



**HAL**  
open science

## Interferencia de flujo entre cilindros circulares en disposición tándem cercanos al suelo

Mauro Grioni, Sergio Elaskar, Anibal Mirasso, Pascal Bruel

► **To cite this version:**

Mauro Grioni, Sergio Elaskar, Anibal Mirasso, Pascal Bruel. Interferencia de flujo entre cilindros circulares en disposición tándem cercanos al suelo. *Mecánica Computacional*, 2019, 37 (26), pp.1065-1074. hal-02376562

**HAL Id: hal-02376562**

**<https://inria.hal.science/hal-02376562>**

Submitted on 22 Nov 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## INTERFERENCIA DE FLUJO ENTRE CILINDROS CIRCULARES EN DISPOSICIÓN TÁNDEM CERCANOS AL SUELO

### FLOW INTERFERENCE BETWEEN CIRCULAR CYLINDERS IN TANDEM ARRANGEMENT NEAR TO A PLANE WALL

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

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

<sup>b</sup>*Instituto de Mecánica Estructural y Riesgo Sísmico, Facultad 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*

<sup>d</sup>*CNRS - University Pau & Pays Adour, LMAP - Inria CAGIRE Team, Av. de l'Université, 64013 Pau, Francia, pascal.brue@univ-pau.fr*

**Palabras clave:** Cilindros circulares en tándem, Scale-Adaptive Simulation (SAS), proximidad al suelo, interferencia de estela.

**Resumen.** Este trabajo se enfoca en estudiar por medio de simulaciones numéricas el flujo alrededor de dos cilindros circulares en tándem considerando su proximidad con el suelo. Los cilindros se encuentran inmersos en un flujo con capa límite del suelo para un número de Reynolds subcrítico  $Re=10000$ . Para modelar el flujo turbulento tridimensional y dependiente del tiempo se utiliza el modelo de turbulencia SAS (Scale-Adaptive Simulation) por medio del código Fluent. La interferencia entre los cilindros y con el suelo se analiza para distintas separaciones entre cilindros y distintas proximidades con el suelo. Se examinan los coeficientes de sustentación, de arrastre, y el comportamiento del desprendimiento de vórtices. Los resultados son comparados con resultados de cilindros en tándem de ensayos experimentales y simulaciones numéricas disponibles en la literatura, como así también con el caso de un cilindro solo cercano al suelo.

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

**Abstract.** This study focuses on the numerical simulations of the flow around two tandem cylinders placed near a wall. The cylinders are immersed in a flow with a boundary layer profile at a subcritical Reynolds number ( $Re=10000$ ). 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. The effects of wake interference due to the proximity between the cylinders and the proximity with the wall are examined through the values of drag and lift coefficients. Also, the details of the flow fields in the near wake of the cylinders are analyzed. The results are compared with experimental and numerical results reported in the literature, as well as to the case of a single cylinder near a wall.

## 1. INTRODUCCIÓN

Tanques horizontales y tuberías son componentes vitales en la cadena de almacenamiento y distribución de combustibles en la industria de hidrocarburos, industria minera e industria petroquímica, entre otras. Es frecuente encontrar estas estructuras cilíndricas dispuestas conformando grupos, donde los efectos de interacciones entre tanques vecinos están presente. Un caso típico de interferencia entre estructuras cilíndricas corresponde a cuando se encuentran alineados una detrás de otra (tándem) con respecto a la dirección del flujo. Esta interferencia tiene efectos significativos en los vórtices desprendidos y la distribución de presión sobre estas estructuras, y como consecuencia de esto también ocurrirá lo mismo con las cargas resultantes (Grioni et al., 2018a). Por otra parte, cuando estas estructuras cilíndricas en tándem se encuentran cercanas al suelo, la proximidad a la misma introduce una complejidad adicional a los patrones de flujo que se obtienen para cuando se encuentran alejadas del suelo (flujo libre). El comportamiento del flujo se ve significativamente afectado principalmente por la distancia entre los centros de las estructuras cilíndricas ( $L$ ), y la altura de separación ( $G$ ) entre la parte inferior del cilindro y el suelo (Wang et al., 2015).

Numerosos trabajos se pueden mencionar para el caso de cilindros en tándem en forma aislada (Zdravkovich y Pridden, 1977; Igarashi, 1981; Meneghini et al., 2001; Kitagawa y Ohta, 2008; Grioni et al., 2018b) e incluso el caso de un cilindro cercano al suelo (Bearman y Zdravkovich, 1978; Lei et al., 1999; Nishino et al., 2007; Grioni et al., 2018b). Sin embargo se cuenta con limitada información disponible sobre el caso de cilindros en tándem cercanos al suelo. Algunos de estos trabajos son los estudios realizados por Wang et al. (2015) y Li et al. (2018). El propósito de este trabajo es evaluar la interferencia de flujo originada al ubicar un par de cilindros circulares estáticos, alineados uno tras otro (tándem) cercanos al suelo para un flujo con número de  $Re$  igual a  $1 \times 10^4$ . Se consideran distintas relaciones de separaciones entre los cilindros ( $L/D=2$  y  $5$ ) y distintas relaciones de proximidades con el suelo ( $G/D=0.15, 0.2, 0.3$  y  $0.6$ ). Teniendo en cuenta los flujos complejos que se desarrollan bajo esta configuración tándem con proximidad al suelo, en este trabajo se utiliza el modelo de turbulencia denominado SAS (en inglés, Scale-Adaptive Simulation) propuesto por Menter et al. (2003). Hemos seleccionado el modelo SAS debido a los resultados satisfactorios obtenidos para analizar casos de prueba similares: el flujo alrededor de un cilindro horizontal cercano a una pared (Grioni et al., 2018b) y cilindros en posición tándem (Grioni et al., 2018a). Las simulaciones se llevan a cabo para un modelo tridimensional (3D) y para un flujo transitorio. Los resultados se comparan con datos disponibles experimentalmente y numéricamente en la literatura.

## 2. CONFIGURACIÓN COMPUTACIONAL

Las simulaciones se realizan mediante el uso del código comercial Ansys Fluent 15 (<http://www.ansys.com>), que implementa el método de volúmenes finitos. El modelo físico corresponde a flujo de aire incompresible, isotérmico, viscoso y turbulento, siendo el conjunto de ecuaciones a resolver las ecuaciones de Navier-Stokes y continuidad (Grioni et al., 2018b). Las ecuaciones son espacialmente discretizadas con un esquema second-order para la presión y la turbulencia, un esquema Bounded central differencing para el momento (derivado por Ansys de Leonard (1991); Barth y Jespersen (1989)), 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) para derivar las ecuaciones de corrección de presión. Para la mayoría de las simulaciones transitorias en este estudio, entre 3 y 10 iteraciones internas

por paso de tiempo fueron suficiente para lograr la convergencia de la solución. La solución se logra cuando todos los residuos de las ecuaciones discretizadas caen por debajo de  $1 \times 10^{-4}$ . El paso del tiempo computacional adoptado es  $\Delta t = 0.001 [s]$ , el cual asegura un valor de CFL (Courant–Friedrichs–Lewy, donde  $CFL = \Delta t U / \Delta x$ ) suficientemente pequeño (menor a 3) para la mayor parte del dominio computacional. El proceso iterativo 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 alcanzar datos promediados en el tiempo de forma tal que permitan estadísticas confiables.

## 2.1. Descripción del problema

Un esquema del dominio computacional y de las condiciones de contorno empleadas en este trabajo se muestra en la Fig. 1. En la entrada del dominio se aplica un flujo constante y uniforme (1.28m/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). Al imponer una velocidad uniforme en la entrada se obtiene en la posición del cilindro de adelante, cuando los cilindros son removidos del volumen de control, una capa límite del suelo con un espesor relativo al diámetro del cilindro,  $\delta/D$ , igual a 0.25. De esta forma queda definida la capa límite utilizada en este trabajo. A la salida del dominio de simulación, se aplicó una condición de difusión del flujo nula para todas las variables (condición homogénea de Neumann), definida como condición de borde “outflow” en Fluent. Para el límite superior del dominio (Top) se especificó una condición de pared libre ( $v = 0$ , velocidad nula en la dirección  $y$ ) y para los contornos laterales una condición de periodicidad sin caída de presión es impuesta en la dirección “ $z$ ”. En cuanto a la condición de pared de los cilindros y el piso del dominio, se consideraron condiciones de no deslizamiento, es decir, velocidad nula sobre la pared ( $u = v = w = 0$ ).

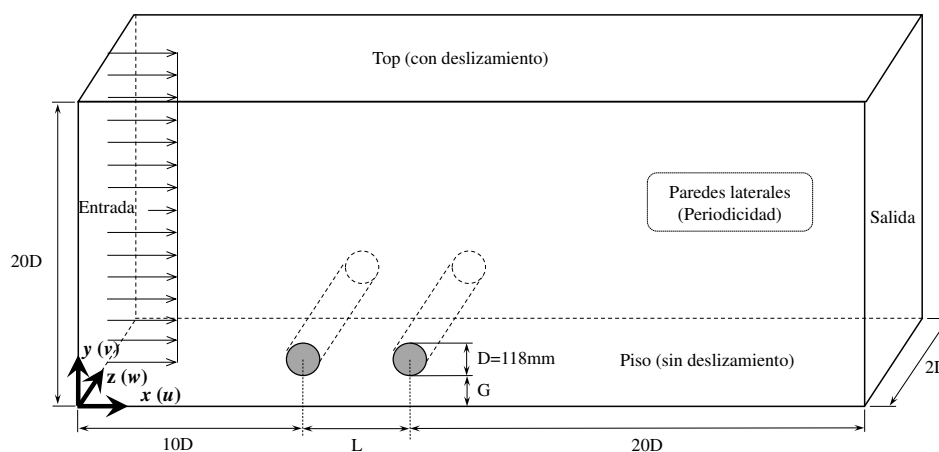


Figura 1: Diagrama esquemático del modelo de simulación.

## 2.2. Simulación SAS

El método SAS se puede definir como un método URANS (Unsteady Reynolds- Averaged Navier–Stokes) de segunda generación, ya 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 (Menter y Egorov, 2005). 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 denominado SST (Shear Stress transport). El modelo SST fue desarrollado por Menter (1994) para combinar las mejores características del modelo  $k - \omega$  y  $k - \epsilon$ , 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 transporte de la energía cinética turbulenta ( $k$ ) y de la tasa de disipación específica de energía cinética turbulenta ( $\omega$ ). Cuando el modelo SST es usado en simulaciones transitorias, existe el problema que éste 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 ( $L_{vk}$ ) que se implementa a través de un nuevo término fuente ( $Q_{SAS}$ ) en la ecuación de transporte para  $\omega$ . La adición de esta escala de longitud permite que el modelo muestre tanto soluciones estables como características de resolución de escala según la situación del flujo. Es decir, el modelo proporciona una resolución RANS en regiones de flujo estables y permite la resolución en parte del espectro turbulento en regiones de flujo inestables. La transición de RANS a la resolución de SAS se produce por el nivel de inestabilidades de flujo. Si estas inestabilidades son demasiados débiles, el modelo no cambia a la resolución SAS y permanece una resolución URANS. Esto implica que los métodos de SAS son prometedores en los flujos con mecanismos de inestabilidad significativos presentes como ocurre en la estela cercana a los cuerpos cilíndricos.

### 2.3. Malla computacional

Las mallas estructuradas multibloques 3D utilizadas en este trabajo se crearon por medio del programa Ansys ICEM 15 (<http://www.ansys.com>). El caso  $L/D=2$  y  $G/D=0.3$  es considerado como ejemplo para mostrar la malla utilizada en las simulaciones numéricas (ver Fig. 2a). Como se observa en la Fig. 2b, aparece un refinamiento cerca de los cilindros para asegurar una resolución espacial de  $y^+ < 1$  con 20 y 30 elementos en la región de capa límite y un refinamiento en el espacio entre los dos cilindros para capturar las estructuras de flujo que se forman en dicha zona. Además, se realiza un refinamiento cerca de la pared plana para capturar la dinámica de la capa límite del suelo. La resolución espacial de la malla en la dirección "x" e "y" es similar a la malla utilizada en Grioni et al. (2018a,b) en donde se estudio el flujo alrededor de un cilindro cercano al suelo y la interferencia de cilindros en tándem para flujo libre, respectivamente. En la discretización del cilindro, se utilizaron 200 elementos equidistantes. La malla tridimensional simplemente es obtenida extendiendo la malla lograda en el plano "x - y" en la dirección "z".

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Coeficiente de arrastre y sustentación

Los efectos de la interferencia entre los cilindros y proximidades con el suelo sobre las fuerzas aerodinámicas se analiza por medio del coeficiente de arrastre promedio (CD) y el de sustentación promedio (CL) y además, se usa la magnitud de la fluctuación de las fuerzas de sustentación y arrastre sobre los cilindros que es representada por su valor medio cuadrático o RMS (Root Mean Square). Dicho RMS es aplicado sobre la diferencia entre la fluctuación de la fuerza y su valor promedio (Li et al., 2018). De ahora en adelante, el subíndice 1 se

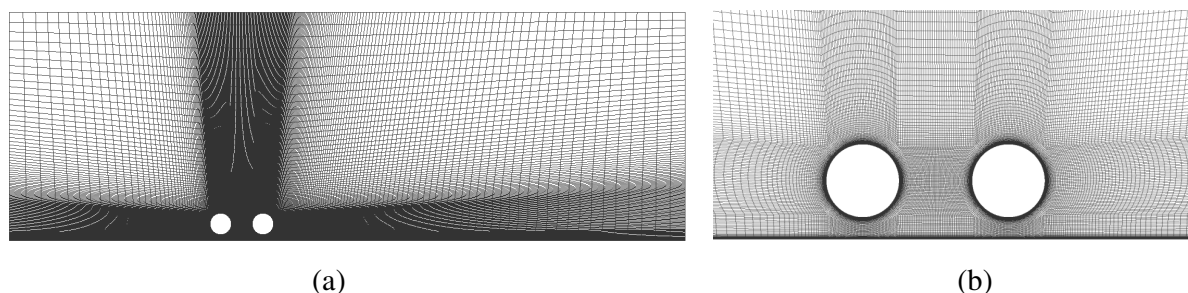


Figura 2: Malla computacional para  $L/D=2$  y  $G/D=0.3$ ; (a) vista general, (b) zoom en la zona de los cilindros y el suelo.

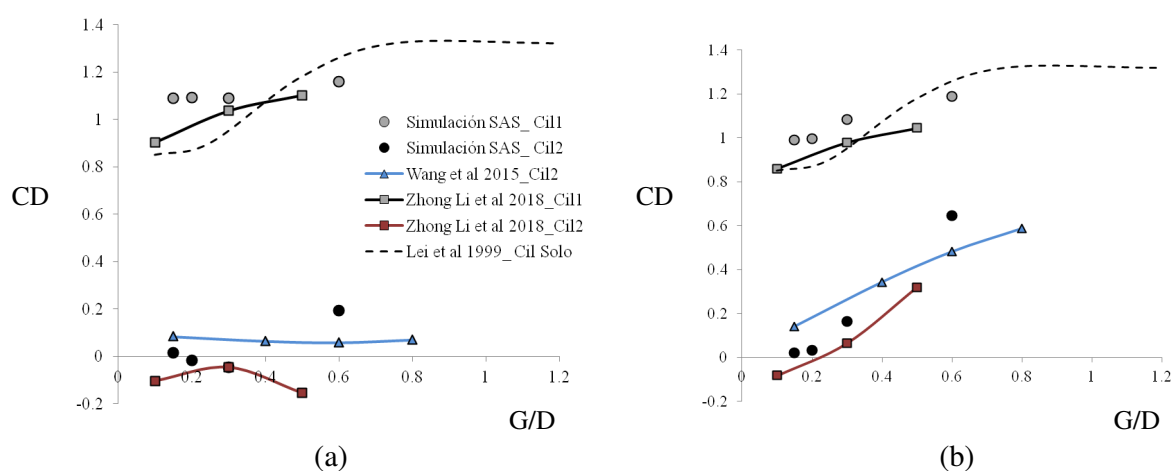


Figura 3: Coeficiente de arrastre para los cilindros de adelante y de atrás en función de  $G/D$ ; (a)  $L/D=2$ , (b)  $L/D=5$ .

encuentra asociado al cilindro aguas arriba, mientras que el subíndice 2 se refiere al cilindro aguas abajo. En la Fig. 3 se muestra el coeficiente de arrastre promediado en el tiempo en ambos cilindros para  $L/D=2$  y 5 en función de las distintas separaciones con el suelo ( $G/D$ ). Datos experimentales y numéricos publicados previamente realizados a número de Reynolds similares (Wang et al. (2015) para  $Re=0.6 \times 10^4$  y Li et al. (2018) para  $Re=1.3 \times 10^4$ ) son incluidos con los resultados obtenidos para su comparación. Como se puede ver en las figuras, el coeficiente de arrastre del cilindro de adelante predicho por las simulaciones numéricas con SAS muestra una buena concordancia con los resultados obtenidos por Li et al. (2018) quienes utilizaron un modelo de turbulencia LES. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos con SAS es posible observar que cuando los cilindros se encuentran cerca entre sí ( $L/D=2$ ) el  $CD_1$  prácticamente no es afectado por la proximidad con el suelo. Sin embargo, cuando los cilindros se alejan entre sí ( $L/D=5$ ) el  $CD_1$  disminuye a medida que los cilindros se acercan al suelo, lo cual se evidencia para el caso de un solo cilindro ubicado cercano a una pared (Lei et al., 1999). Es decir, cuando los cilindros se alejan entre ellos, el cilindro de adelante tiene un comportamiento similar al de un solo cilindro cuando se aproxima al suelo.

En cuanto al cilindro de atrás, se evidencia que el coeficiente de arrastre es menor que para el cilindro de adelante. Para  $L/D=2$ , los resultados predichos por las simulaciones numéricas SAS muestran cierta diferencia con los datos publicados. Sin embargo, se aprecia que para este caso existe una dispersión entre los resultados experimentales (Wang et al., 2015), las soluciones



numéricas por medio de LES (Li et al., 2018) y los de este trabajo por medio del modelo de turbulencia SAS. Por otro lado, para  $L/D=5$ , los resultados muestran un mejor ajuste entre ellos. Se puede observar que a medida que los cilindros se alejan del suelo el  $CD_2$  aumenta, indicando que los efectos de la presencia del suelo dejan de tener influencia sobre los cilindros.

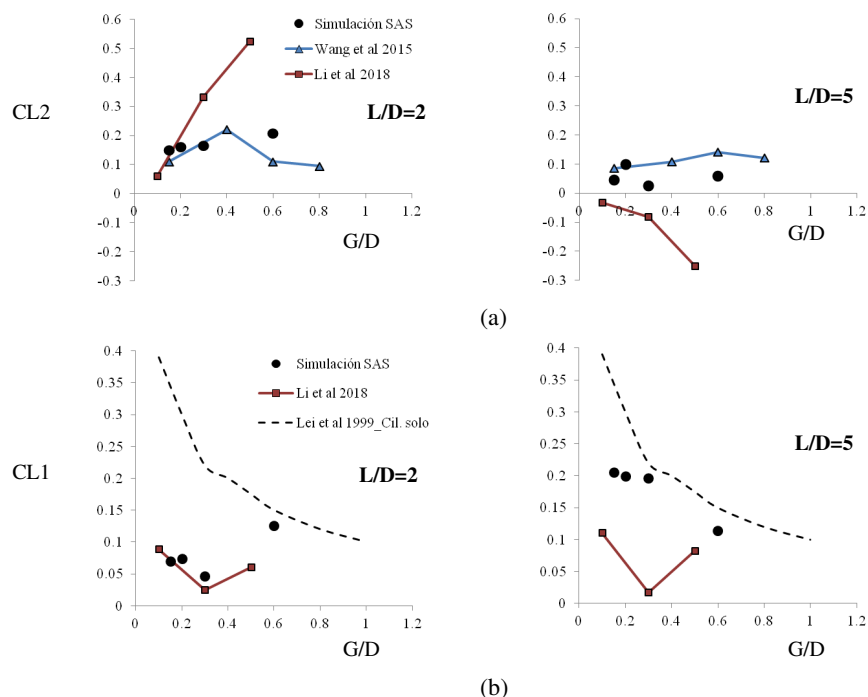


Figura 4: Coeficiente de sustentación para ambos cilindros en función de  $G/D$ ; (a) cilindro de atrás, (b) cilindro de adelante.

La Fig. 4 muestra las variaciones del  $CL$  promedio en función de la separación con el suelo  $G/D$  para los distintos  $L/D$ . Se puede observar que los resultados obtenidos en este trabajo para el cilindro de atrás (Fig. 4a) muestran un buen ajuste con los ensayos experimentales realizados por Wang et al 2015. Por otra parte, los resultados obtenidos para el cilindro de adelante (Fig. 4b) muestran un mejor ajuste cuando los cilindros se encuentran cerca entre ellos ( $L/D=2$ ), mientras que para  $L/D=5$  los resultados indican una mayor diferencia con los resultados de Li et al. (2018). Sin embargo, un aspecto interesante a tener en cuenta que cuando los cilindros se encuentran alejados entre sí ( $L/D=5$ ), el comportamiento del cilindro de adelante se asemeja al comportamiento de un solo cilindro cuando se lo compara con los datos experimentales de Lei et al. (1999) ( $Re=1.30 \times 10^4 - 1.45 \times 10^4$ ) para el caso de un solo cilindro cercano al suelo.

Las Figuras 5 y 6 representan la variación del  $CD_{RMS}$  y  $CL_{RMS}$  (RMS-Root Mean Square de la fluctuación del coeficiente de arrastre y de sustentación) para ambos cilindros con  $L/D=2$  y 5 en función de  $G/D$ . Como se observa en dichas figuras el  $CD_{RMS}$  y el  $CL_{RMS}$  obtenidos en este trabajo presentan un comportamiento muy similar. Si observamos ambas figuras podemos ver que en ambos cilindros el  $CD_{RMS}$  y el  $CL_{RMS}$  tienden a disminuir cuando disminuye la separación con el suelo. Esto se explica debido al hecho que el desprendimiento de vórtice se suprime más para  $G/D$  menores, lo que conduce a una menor amplitud de fluctuación del coeficiente de sustentación y de arrastre. Por otro parte, cuando los cilindros se encuentran cercanos entre sí ( $L/D=2$ ) el incremento en la fluctuación del  $CD$  aparece para  $G/D=0.6$ , mientras que para  $L/D=5$  el incremento aparece para  $G/D=0.3$ . Esto nos indica que el desprendimiento de

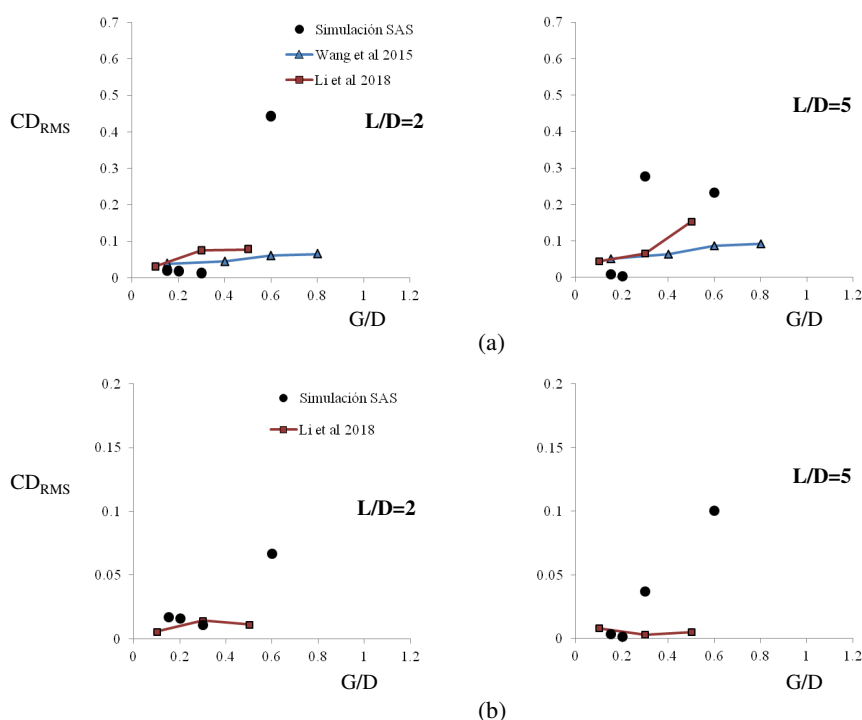


Figura 5: RMS del coeficiente de arrastre para ambos cilindros en función de  $G/D$ ; (a) cilindro de atrás, (b) cilindro de adelante.

vórtices en ambos cilindros se encuentra influenciado tanto por la proximidad con el piso como así también con la distancia de separación entre ellos. Es importante remarcar que el  $CD_{RMS}$  y  $CL_{RMS}$  del cilindro de atrás muestra valores más altos debido a que el cilindro de atrás se encuentra inmerso en la turbulencia de estela del cilindro aguas arriba. Por otro parte, cuando los cilindros se encuentran alejados entre sí ( $L/D=5$ ) el  $CL_{RMS}$  del cilindro de adelante se aproxima al comportamiento de un solo cilindro cercano al suelo.

### 3.2. Desprendimiento de vórtices e interferencia de estructuras de flujo

En esta sección se realiza un análisis del desprendimiento de vórtices y de la estructuras de flujo de estela para las distintas separaciones entre los cilindros y la proximidad con el suelo. La Fig. 7 muestra la presencia o supresión de los vórtices para el cilindro de atrás. De este gráfico se puede identificar la combinación crítica entre la separación con el suelo ( $G/D$ ) y la distancia entre los cilindros ( $L/D$ ) en donde comienza a producirse la propagación periódica de vórtices en el cilindro de atrás. La línea de trazos delimita la región de desprendimiento de vórtices para el cilindro de atrás obtenida por Wang et al. (2015), en donde hacia arriba de la línea se encuentra la región con desprendimientos de vórtices y hacia abajo la región sin desprendimiento de vórtices. Si bien más puntos serían necesarios para tener una descripción más consistente de este comportamiento, los resultados obtenidos en este trabajo muestran una adecuada captura de la presencia o ausencia del desprendimiento de vórtices.

Las estructuras de flujo de estela para las distintas separaciones entre los cilindros y con el suelo se muestran por medio de contornos del campo de vorticidad instantánea en "z" (ver Fig. 8). Del análisis de los gráficos se puede observar que los patrones de flujo dependen de la relación  $G/D$  y  $L/D$ . Para  $G/D=0.15$  la capa de corte superior que se desprende del cilindro de adelante pasa por encima del cilindro de atrás, mientras que la capa de corte inferior recircula



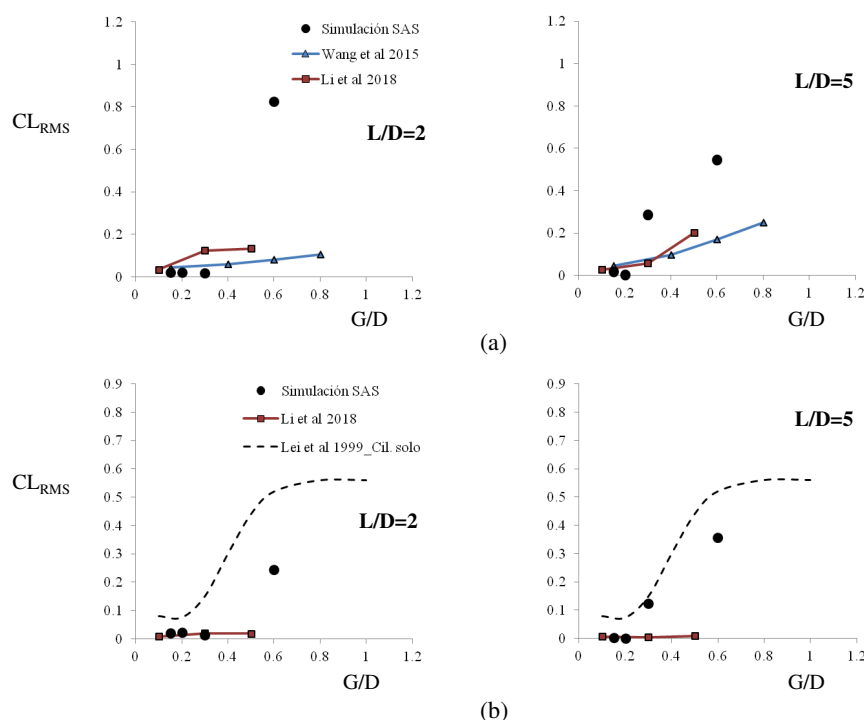


Figura 6: RMS del coeficiente de sustentación para ambos cilindros en función de G/D; (a) cilindro de atrás, (b) cilindro de adelante.

en el espacio entre ambos cilindros. Este efecto produce la deflexión en el flujo lo cual explicaría los valores positivos en el CL. Para G/D=0.3, se puede observar que cuando los cilindros se encuentran cercanos entre sí, el comportamiento del flujo es similar que para G/D=0.15. Por otra parte, cuando los cilindros se alejan (L/D=5) comienza a identificarse estructuras vorticosas relativamente grandes detrás de ambos cilindros, indicando la aparición de los vórtices. Este comportamiento para G/D=0.3 puede observarse en las gráficas del CD<sub>RMS</sub> y CL<sub>RMS</sub> (Figuras 5 y 6, respectivamente). Para G/D=0.6, si bien los efectos de la pared aún persisten en menor medida, los patrones de flujo comienzan a tener un comportamiento semejante al caso de dos cilindros en tándem inmersos en un flujo libre. Es decir, para L/D=2 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 aparece sólo aguas abajo del cilindro de atrás. Por otra parte, para separaciones de los cilindros mayores (L/D=5) la formación de vórtices se produce desde

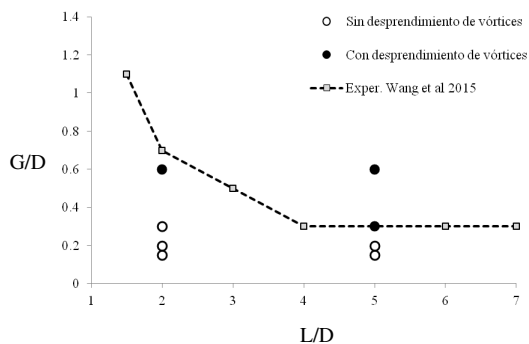


Figura 7: Desprendimiento de vórtices en el cilindro de atrás.

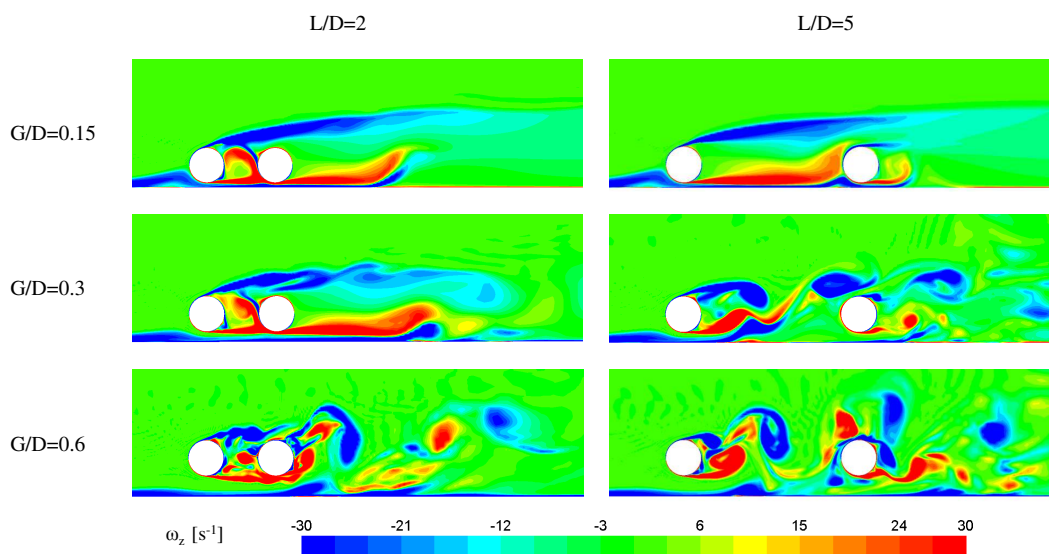


Figura 8: Contorno de vorticidad ( $z$ ) instantánea en la sección media de los cilindros para un tiempo adimensional  $tU_\infty/D = 163$ .

ambos cilindros y cierta asimetría hacia arriba es observada en los patrones de flujo. Estos regímenes del flujo concuerdan bien con los resultados de las mediciones por PIV (Particle Image Velocimetry) llevadas a cabo por Wang et al. (2015).

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizaron simulaciones numéricas tridimensionales con el modelo de turbulencia Scale-Adaptive Simulation (SAS) del flujo alrededor de dos cilindros de igual diámetro dispuestos en una configuración tándem considerando su proximidad con el suelo. Las simulaciones se realizaron para 8 combinaciones diferentes entre las distancias entre los cilindros ( $L/D$ ) y las separaciones con el suelo ( $G/D$ ), para un número de Reynolds igual  $1 \times 10^4$ . Las principales conclusiones son las siguientes.

Respecto al coeficiente de arrastre, para  $L/D=2$  el cilindro de adelante prácticamente no se encuentra afectado por la proximidad con el suelo, mientras que para  $L/D=5$  experimenta un comportamiento similar al de un solo cilindro cuando se aproxima al suelo. Por otro parte, el  $CD$  del cilindro de atrás presenta una mayor dependencia sobre los valores combinados de  $G/D$  y  $L/D$ . Teniendo en cuenta el coeficiente de sustentación sobre los cilindros se observa que el efecto del suelo está presente debido a los valores positivos del  $CL$ , incluso para  $G/D=0.6$ . Este efecto se observa también en forma de asimetría en el flujo cuando se visualiza las estructuras de vórtices de estela. Respecto a las fluctuaciones de los coeficientes de fuerza ( $CD_{RMS}$  y el  $CL_{RMS}$ ) tienden a aumentar cuando aumenta la separación con el suelo. Esto se explica debido al hecho que el desprendimiento de vórtice se suprime más para  $G/D$  menores. Al considerar las estructuras de vórtices se concluye que para distancias entre los cilindros  $L/D=2$ , comienza a producirse la propagación periódica de vórtices en ambos cilindros para una separación con el suelo  $G/D=0.6$ , mientras que para  $L/D=5$  comienza a identificarse estructuras vorticosas relativamente grandes detrás de ambos cilindros para  $G/D=0.3$ . El presente trabajo mostró que el modelo de turbulencia SAS es capaz de producir resultados numéricos satisfactorios para el problema de cilindros en tándem cercanos al suelo. Sin embargo, se requieren investigaciones

adicionales (experimentales y numéricas) para esta configuración para realizar un estudio de validación más detallado.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Cuyo, a los proyectos MINCyT-ECOSud PA17A07, PUE2016-IDIT y PICT2017-3931, y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por la beca doctoral de Mauro Grioni.

## REFERENCIAS

- Barth T. y Jespersen D. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes. Aerospace Sciences Meeting, Technical Report AIAA 89-0366, Reno, USA, 1989.
- Bearman P. y Zdravkovich M. Flow around a circular cylinder near a plane boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, 89(1):33–47, 1978.
- Grioni M., Elaskar S., y Mirasso A. Análisis transitorio de la interferencia de flujo entre dos cilindros circulares en disposición tándem. *Mecánica Computacional*, 37:1195–1204, 2018a.
- Grioni M., Elaskar S., y Mirasso A. Scale-adaptive simulation of flow around a circular cylinder near a plane boundary. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 11(6):1477–1488, 2018b.
- Igarashi T. Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem: 1st report. *Bulletin of JSME*, 24(188):323–331, 1981.
- Kitagawa T. y Ohta H. Numerical investigation on flow around circular cylinders in tandem arrangement at a subcritical Reynolds number. *Journal of Fluids and Structures*, 24(5):680–699, 2008.
- Lei C., Cheng L., y Kavanagh K. Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 80(3):263–286, 1999.
- Leonard B. The ultimate conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 88(1):17–74, 1991.
- Li Z., Prsic M.A., Ong M.C., y Khoo B.C. Large eddy simulations of flow around two circular cylinders in tandem in the vicinity of a plane wall at small gap ratios. *Journal of Fluids and Structures*, 76:251–271, 2018.
- Meneghini J.R., Saltara F., Siqueira C., y Ferrari Jr J. Numerical simulation of flow interference between two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangements. *Journal of Fluids and Structures*, 15(2):327–350, 2001.
- Menter F. y Egorov Y. A scale adaptive simulation model using two-equation models. Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA Paper 2005-1905, Reno, USA, 2005.
- Menter F., Kuntz M., y Bender R. A scale-adaptive simulation model for turbulent flow predictions. Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA Paper 2003-767, Reno, USA, 2003.
- Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8):1598–1605, 1994.
- Nishino T., Roberts G.T., y Zhang X. Vortex shedding from a circular cylinder near a moving ground. *Physics of Fluids*, 19(2):025103, 2007.
- Wang X., Zhang J.X., Hao Z., Zhou B., y Tan S. Influence of wall proximity on flow around two tandem circular cylinders. *Ocean Engineering*, 94:36–50, 2015.
- Zdravkovich M. y Pridden D. Interference between two circular cylinders; series of unexpected discontinuities. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2(3):255–270, 1977.