

## CÓMPUTO DEL MAPA AERODINÁMICO DE UN AUTOMÓVIL DE COMPETICIÓN

**Juan M. Gimenez<sup>a,b</sup>, Horacio Aguerre<sup>a,c</sup> and Norberto M. Nigro<sup>a,b</sup>**

<sup>a</sup>*Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC) - UNL/CONICET, Predio Conicet-Santa Fe Colectora Ruta Nac 168 Paraje El Pozo, Santa Fe, Argentina, <http://www.cimec.org.ar>*

<sup>b</sup>*Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral. Ciudad Universitaria. Paraje "El Pozo". Santa Fe. Argentina. <http://www.fich.unl.edu.ar>*

<sup>c</sup>*Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Argentina*

**Keywords:** CFD, aerodinámica vehicular, mapa aerodinámico, optimización

### **Abstract.**

La medida integral del rendimiento de un vehículo de competición es el tiempo de vuelta. Con el fin de minimizar el mismo, se debe realizar una elección correcta de los elementos aerodinámicos, dinámicos y parámetros de configuración del automóvil, los cuales dependen fuertemente del dibujo del circuito. En este contexto, la optimización de las diferentes variables es asistida mediante "simuladores de tiempo de vuelta" que estiman el tiempo de giro en función de un paquete de parámetros definidos. Un juego de datos muy importante para su cómputo es el denominado mapa aerodinámico, el cual cataloga los coeficientes de sustentación ( $C_l$ ) y arrastre ( $C_d$ ) del vehículo en relación a las diferentes configuraciones de alturas delanteras (front height) y traseras (rear height) por la cual atraviesa el vehículo durante la vuelta. Debido a la gran variación que presentan los coeficientes aerodinámicos para determinado rango de alturas, es necesario computar gran cantidad de puntos dentro del mapa. En este sentido, este trabajo presenta una estrategia de resolución basada en herramientas automatizadas de generación de mallas, simulación y post-proceso, utilizando el software OpenFOAM(R), para computar y analizar los mapas aerodinámicos de un vehículo en particular. Además, se analizan cuestiones relativas a la convergencia de las simulaciones y sensibilidad de los coeficientes aerodinámicos en relación a las características de las mallas utilizadas. Finalmente, una vez definido el mapa aerodinámico, se propone un esquema de procedimiento para minimizar las simulaciones realizadas basado en las curvas de nivel del mapa obtenido.

## 1 INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 40 años, la industria del automovilismo se ha convertido en líder en innovación tecnológica, destacada por la constante necesidad de mejoras en el rendimiento requiriendo de ingenieros altamente calificados. Ésta búsqueda de optimización debe tener en cuenta los distintos factores que influyen en el rendimiento de un vehículo, tales como la potencia, conducción, suspensión, peso, neumáticos y la aerodinámica. Ésta última representa un área relevante en que cada constructor o diseñador debe invertir a propia cuenta en investigación y mejoras, por lo que ésta continua atención ha resultado en grandes avances en metodologías y comprensión del fenómeno.

Las regulaciones existentes en todos los niveles y categorías del deporte motor obligan a los equipos y compañías a reducir costos, siendo el número de pruebas en pista uno de los principales recortes. Este escenario, que demanda herramientas alternativas para el desarrollo, sumado al incremento de la potencia de cómputo a menor costo, han contribuido en la popularización de las herramientas de simulación en competición (Wright, 1982). La herramienta de mayor utilización en competición debido a su carácter integral es la *simulación de tiempo de vuelta*, la cual estima el tiempo de giro en una pista dada en función de un paquete de parámetros que definen el vehículo. Ésta herramienta ayuda a los ingenieros a incrementar su conocimiento en el rendimiento del vehículo permitiendo probar múltiples configuraciones y arribar a una configuración cercana al óptimo para cada pista en particular, junto a un plan inteligente de modificaciones. Obtener resultados precisos con estos simuladores depende directamente de la buena calidad de los parámetros que se les proveen. Entre la información de entrada requerida (tamaños, pesos, datos estructurales, datos dinámicos), un juego de datos muy importante es el denominado mapa aerodinámico, el cual cataloga los coeficientes de sustentación negativa o *downforce* ( $C_l$ ) y arrastre o drag ( $C_d$ ) del vehículo en relación a las diferentes configuraciones de alturas delanteras (front height) y traseras (rear height) por la cual atraviesa el vehículo durante la vuelta.

Desde fines de 1970 los diseñadores de automóviles de competición comenzaron a utilizar una serie de efectos aerodinámicos explotados para crear *downforce*, conocidos como *efecto suelo*. Distintos trabajos que analizan este fenómeno fueron publicados en los últimos años (Cooper et al., 2010; Zhang et al., 2006; Venkatesan et al., 2014), coincidiendo en que en general tanto  $C_d$  como  $C_l$  del vehículo cambian considerablemente cuando se lo acerca al suelo. A medida que se aproxima el vehículo al pavimento se identifica un decremento de  $C_d$  acompañado de un incremento de  $C_l$ , el cual alcanza un máximo. Debajo de dicha altura crítica, el *downforce* comienza a disminuir paulatinamente hasta desaparecer en el momento de contacto entre el vehículo y el suelo. Ésta reducción está asociada con la progresiva interacción entre la capa límite desarrollada por el perfil y la desarrollada por el piso. Durante el recorrido por la pista debido a curvas, suspensiones, irregularidades de la carpeta asfáltica, entre otras, el vehículo atraviesa por los diferentes estadios de fuerzas aerodinámicas, por lo que es necesario relevar, ya sea experimental o numéricamente, los valores correctos de los coeficientes para diferentes alturas de separación vehículo-suelo ( $h_s$ ) en combinación con los diferentes ángulos de ataque ( $AoA$ ) del piso del vehículo respecto al suelo, es decir variaciones en el *pitch*. Por la forma descrita de la variación del  $C_l$ , queda claro entonces la necesidad de muestrear varios puntos densificando hacia la zona de la altura crítica, y esto repetirlo para cada  $AoA$ . Realizar esto experimentalmente es prohibitivo debido a los altos costos de hacerlo por ejemplo en un túnel de viento, por lo que la alternativa de la simulación computacional aparece muy atractiva. Mapas aerodinámicos más complejos podrían incorporar variaciones en el *roll* y el *yaw*, pero el

presente trabajo abordará únicamente variaciones en el *pitch*.

En este trabajo se presenta una estrategia de resolución basada en herramientas automatizadas de generación de mallas, simulación y post-proceso, utilizando el software OpenFOAM®, para computar y analizar los mapas aerodinámicos de un vehículo de competición de una categoría nacional. En concreto, en la Sección 2.1 se presenta el modelo matemático a resolver en conjunto con la estrategia de discretización utilizada. En la Sección 2.3 se presenta el modelo de vehículo empleado, se resuelven modelos simplificados y se analizan cuestiones relativas a la convergencia de las simulaciones y sensibilidad de los coeficientes aerodinámicos en relación a los esquemas de discretización empleados y las características de las mallas utilizadas. La Sección 3.1 presenta los resultados del modelo completo complementandolos con la definición de un procedimiento para minimizar las simulaciones realizadas basado en las curvas de nivel del mapa obtenido. Finalmente la Sección 4 presenta las conclusiones del trabajo y algunas propuestas a futuro.

## 2 CONSIDERACIONES MATEMÁTICAS Y NUMÉRICAS

### 2.1 Modelos Matemático y Numérico

El aire que circula alrededor del vehículo, y que genera las fuerzas aerodinámicas a analizar, se modela como un fluido incompresible, isotérmico y Newtoniano. Las ecuaciones que gobiernan su comportamiento son las ecuaciones de Navier-Stokes:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = \nabla \cdot (\nabla \mathbf{v}) - \nabla p. \quad (2)$$

compuestas por la Ecuación de conservación de masa (1) y la Ecuación de conservación de momento (2), donde  $\mathbf{v}$  es la velocidad del fluido,  $p$  es la presión y  $\rho$  la densidad. Es necesario también definir los coeficientes de arrastre  $C_d$  y de sustentación  $C_l$ ,

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho_\infty |\mathbf{v}|_\infty^2 A} \quad (3)$$

$$C_l = \frac{2F_l}{\rho_\infty |\mathbf{v}|_\infty^2 A} \quad (4)$$

donde  $F_d$  y  $F_l$  son las fuerzas de resistencia (en dirección primaria del avance del flujo) y sustentación (en dirección normal al suelo) respectivamente, siendo  $A$  es la sección frontal del vehículo. Respecto a la convención de signos se debe tener en cuenta que la fuerza de sustentación positiva es hacia arriba, mientras que si se menciona el término *downforce* se estará haciendo referencia a la misma fuerza pero con signo positivo hacia abajo.

Las ecuaciones son resueltas utilizando el Método de los Volúmenes Finitos (FVM) centrado en celdas. En particular, se utiliza un esquema segregado de tipo SIMPLE (Ferziger and Peric, 2001) para el acople entre la velocidad y la presión implementado en el solver `simpleFoam` de la suite OpenFOAM® (Weller et al., 1998). La estrategia de solución elegida considera flujo estacionario. El procedimiento de la simulación parte de una condición inicial de flujo en reposo y con el fin de garantizar estabilidad en las primeras iteraciones se seleccionan inicialmente esquemas de discretización espacial de primer orden y relajación de las ecuaciones. Una vez resuelto cierto número de iteraciones que garanticen que se haya desarrollado un flujo físicamente correcto, se pasa a utilizar esquemas de segundo orden y se resuelve hasta lograr

la convergencia. Debido a la necesidad de modelar la turbulencia, en lugar de las Ecuaciones (1) y (2) se utilizan las ecuaciones promediadas de Reynolds, las cuales agregan un término de tipo difusivo que incluye un parámetro de difusividad turbulenta. En este trabajo se selecciona el modelo  $k-\omega$  SST (Menter, 1994) para el cómputo de dicho valor.

## 2.2 Modelo simplificado del Efecto Suelo

La variación del caudal de flujo que pasa por entre el piso del vehículo y el suelo a medida que la altura  $h_s$  disminuye produce el conocido *efecto suelo*. Éste fenómeno puede modelarse cómo un par resistencias en paralelo (Figura 1a) en dónde el caudal total que pasa a través del automóvil  $Q$  puede subdividirse entre el flujo que pasa por debajo  $Q_{inf}$  y el que pasa por encima  $Q_{sup}$ , tal que  $Q = Q_{inf} + Q_{sup}$ . El valor de las resistencias representa la oposición de la geometría al avance del flujo, es decir la caída de presión. Fijando el caudal a un valor  $Q$  dado y considerando que  $h_s \ll H$ , se puede establecer la curva  $Q_{inf}$  vs  $h_s$  y así también  $|v|$  vs  $h_s$ , presentadas en la Figura 1b. Como una zona de alta velocidad se corresponde a una zona de baja presión, y sabiendo que los esfuerzos de corte son despreciables frente a las fuerzas de presión, entonces la curva de *downforce* aportado por el piso del auto en relación a la altura tendrá la misma forma que la curva de magnitud de la velocidad.

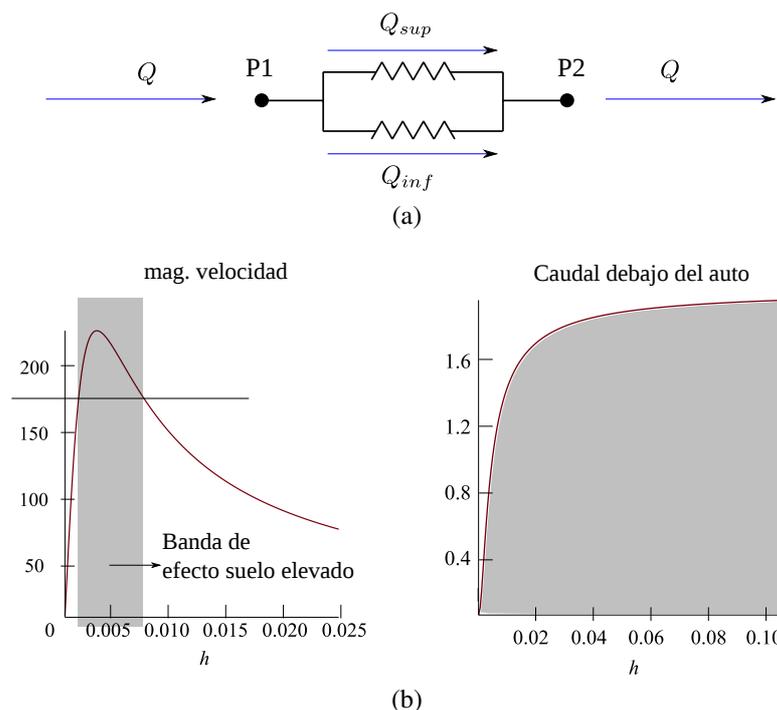


Figura 1: Modelo del fenómeno de efecto suelo y curvas modelo de caudal en  $\text{Kg/m}^3$  y velocidad por debajo del vehículo en  $\text{m/s}$ .

## 2.3 Modelo geométrico y condiciones de borde

En la Figura 2 se presenta el modelo del automóvil junto a la descripción de los puntos en dónde se miden las alturas de referencia de la carrocería, denominadas  $h_s$  (altura desde la trompa al suelo),  $h_f$  (altura delantera) y  $h_r$  (altura trasera). La geometría del mismo fue provista por

parte del equipo de competición interesado en la realización del trabajo. El modelo entregado se corresponde al vehículo en situación de *garage*, es decir alturas e inclinación base.

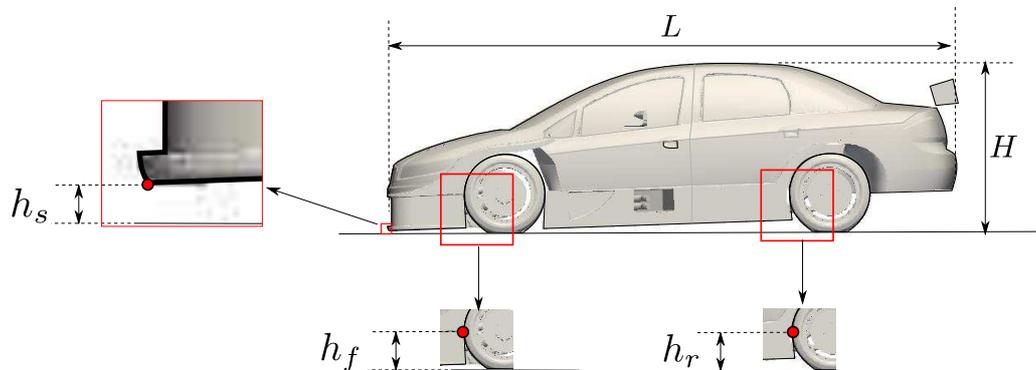


Figura 2: Modelo del vehículo a computar. El diagrama presenta los puntos en los cuales se miden las alturas de referencia para el cómputo del mapa aerodinámico:  $h_s = 14.6[\text{mm}]$ ,  $h_f = 126[\text{mm}]$  y  $h_r = 140[\text{mm}]$ .

La estrategia de resolución plantea un modelo de auto quieto y aire móvil. Para ello se impone condición de no-deslizamiento sobre todo el vehículo y se fijan condiciones de ingreso de flujo a  $180\text{km/h}$  sobre la entrada al dominio. Para simular el movimiento del automóvil a través de la cinta asfáltica se impone la misma velocidad de corriente libre sobre el piso y además se establece una condición de velocidad angular sobre la rueda tal que la velocidad periférica en la línea de contacto con el piso sea equivalente a la velocidad impuesta en el mismo. Para el contacto rueda-suelo se utiliza una estrategia similar a la presentada en (Diasinos et al., 2015).

El modelo del vehículo tiene un alto grado de detalle que incluye gran cantidad de internos en el vano motor, tomas de aire, refrigeración para los neumáticos y frenos. El alerón compuesto por 4 elementos a saber *wing*, *flap*, *gurney* y *end-plate* que conforman un sistema de dos piezas aerodinámicas. Además, la geometría incluye el volumen ocupado por el radiador, siendo el comportamiento del flujo modelado como un flujo en un medio poroso siguiendo las ecuaciones de Darcy-Forchheimer con constantes calibradas en ensayos experimentales por parte del mismo equipo de competición. La disposición de los elementos es tal que puede simularse sólo medio vehículo asumiendo condiciones de simetría. Se elige un dominio de cómputo lo suficientemente amplio para que las condiciones de borde de corriente libre no perturben los resultados sobre la zona de interés. En este contexto se ubica el ingreso a una distancia de  $5L$  del vehículo, el plano superior del dominio a  $8H$ , el lateral opuesto al plano de simetría a  $4W$  y la salida a  $20L$ , siendo  $L$ ,  $H$ , y  $W$  el largo, la altura y el ancho del automóvil.

## 2.4 Simulación bidimensional del Efecto Suelo

Es crítico poder resolver apropiadamente el flujo que atraviesa por debajo del vehículo. Sin embargo es necesario encontrar un óptimo entre el requerimiento computacional por el refinamiento de malla elegido y la precisión obtenida. Con el fin de estimar el número de elementos perpendiculares al suelo que se requieren para capturar el fenómeno, se resuelve en primer lugar un modelo bidimensional del flujo alrededor del vehículo utilizando diferentes refinamientos en dicha zona. Se toma el plano de simetría del vehículo como geometría a

resolver y se desprecia la componente transversal de la velocidad simulando solamente el flujo sobre dicho plano.

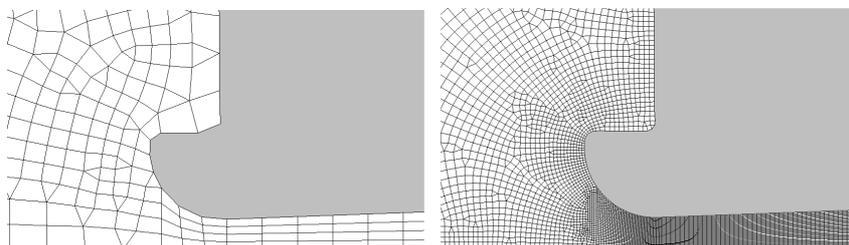


Figura 3: Mallas bidimensionales con diferentes refinamientos en  $h_s$ . Izquierda  $N_{elem} = 4$ , derecha  $N_{elem} = 32$ .

La Tabla 1 presenta los resultados para las diferentes simulaciones realizadas. La Tabla que compara  $h_s$  vs.  $|\mathbf{v}|$  presenta un comportamiento similar al esperado en el modelo equivalente de resistencias: la velocidad alcanza un máximo y luego desciende bruscamente describiendo lo que denominaremos *barranco*. Éste resultado permite aseverar que la simulación computacional considerando flujo estacionario es apropiada para resolver las características más importantes del mismo. Por otro lado, a partir de los datos presentados en la Tabla que compara  $N_{elem}$  vs.  $|\mathbf{v}|$  se observa que a medida que se refina se logran velocidades asintóticamente mayores. Esta información permite por un lado conocer que tipo de error se comete al utilizar mallas gruesas (se está subestimando el máximo de velocidad) y da una respuesta al número mínimo de elementos necesarios que hay que incluir en la perpendicular para tener un error menor a cierto criterio elegido. Como los recursos son finitos hay que tomar una decisión y en este trabajo se asume que con 16 elementos las soluciones ya son lo suficientemente confiables. Esta elección resulta conservadora ya que no considera que, además, se utilizarán elementos de encapado sobre las superficies críticas posibilitando un tamaño mínimo de elemento en estas zonas mucho más cercano al óptimo.

$h_s$ [mm]	$ \mathbf{v} $ [m/s]	$N_{elem}$	$ \mathbf{v} $ [m/s]
0.6	171	4	153
1.6	185	8	181
3.6	197	16	195
6.6	204	32	197
9.6	211	64	203
12.6	212	128	211
30.6	198	256	212

Tabla 1: Simulaciones del modelo del vehículo en 2d. Izquierda: máximos de la magnitud de la velocidad entre el piso y el suelo para diferentes  $h_s$  utilizando  $N_{elem} = 256$ . Derecha: máximos de la magnitud de la velocidad entre el piso y el suelo para diferentes refinamientos a  $h_s = 12.6$ mm.

## 2.5 Modelos 3d simplificados

Continuando con el proceso de selección de una malla de buena calidad minimizando el requerimiento computacional se resuelven diferentes simulaciones con modelos cada vez más complejos incorporando sucesivamente más componentes del vehículo. Al complejizarse los modelos la asunción de flujo estacionario resulta no del todo correcta. Las normas de los residuos  $|\mathbf{R}|$  de los sistemas de ecuaciones  $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ , donde  $\mathbf{x}$  es el vector de las incógnitas (alguna de las componentes de la velocidad o la presión) siendo  $|\mathbf{R}| = \mathbf{b} - \mathbf{Ax}$  logran converger a epsilon de máquina sólo si la no-linearidad del flujo es baja favoreciendo al acople  $p - v$ . En cuanto la complejidad del flujo a simular crece, los residuos no convergen sino que arriban a un estado estacionario. La Figura 4 presenta dos simulaciones con orden creciente de complejidad. La fila de arriba muestra una simulación incluyendo solamente un ala del alerón (*wing*). Los residuos convergen a máquina obteniendo la solución presentada en el snapshot correspondiente. Por su parte, la fila de abajo presenta un modelo más complejo que incluye el alerón completo (*wing+flap+gurney+plate*) cuyos residuos convergen hasta cierto valor y luego permanecen constantes. A partir de este comportamiento del residuo, en este trabajo se toma la decisión de considerar convergida o no la simulación dependiendo del comportamiento de los monitores de la propia solución (valores de los coeficientes de fuerzas, sensores en ciertos puntos críticos, etc). Si estos no presentan mayor variabilidad o su comportamiento es periódico también se considera convergida la solución.

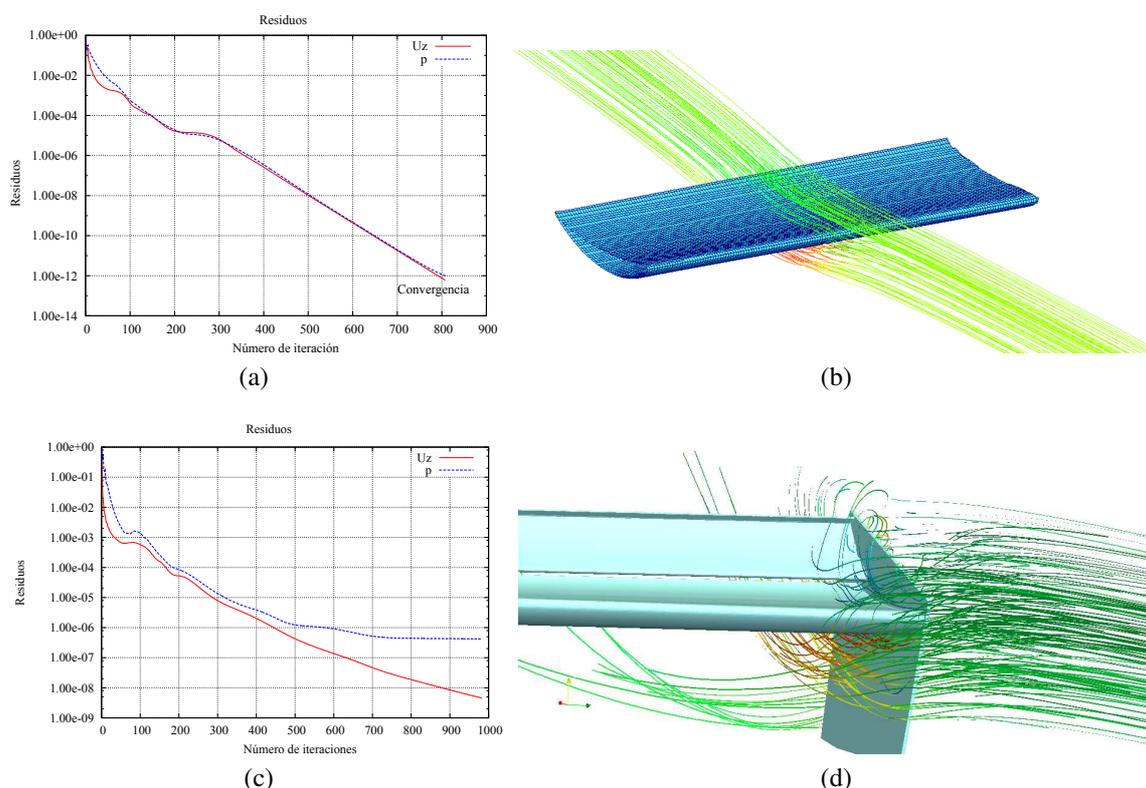


Figura 4: Convergencia de los residuos y soluciones para distintos modelos con complejidad creciente. Arriba modelo con *wing*, abajo modelo con *wing+flap+end-plate*.

### 3 RESULTADOS NUMÉRICOS

#### 3.1 Modelo 3d completo

Una vez comprendido el fenómeno a capturar, las calidades de malla a obtener y el comportamiento que siguen los residuos de una simulación compleja como se plantea, se procede a resolver el modelo completo del vehículo basándose en los requerimientos y estrategias planteadas en secciones anteriores.

La Figura 5 presenta diferentes capturas de una de las mallas utilizadas. Para la generación de la malla se utiliza la aplicación `snappyHexMesh` la cual, a partir de una malla base y mallas de superficie que definen el vehículo, genera una malla de volumen hexa-dominante empleando un esquema de tres pasos, a saber castelado (subdivisión de celdas y selección in-out), esnapado (adaptación de las caras de las celdas a los contornos) y encapado (agregado de elementos de borde sobre ciertas superficies). El mallado respeta diferentes parámetros elegidos por el usuario entre los que se destacan el refinamiento por arista, por superficie, por volumen, y varios tipos de calidades mínimas de malla. Entonces, se utiliza refinamiento cerca del vehículo y se emplea encapado para un correcto cómputo de las capas límite en zonas críticas como es debajo del primer piso, sobre el capot y el techo, y componentes del alerón. Con el esquema de generación empleado, en la zona crítica debajo del vehículo el tamaño de la primer celda es de aproximadamente 0.1[mm].

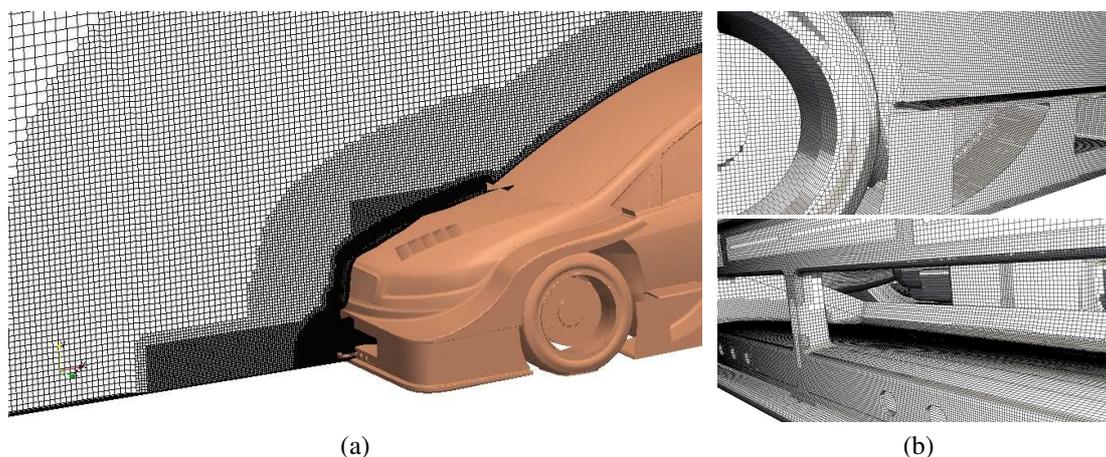


Figura 5: Discretización utilizada. Las mallas creadas tienen aproximadamente 50 millones de celdas.

Una primer simulación del vehículo en situación de *garage* permite ajustar parámetros en cuanto a selección de resultados y criterios de convergencia. En la Figura 6 puede observarse un comportamiento típico de los monitores, es decir de los coeficientes de  $C_d$  y  $C_l$  y su vinculación con la norma del residuo en cada iteración. Al modelar el problema de forma estacionaria, no se logra alcanzar la convergencia a precisión de máquina, sin embargo luego de un número de iteraciones (en el caso presentado a partir de las 10000) los monitores comienzan a presentar un comportamiento estable alrededor de un valor medio, lo que coincide con un comportamiento periódico del residuo. Finalmente el valor de  $C_d$  y el de  $C_l$  que representa la simulación se encuentra promediando la curva durante las últimas iteraciones (zona marcada en gris en las figuras).

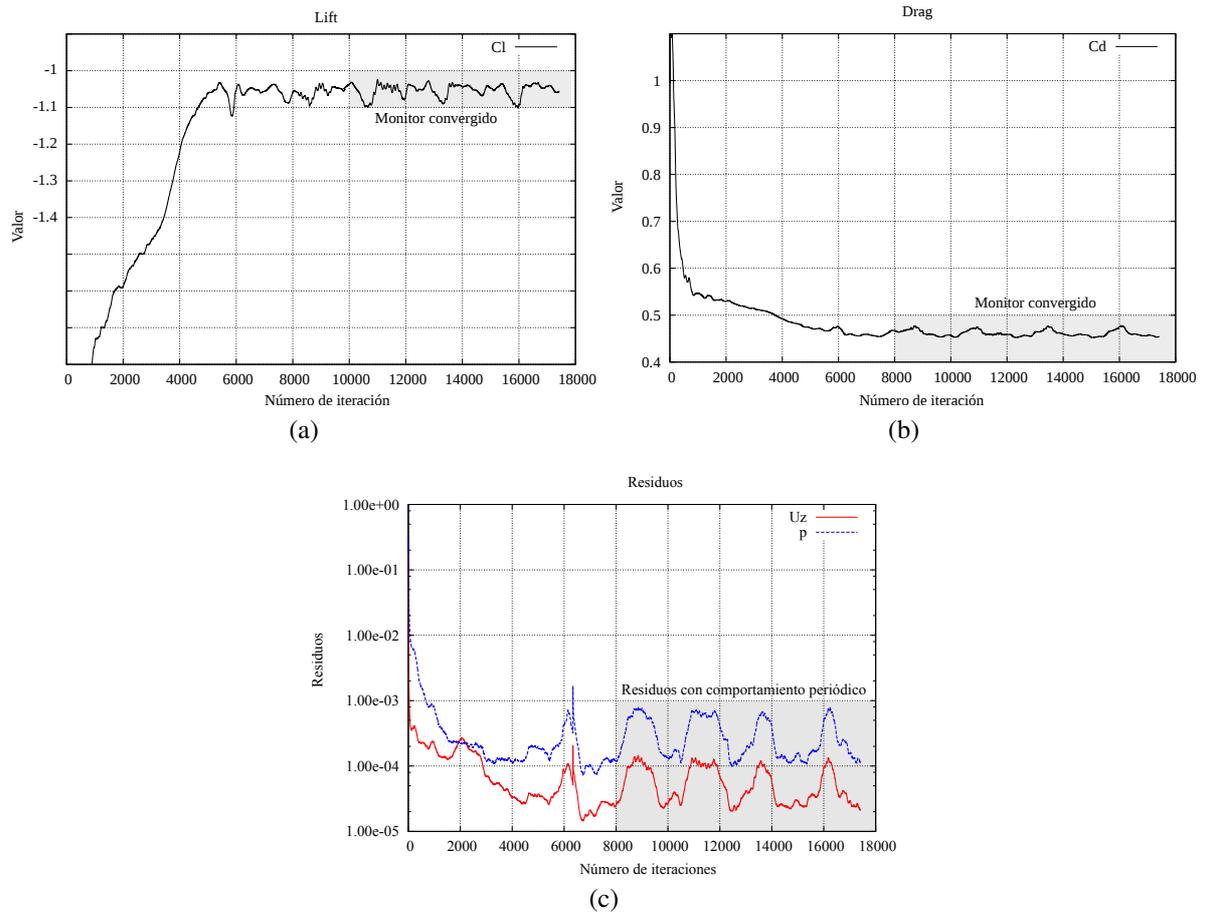


Figura 6: Convergencia de los monitores para una simulación el modelo del vehículo completo contrastado con el comportamiento del residuo.

### 3.2 Cómputo del mapa aerodinámico

La confección del mapa aerodinámico requiere realizar una batería de simulaciones. Para organizar el procedimiento se parte de la situación de *garage*, y se realizan sucesivas simulaciones en las cuales se traslada el automóvil en sentido perpendicular al suelo sin modificar su ángulo de ataque. Notar que cada nueva posición requiere la confección de una nueva malla. En este contexto, la estrategia es realizar las transformaciones de traslación (y rotación si así fuese requerido) de la malla de superficie del automóvil, manteniendo fijos los planos del dominio y las ruedas del vehículo, y luego generar una malla de volumen mediante el uso de `snappyHexMesh`. Dado que el juego de parámetros de mallado fue previamente definido, nos garantiza obtener similar calidad de malla cuando se modifica la posición de las superficies móviles. Sin embargo, sí es necesario modificar el refinamiento requerido en la zona donde se mide  $h_s$  para garantizar la cantidad mínima de elementos entre el piso del auto y el suelo. El modelo del automóvil en las posiciones más alejadas del suelo requieren unos 30 millones de elementos, mientras que en las posiciones con  $h_s$  más pequeño se llegan a utilizar mallas de aproximadamente 80 millones de celdas.

Para minimizar el número de simulaciones necesarias para la confección del mapa es conveniente discretizar con mayor densidad de puntos (número de simulaciones) cerca de la zona del *barranco*. Es por esto que una vez obtenidos resultados para varias alturas  $h_s$  se realizan nuevos cómputos sólo para puntos en donde la variación de los monitores es mayor buscando refinar la solución. En el presente trabajo, este procedimiento de elección de la nueva altura a simular se realiza en forma manual. Finalmente se obtiene la curva para un iso-AoA presentada en la Figura 7.

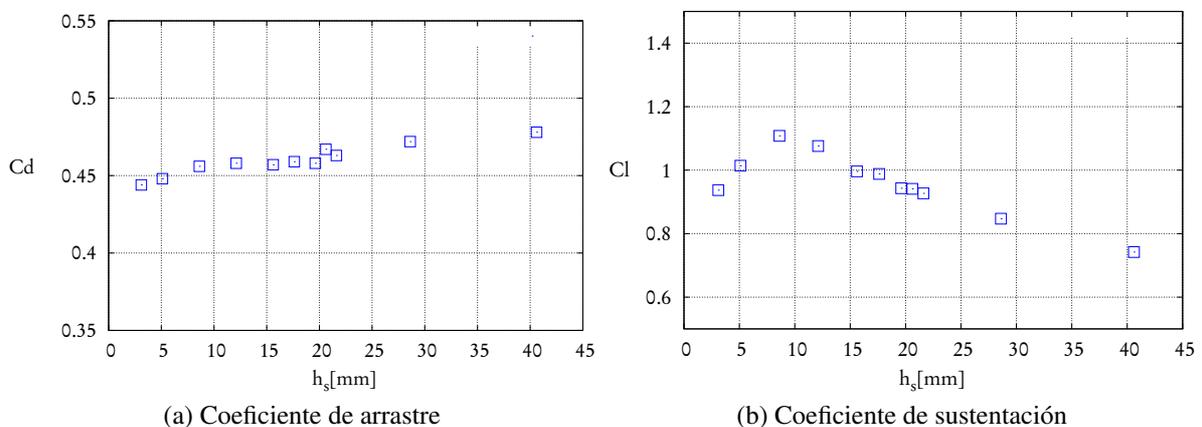


Figura 7: Puntos del mapa aerodinámico para ángulo de ataque fijo.

La Figura 8 se presenta con el fin de analizar cualitativamente el comportamiento del flujo debajo del vehículo a medida que este se aproxima al suelo. La visualización muestra líneas de corriente coloreadas con el valor de la presión en cada punto. Se observa como, a medida que se disminuye  $h_s$ , el flujo de líneas de corriente disminuye (esto es, disminuye el caudal), obteniendo un comportamiento similar al planteado en el modelo simplificado presentado en la sección anterior. La disminución de flujo provoca que la zona de baja presión justo debajo de la parrilla delantera sea de menor valor absoluto con la consecuente baja del *downforce* generado por esta zona del vehículo.

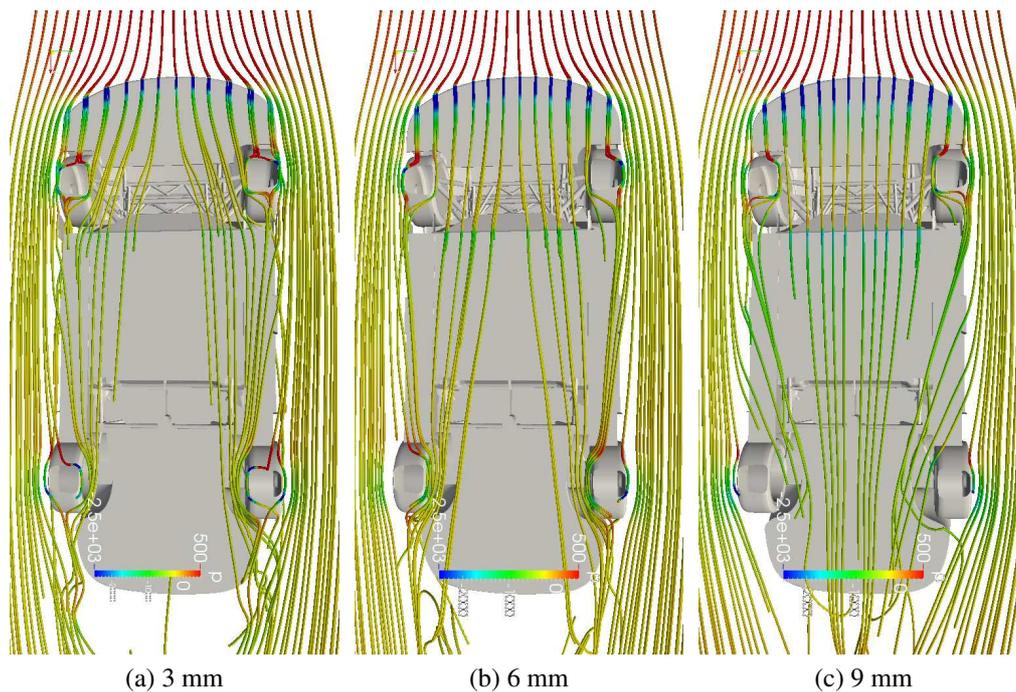


Figura 8: Líneas de corriente debajo del vehículo para diferentes alturas  $h_s$ .

Respecto a la distribución del aporte de las fuerzas, comparando entre los elementos de mayor generación de *downforce* el piso del automóvil genera entre 4 y 5 veces más empuje hacia abajo que el alerón, conformando entre estos dos elementos el 95% del total de la fuerza descendente generada.

Luego de obtener la curva de  $C_d$  y  $C_l$  a diferentes alturas para ángulo fijo, la estrategia de selección de nuevos puntos de simulación está basada en las curvas de nivel del mapa aerodinámico. En este enfoque se supone que la zona de mayor interés es aquella en las proximidades del *barranco*, la que en la Figura 7b se ubica aproximadamente a los 9[mm]. La idea entonces es definir varios puntos sobre una isolínea de  $AoA$  (en este trabajo se selecciona la condición de garage) y una vez determinado el barranco, fijar un  $h_s$  próximo al mismo y rotar el vehículo de forma rígida asignándole un desplazamiento a  $h_r$ .

En la Figura 10 se presentan varios de los puntos computados del mapa aerodinámico (Por razones de confidencialidad se omiten varios puntos del mapa que también fueron computados). Además se muestra la línea de iso- $h_s$  que marca el *barranco*. El comportamiento experimentado en pista coincide con las conclusiones que pueden obtenerse a partir de los resultados obtenidos. Además, en la Figura 10b se presenta la curva de eficiencia aerodinámica  $\eta = C_l/C_d$ . Para ciertos ángulos de ataque el vehículo alcanza eficiencias mayores que para otros y además se modifica la altura respecto al piso al que se encuentra el mejor rendimiento. Es posible entonces realizar modificaciones en la configuración del vehículo atendiendo a las zonas óptimas encontradas a partir de los resultados obtenidos.

#### 4 CONCLUSIONES

Con el fin de optimizar el rendimiento de un automóvil de competición se utilizan simuladores de vuelta. Estos requieren, entre otros datos, información acerca del

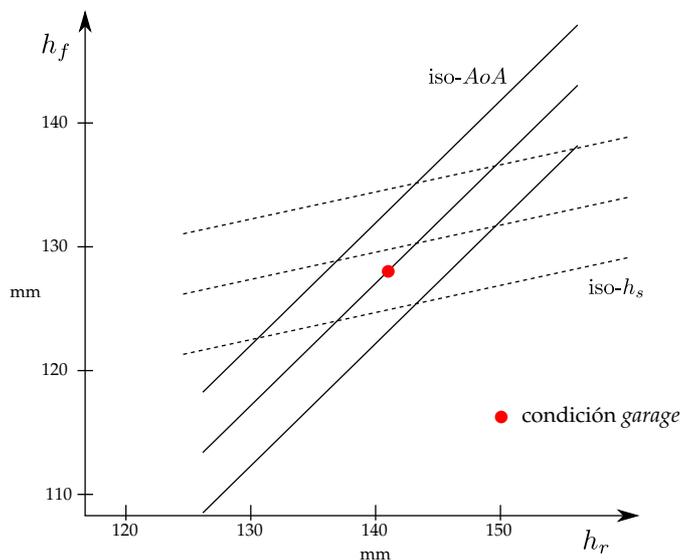


Figura 9: Esquema del mapa aerodinámico: condición de referencia e isolíneas de ángulos de ataque y de altura piso-suelo.

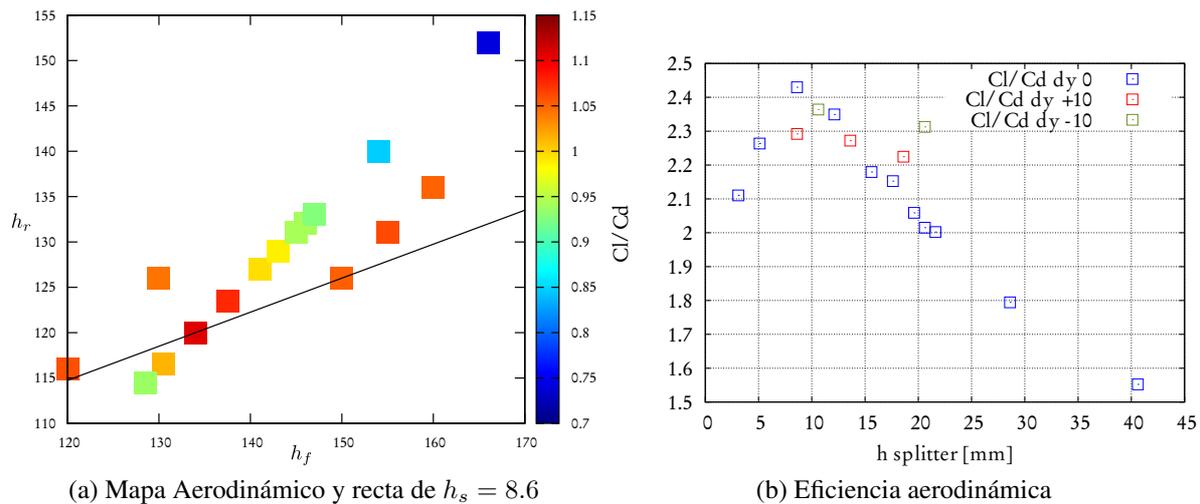


Figura 10: Resultados del mapa aerodinámico.

comportamiento aerodinámico del vehículo. Con este fin, en este trabajo se computaron numericamente los coeficientes de arrastre y sustentación de un automóvil en particular para diferentes configuraciones de alturas respecto al suelo y ángulos de ataque, confeccionando lo que se conoce como el mapa aerodinámico.

Para asegurar calidad en los resultados obtenidos se siguió una estrategia que incrementa progresivamente la complejidad de la simulación para finalizar resolviendo el modelo completo con configuraciones numéricas y discretizaciones validadas. En este contexto se ha propuesto un modelo simplificado del efecto suelo, simulado en dos dimensiones, que permite determinar el refinamiento necesario para obtener el *barranco* de la curva de  $C_l$ . Además se han resuelto simulaciones con sólo algún/os componentes del vehículo concluyendo que no es esperable obtener convergencia de máquina del residuo cuando se resuelven modelos complejos. Pero si debe esperarse estabilización del residuo en cierto valor, el cual es coincidente con un comportamiento convergido (o con variaciones periódicas) de los monitores.

Al resolver el modelo completo, la selección de puntos a simular es decidida siguiendo la isolínea de  $AoA$  y una vez detectado el barranco se siguen isolíneas de  $h_s$ . Los resultados del mapa aerodinámico y las curvas de eficiencia aerodinámica presentan buena concordancia con el comportamiento experimentado en pista.

## 5 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con el apoyo del equipo PSG-16 Team.

## REFERENCES

- Cooper K., Syms J., and Sovran G. Selecting automotive diffusers to maximise underbody downforce. Technical Report, SAE Technical Paper 2000-01-0354, 2010. doi:10.4271/2000-01-0354.
- Diasinos S., Barber T., and Doig G. The effects of simplifications on isolated wheel aerodynamics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 146:90 – 101, 2015.
- Ferziger J.H. and Peric M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, 3rd edition, 2001.
- Menter F. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8):1598–1605, 1994.
- Venkatesan D.V., E S.K., H S.K., A A.N., D A.R., and Kumar V. Studies on race car aerodynamics at wing in ground effect. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 8(7):1169 – 1174, 2014.
- Weller H.G., Tabor G., Jasak H., and Fureby C. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Computers in physics*, 12(6), 1998.
- Wright P. The influence of aerodynamics on the design of formula one racing cars. *International Journal of Vehicle Design*, 3(4):383–397, 1982. doi:10.1504/IJVD.1982.061285.
- Zhang X., Toet W., and Zerihan J. Ground effect aerodynamics of race cars. *Applied Mechanics Reviews*, 59(1):33 – 49, 2006.