

## **SIMULACION COMPUTACIONAL DEL CUERPO DE AHMED CON ANGULOS DE INCIDENCIA DE VIENTO VARIABLES EN EL TIEMPO**

### **AHMED'S BODY COMPUTATIONAL SIMULATION WITH VARIABLE WIND INCIDENCE ANGLES OVER TIME**

**Marcelo I. Adotti<sup>a</sup>, Hugo G. Castro<sup>a,b</sup>, Rodrigo R. Paz<sup>a,c</sup> y Mario E. De Bortoli<sup>a,b</sup>**

<sup>a</sup>*Instituto de Modelado e Innovación Tecnológica (IMIT) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Corrientes, Argentina. italoaddotti@conicet.gov.ar, <http://imit.conicet.gov.ar/>*

<sup>b</sup>*Grupo de Investigación en Mecánica de Fluidos (GiMeF), Facultad Regional Resistencia de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN). Chaco, Argentina*

<sup>c</sup>*ANSYS Inc, Livermore, CA., USA. rodrigo.r.paz@gmail.com*

**Palabras clave:** Fluidodinámica computacional, Aerodinámica vehicular, Mallas solapadas, Malla dinámica.

**Resumen.** En este trabajo se simula computacionalmente el flujo de viento alrededor del modelo simplificado conocido como cuerpo de Ahmed, variando el ángulo de incidencia del viento acorde a una rotación alternativa impuesta a la zona del dominio computacional que se moverá con el cuerpo. La variable de movimiento escogida es el ángulo de guiñada, la cual es función de la ecuación que describe el movimiento oscilatorio de la malla. La simulación computacional se lleva a cabo utilizando el código libre y abierto OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation), utilizando la técnica de mallas solapadas conocida como overset. Mediante esta técnica es posible definir amplios movimientos angulares en la zona móvil sin problemas de deformación de sus celdas. Se analizan estadísticamente los coeficientes aerodinámicos para distintos ángulos adoptados, así como el comportamiento de la estructura del flujo turbulento para cada uno de éstos. Los resultados son además comparados con trabajos experimentales con el cuerpo inmóvil, de tal manera de contrastar las diferencias en las propiedades del flujo.

**Keywords:** CFD, Vehicle aerodynamics, Overset meshes, Dynamic mesh.

**Abstract.** In this work, the wind flow around the simplified model known as Ahmed's body is computationally simulated, varying the angle of incidence of the wind according to an alternative rotation imposed on the area of the computational domain that is moving with the body. The chosen variable of movement is the yaw angle, which is a function of the equation that describes the oscillatory movement of the mesh. The computational simulation is carried out using the free and open source code OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation), using the overlapping mesh technique known as Overset. By means of this technique it is possible to define wide angular movements in the mobile area without problems of deformation of its cells. The aerodynamic coefficients for different adopted angles are statistically analyzed, as well as the behavior of the turbulent flow structure in each case. The results are also compared against a previous experimental work where the body is fixed, in order to contrast the differences in the properties of the flow.

## 1. INTRODUCCIÓN

El cuerpo de [Ahmed et al. \(1984\)](#) es un modelo estándar propuesto para el estudio de la aerodinámica de vehículos terrestres, sirviendo como punto de referencia para calibrar túneles de viento, códigos computacionales, y para extrapolar resultados a fines de diseño o industriales.

Tradicionalmente, los estudios realizados para representar el movimiento de un determinado cuerpo inmerso en un flujo turbulento incidente como el que caracteriza a los vehículos de carretera expuestos a condiciones de viento de la capa límite atmosférica (Atmospheric Boundary Layer, ABL) son llevados a cabo simplemente haciendo incidir este flujo sobre el modelo, el cual no altera su posición durante el tiempo de ensayo. La condición impuesta permite calcular las cargas aerodinámicas actuantes sobre éste, acorde a su alineación estática respecto del flujo incidente, pero no permite determinar la historia de estas cargas por los efectos de una maniobra o cambios bruscos en la incidencia de viento durante un período de tiempo. En consecuencia, bajo las condiciones anteriores, los resultados son representativos de una posición fija respecto de una configuración particular de flujo turbulento incidente.

La Fluidodinámica Computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD) cuenta con metodologías que permiten simular problemas de frontera móvil, necesarias para representar la historia de las cargas en un marco temporal de un cuerpo con movimiento no permanente sobre el cual incide un flujo turbulento. Este movimiento puede ser prescripto o retroalimentado por esquemas de acople interacción fluido-estructura (Fluid Structure Interaction, FSI). Algunas técnicas de fronteras móviles implementadas en el Método de Volúmenes Finitos (Finite Volume Method, FVM) tales como (Arbitrary Lagrangian-Eulerian ALE) ([Trépanier et al., 1991](#)) poseen ciertas dificultades en procesar grandes desplazamientos de frontera móvil, debiendo limitar deformaciones excesivas en las mallas o requiriendo remallado a fin de evitar efectos difusivos por baja calidad de sus elementos; mientras que otras que sí permiten grandes desplazamientos (Immerse Boundary Method IBM) ([Peskin, 2002](#)), (Volume of Fluid VoF) ([Hirt y Nichols, 1981](#)), Level-set Method (LSM) ([Adalsteinsson y Sethian, 1995](#)), no son adecuadas para representar fronteras móviles de geometrías complejas, como puede ser el caso del cuerpo de Ahmed móvil en un flujo de fluido turbulento.

En respuesta a las limitaciones expuestas, existe otro método de fronteras móviles implementado en FVM, denominado Método Quimera o de Mallas Solapadas (Chimera mesh u Overset Grid Method, OM) ([Meakin, 1993](#); [Prewitt et al., 2000](#); [Wolf, 2011](#)), que permite simular grandes desplazamientos con buena resolución de mallado. En este sentido también es posible mencionar al método de mallas deslizantes, el cual se encuentra limitado a movimiento giratorios.

El objetivo de este trabajo es simular con el software OpenFOAM y su implementación de OM, el escurrimiento de un flujo turbulento sobre el cuerpo de Ahmed bajo condiciones de viento con ángulo incidente variable en el tiempo, acorde a un movimiento prescripto sobre el ángulo de guiñada  $\beta$  del cuerpo. Los resultados obtenidos permiten evidenciar las bondades y dificultades del OM, con las cuales se podrían simular problemas de aerodinámica automotriz en otros modelos móviles.

## 2. AERODINÁMICA VEHICULAR

### 2.1. Modelo de Ahmed

La geometría propuesta por [Ahmed et al. \(1984\)](#) aún al estar compuesta por líneas simples, es una de las formas más estudiadas en la aerodinámica de vehículos terrestres, dado a que permite reproducir el flujo turbulento de la estela, separaciones de capa límite y re-ingresos de flujo, similares a los encontrados en vehículos terrestres. En este trabajo las patas del cuerpo

han sido removidas para asegurar el correcto funcionamiento de OM, pero se conserva el centro de rotación para el cálculo de los coeficientes aerodinámicos, ver Fig. (1).

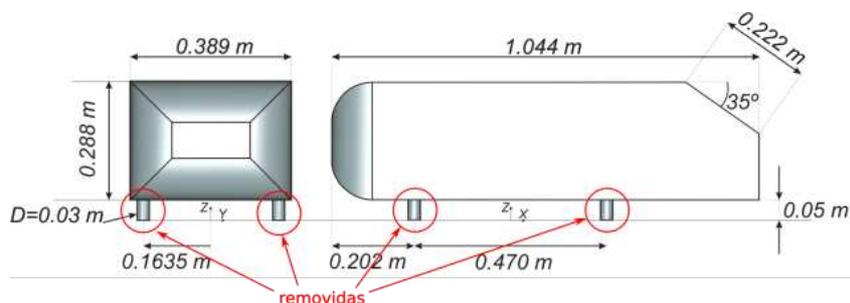


Figura 1: Cuerpo de Ahmed - slant 35°

## 2.2. Fundamentos

La motivación para el análisis del modelo con un ángulo de inclinación de cola de 35°, se debe a que la configuración de la estela turbulenta que se produce aguas abajo es bastante más compleja que la obtenida para otros ángulos estudiados, por efecto del desprendimiento temprano de flujo producido en la cola. Con el estudio del viento en condiciones de ángulo de incidencia variable en el tiempo, se busca entender con mayor detalle la estela de flujo turbulento producida, manteniendo la idea de que ésta posee características similares a las estelas turbulentas de una amplia gama de vehículos terrestres.

La tendencia en el diseño de automóviles modernos es primar la baja resistencia aerodinámica en pos de la eficiencia, para la reducción del consumo de combustible y definir un estilo aero-estético. Es así que las superficies son más sensibles a la condición de viento cruzado, generando un aumento brusco del coeficiente de sustentación en parantes traseros (Rossitto et al., 2016). La variación en la distribución del coeficiente de sustentación (Cl) entre la parte anterior y posterior del vehículo reducen su estabilidad. Un efecto similar se produce en el arreglo turbulento al realizar maniobras de alce o slalom, representadas por un cambio en el ángulo de guiñada en el tiempo.

En este trabajo se busca reproducir la condición de flujo antes mencionada con la técnica OM, imponiendo un movimiento prescrito senoidal alternativo al cuerpo de Ahmed y malla solapada adherida a él, con el fin de simular la configuración turbulenta del flujo ante una variación del ángulo de guiñada en el tiempo, con las mismas condiciones de viento incidente especificadas según Meile et al. (2016) para luego contrastar resultados.

## 3. MÉTODO DE MALLAS SOLAPADAS (OM)

En la estrategia de mallas solapadas se definen al menos dos dominios computacionales: uno móvil que acompaña al cuerpo con su movimiento y el otro estático representando un dominio de fondo, definiendo así diferentes zonas. En ellas se resuelve el flujo e interpolan los resultados entre sí, para obtener así una solución única del problema planteado.

Entre las ventajas que plantea la estrategia, es que ambos dominios pueden ser mallados independientemente, al no precisar alineación espacial entre sus elementos. Así, se permite el movimiento relativo en seis grados de libertad (6DoF) entre sus componentes o configuraciones multicuerpos, precisando la actualización para cada paso de tiempo únicamente de las variables definidas en la interpolación, en consecuencia el acople solo afecta las interfaces y si éstas se encuentran alejadas del cuerpo, el impacto del acople resulta mínimo (Houzeaux et al., 2014).

Además esta metodología permite trabajar con mallas estructuradas de alta calidad, muchas veces utilizadas en geometrías complejas. La discretización independiente entre las partes, otorga una gran flexibilidad en procesos de diseño industrial y optimización, al no necesitar remallar todo el dominio (Storti, 2020). Esto resulta ideal para simular condiciones donde cuerpos inmersos en fluidos poseen grandes desplazamientos, y en donde otros métodos generan deformación en la malla a niveles restrictivos, requiriendo un remallado completo (Hadzic, 2006).

El proceso de mallado del dominio móvil y de fondo, la unión, definición de parches “over-set” y zonas es llevado a cabo en forma manual (ver sección 4).

La etapa siguiente en la implementación del OM es llevada a cabo de forma automática por el solver, definiendo una plantilla con las celdas de ambas mallas, asignándole distintos usos (cálculo, interpolación o huecas). Esta plantilla permite obtener una solución única en todo el dominio y paso de tiempo, actualizándose en función al movimiento del cuerpo. Por esta razón las celdas que la componen no serán siempre las mismas en el período de tiempo simulado.

#### 4. DOMINIO COMPUTACIONAL, CONDICIONES DE BORDE E INICIALES

La discretización del dominio se ha llevado con la herramienta denominada “snappyHex-Mesh” disponible en OpenFOAM. La sección transversal mayor del dominio computacional corresponde a la del Túnel de Viento Aerodinámico de baja velocidad perteneciente al “ISW at Graz University of Technology”, del tipo Göttingen, de sección 3/4 abierta. Para mayores detalles referirse al trabajo de Gretler y Meile (1993).

En el proceso de mallado se tienen en cuenta metodologías y buenas prácticas, que aseguren evitar los errores de conservación generados por la función de interpolación seleccionada del método, buscando compensarlo con mallas más refinadas (Verma y Hemmati, 2020; Chandar et al., 2018). A continuación se especificarán dividiendo al mallado de fondo y solapado.

##### 4.1. Malla de fondo

La discretización más gruesa se realiza con celdas hexaédricas de dimensión promedio  $L/17,256$  donde  $L$  es la longitud del cuerpo de Ahmed, con una densificación de mallado en la dirección del eje “Z” con el propósito de aumentar la cantidad de celdas en la zona de venturi generada entre el suelo del túnel y el del modelo, a fin de lograr mayor precisión en la determinación de los posibles gradientes en el campo de la aceleración y los efectos de la interacción de las capas límites que se generan en esta región de flujo.

A fines de disminuir efectos difusivos producidos en la interpolación entre mallas por la aplicación de la técnica OM, se generan dos regiones con mayor densidad de mallado etiquetadas como I y II, con el objetivo de asegurar la confluencia entre las mallas con el menor gradiente de tamaño posible, utilizándose 3 celdas entre regiones para difuminar los niveles de densidad. Las relaciones de refinamiento son definidas en forma escalonada, en la región I las celdas varían su tamaño entre  $L/138,032 \leq L \leq L/69,024$ , y en la región II se definen celdas de tamaño igual a  $L/34,508$ . La extensión de estas regiones son definidas a partir del giro máximo esperado de la malla solapada de tal forma que esta última quede cubierta siempre dentro de la región I, ver Fig. (2).

La malla cuenta con un total de 619128 celdas hexaédricas, definida como zona 0 en la aplicación de la técnica OM. Se presentan en la Fig. (3) vistas de cortes, de la malla de fondo y tipos celdas de la plantilla del OM, (blancas de interpolación, azules de cálculo y roja huecas). El bloqueo aerodinámico varía entre 3.8 y 7.5 %, en función a la variación de la sección frontal para los distintos ángulos de guiñada.

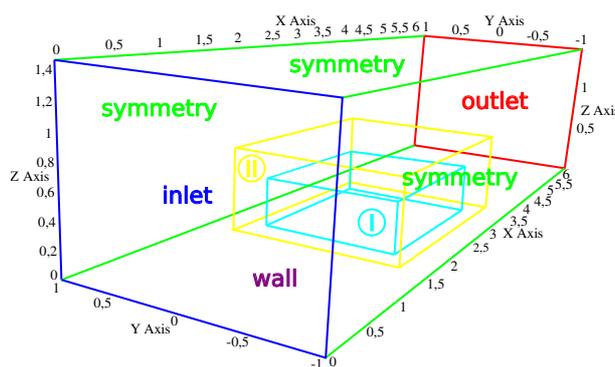


Figura 2: Dimensiones, regiones de refinamiento y condiciones de borde

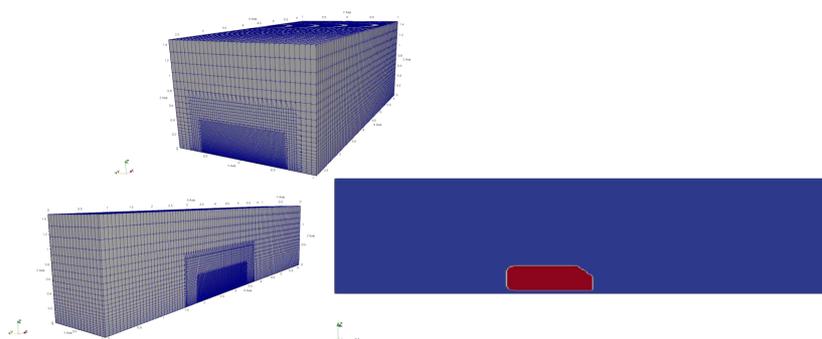


Figura 3: Detalles de regiones de malla planos xz yz - Tipos de celdas OM

#### 4.2. Malla solapada

En esta región se encuentra embebido el cuerpo de Ahmed, con un tamaño de celdas hexaédricas de base de  $L/104$ , el refinamiento sobre los bordes y superficie del modelo la mitad de estas. La capa límite es discretizada en 6 niveles, con una relación de expansión de 1,2, el espesor total de  $1,397mm$ , y el tamaño de la primer celda de  $0,141mm$ , algo mayor al valor  $0,090060mm$ , resultante del cálculo teórico (Schlichting y Gersten, 2000), el cual permite determinar la altura  $yH$  estimativa de la primer celda para un  $y^+ \leq 5$ .

La malla solapada cuenta con un total de 565134 celdas hexaédricas, distribuidas dentro de la denominada zona 1 por la metodología OM. Las condiciones de bordes impuestas en esta malla son dos: tipo “wall” en el cuerpo de Ahmed y “oversetPatch” a la caja que contiene al cuerpo. En ésta última es donde se realiza el proceso de interpolación con la malla de fondo, donde el algoritmo del método OM define la plantilla de celdas de cálculo azules e interpolación blancas. Con ambas mallas listas se genera el solape, ver Fig. (4).



Figura 4: Condiciones de borde, tipos de celdas y solape entre mallas

### 4.3. Condiciones iniciales

En la Tabla 1 se detallan las condiciones iniciales impuestas a la malla de fondo y solapada. Siendo  $U$  la velocidad de entrada,  $k$  energía cinética turbulenta,  $\omega$  tasa de disipación turbulenta. La simulación fue llevada a cabo promediando para cada paso de tiempo las ecuaciones de Navier-Stokes (uRANS). Se ha utilizado el modelo de turbulencia  $k\omega_{SST}$  (Menter et al., 2003), el cual es capaz de modelar correctamente flujos con gradientes negativos de presión, separación o re ingreso, característicos de la configuración turbulenta del modelo estudiado. Esta versión de  $k\omega_{SST}$  no modela los efectos de transición de la capa límite (laminar a turbulenta), pudiendo introducir así errores en los resultados de los coeficientes aerodinámicos. Sin embargo el cambio continuo de posición del modelo presenta una limitación aún para modelos RANS que contemplen tal efecto, los cuales no podrían replicar la transición real por efectos de la actualización continua en la longitud de desarrollo de la capa límite frente al flujo medio incidente.

Se ha configurado un paso de tiempo ajustable limitado por un  $C_{o_{max}} = 4$ . Se evaluó un marco temporal total de 6,5s. Los primeros 0,2s, se busca estabilizar la capa límite turbulenta en el cuerpo de Ahmed estático alineado al flujo y luego se impone un movimiento al “oversetPatch” de oscilación rotante sobre el eje “Z”, definiendo una amplitud y velocidad pequeña de rotación, que permita representar una maniobra de slalom con grandes ángulos barridos (usualmente los ángulos reales barridos son menores y con mayor velocidad angular), que no resulte agresiva para el proceso de actualización de malla y plantillas de interpolación, evitando incrementos en los tiempos de resolución o disparo de errores de conservación y posterior inestabilidad de la simulación, y así calibrar el método. Se pretende en trabajos posteriores realizar un análisis con amplitudes menores y mayor velocidad angular, de manera tal de intentar reproducir maniobras más realistas.

BC_inlet, internalField	$30 \text{ m/s}(U) - 0,0054 \text{ m}^2\text{s}^{-2}(k) - 1,055 \text{ s}^{-1}(\omega)$
BC_outlet	$0Pa$
oversetPatch	$\pm 25 \text{ grados}, 1 \text{ rad s}^{-1}$

Tabla 1: Condiciones de borde e iniciales

## 5. CONFIGURACION Y RESULTADOS

El acople de presión-velocidad, en conjunto con el movimiento de la malla solapada para OM, se realiza con el solver overPimpleDyMFoam. Este fue levemente modificado para medir tiempos inferidos en cada tarea desarrollada. Se usó una configuración PIMPLE de 50 iteraciones máximas para el predictor de momento y 2 iteraciones para el corrector de presión, en conjunto con coeficientes de relajación de 0,8 para todas las variables.

Existen varias funciones de interpolación implementadas en OM para OpenFOAM, en este trabajo se opta por la función “inverseDistance”, que no obstante ser la menos conservativa y de menor grado, si es compensada con un aumento en la densidad de mallado, ofrece resultados aceptables y de menor coste computacional.

Con esta configuración se obtuvieron resultados de coeficientes aerodinámicos, campos de velocidad normalizada en la estela e iso-superficies de vorticidad “Q-criterion”.

## 5.1. Coeficientes aerodinámicos

Todos los coeficientes aerodinámicos fueron calculados para cada paso de tiempo y son filtrados con una media móvil de 50. Los coeficientes de fuerza y momento se presentan en las Ecs. (1).

$$C_d = \frac{2F_x}{\rho U^2 A_f} \quad C_{d(f/r)} = 0,5C_d(\pm CM_{Roll}) \quad (1a)$$

$$C_l = \frac{2F_z}{\rho U^2 A_f} \quad C_{l(f/r)} = 0,5C_l(\pm CM_{Pitch}) \quad (1b)$$

$$C_s = \frac{2F_y}{\rho U^2 A_f} \quad (1c)$$

$$CM_{Roll} = \frac{2M_x}{\rho U^2 A_f b} \quad CM_{Pitch} = \frac{2M_y}{\rho U^2 A_f L} \quad CM_{Yaw} = \frac{2M_z}{\rho U^2 A_f b} \quad (1d)$$

Donde la fuerza global se encuentra representada por sus componentes  $\vec{F} = (F_x\vec{i}, F_y\vec{j}, F_z\vec{k})$ , al igual que el momento global  $\vec{M} = (M_x\vec{i}, M_y\vec{j}, M_z\vec{k})$ ,  $\rho = 1,205\text{kg}/\text{m}^3$  la densidad del aire,  $A_f = 0,112\text{m}^2$  el área frontal del cuerpo de Ahmed,  $b$  el ancho,  $L$  el largo y  $U$  la velocidad de fondo definida en la condición de borde "inlet".

En la Fig. (5a) se presentan el coeficiente de arrastre global  $C_d$ , y sus componentes frontal  $C_{df}$  y trasera  $C_{dr}$ , Fig. (5b) el de sustentación global  $C_l$ , y sendas componentes frontal  $C_{lf}$  y trasera  $C_{lr}$ . Además, son graficadas con línea de puntos las posiciones de alineación del cuerpo con el flujo incidente a  $0 \pm 12,5$  y  $\pm 25$  de ángulo de guiñada.

En primera instancia se simulan 0,2 segundos de forma estática con flujo alineado al cuerpo obteniendo valores cercanos a los publicados por Meile et al. (2016) mediante ensayo experimental y Adotti et al. (2017) mediante simulación RANS, ambos trabajos analizan el ángulo de guiñada de forma estática. Luego se impone movimiento al cuerpo con las características antes descritas, alcanzando mayor amplitud a los 1,5707 y 4,7123 segundos. Los resultados de los coeficientes  $C_d$  y  $C_l$  con guiñada dinámica, resultan mayores respecto de los trabajos citados con posicionamiento estático utilizados como referencia, la discrepancia puede estar asociada al cambio de posición continua del cuerpo respecto del flujo incidente, provocando que el flujo no se termine de desarrollar, por la complejidad de la geometría en condiciones de viento cruzado y el cambio continuo de los puntos de desprendimiento de capa límite sobre el cuerpo, además de las limitaciones del modelo de turbulencia utilizado en este trabajo, ver Fig. (6).

También en la Fig. (5c) se expone el coeficiente lateral  $C_s$ , en la Fig. (5d) el coeficiente de rolido  $CM_{roll}$  y Fig. (5f) coeficiente de guiñada  $CM_{Yaw}$ , los cuales presentan simetría durante el tiempo simulado. El coeficiente de cabeceo  $CM_{Pitch}$  Fig. (5e) presenta un comportamiento negativo en casi todo su desarrollo para cuando el cuerpo no está alineado con el flujo, en coincidencia con la magnitud mayor del coeficiente de sustentación trasero  $C_{lr}$ , respecto del delantero  $C_{lf}$ .

## 5.2. Campo de velocidad en la estela e iso superficies de vorticidad Q-criterion

Existen regiones de vórtices coherentes, donde la concentración de vorticidad es suficientemente elevada para inducir un torbellino en el flujo, manteniendo una forma característica por un tiempo prolongado, mayor al tiempo de rotación local.

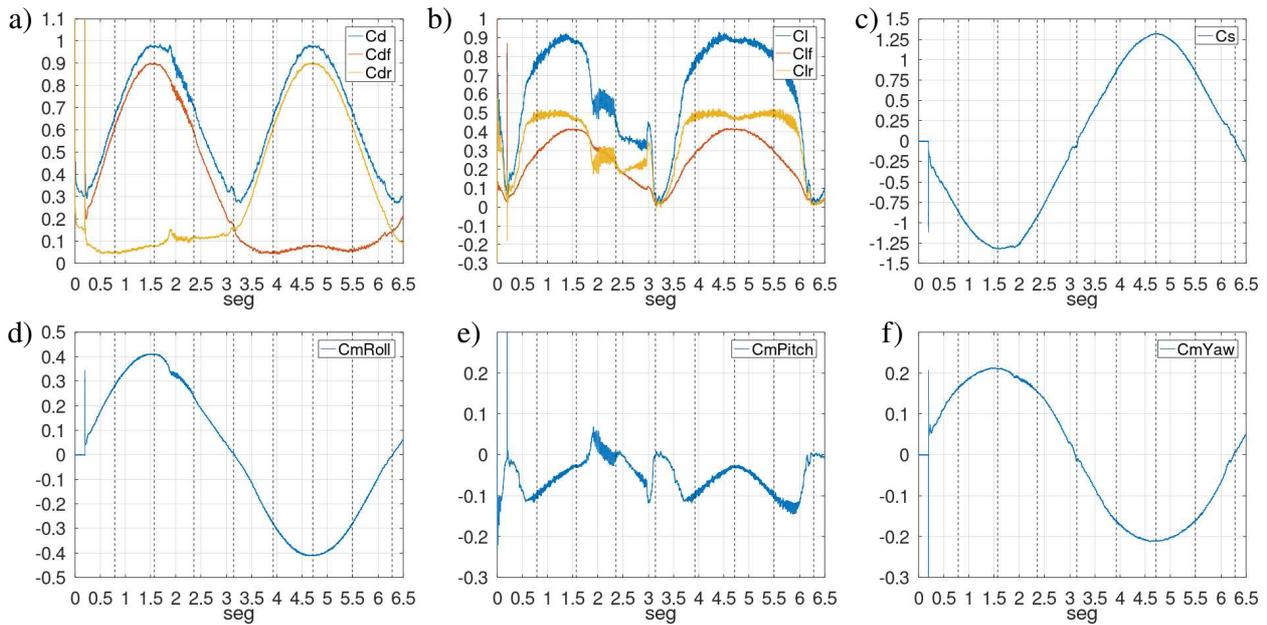


Figura 5: Coeficientes aerodinámicos: a) arrastre  $C_d$ , b) sustentación  $C_l$ , c) lateral  $C_s$ , d) rolido  $CM_{roll}$ , e) cabeceo  $CM_{pitch}$  y f) guiñada  $CM_{yaw}$

Es posible capturar estas estructuras mediante iso-superficies de alto módulo de vorticidad. El método denominando Q-criterio propuesto por Hunt et al. (1988) es bastante eficaz para determinar estas iso-superficies en flujos incompresibles. En las Figs. (7) y (8) se presentan iso-superficies de vorticidad para condición de flujo alineado y para el cuerpo de Ahmed en posición de guiñada, mostrando concordancia con los esquemas de estados dominantes de vorticidad reportados por Meile et al. (2016), al igual que el campo de velocidad normalizado en la estela ubicado en cinco planos “x-z” en dirección del eje “Y”, Ec. (2). Observándose longitudes de estela similares a la referencia para los ángulos de guiñada  $\beta = 0^\circ$  y  $\beta = -12,5^\circ$ .

$$ww_{norm} = \frac{\sqrt{u^2 + w^2}}{U} \quad (2)$$

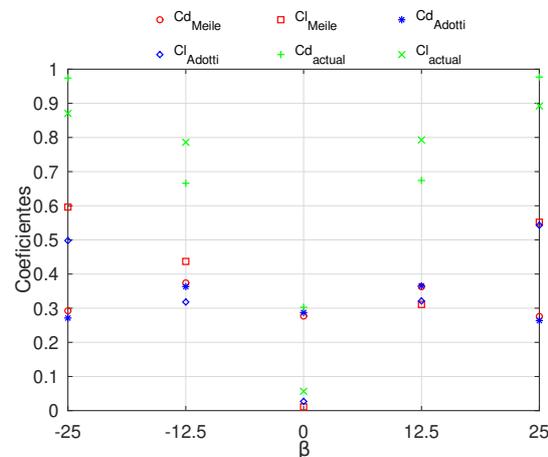


Figura 6: Coeficientes aerodinámicos  $C_d$  y  $C_l$  vs. ángulo de guiñada  $\beta$  (Meile et al., 2016) (Adotti et al., 2017).

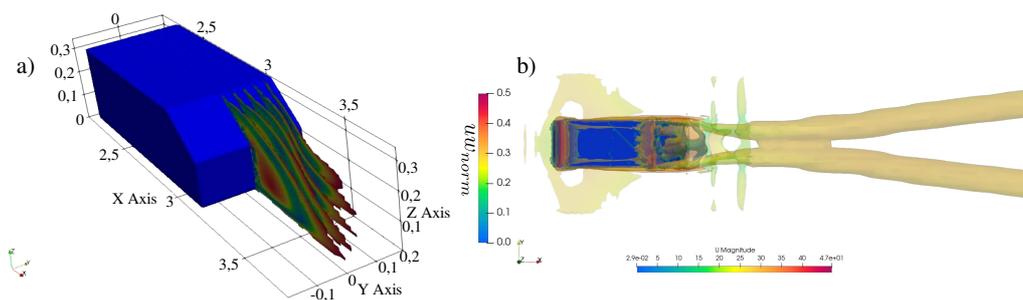


Figura 7: a) Campo de velocidad normalizado en la estela y b) Q-criterion 500 para  $\beta = 0^\circ$

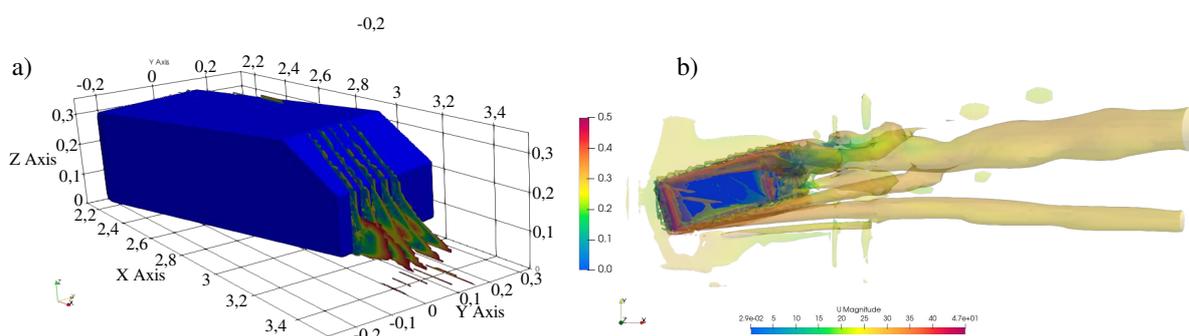


Figura 8: a) Campo de velocidad normalizado en la estela y b) Q-criterion 500 para  $\beta = -12,5^\circ$

## 6. CONCLUSIONES

El OM resulta ser una herramienta muy versátil para simular grandes desplazamientos manteniendo alta calidad de mallado. La aplicación del método en aerodinámica automotriz permite evaluar la configuración turbulenta asociada a una maniobra o cambio de dirección de flujo repentina. El proceso de discretización resulta ser muy laborioso por el tratamiento requerido en los solapes entre las mallas. La necesidad de buena resolución en los campos de velocidad del problema en zonas específicas cercanas al cuerpo de Ahmed y el suelo, complican aún más la implementación. El OM en OpenFOAM, aún se encuentra en etapas iniciales de optimización para el cálculo paralelo, el aumento en cantidad de celdas resulta restrictivo contemplando el tiempo inferido en la malla utilizada en este trabajo (9,38 días). Los resultados obtenidos, permitirán poder seguir avanzando en el estudio de problemas similares. Además se pretende en trabajos futuros utilizar otros modelos de turbulencia que contemplen la transición de la capa límite de laminar a turbulenta y contrastar la influencia sobre los resultados obtenidos en los coeficientes aerodinámicos.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo utilizó recursos computacionales del cluster Pirayu, adquirido con fondos de la Agencia Santafesina de Ciencia, Tecnología e Innovación (ASACTEI), Gobierno de la Provincia de Santa Fe, mediante el Proyecto AC-00010-18, Resolución N° 117/14. Este equipo forma parte del Sistema Nacional de Computación de Alto Desempeño del Min. Ciencia y Tecnología de la Rep. Argentina.

Este trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET, Argentina), la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica

Nacional Facultad Regional Resistencia (UTN-FRRe, Argentina, PID 4061TC (2016)).

## REFERENCIAS

- Adalsteinsson D. y Sethian J.A. A fast level set method for propagating interfaces. *Journal of Computational Physics*, 118(2):269–277, 1995.
- Adotti M.I., Castro H.G., Paz R.R., y DeBortoli M. Simulación computacional del cuerpo de ahmed bajo distintos Ángulos de incidencia de viento. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional. AMCA*, 37, 2017.
- Ahmed S., Ramm G., y Faltin G. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. *SAE International Congress and Exposition*, página 34, 1984.
- Chandar D., Boppana B., y Kumar V. A comparative study of different overset grid solvers between openfoam, starccm+ and ansys-fluent. *AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2018.
- Gretler W. y Meile W. Der 2m-windkanal am institut für strömungslehre und gasdynamik der technischen universität graz. *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift*, 138, 1993.
- Hadzic H. *Development and Application of Finite Volume Method for the Computation of Flows Around Moving Bodies on Unstructured, Overlapping Grids*. Tesis de Doctorado, Technische Universität Hamburg, 2006.
- Hirt C. y Nichols B. Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1):201–225, 1981.
- Houzeaux G., Eguzkitza B., Aubry R., Owen H., y Vázquez M. A chimera method for the incompressible navier–stokes equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 75:155–183, 2014.
- Hunt J.C.R., Wray A.A., y Moin P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows. *Technical Memorandum (TM), NTRS - NASA Technical Reports Server*, 1988.
- Meakin R. Moving body overset grid methods for complete aircraft tiltrotor simulations. *11th Computational Fluid Dynamics Conference*, 1993.
- Meile W., Ladinek T., Brenn G., Reppenhagen A., y Fuchs A. Non-symmetric bi-stable flow around the ahmed body. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 57:34–47, 2016.
- Menter F., Kuntz M., y Langtry R. Ten years of industrial experience with the sst turbulence model. *Heat and Mass Transfer*, 4, 2003.
- Peskin C. The immersed boundary method. *Cambridge University Press*, 11:479 – 517, 2002.
- Prewitt N.C., Belk D.M., y Shyy W. Parallel computing of overset grids for aerodynamic problems with moving objects. *Progress in Aerospace Sciences*, 36:117–172, 2000.
- Rositto G., Sicot C., Ferrand V., Jacques B., y Harambat F. Drag and crosswind sensitivity of rounded fastback vehicle. *Second International Conference in Numerical and Experimental Aerodynamics of Road Vehicles and Trains at Goteborg*, 2016.
- Schlichting H. y Gersten K. *Boundary-Layer Theory*. Springer, 2000.
- Storti B. *Desarrollo de un método de composición de dominios tipo chimera en mecánica computacional*. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional del Litoral. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas; Argentina., 2020.
- Trépanier J., Reggio M., Zhang H., y Camarero R. A finite-volume method for the euler equations on arbitrary lagrangian-eulerian grids. *Computers and Fluids*, 20:399–409, 1991.
- Verma S. y Hemmati A. Performance of overset mesh in modeling the wake of sharp-edge bodies. *Computational Engineering*, 8, 2020.
- Wolf C. *A Chimera Simulation Method and Detached Eddy Simulation for Vortex-Airfoil Interactions*. Tesis de Doctorado, Georg-August-Universität Göttingen, 2011.