

Treball de Fi de Grau

Grau Enginyeria en Tecnologies Industrials

Elementos y dispositivos aerodinámicos en la Fórmula 1: parte central del vehículo

MEMÒRIA

Autor: Rubén Camúñez Llanos

Director/s: Enric Trillas Gay

Convocatòria: Julio 2014



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

En este trabajo se trata de explicar el funcionamiento de los difusores y su aplicación en el mundo de los vehículos de competición, en concreto la Fórmula 1.

Para ello se explican los conceptos aerodinámicos fundamentales para entender cómo trabaja un difusor y lo que se intenta conseguir, generar la mayor carga aerodinámica.

Para realizar esta tarea se han diseñado distintos modelos de difusor y se ha analizado el comportamiento que tendría el aire en cada uno de ellos aplicando condiciones de contorno que simulen un vehículo de Fórmula 1.

Analizando estos modelos se ha averiguado en cuál se consigue que el aire se comporte de la manera que más interesa y sobre todo, con qué modelo se obtiene el mayor valor de coeficiente de sustentación, que será el que proporcione mayor carga aerodinámica, fuerza vertical que hace que el coche se pegue al suelo.

Índice

Resumen.....	1
Índice	3
1. Glosario.....	5
2. Prefacio	7
2.1 Origen del proyecto.....	7
2.2 Motivación.....	7
2.3 Requerimientos previos.....	8
3. Introducción	9
3.1 Objetivos del proyecto	9
3.2 Alcance del proyecto.....	10
4. Introducción a la aerodinámica	11
4.1 La aerodinámica en la Fórmula 1	11
4.2 Estudio de la aerodinámica.....	12
4.3 Los números adimensionales	14
4.4 Capa límite y desprendimiento de la capa límite.....	15
4.5 Ecuación de Bernoulli	18
4.6 Fuerzas aerodinámicas	20
5. Elementos aerodinámicos.....	24
5.1 Deflectores.....	24
5.2 Winglets	25
5.3 Alerones.....	25
5.3.1 Alerones delanteros	26
5.3.2 Alerones traseros.....	26
6. El efecto suelo.....	27
6.1 Introducción	27
6.2 Fondo plano.....	29
6.3 Difusor	30
7. Análisis difusores.....	32
7.1 Doble difusor	32
7.2 Difusor soplado.....	34
8. Simulación numérica.....	35
9. Diseño de un difusor	42

10.	Estudio difusores diseñados	55
11.	Planificación temporal y costes	61
11.1	Planificación temporal	61
11.2	Costes.....	62
12.	Impacto medio ambiental.....	64
13.	Conclusiones	65
14.	Bibliografía	66

1. Glosario

Aerodinámica: Rama de la mecánica de fluidos que estudia la interacción entre los cuerpos sólidos y los fluidos a través de los cuales se desplaza. En este caso los cuerpos sólidos a tratar serán los vehículos y difusores, y el fluido a través del cual se mueven el aire.

Alerón: Pieza saliente que se coloca en la carrocería de ciertos automóviles para hacerlos más aerodinámicos. En el caso de los monoplazas de F1 hay un alerón en la parte delantera y otro en la parte trasera.

Altura de rodadura: Distancia entre el chasis del vehículo y el suelo. Se mide en dos puntos, uno en el eje delantero y otro en el trasero.

Área frontal: Área del vehículo visto desde la vista frontal. Es el área del vehículo que se ve afectada por la fuerza de resistencia al avance una vez en movimiento.

Capa límite: Zona donde el movimiento de un fluido 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.

Carga aerodinámica: Es la configuración aerodinámica que da fuerza contra el asfalto para mantener la adherencia del coche. Cuanta más carga, más adherencia pero menos velocidad. Es una fuerza en dirección vertical descendente.

Centro de presión: Punto de un cuerpo sobre el cual se debe aplicar la resultante de todas las presiones ejercidas sobre ese cuerpo para que el efecto de la resultante sea igual a la suma de los efectos de las presiones.

Coeficiente de resistencia al avance C_D : Coeficiente que indica relativamente la resistencia que sufre un cuerpo al movimiento en la dirección de éste.

Coeficiente de sustentación C_L : Coeficiente que indica la capacidad de crear una fuerza en dirección perpendicular a la de la velocidad de movimiento. En el caso de la F1 interesa que esta fuerza tenga una dirección vertical hacia abajo, y se le denominará carga aerodinámica, considerándola positiva en el caso de ir hacia abajo.

Cuerda: Distancia entre el borde de ataque y el borde de fuga de un ala.

Deflector: Elemento aerodinámico utilizado para variar la dirección de un fluido, en este caso el aire, y conseguir la fuerza de sustentación y resistencia al avance deseada.

Efecto suelo: Es el fenómeno aerodinámico que sucede 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.

Estela: Rastro de aire que deja un vehículo al desplazarse.

Fuerza de resistencia al avance: Fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, de dirección paralela a la de la velocidad del corriente incidente.

Fuerza de sustentación: Fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, de dirección perpendicular a la de la velocidad del corriente incidente.

Línea de corriente: Lugar geométrico de los puntos tangentes al vector velocidad de las partículas de fluido en un instante t determinado.

Número de Reynolds: Número adimensional utilizado para caracterizar el movimiento de un fluido.

Principio de Bernoulli: Describe el comportamiento de un fluido. De aquí se deduce que los puntos con máxima velocidad son a su vez los de menor presión y viceversa.

Resistencia aerodinámica: Fuerza que sufre un cuerpo al moverse a través del aire. Es la fuerza de resistencia al avance en la dirección de la velocidad del vehículo.

Spoiler: Elemento aerodinámico con la finalidad es deshacerse del flujo de alta presión para reducir la fuerza de sustentación.

Túnel de viento: herramienta de investigación desarrollada para ayudar en el estudio de los efectos del movimiento del aire alrededor de cuerpos sólidos.

2. Prefacio

El proyecto se centra en el estudio de los difusores utilizados en competiciones de Fórmula 1. Para ello se harán estudios y simulación con el programa Ansys para evaluar el comportamiento de las líneas de corriente según la geometría del difusor.

2.1 Origen del proyecto

En un principio no se tenía demasiado en cuenta la aerodinámica de los vehículos en la competición, en concreto en la F1, lo única que se intentaba era conseguir la velocidad máxima en recta. Pero desde principios de los 70 se empezó a trabajar en prestaciones aerodinámicas que permitían mejorar quizá no tanto la velocidad punta en recta, pero sí la velocidad y estabilidad del monoplaza en el paso por curva. Es desde entonces que una parte esencial de este tipo de vehículos es la aerodinámica. Las prestaciones deseadas se consiguen gracias a la utilización de distintos elementos aerodinámicos.

2.2 Motivación

En los últimos años, el campeón indiscutible del mundial de F1 ha sido la escudería Red Bull, principalmente gracias a sus grandísimas prestaciones aerodinámicas en curva, ya que es una de las marcas con menos velocidad punta en recta a pesar de utilizar motores Renault, marca que utilizan varias escuderías con gran velocidad punta. Por ello parece que cada vez tiene más importancia conseguir buenas características aerodinámicas en lugar de una gran velocidad en recta, ya que en un circuito de carreras apenas hay uno o dos tramos rectos, pocas veces se consigue llegar al límite de velocidad. Por estos motivos se estudiarán los elementos aerodinámicos, principalmente los difusores, que son los dispositivos que la escudería Red Bull consiguió revolucionar y llevarles a ser el equipo líder en los últimos años.

2.3 Requerimientos previos

Previamente a la realización del proyecto son necesarias unas nociones básicas de competiciones automovilísticas, en concreto de la F1, y principalmente de la rama de la ingeniería que estudia el comportamiento de los fluidos, en el caso de los vehículos el aire.

3. Introducción

Ha quedado demostrado en los últimos años que una de las partes más importantes de un vehículo de competición son las prestaciones aerodinámicas, ya que en concreto en los circuitos de F1 no suele haber demasiados sectores donde explotar la velocidad máxima que permita el motor. Es por ello que actualmente cada una de las piezas que forma parte del chasis de un vehículo de competición es estudiada a fondo, y más aún los elementos diseñados especialmente para mejorar las características aerodinámicas, como son los alerones y los difusores.

Para realizar este estudio sobre la dinámica de los fluidos sobre los distintos elementos se utiliza el CDF (Computational Fluid Dynamics), que permite realizar simulaciones matemáticas de las corrientes de aire entorno al elemento estudiado.

Otra alternativa es utilizar el túnel del viento, que se basa en utilizar un modelo del prototipo de vehículo o elemento deseado para ver su comportamiento a pequeña escala.

3.1 Objetivos del proyecto

El objetivo principal del proyecto es diseñar un difusor eficiente pensado para ser utilizado en vehículos de competición, concretamente en la Fórmula 1.

Para llevarlo a cabo se seguirán los siguientes pasos:

- En primer lugar se estudiará de forma genérica la aerodinámica en los vehículos de competición, para así comprender lo que se busca conseguir y cómo se consigue actualmente.
- En segundo lugar se examinarán conceptos más específicos, ya centrados en el entorno del difusor, como son el fondo plano y el efecto suelo.
- A continuación se analizarán numéricamente diferentes modelos de difusores utilizando el programa *Ansys Fluent*.

- Finalmente se diseñará un modelo de difusor lo más eficiente posible para un monoplace de Fórmula 1.

3.2 Alcance del proyecto

El proyecto llevará a cabo las etapas de comprensión de la aerodinámica, análisis de distintos modelos y el diseño geométrico de un difusor lo más eficiente posible para el ámbito de la F1.

4. Introducción a la aerodinámica

4.1 La aerodinámica en la Fórmula 1

A menudo se piensa erróneamente que el mejor vehículo es aquel que tiene la velocidad punta más elevada. Pero ésta es una idea muy desacertada en el mundo de los vehículos de competición, concretamente en la Fórmula 1. Muestra de ello es que en las últimas temporadas la escudería líder del campeonato ha sido el equipo Red Bull, que casualmente es uno de los equipos con menor velocidad punta.

Sí que es cierto que los términos aerodinámica y velocidad están directamente relacionados, a pesar de que a menudo tener más carga aerodinámica implica pérdida de velocidad punta. El motivo es que en los circuitos en los que compite la F1 apenas hay una o dos rectas considerables para alcanzar la máxima velocidad permitida por el motor, la mayor parte del circuito consiste en curvas a izquierdas y derechas.



Ilustración 4.1: Circuito de Montmeló [1]

Tomando como ejemplo el circuito de Montmeló (circuit de Catalunya) que se puede observar en la imagen anterior, uno de los circuitos oficiales del mundial de F1, se puede observar que básicamente está compuesto por una gran recta y bastantes curvas enlazadas mediante pequeños tramos rectos que no permiten llegar al máximo del motor. En este caso, teniendo mayor carga aerodinámica quizá se pierda algo de tiempo en la recta de llegada, pero se recupera en la zona de curvas.

Lo que trata la aerodinámica precisamente es esto, no conseguir la mayor velocidad en recta sino obtener la máxima velocidad posible en curvas. Es por este motivo que en la actualidad los equipos de Fórmula 1 tratan de conseguir el mejor coche en cuanto a la aerodinámica se refiere, es uno de los motivos de mayor interés de estudio.

Muchas veces el aumento de carga aerodinámica implica aumento de la fuerza de resistencia al avance, por lo que se trata de buscar un punto de equilibrio entre los dos según el circuito en el que se va a competir. Uno de los elementos más importantes es el fondo plano del vehículo acabado con un difusor, ya que no solo proporciona una tercera parte de la carga aerodinámica total del monoplaza sino que provoca muy poca resistencia al avance en comparación con otros elementos aerodinámicos de gran importancia como son los alerones, los cuales se explicarán brevemente más adelante. [2]

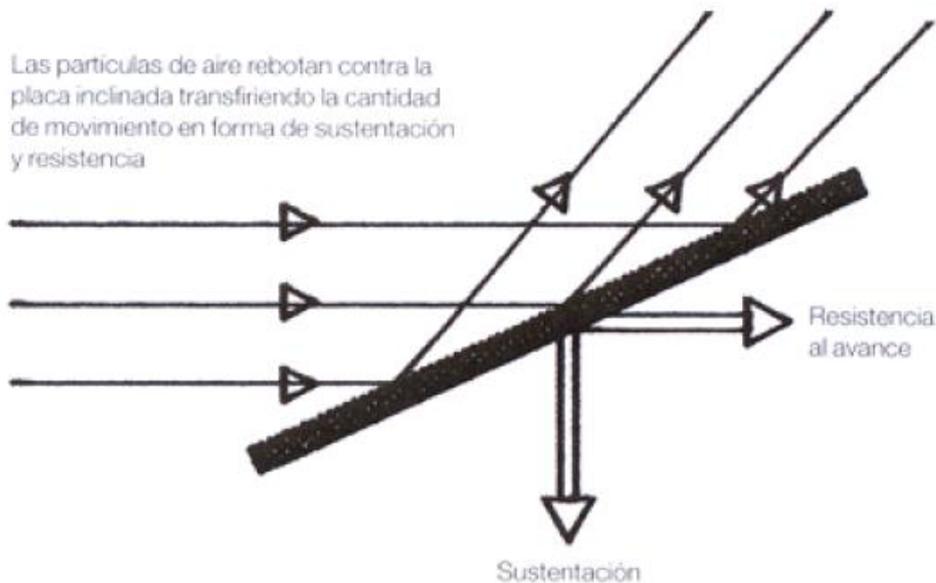


Ilustración 4.2: Fuerzas aerodinámicas [2]

4.2 Estudio de la aerodinámica

Como se ha comentado, el objetivo de la aerodinámica en los vehículos de F1 es el de obtener la mayor carga aerodinámica con la menor fuerza de resistencia al avance. Para conseguirlo se utilizan diferentes elementos aerodinámicos, y las propiedades de éstos dependen básicamente de la geometría que tienen.

Construir estos elementos conlleva unos costes demasiado elevados tanto económicamente como en inversión de tiempo, por lo que se suelen utilizar dos métodos para estudiarlos antes de construirlos y probarlos en el coche definitivo. [38]

El primero de ellos es diseñando un modelo a pequeña escala y estudiando su comportamiento en lo que se denomina túnel de viento. Consta de un modelo reducido del prototipo de coche definitivo sobre el que incide una corriente de aire que es estudiada para ver el comportamiento que se obtiene con distintos elementos. Estos modelos se pueden hacer casi a escala real para obtener unos resultados más similares a los reales, aunque esto aumenta los costes. [31]



Ilustración 4.3: Modelo de túnel de viento [3]

Otra alternativa mucho menos costosa es la de hacer simulaciones numéricas mediante CFD (Computational Fluid Dynamics).

La aerodinámica básicamente se encarga de estudiar las fuerzas que aparecen sobre el monoplaza cuando éste se desplaza. Para estudiar el caso real se deberían resolver ecuaciones que no se pueden resolver de manera analítica debido a su complejidad como son la ecuación de Navier-Stokes (segunda ley de Newton generalizada para fluidos), ecuación de continuidad, de estado, condiciones de contorno y condiciones iniciales. Utilizando CFD se pueden resolver de manera simplificada aunque esto conlleve un pequeño error debido principalmente a la conversión de variables continuas en discretas, por lo que en el mundo de la Fórmula 1 se suelen utilizar más para guiar el desarrollo que para estudiar el modelo definitivo. [37][4]

Actualmente todos los equipos de F1 trabajan con esta tecnología debido a que permite realizar estudios en menor tiempo y con menores costes que en el túnel de viento, y una vez se tiene el modelo casi definitivo se observa su comportamiento en el túnel.

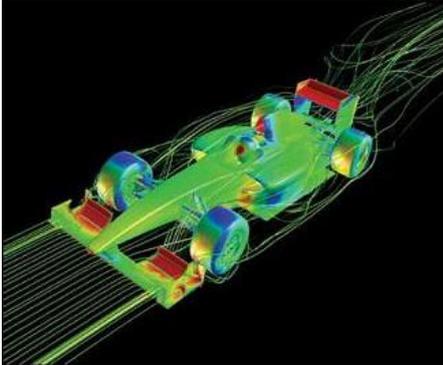


Ilustración 4.5: Ejemplo estudio con CFD [4]

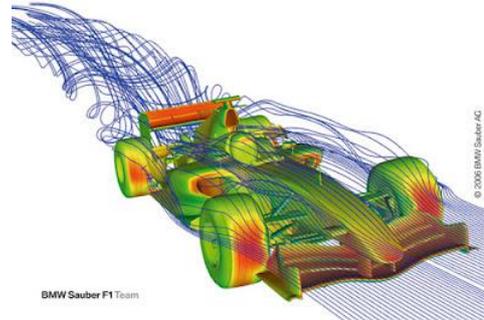


Ilustración 4.4: Ejemplo estudio con CFD [5]

4.3 Los números adimensionales

Para entender bien el estudio de la aerodinámica es importante introducir el concepto de números adimensionales.

Todos los fluidos tiene unas ciertas características con unas ciertas unidades, como por ejemplo una densidad expresada en kg/m^3 o una viscosidad dinámica expresada en $\frac{kg}{s \cdot m}$.

Para simular el funcionamiento de los elementos aerodinámicos tanto en el túnel del viento como mediante CDF es necesario recrear un flujo de aire con las propiedades lo más parecidas posible al aire real. Para ello se utilizan números adimensionales que involucran varias propiedades con sus correspondientes dimensiones, ya que de esta manera con un único parámetro se pueden controlar varias características. Los más utilizados en el mundo de la aerodinámica son el número de Reynolds y el número de Mach.

Se define el número de Reynolds como $Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu}$, siendo ρ la densidad del fluido, en este caso aire, v la velocidad a la que fluye, μ la viscosidad dinámica y L la longitud característica, que en el caso de estudio de este proyecto, el difusor, se puede tomar como la distancia que hay desde el suelo hasta el fondo plano del monoplaza. [2]

Este número ofrece una idea sobre si un flujo es laminar o turbulento, y es especialmente útil en el caso de no trabajar a escala real.

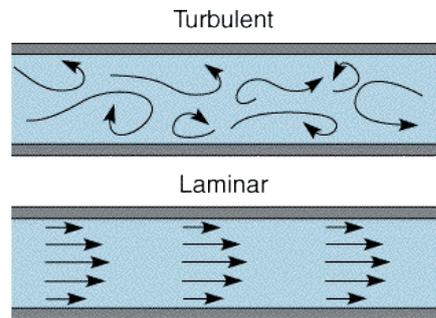


Ilustración 4.6: Flujo turbulento y laminar [6]

Por otra parte, el número de Mach se define como $Ma = \frac{v}{c}$, siendo v la velocidad del fluido y c la velocidad del sonido en el medio en el que se desplaza. Sirve para aportar una idea sobre la velocidad de una manera adimensional y para conocer la compresibilidad de un fluido. Si $Ma < 0,3$ se considera que el fluido es incompresible, simplificando mucho los cálculos sobretodo en el caso de utilizar métodos CFD.

4.4 Capa límite y desprendimiento de la capa límite

Un fluido es una sustancia que fluye y adopta la forma del recipiente que lo contiene, se deforma continuamente mientras sufra un esfuerzo tangencial.

Por otra parte una de sus propiedades es la viscosidad, que es la resistencia que tiene un fluido a ser deformado continuamente en el tiempo al recibir una fuerza tangencial. Se define como el cociente entre el esfuerzo tangencial aplicado sobre un fluido y la velocidad a la que éste se deforma.

Toda partícula de un fluido en contacto con un sólido tiene siempre la velocidad del sólido, no existe deslizamiento entre fluidos y sólidos en contacto. Esta propiedad es conocida como condición de no deslizamiento.

Estos conceptos se han de tener muy en cuenta a la hora de estudiar la aerodinámica. Las partículas de aire que envuelven un coche de Fórmula 1 cuando éste está en movimiento están sometidas a esta condición de no deslizamiento, por lo que la velocidad relativa entre el monoplaza y las partículas de aire en contacto con éste es 0. A su vez, las partículas de aire en contacto con las anteriores también están alteradas, no teniendo la misma velocidad que tendría esta misma partícula si estuviera a una distancia infinita, y lo mismo sucede con las partículas en contacto con estas. Esta zona donde el fluido se ve alterado por la condición de no deslizamiento con un sólido se conoce como capa límite, que se compone por el fluido en contacto con el sólido hasta que alcanza un 99% de la velocidad que debería tener si estuviera lo suficientemente alejada del sólido.

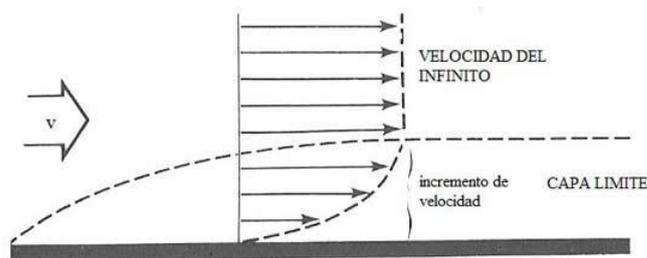


Ilustración 4.7: Capa límite [7]

Las partículas de aire que se desplazan por la capa límite lo hacen primero de manera laminar, de forma paralela entre ellas, mientras que más adelante su trayectoria se va volviendo más caótica, siendo así un flujo turbulento, conllevando además un aumento del espesor de la capa límite.

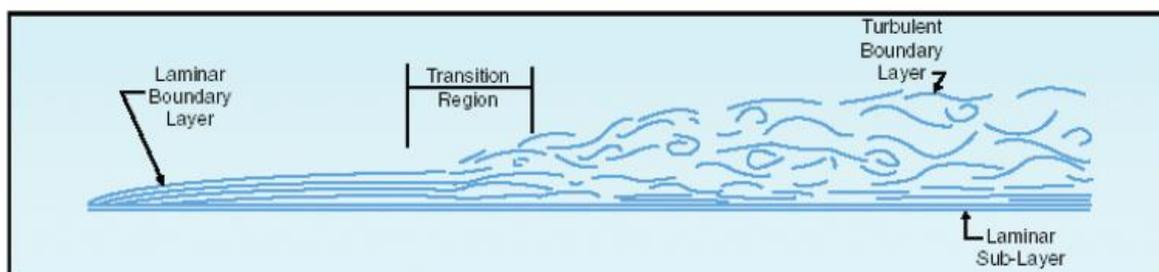


Ilustración 4.8: Capa límite laminar y turbulenta [8]

En la capa límite laminar el flujo es laminar, es decir, el aire circula ordenado, las capas de fluido no se entremezclan y es eficiente a la hora de ser utilizado por alerones y otros elementos aerodinámicos.

Por otra parte, en la capa límite turbulenta el flujo es desordenado, las capas de fluido se entremezclan entre ellas creando remolinos e inestabilidad. Por lo tanto es ineficaz para crear carga aerodinámica. Este tipo de capa límite conlleva mayor pérdida de energía debido a que sufre más fricción.

Cuando el aire entra en contacto con el coche el flujo laminar va perdiendo velocidad a lo largo de la capa límite hasta llegar a un punto en el que el fluido no puede vencer la presión adversa que sufre llegando incluso a retroceder. Este hecho se conoce como desprendimiento de la capa límite, y provoca que el flujo de aire deje de estar en contacto con los elementos aerodinámicos, los cuales basan su funcionamiento en la forma en que el flujo de aire los rodea, generando además turbulencias.

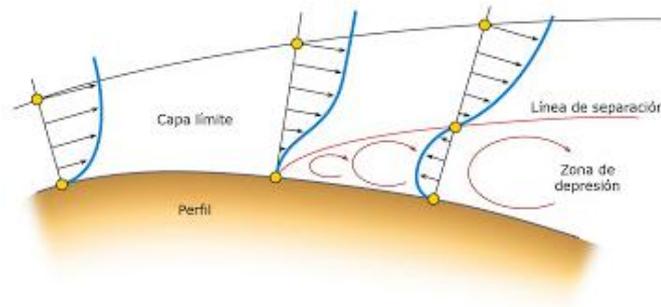


Ilustración 4.9: Desprendimiento de la capa límite [9]

Sin embargo una capa límite turbulenta proporciona mayor resistencia al desprendimiento de la capa límite, por lo que los vehículos de F1 poseen ciertos elementos aerodinámicos que se encargan de convertir el flujo laminar ya aprovechado en flujo turbulento, para alargar el máximo tiempo posible el desprendimiento de la capa límite.

Por esto es muy importante el estudio de la capa límite en el diseño de un vehículo de competición. La forma de los elementos aerodinámicos debe estar muy bien estudiada para conseguir que la capa límite discorra en régimen laminar y que se desprenda lo más tarde posible para evitar la aparición de turbulencias. [32]

4.5 Ecuación de Bernoulli

Como se ha explicado anteriormente los elementos aerodinámicos de los vehículos de competición basan su funcionamiento en la forma en que el flujo de aire los rodea, por lo que era más óptimo trabajar con un flujo laminar que es más ordenado que el turbulento.

Por ello hay que entender las propiedades de los fluidos y los principios que se pueden deducir.

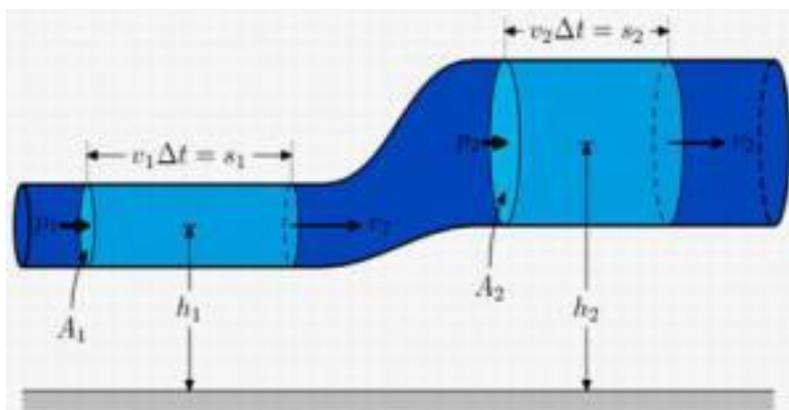


Ilustración 4.10: Tubo Bernoulli [10]

La ecuación de Bernoulli es un caso particular del principio de la conservación de la energía para fluidos incompresibles entre dos puntos que pertenecen a una línea de corriente. La ecuación determina que la presión estática más la presión dinámica más la altura del fluido en el punto 1 es igual a la presión estática más la presión dinámica más la altura del fluido en el punto 2 más unas pérdidas debidas a la fricción, a elementos singulares y a trabajo mecánico proporcionado por bombas y turbinas. Para el caso de flujos turbulentos se obtiene:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{f1-2} + h_m$$

En el caso de la Fórmula 1 se podría considerar que las propiedades del aire no varían con la altura, que no hay pérdidas y obviamente que no se utiliza ningún dispositivo que proporcione o consuma trabajo mecánico. De esta manera se llega a la conclusión de que:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = \frac{P_i}{\rho g} + \frac{v_i^2}{2g} = cte$$

Que dicho de otra manera se podría expresar como

$$P_i + 0,5 \cdot \rho \cdot v_i^2 = cte$$

De aquí se puede observar que al ser la energía constante a lo largo de una línea de corriente, si la aportación de la presión a esta energía es menor, la aportación de la velocidad deberá ser mayor, de la misma manera que si hay un aumento de presión conllevará una disminución de velocidad.

En este hecho se basa el funcionamiento de los elementos aerodinámicos. Al hacer fluir una corriente de fluido, en este caso el aire, alrededor de un cuerpo, si éste no es simétrico lo rodeará de diferente forma por la parte superior que por la inferior, provocando con ello distinta velocidad en una parte que en otra y por lo tanto también una presión distinta.

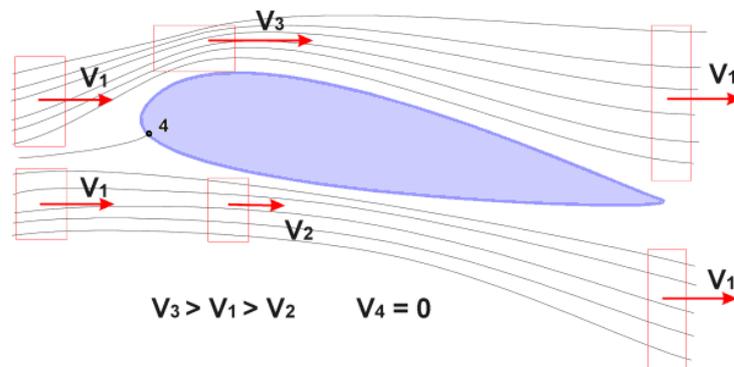


Ilustración 4.11: Líneas de corriente a lo largo de un perfil [11]

Estos hechos se pueden observar si tomamos como ejemplo el perfil de una cometa o un ala de avión como el de la figura anterior.

Es obvio que la corriente de aire que recorre la superficie superior ha de ir a mayor velocidad que la que recorre la parte inferior puesto que ha de recorrer más distancia. Así

pues, la presión será más grande en la parte inferior, lo que generará una fuerza conocida como fuerza aerodinámica, en este caso fuerza de sustentación, que empujará el perfil hacia arriba consiguiendo así que el avión o la cometa a las que pertenece ese perfil se eleve.

4.6 Fuerzas aerodinámicas

Como se ha explicado anteriormente, el hecho de que un flujo de aire recorra un perfil aerodinámico de distinta manera, distinta velocidad, por una parte que por otra, genera una diferencia de presiones y por lo tanto una fuerza con dirección de la presión mayor a la menor conocidas como fuerzas aerodinámicas.

En el caso de la F1 interesa estudiar particularmente dos tipos de fuerzas aerodinámicas, la fuerza de resistencia al avance (*drag force*) y la fuerza de sustentación (*lift force*).

La fuerza de resistencia al avance está provocada por la fricción del perfil con el aire. Las partículas de aire en contacto con el cuerpo en movimiento se adhieren a él debido a la viscosidad, y las partículas cercanas son frenadas por éstas, creando así el fenómeno de capa límite. Esto favorece la aparición de la fuerza de resistencia al avance. Esta fuerza también depende de la forma del cuerpo en movimiento, a más sección transversal mayor superficie de contacto con el aire que se adhiere y lo ralentiza. [14]

Para dar valor a esta fuerza se define un coeficiente de resistencia al avance C_D que representa la oposición que sufre un cuerpo a desplazarse en la dirección del movimiento.

OBJETO	C_D
Coche deportivo	0,2 – 0,3
Esfera	0,47
Turismo	0,5
Coche familiar	0,6

Cilindro	0,6 – 1,2
Ciclista	0,9
Camión	0,8 – 1,0
Moto	0,8
Fórmula 1	0,7 – 1,0

Se observa que los monoplazas de F1 tienen un coeficiente bastante elevado, y esto es debido a que a menudo para ganar carga aerodinámica ha de aumentar también la resistencia al avance.

Por este motivo este coeficiente no tiene un valor fijo en los monoplazas de F1, ya que en función del circuito en el que se va a competir, según si tiene más rectas o más curvas, se pueden modificar algunos elementos aerodinámicos para perder un poco de carga aerodinámica a cambio de reducir la resistencia al avance.

Cuanto más rápido sea el circuito, es decir, con más rectas, menor interesa que sea este coeficiente.

Una vez presentado este concepto, se puede definir la fuerza de resistencia al avance como $F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot v^2$, donde ρ es la densidad del fluido, en este caso aire, v la velocidad a la que se desplaza el vehículo y A el área frontal del monoplaza.

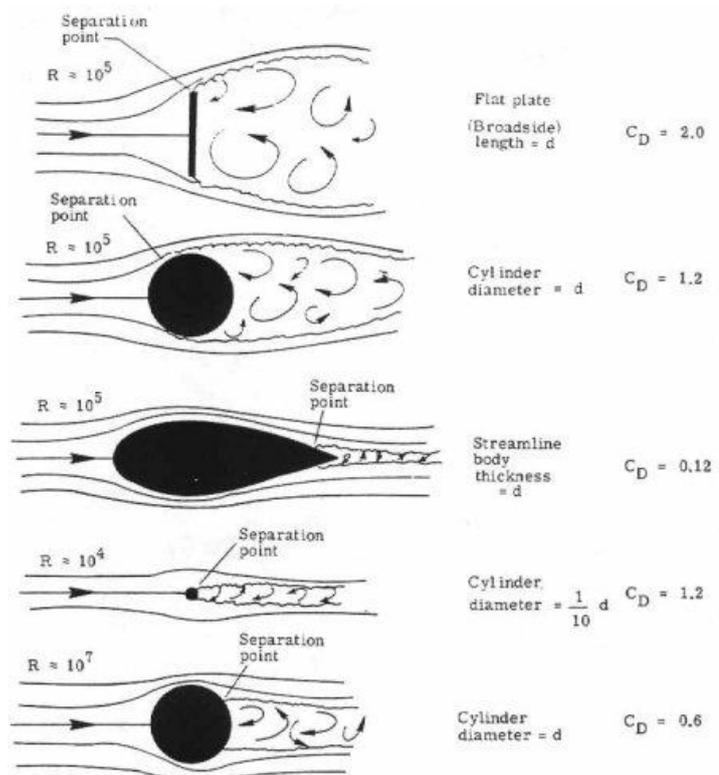


Ilustración 4.12: Coeficientes de resistencia al avance [12]

Por otra parte, la fuerza de sustentación aparece cuando el aire tiene que recorrer de diferente forma un perfil por la parte superior e inferior como ya se ha explicado anteriormente. Al ser diferente la trayectoria de la línea de corriente la velocidad a la que la recorre es también distinta, provocando que la presión sea distinta en la parte superior y en la parte inferior del perfil. Esta diferencia de presión provoca la fuerza de sustentación, perpendicular a la velocidad de avance del aire, y que puede tener sentido tanto ascendente como descendente en función de la geometría del perfil.

En el caso de la Fórmula 1 interesa que esta fuerza sea en sentido negativo, entendiendo como negativo hacia el suelo, para que empuje al vehículo hacia el asfalto haciendo así que tenga un mayor agarre permitiendo mayor velocidad en el paso por curvas.

Aun siendo una fuerza de sustentación negativa, en el caso de la F1 se considerará como carga aerodinámica positiva.

De la misma manera que en el caso de la fuerza de resistencia al avance, en este caso se define un coeficiente de sustentación, que proporciona una idea aproximada de la facilidad que tiene un cuerpo para provocar este tipo de fuerzas. El valor de este coeficiente depende esencialmente del cuerpo estudiado

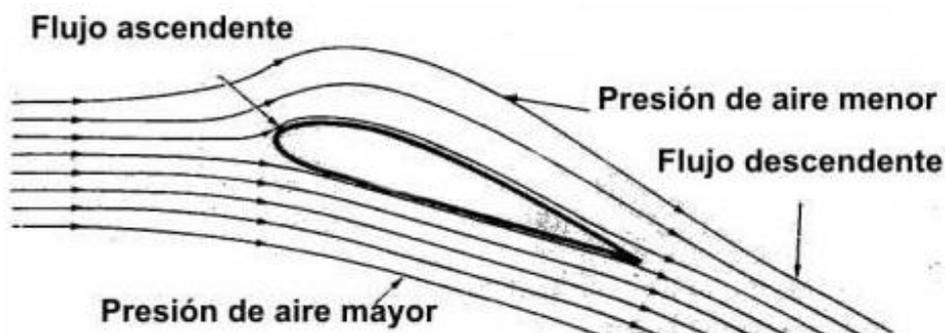


Ilustración 4.13: Diferencia de presiones [13]

Igualmente se puede obtener una expresión para dar un valor aproximado a esta fuerza,

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot A \cdot v^2$$

Donde en esta ocasión el área a tener en cuenta será la sección en planta del elemento estudiado, es decir, el área del cuerpo que recibe ésta fuerza.

De esta manera se obtienen las fuerzas aerodinámicas más representativas, tanto para la Fórmula1 como para otros muchos ámbitos, la fuerza de resistencia al avance y la fuerza de sustentación, a la que se le conoce como carga aerodinámica.

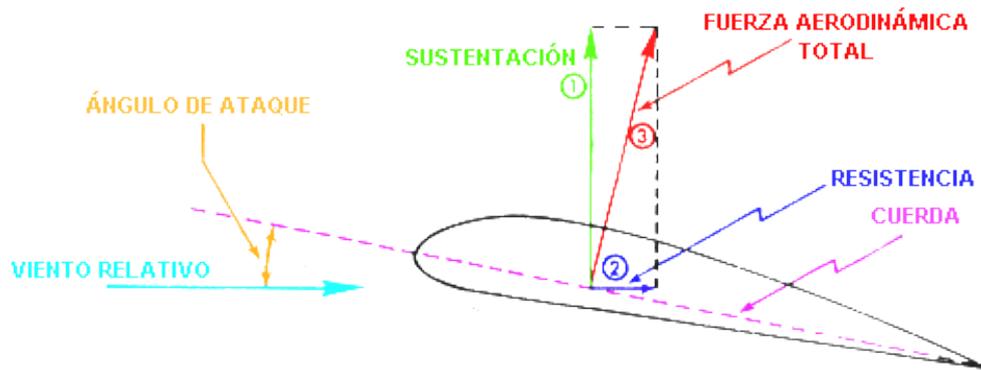


Ilustración 4.14: Fuerzas aerodinámicas [14]

5. Elementos aerodinámicos

En el mundo de la F1 las fuerzas aerodinámicas son un concepto clave. Para conseguir buenos resultados se trata de reducir al máximo posible la fuerza de resistencia al avance y que la carga aerodinámica, fuerza de sustentación que empuja el vehículo hacia el asfalto para conseguir un buen agarre, sea lo más elevada posible.

Para obtener unas características apropiadas se disponen de diferentes elementos aerodinámicos, cada uno con una función distinta, y que pueden ser regulados y adaptados a las diferentes circunstancias de carrera.

5.1 Deflectores

Los deflectores, a diferencia de la mayoría de elementos aerodinámicos, no tiene la función principal de generar apoyo aerodinámico, sino la de distribuir los flujos de aire de manera apropiada canalizando el aire limpio.

Estos flujos de aire son dirigidos hacia los pontones de refrigeración del monoplaza y hacia el fondo plano, que a su vez lo dirige hacia el difusor.

También pueden acelerar el flujo de aire sobre los laterales del vehículo creando estados de baja presión. [21][31][33][2]



Ilustración 5.1: Deflector [15]

5.2 Winglets

Los winglets son unas pequeñas aletas con una función muy parecida a la de los deflectores. Principalmente buscan canalizar el aire de manera que rodee las ruedas traseras sin llegar a tocarlas, además de proporcionar un ligero apoyo aerodinámico. [31][34]

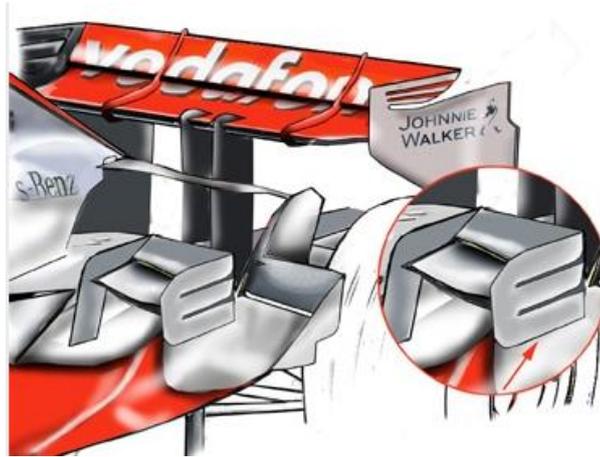


Ilustración 5.2: Winglets [16]

5.3 Alerones

Los alerones tienen forma alar, y son una parte muy importante de la aerodinámica de un vehículo. Su funcionamiento se basa en colocarlos de manera que el flujo de aire tenga mayor velocidad en la parte inferior que en la superior del alerón, creando así una depresión que hace aumentar la carga aerodinámica. En la F1 se utiliza un alerón delantero y otro trasero.

5.3.1 Alerones delanteros

La función primordial del alerón delantero no es solo la de generar carga aerodinámica, sino la de dirigir el flujo de aire incidente en el monoplaza de manera que se aleje de las ruedas delanteras, que son uno de los principales elementos perturbadores. [31]



Ilustración 5.3: Alerón del Red Bull [17]



Ilustración 5.4: Alerón del Mc-Laren [18]

5.3.2 Alerones traseros

El alerón trasero es uno de los elementos que proporciona mayor carga aerodinámica, pero también genera turbulencias y aumenta la resistencia al avance del monoplaza. Por eso se trata de buscar la inclinación ideal en función de las características del circuito, ya que permite ganar carga aerodinámica a cambio de aumentar la resistencia al avance. [31]



Ilustración 5.5: Alerón del Red Bull [19]

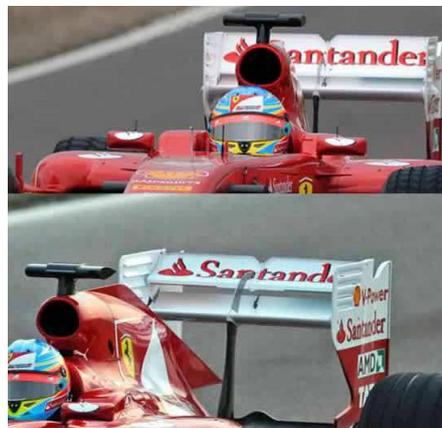


Ilustración 5.6: Alerón del Ferrari [20]

6. El efecto suelo

6.1 Introducción

Como se ha explicado anteriormente, el hecho de que un fluido, en este caso el aire, recorra un perfil con diferente trayectoria por la parte superior que por la inferior provoca que la velocidad de éste sea distinta, y por lo tanto, como se deduce de la ecuación de Bernoulli, la presión también será distinta.

En el caso de los vehículos la corriente de aire los recorre tanto por la parte superior como por la inferior. Esta segunda tiene una sección mucho menor, y puesto que el flujo de aire ha de ser constante y es igual a la velocidad multiplicada por la sección, al ser ésta menor la velocidad ha de ser mayor. Esto implica que se genere una zona de baja presión debajo de los vehículos debida a la alta velocidad del aire en esta zona, y por tanto provoca una fuerza de sustentación en sentido descendente al ser superiores las presiones de encima del vehículo, lo que proporciona un mejor agarre del vehículo.

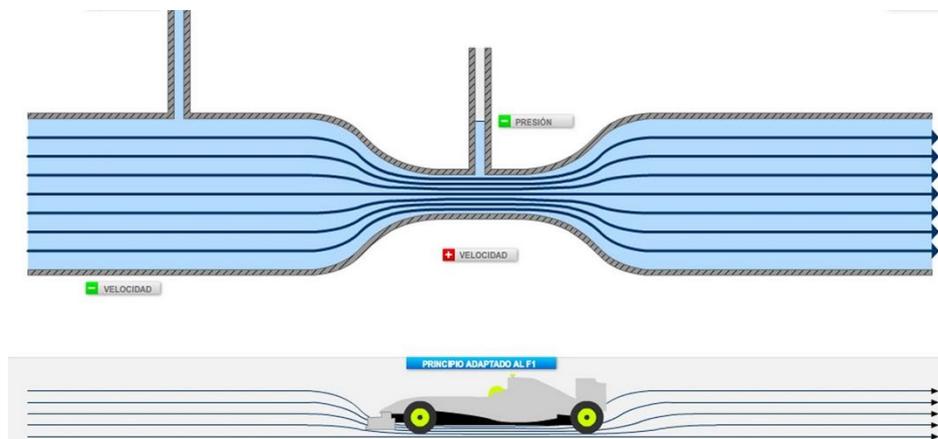


Ilustración 6.1: Efecto Venturi en un vehículo [24]

Para maximizar este efecto suelo se empezaron a diseñar monoplazas con unos faldones móviles laterales que impedían que el aire que recorría la parte inferior del vehículo se escapara por los laterales, consiguiendo así una gran velocidad del flujo de aire que permitía tomar las curvas casi como si fueran rectas.



Ilustración 6.2: Lotus 79 [22]

Pero este tipo de vehículos tenían varios inconvenientes. Uno era que al pegarse el coche al suelo como una ventosa el paso por curva era rapidísimo, y el piloto tenía que soportar unas fuerzas Gs demasiado grandes. Por otra parte, había el peligro de que al pisar un piano o cualquier bache, los faldones podían dejar de estar pegados al suelo, y en ese caso los coches salían volando.

Para solucionar esto la FIA impuso la prohibición de usar un fondo en forma de ala, obligando a utilizar un fondo plano hasta el eje trasero, y también prohibió la utilización de los faldones.

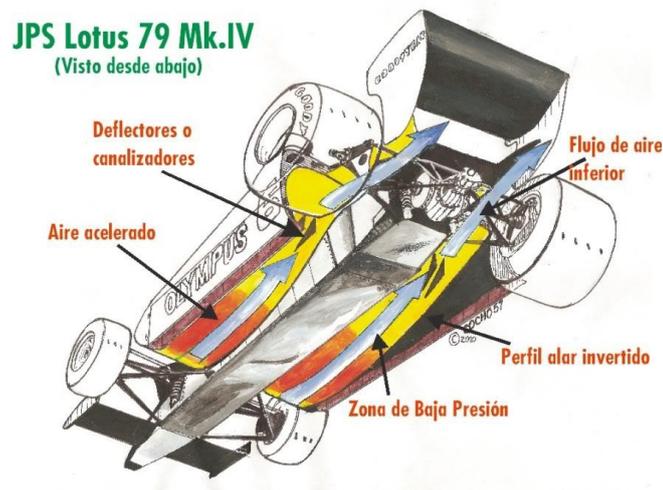


Ilustración 6.3: Parte inferior del vehículo [23]

En la imagen se puede ver el Lotus 79, uno de los vehículos más revolucionarios en su época, que explotaba al máximo el efecto suelo con el uso de un fondo en forma de ala y unos faldones laterales. [35]

6.2 Fondo plano

La prohibición de utilizar los faldones laterales y la obligación de utilizar un fondo plano propició la utilización de elementos aerodinámicos en los laterales del monoplaza. Estos se encargan de generar unos vórtices que extraen el flujo de debajo del coche para aumentar su velocidad de vacío, y a su vez impide la entrada de flujo por los laterales del vehículo, simulando la función que hacían los faldones, y de extraer lateralmente el aire para que no se quede debajo del coche y que no vuelva a entrar.



Ilustración 6.4: Elementos aerodinámicos laterales [24]

El primer paso para situar el fondo plano de manera correcta es colocándolo con un ángulo de incidencia negativa respecto a la horizontal, haciendo que el alerón delantero prácticamente esté en contacto con el asfalto.

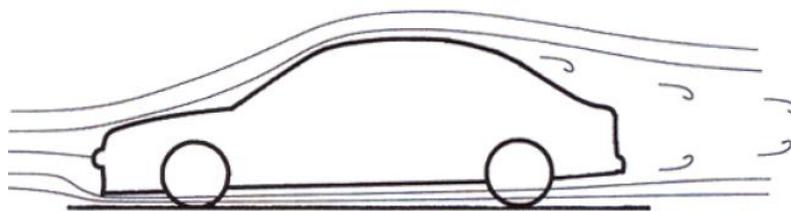


Ilustración 6.5: Líneas de corriente en un vehículo [2]

Haciendo esto se simula que todo el fondo del coche es una sección de Venturi, con una sección más pequeña a la entrada que hace que se acelere todo el flujo de aire que pasa por la parte inferior del monoplaza.

Puesto que el fondo plano está muy cerca del asfalto en muchas ocasiones se roza, por lo que se utiliza una tabla de madera para reforzar esta zona y evitar que el asfalto roce directamente con el chasis del vehículo. [24][35]

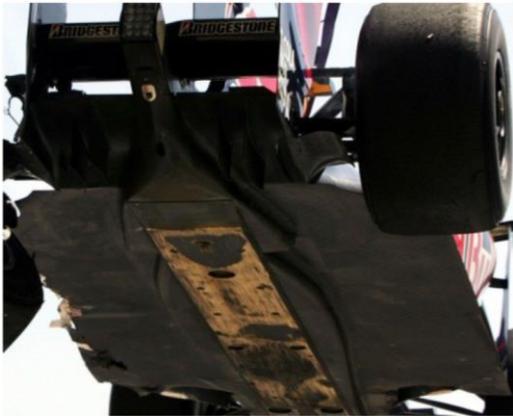


Ilustración 6.6: Refuerzo del fondo plano [31]



Ilustración 6.7: Fondo plano [25]

6.3 Difusor

El difusor es una zona del fondo del coche situado en la parte trasera, justo en el eje posterior, que proporciona un aumento de sección en esa zona en comparación con la sección en el resto del fondo plano del monoplaza. Si miramos el fondo del vehículo como una sección de Venturi el difusor sería la parte divergente, mientras que la delantera sería la convergente.

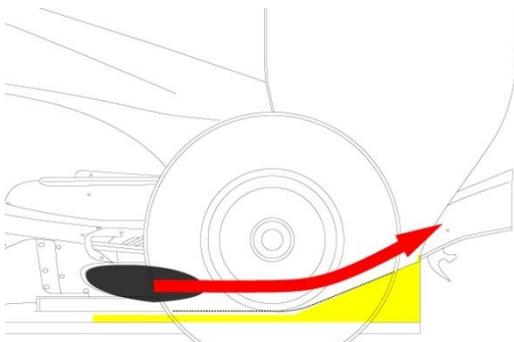


Ilustración 6.8: Vista lateral del difusor [26]



Ilustración 6.9: Vista trasera del difusor [27]

Las funciones principales del difusor son las de extraer el flujo de aire que circula por debajo del monoplaza de F1 y la de adaptarlo al aire exterior.

El objetivo es el de acelerar el flujo de aire que circula por debajo del coche para crear una zona de baja presión y así generar carga aerodinámica. Al aumentar el difusor la sección de paso del flujo por debajo del coche, ésta tiene que ser ocupada por el aire, y para ello este flujo se ha de acelerar a lo largo del fondo plano para poder ocupar más espacio del que ocupaba, provocando así una reducción de presión a la entrada del difusor y por tanto ganar carga aerodinámica. [21]

Si este aire a baja presión fuera extraído directamente al exterior, que se encuentra a presión ambiental, se generarían unas turbulencias que aumentarían las fuerzas de resistencia al avance del coche. Es por ello que el difusor tiene una doble función, ya que una vez el aire es canalizado por él se adapta más o menos a la velocidad ambiente en la que se une con la estela de flujo que rodea el monoplaza por la parte superior. Esta adaptación se ha de hacer de una forma progresiva para evitar la influencia negativa del gradiente de presión adversa y la separación del flujo, es decir, el difusor tiene que tener un cambio gradual de la sección para evitar que el flujo se separe de las paredes. Sin embargo en el caso de la F1, debido a la obligación de la utilización de fondo plano hasta el eje trasero y a algunas otras limitaciones, son muy cortos, por lo que presentan cambios de sección más bruscos.

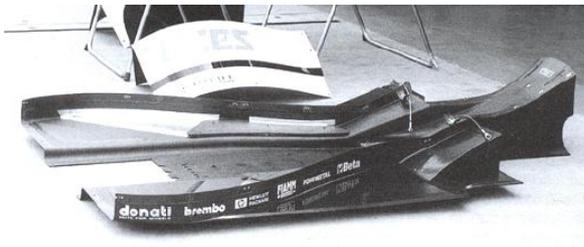


Ilustración 6.10: Fondo plano con difusor incorporado [2]

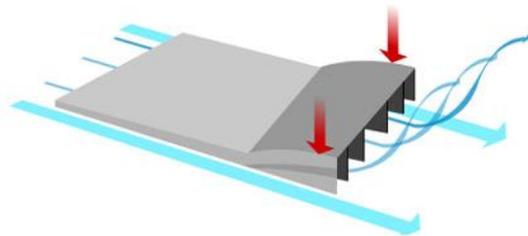


Ilustración 6.11: Líneas de corriente en un difusor [28]

El diseño del fondo plano y el difusor de un F1 es muy importante, ya que proporciona aproximadamente una tercera parte de la carga aerodinámica total del vehículo generando muy poca resistencia al avance.

Este hecho hace que sea muy importante el diseño de los difusores y que las escuderías de F1 innoven año tras año. Uno de los primeros pasos fue la agregación de unos paneles laterales que impiden que el flujo de aire se escape por los laterales. [24][35][36]

7. Análisis difusores

Como se ha dicho anteriormente los difusores son una parte muy importante de los vehículos de F1, ya que proporcionan gran parte de la carga aerodinámica y muy poca resistencia al avance. Por ello se van a estudiar distintos modelos de difusores introducidos por las escuderías de F1 en los últimos tiempos, muchas veces generando polémica

7.1 Doble difusor

Este tipo de difusor permitió hacer campeón del mundial de F1 al equipo Brawn GP gracias a una idea revolucionaria. Estos difusores permitían canalizar más flujo de aire gracias a unos orificios en la parte superior que canalizaban el flujo de aire de los laterales hacia el difusor.

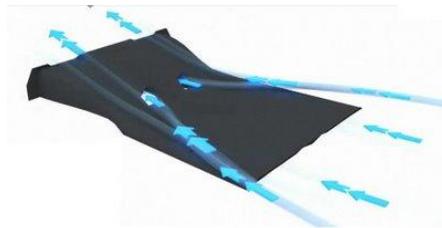


Ilustración 7.1: Recorrido del aire por encima del difusor [29]

Este flujo de aire es expulsado a través de un canal en la zona central superior en forma de V creando un efecto similar al de un alerón.



Ilustración 7.2: Salida del aire del difusor [29]

Se puede observar la diferencia entre cómo expulsa el aire un difusor convencional y el difusor de Brawn GP. El difusor de Brawn GP canaliza más aire ya que aprovecha el flujo que recibe por los orificios laterales.



Ilustración 7.3: Líneas de corriente en el doble difusor [29]

Aunque Brawn GP fue la primera escudería en utilizar este tipo de difusor el resto de escuderías no tardaron en imitarlo.



Ilustración 7.4: Vista trasera del difusor de Brawn GP [29]

Uno de los primeros en imitarlo fue la escudería Renault, que en apenas un gran premio ya había sustituido su difusor original por uno similar al de Brawn GP.

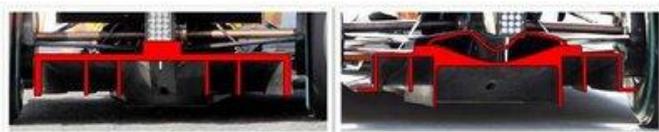


Ilustración 7.6: Diferencia de forma entre difusor normal y doble difusor [29]

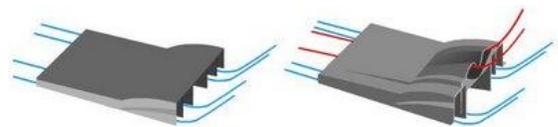


Ilustración 7.5: Diferencia de líneas de corriente entre difusor normal y doble difusor [29]

7.2 Difusor soplado

La primera escudería en sacar el máximo partido de este tipo de difusor fue Red Bull, en concreto Adrian Newey, como solución a la prohibición del doble difusor.

En un vehículo convencional los gases del motor se expulsan por la parte posterior mediante el tubo de escape. La novedad de estos difusores en la F1 fue dirigir estos tubos de escape hacia la zona que interesaba, el difusor, aumentando así el flujo de aire.

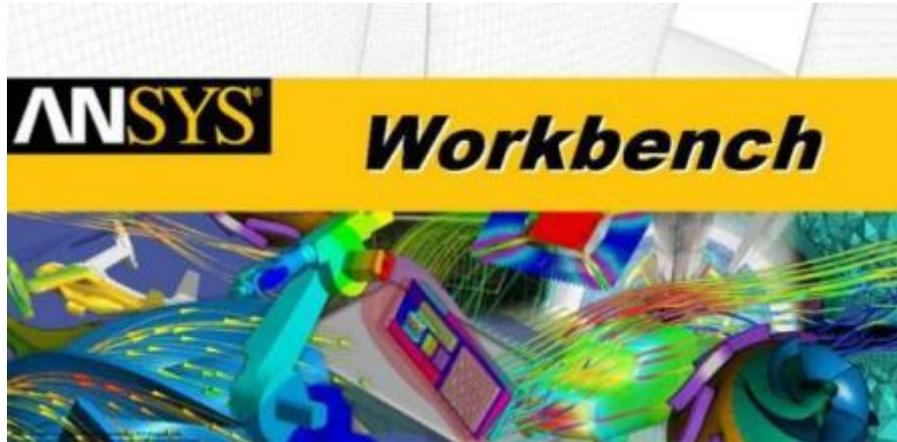


Ilustración 7.7: Soplador de aire hacia el difusor [30]

La polémica de estos difusores se produce porque los tubos de escape solo emiten gases cuando el piloto tiene el pedal del acelerador pisado, por lo que en curvas en las que no se pisa el acelerador y en las frenadas se perdía su efecto. Para solventar esto, Red Bull tenía un mapa de motor que emitía gases todo el tiempo, tanto si el piloto aceleraba como si no. El problema de este mapa de motor es que no se podía durante todo un gran premio, ya que el motor se sobrecalentaría. Así que la solución que encontró Red Bull fue utilizar este mapa para la calificación y la salida en la carrera. Es por eso que casi siempre lograban las mejores posiciones en la parrilla de salida y en apenas dos vueltas ya tenían la carrera sentenciada.

8. Simulación numérica

Para llevar a cabo las simulaciones numéricas de un difusor se utilizará un método CFD mediante el programa *Ansys Workbench 14.5*.



Este programa lo que hace básicamente es simular el comportamiento de un fluido en una geometría dada, pudiendo observar muchos datos de interés, como la distribución de velocidades o de presiones y cálculos aproximados de los coeficientes de resistencia al avance y de sustentación.

El primer paso para empezar a utilizar este programa es definir la geometría. A lo largo de todo el proyecto todos los análisis se realizarán en 2D debido a que en el caso de los difusores no se aprecian grandes diferencias con el caso en 3D. En un primer estudio se van a observar las diferencias existentes entre un tubo de sección constante y un tubo con sección variable en forma de difusor. Para ambos casos se utilizarán unas dimensiones lo más parecidas posible a las dimensiones reales que tendría este difusor en un Fórmula 1.

Como se ha visto anteriormente un difusor consta de una zona de sección constante y otra parte posterior a esta donde esta sección aumenta de manera progresiva. En el caso de un Fórmula 1, el fondo del vehículo hace la función de tubo de sección constante, y a partir del eje trasero se encuentra el difusor propiamente dicho.

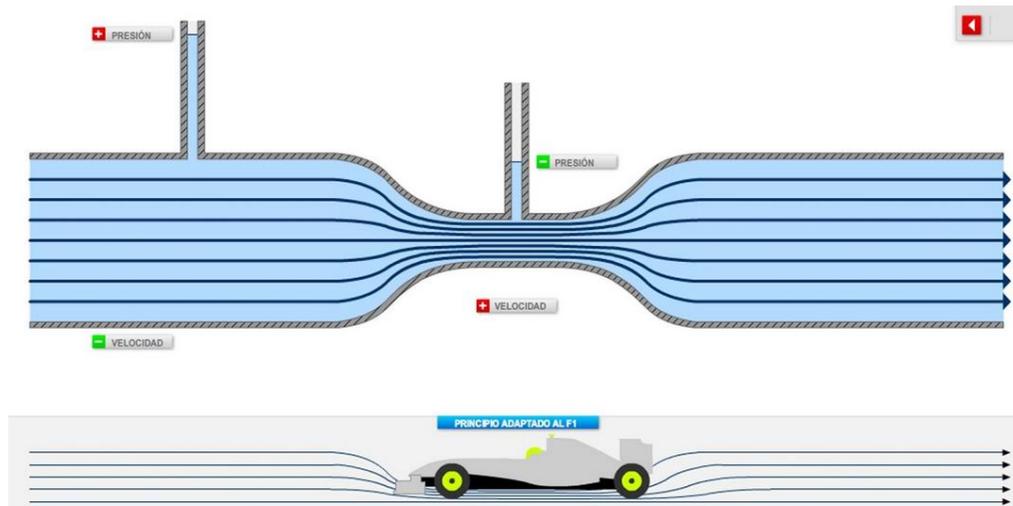


Ilustración 8.1: Efecto Venturi en el vehículo [21]

En el primer caso de estudio se considerará que el elemento a estudiar es el siguiente



Ilustración 8.2: Geometría de un tubo de sección constante

La figura muestra la sección de espacio ocupada por un fluido, en este caso el aire. A la hora de establecer las condiciones de contorno se considerarán las líneas verticales a la izquierda y a la derecha de la figura como la entrada y salida de aire respectivamente. Las líneas horizontales se considerarán como paredes en las que se cumple la condición de no deslizamiento. La superior corresponde al fondo plano del monoplaça, y la inferior al asfalto. Es decir, la geometría representa la cavidad que queda debajo del vehículo que es ocupada por aire.

En la realidad lo que se desplaza es el vehículo, pero a la hora de realizar los análisis se considerará que el vehículo está fijo y que es la corriente de aire la que incide sobre éste. Así pues, se trabajará con velocidades relativas. En cuanto a la velocidad del fluido se considerará un valor de 50 m/s, que equivale aproximadamente a una velocidad de 180 km/h, velocidad fácilmente alcanzable para un Fórmula 1.

Teniendo en cuenta esto, a la línea horizontal inferior de la geometría, que corresponde con el suelo, también se le asignará esta misma velocidad como condición de contorno, ya que todo está visto desde la referencia relativa vehículo.

Y en cuanto a la condición de salida se impondrá que el aire que fluye por el interior del vehículo acaba desembocando al exterior a presión atmosférica, por lo que se establece una presión relativa nula.

Una vez establecidas las condiciones de contorno se puede empezar con la simulación. En este caso es interesante observar la distribución tanto de presiones como de velocidades y las líneas de corriente.

En el caso de las presiones se obtienen los siguientes resultados

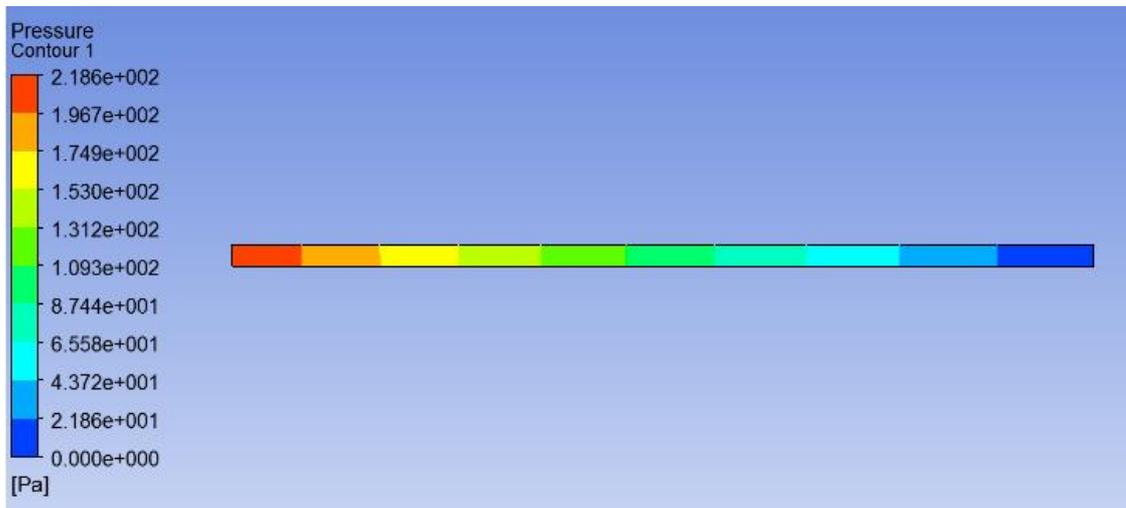


Ilustración 8.3: Distribución de presiones a lo largo del tubo

Se observa que el gradiente de presión es lineal y que varía de una presión de aproximadamente 220 Pa a la entrada hasta una presión de salida igual a la ambiente.

Algo parecido sucede en el caso de las velocidades. A continuación se muestran los resultados obtenidos haciendo zoom en la salida del difusor.

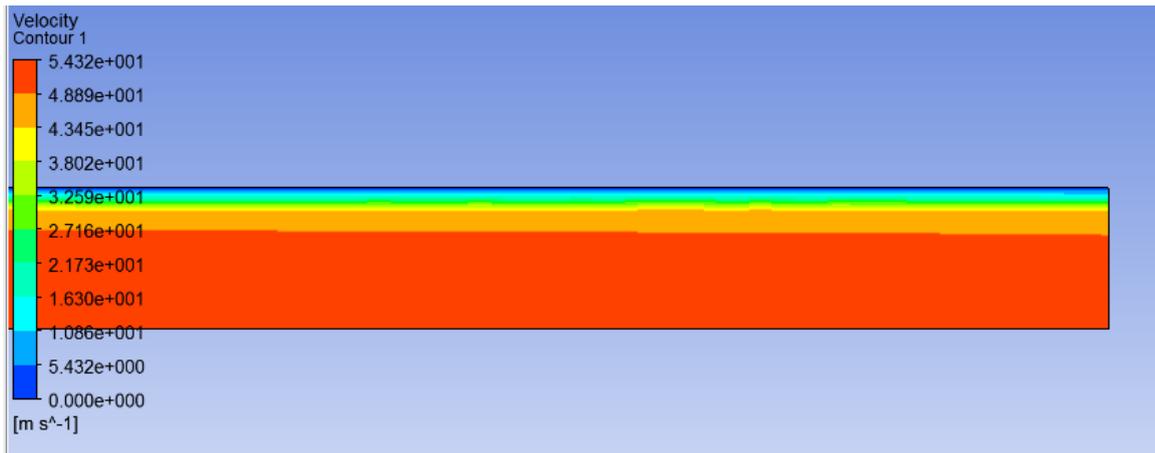


Ilustración 8.4: Distribución de velocidades en la parte final del tubo

Se observa que la velocidad es máxima y prácticamente constante a lo largo del conducto. Se observa que en la zona más cercana a lo que sería el fondo del vehículo la velocidad es nula debido a la condición de no deslizamiento, lo que puede provocar el desprendimiento de capa límite.

En cuanto a las líneas de corriente se puede observar que en este caso prácticamente no sufren variación de dirección a lo largo del conducto.

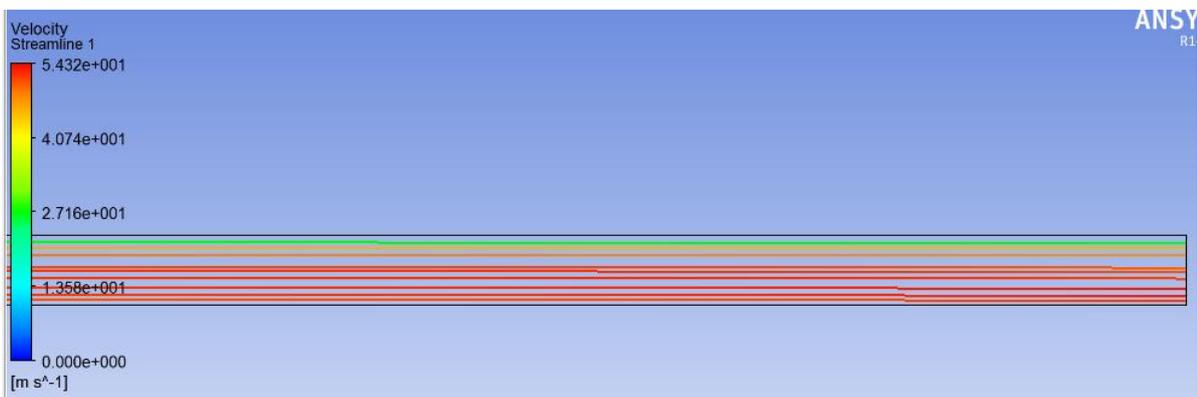


Ilustración 8.5: Líneas de corriente en el tubo

A continuación se estudiará una geometría similar a la del apartado anterior pero con una zona de sección variable al final del conducto que hará la función de difusor de flujo.



Ilustración 8.6: Geometría de tubo con difusor en la parte final

En este caso se puede observar como al final del perfil hay un incremento de sección que simula el efecto de un difusor. Se aplican las mismas condiciones que en el caso anterior, ya que las condiciones de trabajo son las mismas y se quiere apreciar las diferencias entre la existencia o no del difusor para un mismo caso.

En primer punto se vuelven a observar las presiones a lo largo del conducto, obteniendo el siguiente resultado.

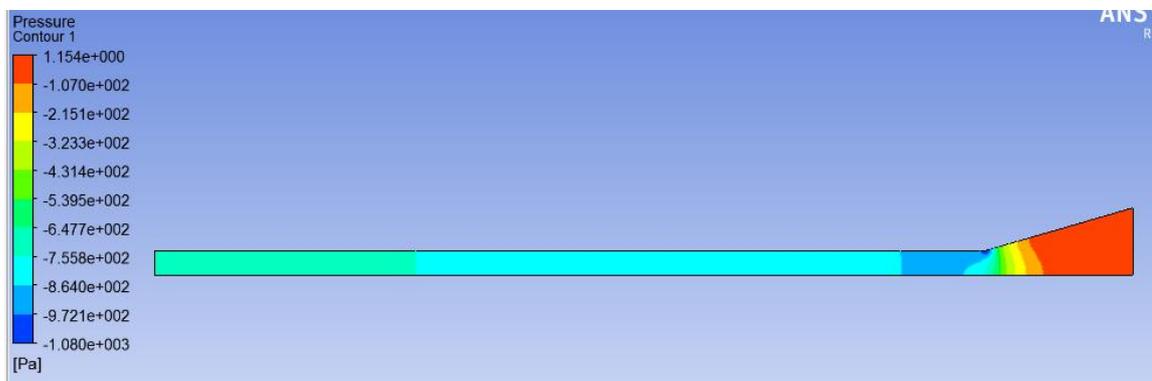


Ilustración 8.7: Distribución de presiones en el tubo y difusor

En este caso se observa cómo la presión es constante a lo largo del conducto hasta llegar a la zona del difusor. En esta zona la presión va aumentando según aumenta la sección debido a que en esta zona la velocidad disminuye.

En el caso de las velocidades se obtiene el siguiente perfil.

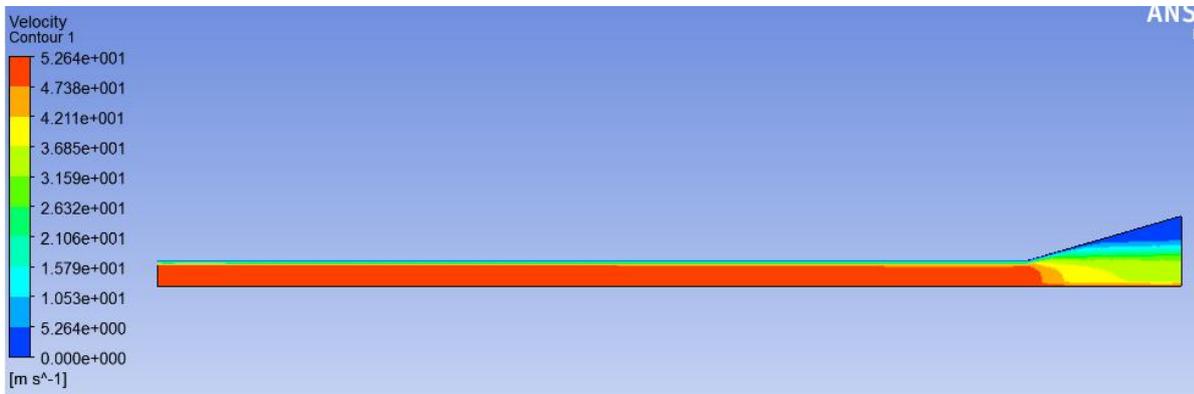


Ilustración 8.8: Distribución de velocidades en el tubo y difusor

Se observa como a lo largo de la zona de sección constante el resultado es similar al obtenido anteriormente, pero en la zona de difusor la velocidad disminuye. También se observa una zona en la parte superior del difusor donde la velocidad es nula debido a la condición de no deslizamiento y al desprendimiento de la capa límite.

Este hecho se puede ver con más claridad visualizando las líneas de corriente.

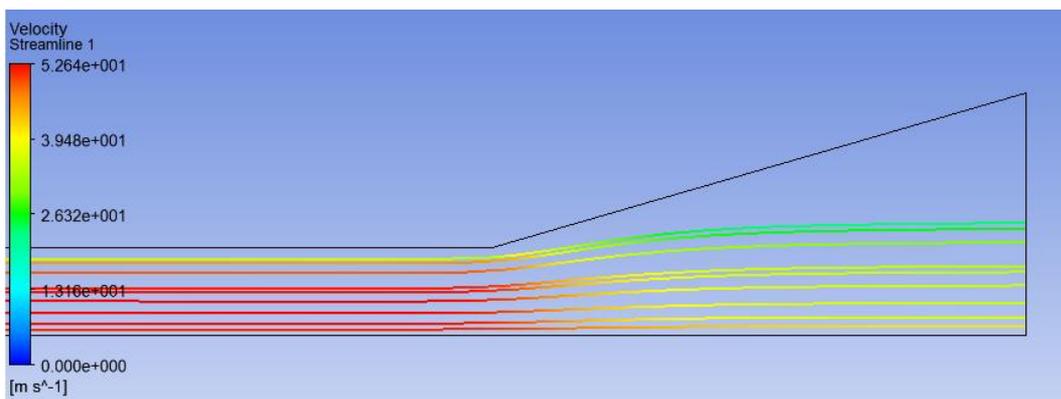


Ilustración 8.9: Líneas de corriente en el difusor

Debido al desprendimiento de la capa límite las líneas de corriente no siguen demasiado la forma del difusor. Es por esto que se tratará de diseñar otro modelo de difusor donde se consiga que las líneas de corriente se adapten el máximo posible a la geometría del difusor.

En este caso es también interesante visualizar los vectores velocidad.

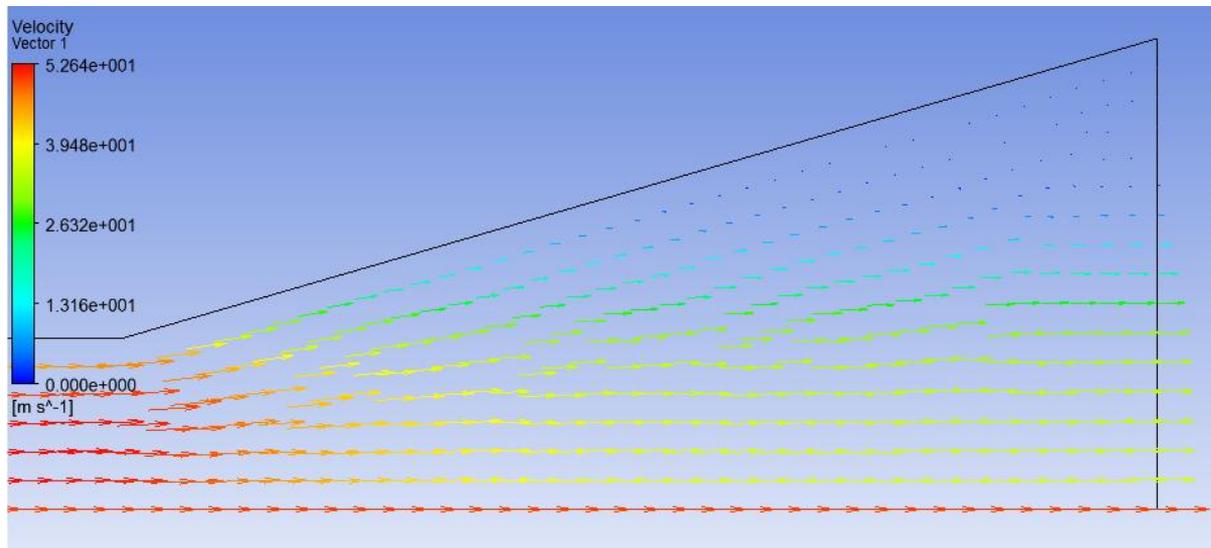


Ilustración 8.10: Vectores velocidad en el difusor

Se puede observar como en la zona donde ocurre el desprendimiento de capa límite la velocidad es mínima llegando incluso a ir en sentido negativo debido a que la presión es adversa y no la puede vencer.

Haciendo la comparativa entre los dos casos estudiados, se concluye que en el caso de que exista un difusor en la zona final del conducto, que en este caso representa la cavidad debajo del monoplaza, la presión es inferior que en el caso contrario, ya que el incremento de sección implica que el aire se tiene que acelerar a lo largo del conducto para rellenar ese espacio extra, y por tanto al tener más velocidad se obtiene menos presión. Esta presión se aumenta luego en la zona del difusor para extraer el flujo de aire al exterior con una presión lo más similar posible a la atmosférica. El hecho de que la presión debajo del vehículo sea inferior a la presión que hay sobre el mismo, presión atmosférica, se traduce en un aumento de carga aerodinámica.

9. Diseño de un difusor

Una vez comprendida la necesidad de utilizar un difusor en los Fórmula1 se procede con el diseño del mismo.

En primer lugar se procederá con el diseño de diferentes geometrías con algunos parámetros comunes a todos ellos. En todos los casos las condiciones de contorno que se aplicarán serán las mismas que se utilizaron en el apartado anterior, velocidad en la entrada de 50 m/s, salida a presión atmosférica, condición de no deslizamiento en la zona correspondiente al difusor, y velocidad igual a la del fluido en la zona correspondiente al asfalto, ya que como se ha explicado anteriormente se utilizarán velocidades relativas a la referencia vehículo cuando éste está en movimiento.

En todos los casos estudiados se considerará una misma longitud del difusor y una misma altura del difusor, 175 mm, que es el máximo permitido, y una distancia del monoplaza al suelo de 100 mm. Por lo tanto lo que se modificará principalmente en cada estudio será la forma correspondiente al difusor.

Caso 1

Una primera opción a estudiar es utilizar una geometría similar a la empleada anteriormente, adaptando las dimensiones a las de un Fórmula1, obteniendo el siguiente resultado al visualizar las líneas de corriente.

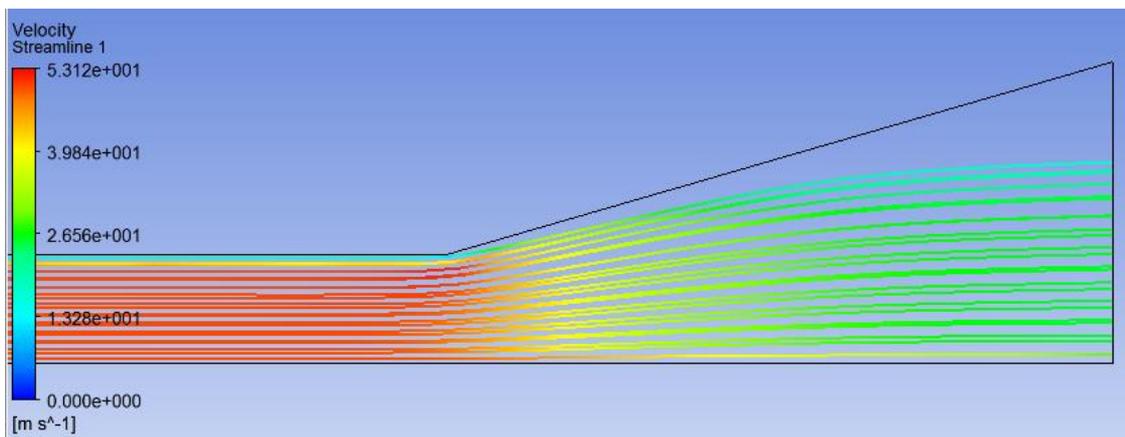


Ilustración 9.1: Líneas de corriente en el difusor del caso 1

Como se ha visto anteriormente las líneas de corriente no se adhieren demasiado al contorno de la geometría del difusor. Si por otra parte se visualizan las presiones

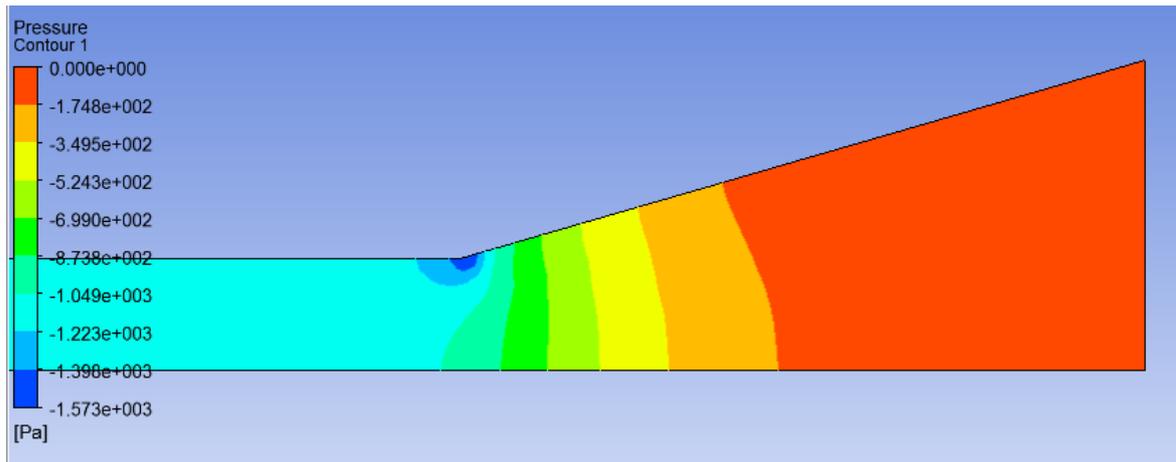


Ilustración 9.2: Distribución de presiones en el caso 1

Se observa que justo en el punto donde empieza el difusor se produce un punto con presión inferior al resto. Esto se debe a que es un punto singular debido al cambio brusco de sección. También se puede ver el perfil de velocidades.

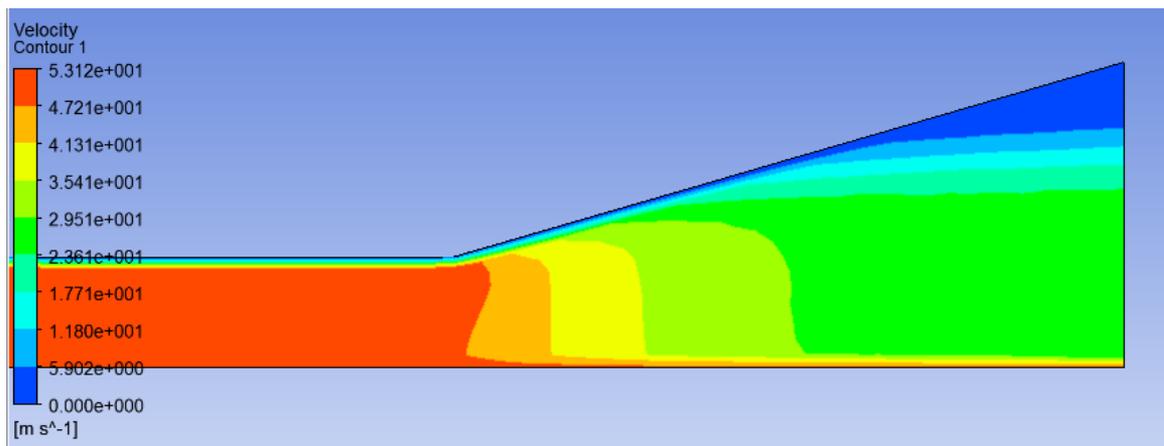


Ilustración 9.3: Distribución de velocidades en el caso 1

Por tanto parece que para evitar este punto singular y el temprano desprendimiento de la capa límite se debe tratar de realizar un cambio de sección lo más suave posible.

Caso 2

Para ello se ha probado de utilizar una geometría que haga la forma del difusor con un perfil curvado lo más suave posible, siendo tangente al conducto en la zona donde empieza el difusor.

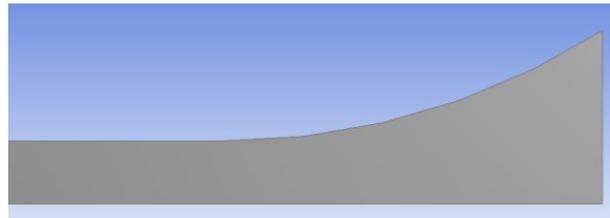


Ilustración 9.4: Geometría estudiada en el caso 2

Para este nuevo perfil se han obtenido las líneas de corriente con el siguiente resultado

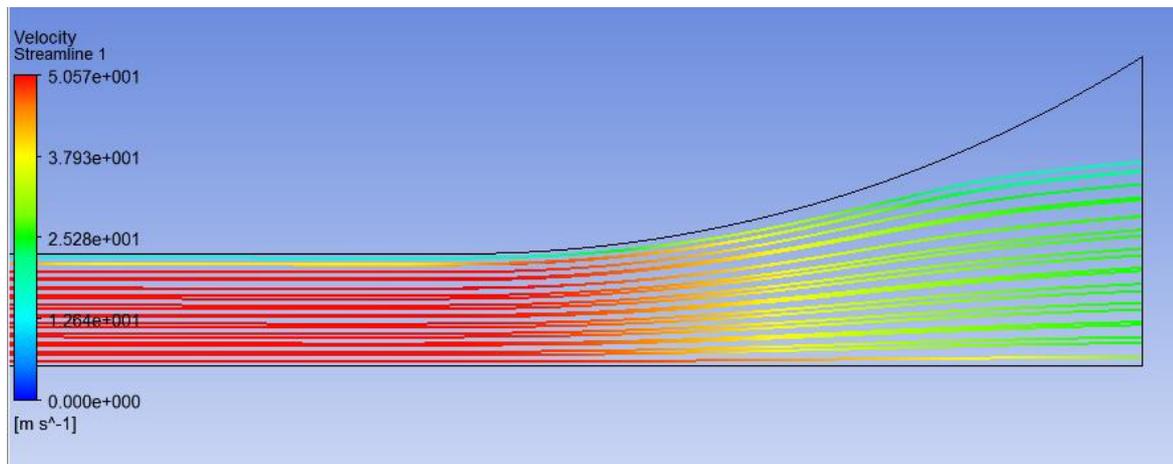


Ilustración 9.5: Líneas de corriente en el difusor del caso 2

En este caso se comprueba que las líneas de corriente siguen mucho mejor la geometría del perfil que en el caso anterior.

Si se estudia el perfil de presiones se obtiene el siguiente resultado

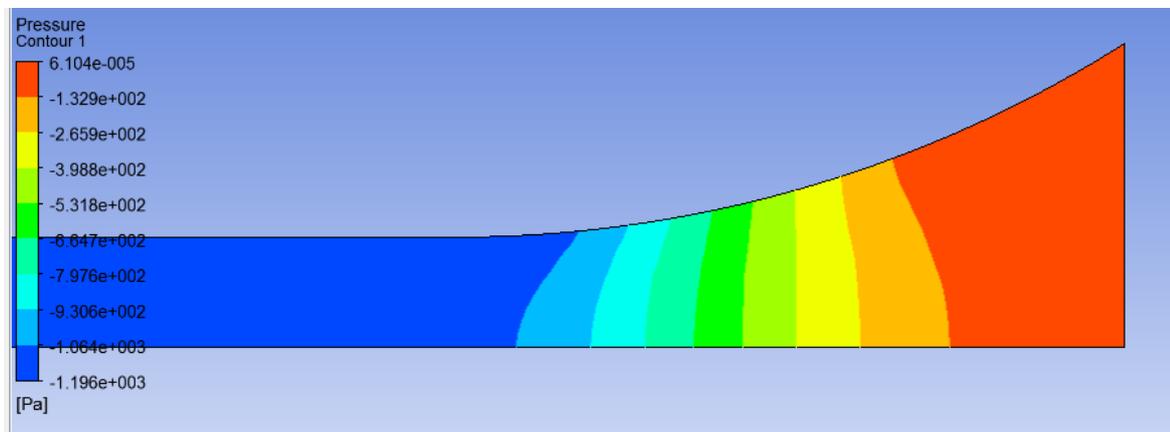


Ilustración 9.6: Distribución de presiones en el caso 2

Se puede apreciar como la presión varía de forma gradual a lo largo del difusor, sin provocar un punto singular de baja presión debido a que el incremento de sección es mucho más gradual que en el primer estudio.

También es interesante ver que la presión a lo largo del conducto es negativa, lo que significa que es inferior a la presión ambiental, que traducido en términos aerodinámicos significa que al ser inferior la presión bajo el monoplaque que sobre él se genera una fuerza de sustentación negativa, carga aerodinámica.

Para el análisis de velocidades se obtiene la siguiente distribución

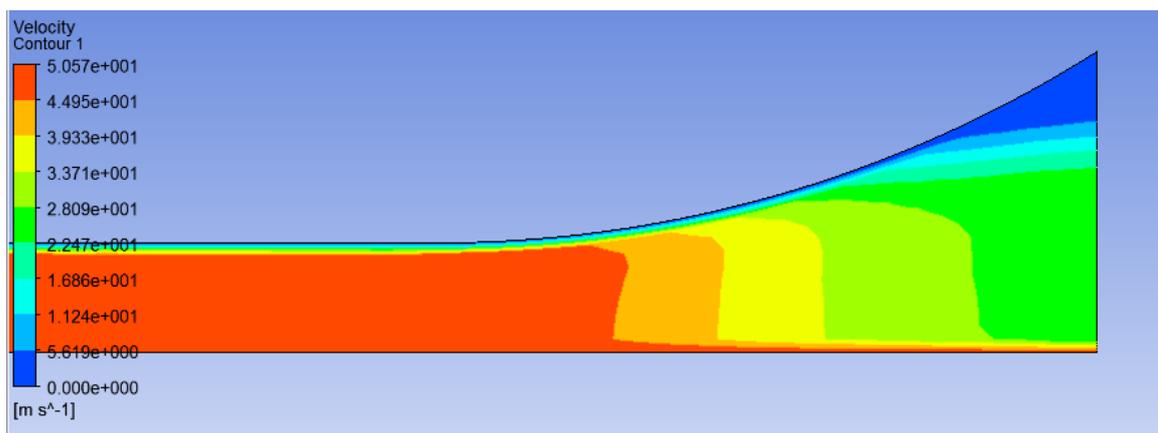


Ilustración 9.7: Distribución de velocidades en el caso 2

Se comprueba que la reducción de velocidad en el difusor se realiza de forma suave, sin cambios bruscos de velocidad, excepto en la zona superior, donde debido a la condición de no deslizamiento se produce el desprendimiento de la capa límite.

Caso 3

Para intentar minimizar este efecto se ha diseñado una nueva geometría donde en la zona final del difusor no haya un cambio de sección muy pronunciado. Se ha probado con la siguiente geometría

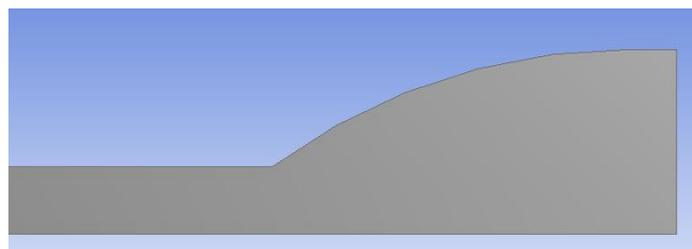


Ilustración 9.8: Geometría estudiada en el caso 3

Como en el primer caso, el cambio de sección al inicio del difusor es demasiado pronunciado, produciéndose también un punto singular e impidiendo que las líneas de corriente se peguen al difusor.

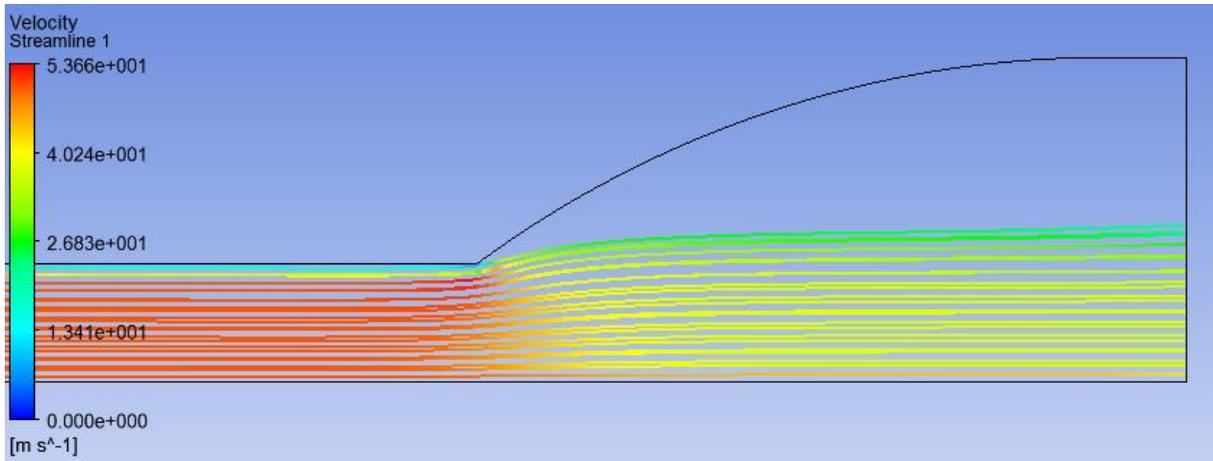


Ilustración 9.9: Líneas de corriente en el difusor del caso 3

En cuanto a la distribución de presiones el resultado obtenido tampoco ha sido bueno

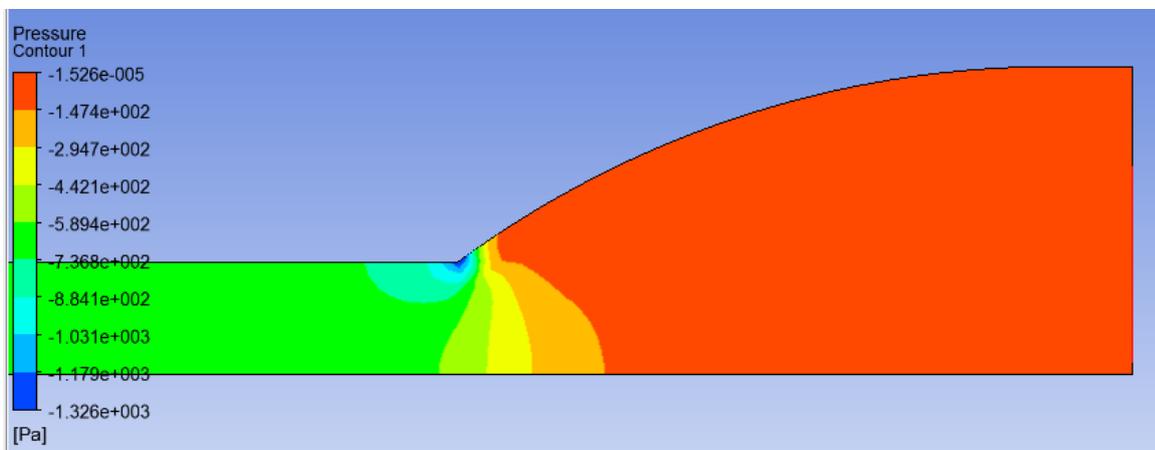


Ilustración 9.10: Distribución de presiones en el caso 3

Ya que se puede ver que el gradiente de presiones en el difusor no es para nada suave, se produce de forma brusca al inicio de éste. Observando el perfil de velocidades se obtienen los resultados esperados

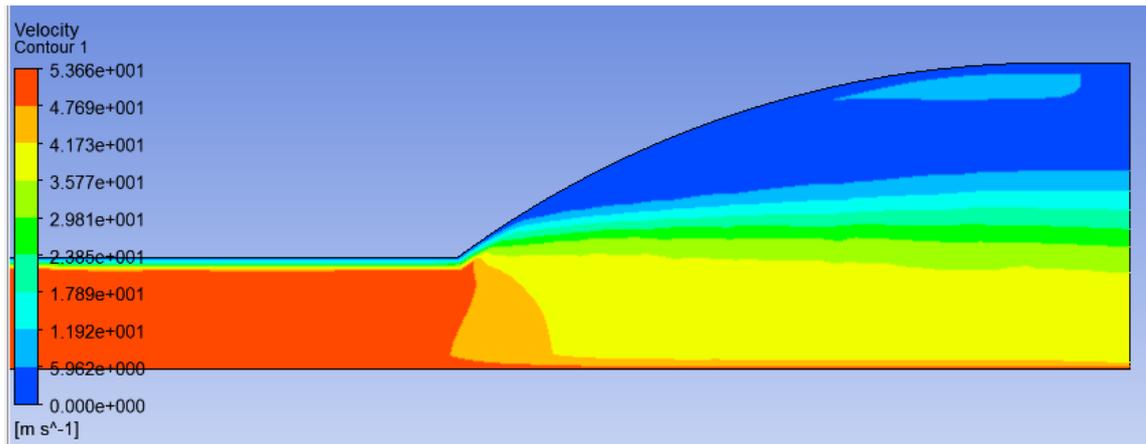


Ilustración 9.11: Distribución de velocidades en el caso 3

En la parte superior del difusor la velocidad es nula debido a que el fluido no llega a esta zona debido al desprendimiento de la capa límite.

Por lo tanto parece claro que la geometría del difusor debe empezar con una forma curvada lo más suave posible.

Caso 4

La siguiente geometría analizada ha sido una mezcla de las dos anteriores, con un inicio curvado muy suave tangente al conducto y un punto de inflexión para acabar con una curva similar a la del caso anterior, con un gradiente de sección suave al final del difusor.

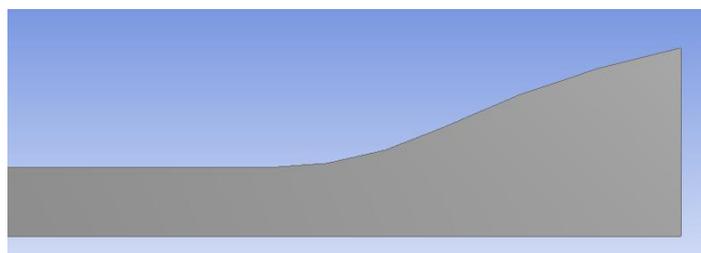


Ilustración 9.12: Geometría estudiada en el caso 4

En este caso se observa que el comportamiento es muy similar al del caso 2 en el inicio del difusor, pero en el punto de inflexión donde la curva cambia de tener una forma parecida a la del caso 2 a ser similar a la del caso 3 las líneas de corriente vuelven a despegarse debido al cambio brusco de sección.

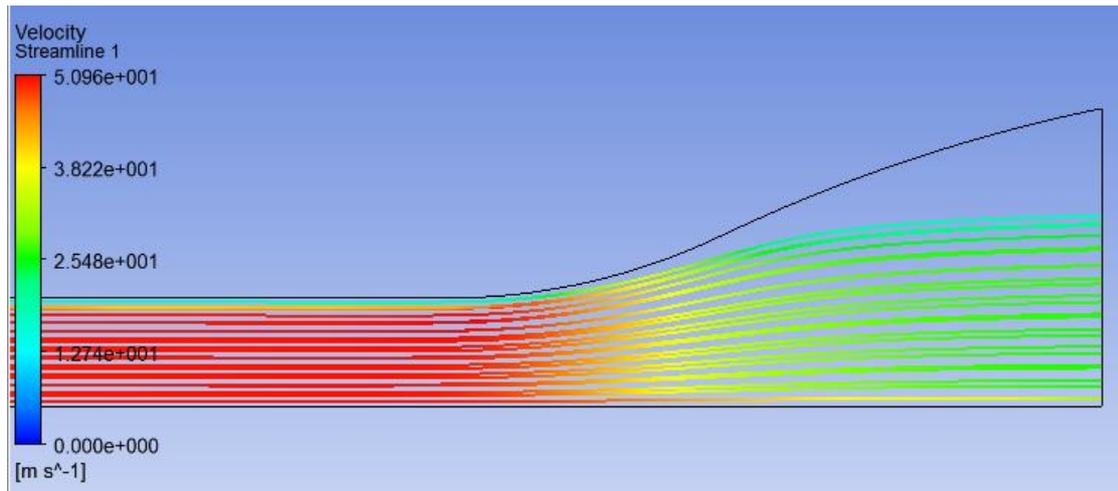


Ilustración 9.13: Líneas de corriente en el difusor del caso 4

Observando la distribución de presiones se llega a la misma conclusión

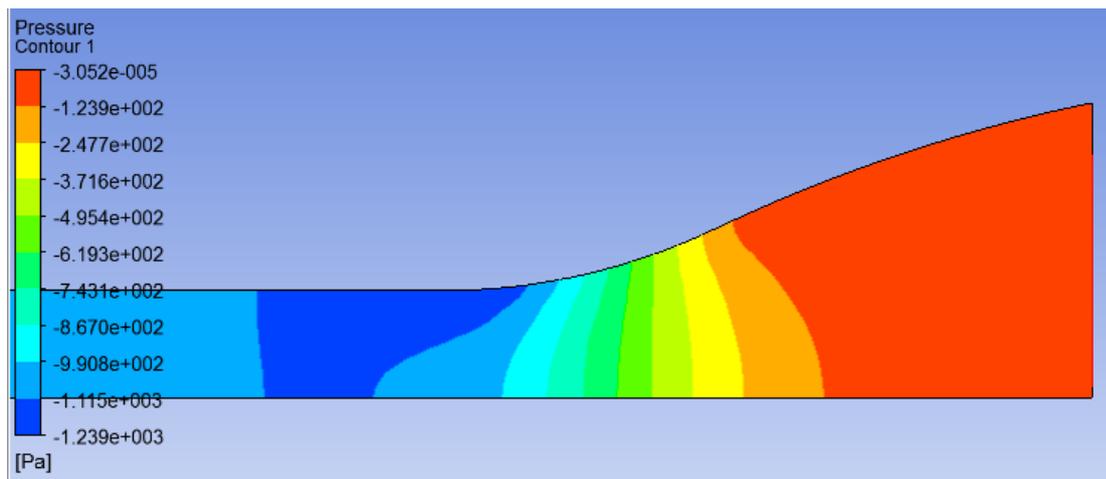


Ilustración 9.14: Distribución de presiones en el caso 4

En el momento en el que se produce el cambio brusco de sección se produce también el cambio brusco de presión, por lo que el gradiente de presiones no es suave a lo largo de todo el difusor.

En cuanto al perfil de velocidades se llega a la misma conclusión

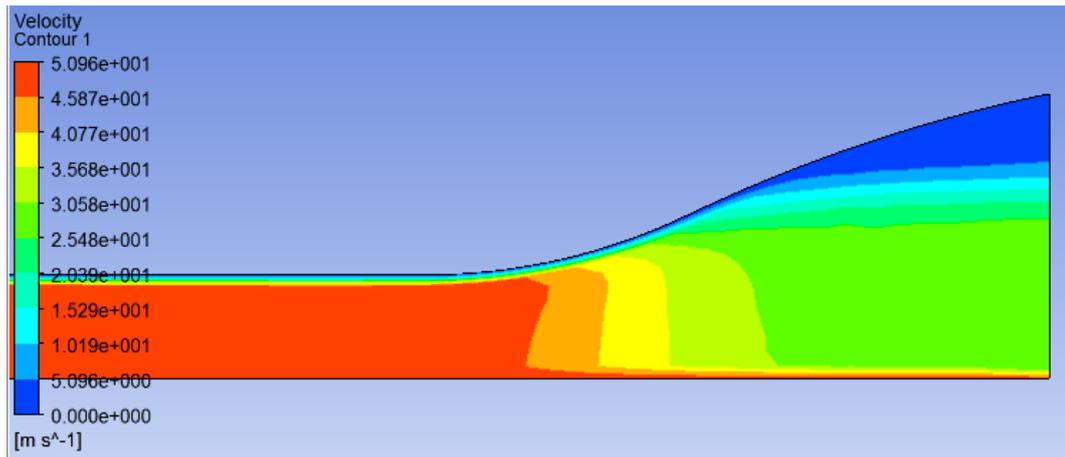


Ilustración 9.15: Distribución de velocidades en el caso 4

Al inicio es similar al del caso 2 pero luego se vuelve como el del caso 3.

Caso 5

Así pues, la siguiente geometría a analizar será similar a la anterior, con inicio del difusor suave como en el caso 2 y final del difusor también suave como en el caso 3. Pero a diferencia del estudio anterior, en lugar de hacer un único cambio de una curva a otra se realizará en dos tandas, para así evitar un cambio brusco repentino en la sección.

La geometría a analizar será la siguiente

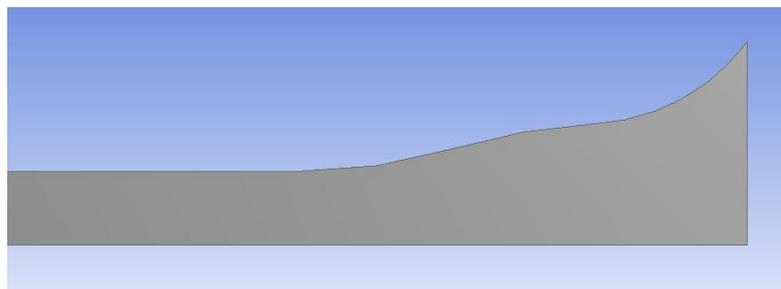


Ilustración 9.16: Geometría estudiada en el caso 5

Tiene un inicio similar al del caso anterior para acabar con un perfil similar al del caso 2, el que por ahora mejores resultados ha obtenido.

En este caso tanto el gradiente de presiones como el de velocidades en el interior del difusor es bastante suave como se puede comprobar a continuación

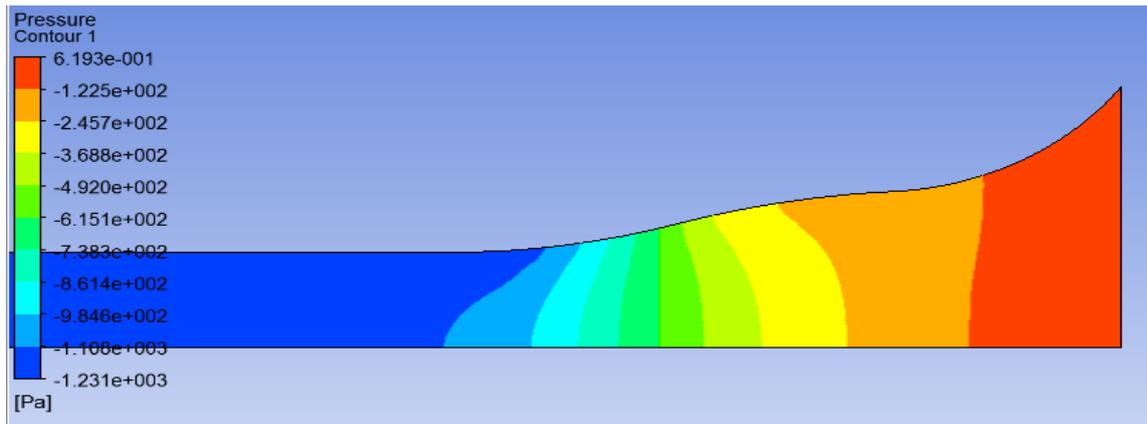


Ilustración 9.17: Distribución de presiones en el caso 5

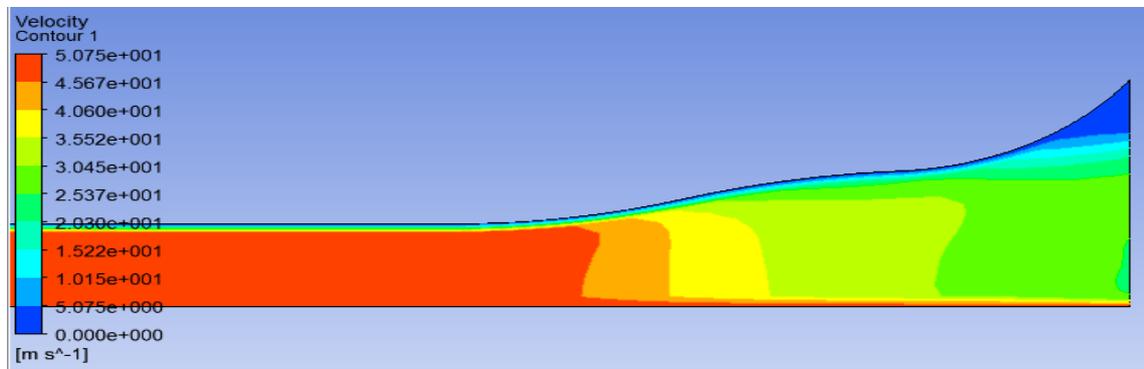


Ilustración 9.18: Distribución de velocidades en el caso 5

Pero como sucede en todos los casos anteriores se vuelve a producir el desprendimiento de capa límite en la parte final superior del difusor.

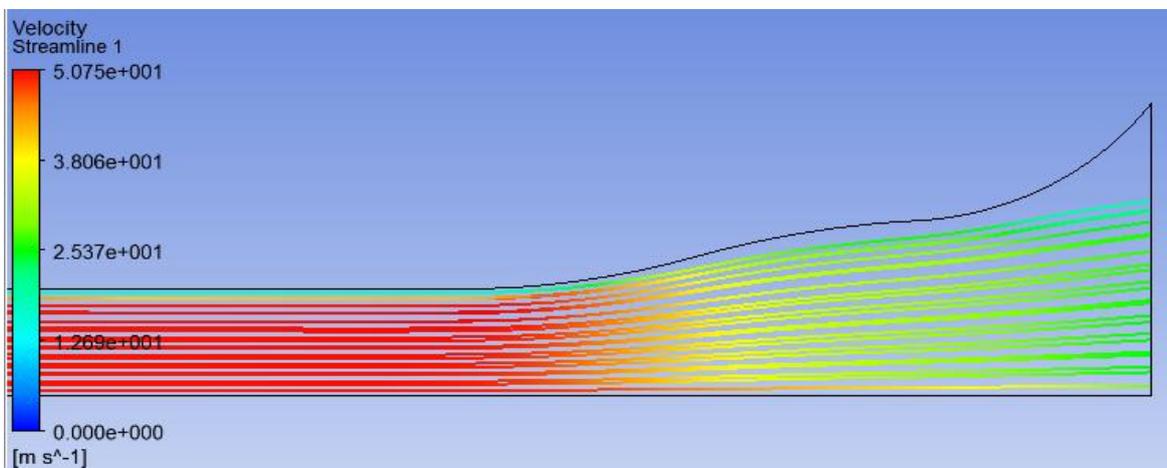


Ilustración 9.19: Líneas de corriente en el difusor del caso 5

Impidiendo nuevamente que las líneas de corriente se peguen al difusor en el punto en el que se produce el cambio de sección más pronunciado.

Es por esto que parece que la mejor opción es la estudiada en el caso 2, ya que es la geometría que tiene los cambios de sección menos bruscos.

Caso 6

Dando por hecho que se va a producir desprendimiento de capa límite, se ha analizado una nueva geometría con un cambio de sección muy suave a lo largo de todo el difusor excepto en la zona final, donde se produce un cambio de sección muy pronunciado.

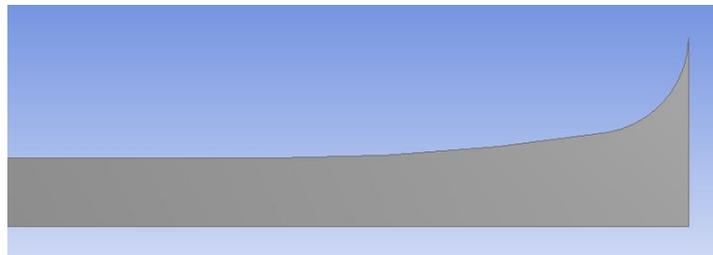


Ilustración 9.20: Geometría estudiada en el caso 6

Como era de esperar, las líneas de corriente siguen bastante bien la forma del difusor en la zona con poco cambio de sección, pero a partir del punto donde se produce el gran cambio casi al final del difusor las líneas se despegan. Aun así en ese sentido se obtienen los mejores resultados.

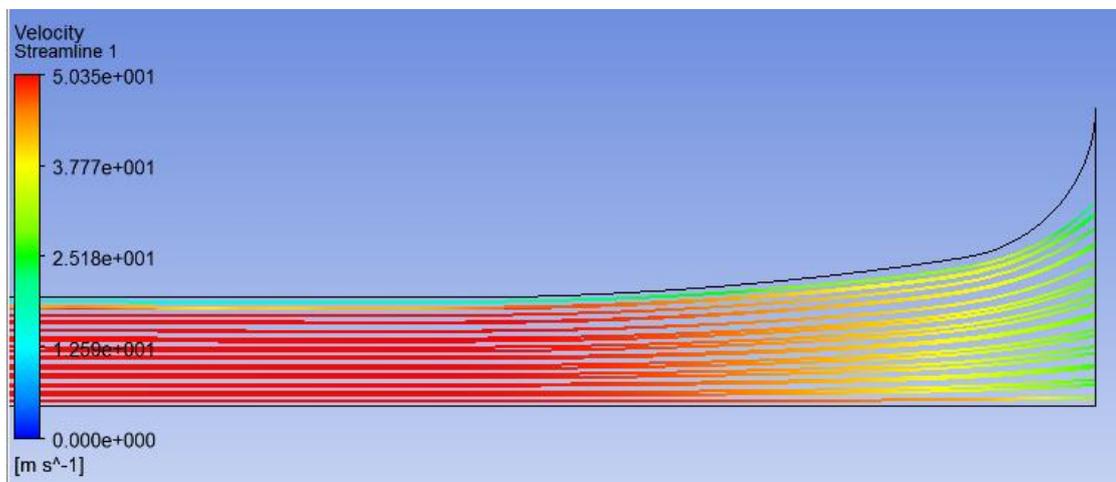


Ilustración 9.21: Líneas de corriente en el difusor del caso 6

En cuanto a los gradientes de presiones y velocidades, con esta geometría se obtienen quizá los más suaves

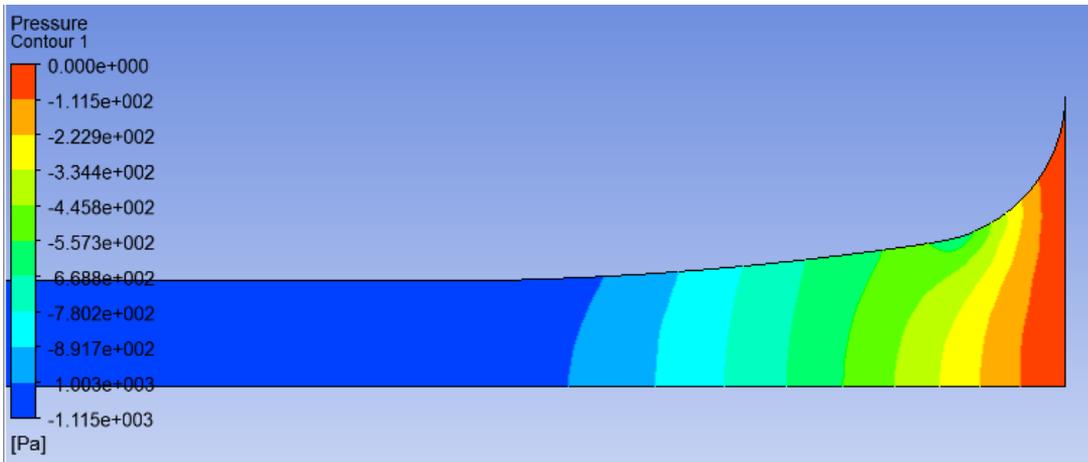


Ilustración 9.22: Distribución de presiones en el caso 6

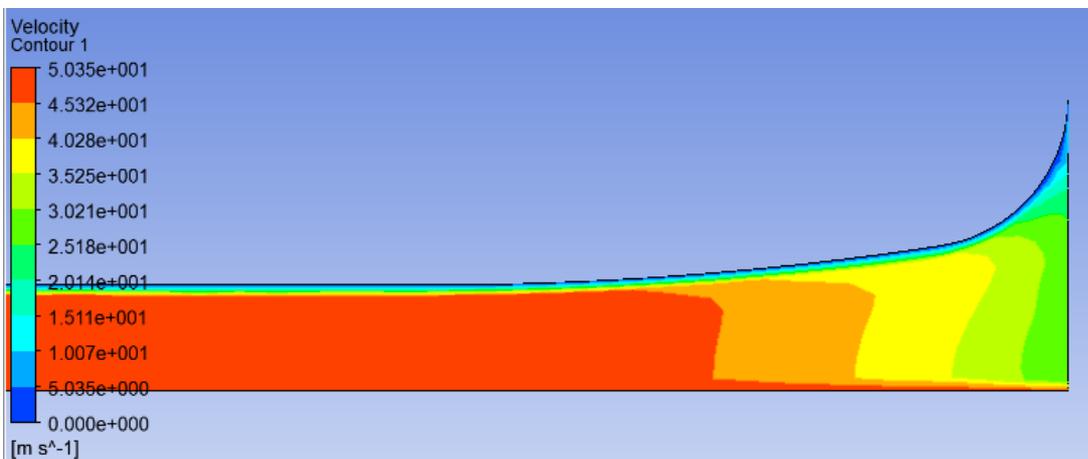


Ilustración 9.23: Distribución de velocidades en el caso 6

Esto sucede porque el incremento de sección en el difusor se produce de manera muy suave, provocando así que los cambios de presión y velocidad también sean muy suaves.

Caso 7

Dado que la geometría anterior es la que proporciona los mejores resultados en lo que a la forma de las líneas de corriente se refiere, se ha tratado de hacer una pequeña variación sobre este modelo.

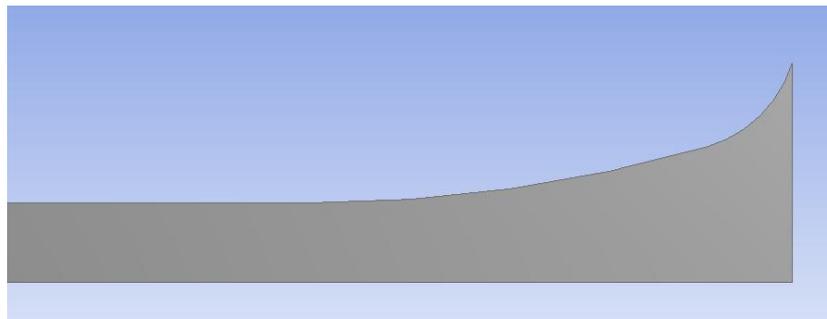


Ilustración 9.24: Geometría estudiada en el caso 7

En este nuevo estudio el incremento de sección también será muy suave en la gran mayoría del difusor, aunque no tanto como en el caso anterior, para que de esta forma el incremento de sección al final no sea tan pronunciado.

En este caso se han obtenido los siguientes resultados al visualizar las líneas de corriente

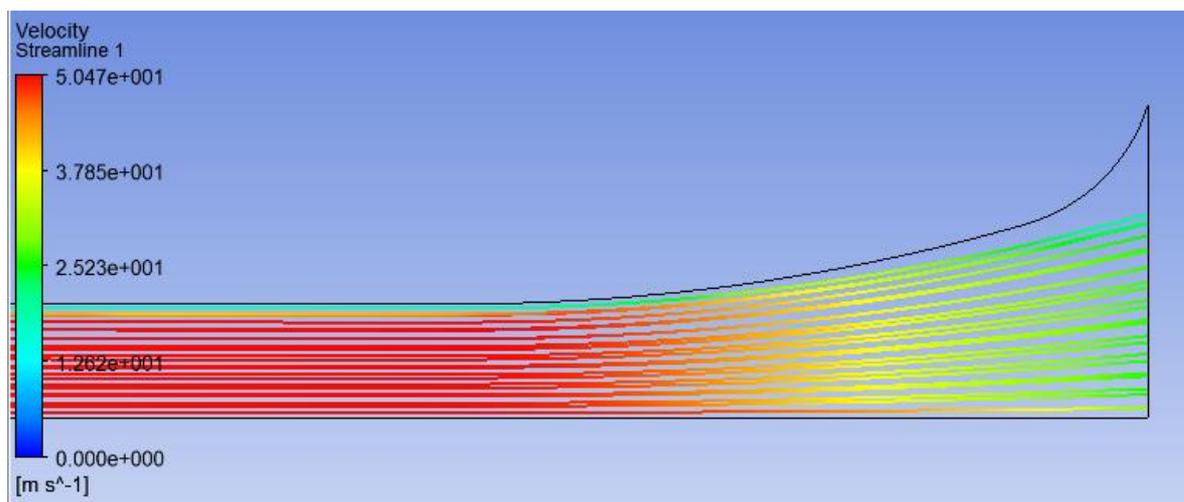


Ilustración 9.25: Líneas de corriente en el difusor del caso 7

Se puede apreciar que igual que en el caso anterior, cuando se produce el cambio más pronunciado de sección las líneas de corriente vuelven a despegarse del difusor.

En cuanto a los resultados obtenidos para el perfil de velocidades y de presiones, los gradientes también son suaves por el mismo motivo que en el caso anterior.

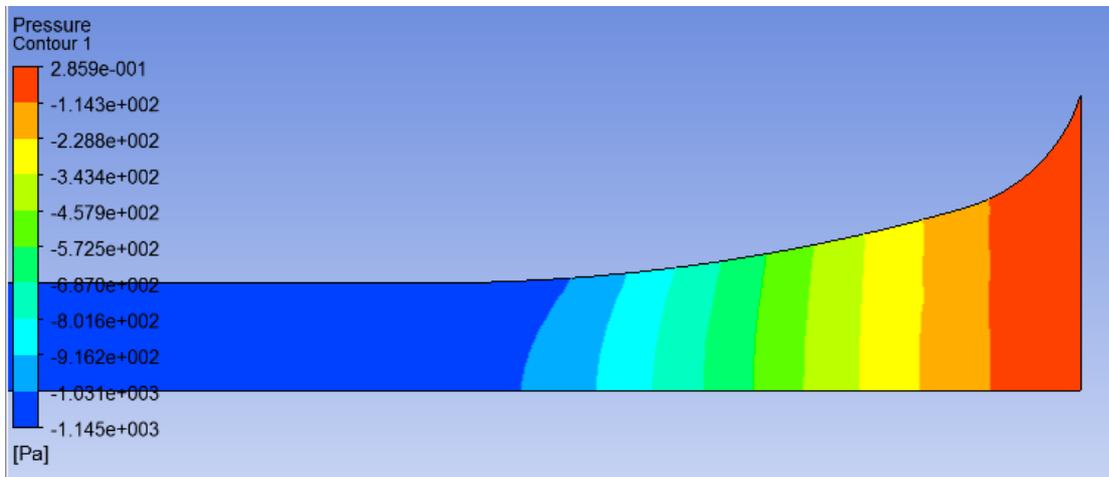


Ilustración 9.26: Distribución de presiones en el caso 7

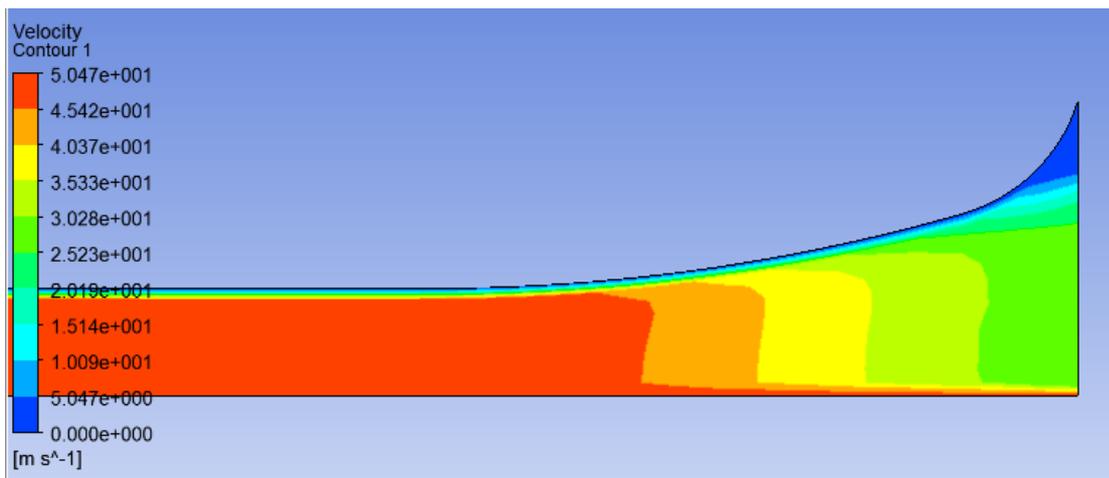


Ilustración 9.27: Distribución de velocidades en el caso 7

10. Estudio difusores diseñados

Una vez vistos distintos modelos de difusor, se ha llegado a la conclusión de que los mejores son los correspondientes al caso 6 y al caso 7. Por ello se va a proceder con el estudio de estos modelos incluidos en el vehículo.

En primer lugar se creará una geometría que represente la forma de un vehículo con la forma del difusor en la parte inferior posterior, y esta geometría se introducirá en una caja lo suficientemente grande para que sus límites no afecten al estudio que se desea realizar.

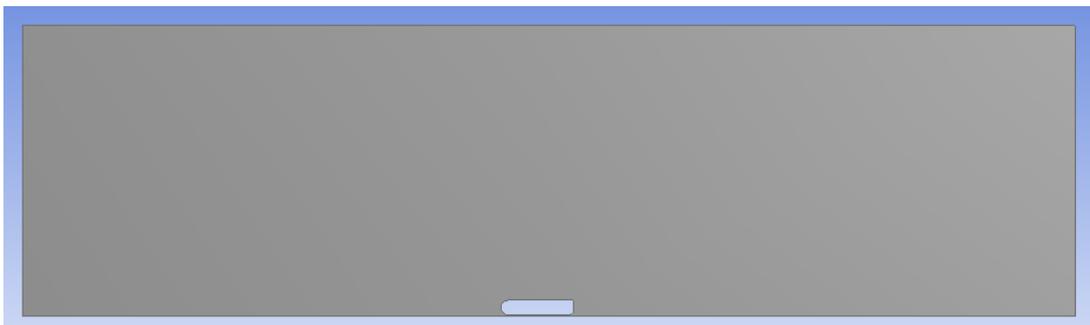


Ilustración 10.1: Geometría a estudiar



Ilustración 10.2: Detalle del vehículo

El vehículo se ha dibujado lo suficientemente cerca del límite inferior del cajetín para simular así el efecto suelo que se produce en la realidad.

Las dimensiones del vehículo son de 4,5m de longitud y 0,9m de altura, mientras que las del cajetín son 65m de ancho y 18m de alto, y la distancia del vehículo al límite inferior del cajetín es de 10cm.

Una vez definida la geometría se ha procedido con el mallado. En éste se han definido elementos más pequeños en la parte inferior del cajetín, que es la zona de mayor interés de estudio ya que es donde se encuentra el coche y por tanto el difusor. El mallado utilizado se puede visualizar en la siguiente imagen.

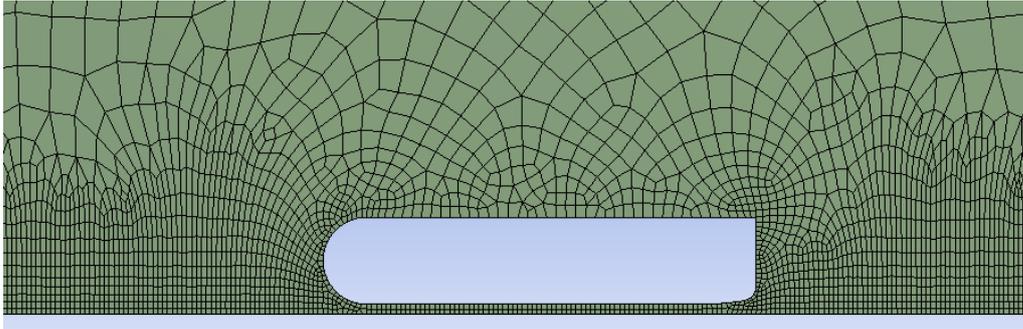


Ilustración 10.3: Mallado

Una vez mallada la geometría a estudiar se procede con establecer las condiciones de contorno. En primer lugar se ha dado nombre a las distintas entidades de la geometría. El perfil izquierdo del cajetín se ha nombrado inlet, el derecho outlet, el inferior suelo, el superior cielo, las líneas correspondientes al fondo plano y el difusor se han nombrado como fondo plano, y el resto de líneas que componen el vehículo como coche. A continuación se ha establecido una velocidad de 50m/s en inlet, una presión relativa igual a 0 en outlet, ya que correspondería al aire ambiente, y condición de contorno *wall* en el resto de partes. En el cielo se ha establecido libre deslizamiento, ya que de esta forma el fluido no se verá afectado por su proximidad al límite del cajetín que debería ser infinito, y en el coche se impone condición de no deslizamiento entre el vehículo y el aire.

Con estas condiciones se ha solucionando el sistema utilizando el método *Shear Stress Transport*, definiendo que se monitoricen datos de interés como son el coeficiente de resistencia al avance y el coeficiente de sustentación de la entidad definida previamente como fondo plano.

Los resultados obtenidos para esta simulación han sido un coeficiente de resistencia al avance de 0,0039 y un coeficiente de sustentación de -2,04, definido como positiva la dirección vertical hacia arriba. Por lo tanto el valor negativo obtenido indica que la fuerza generada es hacia abajo, por lo que se tiene carga aerodinámica tal y como se deseaba.

Esta misma simulación se ha llevado a cabo utilizando la geometría correspondiente al caso 7, diseñando un cajetín idéntico y imponiendo las mismas condiciones de contorno, método de resolución y mallado.

En este caso los resultados obtenidos han sido de un coeficiente de resistencia al avance de 0,0036 y un coeficiente de sustentación de -1,88.

En este caso el coeficiente de resistencia al avance es mejor que el obtenido con la otra geometría, pero puesto que las diferencias no son significativas se ha decidido decantarse por la opción anterior, ya que el coeficiente de sustentación es ligeramente mejor y la función principal del difusor es la de generar carga aerodinámica.

Por lo tanto se estudiará más a fondo el efecto que produce este difusor sobre el monoplaza. Se puede observar que la resistencia al avance que produce el difusor es insignificante en comparación con la carga aerodinámica que proporciona.

En primer lugar se puede calcular la fuerza correspondiente al coeficiente de sustentación obtenido utilizando la fórmula $F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot A \cdot v^2$.

En este caso la densidad a considerar es la del aire, $1,225 \text{ kg/m}^3$, que es la que se ha utilizado a la hora de llevar a cabo la simulación, el coeficiente de sustentación el obtenido en la simulación, -17089 , la velocidad se considerará igual a la de entrada, 50 m/s , y el área se calculará la correspondiente al fondo plano y difusor. En este caso se ha considerado una longitud del fondo plano y difusor del vehículo de 4 m , suponiendo un ancho del vehículo de aproximadamente $0,5 \text{ m}$, el área a considerar será de 2 m^2 .

Así pues, el valor obtenido para la fuerza de sustentación es de $F_L = -\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 2,04 \cdot 2 \cdot 50^2 = -6247,5 \text{ N}$

Este resultado se puede obtener también directamente de la simulación realizada, obteniendo los siguientes valores

Forces - Direction Vector (0 1 0)					
Zone	Forces (n)			Coefficients	
fondo_plano	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous
	-6255.8511	0.26832291	-6255.5828	-2.0427269	8.7615646e-05
Net	-6255.8511	0.26832291	-6255.5828	-2.0427269	8.7615646e-05

Ilustración 10.4: Resultados obtenidos en el Ansys

Se observa que el valor de la carga aerodinámica es de $-6255,85 \text{ N}$, muy similar al calculado de manera teórica.

A partir del valor obtenido para el coeficiente de sustentación se puede calcular el valor teórico que se obtendría para la carga aerodinámica en función de la velocidad utilizando la relación vista anteriormente, $F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot A \cdot v^2$

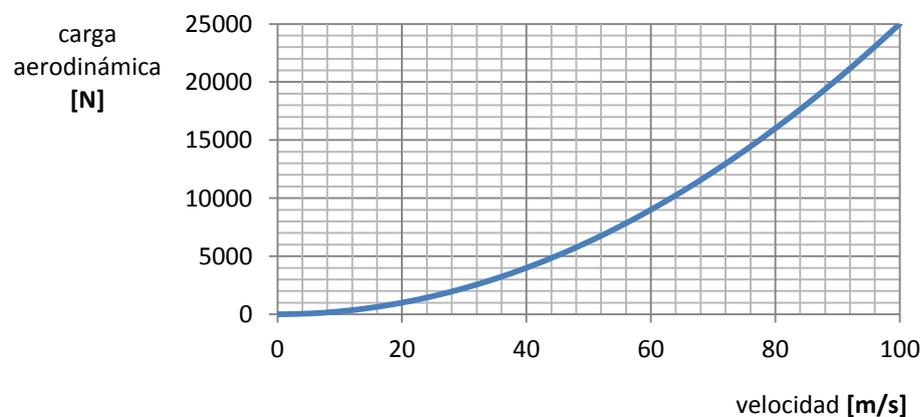


Ilustración 10.5: Carga aerodinámica en función de la velocidad

En la gráfica se puede observar que a una velocidad cercana a los 300 km/h, aproximadamente unos 85 m/s, la carga aerodinámica proporcionada por el difusor y el efecto suelo del monoplaza sería cercana a los 18000 N, prácticamente el triple del peso del coche que es de aproximadamente 600kg. [39]

Una vez estudiados los valores del coeficiente de sustentación es interesante examinar la zona de baja presión generada debajo del vehículo debido al efecto suelo y su evolución en la zona del difusor.

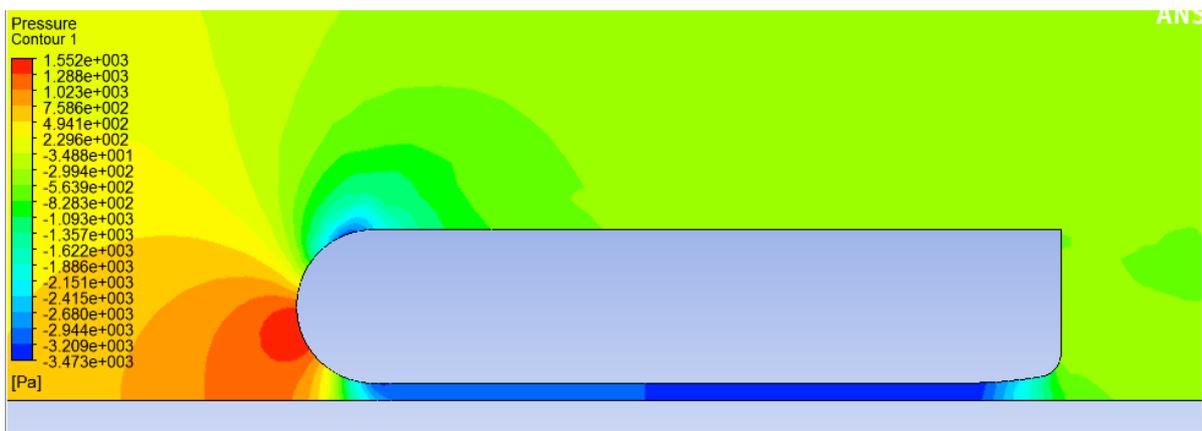


Ilustración 10.6: Perfil de presiones

Es interesante observar cómo delante del monoplaza aparece una zona de máxima presión debido a que en este punto se produce el choque del fluido con el monoplaza generando un punto de estancamiento.

A continuación se observa que la presión disminuye hasta ser mínima debajo del monoplaza, y en la zona del difusor se produce el gradiente de presiones para extraerla al exterior a una presión lo más similar posible a la presión ambiente.

En la siguiente imagen se puede ver con más detalle la zona del difusor

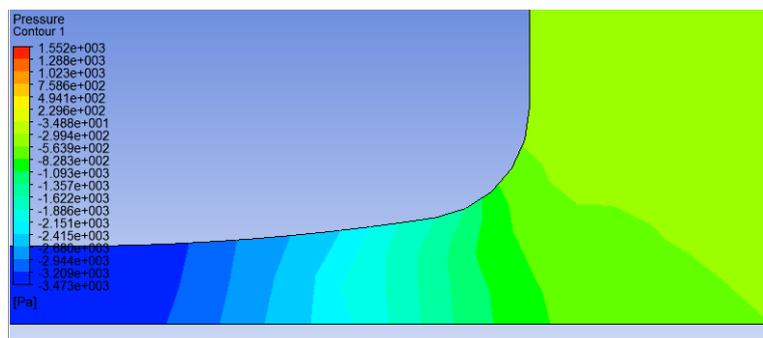


Ilustración 10.7: Detalle de la zona del difusor

De la misma manera se puede examinar el perfil de velocidades de la simulación, obteniendo los resultados esperados. En el punto de estancamiento la velocidad es nula, y ésta se acelera en la zona baja del monoplaza.

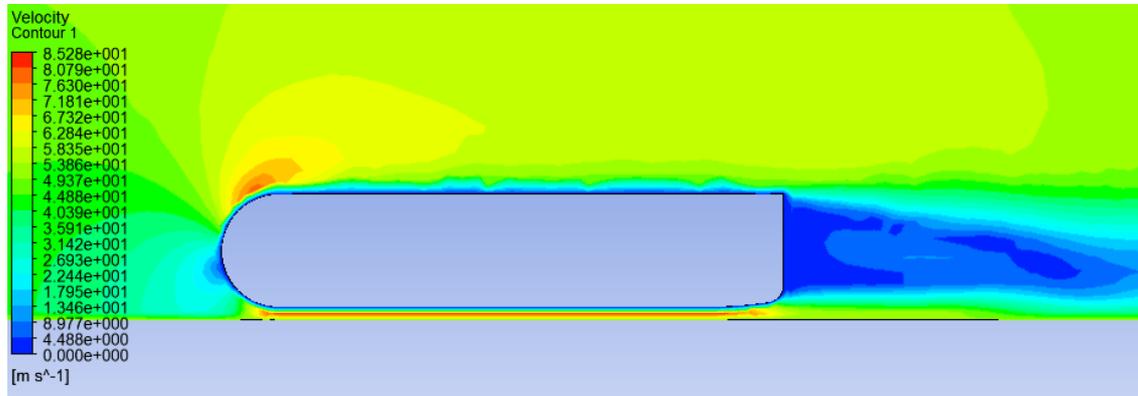


Ilustración 10.8: Perfil de velocidades

También es interesante comentar que detrás del vehículo se genera una zona de bajas velocidades que son el rebufo que deja el coche detrás de él.

Como en el caso de las presiones, la velocidad también se modifica en la zona del difusor, pero en este caso lo que hace es disminuir, ya que se ha acelerado en la zona de debajo del monoplaza debido al efecto suelo.

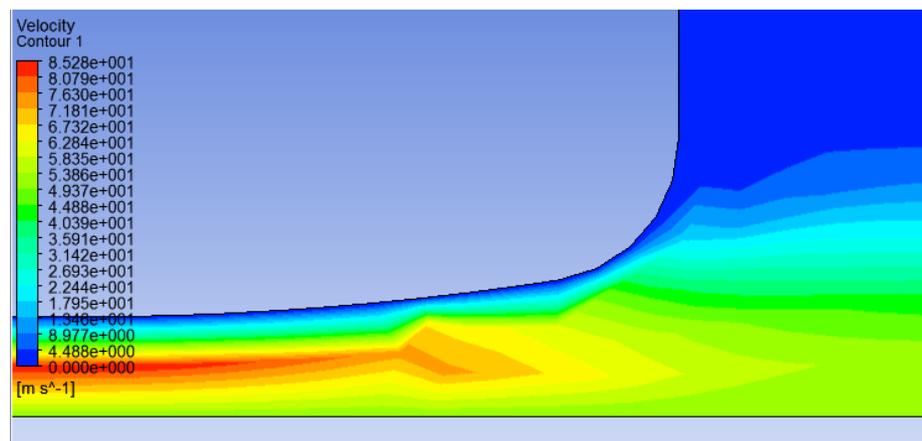


Ilustración 10.9: Velocidades en la zona del difusor

A continuación se puede ver con más detalle los vectores velocidad que se generan detrás del vehículo en la zona del rebufo, y se puede ver cómo se genera una turbulencia con vectores que van en sentido positivo y otros en sentido negativo.

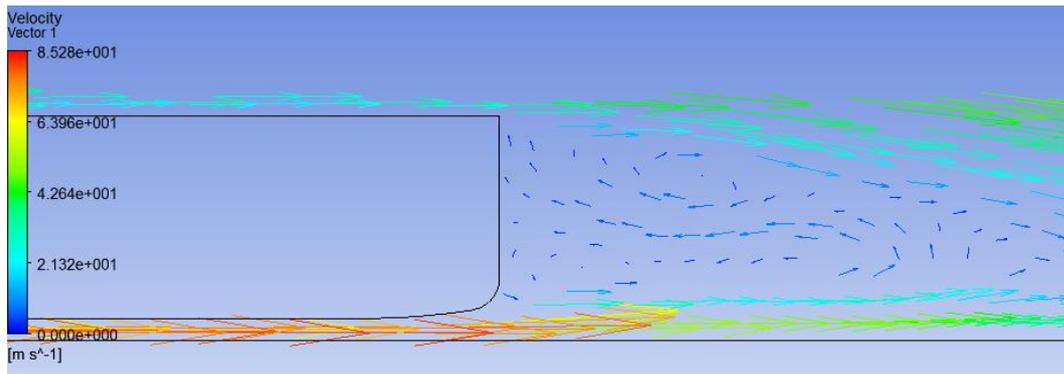


Ilustración 10.10: Vectores velocidad en la zona del rebufo

Visualizando las líneas de corriente se puede observar que éstas nunca se introducen en esta zona de turbulencias en el rebufo, lo que implica que no se pegen al coche como era de esperar.

Esto sucede porque para realizar la simulación se ha utilizado un modelo de monoplaça que no es un Fórmula 1 real, ya que en la realidad se dispone de un alerón trasero que modifica estas turbulencias, pero no entra en el alcance de este proyecto.

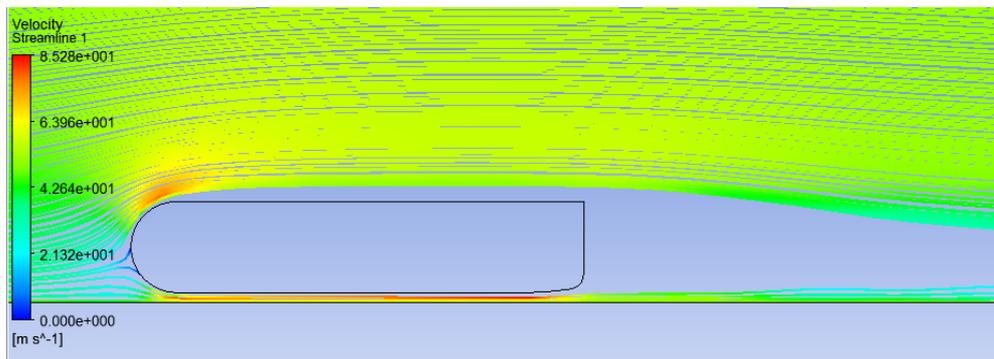


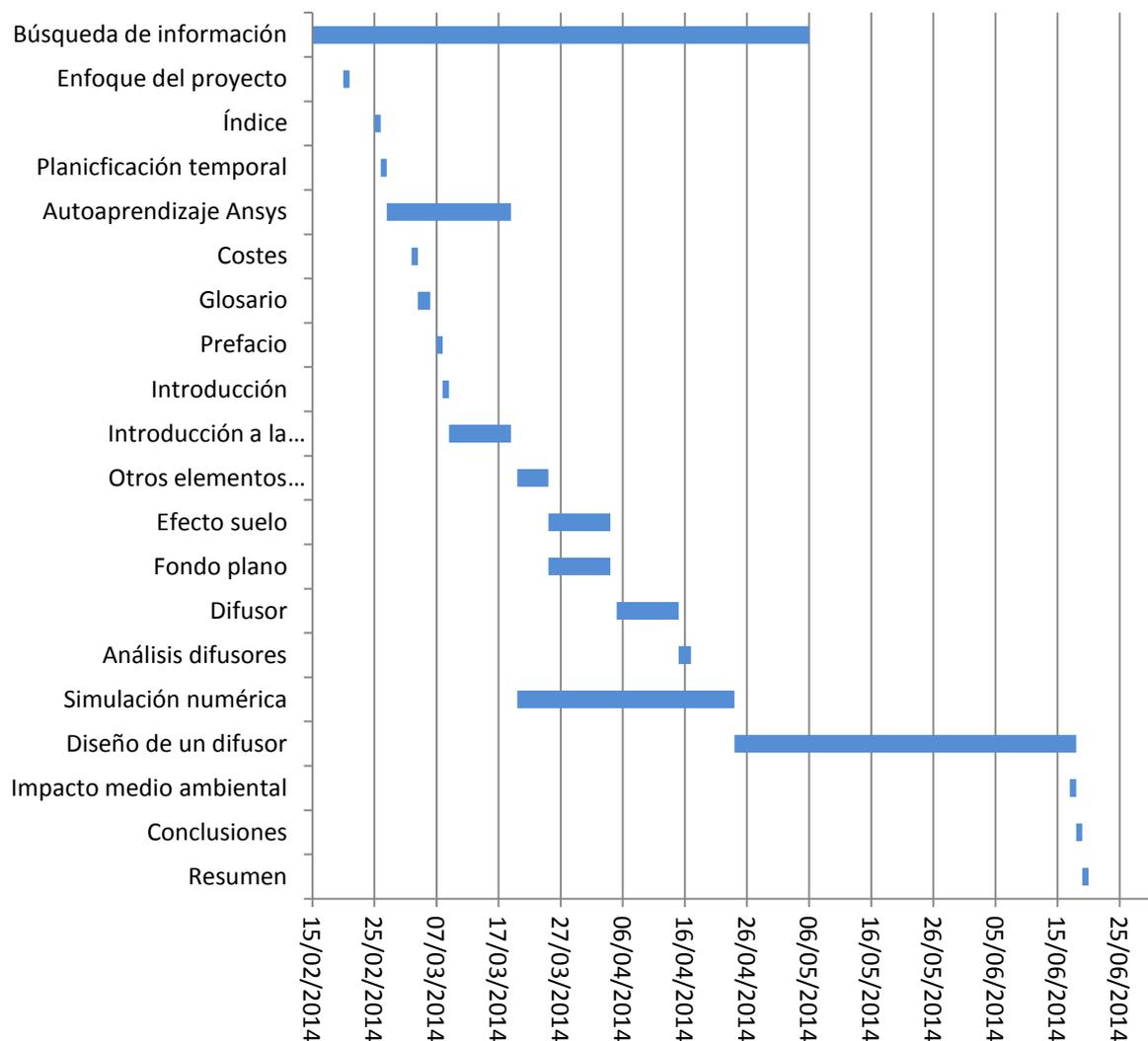
Ilustración 10.11: Líneas de corriente

11. Planificación temporal y costes

11.1 Planificación temporal

Se considerará que el proyecto se inicia a la vez que el cuatrimestre, aproximadamente el 12 de Febrero de 2014, y se finalizará aproximadamente una semana antes de la presentación del mismo, es decir, el 25 de Junio de 2014.

El proyecto se dividirá en distintas etapas, que son desde búsqueda de información sobre el tema y auto aprendizaje del programa Ansys Fluent hasta cada uno de los apartados de los que consta la memoria del proyecto final.



11.2 Costes

A la hora de financiar este proyecto se deben tener en cuenta diferentes aspectos. El primero de ellos es el sueldo del personal, desde el ingeniero encargado del trabajo principal hasta todas las personas implicadas en la elaboración del proyecto.

Considerando que se tratara de un proyecto de consultoría, donde una escudería de Fórmula 1 se ha puesto en contacto con el fin de conseguir un difusor que les posibilite ganar el mundial del próximo año, que se trata de un proyecto de 12 ECTS, donde cada ECTS corresponde a 25 horas de trabajo autónomo, y un precio aproximado de 20 € por hora de trabajo dedicado, el coste del ingeniero a cargo de la elaboración del proyecto ascendería aproximadamente a $12 \text{ ECTS} \times \frac{25 \text{ horas}}{1 \text{ ECTS}} \times \frac{20 \text{ €}}{1 \text{ hora}} = 6000 \text{ €}$.

También se deben tener en cuenta los costes asociados a las tecnologías empleadas para el desarrollo del trabajo.

Este proyecto se realiza principalmente con el uso de un programa de simulación numérica, en este caso el *Ansys Workbench 14.5*, el cual es un programa de pago con licencia anual. El coste del software es de aproximadamente 20000 €, a los que se debe añadir el coste de la licencia que es de unos 4000 € por año. En este caso la licencia de un año será suficiente para llevar a cabo el desarrollo del proyecto.

Este software realiza simulaciones numéricas que pueden llegar a ser muy costosas para la computadora en lo que a memoria y tiempo se refiere. Por ello es apropiado utilizar un ordenador con buenas características.

Cabe indicar que ya se dispone de ordenadores con características apropiadas para realizar esta tarea, por lo que no será necesaria la compra de uno nuevo, y que el software *Ansys Workbench 14.5* empleado en este caso para analizar el difusor también es perfectamente útil para estudiar muchos otros elementos aerodinámicos que tiene un monoplaza de competición, por lo que aunque se considerará el coste total incluido en la partida de costes del difusor se debería repartir con el resto de elementos como por ejemplo los alerones.

Por otra parte se deben incluir los costes del material de oficina empleado tales como papel, bolígrafos y tinta de impresora, así como el coste de la encuadernación de la memoria del proyecto y los dispositivos electrónicos en los que se almacenará una copia. El coste de todos estos elementos es de aproximadamente unos 80 €. Así pues, teniendo en cuenta

todos estos costes, el coste total del proyecto para la persona interesada sería de aproximadamente 30080 € incluyendo la compra del software de simulación numérica.

Aquí estaría únicamente incluido el diseño del difusor y sus estudios previos, ya que la fabricación del mismo no se incluye en el alcance del proyecto, y no se tiene en cuenta que es más que probable que no sea necesario comprar ni la computadora ni el software de simulación matemática ya que todas las escuderías ya los tienen, y que no se utilizan únicamente para los difusores.

Puesto que el difusor diseñado sería utilizado en la próxima temporada se tendría que esperar más de un año para empezar a ver los resultados del mismo, y en caso de ser efectivo y conseguir realizar un buen papel en el campeonato, se percibirían los beneficios económicos a la temporada siguiente en forma de publicidad, ya que los equipos punteros del campeonato son los que reciben mejores ofertas de patrocinio, pudiendo ingresar más de 10 millones de euros al año, con lo que el coste del proyecto quedaría más que amortizado.

12. Impacto medio ambiental

En cuanto al impacto ambiental del proyecto hay que recordar que éste solo cubre la etapa del estudio y diseño, no la de construcción, por lo que no se tendrá en cuenta el impacto que pueda causar el material utilizado.

La herramienta principal de trabajo es el ordenador, por lo que se debe tener en cuenta la reciclabilidad de sus componentes en el caso de que alguno sea dañado y se deba sustituir.

A la hora de hacer impresiones se harán a doble cara para optimizar el uso de los folios, y en caso de ser posible se utilizará papel reciclado.

Todas las hojas utilizadas a lo largo del desarrollo del proyecto son perfectamente reciclables una vez finalizado su uso.

Conclusiones

Así pues, después de analizar distintas geometrías de difusores intentando encontrar aquel que consiguiera que las líneas de corriente se peguen lo máximo posible y que proporcione el mayor coeficiente de sustentación, se ha llegado a la conclusión de que la geometría más adecuada es la siguiente

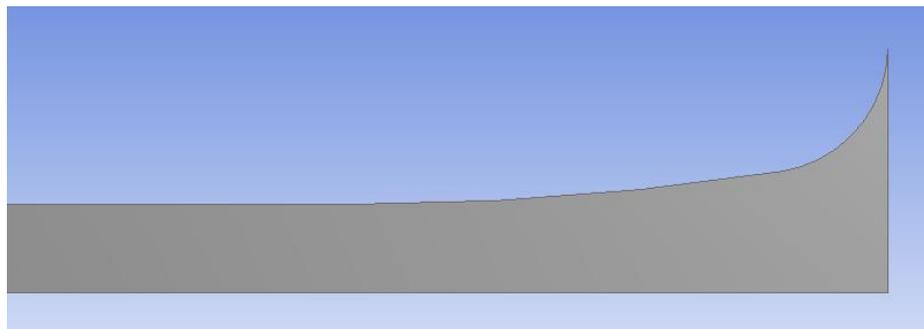


Ilustración 13.1: Geometría estudiada en el caso 6

En este diseño se consigue que las líneas de corriente se adhieran a la pared superior del difusor más que en el resto de diseños debido a que el incremento de sección es muy suave a lo largo de la geometría.

En la parte final se hace un incremento mucho más pronunciado pero en este momento la velocidad ya ha disminuido debido al cambio de sección producido en el inicio del difusor, consiguiendo de esta manera que las líneas de corriente se adhieran mejor que en otras geometrías donde el cambio brusco de sección se produce en una zona donde el fluido está a una velocidad demasiado elevada.

Con este modelo no sólo se consigue que las líneas de corriente sigan la forma del difusor, sino que se consigue el objetivo principal del proyecto, la mayor carga aerodinámica posible. En este caso el coeficiente de sustentación obtenido ha sido de $-2,04$, donde el signo negativo indica que lo que se obtiene es carga aerodinámica ya que provoca una fuerza en sentido vertical descendente.

Con este valor, en función de la velocidad a la que circule el vehículo, se puede conseguir una carga aerodinámica de prácticamente el triple del peso del monoplaza.

También se ha podido comprobar que la resistencia al avance producida por esta zona del monoplaza es insignificante en comparación con la carga aerodinámica conseguida, ya que el coeficiente de resistencia al avance obtenido ha sido de $0,0039$.

Bibliografía

- [1] Mundial Fórmula 1 2010: Fechas y circuitos para 2010 – Deportes Adictos
[<http://www.deportesadictos.com/2010/04/28/mundial-formula-1-2010-fechas-y-circuitos-para-2010>, 16 Marzo 2014]
- [2] McBEATH, SIMON. *Aerodinámica del automóvil de competición*. CEAC, 2005
- [3] Renault ampliará su túnel de viento - F1 al día [<http://www.f1aldia.com/9431/renault-ampliara-tunel-viento/>, 17 Abril 2014]
- [4] ¿Qué es el CFD? [<http://www.gadgets.com/noticias/que-es-cfd/>, 17 Abril 2014]
- [5] Turbulento [<http://f1turbulenta.blogspot.com.es>, 26 Abril 2014]
- [6] Slow is faster [http://blog.nialbarker.com/252/slow_is_faster, 16 Marzo 2014]
- [7] Inmersos en un mar de Aire
[http://www.oni.escuelas.edu.ar/2008/BUENOS_AIRES/1315/pq2.html, 16 Marzo 2014]
- [8] Fundamentos de aerodinámica
[<http://www.cruzdesanandres.com/material/esadocs/Aerodinamica.pdf>, 16 Marzo 2014]
- [9] Reflexiones en Boxes
[http://reflexionesenboxes.blogspot.com.es/2013_02_01_archive.html, 17 Marzo 2014]
- [10] Ecuaciones de Bernoulli | Alexmonrzig's Blog
[<http://alexmonrzig.wordpress.com/2010/02/28/ecuaciones-de-bernoulli-2/>, 8 Marzo 2014]
- [11] El vuelo de las cometas
[<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/interesantes/cometas/cometas.htm>, 18 Marzo 2014]
- [12] Drag coefficient [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/D/drag_coefficient.html, 15 Mayo 2014]
- [13] El rincón de Abner: Aerodinámica, aquella incomprendida III
[<http://elrincondeabner.blogspot.com.es/2009/03/esta-es-una-continuacion-de.html>, 17 Marzo 2014]
- [14] Fuerza aerodinámica
[<http://www.uniquindio.edu.co/uniquindio/ntic/trabajos/4/c4g2helimodelismo/subpaginas/aerodinamica/fuerza.htm>, 11 Abril 2014]

- [15] Técnica F1: Deflectores Laterales | Paso por curva
[<http://pasoporcurva.wordpress.com/2008/01/20/tecnica-f1-deflectores-laterales/>, 20 Febrero 2014]
- [16] Matt Wakelin
[<http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/eng/staff/ymc/members/projects/third2008/matt/>, 11 Abril 2014]
- [17] El polémico alerón delantero de Red Bull - F1 al día [<http://www.f1aldia.com/9358/el-polemico-aleron-delantero-de-red-bull.html>, 13 Abril 2014]
- [18] Elementos aerodinámicos de un Fórmula 1 | TÉCNICA FÓRMULA 1
[<http://tecnicaf1.wordpress.com/2011/12/08/elementos-aerodinamicos-de-un-formula-1/>, 13 Abril 2014]
- [19] Foto: Parte trasera del RB7 - F1 al día [<http://www.f1aldia.com/fotos/parte-trasera-del-rb7/>, 13 Abril 2014]
- [20] Fórmula 1 | Fan F1 | Página 2 [<https://fanf1es.wordpress.com/category/formula-1/page/2/>, 13 Abril 2014]
- [21] Los alerones en la Fórmula 1 - Taringa! [<http://www.taringa.net/posts/autos-motos/12127707/Los-alerones-en-la-Formula-1.html>, 20 Febrero 2014]
- [22] File:Takuma Sato demonstrating Lotus 78 2010 Japan.jpg - Wikipedia
[http://it.wikipedia.org/wiki/File:Takuma_Sato_demonstrating_Lotus_78_2010_Japan.jpg, 16 Abril 2014]
- [23] Los alerones en la Fórmula 1 - Taringa! [<http://www.taringa.net/posts/autos-motos/12127707/Los-alerones-en-la-Formula-1.html>, 16 Abril 2014]
- [24] ANGELES EN LA CABEZA: POR QUÉ CORREN TANTO LOS F1: EFECTO SUELO
[<http://angelesenlacabeza.blogspot.com.es/2013/08/por-que-corren-tanto-los-f1-efecto-suelo.html>, 22 Febrero 2014]
- [25] BMW Williams F1 '04 Project [<http://www.zonatuning.com/f4/bmw-williams-f1-04-project-131289/index2.html>, 15 Abril 2014]
- [26] Ferrari estrenó en Brasil su difusor soplado definitivo | Fórmula F1
[<http://www.formulaf1.es/8544/ferrari-estreno-en-brasil-su-difusor-soplado-definitivo/>, 22 Febrero 2014]
- [27] Blog F1 – La Maxima | Tag Archive | doble difusor
[http://www.lamaximablog.com.ar/lamaxima_blog/?tag=doble-difusor, 19 Abril 2014]
- [28] Portal Velocidade: Inovações tecnológicas da Fórmula 1
[<http://portalvelocidade.blogspot.com.es/p/inovacoes-tecnologicas-da-formula-1.html>, 29 Abril 2014]
- [29] Blog de F1 de Eduardo Car: actualidad Fórmula 1, carreras GP, escuderías, pilotos: Funcionamiento del polémico difusor de doble altura

- [<http://eduardojosecar.blogspot.com.es/2009/04/funcionamiento-del-polemico-difusor-de.html>, 17 Abril 2014]
- [30] Difusor de Soplado F1 - YouTube [<https://www.youtube.com/watch?v=pCUi655d32s>, 15 Abril 2014]
- [31] Aerodinámica de F1 [<http://es.scribd.com/doc/54546668/Aerodinamica-de-F1>, 20 Febrero 2014]
- [32] SEPARACION [<http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/41/tema10/tema10-12.htm>, 17 Marzo 2014]
- [33] Deflectores laterales de los f1 - Paperblog [<http://es.paperblog.com/deflectores-laterales-de-los-f1-2281049/>, 20 Febrero 2014]
- [34] Auto Solar Alicanto PUCV – Casiopea [http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/Auto_Solar_Alicanto_PUCV#Elementos_de_aerodinamica_en_un_F1, 20 Febrero 2014]
- [35] El efecto suelo. Una vista un poco más a fondo.. – ForoCoches [<http://www.forocoches.com/foro/showthread.php?t=149642>, 22 Febrero 2014]
- [36] El Difusor | Truzonef1 Blog::Técnica y Noticias de F1 [<http://truzonef1.wordpress.com/el-difusor/>, 22 Febrero 2014]
- [37] Fórmula 1 y aerodinámica | Cajon d Desastre [<http://cajonddesastre.wordpress.com/2010/03/16/formula-1-y-aerodinamica/>, 22 Febrero 2014]
- [38] Aumento de la sustentación: Alerones | CarandDriverTheF1.com [<http://www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2007/06/23/aumento-la-sustentacion-alerones>, 20 Febrero 2014]
- [39] Carga Aerodinámica | Diseño Formula 1 [<https://jasf1961.wordpress.com/tag/carga-aerodinamica/>, 15 Mayo 2014]

Bibliografía complementaria

Aerodinámica – EcuRed [<http://www.ecured.cu/index.php/Aerodin%C3%A1mica>, 21 Febrero 2014]

El funcionamiento de los difusores (Análisis técnico - F1) [<http://www.quinielaf1.com/news/132.php>, 21 Febrero 2014]

Técnica en Fórmula 1: La aerodinámica | Objetivos [<http://314jyj.foroactivo.com/t41-tecnica-en-formula-1-la-aerodinamica-objetivos>, 21 Febrero 2014]

F1: Todo sobre los difusores soplados [<http://formulauno-auto.blogspot.com.es/2011/07/todo-sobre-los-difusores-soplados-aqui.html>, 2 Marzo 2014]

Efecto de la aerodinámica en la F1 [<http://formulauno-auto.blogspot.com.es/2010/09/efecto-de-la-aerodinamica-en-la-f1.html>, 2 Marzo 2014]

Comprendiendo un F1 [<http://www.formulaf1.es/38068/comprendiendo-un-f1-parte-8/>, 2 Marzo 2014]

Aerodinámica de la F1 el difusor [<http://esferaf1.blogspot.com.es/2009/07/aerodinamica-de-la-formula-1-el-difusor.html>, 2 Marzo 2014]

Análisis técnico difusores

[<http://www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2013/04/30/72776-analisis-tecnico-difusores-flexion-piezas-formas-sumar-carga-aerodinamica>, 13 Abril 2014]

F1 Diffuser Explained [https://www.youtube.com/watch?v=uk_L2IOKArM, 15 Abril 2014]

Diffuser [<https://www.youtube.com/watch?v=3DIJMLrGz8Q>, 15 Abril 2014]

¿Cómo es el fondo plano de un F1? [<https://www.youtube.com/watch?v=FELZp6MV2IA>, 15 Abril 2014]

Dudas F1 [<https://www.youtube.com/watch?v=-y2XyV2aisg>, 15 Abril 2014]

El efecto suelo [<https://www.youtube.com/watch?v=aCTycvQZo7s>, 15 Abril 2014]

Funcionamiento del KERS y difusores de F1

[<https://www.youtube.com/watch?v=FfJQVG13gHc>, 15 Abril 2014]