



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Nombre del Centro

GENERACIÓN DE DRIFT POR INTERACCIÓN FLUIDO- ESTRUCTURA PARA CONJUNTO ROTATORIO CILINDRO-LAMA EN RÉGIMEN LAMINAR

Alumno: Pedro José Merino Arance

Tutor: D. Cándido Gutiérrez Montes
D. Carlos García Baena

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Noviembre, 2020



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Informática

Don Cándido Gutiérrez Montes y Don Carlos García Baena , tutor y cotutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: Generación de drift por interacción fluido-estructura para conjunto rotatorio cilindro-lama en régimen laminar, que presenta Pedro José Merino Arance, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, MES de 2013

El alumno:

Los tutores:

Pedro José Merino Arance

Cándido Gutiérrez Montes
Carlos García Baena

Índice

1. Introducción.....	2
2. Objetivos.....	4
3. Definición del problema.....	4
4. Modelo matemático.....	7
4.1 Parámetros importantes.....	7
4.2 Discretización.....	11
4.2.1 Discretización del tiempo.....	12
4.2.2 Discretización de las ecuaciones.....	13
4.2.2.1 IcoFoam.....	13
4.2.2.2 pimpleDyMFoam.....	15
5. Construcción de malla: sensibilidad de malla y validación.....	16
5.1 Sensibilidad de malla y validación: malla compuesta por cilindro.....	16
5.1.1 Sensibilidad de malla.....	16
5.1.2 Validación.....	20
5.2 Validación: malla compuesta por conjunto cilindro-lama.....	22
6. Resultados.....	27
6.1 El conjunto cilindro-lama está fijado en el centro del cilindro.....	27
6.2 El conjunto cilindro-lama es libre de rotar alrededor del centro del cilindro...	31
6.2.1 Cálculos previos a la simulación.....	31
6.2.2 Evolución del ángulo de giro a lo largo del tiempo.....	32
6.2.3 Drag y Lift.....	36
6.2.4 Vorticidad.....	38
6.2.5 Velocidad.....	40
6.2.6 Presión.....	41
7. Conclusiones y trabajos futuros.....	42

1. Introducción

A lo largo de los años se han realizado un gran número de estudios experimentales y numéricos del flujo que circula alrededor de cuerpos, con diferentes formas geométricas, sumergidos en un flujo uniforme.

El estudio del flujo alrededor de un cilindro circular fue muy importante debido a su importancia en prácticas de ingeniería, como, por ejemplo, los puentes. Según Williamsom [1], el flujo estable que circula a través del cilindro pierde estabilidad cuando $Re = 47$ debido a la inestabilidad que se produce en la parte trasera del cilindro. Esta inestabilidad lleva a producir los vórtices de Von Karma. Los vórtices de Von Karma es un patrón que se repite de vórtices en remolinos causados por la separación no estacionaria de la capa de fluido al pasar por el cilindro. A medida que nos alejamos de la estructura cilíndrica, los vórtices crecen en dimensión espacial a la vez que se disipan o se debilitan, hasta desaparecer. Sin embargo, el flujo permanece en dos dimensiones, todavía, en este punto. A partir de un $Re = 180$ aparece una inestabilidad de tres dimensiones.



Figura 1. Visualización de vórtices de Von Karma detrás de un cilindro circular en el aire

Otros estudios de vital importancia fueron los relacionados con el flujo que circula a través de un conjunto cilindro-lama, entre otras cosas, por su conexión con fenómenos de la naturaleza como la locomoción animal. En este sentido, existen protuberancias como los pelos de las plumas o los pelos de la cola de un animal que interactúan de forma pasiva con el fluido que le rodea ayudando a la locomoción del animal en cuestión.

Entre estos estudios, el primer trabajo experimental lo realizó Roshko [2,3]. En él, se colocó una placa muy fina detrás del cilindro, de tal manera que su dirección era paralela a la del flujo. Se probaron diferentes longitudes de placa y distancias desde cilindro con flujo uniforme variando el número de Reynolds. Descubrieron que la colocación de una placa, con la longitud

y la distancia apropiada, ayudaba a reducir la fuerza de arrastre y el desprendimiento de vórtices.

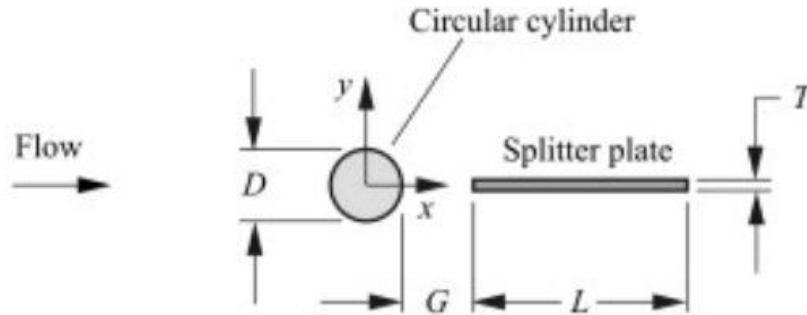


Figura 2. Esquema del flujo estudiado por Roshko.

Luego, en 1975, C.J. Apelt, G.S. West y A. A. Szewczyk [4] averiguaron, a través de experimentos, que incluso para placas muy cortas ($L/D=1/16$), hay una reducción significativa de las fuerzas de arrastre. Estos experimentos se realizaron con números de Reynolds muy altos, los valores estaban comprendidos entre 1×10^4 y 5×10^4 .

Más tarde, en 1996, K. Kwon y H. Choi [5] realizaron simulaciones numéricas del flujo que circula a través de un conjunto cilindro-lama con números de Reynolds que oscilaban entre los valores 80-160. Demostraron que el desprendimiento de vórtices es eliminado cuando la longitud de la placa excede un valor crítico.

En la última década ha habido grandes avances en esta temática. Por ejemplo, Jie Wu, Jing Wu y Jiapu Zhan [6], en 2016, averiguaron que la implementación de dos placas, paralelas entre sí, con una masa m , una flexibilidad ω y un ángulo de ataque α detrás del cilindro, generalmente es más efectivo a la hora de eliminar la fluctuación de la fuerza de sustentación y la fuerza de arrastre media que la colocación de una sola placa.

En 2018, se realizó investigaciones numéricas con un conjunto cilindro-placa en el que la placa es totalmente flexible [7]. Los resultados de estas sugirieron que el coeficiente de arrastre y las fluctuaciones del coeficiente de sustentación pueden ser reducidos considerablemente con la colocación de una placa flexible en la posición adecuada.

2. Objetivos

En el presente trabajo se pretende estudiar la interacción del fluido con el conjunto cilindro-lama funcionando como un sistema dinámico, es decir, se tendrá en cuenta el momento de inercia, la amortiguación estructural y la rigidez torsional. Estos tres conceptos se tratarán y se definirán más adelante, en el apartado modelo matemático.

Para ello, primero, se realizará una descripción del problema. En ella describiremos las condiciones de contorno y dimensionaremos el problema. En segundo lugar, construiremos la malla. Para este apartado haremos un estudio de la sensibilidad de la malla y, después, se realizará una verificación. En la verificación compararemos los resultados obtenidos en la malla construida con los resultados que se han obtenido en simulaciones numéricas realizadas con anterioridad. Por último, estudiaremos el flujo que circula a través de un conjunto cilindro-lama, los momentos de las fuerzas que intervienen en este proceso y el movimiento que describe bajo unas determinadas condiciones. Para este estudio, primero se trabajará con el conjunto cilindro-placa actuando como una unidad totalmente rígida y, en segundo lugar, se trabajará con el conjunto cilindro-lama libre de rotar alrededor del centro del cilindro.

3. Definición del problema

Se pretende estudiar el flujo inducido por una corriente incomprensible de densidad, ρ , y viscosidad dinámica, μ , alrededor de un conjunto cilindro-lama que puede girar alrededor del centro del cilindro. Para ello intentaremos emular el estudio experimental explicado en el artículo [8]. La figura 3 representa el esquema del experimento que permitió este estudio:

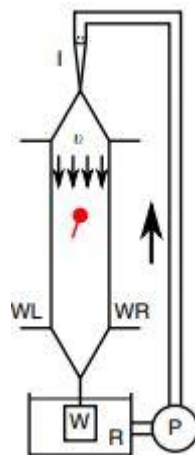


Figura 3. Esquema del experimento

Para el estudio de la interacción del fluido con el conjunto cilindro-lama a través de las simulaciones numéricas deberemos diseñar una malla que replique las condiciones mostradas en el experimento anterior. Para ello nos apoyaremos en los siguientes dos esquemas, que nos indican tanto las condiciones de contorno como las dimensiones de la malla en la que trabajaremos a lo largo de este trabajo:

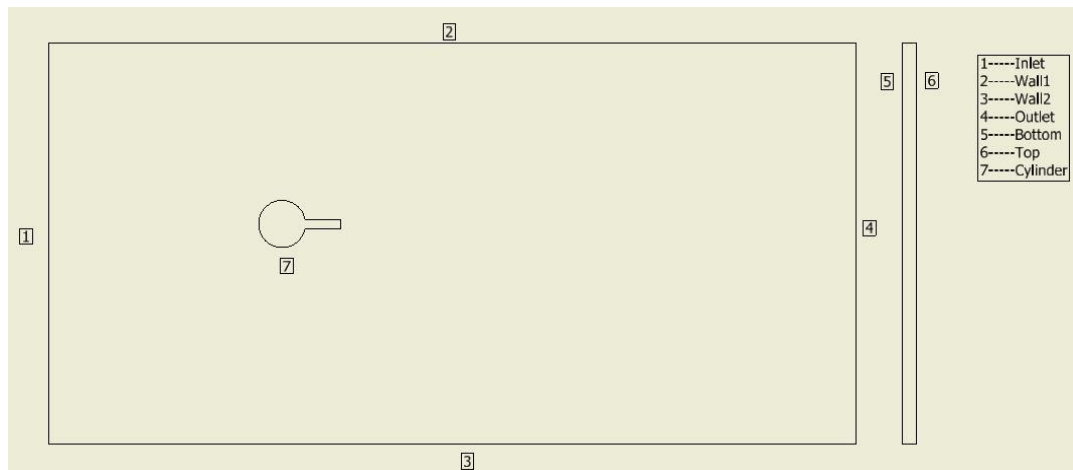


Figura 4. Partes que conforman la malla.

En este primer esquema se puede observar las distintas partes que conformaran la malla de las distintas simulaciones que haremos en este trabajo. A continuación, se explicará las condiciones de contorno que le asignaremos a estas partes de la malla:

- En 1 se encuentra la entrada (Inlet) por donde entrara el fluido con una velocidad v . En OpenFoam en la entrada, en el archivo de la velocidad, se utilizará la condición “uniformFixedValue”, que permite escribir la velocidad en función del tiempo. De este modo, la velocidad en la entrada será una función rampa, en el que la velocidad comienza teniendo el valor 0 y aumenta linealmente hasta llegar al valor nominal v , donde permanecerá constante. Se utiliza una entrada escalonada para aumentar la estabilidad numérica. A esto se le denomina condición de frontera de Dirichlet debido a que se le especifican los valores de la solución que necesita la frontera para hallar la solución de unas ecuaciones diferenciales. Asimismo, en OpenFoam, en el archivo de la presión, se establecerá la condición de “zeroGradient”.
- Como trataremos las simulaciones como un problema 2D, tanto en la cara inferior (Bottom) como en la cara superior (Top) le asignaremos la condición de “Empty” en OpenFoam, tanto en el archivo de la velocidad como en el archivo de la presión. Esta

condición se asigna a las caras que no son importantes para los cálculos de la simulación, permitiendo a OpenFoam realizar un caso 2D en una geometría tridimensional.

- En 4 tenemos la salida (Outlet) donde la presión toma el valor de 0. Para indicar esto, en OpenFoam, en la salida, en el archivo de la presión, se utilizará la condición “fixedValue”, que permite fijar un valor de la presión. La condición “fixedValue” es, también, una condición de frontera de Dirichlet. Además, en este caso, como el valor es nulo, la condición es de Dirichlet homogénea. Asimismo, es importante especificar que, en el archivo de la velocidad, en la salida, tenemos una condición tipo Neumann “zeroGradient”. Se le denominan condición Neumann a aquella condición de frontera que se le especifican los valores de la derivada de una solución en la frontera. La condición “zeroGradient” extrapola los valores, en este caso de la velocidad, de las celdas más cercanas a la salida.

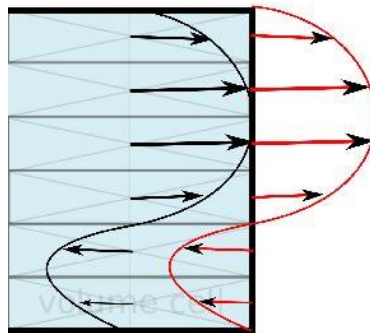


Figura 5. Visualización de la condición zeroGradient

- A las caras laterales (Wall1 y Wall2) le asignaremos la condición de “Slip”, tanto en el archivo de la velocidad como en el archivo de la presión. Esto indica que la velocidad del fluido en todos los límites fluido-sólido no será igual a la velocidad del sólido porque hay una velocidad relativa entre el sólido y el fluido adyacente al sólido. Esta condición permite al flujo no perder velocidad debido a la fricción de las paredes.
- Por último, tenemos el conjunto cilindro-lama (Cylinder) donde la velocidad en las paredes será 0. Para indicar esto, en OpenFoam, en Cylinder, en el archivo de la velocidad, se utilizará la condición fixedValue, explicada anteriormente. A esto se le denomina condición “no Slip” que, en castellano, es la condición de no deslizamiento. A diferencia de la condición “Slip”, explicada con anterioridad, aquí la velocidad relativa entre el sólido y el fluido adyacente al sólido es cero. Como consecuencia la

velocidad en las paredes del conjunto cilindro-lama será igual a la velocidad del fluido adyacente al sólido. Asimismo, en el archivo de la presión, se establecerá la condición de “zeroGradient”.

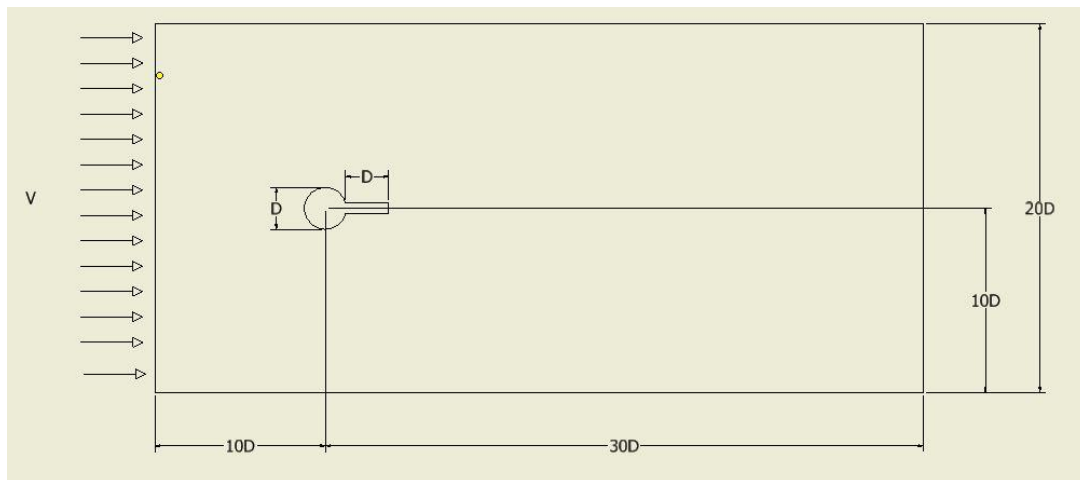


Figura 6. Dimensiones de la malla.

En este segundo esquema se muestran todas las dimensiones que hacen falta para resolver el problema. Las dimensiones mostradas en el esquema de arriba están pensadas para que el cilindro esté lo suficientemente lejos tanto de la entrada como de las paredes. De esta manera, nos aseguramos que el flujo está totalmente desarrollado antes de que llegue a impactar en el cilindro y que las paredes no influyen en el desarrollo del flujo. La placa del conjunto cilindro-placa tiene un ancho igual a 0.0005 m.

En el esquema de la figura v es la velocidad del fluido en la entrada y D es el diámetro del cilindro. El diámetro tiene el valor de 0.0065 m.

4. Modelo matemático

4.1. Parámetros importantes

El flujo de un fluido está descrito por las ecuaciones de continuidad y las ecuaciones de Navier-Stokes. Asumiendo que el fluido es incomprensible, estas ecuaciones son:

$$\nabla U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla * (UU) = g - \nabla p + \nabla * (\nu \nabla U) \quad (2)$$

donde U es la velocidad del fluido, g es la gravedad, que en nuestro caso la ignoraremos debido a que el peso del conjunto cilindro-lama es despreciable frente a las fuerzas ejercidas por el fluido en la estructura, ν es la viscosidad cinemática y p la presión.

Además, para caracterizar el flujo necesitaremos usar también el número de Reynolds, que se define así:

$$Re = U * \frac{D}{\nu} \quad (3)$$

Las fuerzas que ejerce el fluido sobre la estructura del conjunto cilindro-lama se calcula a través de la integración de la presión normal y el esfuerzo cortante o viscoso. La resultante de las fuerzas tanto en el eje x , F_x , como en el eje y , F_y , se adimensionaliza a través de la fórmula $0.5 * \rho * U^2 * D * h$ con ρ la densidad del fluido y h es la altura de la malla. El producto $D * h$ corresponde al área característica. En este trabajo utilizaremos los coeficientes adimensionales que sacamos a partir de las fuerzas F_x y F_y , que son el coeficiente de arrastre (Drag), C_d , y el coeficiente de sustentación (Lift), C_L , respectivamente:

$$C_d = \frac{2 * F_x}{\rho * U^2 * D * h} \quad (4)$$

$$C_L = \frac{2 * F_y}{\rho * U^2 * D * h} \quad (5)$$

Otro parámetro adimensional importante para la caracterización del flujo es el número de Strouhal, que describe la frecuencia de los mecanismos de oscilación. Se define así:

$$St = \frac{f * D}{U} \quad (6)$$

donde f es la frecuencia de desprendimiento de vórtices, D la longitud característica y U la velocidad del fluido en la entrada.

El conjunto cilindro-lama es tratado como un cuerpo rígido uniforme con un específico momento de inercia J , una rigidez torsional κ , y una amortiguación estructural ζ .

El momento de inercia J es la medida de la inercia rotacional de un cuerpo, siendo esta la resistencia que opone la materia al modificar su estado de movimiento, incluyendo cambios de velocidad o cambios de dirección en el movimiento. El momento de inercia depende de la f

forma del objeto y de la localización del eje de referencia. En nuestro caso, teniendo en cuenta que trabajaremos con el eje z , se utilizará las siguientes ecuaciones para su cálculo:

- Cilindro

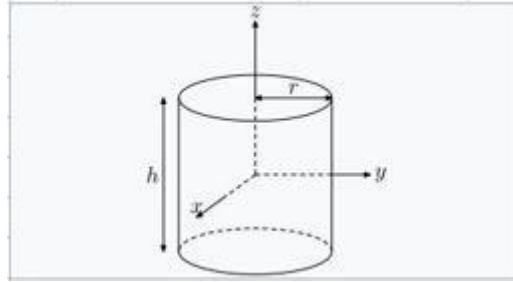


Figura 7. Localización de los ejes en el cilindro

$$J_{z,c} = \frac{1}{2} * m * r^2 \quad (7)$$

donde m es la masa del cilindro y r el radio del círculo.

- Placa

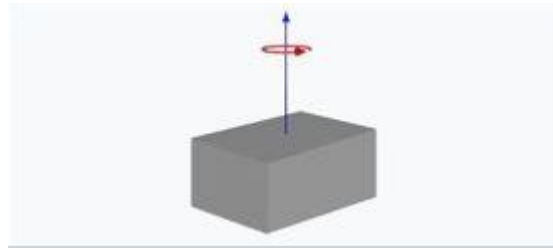


Figura 8. Localización de los ejes en la placa

$$J_{z,p} = \frac{1}{12} * m * (l^2 + h^2) \quad (8)$$

donde m es la masa de la placa, l la longitud de la placa, que en nuestro caso es igual al diámetro del cilindro y h es la altura de la placa. En el caso de la placa se utilizará el teorema de Steiner para relacionar el momento de inercia en el eje z de la placa, $J_{z,p}$, con el momento de inercia que ejerce la placa en el centroide del cilindro, $J_{z,p-c}$. Este teorema se define así:

$$J_{z,p-c} = J_{z,p} + m * (l - C_m)^2 \quad (9)$$

donde m es la masa de la placa, l la longitud de la placa y C_m es el centro de masas. Por último, se tendría que obtener el momento de inercia total, tal que así:

$$J_z = J_{z,c} + J_{z,p-c} \quad (10)$$

En este trabajo nos interesa principalmente la posición del centro de masas en el eje x. Esto es debido a que el centro de rotación será nuestro centro de masas. El centro de masas de un cilindro es el centro del círculo, pero, como le añadimos una placa muy fina, este centro de masas se desplazará un poco en el eje x. Para su cálculo, primero, se calculará el volumen del cilindro, el volumen de la placa y el volumen total:

$$V_c = \frac{(\pi * D^2)}{4} * h \quad (11)$$

donde V_c es el volumen del cilindro, D es el diámetro del cilindro y h es la altura del cilindro.

$$V_p = l * h * a \quad (12)$$

donde V_p es el volumen de la placa, l la longitud de la placa, h la altura de la placa y a el ancho de la placa.

$$V_T = V_c + V_p \quad (13)$$

donde V_T es el volumen total.

A partir de los volúmenes podemos calcular la posición del centro de masas en el eje x a través de la siguiente ecuación:

$$C_{m,x} = C + \frac{D * V_p}{V_T} \quad (14)$$

donde C es la posición del centro del cilindro en el eje x y D es el diámetro del cilindro.

La rigidez torsional, κ , cuantifica la rigidez del conjunto cilindro-lama frente a momentos torsionales. Se puede calcular a través de la siguiente ecuación:

$$\kappa = (f_n * 2 * \pi)^2 * J_z \quad (15)$$

donde f_n es la frecuencia natural.

La amortiguación estructural, ζ , es la capacidad del conjunto cilindro-placa de disipar la energía cinética en otro tipo de energía. Se puede calcular a través de la ecuación (17).

Debido al desprendimiento de vórtices, el conjunto cilindro-lama rotará respecto al centroide del cilindro circular. La oscilación rotatoria del sistema se puede describir con la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \frac{4\pi\xi}{U_r} * \frac{d\theta}{dt} + \left(\frac{2\pi}{U_r}\right)^2 * \theta = \frac{50}{25\pi+2} + \frac{m_\tau}{m^*} \quad (16)$$

donde θ es el ángulo de rotación respecto a la dirección del flujo libre, y ξ se define como:

$$\xi = \frac{\zeta}{4\pi J f_n} \quad (17)$$

donde $f_n = \left(\kappa/J\right)^{0.5} / (2\pi)$ es la frecuencia natural del correspondiente sistema de amortiguación libre. La velocidad reducida, U_r , es definida como:

$$U_r = \frac{U}{f_n D} = \frac{U}{\left(F_n \frac{U}{D}\right) D} = \frac{1}{F_n} \quad (18)$$

donde $F_n = f_n / \left(\frac{U}{D}\right)$ es la frecuencia natural. El esfuerzo de torsión no-dimensional, m_τ , y la relación de masa m^* son:

$$m^* = \frac{m_s}{\left(\frac{\pi \rho D^2}{4} + \frac{\rho D^2}{50}\right)} \quad (19)$$

$$m_\tau = \frac{M_t}{\left(\rho_s J \frac{U^2}{2} m_s\right)} \quad (20)$$

donde M_t es el esfuerzo de torsión dimensional con respecto el centro rotacional, m_s la masa sistema cilindro-lama y ρ_s es la densidad uniforme de la estructura.

4.2. Discretización

Para las simulaciones, OpenFoam utiliza el método de volúmenes finitos. Este permite discretizar y resolver numéricamente ecuaciones diferenciales.

El objetivo es transformar una o más ecuaciones parciales diferenciales en su correspondiente sistema de ecuaciones algebraicas. La solución de este sistema algebraico nos proporciona un conjunto de valores que corresponde a la solución de las ecuaciones originales en algunas localizaciones pre-determinadas en espacio y tiempo. La discretización se divide en 2 pasos: la discretización del dominio solución y la discretización de las ecuaciones.

Para la discretización del dominio solución, primero, hay que discretizar el tiempo. Para esto solo hace falta prescribir el paso del tiempo (dx) que se utilizará en la simulación. En segundo lugar, hay que discretizar el espacio, es decir, subdividir el dominio en volúmenes de control. Esto lo realizaremos cuando construyamos la malla en el apartado 3.

2.2.1 Discretización del tiempo

En OpenFoam, para la discretización del tiempo utilizaremos el archivo llamado “controlDict”. Este archivo permite fijar parámetros esenciales para la creación de una base de datos. A través de este archivo se puede controlar todas las variables relacionadas con el tiempo y con la escritura de los datos. A continuación, se explicará las entradas más importantes:

Control del tiempo

- *startFrom*: Controla el comienzo de la simulación. En nuestro caso, en todas las simulaciones se fijará “latestTime”, que permite empezar la simulación desde el más reciente paso de tiempo de todos los directorios de tiempo.
- *stopAt*: Controla el final de la simulación. En nuestro caso, en todas las simulaciones se fijará “endTime”, que permite especificar el tiempo final en “endTime”.
- *endTime*: Tiempo final de simulación. Para cuando el conjunto cilindro-lama actúa como un cuerpo sólido fijado en el centro del cilindro circular este tiempo será 8, mientras para cuando el conjunto cilindro-lama sea libre de rotar alrededor del eje z del centro del cilindro será 2000.
- *deltaT*: El tiempo de paso Δt , de la simulación. Este se fijará en 0.0002 para cuando utilizemos el solver IcoFoam y en 0.0004 para cuando utilicemos el solver “pimpleDyMFoam”. Para calcular el paso del tiempo se utiliza el número de Courant. En simulaciones donde el flujo es transitorio, con el objetivo de estabilizar las simulaciones, este parámetro debe ser igual o menor a 1, por lo que fijando $C_0 = 1$ podemos calcular el paso del tiempo así:

$$\Delta t = \frac{C_0 \cdot h}{|U|} \quad (21)$$

donde h es el valor de un lado de la celdilla (figura 11) y U es la velocidad a la entrada.

Control de la escritura de datos

- *writeControl*: Para cuando el conjunto cilindro-lama actúa como un cuerpo sólido fijado en el centro del cilindro circular se fijará en “adjustableRunTime”, que escribe datos cada x segundos del tiempo de simulación, donde x se fijará en writeInterval y será 0.05. Para cuando el conjunto cilindro-lama sea libre de rotar alrededor del eje z del centro del cilindro se fijará en “TimeStep”, que escribe datos cada x pasos de tiempo, donde x se fijará en writeInterval y será 200.

2.2.2 Discretización de ecuaciones

Para la discretización de las ecuaciones (1) y (2), OpenFoam nos permite elegir los métodos numéricos utilizados a través del archivo llamado “fvScheme”. Por ejemplo, el método utilizado para la interpolación de un valor de un punto a otro.

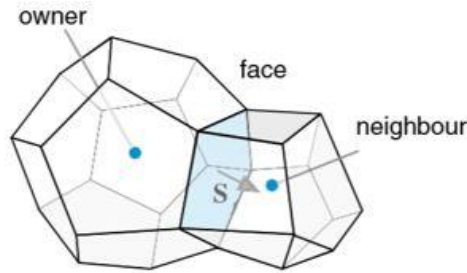


Figura 9. Representación de dos celdas adyacentes. P será el centro de la celda owner, N será el centro de la celda neighbour y f será el centro de la cara S.

2.2.2.1 IcoFoam

Para la realización de las simulaciones en el que ya sea el cilindro o el conjunto cilindro-lama se comporte como un sólido rígido se ha utilizado este solver. Permite resolver las ecuaciones de Navier-Stokes de un flujo incomprensible, laminar y transitorio, como es nuestro caso. A continuación, se mostrará los métodos numéricos elegidos para la discretización de las ecuaciones (1) y (2):

- *ddtSchemes*: En este apartado del archivo “fvSchemes” se fija el método de discretización para la derivada temporal $\frac{\partial}{\partial t}$. Para este solver se utilizará Euler, que es un método de primer orden implícito que nos permite resolver flujos transitorios.
- *gradSchemes*: Este apartado se utiliza para fijar los métodos de discretización de los términos gradientes. Para ∇p se utilizará el método Gauss linear. El término Gauss especifica la utilización de la discretización estándar de volumen finito de la integración gaussiana, que requiere la interpolación de valores del centro de una celda (P) al centro de la celda adyacente (N). El término linear indica la utilización de la interpolación linear. Además, también fijaremos el método Gauss linear por defecto, para que lo utilice en los términos de gradientes que no hemos especificado.

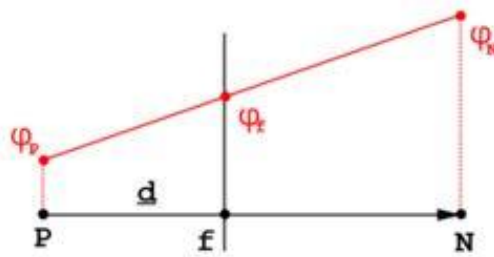


Figura 10. Esquema de la interpolación lineal.

El valor de la cara es calculado así: $\phi_f = f_x * \phi_P + (1 - f_x) * \phi_N$ donde

$$f_x = \frac{\overline{fN}}{\overline{PN}}$$

$\overline{fN}$ = Distancia entre f y N

$\overline{PN}$ = Distancia entre P y N

- *divSchemes*: Este apartado permite fijar los métodos de discretización utilizado para los términos divergentes. En nuestro caso, para discretizar el término $\nabla * (UU)$ se utilizará el método Gauss linear, explicado anteriormente.
- *laplacianSchemes*: Este apartado permite fijar los métodos de discretización utilizados para los términos laplacianos. En nuestro caso, para discretizar el término $\nabla * (u\nabla U)$ se utilizará el método Gauss linear orthogonal. El término orthogonal indica que la conexión entre los centros de la celda y la cara es totalmente orthogonal.
- *interpolationSchemes*: Este apartado permite fijar el método para la interpolación de valores del centro de una celda a la cara de esa celda. Mayoritariamente es utilizado para la interpolación de los valores de la velocidad. Se utilizará el método linear.
- *snGradSchemes*: Este apartado permite fijar el método para evaluar los gradientes normales a la superficie. En nuestro caso, se utilizará el método orthogonal. Este método se utiliza cuando la conexión entre los centros de las celdas y la cara es totalmente orthogonal. Este método es totalmente válido cuando el ángulo de giro del conjunto cilindro-lama es 0. Cuando el ángulo de giro es distinto de 0, la utilización de este método empeorara un poco los resultados obtenidos, pero seguiremos utilizándolo ya que trabajamos con ángulos de giros pequeños mayormente.

2.2.2.2 pimpleDyMFoam

Para las simulaciones en el que el conjunto cilindro-lama sea libre de rotar alrededor del eje z del centro del cilindro se utilizara el solver pimpleDyMFoam implementado en OpenFoam. Este solver permite resolver flujo transitorios e incompresibles en mallas dinámicas. A continuación, se mostrará los métodos numéricos utilizados para la discretización de las ecuaciones (1) y (2):

- *ddtSchemes*: Para la discretización de las derivadas temporales $\frac{\partial}{\partial t}$, en el archivo “fvSchemes” se utilizará el método backward. Es un método de segundo orden que permite resolver flujos transitorios. El hecho de que sea de segundo orden ayuda a que los resultados obtenidos al resolver las ecuaciones (1) y (2) sean más precisos porque coincide con el orden de estas.
- *gradSchemes*: Para la discretización de los términos gradientes, en nuestro caso ∇U y ∇p , se utilizará el método leastSquares. Es un método de segundo orden que calcula la distancia por mínimos cuadrados usando todas las celdas vecinas.
- *divSchemes*: Para la discretización de los términos divergentes se utilizará el método Gauss linear en todos menos en los términos $\text{div}(\phi, k)$ y $\text{div}(\phi, \omega)$, que son términos relacionados con las turbulencias, que se utilizará el método Gauss LimitedLinear 1. En nuestro caso, estos últimos términos no son importantes debido a que trabajamos en flujos laminares.
- *laplacianSchemes*: Para la discretización de los términos laplacianos, en nuestro caso $\nabla \cdot (\nu \nabla U)$, se utilizará el método Linear limited corrected 0.33. Este método utiliza la interpolación linear explicada anteriormente pero aplica un corrector ϕ , que en nuestro caso, vale 0.33. Este corrector se utiliza cuando la conexión entre el centro de las celdas y las caras no son totalmente ortogonales como es nuestro caso ya que al girar el conjunto cilindro-lama va a haber celdas, sobre todo las adyacentes al cilindro, en el que esto pase. Este limitante da estabilidad a la simulación numérica.
- *interpolationSchemes*: Para la interpolación de los valores del centro de una celda a la cara de esa celda se utilizará el método Linear.
- *snGradSchemes*: Para evaluar los gradientes normales a la superficie se utilizará el método limited corrected 0.33, explicado con anterioridad.

5. Construcción de malla: sensibilidad de malla y validación

La construcción de la malla se dividirá en dos partes. Primero, trabajaremos en el estudio de sensibilidad de malla y validación de la malla a través del paso de un flujo incomprensible alrededor de un cilindro circular. Esto se debe a su simpleza y a que este caso se ha estudiado, tanto experimentalmente como en simulaciones numéricas, anteriormente. En segundo lugar, trataremos de realizar la validación para una malla compuesta por un conjunto cilindro-lama con las dimensiones de las celdas obtenidas anteriormente.

5.1. Sensibilidad de malla y validación: malla compuesta por un cilindro

5.1.1 Sensibilidad de malla

El objetivo es encontrar las dimensiones adecuadas de las celdas en nuestro modelo de malla.

Para estudiar la malla variaremos el tamaño de las celdas que la componen. Así pues, conforme el tamaño de la celda sea menor, la densidad de celdas en la malla aumentará.

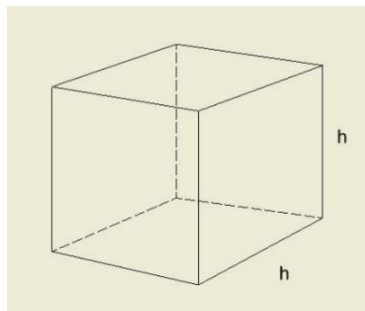


Figura 11. Dimensiones de una celda.

En la figura 11 se puede observar las dimensiones de una celda. El valor de h variará entre los siguientes valores: 0.003 m, 0.001 m, 0.00065 m y 0.0004 m. A continuación, se mostrará las mallas con diferentes densidades de celdas:

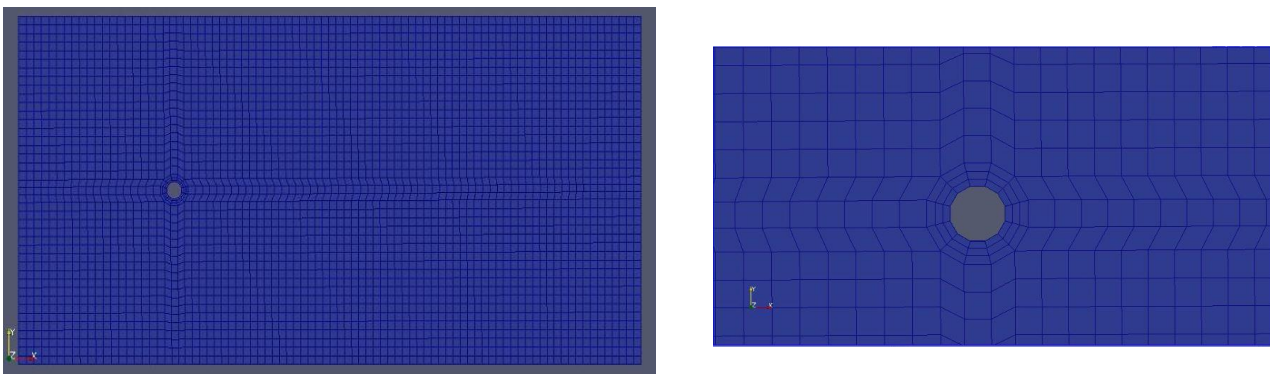


Figura 12. Malla 1 (3512 celdas)

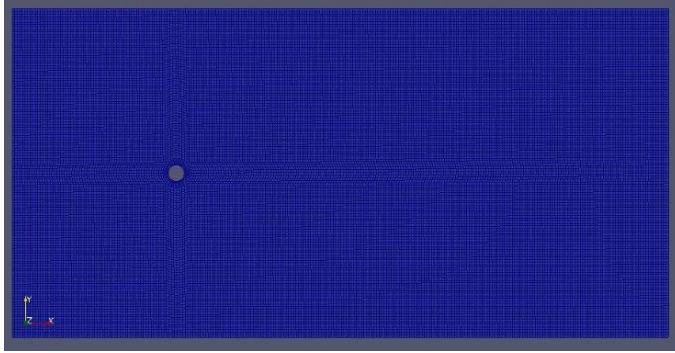


Figura 13. Malla 2 (33248 celdas)

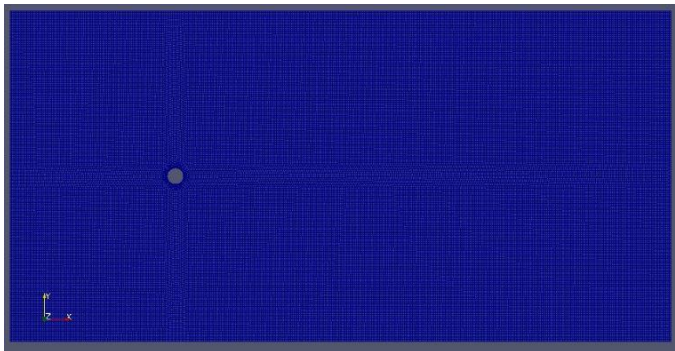
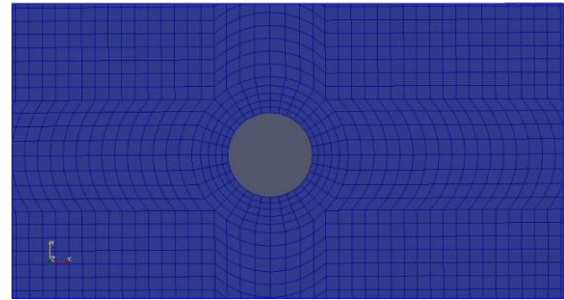


Figura 14. Malla 3 (79242 celdas)

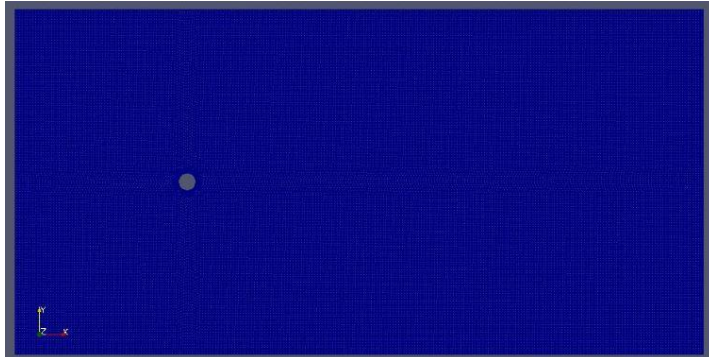
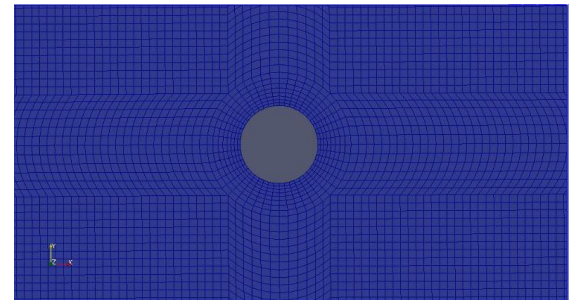
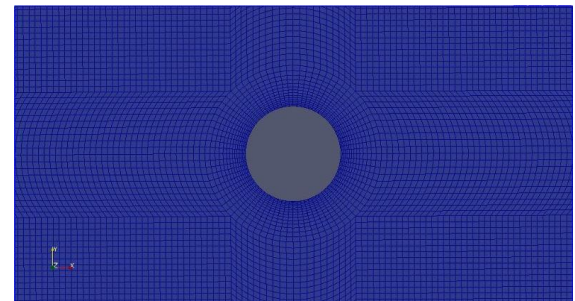


Figura 15. Malla 4 (210020 celdas)



En las imágenes mostradas en las figuras 12, 13, 14 y 15 se puede observar que la malla se ha diseñado para que la densidad de celdas aumente conforme nos acercamos a las paredes sólidas del cilindro. Esto es debido a que la zona más importante de la malla son las paredes del cilindro, donde el fluido interactúa con la estructura. En esta zona, siempre es mejor que la malla sea más fina porque los resultados numéricos serán más precisos. Además, se puede ver que en los cuatro casos se trata de una malla estructurada formada por celdas iguales a la mostrada en la figura 11.

Para la elección de la dimensión de las celdas, estudiaremos el coeficiente de arrastre, el coeficiente de sustentación y el número de Strouhal. Una vez sepamos el valor de estos

coeficientes, los compararemos con resultados obtenidos experimentalmente con anterioridad, de esta forma, podremos elegir aquella malla en el que los valores de los coeficientes se acerquen de forma más exacta a los valores obtenidos experimentalmente.

Para las simulaciones numéricas, el número de Reynolds será fijado en 100. Cuando $Re=100$, el flujo que circula a través del cilindro es transitorio, es decir, el flujo varía con el tiempo. Para resolver este tipo de flujos en Openfoam, utilizaremos el solver IcoFoam.

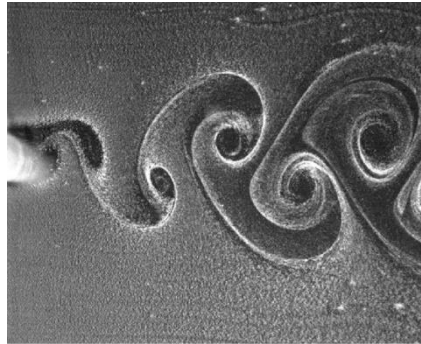


Figura 16. Desprendimiento de vórtices observados experimentalmente (régimen transitorio)

Una vez realizadas las simulaciones numéricas, debemos analizar los resultados. En las siguientes imágenes se puede ver la evolución del coeficiente de arrastre, C_d , a lo largo del tiempo en las diferentes mallas:

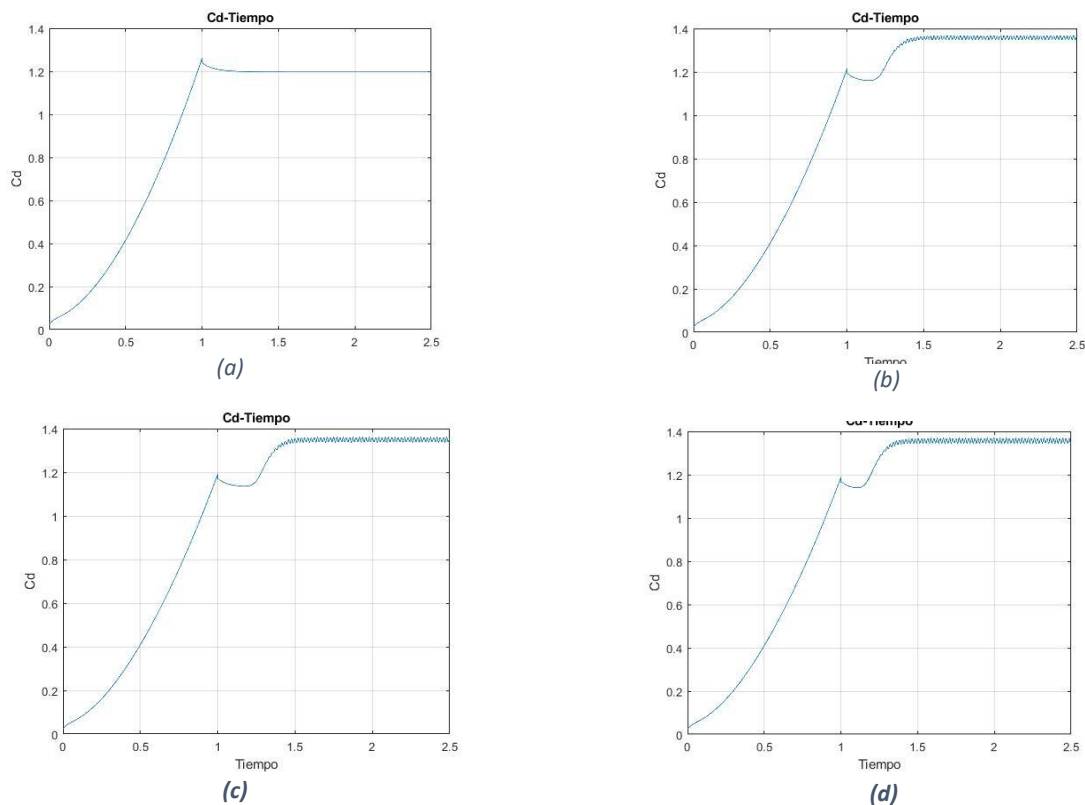


Figura 17. Gráficas C_d -tiempo. a) Malla 1 b) Malla 2 c) Malla 3 d) Malla 4.

En la figura 17 ya se puede ver anomalías en la gráfica de la malla 1. En esta gráfica se puede observar que el valor del coeficiente de arrastre, llegado a un punto, no varía con el tiempo. Esto indica que en este caso el flujo es estacionario, cuando experimentalmente se ha comprobado que el flujo que circula a través de un cilindro cuando $Re=100$ es transitorio. Esto es debido a que la malla es demasiado basta. Para nuestro estudio sólo nos interesa la parte de la gráfica en la que esta se estabiliza. Las gráficas se estabilizan alrededor del segundo 2. A continuación, se muestran imágenes tanto del coeficiente de arrastre como del coeficiente de sustentación a partir de los dos segundos:

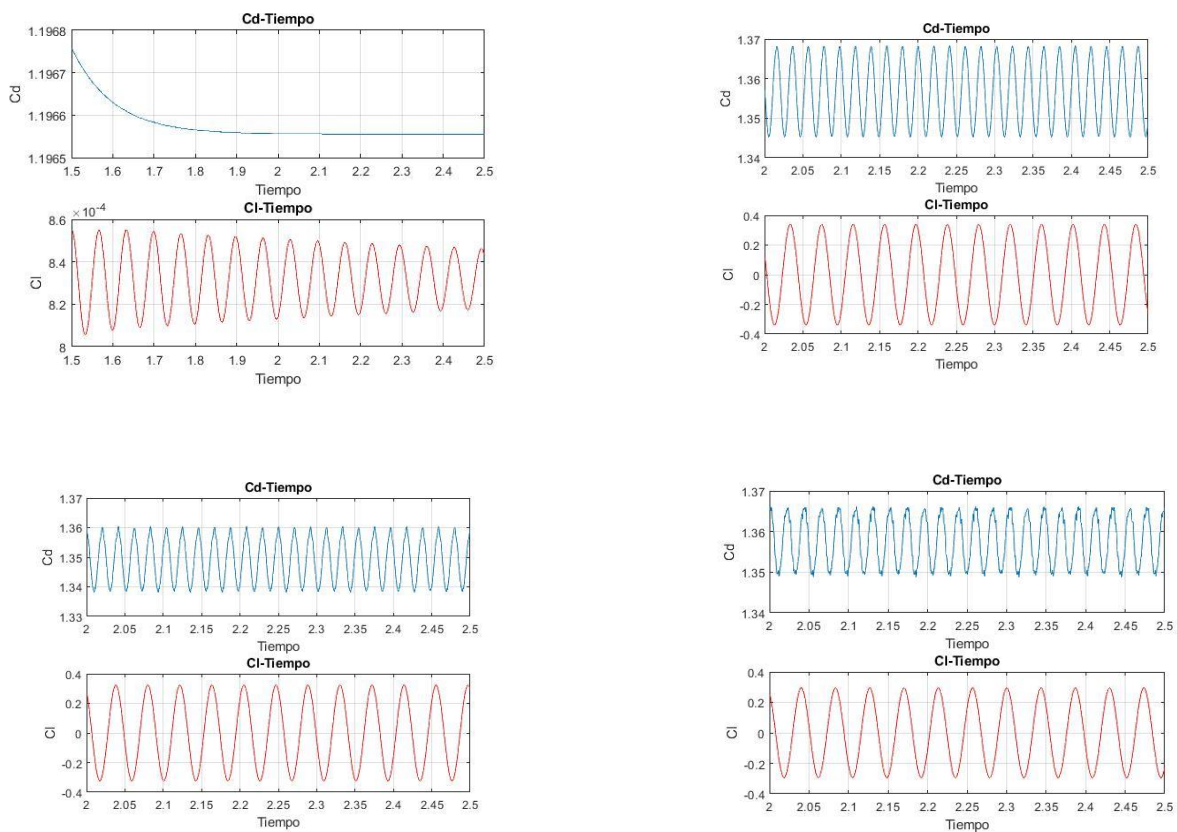


Figura 18. Parte estabilizada de las gráficas Cd-tiempo y Cl-tiempo. a) Malla 1 b) Malla 2 c) Malla 3 d) Malla 4.

En la figura 18 se puede ver, de mejor manera, que en la malla 1 el coeficiente de arrastre, llegado a un punto, se mantiene constante. Debido a esto, en el apartado de validación solo trabajaremos con las tres mallas restantes. En las demás gráficas se puede observar que tanto el coeficiente de arrastre como el coeficiente de sustentación varían de forma cíclica. A partir de estas gráficas, podemos sacar el valor medio del coeficiente de arrastre y el valor medio del coeficiente de sustentación. Además, a partir de la fórmula (6) podemos obtener el valor del número de Strouhal. En la tabla 1 se muestra los valores de los diferentes parámetros en las distintas mallas:

	Cd	Cl	St
Malla 1	1.1966	0.00085	-
Malla 2	1.3578	0.29581	0.14444
Malla 3	1.3490	0.32384	0.15476
Malla 4	1.3566	0.33927	0.15854

Tabla 1. Valores del coeficiente de arrastre, del coeficiente de sustentación obtenidos y del número de Strouhal en las distintas mallas.

5.1.2 Validación

En este apartado se comparará los resultados de las simulaciones numéricas con los obtenidos en experimentos en estudios previos. Para ello calcularemos tanto el error relativo mínimo como el error relativo máximo, según el caso. La ecuación del error relativo es:

- Para el coeficiente de arrastre

$$\varepsilon_{R,Cd} = \frac{|C_{d,e} - C_{d,s}|}{C_{d,e}} * 100 \quad (22)$$

donde $C_{d,e}$ es el coeficiente de arrastre experimental y $C_{d,s}$ es el coeficiente de arrastre de la simulación.

- Para el coeficiente de sustentación

$$\varepsilon_{R,Cl} = \frac{|C_{l,e} - C_{l,s}|}{C_{l,e}} * 100 \quad (23)$$

donde $C_{l,e}$ es el coeficiente de sustentación experimental y $C_{l,s}$ es el coeficiente de sustentación de la simulación.

- Para el número de Strouhal

$$\varepsilon_{R,St} = \frac{|St_e - St_s|}{St_e} * 100 \quad (24)$$

donde St_e es el número de Strouhal experimental y St_s es el número de Strouhal de la simulación.

A continuación, se muestran las tablas comparativas:

Resultados previos para comparación

	Coeficiente	Russel y Wang	Calhoun y Wang	Braza	Choi	Lui	Guerrero	Simulación	Error relativo mínimo
Malla 2	Cd	1.38	1.35	1.365	1.34	1.35	1.38	1.3578	0.5274%
	Cl	0.322	0.3	0.25	0.315	0.339	0.333	0.29581	1.3966%
Malla 3	Cd	1.38	1.35	1.365	1.34	1.35	1.38	1.349	0.0740%
	Cl	0.322	0.3	0.25	0.315	0.339	0.333	0.32384	0.5714%
Malla 4	Cd	1.38	1.35	1.365	1.34	1.35	1.38	1.3566	0.4888%
	Cl	0.322	0.3	0.25	0.315	0.339	0.333	0.33927	0.0796%

Tabla 2. Valores del coeficiente de arrastre y del coeficiente de sustentación obtenidos tanto de los experimentos realizados previamente como en nuestras simulaciones numéricas ($Re=100$).

En la tabla 2, a simple vista, podemos observar la concordancia de los valores del coeficiente de arrastre, Cd, y el coeficiente de sustentación, Cl, en las simulaciones numéricas de la malla 3 y la malla 4 con los datos experimentales obtenidos por Calhoun y Wang y Lui. Si calculamos los errores relativos entre los datos experimentales y los valores obtenidos en las diferentes simulaciones numéricas, nos damos cuenta que el error relativo mínimo se produce entre los valores obtenidos por Calhoun y Wang y los datos obtenidos en la malla 3. Este error

relativo mínimo vale 0.0740 %.

Resultados previos para comparación

	Coeficiente	Roshko	Williamson	Braza	Li	Simulación	Error relativo máximo
Malla 2	St	0.158	0.160	0.160	0.163	0.14444	11.384 %
Malla 3	St	0.158	0.160	0.160	0.163	0.15476	5.055 %
Malla 4	St	0.158	0.160	0.160	0.163	0.15854	2.79 %

Tabla 3. Valores del número de Strouhal obtenidos tanto de los experimentos realizados previamente como en nuestras simulaciones numéricas (Re=100).

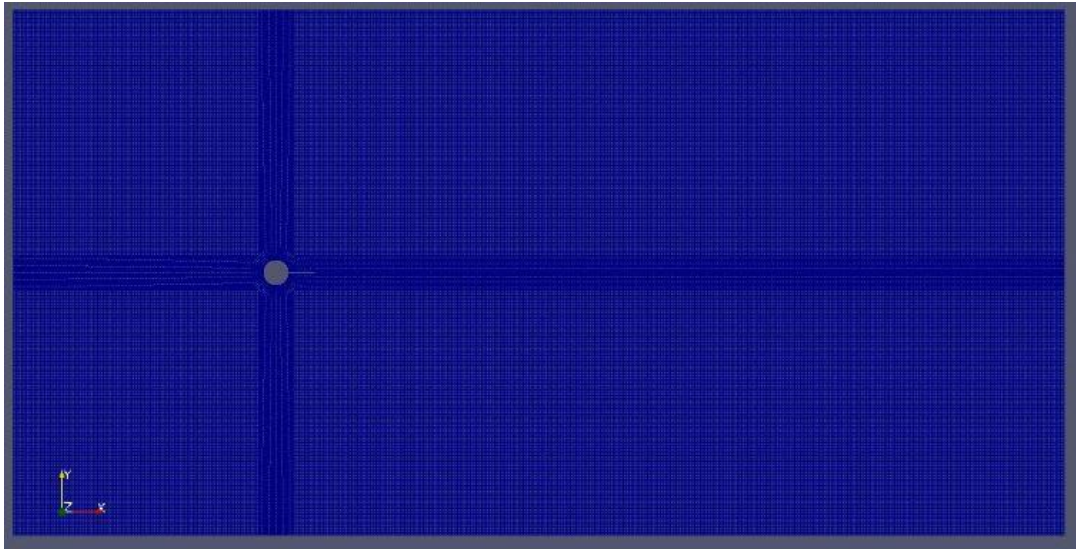
En la tabla 3 podemos ver que el error relativo entre los valores del número de Strouhal de los experimentos realizados previamente y los datos de las simulaciones numéricas disminuye conforme la densidad de celdas en la malla aumenta.

La malla 4 es donde hemos obtenido el número de Strouhal más próximo a los resultados experimentales, es decir, es la mejor malla. Sin embargo, en este trabajo, utilizaremos la malla 3. Primero, porque la diferencia entre los números de Strouhal entre la malla 3 y la malla 4 es mínima. En segundo lugar, entre la malla 3 y la malla 4 nos interesa aquella cuyo número de celdas sea menor debido a que posteriormente realizaremos simulaciones numéricas en movimiento. En estas simulaciones el tiempo en el que la computadora trabaja aumenta considerablemente respecto a las simulaciones en el que el cilindro es totalmente rígido, por lo que, este tiempo disminuirá conforme disminuye el número de celdas.

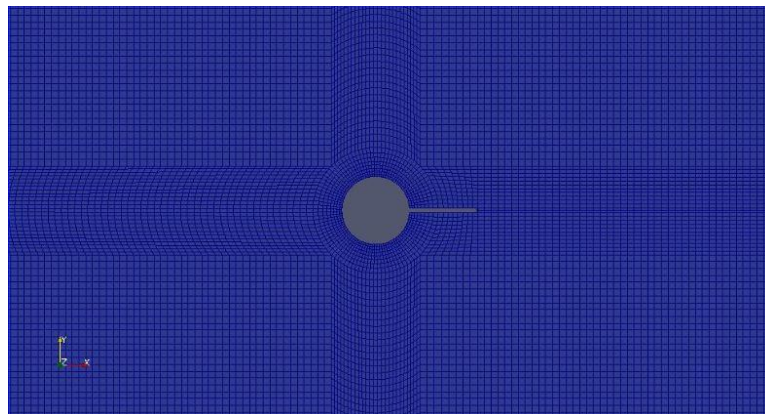
5.2. Validación: malla compuesta por el conjunto cilindro-lama

El segundo paso que se ha llevado a cabo en la construcción de la malla es la validación para el sistema completo cilindro-lama. En este paso construiremos la malla del conjunto cilindro-lama sabiendo que el valor óptimo de h es 0.00065 m, correspondiente a la malla 3. Una vez construida la malla, averiguaremos el valor del número de Strouhal, St , el valor del coeficiente de arrastre y el valor del coeficiente de sustentación a través de una simulación con

$Re=100$. El valor de Re es 100 porque es un caso que ya se ha estudiado con anterioridad, entonces, nos permitirá comparar los resultados con el objetivo de validar la malla. Si el resultado de nuestra simulación tiene un error relativo pequeño, nuestra malla es totalmente válida para continuar con las simulaciones numéricas. A continuación, se mostrará la malla del conjunto cilindro-lama:



(a)



(b)

Figura 19. Malla del cilindro-lama. (a) Visualización de la malla completa (b) Zoom a la zona crítica de la malla (conjunto cilindro-lama).

La malla del cilindro-lama es una malla estructura compuesta por celdas iguales a la mostrada en la figura 11, donde h tiene el valor de 0.00065 m. Como se muestra en la figura 6 la longitud de la placa es igual al diámetro del cilindro circular. La malla se ha refinado en las paredes sólidas del conjunto cilindro-lama porque es la zona más importante de esta, ya que es

donde se produce la interacción fluido-estructura. La malla tiene un total de 86353 celdas. Un indicador de calidad es la relación de aspecto. La relación de aspecto de una celda es la medida de la desviación de una celda de malla de tener todos los lados con la misma longitud. Si la máxima relación de aspecto de la malla es 1 indica que todas las celdas en nuestra malla son equiláteras. En nuestro caso la máxima relación de aspecto es 3.2922. Esta relación de aspecto se produce en las celdas que están adyacentes al cilindro por el complejo de la forma. Otro aspecto importante de la malla es el skewness. El skewness es un indicador de calidad de la malla que indica como de próximo a una celdilla ideal es cada una de las celdas que compone esta. La siguiente tabla muestra el valor de skewness y su correspondiente calidad de celda:

CALIDAD DE LA CELDILLA	SKEWNESS
EQUILÁTERA	0
EXCELENTE	0-0,25
BUENA	0,25-0,50
ACEPTABLE	0,50-0,75
POBRE	0,75-0,90
MALA	0,90-1
DEGENERADA	1

Tabla 4. Tabla que muestra la calidad de la celdilla según el valor máximo de skewness

El valor de skewness máximo de la malla con la que trabajaremos es 0.592628, por lo que, si seguimos el criterio de la tabla 4 la calidad de la celdilla es notable. Este, al igual que con la relación de aspecto, se produce en las cercanías al cilindro por la dificultad de la forma. En las celdas más alejadas del cilindro este valor estará más cercano al 0, que corresponde a una celdilla equilátera.

A partir de esta malla realizamos una simulación numérica utilizando el solver IcoFoam de Openfoam. Este solver permite resolver problemas con flujos transitorios como es nuestro caso. A continuación, se muestra unas imágenes de las gráficas del coeficiente de arrastre frente al tiempo y del coeficiente de sustentación frente al tiempo:

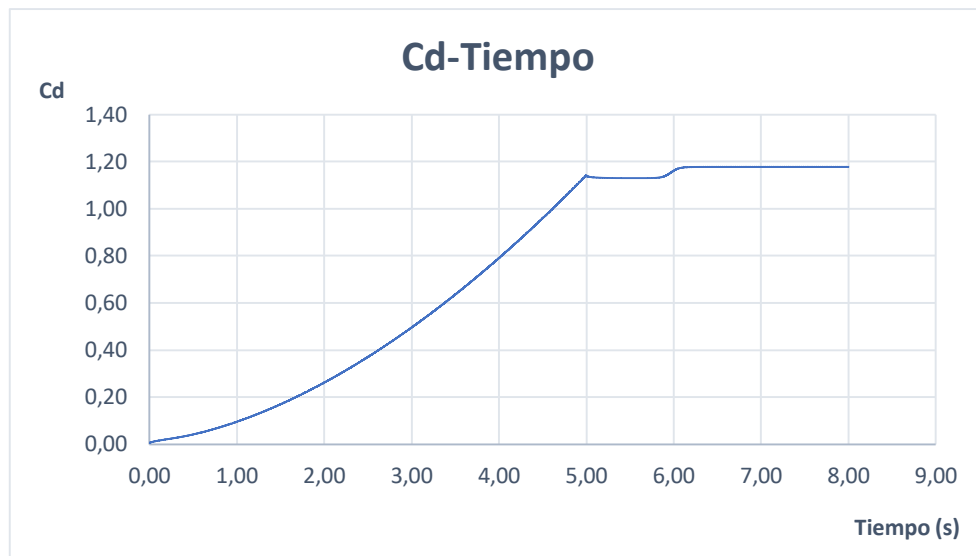


Figura 20. Gráfica del coeficiente de arrastre frente al tiempo

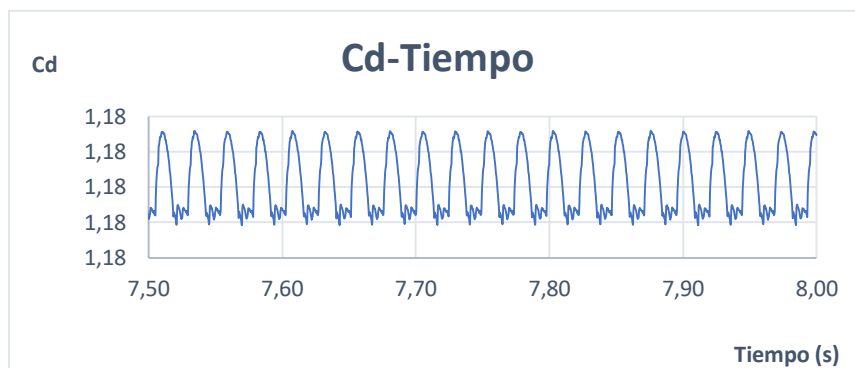


Figura 21. Zoom a la parte de la gráfica C_d -t donde esta se estabiliza.



Figura 22. Zoom a la parte de la gráfica C_l -t donde esta se estabiliza.

En la figura 20 se puede observar la evolución del coeficiente de arrastre a lo largo del tiempo. También se puede ver que en este caso la velocidad a la entrada aumenta de 0 m/s a 1 m/s en 5 segundos de forma lineal. En la figura 21 y en la figura 22 se puede observar que tanto

el coeficiente de arrastre como el coeficiente de sustentación varía de forma cíclica. A partir de estas gráficas podemos calcular tanto el valor medio de coeficiente de arrastre como el valor medio del coeficiente de sustentación. En este caso, el coeficiente medio de sustentación debería ser muy cercano a 0 porque el flujo se comporta de forma simétrica alrededor del conjunto cilindro-placa. Esto quiere decir que el coeficiente de sustentación se comportará como un oscilador armónico en el que tanto la amplitud como la longitud de onda se mantienen constante, como puede observarse en la figura 20. Además, apoyándonos en la fórmula (6) obtendremos el valor del número de Strouhal. Para comparar los resultados de la simulación con los obtenidos en simulaciones previas calcularemos el error relativo del coeficiente de arrastre y del número de Strouhal con las ecuaciones (21) y (23), explicadas con anterioridad. En la siguiente tabla se muestra el valor de estos coeficientes tanto en la simulación numérica en este trabajo como en una simulación numérica realizada con anterioridad:

Resultados previos			
Coeficientes	Kwon and Choi	Simulación	Error relativo
Cd	1.16	1.1782	1.5689 %
Cl	-	-0.0005	-
St	0.137	0.1354	1.1678 %

Tabla 5. Comparación del coeficiente de arrastre medio y el número de Strouhal para un sistema cilindro-lama.

Como se puede observar en la tabla 5 el error relativo entre el valor del coeficiente de arrastre obtenido en nuestra simulación y el valor del coeficiente de arrastre obtenido en simulaciones realizadas con anterioridad es mínimo. Debido a esto podemos confirmar que la malla construida es totalmente válida para la realización de las futuras simulaciones numéricas.

Observando las figuras 21 y 22 se puede apreciar que la frecuencia del Drag es el doble de la frecuencia del Lift. Además, es sabido que la frecuencia del Lift es igual a la frecuencia del Strouhal, que corresponde a la frecuencia de desprendimiento de vórtices. En la siguiente tabla se muestra los distintos valores de las frecuencias:

Parámetro	Frecuencia
Drag	41.667
Lift	20.833
Frecuencia de desprendimiento de vórtices	20.833

Tabla 6. Comparación de los distintos valores de las frecuencias para $L/D=1$ y $Re=100$.

Además, es importante puntualizar que la colocación de una placa al cilindro ha supuesto una disminución del Drag. En la siguiente tabla se puede apreciar esto que se comenta:

	Drag medio	Disminución (%)
Cilindro	1.349	12.66%
Cilindro-lama	1.1782	

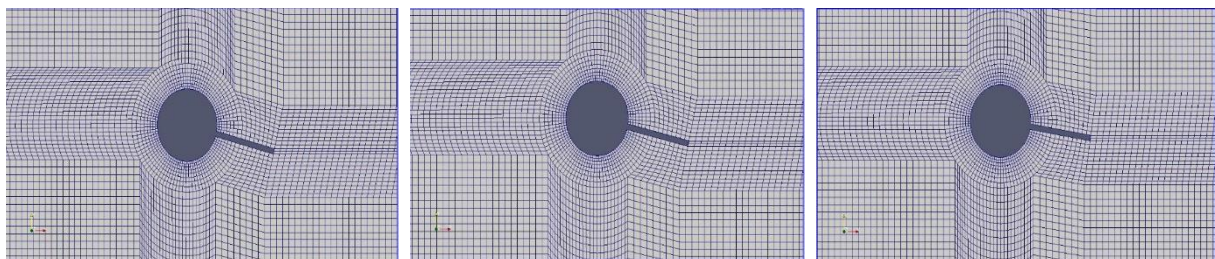
Tabla 7. Comparación de los distintos valores de las frecuencias para $L/D=1$ y $Re=100$.

El Drag medio ha disminuido un 12.66 % respecto al Drag medio obtenido en la simulación del flujo alrededor del cilindro cuando hemos colocado una placa. Esto quiere decir que ha disminuido la componente x de las fuerzas de presión y las fuerzas viscosas que ejerce el fluido sobre la estructura.

6. Resultados

6.1. El conjunto cilindro-lama está fijado en el centro del cilindro.

Primero, se trabajará utilizando el conjunto cilindro-lama como una unidad totalmente rígida. En este caso, estudiaremos el comportamiento del flujo y los momentos que realizan las fuerzas viscosas y las fuerzas de presión en el centro del cilindro. Para ello, se utilizará un número de Reynolds muy bajo con el objetivo de simplificar la simulación numérica. El valor del número del Reynolds será 50, que corresponde a un flujo laminar. Además, las condiciones iniciales serán las explicadas anteriormente, en la definición del problema. Para estudiar cómo se comportan los diferentes momentos en el centro del cilindro, se variará el ángulo de giro del conjunto cilindro-lama, θ (Figura 23). Se realizarán un total de 11 simulaciones donde, en cada una de ellas, el conjunto cilindro-placa actuará como un sólido rígido fijado en el centro del cilindro y se variará el ángulo de giro θ .



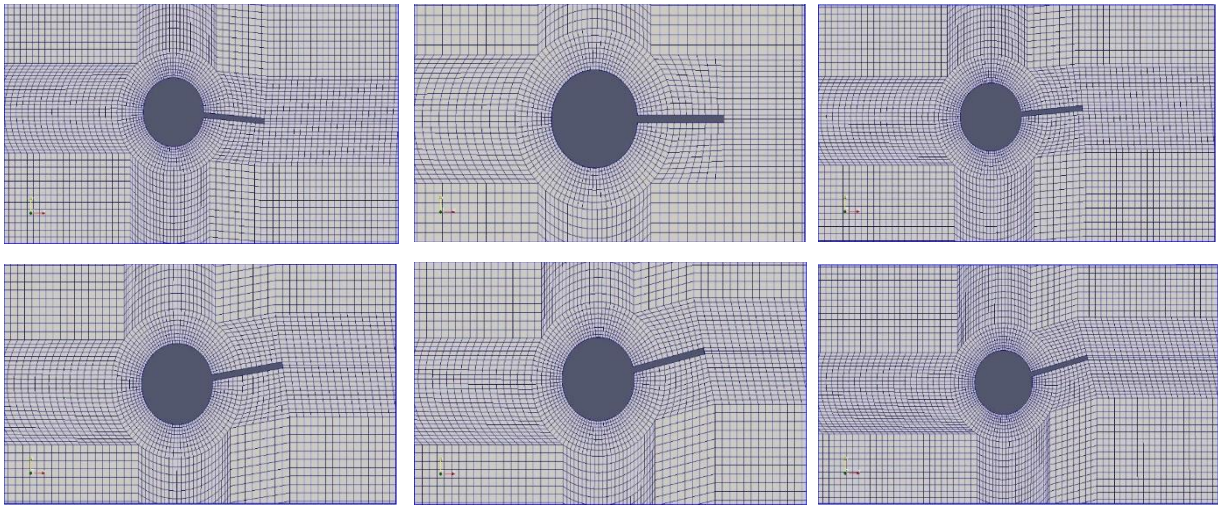


Figura 23. Diferentes ángulos (θ) del conjunto cilindro-lama. θ varía de -15 grados a 15 grados.

En un cuerpo sumergido en un fluido en movimiento actúan dos tipos de fuerzas: las fuerzas originadas por la diferencia de presiones y las fuerzas originadas por las tensiones tangenciales de origen viscoso. Estas fuerzas ejercen momentos en el centroide del cuerpo, que nuestro caso es el centro del cilindro. La siguiente figura muestra los momentos ejercido por ambos tipos de fuerzas y la suma de estos momentos en cada ángulo de giro, θ :

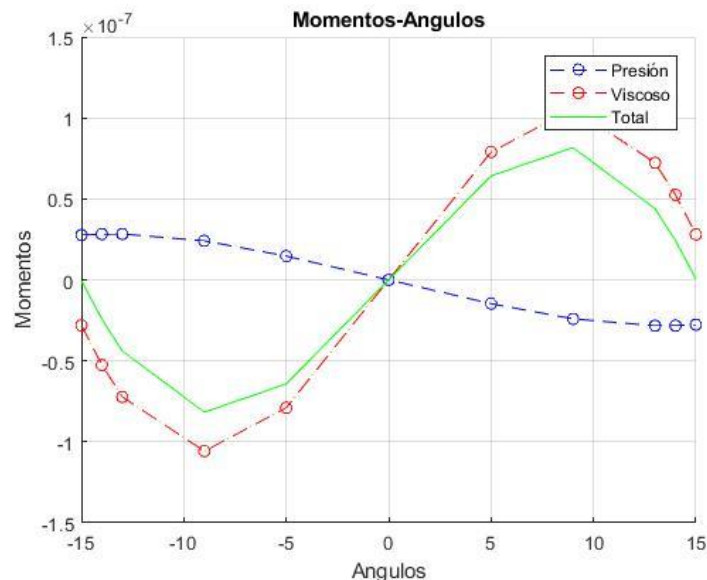


Figura 24. Gráfico que muestra los momentos de las fuerzas de presión, de las fuerzas viscosas y los momentos originados por la suma de ambas en cada ángulo de giro θ . ($Re=50$)

En la figura 24 se puede observar que, para un flujo con un número de Reynolds igual a 50, hay tres valores de θ en la suma de los momentos originados por las fuerzas de presión y los momentos originados por las fuerzas viscosas es 0. Esto significa que hay tres posiciones de equilibrio del conjunto cilindro-lama, cuando $\theta = 0$ y cuando $\theta = \pm 15$. Además, se puede ver que los momentos originados por las fuerzas de presión son mucho mayores que los momentos originados por las fuerzas viscosas cuando el ángulo de giro, θ , toma los valores de 9 grados y -9 grados. Estos momentos llegan a ser 4 veces más grandes.

Para explicar de manera física porque el conjunto cilindro-lama reposa en una posición asimétrica observaremos el comportamiento del flujo detrás de un cilindro circular sin placa (figura 25).

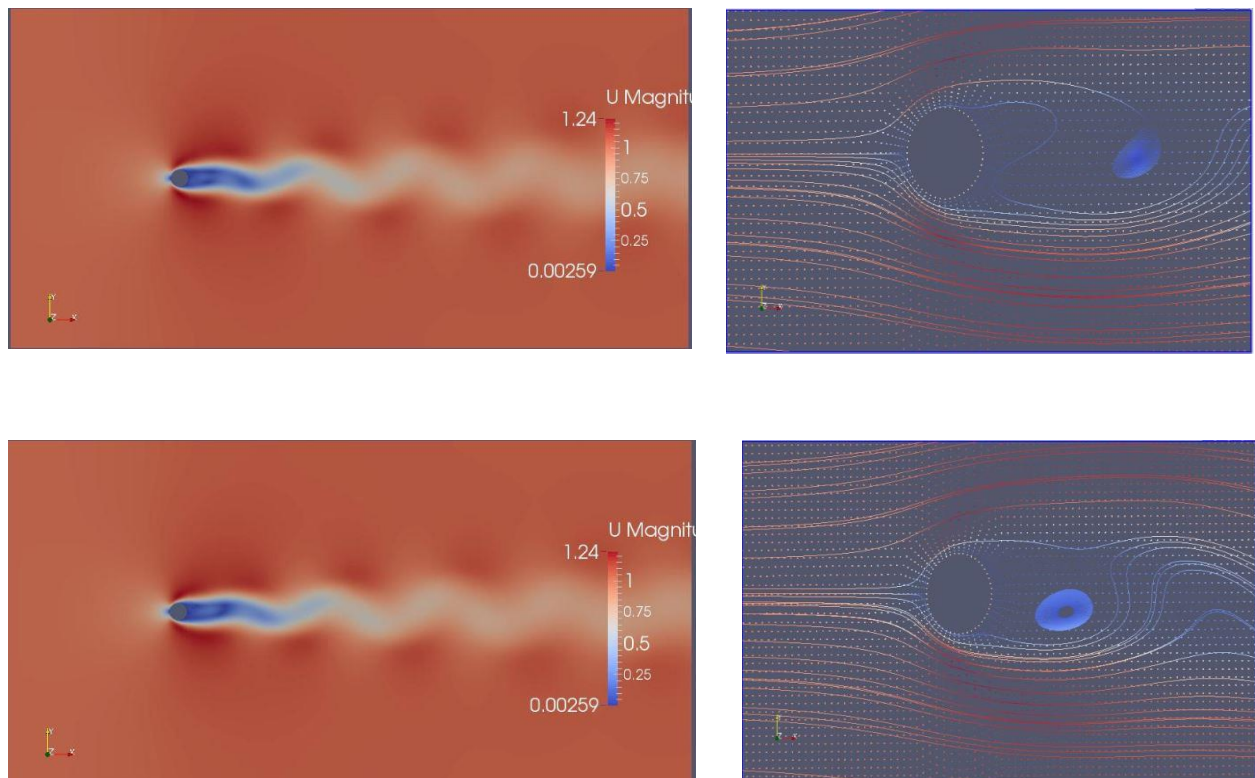


Figura 25. Campos de velocidades y comportamiento del flujo detrás del cilindro. ($Re=50$)

En la figura 25 se puede observar que, en un flujo laminar, en el que el valor de número de Reynolds es 50, se producen vórtices y remolinos detrás del cilindro. Esta zona es consecuencia de la diferencia de presiones que se produce entre la parte delantera y la parte trasera del cilindro debido a la separación del flujo, como explicó Prandtl en su teoría en 1905. Ahora, si colocáramos una placa cuya longitud es igual al diámetro del cilindro en esta zona y

dejáramos libre de rotar al conjunto cilindro-placa, la posición inicial en el que $\theta = 0$ no sería estable ya que parte del flujo en esta zona va hacia el cilindro. Por eso el cilindro rota hasta la posición de equilibrio $\theta = \pm 15$.

En conclusión, la colocación de una placa, en el que el coeficiente adimensional $L/D=1$, detrás de un cilindro en un flujo laminar, hace que si el conjunto cilindro-placa fuese libre de rotar alrededor del centro del cilindro, este conjunto tome una posición de equilibrio asimétrica, en un nuestro caso $\theta = \pm 15$.

Para comprobar la veracidad de los resultados nos apoyaremos en el diagrama de bifurcación de Pitchfork para $\frac{L}{D} = 1$ construido por Xu en 1990. Xu realizó en mismo procedimiento descrito arriba con distintos números de Reynolds con el objetivo de construir este diagrama. En este diagrama se describe las posiciones de equilibrio para distintos números de Reynolds. El rango del número de Reynolds es de 1 a 50. En la figura 24 se muestra este diagrama, en el que se puede observar como para Reynolds menores de 30 sólo hay una posición de equilibrio estable. La posición de equilibrio estable es aquella en la cual si el conjunto cilindro-lama fuera libre de rotar en vez de estar fijado en el cilindro, este no se rotaría. Mientras para números de Reynolds mayores de 30 hay tres posiciones de equilibrio, como es nuestro caso.

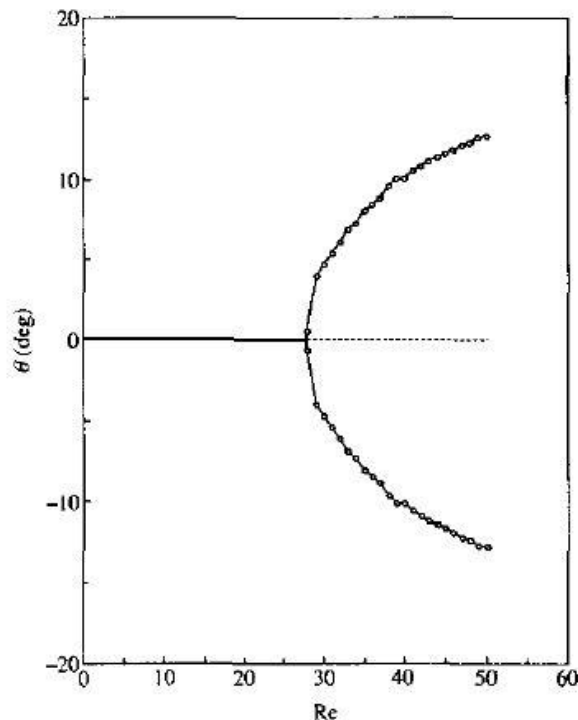


Figura 26. Diagrama de bifurcación de Pitchfork

En este diagrama se puede observar que, para un número de Reynolds igual a 50, hay tres posiciones de equilibrio, al igual que nuestro caso. La primera de ellas es $\theta = 0$. Esta es una posición de equilibrio inestable. Además, las otras dos posiciones de equilibrio según este diagrama son $\theta = \pm 13$. Difiere de nuestro resultado 2 grados. Esto es debido principalmente a dos cosas: la malla no es suficientemente fina alrededor del cilindro y la elección de los métodos de discretización utilizados en OpenFoam. Ya se ha explicado en apartados anteriores que la elección de que la malla no sea muy fina es para ahorrarnos tiempo de simulación en los posteriores casos en el que el conjunto cilindro-lama es libre de girar alrededor del cilindro.

6.2. El conjunto cilindro-lama es libre de rotar alrededor del centro del cilindro

Por último, se trabajará dejando al conjunto cilindro-lama rotar libremente alrededor del cilindro. En este caso se estudiará el movimiento que realiza el conjunto-cilindro placa. Las condiciones iniciales serán las explicadas anteriormente salvo la condición de velocidad en las paredes del conjunto cilindro-lama que será “movingWallVelocity”, utilizada para casos en el que las paredes estén en movimiento. Se utilizará el solver “pimpleDyMFoam”, implementado en OpenFoam, que permite resolver problemas en el que la malla es móvil y el flujo es incomprensible. El número de Reynolds tendrá el valor de 100, que corresponde a un flujo laminar.

6.2.1 Cálculos previos a la simulación

En este caso, son importantes muchos parámetros adimensionales tales como la velocidad reducida, U_r , el momento de inercia J , la rigidez torsional κ , la amortiguación estructural ζ o la relación de masas, m^* , todas ellas definidas en el modelo matemático. Para este estudio fijaremos los valores de ξ y m^* , que serán 0.007 y 10 respectivamente. Además, realizaremos dos simulaciones en el que la velocidad reducida será diferente en cada una de ellas. La velocidad reducida tomará los valores de 11.5 y 15. La velocidad nominal v es 0.1. Se ha disminuido la velocidad con respecto a las demás simulaciones con el objetivo de mejorar la estabilidad de la simulación numérica. A partir de las ecuaciones descritas en el apartado del modelo matemático sacaremos todos los valores de estos parámetros adimensionales. En las siguientes tablas se mostrarán estos valores para las dos velocidades reducidas:

Parámetros	Valores	Unidades
f_n	1.337793	s^{-1}
J_z	$3.12 * 10^{-13}$	$k * m^2$
ζ	$3.67 * 10^{-14}$	$(N * m * s)/rad$
κ	$2.20 * 10^{-11}$	$(N * m)/rad$
m_s	$3.4 * 10^{-8}$	kg
$C_{m,x}$	0.06558	m

Tabla 8. Valores de los parámetros importantes calculados para $Re=100$, $\xi=0.007$, $m^ = 10$ y $U_r = 11.5$*

Parámetros	Valores	Unidades
f_n	1.025641	s^{-1}
J_z	$3.12 * 10^{-13}$	$k * m^2$
ζ	$2.81 * 10^{-14}$	$(N * m * s)/rad$
κ	$1.29 * 10^{-11}$	$(N * m)/rad$
m_s	$3.4 * 10^{-8}$	kg
$C_{m,x}$	0.06558	m

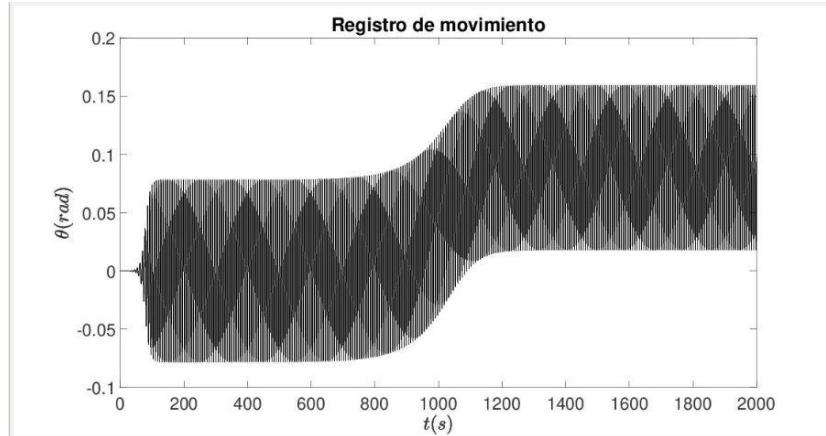
Tabla 9. Valores de los parámetros importantes calculados para $Re=100$, $\xi=0.007$, $m^ = 10$ y $U_r = 15$*

En las tablas 6 y 7 se puede observar que al modificar la velocidad reducida se cambia los valores de la frecuencia natural, f_n , de la amortiguación estructural, ζ y de la rigidez torsional, κ . Esto es debido a que estos parámetros son los asociados al movimiento oscilatorio del conjunto cilindro-lama, descrito por la ecuación (16). Además, se puede observar que, aumentando la velocidad reducida, estos parámetros disminuyen.

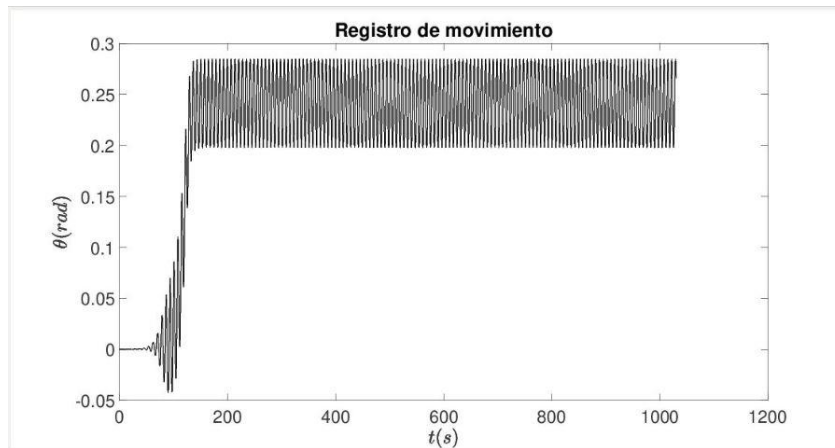
6.2.2. Evolución del ángulo de giro a lo largo del tiempo

Los valores de los parámetros calculados en el apartado anterior se escriben en el archivo “dynamicMeshDict”. Este archivo sirve para caracterizar el sistema dinámico con el cual funcionará la interacción fluido-estructura en esta simulación. En resumen, en este archivo se escribe variables como la masa del conjunto cilindro-lama, el centro de rotación, la amortiguación estructural, la rigidez torsional o el momento de Inercia.

La siguiente figura muestra dos gráficas de la evolución del ángulo de giro del conjunto cilindro-lama a lo largo del tiempo:



(a)



(b)

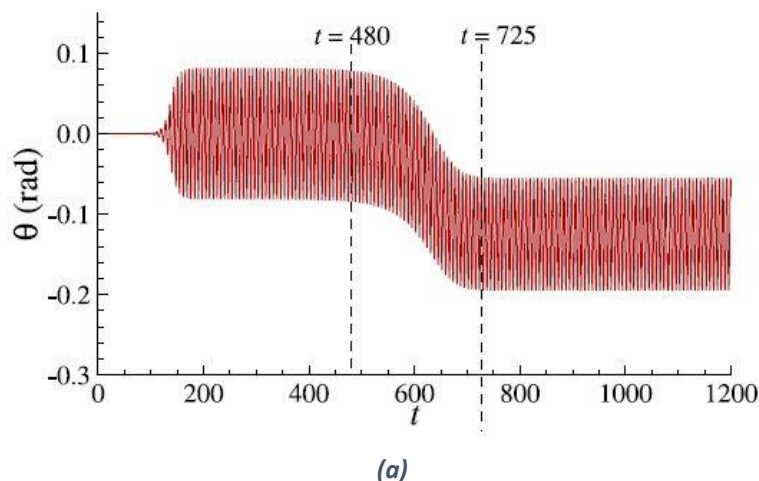
Figura 27. Evolución del ángulo de giro, θ , a lo largo del tiempo para $\xi = 0.007$ y $m^* = 10$. (a) $Ur=11.5$ (b) $Ur=15$.

En la figura 27 se puede observar que, para ambos casos, hay un tramo inicial en el que el conjunto cilindro-lama permanece estático en la posición inicial, $\theta = 0$. Sin embargo, a partir de este tramo, el movimiento que realiza el conjunto cilindro-placa es totalmente diferente. Cuando $U_r = 11.5$, figura 27(a), el movimiento oscilatorio empieza cuando $t \approx 50$, seguido por una fase de oscilaciones armónicas regulares con una amplitud de $\theta = 0.15$, que termina cuando $t \approx 700$. En esta fase la posición de equilibrio es de 0.075 rad. Después, hay una transición de la posición de equilibrio, en el que el conjunto cilindro-lama cambia de posición de equilibrio mientras sigue oscilando. En esta etapa la amplitud de oscilación disminuye un poco. A partir de $t \approx 1200$, el conjunto cilindro-placa mantiene una oscilación armónica

regular con una amplitud de $\theta = 0.15$ en la nueva posición de equilibrio. Cuando se disminuye la velocidad reducida a $U_r = 15$, figura 27(b), el movimiento oscilatorio empieza cuando $t \approx 50$, al igual que en el caso anterior. Sin embargo, no sigue una fase en el que el conjunto cilindro-lama permanezca oscilando de forma regular, sino que oscila aumentando su amplitud hasta llegar a un punto, $t \approx 100$, en el que cambia a una posición de equilibrio, $t \approx 150$. Esta etapa de transición es mucho más rápida que la vista anteriormente. En la última fase, el conjunto cilindro-lama mantiene una oscilación armónica regular con una amplitud de $\theta = 0.08$.

En resumen, podemos dividir el proceso del movimiento en 4 etapas. En la primera etapa, en ambos casos, el conjunto cilindro-lama permanece estático durante un tiempo. En la segunda fase, el conjunto cilindro-placa empieza a oscilar aumentando su amplitud hasta llegar a un punto en el que permanece oscilando con una amplitud constante. Cuando aumentamos la velocidad reducida de 11.5 a 15, el conjunto cilindro-lama no permanece oscilando con una amplitud constante, sino que transiciona directamente a la tercera etapa. En esta tercera etapa, el conjunto cilindro-placa cambia de posición de equilibrio. Cuando disminuimos la velocidad reducida, este cambio de posición se realiza de forma más rápida. En la última y cuarta fase, el conjunto cilindro-lama se mantiene oscilando con una amplitud constante en la nueva posición de equilibrio.

Para comprobar la veracidad de los resultados nos apoyaremos en el artículo “Numerical investigation of flow-induced rotatory oscillation of circular cylinder with rigid splitter plate” realizado por Lin Lu, Xiao-ling, Guo-Tang Ming-ming, Chuan-qui y Zhi-hua en 2016. En él se estudia mediante simulaciones numéricas el mismo problema presentado arriba. Ellos realizan las simulaciones con distintas velocidades reducidas, entre ellas, una es $U_r = 15$. A continuación se muestra la gráfica de la evolución del ángulo de giro θ durante el tiempo:



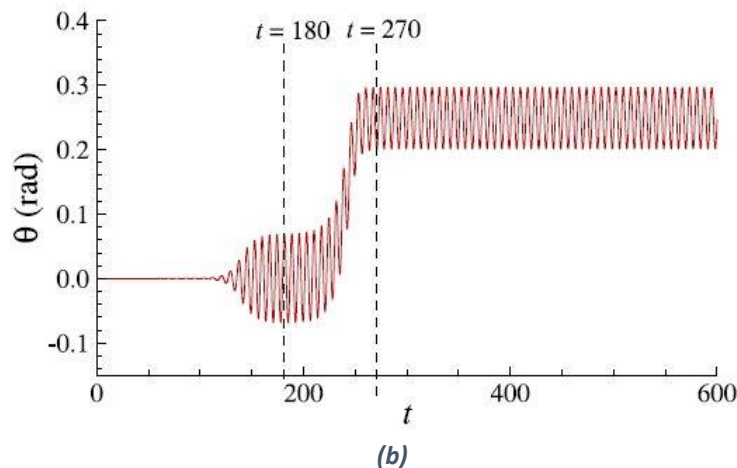


Figura 28. Evolución del ángulo de giro , θ , a lo largo del tiempo para $\xi = 0.007$, $m^* = 10$. (a) $Ur=11.5$ (b) $Ur=15$ (Artículo 2016)

Si observamos la figura 28(a) se puede observar una pequeña diferencia respecto a la figura 27(a). En este trabajo, la última etapa de las 4 que hay en la gráfica, que hemos descrito con anterioridad, es positiva, es decir, el conjunto cilindro-placa mantiene la posición de equilibrio en la parte de arriba, moviéndose en ángulos positivos. En el estudio de 2016, se produce el fenómeno contrario, es decir, mantiene la posición de equilibrio en la parte inferior, es decir, se mueve en ángulos negativos. Es igual de probable que la placa se coloque a la derecha o a la izquierda del flujo de corriente entrante.

Comparando la figura 28(b) con la figura 27(b) se puede observar la similitud en el resultado. Ambas gráficas muestran los 4 pasos explicados anteriormente. La primera diferencia que se puede observar es que en la simulación realizada en este trabajo el conjunto cilindro-lama se mantiene estático hasta $t \approx 50$, mientras que en la gráfica sacada del artículo el conjunto cilindro-lama permanece estático hasta $t \approx 120$. En ambos caso en la última posición de equilibrio el conjunto cilindro-lama mantiene una amplitud $\theta = 0.08$. Otra pequeña diferencia es que en la gráfica sacada del artículo el conjunto cilindro-lama si se mantiene con una oscilación constante durante un pequeño periodo de tiempo una vez llega a la primera posición de equilibrio mientras en la de este trabajo ese periodo de tiempo no se aprecia. Las diferencias vienen dadas por cuan basta es la malla en este trabajo comparado con la malla del artículo y por los métodos matemáticos elegidos para la discretización de las ecuaciones de Navier-Stokes.

6.2.3. Drag y Lift

Con el objetivo de graficar el coeficiente de Drag y coeficiente de Lift en la simulación, en el archivo “ControlDict” se ha implementado la función “forces”, que genera un archivo con los valores de las fuerzas de presión, de las fuerzas viscosas, de los momentos debidos a las fuerzas de presión y de los momentos debidos a las fuerzas viscosas. A partir de los valores de las fuerzas en el eje x y las fuerzas en el eje y, obtenidas sumando la componente x y las componentes y, respectivamente, de las fuerzas de presión y las fuerzas viscosas, se ha obtenido los valores del coeficiente de arrastre (Drag) y del coeficiente de sustentación (Lift) con las ecuaciones (4) y (5). En la siguiente figura se puede observar la evolución del coeficiente de Drag y la evolución del coeficiente de Lift a lo largo de tiempo cuando $U_r = 11.5$:

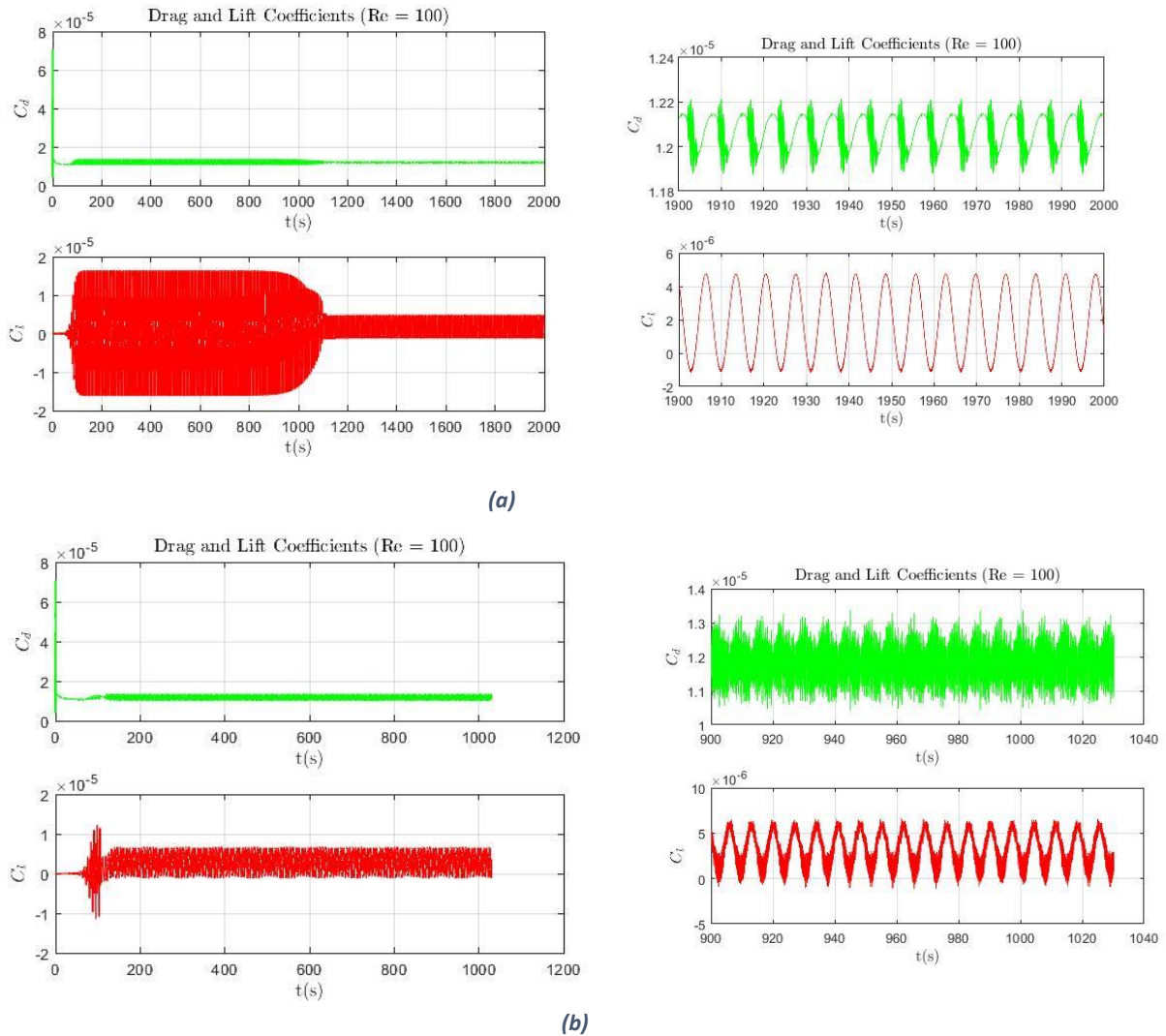


Figura 29. Evolución del coeficiente Drag y del coeficiente Lift a lo largo del tiempo para $\xi = 0.007$, $m^* = 10$. (a) $U_r = 11.5$ y (b) $U_r = 15$.

En la figura 29 se puede ver la evolución del coeficiente de arrastre (C_d) y del coeficiente de sustentación (C_l) a lo largo del tiempo para los dos casos que se están estudiando en este trabajo. Además, se aprecia que estamos tratando con un flujo transitorio dado que tanto el Drift como el Lift varían con el tiempo. En la figura 29 (a) se puede ver que el coeficiente de arrastre tiene 3 etapas cuando $U_r = 11.5$. Se observa que el coeficiente de arrastre, en la primera etapa, oscila de forma constante con una amplitud muy pequeña, correspondiendo a la etapa en el que el conjunto cilindro-lama permanece estático. Después hay una segunda etapa donde el coeficiente de arrastre oscila de forma constante con una amplitud un poco más grande que la anterior. Por último, hay una tercera etapa en el que el coeficiente de arrastre se mantiene oscilando de forma regular con una amplitud aún más pequeña que la anterior etapa. El Lift tiene una primera etapa en el que oscila de forma constante con una amplitud muy pequeña. En la segunda etapa el Lift oscila de forma regular, sin embargo, la amplitud es mucho más grande en este caso que en la anterior etapa. Luego hay una tercera etapa en el que este coeficiente se mantiene oscilando con una amplitud mucho más pequeña que la amplitud de la segunda etapa. En la figura 29 (b) se puede apreciar que, al igual que en el caso anterior, la evolución del Drift y del Lift a lo largo del tiempo tiene 3 etapas cuando $U_r = 15$. En la primera etapa del coeficiente Drag, que corresponde a la etapa donde el conjunto cilindro-lama permanece estático, este se mantiene oscilando con una amplitud muy pequeña. En la segunda etapa, el Drag sigue oscilando de forma constante, pero aumenta un poco la amplitud. El tiempo de duración de esta segunda etapa es mucho más corto que el tiempo de duración de la segunda etapa del Drag cuando $U_r = 11.5$. Por último, hay una tercera etapa, en el que el Drag oscila de forma constante, aumentando un poco la amplitud respecto a la segunda etapa. En este caso, el Lift tiene una primera etapa en el que permanece oscilando de forma constante con una amplitud muy pequeña. Luego, tiene una segunda etapa en el que se mantiene oscilando de forma regular, aumentando considerablemente su amplitud. La duración de esta segunda etapa es más corta que la duración de la segunda etapa cuando $U_r = 11.5$. Por último hay una tercera etapa en el que el Lift mantiene una oscilación armónica regular, disminuyendo considerablemente su amplitud respecto a la segunda etapa.

Es importante comentar que la frecuencia que se observa en la evolución del Lift corresponde a la frecuencia de desprendimiento de vórtices dada por el Strouhal. Además, la frecuencia del Drag es el doble de la frecuencia del Lift. Esto ya se ha explicado anteriormente en el apartado de validación.

Si comparamos los valores de los coeficientes de arrastre y los coeficientes de sustentación obtenidos en la simulación del conjunto cilindro-lama cuando es libre de rotar alrededor del eje z del centro del cilindro con los valores de la simulación cuando el conjunto cilindro-lama actúa como un sólido rígido nos damos cuenta que tanto el Lift como el Drag disminuye muchísimo cuando trabajamos con el conjunto cilindro-placa móvil. Esto quiere decir que las fuerzas F_x y F_y son mucho menores. Estas fuerzas son la suma de la componente x y componente y, respectivamente, de las fuerzas de presión y las fuerzas viscosas que actúan sobre el conjunto cilindro-lama. Otra notable diferencia entre ambos casos es que mientras en la simulación en el que el conjunto cilindro-lama actúa como un sólido rígido los coeficientes solo tiene una etapa en el que estos oscilan con la misma amplitud, en la simulación en el que el conjunto cilindro-lama es móvil estos coeficientes pasan por tres etapas.

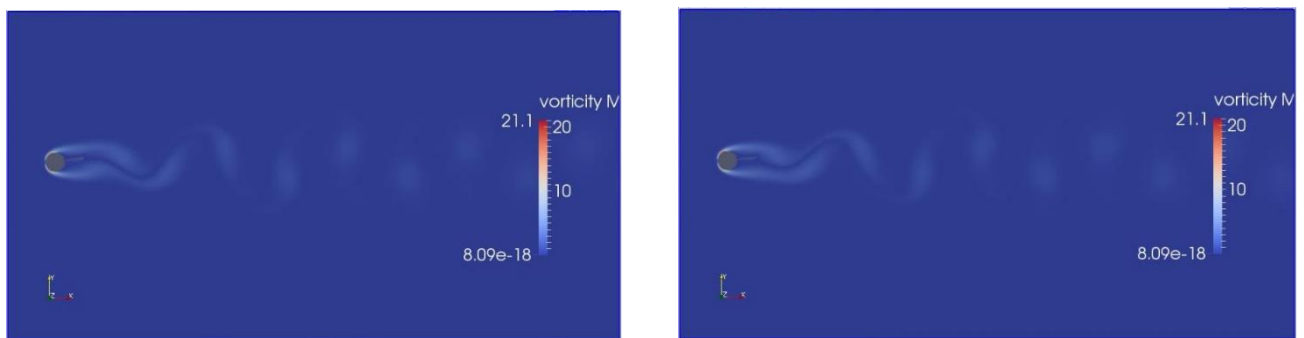
6.2.4 Vorticidad

La vorticidad es un campo pseudovectorial que describe el movimiento giratorio local de un continuo cerca de algún punto, como lo vería un observador ubicado en ese punto y viajando junto con el flujo. Matemáticamente se define así:

$$\omega = \nabla \times u \quad (24)$$

donde ω es el vector vorticidad, medido en 1/s y u es la velocidad.

En OpenFoam, añadiendo la función “vorticity1” en el archivo “ControlDict” puedes sacar los valores de la vorticidad. Después a través de paraview se puede observar la vorticidad en la malla. A continuación, se mostrará imágenes de la vorticidad en las dos simulaciones estudiadas:



(a)

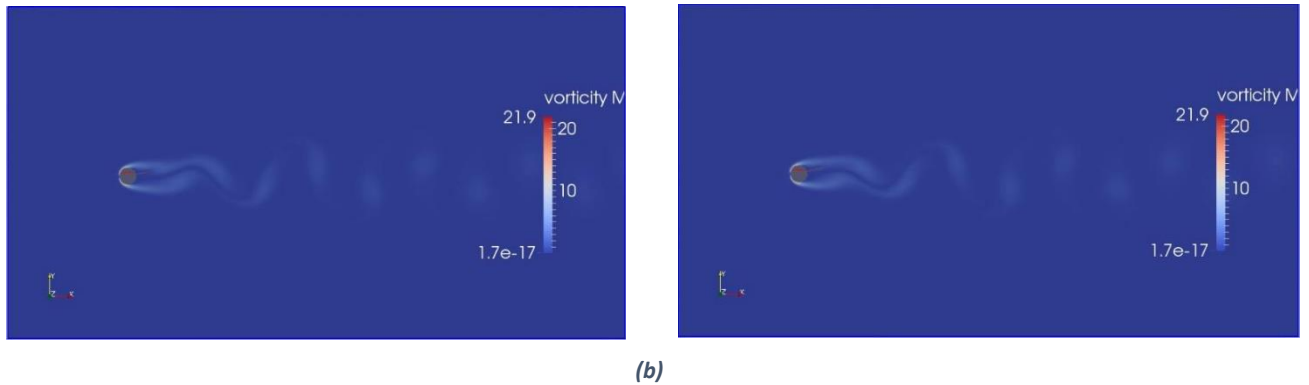


Figura 30. Campos de vorticidades. (a) $U_r=11.5$ (b) $U_r=15$

La figura 30 se muestra la vorticidad en la etapa de la evolución del ángulo de giro a lo largo del tiempo, es decir, en la última posición de equilibrio, donde el conjunto cilindro-lama oscila de forma constante con la misma amplitud. Se observa que, tanto para la simulación donde $U_r = 11.5$ como para la simulación donde $U_r = 15$, el pico máximo de vorticidad se produce tanto en la parte superior como en la parte inferior del cilindro, coincidiendo con el pico máximo de la velocidad. Esto se puede explicar observando la figura 25. En ella se puede ver como las líneas de corriente están más juntas en la parte superior e inferior del cilindro. La velocidad siempre es mayor cuando las líneas de corriente están más próximas entre sí y, como consecuencia, la vorticidad es, también, mayor ya que esta depende de la velocidad como se puede ver en la ecuación (24). También podemos ver que, tanto para $U_r = 11.5$ como para $U_r = 15$, se produce un desprendimiento de vórtices ‘2S’, es decir, se desprenden dos vórtices por cada proceso de desprendimiento de vórtices completado. Esto se produce de manera similar en un cilindro circular en un flujo estacionario.

A continuación, se mostrará una imagen de la componente z de la vorticidad:



Figura 31. Componente z de la vorticidad.

En la figura 31 se puede ver la dirección de giro de los dos vórtices que se están desprendiendo en ese momento. Se puede apreciar que el vórtice de la parte superior del cilindro gira en sentido de las agujas del reloj y está representado de color azul. El vórtice situado en la parte inferior gira en sentido anti-horario y está representado en color rojo.

6.2.5 Velocidad

La velocidad es un parámetro importante para caracterizar el comportamiento del flujo cuando interacciona el fluido con la estructura del cilindro-lama. A continuación, se mostrará el campo de velocidades para las dos simulaciones que se están estudiando en este trabajo:

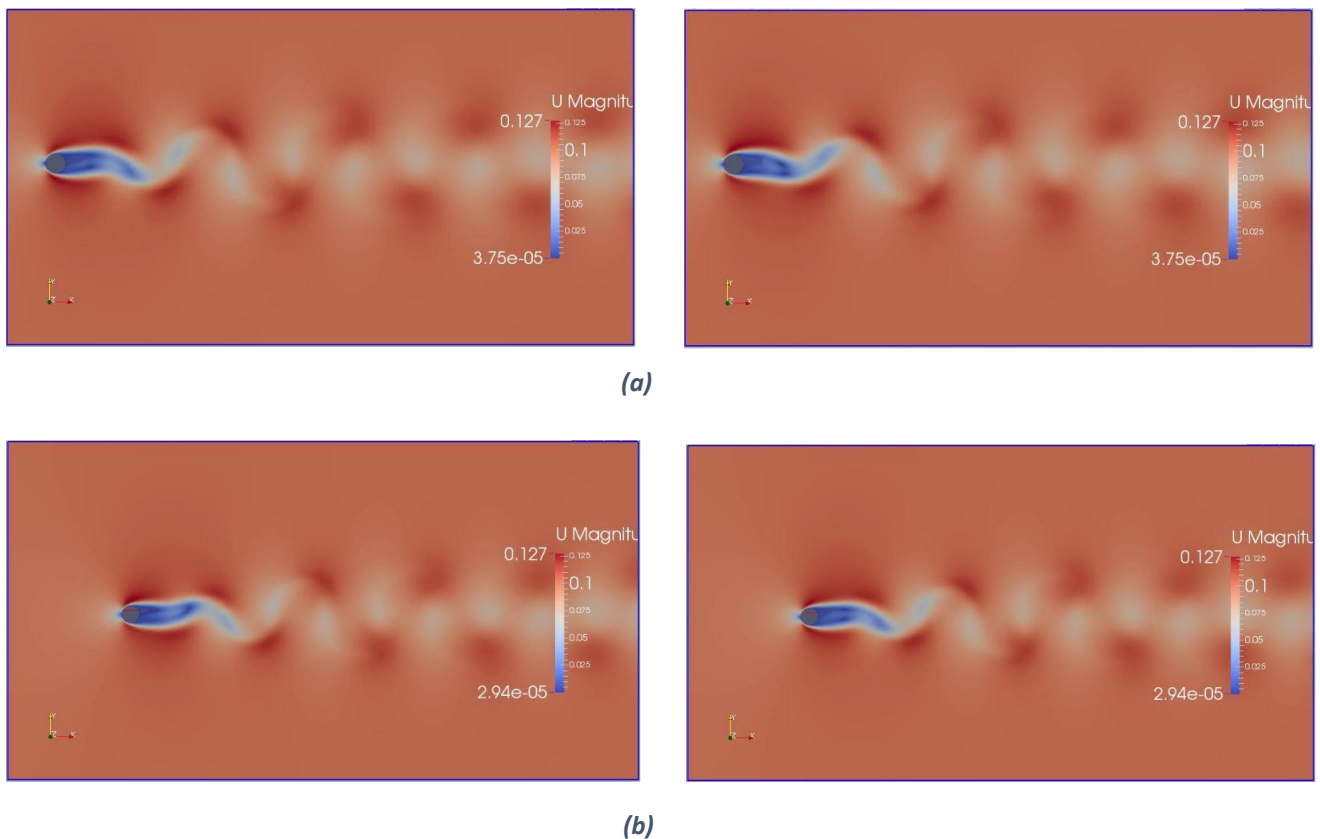


Figura 32. Campos de velocidades. (a) $Ur=11.5$ (b) $Ur=15$

En la figura 32 se muestra el campo de velocidades cuando el conjunto cilindro-lama se encuentra en la última posición de equilibrio en las dos simulaciones que se están estudiando. Se puede observar que, para ambos casos, el pico máximo de velocidad, cuyos valores son 0.127 m/s y 0.131 m/s , se produce tanto en la parte superior e inferior del cilindro como en los vórtices desprendidos. Esto es debido a que, como ya se ha explicado durante varias veces a lo largo de este trabajo, en esas zonas las líneas de corriente se aproximan mucho entre ellas y la velocidad es mayor conforme estas líneas estén más próximas entre ellas. Además, se puede

ver que en la zona de la placa la velocidad es mínima. Esto tiene el mismo razonamiento que antes, en esta zona las líneas de corriente están muy separadas debido a que el flujo se ha separado al interaccionar con la estructura cilindro-lama.

6.2.6 Presión

Por último, vamos a comentar el campo de presiones en el conjunto cilindro-lama. La siguiente figura muestra el campo de presiones en las dos simulaciones que se están estudiando en este trabajo:

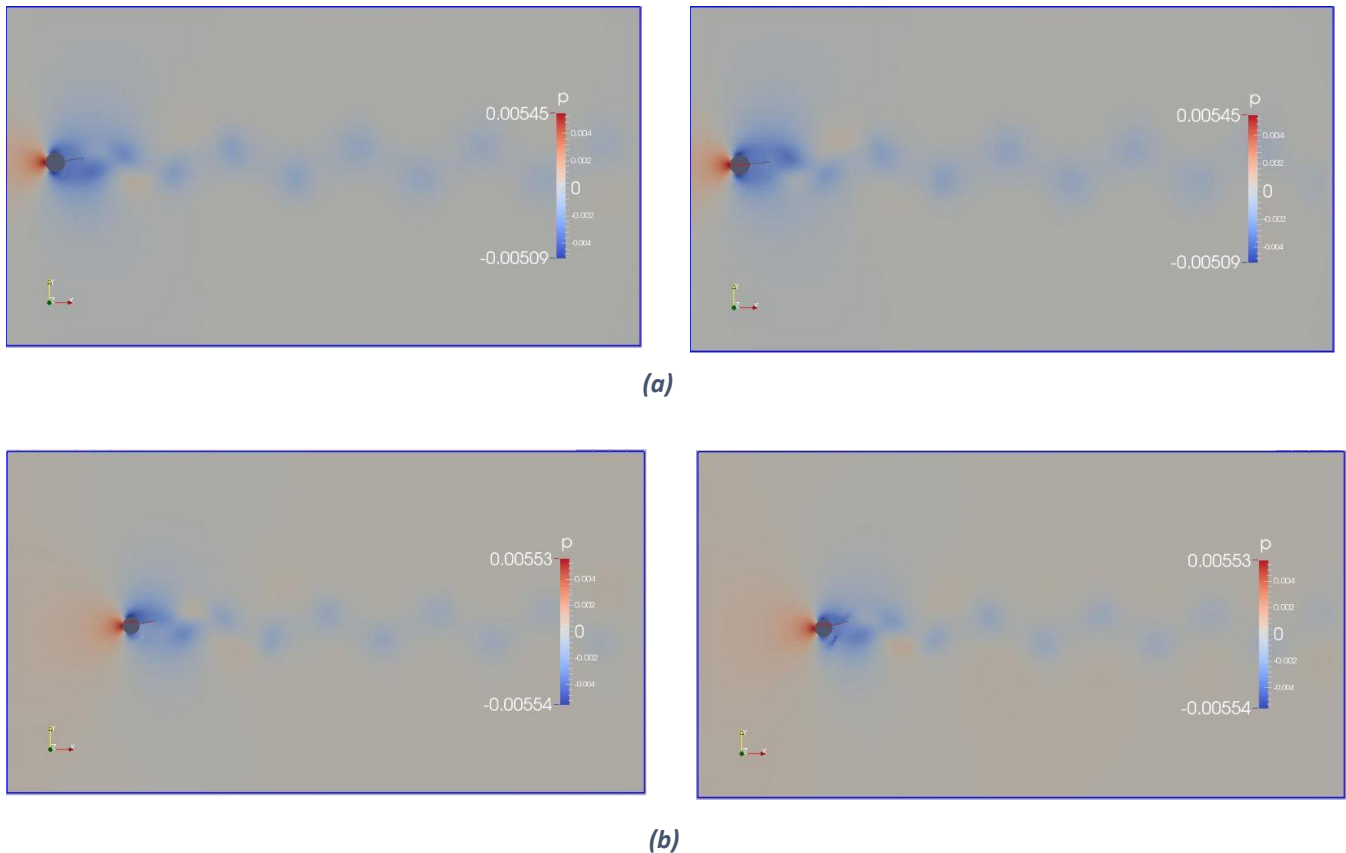


Figura 33. Campos de presiones. (a) $U_r=11.5$ (b) $U_r=15$

En la figura 33 se puede observar el campo de presiones en la última etapa de la evolución del ángulo de giro a lo largo del tiempo, en otras palabras, en la última posición de equilibrio para las dos simulaciones. Como explicó Prandtl en 1905, hay una diferencia de presiones entre la parte delantera y la parte trasera del conjunto cilindro-lama debido a la separación del flujo al interaccionar con la estructura. Justamente en la zona donde el flujo choca con el cilindro se produce el punto de máxima presión, cuyo valor es 0.00545 N/m^2 cuando $U_r = 11.5$ y 0.00553 N/m^2 cuando $U_r = 15$.

En la segunda imagen de la figura 33(b) se puede observar que hay datos anómalos en una zona situada justo debajo del cilindro. Esto es debido a que la deformación de la malla está siendo excesiva y el skewness de las celdillas en esa zona es muy alto. Esto se puede ver en la siguiente figura:

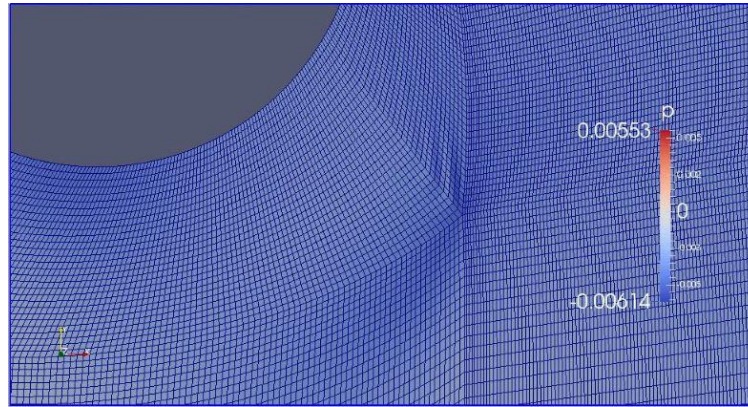


Figura 34. Deformación de la malla en la zona donde hay datos de la presión anómalos.

7. Conclusiones y trabajos futuros

Tras la realización de simulaciones numéricas del flujo inducido por un conjunto cilindro-lama, que actuaba como una unidad fija, variando el ángulo de giro, se ha llegado a la conclusión que, para un número de Reynolds de 50, el conjunto cilindro-placa tiene tres posiciones de equilibrio. En estas posiciones, los momentos debido a las fuerzas viscosas son iguales a los momentos realizados por las fuerzas de presión porque el Reynolds empieza a ser alto. Además, se ha observado que en el movimiento del conjunto cilindro-lama, los momentos originados por las fuerzas de presión son mucho mayores que los momentos realizados por las fuerzas viscosas. También, se ha explicado que la posición de equilibrio $\theta = 0$ no es estable debido a que hay flujo detrás de cilindro que va hacia el propio cilindro.

Asimismo, tras la realización de simulaciones numéricas del flujo inducido por un conjunto cilindro-lama, que es libre de rotar alrededor del centro del cilindro, con un número de Reynolds de 100 y considerando la interacción fluido-estructura como un sistema dinámico, se ha llegado a la conclusión que el movimiento que realiza el conjunto cilindro-placa tiene 4 etapas, explicadas anteriormente. Además, se ha observado que dos de estas fases se realizan de manera más rápida si aumentamos la velocidad reducida, por lo que, el conjunto cilindro-lama llegará más rápido a la última posición de equilibrio, donde permanecerá oscilando con una amplitud constante.

Comparando los valores del coeficiente Drag y del coeficiente Lift obtenidos en las simulaciones en el que el conjunto cilindro-lama es libre de rotar alrededor del eje z del centro del cilindro con los valores obtenidos en las simulaciones en el que el conjunto cilindro-lama actúa como un sólido rígido fijado en el centro del cilindro circular se ha llegado a la conclusión que tanto las fuerzas de presión como las fuerzas viscosas disminuyen mucho cuando el conjunto cilindro-placa se mueve.

Además, se ha observado que el proceso de desprendimiento de vórtices del conjunto cilindro-lama móvil cuando la velocidad reducida es 11.5 y cuando la velocidad reducida es 15 es similar al proceso de desprendimiento de vórtices de un cilindro circular en flujo laminar. En ambos casos, se desprende dos vórtices que avanzan realizando un movimiento en S.

En futuros trabajos, se podría estudiar el patrón de movimientos que realiza el conjunto cilindro-lama en un flujo laminar cuando la velocidad reducida disminuye considerablemente. También se podría estudiar las causas físicas que provocan el patrón de movimientos que hemos explicado en este trabajo a través de la observación del comportamiento del flujo.

Referencias

- ¹C.H.K. Williamson. "Vortex dynamics in the cylinder wake." (1996)
- ²A. Roshko. "On the drag and shedding frequency of two-dimensional bluff bodies." (1954)
- ³A. Roshko. "On the wake and drag of bluff bodies." (1955)
- ⁴C.J. Apelt, G.S. West y A.A. Szewczyk. "The effects of wake splitter plates on the flow past a circular cylinder in the range $1 \times 10^4 < Re < 5 \times 10^4$ ". (1973)
- ⁵K. Kwon y H. Choi. "Control of laminar vortex shedding behind a circular cylinder using splitter plates." (1996)
- ⁶Jie Wu, Jing Wu y Jiapu Zhan. "Characteristics of flow over a circular cylinder with two attached filaments." (2016)
- ⁷R. Abdi, N. Rezazadeh y Meisam Abdi. "Investigation of passive oscillations of flexible splitter plates attached to a circular cylinder." (2018)
- ⁸U. Lacis, N. Brosse, F. Ingremau, A. Mazzino, F. Lundell, H. Kellay y S. Baghen. "Passive appendages generate drift through symmetry breaking." (2014)