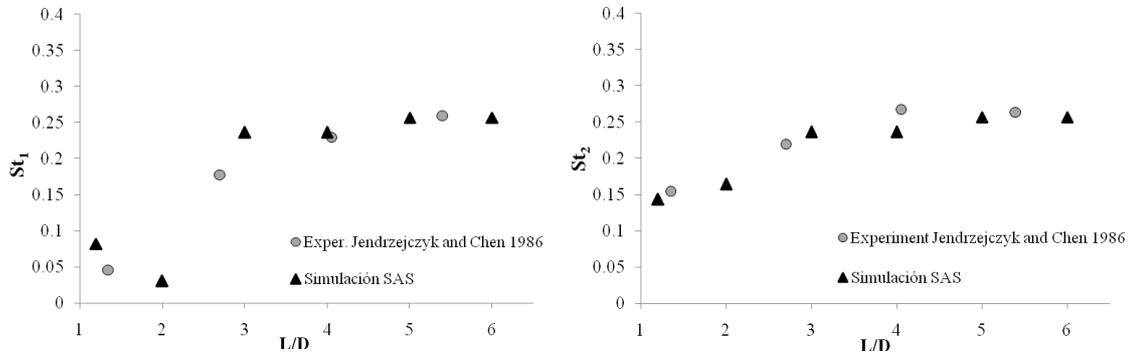


Figura 4: Variación del número de Strouhal ( $St$ ) para ambos cilindros en función de  $L/D$ .

#### 4.2 Interferencia de estructuras de flujo

En esta sección se realiza un análisis de la estructuras de flujo de estela para distintas separaciones entre los cilindros por medio de contornos del campo de vorticidad instantánea en "z" (ver Figura 5).

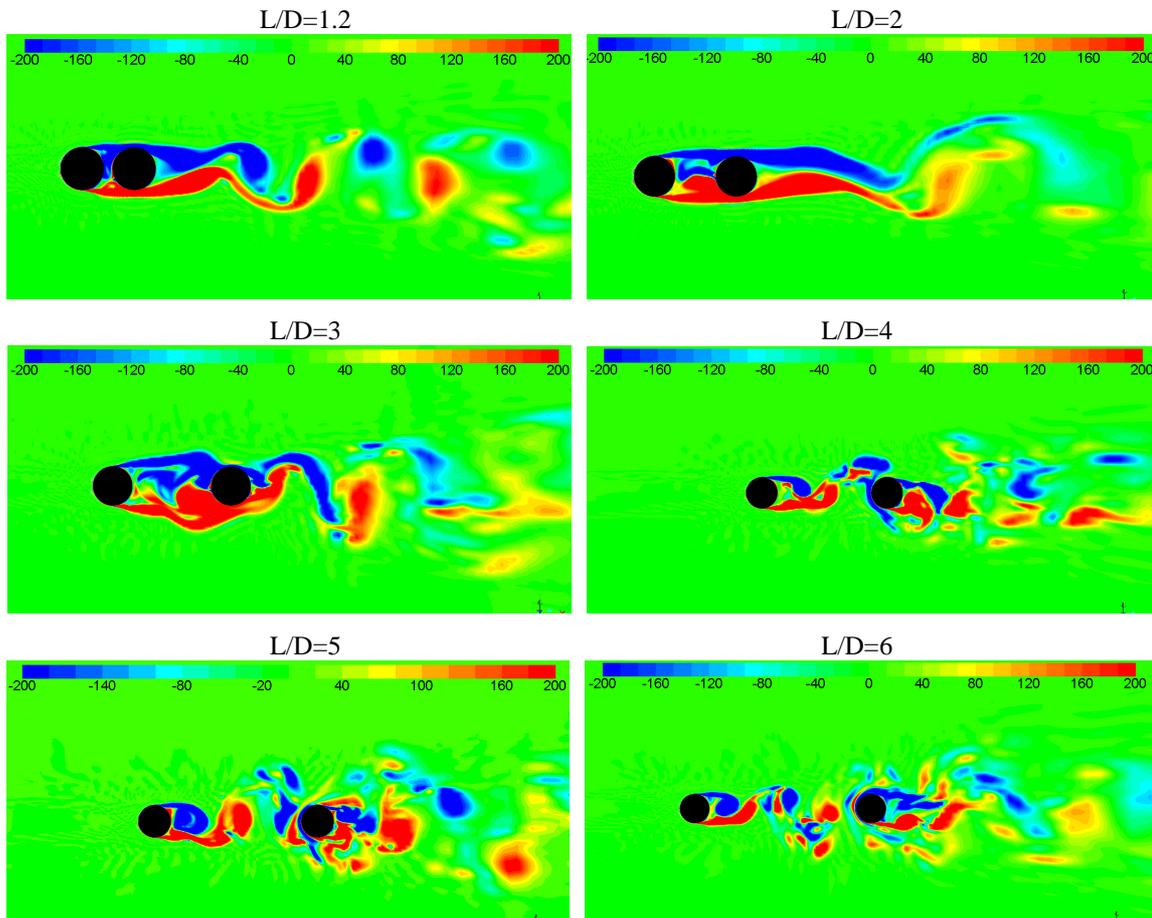


Figura 5: Contorno de vorticidad ( $z$ ) instantánea en la sección media de los cilindros para un tiempo adimensional  $tU_\infty/D=210$ .

Del análisis de los gráficos se puede observar tres regímenes de flujo diferentes. Por un lado se tiene que cuando la distancia entre los centros de los cilindros relativa al diámetro es igual a 1.2, la separación del flujo desde el cilindro de adelante no se vuelve a adherir en las paredes del cilindro de atrás. La formación de los vórtices ocurre sólo detrás del cilindro aguas abajo y los cilindros se comportan como si fueran un sólo cuerpo. Luego se observa en el rango de  $1.2 < L/D < 3$  que las capas límites del cilindro de adelante se desprenden y vuelven a adherirse en el cilindro de atrás, pero la formación de los vórtices alternados sigue apareciendo sólo aguas abajo del segundo cilindro. Finalmente para separaciones de los cilindros mayores a 3 ( $L/D > 3$ ) la formación de vórtices se produce desde ambos cilindros y se puede decir que el efecto de interferencia desaparece. Estos regímenes del flujo concuerdan bien con la clasificación de regímenes para cilindros en tándem establecida por Zdravkovich (Zdravkovich, 1987).

### 4.3 Variaciones del coeficiente de arrastre y sustentación

La magnitud de la fluctuación de la fuerza de sustentación y de arrastre sobre los cilindros puede ser representada por medio de su valor medio cuadrático o RMS (en inglés, *Root Mean Square*). La Figura 6 representa la variación del  $CL_{RMS}$  y  $CD_{RMS}$  (RMS de la fluctuación del coeficiente de sustentación y de arrastre) con la separación entre los cilindros obtenidos de las simulaciones numéricas para ambos cilindros. Los resultados de los experimentos llevados a cabo por Arie et al. (1983) para un  $Re = 1.57 \times 10^5$  son mostrados en las figuras para su comparación.

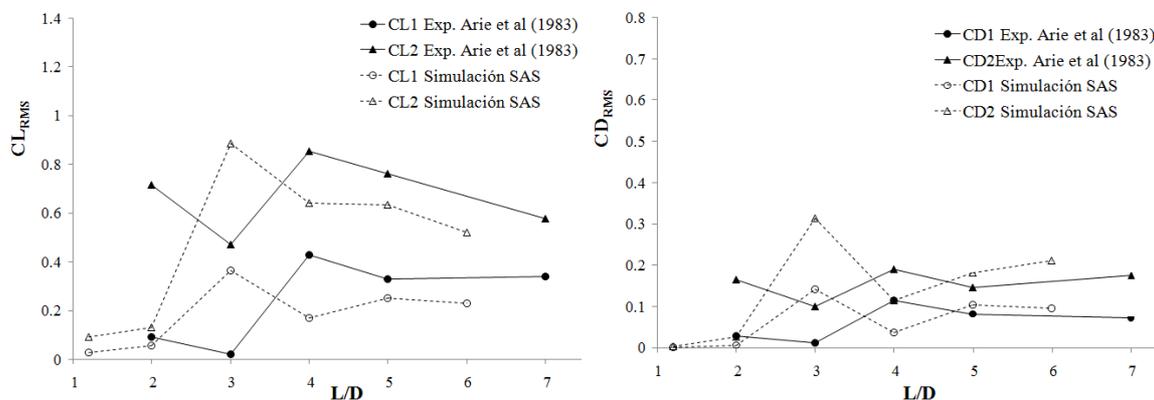


Figura 6: RMS de los coeficientes de fuerza para el cilindro de adelante y el de atrás en función de la separación relativa entre ellos ( $L/D$ ).

Las figuras muestran que los coeficientes de sustentación y arrastre RMS ( $CL_{RMS}$  y  $CD_{RMS}$ ) para el cilindro aguas abajo fueron más altos que para el cilindro aguas arriba cuando se encuentran a una distancia  $L/D < 5$ . Mientras que para  $L/D > 5$  se muestra una leve tendencia a que las fluctuaciones de  $CL$  tiendan a un mismo valor. Esto estaría asociado a la interferencia de estela que produce el cilindro de atrás. Además, se puede observar que para  $L/D > 3$  los resultados de las simulaciones muestran consistencia con los resultados experimentales. Sin embargo, para  $L/D$  menores e iguales a 3, las diferencias con los datos experimentales son mayores. Aunque ciertas diferencias son encontradas cuando se comparan los resultados de las simulaciones numéricas con los resultados obtenidos por Arie et al. (1983), es importante mencionar que la variación del  $CL_{RMS}$  y  $CD_{RMS}$  en función de  $L/D$  para ambos cilindros tienen un comportamiento similar, fundamentalmente para  $L/D > 3$ , como se evidencia en ambos estudios.

## 5 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizaron simulaciones numéricas tridimensionales (3D) con el modelo de turbulencia Scale-Adaptive Simulation (SAS) del flujo alrededor de dos cilindros de igual diámetro dispuestos en una configuración tándem. Las simulaciones se realizaron para 6 diferentes distancias, relativas al diámetro, medidas de centro a centro de los cilindros ( $L/D=1.2, 2, 3, 4, 5$  y  $6$ ) y para un número de Reynolds igual  $1.2 \times 10^5$ . Las principales conclusiones son las siguientes.

En líneas generales, las relaciones entre el espaciamiento de centro a centro de los cilindros y las características del flujo, la fuerza de arrastre, las fluctuaciones de la fuerza de arrastre y sustentación y la frecuencia de desprendimiento de vórtices obtenidas en el presente trabajo, fueron razonablemente consistentes con los resultados experimentales reportados en la literatura. Además, los resultados numéricos mostraron que el comportamiento del CD del cilindro de adelante no se encuentra muy afectado por la presencia del cilindro de atrás, mientras que el CD del cilindro de atrás sufre cambios importantes debido a la presencia del cilindro de adelante e incluso llega a tomar valores negativos.

Otra conclusión relevante es que los resultados numéricos capturaron la evolución del número de Strouhal: los valores de St obtenidos para ambos cilindros son muy similares para  $L/D > 3$ , mientras que para valores de  $L/D$  más chicos, el valor del St del cilindro de adelante cae considerablemente debido a que la formación de los vórtices ocurre sólo en el cilindro de atrás.

Por otra parte, las simulaciones lograron reproducir los diferentes regímenes asociados a los cilindros en tándem y visualizar la interferencia en la estructuras de flujo.

Finalmente, cabe destacar la importancia de complementar los resultados obtenidos en el presente trabajo para otros números de Reynolds (régimen de flujo crítico y supercrítico).

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada parcialmente por la Secretaría de Ciencia, Tecnología y Postgrado, Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo, 06/B344), el proyecto MINCyT-ECOSud PA17A07, el proyecto PUE2016-IDIT y por una beca doctoral del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) a Mauro Grioni.

## REFERENCIAS

- Akbari, M.H., Price, S.J., Numerical investigation of flow patterns for staggered cylinder pairs in cross-flow. *Journal of Fluids and Structures*, 20, 533-554, 2005.
- ANSYS Fluent Inc., Fluent 15.0.7 User's Guide, 2014.
- ANSYS ICEM CFD Inc, Ansys ICEM 15.0.7, 2014.
- Arie, M., Kiya, M., Moriya, M., Mori, H., Pressure fluctuations on the surface of two circular cylinders in tandem arrangement. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 105, 161-167, 1983.
- Biermann D., Herrstein, W.H. Jr., The interference between struts in various combinations. *National Advisory Committee for Aeronautics*, Tech. Rep. 468, 1933.
- Grioni, M., Elaskar S., Mirasso, A. E., Simulación de Flujo Transitorio 2D alrededor de un Cilindro Circular Horizontal considerando el Efecto Suelo. *Mecánica Computacional*. 35, 873-885, 2017.
- Grioni, M., Elaskar S., Mirasso, A. E., Scale-Adaptive Simulation of flow around a circular cylinder near a plane boundary. *Journal of Applied Fluids Mechanics*. (En edición), 2018.
- Igarashi, T., Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem.

- Bulletin of JSME*, 24 (188), 323–331, 1981.
- Jendrzejczyk, J.A, Chen, S.S., Fluid forces on two circular cylinders in crossflow. *Proceedings of the Flow-Induced Vibration 1986*, PVP-vol. 104, ASME, New York, 1-13, 1986.
- Kitagawa, T., Ohta, H., Numerical investigation on flow around circular cylinders in tandem arrangement at a subcritical Reynolds number. *Journal of Fluids and Structures*, 24, 680-699, 2008.
- Liang C, Papadakis G, Luo X., Effect of tube spacing on the vortex shedding characteristics of laminar flow past an inline tube array: a numerical study. *Computers and Fluid*, 38, 950-964, 2009.
- Meneghini, J.R., Saltara, F., Siqueira, C.L.R., Ferrari Jr., J.A., Numerical simulation of flow interference between two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangements. *Journal of Fluids and Structures*, 15, 327-350, 2001.
- Menter, F.R., Two-equation eddy viscosity models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8): 269–289, 1994.
- Menter, F.R., Kuntz, M., Bender, R., A scale-adaptive simulation model for turbulent flow predictions. *AIAA Paper 2003-0767*, Reno, Nevada, USA, 2003.
- Menter, F.R., Egorov, Y., Re-visiting the turbulent scale equation. In: *Proc. IUTAM Symp. One Hundred Years of Boundary Layer Research*, Göttingen. Springer, Heidelberg, 2004.
- Menter, F.R. and Egorov, Y., A scale-adaptive simulation model using two-equation models, *Paper AIAA 2005-1095*, Reno, Nevada, USA, 2005.
- Ng, C.W., Ko, N.W.M., Flow interaction behind two circular cylinders of equal diameter-a numerical study. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 54-55, 277-287, 1995.
- Palau-Salvador, G., Stoesser, T., Rodi, W., LES of the flow around two cylinders in tandem. *Journal of Fluids and Structures*, 24, 1304–1312, 2008.
- Patankar, S.V., Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere, Washington, DC, USA, 1980.
- Rotta, J.C., Turbulente Strömungen. BG Teubner Stuttgart, 1972.
- Zdravkovich, M.M., Pridden, D.L., Interference between two circular cylinders; series of unexpected discontinuities. *Journal of Industrial Aerodynamics*, 2, 255-270, 1977.
- Zdravkovich M.M., The effects of interference between circular cylinders in cross flow. *Journal of Fluids and Structures*, 1, 239-61, 1987.
- Zhang, H., Melbourne, W.H., Interference between two circular cylinders in tandem in turbulent flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41-44, 589-600, 1992.