

MODELIZACIÓN DEL FLUJO DE VIENTO SOBRE EL MODELO DE AHMED

Gerardo Franck[†], Norberto Nigro*, Mario Storti* y Jorge D'Elía*

[†]Becario Proyecto FOMEC 1055.
Universidad Tecnológica Nacional (UTN)
Facultad Regional Santa Fe (FRSF). Lavaise 610, 3000-Santa Fe, Argentina.
e-mail: gfranck@intec.unl.edu.ar

*Centro Internacional de Métodos Computacionales
en Ingeniería (CIMEC), CONICET / INTEC – UNL
Parque Tecnológico del Litoral Centro (PTLC), 3000 Santa Fe, Argentina.
e-mail: cimec@ceride.gov.ar, web page: <http://www.cimec.org.ar/>

Palabras clave: mecánica de fluidos, cuerpos obtusos, modelo de Ahmed, fuerzas de arrastre, estela de vórtices, elementos finitos, cálculo paralelo

Resumen. *El desarrollo actual de los vehículos de calle necesita una buena base de conocimientos en aerodinámica para mejorar y optimizar el control de flujo por medio de dispositivos activos. Esta experiencia se puede adquirir por ensayos experimentales o por medio de la simulación numérica. Mientras la primera es digna de mencionar por su realismo inherente, la última se está viendo en la actualidad como una tarea atractiva, debido al menor tiempo y costos involucrados en su aplicación. Sin embargo, en la industria se requiere un grado de precisión que hace necesario un trabajo detallado para validar los códigos, prioritario al trabajo de producción. La complejidad involucrada en el diseño de automóviles, debido a la gran cantidad de accesorios y dispositivos, hace a la tarea de validación prácticamente inabordable. Es por ello que un cuerpo obtuso con formas geométricas simples, que retenga los principales comportamientos del flujo, es un buen candidato a ser usado como ensayo numérico para validación de los códigos. El modelo de Ahmed reúne estas características y por esta razón lo usamos como un ensayo de referencia en esta clase de aplicaciones, empleando para tal fin un código de elementos finitos con un modelo de turbulencia LES.*



Figura 1: Izq.: “esqueleto” del cuerpo de Ahmed. Der.: vista de la “piel” del cuerpo de Ahmed.

1 INTRODUCCIÓN

Con el objeto de optimizar el trabajo experimental, disminuir los costos asociados al diseño, los expertos en aerodinámica de vehículos terrestres buscan permanentemente nuevas ideas capaces de suministrar una respuesta rápida y precisa a los objetivos planteados por el cada vez más exigente mercado de consumidores. Las metas que se tienen en cuenta en el proceso de diseño son: mínimo consumo de combustible, disminución del ruido, mejoramiento del confort, utilización eficiente del viento como medio de enfriamiento de la unidad motriz, entre otras. Una forma de alcanzar en parte lo planteado, consiste en combinar la simulación numérica junto con los ensayos en túneles de viento, es decir, utilizar un modelo en el túnel de viento junto con otro virtual en la computadora e incluso con los ensayos en ruta, e.g. ver Hucho¹ *et al.*. Sin embargo, el estado actual del arte en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) muestra que, en los últimos años, han ido apareciendo resultados con suficiente precisión, dentro de las expectativas de la aerodinámica automotriz. Desde que se comenzó a observar la importancia del efecto del ángulo de inclinación del extremo trasero de los vehículos (*base slant angle*) en el valor de la fuerza de arrastre (*drag force*), efecto notado por primera vez por Janssen/Hucho², se puso especial énfasis en estudiar modelos simplificados que simulen los comportamientos principales del flujo real. El desarrollo de códigos computacionales trae aparejado su validación con resultados experimentales. En lo que respecta a modelos aerodinámicos esta etapa no es trivial, debido a la complejidad, escasez y confiabilidad de dichos ensayos. Los vehículos terrestres pueden ser definidos como cuerpos obtusos (*bluff bodies*) que se desplazan a velocidades relativamente moderadas y próximos al piso de la carretera. Las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre los mismos son el resultado de complicadas interacciones entre las separaciones de las capas de corte y un conjunto de vórtices que se desarrollan en la zona posterior (o estela) del flujo. Por consiguiente, los puntos claves a tener en cuenta y a observar son las regiones de separación, los tipos de vórtices que se

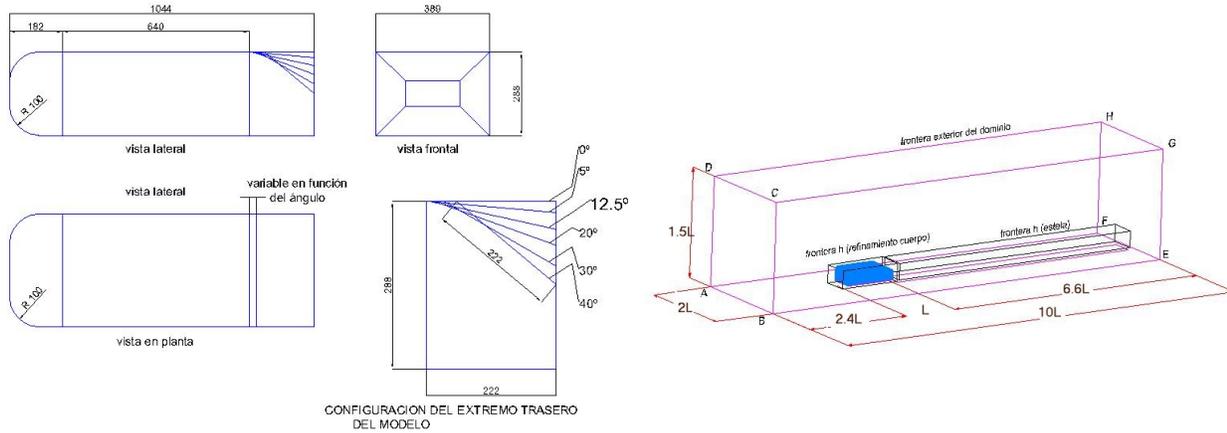


Figura 2: Izq.: dimensiones geométricas del cuerpo de Ahmed. Der.: dominio de flujo computacional.

desarrollan en la estela cercana, su influencia en el arrastre, las regiones con flujo cuasi bidimensional o completamente tridimensional (3D) y los fenómenos de turbulencia, entre otros. Además, el estudio de los modelos reales (para ensayos en ruta) o en escala (ensayos en túnel de viento) resultan costosos. Por estos motivos, entre otros, Ahmed³ y sus colaboradores analizaron un modelo simplificado, con una configuración geométrica simple, libre de aditamentos o accesorios, con superficies suaves, de tal manera de concentrar la atención en los fenómenos antes descritos. El modelo obtenido reproduce bastante bien los comportamientos principales del flujo alrededor de los vehículos y constituye también un punto de partida para el desarrollo y validación de los códigos computacionales específicos al tema. El éxito de los equipos de diseño tiene que ver con el hecho de tomar ventaja de estas complicadas interacciones en el flujo, de su comprensión, de tal forma que les sirva para perfeccionar el control del flujo. Un conocimiento detallado de los mecanismos físicos involucrados tales como las estructuras disipativas, difusión, frotamiento, viscosidad, formación de torbellinos, fluctuaciones e inestabilidad, es también primordial para el desarrollo de los códigos numéricos. Desde que se plasmó esta idea, varias publicaciones han ido apareciendo, presentando resultados experimentales o numéricos o bien ambos. Las mismas a su vez sirven como base de datos para futuros avances en esta complicada aplicación de ingeniería. Presentamos algunos resultados y los comparamos con algunas simulaciones numéricas o ensayos experimentales publicados, que dan sustento a la discusión sobre la validez de los resultados obtenidos. En primer lugar, haremos una breve reseña histórica y del estado del arte en este tema. Luego describimos en forma concisa la geometría del modelo y la estrategia utilizada en la generación de la malla. Luego analizamos algunos de los fenómenos físicos presentes incluida la turbulencia y, a continuación, formulamos numéricamente el modelo CFD empleado. Con todo este material, pasamos a discutir los resultados obtenidos, finalizando con las conclusiones a que se arribaron y las futuras líneas de trabajo a implementar.

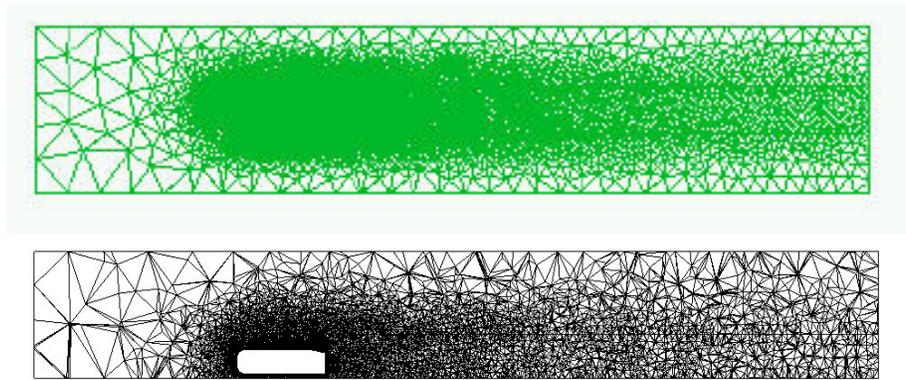


Figura 3: Arr.: mallado de la superficie del piso. Abajo: corte longitudinal con las zonas de refinamiento.

2 CRONOLOGÍA Y ESTADO ACTUAL DEL ARTE

Cronológicamente los acontecimientos más relevantes fueron:

- 1975 Janssen y Hucho: exposición del efecto de la superficie inclinada del extremo trasero, en el congreso de la Volkswagen Golf I;
- 1978 Morel: estudio experimental del flujo sobre el cuerpo de Morel;
- 1984 Ahmed, Ramm, Faltin: estudio experimental del flujo a tiempo promediado sobre el modelo de Ahmed;
- 1997 Gilliéron, Chometon: modelización numérica del flujo 3D en el modelo de Ahmed;
- 1998 MOVA: European Project (1998-2001): nuevos experimentos de validación:
 - Lienhart, Stoots, Becker: cálculo del flujo y la estructura turbulenta en la estela de un modelo de vehículo simplificado (similar al cuerpo de Ahmed);
 - Craft, Gant, Iacovides, Launder, Robinson: nuevos estudios, modelización de la turbulencia, cálculo numérico (caso 9.4);
- 2000 Rouse, Diwakar: cálculo del flujo sobre el cuerpo de Ahmed, usando mallas tetrahédricas adaptadas con un estimador de error anisotrópico;
- 2000 Gullman, Strand, Angele: análisis y medición de la estela. Aproximación a la inclinación óptima (experimental);
- 2001 Howard, Bieder, Lesieur: primera publicación con LES en el cuerpo de Ahmed;
- 2001 Krajnovic, Davidson: simulación LES del flujo alrededor de un cuerpo simplificado muy parecido al de Ahmed sólo que su ángulo es nulo (caso típico en autobuses);
- 2001 10th ERCOFTAC-IAHR Workshop: congreso relacionado a una modelización turbulenta refinada (en Darmstadt): dieciocho tipos de cálculo diferentes;
- 2001 Gilliéron, Spohn: análisis de las separaciones del flujo generadas por una simetría simplificada de un vehículo automotriz;

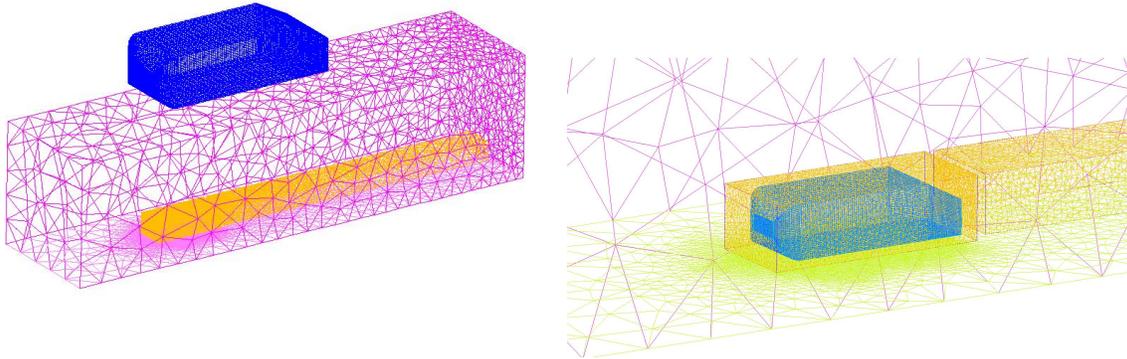


Figura 4: Izq.: malla en la frontera del dominio y del cuerpo. Der.: detalles de la malla de frontera alrededor del cuerpo.

- 2001 Khalighi⁴ *et al.* estudian un modelo simplificado muy parecido al de Ahmed pero con el agregado de accesorios para el control de flujo a la salida;
- 2002 ERCOFTAC-IAHR Workshop congreso relacionado con una modelización turbulenta refinada (Poitiers);
- 2003 Kapadia, Roy, Wurtzler: simulación de remolinos sobre el modelo de Ahmed;
- 2003 Liu, Mozer: modelización numérica del flujo de aire sobre el cuerpo de Ahmed. Modelo de turbulencia RANS.

3 DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DEL MODELO

Un paso previo a la generación de la malla, consiste en la definición de la forma del dominio a mallar. En ciertas circunstancias tendremos objetos de formas complicadas, por lo que es necesario utilizar técnicas de Diseño Asistido por Computadora (CAD) para definirlo. Esto condiciona a los programas de generación de mallas a adaptarse para recibir la información proveniente de los programas de este tipo. En nuestro caso, la etapa de pre-proceso la realizamos en varias sub-etapas, empezando a partir del diseño y construcción de la geometría global. La Fig. 1 (izq.) muestra el esqueleto del modelo de Ahmed³, la Fig. 2 (izq.) las dimensiones del cuerpo de referencia y los diferentes tipos de superficie inclinada en el extremo trasero utilizadas para estudiar su incidencia en la estela turbulenta y, por ende, en las fuerzas de arrastre (*drag*). La Fig. 2 (der.) especifica las dimensiones del dominio computacional, donde observamos que la superficie de entrada se encuentra corriente arriba a $2.4L$ del cuerpo, y la superficie de salida a $6.6L$ corriente abajo del extremo trasero del mismo, donde L es la longitud del vehículo. Con respecto a las componentes cartesianas tenemos: y corresponde a la dirección de la corriente (*stream-wise*), la x a la transversal (*span-wise*) y la z corresponde a la altura (*stream-normal*). El huelgo entre el piso y la parte inferior del cuerpo es de $0.05 m$.

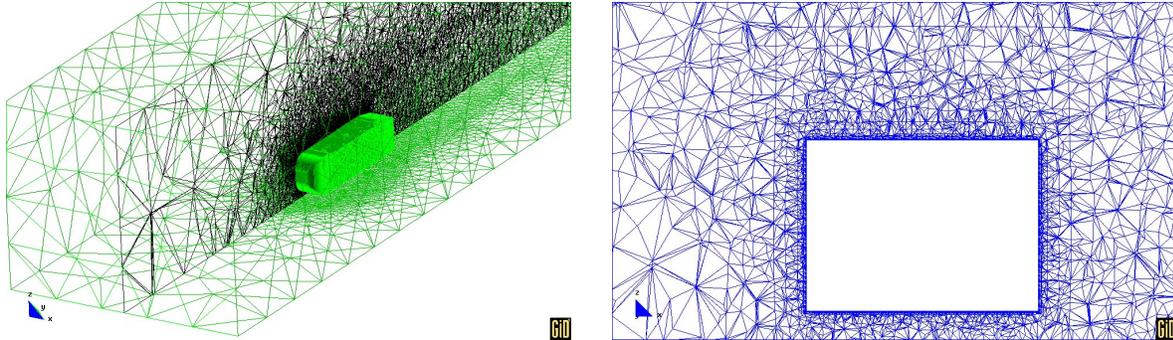


Figura 5: Arriba: corte longitudinal con la frontera del dominio como fondo. Abajo: corte transversal del dominio.

4 MODELO MATEMÁTICO

Las ecuaciones de Navier-Stokes restringidas a un fluido viscoso e incompresible, representan el modelo matemático más apropiado del flujo de un fluido viscoso con efectos compresibles despreciables. El flujo de aire relativo generado por el vehículo crea un campo de presión y su consecuente campo de velocidades, presentando zonas donde el flujo se acelera y otras donde se frena. Este campo de presión y el gradiente de velocidad resultante dan lugar a fuerzas aerodinámicas experimentadas por el vehículo las cuales dependen, fundamentalmente, de su geometría y de su velocidad de avance relativa al viento. Para todo propósito práctico, el flujo alrededor del cuerpo es totalmente turbulento, i.e. $Re > 10^6$. Los efectos de compresibilidad son insignificantes hasta una velocidad aproximada de 350 Km/h, así que para vehículos de calle el flujo puede ser considerado como prácticamente incompresible.

4.1 Resolución numérica

La resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes incompresibles la hacemos mediante elementos finitos [Finite Element Method (FEM)], con un esquema combinado de derivadas en contracorriente, en la variante SUPG+PSPG [Streamline Upwind Petrov Galerkin (SUPG) + Pressure Stabilized Petrov Galerkin (PSPG)] propuesto por Tezduyar⁵ *et al.*. Este esquema combinado se debe a que las ecuaciones de Navier-Stokes para flujos incompresibles presentan dos dificultades distintivas para su resolución por elementos finitos. En primer lugar, tales ecuaciones se tornan cada vez más dominadas por la advección a medida que el número de Reynolds (Re) se incrementa. Por otra parte, la condición de incompresibilidad no representa una ecuación de evolución sino, más bien, una restricción sobre las de Navier-Stokes. Esto tiene el inconveniente que sólo podemos usar algunas combinaciones de los espacios de interpolación para la velocidad y la presión, a saber, aquellas que satisfacen la denominada condición de Brezzi-Babuska. En la formulación de Tezduyar *et al.*, la ecuación de advección es estabilizada agregando un cierto término SUPG y, similarmente, se incluye otro término PSPG para estabilizar la ecuación

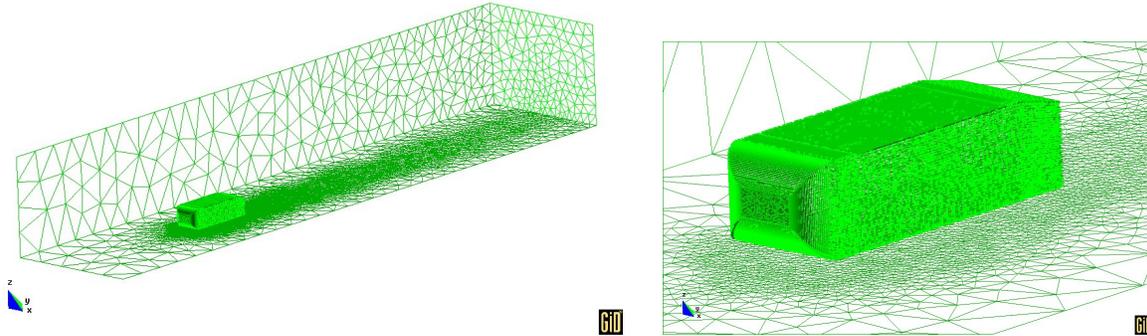


Figura 6: Izq.: vista isométrica de la malla del dominio. Der.: otra vista más en detalle.

de incompresibilidad. Una vez que estas ecuaciones “modificadas” son discretizadas en el espacio mediante elementos finitos, resulta un sistema de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (ODE) en el tiempo t , cuya solución numérica es hallada mediante un esquema trapezoidal, e.g. con un retro-Euler. A su vez, en cada paso de tiempo t_k , el sistema de ecuaciones no lineales es resuelto iterativamente mediante residuos generalizados GMRES⁶ con preconditionamiento a la derecha de Jacobi. Todo este esquema es implementado en el programa de elementos finitos PETSc-FEM^{7,8}, orientado principalmente a la resolución numérica de problemas en mecánica de fluidos con varios campos acoplados (o multifísica), y está basado en la librería de paso de mensajes MPI⁹ (Message Passing Interface) y en la librería de cálculo paralelo científico PETSC¹⁰ (Portable Extensible Toolkit for Scientific Computations). Esta última nos provee un entorno para programación distribuida, permitiendo diferentes niveles de inserción del programador con el paralelismo, ya sea desarrollando tareas paralelas (e.g. asignación de datos, resolución de sistemas) o bien programando explícitamente las mismas. El código PETSC-FEM es ventajoso en su flexibilidad y su capacidad de paralelizar en forma eficiente todo el proceso de resolución, permitiendo además utilizar diferentes estrategias para la misma.

4.2 Modelo de turbulencia

La modelización de la turbulencia, e.g. ver Wilcox¹¹ se basa en considerar que cada variable del flujo ϕ se puede descomponer en un valor promediado $\bar{\phi}$ y una fluctuación ϕ' , tal que $\phi = \bar{\phi} + \phi'$. Si se asume luego que $\bar{\phi}' = \bar{\phi}$ y $\bar{\phi}' = 0$, se tiene que el operador de promediación es lineal. Aplicando el operador de promediación a las ecuaciones de balance de masa y de momento, se obtiene un nuevo juego de ecuaciones sobre las cantidades promediadas y términos adicionales de carácter difusivo sobre las cantidades fluctuantes. Estos últimos deben ser necesariamente modelados. Una de las hipótesis más simples calcula los nuevos términos difusivos mediante un tensor múltiplo de la identidad, considerando de esta manera que la estructura que forma la turbulencia es de carácter isotrópico. Estos modelos se conocen como métodos de viscosidad turbulenta (*eddy viscosity models*). La viscosi-

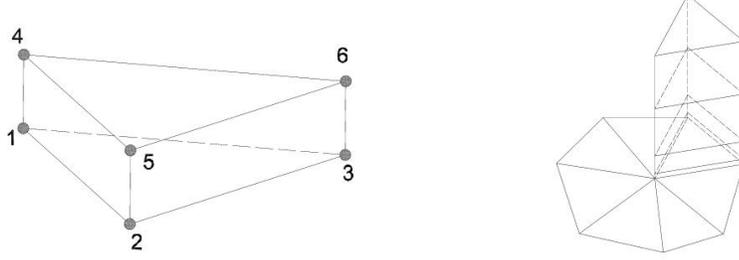


Figura 7: Capas de elementos prismáticos por extrusión de triángulos sobre la “piel” del cuerpo.

dad y conductividad turbulentas se pueden determinar por diversos modelos, basados en ecuaciones de transporte adicionales o bien en forma algebraica. Entre estos últimos, uno de los modelos más sencillos es el *Large Eddy Simulation* (LES) de Smagorinsky. El modelo algebraico LES resuelve las ecuaciones de balance de momento con una viscosidad efectiva μ_e , suma de las cantidades moleculares μ , ν y las cantidades turbulentas μ_t y κ_t . Estas últimas se calculan con $\nu_t = C_s \Delta h_{\text{elem}} \sqrt{\epsilon(u) : \epsilon(u)}$, $\kappa_t = C_p / (\mu_t Pr_t)$, donde C_s es la constante de Smagorinsky, Δ es una función de amortiguamiento que disminuye la intensidad de la viscosidad turbulenta cerca de la interface con la pared sólida, h_{elem} es un tamaño característico, $\epsilon(u) : \epsilon(u)$ es la traza del tensor de la tasa de deformación $\epsilon(u)$ y Pr_t es el número de Prandtl turbulento.

4.3 Función de pared

Si bien no hemos utilizado en este ensayo, una ley de pared, consideramos conveniente describir la misma, ya que en próximos trabajos, resultará necesario incorporarla. Un cálculo de la velocidad de fricción en la pared nos permite definir todas las condiciones de borde de las ecuaciones de momento. En el borde Γ_w del dominio imponemos una ley de pared, que representa una condición de contorno que calcula la tracción para las ecuaciones de momento. Este procedimiento involucra un cálculo de la velocidad de fricción en la pared u_* , para la cual asumimos el perfil representado por las expresiones

$$f(y^+) = \frac{|\mathbf{u} - \mathbf{u}_{\text{wall}}|}{u_*} = \begin{cases} y^+ & \text{para } y^+ < 5 \text{ (región laminar);} \\ 5 \log(y^+) + C_{\text{wall},1} & \text{para } 5 < y^+ < 30 \text{ (región intermedia);} \\ 2.5 \log(y^+) + C_{\text{wall},2} & \text{para } y^+ > 30 \text{ (región logarítmica);} \end{cases} \quad (1)$$

con $y^+ = y_{\text{wall}} u_* / \nu$, donde y_{wall} es la distancia a la pared. Este sistema de ecuaciones no lineales puede resolverse, por ejemplo, mediante un método secante. Una vez determinado el valor de u_* , la tracción para las ecuaciones de momento se determinan con $h_{\text{wall}} = g(u - u_{\text{wall}})$, donde $g = |\tau_{\text{wall}}| / |\mathbf{u} - \mathbf{u}_{\text{wall}}|$ y $|\tau_{\text{wall}}| = \rho u_*^2$.

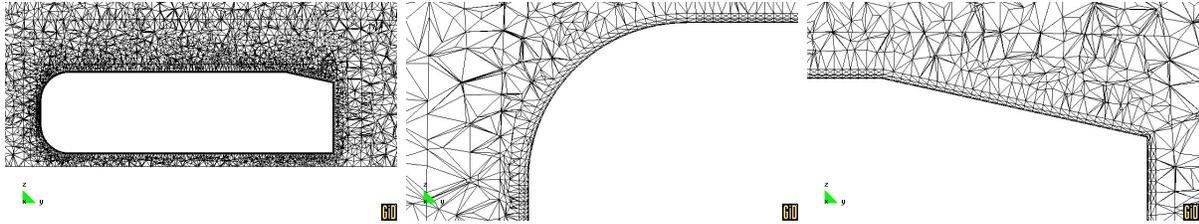


Figura 8: Detalles de la capa estructurada: corte longitudinal (izq.); en la parte anterior (centro) y en la parte posterior (der.).

5 GENERACIÓN DE LA MALLA DE ELEMENTOS FINITOS

En esta sección describimos el proceso de generación automática de la malla. El proceso adoptado consiste en un mallado en sucesivas dimensiones, primero uni-dimensional (1D), luego bi-dimensional (2D) y, finalmente, tridimensional (3D). Para la construcción de la malla 3D partimos de las correspondientes a las superficies límites, tanto sobre el cuerpo (límite interior) como del dominio computacional exterior (límite exterior) y del dominio de refinamiento. Esta construcción la subdividimos en tres pasos, a saber,

- mallado 1D de los contornos superficiales y posterior mallado de superficie;
- generación automática de la malla de volúmen;
- incorporación de capas de elementos prismáticos en la vecindad del cuerpo.

5.1 Mallado de las superficies de frontera

El primer paso consiste en la subdivisión, regular o variable, de las líneas que definen el contorno de las superficies. Esta tarea se realiza utilizando las herramientas CAD utilizadas en el proceso de modelización. Para la construcción de la malla, partimos de la definición geométrica de la frontera y de una función real $h(\mathbf{x})$ de la posición \mathbf{x} , que determina el espaciamiento deseado para los elementos o entre los nodos que forman las superficies, contemplando las posibles zonas de refinamiento. Dicha función viene dada en forma implícita por el tamaño de los elementos unidimensionales de la frontera y por algunos elementos interiores, definidos mediante mallas H . En la Fig. 3 vemos como queda la superficie del piso luego de aplicarle el generador de superficie. La Fig. 4 visualiza las mallas de frontera de dominio anterior junto con las de los interiores utilizadas para refinar la malla en las zonas más próximas al vehículo, en la estela turbulenta y en el huelgo entre el mismo y el piso de la carretera virtual. Cabe aclarar que estas mallas de superficie límites, conformes o no, pueden contener cualquier tipo de elementos, incluso mezclados, tal como lo apreciamos en la discretización de las superficies del cuerpo, las que se resolvió con elementos cuadriláteros, estructurados, por medio del sistema CAD, posteriormente convertidos a triángulos, por el mismo generador automático de superficie, ver Fig. 4 (derecha).

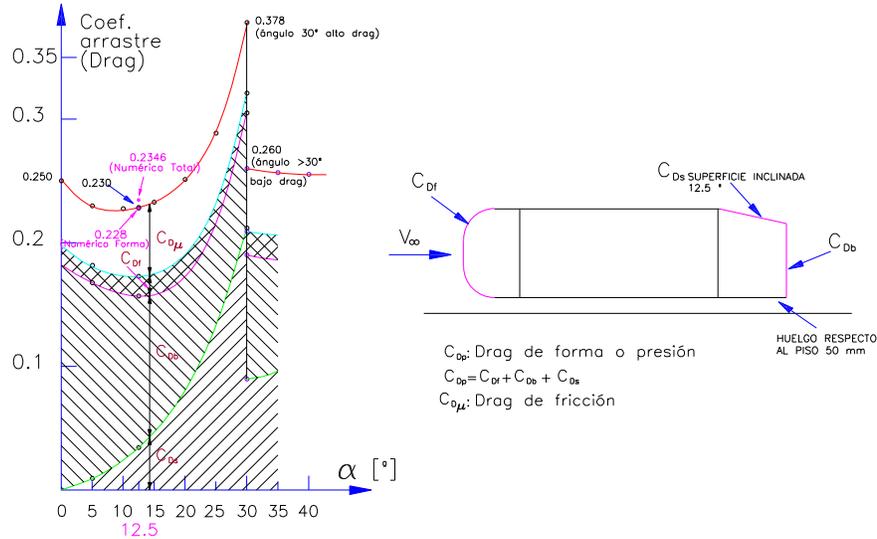


Figura 9: Coeficiente de arrastre C_D para distintas configuraciones del ángulo de inclinación. Descomposición por regiones geométricas.

5.2 Generación automática de la malla de volúmen

Las funciones principales de las mallas de superficie límite, de acuerdo con lo establecido en la sección anterior son: *limitar el dominio*, *definir el espaciamiento entre los nodos* y *proveer los nodos que serán incluidos en la malla de volúmen final*. Por lo tanto, el siguiente paso consiste en generar de manera automática la malla de volúmen. Existen diferentes métodos de generación pero, en este trabajo, presentamos una nueva forma para obtener mallas tridimensionales, cuyo costo computacional es $O(n)$, donde n el número de puntos que define el dominio Ω . El método se denomina EDT (*Extended Delaunay Tessellation*), pues se basa en el diagrama de Voronoï de una nube de puntos, para armar poliedros con los mismos que definen esferas prácticamente coincidentes. De ese modo, se evitan las inestabilidades propias de la “teselación” estándar de Delaunay, que suelen provocar indefiniciones en 2D y 3D y, peor aún, elementos de volúmen casi nulos (*sliver*) en 3D. Con este procedimiento obtenemos automáticamente elementos de buena calidad, sin pagar el precio computacional de un posterior tratamiento de suavizado de la malla. Para más detalles al respecto, e.g. ver Calvo/Idelsohn¹². El generador fue desarrollado en el CIMEC por N. Calvo, la malla tridimensional contiene alrededor de 450.000 elementos tetraédricos y 87.000 nodos. La Fig. 5, muestra un corte transversal donde es posible apreciar el refinamiento en la zona comprendida entre el piso y la parte inferior del modelo. Además, es posible distinguir un cierto refinamiento en la estela del flujo que se aprecia en el corte longitudinal de esta figura. En la Fig. 6 observamos la malla sobre el cuerpo, el piso y, como fondo, las superficies límites del dominio computacional. Con respecto a los datos de generación podemos especificar que se utilizó como frontera interior una malla preexistente del cuerpo que fue envuelta por una malla H , utilizando

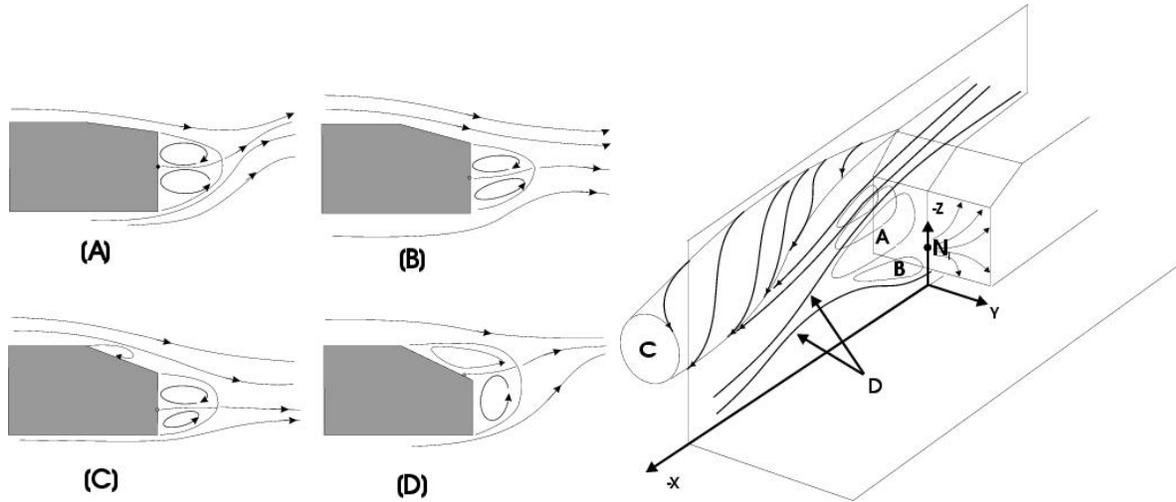


Figura 10: Izq.: comportamiento del flujo en la estela según el ángulo de inclinación. Der.: vista esquemática del flujo en la estela para un ángulo de inclinación de 12.5° .

Coeficiente de arrastre: Ahmed vs. Numérico				
α	C_D	C_{Df}	C_{Ds}	C_{Db}
Ahmed 12.5°	0.2300	0.0160	0.0370	0.1220
Numérico 12.5° <i>slant</i> = 176mm	0.2346	0.0230	0.0385	0.1658
% Diferencia	+2 %	+43.75 %	+4.05 %	+35.90 %

Tabla 1: Descomposición de la fuerza de arrastre para la configuración $\alpha = 12.5^\circ$.

otra similar para la zona correspondiente a la estela del viento, rodeando todo el conjunto con una malla de frontera exterior que totalizó unos 26.000 elementos y 23.000 nodos de partida. El generador obtuvo 87.000 nodos y 450.000 elementos tetraédricos en un tiempo de unos 18 segundos para el Voronoï de frontera, otros 20 segundos para calcular las esferas exteriores, y unos 17 segundos para los puntos (60.000 nodos y 310.000 esferas de volúmen), eliminando 6.300 elementos cuasi-nulos o degenerados (“slivers”) mediante “swapping” diagonal.

5.3 Incorporación de los elementos prismáticos

El espaciamiento más pequeño lo imponemos en la inmediata vecindad de la superficie del vehículo, para así luego poder resolver mejor, en la etapa de cálculo, las tensiones de corte superficiales que ahí ocurren. Si bien el refinamiento en esta zona es importante, no satisface del todo los requerimientos físicos del problema, por lo que incorporamos una capa semi-estructurada de elementos prismáticos, ver Fig. 7, que nos permite refinar aún más el dominio y así poder observar fenómenos que se manifiestan en esta delgada región, muy cercana a la superficie del cuerpo, tales como separaciones del flujo, vorticidades e intensos gradientes de presión y velocidad. La malla de tetraedros previamente construída,

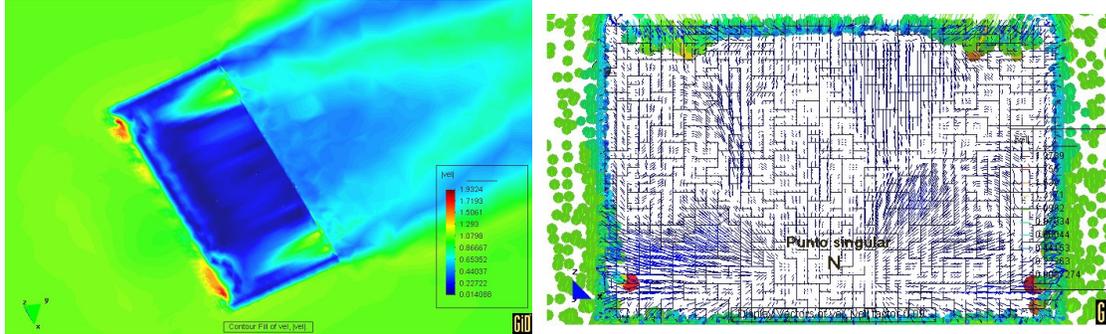


Figura 11: Izq.: contour fill del campo de velocidad (prácticamente 2D) sobre la superficie inclinada trasera (*slant*) en el modelo de Ahmed (simil parabrisas trasero en vehículos). Der.: velocidad sobre la base y localización del punto singular N .

tal como se explicó en la sección anterior, estará ligada a la malla de prismas por una de sus caras triangulares (la más externa) preservando así la continuidad. De esta forma hemos generado una malla híbrida, con refinamiento tanto en el sector de tetraedros como en la zona de los prismas triangulares. Para llevar a cabo esta tarea, se realizó un “inflado” de la malla original, obtenida con el generador automático, con el objetivo de dejar un hueco y así poder intercalar los elementos prismáticos de la capa semi-estructurada. El mismo fue logrado resolviendo las ecuaciones de elasticidad lineal, con desplazamiento impuesto en la zona del cuerpo, fijando el resto del contorno a un desplazamiento nulo. La Fig. 8 (izq.) muestra la capa sobre el total del cuerpo, mientras que en centro y derecha se ven detalles en donde podemos apreciar las capas incorporadas, en ellas vemos elementos distorsionados, ya que los elementos prismáticos fueron subdivididos en tetraedros, para que se puedan captar con el visualizador.

5.4 Datos finales de la malla obtenida

Luego de aplicar la capa de prismas hemos obtenido una malla de unos 450.000 elementos del tipo de tetraedros y unos 151.000 elementos tipo prisma triangular, con un total de unos 162.000 nodos (unos 86.000 en la malla original de tetraedros y otros 76.000 en la de prismas). Cada capa de prismas posee unos 51.000 prismas y 26.000 nodos. Para apreciar mejor la magnitud de la malla, si descomponemos los prismas en tetraedros, entonces tendremos unos 450.000 tetraedros originales más 453.000 correspondientes a la capa, lo que totalizan unos 903.000 elementos, con 162.000 nodos. Una manera de analizar la calidad de la malla obtenida consiste en medirla en forma directa a través de los gradientes de las funciones de forma. Al máximo gradiente calculado en el centroide del poliedro, lo comparamos con un gradiente esperado que resulta de una variación de 0 a 1 en la menor arista del poliedro. El valor de la calidad γ resulta de la cociente entre los valores anteriores, el cual se encontrará entre 0 y 1. El método utilizado al eliminar los “slivers”, es decir, los elementos de calidad extremadamente baja, dejar sólo tetraedros aceptables y sin suavizar, nos da, en este caso, una calidad mínima $\gamma_{\min} = 0.02$ y máxima $\gamma_{\max} = 0.95$, lo

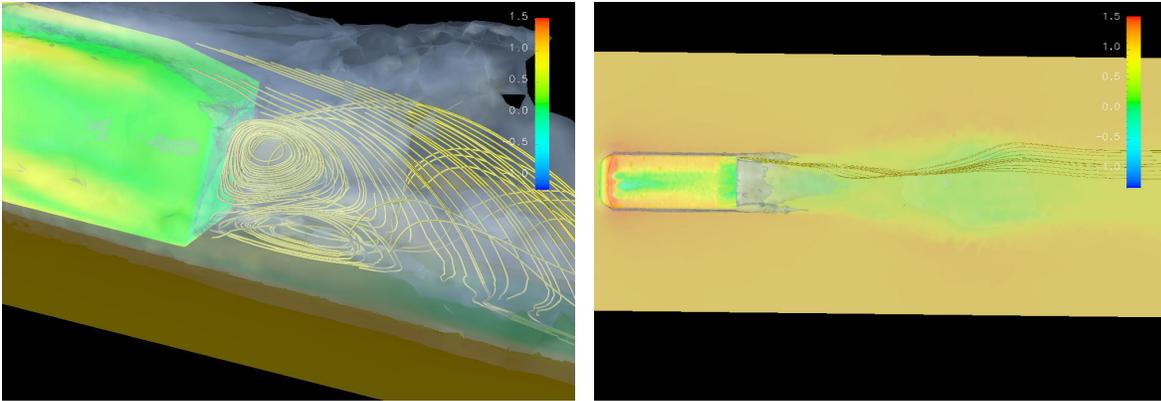


Figura 12: Izq.: líneas de corriente para la velocidad en la estela cercana a la superficie base del modelo de Ahmed, donde se evidencian la presencia de dos vórtices en herradura A y B . Der.: vista en planta de la velocidad en donde se aprecia el vórtice longitudinal producido por una arista lateral.

cual puede considerarse bastante buena. Por otra parte, también es conveniente estimar algunas de las longitudes de escala características asociadas con el flujo, tales como las microescalas de Kolmogorov y de Taylor, e.g. ver Tennekes/Lumley¹³. La microescala de Kolmogorov es una longitud de escala para los movimientos turbulentos más pequeños del flujo, dada por $\eta = A^{-1/4}R_l^{-3/4}l$, mientras que la microescala de Taylor pone más énfasis en los movimientos de escala integral y está dada por $\lambda = 15^{1/2}A^{-1/2}R_l^{-1/2}l$. En ambas expresiones, A es una cierta constante, de orden 1 (suponemos para este caso $A = 0.5$), l es una escala integral volumétrica, por ejemplo, adoptamos la longitud del cuerpo $L = 1.044$ [m] y R_l es el número de Reynolds de escala integral, que para nuestro caso es del orden de 4.25×10^6 , tomando una viscosidad cinemática del aire a $15^\circ C$ de 14.5×10^{-6} [$m^2/seg.$], representa aproximadamente 60 [m/seg] de velocidad de desplazamiento. Con estos valores resulta $\eta \approx 1.27047 \times 10^{-5}L$ y $\lambda \approx 2.6568 \times 10^{-3}L$. El espacio de malla (a nivel de elemento) más pequeño, en la vecindad de la superficie del cuerpo (capa más cercana), es del orden de $6.35057 \times 10^{-4}L$. Podemos ver que la malla empleada tiene los valores más pequeños por debajo del margen de la microescala de Taylor. Esto significa que los remolinos turbulentos de gran escala estarán bien resueltos numéricamente y que la malla es apropiada para la precisión requerida en el cálculo por LES.

5.5 Conclusiones respecto a la malla

A partir de la experiencia realizada, podemos afirmar que el método utilizado en la generación comparte todas las ventajas del método estándar de Delaunay, pero con el adicional que no requiere una etapa de suavizado (o “cosmética”) para mejorar la calidad de la malla, destacándose además por su bajo costo computacional, permitiéndonos trabajar en micro-computadoras tipo PC. Otra ventaja está relacionada con la incorporación de la capa de elementos prismáticos, que nos proveen de una mejor solución en una zona crítica de nuestro problema. Por último, mencionamos que ambos procesos nos permitieron in-

corporar una gran cantidad de elementos en la zona entre el cuerpo y el piso, que es un sector crítico tanto para el flujo como para la generación de la malla.

6 FLUJO DE AIRE ALREDEDOR DEL CUERPOS OBTUSOS

6.1 Aplicación al modelo de Ahmed

El flujo de aire alrededor de los vehículos en movimiento produce un conjunto de fuerzas y momentos que afectan en forma directa la estabilidad del mismo y sus características de funcionamiento (e.g. consumo de combustible). Dicho flujo también tiene influencia en fenómenos tales como la acumulación y limpieza de polvo o de agua de lluvia sobre los faros y cristales. Generalmente cuando observamos un ensayo podemos ver que las líneas de corriente siguen el contorno del cuerpo en su extremo frontal, que las separaciones se producen en el extremo trasero, comenzando en la mayoría de los casos en el extremo final del techo para formar luego una larga estela en la región corriente abajo del mismo. Esta última presenta diferentes configuraciones según la forma geométrica de la parte trasera. La fuerza de resistencia al avance (o de arrastre) F_D , así como otras fuerzas y momentos, es proporcional al cuadrado de la rapidez u , es decir, $F_D \sim u^2$. La reducción de la misma trae aparejado implicaciones económicas sobre todo al disminuir el consumo de combustible. Luego, en la Sec. 6, volveremos a tratar el tema y analizaremos su determinación, descomposición y los resultados obtenidos. Por otra parte, existe una diferencia de presiones entre las zonas superior e inferior del modelo, dando lugar a una fuerza resultante vertical, perpendicular a la dirección del flujo, denominada fuerza de elevación o sustentación (*lift*). En la mayoría de los casos tiene un sentido ascendente tendiendo a levantar el vehículo, disminuyendo la carga sobre las ruedas. Debemos señalar además que cuando el viento sopla y es perpendicular a la dirección de avance el flujo de aire es no simétrico. Tal como fue presentado por Ahmed *et al.*, el análisis aerodinámico se puede descomponer en dos partes, una es la determinación del valor de la presión sobre la “piel” (*skin friction*), que nos permita calcular la fuerza de arrastre, sustentación y fricción, no sin dejar de lado la posición del centro de presión. El otro análisis corresponde al estudio de las características y comportamientos de la estela del flujo. La descripción del mapa de flujo evalúa el rol de los diferentes patrones de vórtices y torbellinos sobre el valor del arrastre total. Si bien el primer análisis es más representativo desde el punto de vista del diseño, el último está tomando mucha importancia ya que le indica a los aerodinamicistas donde concentrar los esfuerzos para reducir los coeficientes y mejorar la eficiencia global, eliminando efectos no deseados, tales como ruido, acumulación de suciedad, optimizando el sistema de enfriamiento, entre otros.

6.2 Mediciones del campo de presión y de la fuerza de arrastre

La estela que se forma detrás del modelo constituye una de las principales fuentes del coeficiente de arrastre total C_D , sobre todo en cuerpos aerodinámicos (*slender*). La estela se forma como consecuencia de las separaciones producidas en el extremo trasero de estos

cuerpos obtusos. La separación se produce por una región de baja presión en la zona *base* y a menudo intensos vórtices longitudinales acompañados por un flujo transversal de magnitud considerable que extrae energía cinética del mismo. La fuerza de arrastre, se suele descomponer en dos partes principales, que son la de presión y la de fricción. A su vez se calculan las contribuciones de las diferentes partes geométricas del modelo bajo estudio, e.g. ver Fig. 9. Con el objeto de mejorar el comportamiento del cuerpo considerando como parámetro el coeficiente de arrastre, es importante conocer la estructura cualitativa de la estela, tarea que abordaremos en la Sec. 6.3. La fuerza neta del fluido sobre el modelo de referencia, es una fuerza de arrastre alineada con la dirección del flujo. Existe una relación entre esta fuerza y el *espesor de cantidad de movimiento* en la estela. Además, la causa de su existencia, sobre todo cuando el número de Reynolds es grande, se debe a la creación de energía cinética de remolinos (*eddies*), cuyas velocidades son proporcionales a la velocidad de la corriente y cuyas dimensiones son determinadas por la geometría del cuerpo. El coeficiente de arrastre $C_D = D/(\rho U_\infty^2 A_{proy}/2)$, donde A_{proy} representa el área frontal o proyectada del cuerpo sobre un plano transversal a la dirección de la corriente, ρ es la densidad del fluido, en nuestro caso aire, y U_∞ corresponde a la rapidez de la corriente libre a la entrada, que hemos tomado igual a la unidad. A continuación examinamos la contribución de las fuerzas de presión y las de fricción en el arrastre total experimentado por el modelo. Si tomamos las presiones normales superficiales éstas, por sí solas, generan un arrastre, que lo medimos con el coeficiente

$$C_{Dp} = \frac{2}{\rho U_\infty^2 A_{proy}} \sum_{surf} \left[\int_{Area_{surf}} p_{surf} dS_{surf} \right] ; \quad (2)$$

el cual está formado por la presión actuante sobre las superficies (*surf*) y por la componente normal al área de sección transversal a la dirección del flujo, siendo $Area_{surf}$ el área total de la superficie y dS_{surf} el valor por elemento. Es decir, calculamos la presión media en la dirección de la corriente y por elemento y luego la integramos en su área, sumamos la contribución de todos ellos, obteniendo de esta forma el coeficiente de arrastre de presión o de forma. Al mismo lo descomponemos para observar su contribución en diferentes sectores del cuerpo. Dichos sectores serán la parte delantera C_{Df} , la parte de la superficie de inclinación C_{Ds} y la superficie base vertical del extremo trasero C_{Db} , tal que el total es $C_{Dp} = C_{Df} + C_{Ds} + C_{Db}$. Por otra parte, el coeficiente de fricción

$$C_{D\mu} = \frac{2}{\rho U_\infty^2 A_{proy}} \sum_{surf} \left[\int_{Area_{surf}} \tau_{surf} dS_{surf} \right] ; \quad (3)$$

está formado por las fuerzas superficiales de fricción τ_{surf} que actúan en la dirección del flujo. La Tabla 1 compara nuestros resultados con los experimentales de Ahmed y los porcentajes de diferencia entre ellos. Considerando sólo el arrastre por presión, la diferencia entre el experimental de Ahmed y el obtenido en el presente cálculo es de un

+30 %. Considerando la parte frontal del cuerpo, para una variación de la relación entre las áreas de la base y frontal de un +4 %, obtenemos para la relación C_{Db}/C_{Dp} una diferencia de $\approx +4\%$. En la superficie inclinada trasera, para una relación de áreas de -22 %, obtuvimos una diferencia en la relación C_{Ds}/C_{Dp} de -20 %. Con respecto a la sección frontal se observa un incremento en la relación C_{Df}/C_{Dp} de +11 %. Concluimos que el arrastre por presión en el extremo trasero es un 87 % del arrastre total. Los coeficientes de arrastre en esta zona oscilan significativamente, ya sea con oscilaciones de baja o alta frecuencia. Las de alta frecuencia están ligadas a la generación de vórtices, que analizaremos en la Sec. 6.3. No obstante, las oscilaciones de baja frecuencia son más difíciles de identificar y están más ligadas con los efectos de circulación alrededor del modelo y con la estabilización del campo de flujo total. El arrastre por fricción calculado aquí $C_{D\mu} \sim 0.0066$ es significativamente más pequeño que el calculado experimentalmente ~ 0.057 . Una posible explicación es que éste es un efecto de la ley logarítmica no utilizada para calcular los esfuerzos de corte en la pared. Se debería utilizar la misma teniendo en cuenta los efectos del gradiente local de presión. Esto significaría que, en la parte frontal donde hay un gradiente adverso en la presión local, la ley predeciría un alto esfuerzo de corte superficial para el mismo valor de velocidad cercano a la pared. Este cambio tiene un efecto significativo tanto sobre la generación de la capa límite en la parte frontal como en el incremento de los esfuerzos de corte superficiales sobre la superficie plana del cuerpo. En definitiva, si bien el acortamiento de la longitud de la superficie inclinada disminuyó el valor del arrastre total hasta un valor cercano al experimental, se incrementaría al corregir el valor por fricción. En cuanto a la fuerza de sustentación (o de elevación) \mathbf{L} (lift) que da lugar a la determinación del coeficiente correspondiente

$$C_L = \frac{2}{\rho U_\infty^2 A_{proy}} \sum_{surf} \left[\int_{Area_{surf}} p_{Z_{surf}} dS_{surf} \right] ; \quad (4)$$

donde $p_{Z_{surf}}$ es la componente de presión en dirección ortogonal a la superficie en la que actúa, en este caso, hemos obtenido $C_L = 0.0413$. Consideramos que un difusor en la parte trasera inferior aumentaría el flujo de aire en dicha zona, favoreciendo el trabajo de esta fuerza, es decir, elevando el cuerpo y disminuyendo la carga sobre las hipotéticas ruedas del mismo.

6.3 Flujo en la estela cercana

Luego de realizar el cómputo numérico del flujo y teniendo en cuenta las mediciones experimentales, e.g ver Gilliéron^{3,14} *et al.*, podemos observar que los resultados revelan dos patrones básicos en el flujo, delimitados por un umbral inferior α_m y otro superior α_M , que representan el ángulo de inclinación de la superficie trasera. Los valores obtenidos por Ahmed *et al.* fueron de 12.5° y de 30° , respectivamente. Para valores de $\alpha < \alpha_m$ el flujo es prácticamente bidimensional, cuando $\alpha_m < \alpha < \alpha_M$ es prácticamente tridimensional, y revierte a su comportamiento bidimensional si $\alpha > \alpha_M$. En el primer caso $\alpha < \alpha_m$, el

flujo sobre el techo permanece tangencial a la ventana trasera, separándose sobre el total del área base, ver arriba (izquierda y derecha) en la Fig. 10, en donde dos conjuntos de flujos paralelos, uno desde el techo y el piso y el otro desde ambos laterales, forman dos vórtices con sentido contrario. Este sistema de vórtices toroidales ejercen presión sobre la superficie base, disipándose corriente abajo en la estela. Sobre la base, las líneas de corriente toroidales convergentes generan un punto singular del tipo nodo de fijación o de acoplamiento, identificado como **N** en la Fig. 10. La localización de este punto está directamente gobernada por las intensidades del sistema vorticoso, desde el piso y el techo, y varía con la velocidad exterior alrededor de la base, e.g. ver Chometon¹⁵. Cuando el ángulo de inclinación α crece desde 0 hasta α_m , el flujo en la ventana trasera inclinada permanece ligado pero experimenta una inflexión descendente, por lo que el punto **N** de acoplamiento se mueve hacia abajo. A medida que incrementamos el valor α , las líneas de fricción comienzan a curvarse hacia las aristas exteriores laterales de la superficie inclinada, formándose dos vórtices laterales que claramente se observan en la Fig. 11, en donde vemos un “contour fill” de la superficie inclinada. En esta última apreciamos claramente el carácter bidimensional del flujo. En nuestro estudio, analizamos un modelo cuyo ángulo de inclinación es de $\alpha = 12.5^\circ$, pero hemos variado ligeramente la longitud de la superficie inclinada, reduciéndola desde 222[mm] a 176[mm], e.g. ver Fig. 2. Si bien se han notado cambios con respecto al valor del coeficiente de arrastre, que hemos descrito en otra sección, no hemos observado una alteración en el patrón de flujo, permaneciendo éste con su carácter bidimensional. En la Fig. 11 observamos la localización del punto *N*, descrito anteriormente, y vemos como el aire alimenta al cono vorticoso resultante. Fuera de una pequeña área localizada en la parte superior de la arista de la superficie inclinada, los valores calculados para los coeficientes de presión estáticos, sobre la superficie inclinada y la base, correlacionan bien con los observados experimentalmente. En nuestro caso, para el ángulo de $\alpha = 12.5^\circ$, el coeficiente de presión está en el rango de -0.05 a -0.15 , comparados con los de Ahmed de -0.15 . Sobre la ventana inclinada, los coeficientes de presión van de -0.15 a -0.65 , comparados con Ahmed que están en el orden de -0.15 a -0.5 . El valor del coeficiente de arrastre C_D zonal por encima del experimental, probablemente se pueda explicar por una sobreestimación que realiza el código a la caída de presión en la base. Este defecto se puede deber a una simulación defectuosa de la vorticidad en la estela, provocado por una escasa resolución en la capa límite, que mejoraría aún más incrementando la cantidad de capas prismáticas. Por otra parte, la forma del perfil en la distribución de la presión a lo largo del eje z , indica que la presión media es más alta sobre la parte más baja de la base, lo cual fue observado en el experimento¹⁴, y es claro un pico de succión en la mitad superior mientras que un pico positivo aparece en la parte de abajo. Podemos concluir que el patrón de flujo es similar al observado experimentalmente^{3,14}, la distribución y orden de magnitud de la presión son consistentes. Para finalizar, se disponen de varias animaciones y figuras en la página <http://venus.ceride.gov.ar/~mstorti/AHMED/tex/ahmed/ahmed.html>.

7 CONCLUSIONES

- El modelo de referencia de Ahmed estudiado resulta atractivo desde el punto de vista computacional para efectuar calibraciones de los códigos CFD orientados a la aerodinámica de los cuerpos obtusos (e.g. vehículos terrestres);
- en nuestro caso, para el modelo de referencia de Ahmed con una configuración del ángulo de inclinación α próxima al valor crítico inferior y con una menor longitud de la superficie inclinada trasera, un 87 % del arrastre de presión corresponde a la región posterior (“hatchback”);
- el coeficiente de fricción estimado en las presentes simulaciones numéricas está bastante por debajo del experimental. Consideramos que al mejorar el cálculo turbulento, e.g. una ley logarítmica de pared junto con una mayor densidad de capas de elementos cuasi-estructurados, se obtendría una mejora en dicho coeficiente;
- el arrastre en la superficie delantera sólo representa un 9 % del total correspondiente a la presión;
- el pos-procesamiento, e.g. ver Fig. 12, sugiere que las estructuras vorticales en la estela cercana al extremo trasero se originan por las separaciones del flujo. En la parte frontal, las zonas de separación están de acuerdo con un derramamiento periódico. Aunque dicha zona disminuye cuando crece el número de Reynolds, el fenómeno persiste y es causa de generación de ruidos, interacciones no-estacionarias con las estructuras de vórtices traseros, además de otras inestabilidades. La región trasera es más compleja que lo visualizado por Ahmed, sobre todo porque la simulación numérica permite observar regiones “oscuras” para el ensayo experimental, como ser la de vórtice inferior tipo herradura;
- los ensayos con geometrías simples no serán suficientes para determinar la capacidad del código CFD, por lo que será necesario ir incorporando estructuras más elaboradas hasta obtener una herramienta suficientemente válida para integrar los métodos computacionales a los equipos de diseño;
- el método de generación de la malla 3D comparte todas las ventajas del método estándar de Delaunay, pero con el adicional de que no requiere una etapa de suavizado (o “cosmética”) para mejorar la calidad de la malla, destacándose además por su bajo costo computacional y permitiéndonos trabajar en microcomputadoras;
- el agregado de capas estructuradas en la malla es beneficioso en varios aspectos, e.g. mejorar las estimaciones en las tensiones de corte;
- los próximos pasos a seguir deberemos extenderlos para estudiar configuraciones con elevado arrastre, es decir, con ángulos cercanos a 30° y con valores intermedios dentro de la zona de flujo 3D, e.g. lo discutido en la Sec. 6.3, para pasar posteriormente a una etapa de análisis sobre las influencias de nuevas formas geométricas en la estructura del flujo, e.g. incorporación de un difusor en el plano inferior-posterior, aditamentos en el extremo trasero (“*boat tailing*”) para reducir el arrastre, modificación del perfil delantero similar a un parabrisas, entre otros.

Agradecimientos Este trabajo fue desarrollado con subsidios de CONICET, ANPCyT y UNL, a través de los proyectos CONICET-PIP-198/98 *Germen-CFD*, SECyT-FONCyT-PICT-6973 *PROA*, SECyT-PID-99/74 *FLAGS* y CAI+D-UNL-PIP-02552-2000. Se ha hecho uso intensivo de *Software Libre* como las librerías MPI, *SO GNU/Linux*, *Octave*, *Xfig*, *Tgif*, *OpenDx* y muchos otros, así como del procesador gráfico interactivo *GiD* (CIM-NE, Barcelona). Néstor Calvo ha participado en discusiones acerca de la generación de mallas 3D con refinamiento y desrefinamiento espacial selectivo.

REFERENCIAS

- [1] W.H. Hucho, editor. *Aerodynamics of road vehicles*. SAE, (1998).
- [2] L.J. Janssen and W.H. Hucho. Aerodynamische formoptienierung der typen vw - golf und vw - scirocco. *Volkswagen Golf I ATZ*, **77**, 1–5 (1975).
- [3] S.R. Ahmed, G. Ramm, and G. Faltin. Some salient features of the times-averaged ground vehicle wake. *SAE Society of Automotive Eng., Inc*, **1**(840300), 1–31 (1984).
- [4] B. Khalighi, S. Zhang, and C. Koromilas. Experimental and computational study of unsteady wake flow behind a bluff body with a drag reduction device. Technical Report 2001-01B-207, SAE, (2001).
- [5] T. Tezduyar, S. Mittal, S. Ray, and R. Shih. Incompressible flow computations with stabilized bilinear and linear equal order interpolation velocity-pressure elements. *Comp. Meth. Applied Mechanics and Engineering*, **95**(95), 221–242 (1992).
- [6] Y. Saad and M. Schultz. Generalized minimum residual method (GMRES). *SIAM J. Sci. Statist. Comput.*, **7**, 856–869 (1986).
- [7] V.E. Sonzogni, A. Yommi, N.M. Nigro, and M. Storti. Cfd finite element parallel computations on a beowulf cluster. In *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS 2000*, (11-14 September 2000).
- [8] PETSc-FEM: A general purpose, parallel, multi-physics FEM program. GNU General Public License (GPL), <http://www.cimec.org.ar/petscfem>.
- [9] Message passing interface (MPI). <http://www.mpi-forum.org/docs/docs.html>.
- [10] S. Balay, W. Gropp, L.C. McInnes, and B. Smith. *Petsc 2.0 users manual*. Technical Report UC-405, Argonne National Laboratory. Math. and Computer Sc., (1997).
- [11] D.C. Wilcox. *Turbulence Modeling for CFD*. DWC Industries, 2nd edition, (1998).
- [12] N.A. Calvo and S.R. Idelsohn. Generación de mallas tridimensionales en tiempo lineal. In *MECOM 2002: 1st South-American Congress on Computational Mechanics, III Brazilian Congress on Computational Mechanics, VII Argentine Congress on Computational Mechanics*, Santa Fe-Paraná, Argentina, (October 28-31 2002).
- [13] H. Tennekes and J.L. Lumley. *A First Course in Turbulence*. Cambridge, MA: MIT Press, (1994).
- [14] P. Gilliéron and F. Chometon. Modelling of stationary three-dimensional separated air flows around an ahmed reference model. *ESAIM: Proceeding*, **7**, 173–182 (1999).
- [15] F. Chometon. Analysis of three-dimensional separated flow on bluff bodies. *Second IAVD congress on Vehicle Design and components, Geneva*, **1** (1985).