



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL MECÁNICO

Título del proyecto:

**ESTUDIO DE LA CAPACIDAD AERODINÁMICA DE
CARROCERÍAS DE VEHÍCULOS CATEGORÍA CM**

MEMORIA

Danny García Martín

Sara Marcelino Sádaba

Pamplona, 15 de Septiembre de 2010

1.1 OBJETIVO	3
1.2 ANTECEDENTES	4
1.3 AERODINÁMICA DE COMPETICIÓN	6
1.4 CARACTERÍSTICAS DEL VEHÍCULO.....	12
1.5 DEFINICIONES.....	21
1.5.1 RESISTENCIA AERODINÁMICA, Cx.....	21
1.5.2 CAPA LÍMITE.....	23
1.5.3 EFECTO SUELO.....	25
1.5.4 TÚNEL DE VIENTO.....	27
1.6 ANÁLISIS CON SOFTWARE SENCILLO.....	30
1.6.1 DESARROLLO	30
1.6.2 VALIDACIÓN.....	41
1.7 SOFTWARE ESPECIALIZADO EN AERODINÁMICA.....	42
1.7.1 SOFTWARE ELEGIDO	43
1.7.2 MODELO MATEMÁTICO.....	45
1.8 CÁLCULO	46
1.8.1 MODELO Y MALLADO UTILIZADO	48
1.8.2 DIMENSIONES TÚNEL VIRTUAL Y CONDICIONES DE CONTORNO.....	55
1.7.3 CONDICIONES DEL FLUIDO	58
1.9 RESULTADOS	59
1.9.1 VELOCIDAD 108 Km/h.....	61
1.9.1.1 PARTE FRONTAL	62
1.9.1.2 PARTE SUPERIOR	64
1.9.1.3 PARTE LATERAL	66
1.9.1.4 PARTE TRASERA.....	67
1.9.1.5 ALERÓN	68
1.9.1.6 DIFUSOR	71
1.9.1.7 COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL AVANCE, Cx.....	74
1.9.2 VELOCIDAD 140 Km/h.....	75
1.9.2.1 PARTE FRONTAL	76
1.9.2.2 PARTE SUPERIOR	78
1.9.2.3 PARTE LATERAL	80
1.9.2.4 PARTE TRASERA.....	82
1.9.2.5 ALERÓN	83
1.9.2.6 DIFUSOR	86

1.9.2.7 COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL AVANCE, C_x	88
1.9.3 VELOCIDAD 170 Km/h.....	89
1.9.3.1 PARTE FRONTAL	90
1.9.3.2 PARTE SUPERIOR	92
1.9.3.3 PARTE LATERAL	94
1.9.3.4 PARTE TRASERA.....	95
1.9.3.5 ALERÓN	96
1.9.3.6 DIFUSOR	99
1.9.3.7 COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL AVANCE, C_x	101
1.9.4 VELOCIDAD 200 Km/h.....	102
1.9.4.1 PARTE FRONTAL	103
1.9.4.2 PARTE SUPERIOR	105
1.9.4.3 PARTE LATERAL	107
1.9.4.4 PARTE TRASERA.....	108
1.9.4.5 ALERÓN	109
1.9.4.6 DIFUSOR	112
1.9.4.7 COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL AVANCE, C_x	115
1.9.5 VELOCIDAD 230 Km/h.....	116
1.9.5.1 PARTE FRONTAL	117
1.9.5.2 PARTE SUPERIOR	119
1.9.5.3 PARTE LATERAL	121
1.9.5.4 PARTE TRASERA.....	122
1.9.5.5 ALERÓN	123
1.9.5.6 DIFUSOR	125
1.9.5.7 COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL AVANCE, C_x	127
1.10 CONCLUSIONES.....	128
1.10.1 VALIDEZ SOLIDWORKS Y STAR-CCM+.....	128
1.10.2 CONCLUSIONES AERODINÁMICAS	130
1.11 BIBLIOGRAFÍA.....	141

1.1 OBJETIVO

Los objetivos de este Proyecto Final de Carrera son los siguientes:

1. Conocer la posibilidad de realizar estudios aerodinámicos mediante software de diseño no específico para este ámbito.
2. Conocer el comportamiento aerodinámico de un vehículo de competición categoría CM, mediante la realización de un análisis aerodinámico que permita disponer de datos para la futura evolución del vehículo diseñado manteniendo el mismo chasis y componentes mecánicos.
3. Conocer nuevos puntos de mejora aerodinámica para definir nuevas geometrías e integrarlas en un proceso de ingeniería directa minimizando el gasto en prototipos.

Para lograr los objetivos anteriores, se deberán realizar los siguientes objetivos de trabajo:

1. Adquirir conocimientos de aerodinámica.
2. Realizar un análisis de la geometría y comprobar su validez frente al reglamento de la Federación Española de Automovilismo de categoría CM
3. Realizar un análisis aerodinámicos mediante métodos sencillos
4. Realizar los análisis pertinentes mediante programas aerodinámicos.
5. Comparación de resultados y validación en su caso de métodos sencillos
6. Estudio de resultados
7. Conclusiones y puntos de mejora.

Para el análisis con métodos sencillos utilizaremos el programa de diseño en 3D Solidworks.

Este PFC será realizado para la empresa SILVER CAR, con el fin de tener un estudio aerodinámico teórico del modelo. Pudiendo realizar los cambios pertinentes dependiendo del tipo de competición en el cual vaya a competir el vehículo

1.2 ANTECEDENTES

Debido al fallecimiento de Don Carlos María Sopena Serna profesor de maquinas térmicas en las titulaciones de Ingeniería Industrial e Ingeniería Técnica Industrial especialidad Mecánica, antiguo tutor de mi PFC “*Acoplamiento de un turbocompresor a un motor diesel atmosférico*” y la falta de personal cualificado en el campo de turbocompresores, me surgía la necesidad de buscar otro Proyecto Fin de Carrera.

Fui ofertado en el departamento de Ingeniería Rural de la UPNA a realizar un análisis aerodinámico de un vehículo. Tratándose de un Proyecto referido al mundo del automóvil y en mi conveniencia respecto a la realización del Máster de Especialización Técnica en Competición Automovilística, procedí a la realización de él.

SILVER CAR es una empresa Navarra ubicada en Peralta, dedicada al mundo del automovilismo por parte de su creador Juan Carlos Silvestre. SILVER CAR se centra en el desarrollo de prototipos de vehículos de carreras de la categoría CM

SILVER CAR ha sido capaz de desarrollar varios prototipos, siendo su principal apuesta el último prototipo desarrollado para categoría CM, que ha logrado el campeonato de España, siendo a día de hoy el mejor coche existente.

En el mundo de la competición durante los periodos de carreras las evoluciones de los vehículos son constantes con el fin de aprovechar al máximo las prestaciones de los coches.

El CM de SILVER CAR es el mejor coche de su categoría y además es el vehículo que mejor comportamiento tiene en la mayor parte de terrenos.

Actualmente en España en estos momentos existen cuatro firmas (incluyendo a SILVER CAR), de los que dos de ellos llevan casi ocho años fabricando monoplazas CM.

Las cuatro empresas son:

- Speed Car: El primero en aparecer fue el prestigioso Speed Car, primero con sus Car Cross de tierra y luego con los CM, con los que ha conseguido dos títulos de montaña. Actualmente ha lanzado su segunda versión, el Speed Car GT-R, un vehículo que se está mostrando muy competitivo por las rampas nacionales. Su creador es Delfín Lahoz quien, con sede en Lleida.
- Bango Car: El segundo en cuanto a antigüedad es Bango Car. El responsable es Jesús Bango quien, asentado en Asturias, ya ha fabricado 50 unidades. Bango

Car está comercializando su segunda evolución, el BRC '05. Un monoplaça muy competitivo que ha conquistado tres títulos nacionales.

- Silver Car: Fue el vehículo revelación de la temporada 2007. El año 2006 estuvo evolucionando su primer producto y en 2007 consiguió un nivel de competitividad altísimo, llevándose el entorchado nacional de montaña en la temporada 2007 y 2008. El responsable es Juan Carlos Silvestre y ha fabricado 36 unidades en sus instalaciones en Navarra.
- Tecnicar: Es otro fabricante que desarrolló su primer prototipo durante el 2007. Desde sus instalaciones de Valencia, su responsable Javier Lapeña tiene su monoplaça homologado y las dos unidades construidas actualmente han mostrado muy buenas maneras frente a los cronos conseguidos por la competencia.

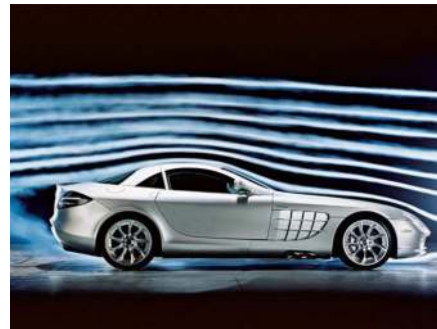
El CM de SILVER CAR es el mejor coche de su categoría y además es el vehículo que mejor comportamiento tiene en la mayor parte de terrenos, pero sin embargo, el análisis de una serie de datos una vez concluida la temporada 2008 y la aparición de un nuevo motor de mayor potencia de partida, hacen que SILVER CAR haya decidido desarrollar un documento en el que se puedan recoger nuevos puntos de mejora.

1.3 AERODINÁMICA DE COMPETICIÓN

La aerodinámica es una rama de la mecánica de fluidos que se ocupa de los fluidos, las fuerzas que actúan sobre ellos y estos generan. Algunos ejemplos del ámbito de la aerodinámica son el movimiento de un avión a través del aire, las fuerzas que el viento ejerce sobre una estructura o las fuerzas que intervienen en el desplazamiento de un vehículo, tema de este proyecto fin de carrera.



Airbus



Mercedes SLC

La forma de un objeto afecta enormemente la resistencia al movimiento que ejerce el aire sobre él. Una de las leyes fundamentales que rigen el movimiento de los fluidos es el Teorema de Bernoulli, que relaciona un aumento de velocidad de flujo con una disminución de la presión y viceversa.

La aerodinámica tiene su mayor impacto en el sector automovilístico a través de su contribución en las cargas del vehículo. En el diseño de un automóvil moderno interviene de manera fundamental la forma de su carrocería, influyendo tanto en el aprovechamiento de la potencia que desarrolla el motor, como en la estabilidad a altas velocidades y consumo de combustible.



competitivo.

Un claro ejemplo es la Fórmula 1, los equipos invierten tantos millones en investigación y desarrollo de esta área cada año. Los diseñadores tienen principalmente dos objetivos a la hora de desarrollar un monoplace: Conseguir una correcta incidencia del vehículo en el aire para conseguir que este se pegue lo más posible al suelo. El equilibrio entre ambas, es lo que determina si un monoplace es o no

Un monoplaça con mucha carga aerodinámica, es decir, que se pegue mucho al suelo, conseguirá un rápido paso por curva, pero en las rectas al tener mucha carga perderá velocidad punta, de modo que con poca carga tendrá una mayor velocidad punta. Para poder elegir la mejor configuración posible los equipos realizan simulaciones informáticas y en túneles de viento. A partir de los resultados obtenidos se configuran los coches usando alerones, pontones, spoilers y demás artilugios aerodinámicos

Las fuerzas aerodinámicas interactúan con el vehículo causando arrastre, sustentación, fuerzas laterales, momentos.... Los parámetros que rigen las formas de un vehículo de calle son muy diferentes a las de un coche de carreras. Mientras en los coches de carreras la eficiencia aerodinámica, la sustentación negativa y las reglas propias de cada competición son las que le dan forma al vehículo; en los coches de calle la estética, la funcionalidad, el consumo, la seguridad y el uso particular son los que determinan su forma.

La facilidad con que un automóvil se mueve en una corriente de aire viene indicada por un coeficiente de resistencia aerodinámica, determinado por la forma de cada carrocería y por elementos no integrados en ella. La aerodinámica interviene también en el confort de los pasajeros, el diseño condiciona las formas de la carrocería, el ruido aerodinámico en el interior del habitáculo.

Por ejemplo el vehículo que se muestra en la imagen un jeep compass (vehículo propio), produce ruido aerodinámico. A velocidades superiores a los 90 km/h el vehículo produce un ligero silbido.



Jeep Compass

En cuanto a la estabilidad del vehículo, es muy importante que el centro de presiones (punto donde se concentran todas las fuerzas aerodinámicas) quede lo más cerca posible del centro de gravedad del vehículo, pero resulta difícil de conseguir porque a altas velocidades el flujo de aire cambia completamente. Para solucionar esto, algunos coches muy sofisticados cuentan con sistemas de aerodinámica activa.

La aerodinámica activa, consta de elementos que afectan a la aerodinámica y se despliegan elementos en algunas condiciones como ejemplo alerones, spoilers,... Coches como el Porsche 911, Audi TT o el Bugatti Veyron utilizan estas novedosas aplicaciones.



Porsche 911 Carrera

El porche 911 Carrera despliega un alerón trasero a partir de cierta velocidad con el fin de obtener un mayor agarra y estabilidad.



Bugatti Veyron

El Bugatti Veyron al igual que el Porsche 911 Carrera despliega un alerón a altas velocidades, e incluso modifica la inclinación del en función de la velocidad.

La aerodinámica en los vehículos de competición se define como el manejo de las corrientes de aire aplicada a la geometría exterior del vehículo, con el fin de ganar adherencia y en consecuencia mayor velocidad, garantizando la seguridad del piloto.

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, debido a los altos costes.

Antiguamente cuando se diseñaban y construían vehículos de competición, todo se basaba en el motor, intentaban potenciar al máximo el coche e intentar reducir todo el peso posible.

La fórmula 1 es un claro ejemplo. Antiguamente se dedicaban a montar motores muy grandes sin limitaciones de potencia. Actualmente los motores que se utilizan son de 2400 cc sin sobrealimentar y limitados de revoluciones.

En la siguiente tabla quedan registrados el tipo de motor y año en el que se utilizaron en la fórmula 1

Años	Cilindrada y tipo aspiración	Disposición del motor
1950-1951	4500cc atmosféricos o 1500cc con turbo	Indiferente
1952-1953	2000cc atmosféricos	Indiferente
1954-1960	2500cc atmosféricos o 750cc con turbo	Indiferente
1961-1965	1500cc atmosféricos	Indiferente
1966-1985	3000cc atmosféricos o 1500cc con turbo	Indiferente
1986-1987	1500cc con turbo	Indiferente
1988	3500cc atmosféricos o 1500cc con turbo	Indiferente
1989-1994	3500cc atmosféricos	Indiferente
1995-2000	3000cc atmosféricos	Indiferente
2000-2005	3000cc atmosféricos	V10
2006	S400cc atmosféricos V8 o 3000cc atmosféricos V10	V8 O V10 limitado a 16.800rpm
2007-2008	2400cc atmosféricos	V8 limitados a 19000 rpm
2009	2400cc atmosféricos V8	Limitado a 16000

Cada año les imponen nuevas normas en las cuales sus velocidades máximas son menores, en cambio los tiempos registrados en los distintos trazados del mundial de fórmula 1, son cada vez mas menores. Esto se debe a la influencia de la aerodinámica. Aunque han perdido velocidad punta y la han ganado en paso por curva de ahí que cada año se superen en sus registros.

No todas las escuderías de automovilismo poseían grandes cantidades de capital. Este hecho ha llevado a la constante búsqueda de métodos de análisis del comportamiento aerodinámicos menos costosos.

Existen otros métodos menos costosos para comprobar de forma general la incidencia del aire sobre la carrocería.

Uno de estos métodos trata de colocar hilos por toda la carrocería del vehículo y mediante fotos sacadas a distintas partes del vehículo y en determinadas condiciones: finales de rectas a velocidad máxima, paso por curva,...



Método hilos

Otro método existente consiste en colocar gotas de agua sobre cera y observar la dirección que toman las gotas.

Pero estas formas sencillas de análisis no son del todo precisas. Con estos métodos sencillos se pueden llegar a observar grandes cosas, pero llega un momento en el cual se necesitan datos más precisos.

La mejor respuesta a las exigencias planteadas por este sector apareció de la mano de los programas de simulación, conocidos como CFD ,Computational Fluid Dynamics, es decir, el estudio de los fluidos dinámicos mediante ordenador. Se trata de una tecnología utilizada en los estudios de aerodinámica que permite analizar diferentes configuraciones

para verificar los movimientos del aire alrededor de distintas formas. El CFD es un paso previo a los estudios reales realizados en túneles de viento, de esta forma las simulaciones son de bajo costo y se podrán realizar tantas simulaciones como uno quiera y permite estimar de manera bastante eficiente el modo en que el aire afectará al movimiento del vehículo.

1.4 CARACTERÍSTICAS DEL VEHÍCULO

Los vehículos CM, son prototipos que están contruidos sobre la base de un chasis tubular, animados con un motor de motocicleta de 1.000c.c. Todo vehículo CM debe estar diseñado cumpliendo la normativa del Reglamento de la Real Federación Española de Automovilismo de categoría CM.

Se expondrán los artículos que vayan relacionadas con las características externas del vehículo y los relacionados con aerodinámica.

En cuanto lo que atañe a carrocería y dimensiones el artículo 3 del reglamento dice:

3.1.a. Longitud

La longitud máxima del vehículo, no podrá sobrepasar los 3.750 mm.

3.1.b. Anchura

La anchura exterior máxima del vehículo no podrá sobrepasar los 1.750 mm.

3.1.c. Altura

La altura medida verticalmente desde el punto más bajo de la superficie plana al punto más elevado del vehículo no deberá ser superior a 1.030 mm salvando el arco principal de seguridad que no deberá dar lugar a una estructura aerodinámica.

Las dimensiones del vehículo cumplen con el reglamento de la copa de España de CM y son las siguientes:

- Largo: 3.749 mm.
- Ancho: 1.749 mm.
- Alto: 1.030 mm.

3.1.d Voladizos

Los voladizos máximos medidos desde el eje de mangueta hasta el final del vehículo deben ser:

Delantero: 730 mm

Trasero: 630 mm

3.2. Puertas

Las dimensiones del paño inferior (parte opaca) deberán ser tales que se pueda inscribir un rectángulo o paralelogramo de al menos 500 mm de largo en total y 300 mm de alto medidos verticalmente en el que los ángulos podrán ser redondeados con un radio máximo de 50 mm. Los vehículos cuyas puertas sean deslizables, no serán admitidos salvo que lleven un dispositivo de seguridad que permita en caso de accidente evacuar rápida y fácilmente los ocupantes del vehículo.

Las puertas deben llevar una ventana diferenciada del panel inferior, realizada en un material transparente y que pueda contener un paralelogramo horizontal cuyos lados midan al menos 400 mm. La altura medida sobre la superficie de la ventana perpendicularmente a los lados horizontales será al menos de 250 mm. Los ángulos del paralelogramo pueden ser redondeados según un radio máximo de 50 mm. Deberán ser diseñadas de forma que no restrinja la visión lateral del conductor.

Cada puerta no debe llevar mas que una empuñadura exterior que deberá ser del tipo de leva accionada hacia arriba, claramente señalada por una flecha roja o de un color que contraste con el fondo.

Únicamente la puerta del conductor, puede ir provista de una red homologada, en cuyo caso no es obligatorio el cristal antes descrito.



Silver Car S1, puerta

Como se observa en la imagen posterior la puerta consta de dos partes. Una parte superior de material transparente y una parte inferior de panel opaco, con una sola empuñadura. Las puertas son de gran accesibilidad y abatibles sobre la parte del retrovisor delantero.

3.3. Parabrisas

Es obligatorio el montaje de un parabrisas formado por una sola pieza de vidrio laminado o de Policarbonato de 4 mm de espesor.

La forma de este vidrio tiene que ser tal, que a una distancia de 50 mm medidos verticalmente hacia la base a partir del punto superior de la parte transparente, la superficie vitrificada tenga una longitud de al menos 250 mm medidos en la cuerda, de una parte y otra del eje longitudinal del vehículo. Su arista superior debe formar una línea convexa regular y continua con el plano horizontal. Deberá poder inscribirse en él, una tira vertical de 100 mm de altura y de 850 mm de largo (medidos horizontalmente) en la cuerda entre las caras del parabrisas.



Silver Car S1, luna

3.4. Carrocería

3.4.1 Está prohibida la utilización de fibra de carbono y/o Kevlar en la fabricación de la carrocería; sin embargo los dispositivos aerodinámicos traseros constituidos por un ala incluidos sus apoyos, podrán ser fabricados de estos materiales compuestos.

La carrocería del SILVER CAR consta de 5 piezas en fibra de vidrio reforzada y perfectamente referenciadas entre sí.



Silver Car S1

Se entiende como ala, una superficie con forma de perfil de ala de avión invertida, separada de la superficie formada por la carrocería de tal forma, que una corriente de aire pueda pasar por entre estas dos superficies.



Silver Car S1, alerón

3.4.2. La carrocería deberá cubrir todos los elementos mecánicos, con la única exclusión de las tomas de admisión y escape.

3.4.3. La toma de aire de admisión, no podrá sobrepasar en altura la curva final de la barra antivuelco.



Silver car S1, toma de admisión

3.4.4. Entre el borde trasero de las ruedas delanteras completas, y el borde delantero de las ruedas traseras completas, toda la parte suspendida visible desde la parte inferior del vehículo ha de formar una superficie sólida, continua plana y continua, en la que sea posible inscribir un rectángulo de 1000 mm (medidos según el eje transversal del vehículo) por 800mm (medidos según el eje longitudinal del vehículo) (tolerancia ± 5 mm).

3.4.5. Ninguna parte de esta superficie tendrá una influencia aerodinámica, y ninguna parte de la carrocería podrá encontrarse en ninguna circunstancia por debajo del plano geométrico conformado por la superficie antes definida en el Art. 3.4.4.

3.4.6. Todas las partes que tengan influencia aerodinámica, así como cualquiera de la carrocería deben estar fijadas rígidamente a la parte suspendida del vehículo (conjunto chasis carrocería) no debiendo tener ninguna posibilidad de movimiento, estar fijadas sólidamente, y permanecer inmóviles con respecto a esa parte cuando el vehículo se mueva.



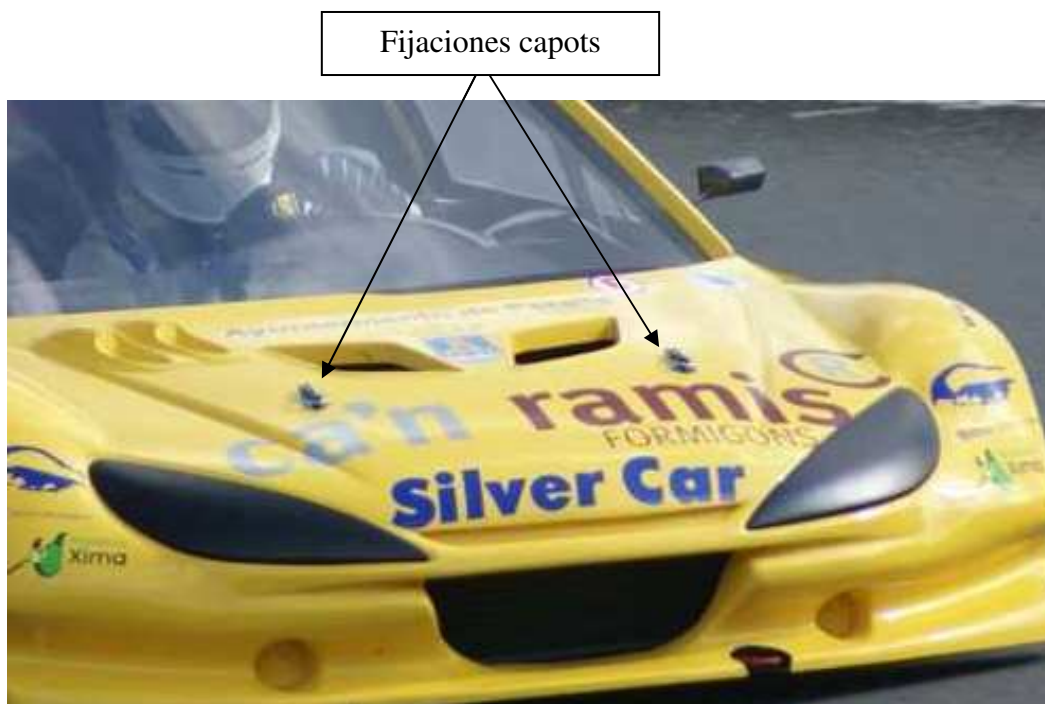
Silver Car S1

3.4.7. Todo dispositivo o construcción, diseñado para interponerse entre la parte suspendida del vehículo y el suelo está prohibido.

3.4.8. Detrás de las ruedas traseras, la carrocería deberá descender por debajo del eje de dichas ruedas traseras. Toda abertura de refrigeración practicada en la carrocería y dirigida hacia atrás, estará provisto de persianas o de otro dispositivo que impidan la visión en cualquier caso, de los elementos mecánicos o de las ruedas. La carrocería deberá tapar las ruedas, de forma que cubra al menos la parte superior de su circunferencia.

3.4.9. Todos los elementos de la carrocería deberán estar completos y cuidadosamente terminados, sin piezas provisionales que cubran desperfectos anteriores.

3.4.10. Las fijaciones de los capots delantero y trasero, deben estar claramente indicadas por flechas en rojo o de otro color que contraste con el fondo de la carrocería y deben ser practicables sin ayudas de herramientas.



Silver Car SI, fijaciones capot

3.4.11. Elemento aerodinámico delantero

Delante-Teniendo en cuenta la proyección de la carrocería en posición horizontal, desde el eje de las ruedas delanteras ningún elemento aerodinámico podrá sobrepasar en proyección horizontal más de 200 mm.

Se permite la adición de un plano horizontal en la parte delantera (“splitter”) de una anchura máxima de 50 mm., medidos desde la proyección de la carrocería original en el suelo hacia delante. Debe ser prolongación del plano inferior, fijado en él y a la carrocería del coche sin piezas intermedias. Su anchura lateral no podrá sobrepasar a la carrocería.



Silver Car SI, parte delantera

3.4.12. Ala trasera

Está permitida un ala de un solo plano de sección máxima 250 mm x 150 mm, y de longitud el valor el de la proyección vertical de la carrocería sobre el plano horizontal, menos 75 mm por cada lado; si fuera de forma curva, su longitud máxima será de 500 mm.

Los finales de ala deberán ser paralelos al eje longitudinal del vehículo y tener una dimensión máxima de 280 x 160 mm y espesor 5 mm.



Silver car SI, alerón

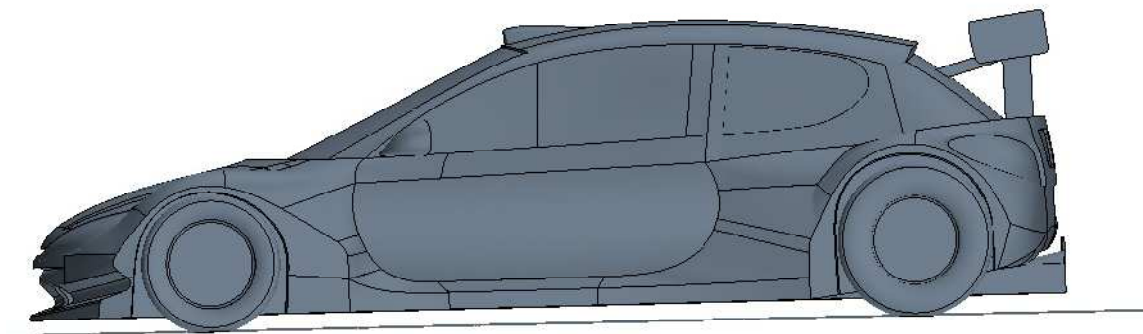
Estas son las condiciones que deben cumplir en relación a la carrocería y dimensiones del vehículo.

Debido a su geometría coches, bajos, cortos, anchos, y poco peso, son extremadamente rápidos, capaces de hacer sombra a coches de altas prestaciones como el toledo gt, con una potencia de 465 CV



Seat Toledo GT

SILVER CAR nos aportó el diseño 3D del S1 para realizar los análisis. La geometría del S1 queda reflejada en la siguiente ilustración:



Geometría exterior Silver Car S1

1.5 DEFINICIONES

En este apartado se definen conceptos aerodinámicos que se emplean durante el desarrollo de este Proyecto Fin de Carrera.

1.5.1 RESISTENCIA AERODINÁMICA, C_x

Se denomina resistencia aerodinámica o *drag*, al componente de la fuerza que sufre un cuerpo al moverse a través del aire en la dirección de la velocidad relativa entre el aire y el cuerpo. La resistencia es siempre de sentido opuesto a dicha velocidad, por lo que es la fuerza que se opone al avance de un cuerpo a través del aire.

Se utiliza coeficientes aerodinámicos que representan la efectividad de la forma en la que un cuerpo se desplaza a través del aire. Su coeficiente asociado es conocido popularmente como coeficiente de penetración o coeficiente de resistencia.

Cuando se circula en coche, no nos damos cuenta de que no estamos avanzando en el vacío, sino atravesando el aire. El motor del coche tiene que vencer la resistencia y esto queda reflejado en el consumo de combustible.

El incremento en la resistencia aerodinámica queda reflejado por varios factores:

- La velocidad: cuanto más rápido se circula, mas resistencia existe, y por lo tanto más resistencia existe.
- La limpieza del vehículo: con un coche muy sucio, con barro en los bajos y laterales y la aerodinámica del coche se altera y representa más resistencia al avance.
- El incremento es mucho mayor cuando se dispone de baca si se coloca equipaje sobre la baca el coeficiente aumenta enormemente. Como se ha dicho el consumo de combustible aumentaría considerablemente.



Portaequipajes

Para reducir el coeficiente aerodinámico o drag y ahorrar el máximo combustible posible debemos: reducir peso, es decir, llevar lo necesario, transportar el equipaje dentro del vehículo correctamente sujeto y teniendo repartido el peso por igual a las ruedas, llevar el coche limpio y no circular a velocidades altas.

Ejemplos de coeficientes aerodinámicos:

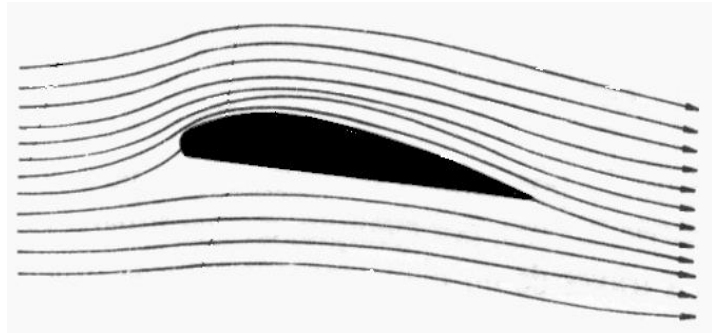
VEHÍCULO	C _x
Opel Insignia (2009)	0,27
Audi A3 (2003)	0,32
Audi A6 (1997)	0,28
Opel Kadett (1989)	0,38
Formula 1 (Mónaco)	1,084
Formula (Monza)	0,7
BMW serie 1 (2004)	0,31
Renault Espace (2002)	0,35
Opel Astra (2004)	0,32

1.5.2 CAPA LÍMITE

En mecánica de fluidos, la capa límite de un fluido es la zona donde el movimiento de éste es perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto. La capa límite se entiende como aquella en la que la velocidad del fluido respecto al sólido en movimiento varía desde cero hasta el 99% de la velocidad de la corriente no perturbada.

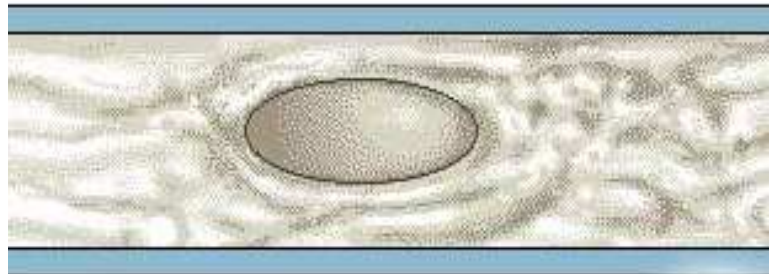
Existen dos tipos de capa límite: laminar y turbulenta; en ellas respectivamente actúan flujo laminar y flujo turbulento.

Se llama flujo laminar, al tipo de movimiento de un fluido cuando éste es perfectamente ordenado, estratificado, suave, de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse, si la corriente tiene lugar entre dos planos paralelos. Las capas no se mezclan entre sí. El mecanismo de transporte es exclusivamente molecular. Se dice que este flujo es aerodinámico. En el flujo aerodinámico, cada partícula de fluido sigue una trayectoria suave, llamada línea de corriente.



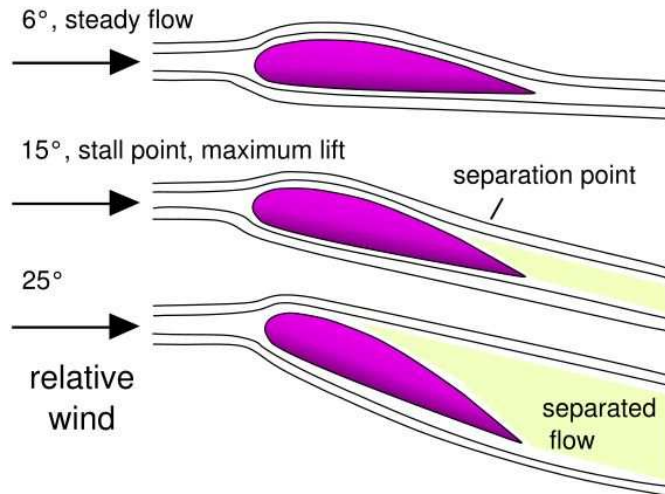
Régimen laminar

Se llama flujo turbulento al movimiento de un fluido que se da en forma caótica, en que las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos, como por ejemplo el agua en un canal de gran pendiente. Debido a esto, la trayectoria de una partícula se puede predecir hasta una cierta escala, a partir de la cual la trayectoria de la misma es impredecible, es decir, caótica.



Régimen turbulento

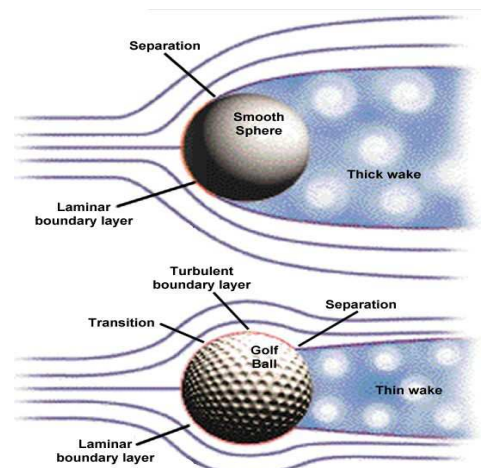
Una capa límite turbulenta tiene una ventaja muy importante frente a una capa límite laminar. El flujo laminar va perdiendo velocidad a lo largo de la capa límite, hasta que finalmente se para o incluso retrocede, provocando que la capa límite se desprenda y el flujo ya no siga la forma de la superficie. Este efecto es especialmente perjudicial en el ala



Desprendimiento capa límite

de un avión, ya que la sustentación depende de que el flujo siga la forma del perfil del ala. El desprendimiento de la capa límite de las alas es lo que ocurre cuando se dice que el avión *entra en pérdida*, es decir, deja de sustentar y cae como una piedra, y si el piloto no es capaz de hacer que la capa límite vuelva a adherirse al ala, el avión caerá.

Una capa límite turbulenta, en cambio, hace que parte de la energía cinética de la zona exterior se transmita al interior, estimulando el avance de las zonas de menor velocidad, por lo que el desprendimiento tarda mucho más en ocurrir, y el avión es mucho menos propenso a entrar en pérdida. Además, cuando la capa límite se desprende, la sección efectiva del objeto aumenta mucho porque el fluido no sigue su forma, de modo que la resistencia también es mucho mayor. Cuanto menor sea el desprendimiento, menor será dicha sección efectiva, y por tanto menor será la resistencia (el aire tendrá que desviarse menos para rodear el obstáculo). Así, con una capa límite turbulenta, muchas veces se consigue reducir bastante la resistencia aerodinámica al retrasar el desprendimiento. Es debido a esto que las pelotas de golf tienen agujeros y las de tenis son peludas.



Desprendimiento capa límite

1.5.3 EFECTO SUELO

Se denomina efecto suelo al fenómeno aerodinámico que se da cuando un cuerpo, con una diferencia de presiones entre la zona que hay por encima de él y la que hay por debajo, está muy cerca de la superficie terrestre, lo que provoca unas alteraciones en el flujo de aire que pueden aprovecharse en diversos campos.

En el mundo de automovilismo, generalmente de competición, se busca, al contrario que en aeronáutica, crear una zona de alta presión por encima del vehículo y una de baja presión por debajo, lo que provoca una succión al vehículo contra el suelo, mejorando el agarre, lo que se traduce en la posibilidad de trazar curvas a mayor velocidad.

Este efecto se introdujo en la Fórmula 1 a finales de los años 70 por parte de Lotus, mediante faldones y un diseño especial de la parte inferior de la carrocería. Otra técnica que se utilizó, era la extracción del aire de debajo del vehículo mediante un ventilador situado horizontalmente, pero fue prohibida inmediatamente.

Sin embargo, esta técnica tenía el problema de que en cuanto no hubiese una presión lo suficientemente pequeña por debajo del vehículo, cosa que por ejemplo podía pasar si se pasaba a gran velocidad por encima de un bache y el vehículo daba un "saltito", éste podía volverse muy inestable e incluso podía salir volando. Después de un período de tiempo y tras varios accidentes muy aparatosos, en la mayoría de competiciones, incluida la Fórmula 1, se limitó la utilización del efecto suelo por motivos de seguridad.



Jordan

Se podría pensar erróneamente que aumentando el peso del vehículo, se lograría un mayor efecto suelo ya que el aumento del peso del vehículo se traduciría en mayor fricción de los neumáticos contra el suelo y por ende en un mayor agarre. Lo cierto es que al aumentar la masa del automóvil, aumenta la fuerza centrífuga y esto hace que esta fuerza venza a la fricción entre los neumáticos y el suelo, perdiéndose el agarre por completo.

Lo interesante del efecto suelo es que aumenta considerablemente la fricción entre los neumáticos y el suelo, sin aumentar la masa del automóvil haciendo que el agarre sea

mayor a mayores velocidades. El problema se presenta cuando los materiales de la banda de rodamiento de los neumáticos llegan al límite de adherencia contra el suelo, o cuando por accidente se levanta una rueda o el vehículo avanza ladeado. Cuando esto ocurre, el vehículo simplemente se vuelve incontrolable.

Esta condición causó gravísimos accidentes en competiciones, especialmente en la Fórmula 1. Entre los más trágicos el accidente que sufrió el piloto canadiense Gilles Villeneuve en la tanda clasificatoria del GP de Bélgica de 1982, donde al golpear con una de sus ruedas delanteras la rueda trasera del vehículo que le precedía, su Ferrari salió prácticamente volando despidiendo por los aires a Villeneuve, quien murió en el acto.



Gilles Villeneuve

1.5.4 TÚNEL DE VIENTO

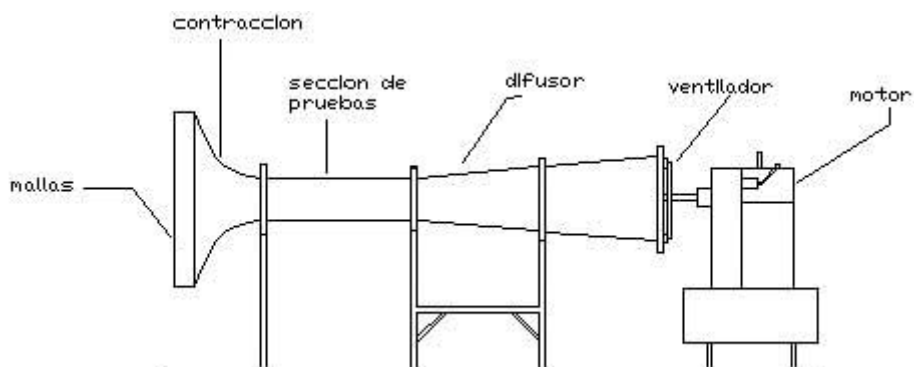
En ingeniería, un túnel de viento o túnel aerodinámico es una herramienta de investigación desarrollada para ayudar en el estudio de los efectos del movimiento del aire alrededor de objetos sólidos. Con este aparato que simulan las condiciones experimentadas por el objeto en la situación real.

En un túnel de viento, el objeto permanece estacionario mientras se fuerza el paso de aire o gas alrededor de él. Se utiliza para estudiar los efectos del movimiento del aire en objetos como aviones, , naves espaciales, misiles, automóviles, edificios o puentes.

El aire se sopla o aspira por medio de un conducto equipado con una ventana y otros aparatos en los que los modelos o formas geométricas se montan para su estudio. Después se utilizan varias técnicas para estudiar el flujo de aire real alrededor de la geometría y la compara con los resultados teóricos.

Aunque hay muchas familias de túneles de viento, por lo general pueden definirse como conductos que llevan en alguna parte de su trayecto un ventilador accionado por un motor, que se encarga que el aire fluya de manera constante; usualmente las aspas del ventilador son diseñadas, según el tipo de túnel que se vaya a construir, de manera similar a como se hacen las de los aviones.

Los túneles de viento constan de varias partes. La parte de interés para la experimentación es la sección de pruebas, que debe ser transparente para permitir la observación y la filmación, en ella se instala el modelo del vehículo o forma cualquiera, y diferentes aparatos que midan las fuerzas que experimenta este y las condiciones del aire que atraviesa esta sección. Resulta de interés que la sección de pruebas sea de menor área que el resto del túnel, puesto que por conservación de caudal genera una velocidad mayor cerca del modelo; ahorrando energía en el ventilador, que genera el mismo efecto en la sección de pruebas con una potencia menor, que además reduce las pérdidas por fricción en las paredes y codos del túnel.



Esquema túnel de viento abierto

Como una reducción brusca en el área de la sección genera desprendimientos y turbulencias, en la entrada de esta se coloca un cono que reduce de manera gradual el área, al que se le nombra contracción, de manera similar, al acabar la sección de pruebas hay un tramo denominado difusor, encargado de aumentar el área y disminuir la velocidad del aire.

Aunque las velocidades con que se experimenta en los túneles de viento varían dentro de un amplio rango, solo se considerarán las menores 580 Km/h, denominadas subsónicas, donde la compresibilidad del aire es despreciable.

En los túneles de viento no es necesario someter a experimentación el prototipo sino a un modelo a escala que guarde parecido aerodinámico.



BMW 320D E46



Modelo BMW 320D E46

Para conocer las fuerzas que se aplican al caso real, en un túnel subsónico, debe existir una similitud geométrica, lo que hace que ambos tengan la misma escalera de longitudes, tiempo y fuerzas. El tamaño del modelo define en muchos casos el tamaño de la sección; en teoría sería ideal que la sección tuviera el mayor ancho posible, sin embargo, por razones económicas, es aceptable que la envergadura del modelo sea como máximo cuatro quintas partes del ancho de la sección, de suerte que el efecto de las paredes no se vea reflejado en las mediciones.

Pero como ya sabéis los túneles no van dirigidos exclusivamente al diseño de aeronaves, sino también al de automóviles, bicicletas, edificios, a simular la propagación de incendios y de contaminantes atmosféricos... Para los resultados de las pruebas no sólo se usan sensores, también se usan sustancias que sirven para visualizar el flujo, como es el caso de los túneles de humo o túneles en los que se utiliza agua con jabón para marcar líneas y trayectorias en el fluido. En las siguientes figuras se pueden apreciar las líneas del flujo de aire en pruebas de túnel aerodinámico desde diferentes vistas.



Trayectorias fluido



Trayectorias de humo, túnel del viento

1.6 ANÁLISIS CON SOFTWARE SENCILLO

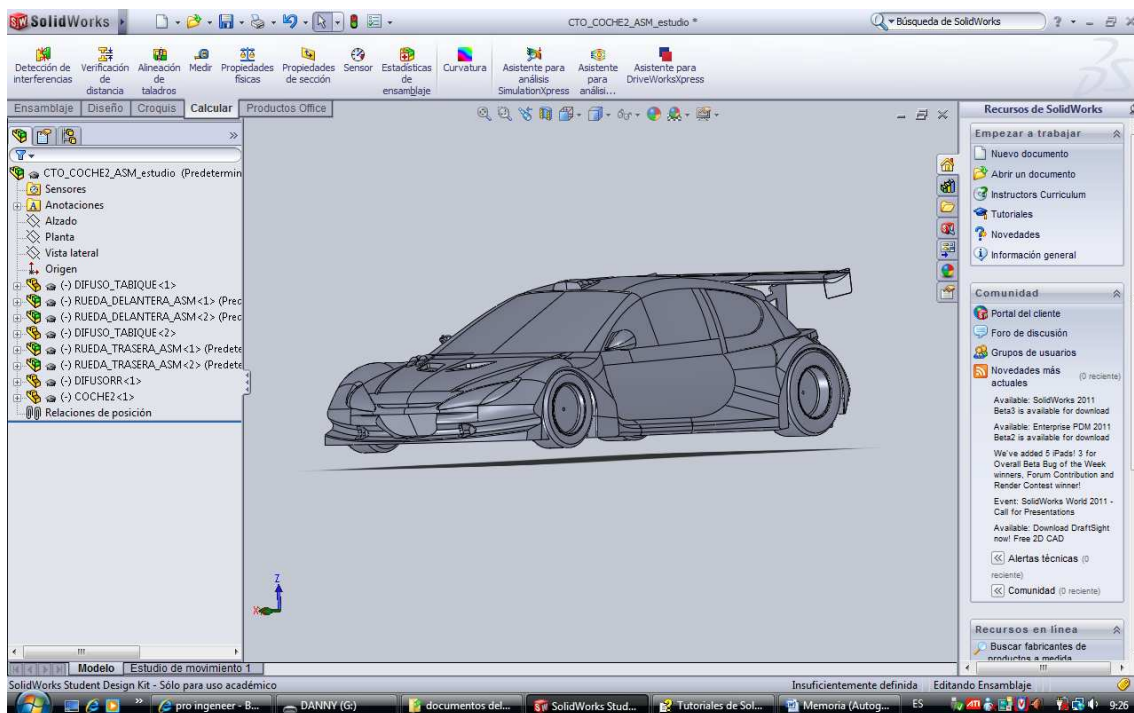
Para el estudio aerodinámico del vehículo S1 con métodos sencillos, se utilizará en su última versión el programa de diseño en 3D SolidWorks 2009 y su paquete de simulación de flujo, llamado *FloXpress*.

1.6.1 DESARROLLO

Se explicará desde el diseño inicial todos los pasos a seguir explicando en cada caso los comandos.

El primer paso que hay que hacer es cargar la geometría en un nuevo

Archivo → abrir → (nombre del dibujo), Nos permite abrir infinidad de formatos, referente a programas de diseño como: catia, pro/engineer, inventor, autocad,...

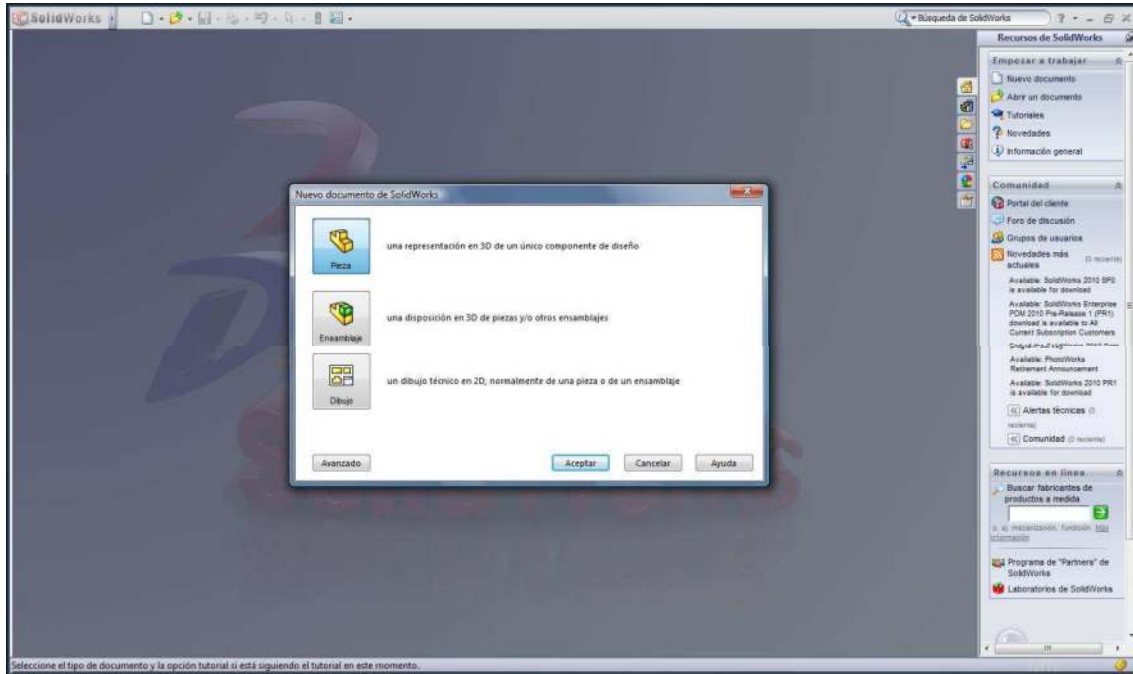


Abrir geometría coche

SolidWorks FloXpress sólo puede analizar flujo de fluidos en un volumen que esté completamente cerrado y que tenga al menos una entrada y una salida. Antes de analizar el flujo, debe cerrar todas las entradas del modelo.

Como no se quería un flujo en el interior del vehículo sino sobre su carrocería, se procedió a la creación de una nueva pieza a la que llamaremos túnel.

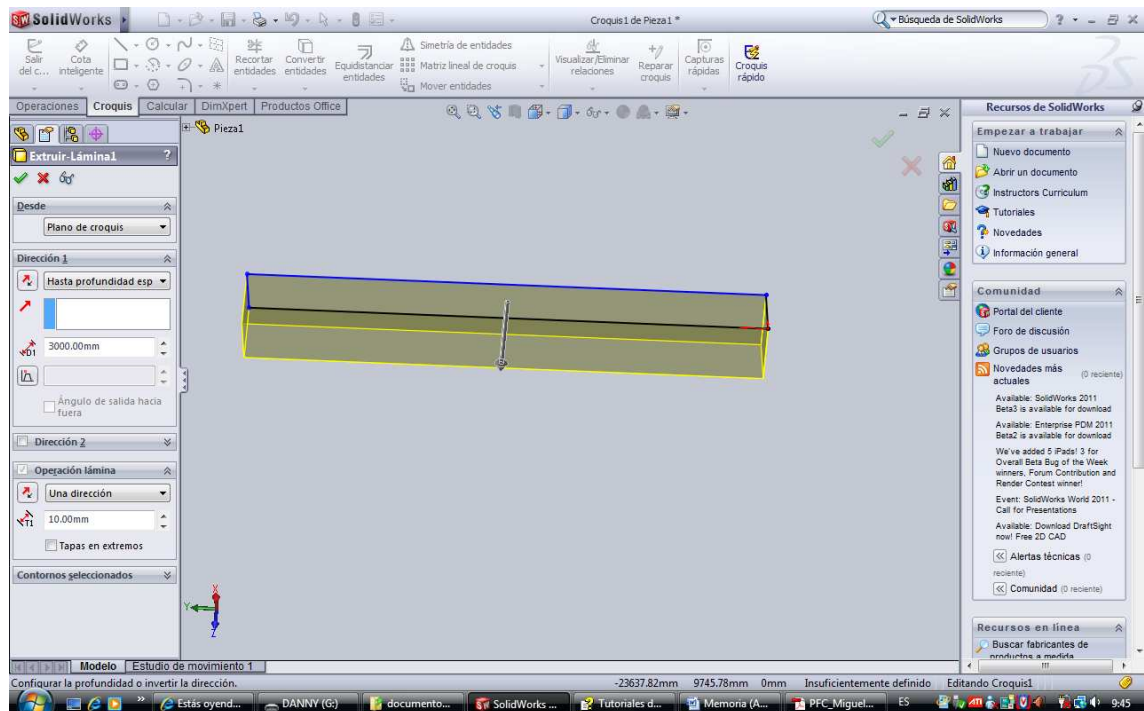
Archivo → nuevo → pieza,



Crear archivo nuevo

Activar la pestaña croquis, en ella dibujaremos un rectángulo, de lados 8 veces la longitud del coche y 5 veces la altura del coche (en el apartado 1.4 definiciones queda explicado las dimensiones del túnel).

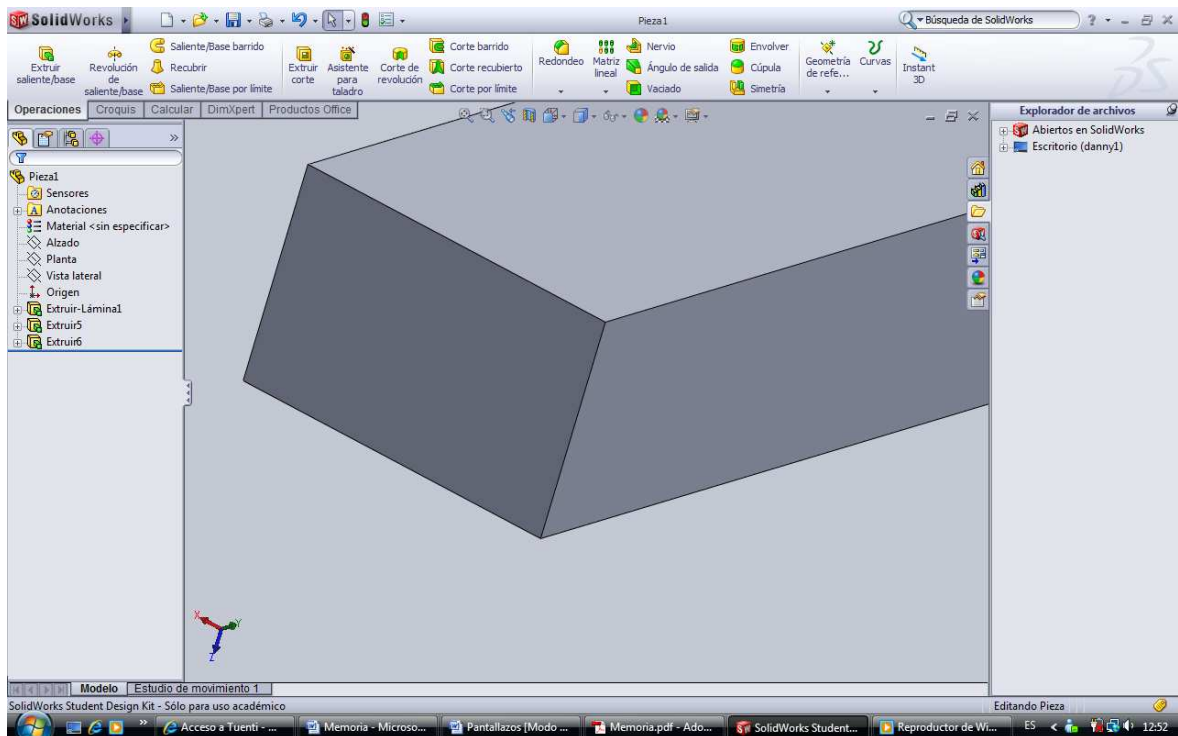
Activamos la pestaña operaciones → extruir saliente/base,



Extruir croquis

En el cuadro de dialogo de la izquierda, elegimos que tenga de ancho el túnel 5 veces la anchura del coche.

Para que no nos cree todo un bloque sólido, activamos la pestaña operación lámina (al final del cuadro de dialogo), como espesor de las paredes elegimos por ejemplo 10 mm, ya que esto no nos implica para nada. Una vez hecho esto, pulsamos el botón aceptar del cuadro de dialogo.

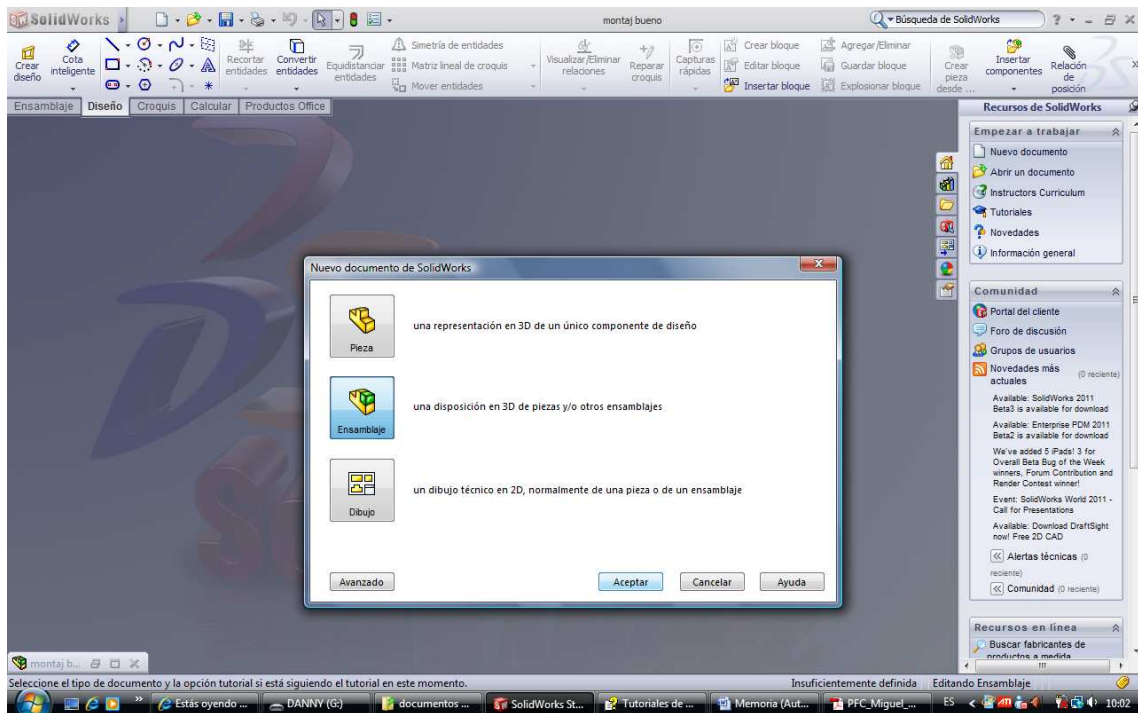


Túnel de viento virtual

El túnel todavía se encuentra abierto, se deben crear dos tapas para los laterales. El procedimiento será el mismo que lo explicado hasta ahora. Realizar el croquis y extruir.

A continuación crearemos un conjunto con el túnel y el coche. Para ello hacemos:

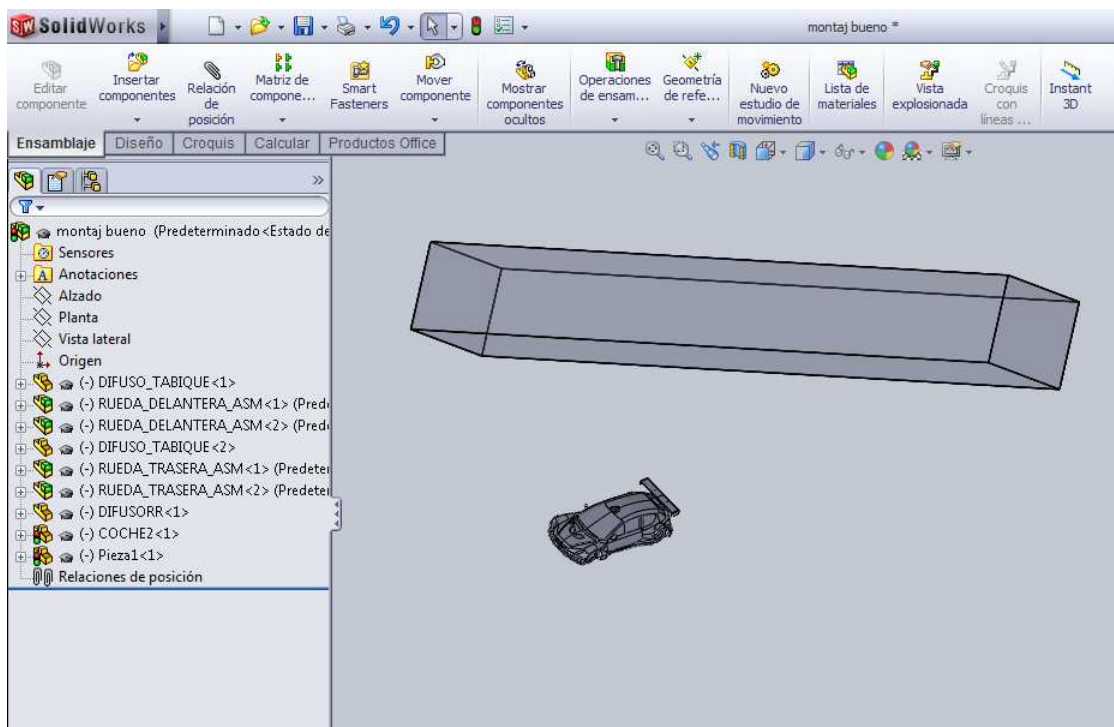
Archivo → nuevo → ensamblaje



Crear ensamblaje

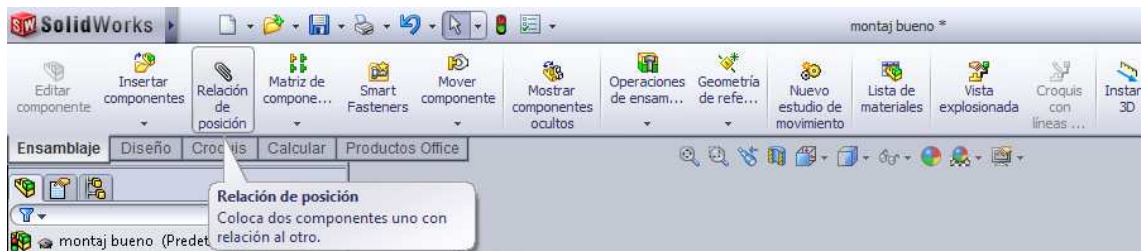
A continuación examinar → elegir la pieza

Una vez tengamos o el túnel o el coche, en la pestaña ensamblaje → examinar → elegir la otra pieza.



Abrir ambas piezas en ensamblaje

Se introducen las relaciones de posición necesarias para que esté completamente definido. Dentro del menú ensamblaje, pinchar en el botón, “relación de posición”

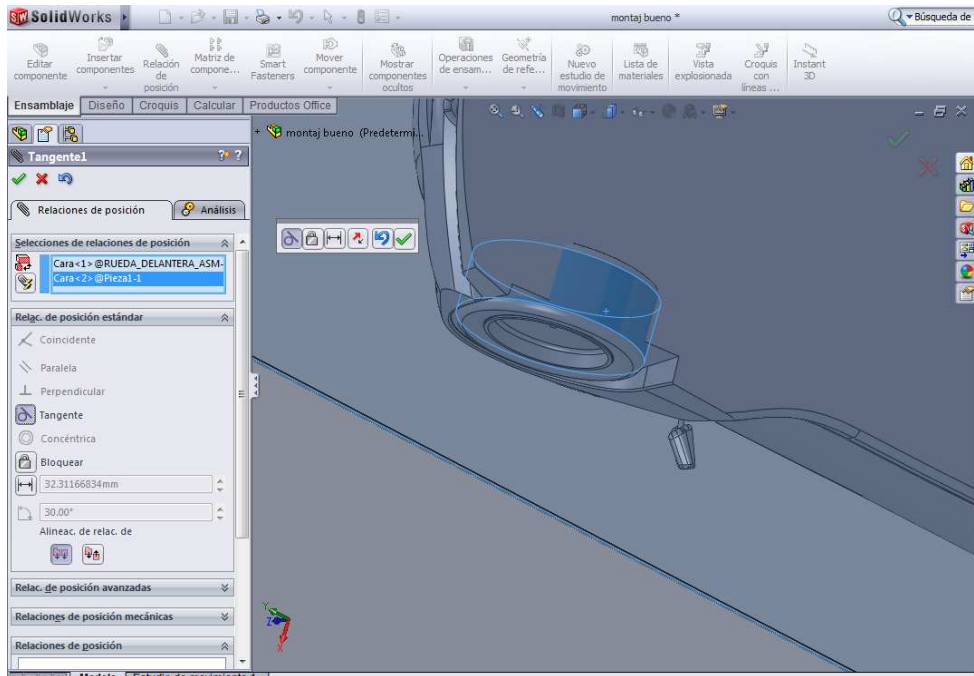


Menú, agregar relaciones de posición

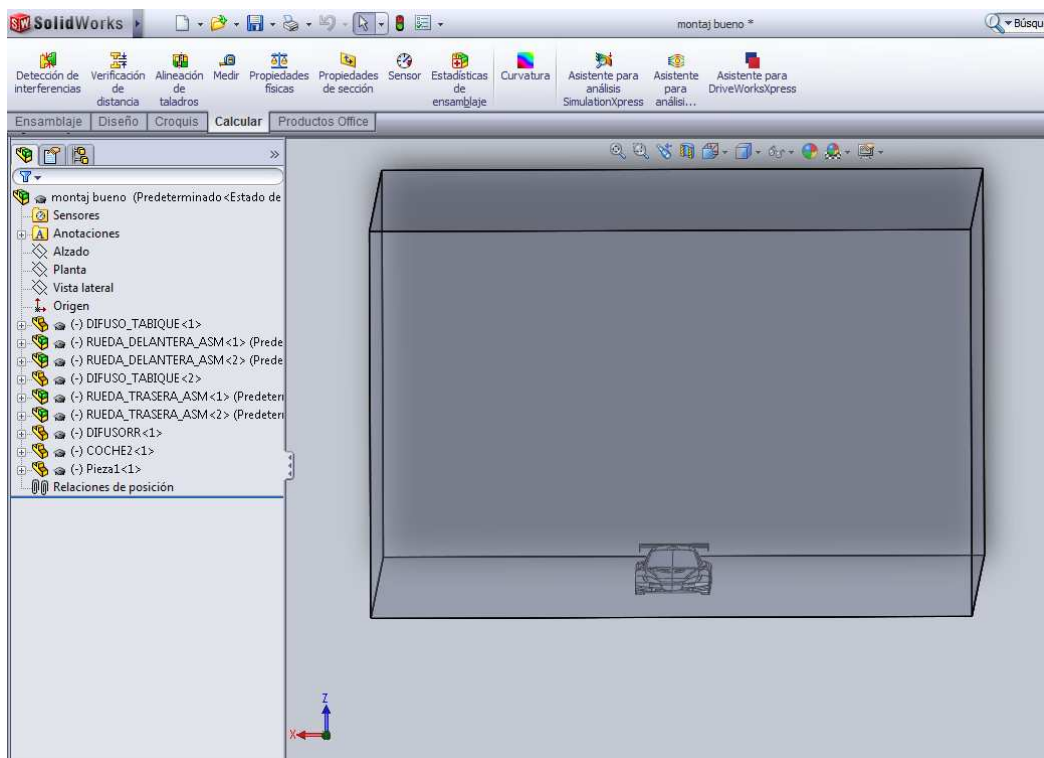
En la parte izquierda de la pantalla aparece un menú. Marcaremos las necesarias hasta que el coche quede en el interior del túnel tocando con las ruedas el fondo.

Debido a que a la hora de la construcción del túnel se tuvo en cuenta los planos en los cuales se encontraba el coche, de esta forma se la dificultad a la hora de agregar las relaciones de posición. Se impuso que las ruedas fuesen tangentes al suelo y las distancias a las cuales estaba el coche de los laterales estas son:

- 3 veces la longitud del coche a la entrada al morro del vehículo
- 5 veces la longitud del coche de la parte trasera del vehículo al final del túnel
- Situado en el centro del túnel.

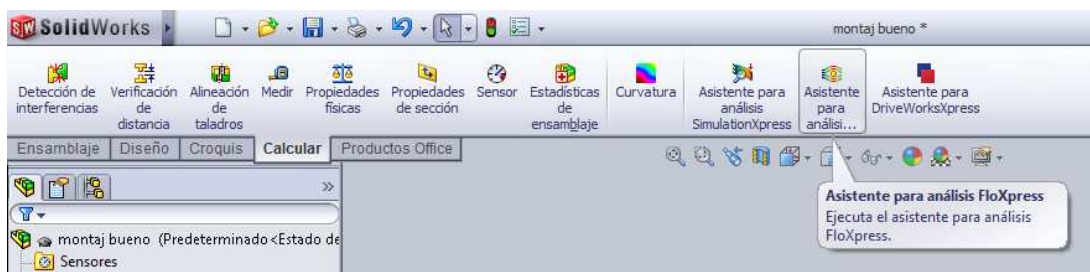


Agregar relaciones de posición

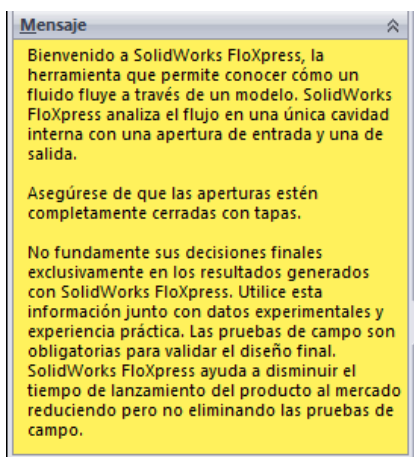


Ensamblaje

Por seguridad se guarda el ensamblaje. Ahora tenemos la geometría preparada para realizar el análisis. Para ello hacemos clic en herramientas la barra de herramientas en calcular → asistente para análisis FloXpress

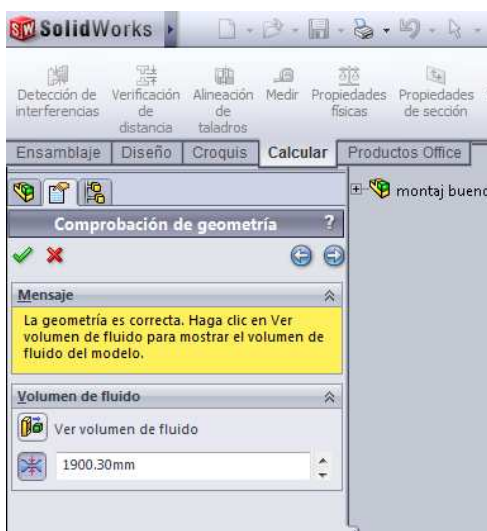


Selección asistente de análisis



Mensaje bienvenida

En la parte izquierda de la pantalla aparece un mensaje de bienvenida, el cual se puede observar en la imagen.



Comprobación de la geometría

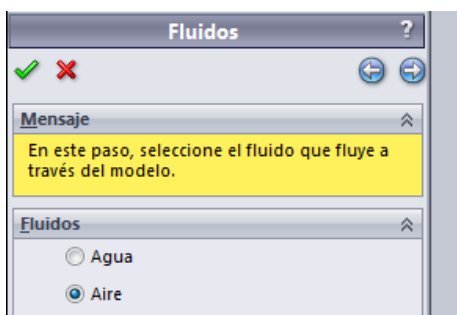
En primer lugar comprueba la geometría y emite un mensaje. En caso de existir problema con la geometría, se debería volver atrás y comprobar el diseño.

El botón *Ver volumen de fluido* nos sirve para asegurarse de que el volumen de fluido se especifique correctamente. Si las entradas se sellaron correctamente con las tapas pero existen espacios interiores pequeños en el modelo, SolidWorks FloXpress puede validar la geometría.

Si el modelo tiene espacios internos, SolidWorks FloXpress muestra otro mensaje que indica que el modelo no está preparado para realizar un análisis de flujo.

Si el fluido pasa a través de una separación más pequeña que el paso de flujo más pequeño predeterminado, se puede configurar esta opción para igualar la anchura de esa separación. En nuestra simulación al no tener otros pasos más pequeños no debemos modificar nada.

Una vez realizado los cambios pertinentes proseguimos, clic en 



Condiciones del fluido

En el siguiente paso, debemos seleccionar el tipo de fluido que fluye a través de nuestro modelo.

Como vamos a realizar un análisis aerodinámico seleccionamos aire

Clic siguiente paso.

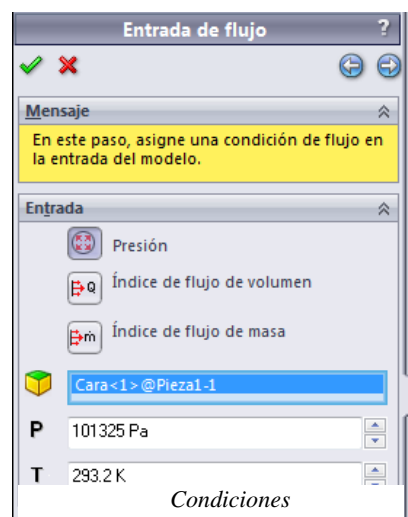


En el siguiente paso debemos asignar la entrada del modelo y la condición de flujo.

En el caso de una simulación aerodinámica no nos consta el flujo de masa ni de volumen el cual puede atravesar a través de un coche.

Si pulsamos la pestaña presión debemos indicar la presión de incidencia del aire sobre la carrocería. Debido a que estos datos son muy complicados de obtener y no se podrá proseguir con la simulación.

De este modo el paquete de simulación FlowXpress no nos ha sido valido para el análisis aerodinámico de un coche.



Condiciones

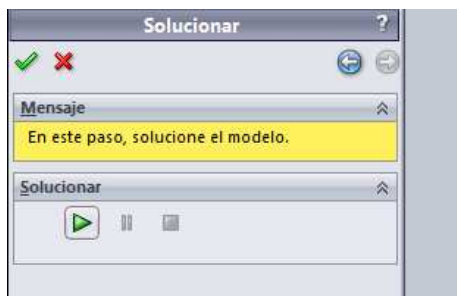
Con el fin de que se conozca el funcionamiento del paquete de simulación de Solidworks se proseguirá. Para ello a la entrada colocaremos dos veces la presión atmosférica, recalcar que estamos colocando estos datos con el fin de conocer qué resultados da el programa, pero que en ningún caso no son validos.

Clic siguiente paso.



Aparece una ventana donde se deben elegir la salida del fluido y las condiciones de flujo. Se toma la presión a la presión de 101325 Pascales (presión atmosférica).

Clic siguiente paso.

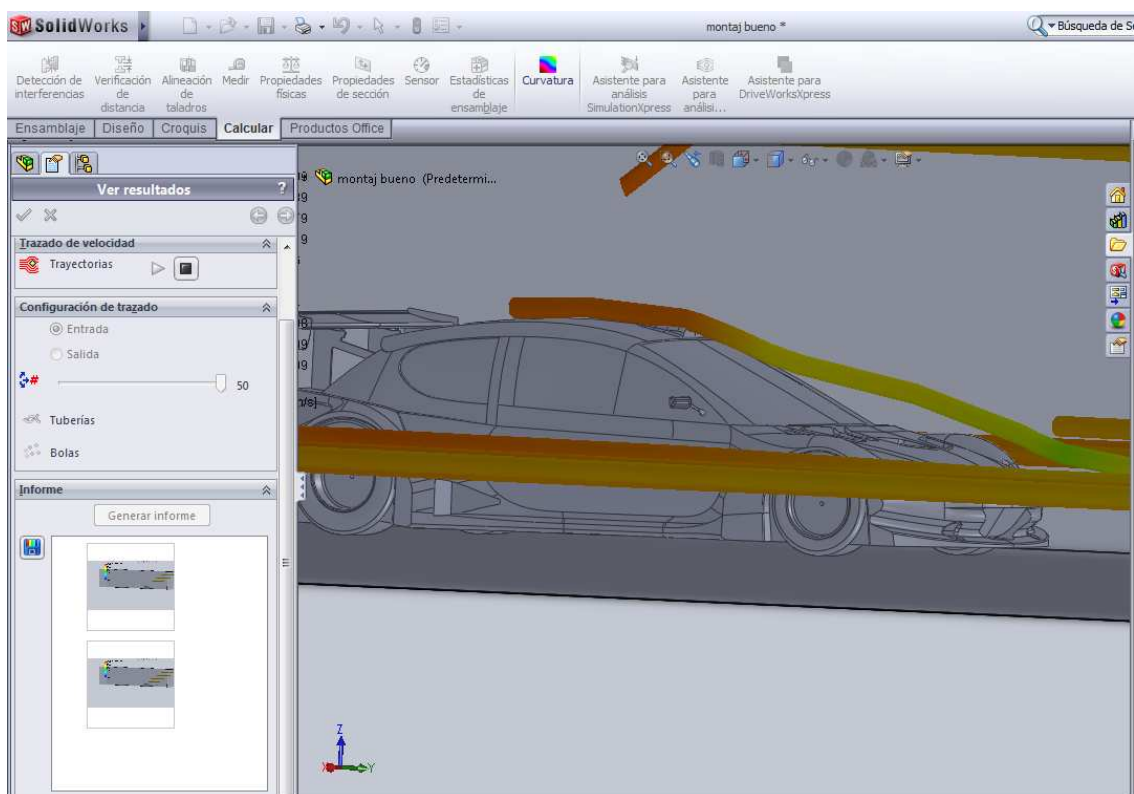
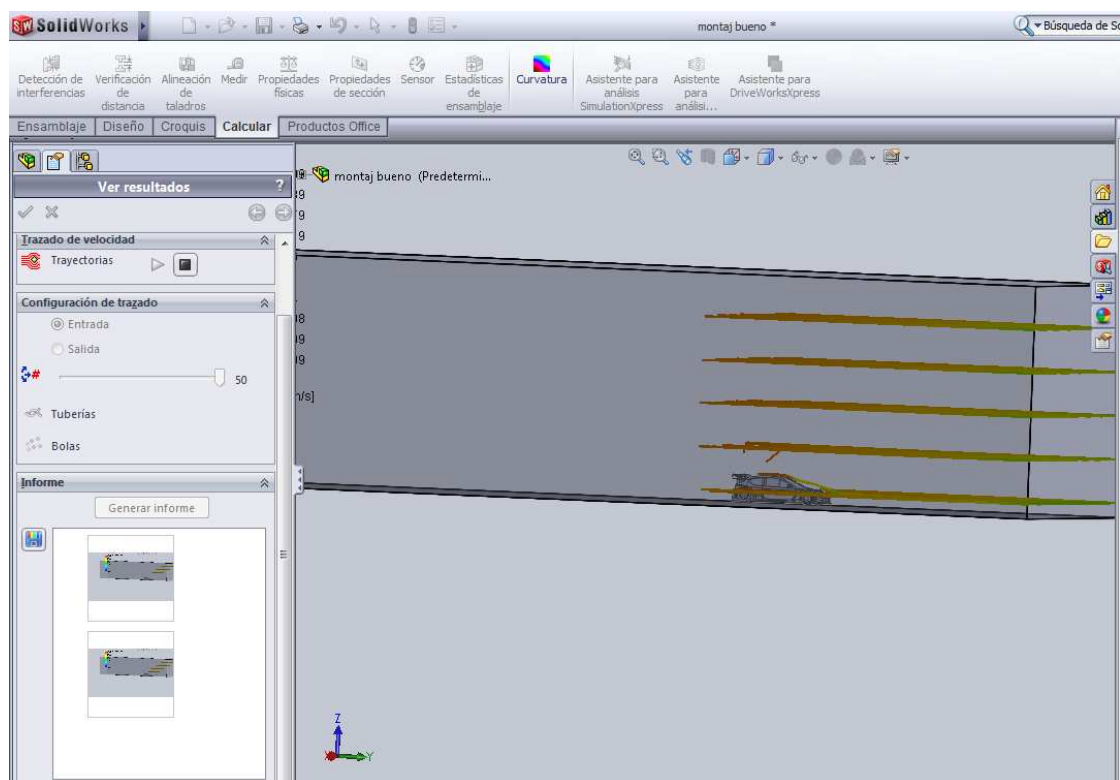


A continuación el modelo comienza con los cálculos

Cálculos

Una vez terminados los cálculos, en la parte izquierda de la pantalla nos aparece una ventana en ella se puede hacer lo siguiente.

- Cambiar la densidad de líneas de flujo, como máximo se puede 20.
- Cambiar las líneas de flujo a bolas.
- Se pueden capturar imágenes.
- Existe la posibilidad de generar un documento con formato Word, en el aparecen las condiciones de contorno. Y la velocidad máxima registrada.
- Visualizar mediante video el progreso de las líneas de flujo.

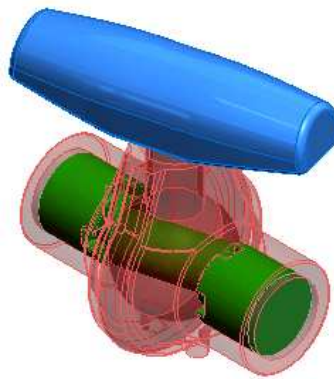


Resultados

1.6.2 VALIDACIÓN

Solidworks es un buen programa de diseño e incluso fácil de manejar. Para este proyecto fin de carrera se ha utilizado el paquete de simulación FlowXpres. Como se puede ver durante el desarrollo no se ha podido llegar al final de la simulación.

Ha sido creado el paquete de análisis para comprobaciones sobre modelos en el cual tengamos información sobre los flujos másicos o volumétricos del fluido, es decir, sobre válvulas, codos en tuberías, derivaciones en general.



Durante el proceso de condiciones, se han pasado detalles sin poder cambiar, debido a que el programa no nos daba la posibilidad, por ejemplo el mallado que ha realizado.

Sobre los resultados, tampoco nos eran validos en caso de a ver podido proseguir con la simulación. En toda simulación de aerodinámica tiene un gran interés la presión que el fluido realiza sobre la carrocería, solo muestra el mapa de velocidades sobre líneas de flujo.

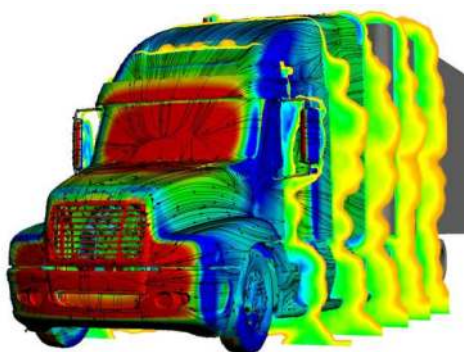
Por todo esto para un estudio aerodinámico es muy recomendable e incluso necesario utilizar programas de CFD especializados. Para la realización de este Proyecto Fin de Carrera se utilizará un programa especializado en aerodinámica.

1.7 SOFTWARE ESPECIALIZADO EN AERODINÁMICA

Una vez comprobado que Solidworks no nos es eficaz para nuestros análisis, se procede a la búsqueda de otros programas más complejos.

Existen numerosos programas de CFD, utilizados en la actualidad para el diseño aerodinámico de automóviles. Por ejemplo Fluent, PowerFlow o STAR-CCM+

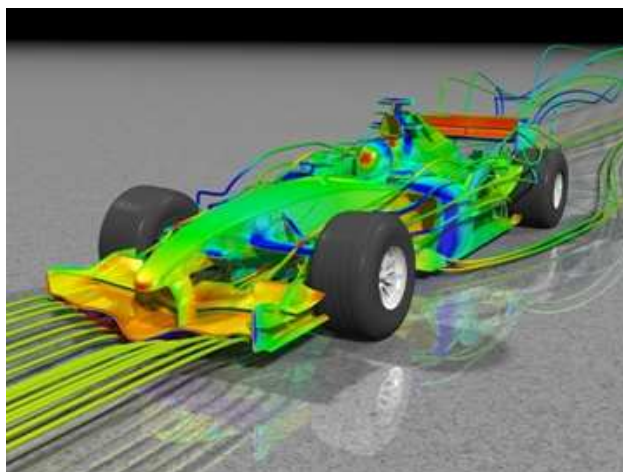
Aunque hay muchas áreas para la exploración CFD, PowerFlow ha centrado sus esfuerzos en perfeccionar y mejorar las simulaciones de transporte terrestre. Ingenieros, físicos y expertos del mundo académico con experiencia en la industria, que saben los problemas que enfrentan los ingenieros de hoy y centrarse en la solución de ellos.



Simulación PowerFlow

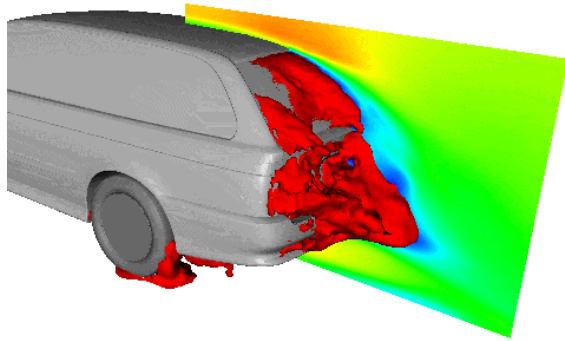
En cuanto a STAR-CCM+ ofrece el proceso de ingeniería de simulación completa en un entorno de software integrado. Este enfoque único ofrece incomparable facilidad de uso y la automatización para la preparación de CAD , mallado , el modelo de configuración y diseño de estudios interactivo, permitiendo obtener mejores resultados , más rápido.

STAR-CCM + es un nuevo concepto en su totalidad en CFD. STAR-CCM+ Tiene un gran marco de aplicación en el sector automovilístico.



Simulación con STAR-CCM+

En cuanto a la utilización de Fluent, lo utilizan grandes marcas en el sector automovilístico como Chrysler, Jaguar, Ford, Volkswagen, Skoda,...



Simulación con Fluent

Es más utilizado en el diseño de coches particulares y menos utilizado en competición aunque por ejemplo Ford lo utiliza en el mundial de rallyes para el diseño de los WRC (World Rally Car) con el Ford focus y en la categoría de súper 2000 con Ford fiesta.

1.7.1 SOFTWARE ELEGIDO

En este Proyecto Fin de Carrera 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 competición.

El software utilizado es STAR-CCM+ en su última versión 5.02.2010 siendo este un programa de CFD. STAR-CCM + ofrece el proceso de ingeniería de simulación completa en un entorno de software integrado. Este enfoque único ofrece incomparable facilidad de uso y la automatización de la preparación de CAD, mallado, el modelo de configuración y estudios de diseño interactivo, permitiendo obtener mejores resultados, más rápido.

Dicho software es empleado por grandes marcas automovilísticas, tanto en el rango de la competición como en el diseño de vehículos particulares, como ejemplo tenemos las escuderías mas punteras de la formula 1 como Ferrari, McLaren-Mercedes, Renault,...

STAR-CCM + trabaja con un cliente en java que se ejecuta en la luz del escritorio de la máquina el usuario, conectado al servidor que se ejecuta en el mismo o en otra máquina.

Esto entrega una serie de ventajas:

- Utilizando tan solo una computadora portátil, los usuarios pueden ver los resultados, iniciar o detener un cálculo, o hacer cambios en la puesta a un caso con millones de células, que se ejecutan en un gran grupo.
- El pre y post-procesador es una parte integral del programa de solución. Los cambios realizados en el cliente (por ejemplo, modelo de turbulencia o condición de contorno) se reflejan al instante en el solucionador. Por el contrario, una actualización del campo de flujo se puede visualizar en cada iteración, sin sobrecarga adicional.
- Es el desarrollo de código más rápido en el mercado, con una nueva emisión importante que ocurre cada cuatro meses.
- STAR-CCM + es el único código que ya se ejecuta un cálculo que implica más de un mil millones de células.
- ha sido diseñado específicamente para soportar los sistemas operativos más importantes utilizados en las empresas de ingeniería: Windows y Windows 7 (32 y 64 bits), Linux (32 y 64-bit) y las plataformas UNIX.

Ya que el desarrollo de este Proyecto Fin de Carrera está ligado íntimamente con la competición automovilística, las grandes marcas anteriormente mencionadas utilizan este programa para sus simulaciones aerodinámicas, se puede acceder al programa en la Universidad Pública de Navarra. Por todo esto se ha decidido usar STAR-CCM+.

1.7.2 MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático desarrollado por STAR-CCM+ es el siguiente

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

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

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 está 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.

1.8 CÁLCULO

Una simulación CFD consta de 4 etapas para obtener unos resultados óptimos: generación del modelo 3D, mallado del dominio, resolución de las ecuaciones y análisis de los resultados.

Como la geometría del coche 3D, nos la aporta la empresa SILVER-CAR. Lo primero que se debe hacer es la importación del modelo.



Para ello primero file/new simulation.

Se abre un cuadro de dialogo, en el cual nos ofrece la posibilidad de realizar el análisis con varios ordenadores a la vez, para ello deberíamos pulsar en la opción *parallel*. En el caso del PFC se procederá con un solo ordenador, por lo se marcará la opción *serial* y a continuación pulsar *ok*



Cargar simulación

Seguidamente importaremos la geometría, para ello file/import surface, en el cuadro de dialogo buscar la geometría y pulsar *ok*.

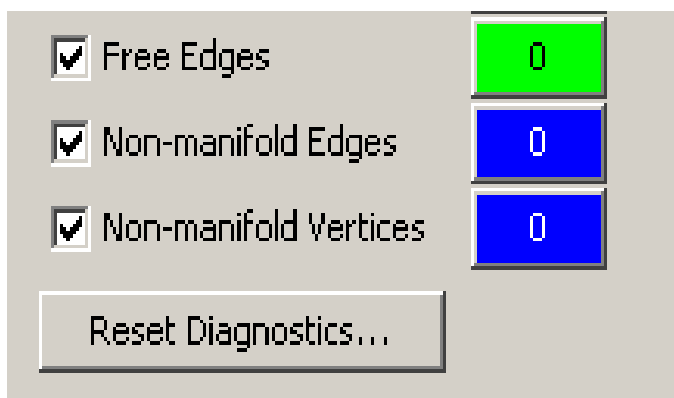
STAR-CCM+ nos facilita la importación en distintos tipos de formatos. Estos pueden ser:

Tipo de formato	Programa origen
.x_t .x_b	Parasolid
.iges .igs	IGES
.stp .step	STEP
.stl	Stereo lithography
.pat	Patran
.nas	Nastran
.fro	FELISA
.dbs	CD adapco
.inp	CD adapco
.model .exp. sesión	CATIA V4
.catpart .cadproduct	CATIA V5
.sldprt .sldasm	SolidWorks
.prt .asm	PRO/engineer
.prt	Unigraphics NX
.ipt .iam	Inventor
.vda	VDA
.xml	Medina

La geometría del modelo está en formato .asm, así pues no existirá ningún problema a la hora de importarla.

1.8.1 MODELO Y MALLADO UTILIZADO

Antes de proceder al mallado es necesario comprobar el estado de la superficie, que todas están correctamente definidas; hemos de saber necesariamente si existe sobre la carrocería, algún agujero; si esto es verdaderamente así, no podemos generar el volumen necesario; ya que para realizar la simulación CFD, debemos generar un volumen; es decir debemos tener un volumen que corresponderá con el volumen de todo el aire, el túnel de

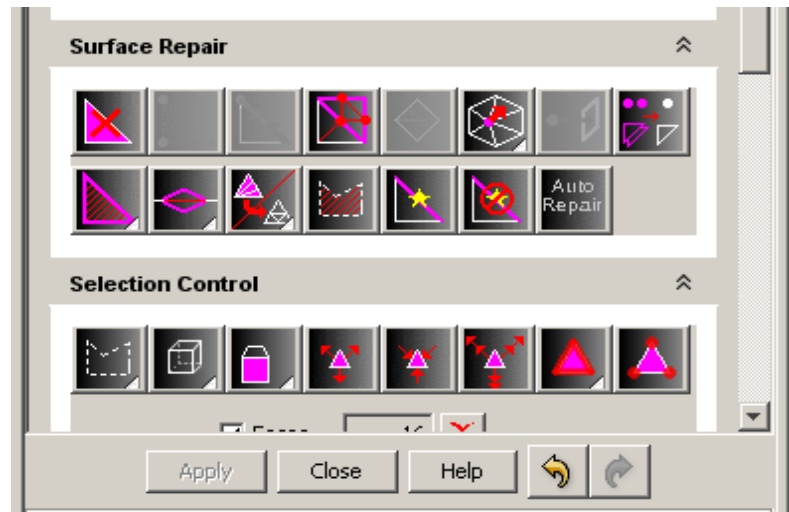


Comprobación superficie

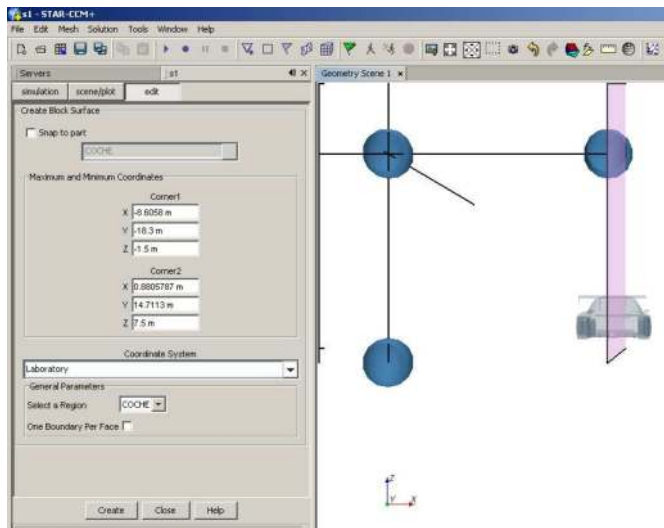
viento virtual creado también tendrá un volumen de aire definido. Hasta que no consigamos este volumen de aire, no podemos seguir avanzando en el proceso.

En la imagen se puede apreciar como la geometría esta correcta, todos los valores a cero. Estos valores representan lo siguiente.

- *Non manifold edges=0*, es decir no hay superficies superpuestas, en caso de no resolverlo a la hora de mallar existiría una superficie mas creando irregularidades en la geometría e incluso obteniendo datos en sitios erróneos.
- *Non-manifold vértices=0*, es decir todos los vértices de los poliedros que forman la malla están unidos, no existen vértices libres.
- *Free edges =0*, es decir el modelo se encuentra correctamente cerrado. En caso de que la geometría se encuentre abierta, existen dos posibilidades para solucionarlo:
 - Abriendo la geometría en un programa de dibujo como puede ser Catia, Solidworks, PROengineer,...
 - Como se puede apreciar en la imagen STAR-CC+ provee de una serie de herramientas para arreglar las superficies manualmente e incluso un botón de auto reparación. Decir sobre esto que solo es válido para pequeños errores ya que el programa recrea las superficies como lo cree oportuno y en numerosas lo hace erróneamente.



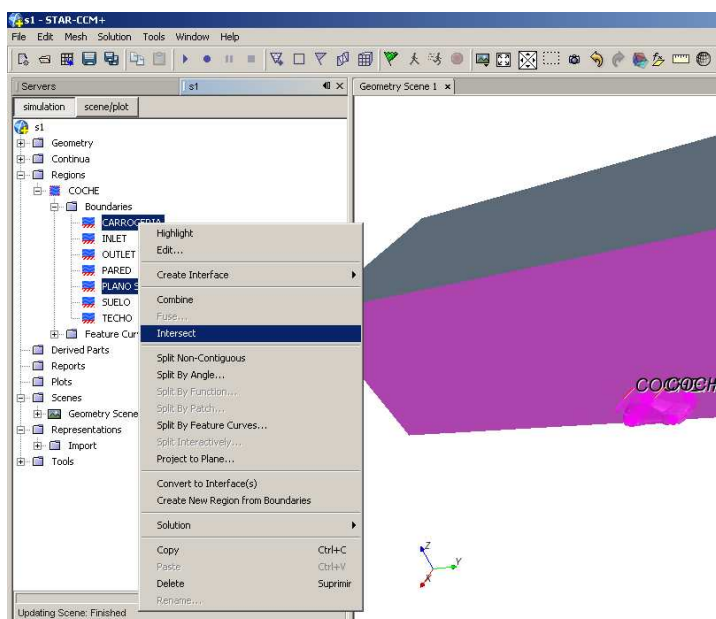
Reparar superficie



túnel virtual

Como el vehículo estudiado guarda simetría longitudinal, hacemos el estudio de la mitad del coche, de esta forma aprovechamos al máximo la memoria virtual del ordenador, así luego el mallado será mejor, puesto que requiere de toda el potencial posible.

Para ello haremos pasar el túnel virtual creado por la mitad del coche.



Intersección

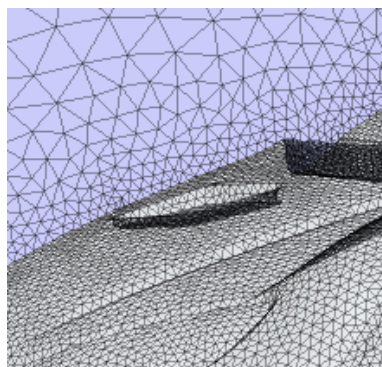
Después de hacer la intersección del túnel con la carrocería y el suelo del túnel con los neumáticos se elimina las partes que quedan fuera del túnel.

Pasaremos a comprobar de nuevo que nuestro coche-túnel si se encuentra con o sin fallos y todo el volumen cerrado.

El proceso de mallar la geometría, consiste en convertir lo infinito en finito; existen infinitos puntos en el espacio, con lo que es absolutamente imposible calcular las velocidades, presiones, temperaturas, fuerzas,... en todo esos puntos; de esta forma, lo que se hace, es discretizar el espacio de tal forma que ahora dispondremos de un número ya finito de puntos.

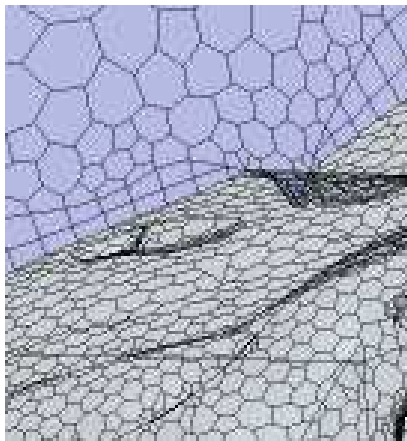
STAR-CCM+ ofrece tres tipos de malla:

- mallas tetraédricas: esta formada por tetraedros, su convergencia es lenta, es un a malla que esta en deshuso.



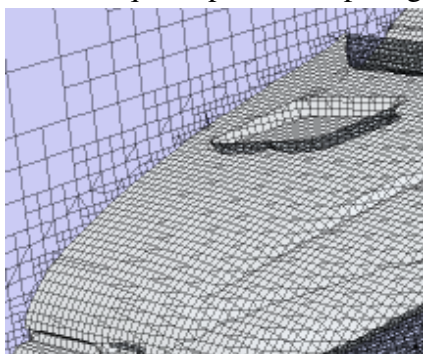
Malla tetraédrica

- mallas poliédricas: son mallas formadas por octaedros, son más precisas y convergen más rápido que las mallas tetraédricas.



Malla poliédrica

- mallas hexaédricas: son mallas formadas por hexaedros. Requieren de menos memoria que la poliédrica para generar la malla.

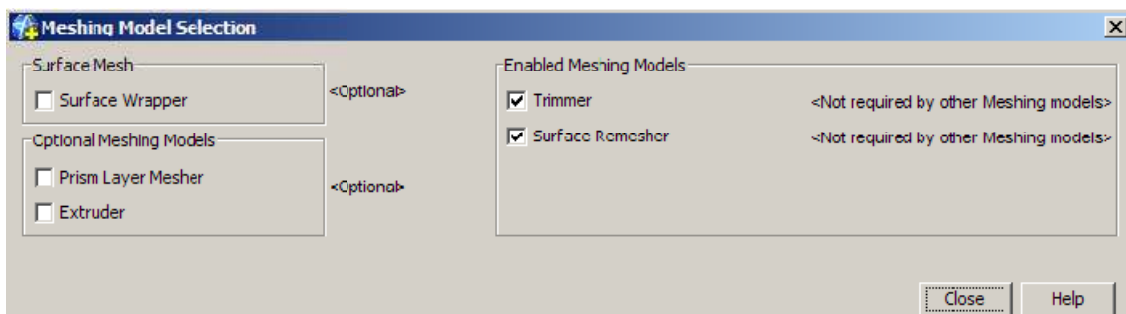


Malla hexaédrica

En nuestro análisis utilizaremos la malla hexaédrica, ya que para el cálculo de vehículos es la más idónea debido a que esta malla tiene una dirección más definida en el sentido de flujo.

Para realizar el mallado en STAR-CCM+ hay que seguir los siguientes pasos.

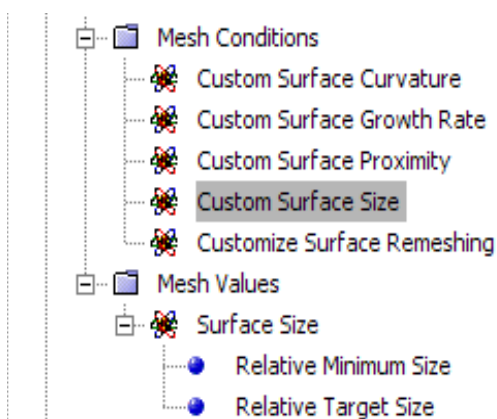
En el cuadro de dialogo de la izquierda seleccionar: *continua/mesh 1*(botón derecho del raton)/*select meshing models*



Elección tipo de mallado

Como se ha explicado anteriormente seleccionaremos la malla hexaédrica, *trimmer* y *surface remesher* y cerramos el cuadro pulsando el botón *close*.

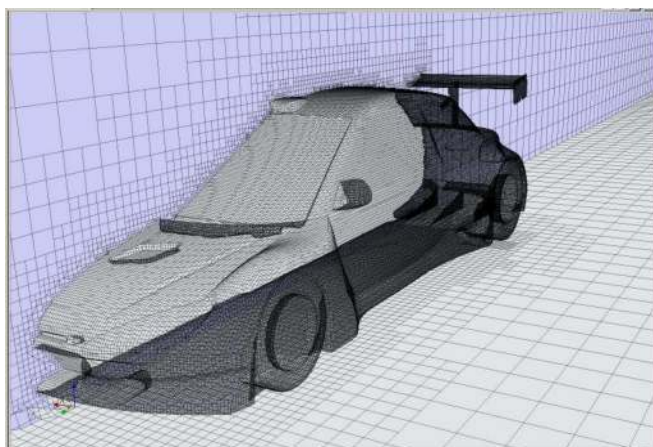
A continuación vamos a *continua/mesh 1/reference value/ base size* colocaremos el valor de 0.2, este valor indica el tamaño de la malla del conjunto túnel y carrocería.



Definición tamaño de malla

Seguidamente en el árbol clicaremos en la carrocería y le cambiaremos el porcentaje del tamaño de la celda, en nuestro caso a un 10%, en *relative minimum size*.

Al activar la casilla de *custom surface size*, el tamaño de la celda alrededor de la carrocería aumentará de forma gradual hasta llegar al tamaño dado al principio.



Mallado superficial

A continuación se procede a realizar la malla de superficie, observarla y en caso de no ser lo suficientemente precisa reducir los valores.

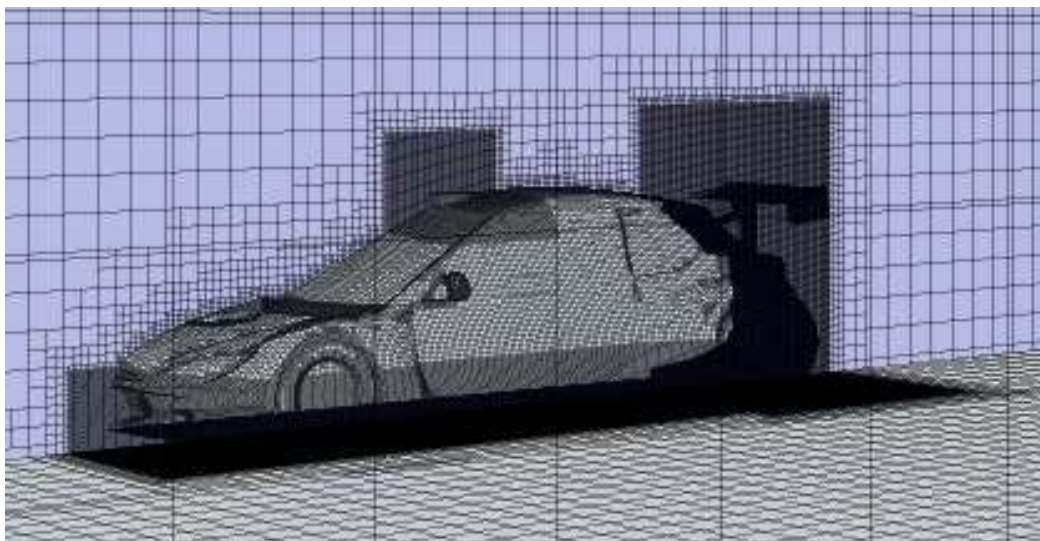
Una vez creada la malla superficial, y comprobando visualmente su efecto correcto procederemos al mallado volumétrico, para ello sin modificar ningún dato pulsar en *generate volume mesh*. Se puede saltar el paso del mallado superficial y crear directamente el volumétrico, pero en caso de no que el mallado no hubiese sido todo lo preciso y hubiera que volver a mallar, hubiésemos perdido tiempo ya que al ordenador realiza el mallado superficial de todas formas aunque de esta ultima forma no lo muestra.

Como reglas generales y a modo de resumen, para que todo mallado sea bueno y sobre todo, sea posible su generación y existencia, la geometría debe cumplir una serie de requisitos, básicamente, estas son las dos condiciones, que son suficientes para asegurar la correcta generación del mallado:

- No debe existir ángulos excesivamente pequeños; ello produce que necesariamente se tengan que colocar mallas excesivamente pequeñas con el riesgo que con lleva esto, hasta el punto, de no poderse realizar.
- Las superficies, allí donde haya una gran curvatura, es mejor separarla por varias superficies más pequeñas, en caso contrario el mallado debería ser muy pequeño e incluso en ocasiones llegando a la imposibilidad de crearlo.

Para intentar optimizar al máximo los recursos y ahorrar memoria, es mejor hacer una malla más densa en:

- Zona de las ruedas, frenos, alerón, difusor.
- Parte delantera del vehículo (morro)
- Espacio entre el fondo del coche y el suelo.



Mallado volumétrico final

1.8.2 DIMENSIONES TUNEL VIRTUAL Y CONDICIONES DE CONTORNO

En mecánica de los fluidos, aerodinámica, la complejidad de las ecuaciones matemáticas hace todavía hoy imposible su tratamiento completo en problemas prácticos. Además, existen ciertos parámetros que por su naturaleza son claramente experimentales. Es necesario por lo tanto contar con medios que hagan posible el estudio de estos fenómenos de una manera económica y fiable. El túnel de viento es la herramienta adecuada para la verificación, estudio y desarrollo de técnicas y procedimientos, así como de teorías con la finalidad de entender el comportamiento de cuerpos o masas de aire en movimiento.

Un túnel de viento, por lo general puede definirse como conductos que llevan en parte de su trayecto un ventilador accionado por un motor, que se encarga que el aire fluya a través de él de manera constante.

Aunque las velocidades con que se experimenta en los túneles de viento varían dentro de un amplio rango, solo se considerarán las menores a 580 km/h, denominadas subsónicas, dónde la compresibilidad del aire es despreciable.

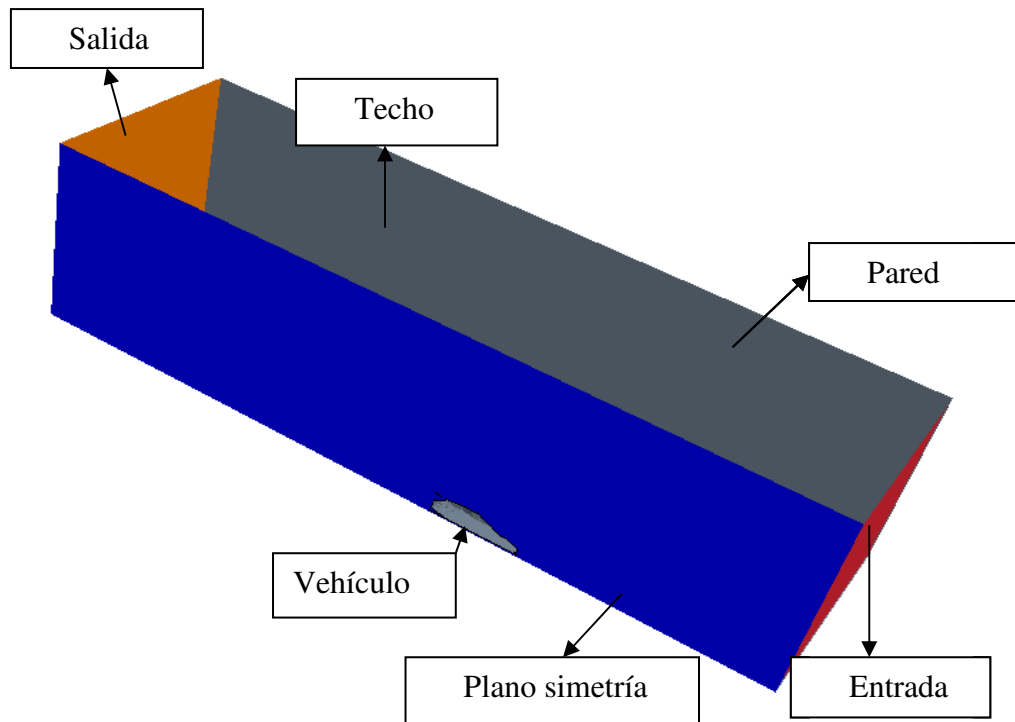
El tamaño del modelo define en muchos casos el tamaño de la sección; en teoría sería ideal que la sección tuviera el mayor ancho posible, sin embargo, por razones económicas, es aceptable que la envergadura del modelo sea como máximo cuatro quintas partes del ancho de la sección, con el fin de que no se produzca reflejo de la onda de choque producida en el modelo contra las paredes del túnel

Las dimensiones aproximadas que debe tener un túnel del viento virtual son las siguientes:

- **Longitud:** de la entrada al morro del vehículo; tres veces la longitud y de la parte trasera del vehículo al final del túnel cinco veces la longitud del vehículo.
- **Anchura:** cinco veces la anchura del vehículo
- **Altura:** cinco veces la altura del vehículo.

Una vez creado el bloque, se descompone las paredes. Se debe descomponer por paredes aplicándole a cada una su propiedad, con el fin de que el programa las reconozcas y les aplique las condiciones necesarias. Las paredes definidas son:

- Entrada: al programa le especifica la cara cual será la entrada de aire.
- Salida: la superficie por el cual debe salir el flujo de aire
- Plano de simetría: esta pared no influye para nada en la simulación, el aire no se reflejará sobre la pared ni creará turbulencias de ningún tipo.
- Pared lateral y techo: son paredes rígidas. Pero al estar lo suficientemente lejos del modelo no influirán sobre el análisis.



Para realizar y poder así, disponer de una fiable simulación CFD, es necesario también, simular la realidad, por ello se asignan condiciones de contorno, estas son:

- Velocidad fija en la entrada, la velocidad que se emplea en la simulación coincide con la de un túnel real.
- Velocidad normal nula en la parte superior del túnel y en la pared lateral. Se añade esta condición con el fin de que no se crea ninguna turbulencia por la cercanía del techo y pared, aunque estén colocadas lo suficientemente lejos.
- Presión impuesta en la salida del dominio (presión atmosférica). Al igual que un túnel real la presión de salida del aire será la presión atmosférica.
- Condición de simetría en el plano central.

Se le asigna a toda la carrocería la condición de wall; ello significa que todo el coche es de pared sólida.

También hay que indicar dónde es la entrada de aire, la salida, el plano de simetría (en su caso; se le está diciendo al código del programa que hay una pared, pero no es sólida, ni tiene fricción....).

Es posible, si se conoce, asignar coeficientes de rugosidad o fricción a aquellas superficies que lo necesiten.

A modo de resumen decir que el proceso, estudio o generación de la geometría es el proceso más importante, si la geometría cumple todo lo dicho anteriormente, el mallado no tendrá problema alguno en su generación, y los resultados obtenidos serán fiables.

1.7.3 CONDICIONES DEL FLUIDO

Otro parámetro a definir es el referente a la naturaleza del fluido. Para el caso de la simulación aerodinámica nuestra, el fluido será aire.

Se ha utilizado aire a 20 °C correspondiente a una densidad $\rho = 1,184 \text{ Kg/m}^3$

Además de la condición de aire a se le asignan las siguientes condiciones:

- Que el fluido sea un gas: Se ha utilizado aire a 20 °C
- Fluido estacionario: Las condiciones de contorno no varían con el tiempo, por lo que todas las variables térmicas y cinéticas del problema son independientes del tiempo
- Densidad constante. $\rho = 1,184 \text{ Kg/m}^3$ a 20 °C
- La velocidad de entrada.
- Los esfuerzos cortantes en el suelo sean cero. El suelo no nos cree ninguna fuerza distinta a la que el propio coche pueda realizar normal al suelo
- La presión de entrada y salida consideraremos la presión atmosférica.

1.9 RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la malla siguiendo todos los pasos posibles mencionados en el apartado 1.7.1 han sido:

- Celdas: 1 901 691
- Caras: 3 740 337
- Vértices: 332 133

```
Output - S1_SIMULACION

Pressure
SlipVelocity
TurbulentDissipationRate
TurbulentKineticEnergy
U_Velocity
Ustar
V_Velocity
W_Velocity
WallShear
Exchanging cell data
Volume Meshing Pipeline Completed: CPU Time: 229.22, Wall Time: 229.22, Memory: 305.54 MB
Cells: 1901691      Faces: 3740337      Vertices: 332133
Loading module: StarTrimmer
```

Resultados del mallado

Se han lanzado cinco simulaciones a distintas velocidades 108 Km/h, 140 Km/h, 170 Km/h, 200Km/h, y 230 Km/h. Las razones de estas velocidades son las siguientes:

- 108 Km/h: se corresponde con la velocidad media que se registran en competiciones de montaña. Las competiciones de montaña se realizan en ascensiones a puertos de montaña en las diferentes comunidades de España. 108 km/h corresponderá con trazados revirados, dominado por sucesión de curvas cerradas.
- 140 km/h: se corresponde con competiciones de montaña, en los que los trazados son rápidos. Están caracterizados estos trazados por curvas abiertas con velocidades de paso por curva altas. Algunos ejemplos de ascensiones con estas características son: subida al Fito(Arriondas, Asturias), subida Arrate (Eibar, Guipúzcoa), entre otras.



Trazado subida Arrate

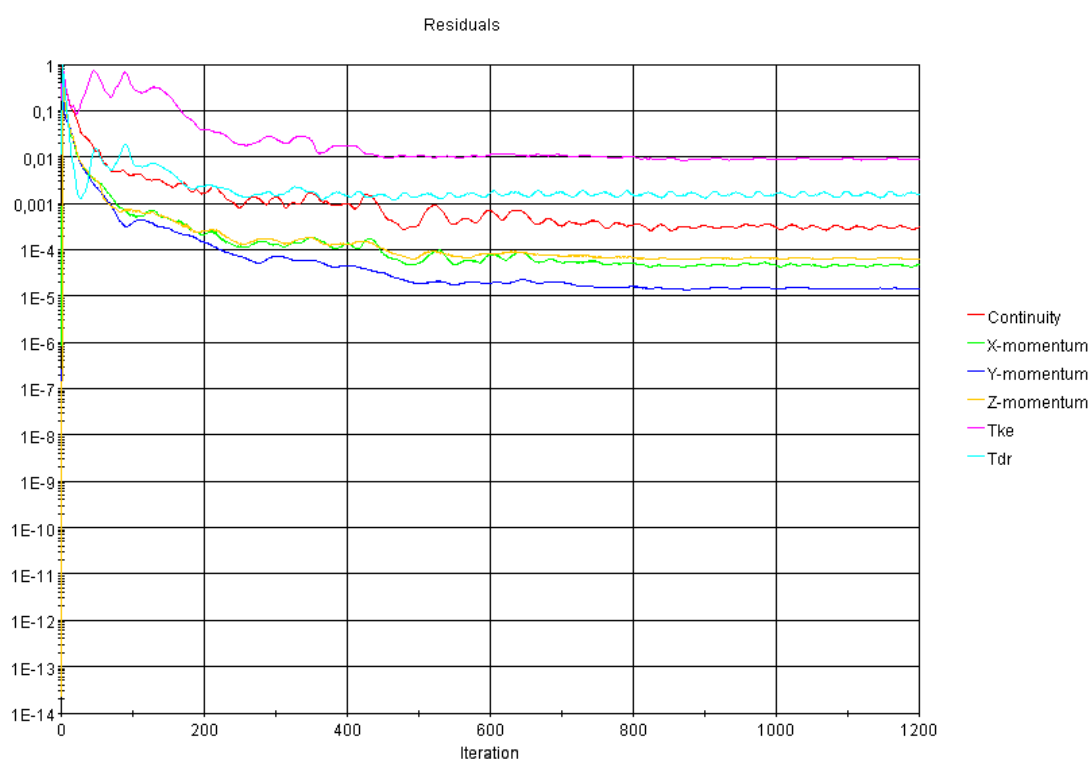
- 170 Km/h: los vehículos categoría CM, pueden participar en dos modalidades de competición, en circuito como en montaña. En circuitos rápidos se suelen alcanzar velocidades medias alrededor de la citada. Al competir en circuitos modifican parámetros con el fin de alcanzar mayores velocidades, por ejemplo relaciones de caja de cambios más largas, menor inclinación del alerón,... de esta forma se alcanzan velocidades mayores.
- 200 Km/h: esta velocidad quiere simular las rectas de los circuitos, e incluso en numerosas ocasiones se mantiene con sucesión de largas curvas.
- 230Km/h: la velocidad de 230 Km/h es la velocidad punta que alcanzan en circuitos. Se toma la velocidad punta para comprobar el comportamiento. A estas altas velocidades con comprobar su aerodinámica y conseguir con ella tan solo un 1Km/h más que los demás es un gran potencial. En la temporada actual de Formula 1, se puede observar que los McLaren-Mercedes al tener más velocidad punta son capaces por ejemplo de adelantar fácilmente.

En los siguientes apartados se mostraran los mapas de presiones y velocidades en las cercanías del vehículo, estudiando las condiciones del flujo en cada una de las zonas.

1.9.1 VELOCIDAD 108 Km/h

El análisis ha sido lanzado a 30 m/s, 108 km/h, se ha escogido esta velocidad, siendo unas de las velocidades medias que alcanzan en algunas competiciones de montaña

Se realizaron tantas iteraciones como fueron necesarias hasta que el cálculo llegase a una condición estable. Para la velocidad de 108 Km/h se efectuaron 1200 iteraciones. Mostrándose los residuos mínimos en la siguiente gráfica:



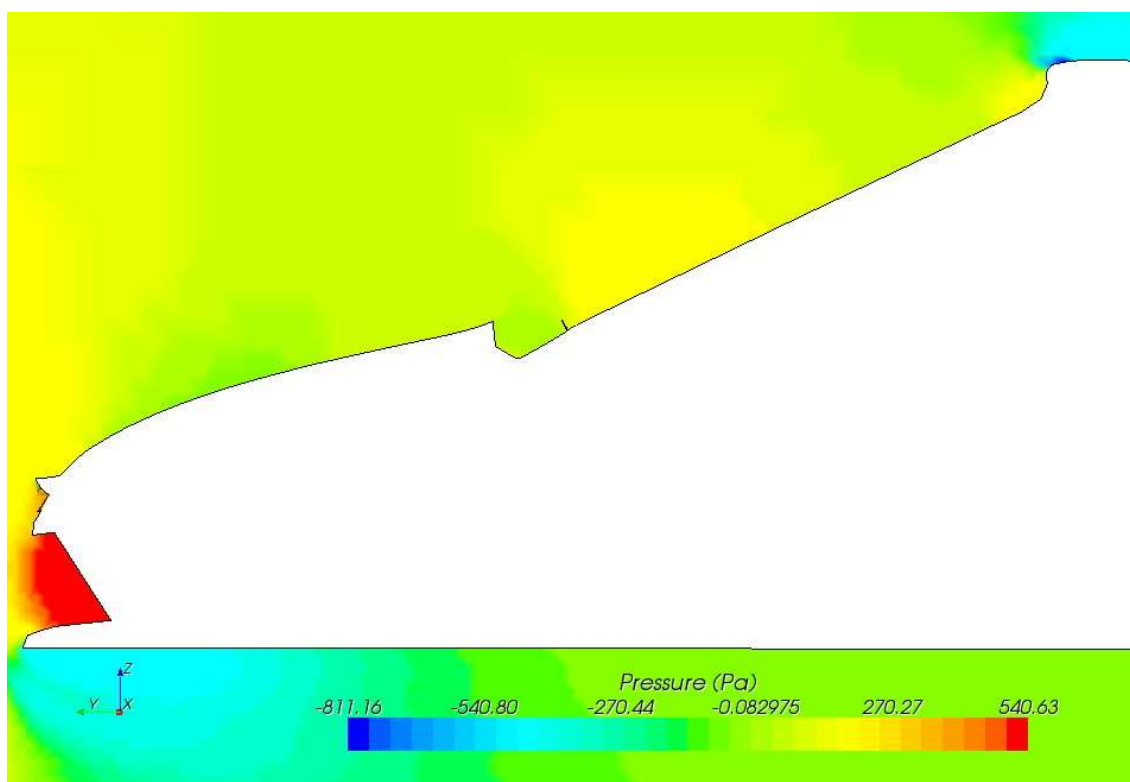
Grafica residuales

Como queda reflejado en la imagen a partir de 800 iteraciones los datos convergen, sus variaciones se mueven sobre el mismo rango.

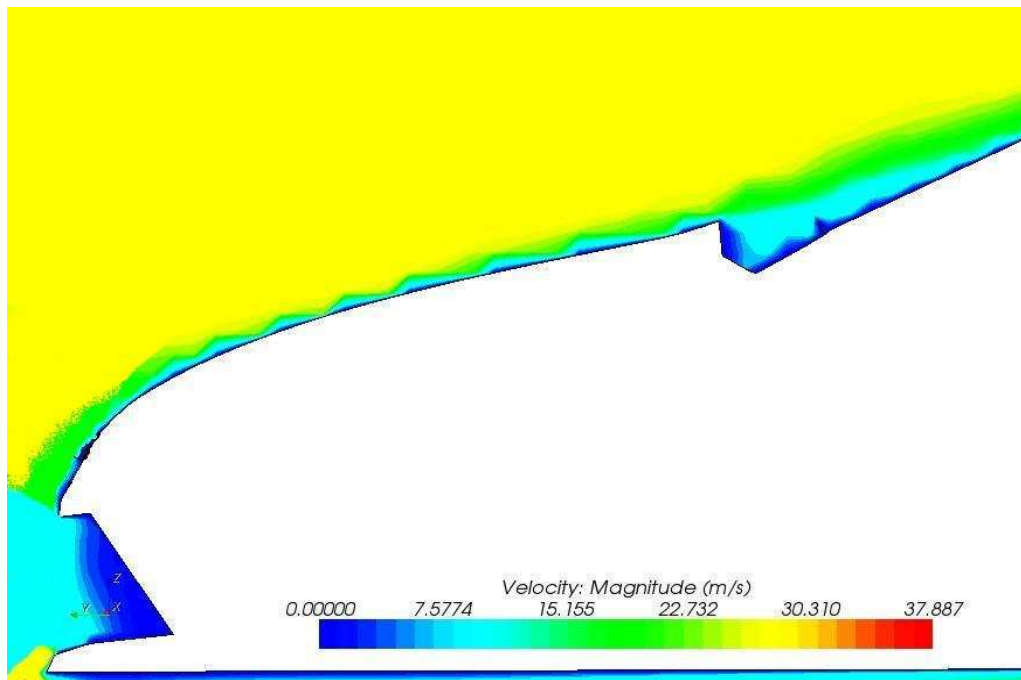
1.9.1.1 PARTE FRONTAL

A continuación se muestran los mapas de presiones y velocidades en la parte delantera del vehículo.

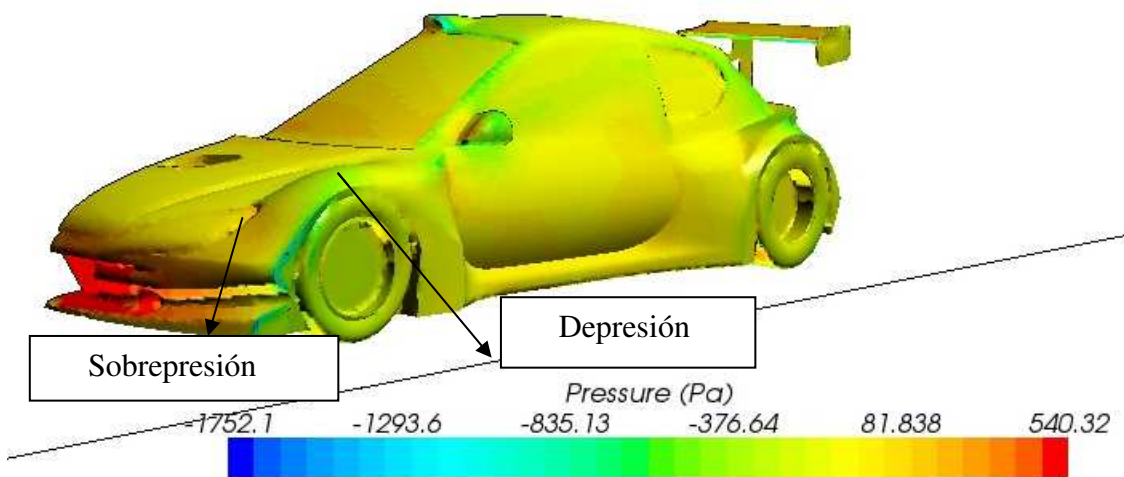
Es la zona en la cual hay una incidencia directa con el flujo, en la que se podrá observar zonas de altas presiones y bajas velocidades.



Mapa presiones en el plano medio de la parte delantera del vehículo



Mapa de velocidades en el plano medio de la parte delantera

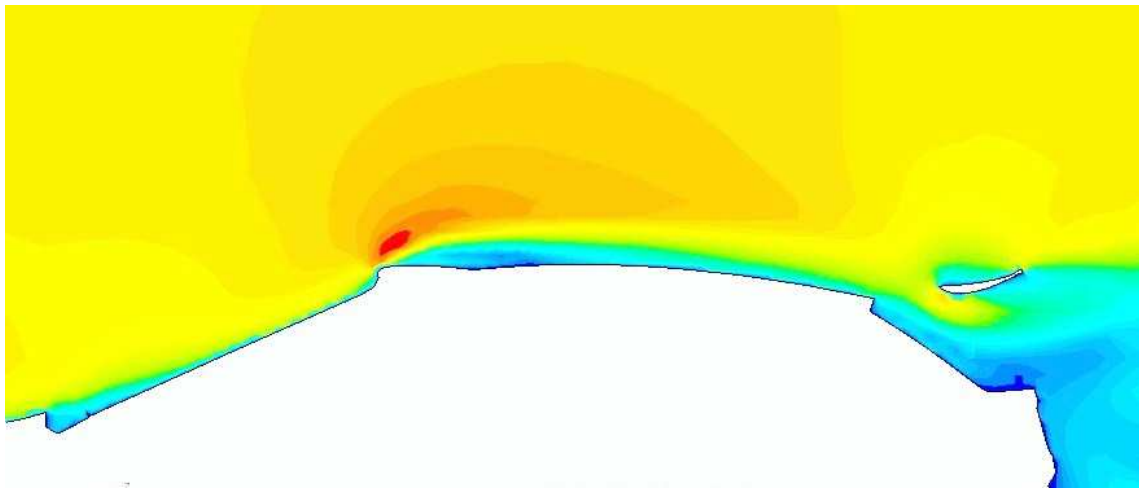


Mapa de presiones en la parte delantera del vehículo

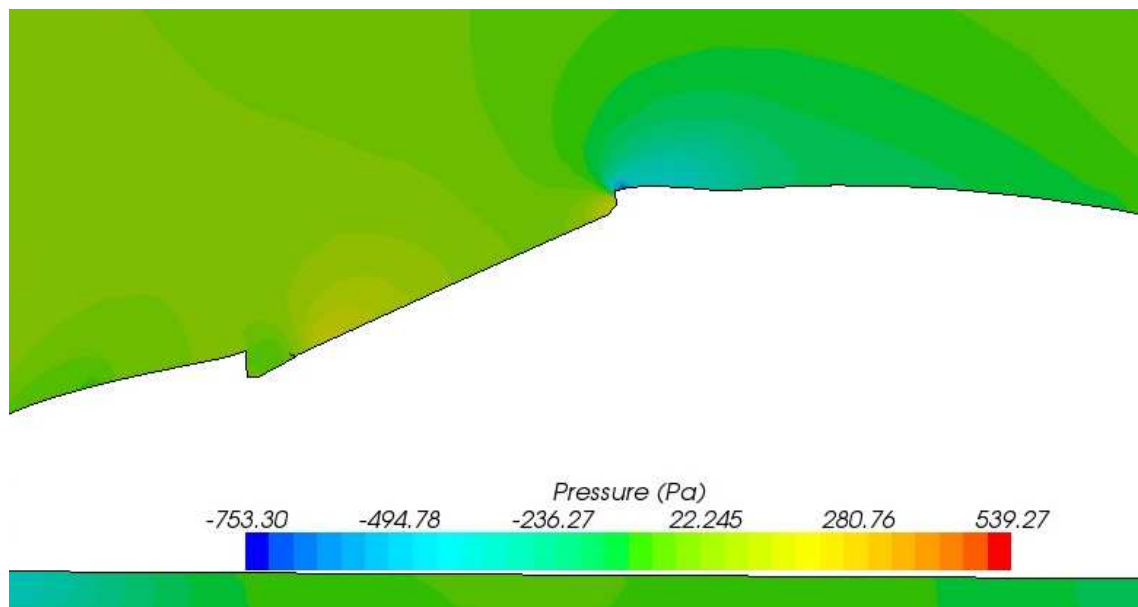
Como se puede observar en la imagen anterior se produce una sobrepresión en el alojamiento del foco y una depresión sobre el paso de rueda.

1.9.1.2 PARTE SUPERIOR

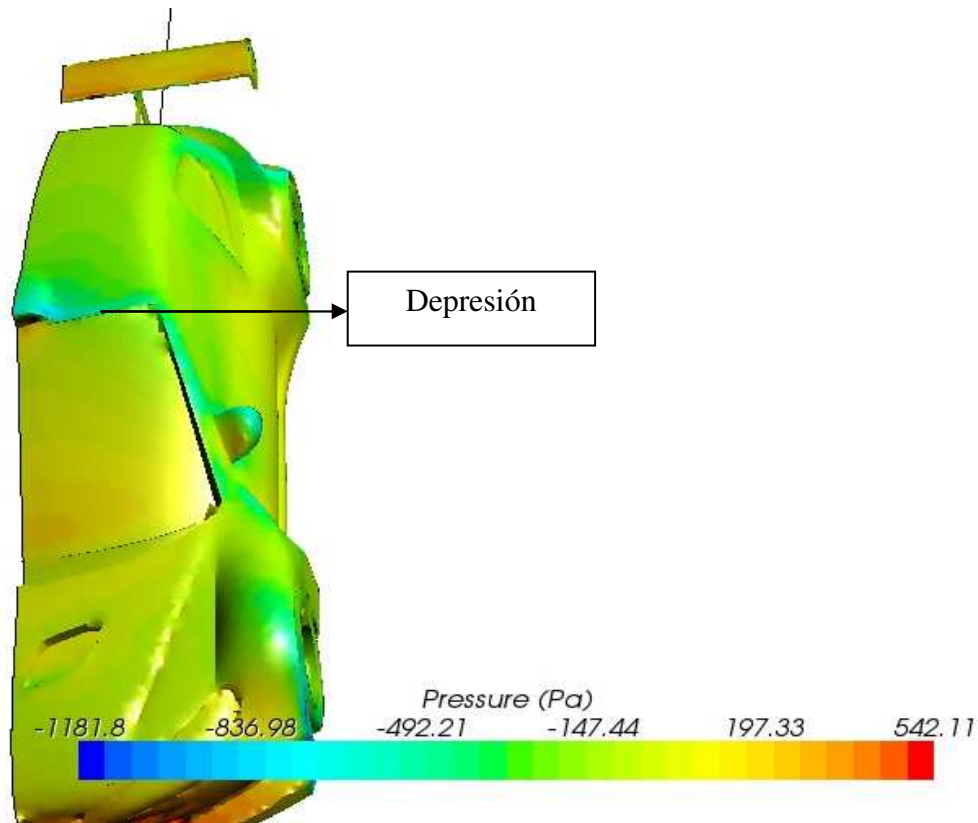
En el siguiente apartado se muestran los mapas de velocidades y presiones en la parte superior del vehículo.



Mapa de velocidades en el plano medio de la parte superior del vehículo



Mapa de presiones en el plano medio de la parte superior del vehículo

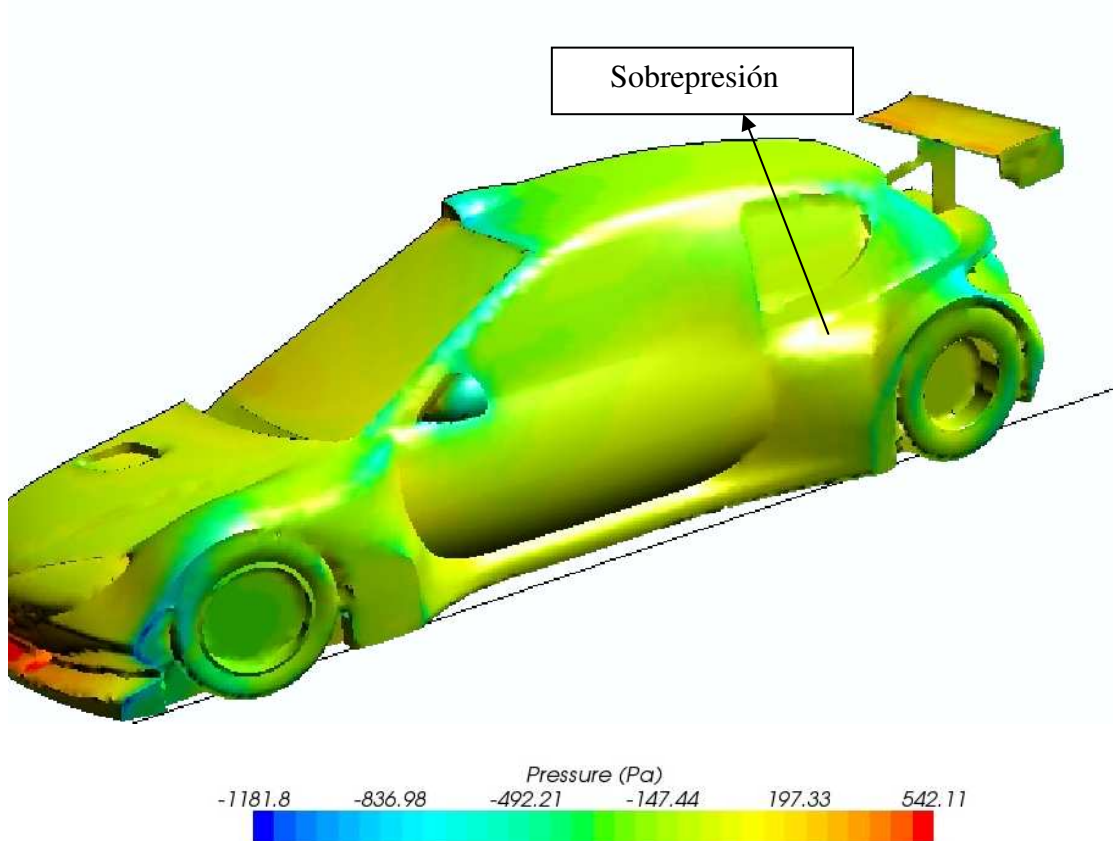


Mapa de presiones en la parte superior del vehículo

En lo que se refiere a la parte superior, hay una depresión entre la luna y el techo, es producido por el escalón existente entre los dos elementos.

1.9.1.3 PARTE LATERAL

Se van a mostrar los mapas de velocidades y presiones en la parte lateral del vehículo.



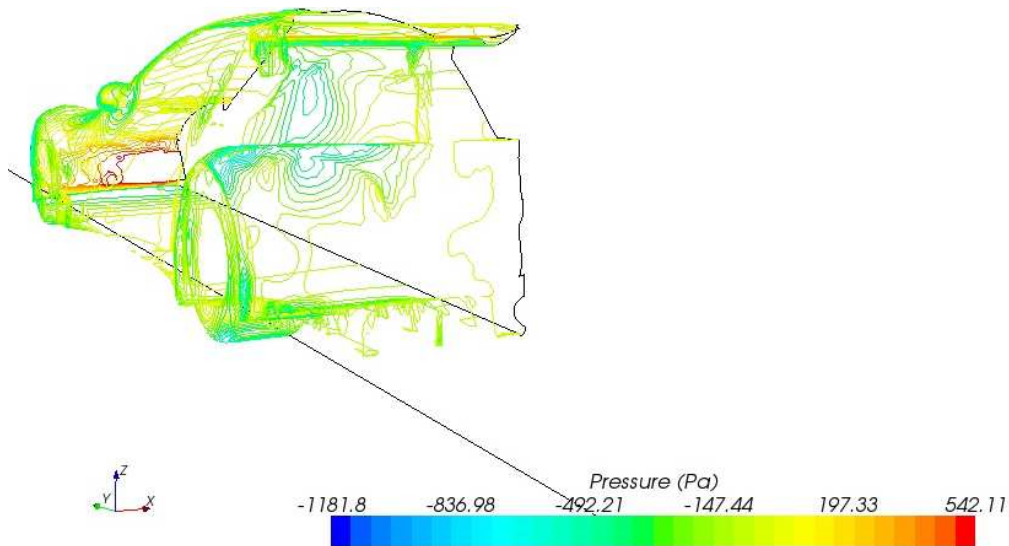
Mapa de presiones en la parte lateral del vehículo

En la zona que se refiere a la parte lateral del vehículo, tenemos una sobrepresión entre la puerta y el eje trasero. La zona entre el eje delantero y la puerta existe una depresión.

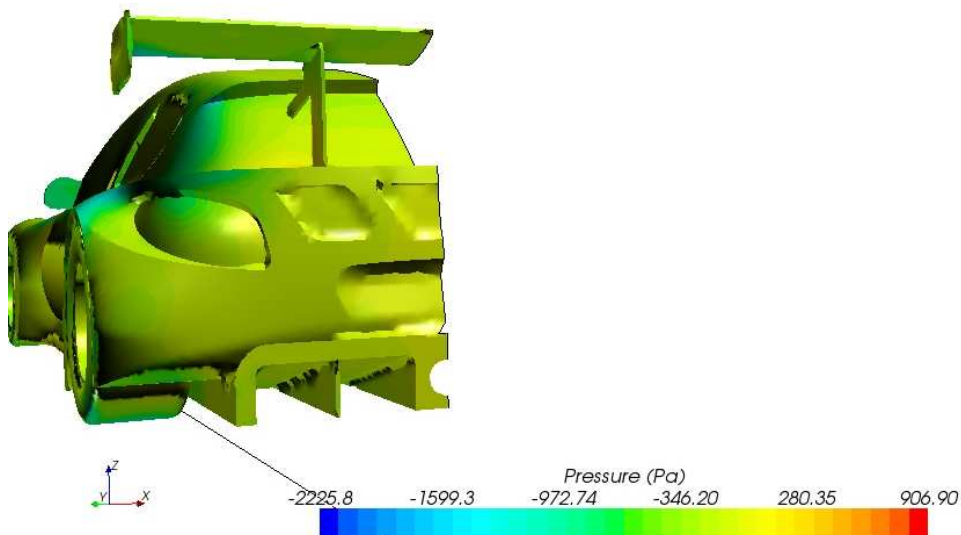
En la zona de cambio de sección situada debajo del retrovisor al crearse esa depresión estará creando turbulencias, haciendo aumentar el coeficiente de resistencia al avance.

1.9.1.4 PARTE TRASERA

Se muestran los mapas de presión y velocidad en la parte posterior del vehículo. El alerón y difusor por tener una gran influencia aerodinámica se estudian por separado.



Mapa de presiones en la zona posterior



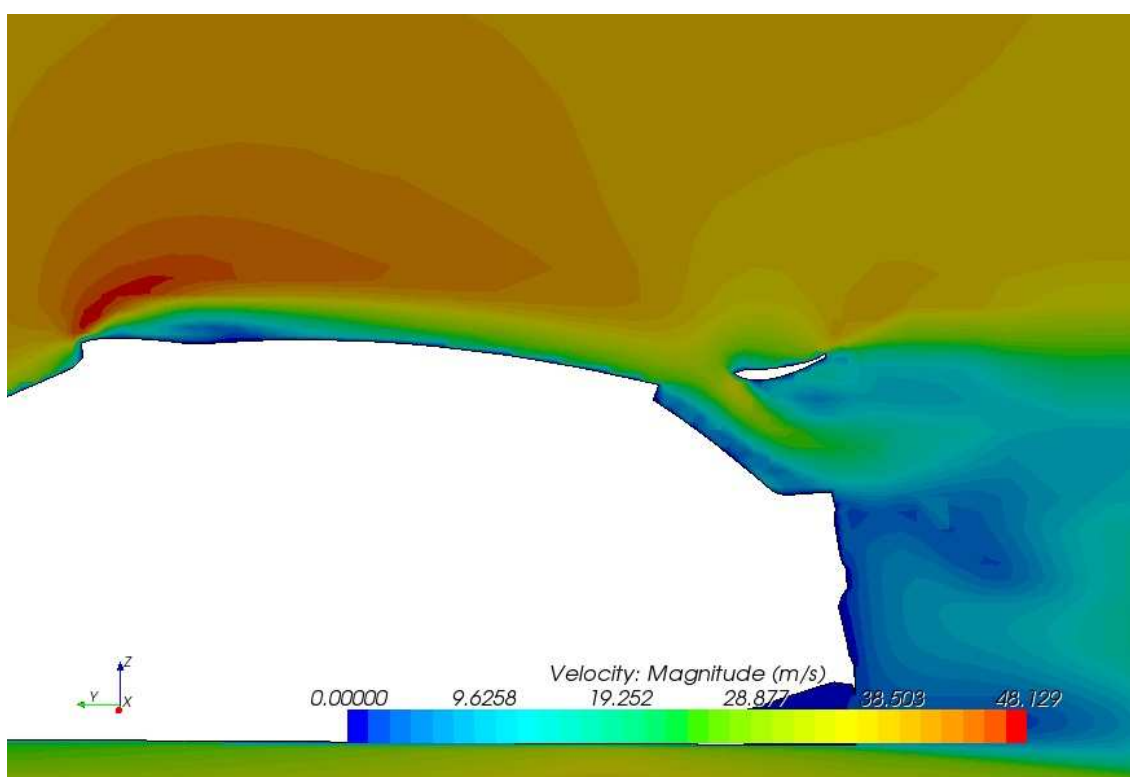
Mapa de presiones zona posterior del vehículo

En lo que se refiere a la zona trasera del vehículo, se crea depresión en la zona de la carrocería por encima del foco y la zona del paso de rueda trasero.

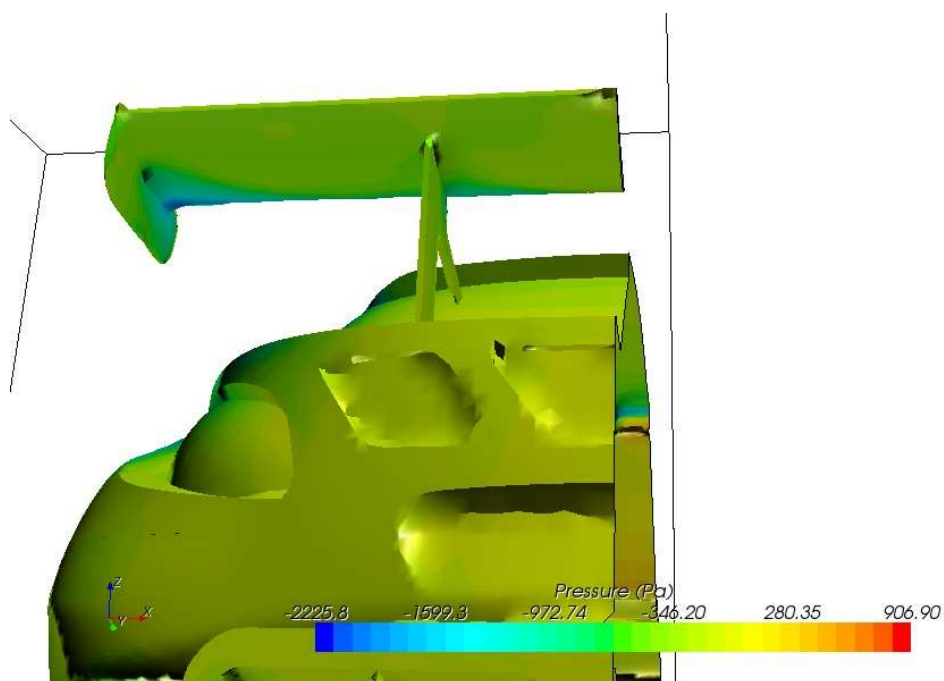
1.9.1.5 ALERÓN

El alerón es una de las partes más importantes de los vehículos de competición. El alerón crea sustentación negativa, con el paso del flujo a través ella. Crean carga aerodinámica, consiguiendo un paso por curva más rápido.

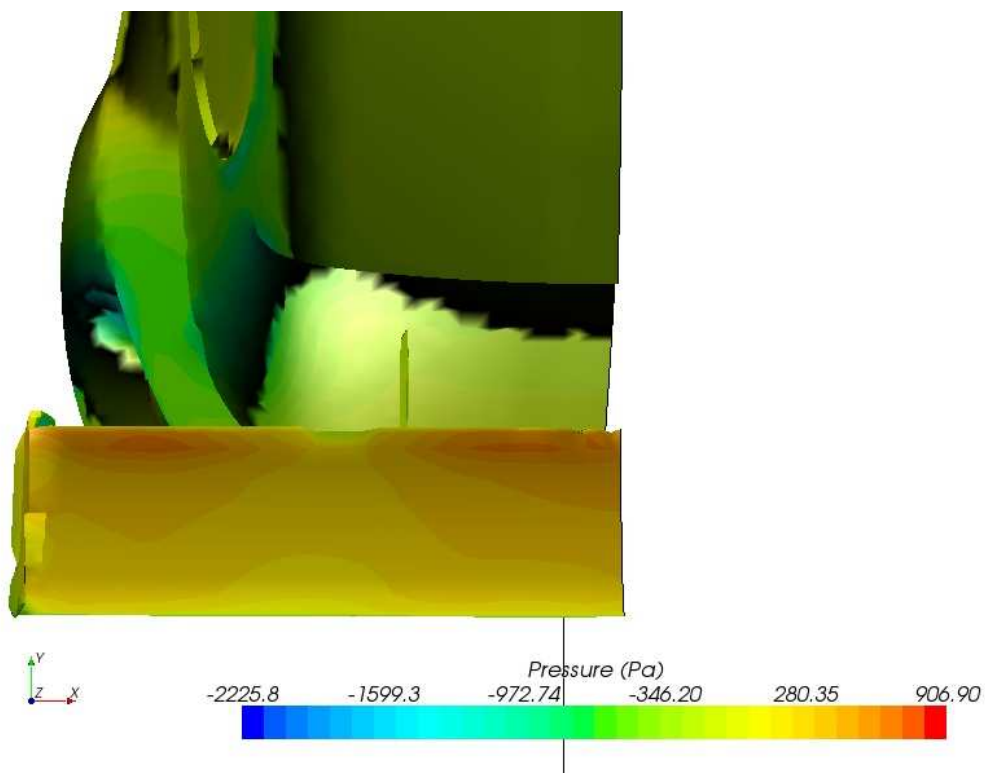
Por ello los alerones son de un gran interés en el estudio aerodinámico, a continuación estudiaremos los mapas de presión y velocidad.



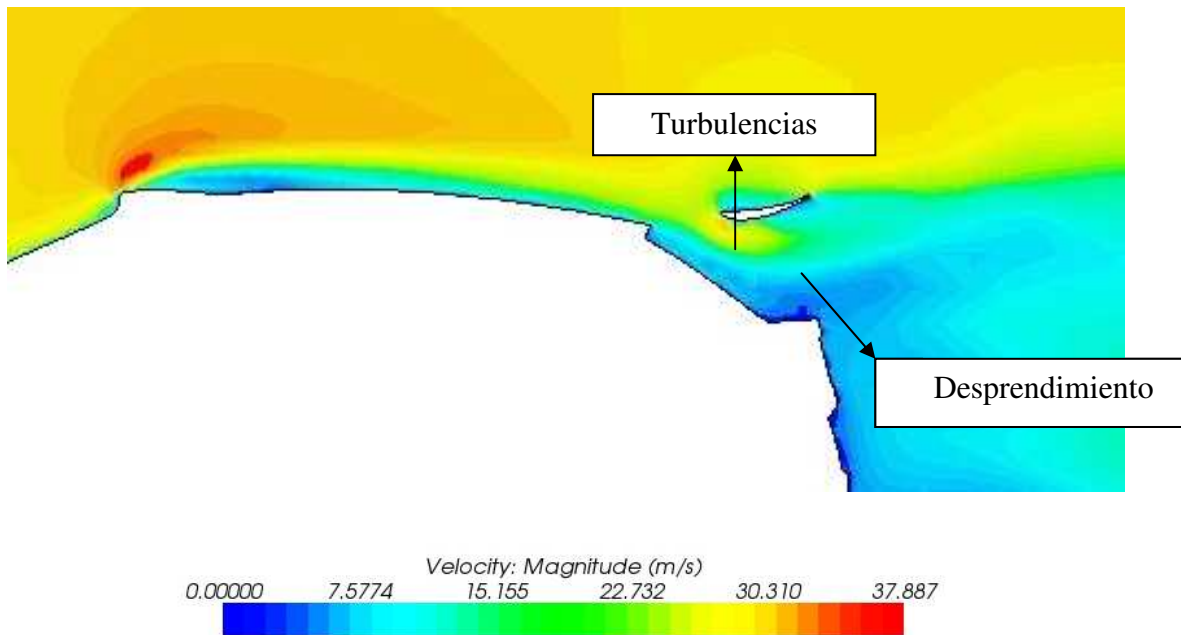
Mapa de velocidades en la zona del alerón en el plano medio.



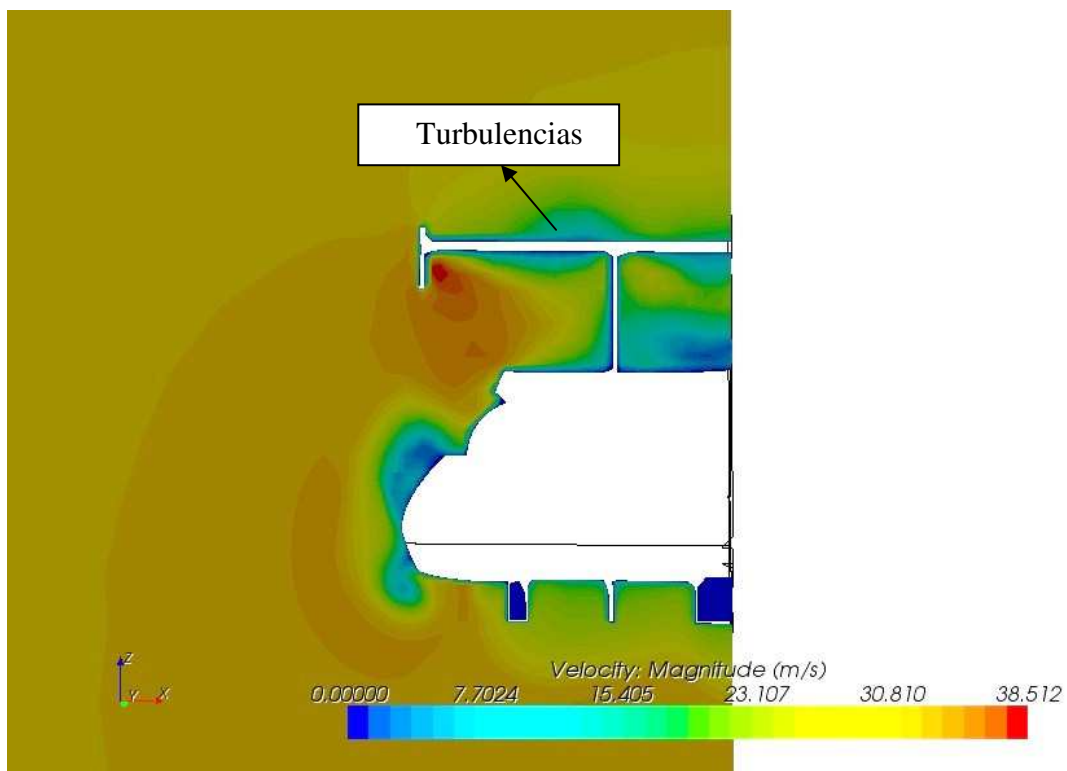
Mapa de presiones en la superficie posterior del alerón



Mapa de presiones en la superficie del alerón



Mapa de velocidades en el plano medio del vehículo.



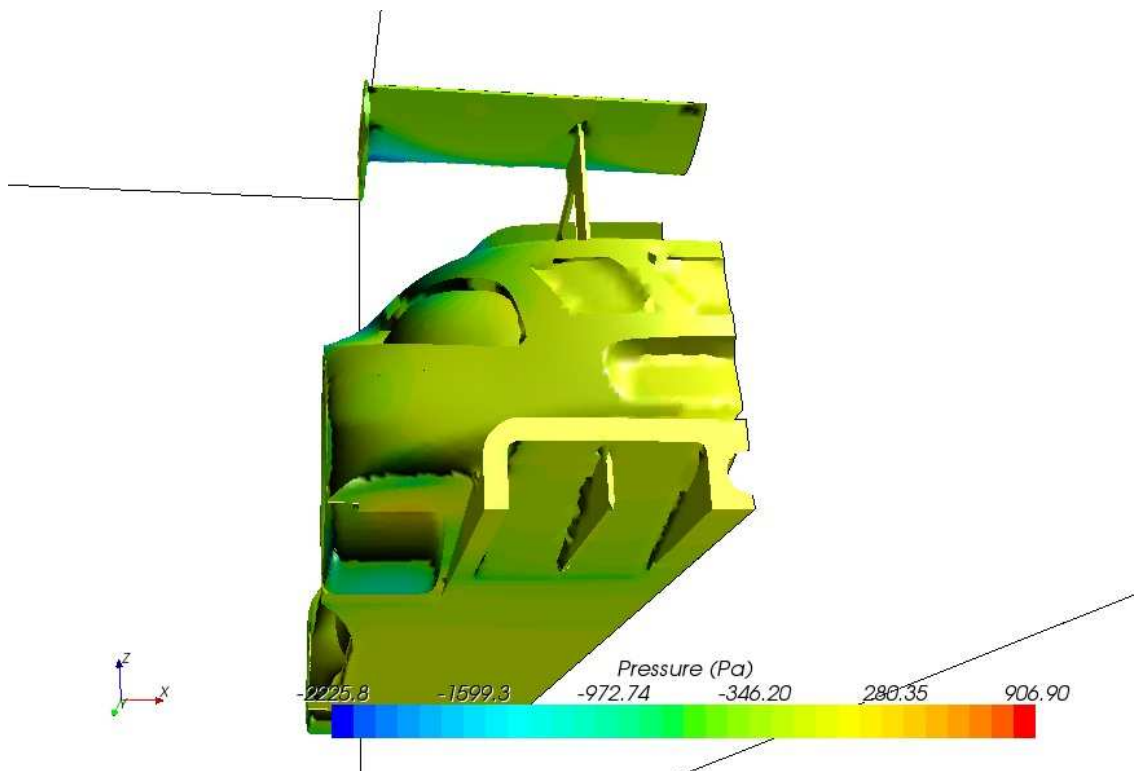
Mapa de velocidades perpendicular al plano de simetría situado en la mitad de la longitud del alerón

En lo que se refiere sobre el alerón, el flujo se adhiere a él salvo al final en el que tenemos un desprendimiento de la capa límite.

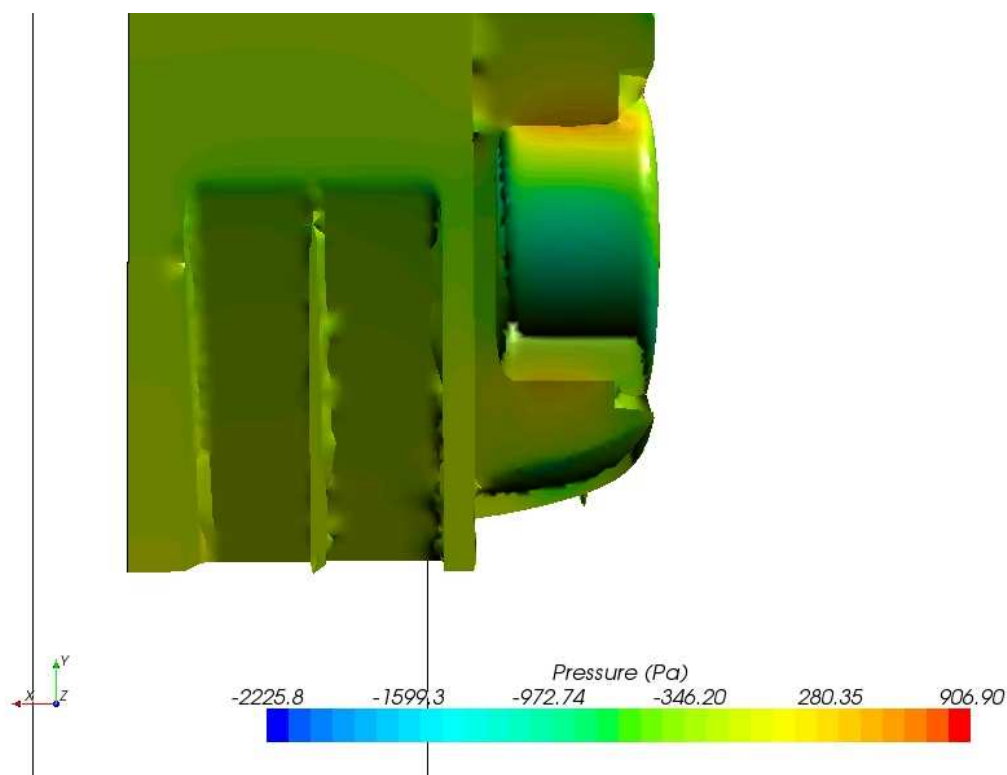
1.9.1.6 DIFUSOR

El difusor esta, situado en la zona posterior del coche, con el fin de evacuar más rápidamente el aire del fondo, creando efecto suelo, es decir, que el vehículo se adhiera al suelo consiguiendo un paso por curva más rápido.

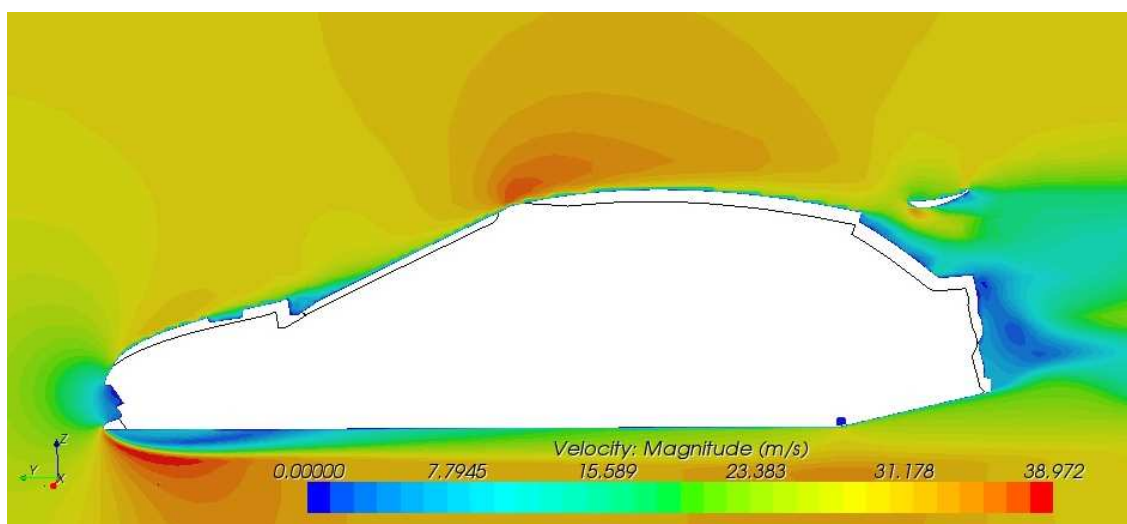
Se muestran los mapas de velocidades y presiones en el difusor del vehículo.



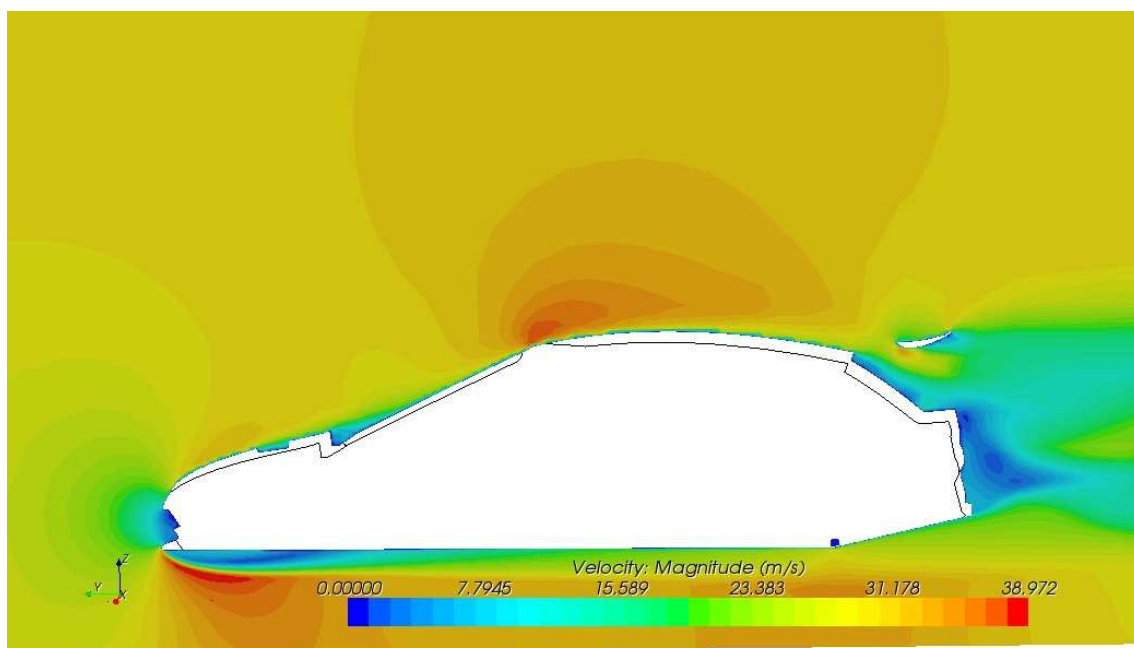
Mapa de presiones del difusor



Mapa de presiones en el fondo plano del vehículo



Mapa velocidades en un plano paralelo al plano de simetría en el difusor



Mapa velocidades en un plano paralelo al plano de simetría en la zona del difusor

1.9.1.7 COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL AVANCE, Cx

El coeficiente de resistencia al avance o *drag* en ingles, se define como:

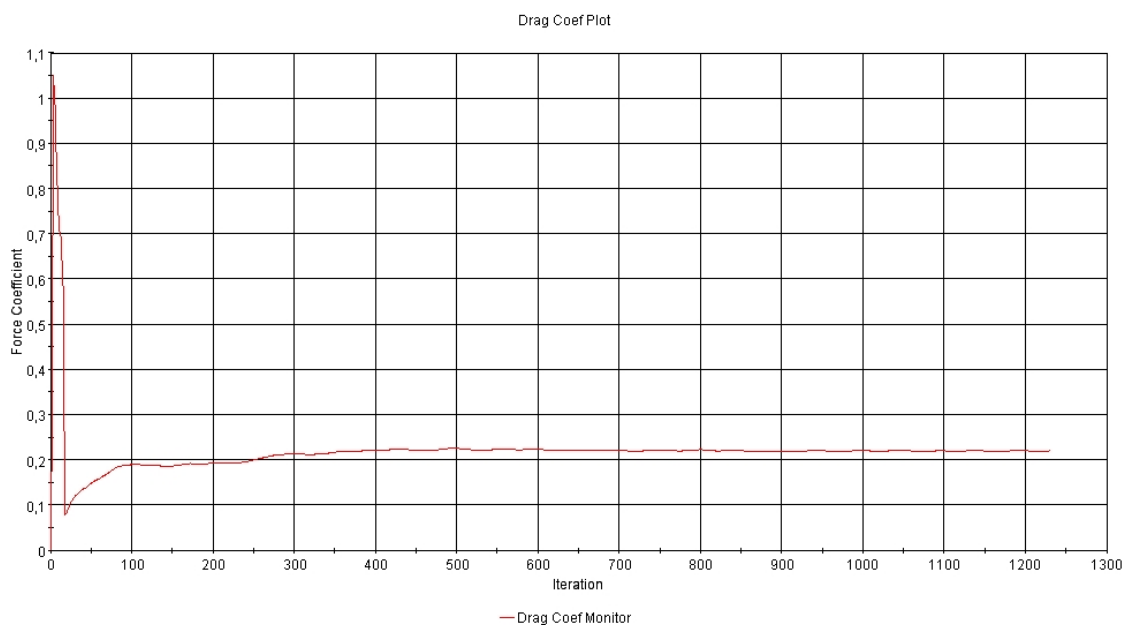
$$C_x = \frac{F \cdot 2}{\rho \cdot A \cdot v^2}, \text{ siendo}$$

ρ : densidad N; 1,184 Kg/m³

A: área del vehículo; 1,642 m²

V: 30 m/s

Se tiene que el Cx, es aproximadamente 0.2195 (Dato obtenido de STAR-CCM+)

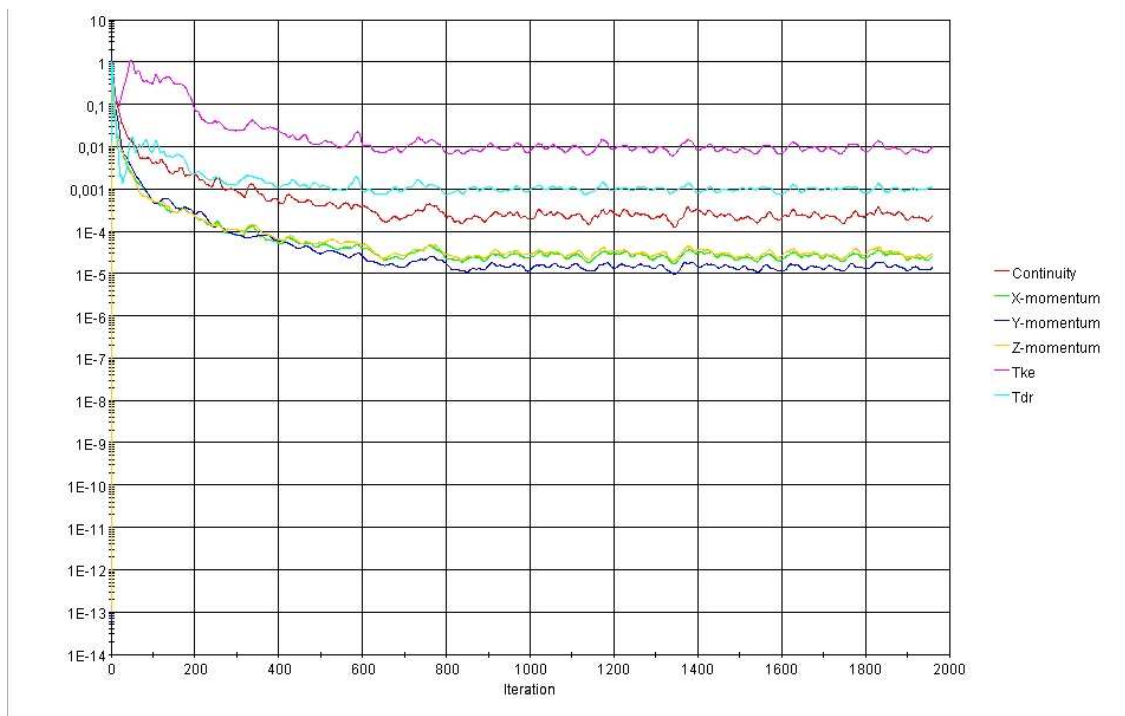


Coeficiente de resistencia al avance

1.9.2 VELOCIDAD 140 Km/h

El análisis ha sido lanzado a 140 km/h.

Se han hecho 1960 iteraciones hasta que el cálculo llegase a una condición estable. Mostrándose los residuos mínimos en la siguiente gráfica:

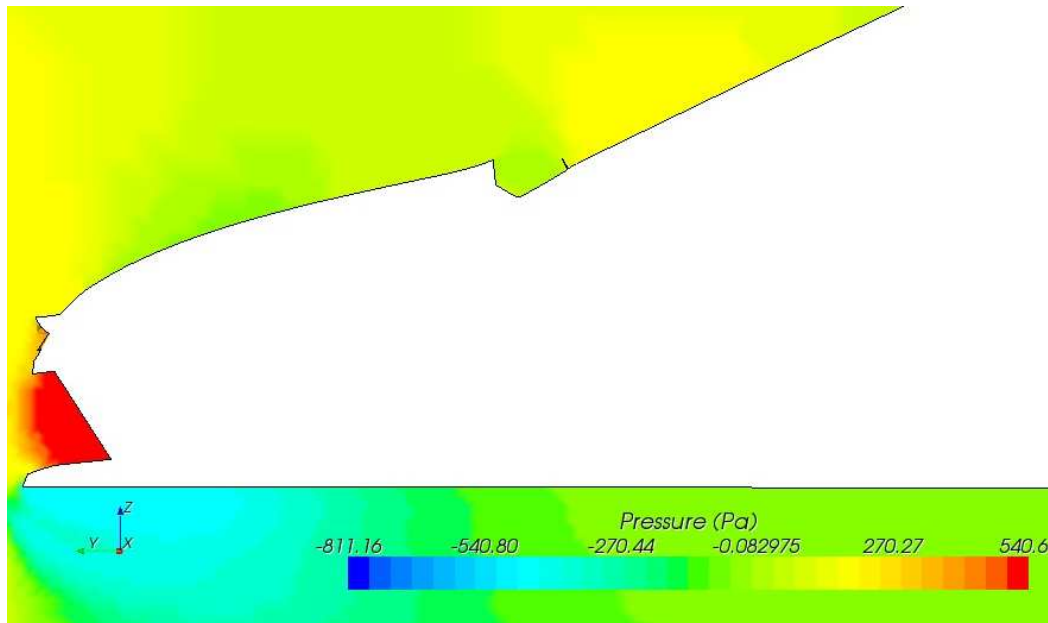


Residuales

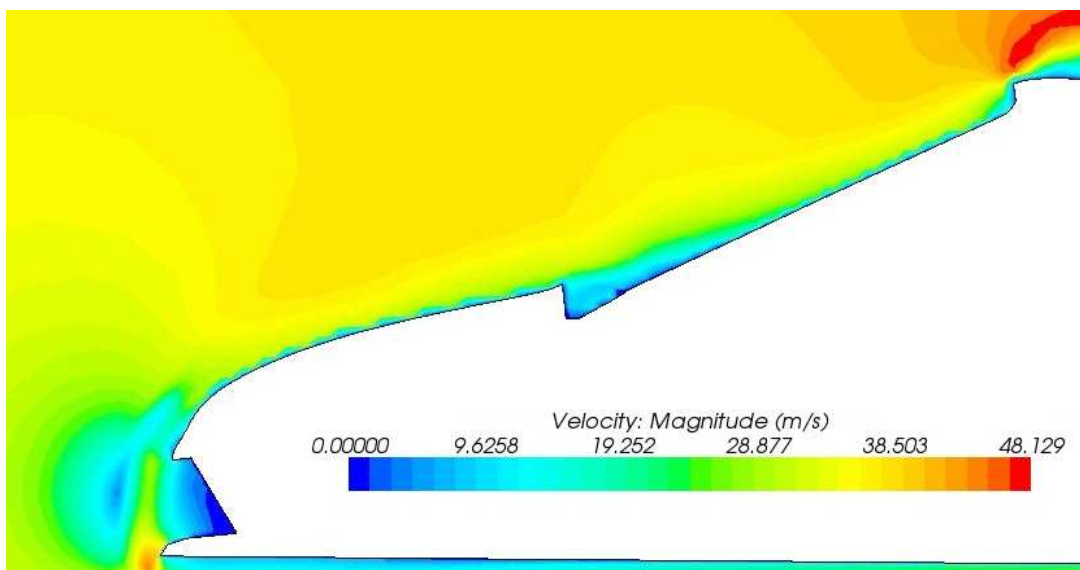
Se mostrarán los diferentes mapas de presiones y velocidades en las diferentes partes del coche.

1.9.2.1 PARTE FRONTAL

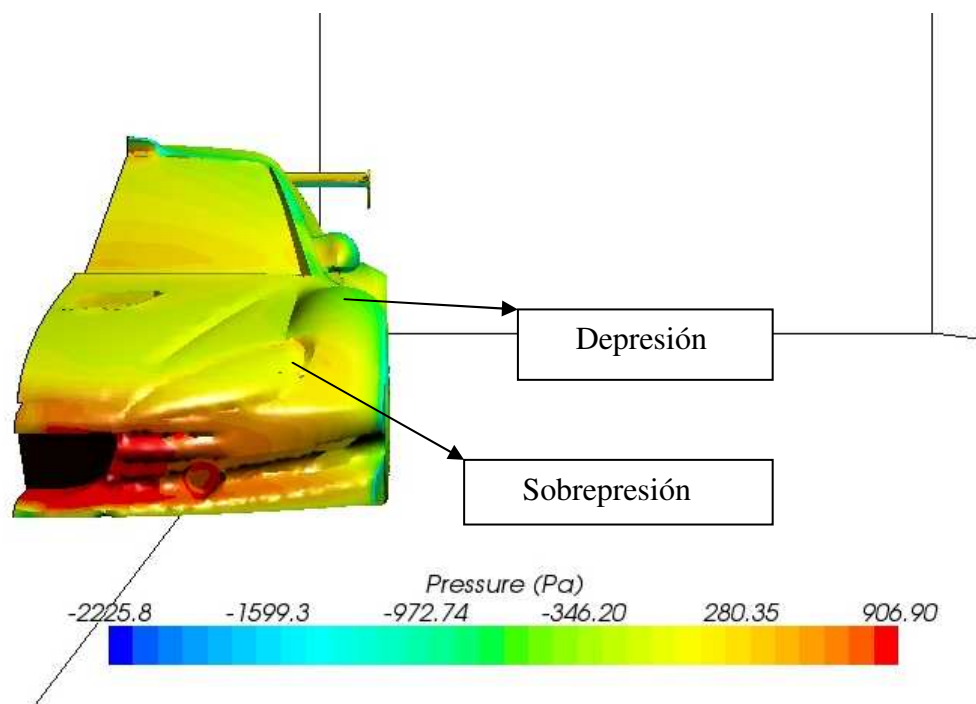
A continuación se mostraran los mapas de presiones y velocidades en la parte delantera del vehículo.



Mapa presiones en el plano medio de la parte delantera del vehículo



Mapa de velocidades en el plano de simetría de la parte delantera

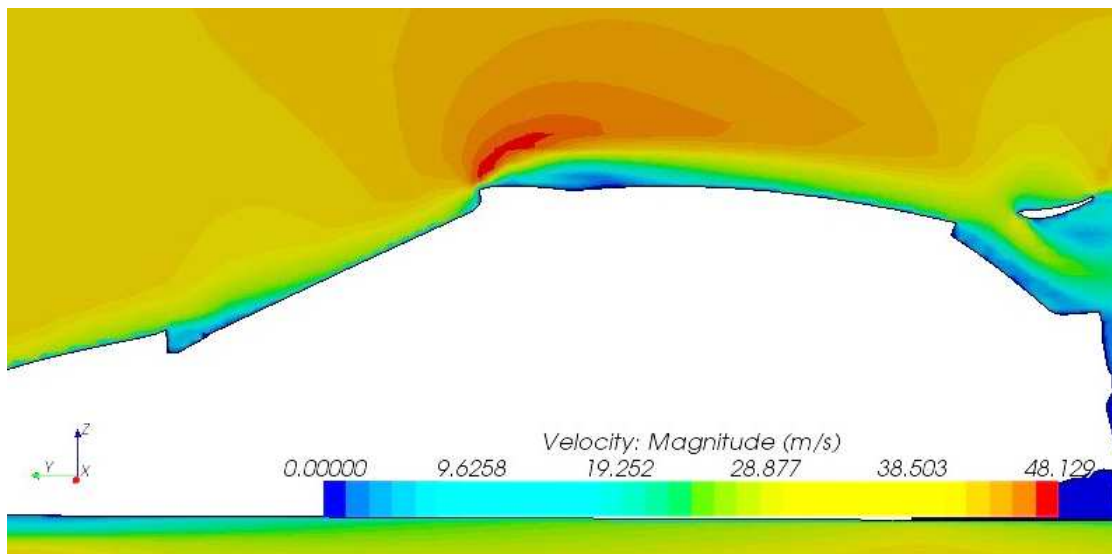


Mapa de presiones en la parte delantera del vehículo

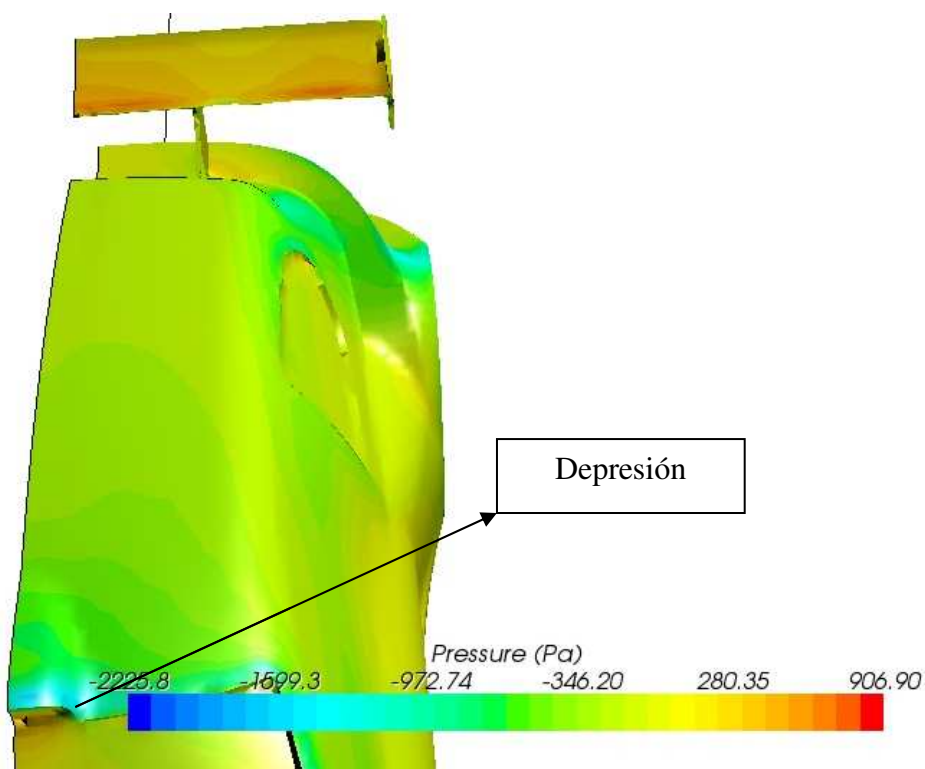
Puede observarse una sobrepresión sobre el foco y una depresión en el paso de rueda.

1.9.2.2 PARTE SUPERIOR

En el siguiente apartado se muestran los mapas de velocidades y presiones en la parte superior del vehículo.



Mapa de velocidades en el plano medio de la parte superior del vehículo

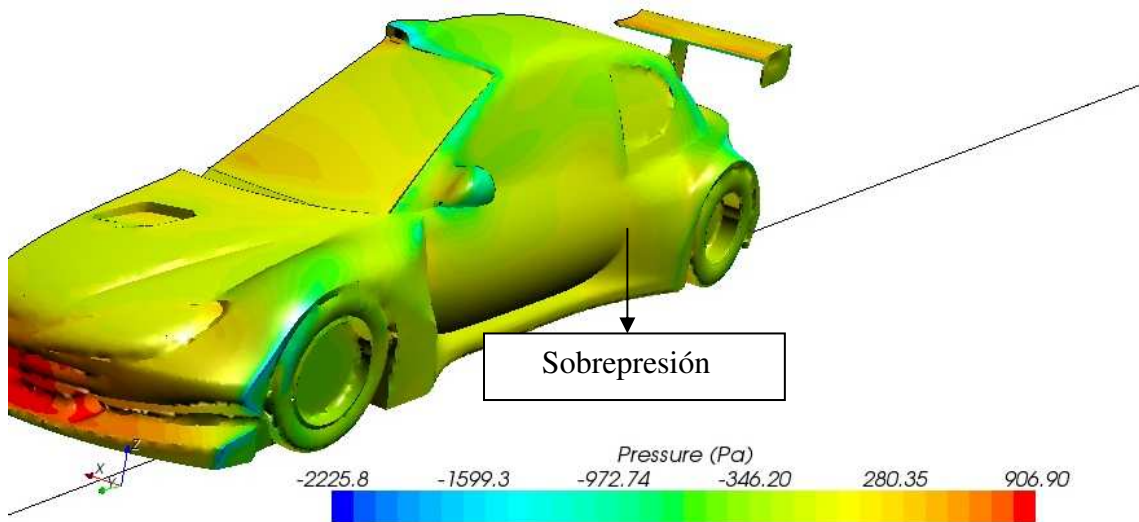


Mapa de presiones en la parte superior del vehículo

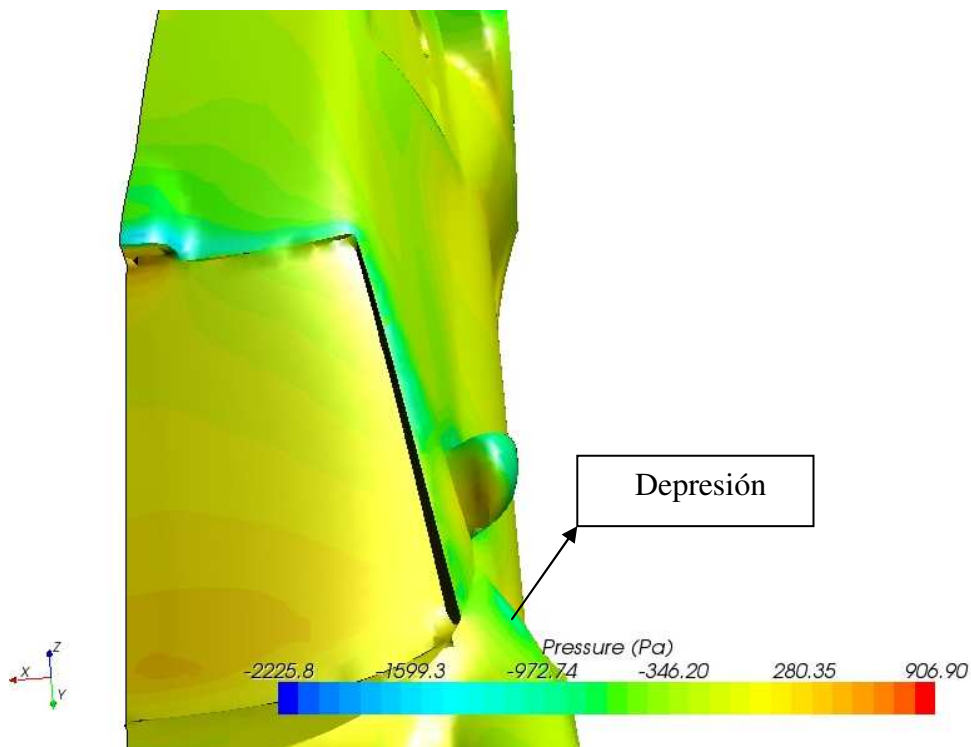
En lo que se refiere a la parte superior, hay una depresión entre la luna y el techo, es producido por el escalón existente entre los dos elementos.

1.9.2.3 PARTE LATERAL

Se van a mostrar los mapas de velocidades y presiones en la parte lateral del vehículo.



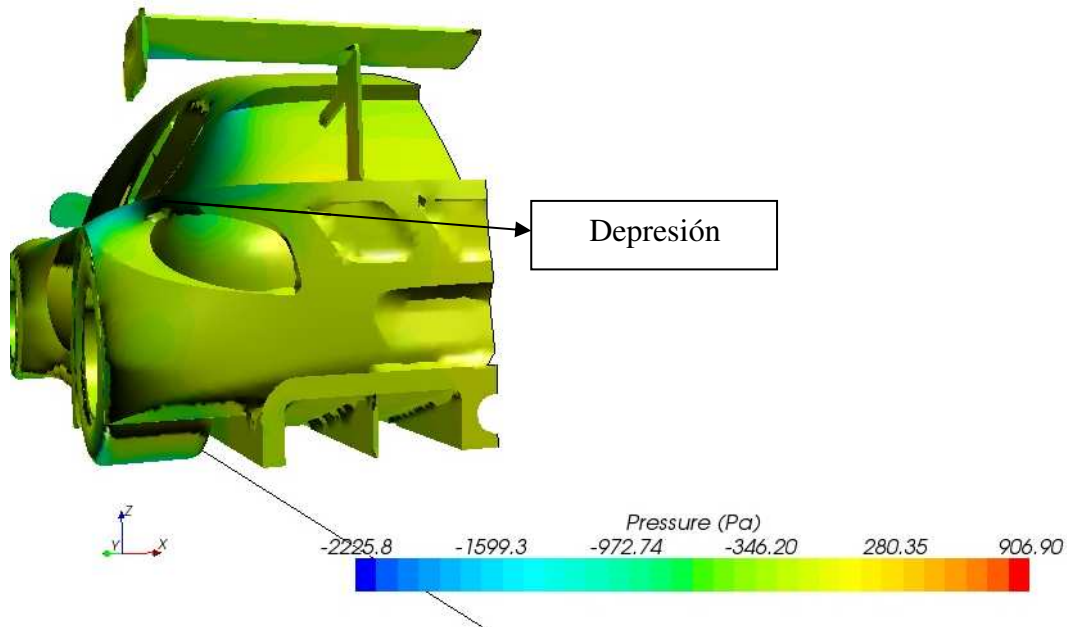
Mapa de presiones en la parte lateral del vehículo



En la zona que se refiere a la parte lateral del vehículo, tenemos una sobrepresión entre la puerta y el eje trasero. La zona entre el eje delantero y la puerta existe una depresión.

1.9.2.4 PARTE TRASERA

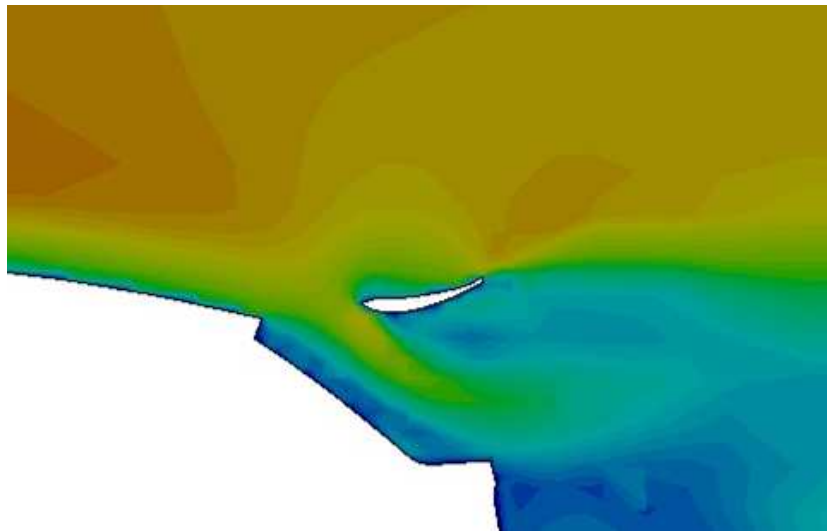
Se mostrarán los mapas de presión en la parte posterior del vehículo.



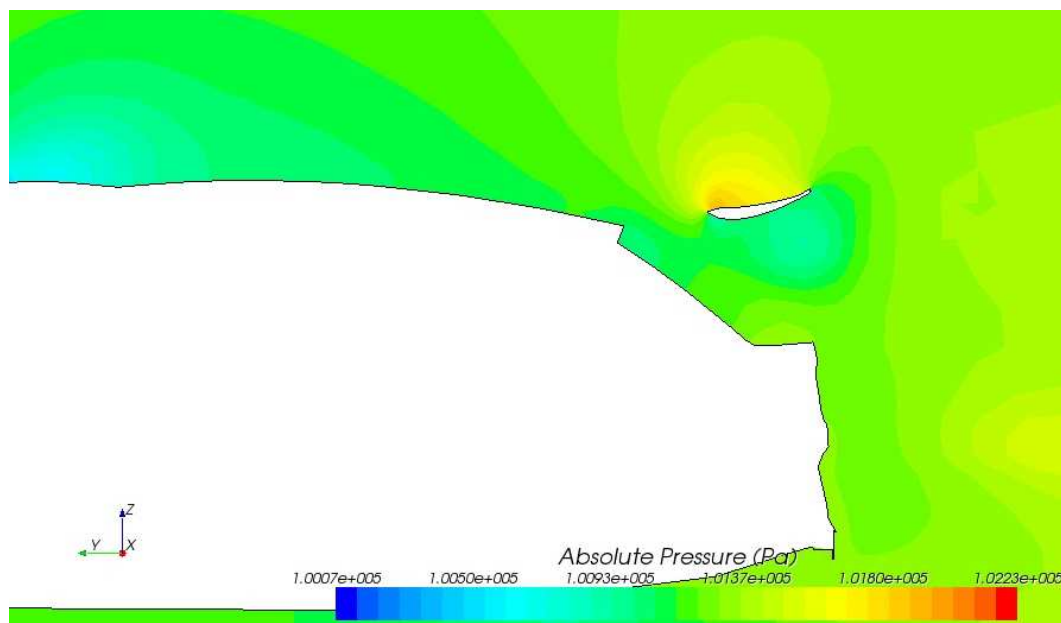
Como se observa en la anterior imagen existe una depresión encima del foco trasero y del paso de rueda.

1.9.2.5 ALERÓN

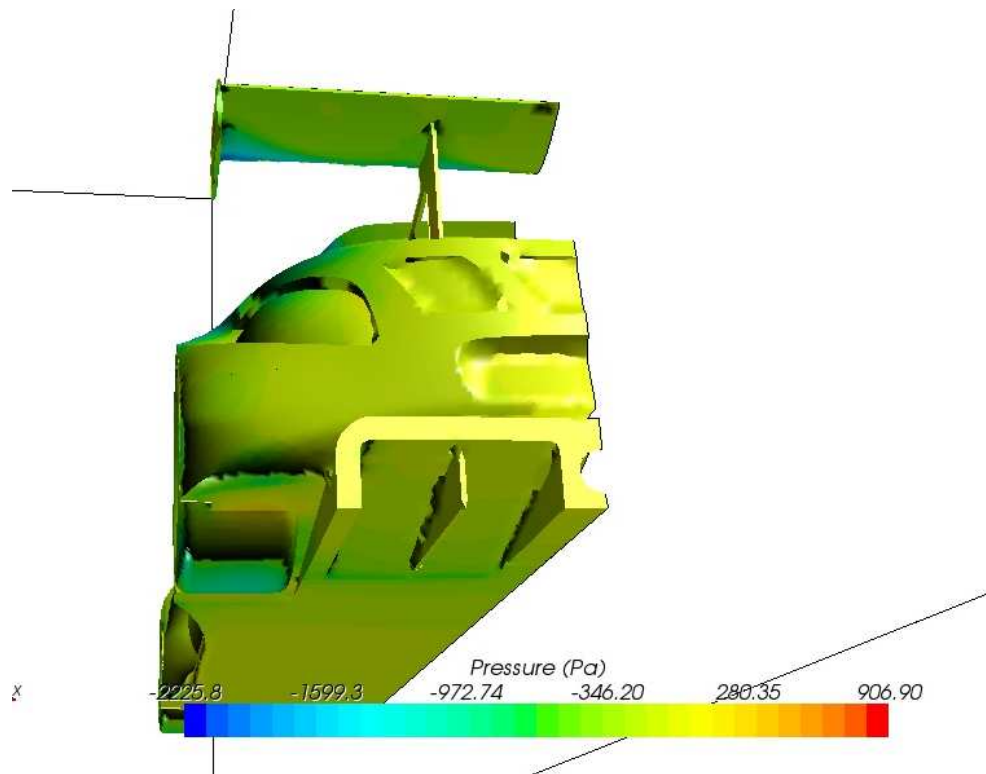
A continuación se mostrarán los mapas de presiones y velocidades en el alerón.



Mapa de velocidades en la zona del alerón en el plano medio.



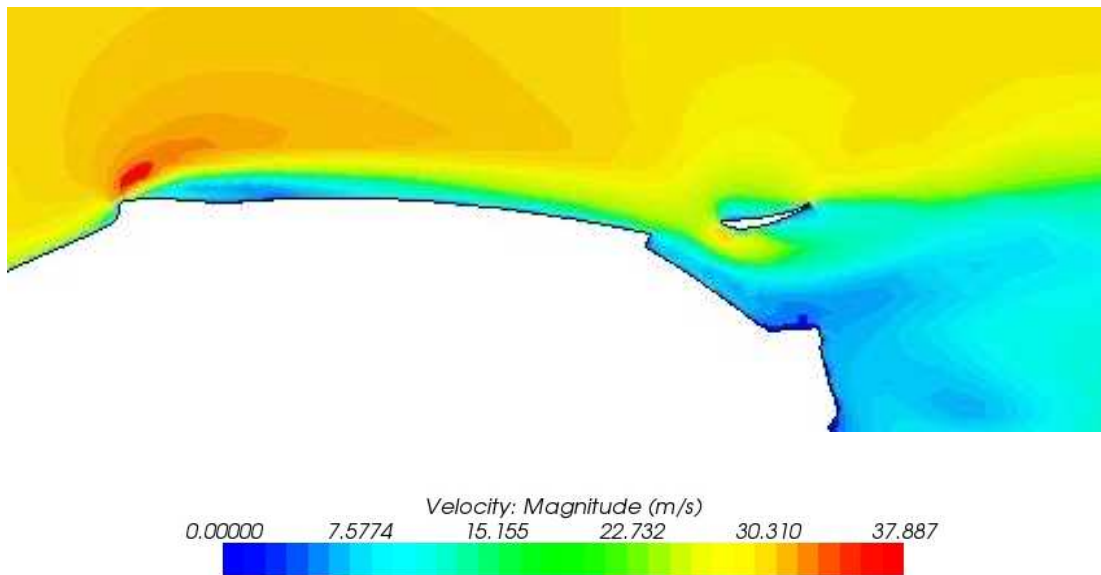
Mapa de presiones en un plano medio paralelo al de simetría en la zona del alerón



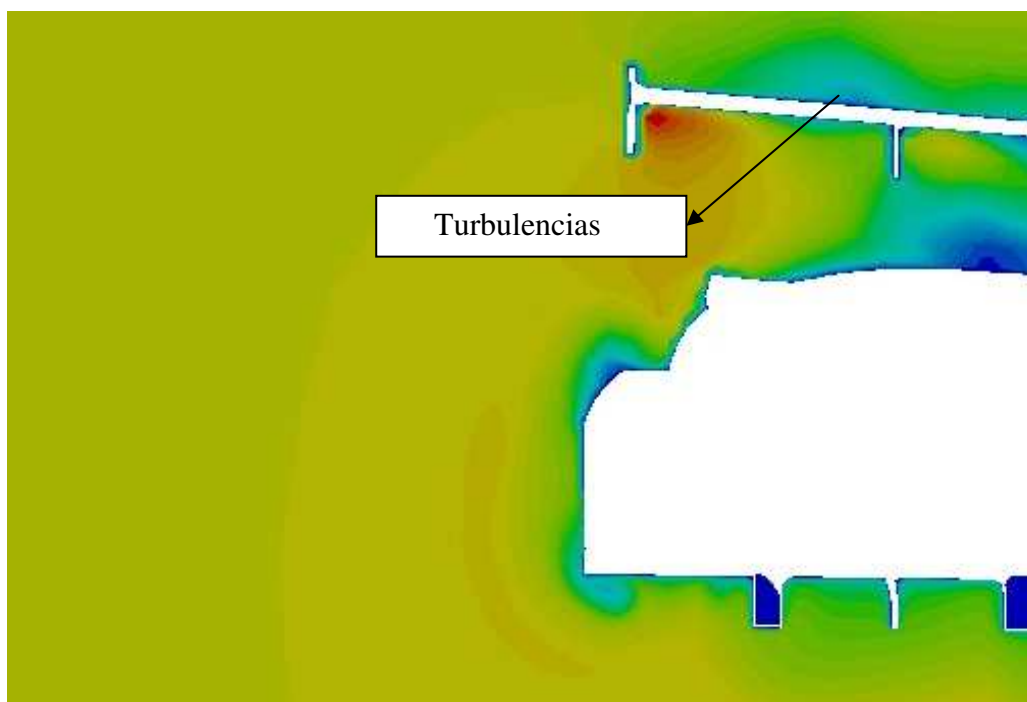
Mapa de presiones en la superficie posterior del alerón



Mapa de presiones en la superficie del alerón



Mapa de velocidades en el plano medio del vehículo.

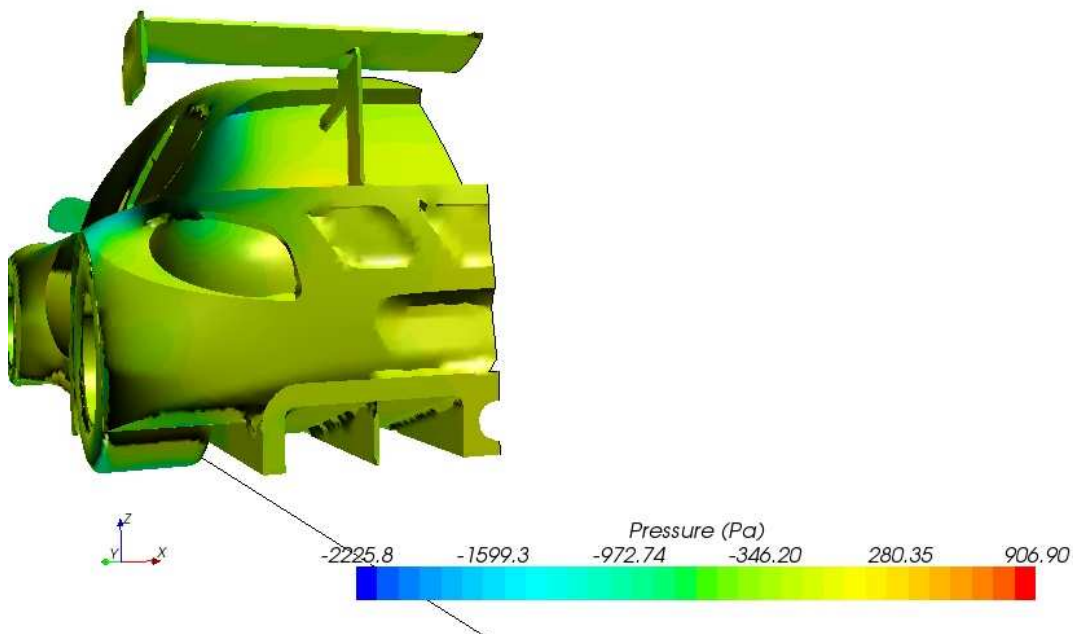


Mapa de velocidades perpendicular al plano de simetría situado en la mitad de la longitud del alerón

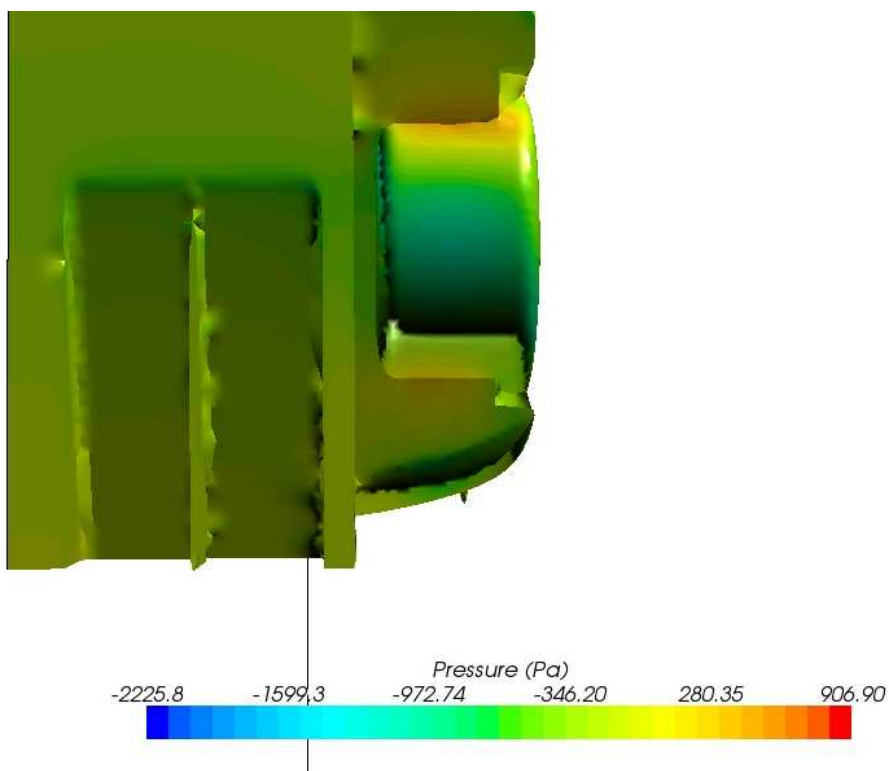
En lo que se refiere sobre el alerón, el flujo se adhiere a él salvo al final en el que tenemos un desprendimiento de la capa límite.

1.9.2.6 DIFUSOR

Se mostrarán los mapas de velocidades y presiones en el difusor del vehículo.



Mapa de presiones del difusor



Mapa de presiones en el fondo plano del vehículo

Se puede observar que el fluido se pega en las paredes en la sección central, mientras que en la lateral se desprende.

1.9.2.7 COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL AVANCE, Cx

El coeficiente de resistencia al avance o *drag* en ingles, se define como:

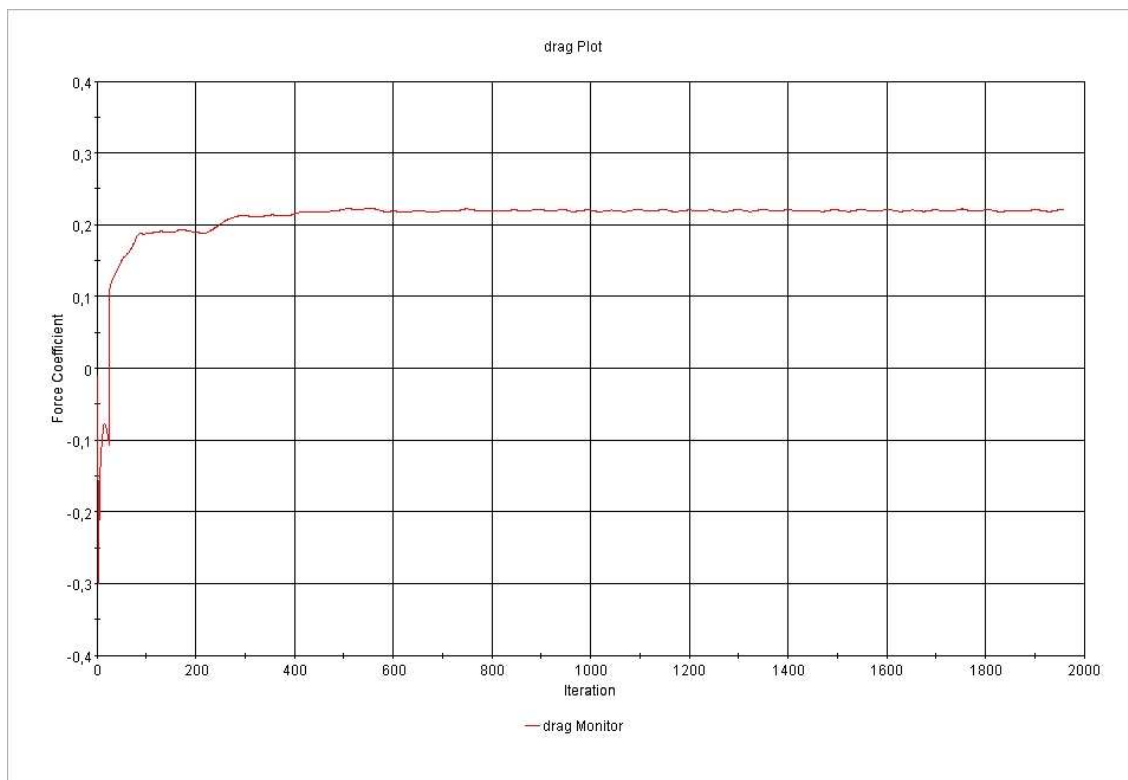
$$C_x = \frac{F \cdot 2}{\rho \cdot A \cdot v^2}, \text{ siendo}$$

ρ : densidad; 1,184 Kg/m³

A: área del vehículo; 1,642 m²

V: 38,88 m/s

Se tiene que el Cx, es aproximadamente 0.220 (Dato obtenido de STAR-CCM+)

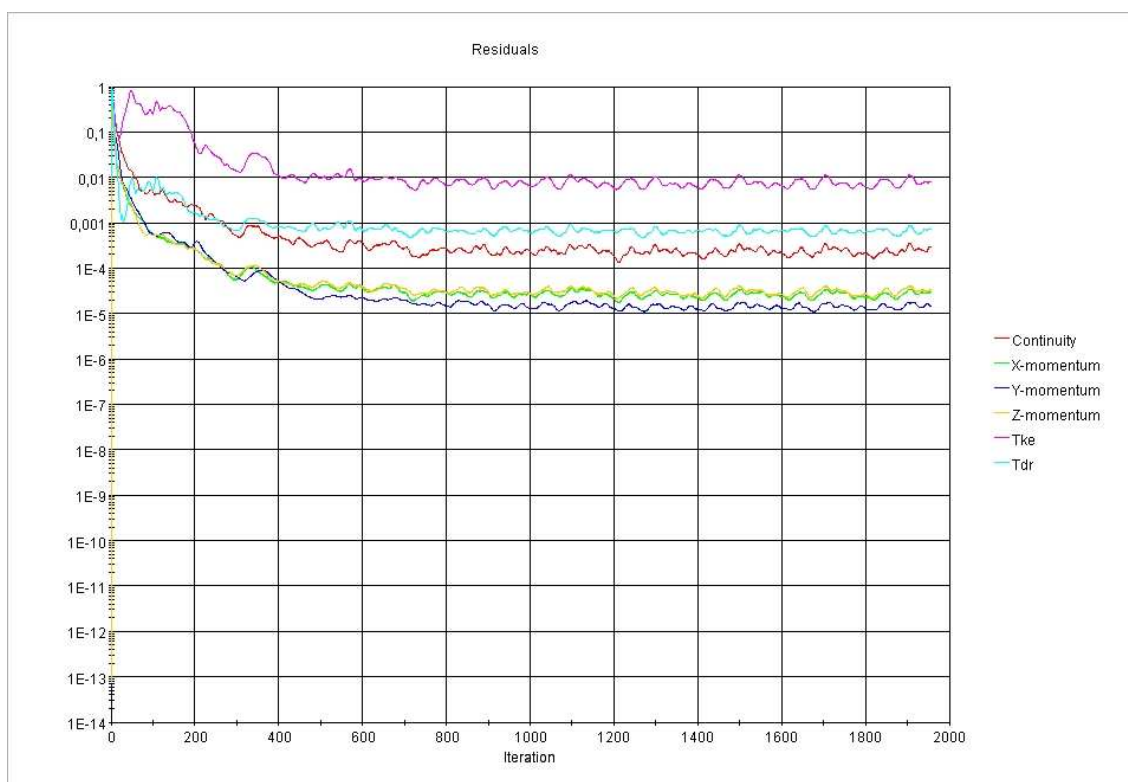


Coeficiente de resistencia al avance

1.9.3 VELOCIDAD 170 Km/h

El análisis ha sido lanzado a 170 km/h, velocidad media que se suele dar lugar en circuitos.

Se han hecho 1960 iteraciones hasta que el cálculo llegase a una condición estable. Mostrándose los residuos mínimos en la siguiente gráfica:

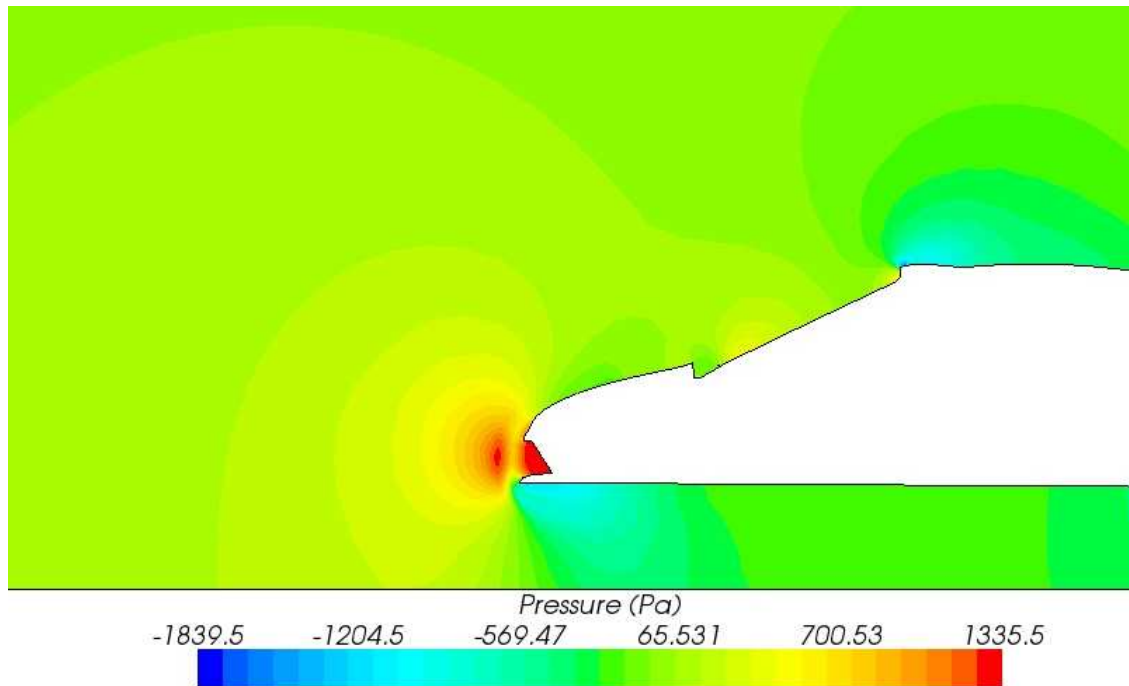


Residuales

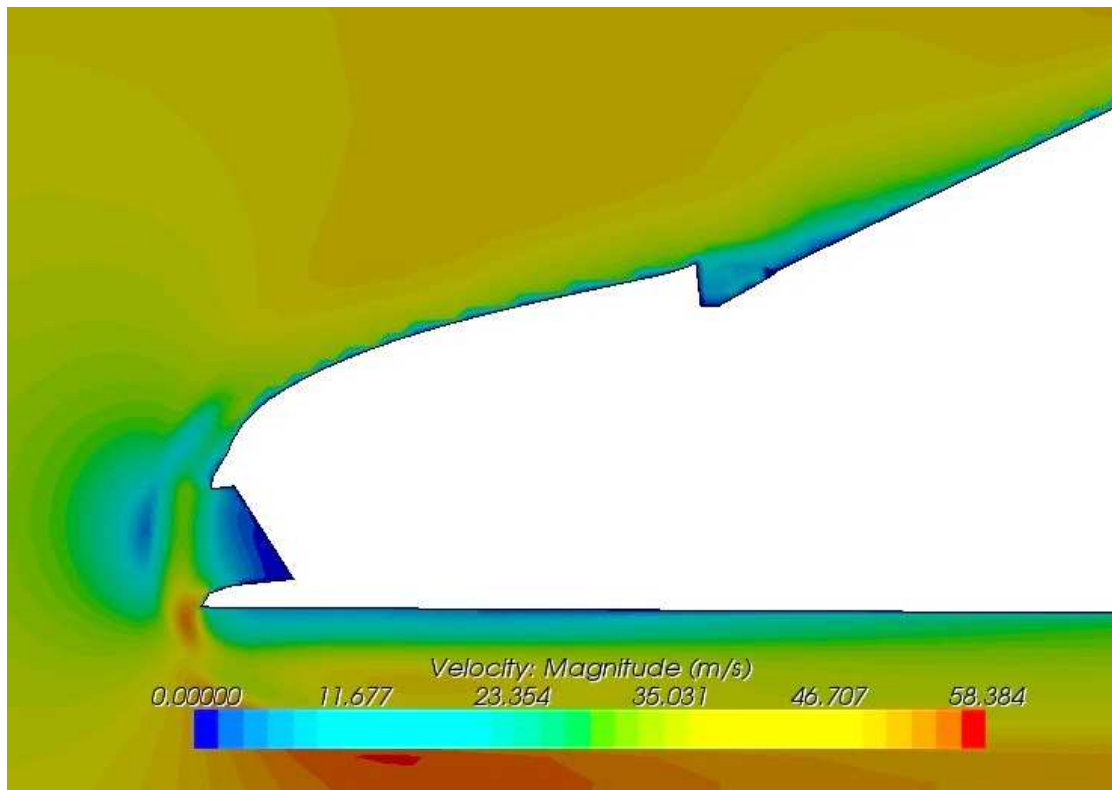
Como se puede observar en la gráfica a partir de las 800 iteraciones, los valores se estabilizan.

1.9.3.1 PARTE FRONTAL

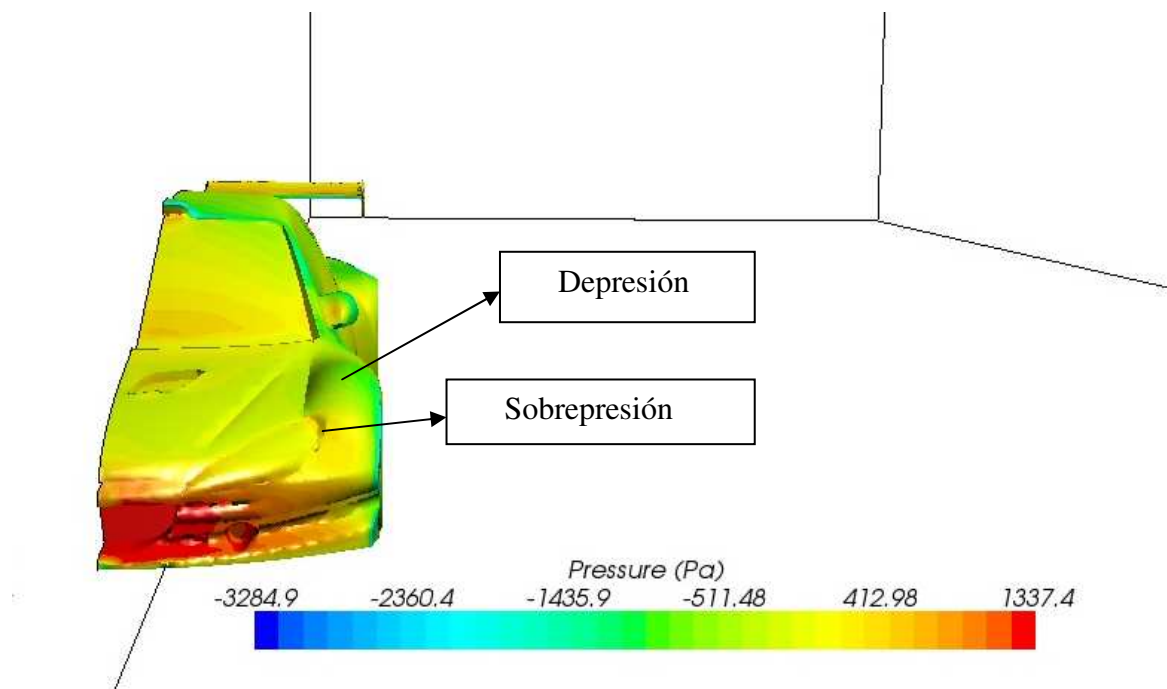
A continuación se muestran los mapas de presiones y velocidades en la parte delantera del vehículo.



Mapa presiones en el plano medio de la parte delantera del vehículo



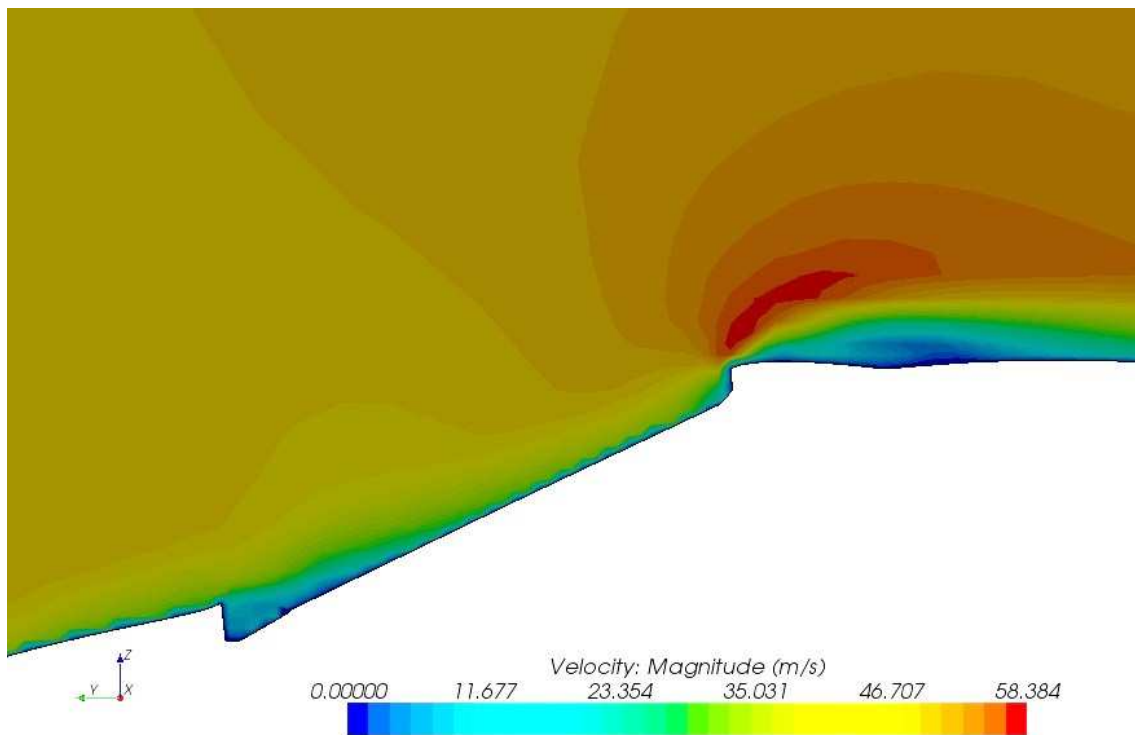
Mapa de velocidades en la zona media del vehículo



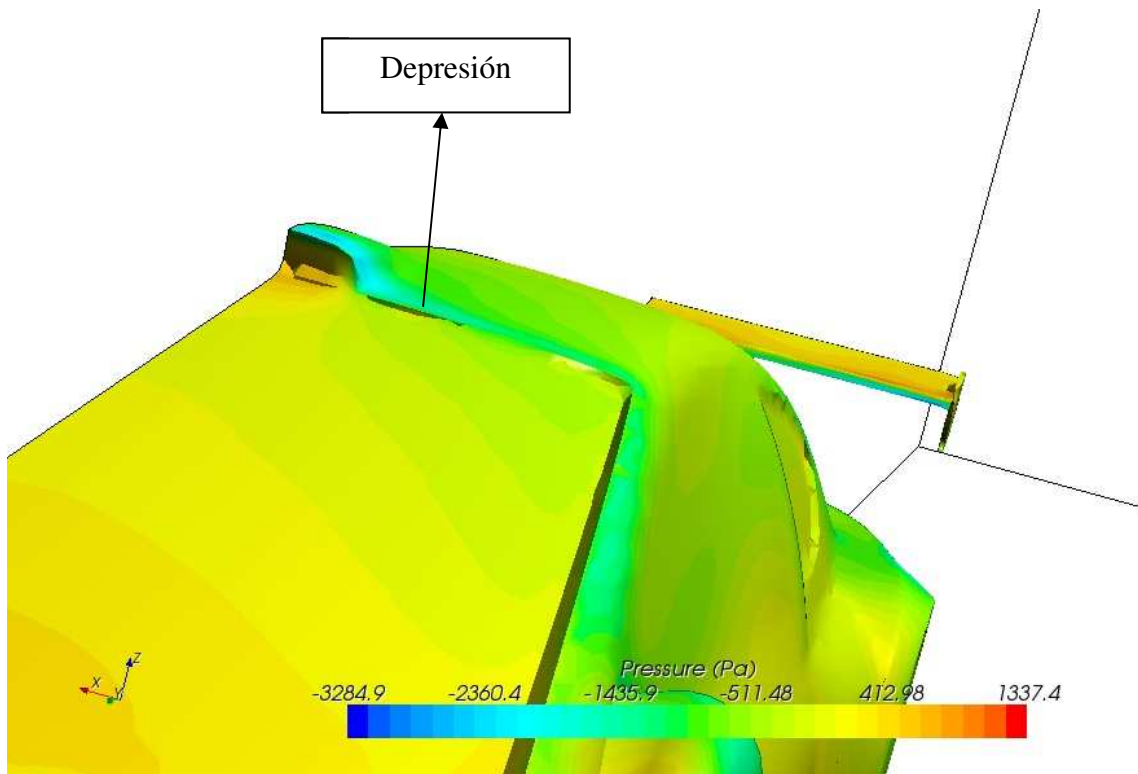
Mapa de presiones en la parte delantera del vehículo

1.9.3.2 PARTE SUPERIOR

En el siguiente apartado se muestran los mapas de velocidades y presiones en la parte superior del vehículo.



Mapa de velocidades en el plano medio de la parte superior del vehículo

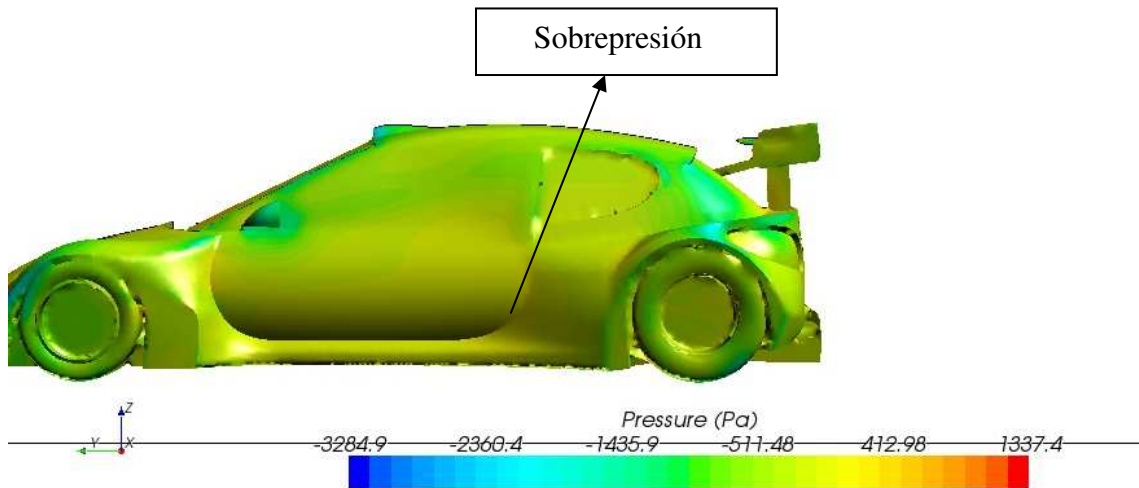


Mapa de presiones en la parte superior del vehículo

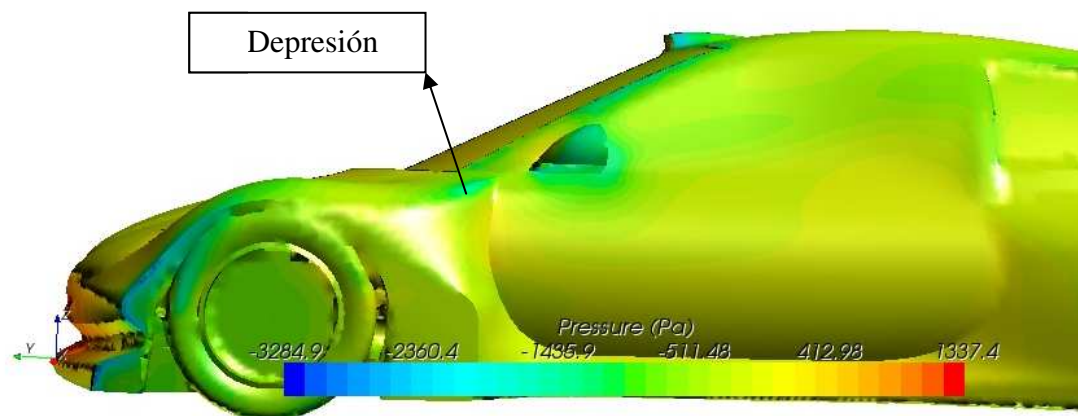
En lo que se refiere a la parte superior, hay una depresión entre la luna y el techo, es producido por el escalón existente entre los dos elementos.

1.9.3.3 PARTE LATERAL

Se muestran los mapas de velocidades y presiones en la parte lateral del vehículo.



Mapa de presiones en la parte lateral del vehículo

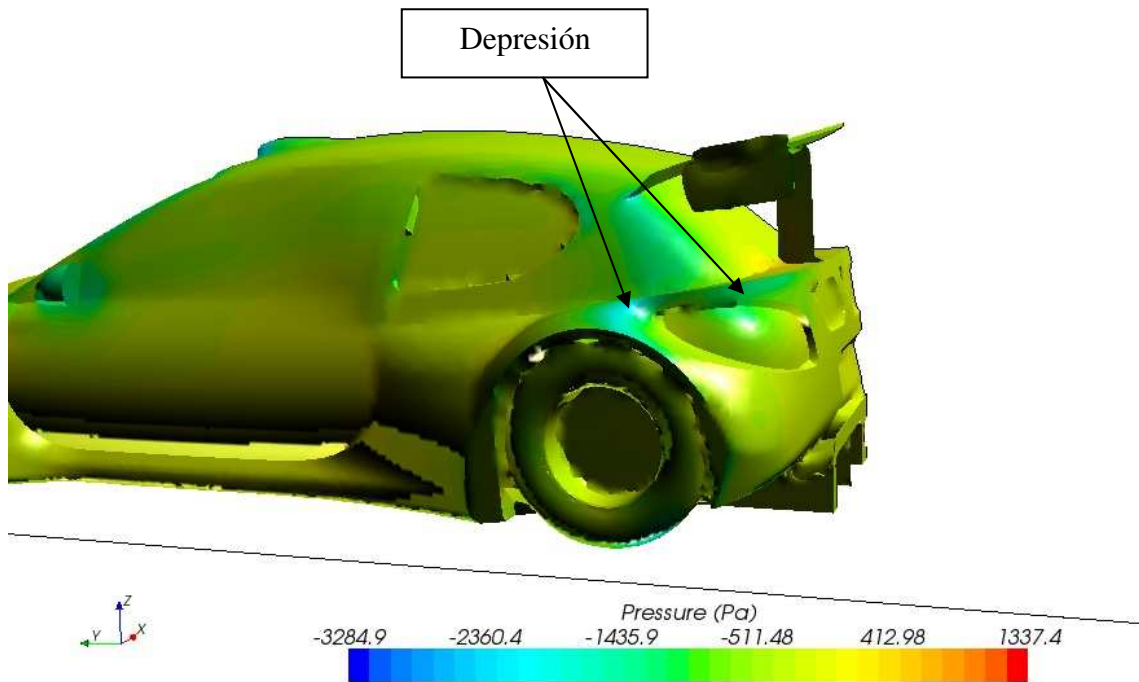


Mapa de presiones en la parte lateral del vehículo

En la zona que se refiere a la parte lateral del vehículo, tenemos una sobrepresión entre la puerta y el eje trasero. La zona entre el eje delantero y la puerta existe una depresión.

1.9.3.4 PARTE TRASERA

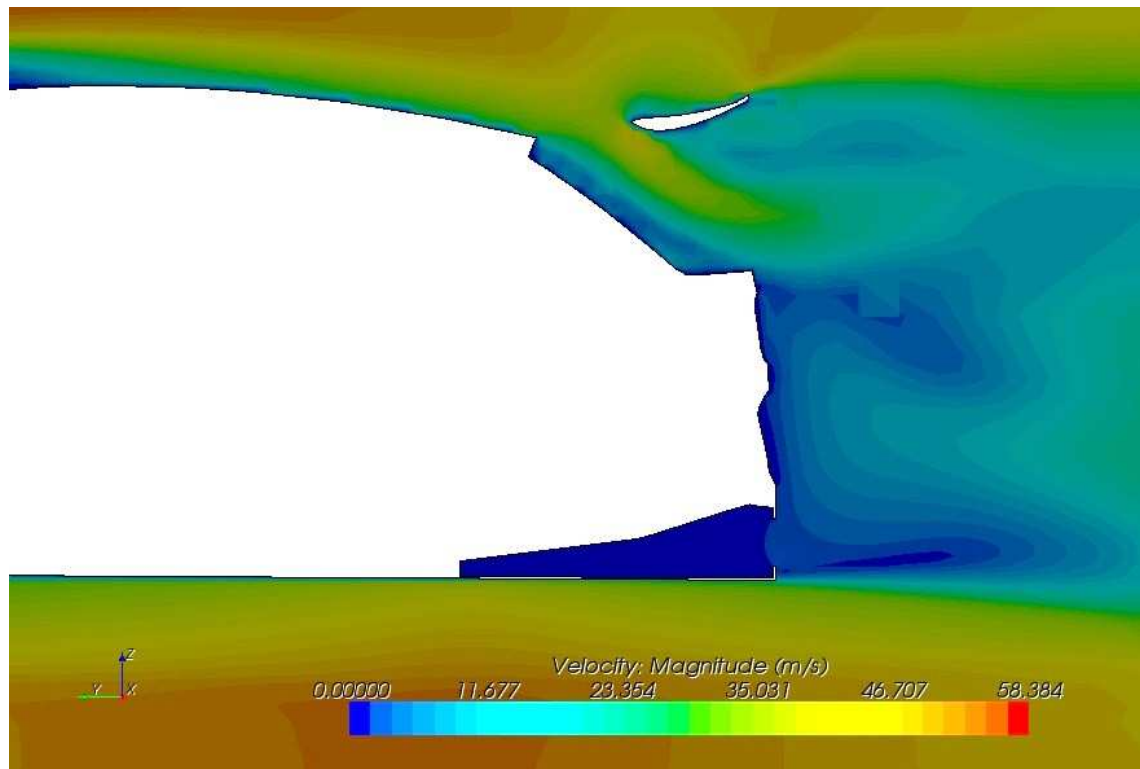
Se muestran los mapas de presión en la parte posterior del vehículo.



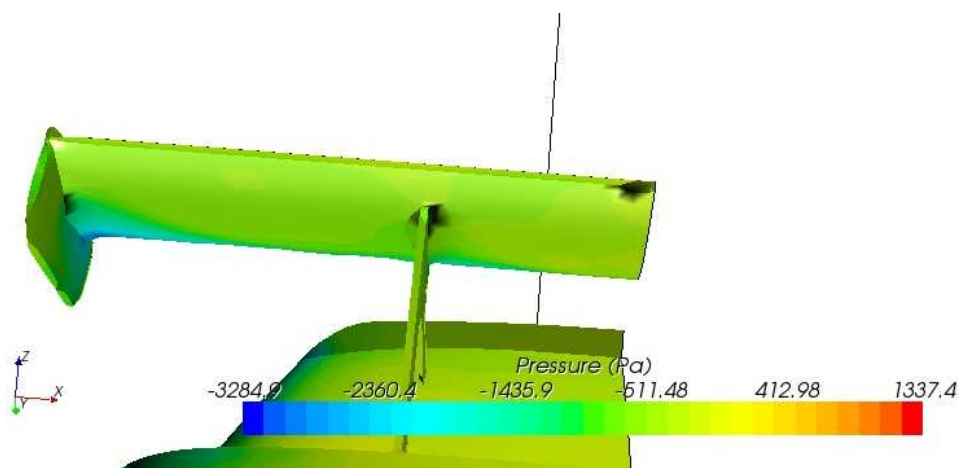
El paso de rueda, la zona próxima al foco y la columna del chasis, tiene una sobrepresión.

1.9.3.5 ALERÓN

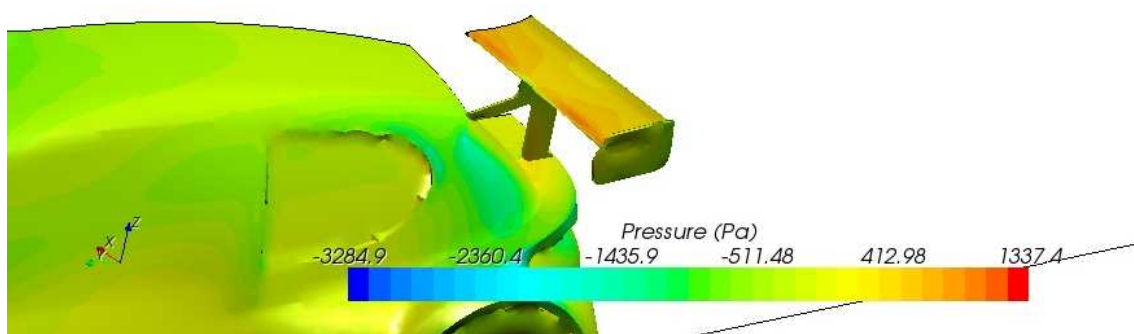
A continuación se mostrarán los mapas de presiones y velocidades en el alerón.



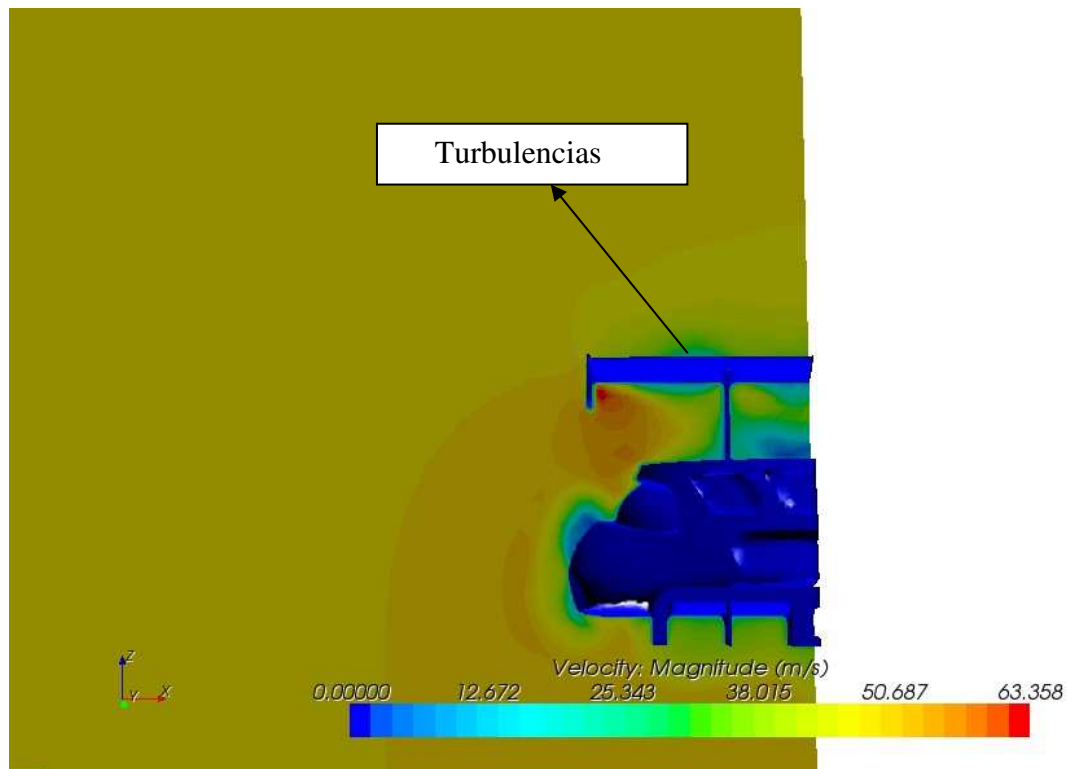
Mapa de velocidades en la zona del alerón en un plano paralelo al plano medio.



Mapa de presiones en la superficie posterior del alerón



Mapa de presiones en la superficie del alerón

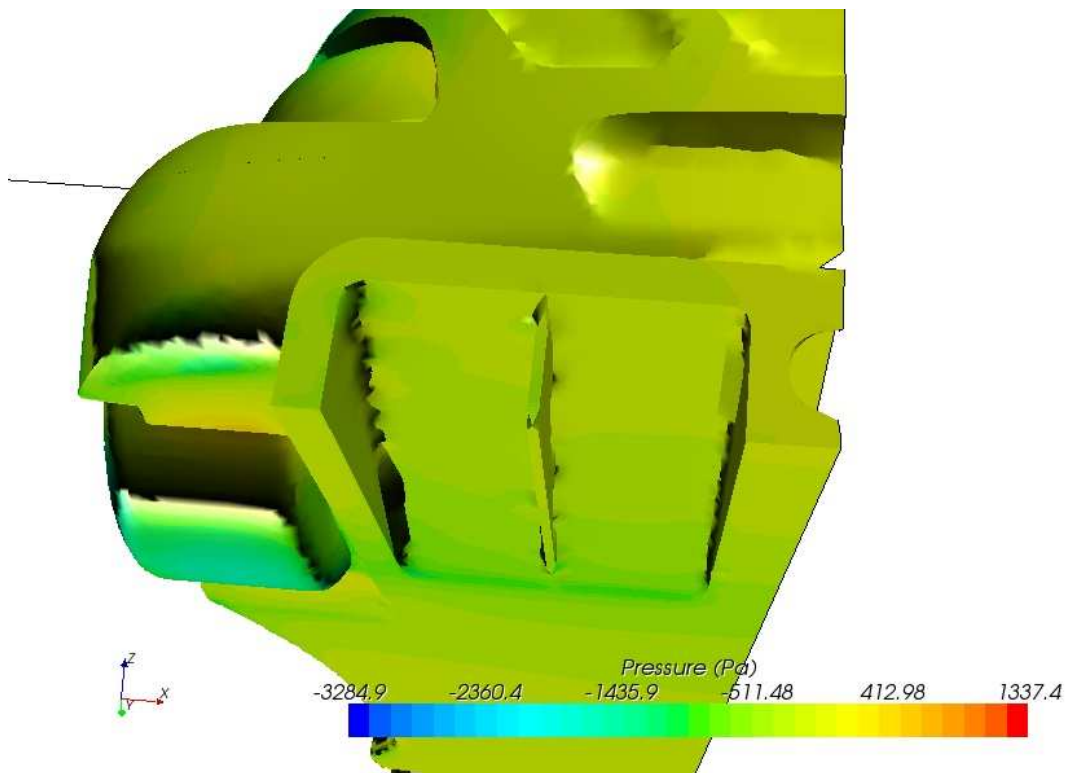


Mapa de velocidades perpendicular al plano de simetría situado en la mitad de la longitud del alerón

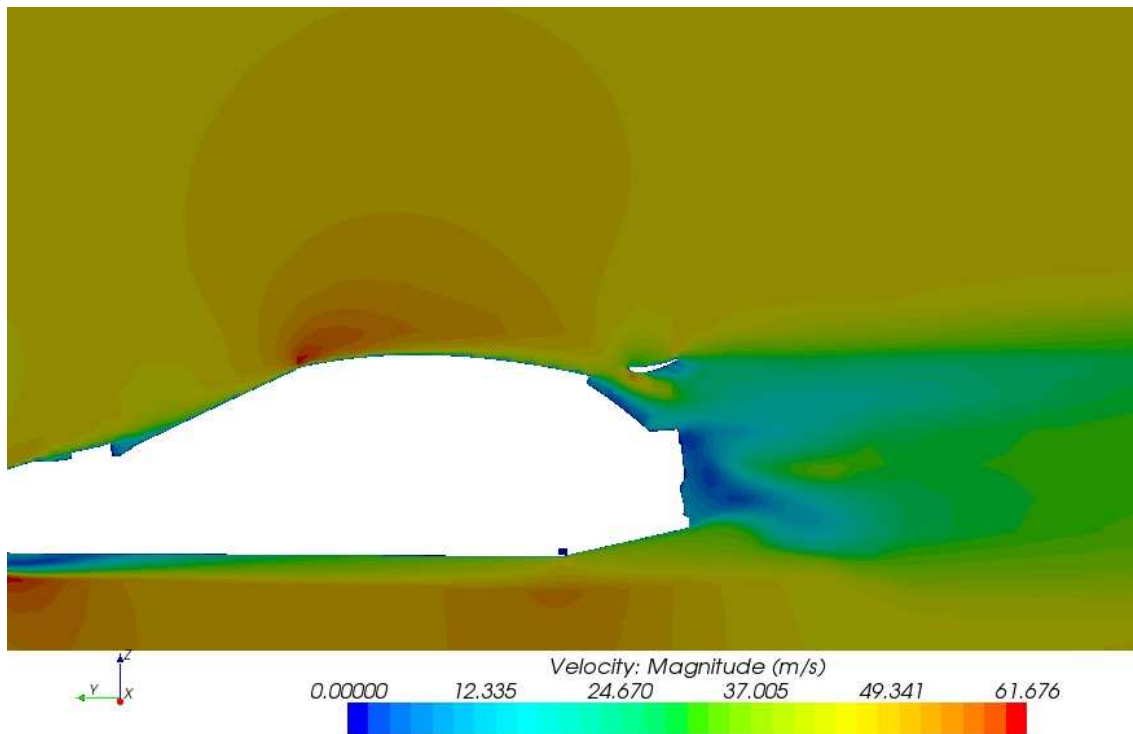
En la parte superior del alerón existen unas turbulencias producidas por la entrada de aire situada al principio del techo del vehículo.

1.9.3.6 DIFUSOR

Se muestran los mapas de velocidades y presiones en el difusor del vehículo.



Mapa de presiones del difusor



Mapa de velocidades paralelo al plano de simetría del vehículo

Se puede observar que el fluido se pega en las paredes en la sección central y así es capaz de extraer el aire del fondo del coche más rápidamente.

1.9.3.7 COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL AVANCE, Cx

El coeficiente de resistencia al avance o *drag* en ingles, se define como:

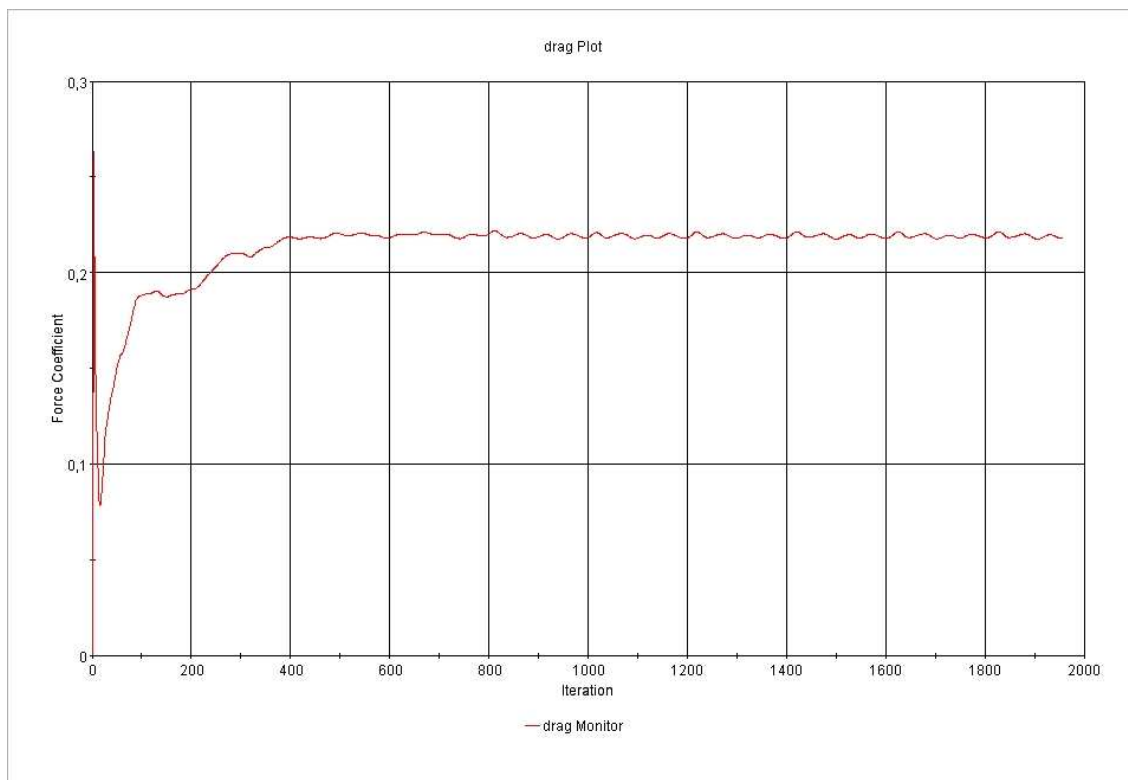
$$C_x = \frac{F \cdot 2}{\rho \cdot A \cdot v^2}, \text{ siendo}$$

ρ : densidad; 1,184 Kg/m³

A: área del vehículo; 1,642 m²

V: 47,22 m/s

Se tiene que el Cx, es aproximadamente 0.2181 (Dato obtenido de STAR-CCM+)

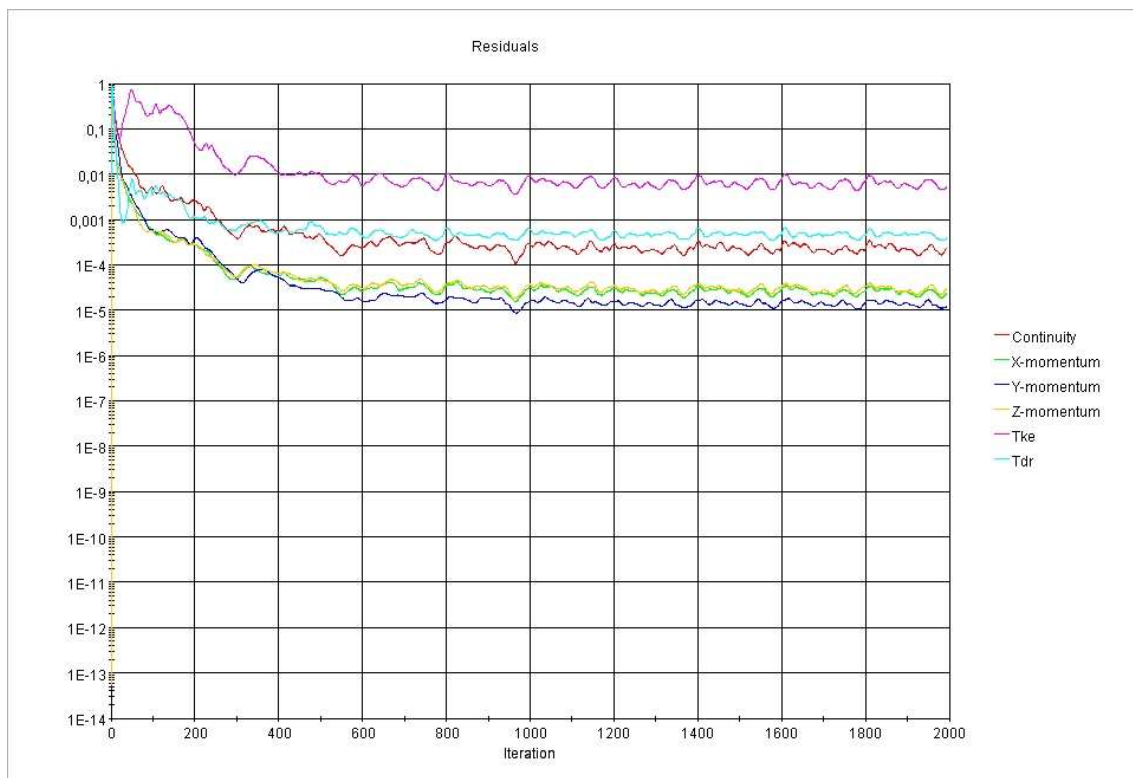


Coeficiente de resistencia al avance

1.9.4 VELOCIDAD 200 Km/h

El análisis ha sido lanzado a 200 km/h, se ha escogido esta velocidad para simular las rectas de los circuitos en las que se alcanzan fácilmente los 200 km/h e incluso velocidades más altas.

Se han hecho 2000 iteraciones hasta que el cálculo llegase a una condición estable. Mostrándose los residuos mínimos en la siguiente gráfica:

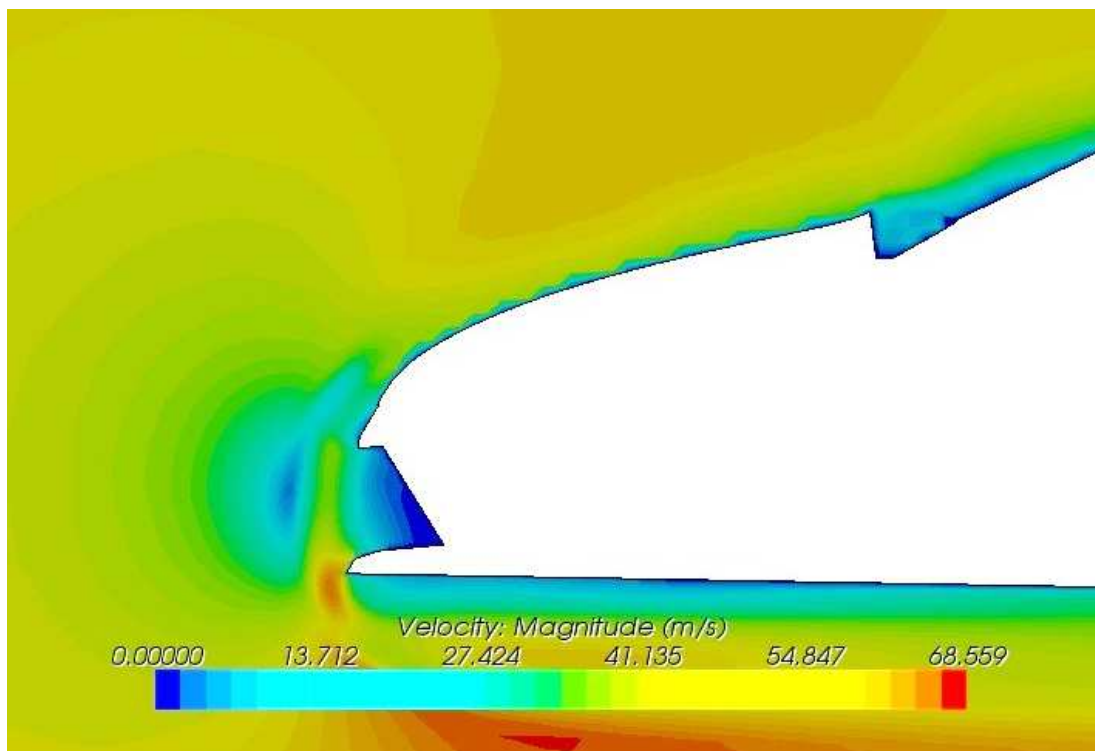
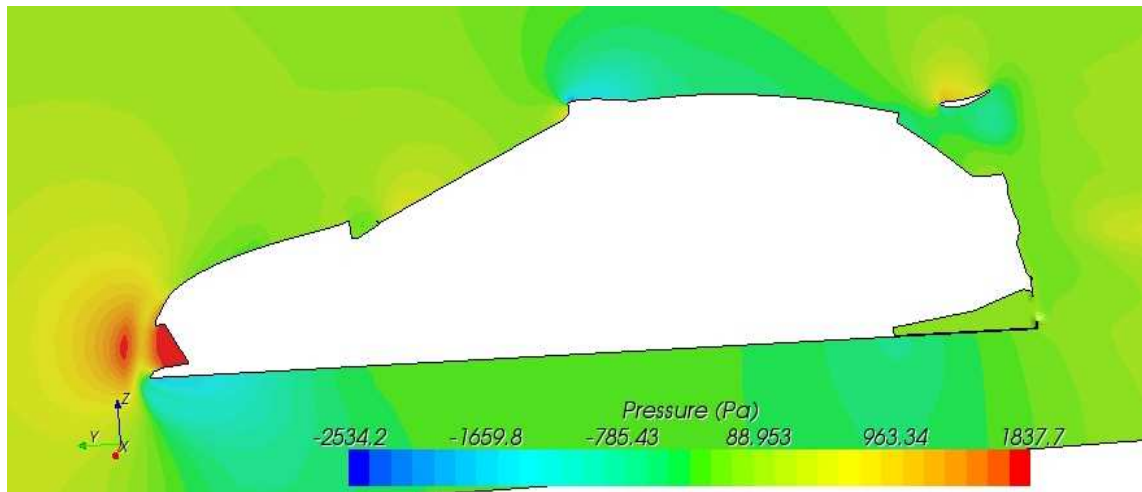


Residuales

Se muestran los diferentes mapas de presiones y velocidades sobre la geometría externa del vehículo.

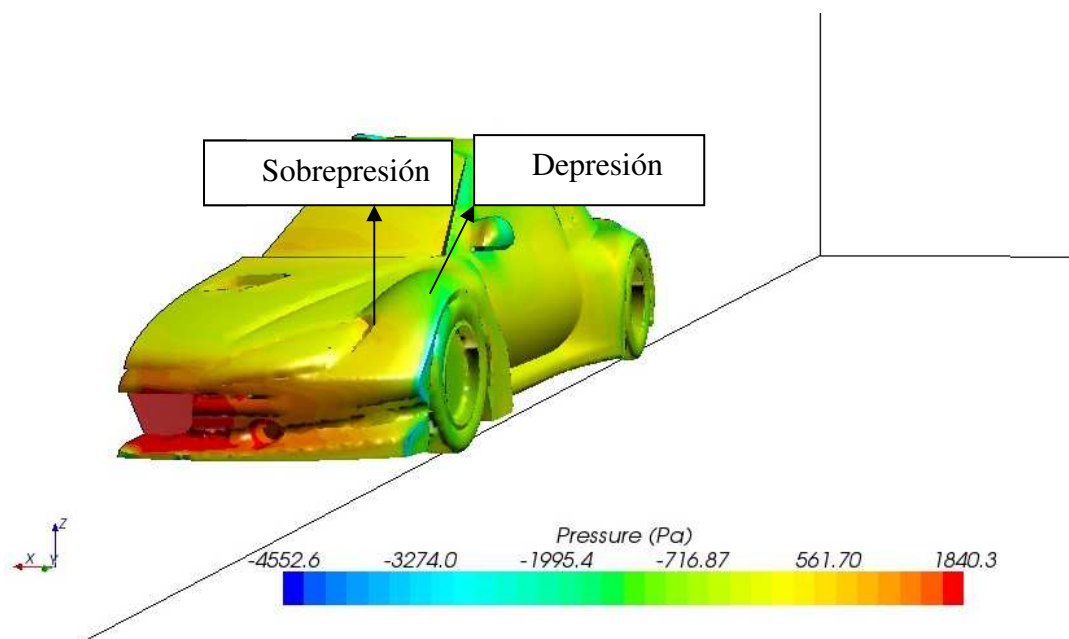
1.9.4.1 PARTE FRONTAL

A continuación se mostraran los mapas de presiones y velocidades en la parte delantera del vehículo.



Mapa presiones en el plano medio de la parte delantera del vehículo

Mapa de velocidades en la zona media del vehículo

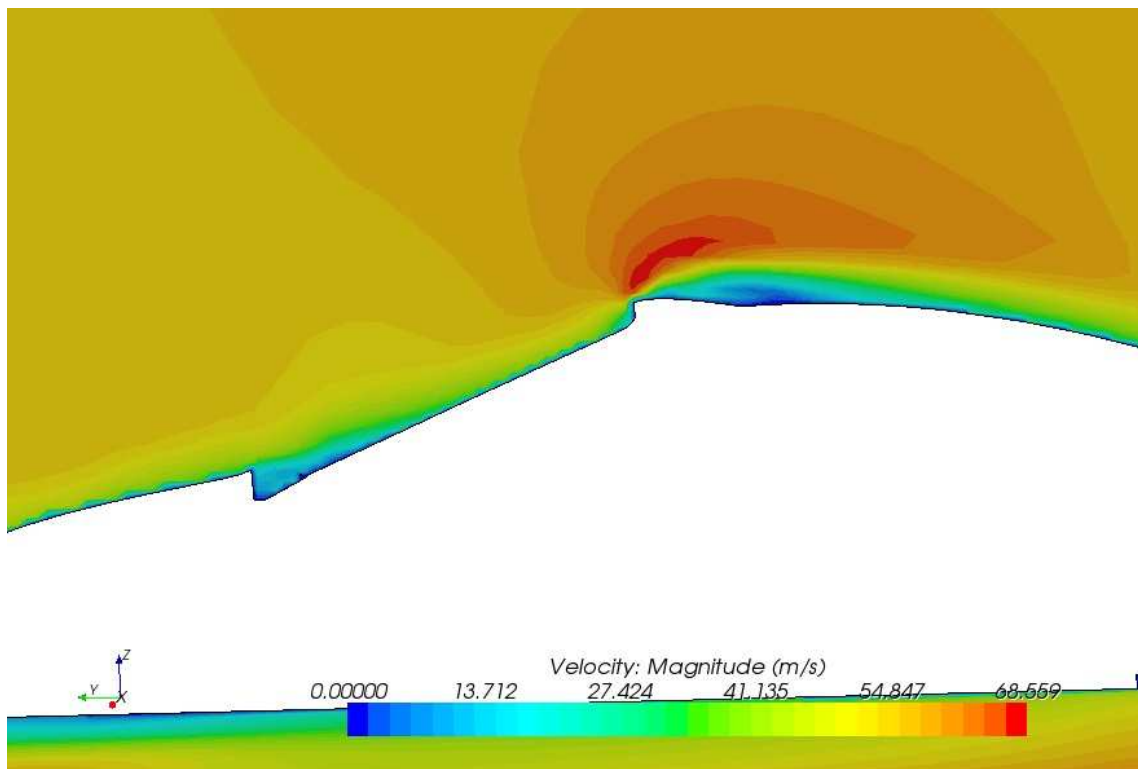


Mapa de presiones en la parte delantera del vehículo

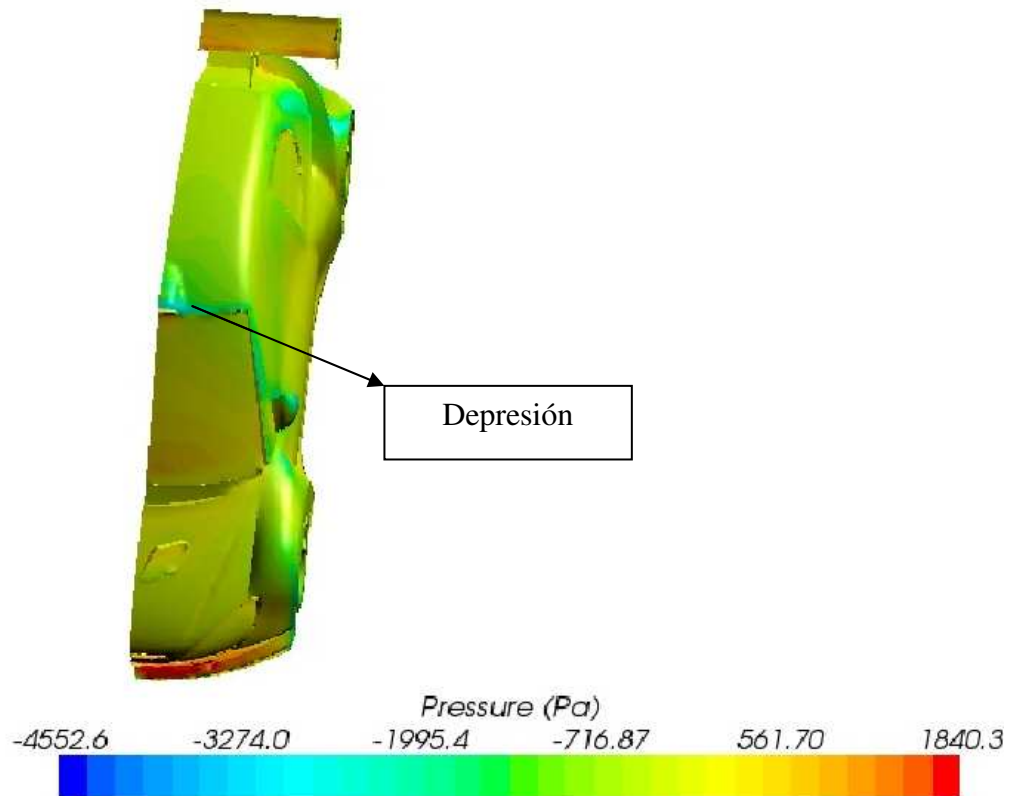
Existe una sobrepresión en el alojamiento del foco y una depresión sobre el paso de rueda.

1.9.4.2 PARTE SUPERIOR

En el siguiente apartado se muestran los mapas de velocidades y presiones en la parte superior del vehículo.



Mapa de velocidades en el plano medio de la parte superior del vehículo

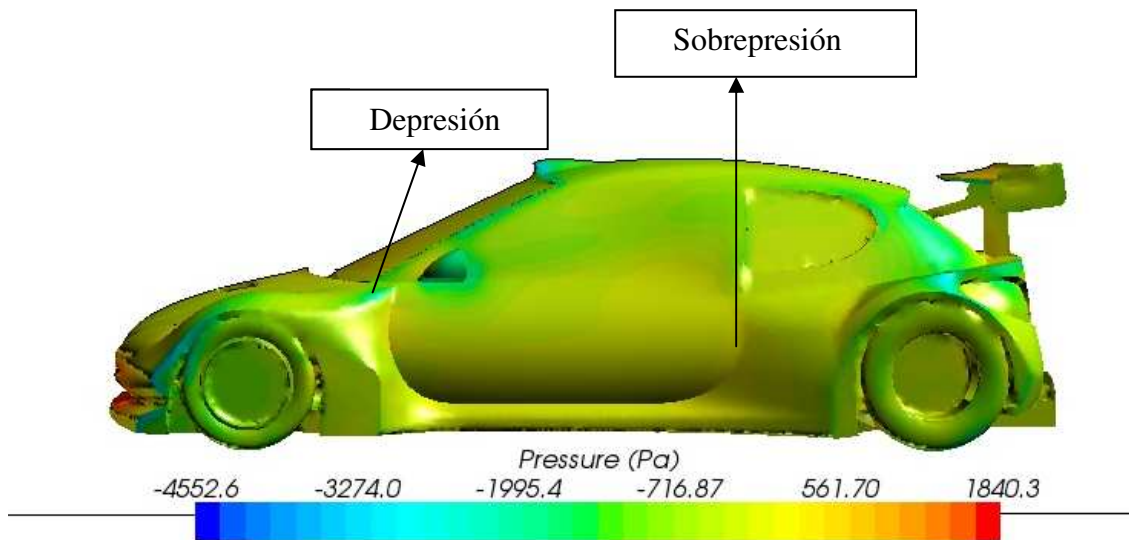


Mapa de presiones en la parte superior del vehículo

En lo que se refiere a la parte superior, hay una depresión entre la luna y el techo, es producido por el escalón existente entre los dos elementos.

1.9.4.3 PARTE LATERAL

Se van a mostrar los mapas de velocidades y presiones en la parte lateral del vehículo.

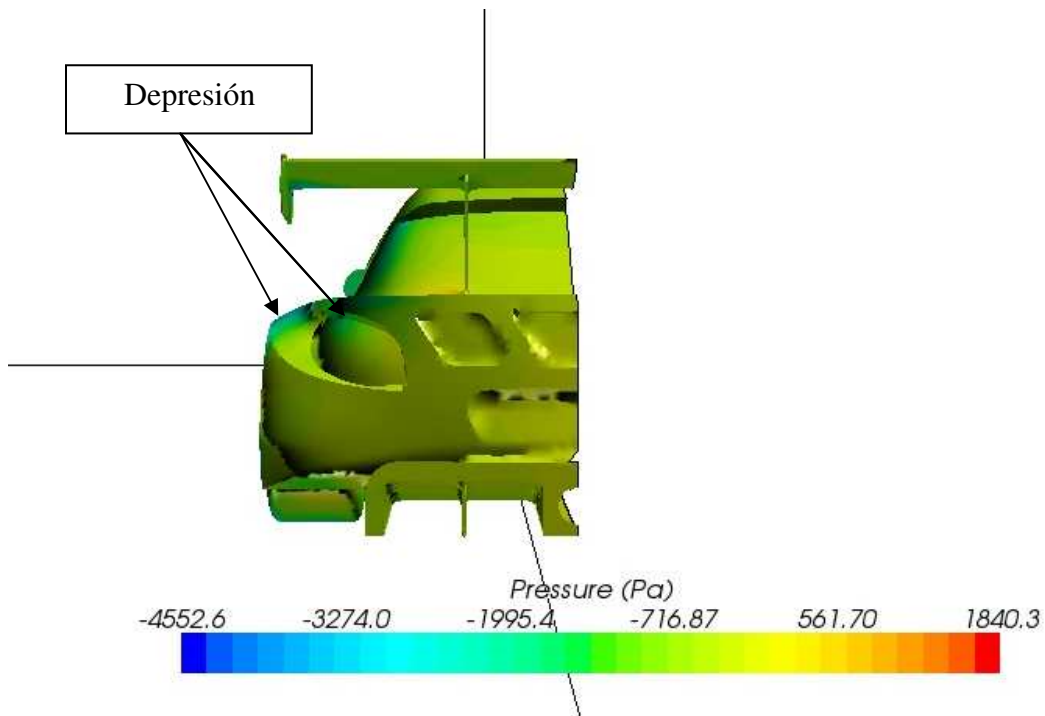


Mapa de presiones en la parte lateral del vehículo

En la zona que se refiere a la parte lateral del vehículo, han incrementado los valores de sobrepresión y depresión.

1.9.3.4 PARTE TRASERA

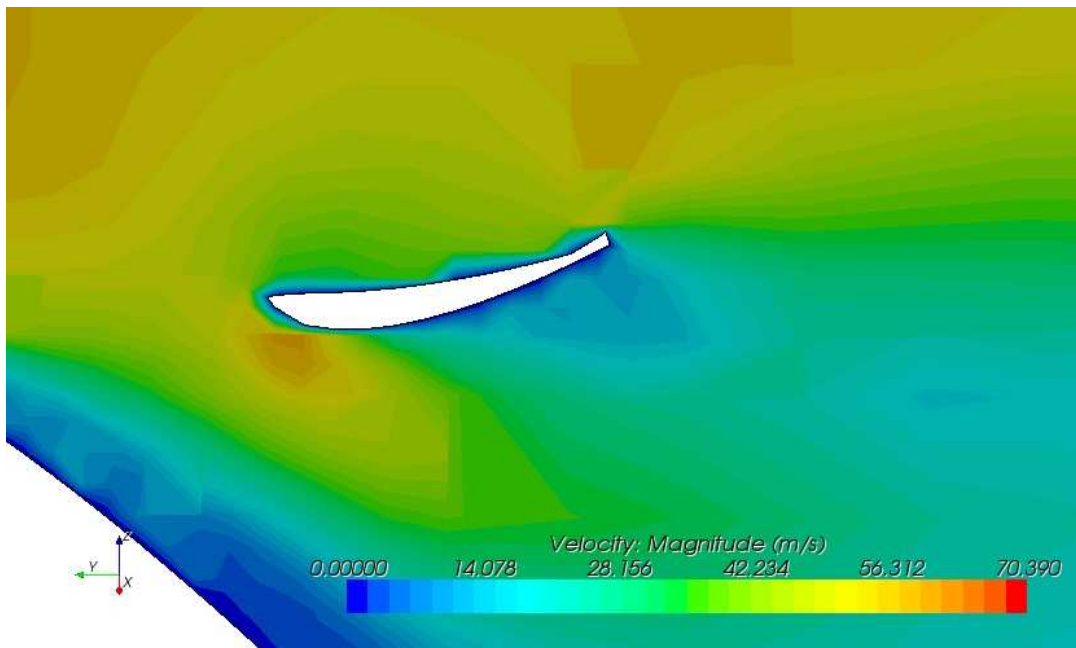
Se mostrarán los mapas de presión en la parte posterior del vehículo.



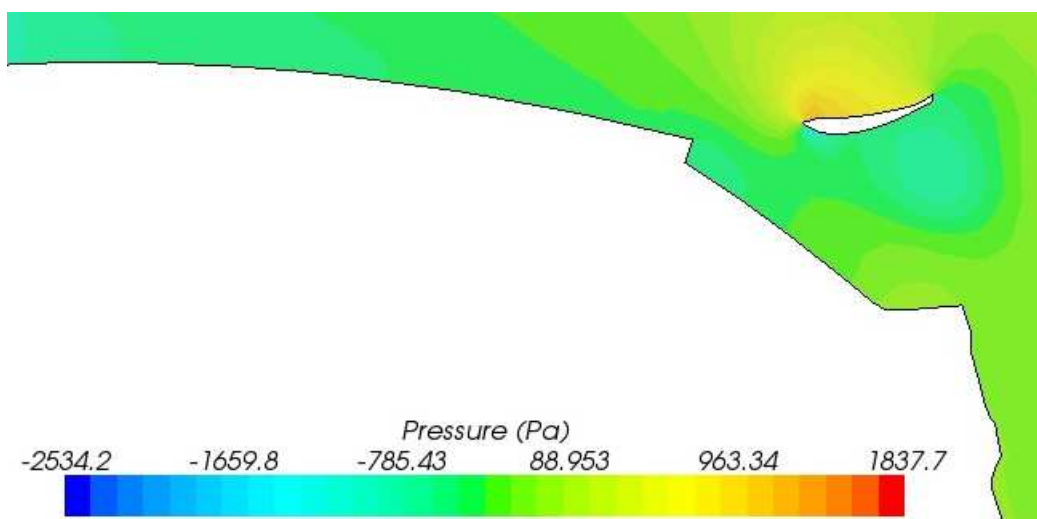
El paso de rueda, la zona próxima al foco y la columna del chasis, tiene una sobrepresión.

1.9.4.5 ALERÓN

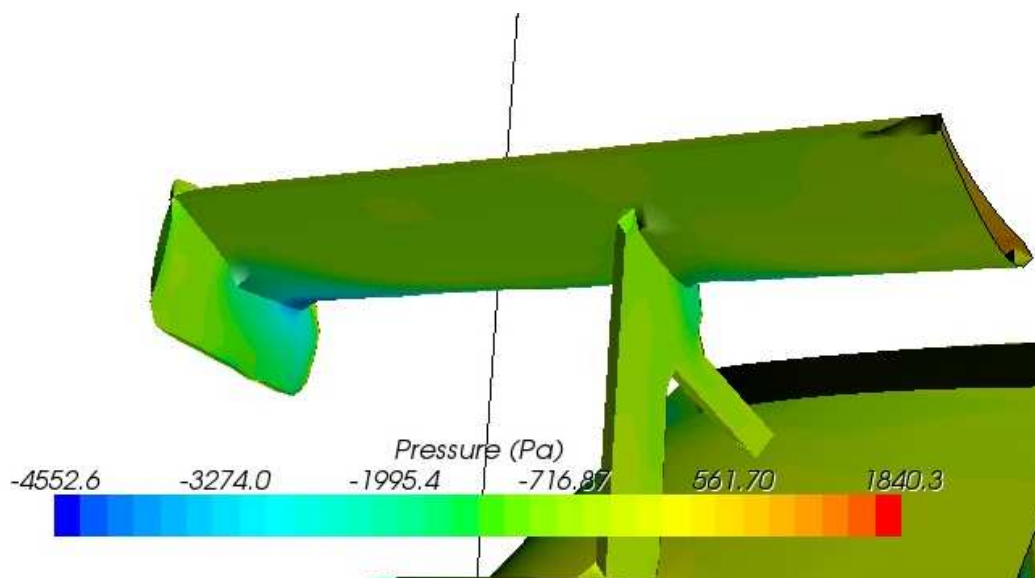
A continuación se mostrarán los mapas de presiones y velocidades en el alerón.



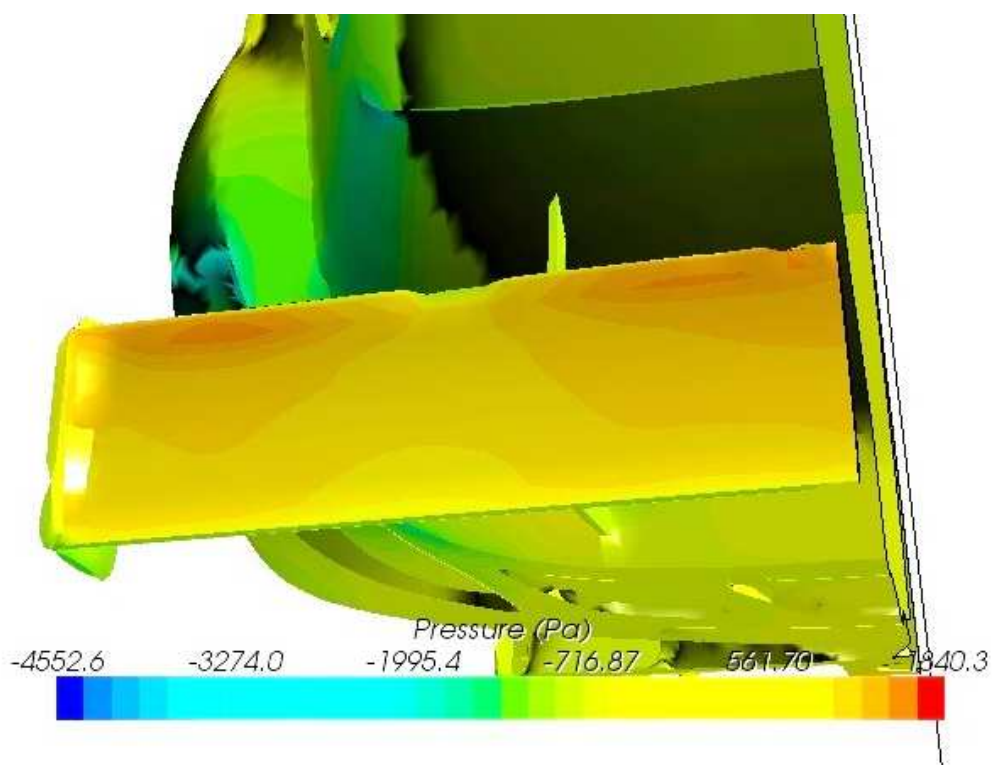
Mapa de velocidades en el plano medio del alerón.



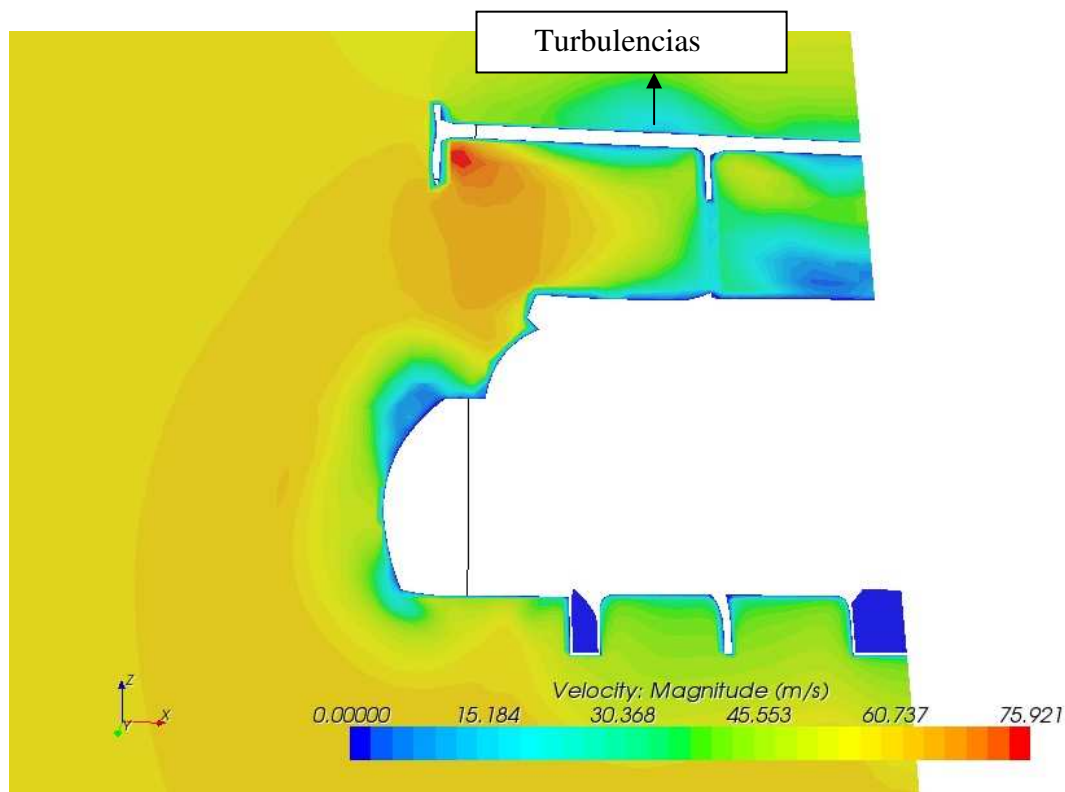
Mapa de presiones en la zona media del alerón



Mapa de presiones en la superficie posterior del alerón



Mapa de presiones en la superficie del alerón

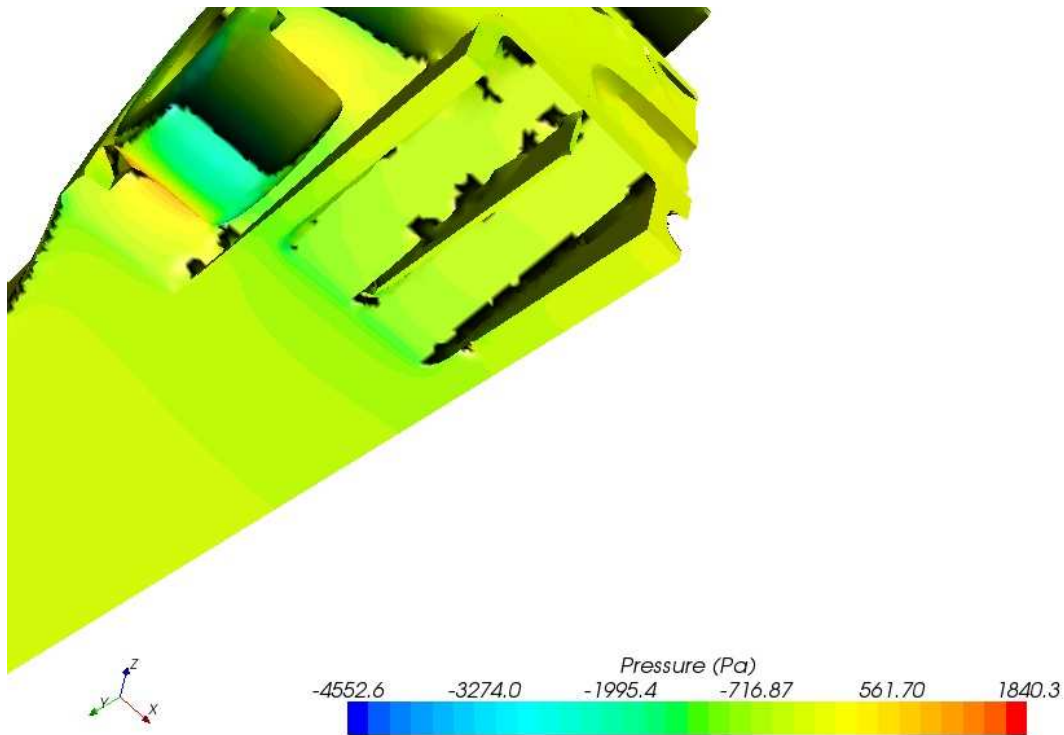


Mapa de velocidades perpendicular al plano de simetría situado en la mitad de la longitud del alerón

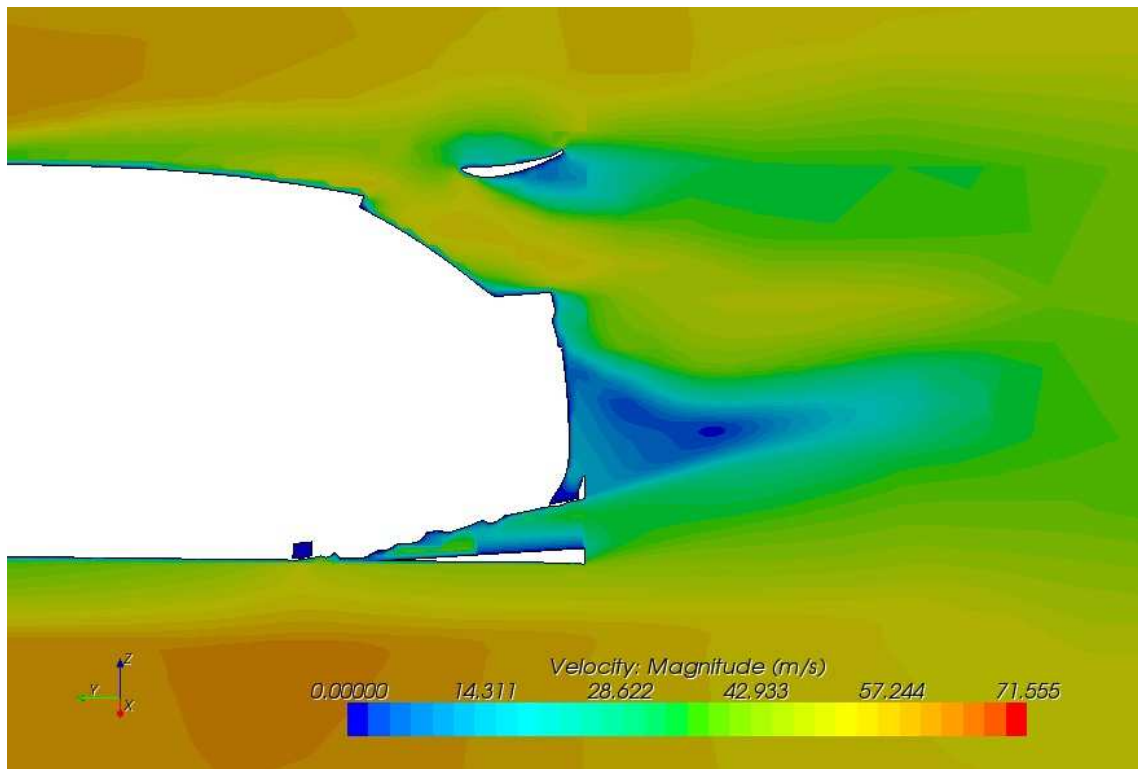
Se pueden ver las turbulencias que se crean en el alerón.

1.9.4.6 DIFUSOR

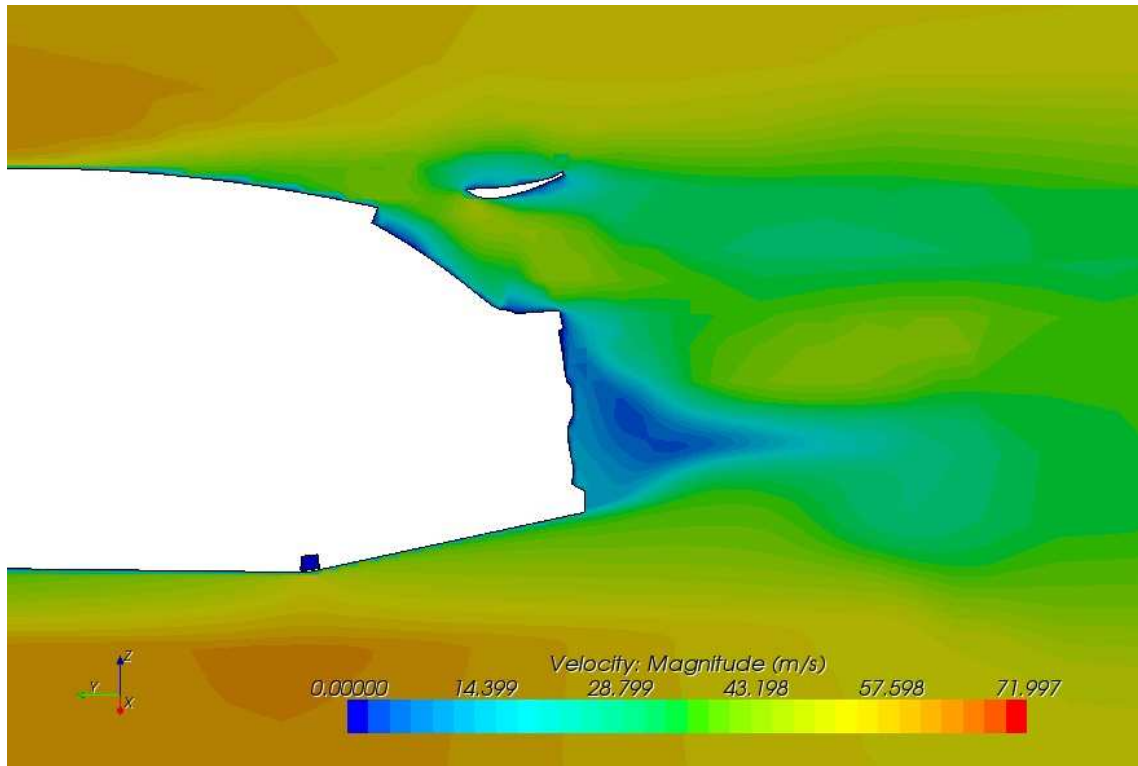
Se mostrarán los mapas de velocidades y presiones en el difusor del vehículo.



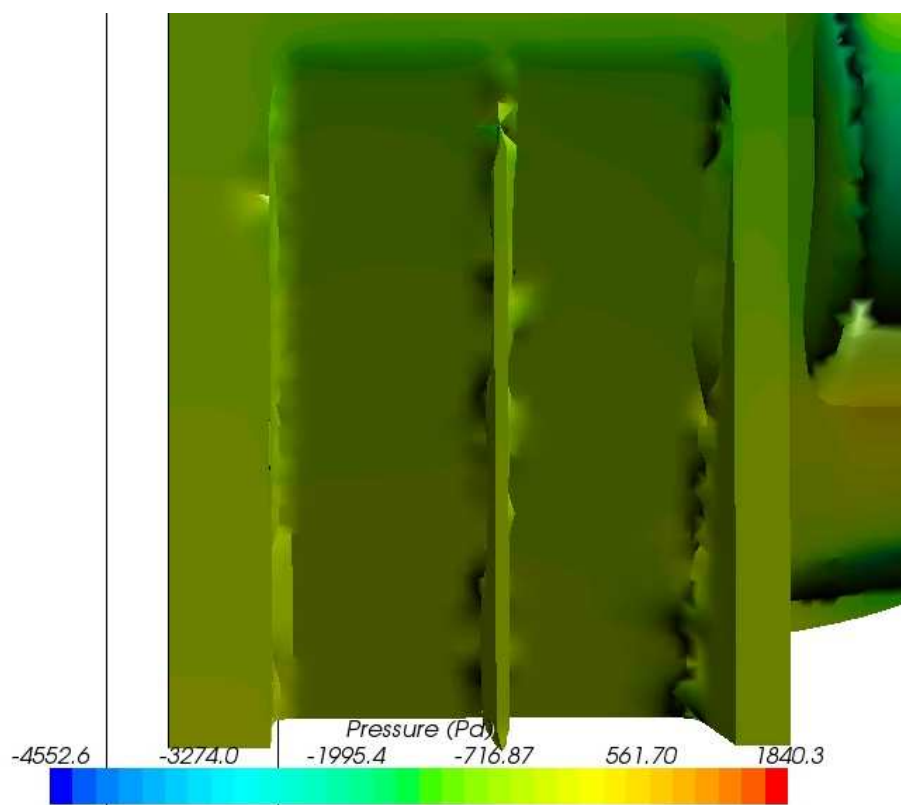
Mapa de presiones del difusor



Mapa de velocidades paralelo al plano de simetría del vehículo



Mapa de velocidades paralelo al plano de simetría del vehículo



Mapa de presiones en el fondo del vehículo.

Se puede observar que el fluido se pega en las paredes en la sección central. No hay desprendimiento de la capa límite.

1.9.4.7 COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL AVANCE, Cx

El coeficiente de resistencia al avance o *drag* en ingles, se define como:

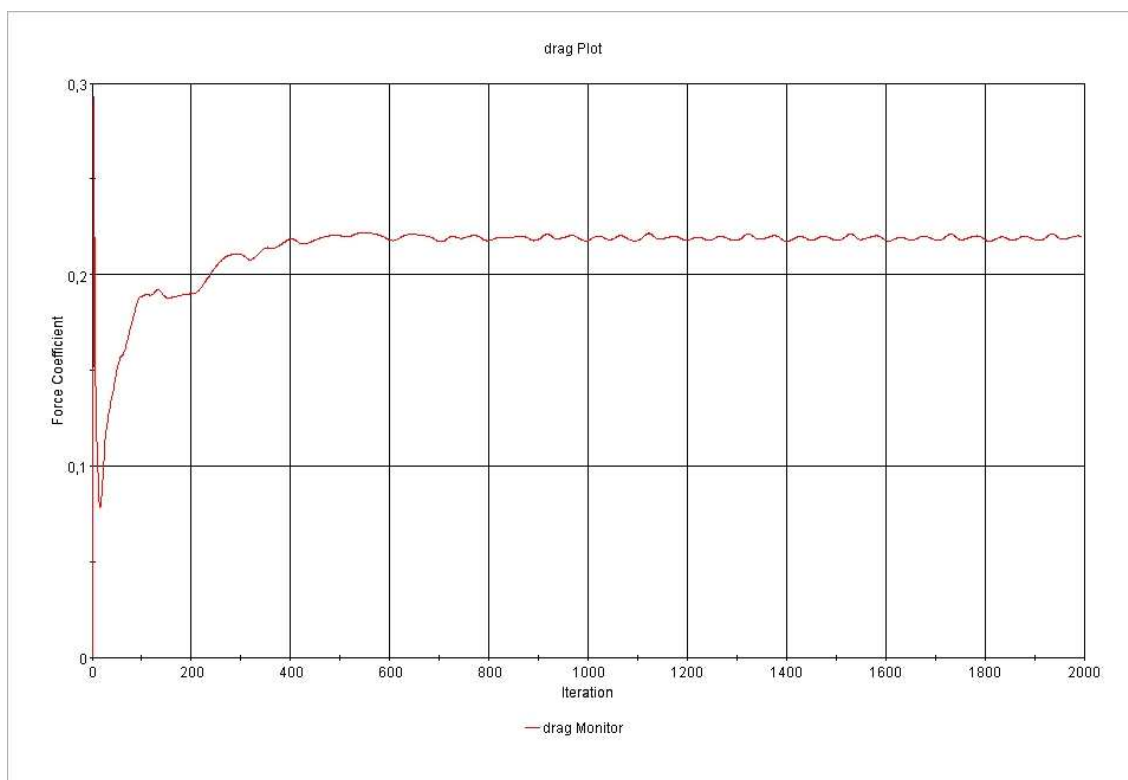
$$C_x = \frac{F \cdot 2}{\rho \cdot A \cdot v^2}, \text{ siendo}$$

ρ : densidad; 1,184 Kg/m³

A: área del vehículo; 1,642 m²

V: 55,55 m/s

Se tiene que el Cx, es aproximadamente 0.2188 (Dato obtenido de STAR-CCM+)

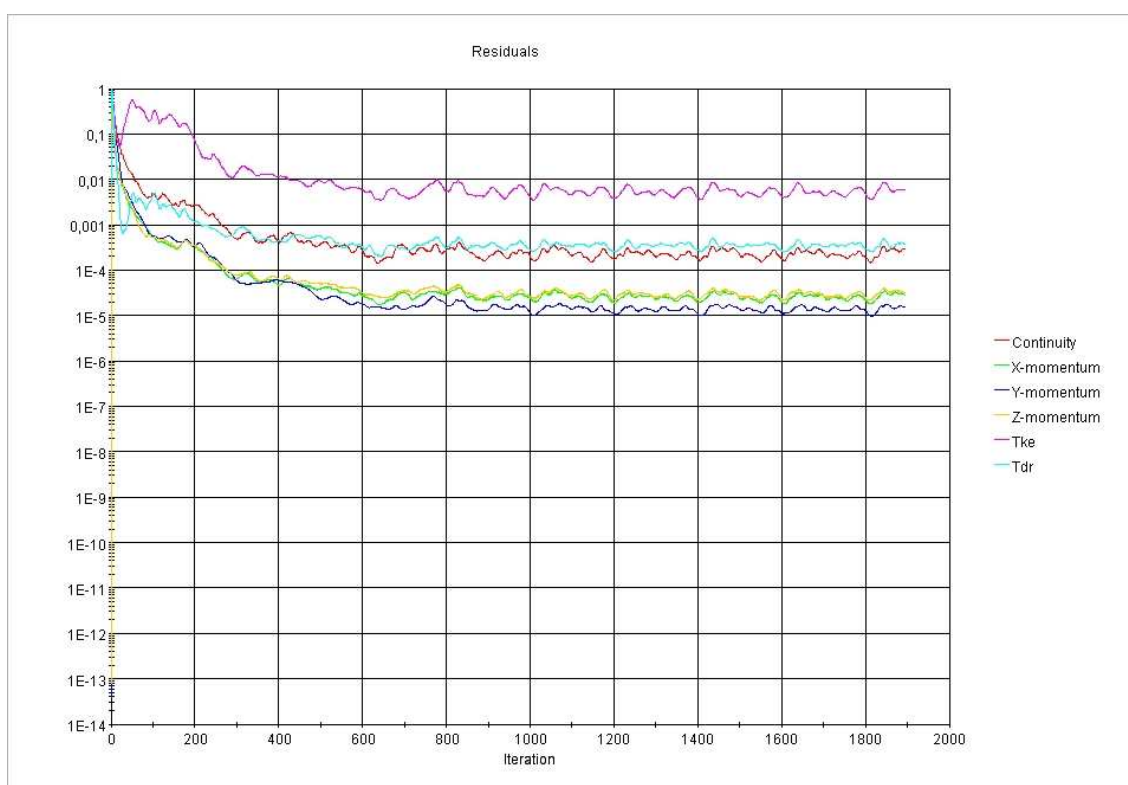


Coeficiente de resistencia al avance

1.9.5 VELOCIDAD 230 Km/h

El análisis ha sido lanzado a 230 km/h, se ha escogido esta velocidad, siendo la velocidad punta del vehículo.

Se realizaron tantas iteraciones como fueron necesarias hasta que el cálculo llegase a una condición estable. Para la velocidad de 230 Km/h se efectuaron 1893 iteraciones. Mostrándose los residuos mínimos en la siguiente gráfica:

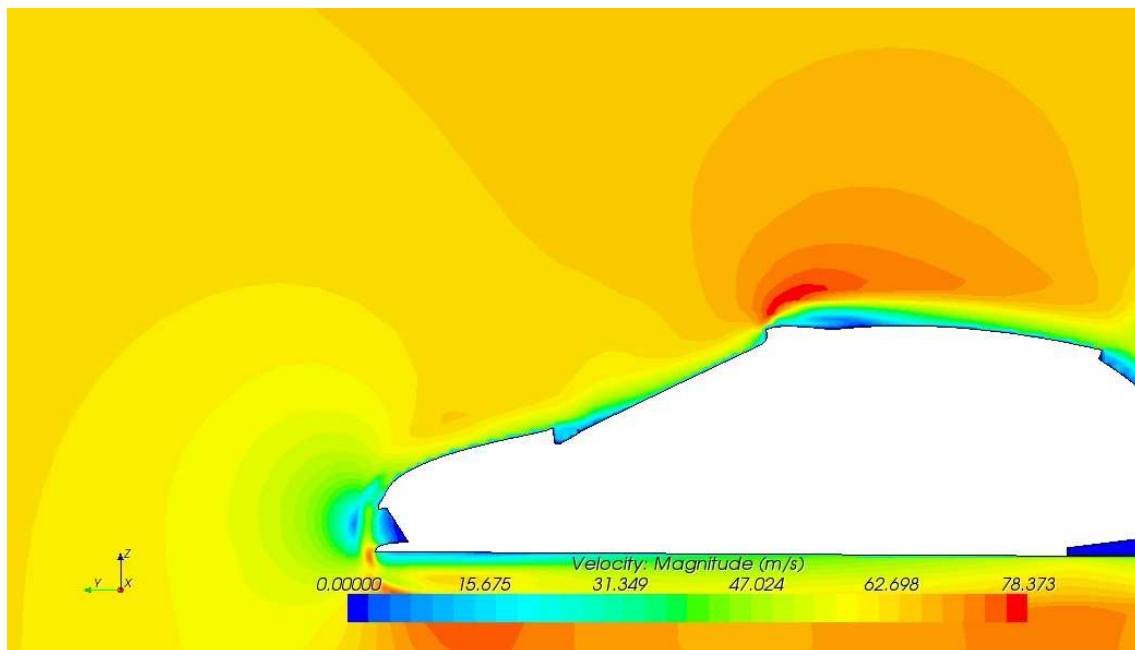


Residuales

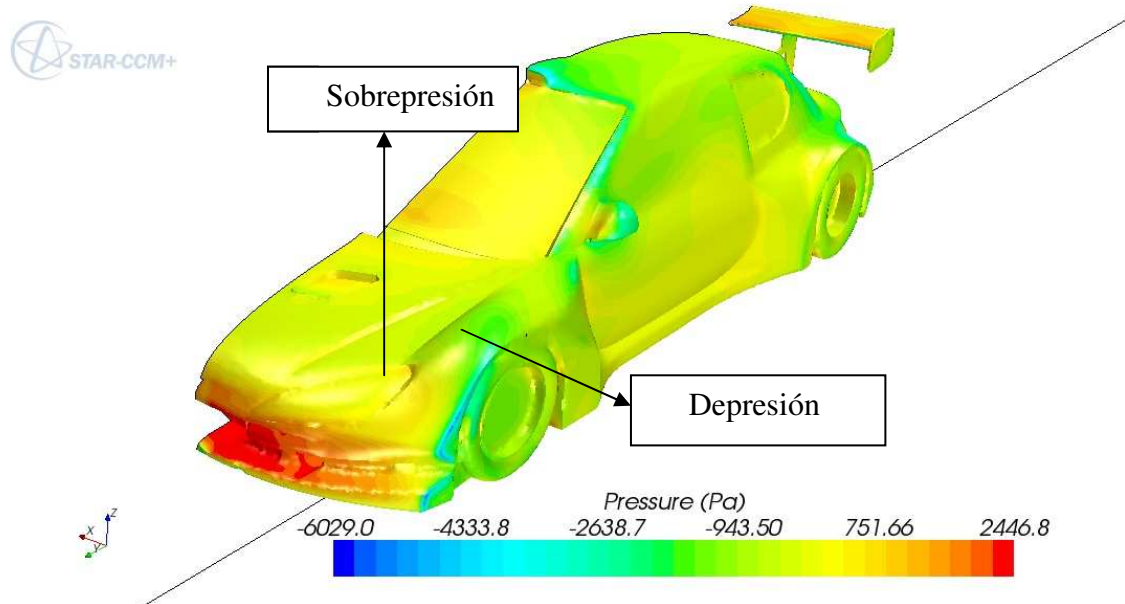
Como queda reflejado en la imagen a partir de 1000 iteraciones los datos convergen, sus variaciones se mueven sobre el mismo rango.

1.9.5.1 PARTE FRONTAL

A continuación se muestran los mapas de presiones y velocidades en la parte delantera del vehículo.



Mapa de velocidades en el plano medio de la parte delantera

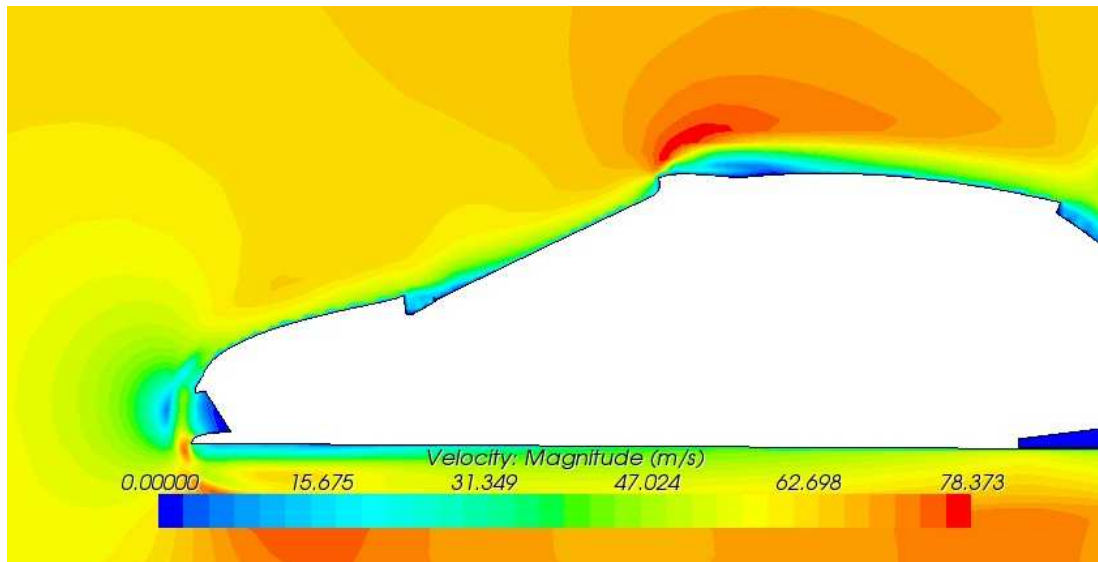


Mapa de presiones en la parte delantera del vehículo

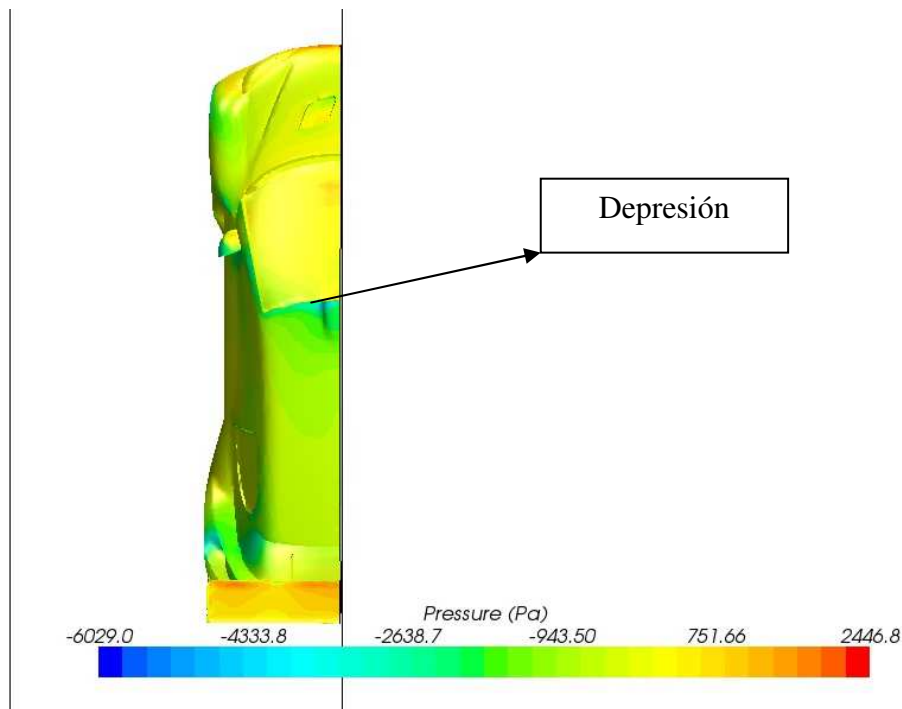
Como se puede observar en la imagen anterior se produce una sobrepresión en el alojamiento del foco y una depresión sobre el paso de rueda.

1.9.5.2 PARTE SUPERIOR

En el siguiente apartado se muestran los mapas de velocidades y presiones en la parte superior del vehículo.



Mapa de velocidades en el plano medio de la parte superior del vehículo

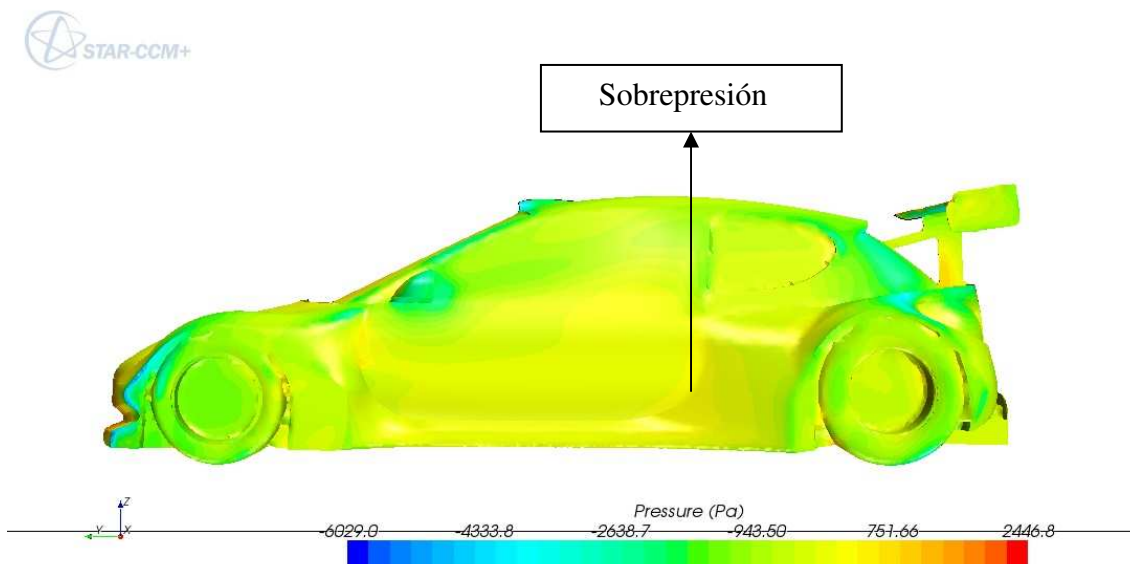


Mapa de presiones en la parte superior del vehículo

En lo que se refiere a la parte superior, hay una depresión entre la luna y el techo, es producido por el escalón existente entre los dos elementos.

1.9.5.3 PARTE LATERAL

Se van a mostrar los mapas de velocidades y presiones en la parte lateral del vehículo.

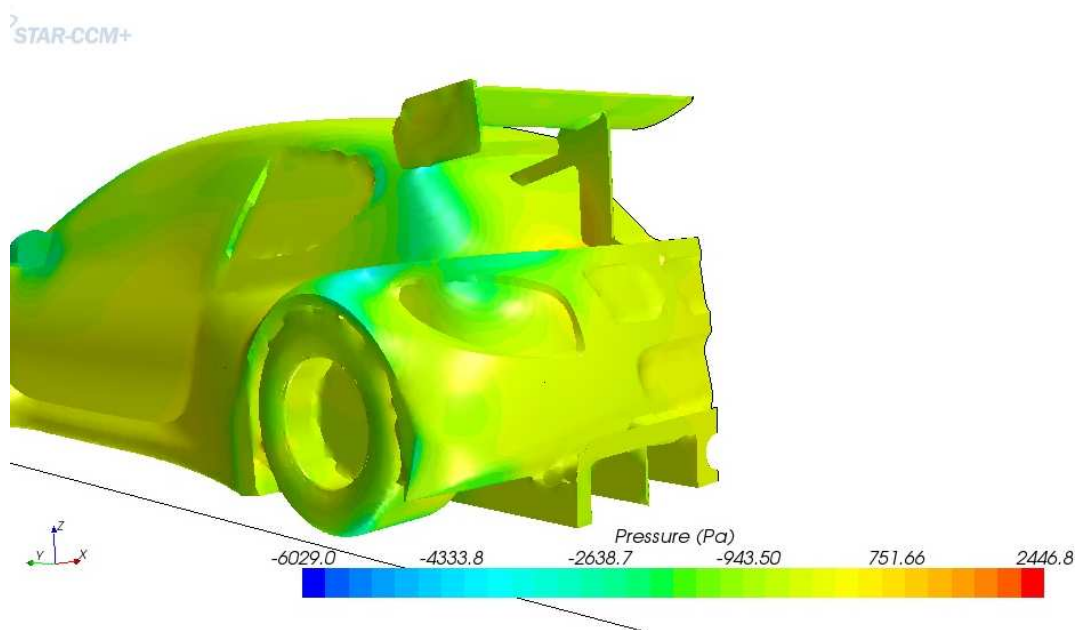


Mapa de presiones en la parte lateral del vehículo

En la zona que se refiere a la parte lateral del vehículo, tenemos una sobrepresión entre la puerta y el eje trasero. La zona entre el eje delantero y la puerta existe una depresión.

1.9.5.4 PARTE TRASERA

Se muestran los mapas de presión y velocidad en la parte posterior del vehículo. El alerón y difusor por tener una gran influencia aerodinámica se estudian por separado.

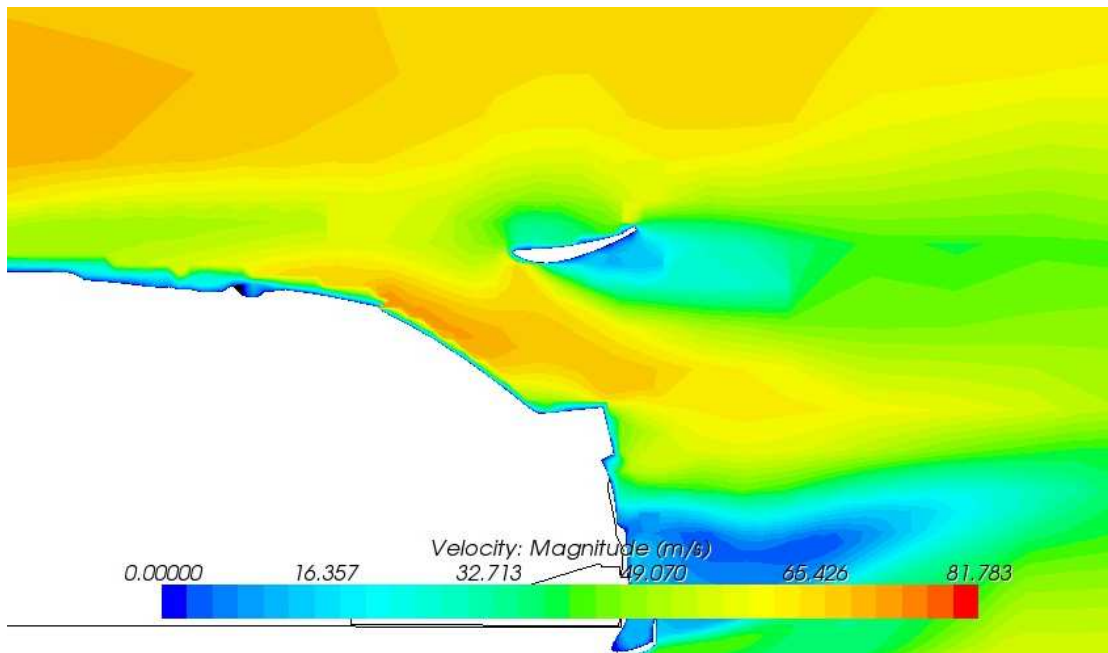


Mapa de presiones zona posterior del vehículo

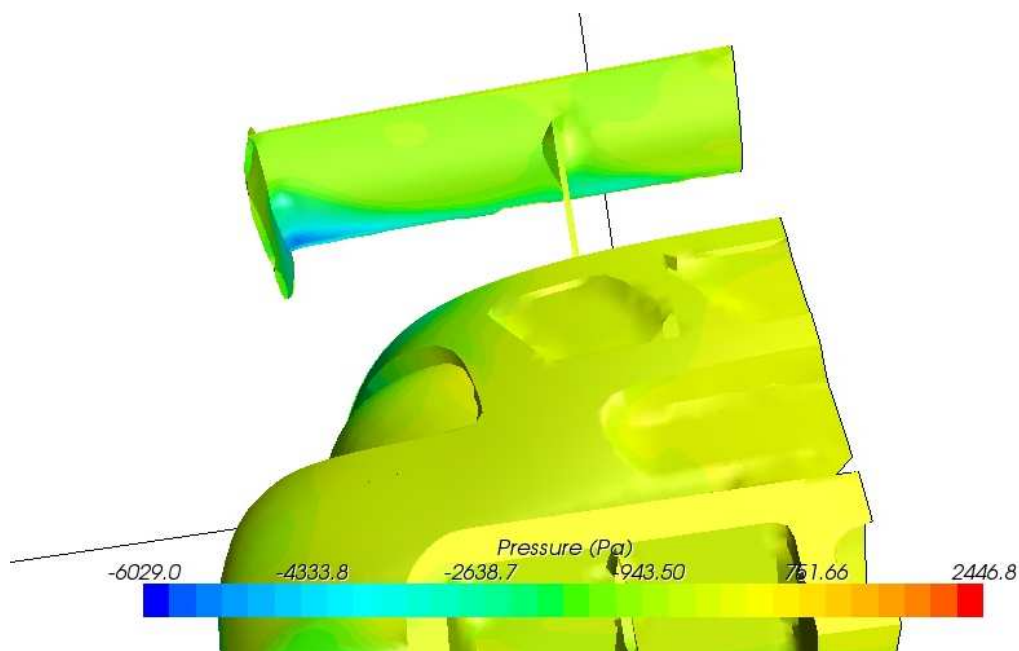
En lo que se refiere a la zona trasera del vehículo, se crea depresión en la zona de la carrocería por encima del foco y la zona del paso de rueda trasero.

1.9.5.5 ALERÓN

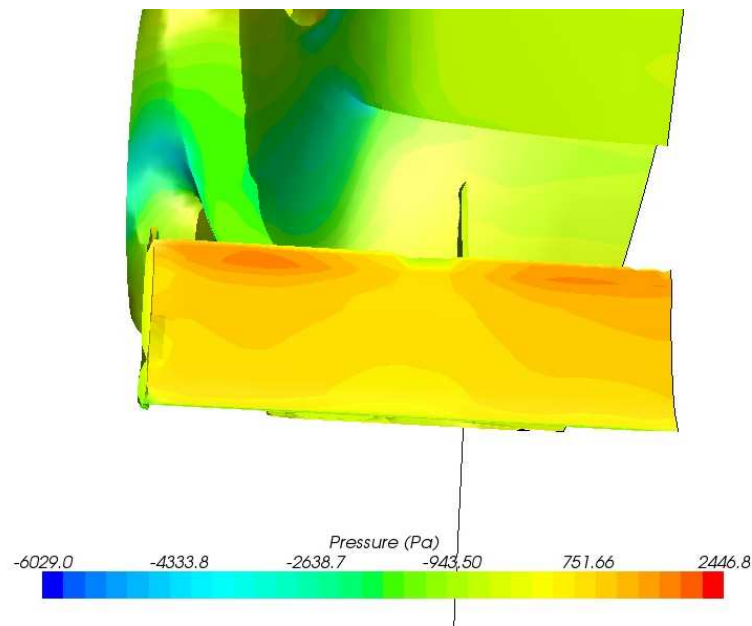
Se muestran los mapas de velocidades y presiones del alerón



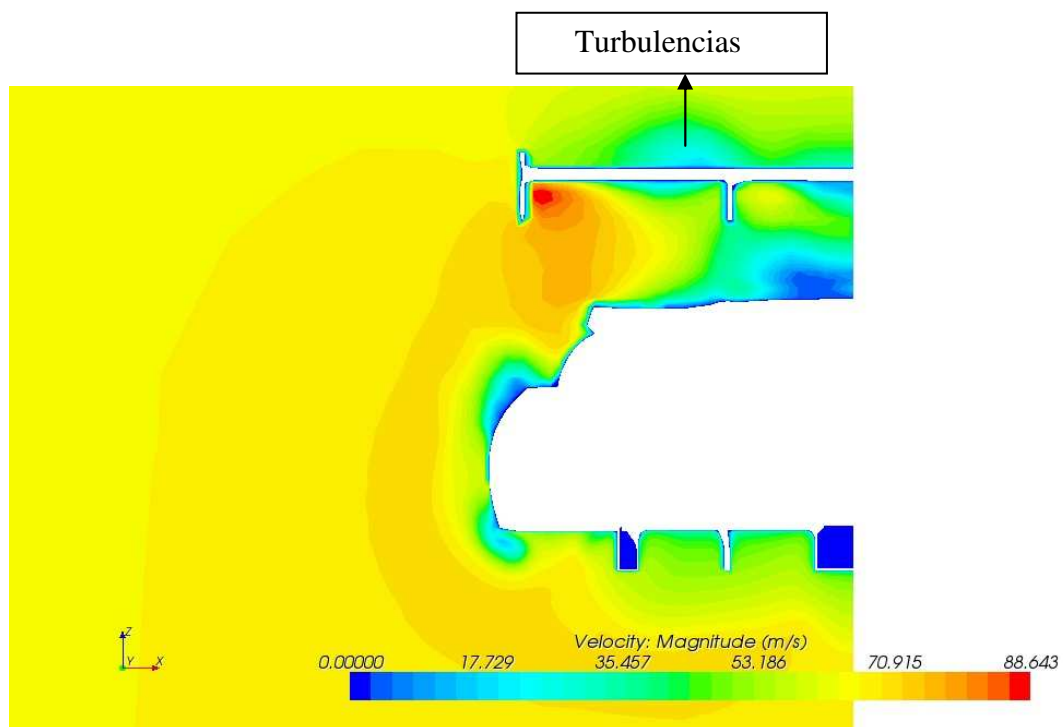
Mapa de velocidades en la zona del alerón en el plano medio.



Mapa de presiones en la superficie posterior del alerón



Mapa de presiones en la superficie del alerón

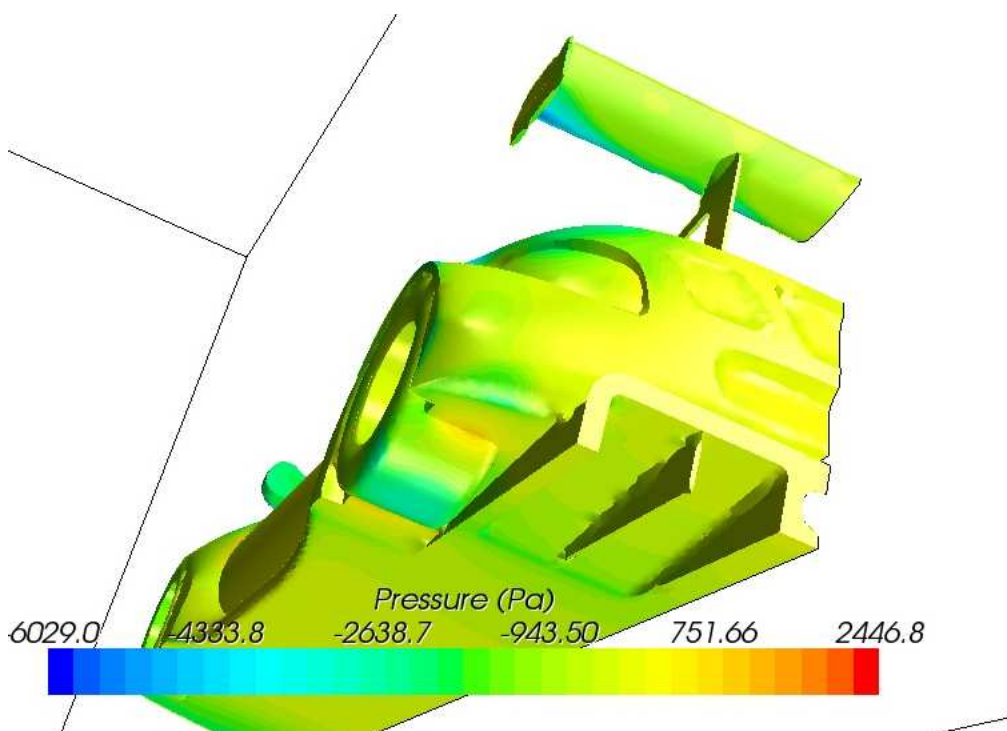


Mapa de velocidades perpendicular al plano de simetría situado en la mitad de la longitud del alerón

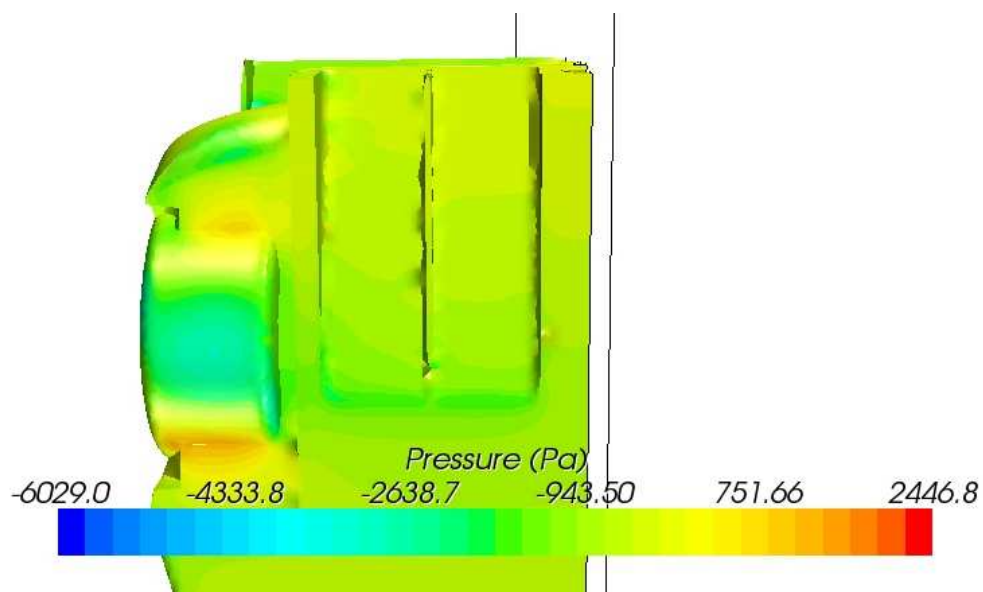
En lo que se refiere sobre el alerón, el flujo se adhiere a él salvo al final en el que tenemos un desprendimiento de la capa límite

1.9.5.6 DIFUSOR

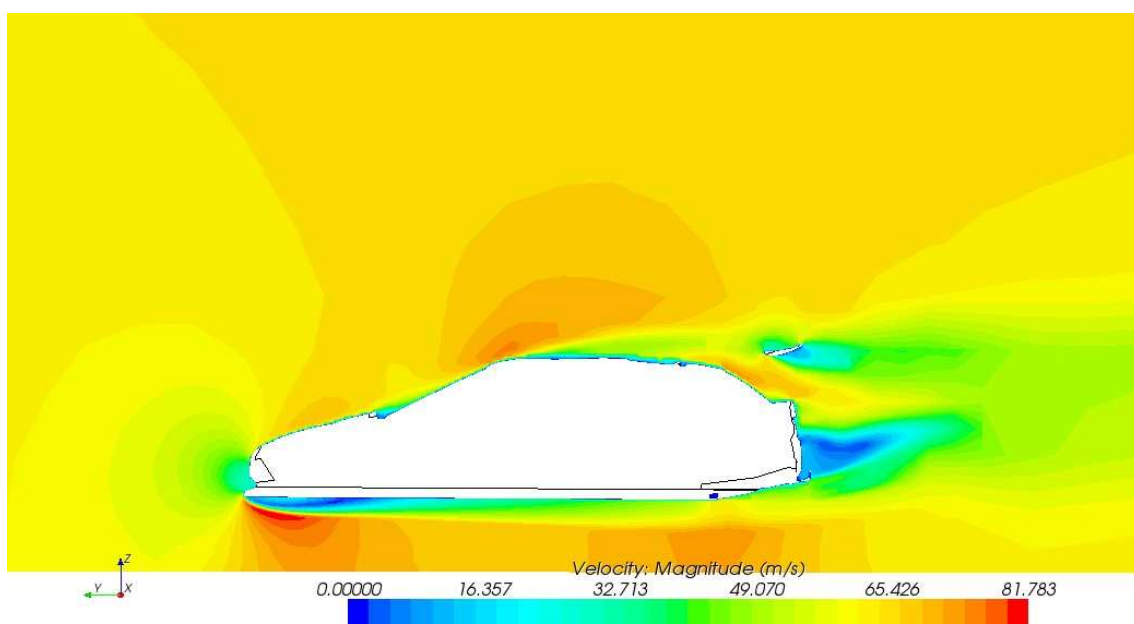
Se muestran los mapas de velocidades y presiones en el difusor del vehículo.



Mapa de presiones del difusor



Mapa de presiones en el fondo plano del vehículo



Mapa velocidades en un plano paralelo al plano de simetría en el difusor

1.9.5.7 COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL AVANCE, C_x

El coeficiente de resistencia al avance o *drag* en ingles, se define como:

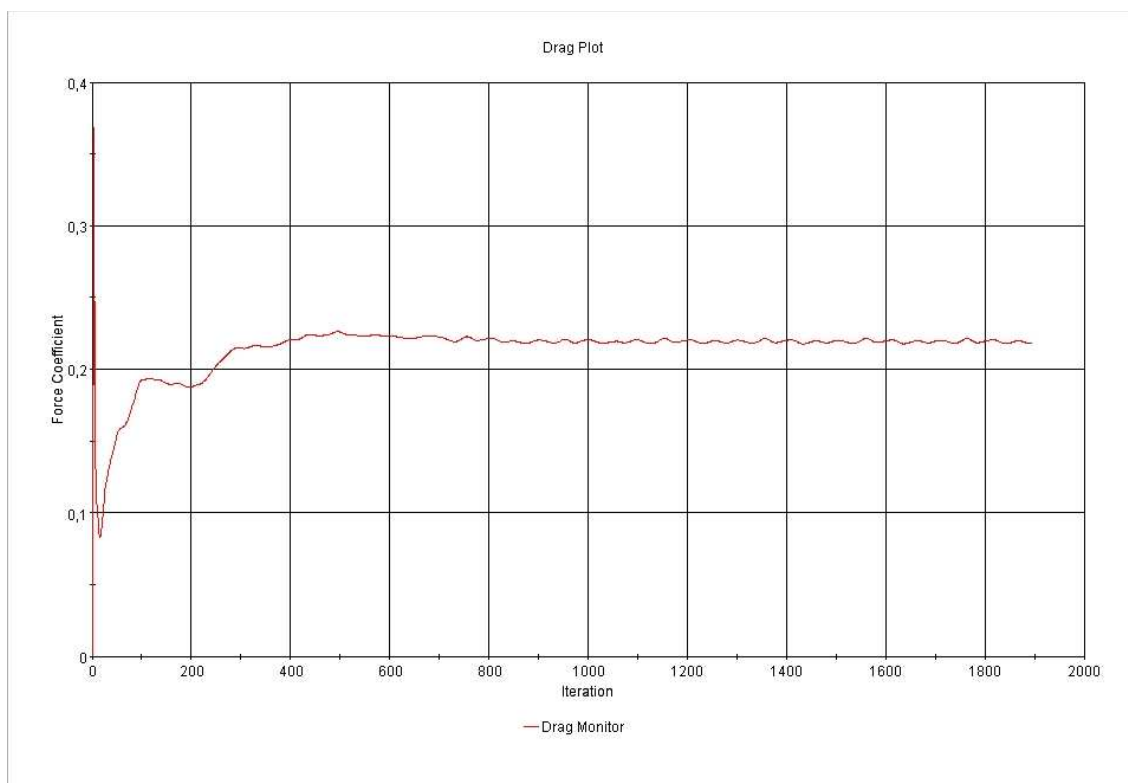
$$C_x = \frac{F \cdot 2}{\rho \cdot A \cdot v^2}, \text{ siendo}$$

ρ : densidad N; 1,184 Kg/m³

A: área del vehículo; 1,642 m²

V: 63.88 m/s

Se tiene que el C_x , es aproximadamente 0.2210 (Dato obtenido de STAR-CCM+)



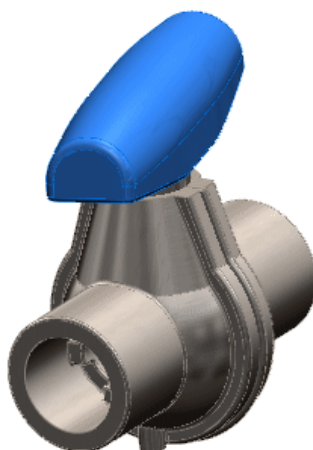
Coeficiente de resistencia al avance

1.10 CONCLUSIONES

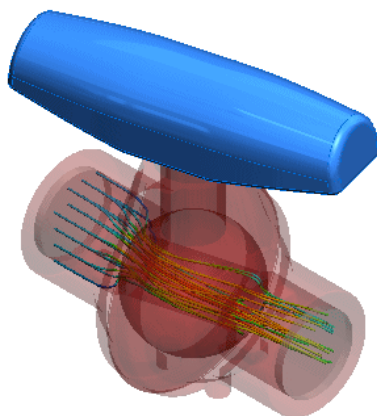
1.10.1 VALIDEZ SOLIDWORKS Y STAR-CCM+.

Como conclusiones finales de este proyecto fin de carrera podemos decir que el uso de software CAD y su paquete de simulación CDF no es útil para análisis aerodinámicos de vehículos de competición.

SolidWorks y su paquete de simulación FLOWXpress, sea creado con el fin de utilizarlo en canalizaciones así como dispositivos para efectuar derivaciones de fluidos, válvulas, codos, ya que un requisito importante en toda simulación de FlowXpress, se necesita saber el flujo másico o volumétrico a canalizar.

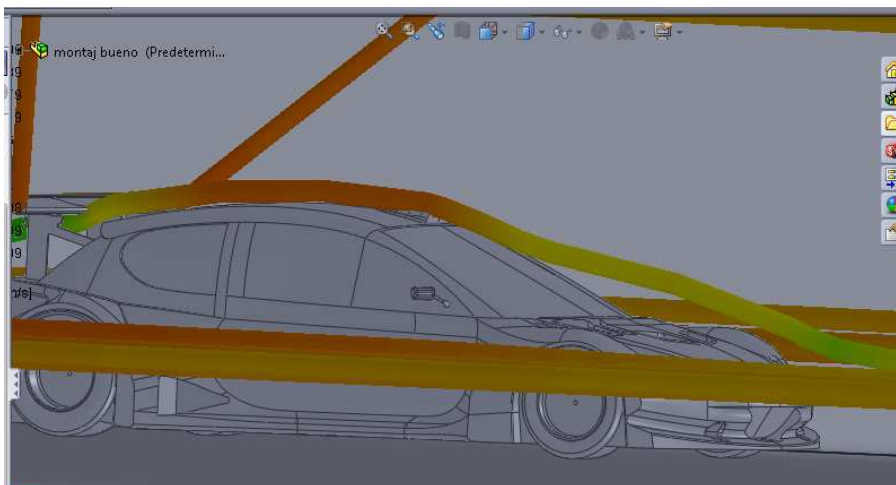


Válvula de bola



Análisis válvula de bola

El software especializado STAR-CCM+ a diferencia de SolidWorks, al ser realmente un programa diseñado y creado para análisis aerodinámicos nos aporta mapas de presiones, velocidades, temperaturas, fuerzas,... del fluido en las cercanías del vehículo, en cambio SolidWorks aportaba la velocidad del aire por medio de una representación tridimensional en diferentes tonalidades.



Simulación SI con SolidWorks

Todo proceso CFD, posee tres fases: la primera es la que atañe a la creación de la geometría; la segunda fase se refiere al mallado del modelo, y la tercera y última, corresponde a la programación de la simulación y el análisis de los resultados. El STAR-CCM+ al ser un programa puramente de CFD, sigue todos los pasos perfectamente consiguiendo unos resultados excepcionales.

SolidWorks al igual que el STAR-CCM+ sigue las tres fases pero de un modo mucho más sencillo, la primera fase la realiza correctamente creando la geometría y validando que sea correcta. A diferencia con el STAR-CCM+, en el cual se elige el tipo de mallado más adecuado a tu simulación, calidad de malla, es decir, tamaño de las celdas. En cambio SolidWorks crea automáticamente la malla.

Con el fin de ver la gran disparidad entre ambos programas, mientras SolidWorks crea el mallado y realiza los cálculos pertinentes han pasado unos 45 min. STAR-CCM+ en cambio tarda una media hora en crear una malla, aunque este tiempo dependerá de la definición que se le dé. A la hora de calcular dependiendo de la cantidad de nodos y de la geometría dependerá el tiempo invertido, pero en lo que afecta a las simulaciones de este Proyecto Fin de Carrera han durado para 1400 iteraciones alrededor de las 9 horas

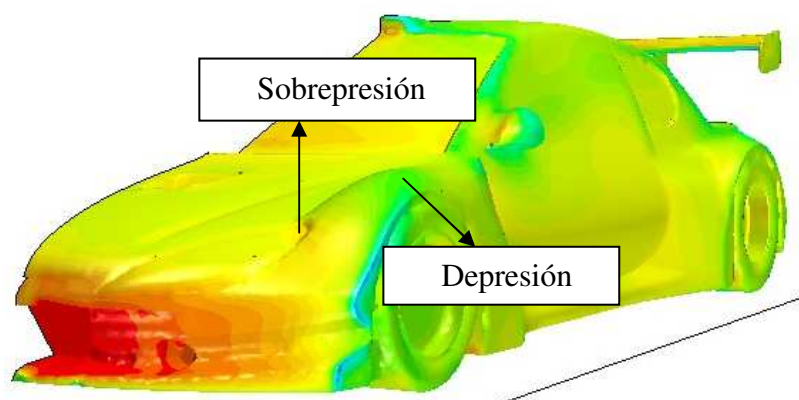
Como conclusión final indicar que para cualquier análisis lo mas recomendado será elegir los programas recomendados, aunque en ocasiones programas sencillos nos concebirán intuiciones de los resultados que debemos obtener.

1.10.2 CONCLUSIONES AERODINÁMICAS

Como se ha podido ver en el capítulo de resultados para todas las velocidades existen en los mismas partes de la carrocería sobrepresión o depresión.

Realizaremos las conclusiones dividiendo el coche en las mismas partes que el apartado de resultados y sacaremos las conclusiones para las diferentes velocidades.

FLUJO EN LA PARTE CENTRAL.



Mapa presiones parte central

En lo que se refiere a la parte de delantera y como se vio en el apartado de resultados, existe una sobrepresión alojada en el foco y una depresión en el paso de rueda.

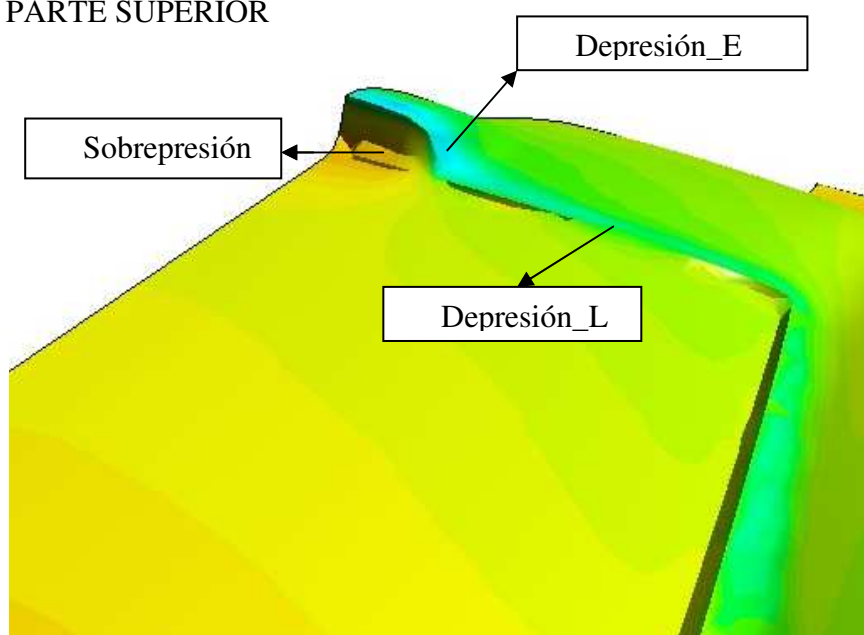
La eliminación del alojamiento para el foco utilizando para ello una superficie siguiendo la línea de la carrocería, podría eliminar la sobrepresión generada. Para solucionar el problema de la depresión bastaría con reducir el paso de rueda, e incluso realizando una superficie de forma gradual desde el morro hasta el final del paso de rueda eliminando la cavidad del foco.

Según amentamos las velocidades las sobrepresiones generadas son mayores y las depresiones disminuyen. Se observa en la siguiente tabla el valor de sobrepresión en el alojamiento del foco y el valor de la depresión en el paso de rueda para las distintas velocidades.

VELOCIDAD (Km/h)	SOBREPRESIÓN(Pa)	DEPRESIÓN(Pa)
108	167	-391
140	280	-659
170	413	-974
200	562	-1356
230	752	-1791

Como queda reflejado en la tabla al aumentar la velocidad los valores de las presiones aumentan (en valor absoluto). Así pues cuanto mayor velocidad tenga el vehículo, mayor resistencia aerodinámica al avance.

PARTE SUPERIOR



Mapa de presiones parte superior

Se denomina depresión_E a la depresión situada a en los alrededores de la entra de de aire y depresión_L a la depresión alojada en la zona de transición luna y techo del coche.

VELOCIDAD (Km/h)	SOBREPRESIÓN (Pa)	DEPRESIÓN_E (Pa)	DEPRESIÓN_L (Pa)
108	287	-764	-377
140	380	-1286	-772
170	512	-1898	-1100
200	661	-2634	-1465
230	851	-3485	-1791

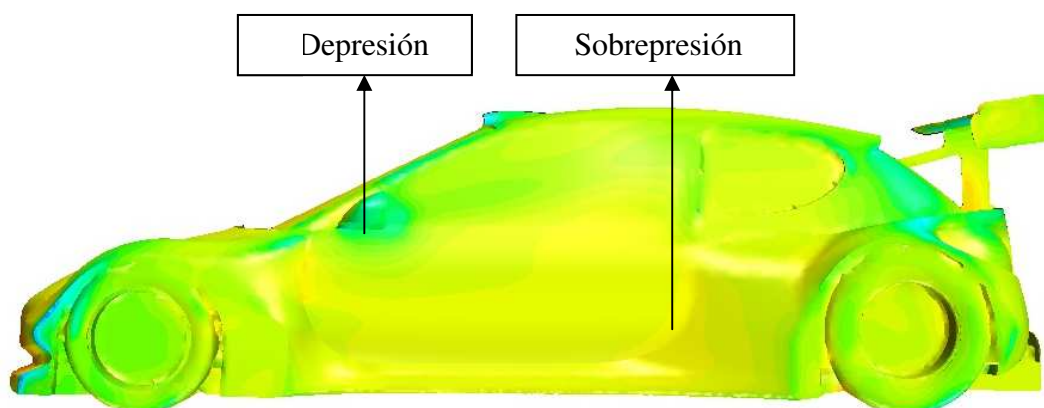
En la entrada de aire del motor se crea una gran sobrepresión, eso es así ya que es beneficioso para el rendimiento del motor. Cuanta mayor densidad de aire entre, mayor combustible quemará, obteniendo mayor potencia. Como queda reflejado en el cuadro anterior a mayor velocidad mayor presión, es decir, existe una mayor fluidez del aire al motor.

Las depresiones existentes denominadas como depresión_E y depresión_L aumentan al aumentar la velocidad. Estos valores pueden reducirse de la siguiente forma:

A la depresión creada en la zona de transición entre luna y el techo, haciendo que ambas partes del vehículo coincidieran eliminando el escalón, se conseguiría aumentar la presión y con ello ganar carga aerodinámica, es decir, agarre.

La depresión causada por los extremos y encima de la toma de aire, podría reducirse suavizando los extremos de la toma de aire.

PARTE LATERAL



Mapa de presiones parte lateral del vehículo

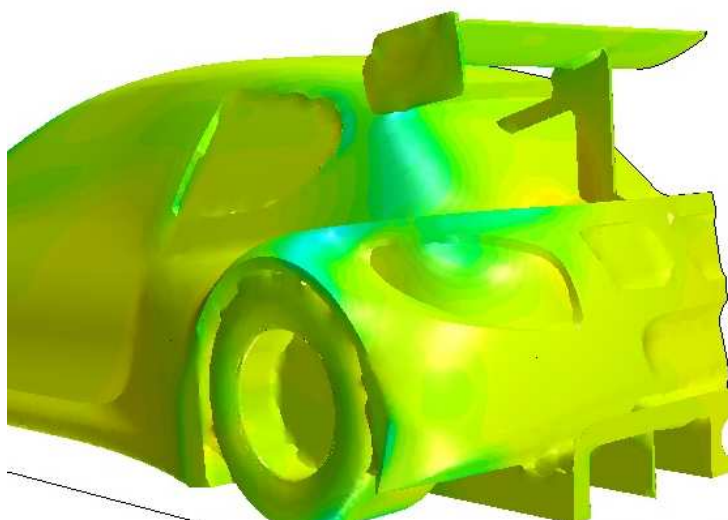
VELOCIDAD (Km/h)	SOBREPRESIÓN (Pa)	DEPRESIÓN (Pa)
108	130	-677
140	254	-1060
170	379	-1635
200	473	-2105
230	657	-2838

En lo que se refiere a la parte lateral del vehículo, consiguiendo que los cambios de sección entre el paso de rueda y la puerta se consiguieran suavizar, reduciría la sobrepresión existente al final de la puerta.

En la zona que está situada el retrovisor existe depresión, cambiando la geometría del retrovisor por una en que afecte menos a la aerodinámica el coche reduciría el coeficiente de resistencia. Lo ideal de forma aerodinámica, sería la eliminación del retrovisor. Debido a que el Reglamento de la Federación Española de Automovilismo obliga a colocarlos por la seguridad de los pilotos se deberá conseguir la geometría más apropiada

Como queda reflejado en la tabla los valores de presiones y sobrepresiones quedan agravados por la velocidad del vehículo.

PARTE TRASERA



Mapa de presiones parte trasera del vehículo

La zona trasera excluyendo alerón y difusor queda influenciada por la geometría que le precede.

VELOCIDAD (Km/h)	DEPRESIÓN (Pa)
108	-764
140	-1286
170	-1898
200	-2634
230	-3485

Se puede observar una depresión en el foco, paso de rueda y en la zona de transición luna lateral con la luna trasera.

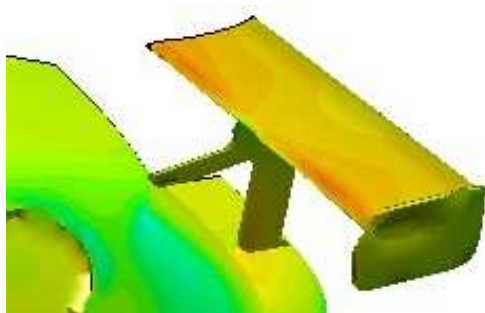
Al crearse una sobrepresión en la zona final de la puerta, (estudiado en zona lateral) le precede la depresión sobre el paso de rueda. Suavizando la transición entre la puerta y el eje trasero, ayudaría a reducir la depresión.

Al producirse la zona de baja presión, produce un desprendimiento de la capa límite, con lo cual el aire no crea fuerza contra la carrocería, disminuyendo el paso por curva del vehículo.

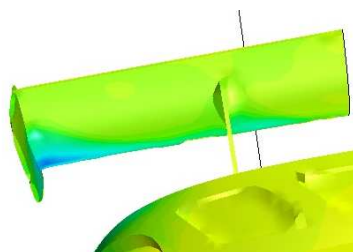
Eliminando los focos traseros y realizando una superficie que suavice el cambio de sección entre parte lateral y parte trasera, ayudaría a direccionar flujo hacia la carrocería, pudiendo así aumentar la presión y por tal reducir el coeficiente de resistencia de avance.

Como queda plasmado en el cuadro a mayor velocidad mayores valores de presión y depresión, por tanto, mayor coeficiente de resistencia al avance.

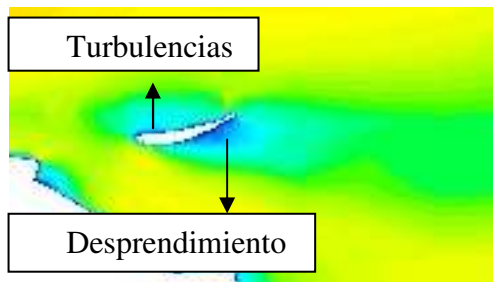
ALERÓN



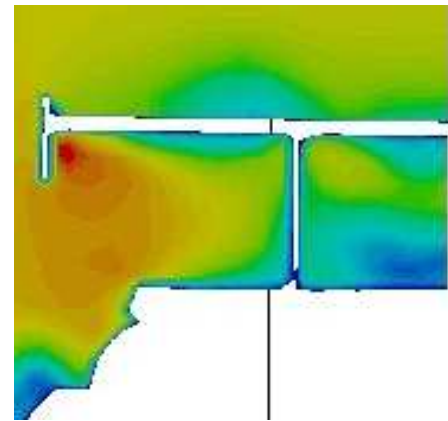
Alerón



Alerón



Mapa de velocidades en el alerón



*Mapa de velocidades en un plano
 perpendicular al plano de simetría*

En lo que se refiere al alerón, el flujo se adhiere a este salvo en la zona en la que inciden sobre este unos vórtices. Al crearse los vórtices el flujo de aire es caótico y no puede adherirse al alerón.

Las turbulencias son producidas por la entrada de aire situada al principio del techo del vehículo. Este tipo de turbulencias, se denominan vórtices y giran a modo sacacorchos sobre la dirección longitudinal del vehículo.

Los vórtices se crean porque existe un desprendimiento de la capa límite, de esta forma a mayor velocidad, mas fácil se produce el desprendimiento de la capa límite, y más grandes serán las turbulencias.

Este tipo de turbulencias son muy comunes en los techos de los automóviles, en vehículos comerciales no se les da ninguna importancia, ya que el fin de los vehículos no es la competición. En caso contrario en la competición automovilística tiene gran importancia, se puede solucionar intentando que no exista desprendimiento de la capa límite.

En fórmula 1, han colocado lo que se llama “aletas de tiburón” (ver figura), con ello lo que hacen es dividir el flujo de aire que llega al alerón. Las turbulencias son creadas igualmente pero en este caso se crean dos más pequeñas, cuyo efecto final es superior que al creado por una sola turbulencia.



Aletas de tiburón en un formula 1

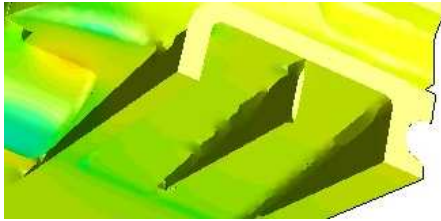
Para disminuir las turbulencias también se puede variar la disposición del alerón, es decir, darle distintas inclinaciones.

Se han realizado las simulaciones con la misma inclinación del alerón, decir al respecto que esto no se hace en realidad.

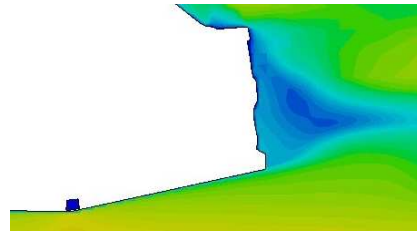
La inclinación del alerón dependerá al igual que muchas otras partes del vehículo del trazado en que se dispute la competición. No se colocará el alerón en la misma posición para realizar una prueba de montaña, en la que se necesita mucha carga aerodinámica y relativamente poca velocidad punta, con un trazado en circuito en la que las velocidades alcanzadas son mayores.

De esta forma además de reglar configuraciones del coche como suspensiones, relación cajas de cambio, la inclinación del alerón es tanto o más importante. La inclinación del alerón en circuitos es menor que en competiciones de montaña, porque mientras en montaña nos interesa tener un paso por curva más rápido posible en circuito se pretende tener velocidad punta alta y paso por curva alto.

DIFUSOR



Difusor



*Velocidad en el plano medio paralelo al
plano de simetría en el difusor*

En lo que se refiere al difusor se puede observar que el fluido se pega a las paredes, es debido que no existe depresión.

Se puede observar en los mapas de velocidades como el aire es lanzado hacia arriba, función del difusor para evacuar el aire del fondo del vehículo y crear efecto suelo.

En lo que respecta al número de iteraciones, como se puede observar a mayor velocidad los parámetros convergen peor, por eso que no han iterado el mismo número de veces.

El C_x o Coeficiente de resistencia aerodinámica. Es un número adimensional se obtiene de una forma experimental en túneles de viento o mediante programas informáticos a través de operaciones matemáticas complejas.

Cuánto menor es el C_x menos resistencia aerodinámica al avance del coche y por tanto, menos consumo y más prestaciones. O sea, mejor.

Hoy en día es un número de gran interés en la industria del automóvil. Es difícil bajar del nivel de 0,28, la mayoría de los turismos que se fabrican hoy están entre 0,29 y 0,34.

Algunos ejemplos de coeficientes aerodinámicos de coches

VEHÍCULO	C _x
Opel Insignia (2009)	0,27
Audi A3 (2003)	0,32
Audi A6 (1997)	0,28
Opel Kadett (1989)	0,38
Formula 1 (Mónaco)	1,084
Formula (Monza)	0,7
BMW serie 1 (2004)	0,31
Renault Espace (2002)	0,35
Opel Astra (2004)	0,32

En Fórmula 1, el coeficiente aerodinámico C_x no se utiliza. Diseñan en base a la experimentación en el túnel del viento y los datos obtenidos en simulaciones por los ordenadores.

Los resultados obtenidos con el STAR-CCM+ del CM a las distintas velocidades con las mismas configuraciones son:

VELOCIDAD (Km/h)	C _x	ITERACIONES
108	0.2195	1200
140	0.2204	1960
170	0.2181	1960
200	0.2188	2000
230	0.2210	1893

El valor del coeficiente de resistencia al avance de C_x se ve afectado por un elevado número de factores de diseño: forma de la delantera, inclinación del parabrisas, techo, laterales, bajos, ruedas, spoiler delanteros y traseros, salientes, flujo interior.

Lo correspondiente al coeficiente de resistencia al avance, decir que un coche con coeficiente cero será el ideal, aquel que atraviesa el fluido sin causar ninguna resistencia aerodinámica.

En cuanto a la geometría exterior del coche los cambios más importantes a realizar son los siguientes:

- Eliminar las formas redondeadas de la parte delantera del coche construyendo una superficie desde el morro hasta la luna suavizada, eliminando las cavidades del foco además de suavizar el cambio de sección en el paso de rueda. Dirigiendo el aire a los laterales para no crear una sobrepresión sobre la luna.
- Suavizar las zonas de transición entre los pasos de rueda con la zona media del vehículo, para ello se puede cambiar la geometría de los faldones, haciendo que la reducción de sección sea más constante.
- El final de la luna y el comienzo del techo se encuentren al mismo nivel, con el fin de evitar el escalón, de este modo, el fluido creara mayor presión sobre la carrocería.
- Eliminar las cavidades de los focos posteriores y crear una superficie mas suavizada. Los cambios de sección del paso de rueda trasero al final del vehículo, reducirlos de forma que el fluido no se despegue de la carrocería.
- Para evitar en todo lo posible las turbulencias generadas sobre el alerón, estudiar los casos posibles de un nuevo techo y una entrada de aire al motor, con el fin de producir el desprendimiento de la capa límite lo más cercana al alerón.

Consejos para un buen diseño aerodinámico:

- **Cubrir las ruedas:** las ruedas abiertas crean una gran cantidad de arrastre y la turbulencia del flujo de aire. Cubrir completamente la carrocería es la mejor solución si se permite en la normativa, pero si la carrocería está cerrada parcialmente, colocando una convergencia detrás de la posición del volante proporciona el máximo beneficio.
- **Carrocería converge lentamente:** Carrocería que converge rápidamente, o simplemente se trunca, las fuerzas de la corriente de aire generan turbulencia y por ende gran cantidad de arrastre.
- **Uso de spoilers:** son utilizados en coches tanto en competición como en vehículos particulares. Son utilizados en para mantener ganar carga aerodinámica.

- **Difusores:** son utilizado para evacuar el aire del fondo del coche más rápidamente, así de esta forma se crea efecto suelo.
- **Alerones:** a diferencia de los spoilers son piezas de mayores dimensiones cuya función consiste en producir carga aerodinámica al pasar el aire a través de él.

El coche ideal aerodinámicamente es aquel cual su coeficiente de resistencia aerodinámica sea lo más próximo a cero. A la hora de diseñarlo realmente para conseguirlo deberíamos eliminar partes del diseño como retrovisores, alerones,... lo más parecido sería un coche con la geometría de una gota de agua.

1.11 BIBLIOGRAFÍA

Lista de los libros de consulta, catálogos, documentos, artículos y página web, que han sido usados para la realización del PFC:

- REGLAMENTO TÉCNICO VEHÍCULOS DE COMPETICIÓN CM. Real Federación Española de Automovilismo. 2010
- AERODINÁMICA DEL AUTOMÓVIL DE COMPETICIÓN. Mac Beath Simon. 2005
- AERODYNAMICS. Allen Jhon E. 1982
- AERODYNAMICS FOR ENGINEERING STUDENTS. Houghton Edward Lewis. 2003
- MECÁNICA DE FLUIDOS. Frank M. White. Ed Mc Graw Hill. 2008
- FUNDAMENTALS OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS. Harvard Lomax and Thomas H. Pulliam. 2004
- Manual STAR-CCM+
- www.solidworks.es
- www.wikipedia.com
- www.google.com
- www.cd-adapco.com
- www.fluent.com
- www.tecnicafl.com
- www.efectosuelo.com
- <http://aerodinamicaautomovil.iespana.es>