

# DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES GLOBALES DE FUERZA Y SUSTENTACIÓN EN EL CUERPO DE AHMED APLICANDO MODELOS NUMÉRICOS Y EN TÚNEL DE VIENTO CON MODELO REDUCIDO

Marighetti, Jorge O.<sup>a</sup>, Colman, Juan<sup>a</sup>; Adotti, Marcelo I.<sup>a, b</sup>; De Bortoli, Mario E.<sup>a</sup>; Wittwer, Adrián R.

<sup>a</sup> Laboratorio de Aerodinámica, Facultad de Ingeniería, Av Las Heras 727, Resistencia (Chaco), Argentina

<sup>b</sup> Carrera del Personal de Apoyo, CONICET, Facultad de Ingeniería, Av Las Heras 727, Resistencia (Chaco), Argentina

\*E-mail Autor: jomaringha@gmail.com

## Resumen

El cuerpo de Ahmed es un modelo de vehículo terrestre simplificado, utilizado para investigar la influencia de la estructura del flujo en la resistencia aerodinámica. El estudio del escurrimiento tridimensional alrededor de este cuerpo, es de relevancia en la industria automotriz, evidenciada en mejoras en el consumo energético con la reducción de la resistencia aerodinámica o la estabilidad del vehículo al optimizar las formas del vehículo. La ejecución de un buen diseño aerodinámico requiere de un buen conocimiento de las características del flujo y cómo la aerodinámica es modificada por cambios en la forma del cuerpo.

En este trabajo se realiza la comparación de coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos de ensayos experimentales en túnel de viento y de modelos numéricos del cuerpo de Ahmed; la simulación numérica es realizada por el método de volúmenes finitos (FVM) en condiciones de flujo externo, turbulento, incompresible y tridimensional, donde el escurrimiento sobre el cuerpo simulado será estacionario. El estudio permite reproducir una amplia gama de estructuras turbulentas características en vehículos terrestres, resultando de interés la extrapolación de resultados e inferencia a configuraciones aerodinámicas de vehículos en la industria. Se adoptan distintos tipos de elementos para celdas base del mallado del dominio computacional, se densifica las mallas en zonas de deformación y aceleración del flujo turbulento, efectos producidos por detalles del cuerpo, donde se incluye en el mallado el control de calidad global y local sobre la capa límite. Se obtienen coeficientes adimensionales de arrastre ( $C_d$ ) y sustentación ( $C_l$ ) utilizando los programas de ANSYS Fluent y OpenFOAM. Los resultados son contrastados con datos experimentales del cuerpo de Ahmed ensayados en túnel de viento de Laboratorio de Aerodinámica, Facultad de Ingeniería (UNNE) y de datos de referencia publicados en bibliografía específica.

**Keywords:** CFD, Cuerpo de Ahmed, Coeficientes Aerodinámicos, Túnel de viento.

## 1. Introducción

El cuerpo de Ahmed es un modelo de vehículo automotor terrestre utilizado en la industria para investigar la influencia de la estructura del escurrimiento generada, principalmente, en el arrastre. La comprensión de la dinámica del flujo tridimensional alrededor del vehículo adquiere importancia en la reducción del consumo energético, por optimización del aspecto aerodinámico, reduciendo el arrastre [1]. Las características del cuerpo de Ahmed, permiten profundizar el conocimiento del fenómeno y detectar como la aerodinámica del vehículo está afectada por los cambios en la forma del cuerpo. La estela producida en la parte trasera del vehículo es la que más produce arrastre; el tamaño de esta, y la magnitud del arrastre, está fuertemente influenciada por el punto de desprendimiento del flujo. Una buena simulación de la estela y el punto de desprendimiento resultan necesarios para una buena predicción del arrastre.

El análisis del comportamiento de flujos en la estela del vehículo, son difíciles de predecir, tanto con modelos numéricos como en modelos experimentales, debido a la

complejidad de los fenómenos de turbulencia generados en esos flujos. Ambos modelos son utilizados en este trabajo para el análisis del flujo en la estela, que permiten combinar la simulación numérica de flujos en diversas condiciones y la capacidad de verificación y ajuste de los modelos experimentales [2].

En el presente trabajo, se presenta una comparación de modelo numérico y experimental del comportamiento del flujo en la estela para el modelo de cuerpo de Ahmed de 1:1 con viento incidente longitudinal (dirección del eje  $x$ )  $0^\circ$  y un ángulo de  $30^\circ$ , respecto a éste, y un ángulo de cola (slant) de  $35^\circ$ . El ensayo experimental fue realizado en el túnel de viento de capa límite "Jaceck Goreki" de la UNNE con viento suave y uniforme. El cuerpo de Ahmed es usado como referencia para el caso de la validación de la simulación numérica, basado en el modelos de turbulencia SST  $K-\omega$  en la plataforma ANSYS Fluent. Éste modelo de turbulencia, permite modelar correctamente la capa límite, pudiendo modificarse a una formulación  $k-\epsilon$  en la corriente libre, más adecuada para zonas de alta energía turbulenta. De esta manera, es posible modelar la zona de gradientes

de presión negativos y flujos separados, con un alto grado de confiabilidad. Adicionalmente, resultados del trabajo de Meile et al.[3] son utilizados como referencia para las comparaciones.

## 2. Descripción del trabajo realizado

### 2.1 Geometría del modelo de Ahmed

El cuerpo Ahmed en estudio, como se ve en Figura 1, no presenta bordes pronunciados, ni aditamentos particulares, tiene una longitud  $L= 1044$  mm, una altura  $H= 288$  mm y un ancho  $A= 389$  mm.

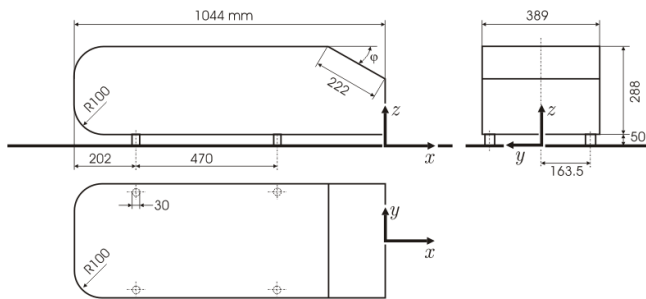


Fig. 1. Vistas del cuerpo Ahmed, con ángulo de cola (slant) de 35°.

En el modelo, se identifican tres partes bien definidas; la frontal de curvas suaves, la central de sección rectangular constante y la posterior, con ángulos de inclinación de 35°, con una longitud diagonal constante de 222 mm.

### 2.2 Estudios experimentales en túnel de viento

El análisis experimental se llevó a cabo en el Túnel de viento "Jacek P. Gorecki" del Laboratorio de Aerodinámica (Figura 2), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste. Es un túnel de capa límite de circuito abierto, con una longitud total de 39,65 m. La cámara de ensayos es de 2,4 m de ancho  $\times$  1,8 m de alto  $\times$  22,8 m de largo, con una velocidad máxima en vacío de 25 m/s. Mayores detalles son expuestos en el trabajo de Wittwer and Möller (2000).

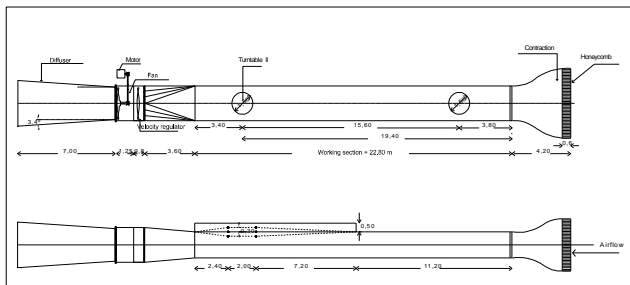


Fig. 2. Esquema Túnel de viento "Jacek P. Gorecki" de la UNNE.

La prueba experimental se realizó con una velocidad de viento suave y uniforme de 23,5 m/s con turbulencia menor al 1%, según la disposición que se muestra en Figura 3.

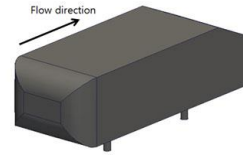


Fig. 3. Disposición del modelo del cuerpo Ahmed en el túnel de viento de la UNNE.

Las mediciones del arrastre se realizaron con una balanza diseñada para medir las variaciones de las fuerzas totales horizontales en el tiempo, mediante el uso de galgas extensométricas. La escala del modelo de Ahmed es de 1:1 ensayado en dos direcciones de viento incidente, 0° y 30°, con un ángulo de cola (slant) de 35°. La relación de bloqueo del túnel de viento es  $0,112/4,32= 0,025\%$ , admisible sin correcciones de bloqueo para este ensayo. El Número de Reynolds, para los ensayos fue de  $1,7 \times 10^6$ . La presión dinámica fue medida con Pitot-Prandtl y micromanómetro Betz 2500. Fuerzas fluctuantes de arrastre fueron medidas con una balanza de bandas extensométricas, conectada a un medio puente Wheastone, acondicionador de señal Vishay Systems 2100 y una plaqueta adquisidora Computer Board's PCI-DAS 1602 de 16 canales.

Las expresiones para el cálculo de los coeficientes de arrastre,  $C_d$ , y sustentación,  $C_l$ , son las siguientes:

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^2 A} \quad C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^2 A}$$

Donde,  $F_d$  y  $F_l$ , son las fuerzas de arrastre y sustentación,  $\rho$ , la densidad,  $V$ , la velocidad y  $A$ , la superficie del modelo.

### 2.3 Descripción del dominio computacional

Se utilizaron dos mallas diferentes para realizar este trabajo; en la plataforma ANSYS Fluent se implementó una malla no estructurada de elementos tetraédricos, con refinamiento mediante elementos estructurados para obtener mayor detalle en la capa límite, tanto del vehículo como del suelo (Figura 4 y Figura 5), con un número de elementos de 1.927.820.

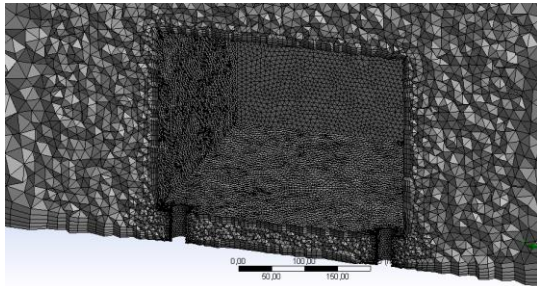


Fig. 4. Malla Híbrida, con refinamiento en las capas límites del suelo y del vehículo (ANSYS Fluent).

En este trabajo se aproxima numéricamente el flujo del túnel de viento sobre el vehículo, ajustándose el dominio computacional a las dimensiones principales de la cámara de ensayos del túnel de viento.

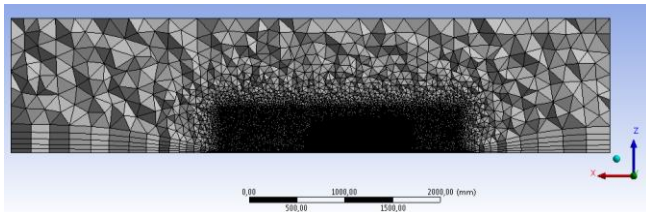


Fig. 5. Malla híbrida del túnel de viento, con aumento de densidad al acercarse al vehículo (ANSYS Fluent).

Por otro lado, para la plataforma OpenFOAM se optó por una malla estructurada hexaédrica (Figura 6).

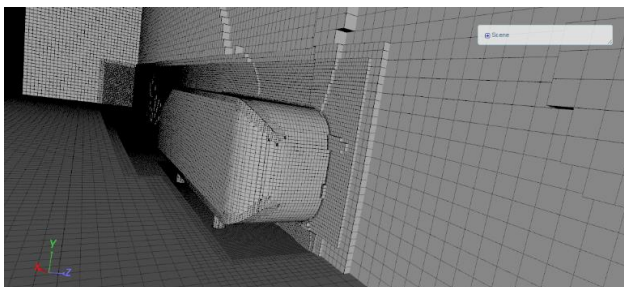


Fig. 6. Malla estructurada de elementos hexaédricos (OpenFOAM).

En la selección del mallado surge de la necesidad de evaluar otro tipo de elementos, distintos a los tetraédricos que ofrece el Ansys-meshing; el paquete OpenFOAM cuenta con la topología hexa-mesh, que resulta sencilla de implementar, que realizar un mallado por bloques en ICEM-CFD. Parar detectar algunas asimetrías en la solución no se

utilizaron simetrías del problema. El dominio computacional tiene un ancho es 2,40 m, alto 1,80 m y 6,26 m de longitud.

El modelo adopta un fluido newtoniano, viscoso con una velocidad masiva (bulk velocity) de 23,5 m/s, una viscosidad cinemática  $\nu = 1,45 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  y una densidad  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ ; el flujo es incompresible ( $\rho = \text{constante}$ ), el régimen estacionario ( $\partial/\partial t = 0$ ) y temperatura constante (flujo isotérmico). La condición de no-deslizamiento es prescrita a nivel del suelo, techo y paredes, tanto del dominio como la superficie del cuerpo, mientras para el dominio de salida, la presión de fijada en cero.

Las condiciones de borde impuestas, son las siguientes [2]:

- *Velocity Inlet* ( $V = 23,5 \text{ m/s}$ )
- *Reynolds Number* =  $1,636 \times 10^6$
- *Pressure Outlet* ( $P = 0$ )
- *Roof and Walls* (*No Slip*)
- *Floor* (*No Slip*)

Siendo ‘*Velocity Inlet*’ la velocidad del fluido a la entrada del túnel, ‘*Pressure Outlet*’ la presión a la salida del túnel, y las condiciones ‘*Roof*’, ‘*Wall*’ y ‘*Floor*’ hacen referencia a superficies fijas sin deslizamiento.

Para la simulación se utilizaron las plataformas ANSYS Fluent y OpenFOAM; ambas emplean el método del volumen finito (FVM), siendo ANSYS Fluent de código cerrado y OpenFOAM una herramienta de libre uso. Para la simulación de la turbulencia se utilizó el modelo de turbulencia  $k-\omega_{sst}$ . Éste, es un modelo de dos ecuaciones, utilizando dos ecuaciones de transporte adicionales para representar las propiedades turbulentas del flujo (Wilcox, D.C. (1993), *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries, Inc.). Se han utilizado el esquema de acople SIMPLE para ambos casos (simple, simpleFoam). El esquema, inicialmente utilizado, es el Upwind de 1º orden, luego, según la convergencia de los residuos y los coeficientes de fuerza, se modifica a uno de segundo orden.

Las variables de las ecuaciones de transporte, son:

$K$  = Energía cinética turbulenta, energía cinética por unidad de masa de las fluctuaciones turbulentas.

$\omega$  = Grado de disipación específico de la turbulencia, representa la rapidez con que la energía cinética turbulenta se convierte en energía térmica interna del fluido.

Las ecuaciones de transporte, para el modelo simulados, se expresan a continuación:

*Energía Cinética Turbulenta:*

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + U_j \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \kappa \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_k v_T) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right]$$

*Viscosidad Cinemática de Eddy:*

$$v_T = \frac{a_1 \kappa}{\max(a_1 \omega, SF_2)}$$

*Grado de disipación específico:*

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_\omega v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}$$

El flujo francamente turbulento es resuelto con un modelo RANS, Ecuaciones de Navier Stokes promediadas respecto del Número de Reynolds, permitiendo representar las velocidades medias, con un aceptable error respecto al flujo turbulento con velocidades locales variantes.

### 3. Resultados

En Tabla 1 se contrastan los coeficientes de arrastre,  $C_d$ , y sustentación,  $C_l$ , globales, obtenidos en ensayos en túnel de viento "Jacek P. Gorecki" con balanza, y los resultados obtenidos en la simulación por aplicación de herramientas ANSYS Fluent y OpenFOAM para el cuerpo de Ahmed. A modo de referencia se anexan valores adquiridos en simulación numérica desarrollada por Meile [3], en condiciones similares ( $U_\infty = 30$  m/s;  $Re = 2,074 \times 10^6$ , con dimensiones dominio computacional  $(2 \times 1,46 \times 6,264$  m), y similares condiciones de borde. Siendo estos valores avalados por verificación experimental.

Tabla 1. Magnitudes de los coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos numérica y experimentalmente.

	$C_d$	$C_l$
Túnel de viento	0,4	-
ANSYS Fluent	0,321	0,094
OpenFOAM	0,41	-
Meile [3]	0,321	0,055

En Figura 7, se muestra el campo de velocidades simulado numéricamente en este trabajo con plataforma ANSYS Fluent.

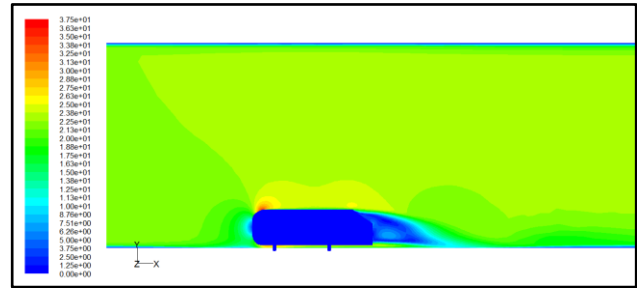


Fig. 7. Campo de velocidades obtenido mediante plataforma ANSYS Fluent del cuerpo de Ahmed.

### 4. Conclusiones

Este trabajo presenta los primeros resultados preliminares de la determinación experimental y numérica de coeficientes de arrastre y sustentación en cuerpos de bordes cortantes expuestos a flujos turbulentos.

Comparando los resultados provenientes del trabajo experimental y otras referencias experimentales, así como los de la simulación numérica, estos presentan algunas diferencias. El arrastre medio de los ensayos experimentales en túnel de viento  $C_d = 0,40$ , similar a la simulación del OpenFOAM, son valores altos comparando con los obtenidos por el trabajo de Ahmed et al. (1984), con un  $C_d = 0,257$ ; en tanto, el valor de la simulación numérica realizada con ANSYS Fluent es similar al trabajo experimental de Meile. Es importante recalcar que el trabajo del Ahmed es considerado sin las cuatro patas de apoyo del modelo; la carga de cada pata fue corregida considerando esta situación. Sin embargo, los resultados experimentales son aún muy altos.

Las diferencias halladas en las fuerzas de arrastre, posiblemente, se debe la aceleración del flujo en la zona baja del modelo, debido a la masa de aire que entra en la sección de ensayo en la zona en la balanza de arrastre por succión; En consecuencia, mejoras en la configuración experimental permitirán mejorar resultados.

En los modelos de simulación, la densidad de la malla puede ser mejorada para lograr mejor aproximación, que muestra una diferencia levemente alta; de igual manera, verificar condiciones del ensayo experimental, calidad del escurrimiento simulado. Por otra parte, futuros ensayos en túnel de viento del cuerpo de Ahmed deben realizarse en la cámara de ensayos anterior, donde el flujo es uniforme, suave y de muy baja turbulencia.

### Agradecimientos

Se agradece la colaboración de Juan Manuel Rodriguez Aguirre y Beatriz Iturri, personal técnico de este laboratorio.

## Referencias

- [1] Ahmed S., Ramm G., and Falin G. Some Salient Features Of The Time-Averaged Ground Vehicle Wake. SAE International, 1984.
- [2] H. Castro; R. Paz; M. Storti; V. Sonzogni; J. Marighetti and M. De Bortoli; “Experimental and numerical study of the aerodynamic behaviour of a simplified road vehicle”, II Congreso Sudamericano de Ingeniería Computacional, Noviembre 2010, B.A., Argentina.
- [3] Meile W., Brenn G., Reppenhagen A., Lechner B., and Fuchs A. Experiments and numerical simulations on the aerodynamics of the ahmed body. CFD Letters, 3, 2011.