

# EFECTOS DEL MODELADO DE TURBULENCIA SOBRE LAS FUERZAS AERODINÁMICAS EN UN CILINDRO FIJO

Nicolás I. Seguenzia<sup>a</sup>, Patricio Canciani<sup>a</sup>, César I. Pairetti<sup>a,b</sup> y Hugo D. Navone<sup>a,c</sup>

<sup>a</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - Universidad Nacional de Rosario, Pellegrini 250, CP 2000, Rosario, Argentina

<sup>b</sup>Sorbonne Université and CNRS, Institut Jean Le Rond d'Alembert, UMR 7190, 4 Place Jussieu, Paris, France

<sup>c</sup>Instituto de Física de Rosario (CONICET-UNR), Bv. 27 de Febrero 210 Bis, CP 2000, Rosario, Argentina

nicolasseguenzia@gmail.com

## INTRODUCCIÓN

La evolución de la tecnología y el desarrollo de *Software* en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de las últimas décadas han sido piezas fundamentales para poder obtener diseños aerodinámicos cada día más eficientes y resolver diversos problemas de la ingeniería relacionadas a todo tipo de flujos. En la actualidad, dicha tecnología se ve reflejada en la existencia de diversos paquetes que incluyen modelos de resolución para las ecuaciones de Navier-Stokes mediante el uso de CFD.

En este trabajo, se realiza un análisis de flujo incompresible y newtoniano alrededor de un cilindro circular mediante CFD, el cual actualmente es un problema clásico de la mecánica de los fluidos para comprender la separación inestable del flujo alrededor de cuerpos romos. Para llevar a cabo dicho análisis mediante CFD, se emplea Simulación Numérica Directa (DNS) y Modelos de Turbulencias RANS (*k-Omega sst*, *k-epsilon*) y LES (Large Eddy Simulation), utilizando los *Software* open-source *OpenFOAM* y *Basilisk*. En este aspecto, se caracteriza el patrón de flujo en la estela para regímenes de flujo a distintos Números de Reynolds (*Re*). De esta manera, las soluciones numéricas obtenidas se comparan entre sí, reportando los números adimensionales aerodinámicos Coeficiente de Lift (*CL*) y Coeficiente de Drag (*CD*).

Además, cabe destacar el efecto de patrón de vorticidad aguas abajo del cilindro a altos números de Reynolds (*Re*), para lo cual se analiza la variación en frecuencia de la emisión de vórtices, reportando comparaciones en los resultados obtenidos mediante el Número de Strouhal (*St*).

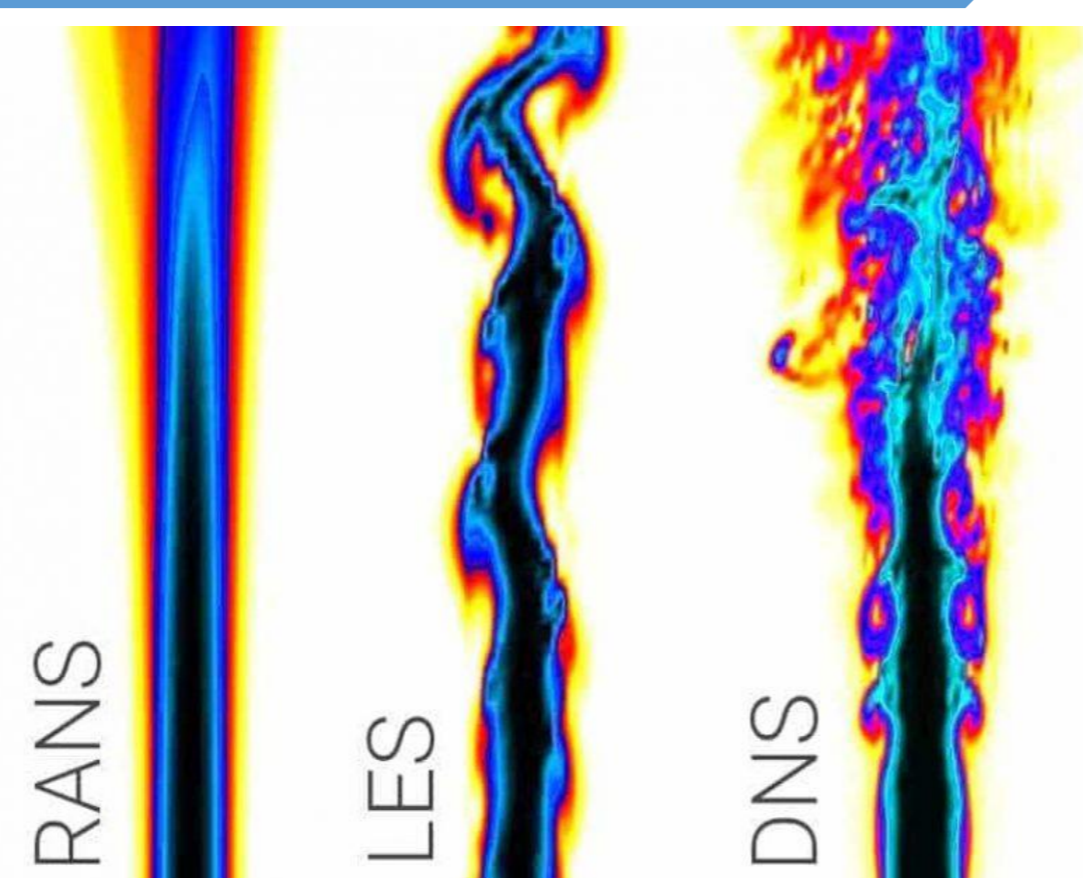


Figura 1. Comparativas de vorticidad RANS, LES, DNS [7].

## VALIDACIÓN Y RESULTADOS

Se realiza una validación del solver *PimpleFoam* de *OpenFOAM* [2] y del solver *Navier-Stokes Centrado en Celdas* de *Basilisk* [3] para los casos en estudio, adquiriendo como parámetros de referencias, Números de Reynolds (*Re*) adoptados por referencias [5] y [6], para así entonces, validar los resultados obtenidos de Coeficiente de Lift (*CL*) y Coeficiente de Drag (*CD*) por los *Software* en estudio. Además, en la misma validación, se analizan diferentes mallas estructuradas a emplear en el *Software OpenFOAM*, con el objetivo de observar el comportamiento y convergencia de cada uno de los métodos de resolución a emplear en dicho *Software*.

En *Tabla 1*, se observa el número de celdas totales aplicadas en cada una de las Mallas Estructuradas (M) y la cantidad de Celdas por Diámetro (CPD) equivalentes, considerando a CPD como número característico que hace referencia al mallaado.

Mallados Estructuradas	Número de Celdas
Malla Estructurada 1 (M1)	9200
Malla Estructurada 2 (M2)	36800
Malla Estructurada 3 (M3)	56800

Re	CPD (M1)	CPD (M2)	CPD (M3)
20	26.67	53.77	60.21
40	26.67	53.77	60.21
100	26.67	53.77	60.21
200	26.67	53.77	60.21
500	43.34	86.53	71
1.000	57.6	114.39	114.39
10.000	152.1	225.87	225.55
100.000	413.45	442.37	618.98

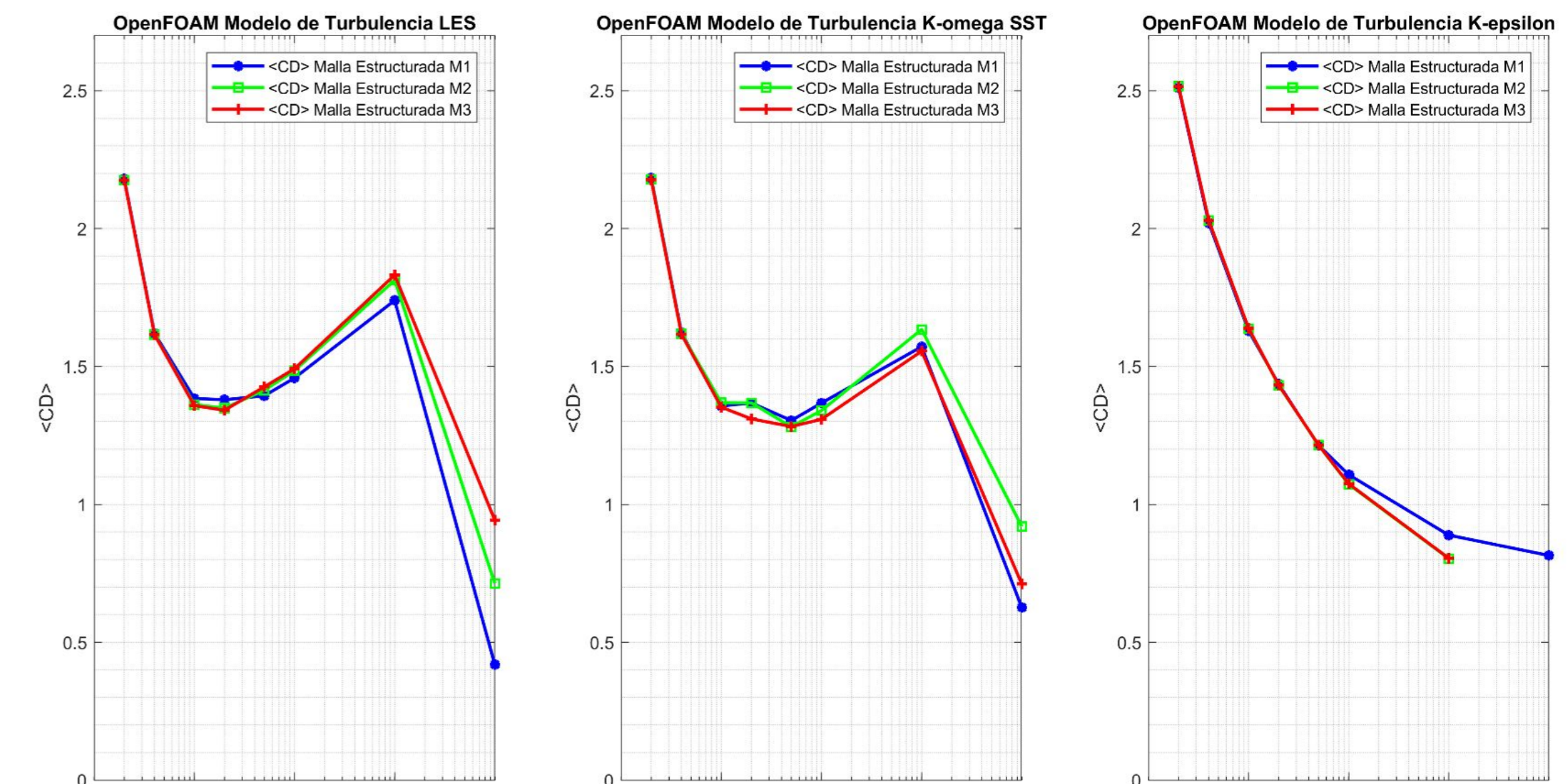


Tabla 1. Detalles de Mallas Estructuradas (M)

Figura 5. Resultados de Coeficientes de Drag en Mallas Estructuradas (M1, M2, M3)

## MARCO TEÓRICO y DEFINICIONES

Los *Software OpenFOAM* y *Basilisk* resuelven el fenómeno físico planteado en cada caso en estudio mediante el Método de Volúmenes Finitos (FVM), el cual, representa y evalúa las ecuaciones diferenciales parciales en forma de ecuaciones algebraicas inmersas en el estudio de la dinámica de los fluidos. En este caso, se resuelve la Ecuación de Continuidad (1) y las Ecuaciones de Navier-Stokes (2) mediante FVM, las cuales expresan de forma matemática la conservación de masa y la conservación del momento lineal, determinando el comportamiento del flujo del fluido alrededor del cilindro en estudio.

A continuación, se detallan las Ecuaciones (1) y (2) [1], para flujo incompresible de un fluido newtoniano con propiedades constantes.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (2)$$

El uso de DNS implica resolver numéricamente dichas Ecuaciones (1) y (2), mientras que RANS y LES agregan un modelo de corte turbulento, por lo tanto, la Ecuación (2) se ve afectada por la adición de un tercer término denominado Tensor de esfuerzos específico de Reynolds ( $\tau_{turbulento}$ ) en el campo de fuerzas.

• **Fuerza de arrastre (FD):** Fuerza neta ejercida por un fluido sobre un objeto en la dirección del flujo debido a efectos combinados de fuerzas de fricción y fuerzas de presión.

• **Fuerza de sustentación (FL):** Fuerza neta ejercida por un fluido sobre un objeto que es perpendicular a la dirección del flujo debido a efecto combinado de fuerzas viscosas y de presión.

• **Número de Strouhal (St):** Número adimensional que describe los mecanismos de un flujo oscilante. En este trabajo, se considera un cilindro circular infinitamente largo, por lo tanto, la producción de los vórtices se determina por la siguiente relación empírica [1].

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad ; \quad C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad ;$$

Siendo  $\frac{1}{2} \rho V^2 A$ , la presión dinámica.

$$Nro. \text{ Strouhal } St = \frac{f d}{u} = 0,198 \left(1 - \frac{19,7}{Re}\right) \quad ; \quad 250 < Re < 2 \times 10^5 \quad (3)$$

## HIPÓTESIS

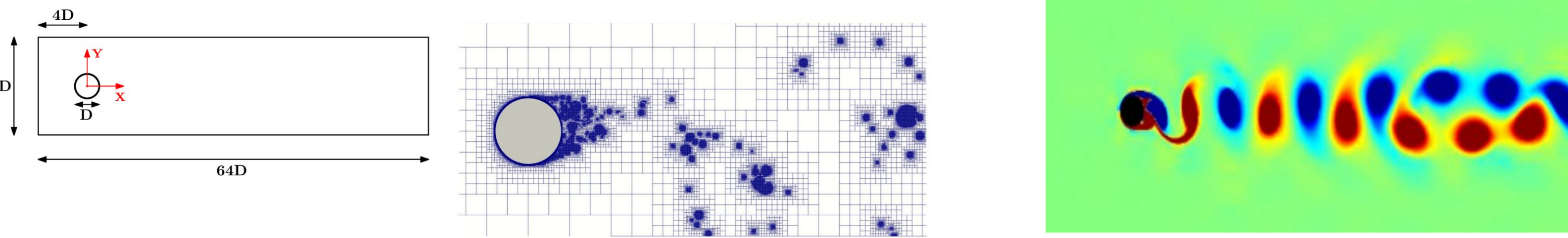
• **Flujo incompresible:** Aquel fluido que su densidad permanece aproximadamente constante a lo largo de todo el flujo. Incluye a los líquidos y a los flujos compresibles que se pueden aproximar como incompresibles bajo condiciones de Número de Mach < 0,3.

• **Fluido newtoniano:** Fluidos para los cuales la razón de deformación es proporcional al esfuerzo cortante.

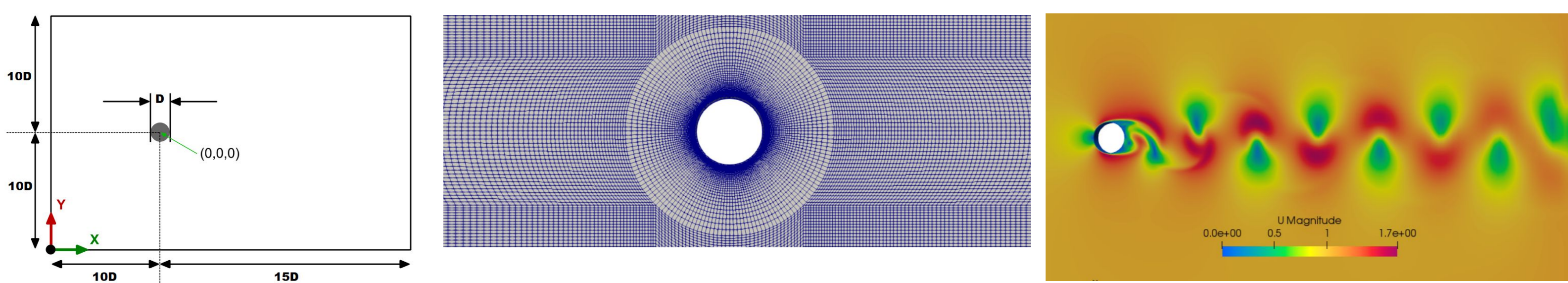
• **Flujo isotérmico:** Cambios locales de temperatura son pequeños o inexistentes, condición que elimina resolver a la ecuación diferencial de conservación de energía.

## METODOLOGÍA

• **Dominio computacional y discretización del mismo:** Cabe destacar que para realizar adecuadas comparaciones entre ambos *Software*, se ha verificado que la longitud del dominio computacional 2D detrás del cilindro sea lo suficientemente grande para que los efectos que se produzcan en el campo de flujo lejano estén también muy alejados del mismo, de modo que su impacto en los cálculos sea totalmente insignificante y se puedan adquirir resultados más confiables.



Figuras 2. Dominio computacional 2D en Software Basilisk [3], utilizando Nivel de Refinamiento Malla Adaptativa (AMR) Level = 11. Campo de vorticidad Re=1.000



Figuras 3. Dominio computacional 2D en Software OpenFOAM [4] utilizando Malla Estructurada Re=1000. Campo de velocidad Re=1.000

• **Condición de no-deslizamiento:** Para ambos *Software* se ha considerado resolver los efectos de la subcapa viscosa ( $y^+ < 1$ ) perteneciente a la capa límite producidos en la superficie del cilindro. De esta manera, para la malla estructura en el *Software OpenFOAM* se ha utilizado la solución de Blasius de flujo laminar para placa plana y así poder realizar correctas aproximaciones del espesor de capa límite.

• **Condiciones de borde para Modelo de Turbulencia RANS (k-omega SST : k-epsilon) en Software OpenFOAM**

- **Intensidad de turbulencia:** Flujo que se origina proveniente de un fluido en estado de reposo. Se adopta Intensidad de Turbulencia = 1% para los casos simulados con Modelos de Turbulencia RANS.
- **k:** Energía cinética turbulenta  $k = \frac{3}{2} (U')^2$
- **ε:** Disipación de la turbulencia  $\epsilon = \frac{C_\mu k^2}{\mu} \quad ; \quad C_\mu = 0,09$
- **ω:** Disipación específica turbulenta  $w = \frac{\rho k}{\mu} \frac{\mu_t - 1}{\mu} \quad ; \quad w = \frac{\epsilon}{C_\mu k} \quad ; \quad C_\mu = 0,09$
- **νt:** Viscosidad cinemática turbulenta  $\nu_t = \frac{k}{w}$

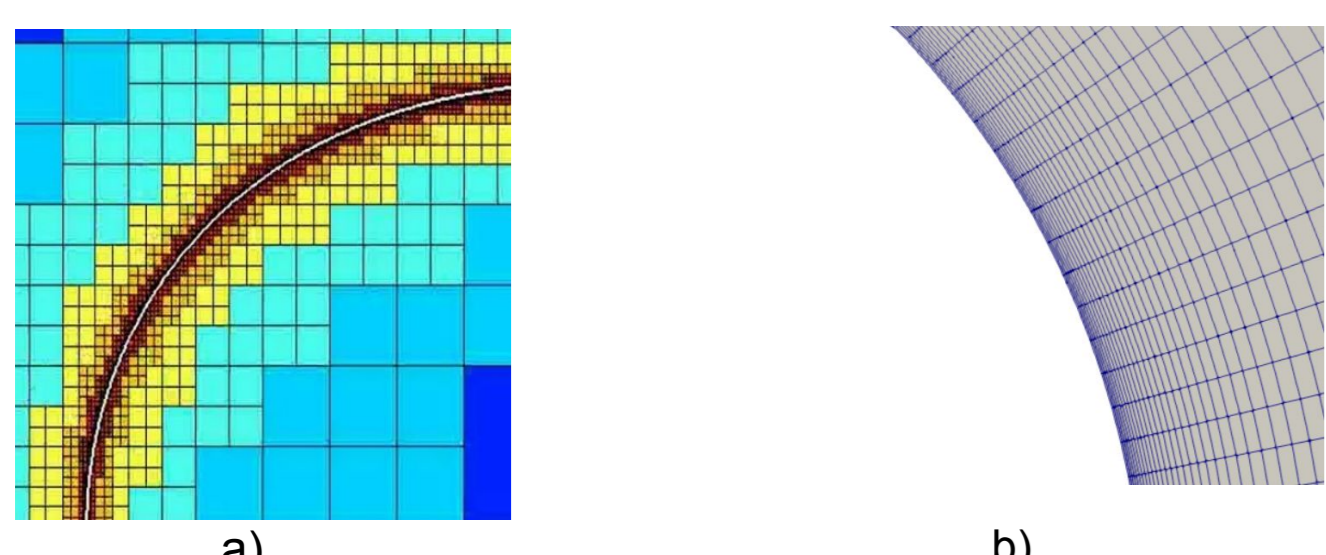


Figura 4. Refinamiento en Malla para resolver subcapa viscosa. a) Basilisk. b) OpenFOAM

## REFERENCIAS

- [1] Yunus A. Cengel; John M. Cimbala. *Mecánica de Fluidos, Fundamentos y Aplicaciones 1st ed*, McGraw Hill
- [2] User Guide <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide>
- [3] Bénard-von Kármán Vortex Street for flow around a cylinder at Re=160 <http://basilisk.fr/src/examples/karman.c>
- [4] Tutorial 3: 2D Circular cylinder - Vortex shedding [https://wiki.openfoam.com/Collection\\_by\\_authors#Joel\\_Guerrero](https://wiki.openfoam.com/Collection_by_authors#Joel_Guerrero)
- [5] Schlichting H., Gersten K., (2017) *Boundary-Layer Theory 9th ed*, Springer
- [6] Norberg C. (2002). *Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements*
- [7] Maries et al (2011). *Tensors in Turbulent Combustion: Turbulent Combustion Modeling*

## CONCLUSIONES

Las Simulaciones Numéricas Directas (DNS), tanto en *Basilisk* como *OpenFOAM* (LES) logran representar, con las mallas empleadas, los flujos para bajos números de Reynolds ( $Re < 1.000$ ), llegando a un acuerdo razonable con los resultados experimentales de referencia. En este rango, los modelos de turbulencia no generan correcciones significativas, con lo cual su uso sólo aumenta la complejidad y costo computacional, sin beneficios. De hecho, el modelo *k-epsilon* sobrestima el valor del Drag, aumentando el error de la predicción. Esto tiene sentido, ya que a bajos *Re* no se cumplen las hipótesis de los Modelos de Turbulencia RANS.

Al aumentar el *Re* ( $1.000 < Re < 100.000$ ), las discrepancias observadas crecen significativamente. Más aún, los errores numéricos en el Lift denotan ciertos problemas de convergencia con *DNS*, lo que puede deberse a un refinamiento en malla insuficiente para capturar la capa límite, que reduce su espesor al aumentar el *Re*. Si bien es esperable que lo mismo ocurra en las simulaciones *LES* de *OpenFOAM*, el error numérico en este caso se nota como una sobre estimación del drag. El uso del modelo *k-Omega SST* para los *Re* elevados compensa, en parte, este error, como se observa en la *Figura 6*.

En cuanto al comportamiento periódico de las fuerzas aerodinámicas, cabe notar que el modelo *k-epsilon* elimina las oscilaciones por completo y el modelo *k-Omega SST* las atenúa significativamente, aunque mantiene una frecuencia de oscilación relativamente cercana a la predicha por el *DNS* y los valores de referencia.

En concreto, con estos resultados observamos la utilidad del modelo *k-Omega SST* para capturar valores medios de arrastre y sustentación a partir del régimen de transición turbulenta ( $Re > 1000$ ). En este sentido, el presente estudio muestra la importancia de optar modelos de turbulencia adecuados, en función del régimen de flujo. El mismo impactará no sólo en la precisión de los resultados, sino también en el costo computacional y la estabilidad numérica de la simulación. En particular, hemos observado cómo el uso de formulaciones RANS atenúa significativamente los fenómenos transitorios.