

E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática  
y de Telecomunicación

Digitalización 3D, estudio  
aerodinámico por elementos finitos y  
diseño del alerón en un BMW E36  
para competición drift.



Grado en Ingeniería en Diseño Mecánico

Trabajo Fin de Grado

Miriam Mesquita González

Director: José Ramón Alfaro López

Tudela, JUNIO 2022

upna

Universidad Pública de Navarra  
Nafarroako Unibertsitate Publikoa



### Agradecimientos

A mi familia, por apoyarme durante mis estudios, animarme a hacer siempre lo que me gusta y ayudarme en momentos difíciles.

A mi tutor José Ramón Alfaro por ayudarme a realizar este trabajo y dejarme llevarlo a cabo hasta materializarlo.

A mis compañeros de clase, por haberme ayudado durante el grado tanto en el ámbito académico como fuera de él.

**Resumen:**

En el presente trabajo de fin de grado se ha realizado un alerón para un BMW E36 destinado a competición, para ello se ha realizado un análisis para obtener los puntos conflictivos de su aerodinámica y proponer un diseño que sirva para mejorar los resultados, se ha escaneado un modelo a escala usando un escáner Artec Spider, se ha procesado el archivo en Solidworks y se ha analizado con ANSYS Fluent, analizados los resultados, se ha comenzado un proceso de diseño del alerón utilizando el programa Airfoil Tools para obtener el perfil alar adecuado para varios trazados y se ha llevado a cabo su fabricación

**Palabras clave:**

Análisis de fluidos, Aerodinámica, BMW E36, Alerón, Vehículo, Diseño en Automoción

**Abstract:**

In the present final degree Project, a spoiler has been made for a BMW E36 destined for competition, for which an analysis has been carried out to obtain the conflictive points of its aerodynamics and propose a design that serves to improve the results, for this, a scale model has been scanned using an Artec Spider scanner, the file has been processed in Solidworks and analyzed with Ansys fluent. Once the results have been analyzed, a spoiler design process has begun using Airfoil Tools program to obtain the wing profile for different layouts and its manufacture has been carried out.

**Keywords:**

Fluid analysis, Aerodynamics, BMW E36, Spoiler, Vehicle, Automotive design



## ÍNDICE

1. Introducción .....	10
2. Objetivos .....	12
3. Marco teórico .....	14
3.1. Conceptos básicos de aerodinámica.....	14
3.2. Historia.....	21
3.3. Análisis por elementos finitos.....	25
3.4. BMW E36 .....	26
4. Modelo de estudio .....	29
4.1. Proceso de escaneado.....	29
4.2. Procesado del archivo .....	31
4.3. Exportación a SOLIDWORKS .....	32
4.4. Exportación a ANSYS .....	33
5. Estudio aerodinámico .....	34
5.1. Análisis de fluidos.....	34
5.2. Resultados .....	41
5.3. Puntos de mejora.....	44
6. Diseño del alerón.....	45
6.1. Concepto de alerón y funcionamiento .....	45
6.2. Requisitos y normativa.....	46
6.3. Tipos de trazado .....	47
6.4. Cálculo del perfil.....	48
6.5. Obtención de perfiles .....	49
6.6. Diseños.....	51
6.7. Diseño final .....	54
6.8. Forma definitiva .....	55
7. Prototipo .....	57
7.1. Materiales.....	57
7.2. Fabricación.....	65
8. Conclusiones .....	73
9. Bibliografía.....	74

## ANEXOS

I. PLANOS.

II. INFOGRAFÍA DEL VEHÍCULO.

III. PRESUPUESTO DE MATERIALES.

## ÍNDICE DE FIGURAS.

- Figura 1. Modelo BMW E36 que va a analizarse.
- Figura 2. Esquema del principio de continuidad.
- Figura 3. Esquema de efecto Venturi aplicado a vehículos.
- Figura 4. Flujo laminar y turbulento.
- Figura 5. Capa límite.
- Figura 6. Desprendimiento de capa límite y turbulencia.
- Figura 7. Influencia de la forma en los coeficientes aerodinámicos.
- Figura 8. Influencia del alerón en los coeficientes aerodinámicos.
- Figura 9. Coche Ricotti.
- Figura 10. Coche Rumpler.
- Figura 11. Coche Jaray.
- Figura 12. Vehículo de Fórmula 1.
- Figura 13. Vehículo de la marca Tesla.
- Figura 14. Medidas del coche a estudiar.
- Figura 15. Modelo que va a escanearse.
- Figura 16. Escáner Spider.
- Figura 17. Diagrama explicativo del fundamento de escaneado.
- Figura 18. Modelo preparado para escanear.
- Figura 19. Fragmento frontal-lateral de la superficie.
- Figura 20. Fragmento lateral de la superficie.
- Figura 21. Fragmento frontal de la superficie.
- Figura 22. Unión de las superficies generadas.
- Figura 23. Generación del primer modelo.
- Figura 24. Rellenado de agujeros en el modelo escaneado.
- Figura 25. Modelo final obtenido en Artec.
- Figura 26. Archivo importado en SolidWorks.
- Figura 27. Archivo importado en Ansys.
- Figura 28. Generación del túnel de viento virtual.
- Figura 29. Corte del modelo por plano medio.
- Figura 30. Definición de las superficies de estudio.
- Figura 31. Importación de superficies al módulo de mallado.
- Figura 32. Selección de tamaño de elementos de malla.
- Figura 33. Generación de elementos de malla.
- Figura 34. Definición de caras y fronteras del sistema.
- Figura 35. Definición de regiones de fluido.
- Figura 36. Definición de límites del sistema.
- Figura 37. Selección de tipo de elemento de malla.
- Figura 38. Generación de malla volumétrica.
- Figura 39. Definición entrada-salida del fluido.
- Figura 40. Parámetros de densidad y viscosidad del aire.
- Figura 41. Parámetros del material del vehículo.
- Figura 42. Definición de condiciones de trabajo.

- Figura 43. Módulo de solución y resultados de estudio.
- Figura 44. Selección de parámetros a estudiar.
- Figura 45. Modelo de estudio completamente definido.
- Figura 46. Zonas conflictivas encontradas en el estudio.
- Figura 47. Mapa de vectores del vehículo.
- Figura 48. Mapa de velocidades del vehículo.
- Figura 49. Mapa de trayectorias de partículas.
- Figura 50. Mapa de turbulencias.
- Figura 51. Mapa de trayectorias de partículas turbulentas.
- Figura 52. Partes del perfil alar.
- Figura 53. Angulo de ataque de un ala.
- Figura 54. Perfil alar Dayton-Wright.
- Figura 55. Perfil alar AH 81-K-144 W-F KLAPPE.
- Figura 56. Perfil alar FX 69-PR-281.
- Figura 57. Alerón Dayton-Wright en solidworks.
- Figura 58. Alerón AH 81-K-144 W-F KLAPPE en solidworks.
- Figura 59. Alerón FX 69-PR-281 en solidworks.
- Figura 60. Boceto de alerón variable.
- Figura 61. Boceto de alerón doble.
- Figura 62. Soporte de alerón.
- Figura 63. Base de unión de soporte y vehículo.
- Figura 64. Placa lateral del alerón.
- Figura 65. Modelo ensamblado en solidworks.
- Figura 66. Plano de montaje del alerón.
- Figura 67. Corte de perfiles de madera en laser.
- Figura 68. Perfiles de madera cortados en laser.
- Figura 69. Utilización de perfil de madera como plantilla de corte.
- Figura 70. Corte de perfiles de espuma.
- Figura 71. Perfil de espuma cortado en hilo caliente.
- Figura 72. Corte de espuma en CNC.
- Figura 73. Corte de perfiles de espuma en CNC.
- Figura 74. Perfiles de espuma ordenados.
- Figura 75. Perfil AH 81-K-144 W-F KLAPPE.
- Figura 76. Perfil FX 69-PR-281.
- Figura 77. Perfil Dayton-Wright.
- Figura 78. Resina de poliéster usada para recubrimiento de fibra de vidrio.
- Figura 79. Catalizador para resina de poliéster.
- Figura 80. Fibra de vidrio utilizada para recubrimiento.
- Figura 81. Detalle de las fibras utilizadas.
- Figura 82. Proceso de impregnación de la fibra de vidrio.
- Figura 83. Soportes de aluminio cortados en chorro de agua.
- Figura 84. Corte de los vinilos en el plotter.
- Figura 85. Vinilos preparados para la colocación.

## ÍNDICE DE GRÁFICAS.

Gráfica 1. Relación entre ángulo de ataque y coeficientes drag y lift.

Gráfica 2. Relación modelo de coche- coeficiente aerodinámico

Gráfica 3. Relación ángulo de ataque- coeficiente drag

Gráfica 4. Relación ángulo de ataque coeficiente lift

## ECUACIONES

1. Ecuación de los gases ideales
2. Principio de Bernoulli.
3. Principio de continuidad
4. Cálculo de coeficiente aerodinámico “drag”
5. Cálculo de coeficiente aerodinámico “lift”

## 1. Introducción.

En los últimos años, los deportes de motor han experimentado un aumento en el número de usuarios y aficionados que se interesan por participar en carreras y competiciones, tanto en circuito como en carreteras y trazados de montaña.

La modificación de vehículos de calle, no destinados específicamente a competición se ha visto en aumento por permitir a mayor número de personas introducirse en el mundo de la competición, si bien existen reglamentos que especifican como deben hacerse estas modificaciones, es posible realizar nuevos diseños y prototipos que buscan mejorar la eficiencia y la competitividad de los vehículos.

La competición drift es un modo de conducción que consiste en realizar derrapes, giros rápidos y adelantamientos en curvas a altas velocidades.

La principal característica de este estilo es que los coches utilizados tienen que ser de venta al público general, por lo que no pueden utilizarse vehículos especializados para competición.

El drift se lleva a cabo tanto en pistas urbanas como en circuitos y montañas, por lo que las condiciones de conducción varían en muchos factores de un trazado a otro.

El presente trabajo se centra en el análisis aerodinámico de un coche modelo BMW E36 M3 coupé, introducido en el mercado en el año 1994, y cuyo objetivo principal no era la competición, pero que ha sido modificado para ello. Una vez realizado el análisis, trataremos de diseñar un alerón sencillo que permita ser fabricado con medios al alcance de usuarios no profesionales y mejore las prestaciones aerodinámicas, de velocidad y empuje del coche. En la figura 1 se observa el coche que va a modificarse en este trabajo de fin de grado.



Figura 1 Modelo de BMW que va a analizarse (Fuente:propia).

La estructura que se sigue en el trabajo es la siguiente: Se definen los conceptos aerodinámicos básicos que permitirán entender los puntos de mejora del vehículo que va a analizarse y se estudian las características del modelo específico que se va a ensayar.

Se lleva a cabo el escaneo la superficie de un modelo a escala del vehículo para procesarla y obtener un modelo en 3 dimensiones que permita su estudio por elementos finitos, usando el programa Ansys, se introducen los parámetros del vehículo que se ha estudiado, se simulan los flujos en el vehículo y se obtienen resultados que se interpretan para conocer los puntos de mejora.

Una vez conocidos los aspectos a mejorar, se procede a proponer diseños de un alerón que permita mejorar las características de las zonas más conflictivas, teniendo en cuenta distintos factores y normativas que afectan a estos accesorios.

Se definen materiales y procesos de fabricación, construcción y montaje del prototipo y estética del alerón terminado, así como el proceso de instalación que debería llevarse a cabo.

## 2. Objetivos.

El objetivo del presente trabajo de fin de grado es realizar un alerón para un coche BMW modelo E36 de competición a partir de los datos de un análisis aerodinámico de su carrocería.

Para llevar a cabo este objetivo es necesario dividir las tareas en objetivos más concretos que nos permitan alcanzar el objetivo final de manera sencilla.

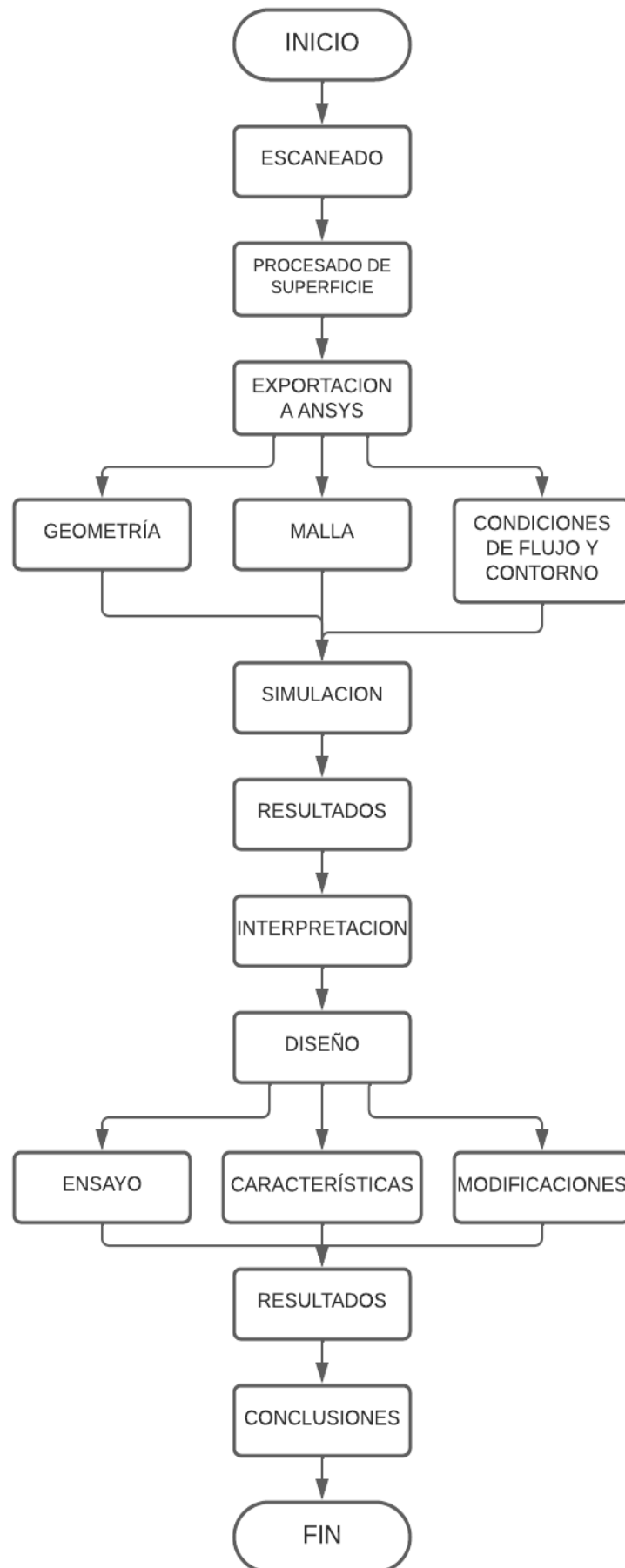
Se establece un orden de trabajo desde la parte teórica, pasando por la parte de análisis hasta la parte de diseño.

Entre los objetivos que se han especificado se encuentran los siguientes:

- Familiarizarse con la teoría y los conceptos aerodinámicos que afectan al rendimiento aerodinámico de un vehículo.
- Analizar mediante el método de elementos finitos los aspectos aerodinámicos de un coche modelo BMW E36 para obtener los puntos conflictivos del vehículo y analizar puntos de mejora en su parte trasera.
- Diseñar un alerón que permita mejorar los aspectos aerodinámicos más débiles y zonas más conflictivas que se han encontrado en el estudio anterior.
- Definir materiales de fabricación, proceso de construcción y montaje del alerón para permitir una fabricación sencilla al alcance de usuarios de deportes de motor no profesionales.

Se establece un flujo de trabajo que ayude a cumplir todos los objetivos que se han establecido y que muestre como se alcanza el objetivo final.





### 3. Marco teórico.

#### 3.1. Conceptos básicos de aerodinámica.

Para realizar el estudio aerodinámico, el primer objetivo es familiarizarse con los conceptos de aerodinámica básica aplicada al análisis de vehículos.

La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que estudia el comportamiento del aire, las fuerzas y momentos que se producen sobre el cuerpo de interés, en nuestro caso, un vehículo (Kundu, Cohen, & David, 2012).

El estudio de la aerodinámica requiere una serie de definiciones básicas y conceptos que se explican a continuación, estos conceptos son los que se van a aplicar más adelante al análisis del vehículo y al diseño del alerón.

##### *a. Fluidos.*

Un fluido puede ser un líquido o un gas, las ecuaciones de movimiento no dependen del estado en el que se encuentre la materia, en el caso del presente análisis, el fluido que se va a estudiar es aire, en condiciones atmosféricas normales y se supone densidad constante. (Houghton, Carpenter, Collicot, & Valentine, 2013).

La ecuación de los Gases ideales relaciona dos propiedades termodinámicas con la presión, esta se describe de la siguiente manera, como vemos en la ecuación 1:

$$p = \rho RT \quad (1)$$

Donde:

$p$  = presión

$\rho$  = densidad

$R$  = Constante

$T$  = Temperatura absoluta

Estas propiedades de presión, temperatura y densidad se van a asumir como propiedades de un punto en el espacio en un instante determinado.

Se asumen también los siguientes principios físicos:

- Principio de Bernoulli:

“En todo fluido ideal incompresible, en régimen laminar que circula por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante durante su recorrido”

El teorema se expresa en la ecuación 2, que se muestra a continuación.

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = cte. \quad (2)$$

Donde  $p$  es la presión estática,  $\rho$  es la densidad del aire y  $v$  es la velocidad del flujo (Ruben Sanchez & Barbosa, 2013)

Se observa en esta ecuación que, si la velocidad aumenta, la presión disminuye.

- Principio de continuidad.

“En todo fluido incompresible, con flujo estacionario, la velocidad en un punto cualquiera de un conducto es inversamente proporcional a la superficie de ese punto”. En la figura 2 se observa el esquema que muestra este principio de manera gráfica.

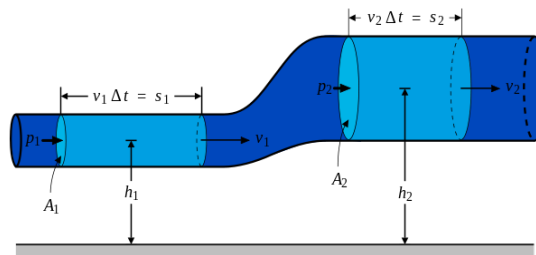


Figura 2 Esquema del principio de continuidad. (Valfonta diseño y fabricación de válvulas, 2022)

Este principio viene expresado por la ecuación 3, que se muestra a continuación:

$$A_1 * V_1 = A_2 * V_2 = cte. \quad (3)$$

Donde  $A$  expresa la sección del conducto en el punto y  $V$  la velocidad en ese tramo.

- Efecto Venturi.

“Un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado disminuye su presión al aumentar la velocidad después de pasar por una zona de menor sección”. Este efecto es importante en el mundo del motor, como se muestra en la figura 3, este efecto es el que se produce en los vehículos cuando el flujo de aire atraviesa la parte inferior o conducciones más estrechas.

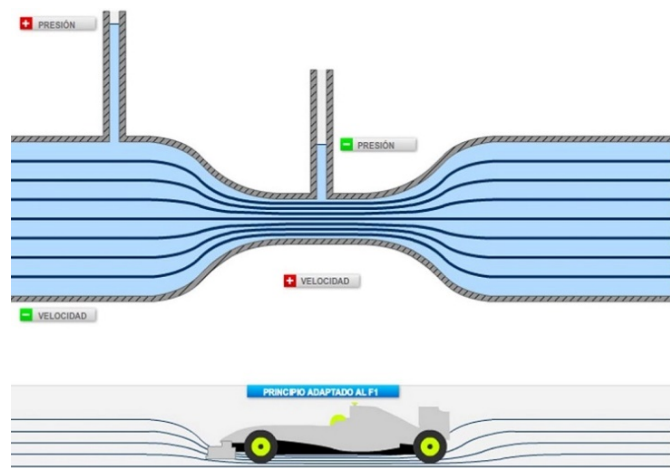


Figura 3 Esquema del efecto Venturi aplicado a vehículos. (Martinez, 2022)

Esto es lo mismo que expresar que cuando aumenta la velocidad de un fluido, su presión disminuye.

*b. Presión.*

En cualquier punto en un fluido, sea líquido o gas, existe una presión, la presión estática, a la que nos referimos como presión, es aquella que se asume como uniforme en todas las direcciones, cuando la presión no es uniforme en todas direcciones en una superficie, la llamamos presión dinámica (Houghton, Carpenter, Collicot, & Valentine, 2013).

*c. Viscosidad.*

La viscosidad es la tendencia de un fluido a resistir el desplazamiento entre capas.

Se diferencian dos coeficientes de viscosidad:

Coefficiente de viscosidad dinámica: También llamada viscosidad absoluta, es una medida directa de la viscosidad de un fluido, de la resistencia de las moléculas al deslizamiento entre ellas.

Coefficiente de viscosidad cinemática: Se trata de una expresión de viscosidad relacionada con la densidad del fluido.

*d. Flujos.*

Los flujos se clasifican de distintas maneras, atendiendo a:

- La velocidad del flujo:
  - Laminar: El movimiento de las partículas del fluido se produce siguiendo trayectorias regulares, separadas y definidas, con capas paralelas entre sí.
  - Turbulento: Las partículas del fluido se mueven en trayectorias erráticas e irregulares, sin orden establecido. La comparación entre ambos flujos se muestra en la figura 4.

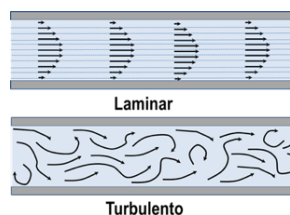


Figura 4. Flujo laminar y turbulento (Noguera, 2022)

- Variación de velocidad con respecto al tiempo:
  - Flujo permanente o estacionario: Las condiciones de velocidad de escurrimiento no cambia con el tiempo.
  - Flujo no permanente: Las características mecánicas y las propiedades del fluido serán diferentes de un punto a otro dentro del campo.

- Magnitud y dirección de la velocidad del fluido:
  - Flujo uniforme: El vector velocidad en todos los puntos es idéntico tanto en magnitud como en dirección para un instante dado.
  - Flujo no uniforme: El valor y la magnitud de la velocidad en un instante dado no coinciden de un punto a otro.
- Efectos del vector velocidad:
  - Rotacional: El campo rota y adquiere valores distintos de cero para cualquier instante.
  - Irrotacional: Dentro del campo del flujo los valores son cero y no se produce rotación.

#### e. Capa límite.

En el seno de un fluido existen regiones delgadas en las proximidades de la entre fases, a esas regiones se les conoce como capas límite, dentro de estas regiones el fluido deja de comportarse como ideal, la viscosidad y la conducción de calor pasan a ser dominantes. En la figura 5 se muestra como se distribuye esta capa límite desde la superficie.

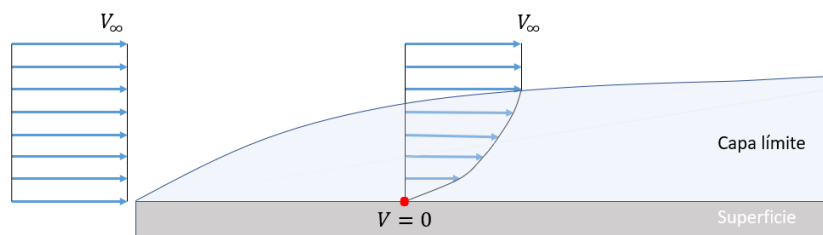


Figura 5. Capa límite (Osma, 2022)

En ocasiones esta capa límite se desprende y el comportamiento no ideal pasa a extenderse a regiones más amplias.

Por esto, las presiones se distribuyen de manera muy distinta a la ideal y resulta en unas fuerzas de presión que denominamos resistencia de forma, si los cuerpos tienen forma fuselada (aerodinámicos o hidrodinámicos) esta capa límite permanece adherida (Peña, 2000). En la figura 6 se muestra el comportamiento que tiene la capa límite en las regiones laminares y turbulentas.

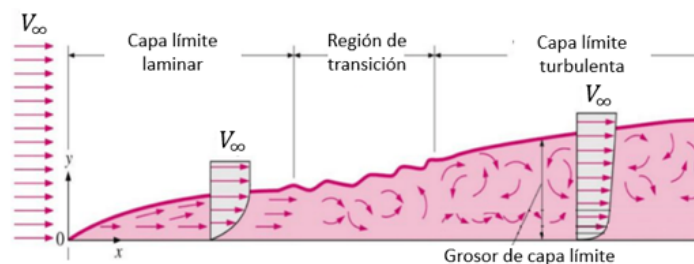


Figura 6. Desprendimiento de capa límite y turbulencia (Connor, 2022)

*f. Fuerzas.*

Cuando el fluido, en este caso el aire, actúa sobre un cuerpo, en el caso de estudio es el vehículo, se producen sobre estas fuerzas que afectan a su dinámica, existen cinco fuerzas que tienen gran importancia en la aerodinámica del vehículo:

- **Weight:** Se trata del peso, es la fuerza que se genera por gravedad y empuja el coche hacia el suelo, se trata de una fuerza favorable en el automóvil, aunque si su valor es elevado, mayor será la fuerza de empuje que hay que realizar para mover el vehículo
- **Empuje:** Fuerza que crea el movimiento de avance del vehículo, debe ser mayor que la fuerza de resistencia, esta es la fuerza que da el motor del vehículo.
- **Drag:** Se trata de una fuerza de resistencia al avance, en dirección a este, pero de sentido contrario, esta resistencia al avance proviene de tres aspectos distintos:
  - **Fricción del fluido:** Al tratarse de un fluido viscoso, se generan fuerzas tangenciales en la superficie del monoplaza que se oponen a su avance.
  - **Generación de carga aerodinámica:** Llamado drag inducido, aparece en cuerpos que generan fuerzas de sustentación.
  - **Distribución de presiones:** Surge por la diferencia de presión entre la parte frontal, donde hay sobrepresión, y la parte posterior, donde hay depresión. Se genera entonces una fuerza que va de la zona de mayor a la de menor presión y se opone al avance del vehículo.

Esta fuerza depende en gran medida de la sección y la forma del perfil del objeto en el que incide el fluido, este efecto puede verse en la figura 7 y se debe tener en cuenta para el diseño del alerón.

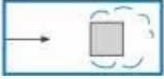

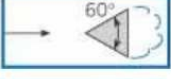
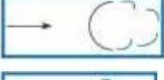


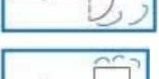
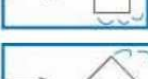


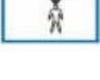
	Type of Body	Length Ratio	Re	C <sub>D</sub>
	Square rod	$\infty$	$>10^4$	2.00
	Square rod	$\infty$	$>10^4$	1.50
	Triangular cylinder	$\infty$	$>10^4$	1.39
	Semicircular Shell	$\infty$	$>10^4$	1.20
	Semicircular Shell	$\infty$	$>10^4$	2.30
	Hemispherical shell		$>10^4$	0.39
	Hemispherical shell		$>10^4$	1.40
	Cube		$>10^4$	1.10
	Cube		$>10^4$	0.81
	Cone—60° vertex		$>10^4$	0.49
	Parachute		$\approx 3 \times 10^7$	1.20

Figura 7. Influencia de la forma en los coeficientes aerodinámicos (Sanchez, Escaño, & Castaño, 2011)

- Lift: Es una fuerza de sustentación vertical que eleva el vehículo, por eso trata de evitarse o reducirse, por eso se trata de crear el efecto contrario, una fuerza en la misma dirección, pero en sentido contrario, llamada downforce o carga aerodinámica, que empuja el vehículo hacia el asfalto. Este downforce se genera por una diferencia de presiones entre la parte superior e inferior de un perfil alar. Es necesario indicar que en nuestro alerón el coeficiente lift tendrá un valor negativo, no obstante, lo usaremos en valor absoluto, sabiendo que la fuerza está siendo generada hacia el suelo, al contrario que sucede en las alas de los aviones.
- Downforce o carga aerodinámica: Es la fuerza que crea el apoyo aerodinámico, se encarga de mantener el contacto entre el neumático y el asfalto. Se trata de una fuerza con un efecto muy influyente en la calidad de la adherencia del vehículo al asfalto, porque si esta fuerza no se genera o no tiene un valor suficiente, puede existir el riesgo de provocar un accidente por deslizamiento del vehículo.

Estas fuerzas pueden expresarse mediante dos ecuaciones muy similares entre sí:

$$D = \frac{1}{2} \rho A C_D V^2 \quad (4)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho A C_L V^2 \quad (5)$$

Donde:

D= Drag

L= Lift

$\rho$ = Densidad del aire

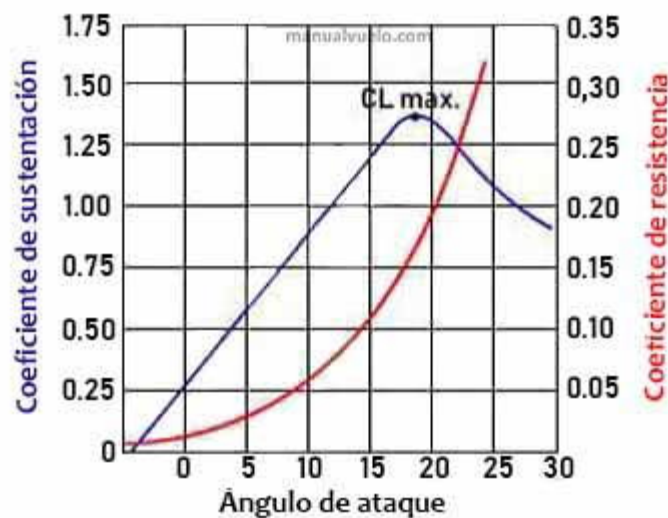
A= Área frontal del vehículo

V= Velocidad a la que circula

$C_D$  y  $C_L$ = Son coeficientes drag y lift

Ambos valores dependen del ángulo de ataque que lleve el alerón, por eso es un factor muy importante para tener en cuenta en el diseño de este.

Comparativamente se puede observar en la gráfica 1 cómo evolucionan los valores de ambos coeficientes según el ángulo de ataque que lleva el perfil del alerón (Navarro, 2022)



Gráfica 1. Relación entre ángulo de ataque y coeficientes drag y lift.



De estas ecuaciones se observa que la velocidad, que se encuentra elevada al cuadrado será el término que mayor influencia tenga en estas fuerzas, esto implica que, a bajas velocidades, el efecto del drag y del lift se ve reducido, mientras que, a altas velocidades, tiene un efecto muy importante, como se observa en la figura 8.

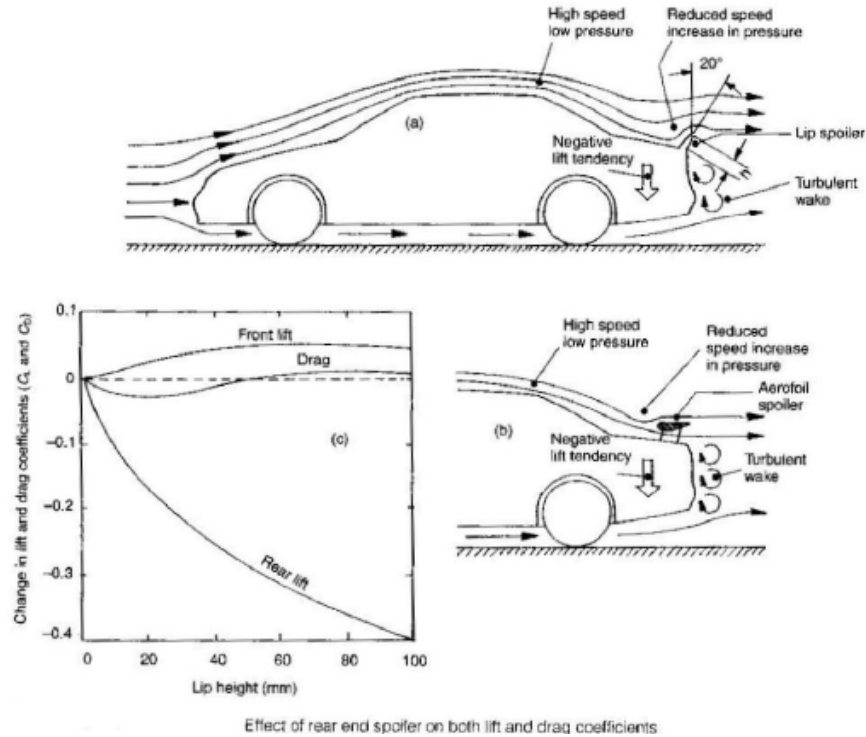


Figura 8. Influencia del alerón en los coeficientes aerodinámicos (Thiaga, 2022)

Los coeficientes  $C_D$  y  $C_L$  dependen de varios parámetros, entre otros la geometría del vehículo, las condiciones del flujo, pero no dependen de manera directa de la velocidad, es por esto por lo que son coeficientes que no varían en el vehículo según su velocidad, sino que se mantienen constantes en cada modelo y por ello sirven para comparar la aerodinámica de dos vehículos.

### 3.2. Historia.

En los inicios del automóvil, no se tenían en cuenta los conceptos aerodinámicos que se han mencionado, los coches y sus carrocerías se diseñaban con el objetivo de proteger a los pasajeros del exterior, la aerodinámica solo se aplicaba de forma estética y solo se tenían en cuenta los parámetros referentes al motor.

La idea de aplicar conceptos aerodinámicos a los vehículos es posterior, cuando se empezó a desarrollar la tecnología de aviones y vehículos aéreos, las formas y curvas que

tenían las aeronaves reducían notablemente el coeficiente lift, lo que permitía incrementar las velocidades frente a formas y carrocerías convencionales.

Los primeros coches con curvas aerodinámicas se realizaron siguiendo las formas de barcos, esto condujo a un fracaso, pues las carreteras permitían únicamente velocidades limitadas y los motores no eran suficientemente potentes, y las formas de los barcos no eran apropiadas para el diseño de automóviles pues otros aspectos de este no se modificaban. Es el caso de los diseños de Ricotti (figura 9), Rumpler (figura 10) o Jaray (figura 11), que desarrollaron aspectos interesantes, pero no llegaron a funcionar de la manera deseada.

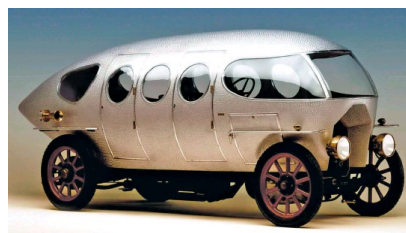


Figura 9. Coche Ricotti. (Pressreader, 2022)



Figura 10. Coche Rumpler. (Sherman, 2022)



Figura 11. Coche Jaray. (Eckhart, 2022)

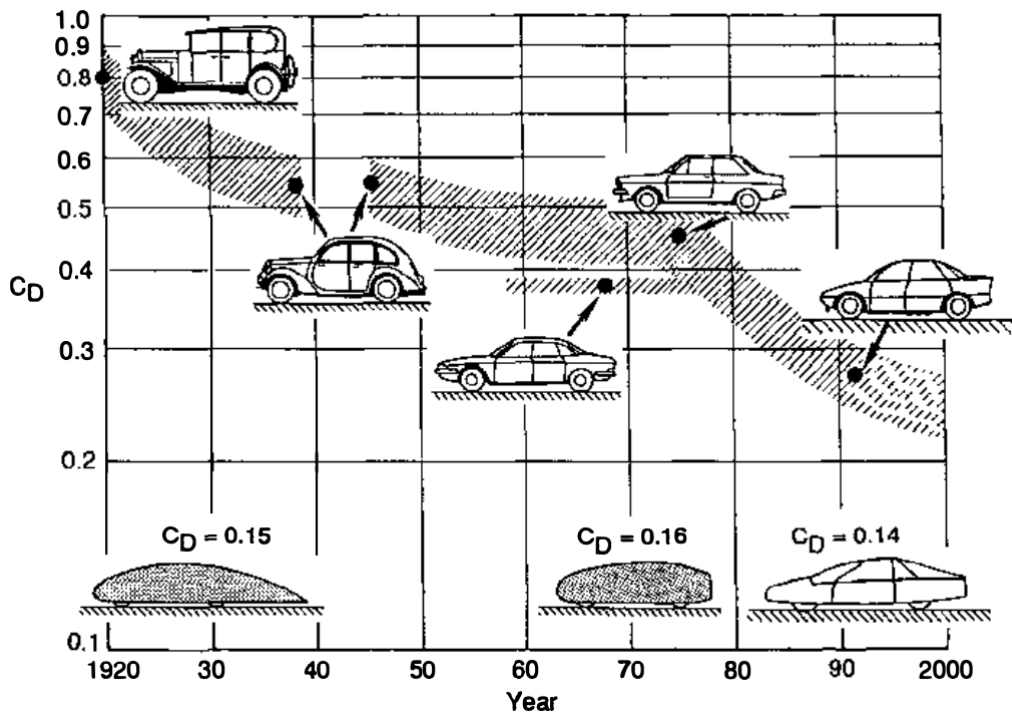
A medida que fueron desarrollándose los conocimientos de aerodinámica en vehículos se aplicaron en las primeras competiciones de automóviles en los años 50, donde los vehículos tenían geometrías pequeñas, estilizadas y con bordes afilados con intención de reducir la resistencia al avance.

La implementación de alerones permitía que se aumentase la velocidad de los vehículos sin que este saliera despedido.

Los intentos de adaptar la aerodinámica a los vehículos fueron avanzando con éxito y se empezaron a implementar en todos los vehículos, con el conocimiento del

funcionamiento de los flujos de aire alrededor del vehículo, la modificación de detalles y el diseño y la optimización de partes añadidas, como alerones o carenados se consiguieron modelos más rápidos, eficientes y potentes.

La evolución histórica de estos aspectos puede observarse en la siguiente gráfica, que, a escala logarítmica muestra como se ha reducido el coeficiente drag en los vehículos de calle.



Gráfica 2. Relación entre el modelo de coche-coeficiente aerodinámico (Hucho, 1993)

En la actualidad, los diseños han avanzado notablemente, el diseño aerodinámico se emplea con especial importancia en competiciones y sectores profesionales como Fórmula 1, donde los coches alcanzan grandes velocidades y tienen gran aprovechamiento de flujos de aire, dando mucha importancia a las formas y las curvas, así como a los accesorios y al cálculo de fuerzas y coeficientes aerodinámicos.

Actualmente, la FIA se encarga de regular la utilización de alerones a nivel competitivo, limita dimensiones, número de piezas y materiales, como es el caso de los coches de competición de Fórmula 1, como el que se muestra en la figura 12.



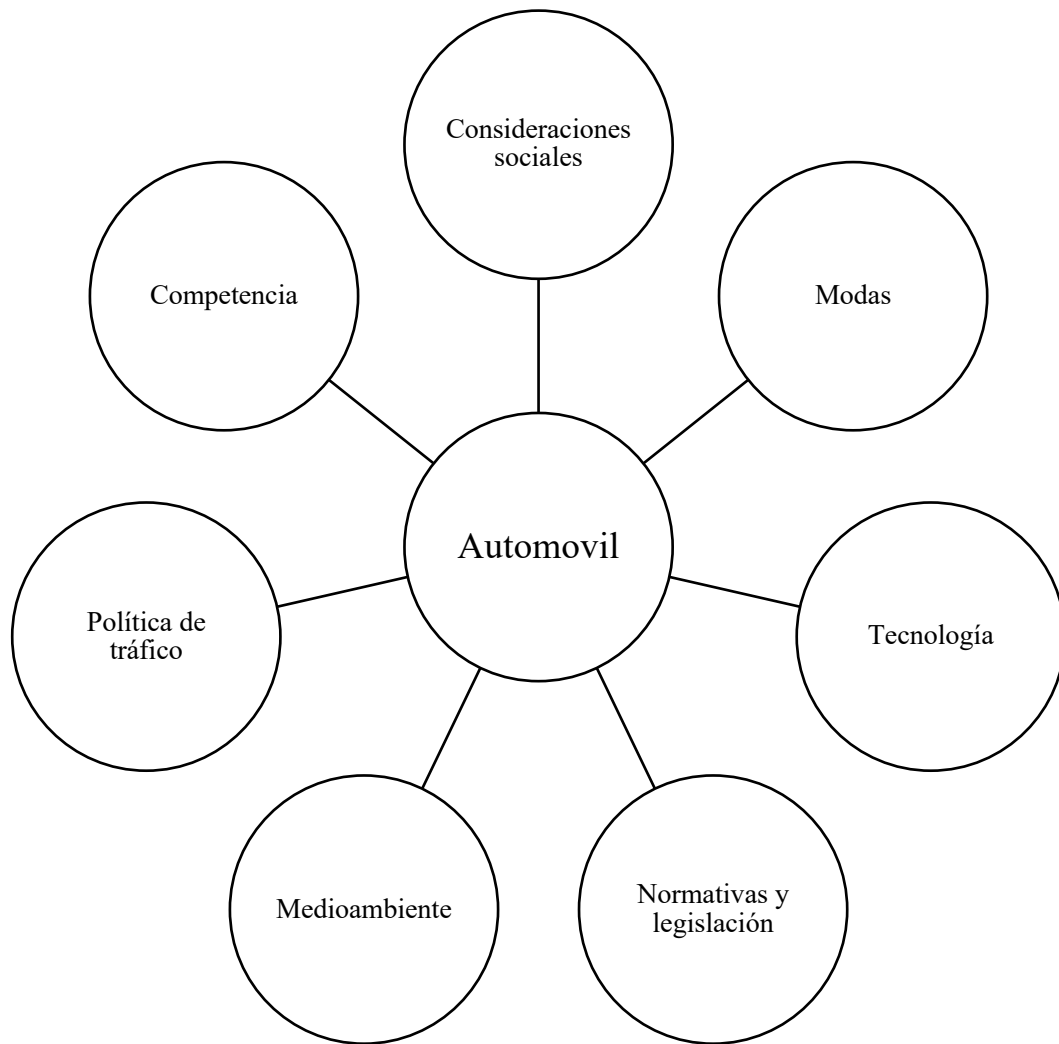
Figura 12. Vehículo de Fórmula 1. (FIA, 2022)

Pero estos conocimientos y avances también se emplean en vehículos de carretera destinado a usuarios comunes, con el fin de mejorar su eficiencia, y su estética, teniendo además en cuenta numerosos factores (Hucho, 1993). Es el caso de los vehículos de la marca Tesla, como el que se muestra en la figura 13, que cuentan con un diseño aerodinámico cuidado y estilizado.



Figura 13. Vehículo de la marca Tesla. (León, 2022)

En el siguiente esquema se muestran los factores más importantes que se tienen en cuenta hoy en día en el sector de la automoción en el diseño y fabricación de vehículos, estos factores deben tenerse en cuenta para llevar a cabo un diseño exitoso de vehículos tanto de calle como de competición.



Normalmente, los prototipos y modelos se ensayaban en túneles de viento y laboratorios especializados, que siguen realizando esos ensayos actualmente en modelos finales antes de su salida al mercado, sin embargo, en las primeras fases del desarrollo, las superficies, elementos y partes diseñadas se analizan utilizando medios digitales. Gracias al desarrollo del análisis por elementos finitos han conseguido llevarse a cabo estudios con mayor profundidad, pudiendo analizar las superficies del vehículo, variando condiciones y factores sin necesidad de construir modelos y prototipos en cada fase. Estos análisis arrojan resultados de gran parecido a la realidad y nos permite conocer el comportamiento del vehículo con precisión.

### **3.3. Análisis por elementos finitos.**

El Análisis de elementos finitos es un método numérico utilizado como herramienta en la ingeniería para representar procesos, y obtener soluciones analíticas que no pueden realizarse de manera sencilla usando expresiones matemáticas.

Este método considera el objeto a analizar un conjunto de partículas de tamaño finito, formulando un sistema de ecuaciones se obtiene el comportamiento de la estructura global.

Estas partículas las llamamos Elementos finitos, y se encuentran interconectadas entre sí por nodos, el proceso por el cual se seleccionan los nodos se llama modelado.

Este método sirve para la resolución de problemas de gran dificultad, con geometrías y superficies complejas como. Las carrocerías de los vehículos. Permite conocer si el objeto funcionará de la manera prevista o fallará durante el servicio.

El proceso básico consiste en dividir el objeto continuo en un número determinado de elementos con una geometría determinada, resolver cada elemento y ensamblar los resultados para obtener la solución total.

Para el análisis aerodinámico se cuenta con un sistema continuo, por lo que el análisis resulta más complejo que un sistema discreto.

Existen numerosos programas destinados al cálculo y análisis de elementos finitos, en el presente trabajo utilizaremos ANSYS, el programa puede dividirse en tres partes:

- Pre-procesador: Se trata del módulo en el que se crea y se define la geometría y el mallado, posee una interfaz gráfica que facilita su uso.
- Procesador: Analiza problemas de carácter lineal y no lineal, transferencia de calor y fluidos, acústica y electromagnetismo
- Post-procesador: Está provisto de una interfaz gráfica que permite visualizar los resultados.

Se debe tener en cuenta al utilizar este programa que la geometría debe estar bien definida y no presentar errores de reconstrucción que pueden arrojar resultados contradictorios o no concluyentes y pueden conducir a realizar diseños no apropiados.

### **3.4. BMW E36**

#### *a. Características principales*

EL coche que se va a estudiar es un BMW E36 M3 coupé del año 1994, la carrocería E36 sustituyó al E30 entre los años 1991 y 1999.

Se trata de un coche de 2 puertas y 4 plazas, con carrocería de aluminio.

Su motor es de combustión interna, de 6 cilindros en línea y 2990 cm<sup>3</sup>, posee 295 CV y su velocidad máxima es de 250km/h alcanza los 100km/h en 5.9 segundos.

Se trata de un vehículo de tracción trasera, tiene cinco marchas y es de transmisión manual.

Las dimensiones principales del vehículo pueden observarse en la figura 14.

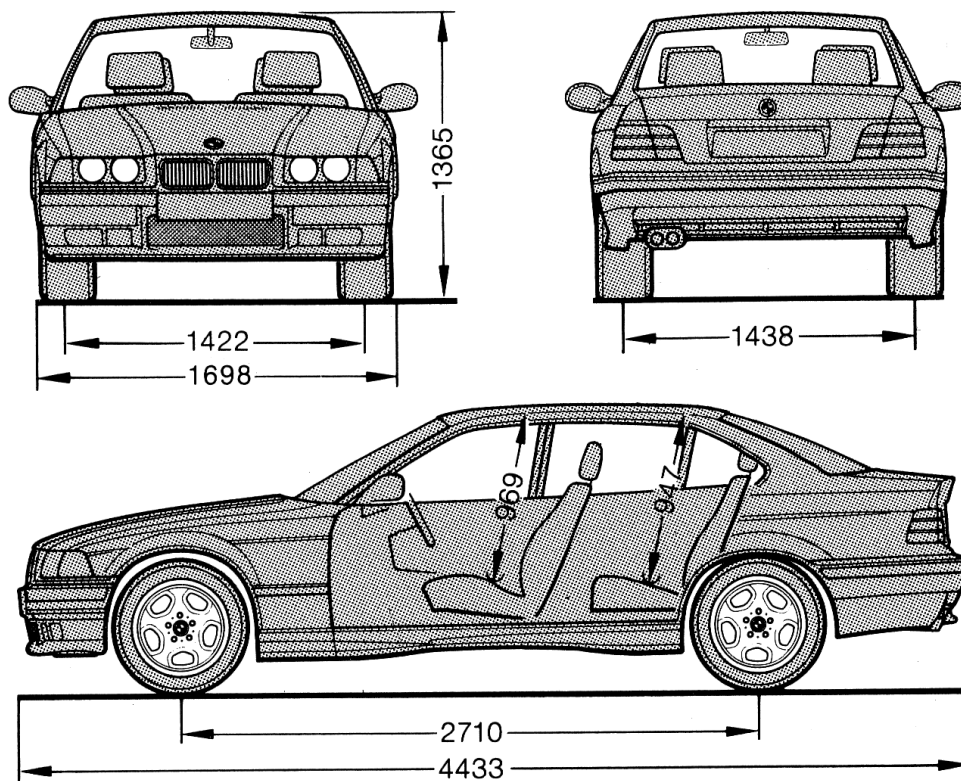


Figura 14. Medidas del coche a estudiar. (Creative Commons, 2022)

- Longitud: 4433 mm
- Anchura: 1698 mm
- Altura: 1365 mm
- Distancia entre ejes: 2710 mm
- Vía delantera: 1422 mm
- Vía trasera: 1438 mm

El coeficiente de arrastre, o drag de este modelo es de 0,32.

Su peso de serie es de 1440 kg, sin embargo, al modelo de estudio se le han retirado las partes no esenciales del interior y se ha sustituido el salpicadero original por un salpicadero de fibra de vidrio. Mas adelante se detallan las modificaciones que se han realizado en el vehículo.

Los cristales se han sustituido también por metacrilato para reducir su peso.

#### *b. BMW E36 en competición.*

BMW ha sido un estandarte en competición y en automoción en general.

Sus modelos BMW E36 M3 han sido unos de los coches de calle pasados a competición con mayor éxito durante la historia, llegando a ganar las 24 horas de Nürburgring en 1998.

Al modelo original se le realizan ciertas modificaciones en su carrocería y en el interior, algunas de las más importantes son:

- Sustitución del salpicadero: El salpicadero original se sustituye por uno de fibra de vidrio para ayudar a reducir el peso total.
- Sustitución de los espejos retrovisores. Se colocan espejos más pequeños, que disminuyan efectos de rozamiento y frenado por el aire.
- Cambio de ventana de vidrio por metacrilato: Se sustituyen los cristales de las puertas por pantallas de metacrilato, lo que ayuda a reducir su peso sin afectar a su visibilidad ni propiedades, pues es un material transparente y resistente. Este cambio también afecta a la seguridad del piloto, porque en caso de accidente no existe la posibilidad de la formación de cristales o bordes cortantes que dañen al piloto.
- Instalación de alerones laterales y traseros: Se utilizan para disminuir los efectos aerodinámicos de drag, que se opone al avance, permitiendo aumentar la eficiencia y la velocidad del vehículo, también tienen fines estéticos.
- Sustitución de asientos de serie por Buckets de competición: Se utilizan para aumentar la seguridad del conductor y el copiloto, van provistos de arneses de seguridad y anclajes para evitar su separación.
- Instalación de barras antivuelco para protección de pilotos: Este sistema se utiliza para proteger el interior en caso de accidente, evitando la deformación y el aplastamiento de la carrocería y protegiendo al piloto y al copiloto de grandes daños.



#### 4. Modelo de estudio.

Vamos a estudiar el modelo BMW E36 M3 Coupé del año 1994, lo primero que se hace es escanear la superficie de un modelo a escala para poder obtener la superficie de manera digital, esa superficie se importa al programa ANSYS para realizar el análisis aerodinámico correspondiente.

La maqueta es una réplica oficial a escala 1:18 de la marca Solido, que se muestra en la figura 15



Figura 15. Modelo que va a escanearse. (Modelcar world, 2022)

##### 4.1. Proceso de escaneado.

Se procede a escanear la superficie del modelo, para ello se usa un escáner 3D Space Spider como el que se muestra en la figura 16, se trata de un escáner de luz azul de alta resolución, que permite captar detalles pequeños con precisión, para luego exportar el modelo 3d a un software CAD.



Figura 16. Escaner Spider. (Universidad politécnica de Cartagena, 2022)

Se trata de un escáner de luz estructurada, proyecta un patrón de luz sobre el objeto y lo graba, las cámaras captan como deforma la luz el objeto y calcula sus dimensiones, obteniendo resultados en tres dimensiones. El diagrama explicativo de la figura 17 muestra el funcionamiento de este sistema.

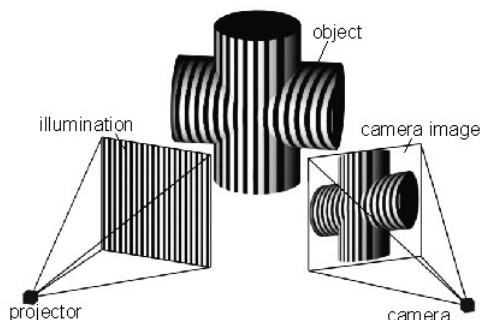


Figura 17. Diagrama explicativo del fundamento de escaneado. (Bitfab, 2022)

a. Preparación del modelo.

Se prepara la maqueta para escanearla, para ello, se desmontan las partes que no resulta interesante escanear, como ruedas, interior y limpiaparabrisas. Esto puede observarse en la figura 18

Se pinta la carrocería con pintura blanco mate para obtener mejores resultados del escaneado de la superficie y se procede a comenzar el escaneo.



Figura 18. Modelo preparado para escanear. (Fuente: Propia)

b. Escaneado.

Se escanea la superficie por partes, barriendo en diferentes tramos el objeto para que quede asegurado que se han cubierto todos los detalles.

Una vez terminado el escaneado se obtienen en el programa los archivos con los fragmentos de la superficie del coche. Algunos de estos fragmentos se muestran en las figuras 19, 20 y 21.

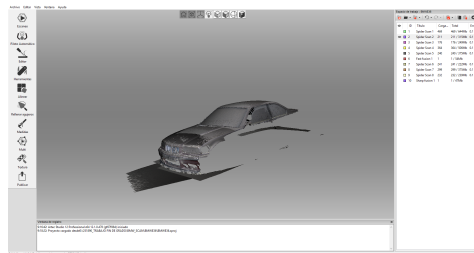


Figura 19. Fragmento frontal-lateral de la superficie. (Fuente: Propia)

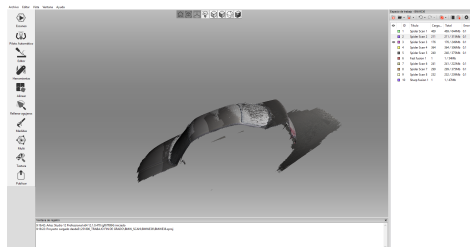


Figura 20. Fragmento lateral de la superficie. (Fuente: Propia)

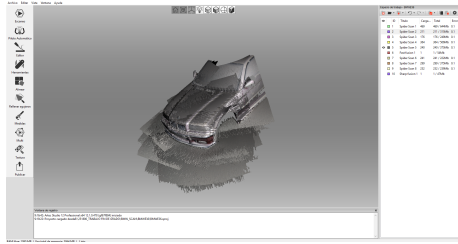


Figura 21. Fragmento frontal de la superficie. (Fuente: Propia)

#### 4.2. Procesado del archivo.

Para obtener un solo archivo con el objeto completo, se deben ir uniendo las superficies, para ello, se asignan puntos coincidentes de una parte a otra y se va realizando el guardado del trabajo, una vez unidos todos los puntos, se obtiene el objeto que se muestra en la figura 22.

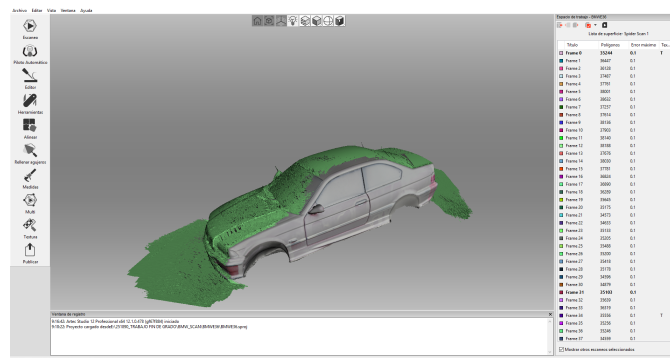


Figura 22. Unión de las superficies generadas. (Fuente: Propia)

Pero este objeto no está finalizado, se observa en la superficie que han quedado defectos y huecos, con el editor, utilizando un pincel 3D se llenan agujeros y se obtiene así el objeto final que se debe exportar. Con las herramientas del editor se borran defectos y partes que se han incluido en el escaneo pero que no corresponden al vehículo, como el suelo. El resultado es el de la figura 23.

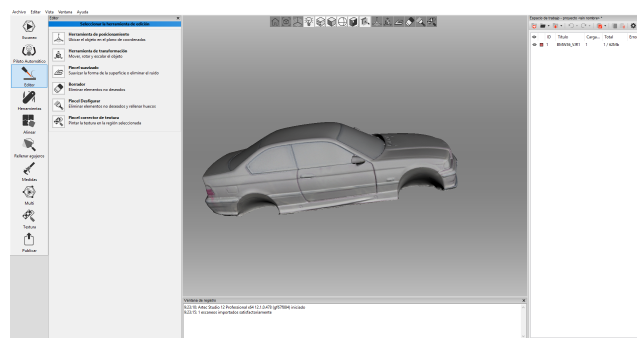


Figura 23. Generación del primer modelo. (Fuente: Propia)

Para rellenar agujeros que no se han rellenado manualmente se selecciona la herramienta correspondiente y activamos las casillas de los agujeros que queremos rellenar. Este proceso se muestra en la figura 24.

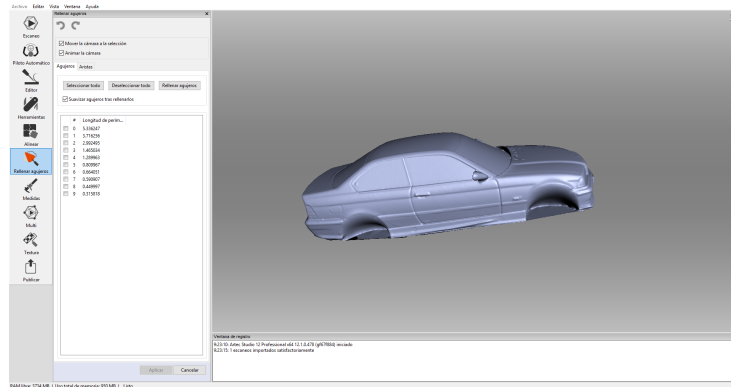


Figura 24. Rellenado de agujeros en el modelo escaneado. (Fuente: Propia)

Procesamos el modelo ya modificado y obtenemos el modelo final mostrado en la figura 25.

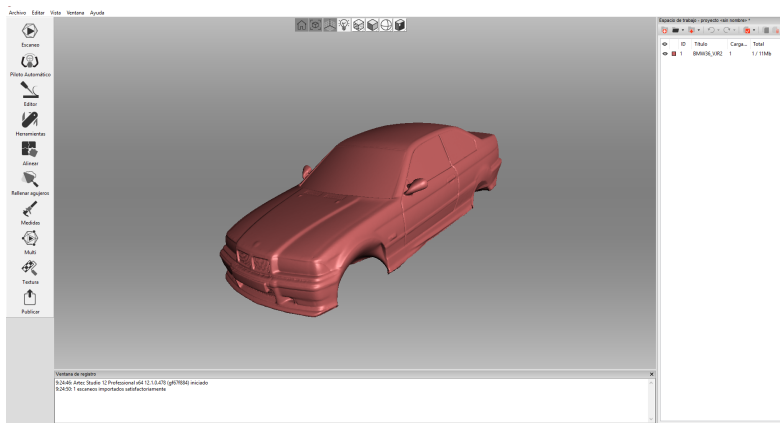


Figura 25. Modelo final obtenido en artcam. (Fuente: Propia)

### 4.3. Exportación a Solidworks

Una vez obtenemos el objeto, este se encuentra en formato .ply, debemos abrir solidworks, desde allí, abriremos el archivo con el complemento geomagic, procederemos a leer la superficie que ha sido generada como una malla y la transformamos en un sólido. El sólido resultante es el de la figura 26.

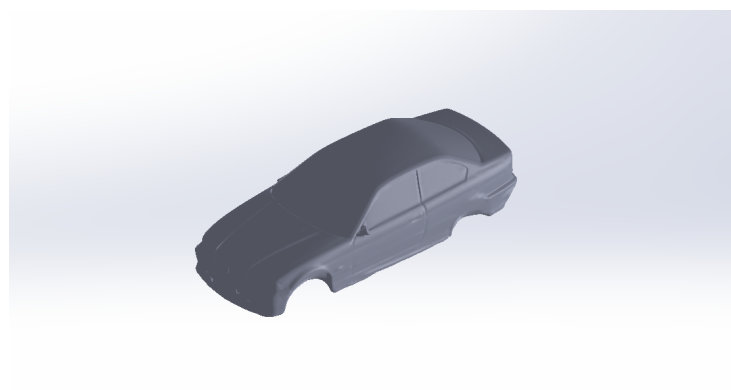


Figura 26. Archivo importado en solidworks. (Fuente: Propia)

A este sólido se le realizan algunas modificaciones en los retrovisores y parte de la carrocería para luego llevar a cabo la exportación a ANSYS.

#### **4.4. Exportación a ANSYS.**

El siguiente paso que se sigue es abrir ANSYS para comenzar un nuevo estudio de fluidos (Módulo fluent), para ello es necesario asegurarse de que el sólido cumpla los siguientes puntos:

- Se encuentra en formato .SLDPRT.
- No tiene errores de construcción, huecos o defectos.
- Está construido a una escala correcta

De esta manera se asegura de que el estudio pueda realizarse sin errores de carácter geométrico y se pueda realizar la malla de la geometría.

## 5. Estudio aerodinámico.

### 5.1. Análisis de fluidos

Se abre una nueva geometría, en ella se importa el sólido que se ha obtenido con solidworks, se comprueba que las dimensiones del objeto sean correctas (la longitud del vehículo es de 4433mm). El sólido importado se muestra en la figura 27.

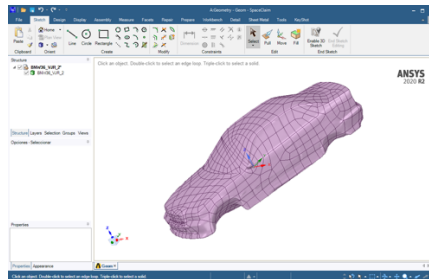


Figura 27. Archivo importado en ANSYS. (Fuente: Propia)

Se genera a su alrededor un paralelepípedo que actuará como “túnel de viento virtual”, se crea un plano que divida el sistema en dos caras simétricas, esto ayuda a simplificar los cálculos y disminuirá el tiempo de procesado, se define en el sólido la cara de entrada o inlet, la cara de salida u outlet, el suelo, y las paredes (figura 28).

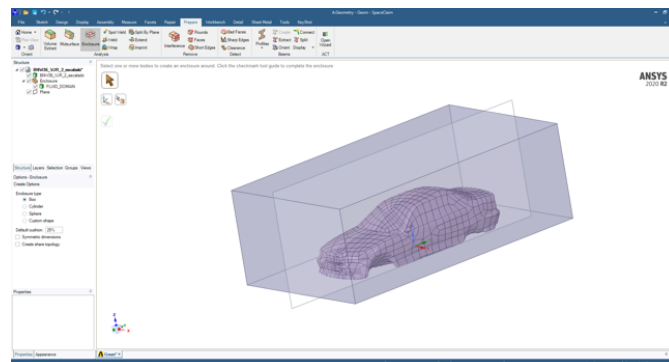


Figura 28. Generación del tunel de viento virtual. (Fuente: Propia)

Ahora se va a realizar una operación de sustracción, se elimina del paralelepípedo el interior correspondiente al coche, así podremos se definen las superficies sobre las que actuará el fluido durante el estudio. (figuras 29 y 30)

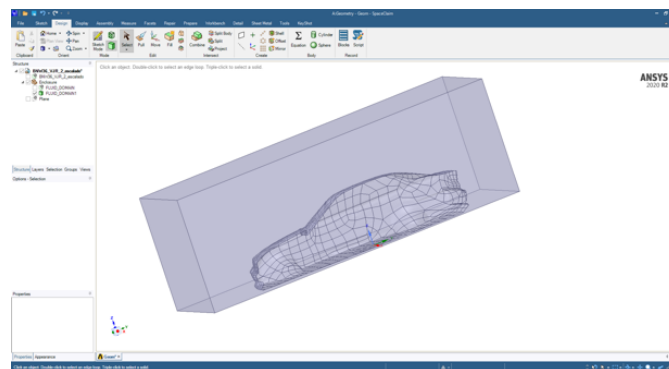


Figura 29. Corte del modelo por plano medio. (Fuente: Propia)

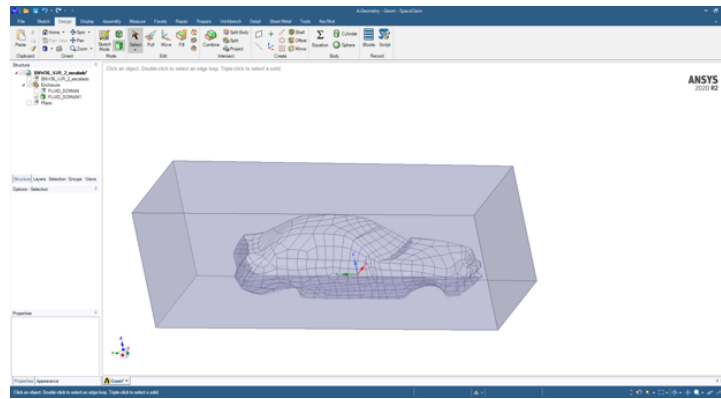


Figura 30. Definición de las superficies de estudio. (Fuente: Propia)

Se cierra el módulo de geometría y se inicia el módulo de mallado.

Lo primero que se hace es importar todo el conjunto que se ha definido en el módulo de geometría anterior, este paso se muestra en la figura 31.

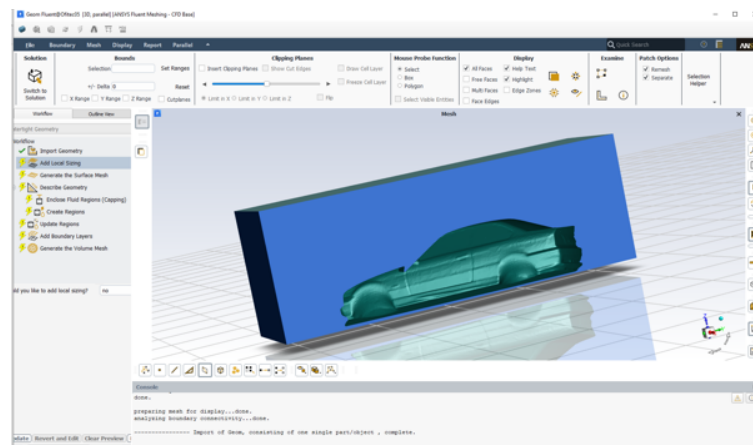


Figura 31. Importación de superficies al módulo de mallado. (Fuente: Propia)

Se genera primero una malla de superficie, para ello, es necesario especificar el tamaño máximo y mínimo de elemento y se selecciona todo el conjunto, dando más importancia a la zona donde se encuentra la superficie del sólido para que la malla sea más precisa. (Figura 32)

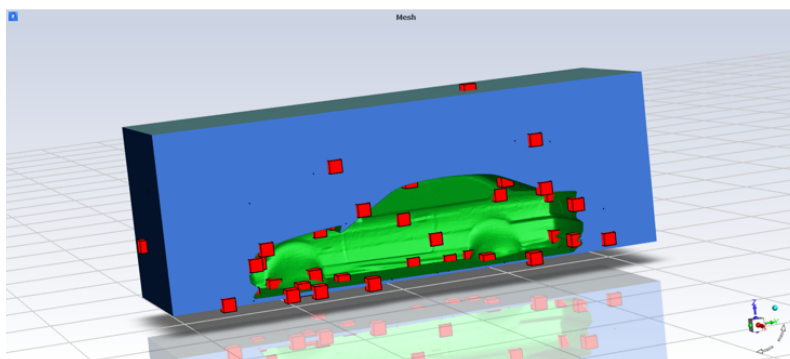


Figura 32. Selección de tamaño de elementos de malla. (Fuente: Propia)

Se ejecuta ese apartado y obtenemos el resultado mostrado a continuación, observamos que el mallado se ha realizado correctamente, los elementos son más pequeños en la zona de la superficie del vehículo y van aumentando su tamaño según se alejan de este y van hacia las fronteras del sistema. (Figura 33)

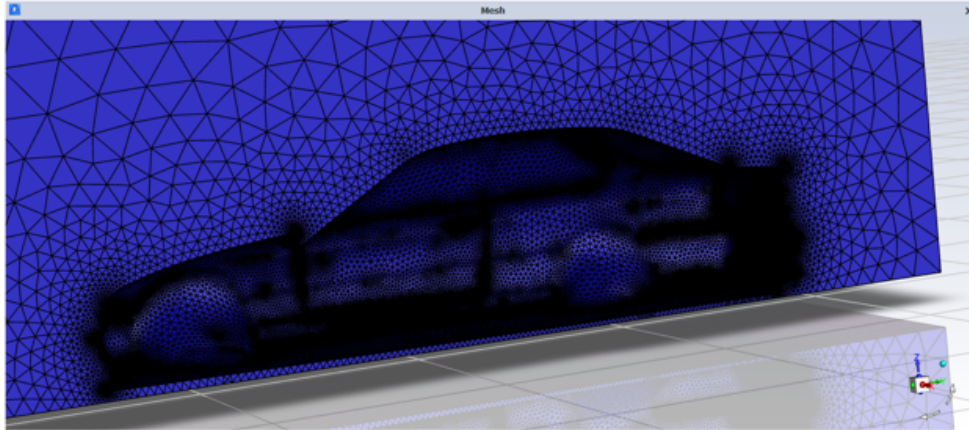


Figura 33. Generación de elementos de malla. (Fuente: Propia)

Para realizar el análisis se debe describir la geometría y especificar en que partes se dan la entrada y salida del fluido, en este caso, la parte frontal será la entrada del fluido y la parte trasera la salida del fluido. (Figuras 34 y 35). El resto de las regiones se describen como paredes, a excepción del plano de simetría, que se suprime para efectos físicos, de esta manera más adelante duplicaremos los resultados obtenidos en el ensayo y obtendremos los del vehículo completo.

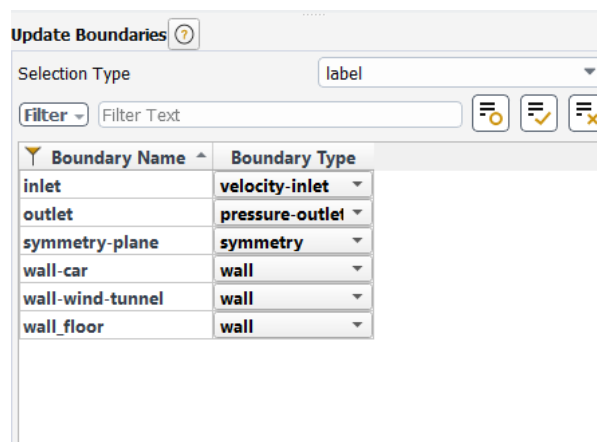


Figura 34. Definición de caras y fronteras del sistema. (Fuente: Propia)



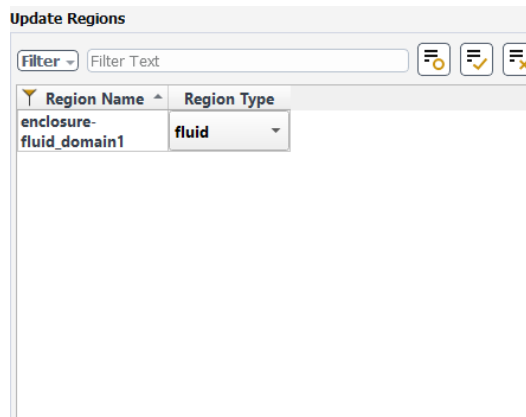


Figura 35. Definición de regiones del fluido. (Fuente: Propia)

Se especifica la región exacta del fluido hasta las paredes. (Figura 36)

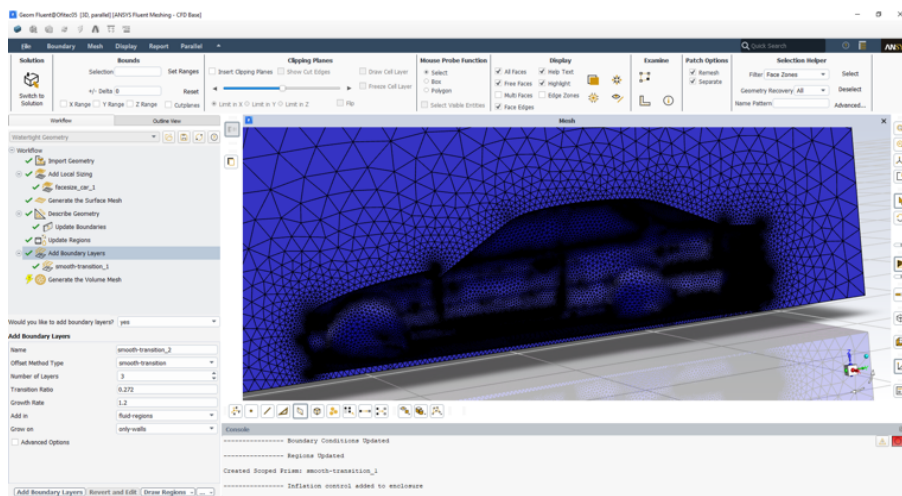


Figura 36. Definición de límites del sistema. (Fuente: Propia)

Por último, se define el tipo de elemento que queremos utilizar para generar el mallado volumétrico el poly-hexcore, este elemento tiene mayor eficiencia que el tetraedro y el hexcore y arroja resultados más exactos. (Figura 37)

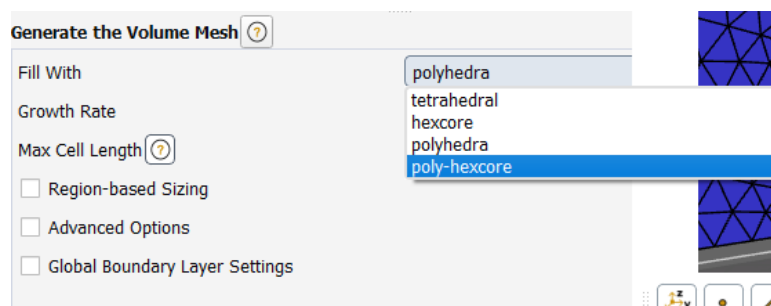


Figura 37. Selección de tipo de elemento de malla. (Fuente: Propia)

Una vez definidos todos los parámetros, se genera la malla volumétrica y se obtiene el siguiente resultado:

Se observa, al igual que en el mallado superficial, que en la zona donde se encuentra el vehículo, el tamaño de elemento es menor, y por lo tanto más preciso, mientras que, en las regiones cercanas a la frontera, el tamaño de elemento es mayor. (Figura 38).

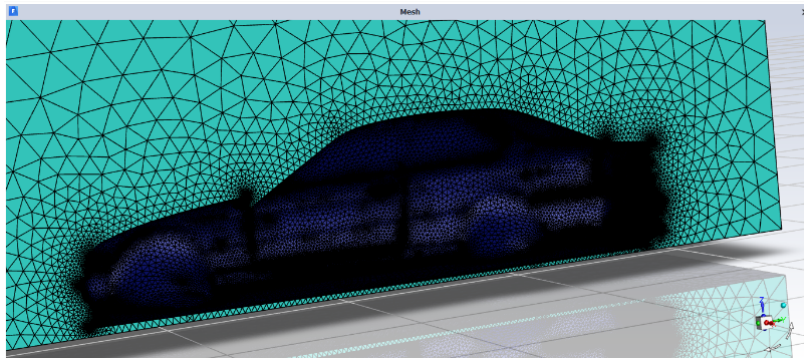


Figura 38. Generación de malla volumétrica. (Fuente: Propia)

Iniciamos el módulo de solución, Se selecciona la opción en la que puedan visualizarse las caras y las aristas para comprobar que el aire entra por la cara frontal y sale por la trasera, como se muestra en la figura 39.

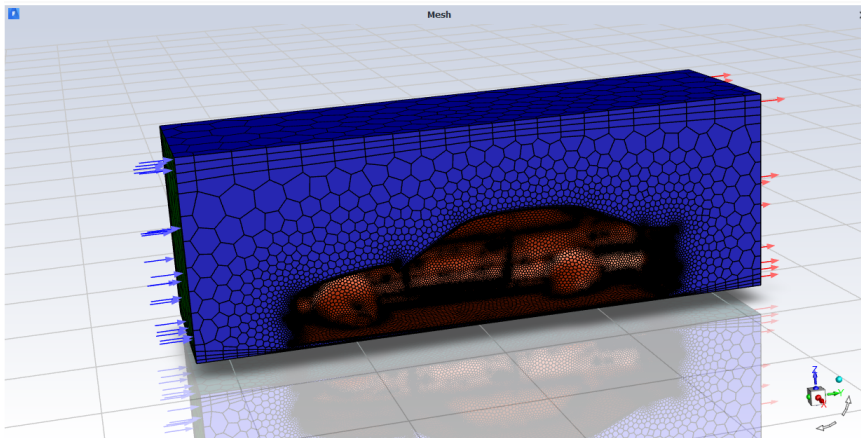


Figura 39. Definición de entrada salida del fluido. (Fuente: Propia)

Ahora se define el fluido de trabajo, aire, por el modelo utilizado, se dan propiedades constantes, tanto de densidad como de viscosidad. (Figura 40)

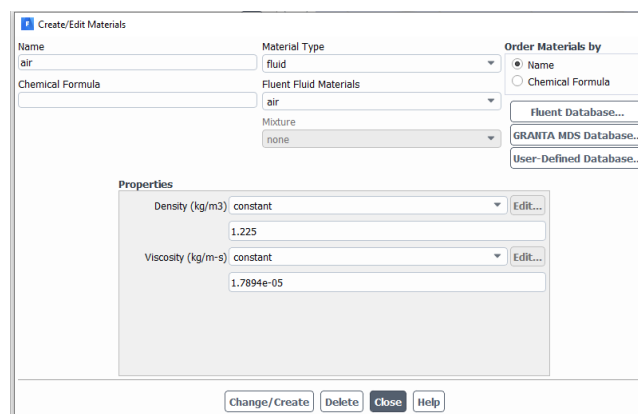


Figura 40. Parámetros de densidad y viscosidad del aire. (Fuente: Propia)

También se tiene que definir el material del vehículo, en este caso aluminio. (Figura 41)

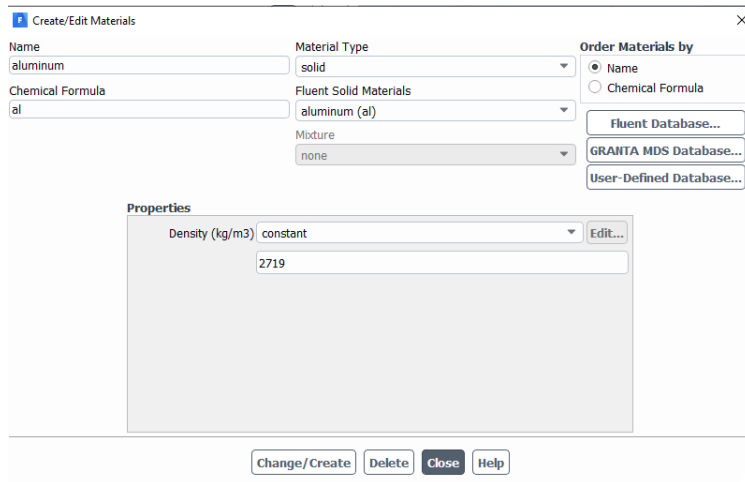


Figura 41. Parámetros del material del vehículo. (Fuente: Propia)

Una vez establecidos los materiales del análisis y sus propiedades se va a definir las condiciones del trabajo, para ello, primero se define la velocidad a 20m/s. Daremos la entrada por la cara frontal, definida como “Inlet”. Se define también la presión como atmosférica. (Figura 42)

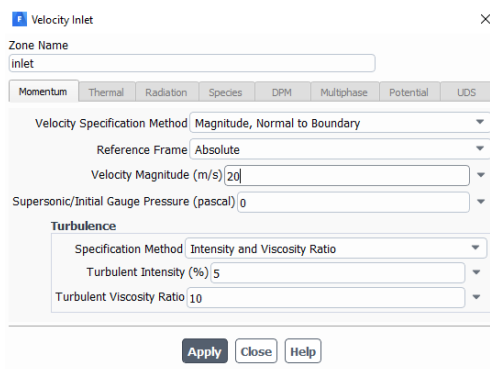


Figura 42. Definición de condiciones de trabajo. (Fuente: Propia)

Se dejan todas las propiedades de cada cara definidas y se pasa a la parte de solución. (Figura 43)

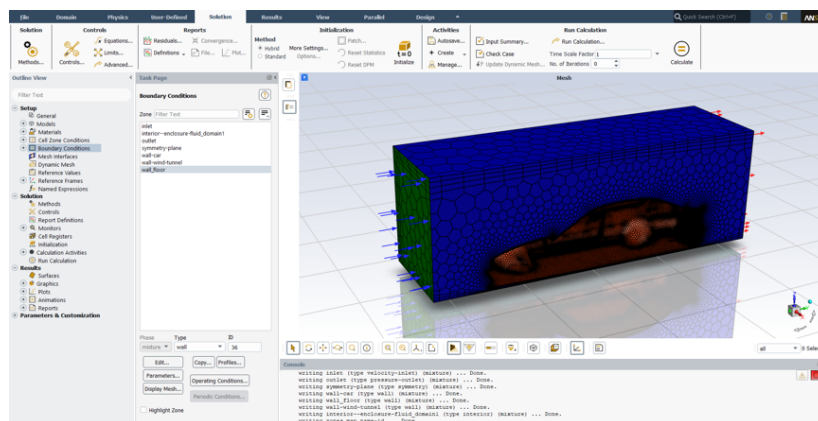


Figura 43. Módulo de solución y resultados de estudio. (Fuente: Propia)

Se seleccionan las dos fuerzas más importantes en la aerodinámica del vehículo, drag o arrastre y lift, también llamada sustentación. (Figura 44)

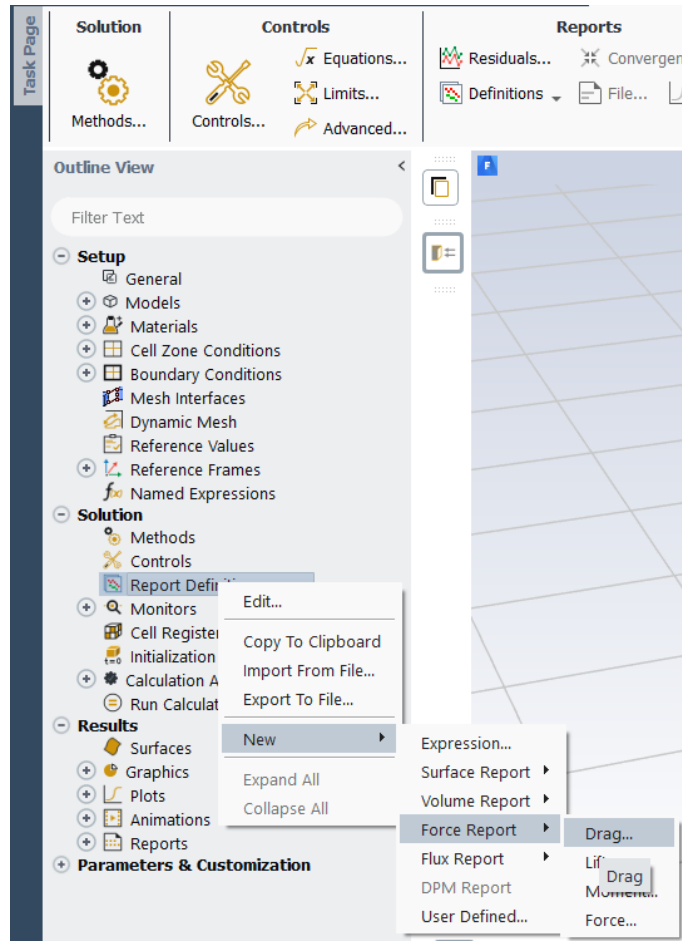


Figura 44. Selección de parámetros a estudiar. (Fuente: Propia)

Se inicia el análisis y una vez terminado el estudio, si el análisis se ha realizado sin errores se muestra el modelo de estudio con paredes de entrada y salida. (Figura 45)

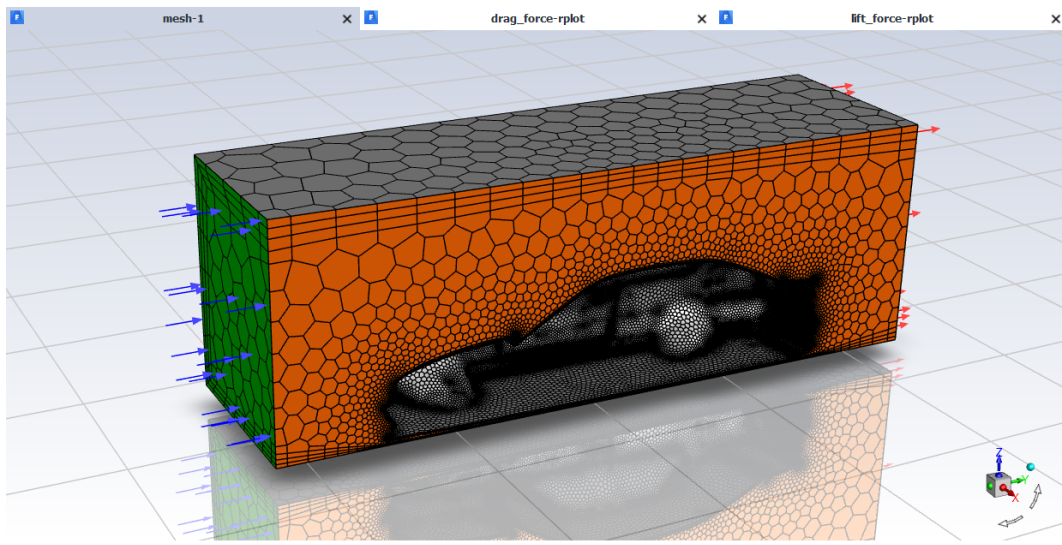


Figura 45. Modelo de estudio completamente definido. (Fuente: Propia)

## 5.2. Resultados.

Una vez realizados los cálculos, se abre el post-procesado, se debe configurar la visualización de las soluciones, es necesario conocer cómo se comportan la velocidad y si existe zonas de mayor turbulencia, para ello se necesita configurar tres tipos de soluciones:

- Vectores: Muestran la dirección y el sentido que lleva la velocidad en cada punto de estudio del vehículo.
- Contornos: Muestran en continuo las regiones del vehículo con un código de colores que nos indica donde hay mayor y menor velocidad.
- Líneas de flujo: Estas líneas sirven para conocer cómo se comporta una partícula de aire desde un punto al comienzo hasta el final del recorrido, se puede dar un punto de inicio, o un conjunto de puntos en forma de línea o plano.

Para la interpretación de resultados se van a crear zonas diferenciadas para referirnos a ellas de manera determinada. Se muestran señaladas en la figura 46.

Las zonas A y B se encuentran en la parte frontal.

La región C abarca la parte delantera de la luna y parte superior del vehículo.

La región D abarca la parte trasera superior y la luneta trasera.

La región E abarca la zona posterior del vehículo

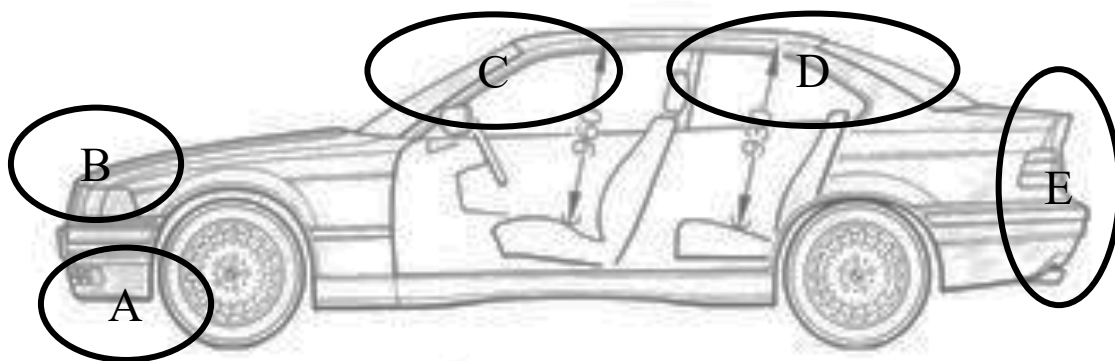


Figura 46. Zonas conflictivas encontradas en el estudio. (Fuente: Propia)

### a. Velocidades.

Los resultados que se obtienen muestran que se produce un aumento de la velocidad en las zonas A y B, en la parte inferior delantera del vehículo, en las partes C y D se producen también aumentos de velocidad, los vectores muestran la misma dirección y sentido que el flujo, por lo tanto, no se producen frenados en esa zona. (Figura 47).

Se encuentra una zona conflictiva en la zona E, donde los vectores de velocidad disminuyen en magnitud y cambian su dirección, por lo tanto, se produce frenado.



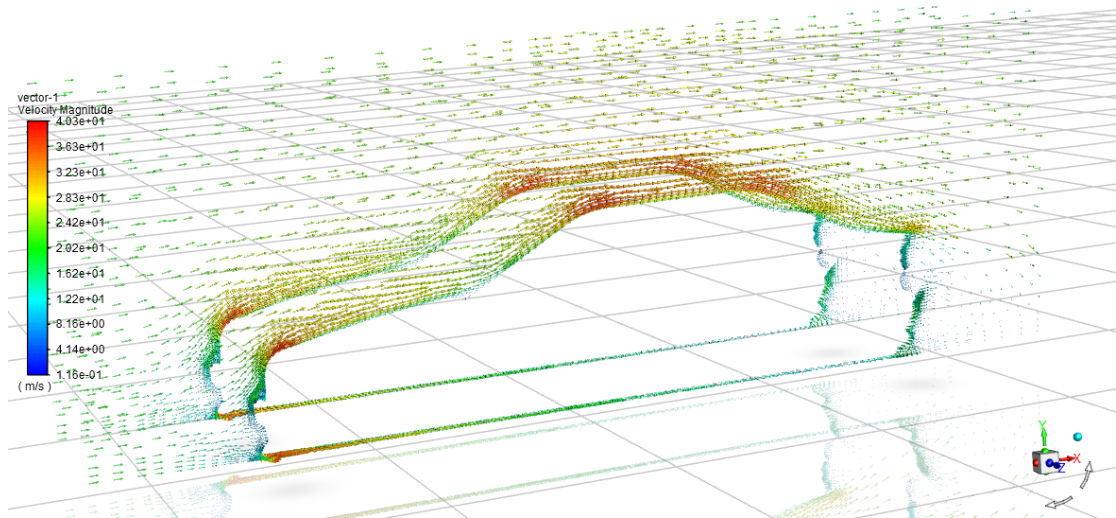


Figura 47. Mapa de vectores de velocidad del vehículo. (Fuente: Propia)

En el análisis por contornos este efecto es mucho más visual, se observa que se produce un descenso de velocidad en la zona posterior, este descenso se debe al efecto “drag” o arrastre que se ha mencionado anteriormente. (Figura 48)

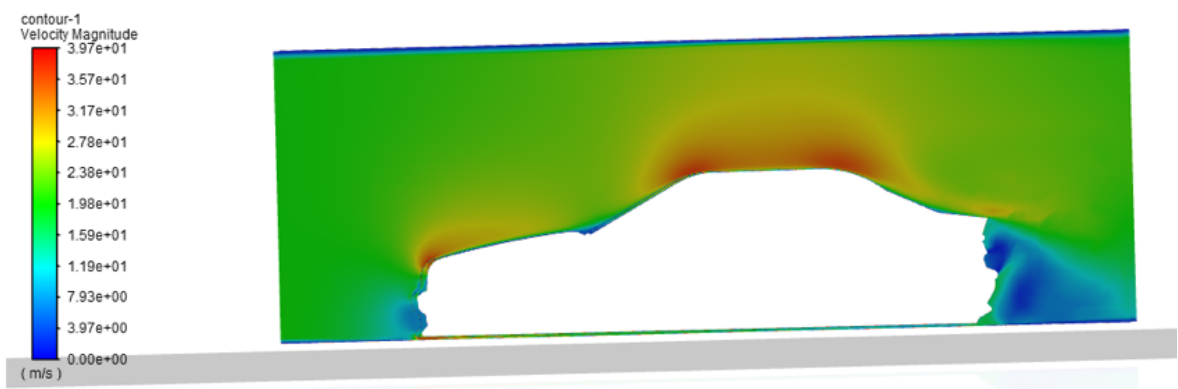


Figura 48. Mapa de velocidades del vehículo. (Fuente: Propia)

Si se analiza el vehículo siguiendo la trayectoria del fluido vemos que las partículas siguen trayectorias uniformes desde la parte frontal del vehículo (zona B) hasta la zona D, produciéndose un aumento de la velocidad de 20 m/s a 39.7 m/s en las zonas de mayor aumento. (Figura 49).

En la zona E, sin embargo, se produce como se ha visto en los resultados comentados anteriormente, un descenso de la velocidad y un cambio de dirección de la velocidad, generando una zona de frenada.

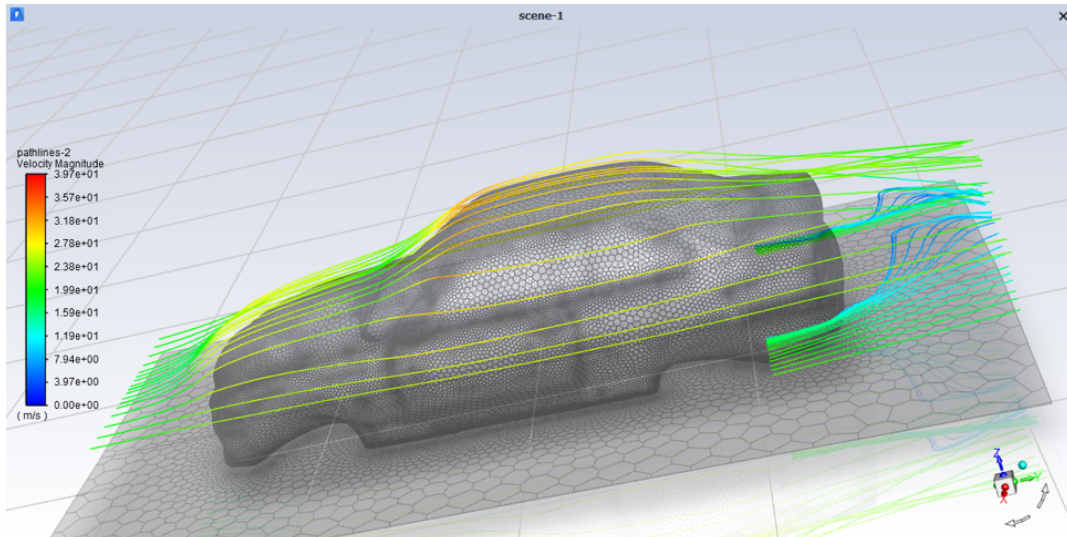


Figura 49. Mapa de trayectorias de partículas. (Fuente: Propia)

b. Turbulencia.

Se analizan también las zonas de turbulencia que pudieran producirse y se encuentra una única zona, la zona E, donde se produce un flujo turbulento que coincide con la zona donde se produce la fuerza de arrastre que da la mayor fuerza de drag. (Figuras 50 y 51)

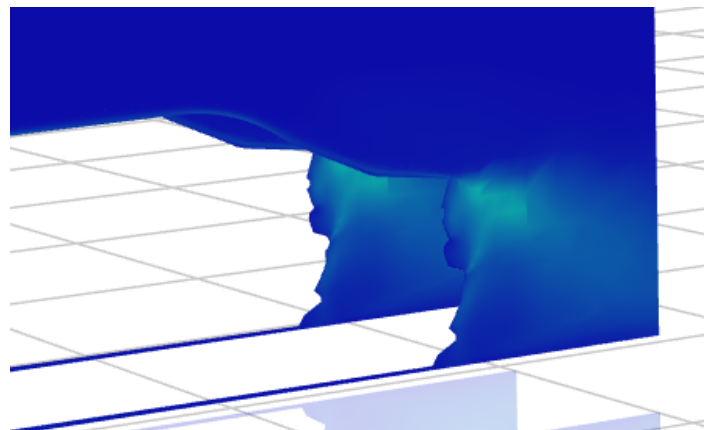


Figura 50. Mapa de turbulencias. (Fuente: Propia)

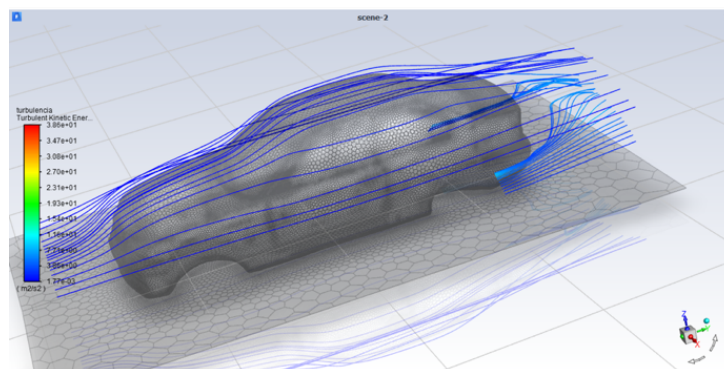


Figura 51. Mapa de trayectorias de partículas turbulentas. (Fuente: Propia)

### **5.3. Puntos de mejora.**

En función de los resultados obtenidos, se observa que existe una zona susceptible de mejora.

En la zona E se producen tanto las mayores frenadas como los flujos más turbulentos, es por esto por lo que será la zona escogida para mejorar.

Para ello se decide diseñar un alerón que permita distribuir mejor el flujo de manera que:

- Se generen fuerzas de carga aerodinámica que mejoren el agarre del vehículo al suelo.
- Se reduzcan las zonas turbulentas.
- Los vectores de velocidad no se reduzcan en su magnitud.
- La dirección de los vectores de velocidad no cambie y se produzca frenada.

Para ello vamos a realizar un estudio de los tipos de alerones que existen y los que se encuentran en el mercado, así como su comportamiento.



## 6. Diseño del alerón

### 6.1. Concepto de alerón y funcionamiento.

El alerón es un elemento aerodinámico del vehículo cuyo principal objetivo es realizar una fuerza de anti-sustentación o carga aerodinámica que impida que el vehículo se despegue, también tiene como objetivo disminuir la aparición de drag sobre el vehículo y generar la menor turbulencia posible.

#### a. Perfil alar.

El perfil alar es la forma que resulta de realizar un corte transversal al alerón, está compuesto por diferentes partes, entre ellas:

- Superficie alar: se trata del área total del alerón.
- Borde de ataque: Es la parte delantera, donde el radio de curvatura del alerón es el máximo
- Borde de salida: Es la parte trasera del alerón, donde se unen las superficies interior y exterior del perfil.
- Intradós: Es la superficie interior del ala
- Extradós: Es la superficie exterior del ala.
- Envergadura: Es la distancia de punta a punta del ala.
- Cuerda: Es la línea que une el borde de ataque con el borde de salida.

Estas partes se muestran en la figura 52.

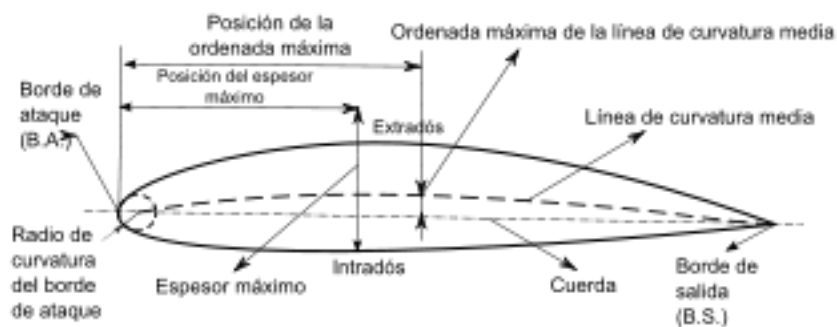


Figura 52. Partes del perfil alar. (Vituorino & Labriola, 2017)

- Ángulo de ataque: Es el ángulo formado entre la cuerda y la dirección de la corriente de aire. Figura 53.

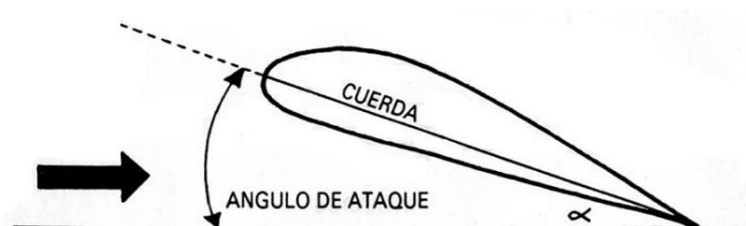


Figura 53. Ángulo de ataque de un ala. (Ramos & Pérez, 2022)

*b. Funcionamiento.*

El alerón es un ala invertida no simétrica, por tanto, las partículas de aire que circulan en la parte superior o extradós, tendrán que hacer un recorrido menor que aquellas que circulan por el intradós, por tanto, estas últimas, tendrán menor velocidad que las que circulan por el exterior.

La diferencia de velocidad de las partículas del intradós y el extradós genera una variación de presiones en el perfil del alerón, la presión mayor se genera en la parte superior, y, por lo tanto, se genera una presión negativa hacia abajo, la fuerza generada hacia abajo es la carga aerodinámica y es la que permite que el vehículo no se despegue del asfalto.

**6.2. Requisitos y normativa.**

Para agregar un dispositivo aerodinámico a un vehículo destinado a competición que sea de carácter superior a la carrocería o de remplazo al dispositivo original (alergones de serie) deben tenerse en cuenta una serie de requisitos, así como unas normas reguladas por la FIA (Fédération Internationale de l'Automobile, 2022)

El dispositivo deberá estar compuesto por:

- Perfil alar
- Soporte de ángulo
- Placas laterales en los extremos del perfil alar.
- Soportes verticales entre la carrocería y el perfil.

Las normas impuestas por la FIA para el diseño y la fabricación de un alerón son las siguientes:

- El material de fabricación del alerón debe ser compuesto, salvo el material de los soportes verticales, que debe tratarse de un material metálico.
- La cuerda máxima del perfil alar debe ser de 300mm.
- Las placas laterales deben tener un grosor máximo de 10mm, si tienen los bordes redondeados, el radio mínimo debe ser 5mm y este debe mantenerse constante.
- El conjunto de perfil alar, soporte y placas debe caber en una caja de 1800x450x150mm
- Los soportes verticales deben estar unidos al chasis, y la distancia entre soportes verticales y placas laterales debe ser mínimo de 100mm
- El punto más alto del alerón no puede ser más alto que el punto más alto del techo del vehículo.

### 6.3. Tipos de trazado.

Aunque el vehículo está destinado a la competición drift, existen varios trazados donde pueden realizarse este tipo de competiciones, es importante que se realice una clasificación para intentar determinar qué tipo de alerón conviene usar en cada trazado.

Aspectos que debemos tener en cuenta:

- Tanto el coeficiente del vehículo como el ángulo de ataque no deben verse modificados pues se buscan aquellos que corresponden con los valores óptimos.
- Para cada tipo de trazado se debe tener en cuenta que factor queremos potenciar, ya sea adherencia a pista, aumento/disminución de empuje aerodinámico...

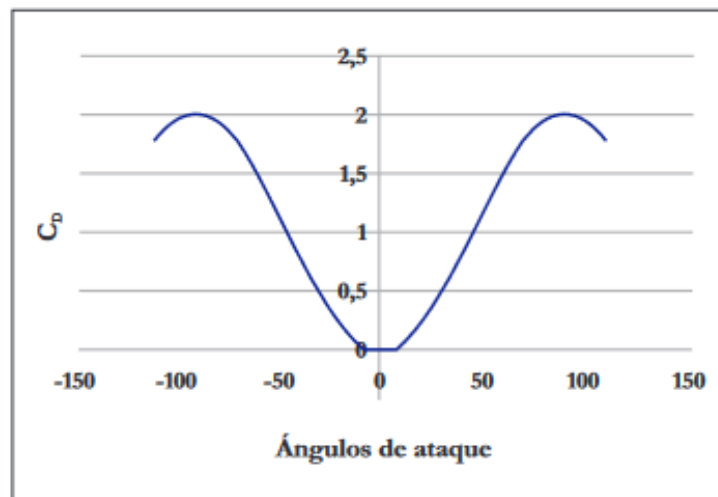
Tipo de trazado	Coeficiente	Ángulo de ataque	Factor	Aspectos a tener en cuenta
Circuito	0.32	18°	Velocidad	En las pruebas de circuito las competiciones suelen llevarse a cabo entre varios coches, el objetivo primordial es realizar adelantamientos para eliminar al oponente, por lo que el factor de velocidad es el más importante.
Montaña	0.32	18°	Empuje	En las pruebas de montaña el objetivo principal es acabar el trazado en el menor tiempo posible.
Urbano	0.32	18°	Adherencia	Los circuitos urbanos suelen destinarse a la realización de exhibiciones, realizando salidas, derrapes o trazado de obstáculos, por lo que el factor de adherencia del vehículo es muy importante.

#### 6.4. Cálculo del perfil.

Se necesita establecer los parámetros de ángulo de ataque, cuerda y envergadura.

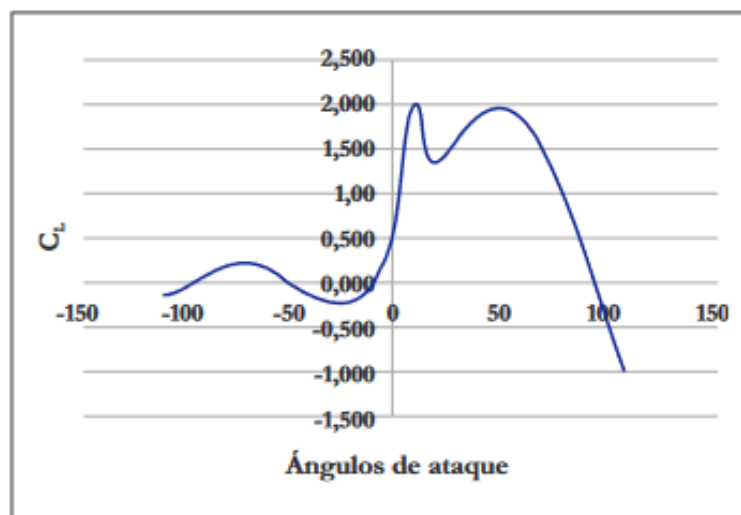
##### a. Ángulo de ataque.

Se sabe por los datos del fabricante que el coeficiente drag del vehículo es de 0,32, no obstante, este coeficiente puede verse afectado por el ángulo de ataque.



Gráfica 3. Relación ángulo de ataque- coeficiente drag

En ángulo de ataque influye también en el coeficiente de carga aerodinámica, que es el responsable de que el vehículo se mantenga pegado al asfalto, como se ha mencionado anteriormente, este valor corresponde al coeficiente lift o de sustentación, pero en sentido contrario, pues el alerón es un ala invertida.



Gráfica 4. Relación ángulo de ataque coeficiente lift

- Si el ángulo de ataque es pequeño, el coeficiente se reduce.
- Según aumenta el ángulo de ataque, el coeficiente aumenta también.

- Llegado a un ángulo determinado, el coeficiente alcanza un máximo, y a partir de ahí, el valor decrece. Ese ángulo se denomina ángulo de ataque crítico.

El ángulo de ataque crítico se encuentra normalmente entre los 18 y 20°

En el alerón de serie del BMW E36, el valor del ángulo de ataque es de 18° por lo tanto se va a tomar ese ángulo para el alerón que va a diseñarse.

#### *b. Cuerda.*

Para seleccionar el valor de la cuerda del vehículo se tiene en cuenta el valor de la cuerda del alerón de serie del BMW E36, originalmente la cuerda es de 230mm, se va a mantener con la dimensión de serie.

#### *c. Envergadura.*

La envergadura se encuentra entre 800mm y 1300mm, la envergadura del alerón original es de 1100 mm.

Con los datos definidos:

Angulo de ataque 18°

Envergadura: 800-1300 mm

Cuerda: 230 mm

Se va a utilizar el programa Airfoil Tools que nos permite generar, basándose en los datos definidos, una serie de perfiles normalizados para diseñar el alerón.

### **6.5. Obtención de perfiles.**

Se utiliza el programa mencionado para la obtención de perfiles aerodinámicos normalizados, se obtienen como válidos 58 perfiles con las dimensiones que se han establecido, ahora debemos llevar a cabo un proceso de eliminación, se establecen criterios más selectivos, se escogen perfiles que cumplan los siguientes requisitos:

1. Perfiles no experimentales: Se descartan 2 perfiles.
2. Perfiles con intradós y extradós con forma curva: Se descartan 17 perfiles.
3. Curvas que no posean curvatura compleja difícil de fabricar: Se descartan 15 perfiles.
4. Perfiles de poco grosor respecto a la cuerda: Se descartan 21 perfiles.
5. Perfiles que cumplan las dimensiones y el reglamento establecido: Los tres perfiles restantes cumplen con las dimensiones y el reglamento establecido, por definición, se han obtenido utilizando las medidas necesarias.

Los perfiles seleccionados son:

- Dayton-Wright 6, para el trazado de circuito.

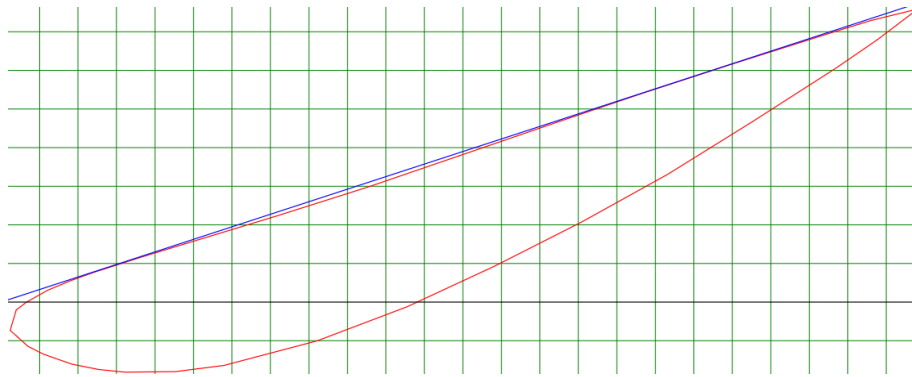


Figura 54. Perfil alar Dayton Wright. Extraído de Airfoil Tools

- AH 81-K-144 W-F Klappe, para el trazado urbano

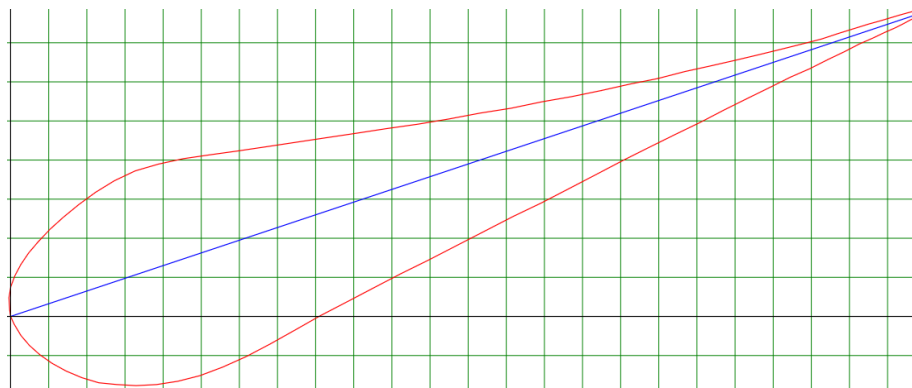


Figura 55. Perfil alar AH81-K-144 W-F-KLAPPE. Extraído de Airfoil Tools

- FX 69-PR-281, para el trazado de montaña

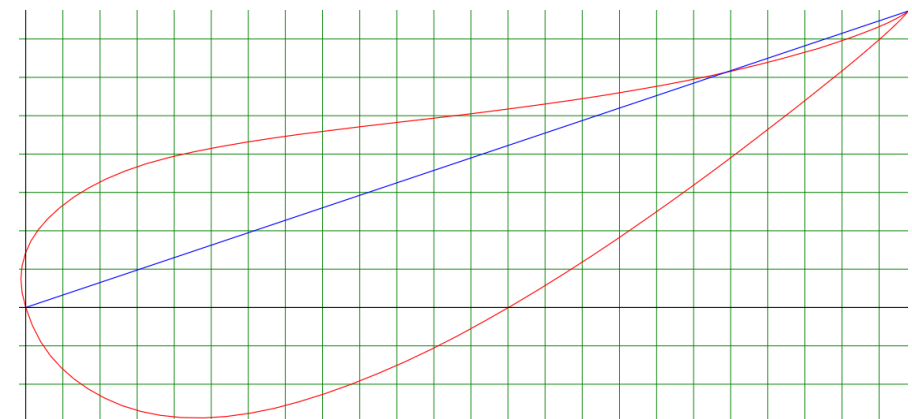


Figura 56. Perfil alar FX 69-PR-281. Extraído de Airfoil Tools

Se construye cada uno en SolidWorks, se importan los perfiles del programa donde se han obtenido y se extruye cada uno por plano medio a 1300 mm para obtener una idea principal de cómo sería el ala dando la envergadura deseada.

- Alerón Dayton:

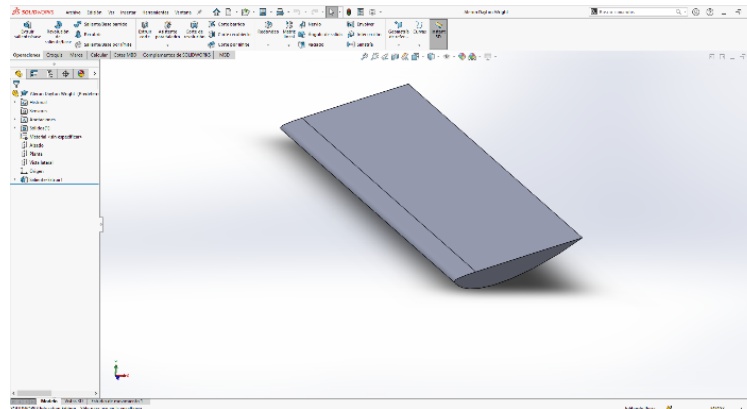


Figura 57. Alerón Dayton-Wright en solidworks. (Fuente: propia)

- Alerón AH 81-K-144 W-F Klappe:

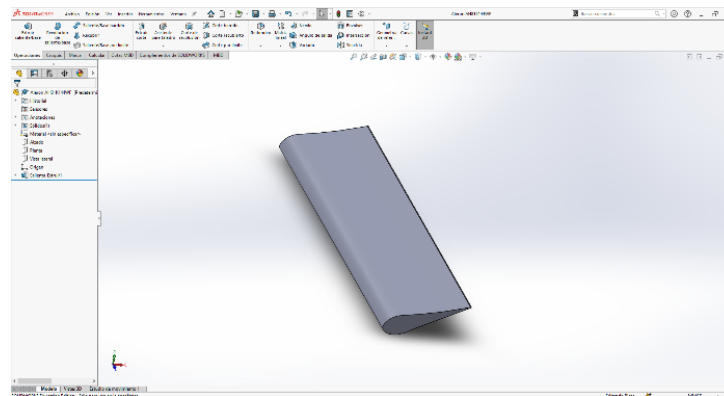


Figura 58. Alerón AH-81-k-144 W-F Klappe en solidworks. (Fuente: propia)

- Alerón FX 69-PR-281:

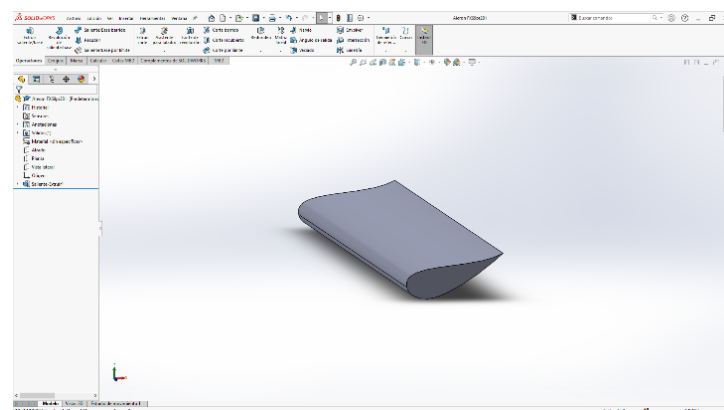


Figura 59. Alerón FX 69-PR-281 en solidworks. (Fuente: propia)

## 6.6. Diseños.

Para diseñar el alerón se parte de las condiciones necesarias impuestas por normativa, y los perfiles válidos obtenidos en Airfoil Tools, se realizan una serie de diseños preliminares y se lleva a cabo una lluvia de ideas para generar distintas soluciones.

Después de haber realizado la lluvia de ideas tenemos varias alternativas principales:

- *Alerón con ángulo variable y regulación hidráulica:*

Se trata de un alerón que puede regular en ángulo de ataque según la velocidad, el primer diseño se realiza con un perfil convencional, colocando dos suspensiones en los soportes del alerón para regular el ángulo, el alerón está realizado en espuma recubierta con fibra de poliéster y los soportes y perfiles son de chapa de acero de 5mm de espesor. Se muestra un boceto en la figura 60.

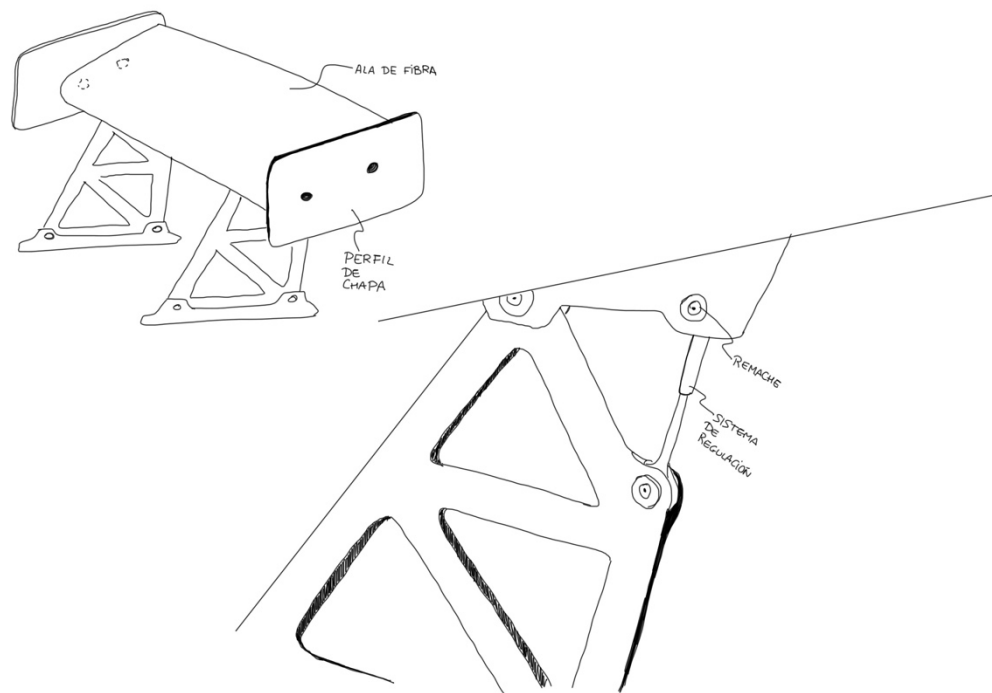


Figura 60. Boceto del alerón variable. (Fuente: propia)

Se descarta esta idea por las siguientes razones:

- Al nivel de competición al que está destinado, no aporta grandes ventajas respecto a la dificultad de su fabricación.
- El ángulo óptimo de ataque del perfil alar en el rango de velocidades que se alcanzan en este tipo de competiciones es de  $18^\circ$ , por lo que no conlleva ventajas que el ángulo pueda regularse.
- El coste de fabricación es alto por los componentes y el proceso que lleva.
- Intercambiar los perfiles sería complicado, por la dificultad de montaje y desmontaje del sistema se fabricaría solo de un perfil y se pierde la opción de intercambiabilidad según el tipo de trazado.



- *Alerón fijo con placas laterales anchas:*  
Se trata de un diseño de alerón con dos placas laterales anchas que permitan definir con mayor precisión la entrada de aire, el perfil alar está fabricado en espuma y los perfiles laterales y los soportes están fabricados con chapa de acero de 5mm.  
Se descarta este diseño por el aumento de peso que se da por aumentar el tamaño de los perfiles
- *Alerón de doble perfil:*  
Se trata de un alerón que combina dos perfiles distintos, con el mismo coeficiente, pero en dos ángulos de ataque ligeramente distintos, se fabrican los perfiles con espuma de poliuretano y se recubren con poliéster. Esta idea está dibujada en la figura 61.

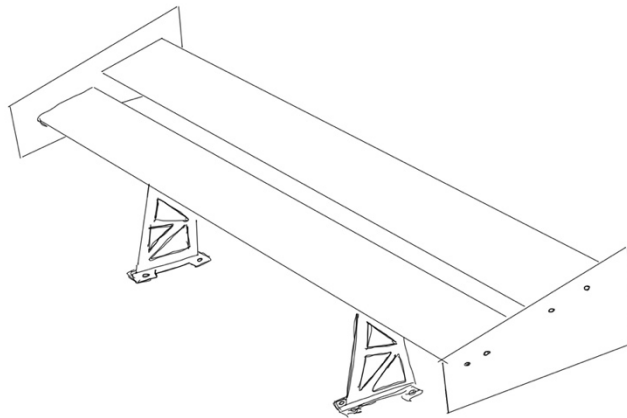


Figura 61. Boceto del alerón doble. (Fuente: propia)

Se descarta esta idea por la complejidad de fabricación que se da para anclar los dos perfiles alineados y manteniendo la distancia correcta. Además, el funcionamiento aerodinámico y el ensayo es más complejo y el coste de fabricación mayor.

- *Alerón de un perfil intercambiable:*  
Esta idea surge del diseño de un alerón convencional, de perfil normal y una sola ala, sin embargo, se obtienen tres perfiles válidos con los datos que se tienen del ensayo y se decide diseñar un alerón que permita intercambiar el perfil alar. Esto permitirá tener la ventaja que ofrece la intercambiabilidad de los perfiles según el tipo de trazado en el que se lleve a cabo la competición.

## 6.7. Diseño final.

Se ha elegido desarrollar el diseño de alerón de perfiles intercambiables por la sencillez de fabricación, el buen funcionamiento aerodinámico, y el bajo coste.

Aunque se conoce el modelo que se va a fabricar, es necesario saber cómo se va a llevar a cabo, que partes va a tener y que sistema de montaje se va a utilizar, así como los materiales.

Se generan varias soluciones posibles y se plantean distintas formas de montaje, se debe ver qué ventajas y desventajas lleva cada una para seleccionar la mejor.

### *Solución posible 1:*

Se realiza el perfil alar ensamblando varios perfiles de espuma de 50mm de grosor con dos varillas guía que además van a servir en los extremos para asegurar el conjunto y aportar rigidez, dentro de estos perfiles de espuma se incluyen dos perfiles metálicos con salientes que permitirán realizar los anclajes a los soportes, de esta manera se facilita la fabricación del conjunto, se aumenta su rigidez y su resistencia, pero también su peso.

### *Solución posible 2:*

La solución que se plantea es realizar el ala de la misma manera que se realizan las estructuras alares de los aviones, realizando un esqueleto armado y rellenando los huecos con espuma y modelando la forma para después realizar el recubrimiento con fibra de vidrio o carbono para otorgarle más resistencia al conjunto. Esta opción es más compleja de fabricar y no proporciona un aumento considerable de la resistencia del alerón en comparación con otras formas propuestas.

### *Solución posible 3:*

Se plantea un ensamblaje de láminas de espuma con refuerzos de contrachapado en las zonas intermedias y dos refuerzos mayores con perfiles de acero en las zonas donde se encuentran los soportes. Se une todo el conjunto colocando dos varillas de acero y se realiza el recubrimiento del conjunto con fibra de vidrio o de carbono. Es una opción sencilla de fabricar y mucho más resistente en comparación con las otras opciones propuestas.

Por lo tanto, se va a desarrollar la solución 3, correspondiente al alerón fabricado con perfiles de espuma y contrachapado con refuerzos de perfiles de acero.

## 6.8. Forma definitiva.

Antes de fabricar los prototipos, se debe definir bien cómo va a ser el modelo.

### *Soportes:*

Van a ser universales, se modela en solidworks un perfil de aluminio de 10mm, como se busca resistencia y ligereza, se quita el material que no aporte resistencia en zonas que no trabajan ni se ven sometidas a esfuerzos. Se va a realizar ensamblando el soporte vertical con el soporte inferior que irá atornillado al vehículo.

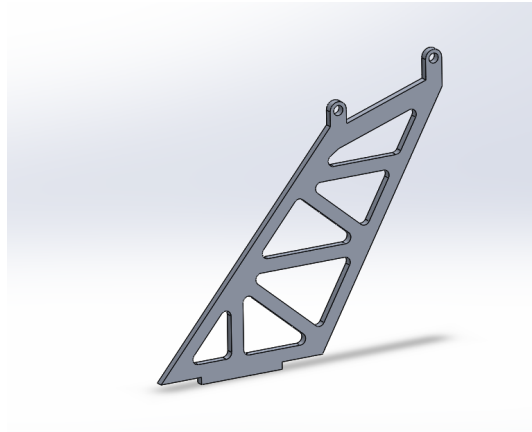


Figura 62. Soporte de alerón. (Fuente: propia)

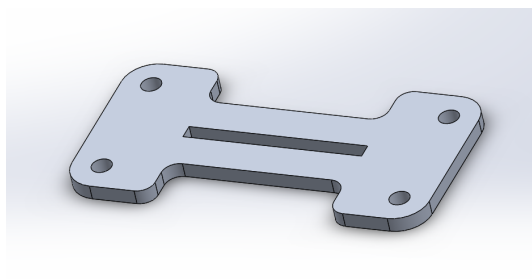


Figura 63. Base de unión de soporte y vehículo. (Fuente: propia)

### *Placas laterales:*

Las placas van a realizarse con mayor anchura, lo que permitirá dirigir el flujo de aire hacia el perfil alar, se diseñan con un espesor de 3mm.

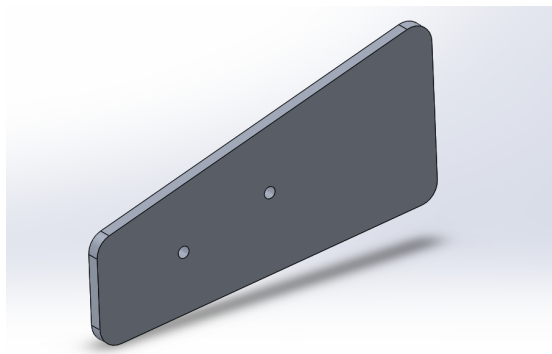
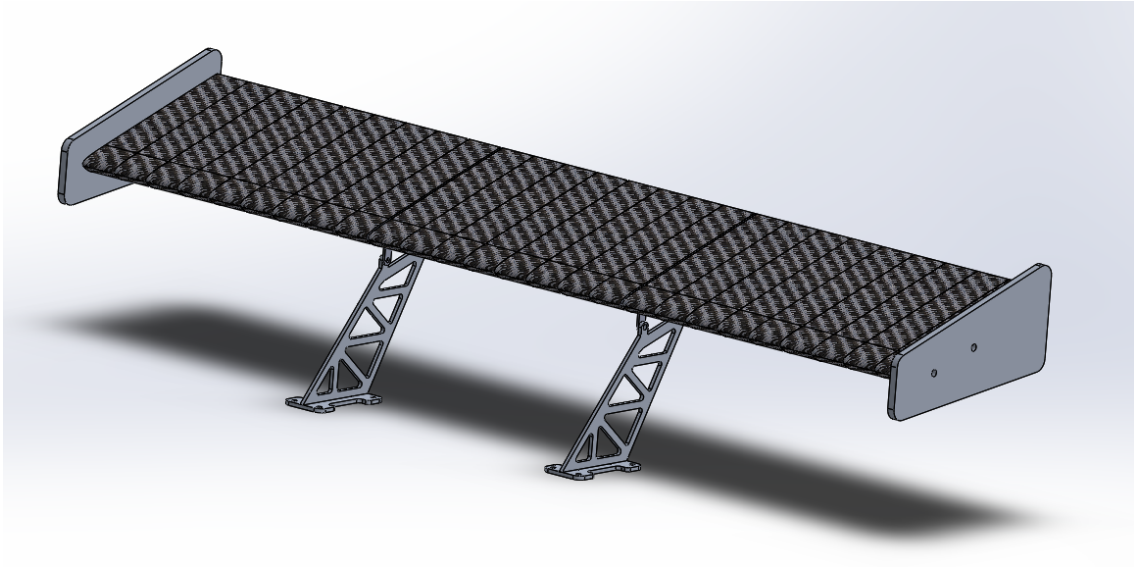


Figura 64. Placa lateral del alerón. (Fuente: propia)

*Perfil alar:*

Se utilizan los tres perfiles que se han seleccionado como óptimos.

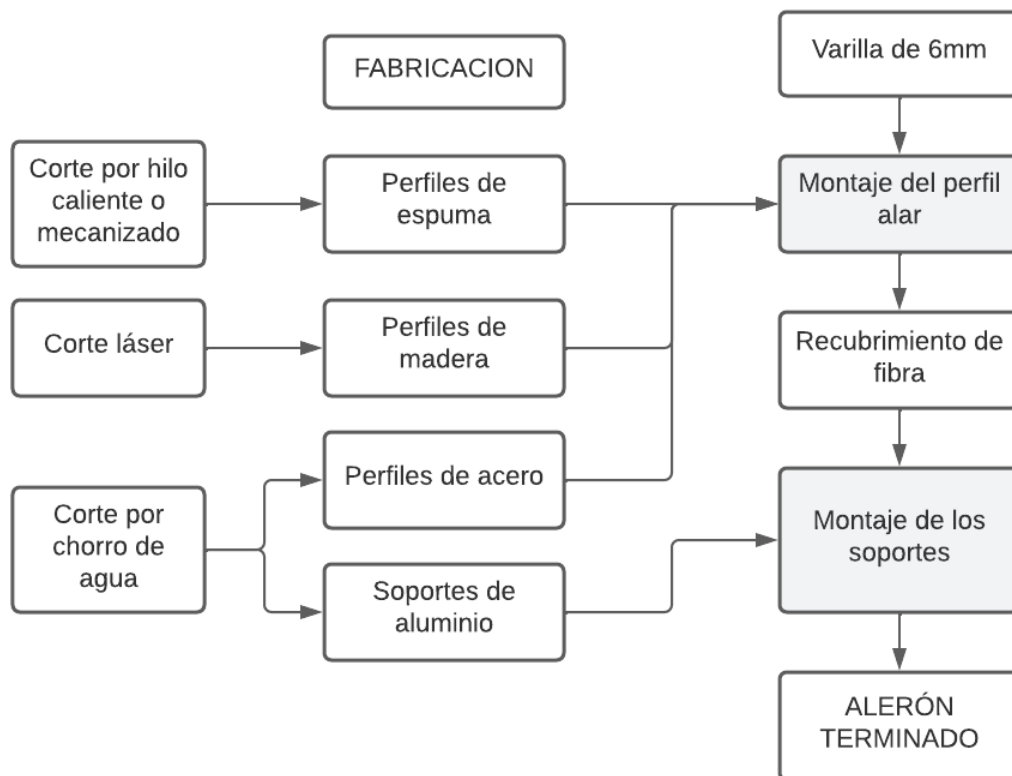
En conjunto, la vista del alerón quedaría como muestra la siguiente imagen:



*Figura 65. Modelo ensamblado en solidworks. (Fuente: propia)*

## 7. Prototipo.

Se plantea la construcción de un modelo funcional para competición, para ello, se debe tener en cuenta aspectos de fabricación, de selección de materiales y de montaje. Se realiza un esquema que permita seguir un orden de trabajo adecuado para la fabricación y el montaje.



### 7.1. Materiales.

Lo primero que se debe conocer es cuales son los materiales que se van a utilizar para fabricar el alerón, una vez escogidos, se puede definir el método de fabricación de cada parte.

Para el interior del alerón se va a usar laminas alternadas de madera contrachapada y espuma de poliestireno, con perfiles de acero de refuerzo en las zonas de la unión con el alerón. Todo ello irá unido con dos varillas de acero que servirán para alinear los perfiles. Una vez unidas las placas, se realizará un recubrimiento con fibra de vidrio de todo el alerón para otorgarle mayor resistencia.

Los soportes del alerón se van a realizar en aluminio para que sean más ligeros y los perfiles laterales se van a realizar en policarbonato con recubrimiento de fibra de carbono para que sean resistentes y aporten menor peso que en el caso del acero.

*Madera contrachapada.*

La madera contrachapada es un tipo de madera en la que se encuentran varias láminas de madera adheridas entre sí con las fibras de cada capa colocadas de manera perpendicular. Esto hace que la madera adquiera mayor rigidez y resistencia en dos direcciones.

Para conseguir que no se combe con la humedad, las láminas siempre son impares, es decir, se colocan 3, 5 o 7 láminas, de esta manera, se consigue simetría.

Para su fabricación, normalmente se usan resinas o colas que permiten una adhesión segura y duradera. (ANSYS Granta Edupack, 2022)

<b>Propiedades generales:</b>	
Densidad	800kg/m <sup>3</sup>
Precio	0.546 EUR/kg
<b>Propiedades mecánicas:</b>	
Módulo de Young	7.97 GPa
Límite elástico	42.1 MPa
Resistencia a tracción	70 MPa
Resistencia a compresión	40 MPa
Resistencia a fatiga para 10 <sup>7</sup> ciclos	27.6 MPa
<b>Propiedades térmicas</b>	
Máxima temperatura en servicio	140°C
Mínima temperatura en servicio	-23.2 °C
¿Conductor o aislante?	Aislante
<b>Propiedades eléctricas</b>	
¿Conductor o aislante?	Mal aislante
<b>Otras propiedades</b>	
Transparencia	Opaco
Moldeabilidad	4 (Escala 1-5, siendo 1 no moldeable)
Mecanizabilidad	5 (Escala 1-5, siendo 1 no mecanizable)
Reciclabilidad	No

En definitiva, se trata de un material que ofrece gran resistencia con poco peso y buena adherencia a la fibra de vidrio, puede cortarse con la máquina de corte laser, por lo tanto, se va a utilizar para realizar varios perfiles intermedios en el interior del alerón por las ventajas que ofrece respecto a otros materiales en facilidad de fabricación.

*Acero.*

El acero es una aleación de hierro y carbono utilizada en muchas partes de los vehículos y componentes de automoción, se trata de un material barato, tenaz, resistente y fácilmente conformable. Se va a utilizar un acero con bajo contenido en carbono (menos de 0.3%) también llamado acero dulce, son los más baratos y ofrecen resistencia suficiente para el alerón. (ANSYS Granta Edupack, 2022)

<b>Propiedades generales:</b>	
Densidad	7820 kg/m <sup>3</sup>
Precio	0.671 EUR/kg
<b>Propiedades mecánicas:</b>	
Módulo de Young	200-220 GPa
Limite elástico	255-355 MPa
Resistencia a tracción	379-532 MPa
Resistencia a compresión	255-355 MPa
Resistencia a fatiga para 10 <sup>7</sup> ciclos	203-278 MPa
<b>Propiedades térmicas</b>	
Máxima temperatura en servicio	340-357°C
Mínima temperatura en servicio	-68.2- -38.2°C
¿Conductor o aislante?	Buen conductor
<b>Propiedades eléctricas</b>	
¿Conductor o aislante?	Buen conductor
<b>Otras propiedades</b>	
Transparencia	Opaco
Conformabilidad	4-5 (Escala 1-5, siendo 1 no conformable)
Mecanizabilidad	3-4 (Escala 1-5, siendo 1 no mecanizable)
Reciclabilidad	Si

En el alerón se van a colocar cuatro perfiles de acero que irán unidos con los soportes, estos perfiles aportarán resistencia para que el alerón no se parta durante su vida útil.

Se debe tener precaución en el uso de este material, puesto que, al tener mayor densidad, utilizarlo en gran cantidad supondría un aumento significativo del peso.

*Aluminio.*

El aluminio es un metal ligero, de carácter dúctil y resistente a la corrosión. No es un material tan resistente como el acero, pero puede alearse para conseguir un aumento de la resistencia. (ANSYS Granta Edupack, 2022)

<b>Propiedades generales:</b>	
Densidad	2700 kg/m <sup>3</sup>
Precio	2.28 EUR/kg
<b>Propiedades mecánicas:</b>	
Módulo de Young	69-74 GPa
Limite elástico	65.1-252 MPa
Resistencia a tracción	151-323 MPa
Resistencia a compresión	65.1-264 MPa
Resistencia a fatiga para 10 <sup>7</sup> ciclos	61.7-150 MPa
<b>Propiedades térmicas</b>	
Máxima temperatura en servicio	91.9-170°C
Mínima temperatura en servicio	-273°C
¿Conductor o aislante?	Buen conductor
<b>Propiedades eléctricas</b>	
¿Conductor o aislante?	Buen conductor
<b>Otras propiedades</b>	
Transparencia	Opaco
Conformabilidad	3-4 (Escala 1-5, siendo 1 no conformable)
Mecanizabilidad	4-5 (Escala 1-5, siendo 1 no mecanizable)
Reciclabilidad	Si

En el alerón se va a utilizar el aluminio para realizar los soportes, es necesario que sean ligeros, y en el caso del aluminio, al ser su densidad menor que la del acero aportará menos peso, la resistencia es menor que la del acero, pero la parte del soporte no está sometida a tantas cargas como el perfil y el aluminio tiene resistencia suficiente para aguantar las fuerzas ejercidas.



*Espuma de poliestireno.*

La espuma de poliestireno es una espuma polimérica realizada por expansión y solidificación de una masa fundida utilizando un agente de soplado, ya sea químico o mecánico. El material resultante que se obtiene tiene una densidad relativamente baja, aunque el que usaremos será de una densidad mayor. Se trata de un material ligero y rígido, con una superficie más densa que le permite mantener la estructura del alerón. (ANSYS Granta Edupack, 2022)

<b>Propiedades generales:</b>	
Densidad	470 kg/m <sup>3</sup>
Precio	14 EUR/kg
<b>Propiedades mecánicas:</b>	
Módulo de Young	0.2-0.48 GPa
Limite elástico	0.8-12 MPa
Resistencia a tracción	1.2-12.4 MPa
Resistencia a compresión	2.8-12MPa
Resistencia a fatiga para 10 <sup>7</sup> ciclos	0.84-9.6 MPa
<b>Propiedades térmicas</b>	
Máxima temperatura en servicio	66.9-171°C
Mínima temperatura en servicio	-113- -73.2°C
¿Conductor o aislante?	Buen aislante
<b>Propiedades eléctricas</b>	
¿Conductor o aislante?	Buen aislante
<b>Otras propiedades</b>	
Transparencia	Opaco
Moldeabilidad	3-4 (Escala 1-5, siendo 1 no conformable)
Mecanizabilidad	3-4 (Escala 1-5, siendo 1 no mecanizable)
Reciclabilidad	No

En el alerón se va a utilizar este material para los perfiles de relleno, puesto que no aportan peso, pero sirven para mantener la estructura, de esta manera se puede recubrir el perfil con fibra de vidrio dejando el interior más ligero y a la vez resistente, se fabricarán los perfiles mecanizándolos con la máquina de CNC.

*Fibra de vidrio.*

La fibra de vidrio es un material compuesto de gran rigidez y resistencia, se fabrica con fibras continuas embebidas en una matriz de resina termoestable, mientras que las fibras son responsables de aportar la rigidez y la resistencia, la matriz distribuye esfuerzos y proporciona tenacidad y protege las fibras. (ANSYS Granta Edupack, 2022)

<b>Propiedades generales:</b>	
Densidad	1970 kg/m <sup>3</sup>
Precio	33 EUR/kg
<b>Propiedades mecánicas:</b>	
Módulo de Young	15- 28 GPa
Límite elástico	207- 304 MPa
Resistencia a tracción	207- 304 MPa
Resistencia a compresión	207-257 MPa
Resistencia a fatiga para 10 <sup>7</sup> ciclos	41.3- 91.1 MPa
<b>Propiedades térmicas</b>	
Máxima temperatura en servicio	140-220°C
Mínima temperatura en servicio	-23- -73.2°C
¿Conductor o aislante?	Mal Aislante
<b>Propiedades eléctricas</b>	
¿Conductor o aislante?	Buen aislante
<b>Otras propiedades</b>	
Transparencia	Translúcido
Moldeabilidad	4-5 (Escala 1-5, siendo 1 no conformable)
Mecanizabilidad	2-3 (Escala 1-5, siendo 1 no mecanizable)
Reciclabilidad	No

En el alerón se utilizará la fibra de vidrio para recubrir el perfil, esto aportará gran resistencia ante las fuerzas aerodinámicas que se generan durante el uso. Como desventaja destaca el alto precio que tiene el material, por lo que se debe hacer un uso moderado y optimizar la disposición de este para no malgastar material. Se orientarán las fibras en varias direcciones para garantizar mayor resistencia, teniendo cuidado de que no se generen grandes defectos que puedan dar lugar a roturas por fallos del material.

*Fibra de carbono.*

La fibra de carbono es un material compuesto que posee mayor rigidez y resistencia que la fibra de vidrio, sin embargo, su precio también es mayor. Se trata de fibras continuas en una matriz de resina, siendo las fibras las que soportan las cargas mecánicas y la matriz la que proporciona ductilidad y tenacidad. (ANSYS Granta Edupack, 2022)

<b>Propiedades generales:</b>	
Densidad	1600 kg/m <sup>3</sup>
Precio	34.4 EUR/kg
<b>Propiedades mecánicas:</b>	
Módulo de Young	69-150 GPa
Limite elástico	550-1050 MPa
Resistencia a tracción	550-1050 MPa
Resistencia a compresión	440-840 MPa
Resistencia a fatiga para 10 <sup>7</sup> ciclos	150-300 MPa
<b>Propiedades térmicas</b>	
Máxima temperatura en servicio	140-220 °C
Mínima temperatura en servicio	-123- -73.2°C
¿Conductor o aislante?	Mal Aislante
<b>Propiedades eléctricas</b>	
¿Conductor o aislante?	Mal conductor
<b>Otras propiedades</b>	
Transparencia	Opaco
Moldeabilidad	4-5 (Escala 1-5, siendo 1 no conformable)
Mecanizabilidad	1-3 (Escala 1-5, siendo 1 no mecanizable)
Reciclabilidad	No

En el alerón se utilizará la fibra de carbono para recubrir las placas laterales para hacerlas más resistentes y duraderas. Al igual que en el caso de la fibra de vidrio, se debe hacer un uso moderado del material por su precio, además se debe tener también precaución para no crear defectos durante su fabricación, que pueden causar fallos y roturas de la pieza.

*Policarbonato.*

El policarbonato es un polímero termoplástico con buenas propiedades mecánicas de dureza y rigidez, así como bajo precio. Se trata de un material que puede reforzarse con fibras, por lo que sus propiedades mecánicas pueden mejorarse aún más. (ANSYS Granta Edupack, 2022)

<b>Propiedades generales:</b>	
Densidad	1210 kg/m <sup>3</sup>
Precio	2.85 EUR/kg
<b>Propiedades mecánicas:</b>	
Módulo de Young	2.24-2.52 GPa
Limite elástico	59.1-65.2 MPa
Resistencia a tracción	62.7-72.4 MPa
Resistencia a compresión	69-86.2MPa
Resistencia a fatiga para 10 <sup>7</sup> ciclos	23.7-30.8 MPa
<b>Propiedades térmicas</b>	
Máxima temperatura en servicio	101-116 °C
Mínima temperatura en servicio	-47.2- -37-2°C
¿Conductor o aislante?	Buen aislante
<b>Propiedades eléctricas</b>	
¿Conductor o aislante?	Buen aislante
<b>Otras propiedades</b>	
Transparencia	Calidad óptica
Moldeabilidad	4-5 (Escala 1-5, siendo 1 no conformable)
Mecanizabilidad	3-4 (Escala 1-5, siendo 1 no mecanizable)
Reciclabilidad	Si

En el alerón se utiliza el policarbonato para las placas laterales, otorgándoles así gran resistencia y rigidez a los extremos del perfil, que servirá como fijación en cada extremo y permitirá que los perfiles permanezcan en su sitio.

Además se recubrirán con fibra de carbono para reforzarlas aún más y garantizar que resistirán las condiciones de cargas y fuerzas que se generan durante el uso del alerón, se debe tener en cuenta por lo tanto que la forma de los perfiles laterales sea lo más sencilla posible para simplificar el proceso de fabricación.

## 7.2. Fabricación.

Antes de comenzar la fabricación, se realiza un esquema de montaje para saber el orden de colocación de cada parte del alerón.

Se utiliza un código de colores para saber a qué parte corresponde cada franja,

Azul: Espuma de poliestireno.

Rojo: Madera de contrachapado.

Verde: Acero

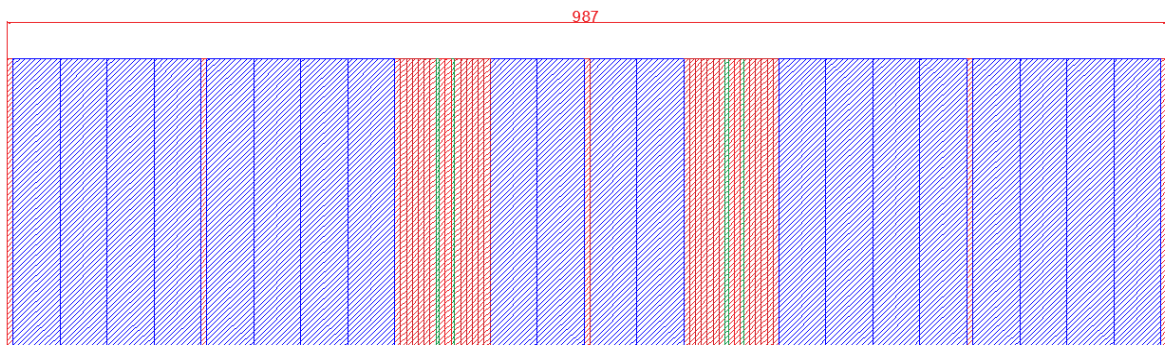


Figura 66. Plano de montaje del alerón

### *Fabricación de los perfiles de espuma.*

Se comienza a fabricar los perfiles de espuma de poliestireno, se debe fabricar para cada ala 20 perfiles, se empieza a realizarlos por corte con hilo caliente, para ello, se fabrican por corte laser dos plantillas de madera de cada modelo, un servirá para guiar los agujeros, y otra como plantilla de corte para el hilo caliente.

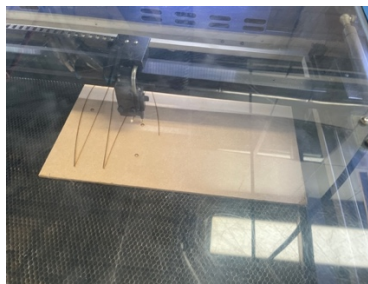


Figura 67. Corte de perfiles de madera en laser. (fuente: propia)

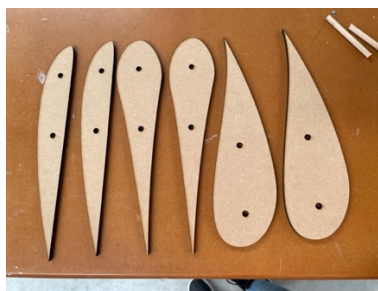


Figura 68. Perfiles de madera cortados en laser. (Fuente: Propia)

Una vez cortadas las plantillas se comienzan a realizar uno a uno los perfiles.

Lo primero que se hace es realizar los agujeros y situar dos centradores para que la pieza no se mueva durante el corte



Figura 69. Utilización de perfil de madera como plantilla de corte. (Fuente: propia)



Figura 70. Corte de perfiles de espuma. (Fuente: propia)

Al realizar el corte de los perfiles ha surgido el problema de que en muchos se generaba el mismo defecto, la parte final del perfil por el calor del hilo y al ser de pequeño espesor, se deshacía y no quedaba regular, por lo que es necesario buscar un método de fabricación distinto al hilo caliente.



Figura 71. Perfil de espuma cortado en hilo caliente. (Fuente: propia)

Se va a cambiar el método de fabricación de los perfiles de espuma, lo que se hace es realizar los perfiles en autocad y guardarlos en formato .dxf, con esto se realiza un programa de mecanizado en Visualmill y se pasan los datos a la máquina CNC para que corte los perfiles, para ello se utilizan las mismas planchas de poliestireno de alta densidad

y una fresa de 6mm como herramienta. Se hace la prueba primero en un solo perfil, para comprobar que los parámetros introducidos de velocidad y avance son correctos. Una vez comprobado que todo funciona, se corta la plancha con los perfiles.



Figura 72. Corte de espuma en CNC. (Fuente: propia)

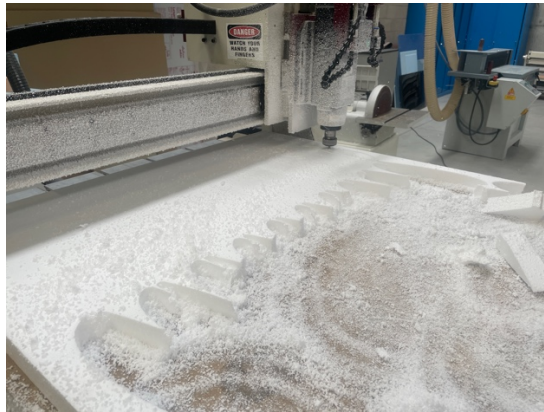


Figura 73. Corte de perfiles de espuma en CNC. (Fuente: propia)

Se terminan de cortar los perfiles y se ordenan en filas correspondientes a cada alerón. Cuando se tienen todos los perfiles cortados se pasa a realizar el montaje del ala.



Figura 74. Perfiles de espuma ordenados. (Fuente: propia)

Se cortan los perfiles y las piezas de acero en el corte por chorro de agua, una vez terminadas las piezas de acero, se montan los perfiles siguiendo el plano de montaje que



se ha realizado al comienzo, se pegan todos los perfiles y utilizamos como guías las varillas roscadas con las que hemos atravesado cada perfil.



Figura 75. Perfil AH 81-K-144 W-F Klappe (Fuente: propia)



Figura 76. Perfil FX 69-PR-281. (Fuente: propia)



Figura 77. Perfil Dayton-Wright. (Fuente: propia)

Cuando estén pegados los perfiles se cubren con fibra de vidrio.

Para preparar el recubrimiento se va a usar fibra de vidrio y resina, la resina está compuesta por dos componentes distintos:



- Resina de poliéster: Se trata de una resina no tixotrópica y sin acelerante, contiene sustancias que permiten obtener gran resistencia, está altamente recomendada para producción con fibras de poliéster y composites.



Figura 78. Resina de poliéster usada para recubrimiento de fibra de vidrio. (Fuente: propia)

- Catalizador: PEROXIDO DE MEC EN SOLUCIÓN DE FTALATO DE DIMETILO. Se trata de un catalizador para poliésteres insaturados.



Figura 79. Catalizador para resina de poliéster. (Fuente: propia)

Se prepara la resina, por cada 400 gr de resina se añaden 8g de catalizador, se mezcla bien para que sea uniforme.

La fibra utilizada es Fibra de Vidrio Krosglass MAT-300g/m<sup>3</sup>, se trata de una fibra de vidrio tipo Mat de hilos cortados cohesionados gracias a un emulsionante, aconsejable para construcción de laminados estructurales para piezas e impermeabilizaciones con resinas de poliéster, vinilester y uretano-acríticas, en este caso, se usan resinas de poliéster.

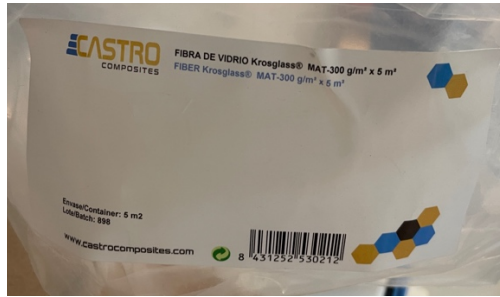


Figura 80. Fibra de vidrio utilizada para recubrimiento (Fuente: propia)

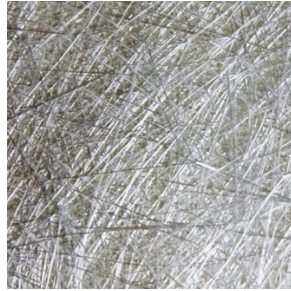


Figura 81. Detalle de las fibras utilizadas. (Fuente: propia)

Se impregna bien la fibra de vidrio con un pincel, se debe tener en cuenta que, una vez mezclada la resina con el catalizador tiene un tiempo de vida limitado, así que este paso debe realizarse rápido.



Figura 82. Proceso de impregnación de la fibra de vidrio. (Fuente:propia)

Una vez realizadas las alas de fibra de vidrio, se cierran ambos lados con las placas de policarbonato.

Se fabrican los soportes con aluminio en la cortadora por chorro de agua, se comprueba que encajan la base y el soporte y se sueldan por la parte inferior.

Se une la base al maletero del coche y se una el alerón con el soporte.



Figura 83. Soportes de aluminio cortados en chorro de agua. (fuente:propia)

Se traslada el alerón a la cabina de pintado para pintar todos los alerones con el mismo color que el coche.

Se realiza el diseño de tres vinilos identificativos que permitan la identificación rápida y de forma visual de cada perfil alar.

Trazado	Alerón	Vinilo diseñado
Circuito	Dayton-Wright 6	
Montaña	FX 69-PR-281	
Urbano	AH 81-K-144 W-F KLAPPE	

Se realiza el programa de corte de los vinilos para exportarlo al plotter de corte y se ejecuta.

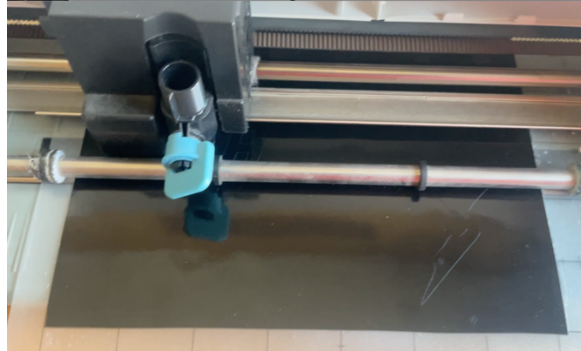


Figura 84. Corte de los vinilos en el plotter. (Fuente: propia)



Figura 85. Vinilos preparados para la colocación. (Fuente:propia)

Con la colocación de estos vinilos, damos por terminada la fabricación y el montaje del alerón.

## 8. Conclusiones.

Del presente trabajo de fin de grado, basándonos en el proceso de trabajo realizado se extraen los siguientes resultados:

- Se realiza el escaneo de la superficie del modelo BMW E36, obteniendo un archivo con las superficies del vehículo en alta resolución.
- Se realiza un análisis aerodinámico que arroja resultados sobre el funcionamiento y el rendimiento aerodinámico del vehículo y las zonas que peor trabajan aerodinámicamente, lo que permitirá la realización de mejoras al vehículo por medio de la instalación de accesorios.
- Se crea una clasificación de los tipos de trazado existentes en competición drift para establecer que factores se busca potenciar en el vehículo.
- Se diseñan varios alerones diferentes y se analizan las soluciones propuestas hasta encontrar una que cumpla las características que se buscan.
- Se calcula el perfil alar necesario para cada tipo de trazado de competición.
- Se realiza un modelo digital para comprobar su viabilidad y la posibilidad de instalación en el vehículo.
- Se realiza el planteamiento de fabricación, materiales y procesos utilizados para su construcción y montaje en el vehículo.

## 9. Bibliografía.

- ANSYS Granta Edupack. (25 de 04 de 2022). Edupack. *Universo Materiales Nivel 2*.  
 Bitfab. (03 de 2022). *Bitfab*. Obtenido de Escaneado 3D con luz estructurada:  
<https://bitfab.io/es/blog/escaneado-3d-luz-estructurada/>
- Connor, N. (12 de 03 de 2022). *¿Qué es la capa límite?* Obtenido de Thermal engineering: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-capa-limite-definicion/>
- Creative Commons. (03 de 2022). *Outlines*. Obtenido de 1997 BMW M3 E36 Sedan blueprints: <https://getoutlines.com/blueprints/6784/1997-bmw-m3-e36-sedan-blueprints>
- Eckhart, R. (03 de 2022). *The world's first streamliner vehicle design by Paul Jaray*  
*Read more: https://www.trussty.com/2020/06/the-worlds-first-streamliner-vehicle.html#ixzz7S32guHg4*. Obtenido de Trussty-Jasmine science and technology: <https://www.trussty.com/2020/06/the-worlds-first-streamliner-vehicle.html#axzz7S32MKUr8>
- Fédération Internationale de l'Automobile. (2022). Specific Regulations for FIA Drag Racing.
- FIA. (03 de 2022). *FIA F1*. Obtenido de Alpine's Esteban Ocon sets the top time on red flag-affected morning of Day 2 in Bahrain testing:  
<https://www.formula1.com/en/latest/article.alpines-esteban-ocon-sets-the-top-time-on-red-flag-affected-morning-of-day-2.5YdmOh2tDGixinzqyxxQgv.html>
- Houghton, Carpenter, Collicot, & Valentine, D. (2013). *Aerodynamics for engineering students*. Kidlington: Elsevier.
- Hucho, W.-H. (1993). AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES. *Fluid Mechanics*, 385-537.
- Kundu, P., Cohen, I., & David, D. (2012). *Fluid Mechanics*. Kidlington, Oxford, Reino Unido: Elsevier.
- León, E. (03 de 2022). *Top Gear*. Obtenido de Tesla Model X 1.020 CV, ¿sus rivales?: <https://www.topgear.es/noticias/coche-electrico/tesla-model-x-1020-cv-rivales-807773>
- Martinez, C. S. (11 de 03 de 2022). *TÉCNICA F1: ¿QUÉ ES Y CÓMO FUNCIONA EL EFECTO SUELO?* Obtenido de Planeta del motor:  
<http://planetadelmotor.com/efecto-suelo-f1-que-es/>
- Modelcar world. (03 de 2022). *Coches miniatura*. Obtenido de Bmw M3 1/18 Solido (E36) rojo 1994 coche miniatura: <http://www.coches-miniaturas.es/bmw/p/94229-bmw-m3-1-18-solido-e36-rojo-1994.html>
- Navarro, M. A. (21 de 03 de 2022). *Manual de vuelo*. Obtenido de [https://www.manualvuelo.es/1pbav/13\\_fuerz.html](https://www.manualvuelo.es/1pbav/13_fuerz.html)
- Noguera, B. (12 de 03 de 2022). *Flujo turbulento en ingeniería química*. Obtenido de IQR Ingeniería química:  
<https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2021/02/flujo-turbulento-en-ingenieria-quimica.html>
- Osma, M. F. (12 de 03 de 2022). *La capa límite*. Obtenido de Aerodinámica F1:  
<https://www.aerodinamicaf1.com/2019/09/la-capa-limite/>
- Peña, F. L. (2000). *Mecánica de fluidos*. A coruña, La coruña, España: Universidad da Coruña.

- Pressreader. (03 de 2022). *El origen del monovolumen*. Obtenido de <https://www.pressreader.com/argentina/parabrisas/20170907/283600990412125>
- Ramos, F., & Pérez, I. (03 de 2022). *Monografías*. Obtenido de Bloque de aerodinámica para F1 in schools: <https://www.monografias.com/trabajos-pdf5/bloque-aerodinamica-f1-in-schools/bloque-aerodinamica-f1-in-schools>
- Ruben Sanchez, C. M., & Barbosa, L. (2013). *Tratado epistemológico del Principio de Bernoulli*. Bogotá: Centro de investigación en ciencia aplicada y tecnología avanzada del instituto politecnico nacional.
- Sanchez, A., Escaño, J. M., & Castaño, F. (2011). Realidad virtual en 3d para automatización y control. Sevilla: Research Gate.
- Sherman, D. (03 de 2022). *How the 1921 Rumpler Tropfenwagen foreshadowed today's mid-engine race cars*. Obtenido de Hagerty: <https://www.hagerty.com/media/car-profiles/how-the-1921-rumpler-tropfenwagen-foreshadowed-todays-mid-engine-race-cars/>
- Thiaga, R. (15 de 03 de 2022). *Car aerodynamics*. Obtenido de Vehicle body engineering: <http://itsmyblogvbe.blogspot.com/2015/07/car-aerodynamics.html>
- Universidad politécnica de Cartagena. (03 de 2022). *Universidad politecnica de Cartagena*. Obtenido de ESCANER PORTATIL ARTEC SPACE SPIDER: <https://www.upct.es/sait/es/digitalizacion-3d/escaner-portatil-artec-space-spider//>
- Valfonta diseño y fabricación de válvulas. (11 de 03 de 2022). *Demostración del principio de funcionamiento de los inyectores*. Obtenido de Valfonta: <https://www.valfonta.com/blog/injector-de-vapor-industrial/>
- Vituorino, M., & Labriola, C. (2017). Sistemas Conversores Fluido - Dinámicos de energía renovable para la Patagonia Argentina. *Universidad Nacional de la patagonia Austral*.

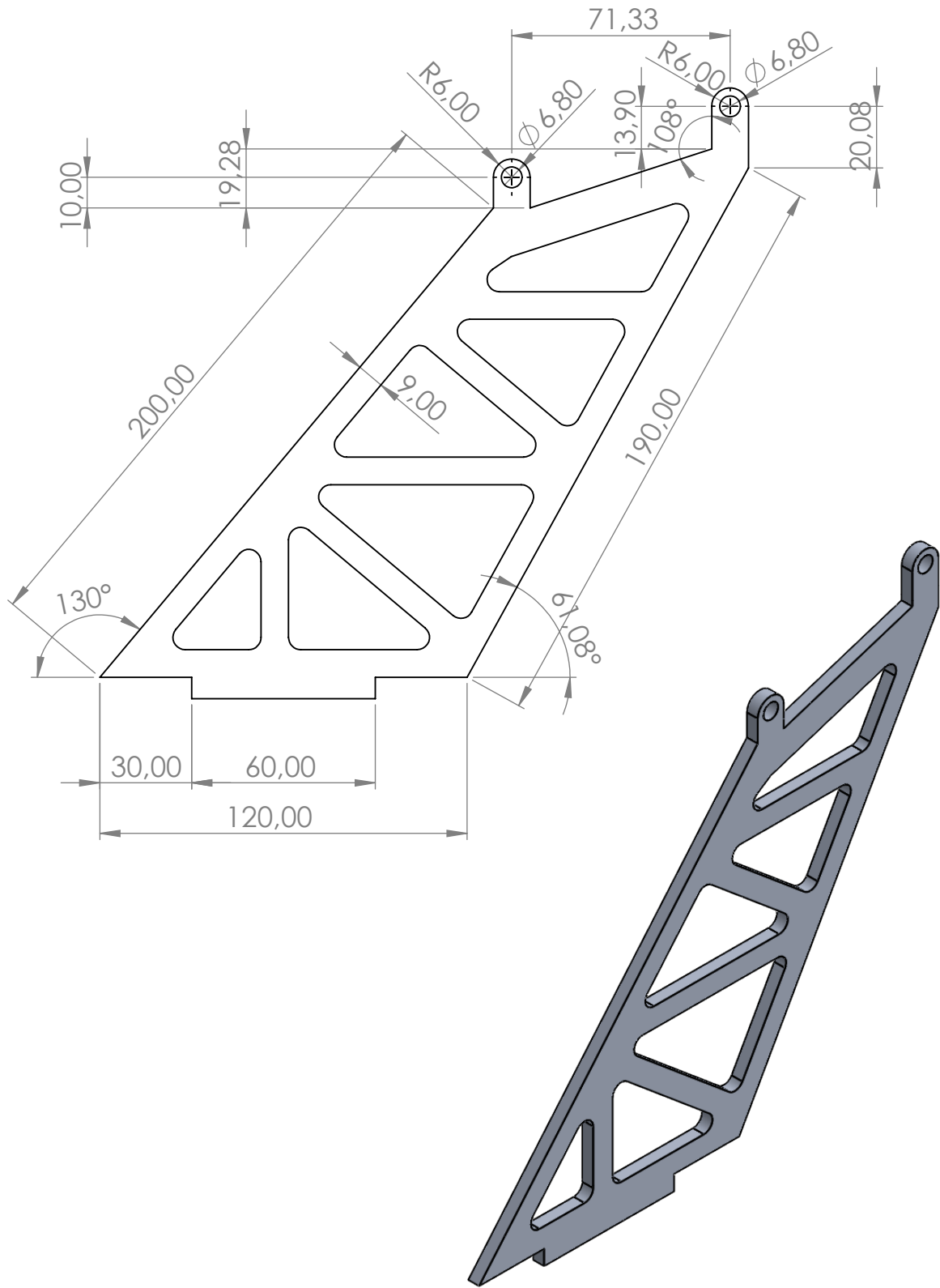
## ANEXO I.

### PLANOS

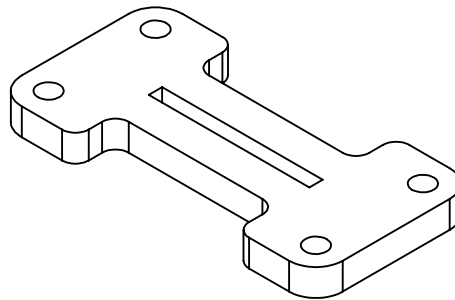
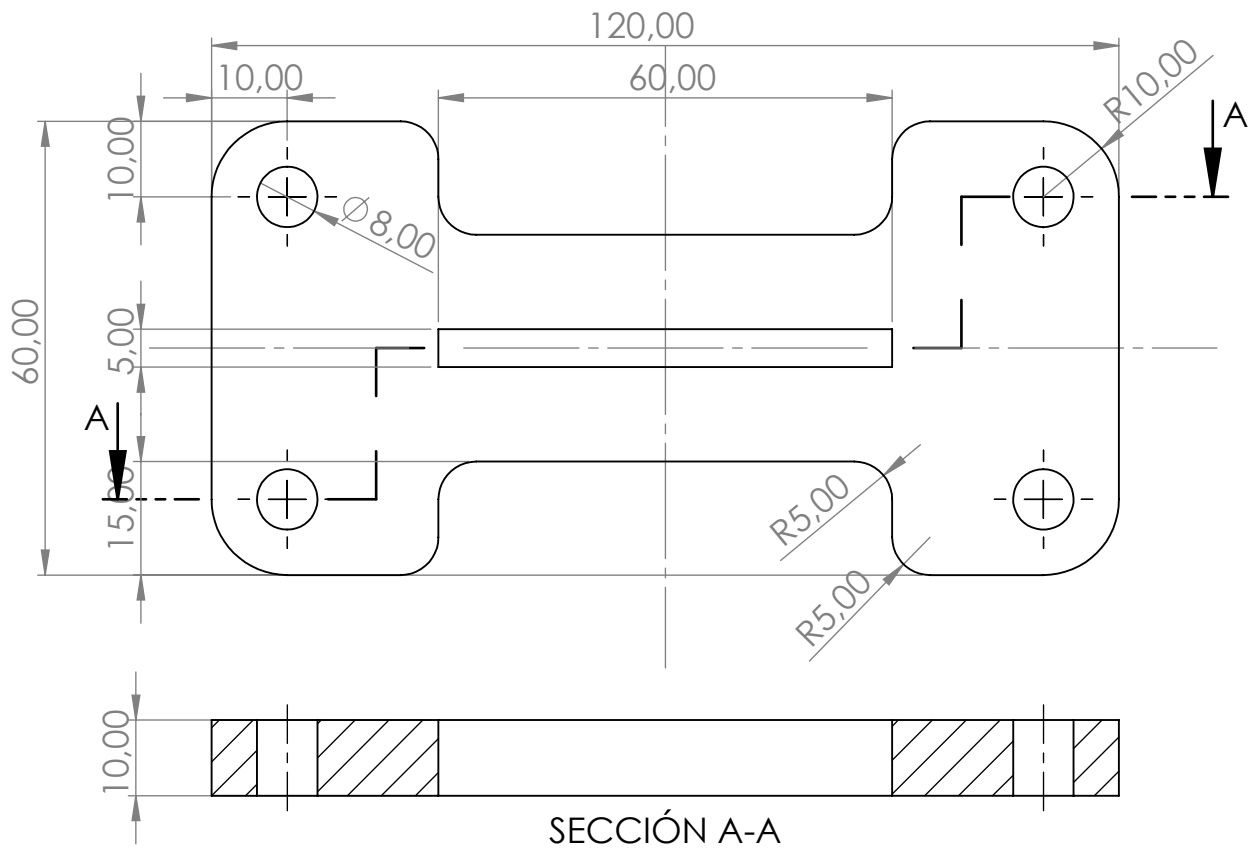
A continuación, se adjuntan una serie de planos orientativos sobre las piezas que se han realizado durante la fabricación del alerón.

Se encuentran realizados a escala y son los que han servido de apoyo para realizar los archivos de corte por chorro de agua, por láser y de mecanizado.

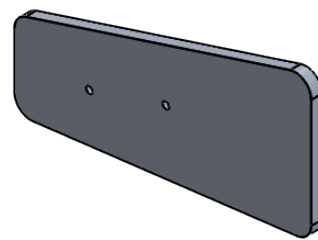
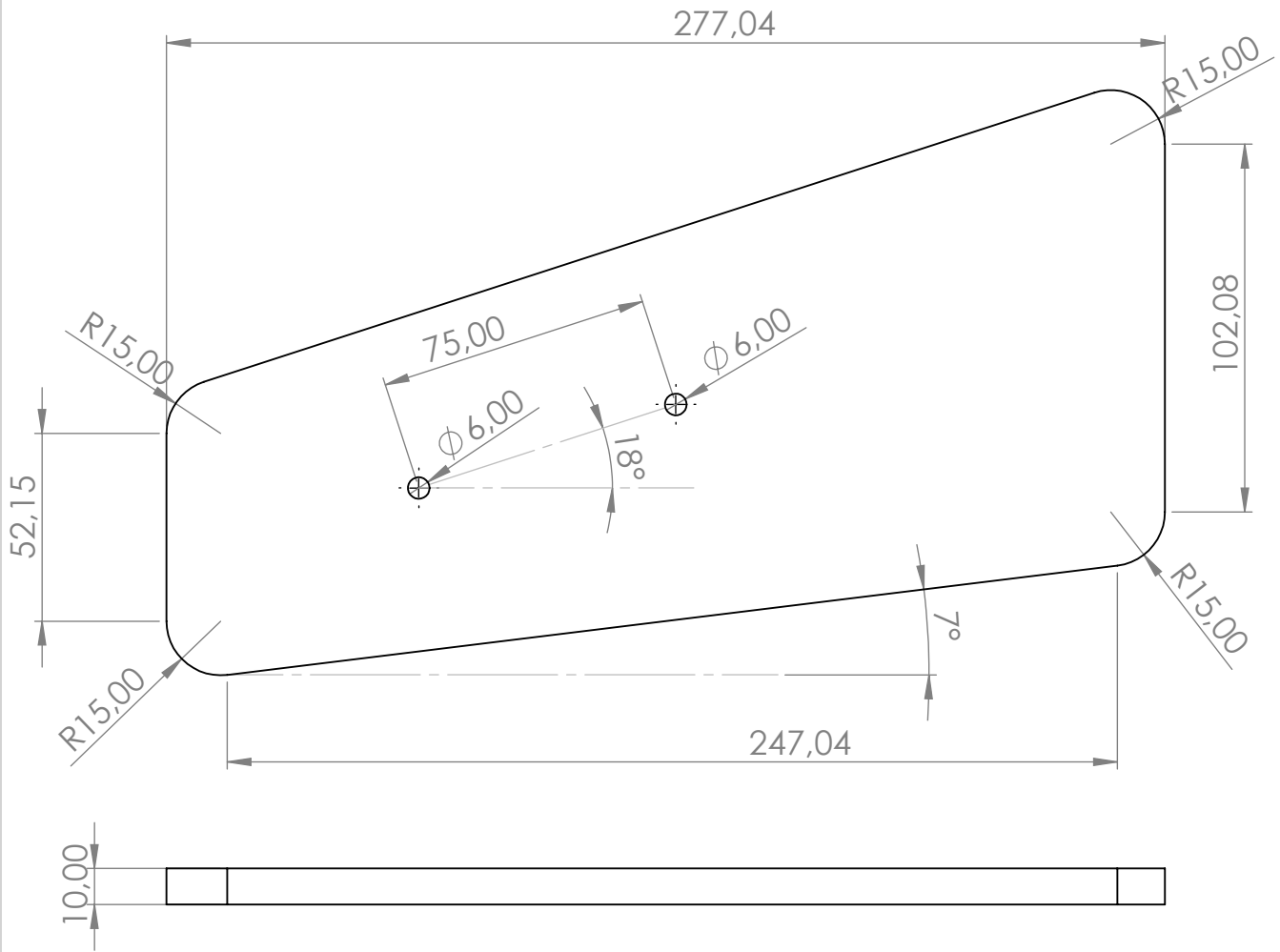




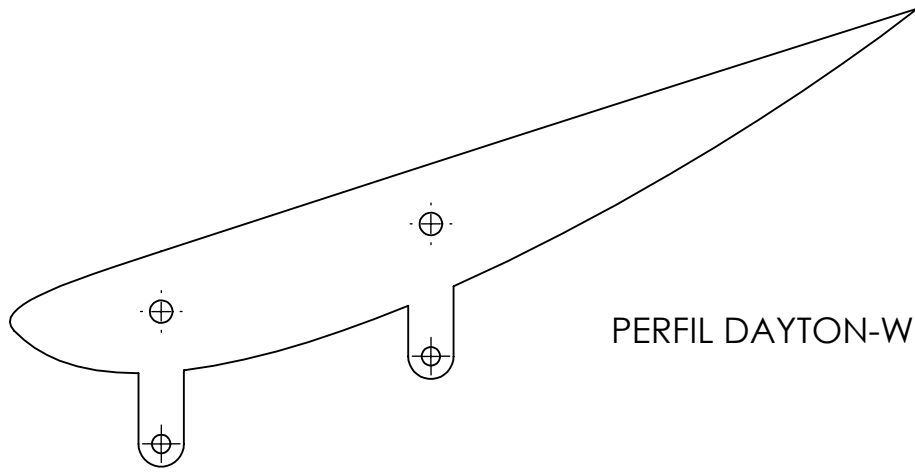
	FECHA	NOMBRE	PROYECTO	FIN DE GRADO	ESPECIFICACIONES GENERALES		
DIBUJADO	3-05-22	Miriam Mesquita	DENOMINACION	SOPORTE ALERÓN	TOLERANCIAS		
APROBADO			MATERIAL	ALUMINIO	ACABADOS SUPERFICIALES		
INGENIERÍA DISEÑO MECÁNICO			TRATAMIENTO		MATAR ARISTAS		
E.T.S.I.I.T.			PESO(KG)		UNIDADES		
Upna			PLANO Nº	120801_01		A4	ESCALA: 1:2



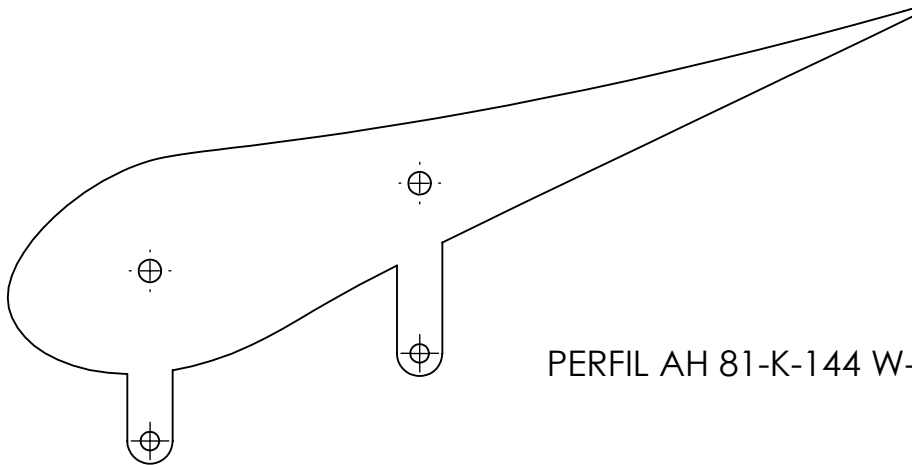
	FECHA	NOMBRE	PROYECTO	FIN DE GRADO	ESPECIFICACIONES GENERALES		
DIBUJADO	3-05-22	Miriam Mesquita	DENOMINACION	BASE SOPORTE ALERÓN	TOLERANCIAS		
APROBADO			MATERIAL	ALUMINIO	ACABADOS SUPERFICIALES		
INGENIERÍA DISEÑO MECÁNICO			TRATAMIENTO		MATAR ARISTAS		
E.T.S.I.I.T.			PESO(KG)		UNIDADES		
Upna			PLANO Nº	120801_02		A4	ESCALA: 1:1



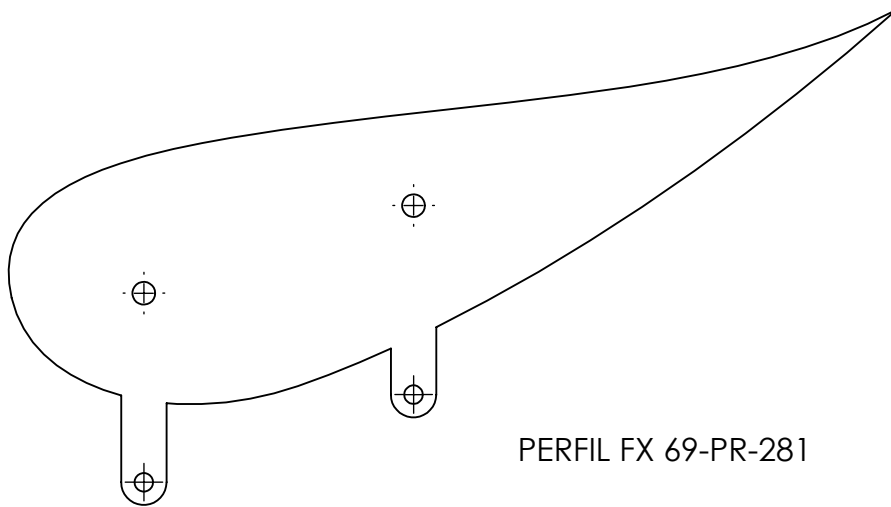
	FECHA	NOMBRE	PROYECTO	FIN DE GRADO	ESPECIFICACIONES GENERALES		
DIBUJADO	3-05-22	Miriam Mesquita	DENOMINACION	PLACA LATERAL	TOLERANCIAS		
APROBADO			MATERIAL	POLICARBONATO	ACABADOS SUPERFICIALES		
INGENIERÍA DISEÑO MECÁNICO			TRATAMIENTO		MATAR ARISTAS		
E.T.S.I.I.T.			PESO(KG)		UNIDADES		
Upna			PLANO Nº	120801_03		A4	ESCALA: 1:2



PERFIL DAYTON-WRIGHT 6



PERFIL AH 81-K-144 W-F Klappe



PERFIL FX 69-PR-281

	FECHA	NOMBRE	PROYECTO	FIN DE GRADO	ESPECIFICACIONES GENERALES		
DIBUJADO	3-05-22	Miriam Mesquita	DENOMINACION	PERFILES DE UNIÓN	TOLERANCIAS		
APROBADO			MATERIAL	ACERO	ACABADOS SUPERFICIALES		
INGENIERÍA DISEÑO MECÁNICO			TRATAMIENTO		MATAR ARISTAS		
E.T.S.I.I.T.			PESO(KG)		UNIDADES		
Upna			PLANO Nº	120801_04		A4	ESCALA: 1:5

## ANEXO II.

### INFOGRAFÍA DEL VEHÍCULO.

En la página que se muestra a continuación se ha elaborado un documento visual que aporta los datos principales del vehículo que va a modificarse y del modelo al que pertenece.

Este documento se ha elaborado con el objetivo de:

- Informar de manera clara y rápida de las propiedades del vehículo a usuarios que tengan acceso a este trabajo y no conozcan el modelo.
- Conocer los datos principales que se han utilizado para la realización del ensayo y el diseño del alerón.
- Contar con un documento auxiliar durante la presentación de este trabajo que ayude a los oyentes a aclarar dudas acerca del vehículo.

upna

Universidad Pública de Navarra  
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

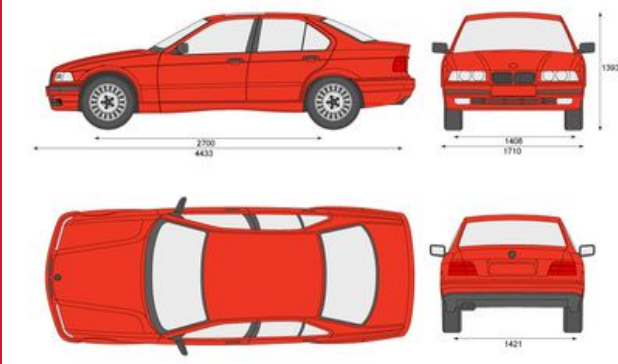
**Trabajo Fin de grado:**  
Digitalización 3D,  
estudio aerodinámico  
por elementos finitos y  
diseño del alerón en un  
BMW E36 para  
competición drift.



## BMW E36 COUPÉ

AÑO 1994

BMW 3-Series Sedan E36 (1994)



## MODIFICACIONES



Infografía realizada por:  
MIRIAM MESQUITA GONZALEZ

### Carrocería

Fabricado en aluminio

Dos puertas

Cuatro plazas

### BMW

BMW ha sido un estandarte en competición y en automoción en general.

### Motor

6

Cilindros en  
línea

295

CV

250

Km/h velocidad  
máxima

### Medidas

4433 mm

longitud

1698 mm

anchura

1365 mm

altura

### Competidores

Los modelos BMW E36 M3 han sido unos de los coches de calle pasados a competición con mayor éxito durante la historia, llegando a ganar las 24 horas de Nürburgring en 1998.

### La serie E36



GT



Lightweig



EVO



M3

Salpicadero



Sustituido por fibra  
de vidrio

Retrovisores



Espejos más  
pequeños

Ventanas



Sustitución de vidrio  
por metacrilato

Barras antivuelco



Instaladas para  
protección de pilotos

Asientos



Instalados Buckets  
de competición

### ANEXO III.

#### PRESUPUESTO DE MATERIALES

El siguiente presupuesto ha sido elaborado extrayendo datos de los precios de mercado a 24 de mayo de 2022.

Se tienen en cuenta las materias primas utilizadas durante la fabricación y los componentes añadidos posteriormente durante el montaje.

<b>CONCEPTO</b>	<b>PRECIO</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>TOTAL</b>
<i>Plancha de poliestireno expandido 40mm de espesor</i>	14 €/m <sup>2</sup>	0,9025 m <sup>2</sup>	12,63 €
<i>Plancha de aluminio 10mm de espesor</i>	2,28 €/m <sup>2</sup>	0,099 m <sup>2</sup>	0,23 €
<i>Plancha de acero 3mm de espesor</i>	0,671 €/m <sup>2</sup>	0,3405 m <sup>2</sup>	0,23 €
<i>Lamina de policarbonato 3mm de espesor</i>	2,85 €/m <sup>2</sup>	0,226 m <sup>2</sup>	0,65 €
<i>Fibra de vidrio</i>	33 €/m <sup>2</sup>	4,275 m <sup>2</sup>	141,08 €
<i>Plancha de madera contrachapada</i>	0,546 €/m <sup>2</sup>	1,564 m <sup>2</sup>	0,85€
<i>Varilla roscada M6 de acero de 1m de longitud</i>	0,95 €/unidad	6 unidades	5,7 €
<i>Pegamento epoxídico de dos componentes</i>	58,08€/kg	0,150 kg	8,71 €
<i>Imprimación de cola para poliestireno</i>	10,40 €/kg	0,5 kg	5,2 €
<i>Resina para fibra de vidrio</i>	11,98 €/kg	3 kg	35,94 €
<i>Tuercas M6</i>	2,19 €/bolsa	1 bolsa de 70 unidades	2,19 €
<i>Tuercas ciegas M6</i>	1,95 €/bolsa	2 bolsas de 20 unidades	3,90 €
<i>Tornillos M6</i>	1,40 €/bolsa	1 bolsa de 20 unidades	1,40 €
<i>Pintura bicapa de vehículo</i>	10 €/kg	1kg	10 €
<i>Vinilo adhesivo no removible</i>	10,68 €/m <sup>2</sup>	0,064 m <sup>2</sup>	0,69 €
		<b>TOTAL</b>	<b>229,40 €</b>