



MECON 2022

XXXVIII CONGRESO ARGENTINO DE MECÁNICA COMPUTACIONAL



EFECTOS DEL MODELADO DE TURBULENCIA SOBRE LAS

FUERZAS AERODINÁMICAS EN UN CILINDRO FIJO Nicolás I. Seguenzia^a, Patricio Canciani^a, César I. Pairetti^{a,b} y Hugo D. Navone^{a,c}

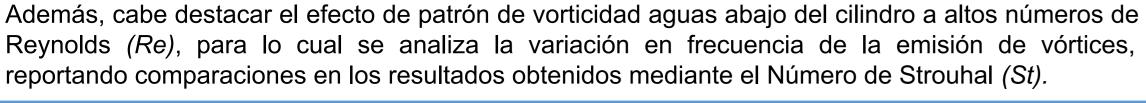
^aFacultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - Universidad Nacional de Rosario, Pellegrini 250, CP 2000, Rosario, Argentina ^bSorbonne Université and CNRS, Institut Jean Le Rond d'Alembert, UMR 7190, 4 Place Jussieu, Paris, France ^cInstituto de Física de Rosario (CONICET-UNR), Bv. 27 de 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 flujo de fluidos. 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 (C) open-source OpenFOAM ® y Basilisk. En este aspecto, se caracteriza el patrón de flujo en la estela para regímenes de flujo a distintos Numeros 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).



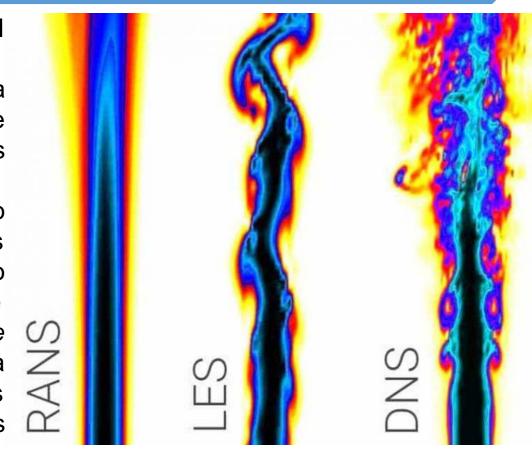


Figura 1. Comparativas de vorticidad RANS, LES, DNS [7].

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.

$$\nabla . \overrightarrow{\mathbf{u}} = 0 \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \overrightarrow{u} = 0$$

$$\rho \frac{\partial \overrightarrow{u}}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\overrightarrow{u} \overrightarrow{u}) = - \nabla P + \mu \nabla^{2} \overrightarrow{u}$$
(1)

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 $\overrightarrow{\nabla}$ 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.

Ambas fuerzas dependen de la densidad del fluido, la velocidad de corrientes arriba y el tamaño, forma y orientación del cuerpo, y no es práctico realizar listas de fuerzas para diversas situaciones. Por lo tanto, se utilizan parámetros adimensionales que representan dichas características de arrastre y sustentación. Dichos parámetros se denominan Coeficiente de Drag (CD) y Coeficiente de Lift (CL).

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

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].

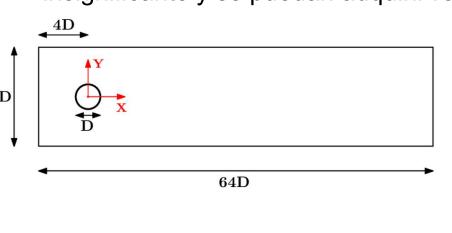
Nro. Strouhal
$$S_t = \frac{\text{fd}}{\text{u}} = 0,198 \left(1 - \frac{19,7}{\text{Re}} \right)$$
; $250 < \text{Re} < 2x10^5$ (3)

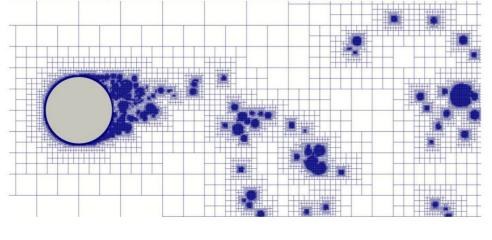
HIPÓTESIS

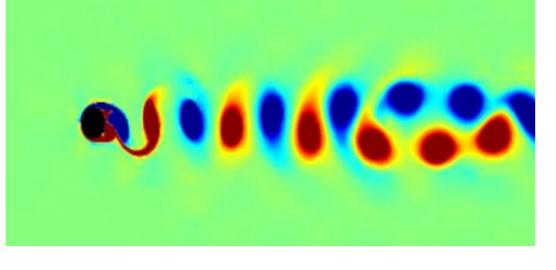
- Flujo Incompresible: Aquel fluido que su densidad permanece aproximadamente constante a lo largo de todo el flujo. Incluye a los líquidos y a los flujos compresibles que se pueden aproximar como incompresibles bajo condiciones de Número de Mach < 0,3.
- Fluido newtoniano: Fluidos para los cuales la 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

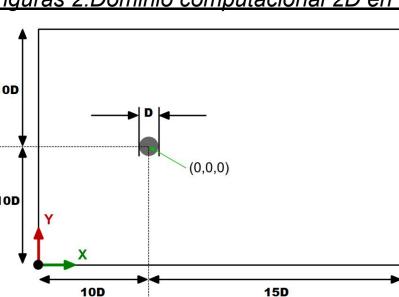
Dominio computacional y discretización del mismo: Cabe destacar que para realizar adecuadas comparaciones entre ambos Software, se ha verificado que la longitud del dominio computacional 2D detrás del cilindro sea lo suficientemente grande para que los efectos que se produzcan en el campo de flujo lejano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

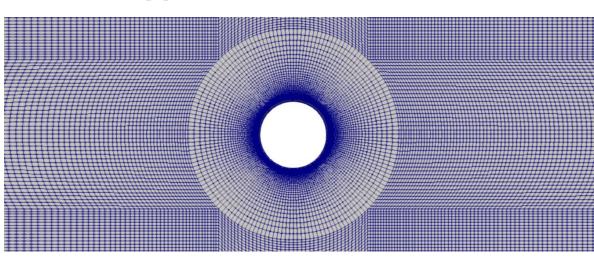


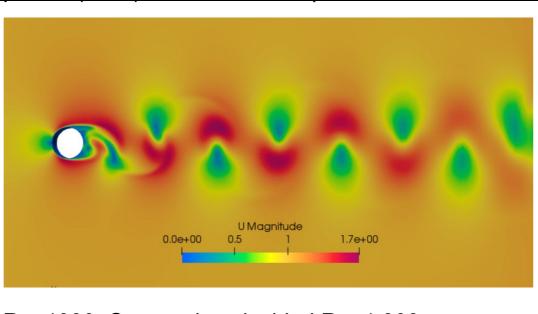




Figuras 2.Dominio computacional 2D en Software Basilisk [3], utilizando Nivel de Refinamiento Malla Adaptativa (AMR) Level = 11. Campo de vorticidad Re=1.000



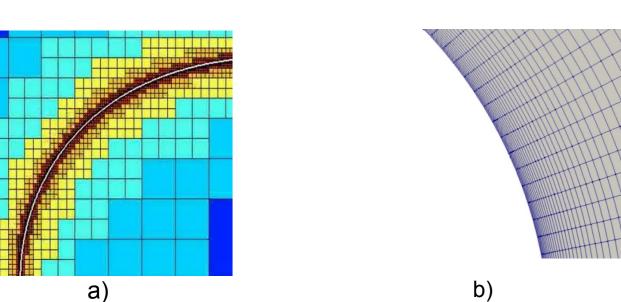




Condiciones de borde para Modelo de Turbulencia RANS (k-omega

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.



• 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.

SST ; k-epsilon) en Software OpenFOAM • **k**: Energía cinética turbulenta $k = -(UI)^{2}$

ε: Disipación de la turbulencia

• w: Disipación específica turbulenta

• **v t**: Viscosidad cinemática turbulenta

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

[7]. Maries et al (2011). Tensors in Turbulent Combustion: Turbulent Combustion Modeling

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

[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

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 sobreestima 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 Modelo 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.

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 a la magnitud de refinamiento en el mallado.

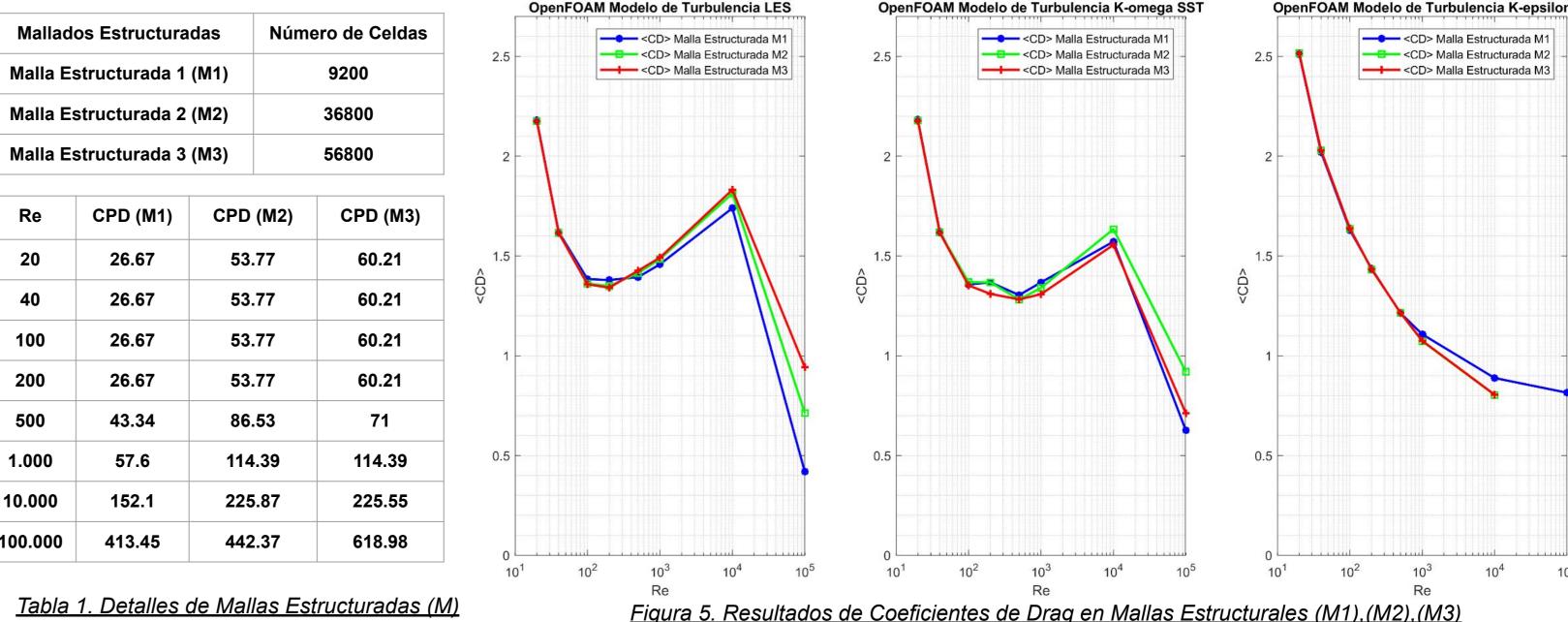


Tabla 1. Detalles de Mallas Estructuradas (M)

Observando la Figura 5, se concluye que se ha conseguido convergencia de resultados en el rango 20 < Re < 10.000 utilizando las diferentes Mallas Estructuradas en Tabla 1 con los distintos métodos de resolución en OpenFOAM. Sin embargo, en simulaciones de Re=100.000 sólo se obtuvo convergencia de resultados en los métodos de resolución LES y RANS k-Omega SST, mientras que los resultados obtenidos por RANS k-epsilon divergen a órdenes de magnitud muy grandes. Esta particularidad, intuye a pensar acerca de la sensibilidad en convergencia que se produce del método de resolución RANS k-epsilon al refinar la Malla Estructurada.

Además, cabe destacar que existe relación entre el comportamiento de los resultados obtenidos por LES y Modelo de Turbulencia k-Omega SST. mientras que no sucede dicha similitud en el comportamiento de resultados obtenidos por el Modelo Turbulencia k-epsilon en ningún rango de los Número de Reynolds (Re) adoptados.

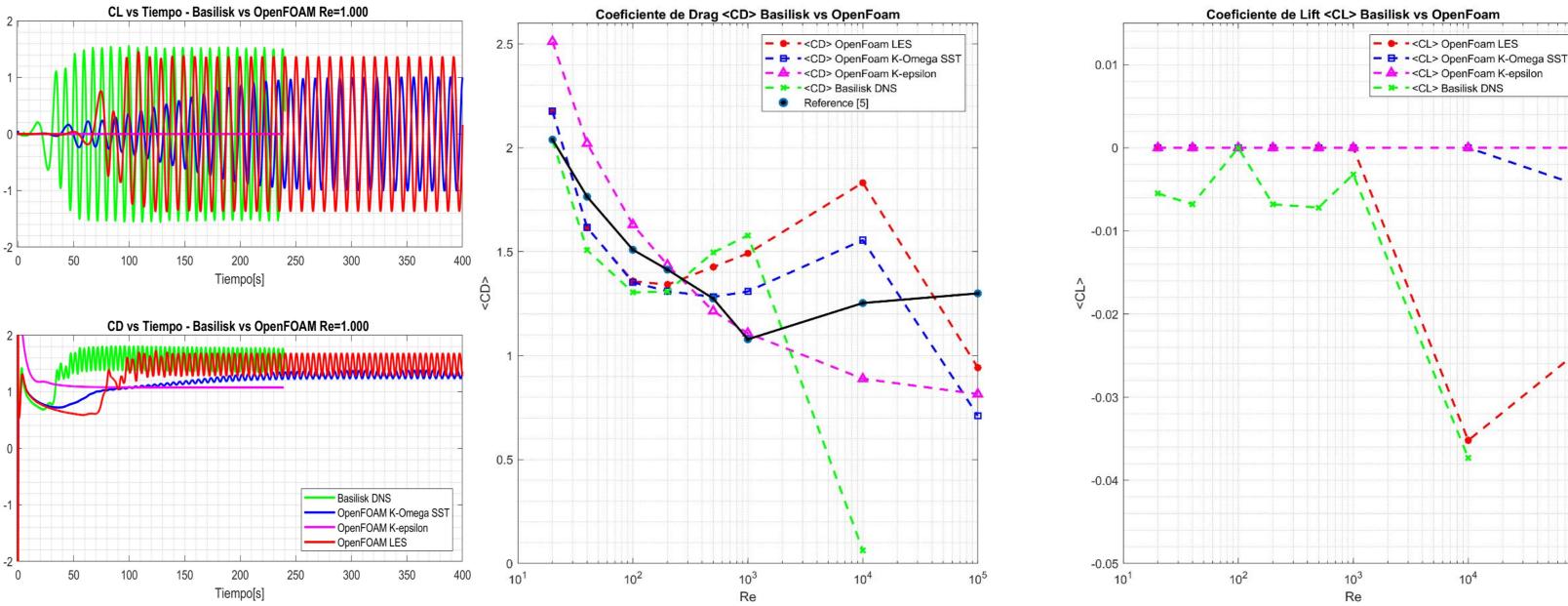
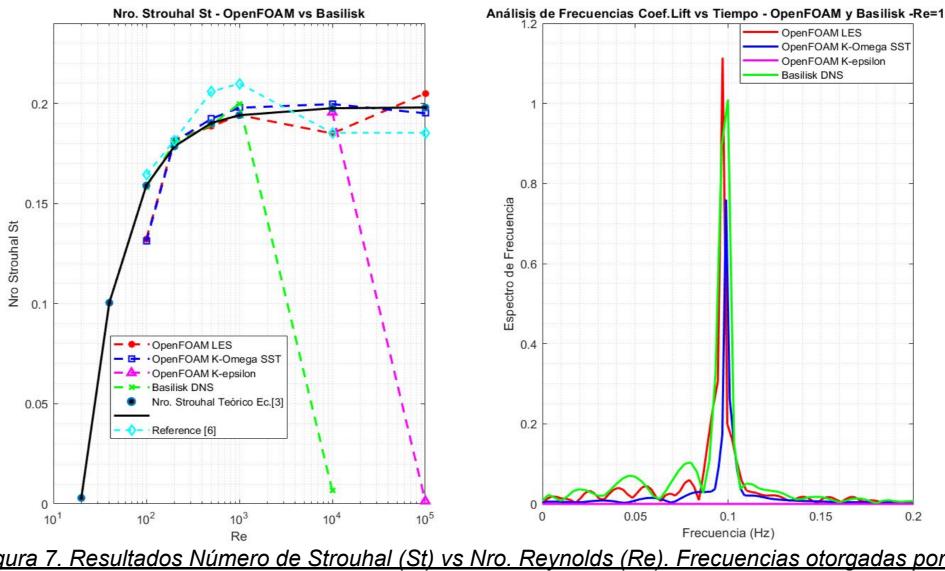


Figura 6. Resultados comparativos OpenFOAM (DNS, LES, RANS) vs Basilisk - Coeficiente de Drag y Coeficiente de Lift En Figura 6, notamos los resultados promedios de Coeficiente de Drag <CD> y Coeficiente de Lift <CL> otorgados por OpenFOAM, Basilisk y

resultados experimentales por la referencia [5]. A simple vista, podemos observar que a bajos números de Reynolds, los resultados de <CD> en ambos Software se asemejan a los resultados

experimentales [5]. En cambio, al sobrepasar Re=1.000, se presenta una mayor dispersión de resultados. Además, Basilisk presenta un valor casi nulo en Re=10.000, la cual, analizando la gráfica <CD> vs Tiempo [seg] se supone que el nivel de refinamiento adoptado de Malla es insuficiente para resolver el problema con DNS, subestimando significativamente el corte sobre el cilindro. Por otra parte, los resultados de *<CL>* representan la simetría que se produce en las variaciones de amplitudes de la onda periódica obtenida por

ambos Software, de ésta manera, se concluye acerca de la captación del desprendimiento alternativo de torbellinos o vórtices en la estela del cilindro. Por lo tanto, se concluye que a medida que los Numero de Reynolds (Re) aumentan, se dificulta cada vez más la estabilidad numérica para captar dicho fenómeno utilizando los métodos de resolución DNS, LES y k-Omega SST, ya que físicamente, se está dando a entender que se producen fuerzas descendentes de Lift constantes en el cilindro según Figura 6. De todas formas, dichos valores de fuerzas en el cilindro, son insignificantes.



Analizando los resultados obtenidos del Número de Strouhal (St) vs Reynolds (Re) para cada método de resolución en CFD, se concluye que los métodos de resolución DNS, LES y Modelo de Turbulencia RANS k-Omega SST poseen un comportamiento semejante a los valores otorgados por referencia [6] y St. Teórico en el rango 100<Re<1.000. Por otra parte, el Modelo de Turbulencia RANS k-epsilon posee valores nulos en el Número de Strouhal en su mayoría , esto se debe a que sus gráficas CL vs Tiempo no presentan una onda periódica sinusoidal (Ver Figura 6).

Luego, observando el rango 1.000<Re<100.000, los resultados se encuentran completamente dispersos entre todos los métodos de resolución en estudio, resaltando la particularidad del Modelo de Turbulencia RANS k-Omega SST, el cual se ha comportado prácticamente de forma análoga a la Ec. (3) perteneciente al Nro. de Strouhal Teórico en todos los rangos de Re analizados.

Figura 7. Resultados Número de Strouhal (St) vs Nro. Reynolds (Re). Frecuencias otorgadas por Métodos de resolución Re=1.000

CONCLUSIONES