



Universidad  
Carlos III de Madrid

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO FINAL DE CARRERA

# DISEÑO DE ALERONES PARA EL VEHÍCULO DE FORMULA STUDENT DE LA UC3M

*Autor:* Joel Leganés Rodríguez

*Tutor:* Dr. Daniel García-Pozuelo Ramos

*Titulación:* Ingeniería Industrial

Leganés, junio 2014

## ABSTRACT

This thesis analyzes a solution for the aerodynamic problem in a Formula Student car. This solution will be implemented in a real car and in a real competition with the purpose of getting a good performance in the race.

The project study is about the more important additional elements for a formula car in terms of drag and lift, which are the ailerons. The design and simulation will be made with SolidWorks software and assuming a sunny day, and sea level pressure. Also it will be assumed a speed of 25 meter per seconds that are 90 kilometers per hour.

SolidWorks software can simulate Computer Fluid Dynamics that show the performance of the whole car in terms of drag and lift and Finite Element Method to analyze the structure in terms of strength of materials.

## AGRADECIMIENTOS

Antes de nada, decir que ha sido un largo y duro camino el que he tenido que recorrer durante esta época universitaria, pero también ha estado llena de alegrías, amistades, risas, sufrimientos, superaciones, lecciones, . . . . Y que sin duda, me gustaría repetir si volviera hacia atrás, han sido unos muy buenos años, tanto por la escuela, como los profesores y estudios, como los compañeros, todo ello me llena de felicidad en estos momentos, por haber aprendido y disfrutado con esta carrera, y haber terminado con un proyecto relacionado con un mundo el cual me apasiona. Me siento muy orgulloso de haber llegado hasta aquí.

Claro está, que "detrás" de todas estas alegrías y triunfos, hay personas fundamentales en mi vida y que han tomado parte en esta historia. Por eso, les agradezco muchísimo:

A mi **familia**, por su entrega, sonrisas y constante vitalidad que me han demostrado cada minuto. Por su confianza y apoyo.

A mis grandes **amigos** y **compañeros**, por todos esos momentos malos en los que han tenido que sufrirme y donde me mostraron su confianza, ayuda y comprensión.

A mi **tutor** de proyecto, Dr. Daniel García-Pozuelo Ramos, por su ayuda y amabilidad en todo momento.

Al equipo **Fórmula UC3M**, donde hemos pasado buenos momentos con una pasión en común, y con la cual seguimos para adelante. Ojalá que muy pronto podamos seguir luchando juntos pero en el circuito.

Gracias.

---

# Contenido

---

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Lista de Figuras</b>                                               | <b>v</b>  |
| <b>Lista de Tablas</b>                                                | <b>ix</b> |
| <b>1. Introducción</b>                                                | <b>1</b>  |
| 1.1. Motivación del proyecto . . . . .                                | 2         |
| 1.2. Objetivos del proyecto . . . . .                                 | 3         |
| <b>2. Competición</b>                                                 | <b>5</b>  |
| 2.1. Formula Student . . . . .                                        | 5         |
| 2.2. Fórmula UC3M . . . . .                                           | 12        |
| <b>3. Aerodinámica</b>                                                | <b>15</b> |
| 3.1. Teoría aerodinámica . . . . .                                    | 15        |
| 3.1.1. Fuerzas aerodinámicas . . . . .                                | 16        |
| 3.1.2. Carga aerodinámica . . . . .                                   | 20        |
| 3.1.3. Resistencia aerodinámica . . . . .                             | 21        |
| 3.1.4. Eficiencia aerodinámica . . . . .                              | 23        |
| 3.1.5. Flujo laminar y flujo turbulento . . . . .                     | 23        |
| 3.2. Elementos aerodinámicos en un automóvil de competición . . . . . | 24        |
| 3.2.1. Los alerones a lo largo de la historia . . . . .               | 24        |
| 3.2.2. Elementos aerodinámicos . . . . .                              | 25        |
| 3.2.3. Alerón delantero . . . . .                                     | 26        |
| 3.2.4. Carenado . . . . .                                             | 27        |
| 3.2.5. Aletas de nariz . . . . .                                      | 28        |
| 3.2.6. Deflectores laterales . . . . .                                | 29        |
| 3.2.7. Toma de admisión . . . . .                                     | 29        |
| 3.2.8. Pontones . . . . .                                             | 30        |
| 3.2.9. Aletas de pontón . . . . .                                     | 31        |
| 3.2.10. Alerón trasero . . . . .                                      | 31        |
| 3.2.11. Fondo plano . . . . .                                         | 35        |
| 3.2.12. Difusor . . . . .                                             | 36        |
| 3.2.13. Casco . . . . .                                               | 36        |

---

|                                                                            |            |
|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3. Reglamento de la Formula Student sobre aerodinámica . . . . .         | 37         |
| <b>4. CFD: Mecánica de fluidos computacional</b>                           | <b>41</b>  |
| <b>5. Diseño CAD</b>                                                       | <b>45</b>  |
| 5.1. Perfil aerodinámico . . . . .                                         | 46         |
| 5.2. Alerón delantero . . . . .                                            | 51         |
| 5.3. Alerón trasero . . . . .                                              | 59         |
| 5.4. Ensamblaje del vehículo . . . . .                                     | 63         |
| 5.4.1. Configuraciones de carga aerodinámica . . . . .                     | 68         |
| <b>6. Materiales</b>                                                       | <b>73</b>  |
| 6.1. Alerones . . . . .                                                    | 73         |
| 6.2. Soportes de los alerones . . . . .                                    | 76         |
| 6.2.1. Soporte delantero . . . . .                                         | 77         |
| 6.2.2. Soporte trasero . . . . .                                           | 78         |
| <b>7. MEF: Método de los elementos finitos</b>                             | <b>81</b>  |
| 7.1. Teoría . . . . .                                                      | 81         |
| 7.1.1. Introducción . . . . .                                              | 81         |
| 7.1.2. Método de trabajo . . . . .                                         | 82         |
| 7.1.3. Resultados del método . . . . .                                     | 83         |
| 7.1.4. Limitaciones . . . . .                                              | 84         |
| 7.1.5. MEF en SolidWorks . . . . .                                         | 84         |
| 7.2. Análisis estructural de los alerones . . . . .                        | 85         |
| 7.2.1. Alerón delantero . . . . .                                          | 86         |
| 7.2.2. Alerón trasero . . . . .                                            | 88         |
| 7.3. Análisis estructural de los soportes de los alerones . . . . .        | 89         |
| <b>8. Costes de fabricación</b>                                            | <b>91</b>  |
| <b>9. Conclusiones</b>                                                     | <b>93</b>  |
| <b>10. Trabajos futuros</b>                                                | <b>95</b>  |
| <b>Referencias</b>                                                         | <b>97</b>  |
| <b>A. Anexo: Planos para la fabricación de los alerones y sus soportes</b> | <b>101</b> |

---

# Lista de Figuras

---

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Logo de la Formula Student . . . . .               | 5  |
| 2.2. Prueba del 8 . . . . .                             | 9  |
| 2.3. Circuito de Montmeló . . . . .                     | 10 |
| 2.4. Circuito de Silverstone . . . . .                  | 11 |
| 2.5. Logo de Fórmula UC3M . . . . .                     | 12 |
| 2.6. Organigrama del equipo . . . . .                   | 13 |
| 2.7. Características del vehículo . . . . .             | 13 |
| 3.1. Descomposición de la fuerza aerodinámica . . . . . | 16 |
| 3.2. Fuerzas aerodinámicas en un coche . . . . .        | 16 |
| 3.3. Efecto Venturi . . . . .                           | 18 |
| 3.4. Ala dentro de un volumen de control . . . . .      | 19 |
| 3.5. Downforce . . . . .                                | 19 |
| 3.6. Gráfico coef.sustentación-ángulo . . . . .         | 21 |
| 3.7. Coeficientes conocidos de resistencia . . . . .    | 22 |
| 3.8. Gráfico coef.resistencia-ángulo . . . . .          | 22 |
| 3.9. Tipos de flujo . . . . .                           | 24 |
| 3.10. Alerón delantero . . . . .                        | 26 |
| 3.11. Carenado . . . . .                                | 27 |
| 3.12. Aletas de nariz . . . . .                         | 28 |
| 3.13. Deflectores laterales . . . . .                   | 29 |
| 3.14. Toma de admisión . . . . .                        | 29 |
| 3.15. Pontones . . . . .                                | 30 |
| 3.16. Aletas de pontón . . . . .                        | 31 |
| 3.17. Relación de aspecto . . . . .                     | 32 |
| 3.18. Simetría en los alerones . . . . .                | 32 |
| 3.19. Ejemplo de alerón trasero simple . . . . .        | 33 |
| 3.20. Alerón multielemento . . . . .                    | 33 |
| 3.21. Eficiencia de un alerón multielemento . . . . .   | 34 |
| 3.22. Alerón multiplano . . . . .                       | 34 |
| 3.23. Derivas laterales . . . . .                       | 35 |
| 3.24. Fondo plano . . . . .                             | 35 |

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| 3.25. Difusor . . . . .                                              | 36 |
| 3.26. Casco . . . . .                                                | 36 |
| 3.27. Reglas aerodinámicas . . . . .                                 | 38 |
| 3.28. Límites de colocación de los alerones en el vehículo . . . . . | 39 |
| 4.1. CFD . . . . .                                                   | 43 |
| 5.1. Partes de un perfil aerodinámico de aviación . . . . .          | 48 |
| 5.2. NACA9615 . . . . .                                              | 51 |
| 5.3. Vistas del coche . . . . .                                      | 53 |
| 5.4. Posición del alerón delantero . . . . .                         | 53 |
| 5.5. Selección de fluido . . . . .                                   | 54 |
| 5.6. Condiciones iniciales y del entorno . . . . .                   | 54 |
| 5.7. Precisión de la simulación . . . . .                            | 55 |
| 5.8. Parámetros a estudiar en la simulación . . . . .                | 56 |
| 5.9. Diagramas de simulación del alerón delantero . . . . .          | 58 |
| 5.10. Alerón delantero de Fórmula UC3M . . . . .                     | 59 |
| 5.11. Posición del alerón trasero . . . . .                          | 60 |
| 5.12. Diagramas de simulación del alerón trasero . . . . .           | 62 |
| 5.13. Alerón trasero de Fórmula UC3M . . . . .                       | 63 |
| 5.14. Ensamblado de Fórmula UC3M . . . . .                           | 63 |
| 5.15. Ensamblado sin aletines de Fórmula UC3M . . . . .              | 64 |
| 5.16. Alerón delantero final . . . . .                               | 65 |
| 5.17. Alerón trasero final . . . . .                                 | 65 |
| 5.18. Ensamblado final de Fórmula UC3M I . . . . .                   | 66 |
| 5.19. Ensamblado final de Fórmula UC3M II . . . . .                  | 66 |
| 5.20. Ensamblado final de Fórmula UC3M III . . . . .                 | 67 |
| 5.21. Ensamblado final de Fórmula UC3M IV . . . . .                  | 67 |
| 5.22. Ensamblado final de Fórmula UC3M V . . . . .                   | 67 |
| 5.23. Dimensiones críticas del reglamento . . . . .                  | 68 |
| 5.24. Distintas cargas aerodinámicas del alerón trasero . . . . .    | 69 |
| 5.25. Gráfico velocidad-carga aerodinámica . . . . .                 | 70 |
| 5.26. Sistema de graduación del alerón . . . . .                     | 71 |
| 6.1. Posibles materiales . . . . .                                   | 73 |
| 6.2. Distintos tipos de fibra de vidrio . . . . .                    | 74 |
| 6.3. Trabajo con fibra de vidrio . . . . .                           | 76 |
| 6.4. Acero AISI 304 . . . . .                                        | 77 |
| 6.5. Soporte clásico de alerón delantero . . . . .                   | 77 |
| 6.6. Alerón delantero tipo morsa . . . . .                           | 77 |
| 6.7. Soporte delantero de Fórmula UC3M . . . . .                     | 78 |
| 6.8. Ejemplos de soportes traseros . . . . .                         | 78 |
| 6.9. Soporte trasero de Fórmula UC3M . . . . .                       | 79 |

---

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 7.1. Ejemplos de análisis de MEF . . . . .              | 84 |
| 7.2. Mallado y análisis del alerón delantero . . . . .  | 87 |
| 7.3. Mallado y análisis del alerón trasero . . . . .    | 88 |
| 7.4. Mallado y análisis del soporte delantero . . . . . | 89 |
| 7.5. Mallado y análisis del soporte trasero . . . . .   | 90 |

---



## Lista de Tablas

---

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Pruebas y puntuaciones de la competición . . . . .         | 6  |
| 5.1. Simulación del vehículo sin alerones . . . . .             | 46 |
| 5.2. Comparación de perfiles . . . . .                          | 49 |
| 5.3. Modificación del perfil NACA0015 . . . . .                 | 50 |
| 5.4. Volumen de control . . . . .                               | 56 |
| 5.5. Comparación de alerones delanteros . . . . .               | 57 |
| 5.6. Resultados del alerón delantero . . . . .                  | 58 |
| 5.7. Comparación de alerones traseros . . . . .                 | 61 |
| 5.8. Resultados del alerón trasero . . . . .                    | 62 |
| 5.9. Simulación del vehículo sin aletines delanteros . . . . .  | 64 |
| 5.10. Simulación del vehículo con derivas modificadas . . . . . | 65 |
| 5.11. Configuraciones de carga aerodinámica . . . . .           | 69 |
| 7.1. Propiedades de la fibra de vidrio . . . . .                | 86 |
| 7.2. Propiedades del acero AISI 304 . . . . .                   | 89 |
| 8.1. Costes de fabricación . . . . .                            | 91 |

---

## Capítulo 1

# Introducción

---

En este proyecto se trata el problema de la aerodinámica en vehículos de competición, concretamente en el apartado de los alerones. Se busca estudiar la influencia de los alerones en la carrocería del vehículo de Fórmula UC3M, para así poder realizar un buen diseño aerodinámico que ofrezca mayor rendimiento al coche.

El objetivo final es competir en la Formula Student, donde universidades de todo el mundo participan con su coche tipo fórmula en diversas pruebas, siendo calificados en cada una de ellas. Para poder obtener un mejor rendimiento del coche es importante estudiar bien la aerodinámica, tanto por la necesaria refrigeración del coche como por el rozamiento y resistencia que opone el aire.

La aerodinámica es fundamental sobre todo a grandes velocidades, donde sus efectos se hacen notar gravemente. En la Formula Student, las velocidades no son muy elevadas comparadas con otras competiciones, ni los coches son de gran tamaño, en cambio diseñar el vehículo con una buena aerodinámica permitirá reducir el efecto del aire contra el monoplaza e incluso beneficiar al coche en determinadas situaciones si se logra reconducir el flujo sobre éste con una adecuada carrocería y alerones o apéndices. El gran inconveniente y problema que se presenta es la resistencia que ofrece el aire a ser atravesado por el monoplaza, pero por otro lado, el aire nos ayuda a refrigerar frenos y motor, y empuja el coche contra el suelo, manteniéndolo pegado al asfalto, consiguiendo mayor velocidad en las curvas sin que el vehículo se salga de su trayectoria. Por eso, es conveniente realizar este análisis sobre los alerones para poder lograr un mejor resultado en cada una de las pruebas de la competición.

Para diseñar los alerones, se utiliza el software SolidWorks 2012, creando distintos diseños que serán analizados con simulaciones de fluidos. Con ello se recrea una situación concreta del coche a una determinada velocidad, comprobando el comportamiento del mismo con un aceptable y muy pequeño margen de error. De aquí se obtendrán valores de las dos grandes magnitudes a estudiar, la resistencia o drag, y la carga aerodinámica o downforce. De entre todos los modelos analizados, se seleccionará el más adecuado para nuestro vehículo, intentando llegar a un equilibrio y compromiso entre resistencia y carga con el que lograr el mejor

resultado.

Otra parte importante del proyecto, es elegir el material de fabricación, por un lado mirando la economía y por otro, mirando su resistencia estructural y deformación. Muy importante también, no olvidar el peso que suponen estos elementos para el vehículo, con lo que sería conveniente seleccionar un material ligero. Para realizar este estudio sobre materiales se utiliza también el software anteriormente indicado, con un módulo basado en el método de elementos finitos, tablas de propiedades de materiales y obteniendo finalmente diagramas de tensiones y deformaciones sobre una determinada pieza.

## 1.1. Motivación del proyecto

El equipo de Fórmula UC3M, está trabajando para diseñar, desarrollar y fabricar un vehículo con el que participar en la competición de Formula Student. En este trabajo en particular, se estudiarán distintas posibilidades con las que dotar al coche de un juego de alerones para mejorar su eficiencia aerodinámica. Por supuesto, los alerones deberán ajustarse y cumplir la normativa de la competición.

Con este estudio se busca obtener un mayor rendimiento en el coche, es decir, disminuir la resistencia del aire, sobre todo en las ruedas que es donde se genera la mayor parte de ésta, y aumentar la carga aerodinámica, para tener más agarre sobre el asfalto y poder circular con el vehículo a mayor velocidad por las curvas. Todo ello para ser más competitivos y poder clasificar mejor en las carreras.

Ante la falta de experiencia en la competición, se ha optado por perseguir un diseño sencillo pero fiable, que sea económico para el equipo y resulte de utilidad. Se puede comprobar que la mayoría de las universidades no utilizan ningún tipo de apéndice aerodinámico (alerones, spoilers, . . . ) en sus vehículos, es por esto que la carrocería se constituye, básicamente, por un morro estilizado y pontones para mejorar la refrigeración del motor. Gran parte de la culpa de esto, la tiene el presupuesto máximo con el que se cuenta para poder construir el vehículo, pero en el caso de Fórmula UC3M, se ha querido evaluar esta opción aerodinámica para así tener preparado un diseño y estudio de los alerones de donde partir si resulta viable finalmente, buscando poder competir y conseguir los mejores resultados posibles, debido a que los alerones nos aportan cierta ventaja en determinadas pruebas de la competición.

Un aspecto fundamental y a tener en cuenta para el diseño, es el rango de velocidades y la máxima velocidad posible a alcanzar por el monoplaza. En general, por el tipo de motores a utilizar y las rectas de los circuitos donde se compite, la velocidad máxima oscila entre 80 y 100 kilómetros por hora, con lo que en este proyecto se supondrá una velocidad máxima de 90 km/h. En la competición hay una serie de pruebas que son iguales para todos los circuitos en todos los países organizadores, pero hay dos (autocross y endurance) que su recorrido

---

depende del circuito en el que se compita, según sea España, Reino Unido, Alemania,... ya que están realizados con conos en una zona de dichos circuitos, por tanto no se pueden estudiar a fondo para reglar el vehículo, pero que resultan útiles para tener una idea de las características de las pistas que montan para estas pruebas.

Por último, destacar que en este proyecto se describen los distintos pasos realizados para la obtención de los alerones del monoplaza de Fórmula UC3M, en el que se evalúan distintos diseños geométricos y condiciones para comparar las diferencias existentes en las distintas configuraciones, con el objetivo de elegir el diseño que mejor se adapte a las necesidades del equipo. Esta parte es muy útil y muy importante de cara al mundo laboral, seguir las fases del proceso de diseño y fabricación de un elemento, así como su análisis y comparación con distintas alternativas eligiendo finalmente la más adecuada, es una parte vital en ingeniería.

## 1.2. Objetivos del proyecto

El objetivo principal del proyecto es diseñar unos alerones para el vehículo de Formula Student, para poder obtener un mejor rendimiento aerodinámico del mismo y conseguir mejores resultados. El segundo objetivo, y no por ello menos importante, es conseguir fabricar los alerones a un precio asumible para el equipo. Puesto que para la competición se cuenta con un presupuesto máximo el cual no se puede superar, los alerones deben tener un precio asequible para poder fabricarse y optar por ellos para la configuración del monoplaza. Respecto a los temas técnicos, señalar que un buen diseño aerodinámico debe perseguir las características y puntos importantes que se describen a continuación:

- Poseer una geometría suave pero consiguiendo gradientes de presión favorables.
- Hay que evitar gradientes de presión negativa en la parte trasera.
- La superficie inferior, llamada extradós en las alas de los automóviles, debe ser suave y continua.
- Se deben evitar los ángulos agudos excepto para compensar la inestabilidad del viento de costado, turbulencias.
- El perfil alar se inicia en un punto bajo con el borde de ataque y sube en una línea suave hasta el borde de salida.

Según estas líneas de trabajo a seguir, se podrían resumir los objetivos generales de este proyecto como los siguientes:

- Conseguir un diseño aerodinámico eficiente, maximizando el apoyo sin aumentar la resistencia excesivamente.
-

- Diseño económico, para que su coste sea asumible dentro del presupuesto del equipo y se pueda disponer de sus ventajas desde la primera competición.
  - Diseño simple, fácil de configurar y de forma rápida durante la competición.
-

---

## Capítulo 2

# Competición

---

### 2.1. Formula Student

La Formula Student, también conocida como Formula SAE, es una competición universitaria a nivel mundial que consta de varias pruebas y consiste en el diseño, construcción, puesta a punto y conducción por parte de los estudiantes de un monoplaça que será evaluado tanto en el apartado de diseño como en el de comportamiento en circuito.



Figura 2.1: Logo de la Formula Student

El evento está organizado por la Institution of Mechanical Engineers (IMechE) con el objetivo de simular una situación real en la cual una empresa de competición contrata a ingenieros para desarrollar un prototipo. El coche debe por ello satisfacer unas prestaciones elevadas en aceleración, frenada, y estabilidad, pero también debe ser barato, fácil de mantener y fiable. Otros factores como la estética y el confort se valoran igualmente. El presupuesto máximo para el vehículo es de 21.000 euros y la victoria es para el equipo que mayor puntuación total logre.

En las competiciones de Formula Student existen varias categorías o clases. La mayoría de equipos se presentan a la categoría primera, que es aquella en la que compiten los monoplazas acabados y que hayan participado por primera vez hace como máximo un año.

- **Clase 3.** Se trata de la clase de entrada para los equipos nuevos, en la cual participan únicamente vehículos en fase de diseño y validación del modelo. Como norma general y para fomentar el progreso, un equipo no se puede presentar a esta categoría dos años consecutivos, teniendo que hacerlo en las superiores. Se permiten excepciones para

aquellos equipos que, además, se presenten a las clases 2 o 1. Únicamente se puntúan las pruebas de diseño, presentación y coste.

- **Clase 2.** Esta categoría está pensada para equipos que hayan pasado de los conceptos básicos del diseño inicial y hayan logrado fabricar un vehículo completo. El mínimo requisito de entrada en esta categoría es disponer de un chasis completo. Al igual que en la categoría 3, los equipos que hayan participado un año en esta categoría han de promocionar a la primera en el siguiente año para poder participar también en ésta. Únicamente se puntúan las pruebas de diseño, presentación y coste.
- **Clase 1.** En esta categoría participan monoplazas totalmente contruidos y que son capaces de desplazarse. Es la categoría más importante de todas y un mismo coche solamente puede participar en ella durante los 12 meses siguientes a la primera competición en la que participa. Esta regla obliga a los equipos a progresar y fabricar cada vez nuevos vehículos. Se permite reaprovechar los componentes de monoplazas antiguos, salvo el chasis. Dentro de la categoría existen las llamadas "series 200", en la que pueden participar vehículos de hasta 2 años de antigüedad. Los equipos puntúan aquí en todas las pruebas (diseño, presentación, coste, aceleración, skidpad, auto-cross, endurance y consumo de combustible).

Durante el evento, los equipos son juzgados por especialistas del sector, debiendo superar diversas pruebas (estáticas y dinámicas) que demuestren el correcto funcionamiento del vehículo diseñado.

Cuadro 2.1: Pruebas y puntuaciones de la competición

|                          |             |
|--------------------------|-------------|
| <b>Pruebas estáticas</b> | <b>325</b>  |
| Presentación             | 75          |
| Diseño                   | 150         |
| Análisis de costes       | 100         |
| <b>Pruebas dinámicas</b> | <b>675</b>  |
| Aceleración              | 75          |
| Prueba del 8 (skidpad)   | 50          |
| Auto-cross               | 150         |
| Resistencia (endurance)  | 300         |
| Consumo                  | 100         |
| <b>Total</b>             | <b>1000</b> |

### **PRUEBAS ESTÁTICAS:**

Las pruebas estáticas intentan valorar otros aspectos fuera de lo que son las prestaciones mecánicas del vehículo. Todas ellas son valoradas por jueces con dilatada experiencia profesional con los que hay que intercambiar opiniones y justificar las decisiones tomadas.

#### Presentación comercial:

El objetivo de esta prueba es que el equipo realice una presentación en la que convenza a los ejecutivos de una firma constructora de que su diseño es el que mejor satisface las demandas de un piloto amateur. Para ello hace falta que quede constancia de que se sabe al mercado al cual va dirigido el producto justificando las decisiones tomadas en el diseño y que es fácil de fabricar. Las presentaciones son valoradas en su contenido, organización y aspectos visuales al igual que los encargados de llevar a cabo la presentación.

#### Diseño:

En esta prueba un equipo de jueces experimentados valora el diseño del monoplaza y como éste satisface las necesidades del mercado. En esta prueba los miembros del equipo han de justificar las decisiones de diseño tomadas así como los componentes escogidos. Antes de la competición los equipos presentan un informe donde explican el diseño que han realizado con pruebas y análisis que lo respalden.

#### Análisis de costes:

Se evalúa un informe presentado con anterioridad, el objetivo del cual es la explicación y justificación detallada de los costes de todas las piezas. En este informe se debe incluir absolutamente todo y con alto grado de detalle, como pueden ser las operaciones de mecanizado de las piezas, las horas de fabricación, la cantidad de material utilizado para éstas e incluso la tornillería. Esto intenta simular el informe de costes que se entregaría a un director general de una compañía de automoción para que decidiera producir el vehículo.

### **PRUEBAS DINÁMICAS:**

Estas pruebas tienen como objetivo valorar el comportamiento del monoplaza, cabe añadir que en estas pruebas los monoplazas son conducidos por miembros de los equipos. Antes de que un coche pueda participar en las pruebas dinámicas han de pasar cuatro inspecciones. La primera es una inspección técnica muy rigurosa llevada a cabo por comisarios de la competición donde comprueban que el vehículo cumpla con la normativa y que no represente ningún tipo de peligro para la seguridad. Después hay que pasar un test de vuelco, otro de ruido y por último uno de frenada donde el monoplaza ha de ser capaz de bloquear simultáneamente las 4 ruedas. Si un equipo no pasa alguna de estas inspecciones o test se les da la oportunidad a los participantes de realizar los

---

cambios pertinentes.

Aceleración:

Esta prueba mide la capacidad de aceleración del vehículo. Consiste en recorrer una recta de 75 metros con el coche inicialmente parado. Se pone a prueba el rendimiento del motor, la eficacia de la transmisión y las relaciones de cambio, sistemas de control de tracción y la suspensión del monoplaza. La ecuación siguiente determina la puntuación siendo  $T_{your}$  el tiempo realizado por el equipo a puntuar y  $T_{min}$  el tiempo del monoplaza más rápido. Esta misma nomenclatura se utiliza para la puntuación de otras pruebas dinámicas.

$$puntuación\ aceleración = 71,5 \cdot \frac{\frac{T_{max}}{T_{your}} - 1}{\frac{T_{max}}{T_{min}} - 1} + 3,5$$

Prueba del 8 (skidpad):

Esta prueba mide la capacidad de hacer giros de radio constante en una superficie plana. La prueba intenta examinar la capacidad de proporcionar la máxima adherencia lateral. El ocho está formado por dos círculos los cuales están limitados por conos interiores situados sobre un diámetro de 15,25 metros y conos exteriores sobre un diámetro de 21,25 metros. Los centros de los dos círculos están separados 18,25 metros. El coche deberá dar dos vueltas a una de las circunferencias en sentido horario y otras dos a la otra en sentido antihorario, pasando de una circunferencia a la otra describiendo un 8. De estas vueltas sólo se promedia el tiempo de las segundas vueltas de cada sentido. La ecuación para determinar la puntuación es:

$$puntuación\ skidpad = 47,5 \cdot \frac{\frac{T_{max}^2}{T_{your}^2} - 1}{\frac{T_{max}^2}{T_{min}^2} - 1} + 2,5$$


---

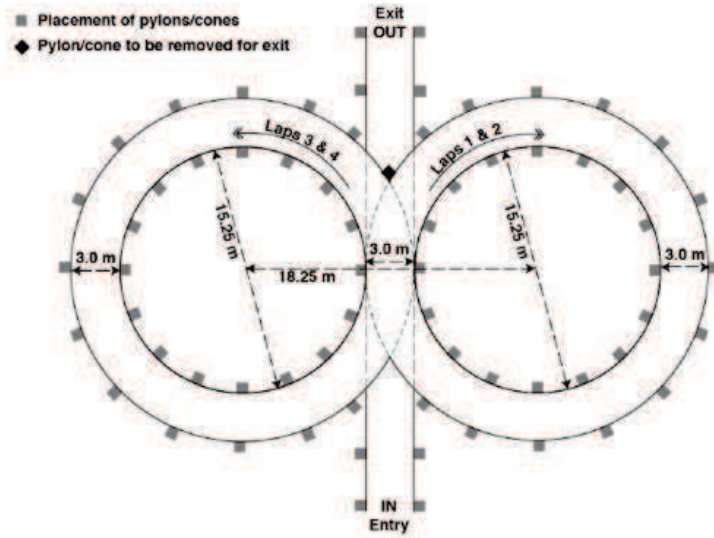


Figura 2.2: Prueba del 8

Auto-cross:

Esta prueba evalúa el comportamiento dinámico general del coche ya que consiste en completar un circuito de aproximadamente 800 metros en el cual hay rectas, curvas rápidas, curvas lentas (horquillas) y slaloms. El objetivo es testear la capacidad de aceleración, frenada y de realizar curvas del monoplaza. La puntuación viene impuesta por la siguiente ecuación:

$$\text{puntuación auto - cross} = 142,5 \cdot \frac{\frac{T_{max}}{T_{your}} - 1}{\frac{T_{max}}{T_{min}} - 1} + 7,5$$

Resistencia (endurance) y consumo:

Es la prueba con más peso de la competición y su longitud es de 22 km, con esta prueba se evalúan los mismos aspectos que en la prueba anterior sumándole otros como es la fiabilidad y el consumo, de hecho el circuito es muy similar al del auto-cross. La mitad de la prueba es realizada por un piloto y la otra mitad por otro. La organización regula en 3 minutos el tiempo máximo para realizar el cambio de piloto. Las puntuaciones de esta prueba son:

$$\text{puntuación resistencia} = 250 \cdot \frac{\frac{T_{max}}{T_{your}} - 1}{\frac{T_{max}}{T_{min}} - 1} + 50$$

Si  $T_{your} > T_{max}$ , entonces la puntuación obtenida sería de 0 puntos.

$$puntuación consumo1 = 100 \cdot \frac{\frac{FactorConsumo_{min}}{FactorConsumo_{your}} - 1}{\frac{FactorConsumo_{min}}{FactorConsumo_{max}} - 1}$$

$$factor consumo = 100 \cdot \frac{\frac{T_{min}}{Vueltas_{T_{min}}}}{\frac{T_{your}}{Vueltas_{your}}} \cdot \frac{\frac{CO2_{min}}{Vueltas_{CO2_{min}}}}{\frac{CO2_{your}}{Vueltas_{your}}}$$

Siendo:

$Vueltas_{T_{min}}$  y  $Vueltas_{CO2_{min}}$ , el número de vueltas que han realizado los equipos con esos requisitos.

$CO_2$ , la cantidad de  $CO_2$  usada por el equipo que está siendo puntuado (your) o el que menos ha gastado (min).

Si un equipo tarda más del 133 % del tiempo del mejor equipo, tampoco puntuará ni en la prueba de resistencia ni en la de consumo.

El objetivo del equipo Fórmula UC3M a corto plazo sería participar en esta competición principalmente en las ediciones de España (Cataluña, circuito de Montmeló, por proximidad y con lo cual menor coste para el equipo) o en Inglaterra (Silverstone, por ser la prueba más famosa e importante).

Montmeló:

Inaugurado en el año 1991, tiene un aforo de 131.000 espectadores, y acoge diversas competiciones entre las que destacan el Gran Premio de España de Fórmula 1 y el Gran Premio de Cataluña de Motociclismo del Campeonato Mundial de Motociclismo. También es uno de los circuitos más utilizados para los ensayos de los diferentes equipos europeos durante el receso de invierno.

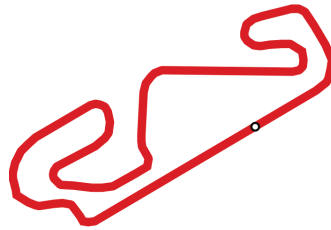


Figura 2.3: Circuito de Montmeló

Silverstone:

Es uno de los más prestigiosos de Europa, al haber albergado el Gran Premio de Gran Bre-

taña de la Fórmula 1, los 1000 km de Silverstone del Campeonato Mundial de Resistencia, y el Gran Premio de Gran Bretaña de Motociclismo del Campeonato Mundial de Motociclismo, entre otras pruebas internacionales. Era un aeródromo inactivo después de la Segunda Guerra Mundial, por lo que las pistas de aterrizaje comenzaron a utilizarse para carreras en 1947.



Figura 2.4: Circuito de Silverstone

## 2.2. Fórmula UC3M

Fórmula UC3M es un equipo formado por estudiantes de la Universidad Carlos III de Madrid, fundado en 2011 y con el objetivo de construir un vehículo tipo fórmula para participar en la competición. El equipo actualmente está compuesto por 40 estudiantes de diversas disciplinas además de la de Ingeniería, como Periodismo, Comunicación Audiovisual o Economía, entre otras, ya que la Formula Student es un proyecto plenamente interdisciplinar que requiere un amplio conocimiento y habilidades diferentes. El proyecto se encuentra tutelado y dirigido por profesores del departamento de ingeniería mecánica. Con esto también se busca motivar a los estudiantes que tienen interés y se ofrece la posibilidad de convertir sus conocimientos teóricos en un proyecto real.



Figura 2.5: Logo de Fórmula UC3M

El equipo está constituido actualmente con las siguientes divisiones para organizar el proceso de diseño:

- Líder del equipo, para coordinar las distintas ramas del mismo.
- Grupo de organización, responsables de la logística del equipo
- Director técnico, apoyo al líder respecto a los temas técnicos e ingenieriles del diseño del vehículo, se encarga de supervisar los siguientes grupos de trabajo:

Motor y transmisión

Electrónica

Marketing y comunicación

Chasis, suspensión y frenos

Análisis

Ensamblaje

Fabricación

Aerodinámica

---

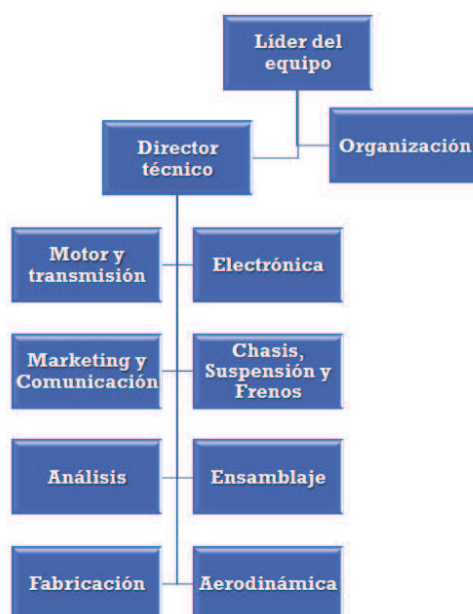


Figura 2.6: Organigrama del equipo

Todas estas divisiones son coordinadas por el director técnico, quien asegura que los diseños se pueden montar en el vehículo y cumplen con los requisitos. Además, el equipo cuenta con una división de marketing que ayuda en la búsqueda de patrocinadores.

Respecto al diseño y construcción del monoplaza ya existen algunas características que están determinadas por el equipo y las cuales van a servir de base para el desarrollo del mismo. Las principales hasta ahora son:

|                           |                        |
|---------------------------|------------------------|
| Distancia entre ejes      | 1.600 mm               |
| Peso (Aproximado)         | 290 kg                 |
| Via delantera             | 1.200 mm               |
| Via trasero               | 1.200 mm               |
| Chasis                    | Tubular Acero AISI 304 |
| Carrocería                | Fibra de vidrio        |
| Suspensión                | Pushrod                |
| Motor                     | 4 cilindros 599 c.c.   |
| Diferencial               | Torsen                 |
| Caballos de fuerza (est.) | 60 c.v.                |
| 0-100 kph (est.)          | 4,5 s                  |

Figura 2.7: Características del vehículo



---

## Capítulo 3

# Aerodinámica

---

### 3.1. Teoría aerodinámica

La palabra aerodinámica proviene del griego: aerios, relativo al aire y dynamis, que significa fuerza. Por tanto, es la rama de la mecánica de fluidos que estudia las fuerzas que aparecen cuando un cuerpo se mueve por un fluido.

Su definición según el diccionario de la R.A.E: parte de la mecánica que estudia el movimiento de los gases y los movimientos relativos de gases y sólidos.

Según el problema de estudio se puede clasificar la aerodinámica en varias clases. Una primera clasificación se debe a la naturaleza del fluido, según esta clasificación se divide en:

- Aerodinámica incompresible, si los cambios en la densidad en el cuerpo son muy pequeños se dice que es un fluido incompresible, en el aire se toma este régimen cuando la velocidad de éste es menor a  $0.3M$ , (donde  $M$  es el número de Mach, que es el cociente entre la velocidad del flujo, un objeto que se mueva en su interior, y la velocidad del sonido, aproximadamente unos 340 m/s). Así que la aproximación de aerodinámica incompresible es válida hasta una velocidad aproximada del aire de 100 m/s. Por tanto, este estudio se realizará acorde a esta suposición.
- Aerodinámica compresible, en el régimen compresible los cambios en la densidad ya no son tan pequeños y se deben tener en cuenta. Este régimen trata problemas aerodinámicos en los que la velocidad del aire es mayor de  $0.3M$ , es decir una velocidad mayor a 100 m/s aproximadamente.

Otra posible clasificación, referida al número de Mach:

- Flujo subsónico: La velocidad del aire es menor que la velocidad del sonido,  $M < 1$ . Este tipo es el correcto para este proyecto.
- Flujo transónico: La velocidad del aire está próxima a la velocidad del sonido,  $M = 1$ .
- Flujo supersónico: La velocidad del aire es mayor que la velocidad del sonido,  $M > 1$ .

Por último, se puede clasificar el fluido en viscoso o no viscoso:

- No viscoso: es un flujo ideal (no tiene fricción interna entre partículas de fluido, lo cual se supondrá en este proyecto).
- Viscoso: fluido no ideal, aquél que se opone a esfuerzos tangenciales.

### 3.1.1. Fuerzas aerodinámicas

Cualquier elemento que se mueve a través del aire sufre una fuerza llamada aerodinámica.

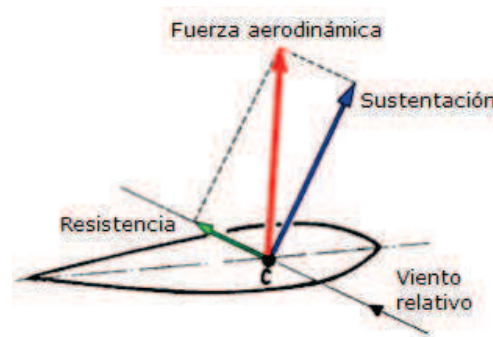


Figura 3.1: Descomposición de la fuerza aerodinámica

En la figura 3.1 se ve un perfil de un ala de avión con la anteriormente citada fuerza aerodinámica. Ésta se descompone en dos componentes: la sustentación (perpendicular al viento) y la resistencia aerodinámica (paralela al viento). En el caso de un alerón de automóvil lo único que cambia es que la sustentación es negativa y se denomina carga aerodinámica.

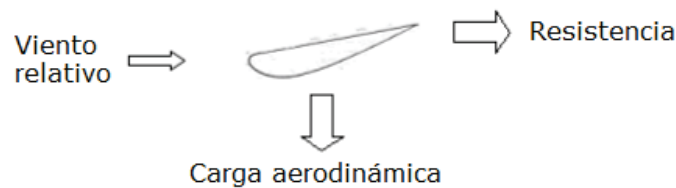


Figura 3.2: Fuerzas aerodinámicas en un coche

Para poder explicar por qué se crea esta fuerza aerodinámica se debe recurrir a tres principios físicos: el teorema de Bernoulli, la ecuación de continuidad y el efecto Venturi que deriva de los dos primeros.

El **teorema de Bernoulli** enunciado por el físico suizo Daniel Bernoulli en el siglo XVIII, demuestra que en un fluido ideal (sin viscosidad), la energía total permanece constante a lo largo de una línea de flujo. Como consecuencia, el aumento de velocidad del flujo corresponderá a una disminución de la presión. Como el aire es un fluido ideal e incompresible a velocidades menores a 0.3M, podemos considerar este teorema válido para el aire a velocidades menores a la citada.

$$\frac{V^2 \cdot \rho}{2} + P + \rho g z = \text{constante}$$

Donde:

V = velocidad del fluido en la sección considerada (m/s)

$\rho$  = densidad del fluido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

P = presión a lo largo de la línea de corriente (Pa)

g = aceleración gravitatoria ( $9,8 \text{ m}/\text{s}^2$ )

z = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia (m)

De todos estos parámetros, los únicos que no son constantes en una línea de flujo con las condiciones de fluido no viscoso e incompresible, son la velocidad y la presión. La fórmula citada anteriormente puede quedar simplificada a:

$$\boxed{\frac{\rho \cdot V^2}{2} + P + \gamma \cdot z = \text{constante}}$$

o lo que es lo mismo: presión dinámica + presión estática = constante.

La **ecuación de continuidad** describe el comportamiento de un flujo dentro de un conducto. Si dentro de éste no hay ninguna fuente ni sumidero, el flujo de masa entrante al conducto será igual al saliente. Sabiendo la fórmula del flujo de masa, se observa que para un fluido incompresible, como el aire a velocidades menores a 0.3M, si el área del conducto aumenta, la velocidad del flujo disminuye y viceversa.

$$\frac{\Delta}{\Delta t} \int (\rho dV) = \int \rho q_n dA_i - \int \rho q_n dA_e$$

Donde:

$\rho$  = densidad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

t = tiempo (s)

V = volumen ( $\text{m}^3$ )

A = área ( $\text{m}^2$ )

$q_n$  = vector velocidad (m/s)

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot V_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot V_2$$

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$$

$$A \cdot V = \text{constante}$$

Como se puede observar en la deducción anterior, partiendo de la fórmula del flujo másico y sabiendo que los flujos a la entrada y a la salida son iguales, se obtiene que el producto del área y la velocidad es constante, por tanto, que son inversamente proporcionales.

El **efecto Venturi** fue descubierto por el físico italiano Giovanni Venturi en el siglo XVIII gracias a un experimento con un tubo que lleva su nombre (figura 3.3). Este efecto Venturi se explica mediante los dos principios anteriores: el teorema de Bernoulli y la ecuación de continuidad. Cuando un fluido pasa por el interior de un conducto, la velocidad aumenta y la presión disminuye si pasa por una sección menor.

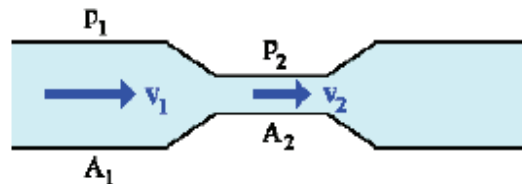


Figura 3.3: Efecto Venturi

$$\begin{aligned} \text{si } A_2 < A_1 : \\ V_2 &> V_1 \\ P_2 &< P_1 \end{aligned}$$

Con estos fundamentos teóricos ya se puede entender por qué se crea la fuerza aerodinámica. Determinando un volumen de control cerrado donde esté el ala (figura 3.4), se observa cómo en el extradós de éste (parte inferior del ala), al tener más curvatura se reduce el área y por lo tanto ateniéndonos al efecto Venturi, se obliga al aire a pasar a más velocidad, por lo tanto la presión disminuye. En el caso del intradós (parte superior), ocurre lo contrario, el área es mayor por lo tanto la velocidad del aire disminuye y la presión aumenta. Así, se consigue una parte superior con alta presión y una parte inferior con baja presión.

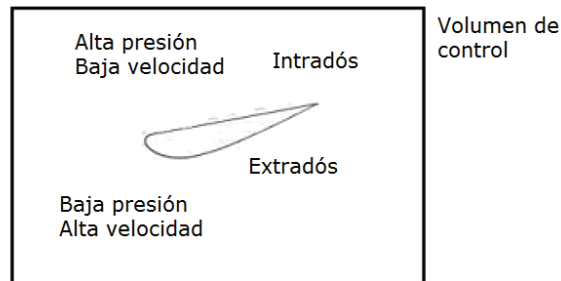


Figura 3.4: Ala dentro de un volumen de control

Con esa diferencia de presiones ( $\Delta P$  en Pa) y la sección del alerón ( $S$  en  $m^2$ ), se conoce la fuerza aerodinámica que sufrirá el ala ( $F$  en N).

$$F_z = S \cdot \Delta P$$

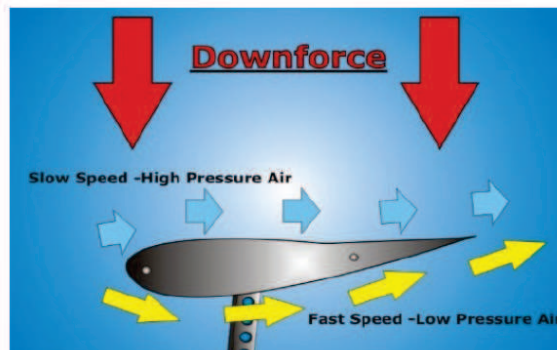


Figura 3.5: Downforce

Esta fuerza provocada por la diferencia de presiones va en la dirección del gradiente de presiones, es decir de alta a baja presión. En la práctica, para poder comparar perfiles alares se utilizan coeficientes adimensionales, ya que la fuerza depende de factores externos tales como la densidad o la sección del perfil. En cambio, el coeficiente adimensional no depende de estos factores, sino de la forma y del ángulo de ataque del perfil, es decir, del propio perfil. Para cada componente de la fuerza aerodinámica, carga aerodinámica (downforce) y resistencia aerodinámica (drag) se utiliza un coeficiente, siendo los coeficientes vertical y horizontal,  $C_z$  y  $C_x$  respectivamente.

### 3.1.2. Carga aerodinámica

La carga aerodinámica  $F_z$  es la fuerza que empuja al alerón hacia el suelo cuando éste se desplaza por el aire. Esta fuerza hace que el automóvil tenga mayor apoyo aerodinámico, es decir, tenga mayor fuerza de agarre con el suelo.

$$F = \mu \cdot N$$

$$N = mg + F_z$$

En la primera ecuación se observa que la fuerza de agarre con el suelo (F en Newtons) es resultado del producto de la normal (N en Newtons) y el coeficiente de rozamiento del suelo ( $\mu$  que es adimensional).

Cuando hay una carga aerodinámica sobre el automóvil, la normal, aumenta, por la suma del peso y de la carga aerodinámica, por lo tanto la fuerza de agarre con el suelo también aumenta. Como conclusión, si hay una carga aerodinámica sobre el automóvil éste tendrá más agarre con el suelo, lo que supone poder ir más rápido por las curvas sin que esta fuerza exceda los límites de derrape del automóvil. Por tanto, en este proyecto se buscará un alto valor de esta magnitud.

Las formas afiladas que tienen los automóviles de carreras hacen que por sí solos tengan inercia a levantarse, es decir tienen un coeficiente de sustentación positivo. Por lo tanto los elementos que crean carga aerodinámica en el automóvil, como el alerón, evitan que éste se levante.

Por otra parte, para poder comparar dos perfiles que crean carga aerodinámica, como se ha dicho en el anterior apartado, no podemos utilizar la carga aerodinámica que crean sino que tenemos que utilizar un coeficiente adimensional, el  $C_z$ . El coeficiente de sustentación (en automoción se puede denominar también coef. antisustentación porque el sentido de la fuerza es el contrario) se define como:

$$C_z = \frac{F_z}{\frac{\rho V^2 S}{2}}$$

Donde:

$F_z$  = carga aerodinámica (Newtons)

$\rho$  = densidad en ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

V = velocidad ( $\text{m}/\text{s}$ )

S = superficie del perfil ( $\text{m}^2$ )

La mayoría de coeficientes de sustentación de perfiles aerodinámicos son conocidos. Así que despejando se obtiene:

---

$$F_z = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_z(\alpha)$$

Como se vió anteriormente, el  $C_z$  depende del perfil y del ángulo de ataque. Con lo cual, para un mismo perfil, la gráfica " $C_z$  - ángulo de ataque" sería como el que se muestra en la figura 3.6.

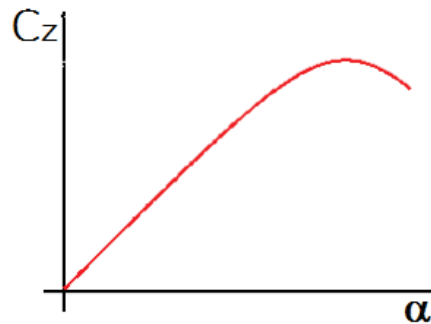


Figura 3.6: Gráfico coef.sustentación-ángulo

Consta de una primera zona lineal hasta llegar a un punto máximo en el que empieza a descender el  $C_z$ , aunque sigue creciendo el ángulo. Es en esta zona donde se desprende la capa límite, el aire no es capaz de seguir el contorno del perfil y se separa de éste, entrando en pérdida.

### 3.1.3. Resistencia aerodinámica

La resistencia aerodinámica ( $D$ ) es la fuerza que se opone al avance de un objeto por el aire. El objetivo es conseguir un valor lo más bajo posible, lo que indicaría que existe muy poca resistencia al avance del vehículo por el fluido. De nuevo, en vez de usar la fuerza total se utiliza el coeficiente de resistencia para comparar perfiles. El coeficiente de resistencia se define como:

$$C_x = \frac{D}{\frac{\rho V^2 S}{2}}$$

En la mayoría de casos, al igual que se conocen muchos coeficientes de sustentación para diferentes ángulos de un perfil determinado, también se conocen los coeficientes de resistencia.

| Forma                     |                                                                                       | Coefficiente de resistencia |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Esfera                    | →    | 0.47                        |
| Media esfera              | →    | 0.42                        |
| Cono                      | →    | 0.50                        |
| Cubo                      | →    | 1.05                        |
| Cubo en ángulo            | →    | 0.80                        |
| Cilindro largo            | →    | 0.82                        |
| Cilindro corto            | →    | 1.15                        |
| Cuerpo aerodinámico       | →    | 0.04                        |
| Medio cuerpo aerodinámico | →  | 0.09                        |

Figura 3.7: Coeficientes conocidos de resistencia

Así, es más fácil conocer la resistencia que ofrece un determinado perfil. Despejando de la ecuación anterior:

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_x(\alpha)$$

En la figura 3.8 se muestra cómo el coeficiente de resistencia aumenta si aumentamos el ángulo de ataque del perfil.

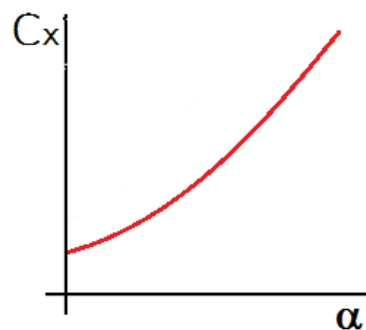


Figura 3.8: Gráfico coef.resistencia-ángulo

Siempre es creciente y no llega a ningún punto crítico como el coeficiente de sustentación.

La resistencia se opone al avance del objeto, así que tendrá repercusiones en la velocidad máxima que pueda alcanzar éste. Para un automóvil de carreras se puede obtener este parámetro a partir de la siguiente expresión matemática, que relaciona la potencia del motor con la velocidad máxima que podrá alcanzar.

$$CV = \frac{C_x AV^3}{1225}$$

Donde:

CV = potencia del motor disponible

$C_x$  = coeficiente de resistencia

A = área frontal del automóvil

V = velocidad máxima que podrá alcanzar

### 3.1.4. Eficiencia aerodinámica

Lo que se pretende conseguir en todo alerón es maximizar la carga aerodinámica, minimizando la resistencia. Este concepto es el de eficiencia aerodinámica y para calcularla se utiliza el coeficiente adimensional  $f$  (fineza).

$$f = \frac{F_z}{D} = \frac{C_z}{C_x}$$

### 3.1.5. Flujo laminar y flujo turbulento

Uno de los mayores problemas de la aerodinámica es la turbulencia, ya que es difícil de calcular. La turbulencia se debe a los grandes gradientes de presión y velocidad que hay en torno a una superficie, esto consigue que el movimiento de las partículas sea aleatorio, caótico y formen remolinos. En cambio, en los flujos laminares el flujo se mueve de forma continua, ordenada y en láminas paralelas.

Cuando un fluido fluye por la superficie de un perfil alar, la capa del fluido que está tocando con la superficie del perfil tiene velocidad nula y las capas que están más lejanas tienen cada vez más velocidad puesto que hay menos fricción con la superficie. Llega un punto en que una capa de flujo no nota que hay una superficie, y dicha capa tiene la misma velocidad que el flujo libre.

---

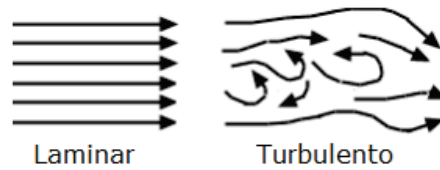


Figura 3.9: Tipos de flujo

Un recurso utilizado para saber si el flujo es laminar o turbulento es saber el número de Reynolds. Un número de Reynolds alto, superior a 4000 aproximadamente, significa un flujo turbulento, en cambio, para números de Reynolds más bajos a 2000 el flujo será laminar. Para números de Reynolds entre 2000 y 4000 el flujo está en transición y no se puede saber su comportamiento.

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu}$$

El número de Reynolds, definido en esta ecuación, depende de la densidad, la velocidad, la longitud característica del objeto considerado y la viscosidad del fluido en el que éste se mueve.

## 3.2. Elementos aerodinámicos en un automóvil de competición

Una vez vistos los fundamentos que rigen el comportamiento de los elementos aerodinámicos del automóvil, se explicará el inicio de la aerodinámica en los automóviles y los elementos aerodinámicos más usados actualmente para un automóvil de competición de tipo fórmula.

### 3.2.1. Los alerones a lo largo de la historia

Cuando se construyeron los primeros automóviles a principios del siglo XX, sólo tenía importancia la potencia y cilindrada del motor. La aerodinámica del automóvil no se tenía en cuenta y la forma que se daba a los automóviles era puramente estética. Las velocidades que alcanzaban estos primeros automóviles eran mínimas así que no había problemas de que el vehículo se levantara.

En los años siguientes se fueron desarrollando todos los elementos mecánicos del automóvil, pero seguía sin tenerse en cuenta la aerodinámica. Ya en los años 50 se empezó a realizar el World Sport Car Championship, considerada la primera competición automovilística. En esta competición los vehículos eran pequeños, ligeros y con formas afiladas para minimizar la resistencia con el aire, se puede destacar como una de las primeras formas de mejorar la

---

aerodinámica, pero el problema era que a altas velocidades el automóvil se podía levantar, cosa que no se deseaba.

En el año 1956 el ingeniero suizo Micheal May colocó un alerón invertido encima de la cabina de su Porsche Type 550, de esta forma se creaba una fuerza de sustentación negativa que pegaba el automóvil al suelo y le permitía ir a más velocidad en las curvas sin salirse de éstas. Esta fuerza de sustentación negativa también impedía a altas velocidades que el automóvil se levantara. Desafortunadamente los organizadores de la carrera donde iba a competir este ingeniero suizo no le permitieron correr alegando que el alerón que había colocado restaba visión a los pilotos que iban detrás de él. Hubo más negativas a esta idea, por lo tanto otros ingenieros desestimaron la idea del alerón y se dedicaron a mejorar la forma del automóvil.

El empujón casi definitivo a la utilización del alerón la dio Jim Hall, un piloto e ingeniero estadounidense. Jim montó un alerón en la parte posterior de su Chaparral 2E y en la competición Can Am (Canadiense Americana) en 1966 obtuvo grandes resultados con este automóvil. Al año siguiente Jim llevó este automóvil a las 24 horas de Le Mans y ganó la carrera. Fue un gran avance ya que Jim con un motor menos potente que sus rivales lograba mejores tiempos. Desde entonces se introdujo el alerón en la mayoría de carreras automovilísticas.

El último paso en la historia de los alerones fue el descubrimiento del efecto suelo, lo que hizo que los alerones estuvieran situados lo más bajos posible y de esta forma crear todavía más carga aerodinámica. Con el paso de los años el organismo regulador (FIA) ha ido cambiando las normas respecto a los alerones: materiales, ángulos, número de elementos, etc. En los últimos años se han ido desarrollando los alerones de varios elementos, ya que mejoran la carga aerodinámica todavía más, pero la FIA ha limitado el número de elementos a tres.

El alerón es un elemento importante en la aerodinámica del automóvil, que frena a éste en las rectas pero a la hora de tomar las curvas es el que hace al vehículo estable y el que permite ir a más velocidad en ellas. Para solventar en parte este problema, en la actualidad se han ideado sistemas mecánicos accionados por el piloto, que actúan sobre las alas del alerón y cambian su inclinación frente al aire. Con lo cual consiguen reducir su resistencia en rectas para obtener mayor velocidad (inclinando menos el alerón), y en el resto del circuito, principalmente en las curvas, llevan el alerón con mayor grado de inclinación para aportar carga aerodinámica al vehículo.

### 3.2.2. Elementos aerodinámicos

A continuación se presentan y explican diversos elementos, que intervienen en la aerodinámica de un monoplaza de tipo fórmula, ya sea en mayor o menor medida:

1. Alerón delantero
  2. Carenado
  3. Aletas de nariz
  4. Deflectores laterales
-

5. Toma de admisión
6. Pontones
7. Aletas de pontón
8. Alerón trasero
9. Fondo plano
10. Difusor
11. Casco

### 3.2.3. Alerón delantero

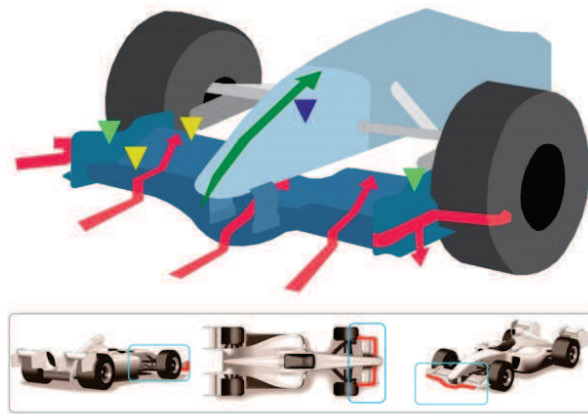


Figura 3.10: Alerón delantero

El alerón delantero es la primera parte del automóvil en hacer contacto con el flujo de aire. El flujo alrededor de éste es mayor que en cualquier otra parte del coche puesto que es la parte en la que el aire incide con menos perturbación. El alerón está diseñado para producir downforce (fuerza de adherencia/agarre) y guiar el aire hacia abajo del monoplaza y hacia atrás. Flaps y winglets (pequeños alerones y apéndices aerodinámicos) se usan para guiar el aire pasadas las ruedas hacia las entradas del radiador y el fondo del vehículo. El aire turbulento que se mueve hacia la parte trasera afectará a la eficiencia del alerón trasero. La eficiencia del alerón se basa en tres parámetros básicos: el alargamiento, el ángulo de ataque y la resistencia:

- El **alargamiento**: La cantidad de downforce producida por un ala o alerón se determina por sus medidas. Cuanto mayor sea el alerón mayor downforce produce. Se llama alargamiento (o relación de aspecto) a la relación entre longitud/anchura y cuanto mayor sea el alargamiento, menor es la resistencia creada por los vórtices en las puntas de los alerones. La longitud de un alerón es la dimensión alargada perpendicular al flujo de aire, mientras que su cuerda es la dimensión paralela al flujo.

- El **ángulo de ataque**: La eficiencia de un alerón depende también de la relación downforce/resistencia. La cantidad de downforce generada también depende del ángulo o inclinación del alerón. Cuanto mayor es el ángulo de ataque mayor es el downforce producido.
- La **resistencia**: Al incrementar el downforce en un alerón también crece la resistencia. La carga generada por el alerón trabaja en sentido vertical, hacia el suelo, mientras que la resistencia actúa en la dirección opuesta al flujo de aire. Las ruedas delanteras y traseras son la mayor fuente de resistencia de un vehículo tipo fórmula, esto provoca hasta un 60 % de ineficiencia aerodinámica (el aporte en la resistencia total suele ser de un 40 %).

El conjunto del alerón delantero tiene unas placas perpendiculares en sus bordes laterales, llamadas "endplates" o derivas, para reducir la turbulencia que hay alrededor de las ruedas y ayudar al flujo de aire a moverse hacia los radiadores. Cualquier cambio realizado en la parte delantera del coche afectará al flujo de aire que se mueve hacia la parte trasera.

El alerón delantero aporta el 33 % de la carga aerodinámica total del coche (y casi la mitad del grupo alerón). A parte de esto y de enviar la corriente de aire a las ruedas de forma que no generen mucha resistencia, tiene la función de alimentar en parte a los bajos, y canalizar el flujo de aire de la forma deseada hacia la parte trasera del monoplaza. Otra función interesante que realiza el alerón delantero gracias a su forma, es la de deflectar aire hacia los frenos para mejorar su refrigeración. La principal problemática en su diseño es buscar una solución equilibrada entre la generación de fuerza vertical y el desvío de aire a otras partes del vehículo.

### 3.2.4. Carenado

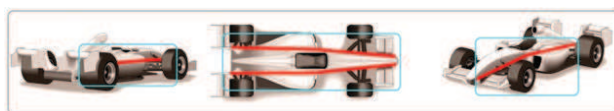


Figura 3.11: Carenado

El carenado de un fórmula está diseñado, para producir el máximo de downforce minimizando a su vez la resistencia. Para conseguirlo la parte superior del coche está diseñada para acariciar el aire tan suavemente como sea posible, mientras que su parte inferior se diseña para crear una zona de baja presión entre el coche y el asfalto, que empuje el monoplaza hacia el suelo. El desarrollo del efecto suelo empezó en los años setenta cuando se comenzó a usar alas montadas en los vehículos para generar downforce en las ruedas traseras. Por razones de seguridad esto fue prohibido, lo que condujo a un rediseño del underbody (parte de abajo del coche) y se introdujeron los sidepods (pontones) que contenían los radiadores e introducían el aire debajo del vehículo hacia sus túneles. Estos túneles se estrechaban en el centro y se ensanchaban hacia la parte posterior. Tal y como el aire se movía hacia los túneles, se creaba

un área de baja presión entre el coche y el suelo. Esto producía que fuera succionado hacia el suelo. Al progresar las pruebas se comienza a ver que reduciendo el flujo lateral debajo del coche mejoraba aún más el efecto suelo.

### 3.2.5. Aletas de nariz

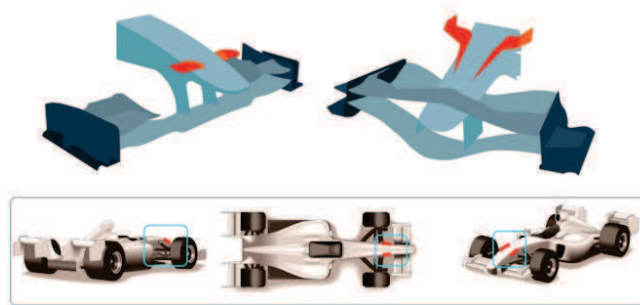


Figura 3.12: Aletas de nariz

Estos elementos son aletas destinadas a la corrección de los flujos de aire pasantes por la nariz o morro hacia la parte media y luego a la trasera. Independientemente de su orientación, su función no es la generación de empuje, sino el redirigir, dividir o repartir el flujo de aire incidente en ellas. Su función es solucionar inestabilidades, vibraciones o decaimientos de rendimiento en elementos que están por detrás en el flujo de aire, y como ocurre siempre, son elementos añadidos tras la detección de una anomalía en algún sitio posterior. Por esto mismo, son específicas para cada problema y cada coche. Además suelen tener cortos periodos de vida, pues suele haber soluciones menos costosas en cuanto al arrastre; aunque más difíciles de implementar. A cada uno de los tipos de aletas que aparecen se les suele poner un nombre particular.

---

### 3.2.6. Deflectores laterales

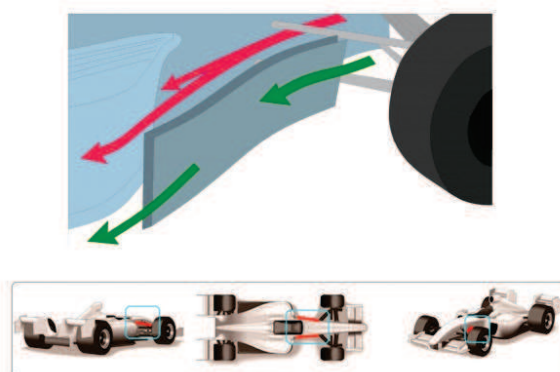


Figura 3.13: Deflectores laterales

Los deflectores al contrario que otros elementos aerodinámicos no cumplen la función de generar apoyo o downforce es decir no se encargan de empujar el coche hacia abajo. Los deflectores tienen una función distribuidora de los flujos de aire. Tiene la cualidad de canalizar el aire hacia los pontones para mejorar la refrigeración, los deflectores imitan la forma del chasis y suelen ir sujetos a la esquina inferior externa del pontón en cuestión. Otra cualidad que poseen es la de orientar los flujos de aire por debajo del coche, sobre todo por la zona de los pontones pero redirigiéndolo hacia su parte inferior. Seguidamente el fondo del vehículo distribuye dichos flujos de aire hacia el difusor mejorando así el apoyo aerodinámico (el difusor es el elemento del auto que genera más apoyo aerodinámico por sí sólo). Por tanto, si los deflectores mejoran el flujo de aire hacia el difusor la eficacia aerodinámica es mayor.

### 3.2.7. Toma de admisión

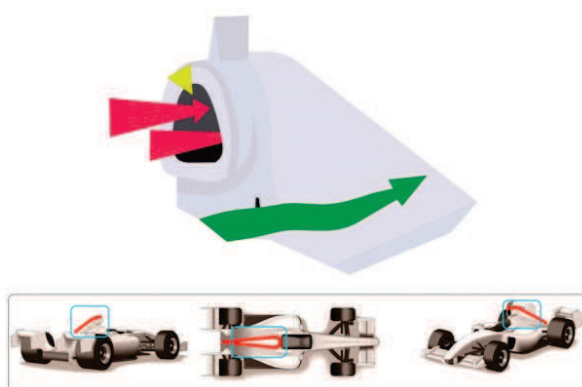


Figura 3.14: Toma de admisión

El anclaje para grúa, es la parte elevada por encima de la cabeza del piloto, que tiene una entrada de aire más o menos grande y está rematada por el alerón superior de la cámara, impuesto por reglamento, al igual que la apertura necesaria para poder levantar el monoplace mediante una grúa, en caso de tal necesidad. Es una buena zona para posicionar aletas, que pueden tener múltiples aplicaciones, desde generar un alto empuje en la zona central, o redirigir los flujos de aire hacia el alerón trasero, hasta corregir inestabilidades o vibraciones innecesarias.

### 3.2.8. Pontones

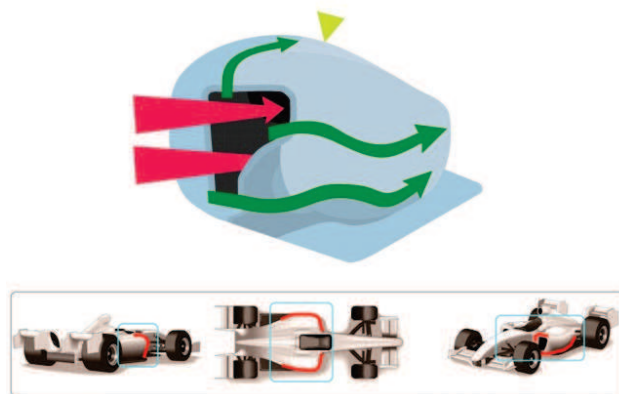


Figura 3.15: Pontones

Son la parte ancha y baja de la carrocería, que se extienden desde cada lado del habitáculo del piloto hasta el extremo final de los radiadores cubriéndolos, obviamente no cubre las tomas de aire. Desde ahí hacia atrás, se van estrechando hacia la zona central trasera, de tal manera que dan una forma de botella o embudo a la silueta del automóvil.

Esa forma no es casual, ya que se basa en una regla del diseño aeronáutico, la llamada **Regla del área**. Esta regla de diseño sirve para reducir la resistencia de onda producida en el avance de un cuerpo a través de un fluido (relacionada con la compresibilidad del aire), sobre todo en altas velocidades. Resumiendo, la regla consiste en reducir en lo posible las variaciones bruscas de sección transversal del objeto que se desplaza.

En aviones es fundamental si se quiere sobrepasar el Mach 1 de velocidad, en los barcos también se usa, y en los coches es asumible para reducir las vibraciones estructurales. Lo que se traduce en estabilidad estructural y facilidad para el piloto, que no temblará tanto por este motivo, aunque las vibraciones por el motor y suspensión son otro asunto. Es en los pontones donde se colocan aditamentos como las famosas branquias y también, obviamente, las aletas de pontón, las chimeneas, así como los escapes que están en la parte trasera de esta cubierta.

### 3.2.9. Aletas de pontón

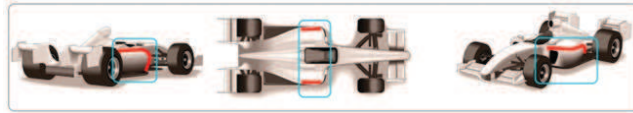


Figura 3.16: Aletas de pontón

Parecería evidente que disponiendo de una zona tan amplia como los pontones, se pudiesen llenar con uno o varios dispositivos aerodinámicos que produjeran una gran cantidad de empuje, pero resulta que no es necesario tanto empuje, ya que precisamente esta es la zona de mayor peso (motor, transmisión, refrigeración, ...) En lugar de esto es preferible, ya que se gana más, mejorar el resto de prestaciones que debe cumplir la zona:

1. Canalizar mejor el aire en la entrada de los radiadores.
2. Separar el flujo de aire incidente en las ruedas traseras.
3. Dirigir el flujo de aire para que incida mejor en el alerón trasero.
4. Evacuar el aire caliente proveniente de los radiadores.
5. Evitar que los flujos de aire incidan en el chorro de los gases de escape.
6. Generación de empuje vertical.

### 3.2.10. Alerón trasero

La idea sigue siendo la misma, generar carga aerodinámica. La diferencia entre el comportamiento de una ala y un alerón, aunque éste sea un ala invertida, es grande ya que en un ala de avión el aire viene limpio, en cambio en un alerón de un automóvil el aire ya viene bastante sucio.

Como se vio con el alerón delantero, la relación de aspecto de un alerón es muy importante ya que una relación de aspecto alta, mejora la eficiencia del alerón. Como se observa en la figura 3.17 si utilizamos un alerón con una relación de aspecto más alta, el coeficiente  $C_z$  (downforce) para un mismo ángulo de ataque crece.

---

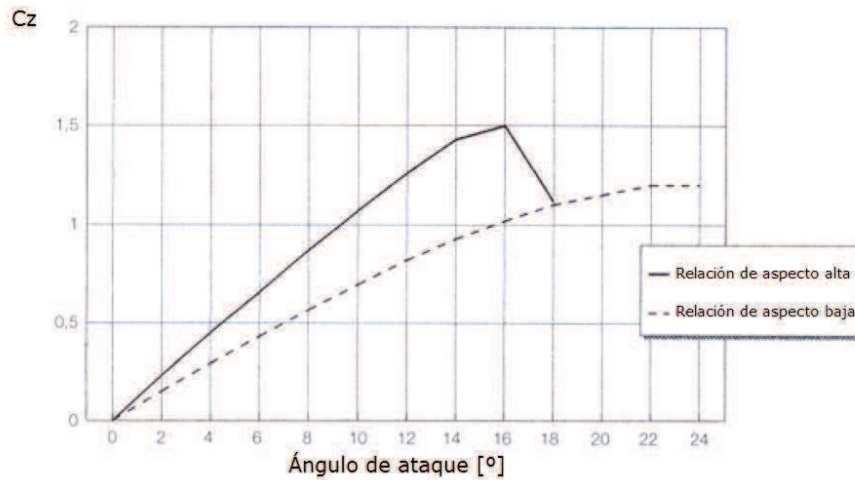


Figura 3.17: Relación de aspecto

En cuanto a alerones simétricos o asimétricos se puede observar en la figura 3.18 que un alerón asimétrico tiene más coeficiente de sustentación que uno simétrico, pero entra en pérdida a un ángulo más bajo.

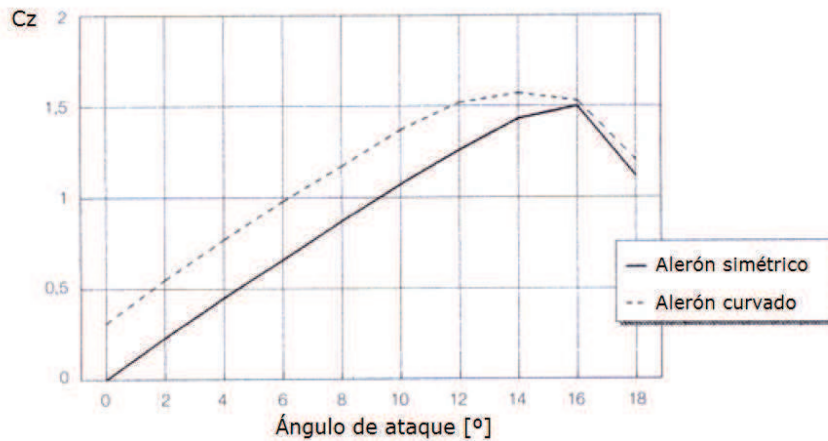


Figura 3.18: Simetría en los alerones

Existen básicamente dos tipos de alerones traseros: los alerones simples y los alerones multi-elementos. El tipo de alerón que se utilice se adaptará a nuestras necesidades ya sean económicas, constructivas o de reglamentación. Los alerones de un solo elemento o simples constan de un solo perfil que es el que genera toda la carga aerodinámica. Los automóviles GT o los de rally utilizan este tipo de alerón, como se muestra en la figura 3.19.



Figura 3.19: Ejemplo de alerón trasero simple

Los alerones multielementos, como el de la figura 3.20, constan de varios perfiles lo que les permite tener más superficie de alerón, por tanto incrementa la carga aerodinámica. También se incrementa la curvatura del perfil, provocando que aumente la carga aerodinámica. Por último, gracias a la interacción de los diferentes planos que hacen que el flujo cambie en el extradós del flap, se crea más carga aerodinámica.

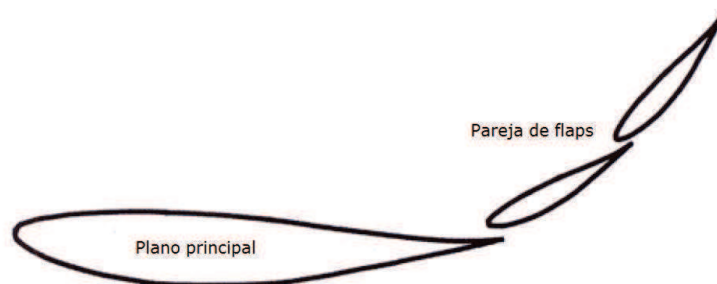


Figura 3.20: Alerón multielemento

Estos alerones multielementos provocan más carga aerodinámica que los simples, por lo tanto son los que más se utilizan en los automóviles de competición, a no ser que la reglamentación lo prohíba. En la Fórmula 1 los alerones están limitados a un número máximo de tres elementos.

Se puede observar en la siguiente imagen, en la figura 3.21, que un alerón de dos elementos crea el doble de carga aerodinámica que uno simple y un alerón de tres elementos casi el triple. Cabe decir que cuantos más elementos tenga el alerón más pronto entrará en pérdida, ya que la curvatura de éste será mayor.

---

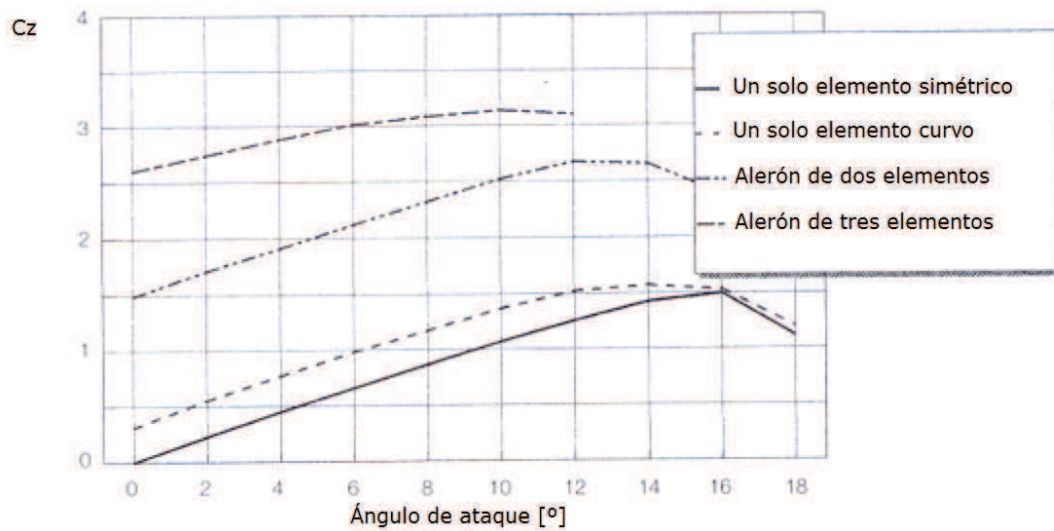


Figura 3.21: Eficiencia de un alerón multielemento

Estos alerones ya sean simples o multielementos están en un solo plano principal, pero para mejorar todavía más la aerodinámica existen automóviles con doble plano de alerones, figura 3.22, de esta forma se mejora la cantidad de carga aerodinámica generada notablemente.



Figura 3.22: Alerón multiplano

Otro elemento que es muy importante en la aerodinámica son las derivas o endplates, estos elementos se colocan en los extremos de los alerones para evitar vórtices en las puntas. Este elemento cumple la misma función que los winglets en un avión.

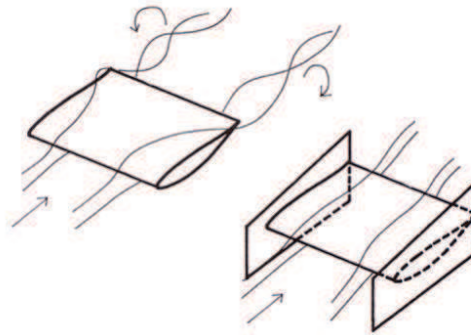


Figura 3.23: Derivas laterales

Las derivas según sea la geometría del vehículo también pueden hacer de soporte para el alerón, es el caso de los coches de Fórmula 1. En otros automóviles donde no es posible el soporte lateral con derivas debido a la geometría de éste, el soporte se coloca en el centro.

### 3.2.11. Fondo plano

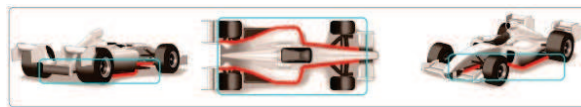


Figura 3.24: Fondo plano

El fondo plano, es la parte más baja del monoplaza, la parte que más cercana está al asfalto. El objetivo en lo que respecta al fondo plano, es hacer que circule la menor cantidad de flujo de aire posible por debajo del coche, para que el downforce del monoplaza aumente. Para tratar de conseguir esto existen diferentes métodos:

1. Vórtices del alerón delantero en un determinado sentido, para extraer aire de debajo del coche.
  2. Apéndices colocados debajo de la abertura de los pontones, para desviar y alejar el flujo de aire de la parte baja del vehículo.
  3. Labios en los extremos de la superficie del fondo plano, justo debajo de los pontones (a cada lado de la cubierta motor) con el fin de extraer aire de debajo del monoplaza.
-

### 3.2.12. Difusor

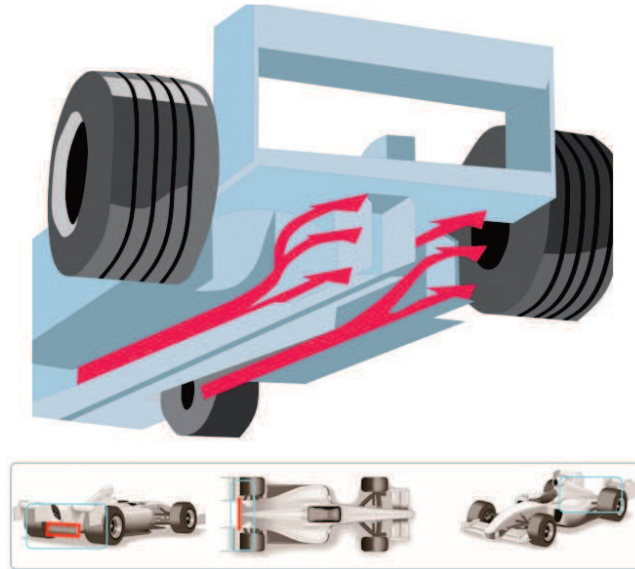


Figura 3.25: Difusor

Otro elemento aerodinámico de mucha importancia en un fórmula es el difusor. Gran parte de la carga generada se obtiene de un difusor que se sitúa por debajo del eje de las ruedas traseras y tiene una geometría tal que mejora las propiedades aerodinámicas del monoplaza, optimizando la transición entre el flujo de alta velocidad por debajo del coche con el flujo mucho más lento de la parte superior.

Funciona proporcionando un espacio para el flujo por debajo del coche para desacelerarse y expandirse de forma que la capa entre el flujo de aire del vehículo y el externo sea menos turbulento. También proporciona cierto grado de estela de relleno. De esta forma el flujo de aire debajo del coche se controla mediante el difusor trasero.

Su diseño es de una importancia vital, puesto que cuánto más rápido sea capaz el aire de salir de debajo del coche, más downforce se produce.

### 3.2.13. Casco

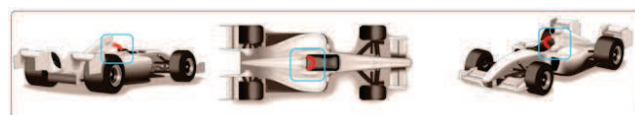


Figura 3.26: Casco

Dado el lugar donde se ubica el casco, puede actuar en distintos aspectos:

1. Adecuando el flujo hacia la toma de admisión: ya que en función de si se canaliza o no, mediante un apéndice colocado en el alerón delantero, el flujo de aire, se podrían obtener aumentos de potencia de hasta 5 CV.
2. Adecuando el flujo de aire hacia la popa (alerón trasero y difusor): en este caso, la eficiencia del alerón trasero y también del difusor aumentan de forma considerable. En un principio y ello es verdaderamente así, los diseños de un casco son diferentes en función de la categoría donde se dan. Las funciones son diferentes y por lo tanto, los diseños han de ser diferentes.
  - Si se pretende canalizar de forma idónea el flujo de aire hacia la toma de admisión, el diseño del casco ha de permitir un flujo superior enfocado hacia la toma de admisión, teniendo en cuenta una desviación de flujo excedente.
  - Si se pretende canalizar el flujo de forma adecuada hacia la popa del vehículo, el diseño ha de permitir un flujo a su alrededor con baja resistencia, siendo la popa del casco una zona importantísima para que el flujo no sea turbulento o cause alteraciones en el mapa de presiones o turbulencias periódicas.En un coche de GP2, la variación de tan sólo 2 cm de la altura del casco, produce una variación de 5 kilos en la resistencia, traducándose en caballos de potencia que se restan.

### 3.3. Reglamento de la Formula Student sobre aerodinámica

A continuación se detallan las normas que deberán seguirse en el diseño y montaje del vehículo para satisfacer éstas sobre la parte aerodinámica y de sus elementos.

#### PART T: REQUERIMIENTOS TÉCNICOS GENERALES

##### ARTÍCULO 2: REQUERIMIENTOS DE DISEÑO GENERALES

##### T2.1: CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO

1. El vehículo debe tener las ruedas y el cockpit abiertos, no se pueden cubrir.
  2. Las ruedas deben tener una zona de seguridad definida como un círculo a su alrededor de 68,6 mm mayor radialmente que el diámetro exterior de los neumáticos cuando el piloto esté montado en el vehículo.
-

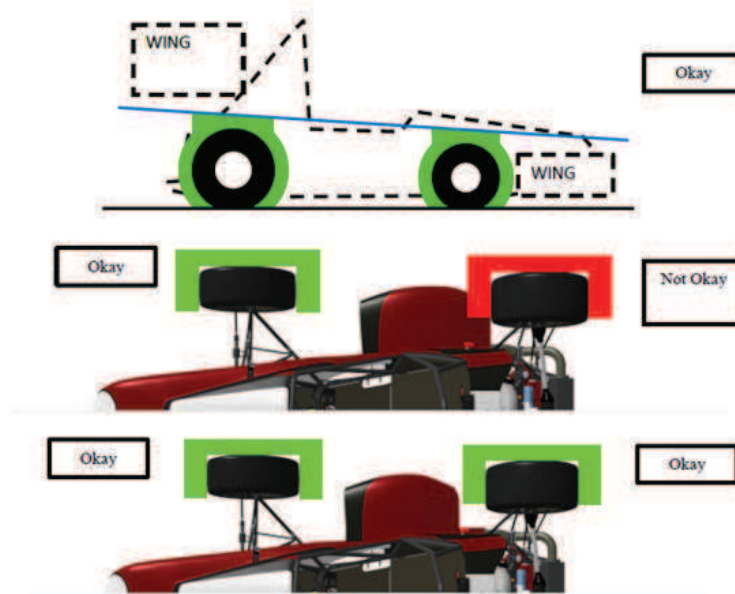


Figura 3.27: Reglas aerodinámicas

## ARTÍCULO 9: DISPOSITIVOS AERODINÁMICOS

### T9.2: POSICIÓN

1. Ningún elemento aerodinámico puede estar más de 762 mm por delante del punto más adelantado del neumático delantero.
  2. Ningún elemento aerodinámico puede estar más de 305 mm retrasado respecto al punto más retrasado del neumático trasero.
  3. Ningún elemento aerodinámico puede ser de mayor longitud que el tren más ancho (cara exterior de los neumáticos incluida).
-

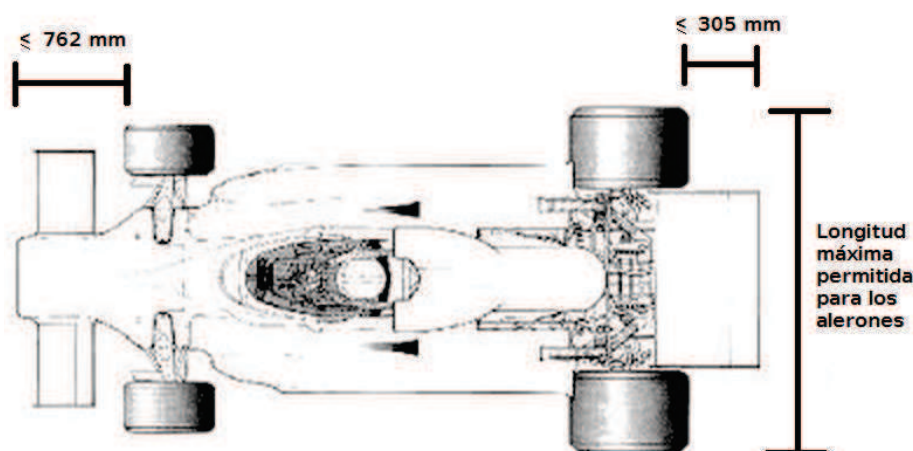


Figura 3.28: Límites de colocación de los alerones en el vehículo

### **T9.3: RADIO MÍNIMO DE BORDES DE LOS ELEMENTOS AERODINÁMICOS**

El radio mínimo para cualquier borde (ya sea ala, derivas, Gurney flaps, etc.) en posible contacto con un peatón, debe ser de 1.5 mm.

### **T9.4: DISPOSITIVOS DE EFECTO SUELO**

Están prohibidos los elementos de alimentación que puedan generar potencia y remover el aire para crear efecto suelo.

### **T9.5: REQUERIMIENTOS DE EVACUACIÓN DEL PILOTO**

#### **T9.5.1:**

Todos los conductores deben ser capaces de salir por el lado del vehículo en no más de 5 segundos. El tiempo de salida comienza con el conductor en su posición, con las manos en posición de marcha en el volante y usando el equipo de controlador requerido. El tiempo de salida se detendrá cuando el conductor tome contacto con el pavimento.

#### **T9.5.2:**

El ala o alas deben estar montados en tales posiciones, y ser lo suficientemente robustos, para que en cualquier accidente sea poco probable deformar las alas o sus montajes y puedan bloquear la salida del conductor.



# CFD: Mecánica de fluidos computacional

---

La CFD es una técnica basada en el diseño asistido por ordenador. Se usa para simular el comportamiento del flujo de aire sobre el monoplaza mediante cálculos por ordenador obteniendo así una imagen visual. Ésta se analiza y a partir de ahí se pueden desarrollar mejoras sobre el rendimiento aerodinámico en función de la turbulencia generada.

Uno de los padres de este método de análisis fue Suhas Patankar que es actualmente profesor emérito de la Universidad de Minesota. El método consiste en discretizar una región del espacio creando lo que se conoce por una malla espacial, dividiendo una región del espacio en pequeños volúmenes de control. Después se resuelve en cada uno de ellos las ecuaciones de conservación discretizadas, de forma que en realidad, se resuelve una matriz algebraica en cada celda de forma iterativa hasta que el residuo es suficientemente pequeño. Como resultado se obtienen tanto datos numéricos de la simulación, como una imagen con mapa de colores del objeto analizado.

Los problemas que tenemos con la CFD es que, al ser simulación, se dan por hecho ciertas suposiciones y consideraciones que, en algunos casos, pueden hacer que los resultados obtenidos sean diferentes a lo que realmente pasa. Otro problema es la generación por ordenador de la malla del monoplaza: la obtención de los puntos que la componen. Debido a que hay que establecer simplificaciones en los límites de las superficies (es totalmente imposible diseñar todas y cada una de las superficies que hay en un monoplaza de Fórmula 1) esto puede llevar a resultados erróneos si no se hace con cuidado. Además, debido a que se requieren un gran número de puntos para tener una malla con suficiente detalle, el tiempo para la obtención de los resultados es elevado, y se necesitan ordenadores realmente potentes. Aun con ecuaciones simplificadas y superordenadores de alto rendimiento, solo se pueden alcanzar resultados aproximados (margen de error aproximadamente del 10 %). La continua investigación, sin embargo, permite la incorporación de software que aumenta la velocidad de cálculo y disminuye también el margen de error, al tiempo que permite analizar situaciones cada vez más complejas como los fluidos transónicos y los flujos turbulentos. La verificación de los datos obtenidos por CFD suele ser realizada en túneles de viento u otros modelos físicos a escala.

En este proyecto se ha utilizado el software SolidWorks y en particular su módulo Flow

Simulation, que ofrece una CFD inteligente y fácil de usar a los ingenieros de diseño, que necesitan saber qué diseño es el mejor, y a la vez evitar costes y tiempo adicionales fabricando demasiados prototipos para lograr sus objetivos.

Las ventajas:

- Potencialmente cualquier idea (incluso cambios relativamente radicales) puede ser diseñada, fabricada y probada en pista en periodos cortos de tiempo.
  - Para un ingeniero aerodinámico, el uso de CFD es una herramienta vital en la competición, ya que proporciona resultados reproducibles en un ambiente controlado y que a veces no es posible realizar en el túnel de viento.
  - La total libertad de diseñar sin las limitaciones de tener que disponer de piezas físicas. Así por ejemplo un fallo en la cadena de montaje, un retraso en la creación de las piezas o por la programación del túnel de viento no impiden seguir trabajando con el diseño creativo y seguir con el rápido desarrollo de conceptos sin estas limitaciones del mundo real.
  - Sin el CFD los equipos se verían obligados a volver a los días de ensayo y error que producían antiguamente las pruebas en el túnel de viento, retrasando considerablemente la tasa de desarrollo de vehículos de F1.
  - Los diseños serían menos desarrollados. Todas estas pequeñas piezas, curvaturas en la carrocería, que aparecen y desaparecen de los coches y que aparentemente son insignificantes son el resultado de CFD y aunque cada uno individualmente puede tener un efecto pequeño, la suma de estas pequeñas contribuciones puede ser la diferencia que conduzca a un piloto al podio o no. Como estas pequeñas modificaciones son difíciles que el piloto pueda determinar si son efectivas o no, se agrupan para formar un conjunto de mejora aerodinámica y así facilitar la tarea.
  - El CFD aporta un alto nivel de comprensión de estos pequeños detalles de diseño que no sería posible interpretar cuando se trabaja solo con el túnel de viento. Las interacciones entre partes del coche son tan complejas que una mínima variación de escasos milímetros en una dirección o en el tamaño de una pieza haría que todo el desarrollo fallara. Así, los diseñadores pueden adaptar cuidadosamente la geometría de tal manera que distribuyan correctamente la cantidad de flujo óptima para tener el efecto global deseado. Este efecto puede ser para acelerar o retrasar ráfagas de algún vórtice, su movimiento lateral o para desarrollar nuevos vórtices para influir en otros componentes más retrasados.
  - El CFD es muy utilizado para desarrollar la admisión y los conductos de refrigeración. La dificultad de observación, lo complejo del comportamiento de los flujos
-

internos en estos conductos le hace ser fundamental en su diseño. Otro aspecto importante es el análisis del comportamiento del flujo en los cuerpos porosos como son los filtros y conductos del radiador ya que esta área es una importante fuente de resistencia del coche (drag) y sus formas complejas no pueden ser fácilmente probados y desarrollados en un túnel de viento. La circulación del aire por las pinzas y los discos de frenos son ideales para ser analizados por CFD para asegurar una adecuada refrigeración.

Los inconvenientes:

- Queda mucho desarrollo por hacer. Los cálculos tienen una gran complejidad y por ello los resultados no son exactos.
- Existen infinidad de variables que interactúan entre sí que aún no están controladas y por tanto hacen que los resultados no sean fiables.
- Simplificación de ecuaciones para poder hacer cálculos más sencillos.
- Suposición de condiciones en el entorno para facilitar las ecuaciones y los cálculos.
- Existe una variable fundamental para el cálculo y la exactitud de los datos, que es el tamaño de la malla. La cual se adapta a la geometría de la pieza, pero según sea su tamaño, ésta podrá seguir y representar la forma más fielmente o no. Por tanto, aquí se cuenta con otra aproximación más a la realidad del modelo.
- Por esto, se suele utilizar después un túnel de viento para corroborar los resultados.

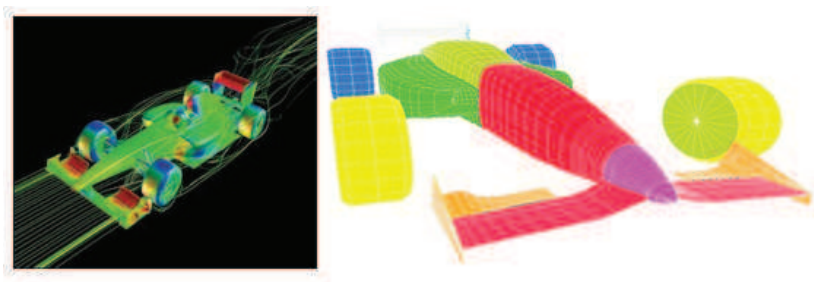


Figura 4.1: CFD



---

## Capítulo 5

# Diseño CAD

---

Una vez explicados los fundamentos teóricos, las reglas de la competición y los principales elementos aerodinámicos que se utilizan en un vehículo de competición, empieza la parte del diseño de los mismos. En este proyecto se ha trabajado con el software específico de diseño SolidWorks en la versión 2012, ya que es patrocinador de la competición, y además, ofrece un completo y potente soporte de módulos de cálculo en áreas de diseño, resolución de esfuerzos y desplazamientos, y simulación de fluidos (entre otros aspectos más que no han sido necesarios para este proyecto). Ya se vio en el anterior apartado que todos los cálculos con este software tienen un 10 % de error aproximadamente, ya que trabajan con ecuaciones simplificadas y suposiciones, como ya se ha explicado anteriormente.

El proceso de diseño de los alerones se ha basado en primer lugar, en la búsqueda de un perfil aerodinámico adecuado, con buenas prestaciones pero también económico y de fácil construcción, eligiendo por tanto varios perfiles más o menos comunes y con buen comportamiento aerodinámico. Una vez comparados y elegido el perfil más conveniente entre ellos, la base constructiva de los alerones ya está seleccionada, así que el siguiente paso es diseñar el alerón delantero, el cual presenta algunas dificultades y consideraciones, ya que es el primer elemento del vehículo que toma contacto con el aire, debe minimizar el contacto del aire con las ruedas y además influye en la trayectoria que va a tomar dicho fluido a lo largo del monoplaza.

Después de esto se diseñará el alerón trasero, completando así el grupo alerón básico que se pretende estudiar en este proyecto. Respecto a este elemento se debe tener en cuenta, además de la reglamentación específica sobre dimensiones de la zona trasera del vehículo, la trayectoria del aire que llega a dicha zona, para poder posicionarlo de la manera más correcta y eficiente. El objetivo de este elemento es el de proporcionar gran apoyo aerodinámico, para ello es lógico diseñarlo de gran tamaño, pero sin excederse ya que ello implicaría mayor resistencia y peso sobre el monoplaza.

Se deben tener presentes los valores aerodinámicos que proporciona el vehículo actualmente, sin alerones, para observar al final del proyecto el avance producido por estos elementos:

Cuadro 5.1: Simulación del vehículo sin alerones

| MAGNITUD                 | VALOR   |
|--------------------------|---------|
| Resistencia aerodinámica | 61,12 N |
| Carga aerodinámica       | 95,03 N |
| Eficiencia               | 1,55    |

Cabe destacar, que en estas simulaciones el vehículo (y con él las ruedas) están parados, y es la corriente de aire la que se desplaza a través de la geometría del monoplaza. Esto provocará que los datos obtenidos en ellas, no sean 100 % reales, pero sí serán muy aproximados y válidos para nuestro estudio. Con las ruedas en movimiento, en contra del flujo de aire, se produciría un aumento de la resistencia del vehículo, así en nuestro análisis obtendremos datos más favorables que los reales. Esto nos ayudará cuando montemos los alerones ya que la mejora que consigamos con ellos será mayor que la teórica en situaciones reales.

Cuando los dos alerones estén diseñados, se pueden terminar de modificar (retocar) levemente en términos de estética, redondeos de bordes o partes puntiagudas, simplificaciones, para intentar disminuir costes o simplemente incluir la decoración de patrocinadores. Siempre que se modifique la geometría, se estará afectando a su aerodinámica, por tanto hay que tener cuidado en esta parte y rehacer los cálculos para comprobar que todo vuelve a estar correcto. También debemos comprobar el análisis estructural de estas piezas y asegurar que son capaces de soportar los esfuerzos que actúan sobre ellas.

## 5.1. Perfil aerodinámico

Se denomina perfil aerodinámico, perfil alar o simplemente perfil, a la forma del área transversal de un elemento, que al desplazarse a través del aire es capaz de crear a su alrededor una distribución de presiones que genere sustentación.

En un perfil alar se pueden distinguir las siguientes partes:

1. **Borde de ataque:** es la parte delantera del perfil alar. Se le denomina borde de ataque ya que es la primera parte que toma contacto con la corriente de aire, provocando que esta se bifurque hacia el intradós y el extradós.

2. **Borde de salida:** llamado también borde de fuga. Corresponde al punto en el que las corrientes de aire provenientes del intradós y extradós confluyen y abandonan el perfil. Aunque en la mayoría de los gráficos tenga forma aguda, no siempre suele ser así, teniendo en algunos casos una terminación plana.
  3. **Intradós:** término genérico que denota la mitad del ala con mayor presión. En un perfil de automóvil corresponde a la parte superior del mismo.
  4. **Extradós:** llamado también trasdós, es un término genérico que denota la mitad alar con menor presión. En un perfil de automóvil corresponde a la parte inferior del mismo.
  5. **Región de curvatura máxima:** área de un perfil de superficies comprendida entre la abscisa (eje X, horizontal) del punto de inicio del borde de ataque y la abscisa de la curvatura máxima.
  6. **Región de espesor máximo:** área de un perfil de superficies comprendida entre la abscisa del punto de inicio del borde de ataque y la abscisa del espesor máximo.
  7. **Radio del borde de ataque:** define la forma del borde de ataque y es un valor que influye de forma importante en la pérdida.
  8. **Cuerda:** corresponde a la línea recta que une el borde de ataque y el borde de salida. Su valor es una característica particular de cualquier perfil.
  9. **Línea de curvatura media:** es una línea equidistante entre el extradós y el intradós.
  10. **Curvatura máxima:** corresponde a la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la cuerda. El valor de su ordenada y la posición de esta ordenada se expresa por lo general en % de la longitud de la cuerda. Un valor típico de esta es 4 % de la cuerda.
  11. **Espesor:** el espesor es un segmento trazado desde un punto referencial del perfil. Según la convención británica, el espesor es trazado de forma perpendicular a la línea de la cuerda.
  12. **Espesor máximo:** corresponde a la longitud máxima posible del espesor de un perfil de superficies.
-

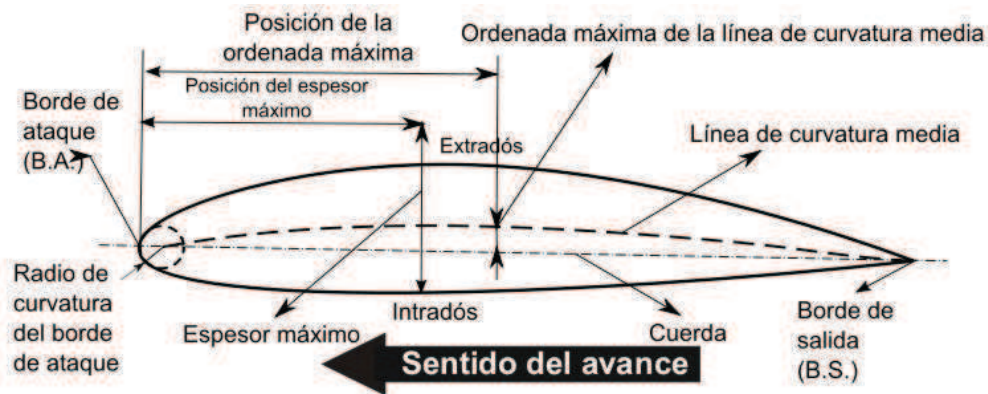


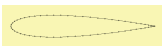
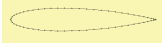
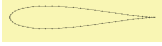
Figura 5.1: Partes de un perfil aerodinámico de aviación

Para diseñar alerones, primero se debe seleccionar el perfil o geometría que tendrán las alas de los alerones. En este caso, se va a elegir un mismo perfil para todos los elementos de los dos alerones, para simplificar y reducir costes de fabricación. A continuación, se procede a evaluar y analizar distintos perfiles aerodinámicos para decidir cuál es el más conveniente.

Para ello, se utiliza el programa ejecutable "JavaFoil" obtenido de [11], el cual ofrece una base de datos con geometrías de numerosos perfiles de aviación. Además tiene la opción de modificar la geometría del perfil o cambiar el ángulo de ataque para después analizarlo en el mismo programa frente a una corriente de aire. El programa ofrece los datos resultantes del estudio aerodinámico, así como el campo de velocidades y presiones que genera el perfil atravesando dicho flujo. Una de las cosas más interesantes de este programa, es que con el perfil elegido, se puede generar un archivo importable a SolidWorks con las coordenadas de los puntos que forman dicho perfil, para poder empezar a trabajar y diseñar fácilmente a partir de él.

Para empezar el estudio, seleccionamos de entre toda la lista que ofrece el programa, los tipos más usuales en el mercado y que resulten más asequibles. Se comparan distintos perfiles y con distintos ángulos de ataque, para comprobar cuál de ellos es más eficiente. Los resultados se muestran en la siguiente tabla resumen:

Cuadro 5.2: Comparación de perfiles

| PERFIL                                                                                                           | ÁNG. ATAQUE [°] | CARGA AEROD. [N] | RESISTENCIA [N] | EFICIENCIA |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------|
| NACA0015<br>                    | 0               | 0                | 0,017           | 0          |
|                                                                                                                  | 8               | 0,924            | 0,023           | 40,122     |
|                                                                                                                  | 10              | 1,067            | 0,038           | 28,005     |
|                                                                                                                  | 13              | 1,126            | 0,103           | 10,959     |
|                                                                                                                  | 15              | 1,194            | 0,131           | 9,093      |
| TsAGI B<br>                     | 0               | 0,081            | 0,014           | 5,895      |
|                                                                                                                  | 7               | 0,887            | 0,021           | 41,939     |
|                                                                                                                  | 10              | 1,175            | 0,031           | 38,449     |
|                                                                                                                  | 13              | 1,328            | 0,053           | 25,071     |
|                                                                                                                  | 15              | 1,197            | 0,122           | 9,802      |
| Van de Vooren symmetrical<br> | 0               | 0                | 0,013           | 0          |
|                                                                                                                  | 8               | 0,936            | 0,023           | 40,502     |
|                                                                                                                  | 10              | 1,066            | 0,034           | 31,548     |
|                                                                                                                  | 13              | 1,088            | 0,103           | 10,604     |
|                                                                                                                  | 15              | 1,141            | 0,131           | 8,724      |
| Joukovsky<br>                 | 0               | 0                | 0,019           | 0          |
|                                                                                                                  | 6               | 0,703            | 0,019           | 37,414     |
|                                                                                                                  | 10              | 1,046            | 0,04            | 25,872     |
|                                                                                                                  | 13              | 1,177            | 0,089           | 13,177     |
|                                                                                                                  | 15              | 1,251            | 0,124           | 10,066     |

Con los resultados de la tabla, se puede decir que no hay mucha diferencia entre ellos, por tanto se elige el tipo NACA0015 (National Advisory Committee for Aeronautics). Este tipo de perfil es el más comercial de todos los anteriores, por tanto es una muy buena opción. Las secciones del ala NACA de cuatro dígitos definen el perfil de:

1. Primer dígito describe máximo camber como porcentaje de la cuerda.
2. El segundo dígito describe la distancia de máxima curvatura del borde delantero de perfil aerodinámico en decenas de puntos porcentuales del acorde.

3. Dos últimas cifras que describen el espesor máximo de la superficie de sustentación como porcentaje de la cuerda.

Por ejemplo, la NACA 2412 perfil aerodinámico tiene un ángulo de caída máximo de 2 % situado a 40 % (0,4 acordes) desde el borde delantero con un espesor máximo de 12 % de la cuerda. Superficies de sustentación de la serie Cuatro dígitos por defecto tienen un grosor máximo de 30 % de la cuerda (0,3 acordes) del borde de ataque.

La NACA 0015 perfil aerodinámico es simétrica, el 00 indica que no tiene inclinación, el 15 indica que la superficie de sustentación tiene un grosor de 15 % a acorde relación longitud, es 15 % tan gruesa como larga.

Este perfil de serie es simétrico y según se ha visto en la parte teórica, interesa tener un lado con mayor curvatura que el otro para favorecer las diferencias de presiones y velocidades entre el intradós y el extradós. Por tanto, se buscará una mejora en la carga aerodinámica modificando la curvatura del perfil en uno de sus lados simétricos. Para las modificaciones se ha elegido una curvatura máxima del 9 %, obteniendo así una curva fácilmente visible y reconocible, pero sin ser exagerada. De este modo, es suficiente para poder apreciar los cambios en las fuerzas aerodinámicas sin afectar apenas en la resistencia ni en las posibles turbulencias que se puedan crear. En la tabla 5.3 se comparan las distintas modificaciones realizadas al perfil de serie NACA0015.

Cuadro 5.3: Modificación del perfil NACA0015

| PERFIL                                                                                          | CURVAT. | POSIC. | ÁNG. ATAQUE [°] | CARGA AEROD. [N] | RESISTENCIA [N] | EFIC.  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------|-----------------|------------------|-----------------|--------|
| NACA9215<br> | 9       | 20     | 4               | 1,459            | 0,025           | 58,267 |
| NACA9315<br> | 9       | 35     | 4               | 1,569            | 0,025           | 63,625 |
| NACA9515<br> | 9       | 50     | 4               | 1,718            | 0,024           | 72,797 |
| NACA9615<br> | 9       | 63     | 5               | 1,985            | 0,025           | 79,719 |
| NACA9815<br> | 9       | 80     | 3               | 2,397            | 0,032           | 74,673 |

De la tabla, se deduce que cuanto más se aleja la curvatura máxima del borde de ataque, mayor eficiencia se obtiene, aunque más allá del 63 % de distancia con respecto al borde de

ataque (NACA9615), la curva máxima queda en la parte más estrecha del borde de salida, resultando una curvatura muy pronunciada y con un aumento de resistencia aerodinámica considerable.

La tabla vista anteriormente refleja que el perfil con mejor eficiencia es el modelo NACA9615, con curvatura máxima del 9 % respecto a la cuerda y dicha curvatura máxima se localiza a una distancia del 63 % desde el borde de ataque, en la parte final del perfil sin llegar a ser la zona más delgada. Destacar también que el mejor ángulo de ataque para este perfil es el de 5°. Por tanto, la base recomendada para los alerones es el perfil NACA9615, cuya geometría se ilustra en la imagen 5.2.



Figura 5.2: NACA9615

Este perfil alar se importará al programa SolidWorks 2012 a través de un archivo de texto ".txt" con las coordenadas de cada uno de los puntos que componen dicho perfil. A partir de él ya se puede empezar a diseñar los alerones.

## 5.2. Alerón delantero

Es uno de los elementos más complicados e influyentes en el monoplaza y como ya se ha explicado, es el primero que contacta con el flujo de aire y de él va a depender la trayectoria del flujo de aire hacia el resto del vehículo.

Tiene dos misiones fundamentales que cumplir esta pieza. Una de ellas es la de derivar el aire que va en dirección a las ruedas, ya que éstas proporcionan una parte muy destacable de la resistencia total del vehículo (drag) frente al aire. La otra función importante es la de proporcionar carga aerodinámica al monoplaza, si bien no es el elemento principal en esta función, pero es útil en la zona delantera para conseguir un buen apoyo en curvas.

Otro aspecto a tener en cuenta del alerón delantero es la trayectoria del flujo que se deriva de él y cómo puede afectar al resto del coche. Algunas de estas influencias son importantes, como la refrigeración en frenos y motor (a través de los pontones laterales), el flujo sobre la cabeza del piloto y sobre el alerón trasero, esencial para luego diseñar y colocar este elemento y poder aprovecharlo al máximo.

Para realizar el diseño de este componente se necesita el software adecuado el cual ya se ha mencionado, y la geometría del perfil alar, conseguida anteriormente. También hay que tener presente tanto las normativas referidas a la aerodinámica en el tren delantero como los

requerimientos aerodinámicos por parte del resto de componentes del vehículo. Se recuerdan a continuación las normas adecuadas para esta sección:

1. El vehículo debe tener las ruedas y el cockpit abiertos, no se pueden cubrir.
2. Las ruedas deben tener una zona de seguridad definida como un círculo 68,6 mm mayor radialmente que el diámetro exterior de los neumáticos con el piloto montado en el vehículo.
3. Ningún elemento aerodinámico puede estar más de 762 mm por delante del punto más adelantado del neumático delantero.
4. Ningún elemento aerodinámico puede estar más de 305 mm retrasado respecto al punto más retrasado del neumático trasero.
5. Ningún elemento aerodinámico puede ser de mayor longitud que el tren más ancho (cara exterior de los neumáticos incluida).
6. El radio mínimo para cualquier borde (ya sea ala, endplate, Gurney flap, etc.) que pueda estar en contacto con un peatón, debe ser de 1.5 mm.
7. El ala o alas deben estar montados en tales posiciones, y ser lo suficientemente robustos, para que en cualquier accidente sea poco probable deformar las alas o sus montajes y puedan bloquear la salida del conductor.
8. Todos los conductores deben ser capaces de salir por el lado del vehículo en no más de 5 segundos.
9. Están prohibidos los elementos de alimentación que puedan generar potencia y remover el aire para crear efecto suelo.

Teniendo lo anterior claro, se prosigue con el diseño. El ancho de vía del monoplaza es de 1200 mm y los neumáticos (Hoosier slicks de 20,5x6x13 en pulgadas, son especiales para esta competición) tienen un ancho de 6" (152,4 mm), por tanto se dispone de un ancho máximo de 1352,4 mm para el diseño de este alerón. De todos modos, para tener un pequeño margen de maniobra y no estar al límite en el reglamento, se diseñará con una longitud igual a la del ancho de vía, 1200 mm, más las derivas laterales que serán de 10 mm de espesor cada una. Lo cual supone un diseño con 1220 mm de longitud.

---

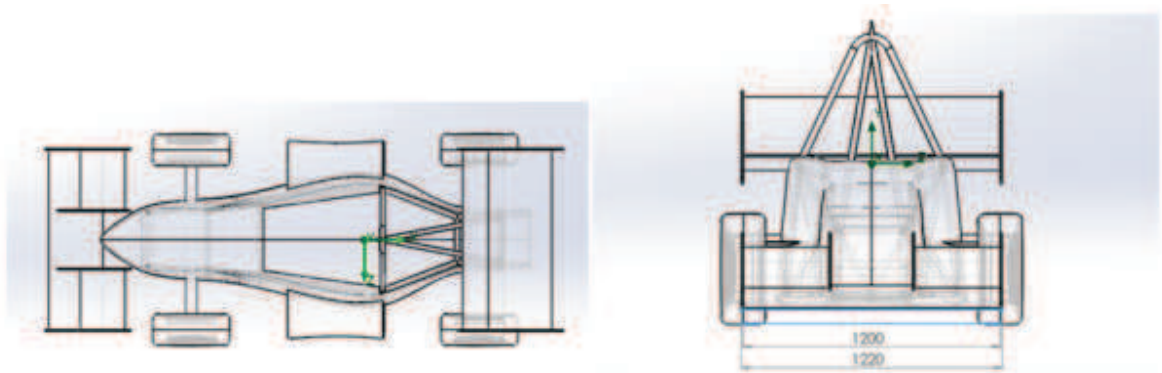


Figura 5.3: Vistas del coche

No se puede obviar la altura a la que se colocará el alerón, con lo cual para evitar problemas se va a situar en una zona media respecto a la altura del neumático, es decir con márgenes similares tanto en la zona inferior (evitando choques contra el suelo) como en la zona superior (importante para el desvío del aire por encima de las ruedas). Todo ello teniendo el objetivo claro, cubrir lo máximo posible las ruedas frente a la corriente de aire que les llega.

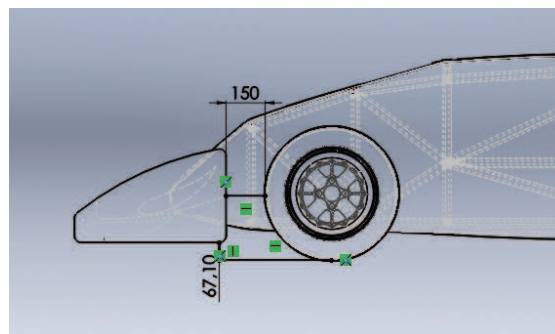


Figura 5.4: Posición del alerón delantero

Para poder realizar un amplio estudio y englobar el máximo número de posibilidades, se han diseñado varios modelos de alerones, con distintas configuraciones a comparar: un solo ala, 2 alas, 3 alas, con apéndices para distribuir el flujo adecuadamente, variedad de posiciones y tamaños de alas, etc. Así es posible determinar qué tipo es el más conveniente para el vehículo.

Después de diseñar y comparar modelos se hizo una primera preselección, para focalizar en los realmente interesantes. Esta primera parte se basó en la comparación de los resultados conseguidos con la simulación de fluidos de SolidWorks (Flow simulation), en la que se realizaron simulaciones sobre los alerones delanteros por separado, sin ningún componente más del vehículo, para obtener referencias e ideas de cómo trabajan y qué fuerzas son capaces de generar.

Para las simulaciones, tanto en estas primeras como en las posteriores, se eligió como fluido el aire, con una presión a nivel del mar, con densidad y temperaturas por defecto en el programa, y con una velocidad del fluido de 25 m/s o lo que es lo mismo 90 km/h. Esta velocidad sería la máxima que obtendríamos con el motor disponible para el vehículo y la longitud de las rectas del circuito.

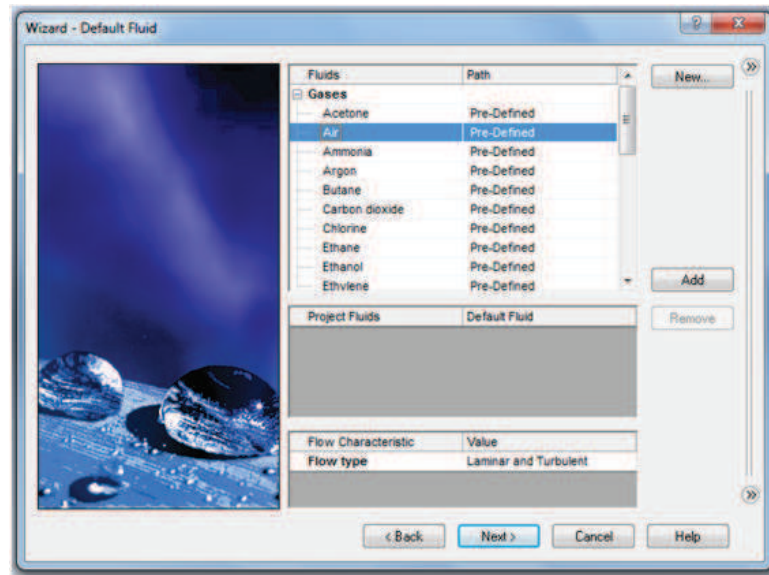


Figura 5.5: Selección de fluido

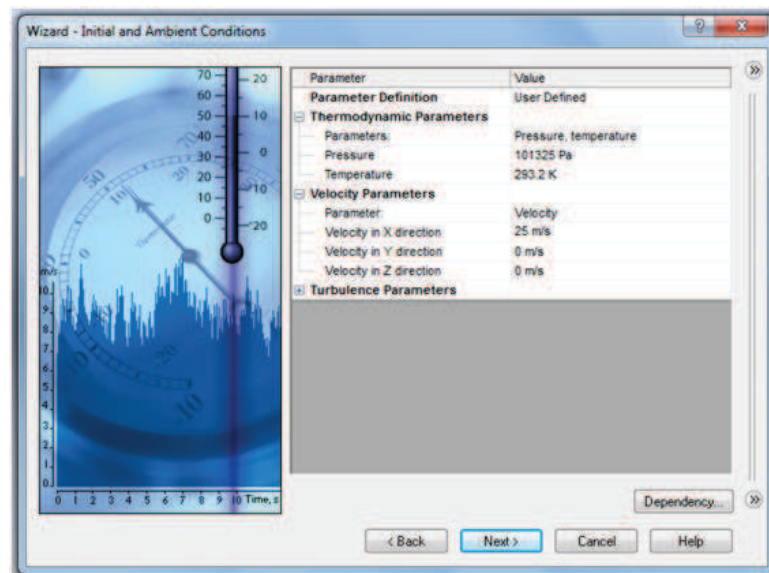


Figura 5.6: Condiciones iniciales y del entorno

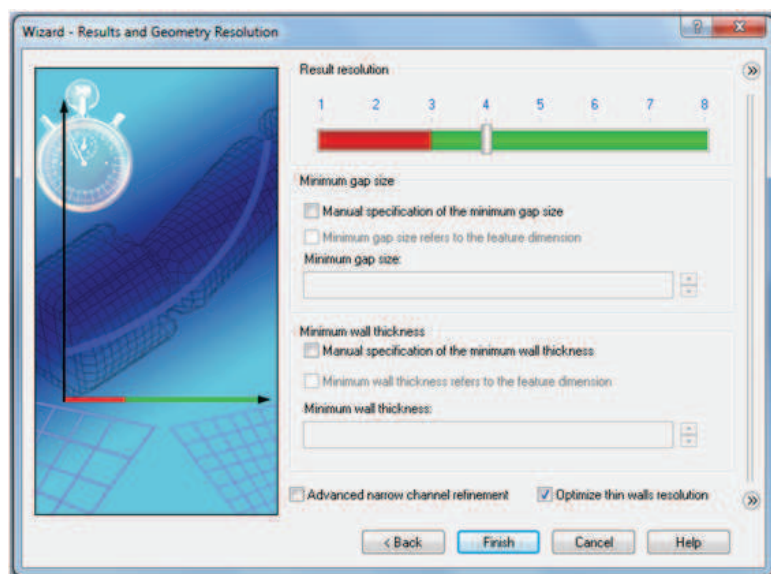


Figura 5.7: Precisión de la simulación

Como se puede observar en la figura 5.7, la precisión del análisis fue de tipo medio (número 4), la cual es suficiente y aporta buenos resultados. Los tipos de precisión más altos, en este proyecto no son recomendables por ser menos eficientes, conllevan muchos más recursos y tiempo y sin embargo el resultado es muy parecido. Se analizaría el modelo con una malla más fina, por tanto mayor exactitud y precisión, pero lo cual aporta más desventajas que beneficios en este estudio. Por eso se decidió trabajar con una precisión media con valor 4 según la escala del programa.

Para continuar con la simulación se deben establecer los objetivos o parámetros que se quieren obtener como resultado principal del análisis. Es por esto que se señalan las fuerzas requeridas y con las que se va a trabajar, la fuerza de resistencia (eje X) y la carga aerodinámica (eje Y).

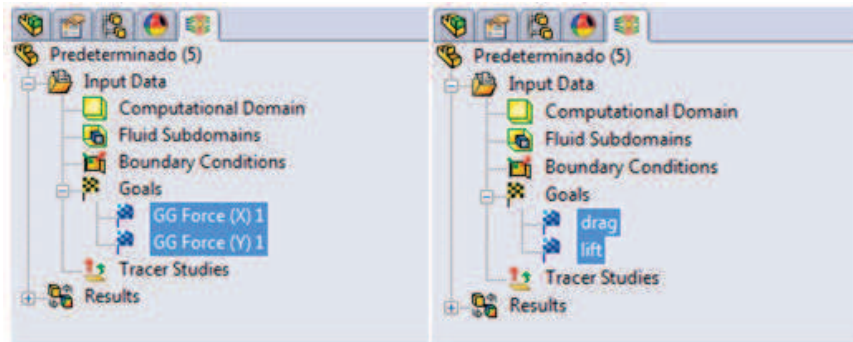


Figura 5.8: Parámetros a estudiar en la simulación

El volumen de control para las simulaciones tiene las siguientes dimensiones:

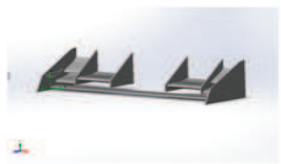
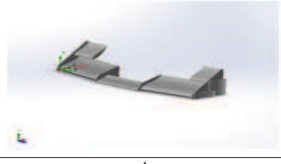
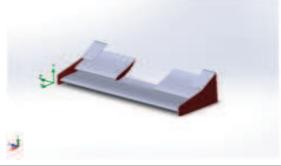
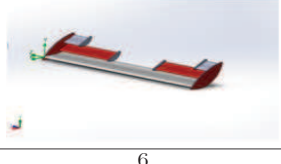
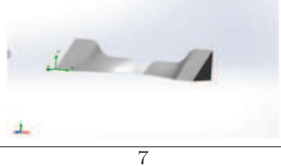
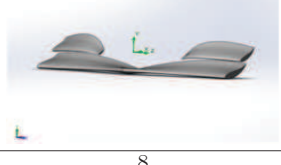
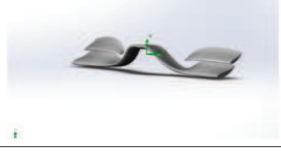
Cuadro 5.4: Volumen de control

| DIMENSIÓN | VALOR (m) |
|-----------|-----------|
| $X_{max}$ | 15        |
| $X_{min}$ | -4        |
| $Y_{max}$ | 3         |
| $Y_{min}$ | -1,5      |
| $Z_{max}$ | 3         |
| $Z_{min}$ | -3        |

Suficiente para poder ver la trayectoria del fluido aguas abajo del monoplaza y con la superficie inferior cerca del fondo del coche para imitar el "efecto suelo" que se podría conseguir en situaciones reales. En este primer caso de preselección, se han simulado los alerones sin el resto del monoplaza, pero para las siguientes si se incluyen distintas partes, para poder ver el comportamiento del fluido sobre el vehículo completo y tener resultados más fiables y parecidos a la realidad.

A continuación se presentan los 8 mejores modelos obtenidos de alerón delantero después de la primera selección y análisis, los cuales se estudiarán en detalle de nuevo con la simulación de SolidWorks, pero esta vez montados junto con el carenado, chasis y el conjunto del tren delantero, ya que de aquí saldrá el diseño a montar en el monoplaza. Cuanto mayor grado de detalle se aporte al programa, más fiables y precisos serán los resultados.

Cuadro 5.5: Comparación de alerones delanteros

| MODELO                                                                                   | CARGA AEROD. [N] | RESISTENCIA [N] | EFICIENCIA | CLASIFICACIÓN |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|------------|---------------|
| 1<br>   | 102,75           | 145,2           | 0,71       | 4°            |
| 2<br>   | 161,7            | 173,68          | 0,93       | 2°            |
| 3<br>  | 115,31           | 162,75          | 0,71       | 3°            |
| 4<br> | 249,6            | 176,6           | 1,41       | 1°            |
| 5<br> | 31,27            | 147,85          | 0,21       | 7°            |
| 6<br> | 21,35            | 183,92          | 0,12       | 8°            |
| 7<br> | 76,81            | 146,6           | 0,52       | 6°            |
| 8<br> | 91,94            | 140,25          | 0,66       | 5°            |

Todos ellos cumplen las reglas de la competición y se ajustan a las dimensiones del chasis y carenado del equipo.

De este análisis, se puede destacar el modelo número 4, con una resistencia aerodinámica similar al resto pero doblando prácticamente a todos en el aspecto de carga aerodinámica. En la siguiente tabla se resumen sus características:

Cuadro 5.6: Resultados del alerón delantero

| MAGNITUD                 | VALOR    |
|--------------------------|----------|
| Resistencia aerodinámica | 176,60 N |
| Carga aerodinámica       | 249,60 N |
| Eficiencia               | 1,41     |

Para este análisis se han tenido en cuenta también otras comparaciones como diagramas de presiones y de velocidades, así como trayectorias de flujo, pero en estos apartados no había grandes diferencias.

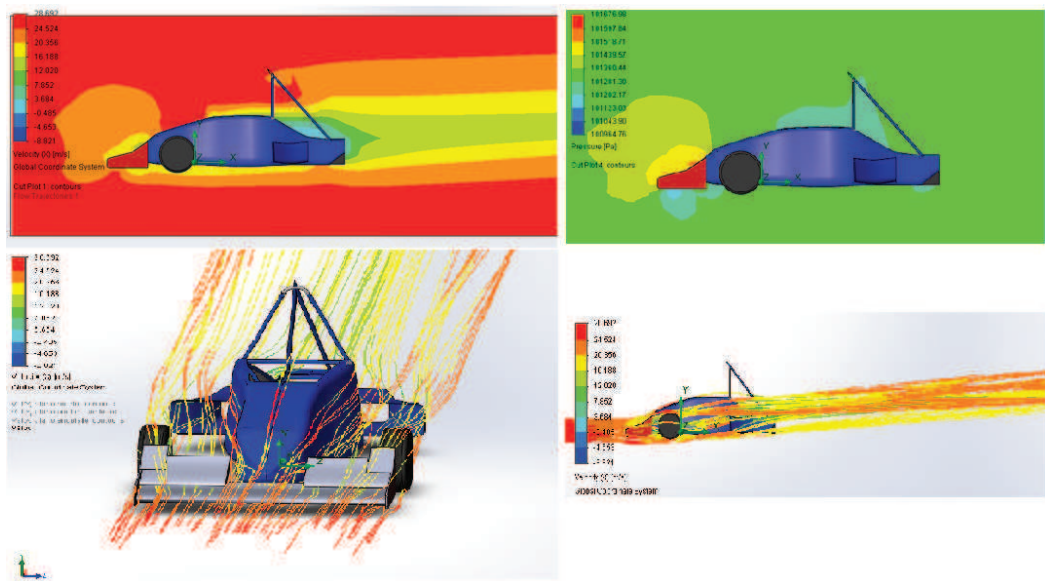


Figura 5.9: Diagramas de simulación del alerón delantero

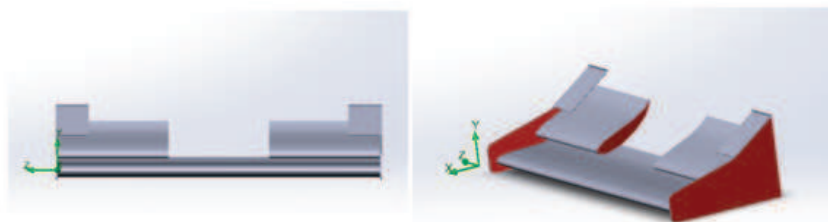


Figura 5.10: Alerón delantero de Fórmula UC3M

### 5.3. Alerón trasero

En esta sección se ha trabajado de la misma forma que en la anterior, con variedad de diseños para cubrir el máximo rango de posibilidades. Cabe destacar que esta fase del proyecto ha sido la más complicada de desarrollar y encajar con el resto del vehículo, para poder sacar un buen rendimiento global.

Para ello, se modelaron distintos tipos de alerones y se simularon frente a una corriente de aire con una velocidad de 25 m/s, estudiando simplemente los alerones traseros por separado del vehículo para eliminar de forma rápida los menos eficientes. Después de esta primera selección, se realiza un estudio más a fondo de los posibles candidatos y ahora sí, montados con el resto del monoplaza que en este caso, incluye el alerón delantero, carenado, chasis y las 4 ruedas.

Además para intentar mejorar en el diseño y el rendimiento del alerón trasero, se realizaron también comparaciones de ellos colocados a diferentes alturas, para poder establecer una altura óptima, resultando para todos los modelos en general una altura ideal entre 195 y 250 mm sobre la base de la carrocería que se encuentra encima del difusor como se muestra en la siguiente imagen:

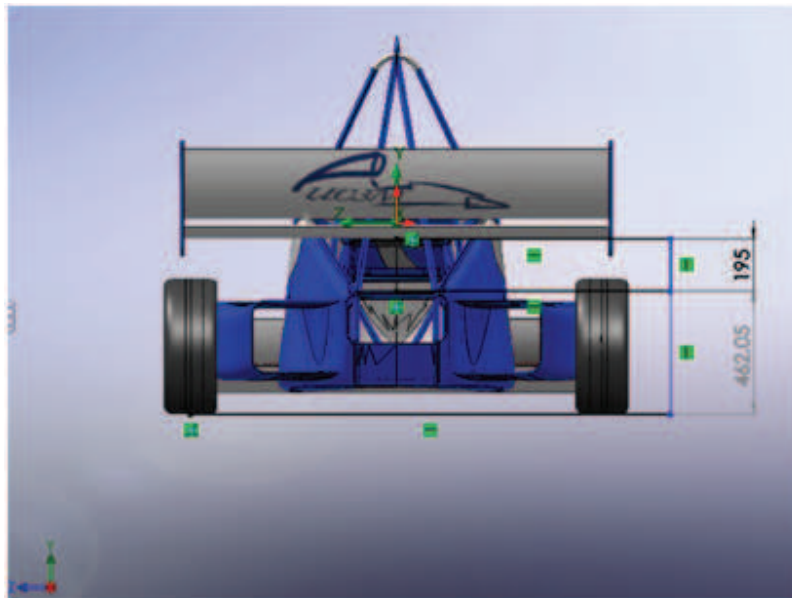
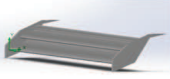
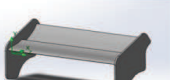
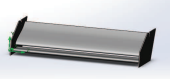


Figura 5.11: Posición del alerón trasero

Una vez hecho un primer análisis de los modelos traseros se realiza un estudio a fondo, en este caso se analizaron en detalle 10 modelos finales, cuyos resultados aerodinámicos se presentan en la tabla mostrada a continuación:

Cuadro 5.7: Comparación de alerones traseros

| MODELO                                                                                    | CARGA AEROD. [N] | RESISTENCIA [N] | EFICIENCIA | CLASIFICACIÓN |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|------------|---------------|
| 1<br>    | 481,53           | 303,33          | 1,59       | 3°            |
| 2<br>    | 278,86           | 208,37          | 1,34       | 9°            |
| 3<br>    | 487,09           | 325,38          | 1,5        | 5°            |
| 4<br>   | 430,44           | 297,53          | 1,45       | 6°            |
| 5<br>  | 542,72           | 375,33          | 1,45       | 7°            |
| 6<br>  | 425,03           | 265,33          | 1,6        | 2°            |
| 7<br>  | 268,49           | 224,41          | 1,2        | 10°           |
| 8<br>  | 426,07           | 312,05          | 1,37       | 8°            |
| 9<br>  | 497,01           | 314,95          | 1,58       | 4°            |
| 10<br> | 509,06           | 302,6           | 1,68       | 1°            |

De esta forma se obtiene el diseño que mejor rendimiento genera en el monoplaza de los aquí analizados. El modelo más adecuado es el número 10, cuyos resultados se resumen en la tabla 5.8. Dicho alerón tiene un diseño con ala inferior de pequeño tamaño, que sirve para derivar el flujo de aire hacia el ala posterior, la cual es de gran superficie e inclinación, encargada de generar alta carga aerodinámica.

Cuadro 5.8: Resultados del alerón trasero

| MAGNITUD                 | VALOR    |
|--------------------------|----------|
| Resistencia aerodinámica | 302,60 N |
| Carga aerodinámica       | 509,06 N |
| Eficiencia               | 1,68     |

Al igual que en el estudio de alerones delanteros, también se tuvieron en cuenta los campos de presiones y velocidades, y las corrientes de flujo, pero sin arrojar grandes diferencias entre ellos.

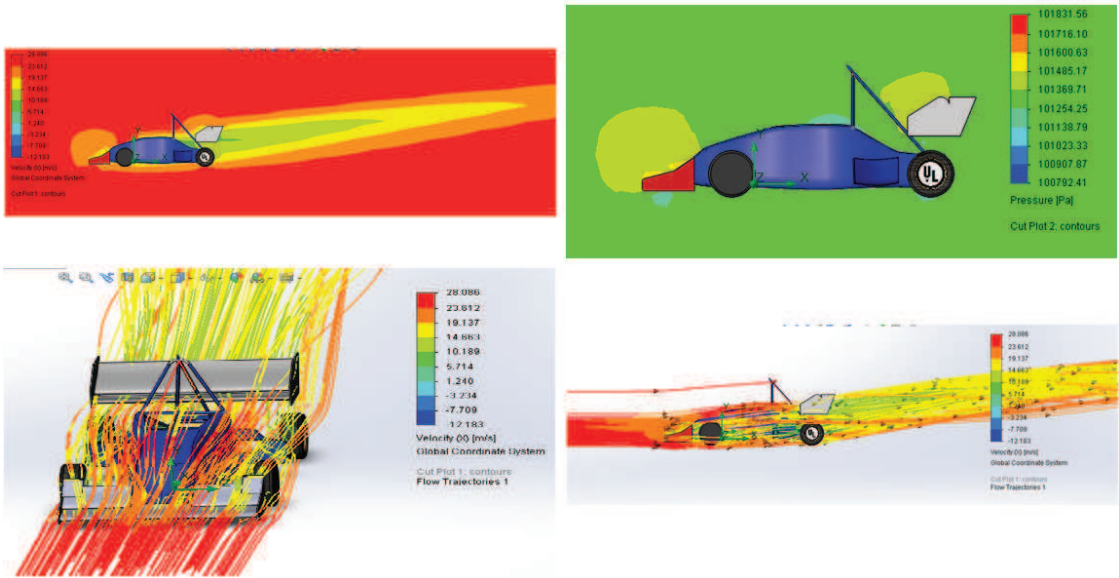


Figura 5.12: Diagramas de simulación del alerón trasero

Con la finalización de esta comparativa, ya se ha diseñado y evaluado el conjunto aerodinámico de alerones más conveniente para el monoplaza de Fórmula UC3M.

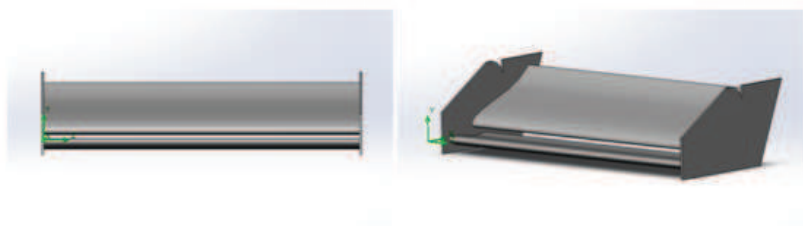


Figura 5.13: Alerón trasero de Fórmula UC3M

## 5.4. Ensamblaje del vehículo

Una vez obtenido el diseño de los elementos a montar en el coche, queda ensamblar todo el conjunto y retocar pequeños detalles, si fuera necesario, para mejorar tanto económica como estéticamente.

El vehículo en este punto, se ve reflejado como en la siguiente imagen, la figura 5.14:

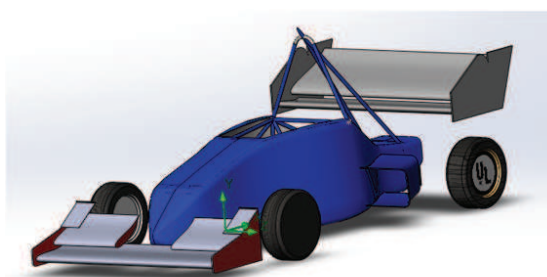


Figura 5.14: Ensamblado de Fórmula UC3M

Cuyos valores aerodinámicos se han mostrado anteriormente en la tabla 5.8.

Ahora se intentará mejorar tanto la eficiencia como la estética, viendo las siguientes posibles modificaciones:

1. ¿Son realmente útiles los aletines del alerón delantero?

Para responder a ello, se analiza el modelo completo sin estas partes y se comparan los resultados:

---

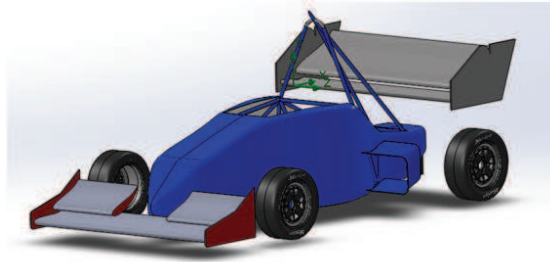


Figura 5.15: Ensamblado sin aletines de Fórmula UC3M

Cuadro 5.9: Simulación del vehículo sin aletines delanteros

| MAGNITUD                 | VALOR    |
|--------------------------|----------|
| Resistencia aerodinámica | 325,96 N |
| Carga aerodinámica       | 579,37 N |
| Eficiencia               | 1,78     |

Se observa que lo que en un principio parecía un elemento útil para desviar el flujo sobre las ruedas, lo único que aporta es resistencia frente al aire. Con lo cual, dichos aletines se eliminan para el diseño final, lo que supone mayor eficiencia en el vehículo y también menor coste para el producto final.

## 2. Modificación estética de las derivas

Se realizará una renovación geométrica de las derivas, tanto interiores como exteriores. Además de la estética, se buscará también una mejora en el apartado aerodinámico, si es posible, o por lo menos no perjudicar los resultados obtenidos hasta ahora. Se llevará a cabo tanto en el alerón delantero como en el trasero.

Tras un simple rediseño, utilizando formas redondeadas y básicas, sin numerosos ángulos para no producir turbulencias ni perjudicar el flujo de aire, se obtienen los siguientes modelos:

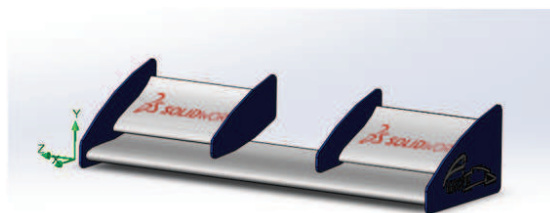


Figura 5.16: Alerón delantero final

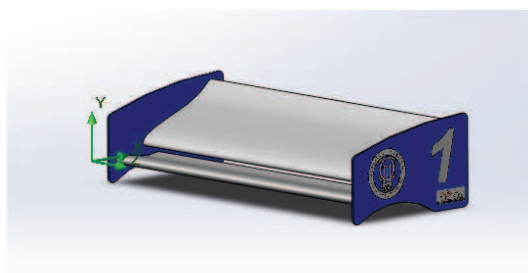


Figura 5.17: Alerón trasero final

Como se puede ver, ahora son de construcción sencilla pero aun así cumplen su función perfectamente. Destacan sus secciones redondeadas, de mayor superficie que las anteriores para mejorar el flujo hacia las alas. Incorporando además, una posible decoración para ambientarlo aun más.

Por tanto, llegando a lo realmente importante que son los resultados aerodinámicos, aquí se pueden ver los datos de la simulación:

Cuadro 5.10: Simulación del vehículo con derivas modificadas

| MAGNITUD                 | VALOR    |
|--------------------------|----------|
| Resistencia aerodinámica | 334,58 N |
| Carga aerodinámica       | 624,47 N |
| Eficiencia               | 1,87     |

Con estos últimos cambios no solo se ha conseguido una mejora estética (redondeos, decoración,...) sino que también ha sido posible mejorar las prestaciones del monoplaza, pasando de tener un coeficiente de eficiencia de 1,68 a 1,87. Esto ha sido posible gracias a eliminar

fuentes de resistencia importantes (como los aletines) y rediseñar adecuadamente las derivas laterales permitiendo mejorar el flujo de aire sobre el vehículo.

Además si lo comparamos con el vehículo inicial (sin alerones, solo carenado) se ha mejorado su eficiencia e incrementado enormemente sus valores de carga aerodinámica y resistencia. De su estado inicial con eficiencia de 1,55 y carga 95,03 N a su estado final con 1,87 y 624,47 N respectivamente, ganando muchas prestaciones en estos apartados como se puede observar. Respecto a la resistencia ofrecida ha pasado de 61,12 N a 334,58 N.

En este punto el monoplaza ya está casi listo para ser fabricado. Incluyendo ruedas, neumáticos y una sencilla decoración, el monoplaza queda ilustrado en las siguientes imágenes:

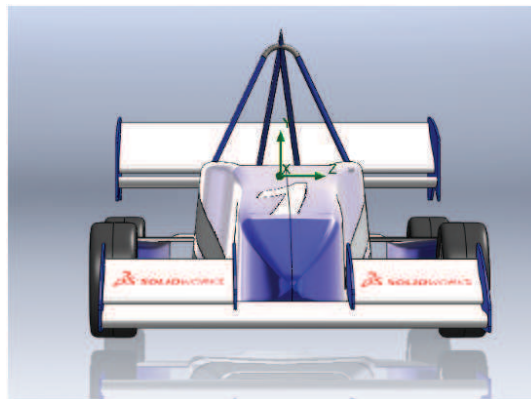


Figura 5.18: Ensamblado final de Fórmula UC3M I

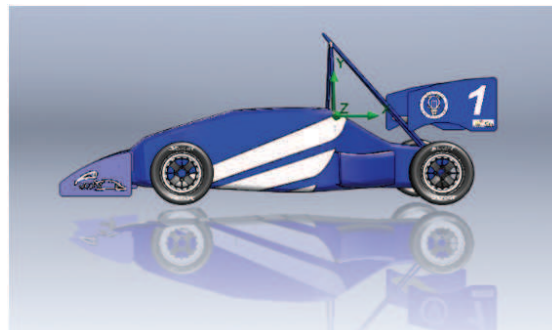


Figura 5.19: Ensamblado final de Fórmula UC3M II

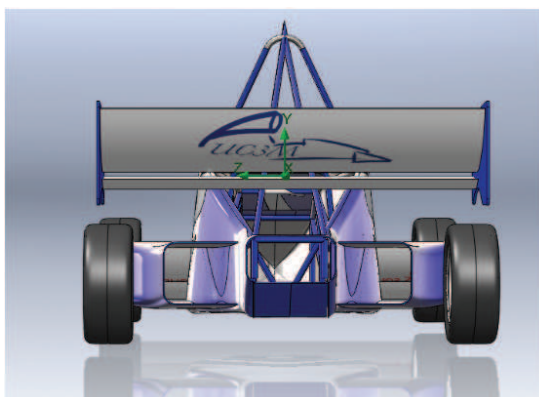


Figura 5.20: Ensamblado final de Fórmula UC3M III



Figura 5.21: Ensamblado final de Fórmula UC3M IV



Figura 5.22: Ensamblado final de Fórmula UC3M V

Se incide en este momento, que todo el proceso de diseño y ensamblaje del vehículo cumple con la normativa de la competición. Por ello se muestra a continuación una imagen con algunas de las dimensiones más críticas en el reglamento para el diseño de los alerones.

---

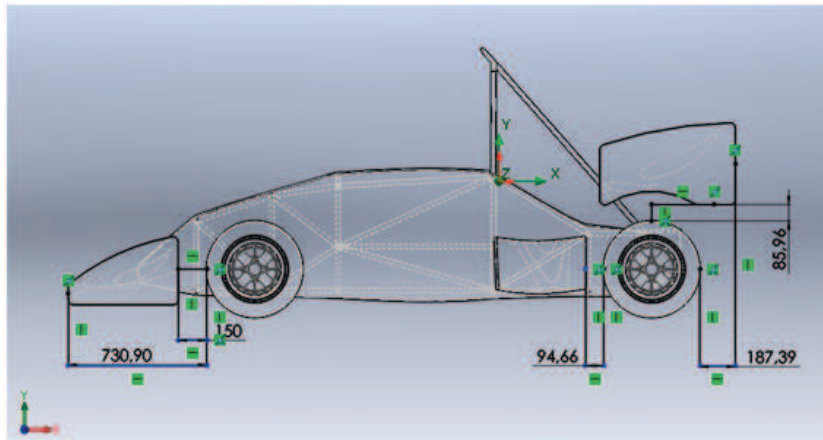


Figura 5.23: Dimensiones críticas del reglamento

#### 5.4.1. Configuraciones de carga aerodinámica

Para terminar de completar el ensamblaje y dejar el monoplaza listo para competir al máximo en cualquier circunstancia, se realizará un estudio del vehículo con distintas configuraciones aerodinámicas en el alerón trasero. Esto incluye la variación de la inclinación del ala trasera y la simulación a distintas velocidades del aire, imitando diferentes características que se encontrarían en el circuito y en las distintas pruebas de la competición.

Del alerón delantero no se modificará nada en este estudio, ya que está optimizado para realizar su misión principal, minimizar la resistencia generada por las ruedas. Si se cambia la inclinación de este alerón, se modificaría la trayectoria del aire hacia la parte trasera del vehículo y con ello la resultante de las fuerzas. Por ejemplo, si se inclina menos para obtener menos resistencia en este elemento, provoca que el aire impacte con las ruedas directamente, con lo cual el objetivo de disminuir drag no se consigue. Si por el contrario se desea lograr mayor carga, se podría estudiar una inclinación mayor, pero esto complicaría el estudio general del coche tanto aerodinámicamente como de comportamiento en la pista (ejemplo de subviraje y sobreviraje) y se modificaría la trayectoria del flujo que le llega al alerón trasero. Así que, para incrementar la carga aerodinámica, mejor actuar sobre el alerón trasero ya que su propósito final es precisamente el de generar dicha carga.

En este análisis se realizan las siguientes modificaciones tanto en el coche (carga del alerón) como en la velocidad del fluido:

- **10 km/h:** curva muy cerrada y muy lenta.
- **30 km/h:** curva normal.
- **50 km/h:** curva rápida.

- **70 km/h:** recta corta.
- **90 km/h:** recta larga, velocidad máxima del vehículo.
- **Carga baja:** alas traseras prácticamente en horizontal, sin aportar drag ni down-force, especial para rectas muy largas o la prueba de aceleración.
- **Carga media:** ala principal con inclinación optimizada para la mayoría de situaciones, con gran equilibrio entre carga y resistencia al aire. Gran eficiencia. Especial para pruebas en circuitos, como las pruebas de endurance o autocross.
- **Carga alta:** ala principal con gran inclinación, casi toda la superficie en perpendicular frente a la corriente de aire. Aporta mucha carga pero también mucha resistencia, puede ser adecuada para realizar la prueba del skidpad (prueba del 8), ya que todo el recorrido es en curva.

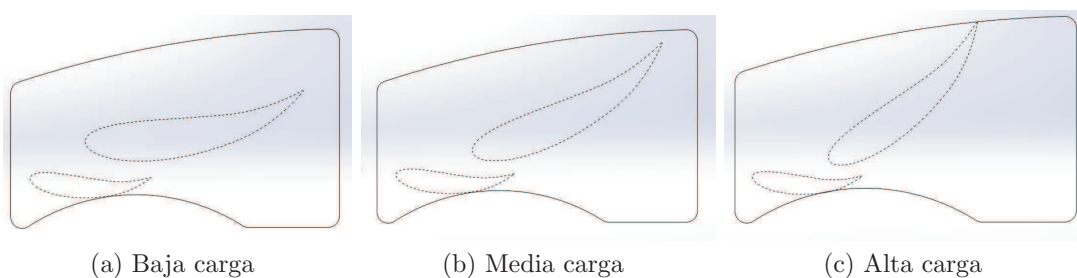


Figura 5.24: Distintas cargas aerodinámicas del alerón trasero

Cuadro 5.11: Configuraciones de carga aerodinámica

| VELOCIDAD | CONFIG. CARGA | CARGA AEROD. [N] | RESISTENCIA [N] | EFICIENCIA |
|-----------|---------------|------------------|-----------------|------------|
| 10 km/h   | Baja          | 4,25             | 2,96            | 1,44       |
|           | Normal        | 7,63             | 4,08            | 1,87       |
|           | Alta          | 8,05             | 5,21            | 1,55       |
| 30 km/h   | Baja          | 38,66            | 26,76           | 1,44       |
|           | Normal        | 69,10            | 36,91           | 1,87       |
|           | Alta          | 72,58            | 47,04           | 1,54       |
| 50 km/h   | Baja          | 107,52           | 74,58           | 1,44       |
|           | Normal        | 192,91           | 103,20          | 1,87       |
|           | Alta          | 202,54           | 130,65          | 1,55       |
| 70 km/h   | Baja          | 211,16           | 146,86          | 1,44       |
|           | Normal        | 377,82           | 202,22          | 1,87       |
|           | Alta          | 396,19           | 255,84          | 1,55       |
| 90 km/h   | Baja          | 347,29           | 242,71          | 1,43       |
|           | Normal        | 624,47           | 334,58          | 1,87       |
|           | Alta          | 656,05           | 423,60          | 1,55       |

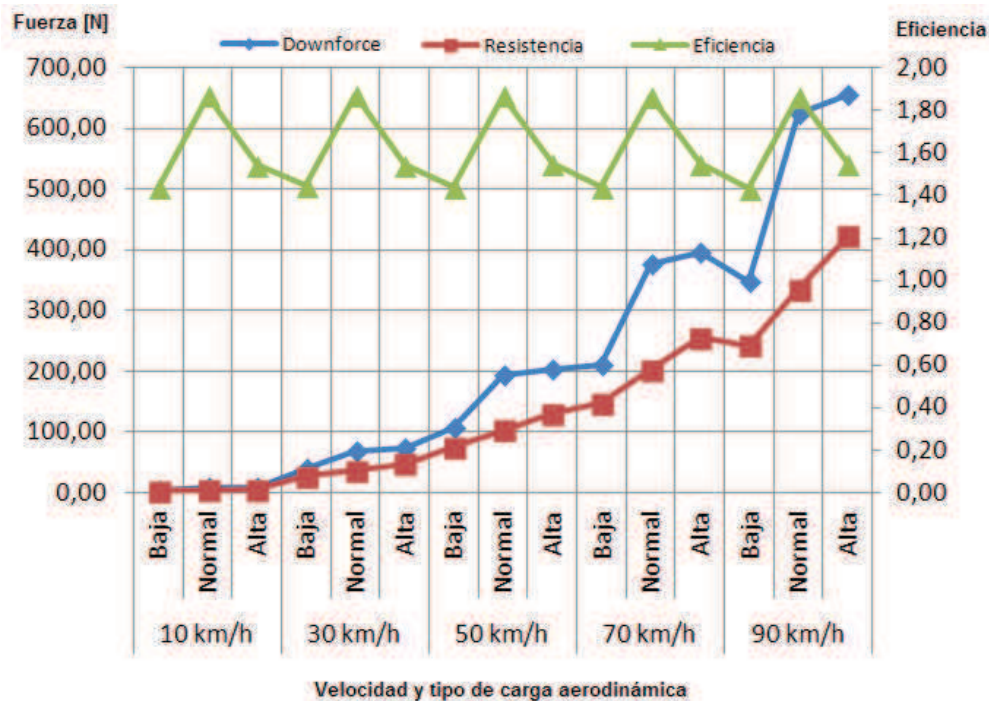


Figura 5.25: Gráfico velocidad-carga aerodinámica

Con este último estudio, se puede concluir que prácticamente con la configuración media se puede competir eficientemente en todas las pruebas sin tener que modificar nada. De todos modos, la cantidad de variables que afectan al rendimiento aerodinámico en el vehículo es tan grande, que resulta muy difícil y sobre todo lleva muchísimo tiempo, el poder estudiar, cuantificar y aunar cada una de las posibilidades para realizar el estudio completo y conocer el efecto de cada una de las variables.

Para terminar el reglaje del alerón, se puede implantar un sistema de graduación en la parte interior de la deriva para indicar cuántos grados de inclinación tiene el alerón en la situación actual, y poder modificarlo rápidamente a otra configuración más adecuada. En la figura 5.26 se muestra una solución muy sencilla, donde de un simple vistazo se conoce la situación actual del alerón y poder decidir y actuar sobre él de manera fácil y rápida.



Figura 5.26: Sistema de graduación del alerón



---

## Capítulo 6

# Materiales

---

### 6.1. Alerones

Para seleccionar los materiales se tendrá en cuenta su precio, facilidad de construcción y peso, con el fin de hacer el coche más rápido con un precio razonable para el equipo.

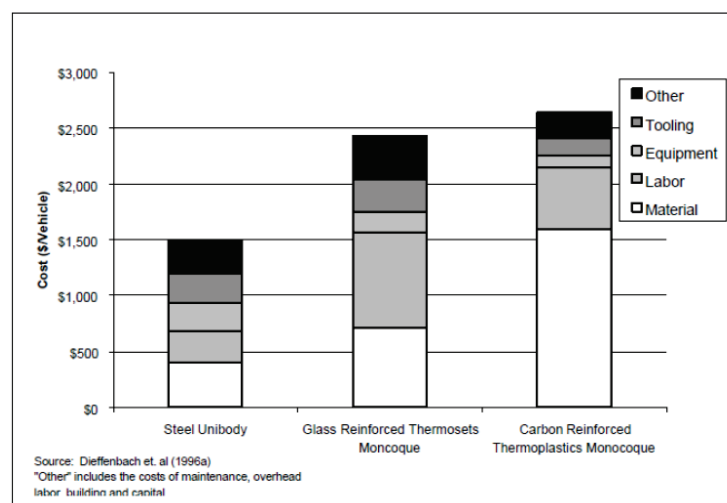


Figura 6.1: Posibles materiales

En la figura 6.1 se muestra una comparativa entre el coste aproximado de fabricación, según sea de acero, fibra de vidrio o fibra de carbono. En el caso del acero, es el más barato, pero de esa manera aumentaríamos demasiado el peso del vehículo, lo cual no conviene porque penaliza la potencia del motor. En caso de elegir el carbono, es el más caro y es necesario un horno para curar, por lo que es el más difícil de construir. Finalmente se decide, por peso, precio, propiedades y fabricación, que el material para fabricar los alerones sea la **fibra de vidrio**.

De este material se pueden destacar las siguientes características:

- **Propiedades mecánicas:**  
Debido a su alta resistencia a la compresión, flexión e impacto, muchas veces son utilizados en estructuras.
- **Ligereza:**  
La fibra de vidrio tiene un peso específico (relación entre peso y volumen) de 1.5 frente a 2.7 del aluminio, 7.8 del acero y 8.9 del cobre.
- **Rigidez dieléctrica:**  
Puede ser utilizado como aislante estructural, debido a que la fibra de vidrio no conduce electricidad.
- **Aislante térmico:**  
Además de no conducir electricidad, la fibra de vidrio es un material que puede utilizarse como aislante para las altas temperaturas, impidiendo la transferencia de calor.
- **Flexibilidad de diseño:**  
Es posible hacer productos complejos mediante el moldeo de la fibra de vidrio, permitiendo un gran valor estético y funcional a los diseños de las piezas.
- **Estabilidad:**  
Gracias a su bajo coeficiente de dilatación térmica y a la reducida absorción de agua, los productos en fibra de vidrio se mantienen inalterados en dimensión y forma incluso en condiciones extremas.
- **Resistencia a la corrosión:**  
A diferencia de los materiales convencionales, la fibra de vidrio no se oxida, así como también muestra una excepcional resistencia a los ambientes agresivos.

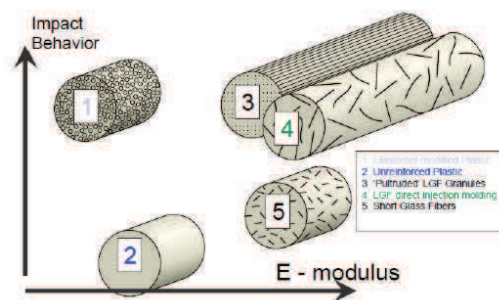


Figura 6.2: Distintos tipos de fibra de vidrio

En este caso, al elegir fabricar las piezas con material compuesto, es importante saber que sus características varían según la orientación y proporción de las fibras y la matriz. En la figura 6.2 se muestra una comparativa con algunos ejemplos.

La construcción de los modelos no es fácil, se deben seguir determinados pasos para hacer el proceso correctamente. Para la fabricación se necesitan algunos materiales:

- Material de seguridad:
  - Bata de laboratorio
  - Guantes
  - Gafas de seguridad
- Material de construcción:
  - Madera, plástico, metal o espuma para crear el molde o estructura a recubrir
  - Fibra de vidrio
  - Resina
  - Tornillos
  - Cera o gel protector
- Herramientas:
  - Sierra
  - Lijadora
  - Taladradora
  - Brocha

Y los siguientes pasos para la construcción:

- Lo primero y más importante de todo es la seguridad, por lo que se hace uso de la bata de laboratorio, guantes y gafas de seguridad para proteger la ropa y la piel de productos químicos que puedan producirse en el proceso de fabricación.
  - Construir un molde con madera o espuma, utilizando también tornillos y un taladro para su perfecta sujeción. Otra posibilidad es construir una estructura de plástico o metal, y recubirla con la fibra de vidrio.
  - En el caso de tener un molde hembra, dar una mano de gel protector o cera. Esto creará una suave capa en la que la fibra y el molde no se pegan.
  - Aplicar la fibra de vidrio y las resinas para construir el diseño final de la pieza y dejar secar. Después se retira el molde, si lo hubiera, y finalmente solo queda pulir la superficie de fibra de vidrio.
-



Figura 6.3: Trabajo con fibra de vidrio

## 6.2. Soportes de los alerones

Estos elementos no se van a estudiar en profundidad en este proyecto, pero es conveniente tener en mente algunas características o posibles modelos de éstos, ya que sin ellos no sería posible ensamblar los alerones en el vehículo. Por tanto, si se plantea la idea de equipar el coche con alerones, también se deben elegir los soportes adecuados en cuanto a diseño, peso y precio.

Para ello, lo más sencillo y barato es utilizar barras metálicas de sección redondeada, formando una estructura que pueda soportar los esfuerzos y peso del alerón requerido. El material más adecuado para esta función, es el **acero AISI 304**, material que ya es utilizado en otras partes del coche, por tanto, tenemos disponibilidad para usarlo, o podemos obtener fácilmente del proveedor con el que se esté trabajando. Este acero tiene buenas propiedades mecánicas y es de los más comerciales, por tanto no hay problemas de proveedores ni de precio, de hecho será más barato que otros materiales. Otra posibilidad sería el aluminio, con la ventaja de ser más ligero, pero por contra, tiene un precio superior y habría que estudiar bien la estructura a construir para que soporte bien los esfuerzos.

### ACERO INOXIDABLE AISI 304:

Es el más versátil y uno de los más usados de los aceros inoxidables de la serie 300. Tiene excelentes propiedades para el conformado y el soldado. Se puede usar para aplicaciones de embutición profunda, de rolado y de corte. Tiene buenas características para la soldadura, no requiere recocido tras la soldadura para que se desempeñe bien en una amplia gama de condiciones corrosivas. La resistencia a la corrosión es excelente, excediendo al tipo 302 en una amplia variedad de ambientes corrosivos incluyendo productos de petróleo calientes o con vapores de combustión de gases. Tiene excelente resistencia a la corrosión en servicio intermitente hasta 870 °C y en servicio continuo hasta 925°C. No se recomienda para uso continuo entre 425 - 860°C pero se desempeña muy bien por debajo y por encima de ese rango.

---

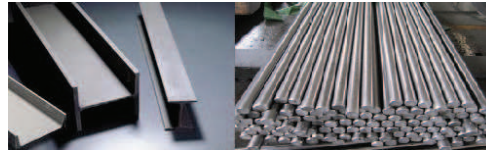


Figura 6.4: Acero AISI 304

### 6.2.1. Soporte delantero

Con respecto al alerón delantero, hoy en día, prácticamente no hay variabilidad en este tipo de soporte, todos se centran en unir la parte central del alerón a los laterales de la nariz del coche.



Figura 6.5: Soporte clásico de alerón delantero

En el caso del vehículo de Fórmula UC3M, la disposición del alerón con la nariz del coche no ayuda a la incorporación de un modelo de este tipo. Además sería parte del diseño de la carrocería, habría que modificarla con dos "brazos" hacia adelante hasta contactar con el ala principal del alerón delantero, algo parecido a lo que ya utilizó el equipo BMW-Williams en la temporada 2004 de la F1, tal y como se puede ver en la figura 6.6. Esta idea se deja planteada, ya que no es parte del estudio de este proyecto, pero se deja a estudiar en un futuro. En el fondo es el mismo concepto de soporte, pero con distinta e inusual forma, que merece ser mencionada.

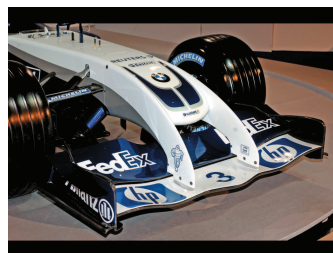


Figura 6.6: Alerón delantero tipo morsa

Por tanto, aquí se planteará otra solución, intentando simplificar nuestro problema de posición entre nariz y alerón. El diseño modelado y estudiado es el de la imagen siguiente:

---

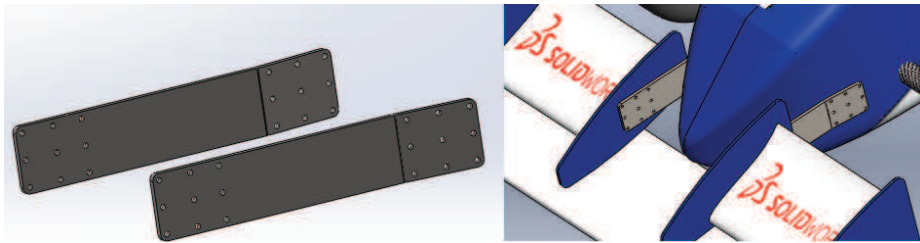


Figura 6.7: Soporte delantero de Fórmula UC3M

Compuesto por dos placas que fijan las derivas interiores del alerón al cuerpo de la nariz del vehículo, y si pudieran ser ancladas hasta el chasis mejor. Es un diseño fácil y sin problemas de construcción, y por tanto de dinero. También se podría estudiar la posibilidad de fijar además el ala principal a ellos para formar una única pieza y más robusta, con forma de "U".

### 6.2.2. Soporte trasero

En este caso se puede ver más diversidad de ideas. En la Formula Student, los más habituales son los de estructuras con barras, pero también aparecen modelos como los siguientes:



Figura 6.8: Ejemplos de soportes traseros

Para el vehículo de Fórmula UC3M, se ha elegido una solución básica como la mayoría de los equipos en Formula Student, diseñando una estructura de formas triangulares para distribuir mejor las fuerzas. La primera característica que se puede observar en el coche es la superficie plana tan amplia de la que se dispone en la parte superior del difusor, con lo que es buena idea colocar y fijar ahí el soporte base o "pie" de nuestra estructura, estando también cerca de la parte final del chasis.

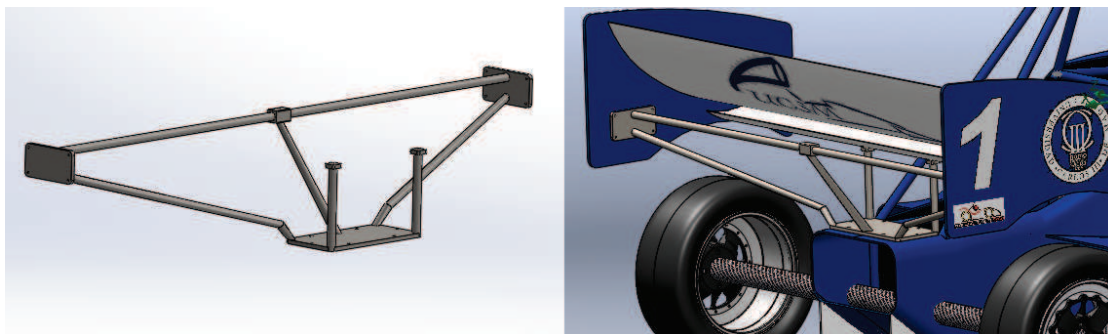


Figura 6.9: Soporte trasero de Fórmula UC3M

Llegado este punto se recuerda que son diseños preliminares de soportes, para tener un primer par de alerones factibles para el monoplaça y a partir del cual, poder desarrollar en un futuro nuevas mejoras.



# MEF: Método de los elementos finitos

---

## 7.1. Teoría

### 7.1.1. Introducción

El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. El MEF está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. Se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos. La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, siendo el requisito básico que las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema a considerar sean conocidas de antemano.

El MEF permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que caracterizan el comportamiento físico del problema, dividiéndolo en un número elevado de subdominios no-intersectantes entre sí denominados «elementos finitos». El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización, en la que dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados "nodos", sobre los cuales se realizan los cálculos.

La generación de la malla se realiza usualmente con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales, cuya matriz se denomina matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Típicamente el análisis de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y

constitutivas se hallan las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además el método es fácilmente adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos, para calcular campos de velocidades y presiones (mecánica de fluidos computacional o CFD) o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

Se esquematiza de la siguiente manera:

$$\mathbf{f} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{u}$$

Donde las incógnitas son los desplazamientos en los nodos (vector  $\mathbf{u}$ ), que se hallan a partir de las fuerzas o solicitaciones en los nodos (vector  $\mathbf{f}$ ) y de la rigidez de las barras (matriz de rigidez  $\mathbf{K}$ ). Conocidos dichos desplazamientos es posible determinar los esfuerzos en las barras. La solución obtenida es exacta.

### 7.1.2. Método de trabajo

La solución obtenida por MEF es sólo aproximada, coincidiendo con la solución exacta sólo en un número finito de puntos llamados nodos. En el resto de puntos que no son nodos, la solución aproximada se obtiene interpolando a partir de los resultados obtenidos para los nodos, lo cual hace que la solución sea sólo aproximada debido a ese último paso.

Dicho conjunto de nodos forma una red, denominada malla formada por retículos. Cada uno de los retículos contenidos en dicha malla es un "elemento finito". El conjunto de nodos se obtiene dividiendo o discretizando la estructura en elementos de forma variada (pueden ser superficies, volúmenes y barras).

Desde el punto de vista de la programación algorítmica modular las tareas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante un programa MEF se divide en:

- **Preproceso:** consiste en la definición de geometría, generación de la malla, las condiciones de contorno y asignación de propiedades a los materiales y otras propiedades. En ocasiones existen operaciones cosméticas de regularización de la malla y preconditionamiento para garantizar una mejor aproximación o una mejor convergencia del cálculo.
-

- **Cálculo:** el resultado del preproceso, en un problema simple no dependiente del tiempo, permite generar un conjunto de  $N$  ecuaciones y  $N$  incógnitas, que puede ser resuelto con cualquier algoritmo para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales. Cuando el problema a tratar es un problema no lineal o un problema dependiente del tiempo a veces el cálculo consiste en una sucesión finita de sistemas de  $N$  ecuaciones y  $N$  incógnitas que deben resolverse uno a continuación de otro, y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.
- **Postproceso:** el cálculo proporciona valores de cierto conjunto de funciones en los nodos de la malla que define la discretización, en el postproceso se calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos, y en ocasiones se aplican operaciones de suavizado, interpolación e incluso determinación de errores de aproximación.

Algunos de los tipos de análisis ingenieriles más comunes que usan el método de los elementos finitos son:

- **Análisis estático:** se emplea cuando la estructura está sometida a acciones estáticas, es decir, no dependientes del tiempo.
- **Análisis vibracional:** es usado para analizar la estructura sometido a vibraciones aleatorias, choques e impactos. Cada uno de estas acciones puede actuar en la frecuencia natural de la estructura y causar resonancia y el consecuente fallo.
- **Análisis de fatiga:** ayuda a los diseñadores a predecir la vida del material o de la estructura, revelando el efecto de los ciclos de carga sobre la pieza. Este análisis puede mostrar las áreas donde es más probable que se presente una grieta. El análisis por fatiga puede también predecir la tolerancia al fallo del material.

### 7.1.3. Resultados del método

El MEF es una solución para la tarea de predecir los fallos debidos a tensiones desconocidas mostrando los problemas de la distribución de tensiones en el material y permitiendo a los diseñadores ver todas las tensiones involucradas. Este método de diseño y prueba del producto es mejor que el de "ensayo y error", donde hay que mantener costes de fabricación asociados a la construcción de cada ejemplar para las pruebas.

Las grandes ventajas del cálculo por ordenador se pueden resumir en:

Hacer posible el cálculo de estructuras que, bien por el gran número de operaciones que su resolución presenta o por lo tedioso de las mismas en la práctica, eran inabordables mediante el cálculo manual. Además en la mayoría de los casos reduce a límites despreciables el riesgo de errores operativos.

---

### 7.1.4. Limitaciones

En general el MEF tal como se usa actualmente tiene algunas limitaciones:

- El MEF calcula soluciones numéricas concretas y adaptadas a unos datos particulares de entrada, no puede hacerse un análisis de sensibilidad sencillo que permita conocer como variará la solución si alguno de los parámetros se altera ligeramente. Es decir, proporciona sólo respuestas numéricas cuantitativas concretas no relaciones cualitativas generales.
- El MEF proporciona una solución aproximada cuyo margen de error en general es desconocido. Si bien algunos tipos de problemas permiten acotar el error de la solución, debido a los diversos tipos de aproximaciones que usa el método, los problemas no lineales o dependientes del tiempo en general no permiten conocer el error.
- En el MEF la mayoría de aplicaciones prácticas requiere mucho tiempo para ajustar detalles de la geometría, existiendo frecuentemente problemas de mal condicionamiento de las mallas, desigual grado de convergencia de la solución aproximada hacia la solución exacta en diferentes puntos, etc. En general una simulación requiere el uso de numerosas pruebas y ensayos con geometrías simplificadas o casos menos generales que el que finalmente pretende simularse, antes de empezar a lograr resultados satisfactorios.

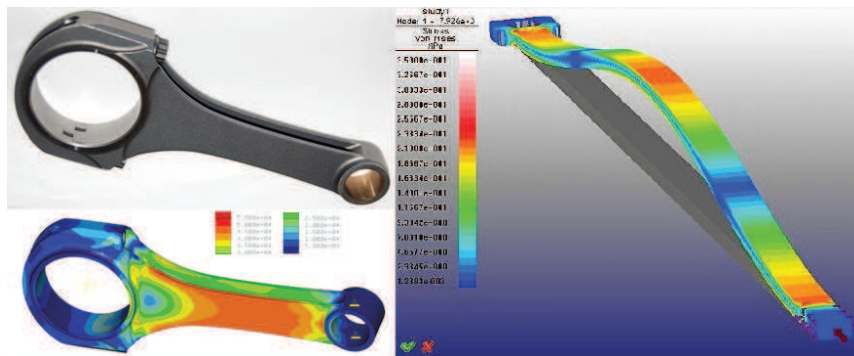


Figura 7.1: Ejemplos de análisis de MEF

### 7.1.5. MEF en SolidWorks

SolidWorks Simulation utiliza la formulación de desplazamientos del método de elementos finitos para calcular desplazamientos, deformaciones y tensiones de los componentes con cargas internas y externas.

El análisis de elementos finitos (FEA) con SolidWorks Simulation conoce la geometría exacta durante el proceso de mallado. Además, cuanto más precisión exista entre el mallado y la geometría del producto, más precisos serán los resultados del análisis. SolidWorks Simulation utiliza métodos de FEA para calcular los desplazamientos y tensiones de la pieza debido a cargas operativas como las siguientes:

- Fuerzas
- Presiones
- Aceleraciones
- Temperaturas
- Contacto entre componentes

## 7.2. Análisis estructural de los alerones

El material seleccionado para estos elementos es la fibra de vidrio, que es muy utilizada en la industria para fabricar piezas de la carrocería del coche. Sus características están recogidas en la tabla 7.1, la cual servirá para introducir dichos parámetros en el software y poder realizar el estudio.

Las condiciones de aplicación de las fuerzas son las siguientes:

- Las fuerzas de resistencia y sustentación son multiplicadas por un factor de seguridad de 1,5.
  - Todas las superficies en contacto con un flujo frontal tienen aplicada una fuerza de resistencia uniformemente distribuida.
  - Todas las caras que tengan un flujo horizontal tienen aplicada una fuerza de sustentación uniformemente distribuida.
  - Los puntos para anclar la pieza han sido elegidos de acuerdo a un punto probable en donde las articulaciones se pueden colocar.
-

Cuadro 7.1: Propiedades de la fibra de vidrio

| PROPIEDADES                   | VALOR      | UNIDADES          |
|-------------------------------|------------|-------------------|
| Fracción de volumen de fibra  | 0,43       |                   |
| Módulo de elasticidad en X    | 2,60E+010  | N/m <sup>2</sup>  |
| Coefficiente de Poisson en XY | 0,13       | N/D               |
| Módulo cortante en XY         | 7200000000 | N/m <sup>2</sup>  |
| Densidad de masa              | 1850       | kg/m <sup>3</sup> |
| Límite a tracción en X        | 400000000  | N/m <sup>2</sup>  |
| Límite a compresión en X      | 350000000  | N/m <sup>2</sup>  |
| Límite elástico               | 2,20E+010  | N/m <sup>2</sup>  |
| Conductividad térmica en X    | 0,2256     | W/(m·K)           |
| Calor específico              | 1386       | J/(kg·K)          |
| Resistencia a cortadura (Mpa) | 45000000   | N/m <sup>2</sup>  |

### 7.2.1. Alerón delantero

Para realizar el análisis estructural de esta pieza en el programa SolidWorks, se debe seleccionar el material a estudiar, en este caso la fibra de vidrio con las características ya mencionadas. Después, hay que agregar los puntos fijos o anclajes para las articulaciones o empotramientos de la pieza, que en el caso del alerón delantero, se van a fijar los puntos que forman el perfil alar y que estén en contacto con las derivas, piezas que van a servir de soporte para las alas.

A continuación, el sistema pide aplicar las cargas existentes sobre el elemento a estudiar, en este caso se introducen la fuerza de resistencia en dirección horizontal y la fuerza de sustentación en dirección vertical, aplicadas sobre todas las superficies afectadas. Como ya se explicó en el punto anterior, estas fuerzas van incrementadas por un factor de seguridad de 1,5.

Por último, SolidWorks crea una malla con elementos triangulares automáticamente cuando va a resolver el sistema, donde se puede elegir el tamaño de los mismos. Lo más conveniente es crear una malla lo más fina posible, para obtener un resultado más preciso. El resultado de este proceso de creación de la malla sobre el modelo, puede visualizarse en la primera imagen de la figura 7.2.

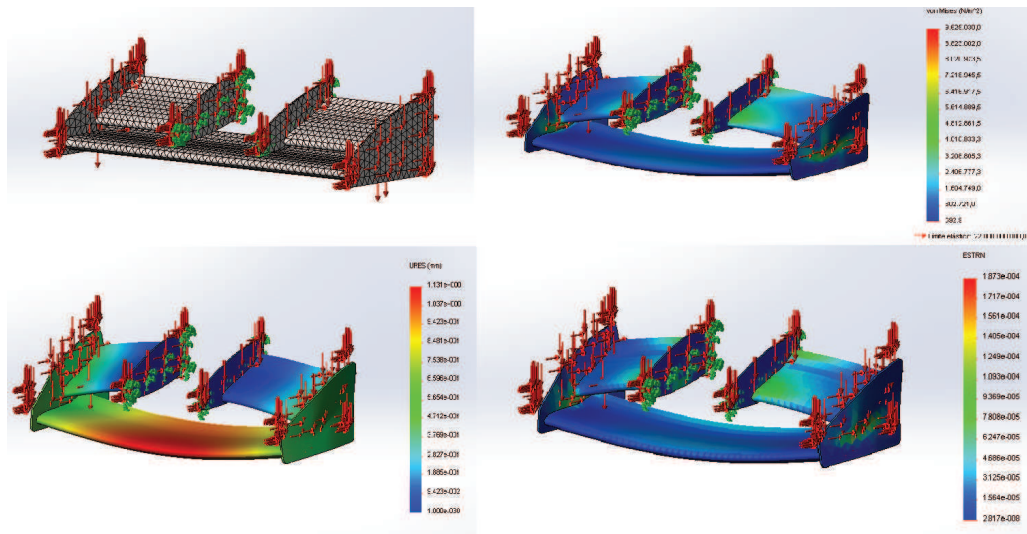


Figura 7.2: Mallado y análisis del alerón delantero

Los resultados del análisis muestran que la tensión máxima en la pieza es de 9,6 MPa, lo cual es mucho menor que el límite que tiene la fibra de vidrio y que puede comprobarse en la tabla 7.1 mostrada anteriormente. Esto quiere decir, que la pieza se encuentra en la zona elástica, por lo que su comportamiento está controlado y es predecible.

Los puntos que soportan mayores tensiones se localizan en la zona interior de las derivas, justo entre las dos alas. Esto último resulta lógico, ya que las derivas hacen de punto fijo donde las alas no pueden moverse (están ancladas), sin embargo soportan los esfuerzos del resto del ala que es empujada hacia abajo por la fuerza de sustentación y hacia atrás por la fuerza de arrastre. Por tanto, en la zona entre las dos alas, este esfuerzo es mayor ya que tiene que soportar los esfuerzos de las alas superior e inferior. Así que, con dichos esfuerzos sumados actuando en una misma región (superficie) y además pequeña, lleva a obtener grandes tensiones.

En el caso de la deformación, las alas superiores tienen un desplazamiento máximo de 0,5 mm por su parte exterior, pero el desplazamiento máximo se encuentra en la zona central del ala inferior, sufriendo en su punto central un desplazamiento de 1,1 mm hacia abajo. Este resultado es comprensible, debido a la mayor superficie y longitud del ala, y a la separación entre anclajes (puntos de apoyo, colocados en los extremos), obteniendo la flecha máxima citada anteriormente.

Estos desplazamientos no son para nada alarmantes, pero si fueran preocupantes se podría resolver reforzando la resistencia del material compuesto en las regiones críticas. Pudiendo optar por diversas opciones como: utilizando una orientación más adecuada de las fibras, incrementando las capas de material o reforzando la zona con otro material más resistente.

### 7.2.2. Alerón trasero

Se analiza ahora el alerón trasero, siguiendo la misma sistemática que en el anterior apartado, es decir, aplicación de material, puntos de anclaje (en este caso los perfiles alares en contacto con las derivas y el alerón inferior en su totalidad, ya que éste va a tener apoyo en las derivas y en el soporte del alerón por la zona central, por tanto no va a sufrir prácticamente deformaciones y se supondrá fijo), cargas, malla y para finalizar, la ejecución del cálculo estructural, cuyo resultado se puede visualizar en la siguiente imagen:

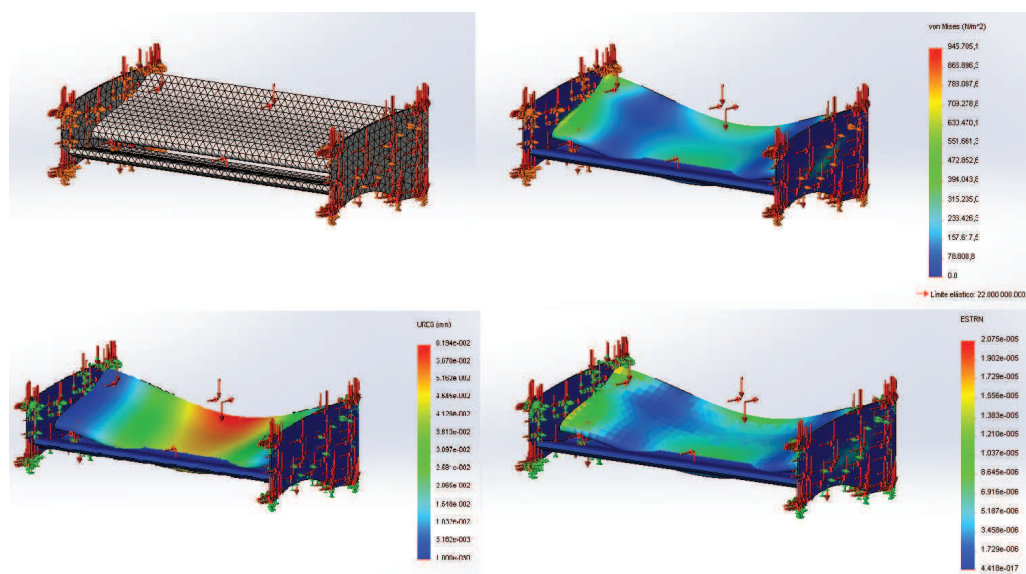


Figura 7.3: Mallado y análisis del alerón trasero

Aquí la tensión máxima se localiza, al igual que en el alerón delantero, en la zona de anclaje del ala y la deriva, en una región intermedia entre las dos alas. La tensión máxima que sufre en este caso es de 0,95 MPa, mucho menor que antes, ya que en este caso dispone de mayor superficie para repartir las fuerzas. La zona de anclaje es todo el perímetro del perfil alar, como es un elemento grande, la fuerza se distribuye por toda ella y presenta tensiones bajas.

En cuanto a la deformación y desplazamientos, es fácil intuir donde se localizarán. Pues, al igual que en el análisis anterior, la zona más afectada es la región central, y en concreto, en el ala superior. El ala inferior va a ir fijada por el soporte trasero, con lo cual sus desplazamientos serán prácticamente nulos al ir sujeto por los extremos y los dos pilares del soporte en la zona central de la misma. El ala superior y con gran tamaño, es más vulnerable por su región central, en particular el área situada más atrás del alerón, es decir en la parte final y estrecha del perfil alar. Aquí, se obtiene un desplazamiento máximo de 0,062 mm.

Con esto, hemos comprobado que los alerones son aptos para montar en el coche. Obteniendo un buen rendimiento de ellos y con suficiente resistencia a los esfuerzos requeridos.

### 7.3. Análisis estructural de los soportes de los alerones

Para el análisis de los soportes, cambiamos de material. Ya se ha visto anteriormente que el material de los soportes es el acero AISI 304, cuyas propiedades se resumen en la tabla 7.2.

Cuadro 7.2: Propiedades del acero AISI 304

| PROPIEDAD                         | VALOR     | UNIDADES          |
|-----------------------------------|-----------|-------------------|
| Módulo elástico                   | 1,90E+11  | N/m <sup>2</sup>  |
| Coefficiente de Poisson           | 0,29      | N/D               |
| Módulo cortante                   | 7,50E+10  | N/m <sup>2</sup>  |
| Densidad                          | 8000      | kg/m <sup>3</sup> |
| Límite a tracción                 | 5,17E+08  | N/m <sup>2</sup>  |
| Límite elástico                   | 206807000 | N/m <sup>2</sup>  |
| Coefficiente de expansión térmica | 1,80E-05  | K <sup>-1</sup>   |
| Conductividad térmica             | 16        | W/(m·K)           |
| Calor específico                  | 500       | J/(kg·K)          |

Por tanto, solo queda aplicar las condiciones de entorno al programa, realizar el mallado a la pieza y ejecutar el análisis para obtener los resultados.

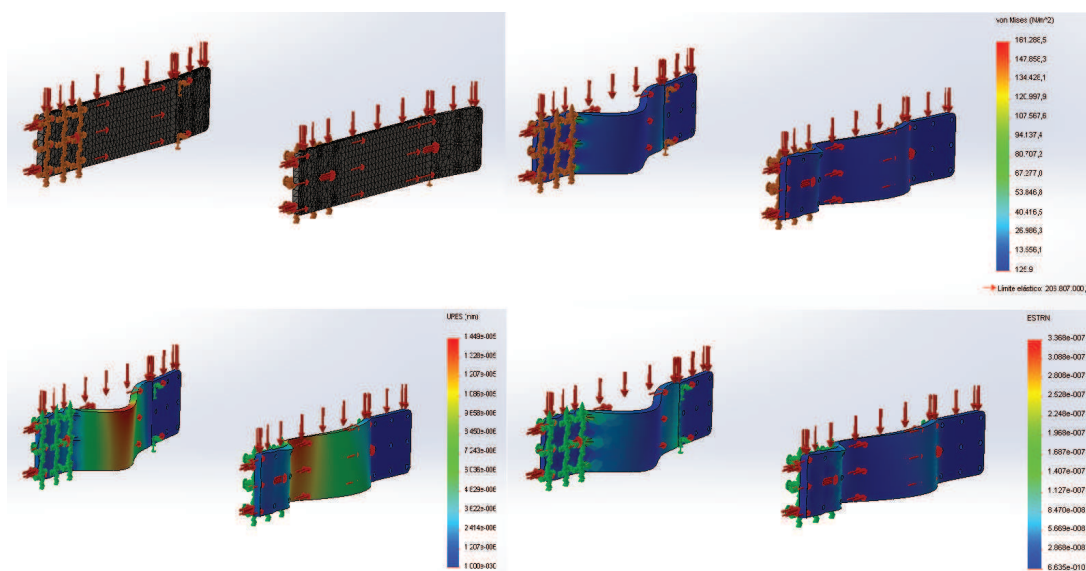


Figura 7.4: Mallado y análisis del soporte delantero

Para el soporte delantero se obtiene una tensión máxima de 0,16 MPa, muy por debajo del

límite elástico del material por tanto, aquí no presenta problemas. Respecto a los desplazamientos sufridos en la pieza, el máximo valor que encontramos es de  $1,5 \times 10^{-5}$  mm, es decir prácticamente nulo, con lo que no hay preocupación por este tema.

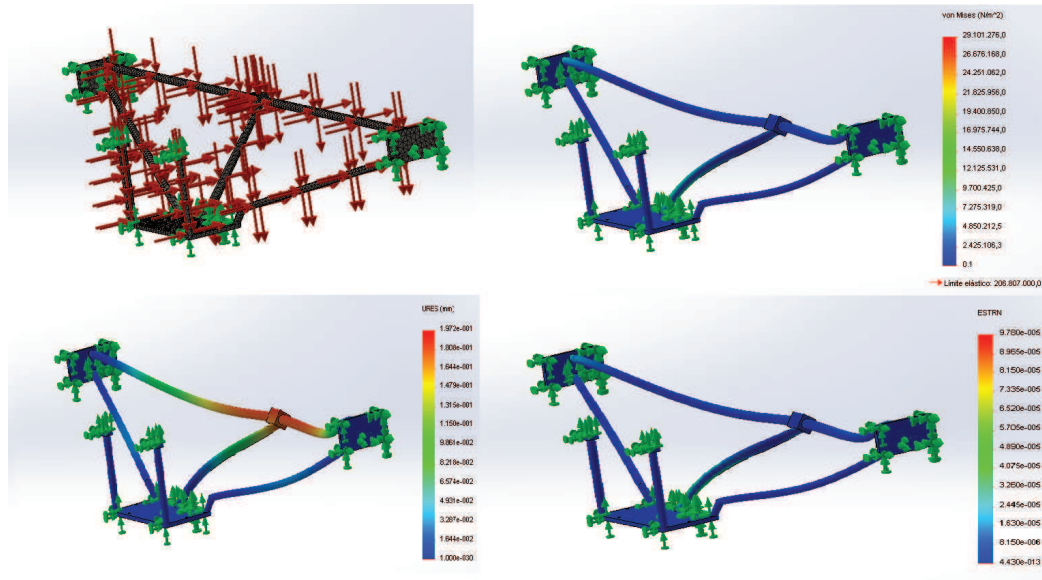


Figura 7.5: Mallado y análisis del soporte trasero

En el soporte trasero se observa que la tensión máxima soportada es de 29 MPa, muy superior al del soporte delantero, pero con amplio margen por debajo del límite de elasticidad. Esto es debido, en gran parte a la geometría de la pieza. Se podría modificar para distribuir mejor las tensiones y esfuerzos, además de tener que soportar el peso del alerón, pero según los resultados obtenidos, es válido y cumpliría perfectamente su función.

El desplazamiento máximo se localiza en las barras posteriores horizontales y en su zona central, llegando a un máximo de 0,2 mm.

Una vez terminado el análisis estructural de los distintos componentes que forman el conjunto de alerones, ya se han completado todos los estudios de corte técnico de este trabajo (diseño, CFD, comparación, selección, retoque y MEF), pero aun queda por tratar otro aspecto igual o más importante que el resto: los costes de fabricación.

Ya que si después de todos los análisis anteriores el modelo no fuera viable económicamente, el vehículo real no podría beneficiarse de las ventajas que ofrece este conjunto aerodinámico.

## Costes de fabricación

Un apartado fundamental de este proyecto es evaluar los costes imputables a la fabricación de los alerones. En la tabla 8.1 se presenta una estimación inicial del presupuesto que habría que destinar para los alerones, suponiendo que se realiza en la propia universidad, por tanto sólo se estiman costes de materiales y mano de obra.

Cuadro 8.1: Costes de fabricación

|                                  | ELEMENTOS                       | COSTE UNITARIO | UNIDADES   | TOTAL (€)      |
|----------------------------------|---------------------------------|----------------|------------|----------------|
| Coste de material                | Fibra de vidrio                 | 6,92 €/kg      | 4 kg       | 27,68          |
|                                  | Resina epoxi                    | 40,54 €/kg     | 12 kg      | 486,48         |
|                                  | Vara de acero (20 mm diámetro)  | 120 €/m        | 3 m        | 360            |
|                                  | Placa de acero (10 mm espesor)  | 174 €          | 500x500 mm | 174            |
|                                  | Madera                          |                |            | 100            |
|                                  | Herramientas                    |                |            | 500            |
|                                  |                                 |                |            | <b>1648,16</b> |
| Coste de ingeniería              | Diseño                          | 35 €/hora      | 40 horas   | 1400           |
|                                  |                                 |                |            | <b>1400</b>    |
| Coste de fabricación de alerones | Fabricación molde               | 20 €/hora      | 6 horas    | 120            |
|                                  | Aplicación de la fibra y resina | 20 €/hora      | 4 horas    | 80             |
|                                  | Curado                          | 20 €/hora      | 2 horas    | 40             |
|                                  |                                 |                |            | <b>240</b>     |
| Coste de fabricación de soportes | Corte y mecanizado del acero    | 20 €/hora      | 2 horas    | 40             |
|                                  | Soldadura                       | 20 €/hora      | 1 hora     | 20             |
|                                  |                                 |                |            | <b>60</b>      |
| <b>TOTAL</b>                     |                                 |                |            | <b>3348,16</b> |

A priori no es un precio muy elevado, sabiendo que el equipo puede fabricar el vehículo entero con un máximo de 21000 €, con lo que supondría un 16 % aproximadamente del total. Es un poco más elevado que el precio del carenado (2604,04 €), pero hay que tener en cuenta que aquí también se incluyen los soportes metálicos para acoplarlos perfectamente al coche.

De todos modos, la decisión de su fabricación queda pospuesta para cuando el equipo tenga preparados y estudiados el resto de componentes del vehículo. Añadir también que muchos materiales y herramientas se pueden utilizar para más de un componente del coche, por lo que el precio se divide entre todos ellos. Se puede aprovechar además un posible descuento del proveedor a la hora de comprar material en gran cantidad y no sólo un pequeño pedido

específico.

Por último, se citan posibles proveedores sobre todo de fibra de vidrio y resina, de donde se han tomado referencias de productos y precios para este proyecto:

<http://www.fibradevidrio.net> [20]

<http://www.globalfiberglass.com.mx> [21]

El resto de materiales se pueden encontrar fácilmente en establecimientos y grandes superficies de bricolaje (madera, barras y planchas de acero, tornillos, herramientas, etc.). Además son materiales comerciales usados por más grupos de trabajo dentro del equipo, por lo tanto, no se especifican nombres de proveedores exactos hasta que el grupo de marketing y compras tenga acuerdos con alguna empresa relacionada.

---

---

## Capítulo 9

# Conclusiones

---

Gracias a la observación de equipos punteros de la competición de Formula Student, se pudo concretar que la mayoría de ellos poseen en sus monoplazas un cuerpo aerodinámico muy cuidado y avanzado, así como unos grandes alerones. Es ahí cuando el equipo Fórmula UC3M opta por estudiar la posibilidad de incorporar alerones a su vehículo, con lo que se inicia la realización de este proyecto.

Eso sí, estableciendo como criterios de diseño de los alerones: sencillez y economía. Lógicamente consiguiendo una mejora de eficiencia aerodinámica en el coche.

En este trabajo se han comparado y analizado las mejores geometrías de alerones para el monoplaza, basados en perfiles alares de tipo NACA0015, el cual resultó ser el más recomendado para esta ocasión (ofreciendo un rendimiento muy parecido a los otros perfiles pero al ser más común y utilizado, presenta ventaja en el aspecto económico).

Se estudiaron diferentes modelos de alerones para comparar su funcionamiento con el conjunto del coche, resultando ser los más adecuados, los de formas simples y con alas de gran superficie, las cuales aportan mayor carga aerodinámica aunque también mayor resistencia. Ésta se logró reducir en parte, gracias a la geometría de las alas y la disposición de las mismas.

Una vez vistos los análisis y resultados de los alerones seleccionados finalmente para el vehículo, se pueden destacar las siguientes conclusiones:

- Se han obtenido alerones que mejoran las prestaciones del vehículo en el paso por curva, es decir consiguen generar carga aerodinámica y reducir parte de la resistencia que crea el coche por sí mismo. Esto era uno de los objetivos que se habían fijado, mejorar la eficiencia aerodinámica (se ha pasado de un coeficiente de eficiencia de 1,55 a 1,87) y aumentar la carga generada (95,03 N antes; 624,47 N ahora).
- Se ha conseguido un coste de los alerones moderado respecto al conjunto de componentes del vehículo (3348,16 €), es decir, un 16 % del presupuesto total para la construcción del vehículo. Como el coste es un objetivo muy importante, se intentará mejorar en trabajos futuros, pero el actual no es excesivo.

- Se ha elegido la fibra de vidrio como material de construcción; un material ligero, económico y con resistencia suficiente para aguantar los esfuerzos de la competición. Además no implica un alto grado de dificultad para ser manipulado, con lo que se reducen los costes de fabricación.

Por tanto se resume que el equipo Fórmula UC3M tiene una primera versión de alerones preparada para montar y disfrutar en el monoplaza. Ya que tanto por diseño, normativa, prestaciones y coste cumplen perfectamente su función.

A nivel personal, mencionar la pasión y el esfuerzo con la que se ha llevado a cabo este proyecto, sobre todo por la afición personal por el mundo del motor, pero también por la implicación, dedicación y constancia que ha tenido todo el equipo de Fórmula UC3M, intentando sacar el equipo adelante y poder estar lo antes posible sobre la pista con el vehículo, además de estar siempre a disposición de cada uno de los miembros y también supervisando cada trabajo.

Este proyecto ha sido una buena oportunidad para acercarse al mundo laboral, trabajando sobre unas reglas las cuales no puedes exceder, y con fechas de entrega acompañadas de un buen nivel de documentación y diseño. También ha sido muy importante trabajar con un método similar a la que lo hacen las empresas, siguiendo los pasos en las distintas fases sobre diseño, cálculo y fabricación de un producto, vitales en cualquier proyecto.

Otro punto más, favorable al realizar este proyecto, ha sido la utilidad de aprender el manejo de una herramienta de software del nivel de SolidWorks, tan apreciado en el mundo laboral como útil, con gran cantidad de módulos de cálculo como CAD, CFD, estructural, materiales, circuitos electrónicos, temperaturas, . . . realmente completo y con resultados satisfactorios.

---

---

## Capítulo 10

# Trabajos futuros

---

Para completar el trabajo aquí realizado, a continuación se exponen algunas líneas de trabajo futuras para mejorar o terminar el diseño de los alerones para la Formula Student:

- Estudio a fondo de los circuitos donde posiblemente se compita, analizando su trayecto, rectas y curvas, para determinar la configuración de carga más adecuada para el vehículo y para cada tipo de prueba. Ajustando la inclinación de los alerones según requerimiento de la pista.
- Mejora del diseño y materiales de los alerones aquí expuestos, con ideas innovadoras o más efectivas, incluyendo el cambio de material por otro con menor peso. También sería positivo una reducción de costes.
- Mejora del diseño de los soportes, ya que en este caso, sólo se hicieron como modelo (guía) para el ensamblaje final del monoplaza.
- Estudio más preciso de CFD sobre el vehículo y alerones, ajustando lo mejor posible todas las limitaciones y condiciones del entorno así como el "efecto suelo", muy influyente sobre el coche.
- Por último, sería bueno poder construir una maqueta a escala para poder probar en un túnel de viento pequeño o en su defecto, construir el coche para probarlo en condiciones reales, comparando los análisis por ordenador con los resultados obtenidos con el modelo real. De aquí también se obtendrían datos valiosos para futuras mejoras y corrección de errores, pero requiere de dinero y tiempo para su fabricación y prueba en circuito.



## Referencias

---

- [1] Joseph Katz, *Race Car Aerodynamics - Designing for speed*, First Edition, Bentley Publishers, 1995.
- [2] Frank M. White, *Fluid Mechanics*, Sixth Edition, Mc Graw Hill, 2008.
- [3] Tu, Yeoh, Liu, *Computational Fluid Dynamics*, Butterworth- Heinemann, 2008.
- [4] CINME, *El método de los Elementos Finitos*, Mc Graw-Hill Barcelona, 1994.
- [5] Simon McBeath, *Aerodinámica del automóvil de competición*, CEAC, 2005.
- [6] F1 Technical  
<http://www.f1technical.net/>  
Última visita: 20/06/2014
- [7] F1 Grand Prix  
<http://f1-grandprix.com/>  
Última visita: 20/06/2014
- [8] Características del alerón delantero  
<http://formula-f.com/fansite/index.php?topic=971.0>  
Última visita: 20/06/2014
- [9] Información técnica sobre la F1  
<http://formulauno-auto.blogspot.com.es/p/ingenieria-f1.html>  
Última visita: 20/06/2014

- [10] Artículo descriptivo sobre la dinámica computacional de fluidos (CFD)  
<http://angelesenlacabeza.blogspot.com.es/2013/01/cfd-dinamica-computacional-de-fluidos.html>  
Última visita: 20/06/2014
  
  - [11] Programa ejecutable para analizar perfiles aerodinámicos  
<http://www.mh-aerotoools.de/airfoils/>  
Última visita: 20/06/2014
  
  - [12] Formula SAE  
<http://www.fsae.com/>  
Última visita: 20/06/2014
  
  - [13] Formula SAE online  
<http://www.fsaeonline.com/>  
Última visita: 20/06/2014
  
  - [14] Formula Student  
<http://www.formulastudent.es/>  
Última visita: 20/06/2014
  
  - [15] Principios aerodinámicos  
<http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV12.html>  
Última visita: 20/06/2014
  
  - [16] Teoría sobre el Método de Elementos Finitos (MEF) en SolidWorks  
<http://grupocarman.com/blog/solidworks-simulation/>  
Última visita: 20/06/2014
  
  - [17] Fórmula UC3M  
<http://www.formulauc3m.com/>  
Última visita: 20/06/2014
  
  - [18] Equipo de Formula SAE de la Universidad de Sevilla  
<http://fssevilla.blogspot.com.es/>  
Última visita: 20/06/2014
-

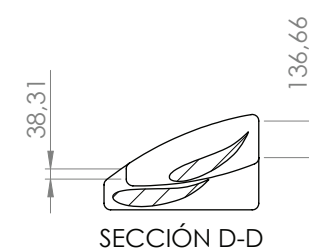
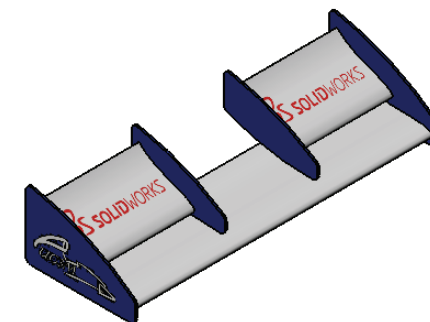
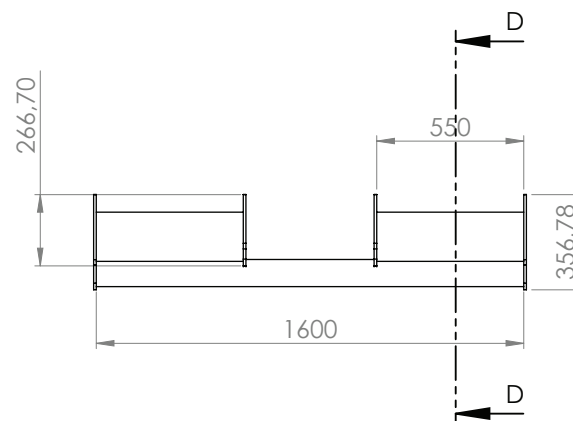
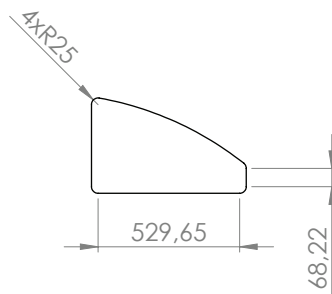
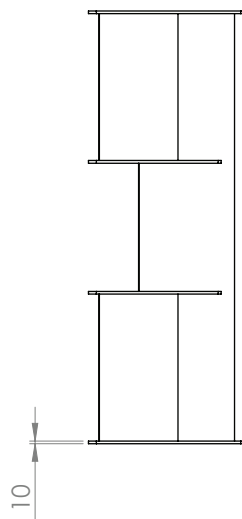
- 
- [19] Material comercial, precios y propiedades  
<http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCatalogue.php?Language=S>  
Última visita: 20/06/2014
- [20] Empresa de fibra de vidrio, España  
<http://www.fibradevidrio.net/trabajos-fibra-de-vidrio.php?r=eolica>  
Última visita: 20/06/2014
- [21] Empresa de fibra de vidrio, México  
<http://www.globalfiberglass.com.mx/propiedades>  
Última visita: 20/06/2014
-



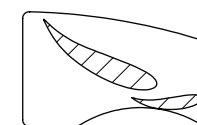
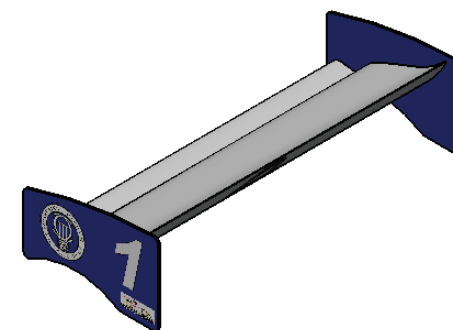
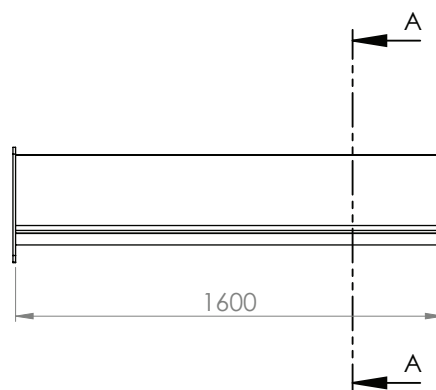
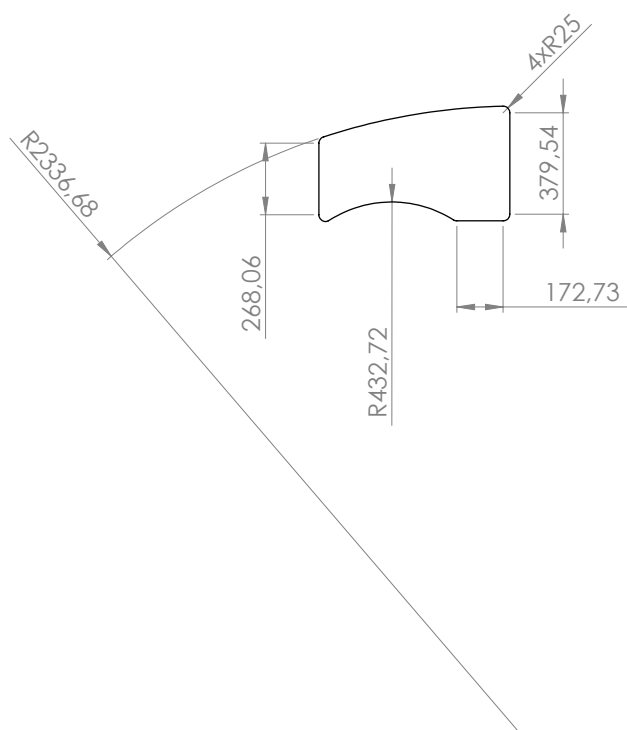
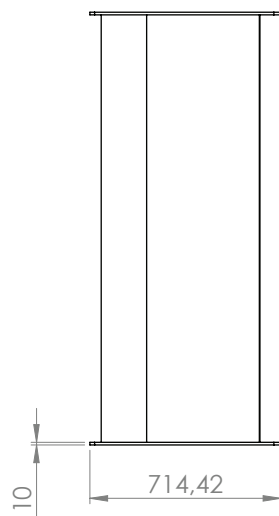
## **Anexo: Planos para la fabricación de los alerones y sus soportes**

---

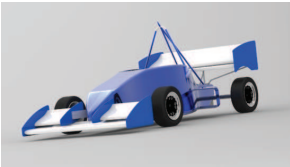
A continuación se muestran los planos referidos a los alerones y los soportes, indicando en los mismos tanto las cotas como el material y tratamiento a emplear.

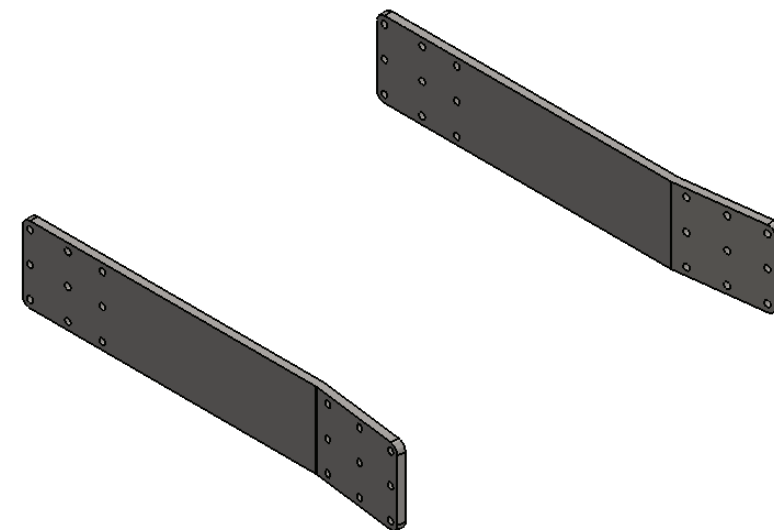
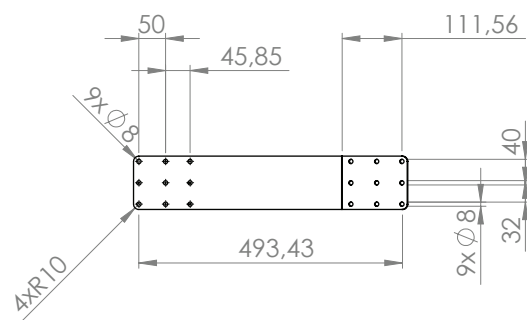
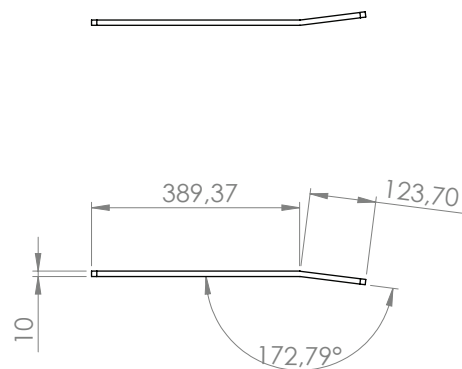


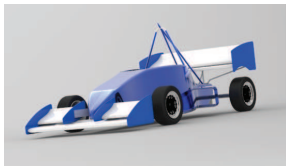
|                                                                 |  |                           |  |
|-----------------------------------------------------------------|--|---------------------------|--|
| Nombre:                                                         |  | Material: Fibra de vidrio |  |
| <div data-bbox="1189 1361 1480 1528" data-label="Image"> </div> |  | Alerón delantero          |  |
|                                                                 |  | Acabado:                  |  |
| Grupo:                                                          |  | Fecha:                    |  |
| Fórmula UC3M                                                    |  | 20/05/2014                |  |
| Autor:                                                          |  | Joel Leganés Rodríguez    |  |

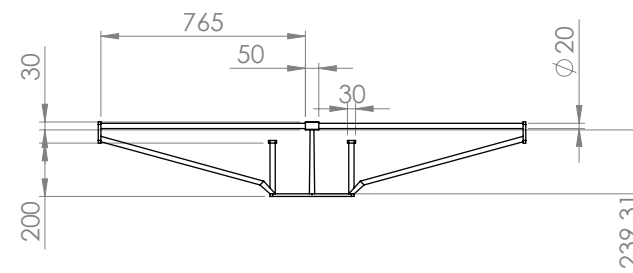
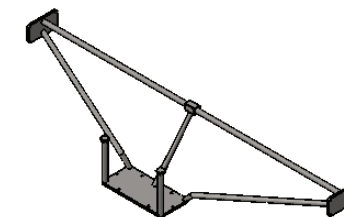
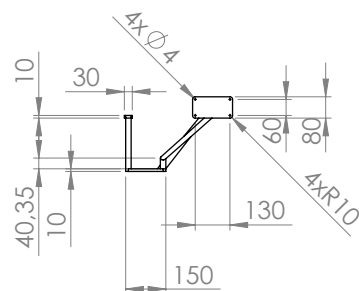
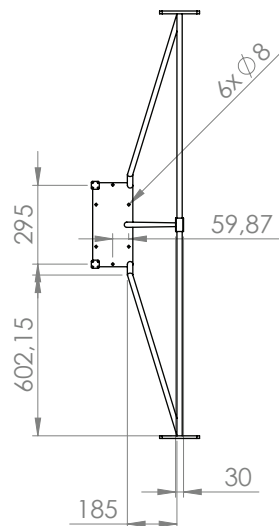


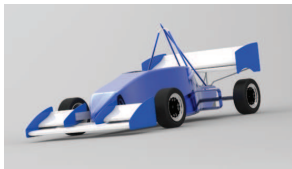
SECCIÓN A-A

|                                                                                       |              |                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------------------|------------|
| Nombre:                                                                               |              | Material: Fibra de vidrio |            |
| Alerón trasero                                                                        |              | Acabado:                  |            |
|  | Grupo:       |                           | Fecha:     |
|                                                                                       | Fórmula UC3M |                           | 20/05/2014 |
| Autor:                                                                                |              | Joel Leganés Rodríguez    |            |



|                                                                                       |                          |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------|
| Nombre:                                                                               | Material: Acero AISI 304 |            |
| Soporte de alerón delantero                                                           | Acabado: Mecanizado      |            |
|  | Grupo:                   | Fecha:     |
|                                                                                       | Fórmula UC3M             | 20/05/2014 |
|                                                                                       | Autor:                   |            |
|                                                                                       | Joel Leganés Rodríguez   |            |



|                                                                                       |                          |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------|
| Nombre:                                                                               | Material: Acero AISI 304 |            |
|                                                                                       | Acabado: Mecanizado      |            |
|  | Grupo:                   | Fecha:     |
|                                                                                       | Fórmula UC3M             | 20/05/2014 |
| Autor:                                                                                |                          |            |
| Joel Leganés Rodríguez                                                                |                          |            |