

ANÁLISIS DE LA AERODINÁMICA DE UN AUTOMÓVIL DE COMPETICIÓN

Sacco Carlos^a y Franco Giuggioloni^a

^a*Dpto. Mec. Aer., Facultad de Ingeniería, Instituto Universitario Aeronáutico
Av. Fuerza Aérea 6500 (IX5010JMX) Córdoba, Argentina.
e-mail: csacco@iua.edu.ar, página web: <http://www.iua.edu.ar>*

Palabras clave: competición, CFD, TC2000, Elementos Finitos

Resumen. El estudio aerodinámico de automóviles de competición se ha venido realizando a lo largo de la historia principalmente mediante ensayos en pista y en menor medida en túneles de viento. En ambos casos los costos de este tipo de análisis es relativamente elevado. Este hecho ha llevado a la constante búsqueda de métodos de análisis y/o predicción del comportamiento aerodinámico menos costosos. La mejor respuesta a las exigencias planteadas por este sector apareció de la mano de los programas de simulación, conocidos como CFD. En este trabajo se presenta la aplicación de un programa de simulación basado en el método de los Elementos Finitos para el estudio de la aerodinámica externa de vehículos de competencia. El algoritmo utilizado es Pasos Fraccionados estabilizado mediante OSS (Orthogonal Subscale Stabilization).

Los resultados obtenidos con el CFD y las pruebas realizadas en pista con un Toyota Corolla de TC2000 mostraban importantes discrepancias, principalmente en los valores de *Down Force* debido a que la altura del vehículo se modifica por la acción de las cargas aerodinámicas. Para subsanar esta dificultad el programa permite modificar la posición del vehículo a medida que se realiza el cálculo. Para esto se tiene en cuenta las características de las suspensiones, las cubiertas, y las cargas aerodinámicas que actúan sobre el mismo.

1. INTRODUCCIÓN

Si bien la mecánica computacional no es una disciplina nueva, gracias a las grandes mejoras experimentadas en el desarrollo de las computadoras han hecho de la simulación numérica una herramienta de suma utilidad en la ingeniería.

Uno de los campos donde la mecánica computacional ha revolucionado por completo la forma de trabajar es en la mecánica de fluidos. Si nos remontamos a mediados de la década del 90 la única forma de realizar simulaciones, con resultados confiables, era mediante el uso de las llamadas super computadoras, que estaban al alcance de muy poca gente. Las nuevas tecnologías y la continua mejora de los algoritmos de cálculo han hecho posible que estos mismos programas de simulación puedan correr en Computadoras Personales de bajo costo.

La mayoría de las herramienta de análisis aerodinámico que se han desarrollado estaban rígidas para el mundo de la aeronáutica donde generalmente las geometrías son esbeltas, por este motivo han sido muy poco utilizadas para analizar automóviles. Sin embargo en los últimos años esta tendencia se ha revertido y hoy existen numerosos programas comerciales que permiten este tipo de análisis.

La posibilidad de correlacionar los resultados numéricos con los ensayos en pista han permitido mejorar las prestaciones de los programas de simulación. En este trabajo se ha logrado, a partir de numerosos ensayos, reproducir el comportamiento de un vehículo de carrera mediante CFD, teniendo en cuenta las modificaciones en la posición del mismo debido a las cargas aerodinámicas.

2. MODELO MATEMÁTICO

2.1. Ecuaciones de Navier Stokes

La modelización del medio continuo que se desea analizar se realiza mediante la utilización de las ecuaciones de Navier Stokes para flujo incompresible. En estas ecuaciones se asume que la densidad permanece constante, por lo tanto la ecuación de energía queda desacoplada y no se tiene en cuenta. Dichas ecuaciones se expresan de la siguiente forma:

Ecuación de momento

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \frac{1}{\rho} \nabla p = \mathbf{f} \quad \text{en } \Omega \times (t_0, t_f) \quad (1)$$

Ecuación de continuidad

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \text{en } \Omega \times (t_0, t_f) \quad (2)$$

donde Ω representa el dominio de análisis cuyo contorno esta formado por $\Gamma_u \cup \Gamma_\sigma$, mientras que (t_0, t_f) es el intervalo de tiempo de análisis. El vector $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$ es la velocidad, p es la presión, ν es la viscosidad cinemática y ρ es la densidad del fluido.

Las condiciones de contorno son:

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} \quad \text{en } \Gamma_u \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \bar{\mathbf{t}} \quad \text{en } \Gamma_\sigma \quad (4)$$

donde $\boldsymbol{\sigma}$ es el tensor de tensiones viscoso y \mathbf{n} el vector normal al contorno. Las condiciones de contorno se deben satisfacer para todo $t \in (t_0, t_f)$. Las ecuaciones resultantes se completan

con las correspondientes condiciones iniciales,

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 \text{ en } t_0 \quad \forall \Omega \quad (5)$$

$$p = p_0 \text{ en } t_0 \quad \forall \Omega \quad (6)$$

2.2. Algoritmo de Pasos Fraccionados

Las ecuaciones que se plantearon previamente no pueden ser resueltas numericamente en forma estandar debido a que la ecuación de incompresibilidad se transforma en una restricción del campo de movimiento. Existen diversos algoritmos que permiten subsanar la dificultad mencionada, entre ellos encontramos el algoritmo de Pasos Fraccionados. Este método satisface la condición LBB utilizando el mismo orden de aproximación para las velocidades y para la presión.

La ecuación de momento se divide en dos parte

$$\bar{\mathbf{u}}^{n+1} = \mathbf{u}^n + \delta t \left[\mathbf{u}^{n+\theta} \cdot \nabla \mathbf{u}^{n+\theta} + \gamma \frac{1}{\rho} \nabla p^n - \nu \Delta \mathbf{u}^{n+\theta} + \mathbf{f}^{n+\theta} \right] \quad (7)$$

$$\mathbf{u}^{n+1} = \bar{\mathbf{u}}^{n+1} - \frac{\delta t}{\rho} (\nabla p^{n+1} - \gamma \nabla p^n) \quad (8)$$

en las ecuaciones (7) y (8) aparece una nueva variable que se conoce como momento fraccionario. Tomando divergencia en la ecuación (8) y aplicando la ecuación de continuidad llegamos a

$$\nabla^2 (p^{n+1} - \gamma p^n) = \frac{\rho}{\delta t} \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}^{n+1} \quad (9)$$

Mediante esta ecuación se puede calcular la presión.

En las ecuaciones presentadas previamente encontramos el parámetro γ que puede tomar valor 1 o 0. Al utilizar $\gamma = 1$ se nota una mejora en la precisión espacial y temporal del esquema. El parámetro θ que se introdujo determina el tipo de esquema utilizado para la aproximación temporal.

2.3. Forma discreta de las ecuaciones

El método utilizado para discretizar la ecuaciones es el Método de los Elementos Finitos que resulta óptimo para este tipo de aplicaciones (Lohner 2001). El esquema resultante es de primer orden ($\gamma = 0$) y la discretización temporal se realizó con un Euler hacia atrás ($\theta = 0$). Tomando como funciones test $(\mathbf{v}_h, q_h) \in \mathbf{V}_h \times \mathbf{Q}_h$ obtenemos ¹,

$$\frac{1}{\delta t} (\bar{\mathbf{u}}_h^{n+1}, \mathbf{v}_h) = \frac{1}{\delta t} (\mathbf{u}_h^n, \mathbf{v}_h) - (\mathbf{u}_h^n \cdot \nabla \mathbf{u}_h^n, \mathbf{v}_h) - \nu (\nabla \mathbf{u}_h^n, \nabla \mathbf{v}_h) - (\mathbf{f}^n, \mathbf{v}_h) \quad (10)$$

$$(\nabla p_h^{n+1}, \nabla q_h) = \frac{\rho}{\delta t} [(\bar{\mathbf{u}}_h^{n+1} - \mathbf{u}_h^n, \nabla q_h) - (\nabla \cdot \mathbf{u}_h^n, q_h)] \quad (11)$$

$$(\mathbf{u}_h^{n+1}, \mathbf{v}_h) = (\mathbf{u}_h^n, \mathbf{v}_h) - \frac{\delta t}{\rho} (\nabla p_h^{n+1}, q_h) \quad (12)$$

Como se puede observar el esquema resultante es semi-implícito, siendo las ecuaciones (10) y (12) explícitas (se condensan las matrices de masa) y la ecuación (11), para el cálculo de la presión, resulta implícita.

¹En las ecuaciones anteriores se utilizó la notación $(a, b) = \int_{\Omega} a \cdot b \, d\Omega$

2.3.1. Estabilización de los términos convectivos

Como es sabido la discretización de los términos convectivos producen inestabilidad numérica, por lo tanto se debe utilizar un método de estabilización apropiado. El método que se utiliza en este trabajo es conocido como OSS (*Orthogonal Subscale Stabilization*) (Bell 1989; Codina 2000 ; Soto 2001). La expresión resultante para el término de estabilización es

$$STB_u = - (\tau_1 (\mathbf{u}_h^n \cdot \nabla \mathbf{u}_h^n - \pi_h^n), \mathbf{u}_h^n \cdot \nabla \mathbf{v}_h) \quad (13)$$

y se añade a la ecuación de momento (10). Como se puede observar el término de estabilización está evaluado en el instante t^n de forma que el sistema sigue siendo explícito. En la ecuación (13) se introduce π_h que es la proyección de los términos convectivos y su expresión está dada por

$$(\pi_h^n, \tilde{\mathbf{v}}_h) = (\mathbf{u}_h^n \cdot \nabla \mathbf{u}_h^n, \tilde{\mathbf{v}}_h) \quad (14)$$

para $(\tilde{\mathbf{v}}_h) \in \tilde{\mathbf{V}}$. El cálculo de este término se realiza en forma explícita condensando la matriz de masas.

2.3.2. Estabilización de la incompresibilidad

Para lograr un correcto comportamiento del algoritmo se debe añadir un término de estabilización en la ecuación de incompresibilidad. En este trabajo se utiliza, al igual que para los términos convectivos, una estabilización OSS (Codina 2000 ; Soto 2001) para la presión, por lo tanto a la ecuación (11) se le debe añadir el término

$$STB_p = - (\tau_2 (\nabla p_h^{n+1} - \xi_h^n), \nabla q_h) \quad (15)$$

En esta expresión aparece ξ_h que es la proyección del gradiente de las presiones y se obtiene a partir de

$$(\xi_h^n, \tilde{\mathbf{v}}_h) = (\nabla p_h^n, \tilde{\mathbf{v}}_h) \quad (16)$$

para $(\tilde{\mathbf{v}}_h) \in \tilde{\mathbf{V}}$. La ecuación (16) se resuelve en forma explícita condensando la matriz de masas.

2.4. Esquema estabilizado

Una vez añadido los términos de estabilización correspondientes a las ecuaciones de momento y de incompresibilidad el esquema resultante se puede escribir de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\delta t} (\bar{\mathbf{u}}_h^{n+1}, \mathbf{v}_h) &= \frac{1}{\delta t} (\mathbf{u}_h^n, \mathbf{v}_h) - (\mathbf{u}_h^n \cdot \nabla \mathbf{u}_h^n, \mathbf{v}_h) - \nu (\nabla \mathbf{u}_h^n, \nabla \mathbf{v}_h) - (\mathbf{f}^n, \mathbf{v}_h) - \\ &- (\tau_1 (\mathbf{u}_h^n \cdot \nabla \mathbf{u}_h^n - \pi_h^n), \mathbf{u}_h^n \cdot \nabla \mathbf{v}_h) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} (\nabla p_h^{n+1}, \nabla q_h) &= \frac{\rho}{\delta t + \tau_2} [(\bar{\mathbf{u}}_h^{n+1} - \mathbf{u}_h^n, \nabla q_h) - (\nabla \cdot \mathbf{u}_h^n, q_h)] + \\ &+ \frac{\tau_2}{\delta t + \tau_2} (\nabla \xi_h^n, \nabla q_h) \end{aligned} \quad (18)$$

$$(\mathbf{u}_h^{n+1}, \mathbf{v}_h) = (\mathbf{u}_h^n, \mathbf{v}_h) - \frac{\delta t}{\rho} (\nabla p_h^{n+1}, \nabla q_h) \quad (19)$$

$$(\pi_h^n, \tilde{\mathbf{v}}_h) = (\mathbf{u}_h^n \cdot \nabla \mathbf{u}_h^n, \tilde{\mathbf{v}}_h) \quad (20)$$

$$(\xi_h^n, \tilde{\mathbf{v}}_h) = (\nabla p_h^n, \tilde{\mathbf{v}}_h) \quad (21)$$

En el esquema resultante los sistemas de ecuaciones resultantes de (17), (19), (20) y (21) se resuelven en forma explícita condensando las matrices de masas. El sistema de ecuaciones de (18) se resuelve mediante gradientes conjugados con preconditionador diagonal.

2.5. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno que se aplican pueden ser en velocidad o en presiones. Para el primer caso se imponen en el paso final y estas pueden ser de tres tipos diferentes:

- Deslizamiento libre y simetría, $u_n = 0$ y $\tau = 0$
- Velocidad impuesta, $\mathbf{v} = \bar{\mathbf{v}}$
- Ley de pared, $u_n = 0$ y $\tau = \tau_w$

Cuando se resuelve la presión las condiciones se imponen en la ecuación (18) y pueden ser:

- Presión impuesta, $p = \bar{p}$
- Tracción nula, $n\sigma n = 0$

2.6. Modelo de turbulencia

En todos los casos que se analizan en este trabajo se utilizó un modelo de turbulencia algebraico de Smagorinsky, siendo su expresión

$$\nu_T = c h \sqrt{\epsilon : \epsilon} \quad (22)$$

donde c es una constante, h es un tamaño característico del elemento y ϵ es el tensor velocidad de deformación.

3. APLICACIÓN A VEHÍCULOS DE COMPETICIÓN

En principio la aplicación del algoritmo presentado para la resolución de distintos tipos de problemas no reviste ninguna dificultad y los resultados que se obtiene son adecuados, sin embargo, la simulaciones realizadas sobre vehículos de competición daban resultados que no concordaban con los que se obtenían mediante ensayos en pista. Tampoco se podían verificar las tendencia que mostraban las simulaciones.

A partir del análisis de los resultados obtenidos en los ensayos se pudo observar que los valores de las cargas eran muy sensibles a la variación de la altura del piso del vehículo y al ángulo de incidencia del mismo. Por otro lado las cargas aerodinámicas producen modificaciones en estos dos parámetros y por lo tanto se deberían tener en cuenta para realizar la simulación aerodinámicas.

3.1. Modelo del automóvil

Para simular los cambios en la posición del automóvil se utiliza un esquema de cuerpo rígido apoyado sobre los resortes del sistema de suspensión, como se puede observar en la figura (1).

A partir de modelo se pueden obtener las deformaciones de los resortes delanteros y traseros para una carga aerodinámica determinada; esta nueva posición del automóvil se utiliza para recalcular las cargas generándose un proceso iterativo que converge en unas pocas iteraciones.

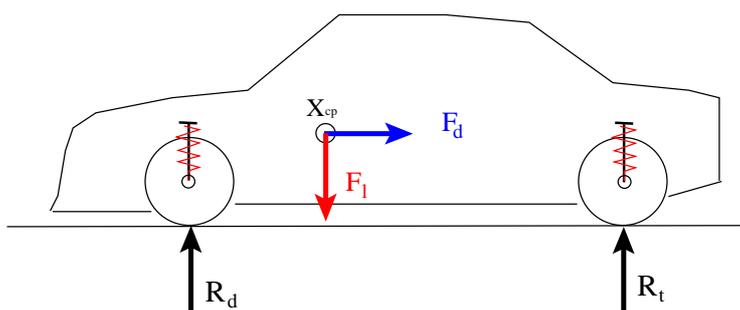


Figura 1: Diagrama de cargas del vehículo.

Si se analiza la naturaleza de las cargas aerodinámicas, manteniendo la velocidad constante, se observa que son transitorias, sin embargo las frecuencias son altas y por lo tanto se puede asumir que la respuesta es estacionaria. Esta suposición se ha verificado en forma experimental y nos permite despreciar los fenómenos dinámicos involucrados en el proceso.

3.1.1. Modelo matemático del vehículo

El modelo que se utiliza tiene en cuenta las rigideces de los resortes, los neumáticos y el factor de instalación. También se debe conocer la posición del centro de presión (X_{cp}) donde se aplicarán las cargas aerodinámicas.

La disposición del tren delantero y el tren trasero se muestran en la figura (2) y como se puede ver considera al vehículo como un sólido rígido.

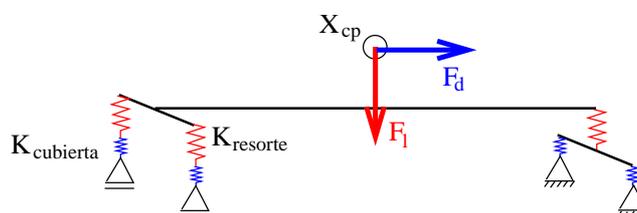


Figura 2: Modelo simplificado del vehículo.

Partiendo de este simple modelo se pueden calcular los desplazamientos de los resortes y modificar la posición del vehículo para continuar el cálculo. Para evitar oscilaciones se realiza una relajación de los resultados de modo que :

$$z_d^{k+1} = (1 - f) \cdot z_d^k + f \cdot z_d^c \quad (23)$$

siendo z_d^{k+1} la posición final del auto respecto al tren delantero, z_d^k la posición que ocupaba previamente y z_d^c es la posición calculada. El factor de relajación que se ha utilizado es $f = 0.85$.

3.2. Movimiento de la malla

Una vez calculada la nueva posición en que queda el vehículo se debe modificar la geometría. Para esto existen dos posibilidades, rehacer la malla o moverla. La primera opción es más costosa aunque garantiza tener una buena malla en todos los casos, mientras que la segunda opción que se menciona es más rápida aunque se debe verificar el grado de deformación de los elementos.

En el presente trabajo se optó por el movimiento de la malla y para ello se realiza el siguiente procedimiento:

1. rotar el vehículo a la nueva posición (excepto las ruedas que están fijas).
2. resolver un problema de Laplace para cada uno de los desplazamientos δx , δy y δz imponiendo los desplazamientos en los nodos del vehículo como condición de contorno.
3. prescribir los desplazamientos del piso y los contornos del dominio exterior a 0.
4. en caso de existir un plano de simetría sólo se prescribe el desplazamiento en la dirección normal al plano.
5. mover los nodos de la malla a la posición calculada.

Este procedimiento da muy buen resultado si los desplazamientos no son grandes. En el caso de los vehículos de competición nos encontramos que el suelo del mismo está muy cerca del piso con lo cual, con pequeños movimientos podemos producir zona con deformaciones muy elevadas de los elementos.

3.2.1. Rigidización de los elementos

Esta dificultad se trata mediante una rigidización diferenciada en cada zona, de forma que los elementos más cercanos a la carrocería, piso y cubiertas tengan una deformación mínima.

Esto se hace mediante el cálculo de una variable nodal k_i resolviendo nuevamente una ecuación de Laplace en la cual se impone como condición de contorno un valor 1 a las zonas a rigidizar y un valor pequeño a las zonas externas del dominio.

$$\nabla^2 k = 0 \quad (24)$$

Estos valores k_i se utilizan para el cálculo de una rigidez elemental de modo que,

$$k^e = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i \right)^2 \quad (25)$$

donde n es el número de nodos del elemento.

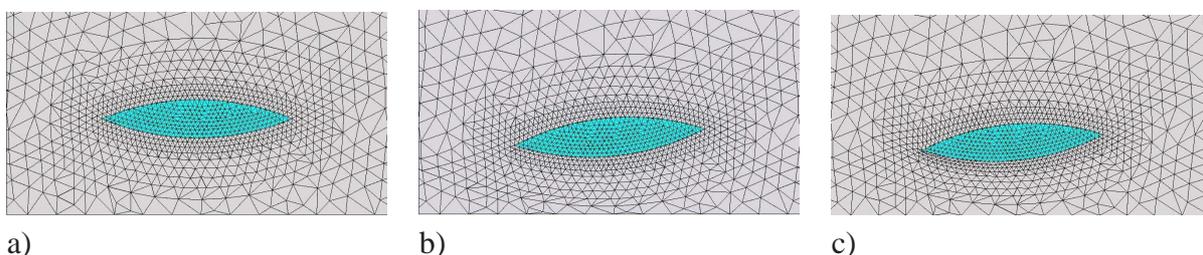


Figura 3: a) malla original, b) malla deformada con rigidización, c) malla deformada sin rigidizar.

En la figura (3) se muestra la diferencia en la malla utilizando la rigidización y sin utilizarla. En dicho ejemplo se aplicó una traslación y una rotación a la geometría y se puede observar en la figura (3-c) como se deforman excesivamente los elementos mientras que en la (3-b) los elementos se pueden considerar de buena calidad.

4. RESULTADOS

Los resultados que se presentan se realizaron sobre la geometría de un Toyota Corolla de la categoría TC2000 Argentina. La geometría fue obtenida mediante una técnica de fotogrametría [(Sacco 2005)].

Por razones de simetría se considera sólo la mitad del auto. La malla que se utiliza en todos los casos que se analizan es la misma y está formada por 1.5 millones de tetraedros y 350000 nodos. En la figura (4) se muestra la geometría del vehículo y un detalle de la malla de superficie.

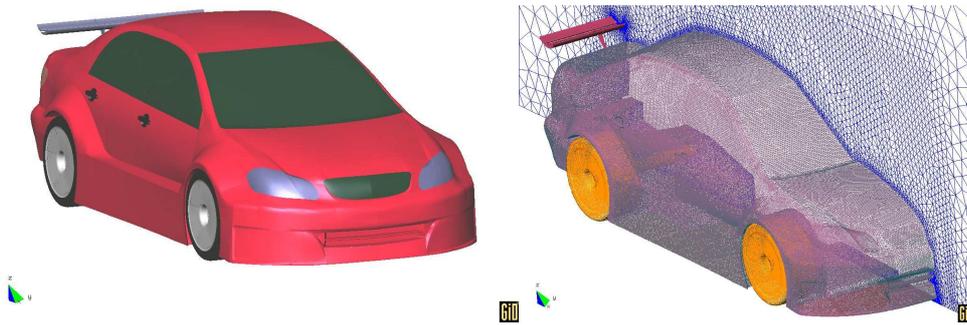


Figura 4: Geometría y malla de superficie.

4.1. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno utilizadas para la simulación son las siguientes:

1. Velocidad fija en la entrada del dominio y el suelo.
2. Condición de pared sobre la geometría del vehículo.
3. Velocidad normal nula en la parte superior del dominio y en la pared lateral.
4. Presión impuesta en la salida del dominio.
5. Condición de simetría en el plano central.

4.2. Cálculo de los coeficientes aerodinámicos

Para facilitar el análisis de los resultados se definen los coeficientes aerodinámicos C_l y C_d para la sustentación (conocida como Down Force) y la resistencia. El cálculo de estos coeficientes se realiza mediante la ecuación

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad (26)$$

y

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad (27)$$

donde F_l y F_d son las fuerzas de sustentación y resistencia respectivamente, V es la velocidad, ρ es la densidad y S es la sección frontal del vehículo. Esta última se toma con valor unitario,

$S = 1 [m^2]$ porque los resultados no se escalan y no se utilizan para comparaciones con otros vehículos.

Respecto a la convención de signos se debe tener en cuenta que la fuerza de sustentación positiva es hacia abajo.

4.3. Análisis de resultados

4.3.1. Vehículo fijo

En el primer caso que se analiza se asume que el vehículo permanece en la misma posición para todas las velocidades. En la figura (5) se muestran las curvas de C_l y C_d calculados para distintas velocidades que van desde los 160 [km/h] hasta los 220 [km/h]. Estos valores se compararon con resultados obtenidos mediante ensayos en pista y se encontró una buena concordancia en el caso de la resistencia aerodinámica, sin embargo los valores del coeficiente de sustentación mostraba un error muy importante frente a los del ensayo.

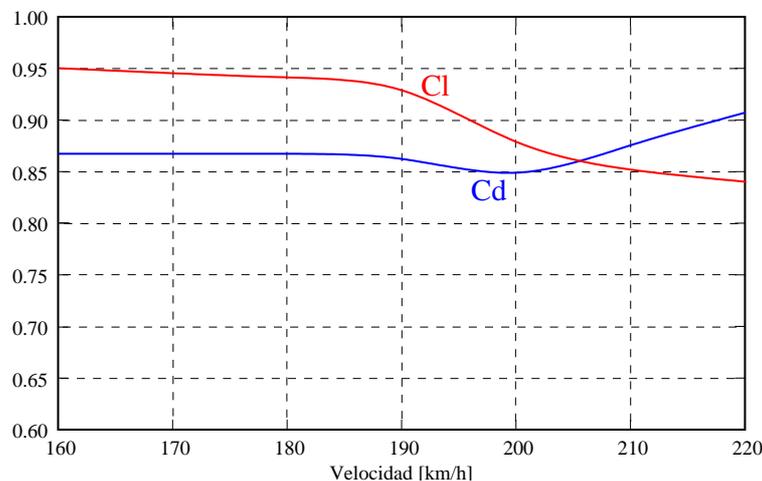


Figura 5: Curva de C_l y C_d en función de la velocidad. Posición fija.

4.3.2. Vehículo libre

Una vez analizados los resultados se determinó que las diferencias existentes con los ensayos se debían a las diferencias de alturas y el ángulo de actitud del vehículo, por lo tanto se desarrolló el algoritmo presentado que permite mover el auto hasta alcanzar el equilibrio entre las fuerzas aerodinámicas y las fuerzas en las suspensiones.

Para todas las velocidades hicieron falta 3 modificaciones de la posición del vehículo (rotación y traslación) para converger. El caso mas crítico se dió para 220 [km/h] donde el piso delantero pasó de 49 [mm] de distancia al suelo (posición estática) a 25 [mm]. En la figura (6) se muestran las curvas de C_l y C_d obtenidas en este caso.

4.3.3. Comparación de resultados

En la figura (7) se realiza una comparación de los dos resultados obtenidos. En el caso de las curvas de resistencia ambos resultados son prácticamente coincidentes, por lo tanto se puede concluir que la resistencia no es dependiente de la altura del vehículo. Este hecho se había

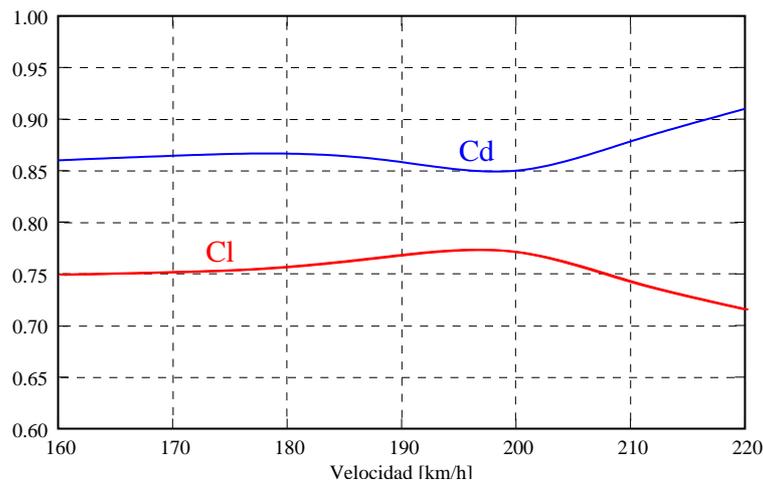


Figura 6: Curva de C_l y C_d en función de la velocidad. Vehículo libre.

verificado en pista, ya que se obtenían valores similares para distintas disposiciones alturas estáticas.

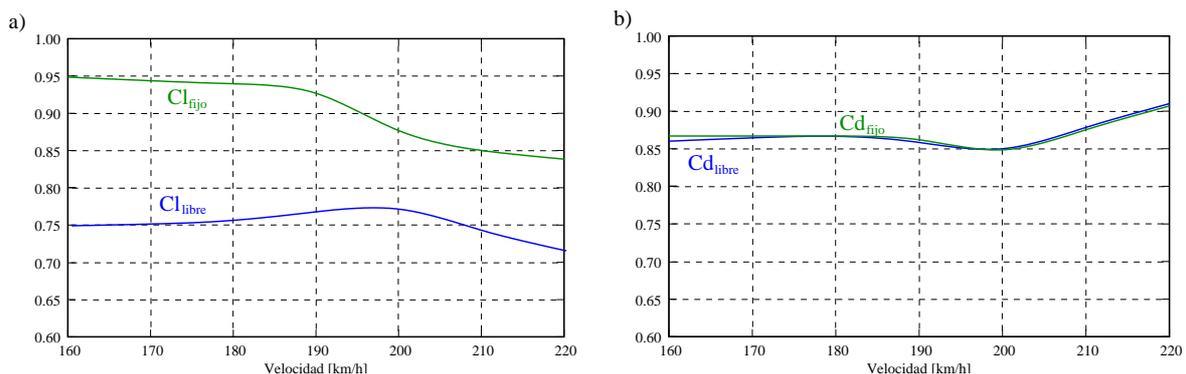


Figura 7: Comparación de las curvas de C_l (gráfico a) y C_d (gráfico b)

En cuanto al cálculo del C_l las diferencias son notorias entre ambas curvas. Si bien las variaciones tanto en ángulo como en altura son relativamente pequeñas, sin embargo el comportamiento del vehículo es extremadamente sensible a estos cambios. Esto se debe principalmente al *efecto suelo* que es producido por el piso delantero de auto que se encuentra a muy poca distancia del suelo.

4.3.4. Visualización de resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos para el vehículo en la condición que denominamos como libre. El coeficiente de sustentación en un automóvil brinda una información parcial del comportamiento del mismo ya que no es posible saber como se transmite esa carga al suelo. Por este motivo es conveniente dividirlo según el aporte de carga en cada eje para lo cual definimos un coeficiente C_{ld} (fuerza aerodinámica en el eje delantero) y C_{lt} (fuerza aerodinámica en el eje trasero).

Los valores de estos coeficientes dependen del C_l y del punto de aplicación de la carga aerodinámica, al que denominamos X_{cp} (centro de presiones). Este punto se va moviendo con

el cambio de velocidades como se puede apreciar en la figura (8-a) y produce un cambio en el balance de cargas en los ejes.

La distribución de carga producida por el movimiento de centro de presiones se muestra en la figura (8-b), donde se aprecia que en la configuración que se ha corrido el vehículo el tren delantero está más cargado que el trasero. Esto se debe a que dicha configuración esta diseñada para circuitos lentos.

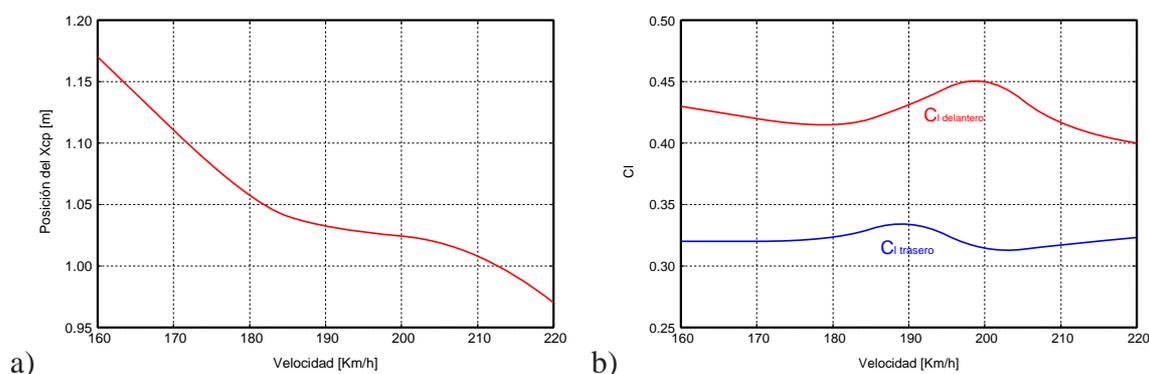


Figura 8: a) Variación del X_{cp} , b) Distribución del C_l en cada eje.

Otro resultado de interés es el cambio de la posición del automóvil con la velocidad, tanto en altura como en ángulo de actitud. Con estos datos se puede conocer la altura del piso delantero respecto del suelo y si existe riesgo de rotura del mismo por rozar el suelo.

Otro resultado de indudable valor cualitativo es la visualización del flujo mediante isolíneas, vectores, líneas de corriente, etc. En la figura (9) se presentan algunos resultados para una velocidad de 200 [km/h].

Todas estas herramientas dan una buena idea del comportamiento del flujo y a partir de la observación se pueden obtener soluciones para mejorar las prestaciones del vehículo.

5. CONCLUSIÓN

El comportamiento aerodinámico de vehículos de carrera presenta algunas particularidades que, como se muestra en el presente trabajo, deben tenerse en cuenta para lograr resultados confiables.

Como se ha demostrado para realizar el cálculo de las cargas de sustentación se debe tener en cuenta la modificación de la posición del vehículo con la velocidad, esto hace que se eleve el costo computacional de la simulación. En el caso del cálculo de la resistencia aerodinámica se muestra que no es importante la diferencia, sin embargo esto puede depender del vehículo en si mismo.

El algoritmo de movimiento de mallas que se presenta es relativamente económico aunque se debe controlar que no produzcan deformaciones excesivas en los elementos. En caso de realizar un remallado hay que añadirle el costo de la interpolación de los resultados entre las mallas.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con el apoyo del Toyota Team Argentina

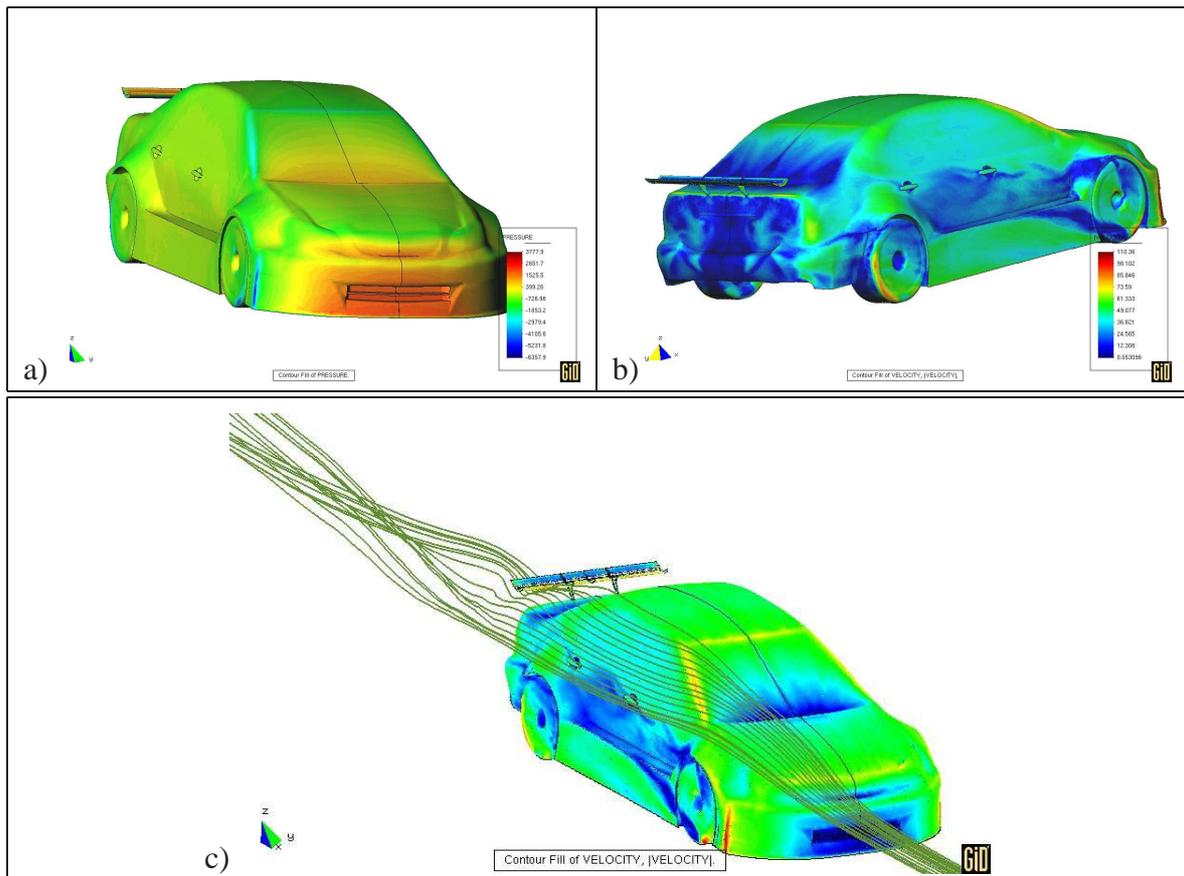


Figura 9: visualizaciones de flujo. a) isocontornos de presión; b) isocontornos de velocidad; c) líneas de corriente.

REFERENCIAS

- [Bell 1989] Bell J., Collela P. and Glaz H., 'A second order projection method for the Navier-Stokes equations', J. Comput. Phys. 85, 257-283 (1989).
- [Codina 2000] Codina R., 'Stabilization of incompressibility and convection through orthogonal sub-scales in finite element methods', Comput. Methods Appl. Engrg. 190, 1579-1599 (2000).
- [Codina 2001] Codina R., 'Pressure stability in fractional step finite element methods for incompressible flow', J. Comput. Phys. 170 112-140 (2001).
- [Lohner 2001] Lohner R., 'Applied CFD Techniques', John Wiley and Sons (2001).
- [Soto 2001] Soto O., Lohner R., 'An implicit monolithic time accurate finite element scheme for incompressible flow problems', AIAA 2616-2631 (2001).
- [Sacco 2005] Sacco C., Gonzalez E. y Giuggioloni F. 'Cálculo de ', Proceeding MECOM 2005, 1494-1507. Buenos Aires, Argentina.