



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Propuesta de fabricación y cálculo de un alerón trasero para un automóvil de competición

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

AUTOR/A: Arce Oliver, Alejandro

Tutor/a: Quiles Carrillo, Luis Jesús

Cotutor/a: Ivorra Martínez, Juan

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



RESUMEN

“Propuesta de Diseño y Cálculo de un Alerón trasero para un Automóvil de Competición”

Este TFG tiene por objetivo el diseño y el cálculo estructural de un alerón trasero para un automóvil de competición, así como el estudio aerodinámico y la elección de materiales para su fabricación. El diseño de esta pieza aerodinámica tendrá como función otorgar agarre al vehículo, maximizando la carga aerodinámica frente a la resistencia que produzca. Otros aspectos que se tendrán en cuenta para su realización será la integración del propio alerón en un vehículo comercial, ya que deberá cumplir en cuanto a sus especificaciones técnicas tanto en normativa como en las exigencias de montaje para la categoría de GT (gran turismo).

Palabras clave: Alerón; competición; vehículo; fibra de carbono; aerodinámica.



SUMMARY

“PROPOSAL FOR THE CALCULATION AND FABRICATION OF A REAR SPOILER FOR A RACING CAR”

The objective of this TFG is the design and structural calculation of a rear spoiler for a racing car, as well as the correct selection of materials and establishing the correct manufacturing process. The design of this part is predefined and its premise is to give grip to the vehicle, maximizing the aerodynamic load against the drag it produces. That is why the correct integration of the spoiler itself in a commercial vehicle Will be taken into account for its realization, it should comply whit its technical specifications both in terms of regulations and assembly requirements for the GT (grand touring) category.

Keywords: Spoiler; competition; vehicle; carbon fiber; aerodynamics.



RESUM

“PROPOSTA DE CàLCUL I FABRICACIÓ D’UN ALERÓ POSTERIOR PER A UN AUTOMÒBIL DE COMPETICIÓ”

Aquest TFG té per objectiu el disseny i el càlcul estructural d’un aleró posterior per a un automòbil de competició, aixina com la correcta selecció de materials i establir el correcte procés de fabricació. El disseny d’aquesta peça ve predefinit i té com a premissa otorgar agarre al vehicle, maximitzant la càrrega aerodinàmica enfront de la resistència que produïska. És per açò que es tindrà en compte per a la seua realització la correcta integració del propi aleró en un vehicle comercial, ja que haurà de complir en quant a les seues especificacions tècniques tant en normativa com en les exigències de montaje per a la categoria de GT (gran turisme).

Paraules clau: Aleró; competició; vehicle; fibra de carboni; aerodinàmica.



Tabla de Contenidos

RESUMEN.....	1
SUMMARY	2
RESUM	3
I. MEMORIA	13
I.1. Objetivo general.	14
I.2. Objetivos parciales.....	14
I.3. Antecedentes de la Aerodinámica.	15
I.4. Principios Físicos de la Aerodinámica.	25
I.4.1. Principio de Bernoulli.	25
<i>I.4.1.a. Principio de Continuidad.</i>	<i>26</i>
I.4.2. Efecto Venturi.	27
I.4.3. 3ª Ley de Newton.	28
I.4.4. Número de Reynolds.	29
I.4.5. Capa Límite.	30
I.4.6. Perfil Alar.	31
<i>I.4.6.a. Carga Aerodinámica (CL- CZ)</i>	<i>32</i>
<i>I.4.6.b. Resistencia Aerodinámica (CX- CD)</i>	<i>33</i>
<i>I.4.6.c. Eficiencia Aerodinámica (E)</i>	<i>34</i>
I.5. Clasificación Alerones.	36
I.5.1. Alerones de un elemento.	36
I.5.2. Alerones de dos elementos.	38
I.5.3. Alerones de varios elementos.	40
<i>I.5.3.a Alerones de varios elementos con aleta.</i>	<i>41</i>
I.5.4. Alerones múltiples.	42
I.6. Consideraciones de Diseño.....	44



I.7. Materiales y Fabricación.....	45
I.8. Elección Perfil Alar.....	47
I.8.1. Comparación Sustentación <i>CL</i> (<i>downforce</i>).....	48
I.8.2. Comparación Resistencia <i>CD</i> (<i>drag</i>).....	49
I.8.3. Comparación Rendimiento <i>CL/CD</i>	50
I.8.4. Resumen Elección.....	51
I.9. Conclusiones.....	52
I.10. Presupuesto.....	53
I.11. Apéndices.....	54
I.11.1. Referencias Bibliográficas.....	54
II. ANEXOS.....	57
ANEXO 1 - CALCULOS.....	58
A-1.1. Downforce.....	59
A-1.2. Potencia Absorbida.....	61
A-1.3. Rendimiento Perfil Alar.....	62
ANEXO 2 - ESTUDIO ECONÓMICO.....	63
A-2.1. Análisis Viabilidad Económica.....	64
ANEXO 3 - DISEÑO.....	66
A-3.1. Diseño Inicial Prototipos.....	67
A-3.2. Diseño Final.....	71
ANEXO 4 - MATERIALES Y PROCESOS DE FABRICACIÓN.....	75
A-4.1. Materiales.....	76
A-4.1.1. Clasificación de Materiales Compuestos.....	76



A-4.1.1.a. Clasificación en Función de la Matriz.....	77
A-4.1.1.b. Clasificación en Función de los Refuerzos.....	77
A-4.1.2. Elección Material.....	79
A-4.2. Procesos de Fabricación.	80
A-4.2.1. Procesos de Molde Abierto.	80
A-4.2.1.a. Moldeo por Colocación Manual.	80
A-4.2.1.b. Moldeo a Vacío y Presión de Aire.....	81
A-4.2.1.c. Moldeo en Autoclave.	82
A-4.2.2. Procesos de Molde Cerrado.....	83
A-4.2.2.a. SMC (Sheet Moulding Compound)	83
A-4.2.2.b. Moldeo por Compresión en Caliente.....	84
A-4.2.2.c. Infusión.	84
A-4.3. Elección Procesos Fabricación Alerón.	85
ANEXO 5 - SIMULACIONES	87
A-5.1. ESTUDIO AERODINÁMICO.....	88
A-5.1.1. Objetivo Estudio.	89
A-5.1.1.a. Procedimiento.	89
A-5.1.2. Simulaciones Aerodinámicas.	94
A-5.1.2.a. 80 km/h.	94
A-5.1.2.b. 120 km/h.	95
A-5.1.2.c. 160 km/h.	95
A-5.1.2.d. 200 km/h.	96
A-5.1.2.e. 225 km/h.	96
A-5.1.2.f. 250 km/h.	97
A-5.1.2.g. 275 km/h.	97
A-5.1.2.h. 300 km/h.	98



A-5.1.2.i. 325 km/h.	98
A-5.1.3. Resultados.	99
A-5.2. ESTUDIO RESISTENTE	101
A-5.2.1. Objetivo Simulación Mediante FEM.	102
A-5.2.2. Procedimiento.....	102
A-5.2.3. Resultados.	106
A-5.2.3.a. Análisis de Estados Tensionales.....	107
A-5.2.3.b. Análisis de Desplazamientos.....	108
A-5.2.3.c. Trazado de Factor de Seguridad.	109
III. PLANOS.....	111
IV. PLIEGO DE CONDICIONES	114
IV.1. Materiales y Fabricación.....	115
IV.2. Almacenamiento.	115
IV.3. Manual de Montaje.	116
V. PRESUPUESTO	117
V.1. Presupuesto.	118
V.1.1. Coste de Diseño.....	118
V.1.2. Coste de Materiales.	119
V.1.3. Coste de Fabricación.	120
V.1.4. Presupuesto Total.	121



LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Fuerzas sobre un perfil alar. [2].....	15
Figura 2: Ford T (1908-1927) [3].....	16
Figura 3: Automóviles que siguen el movimiento del streamline [5]	17
Figura 4: Representación visual de la aerodinámica [6]	17
Figura 5: Porsche 550 (1953-1956) [8].....	18
Figura 6: Lotus 49b diseñado por Colin Chapman (1968) [9]	19
Figura 7: a) Ferrari 312T2 (1977) b) McLaren TAG MP4/2 (1984) [5].....	20
Figura 8: Jaguar XJR-12 (1990) [10].....	21
Figura 9: Mecanismo apertura alerón trasero Volkswagen Corrado G60 [12]	22
Figura 10: Alerón Audi RS 3 LMS del WTCR (2021) [13].....	23
Figura 11: Normativa alerón WTCR [5]	23
Figura 12: Lamborghini Huracán GT3 (2021) [15].....	24
Figura 13: Ilustración concepto del Principio de Bernoulli [16].....	26
Figura 14: Ilustración concepto del Principio de Continuidad [5]	27
Figura 15: Ilustración concepto del Efecto Venturi [18]	28
Figura 16: Ilustración concepto acción-reacción [19].....	29
Figura 17: Comportamiento capa límite [20].....	31
Figura 18: Partes de un perfil alar [21]	32
Figura 19:a) Un vehículo tiende a parecerse al ala de un avión b) El uso de un spoiler consigue separar el flujo de aire [19]	32
Figura 20: Curva evolución resistencia en función de la velocidad [5].....	34
Figura 21: Comparación flujos de aire con/sin flap Gurney [19]	37
Figura 22: Importancia de las derivas laterales en la conducción del aire [19]	38
Figura 23: Diferencia de perfil sin y con ranura Fowler [19].....	39
Figura 24: Coeficiente de sustentación en función del tipo de alerón [19]	39



Figura 25: Coeficiente de sustentación en función del tipo de alerón [19]	40
Figura 26: Vehículo con alerones de varios elementos [23]	41
Figura 27:a) Perfil alar con aleta b) Diferencia sustentación con/sin aleta [5].....	42
Figura 28: Alerón múltiple Mercedes F1 (2001)	43
Figura 29: Perfil NACA 6412 [25]	47
Figura 30: Perfil NACA 4412 [25]	47
Figura 31: Perfil GOE 225 [25]	47
Figura 32: Curva Comparación Sustentación. GOE 225 (amarillo), NACA 4412 (azul), NACA 6412 (verde) [25].....	48
Figura 33: Curva Comparación Resistencia GOE 225 (amarillo), NACA 4412 (azul), NACA 6412 (verde) [25].....	49
Figura 34: Curva Comparación Rendimiento GOE 225 (amarillo), NACA 4412 (azul), NACA 6412 (verde) [25].....	50
Figura 35: Perfil GOE 225 [25]	51
Figura 36: Extrusión Perfil Alar [26].....	67
Figura 37: Croquis Deriva Lateral [26].....	68
Figura 38: Redondeo Cantos Derivas Laterales [26].....	69
Figura 39: Operación Simetría [26]	69
Figura 40: Croquis Soportes [26]	70
Figura 41: Vista Completa Alerón [26].....	70
Figura 42: Croquis Orificios Derivas Laterales [26]	71
Figura 43: Croquis Orificios Perfil Alar [26]	72
Figura 44: Croquis Soportes Alerón [26]	73
Figura 45: Redondeo Soportes Alerón [26]	74
Figura 46: Compuesto reforzado por partículas.[27]	77
Figura 47: Compuesto reforzado con fibras unidireccionales.[27]	78
Figura 48: Compuesto reforzado con fibras bidireccionales.[27]	78



Figura 49: Compuesto estructural tipo “Sándwich”. [28]	78
Figura 50: Compuesto estructural tipo “Panel de Abeja”. [5]	79
Figura 51: Moldeo por colocación manual. [29]	81
Figura 52: Moldeo por vacío. [30]	81
Figura 53: Autoclave [31]	82
Figura 54: Proceso moldeado SMC [32]	83
Figura 55: Moldeo por compresión en caliente. [27]	84
Figura 56: Moldeado por infusión. [33]	85
Figura 57: Inicio simulación. [26]	89
Figura 58: Introducción Sistema de Medida. [26]	90
Figura 59: Introducción tipo de análisis. [26]	90
Figura 60: Introducción tipo de fluido. [26]	91
Figura 61: Introducción velocidad del fluido. [26]	91
Figura 62: Selección dominio computacional. [26]	92
Figura 63: Selección datos a calcular. [26]	92
Figura 64: Configuración mallado. [26]	93
Figura 65: Icono ejecución estudio. [26]	93
Figura 66: Introducción simulación de flujo. [26]	94
Figura 67: Simulación aerodinámica 80 km/h. [26]	94
Figura 68: Simulación aerodinámica 120 km/h. [26]	95
Figura 69: Simulación aerodinámica 160 km/h. [26]	95
Figura 70: Simulación aerodinámica 200 km/h. [26]	96
Figura 71: Simulación aerodinámica 225 km/h. [26]	96
Figura 72: Simulación aerodinámica 250 km/h. [26]	97
Figura 73: Simulación aerodinámica 275 km/h. [26]	97
Figura 74: Simulación aerodinámica 300 km/h. [26]	98



Figura 75: Simulación aerodinámica 325 km/h. [26].....	98
Figura 76: Ejecución análisis estático. [26]	102
Figura 77: Sólido a analizar. [26].....	103
Figura 78: Selección de caras. [26].....	103
Figura 79: Introducción propiedades material. [26].....	104
Figura 80: Introducción valores y direcciones de fuerzas aplicadas. [26]	104
Figura 81: Sujeciones alerón. [26].....	105
Figura 82: Mallado. [26]	105
Figura 83: Ejecución del estudio. [26]	105
Figura 84: Resultados análisis. [26]	106
Figura 85: Tensiones alerón. [26].....	107
Figura 86: Desplazamientos alerón. [26].....	108
Figura 87: Detalle desplazamiento. [26].....	108
Figura 88: FDS alerón. [26].....	109



LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación movimiento de un fluido [5].....	30
Tabla 2: Material seleccionado para la fabricación del alerón. [5]	45
Tabla 3: Presupuesto Final Proyecto. [5]	53
Tabla 4: Comparación Downforce [5].....	60
Tabla 5: Potencia Absorbida en función de la Velocidad [5].....	61
Tabla 6: Rendimiento Perfil Alar [5].....	62
Tabla 7: Comparativa evolución precio unitario [5].....	65
Tabla 8: Comparativa de propiedades mecánicas para los diferentes materiales.[5] ..	80
Tabla 9: Resultados simulaciones aerodinámicas. [5].....	99
Tabla 10: Gráfica evolución propiedades alerón.[5]	100
Tabla 11: Valores FDS. [5].....	110
Tabla 12: Coste Equipos [5].....	118
Tabla 13: Coste Diseño [5].....	118
Tabla 14: Coste Materiales [5]	119
Tabla 15: Costes Fabricación [5].....	120
Tabla 16: Presupuesto Final [5]	121



I. MEMORIA



I.1. Objetivo general.

El objetivo de este proyecto es realizar el cálculo y diseño de un alerón trasero para un automóvil de competición. En este caso en concreto para su utilización en un vehículo de la categoría FIA GT3, también conocida como el mundial de grandes turismos.

I.2. Objetivos parciales.

- **Diseño del alerón trasero.** Así como de las diferentes formas en las que se puede diseñar.
- **Estudio y selección de materiales y de los procesos para su fabricación.** De esta manera se obtiene el material y la forma más eficaz para su construcción.
- **Estudio aerodinámico del elemento.** Para comprobar el rendimiento generado y su correcto funcionamiento.
- **Análisis resistente del elemento.** Observar si el dispositivo es capaz de soportar las fuerzas generadas y poder operar sin riesgo a la rotura.
- **Elaboración planos y presupuesto.** Entender su forma constructiva y analizar la viabilidad económica del proyecto.

I.3. Antecedentes de la Aerodinámica.

La aerodinámica es una rama de la mecánica de fluidos que estudia el movimiento y la interacción que se produce entre un cuerpo sólido moviéndose a través de un fluido, en este caso el aire. A su vez, se encarga de estudiar las reacciones que aparecen sobre este, estas son una velocidad y una aceleración en una dirección determinada. [1]

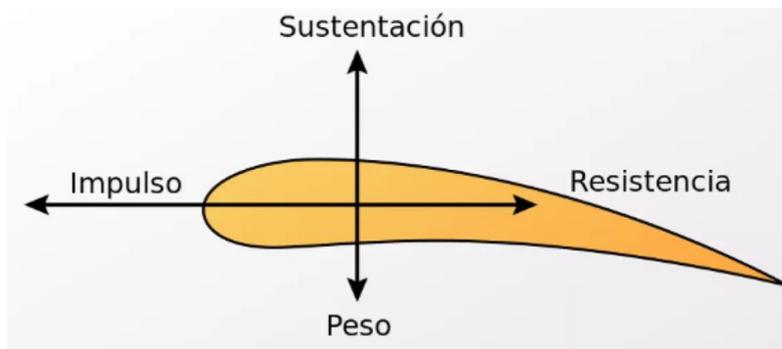


Figura 1: Fuerzas sobre un perfil alar. [2]

A principios del siglo XX se comenzaban a construir vehículos en masa, como el icónico Ford T. En aquellos tiempos, los principales quebraderos de cabeza a la hora de diseñar estos vehículos eran un fácil montaje y una gran velocidad de producción, que estaba relacionado directamente con el precio de venta, sin importar en gran medida su diseño y apariencia.



Figura 2: Ford T (1908-1927) [3]

No fue hasta principios de la década de los años 30, tras la dura depresión económica sufrida por el fin de la I Guerra Mundial, cuando científicos e ingenieros de la época comenzaron a replantearse la importancia de la aerodinámica en sus diseños, y como esto influía directamente en el rendimiento de los vehículos, mejorando sus prestaciones y reduciendo la cantidad necesaria de combustible para ser movidos. Un nuevo aspecto derivado del *art decó*, el *streamline* o su homólogo concepto de “líneas de corriente”, con formas futuristas y redondeadas muy avanzadas a la época y que duraría hasta los años 50 parecía aplicarse a diferentes áreas del diseño, como la arquitectura y el automovilismo.[4]

Apoyándose en este concepto de diseño, podrían construir vehículos menos toscos, con grandes cantos y superficies cuadradas para hacerlo de manera más refinada, apoyándose en curvaturas y formas elegantes y delicadas. Como el Chrysler Thunderbolt de 1941 o el Bugatti Type 57 de 1936 que se aprecian en la Figura 3.



Figura 3: Automóviles que siguen el movimiento del streamline [5]

Gracias a estos avances conceptuales y tecnológicos se comenzó a utilizar la aerodinámica no sólo por un tema estético, sino que los ingenieros lograron emplearla a su favor para reducir la resistencia al avance. Este hecho derivó en la reducción de absorción de potencia a altas velocidades, reduciendo a sí mismo el consumo de combustible, también se consiguió variar la carga que se aplicaba sobre las ruedas, mejorando la seguridad y el manejo de los automóviles. Aunque esta evolución también trajo consigo un compromiso entre la forma aerodinámica y la habitabilidad del vehículo se pudo a su vez mejorar las condiciones acústicas del habitáculo, al reducir las turbulencias producidas por estas formas tan burdas y cuadradas.

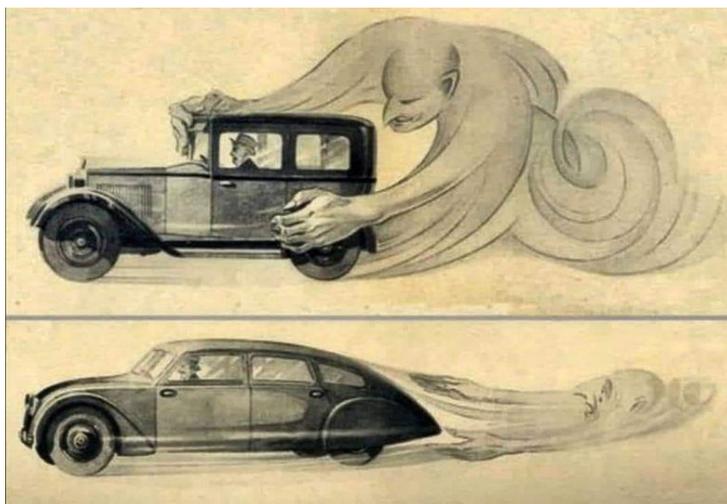


Figura 4: Representación visual de la aerodinámica [6]

Finalmente, entre la década de los 50 - 60 y tras años de observación, los investigadores lograron comprender que las mismas fuerzas generadas por un perfil alar que eran capaces de sostener en el aire a un avión de pasajeros eran capaces de pegar al suelo un vehículo si se invertía su geometría, dotándolo de un agarre extra. No sólo se conseguía agregar esta carga a los neumáticos, la única pieza de un vehículo en contacto con el suelo, sino que se evitaba producir la sustentación positiva normal que estos producían a altas velocidades y que, en algunos casos, provocaba que los coches perdieran adherencia incluso pudiendo llegar a elevarse del asfalto.

Uno de los primeros en llevar a cabo de forma práctica estos descubrimientos fue Michael May, ingeniero alemán nacido en 1934, con su legendario Porsche 550 Spyder al que le introdujo en su parte central un alerón de tipo desmontable que generaba una carga aerodinámica igual a su peso de 550 kg de fuerza a 150 km/h, de ahí su nombre, además conseguía bajar el centro de gravedad del mismo mejorando indirectamente su conducción y manejo [7]. Este vehículo fue rápidamente vetado por la federación de su competición, pero sirvió de reclamo para que otros fabricantes de todo el mundo comenzaran a investigar y crear diseños siguiendo la misma filosofía, como el ingeniero y piloto Jim Hall con su mítico Chaparral 2E.



Figura 5: Porsche 550 (1953-1956) [8]

Las modificaciones relacionadas con la aerodinámica en los coches de Fórmula 1 no llegaron hasta el famoso Gran Premio de Mónaco de 1968 de la mano de Colin Chapman, pionero de este arte en el “Gran Circo”, y de manera muy refinada con un Lotus 49b que terminaba en su parte trasera con una prolongación del chasis al estilo “cola de pato” y que formaba a su vez de carenado del motor, ya que este acostumbraba a estar siempre al descubierto.

Tras el enorme éxito que estas mejoras tuvieron en el rendimiento del coche, los ingenieros tanto de Lotus como de otras escuderías no dudaron en seguir investigando para implementar estos adelantos en sus diseños hasta que carreras más tarde se incluyó el primer alerón de un solo elemento en los circuitos.



Figura 6: Lotus 49b diseñado por Colin Chapman (1968) [9]

Una vez adoptadas estas medidas a la nueva reglamentación los alerones se convirtieron en un habitual en la competición, quedándose atrás todo aquel que no se adaptara a la nueva época. En los años futuros se fueron implementando junto a las novedades relacionadas con los fondos planos los alerones de dos y hasta tres elementos, que conseguían maximizar la carga aerodinámica, como en los Ferrari

312T2 de 1977 pilotado por Niki Lauda o el McLaren TAG MP4/2 de 1984 apreciados en la Figura 7, con el que obtuvo el título del Campeonato de Pilotos de Fórmula 1.

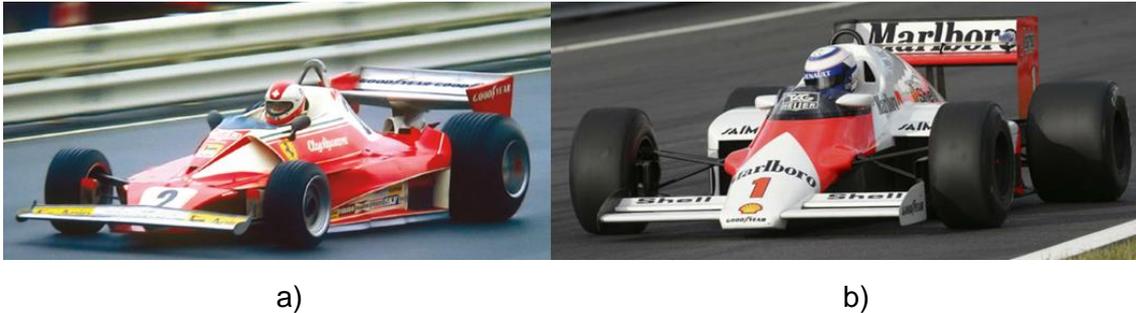


Figura 7: a) Ferrari 312T2 (1977) b) McLaren TAG MP4/2 (1984) [5]

En otras categorías del mundo automovilístico como el famoso Le Mans esta serie de medidas tardaron también en ser integradas dentro de la categoría, aunque desde su incorporación lograron otorgarle más seguridad a la competición, ya que se consideraba una de las pruebas más peligrosas y siniestradas del momento. Los coches y prototipos que corrían en esta carrera eran de los más rápidos y avanzados, llegando incluso a alcanzar los 340 km/h en las dos rectas principales del circuito de la Sarthe donde se realiza este evento desde 1923. Velocidades a las que sin ningún tipo de sustentación extra resultaba muy complicado y arriesgado circular con estos vehículos.

En concreto, mucho antes de que se implementaran estos avances técnicos en 1955 se produjo un accidente el llamado “desastre de Le Mans”, en el que se llegaron a involucrar entre pilotos y aficionados a más de 80 personas. Además, en 1972 el piloto sueco Jo Bonnier “voló literalmente como un helicóptero” debido a esta sustentación positiva que generaba su coche a altas velocidades al carecer de ningún tipo de ayuda aerodinámica, generando un grave accidente que acabó con su vida y también la de otros pilotos.

A partir de 1980, en esta misma competición, se comenzó a fomentar la eficiencia del combustible, por ello hubo numerosos cambios en la aerodinámica de los vehículos con el fin de cumplir dicho objetivo. Pues la integración de alerones traseros no solo otorgaba de mayor carga o sustentación negativa a los coches y, a su vez mayor control

y seguridad sobre estos, sino que en algunos casos incluso llegaban a conseguir menores coeficientes de penetración debido al nuevo y mejorado manejo del flujo de aire, evitando considerablemente las pérdidas en cuanto a resistencia que se generaban debido a las fuertes turbulencias.

Uno de los coches más avanzados en cuanto a su diseño era el Jaguar XJR-12, el cual corrió y ganó en esta categoría durante el período de 1990-91. Este prototipo sport contaba con una refinada carrocería en su parte delantera, favoreciendo la entrada de aire en su parte inferior hacia el fondo plano y su gran difusor, así como una parte final que contaba con el eje trasero carenado. Esto último favorecía en gran medida el manejo de las corrientes de aire hacia su gran alerón trasero. Todo esto en su conjunto lograba producir toneladas de carga que fueron vitales en el increíble rendimiento del coche en la época.



Figura 8: Jaguar XJR-12 (1990) [10]

Este tipo de avances tecnológicos no solo forman parte de la competición, sino que también se pueden observar desde la década de los 80 hasta día de hoy en coches de calle. En 1986 salió a la venta el mítico Volkswagen Corrado G60 con una innovación nunca vista hasta la fecha, la aerodinámica activa, este invento revolucionó el mercado ya que combinaba la seguridad a altas velocidades con un bajo consumo y óptimo rendimiento en condiciones de conducción normales. Contaba con un alerón automático retráctil que se desplegaba a una velocidad de 120 km/h, incrementando de forma efectiva su carga aerodinámica, logrando un comportamiento más estable y reduciendo a su vez en un 64% la sustentación positiva que hacía elevar la carrocería del coche en su parte trasera, perdiendo agarre [11]. No fueron pocos los constructores como

Porsche con su 959 o Lancia con el Therna 8.32, quienes copiaron estas ideas para introducirlos también en sus vehículos de producción.

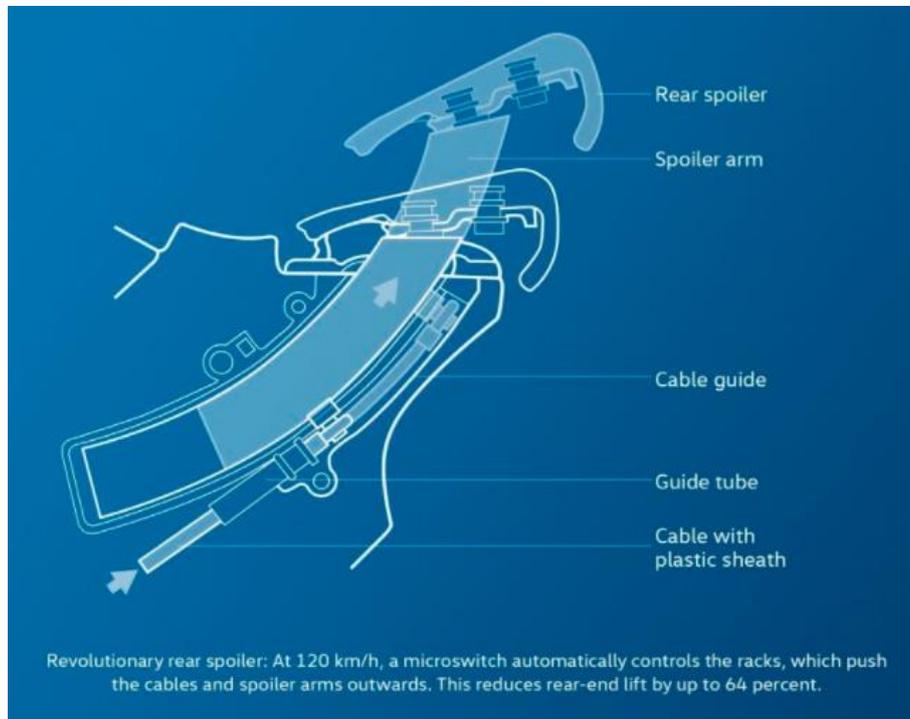


Figura 9: Mecanismo apertura alerón trasero Volkswagen Corrado G60 [12]

De estas incorporaciones aerodinámicas a los coches de calle nacieron las categorías “FIA World Touring Car Cup” también conocida por las siglas WTCR y “FIA Grand Touring” de turismos y de gran turismos respectivamente, en los que estos coches de producción fuertemente vitaminados llevaban al extremo estas medidas para competir en estos certámenes.

En el caso del mundial de turismos, las restricciones técnicas son mucho mayores que en la de gran turismos, de hecho se podría decir que son el hermano menor y mayor de una misma categoría. Por una parte, el mundial de turismos parte de una base que se comparte con los coches de calle donde se conserva el bloque, culata, cigüeñal, distribución, colectores de admisión, inyección y turbo de serie. Pero a la que se le agrega modificaciones en la línea de escape, refrigeración, reducción de peso y en la carrocería. Sin embargo, en dicha categoría por reglamento se establece que todos

los coches participantes deben de utilizar un mismo *spoiler* trasero Figura 11, para evitar crear grandes diferencias entre constructores de un certamen ya limitado de antemano.



Figura 10: Alerón Audi RS 3 LMS del WTCR (2021) [13]

- Ajustable, de un elemento
- Tipo BE 183-176 +/- 0.5mm
- Cuerda 250 +/- 1mm
- Ancho 1380 +/-1mm
- Espesor capas 2 +/- 0.5mm

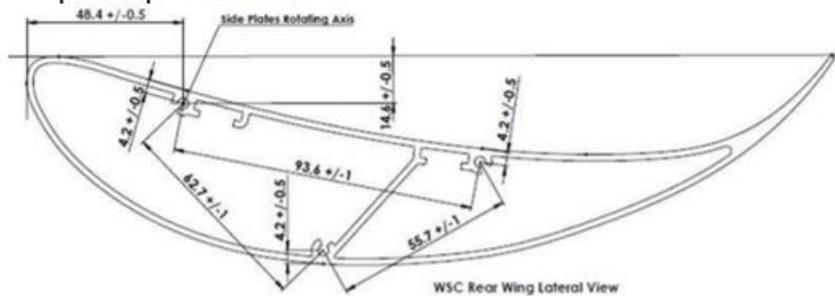


Figura 11: Normativa alerón WTCR [5]

Por otra parte, el FIA GT de gran turismo comprende hasta cuatro clases diferentes de automóviles, llamadas GT1 o GTE, GT2, GT3 y GT4, en orden decreciente en cuanto a costes y avances tecnológicos. Un vehículo de GT1 está enfocado para su competición de resistencia con escasas limitaciones en cuanto a su reglamentación, aunque sí que existen límites en cuanto al cubecaje de su motor, de 5.5 litros en el caso de los atmosféricos y de 4.0 litros para los turboalimentados y con un peso mínimo de 1250 kg. En cambio, un vehículo de clase GT3 enfocado más a un ambiente amateur apenas ha de recibir modificaciones que puedan alterar a sus homólogos de serie, debe tener entre 600 y 700 CV y no dar menos de 1350 kg en la báscula, salvo que sea dictado por normativa como los cambios aerodinámicos en su carrocería o de seguridad, como las jaulas antivuelco y protecciones de seguridad. [14]



Figura 12: Lamborghini Huracán GT3 (2021) [15]

Esta serie de acontecimientos supuso el inicio de una corriente innovadora en la que trabajan los mejores diseñadores e ingenieros de todo el mundo y que llega hasta hoy en día donde el principal objetivo es la maximización y optimización de la aerodinámica de los vehículos. Hecho que favorece directa e indirectamente a nuestra sociedad tanto en la seguridad como en el ahorro de las fuentes de energía necesarias para mover los diferentes medios de transporte que nos rodean, bien sea a través de motores de combustión interna o energía eléctrica.

De hecho, así como antaño el objetivo principal de los fabricantes era crear vehículos con buenas prestaciones mecánicas y bonitos diseños sin importar su comportamiento en carretera, se podría decir que, en la actualidad, existe una carrera



entre marcas para conseguir crear la mejor combinación entre ambas, poniendo como principal exponente el apartado aerodinámico y el coeficiente de penetración. No solo por su función ahorrativa sino también por el apartado de seguridad, se moldean las partes delanteras con aspectos curvos o formas en “V” evitando tener cantos puntiagudos para que, en caso de atropello, la víctima sufra los menores perjuicios posibles.

I.4. Principios Físicos de la Aerodinámica.

Para la realización de este trabajo es necesario conocer algunos aspectos fundamentales de los principios físicos en los que se basa este fenómeno, para ello se va a realizar esta pequeña introducción donde se tratará de explicar los fundamentos teóricos, las fuerzas a las que se somete y la parte técnica necesaria para la comprensión de este proyecto.

I.4.1. Principio de Bernoulli.

Este teorema fue expuesto por Daniel Bernoulli (1700-1782), matemático, físico y estadista holandés en su obra *Hidrodinámica* (1738). Describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente y expresa que en un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee dicho fluido permanece constante a lo largo de todo su recorrido.

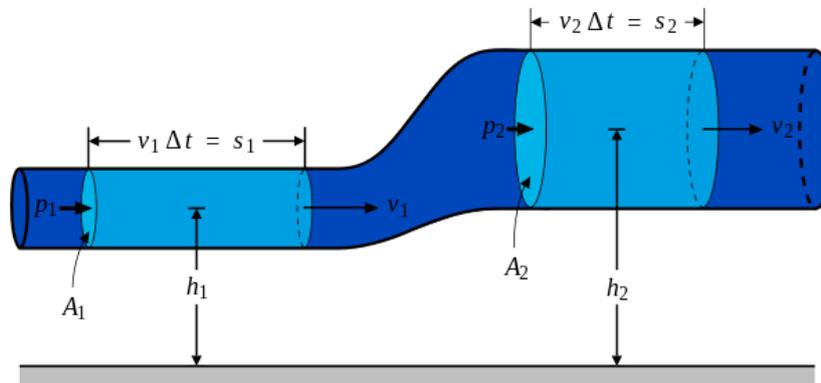


Figura 13: Ilustración concepto del Principio de Bernoulli [16]

La fórmula matemática del principio de Bernoulli consta de los siguientes términos.

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot v_2^2 + \rho g h_2$$

Donde:

- **P = Presión a lo largo de la línea de corriente (MPa)**
- **ρ = Densidad del fluido (kg/m³)**
- **v = Velocidad del fluido (m/s)**
- **g = Aceleración de la gravedad (m/s²)**
- **h = Altura (m)**

Analizando la ecuación se llega a la conclusión de que si la velocidad del fluido aumenta la presión disminuye y viceversa.

I.4.1.a. Principio de Continuidad.

Como consecuencia del anterior teorema también es necesario describir este principio que deriva del mismo, el comportamiento de un fluido dentro de un conducto. Cuando un fluido se encuentra por un conducto de diámetro variable, su velocidad cambia debido a que la sección transversal varía de una sección del conducto a otra.

Donde el caudal Q es igual a la velocidad del fluido v por el área A del conducto por donde circula, siendo:

$$Q = A \cdot v$$

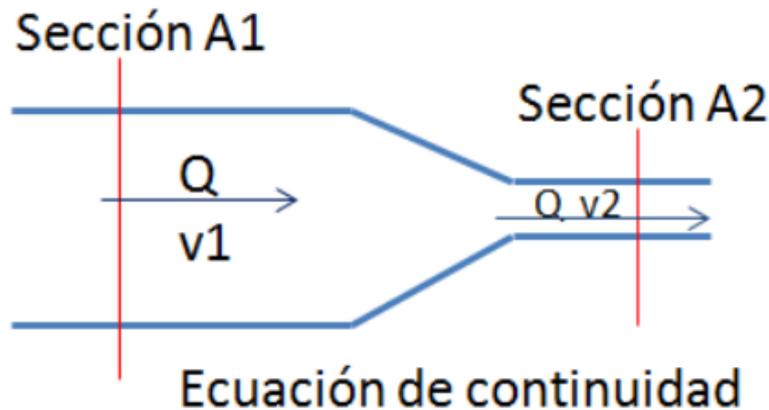


Figura 14: Ilustración concepto del Principio de Continuidad [5]

“En todo fluido incompresible, con flujo estacionario (régimen laminar), la velocidad de un punto cualquiera de un conducto es inversamente proporcional a la superficie, en ese punto, de la sección transversal de la misma.” [17]

La siguiente ecuación describe lo que se observa en la imagen anterior.

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = cte$$

I.4.2. Efecto Venturi.

Este fenómeno involucra los dos principios mencionados anteriormente, ya que involucra la presión con el área de contacto y la velocidad del fluido. Fue demostrado por Giovanni Battista Venturi (1746-1822) y explicó que las partículas son aceleradas debido a la conservación de la energía (principio de Bernoulli), la conservación del momento (3ª ley de Newton) y de la masa (ecuaciones de Euler).

“Un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado disminuye su presión al aumentar la velocidad después de pasar por una zona de sección menor.”

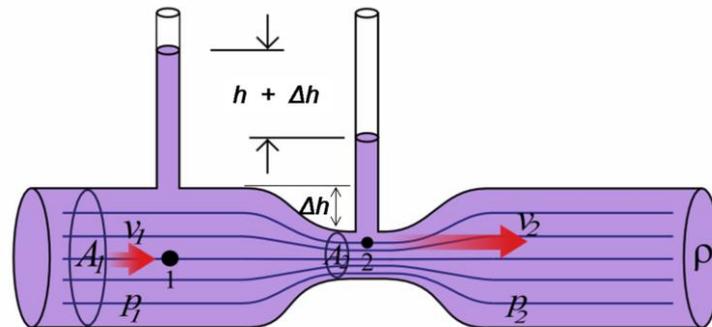


Figura 15: Ilustración concepto del Efecto Venturi [18]

I.4.3. 3ª Ley de Newton.

La tercera ley de Newton o principio de acción-reacción, fue redactado por Sir Isaac Newton (1642-1727), físico, matemático y astrónomo inglés en 1684 en su gran obra *Principia Mathematica*. Esta ley establece que cuando dos cuerpos interactúan entre sí, aparecen fuerzas iguales y de sentidos opuestos sobre el cuerpo que la produjo.

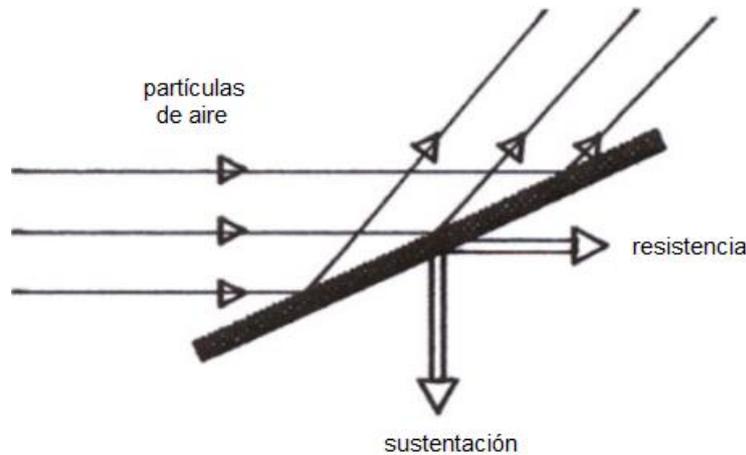


Figura 16: Ilustración concepto acción-reacción [192]

En este caso, la fuerza con la que impactan las partículas de aire contra el perfil de un ala transfiere una cantidad de movimiento creando las reacciones en sentido contrario llamadas resistencia y sustentación. El objetivo principal en el caso del diseño de un perfil alar es conseguir crear la mayor cantidad de sustentación con la menor resistencia posible.

I.4.4. Número de Reynolds.

Este concepto debe su nombre al ingeniero y físico Osborne Reynolds (1842-1912) quien se apoyó en las ecuaciones de Navier-Stokes, de George Stokes, para desarrollarlo. Se trata de un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos para caracterizar el movimiento de un fluido. Su valor se encarga de indicar el tipo de movimiento que adquiere, es decir, si se trata de un modelo de tipo laminar o turbulento.

La expresión general del número de Reynolds expresa la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en un fluido, relacionando la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un determinado flujo. La ecuación general, sus componentes característicos y su clasificación son los siguientes.

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu}$$

Donde:

- ρ = Densidad del fluido (kg/m^3)
- u = Velocidad del fluido (m/s)
- L = Longitud (m)
- μ = Viscosidad dinámica ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

Tabla 1: Clasificación movimiento de un fluido [5]

$Re \leq 2300$	Régimen de flujo estacionario, se comporta como si estuviera formado por láminas delgadas.
$2300 \leq Re \leq 4000$	Régimen en transición.
$Re \geq 4000$	Régimen turbulento, caracterizado por un movimiento desordenado, no estacionario y tridimensional.

I.4.5. Capa Límite.

También llamada capa fronteriza, es una zona donde el movimiento de un fluido es perturbado por la presencia de un cuerpo sólido con el que se encuentra en contacto. Esta capa límite puede ser laminar o turbulenta, aunque durante un período de tiempo pueden llegar a coexistir estos dos tipos de casos.

Este es un apartado muy importante en el diseño de perfiles alares ya que define directamente la cantidad de sustentación que se genera, pues es preferible diseñar un perfil que trabaje en una capa límite de tipo turbulento ya que permite actuar a mayores ángulos de ataque, al contrario que la de tipo laminar que se desprende más fácilmente, provocando la pérdida de adherencia del flujo sobre la superficie y con la consecuente anulación de la carga. Este fenómeno se conoce en el mundo de la aerodinámica como entrar en pérdida o en barrena.

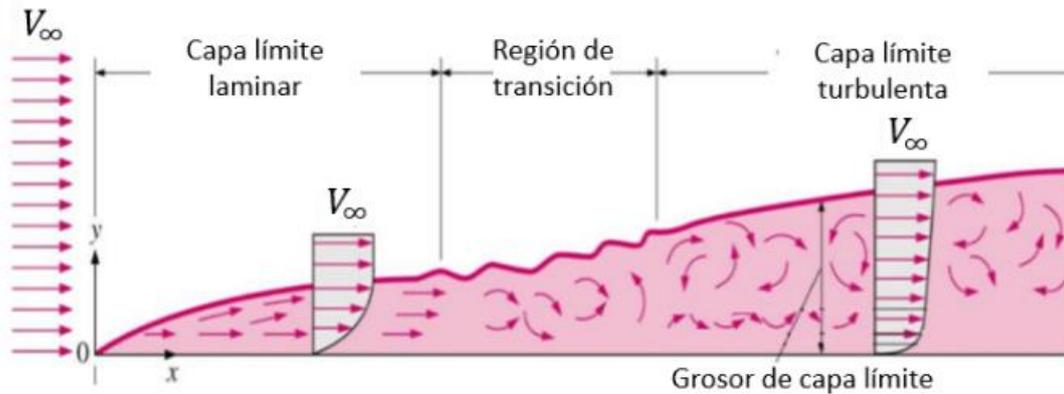


Figura 17: Comportamiento capa límite [20]

I.4.6. Perfil Alar.

Una vez explicados los principios físicos que lo sustentan ya se puede llegar a entender cómo se genera la carga aerodinámica que actúa sobre un perfil alar.

Las partículas de aire que circulan por el intradós, tendrán que realizar un recorrido más corto que en el extradós Figura 18. Como el caudal circulante es el mismo por ambas partes, en la parte superior el fluido circulará a una velocidad menor que en la inferior, creando un diferencial de presiones generando a su vez una fuerza (hacia abajo) de sustentación negativa, lo que se traduce en carga aerodinámica.

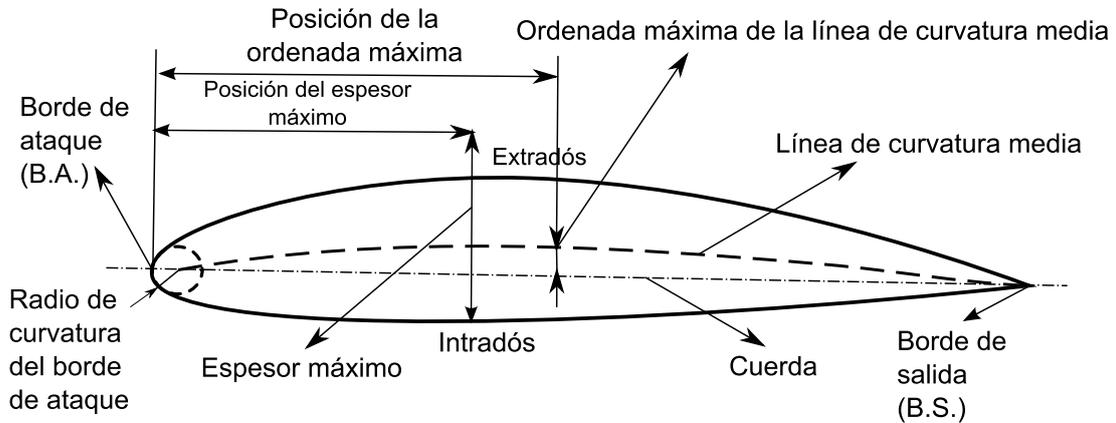


Figura 18: Partes de un perfil alar [21]

I.4.6.a. Carga Aerodinámica (C_L - C_Z)

Se llama carga o *lift* a aquella sustentación positiva o negativa que se genere en un perfil alar. En términos generales, la tendencia normal es que las formas modernas de los vehículos generen sustentación positiva Figura 19a), elevando la carrocería del suelo, es por esto por lo que la introducción de un alerón en un turismo no sólo es beneficioso por otorgar carga (sustentación negativa) consiguiendo separar más alto el flujo de aire, sino por que resta fuerza a esta tendencia de elevar el vehículo Figura 19b).

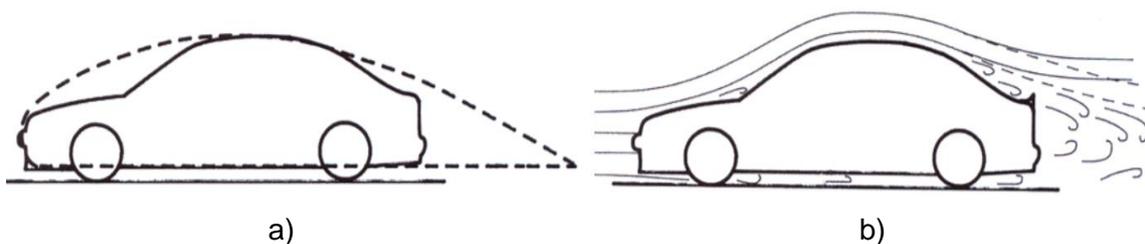


Figura 19:a) Un vehículo tiende a parecerse al ala de un avión
b) El uso de un spoiler consigue separar el flujo de aire [19]

Sin ir más lejos, un turismo corriente a una velocidad de 160 km/h produce entre 70 y 90 kg de fuerza ascendente, pesa “menos” que si se realizara esa medida con una báscula en parado. La introducción de un pequeño *spoiler* en su parte trasera otorga al mismo una fuerza de 60 kg en sentido descendente, es decir, genera una cantidad de 130 – 150 kg de diferencia en cuanto a la carga producida. [7]

Los coeficientes de fuerzas correspondientes con el componente de sustentación se rigen mediante la siguiente fórmula.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S}$$

Donde:

- **L = Fuerza resultante de sustentación (N)**
- **ρ = Densidad del fluido (kg/m³)**
- **V = Velocidad del fluido (m/s)**
- **S = Superficie alar (m)**

I.4.6.b. Resistencia Aerodinámica (C_X - C_D)

Se denomina resistencia o forma aerodinámica a la fuerza que sufre un cuerpo al moverse a través de un fluido, en este caso aire, y en particular a la componente de esta fuerza en la dirección de la velocidad relativa. Es una fuerza que se genera por la reacción del aire golpeando una superficie determinada, oponiéndose a su avance. La fuerza que esta origina proviene de la siguiente expresión.

$$F_X = C_X \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S$$

Y el coeficiente de penetración C_X se puede despejar de la misma ecuación quedando de la siguiente forma.

$$C_X = \frac{F_X}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S}$$

Donde:

- F_x = Fuerza de resistencia al avance (N)
- ρ = Densidad del fluido (kg/m^3)
- V = Velocidad del fluido (m/s)
- S = Superficie alar (m)

Además, la propia resistencia se divide en dos subcategorías que componen la resistencia total, pero estas son de mayor importancia en el mundo de la aeronáutica que en la automovilística, ya que van ligadas principalmente con la variación del ángulo de ataque de un ala en movimiento, en cambio para este estudio o el del alerón de un vehículo generalmente se cuenta con un ángulo fijo y no variable. Estas componentes son la parásita y la inducida, la primera de ellas disminuye a velocidades bajas y aumenta a velocidades altas, al contrario sucede con la resistencia inducida que aumenta en bajas y disminuye a altas velocidades. Este suceso es algo parecido con lo que ocurre al remolcar una carga, al principio cuesta mucho tirar de ella, sin embargo, al alcanzar cierta velocidad el esfuerzo de arrastre es menor.

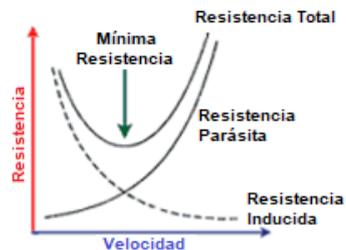


Figura 20: Curva evolución resistencia en función de la velocidad [5]

I.4.6.c. Eficiencia Aerodinámica (E)

Se denomina eficiencia aerodinámica a la relación entre el coeficiente de sustentación C_L con el coeficiente de resistencia aerodinámica C_x , y su fórmula quedaría de la siguiente manera.

$$E = \frac{C_L}{C_x}$$



Este es el valor más apreciado por los fabricantes ya que es el que representa verdaderamente el trabajo de los ingenieros por hacer el vehículo más aerodinámico posible, cuanto mayor sea el valor de este número adimensional, mejores prestaciones se obtendrán del mismo.

Detalles en la carrocería como el diseño de la refrigeración del motor, los retrovisores exteriores, accesorios de techo o las propias ruedas y guardabarros incrementan en gran medida el coeficiente de penetración del automóvil. Sin ir más lejos, en el caso de los retrovisores impacta en un 5% al total del C_x pero en el caso de los pasos de rueda y guardabarros puede llegar a suponer hasta el 35% del mismo. [26] Ya que estos crean vórtices en el interior de estas cavidades o incluso las ruedas en movimiento realizan giros indeseados en las líneas de corriente que fluyen por el vehículo, estropeándolo.

Por otra parte, también existen métodos para reducir esta resistencia que generamos como carenando las ruedas o creando un fondo plano en el coche, de hecho, este último resulta vital en el mundo de la competición no solo restando resistencia, sino conduciendo corrientes de aire hacia el difusor otorgando carga aerodinámica extra de hasta un 30%. Como ya se mencionó anteriormente, lo complicado de crear un buen diseño aerodinámico con grandes prestaciones, es decir, con una gran eficiencia, reside en el buen manejo de este flujo a su paso por todas las partes del coche.

I.5. Clasificación Alerones.

En el ambiente automovilístico ha habido diferentes configuraciones aerodinámicas a lo largo del tiempo, desde sus inicios con diseños más simples hasta la actualidad con formas complejas y grandes avances tecnológicos, fruto del largo período de estudio en el sector, vital para conseguir esas décimas de segundo tan importantes en el mundo de la competición y que separan los coches “normales” con los ganadores de títulos mundiales.

Esta clasificación se va a configurar en función de los diferentes tipos que existen, y no de la propia forma que los conforman. Ya que en aeronáutica o en los complejíssimos alerones de Fórmula 1 se trabaja, generalmente, con perfiles de tipo compuesto, donde su perfil no-simétrico varía a lo largo del mismo. Como en los aviones con perfiles más anchos en las partes más cercanas al fuselaje y más finas al extremo de las alas o como en los monoplazas donde también varía esta figura con alerones de configuración de cuchara doble o simple.

I.5.1. Alerones de un elemento.

Es la forma más sencilla que se puede construir y con la que se introdujo este concepto. Durante años se ha ido perfeccionando la técnica, aunque los valores teóricos siguen siendo los mismos. Aunque hoy en día se siguen utilizando en multitud de coches deportivos de calle e incluso en competiciones oficiales de la FIA, ya que son los más prácticos y económicos de producir, tienen una importancia crucial ya que fueron los primeros en introducirse y con los que se dieron “los primeros pasos” en el mundo de la aerodinámica.

Se trata de un perfil alar simple con curvatura que se puede colocar con un ángulo de ataque desde los 0° hasta los 20° (ángulo crítico), ya que a partir de este punto el flujo de aire comienza a desprenderse entrando en pérdida. Para intentar remendar esta situación las primeras veces que se trabajaba con estos alerones, el ingeniero y piloto Daniel Gurney (1931-2018) llegó a la conclusión que añadiendo una pequeña arista del orden del 1 o 2 % de la cuerda del perfil fijada al borde de fuga del ala y formando un ángulo de 90° se conseguía incrementar este ángulo de ataque sin

perturbar el flujo de aire, mejorando notablemente su carga aerodinámica sin apenas perturbar la resistencia total producida. [19]

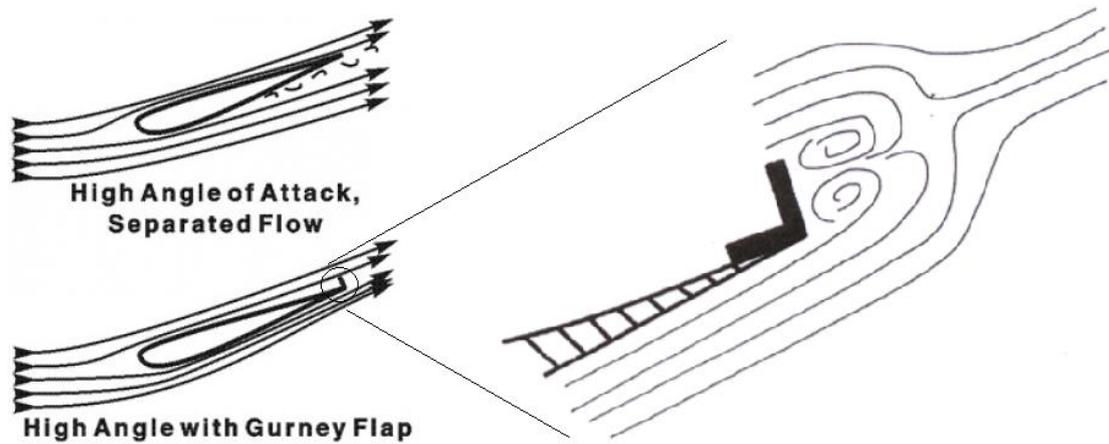


Figura 21: Comparación flujos de aire con/sin flap Gurney [19]

Por otra parte, también se introdujeron novedades en cuanto a la recirculación del aire, así como para hacer de soporte del propio alerón, aunque en algunas competiciones no está permitido tener sujeciones laterales y este se debe anclar en su zona central mediante un soporte simple o de tipo palanca, que ayuda a mejorar la carga generada debido al momento de las fuerzas que este produce. La función de estas derivas laterales son solucionar inestabilidades, vibraciones ocasionadas por las turbulencias y canalizar mejor el flujo por el interior del alerón, evitando el derrame y la separación del mismo, esto consigue concentrar un mayor volumen de aire, cuanto más fricción mayor fuerza vertical se creará, en concreto el uso de estos dispositivos supone un incremento de hasta un 30% en el *downforce* producido.

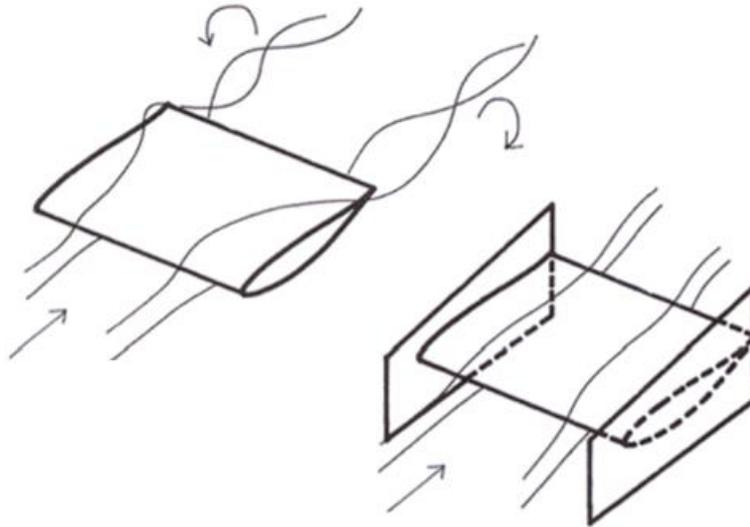


Figura 22: Importancia de las derivas laterales en la conducción del aire [19]

I.5.2. Alerones de dos elementos.

En caso de querer obtener una mayor carga aerodinámica que la propuesta por un perfil alar de un solo elemento se tendría que optar por una configuración de dos elementos o más. En este caso, se puede añadir un plano adicional a la estructura del alerón para conseguir esta carga deseada, generalmente este perfil extra suele tener el mismo perfil que el principal, pero a menor escala “*flap* externo”. De esta manera se consigue aumentar la superficie en planta del alerón en contacto con el aire sin aumentar la curvatura y la longitud de un alerón de un solo elemento capaz de crear la misma cantidad de agarre, puesto que esta acción podría suponer entrar en una región de pérdida aerodinámica.

En concreto hay dos formas comunes para la realización de este tipo de alerón que deriva directamente de aplicaciones aeronáuticas donde el *flap* es una pieza móvil el cual a veces es necesario aumentar radicalmente el *lift*, como al aterrizar o despegar. Estas son la configuración ya mencionada de “*flap* externo” y la de “*flap* de ranura”, también conocido en el mundo del motor como “*flap Fowler*” o dispositivo hipersustentador en la aeronáutica.

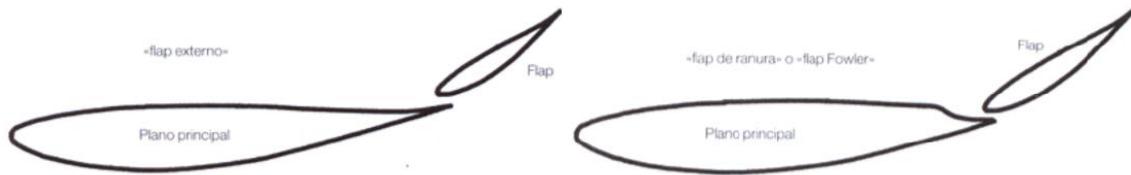


Figura 23: Diferencia de perfil sin y con ranura Fowler [19]

La clave de esta geometría reside también en parte en la ranura ubicada entre el borde de fuga del plano principal y el borde de ataque del *flap*. El aire que circula por la zona de alta presión del plano principal llega a la zona de succión del *flap*, aumentando de esta forma la velocidad del flujo y disminuyendo la presión, incrementando consecuentemente la carga aerodinámica, es por ello que la configuración *Fowler* tiene esta abertura más grande entre perfiles para evitar el solapamiento de flujos. Esto en su conjunto ayuda a controlar la capa límite y a retrasar la separación del flujo, permitiendo mayores ángulos de ataque antes de que el *flap* entre en pérdida, de manera que la combinación del área adicional, el incremento de la curvatura total del perfil y la beneficiosa modificación del campo de flujo alrededor del plano principal sirve para conseguir un aumento muy significativo en la sustentación producida.

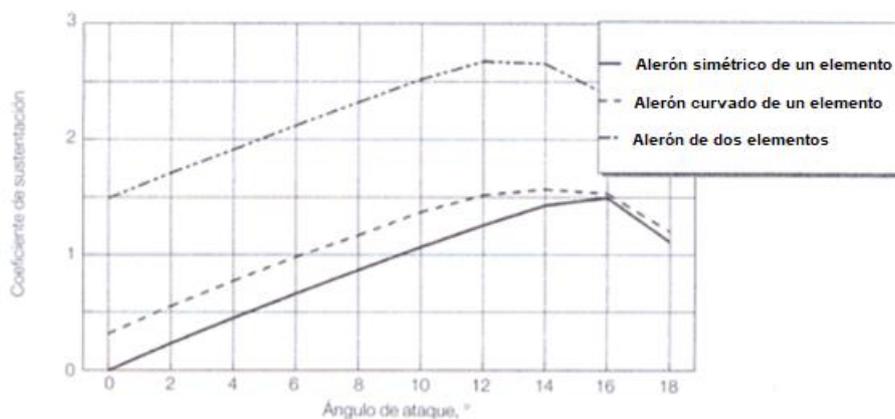


Figura 24: Coeficiente de sustentación en función del tipo de alerón [19]

I.5.3. Alerones de varios elementos.

Para la creación de alerones de más de dos elementos se suele añadir una pareja de *flaps* contiguas al plano principal, lo que consigue crear un ángulo de ataque mayor sin perjudicar la adherencia del flujo, puesto que este se va desplazando progresivamente sin llegar a derramarse por completo, las aletas extra ayudan a “acompañar” este flujo hasta el borde de fuga del último elemento. Existen múltiples posiciones posibles para estos nuevos *flaps*, hay textos aeronáuticos que sugieren que el primero de ellos debe ser algo más pequeño y ancho que el segundo o que la separación entre el plano principal y el *flap* secundario debe ser mayor que con el tercero, dependiendo siempre del uso que se vaya a realizar y de la eficiencia o relación carga-resistencia que se quisiera obtener podemos construir una geometría u otra.

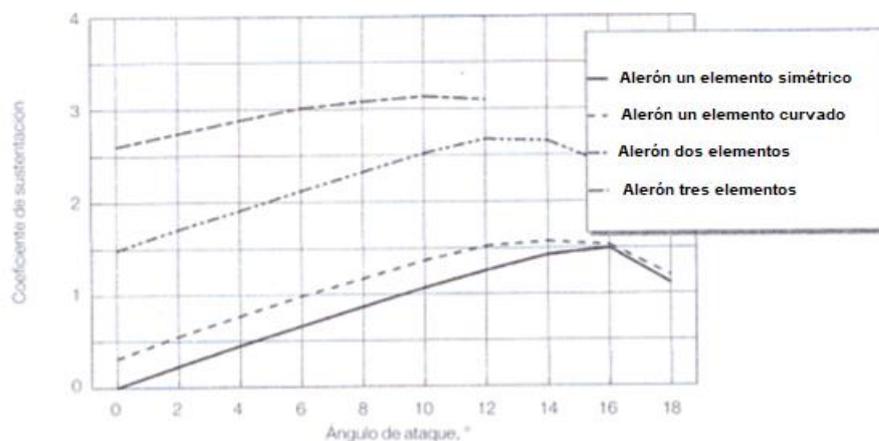


Figura 25: Coeficiente de sustentación en función del tipo de alerón [19]

Esta configuración permite incluso colocar el último *flap* de ellos a una posición mayor de 90° con respecto a la cuerda del anterior, lo que otorga una cantidad grandísima de agarre a costa de, evidentemente, otra cantidad enorme de resistencia aerodinámica, a esta práctica se le conoce también como “Persiana Veneciana” por la cantidad de perfiles que existen en el dispositivo. Esto es perjudicial en muchas competiciones ya que perjudicaría en gran medida la eficiencia del vehículo, perdiendo más prestaciones de las que se ganarían, ya que se necesitaría más potencia que la disponible en el motor para moverse, sería prácticamente como intentar mover un vehículo con una pared completamente vertical a rastras. En cambio, resulta de gran

interés utilizarlos en competiciones donde no se alcancen grandes velocidades o donde el agarre juegue un papel crucial como sería el caso del GP de Mónaco y de los Hillclimb o carreras de ascensión de montaña como el mítico Pikes Peak ubicado en las montañas rocosas en Estados Unidos.



Figura 26: Vehículo con alerones de varios elementos [23]

I.5.3.a Alerones de varios elementos con aleta.

Dentro de esta variante también existe una configuración que presenta una pequeña aleta situada por delante del borde de ataque del plano principal y evita tener que modificar la geometría del mismo. Esto permite el movimiento del plano principal entre 0° y 4° sin perder efectividad, lo que ayuda al incremento de la velocidad del aire en esa parte y al diferencial de presiones obtenidas, por tanto, más *downforce* producido.

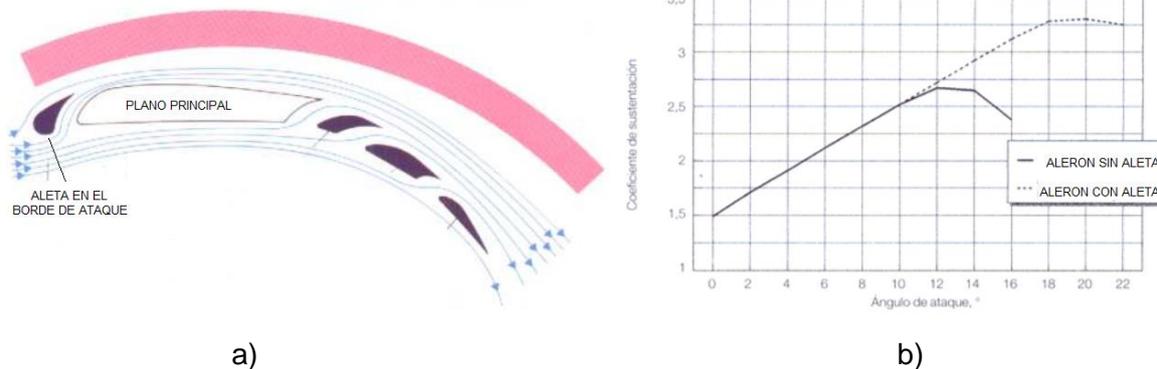


Figura 27:a) Perfil alar con aleta b) Diferencia sustentación con/sin aleta [5]

Principalmente se utiliza esta agrupación en la industria aeronáutica, todos los aviones comerciales lo presentan ya que aumenta en gran medida la superficie por la que circula el aire y permite, a su vez, mayores grados de inclinación. Aunque también es popular en la Fórmula 1, donde los alerones delanteros presentan un primer plano que homológamente cumple dicha función técnica.

1.5.4. Alerones múltiples.

No resulta tan extraño hablar sobre este tipo de configuraciones si tenemos en cuenta que el primer avión en volar era un biplano con dos perfiles alares con un relativo parecido a este, aunque no se vea muy a menudo en las competiciones salvo monoplazas o vehículos de fabricación propia, ya que este tipo o conjunto de alerones no se podría aplicar fácilmente en un coche convencional debido a la limitación de espacio existente.

En concreto es muy habitual verlos, siempre y cuando la reglamentación lo permita, en la Fórmula 1 ya que, con un plano adicional en la parte inferior, se permite aprovechar los flujos de aire provenientes del fondo plano, disminuyendo a su vez la presión de este, así como las corrientes de aire caliente de los sistemas de escape. Con este tipo de alerones no se consigue el doble de carga como se podría llegar a pensar al tener dos alerones montados sobre el mismo soporte. Esto es debido a que el plano de la parte superior interfiere con el de abajo generando una zona de baja presión en la

parte donde se crea alta presión, para ello es necesario que se tenga una amplia separación entre ambos y así evitar que esto ocurra. De todas maneras, la ganancia en cuanto a carga es grandísima en comparación con un mismo soporte con un solo elemento.



Figura 28: Alerón múltiple Mercedes F1 (2001)

I.6. Consideraciones de Diseño.

Muchas categorías automovilísticas disponen de una amplia normativa para regular e igualar los vehículos entre competidores, así como para ahorrar costes derivados del desarrollo de ciertas partes, como en el aspecto aerodinámico. Esto hace por ejemplo que en pequeñas competiciones como el WTCR se tenga un mismo diseño de alerón trasero para todos los participantes, esto supone una ventaja económica y competitiva.

Sin embargo, en algunas competiciones como en F1 o en GT3 no hay una normativa clara y definida, en estas categorías las escuderías deben desarrollar y fabricar sus componentes amoldándose a una serie de requisitos que no se pueden infringir, buscando siempre las “zonas grises” a las que sacar mayor partido. Posteriormente, estos dispositivos son sometidos a un proceso de valoración por el comité organizador de la competición para valorar si cumple o no los requisitos o si la pieza diseñada se encuentra fuera de las especificaciones consideradas como legales.

Por tanto, para el diseño de este alerón trasero se va a seguir unas pautas homólogas a las especificaciones que se encuentran dentro de la categoría GT3, estos requisitos son los siguientes:

- **El perfil alar utilizado debe estar normalizado.**
- **La anchura del alerón no podrá superar en ningún caso la anchura del vehículo.**
- **La altura del alerón no podrá superar en ningún caso la altura del vehículo.**

Para mayor detalle se puede consultar el apartado ANEXO 1 - DISEÑO, donde se explica el proceso completo del diseño del alerón de este proyecto.

I.7. Materiales y Fabricación.

Para el diseño y fabricación de un elemento de estas características, en primer lugar, se necesita saber los requisitos y las condiciones de trabajo a las que va a estar expuesta para poder elegir el material más adecuado para su fabricación. Además, también se debe tener en cuenta las limitaciones que puede ocasionar su forma constructiva, así como el objetivo para el cual está siendo diseñado y de esta manera poder elegir el mejor proceso de fabricación.

En cuanto al ámbito de trabajo, esta pieza va a ser diseñada para competición, donde el principal objetivo es su rendimiento. Por tanto, no es de vital importancia la durabilidad sino más bien la obtención de las mejores propiedades mecánicas con la mayor ligereza posible.

Es por esto por lo que los materiales más adecuados para el conformado de esta pieza son los de tipo compuesto, ya que reúnen las mejores propiedades de los materiales convencionales. En este caso, debido a sus características, se ha elegido de entre otros como material más apropiado a un pre-impregnado de fibra de carbono de alto módulo (HMS) con resina epoxi el cuál se observan sus propiedades a continuación.

Tabla 2: Material seleccionado para la fabricación del alerón. [5]

	FIBRA DE CARBONO HMS + EPOXI
Ex (MPa)	266498
Ey (MPa)	16625
Ez (MPa)	16625
Gxy (MPa)	7297
Gyz (MPa)	6976
Gxz (MPa)	7297
Xt (MPa)	1750
Yt (MPa)	48
Xc (MPa)	1050
Yc (MPa)	90
Le (MPa)	1750
ρ (kg/m ³)	1620



En cuanto a su fabricación, el dispositivo está dividido en dos partes, las derivas laterales capaces de canalizar el flujo de aire para aumentar el rendimiento del alerón y por otra parte, el propio perfil alar con sus soportes. Toda la pieza va a ser construida mediante el mismo material, sin embargo, las técnicas de conformado varían según la pieza ya que en el caso de las derivas no se requiere de unas grandes habilidades para fabricarla.

Por este motivo, ambas piezas se fabricarán por colocación manual de las fibras, la diferencia radica principalmente en la forma de curado de las piezas, mientras que con las derivas se utiliza una bolsa de vacío y un horno para alcanzar las temperaturas de curado, el conjunto del perfil alar más los soportes también irá acompañado del autoclave para mejorar su acabado.

Todo este proceso de comparación y elección tanto del material como del proceso de fabricación adecuado para cada elemento se puede observar de una forma mucho más detallada en el apartado ANEXO 2 - MATERIALES Y PROCESOS DE FABRICACIÓN.

I.8. Elección Perfil Alar.

En primer lugar, se presentan tres opciones diferentes en cuanto al diseño del alerón, para conocer las capacidades técnicas y de diseño que los diferencian [25]. Se procede a comparar los siguientes perfiles de tipo NACA 6412, 4412 y GOE 225.

- **NACA 6412**

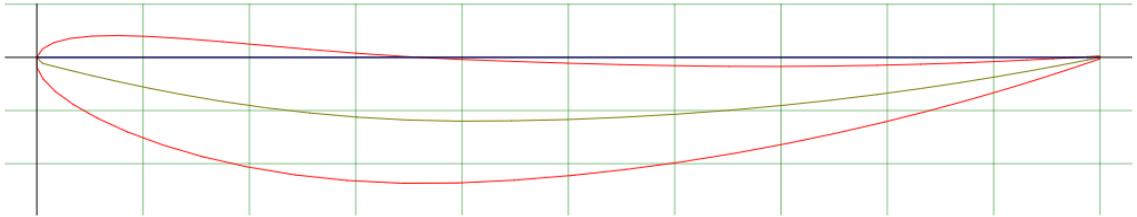


Figura 29: Perfil NACA 6412 [25]

- **NACA 4412**

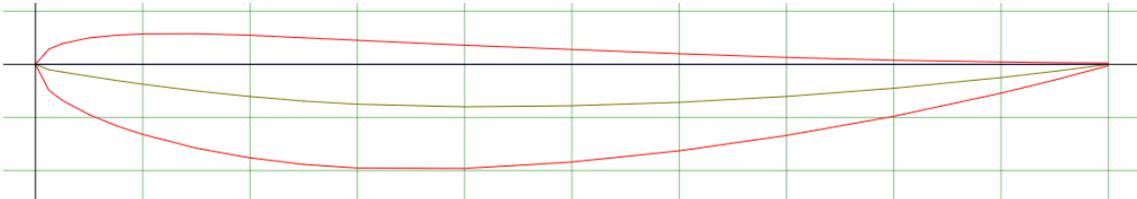


Figura 30: Perfil NACA 4412 [25]

- **GOE 225**

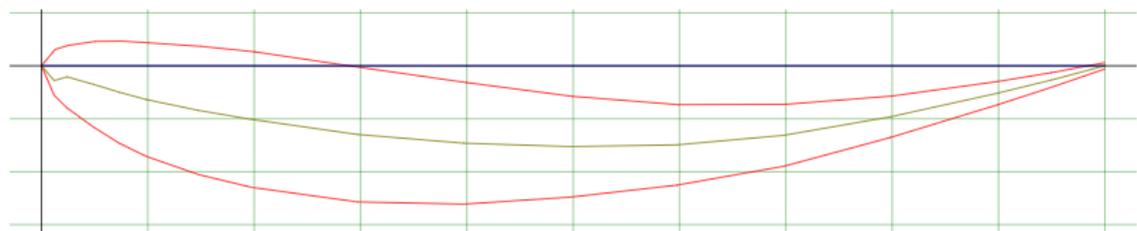


Figura 31: Perfil GOE 225 [25]

I.8.1. Comparación Sustentación C_L (*downforce*).

En este apartado se puede observar el *lift* producido en función del ángulo de ataque (α) del alerón. Para tener una referencia en este apartado el estudio se centra en los ángulos comprendidos entre 0° y 10° .

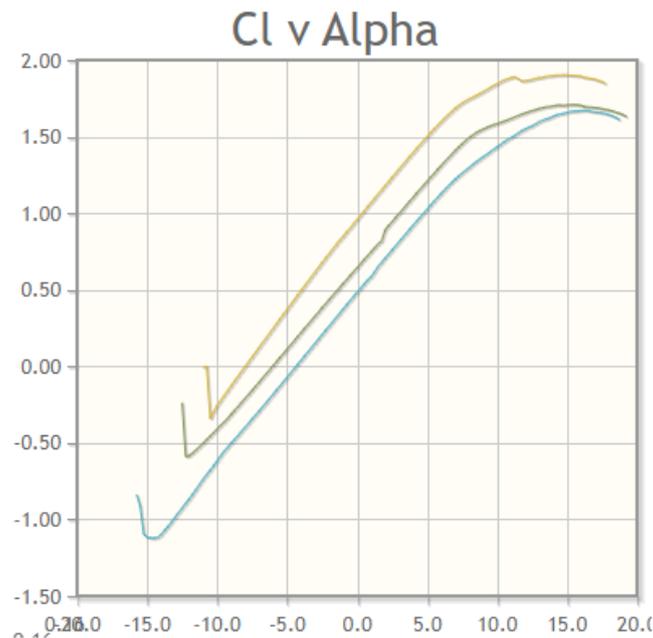


Figura 32: Curva Comparación Sustentación. GOE 225 (amarillo), NACA 4412 (azul), NACA 6412 (verde) [25]

En la imagen anterior se puede apreciar que el perfil GOE 225 es el que más *downforce* produce frente al NACA 4412 en la posición opuesta. A 0° el primero de ellos produce un C_L de 1, en cambio el último de estos se encuentra a la mitad con un C_L de 0,5. Por otra parte, a 10° se observa mayor diferencia entre el GOE 225 con el resto de los perfiles ya que tiene un comportamiento más estable conforme aumenta el ángulo de ataque. El NACA 6412 se encuentra en una posición intermedia entre estos durante todo el recorrido de la gráfica.

I.8.2. Comparación Resistencia C_D (*drag*).

En este apartado el gráfico se centra en un rango más alto entre 0° y 15° para encontrar algo más de diferencia entre perfiles.

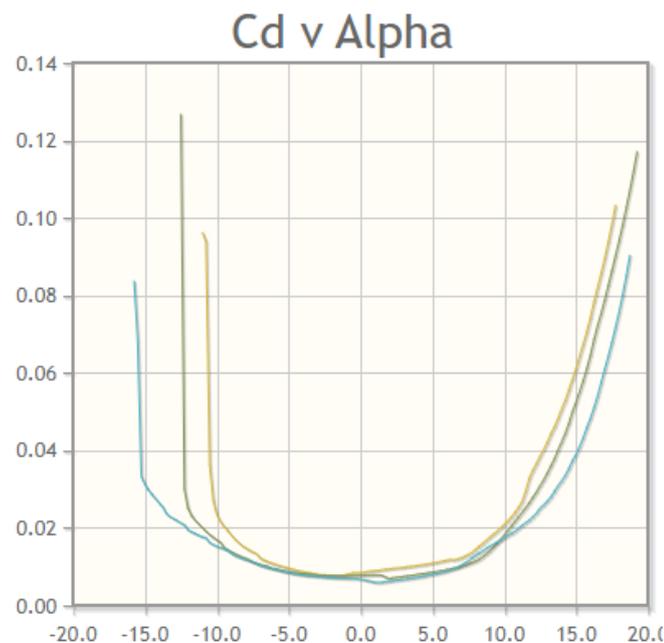


Figura 33: Curva Comparación Resistencia GOE 225 (amarillo), NACA 4412 (azul), NACA 6412 (verde) [25]

Como se observa en la anterior imagen los tres perfiles son muy similares en cuanto a sus características de resistencia. Sin embargo, se encuentran ciertas diferencias a partir de los 10° , esto se debe principalmente a la forma geométrica del perfil y también provocado por la cantidad de *downforce* que se produce, ya que indirectamente hace que el *drag* se vea aumentado. En este caso, a 15° el GOE 225 produce un C_D de 0.06 mientras que el del NACA 4412 es 0.04, pero en cambio produce hasta un 25% menos de carga aerodinámica con el mismo ángulo de ataque.

I.8.3. Comparación Rendimiento C_L/C_D .

En este apartado se va a observar las diferencias existentes en cuanto al rendimiento de las alas. Como anteriormente, se va a analizar un rango entre 0° y 10° el cuál será el interesante de cara al diseño de este proyecto.

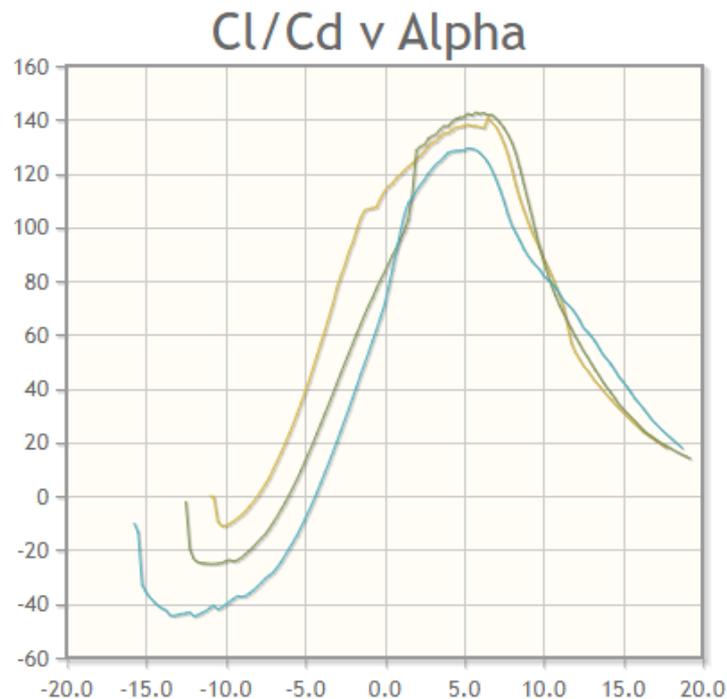


Figura 34: Curva Comparación Rendimiento GOE 225 (amarillo), NACA 4412 (azul), NACA 6412 (verde) [25]

En dicha imagen se observa que esta vez el NACA 6412 saca a relucir su potencial, acercándose en gran medida al GOE 225 que hasta el momento mejor resultados daba. Se aprecia que a 0° el NACA 6412 aún no destaca, sin embargo, logra superar entre los 2° y 10° al último de ellos.

I.8.4. Resumen Elección.

Tras analizar las gráficas y comparando sus características finalmente el más destacado es el perfil GOE 225, ya que reúne las mejores propiedades técnicas para el diseño del alerón. Por el propio diseño geométrico del mismo se consigue una mayor cantidad de carga aerodinámica a costa de una cantidad mínima de resistencia. A su vez, el rendimiento general es mayor que el resto tanto a bajos como a altos ángulos de incidencia.

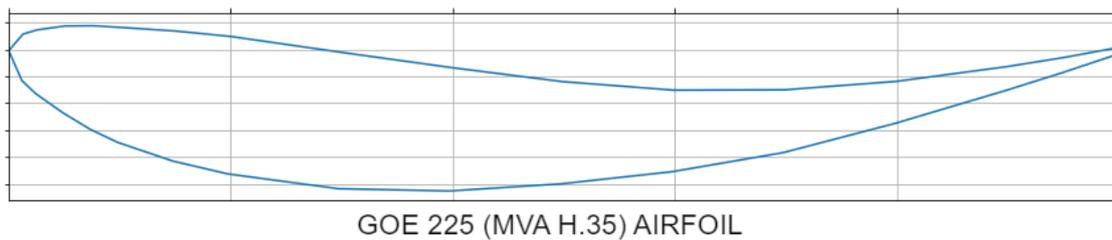


Figura 35: Perfil GOE 225 [25]



I.9. Conclusiones.

Al finalizar este proyecto se ha llegado a comprender la importancia que tiene la aerodinámica en la actualidad, no solo en el mundo de la competición sino también en el día a día. Este es un concepto en auge en la actualidad, no solo por las ventajas mecánicas que se puede conseguir en el ámbito competitivo sino también por la gran cantidad de ahorro que puede suponer en un vehículo de calle.

Esto se debe a que hay dos fuerzas importantes en juego, la sustentación y la resistencia. En la competición prima la primera de ellas para lograr una ventaja competitiva, sin embargo, la resistencia juega un papel fundamental en el diseño de automóviles e incluso aviones, lo que hace tener transportes más seguros, eficientes y comprometidos con el medio ambiente. Pues un buen diseño aerodinámico enfocado en la reducción de la resistencia puede llegar a conseguir reducciones de costes derivados en los consumos de combustible o en la propia seguridad de conductores y viandantes.

Los análisis realizados a través del software SolidWorks han sido utilizados para comprobar todo el proceso de diseño de este elemento, desde su forma geométrica y el comportamiento que este tiene ante el fluido que lo trasiega, hasta la solidez que presenta con los materiales compuestos con los que está fabricado.

Para finalizar, este trabajo de fin de grado ha sido de gran utilidad para afianzar conceptos que ya se habían obtenido y para despertar el interés hacia nuevos caminos. Sin embargo, algo que también podría resultar interesante de cara al futuro sería fabricar este elemento para poder corroborar de forma empírica su funcionamiento y poder rediseñarlo en busca de optimizaciones y mejoras en cuanto a su funcionamiento. Así como tener la oportunidad de variar el ángulo de ataque mediante el uso de tornillos a la hora de sujetar las derivas al perfil, modificando y analizando los diferentes comportamientos de un alerón modular con geometría variable.

I.10. Presupuesto.

En la siguiente tabla se observa el presupuesto final del proyecto, para analizar el desglose de costes al completo ver ANEXO 5 - PRESUPUESTO al final de este documento.

Tabla 3: Presupuesto Final Proyecto. [5]

Costes Materiales	2.218,00 €
Costes Equipo	1.293,75 €
Costes Mano de Obra	1.023,13 €
Total Presupuesto Parcial	4.534,87 €
Gastos Generales (13%)	589,53 €
Beneficio Industrial (6%)	272,09 €
Presupuesto Sin Impuestos	5.396,50 €
IVA (21%)	1.133,26 €
Precio Presupuesto Final	6.529,76 €

El presupuesto para la realización de este proyecto sería de aproximadamente la cantidad de:

SEIS MIL QUINIENTOS VEINTINUEVE CON SETENTA Y SEIS CÉNTIMOS

I.11. Apéndices.

I.11.1. Referencias Bibliográficas.

- [1] Definición RAE, sitio web: < <https://dle.rae.es/aerodin%C3%A1mico> >
- [2] Imagen, fuente: < <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aeroforzas.svg> >
- [3] Imagen, fuente: < https://img.remediosdigitales.com/1564cc/ford_model-t_town_car_1915/1366_2000.jpg >
- [4] Artículo Icon Road, consultado 21/02/2022, sitio web:
< <https://www.iconroad.es/articulos/pasion/art-deco/> >
- [5] Imagen, fuente: *Elaboración propia.*
- [6] Imagen, fuente: < <https://blog.consumerguide.com/wp-content/uploads/sites/2/2021/09/1930.jpg> >
- [7] Artículo Noticias Coches, consultado 21/02/2022, sitio web:
< <https://noticias.coches.com/noticias-motor/naci-spyder-y-falleci-bastardo-i/31165> >
- [8] Imagen, fuente: < <http://type550.com/wp-content/uploads/feature-4.jpg> >
- [9] Imagen, fuente: < <https://d39a3h63xew422.cloudfront.net/wp-content/uploads/2020/02/18104759/Will-Broadhead-Adrian-Newey-Lotus-49B-40-1200x628-2.jpg> >
- [10] Imagen, fuente: < <https://espirituracer.com/archivos/2019/03/Jaguar-XJR-12-57-e1552617376570.jpg> >
- [11] Artículo Diario Motor, consultado 01/03/2022, sitio web:
< <https://www.diariomotor.com/reportajes/volkswagen-corrado-aleron-activo/> >

[12] Imagen, fuente: <

<https://www.diariomotor.com/imagenes/2018/12/volkswagen-corrado-aleron-2-1024x715.jpg>>

[13] Imagen, fuente: <[https://img.remediosdigitales.com/9302df/audi-rs-3-lms-](https://img.remediosdigitales.com/9302df/audi-rs-3-lms-2021-016/1366_2000.jpeg)

[2021-016/1366_2000.jpeg](https://img.remediosdigitales.com/9302df/audi-rs-3-lms-2021-016/1366_2000.jpeg)>

[14] Normativa categorías GT, Artículo Diario Motor, consultado 01/03/2022, sitio web:

<<https://www.diariomotor.com/competicion/noticia/avalancha-de-gts-os-explicamos-las-diferencias-entre-gte-gt2-gt3-y-gt4/>>

[15] Imagen, fuente: <

<https://cdn.motor1.com/images/mgl/VA2O9/s1/lamborghini-huracan.jpg>>

[16] Imagen, fuente: <

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/20/BernoullisLawDerivationDiagram.svg/600px-BernoullisLawDerivationDiagram.svg.png>>

[17] Repositorio Junta de Andalucía, consultado 02/03/2022, sitio web:

<http://agrega.juntadeandalucia.es/repositorio/02112010/7c/es-an_2010110213_9123116/ODE-9c47ef75-fc65-3f80-9e16-4cff11c87af9/22_ecuacin_de_continuidad.html>

[18] Imagen, fuente: <

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/54/Venturifixed2.PNG/1200px-Venturifixed2.PNG>>

[19] McBeath, Simon. (2005). *Aerodinámica del automóvil de competición*. CEAC técnico automóvil.

[20] Imagen, fuente: <[https://www.aerodinamicaf1.com/wp-](https://www.aerodinamicaf1.com/wp-content/uploads/2019/09/boundary-layer_final.png)

[content/uploads/2019/09/boundary-layer_final.png](https://www.aerodinamicaf1.com/wp-content/uploads/2019/09/boundary-layer_final.png)>

[21] Imagen, fuente: <

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8d/Perfil_alar_1.svg/320px-Perfil_alar_1.svg.png>

[22] Katz, Joseph.(2006). *Race car aerodynamics. Designing for speed.* Bentley Publishers.

[23] Imagen, fuente: < <https://www.crxkswap.com/Images/Sources/AutoX/BillGoodale-600.jpg>>

[24] Piola, Giorgio. (2001). *Formula 1 2001 technical analysis.* Giorgio NADA editions.

[25] Base de Datos perfiles alares, fuente: < <http://www.airfoiltools.com/> >

[26] Imagen, fuente: *Elaboración propia - SolidWorks.*

[27] Imagen, fuente: *UPV: Materiales compuestos poliméricos.*

[28] Imagen, fuente: < <https://applynano.com/materiales-compuestos-reforzados-con-fibra-continua/> >

[29] Imagen, fuente: < <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/moldeo-manual-de-materiales-compuestos.html>>

[30] Imagen, fuente: < <https://sites.google.com/site/losplasticosangelaivan/5-fabricacion-de-los-plasticos/f-al-vacio>>

[31] Imagen, fuente: < <https://www.excellentcorp.es/mantenimiento-industrial/autoclaves/>>

[32] Imagen, fuente: < <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/smc.html>>

[33] Imagen, fuente: < https://www.researchgate.net/figure/Figura-9-Proceso-de-infusion-de-resina-66_fig5_343393163>



II. ANEXOS



ANEXO 1 - CALCULOS



En este apartado se detallan algunos de los cálculos realizados en el proyecto, la forma en la que se han obtenido estos resultados, así como una breve explicación de dichos valores.

A-1.1. Downforce.

Mediante el software Solidworks, al realizar los estudios aerodinámicos, se han obtenido los valores de carga aerodinámica (*downforce*), para contrastar estos resultados se pueden obtener también a través de fórmulas como vía de comparación de estos dos diferentes métodos. Esta fuerza se puede calcular gracias a la siguiente ecuación:

$$F_x = \frac{1}{2} * C_x * S * \rho * V^2$$

Donde la superficie (*S*), se puede aproximar mediante una relación con respecto a la masa del vehículo (m_v), de la siguiente forma. Los vehículos GT3 no deben pesar menos de 1350 Kg, por tanto, se usará dicha unidad para el cálculo.

$$S = 1,6 + 0,00056 * (m_v - 765)$$

Además, ya que no tenemos la posibilidad de calcular el coeficiente aerodinámico (C_x) se va a dar un valor de 0,3 para realizar dichos cálculos, ya que se correspondería aproximadamente a un elemento aerodinámico de este tipo.

En la siguiente tabla se pueden comparar los resultados obtenidos por ambas formas, y se observa que no existe una gran diferencia entre ellos. Estas discrepancias se podrían deber, en el caso de los valores obtenidos mediante SolidWorks, a las condiciones o la calidad de las simulaciones y en el caso de los obtenidos con fórmulas a las aproximaciones realizadas.

Tabla 4: Comparación Downforce [5]

SolidWorks (N)	Fórmulas (N)
141,0	174,9
363,1	393,6
648,1	699,6
1007,6	1093,2
1263,3	1383,6
1646,9	1708,1
1985,0	2066,8
2372,4	2459,7
2762,5	2886,7

A-1.2. Potencia Absorbida.

La resistencia que se genera no deja de ser un tipo de pérdidas, por tanto, podemos calcular la potencia perdida o absorbida por el motor de una manera muy sencilla. La potencia mecánica, como se observa en la siguiente ecuación, es el producto entre una fuerza y una velocidad.

$$\text{Potencia} = \frac{\delta W}{dt} = \frac{F \delta r}{dt} = F \cdot V$$

Por consiguiente, multiplicando la fuerza de resistencia por la velocidad obtendríamos la potencia deseada en vatios (W), dividiendo esta unidad por 735,48 conseguimos la potencia absorbida por el motor en caballos de fuerza (CV).

Tabla 5: Potencia Absorbida en función de la Velocidad [5]

Km/h	m/s	DRAG (N)	P. Absorbida (W)	P. Absorbida (CV)
80	22,2	18,1	403,2	0,5
120	33,3	45,0	1499,7	2,0
160	44,4	80,3	3570,2	4,8
200	55,6	125,9	6996,7	9,5
225	62,5	157,0	9814,6	13,3
250	69,4	250,6	17403,9	23,6
275	76,4	304,5	23261,0	31,6
300	83,3	364,9	30407,5	41,3
325	90,3	424,9	38362,2	52,1

A-1.3. Rendimiento Perfil Alar

El rendimiento de un perfil alar es uno de los aspectos más importantes en el análisis y la fabricación del mismo, ya que desemboca en el buen funcionamiento del mismo. Los perfiles alares utilizados en el ámbito aeroespacial suelen tener un rendimiento de entre 12 y 14 veces la resistencia producida. Este valor se trata de un número adimensional que relaciona la cantidad de fuerza producida (ascendente o descendente) con la resistencia que genera, es decir C_L / C_d . Esta relación es tan alta ya que los perfiles alares utilizados en aviones se utilizan a altas velocidades, en torno a los 700 – 1000 km/h, y resulta de vital importancia una buena cantidad de sustentación a costa de una baja resistencia.

En cambio, en el ámbito automovilístico, se pretende maximizar la carga producida sin importar tanto el rendimiento obtenido. Es por esto que los valores que se observan en la siguiente tabla son menores a 10, esto se debe en gran medida a la inclinación tan agresiva que tienen los alerones de competición en busca de la máxima carga aerodinámica.

Tabla 6: Rendimiento Perfil Alar [5]

C_d (N)	C_L (N)	C_L / C_d (N)
18,1	141,0	7,8
45,0	363,1	8,1
80,3	648,1	8,1
125,9	1007,6	8,0
157,0	1263,3	8,0
250,6	1646,9	6,6
304,5	1985,0	6,5
364,9	2372,4	6,5
424,9	2762,5	6,5



ANEXO 2 - ESTUDIO ECONÓMICO

A-2.1. Análisis Viabilidad Económica.

Para comenzar la realización de este apartado, en primer lugar, hay que esclarecer que el objetivo primordial de este proyecto se basa en la perfecta puesta a punto y la maximización de los resultados de un elemento aerodinámico propuesto para su uso en competición.

No es una pieza que vaya a ser producida en masa, sino que va a ser específicamente diseñada y cuidadosamente fabricada con el único propósito de tener las mejores prestaciones posibles. Estos hechos influyen directamente en el coste unitario de cada pieza fabricada.

Además, se trata de un elemento que varía en función del circuito, de las características del trazado y de los objetivos que se deseen obtener en cada uno de ellos. Por último, pero no por ello menos importante, también cambia en función del piloto, de sus preferencias de conducción o incluso por posibles accidentes. Es por todo esto que un mismo alerón no puede ni va a ser utilizado para todos los eventos de un campeonato, sino que se utilizarán muchos y diferentes entre ellos.

Atendiendo al BLOQUE V - PRESUPUESTO, el coste del diseño y fabricación de esta pieza rondaría los 6.770,63 €/u, sin embargo, si se realizaran más de ellas los gastos generales se reducirían en gran medida. De todo este presupuesto, 2.385,28 € hacen referencia al material utilizado, fibra de carbono. Contando con una gran cantidad de material en lugar de un presupuesto exclusivo para la realización de uno de ellos se podría bajar dicha cantidad de entre un 20% haciendo 5 piezas hasta en un 40% fabricando diez de ellas, reduciendo hasta 1.431,17 € el apartado de los materiales.

En cuanto al gasto de equipo y diseño se tendría una reducción muy significativa ya que tan sólo habría que dividir dicho gasto entre el número de piezas fabricadas, por ejemplo, pasando en este caso al fabricar diez de ellas de 1.293,75 € a solo 129,38 €/u.

Por otra parte, los costes derivados de la mano de obra serían exactamente los mismos, ya que fabricar por completo una o diez piezas costaría la misma cantidad de tiempo independientemente de la cantidad producida.

Finalmente, en la siguiente tabla se puede observar de forma aproximada la variación que habría en el coste de fabricación unitario si se aumentase el volumen de producción. Contando con la reducción del coste de material en función de la cantidad que fuera adquirida y del descenso del coste de desarrollo al incrementar el número de piezas.

Tabla 7: Comparativa evolución precio unitario [5]

	1 pieza	5 piezas	10 piezas
Costes Materiales	2.385,28 €	1.908,22 €	1.431,17 €
Costes Equipo	1.293,75 €	258,75 €	129,38 €
Costes Mano de Obra	1.023,13 €	1.023,13 €	1.023,13 €
Total Presupuesto Parcial	4.702,15 €	3.190,10 €	2.583,67 €
Gastos Generales (13%)	611,28 €	414,71 €	335,88 €
Beneficio Industrial (6%)	282,13 €	191,41 €	155,02 €
Presupuesto Sin Impuestos	5.595,56 €	3.796,22 €	3.074,56 €
IVA (21%)	1.175,07 €	797,21 €	645,66 €
Precio Por Unidad	6.770,63 €	4.593,42 €	3.720,22 €



ANEXO 3 - DISEÑO

A-3.1. Diseño Inicial Prototipos.

En primer lugar, una vez obtenido el perfil alar a diseñar se procede a introducirlo en el programa SolidWorks. Para ello se ha introducido una serie de curvas XYZ para otorgar la forma geométrica y, más tarde se le ha dado tanto la anchura como la longitud de extrusión del ala, estas son las que se aprecian en la siguiente imagen.

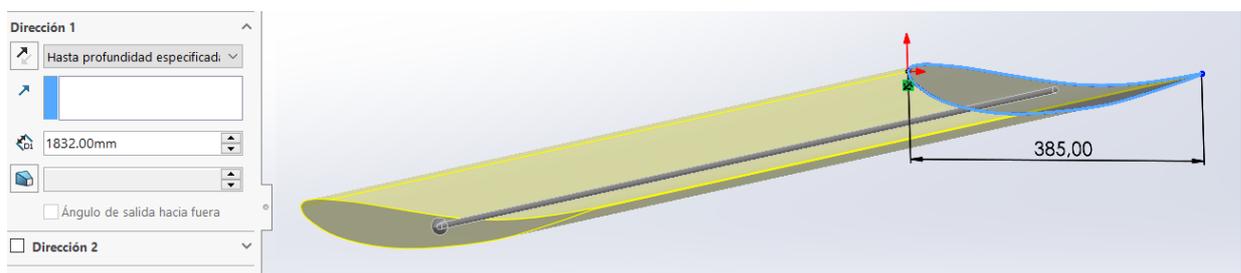


Figura 36: Extrusión Perfil Alar [26]

Una vez construido el perfil, se realiza el croquis de las derivas laterales y se extruyen con una profundidad de 10mm a ambos lados del mismo, este proceso se realiza de la siguiente manera:

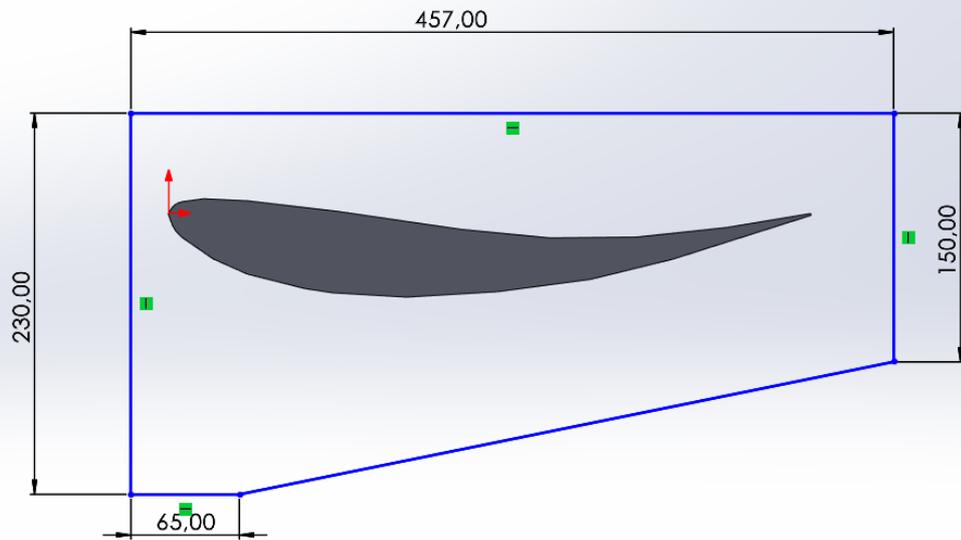


Figura 37: Croquis Deriva Lateral [26]

A su vez, también se realiza una operación de redondeo de las aristas, en primer lugar, por no tener cantos vivos muy pronunciados en la pieza que puedan ocasionar daños a otros vehículos en caso de desprendimiento de esta, así como de función estética.

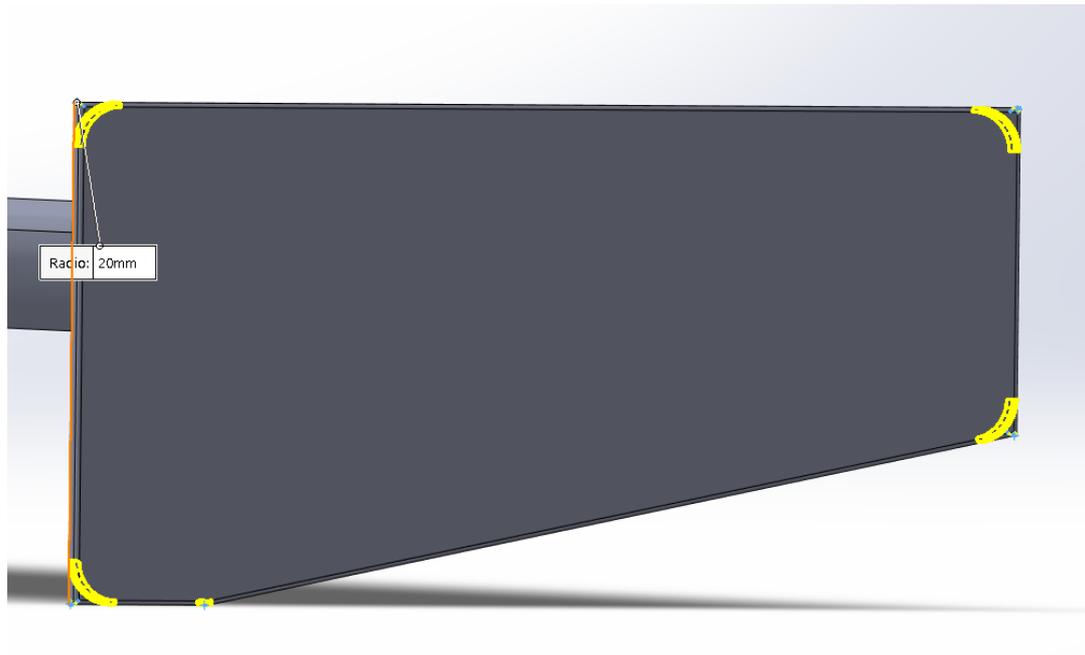


Figura 38: Redondeo Cantos Derivas Laterales [26]

Tras esta operación, se realiza una simetría para obtener dicha pieza en la cara opuesta con las mismas características de diseño. Esta operación evita tener que repetir un mismo croquis y ayuda también a actualizar la pieza en caso de que se desee cambiar algo del aspecto constructivo.

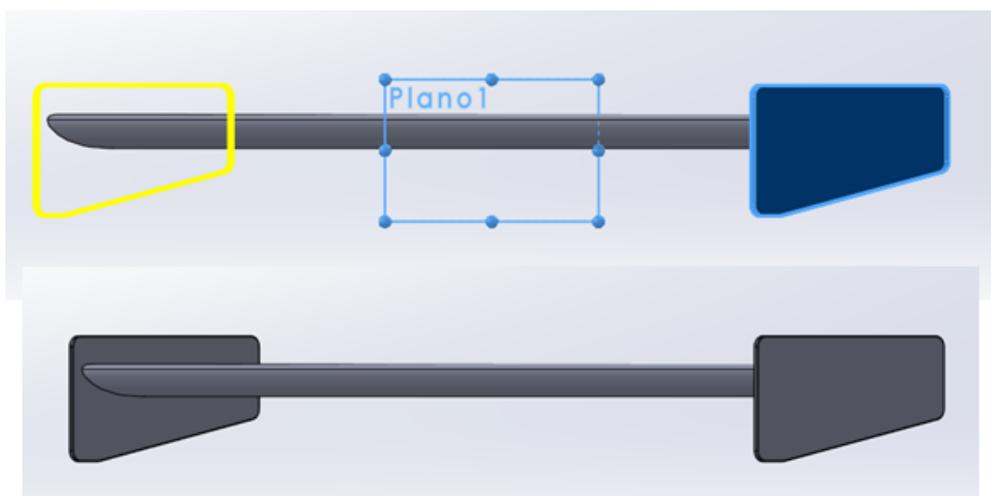


Figura 39: Operación Simetría [26]

El siguiente paso serán los soportes del ala, los cuales sujetan el dispositivo al vehículo, y son los encargados de transmitir la fuerza descendente hasta el cuerpo del mismo. En este caso, se diseñan de tipo palanca para incrementar la fuerza producida, atrasando lo máximo posible el perfil alar del anclaje.

De similar manera con la que se han generado las derivas laterales, se comienza esbozando un croquis con la forma constructiva de los soportes y se extruye con la función (plano medio) 20mm, de esta manera aumenta 10mm a cada lado.

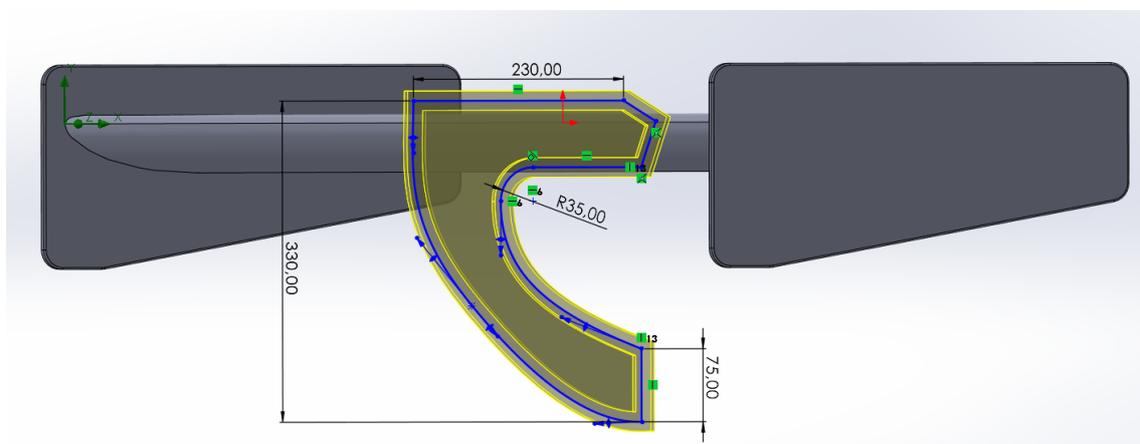


Figura 40: Croquis Soportes [26]

El último paso a realizar es duplicar este soporte con la herramienta simetría y, posteriormente, crear unos agujeros mediante extruir corte para aligerar la pieza. Dejando una parte de material para que absorba la fuerza vertical y evitar problemas de rotura. Finalmente, obtenemos el prototipo inicial terminado, como se puede observar en la siguiente imagen.

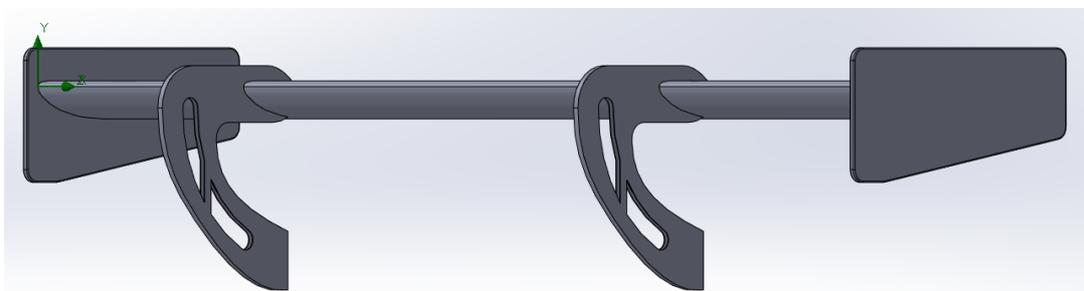


Figura 41: Vista Completa Alerón [26]

A-3.2. Diseño Final.

Una vez hecho el prototipo inicial se van a cambiar un par de componentes con tal de mejorar las condiciones de diseño y el aspecto final.

En este caso se va a reducir el área de las derivas laterales, para producir una menor cantidad de vórtices y, finalmente, hacer una serie de agujeros tanto en el ala como en las derivas para poder establecer diferentes ángulos de ataque del dispositivo aerodinámico. También se van a rediseñar los soportes para tener una mejor relación sujeción-resistencia, además de intentar reducir la cantidad de material necesario para ahorrar peso al máximo.

Primeramente, se va a reducir la altura de las derivas para evitar que en caso de flexión o golpe fuerte se evite tocar la carrocería del vehículo, pudiendo incluso generar problemas en alguna otra parte del mismo. Concretamente, se ha reducido la altura de 230 a 200 mm en su parte izquierda y de 150 a 140 mm en su parte derecha, además se ha recortado su longitud total a 450 mm.

Para finalizar con el rediseño de esta parte se va a perforar lateralmente para poder otorgar el ángulo deseado al alerón. En este caso, el agujero inferior supone una configuración a 0° , el intermedio a 5° y el superior a 10° , esto se puede apreciar en el croquis de la siguiente imagen.

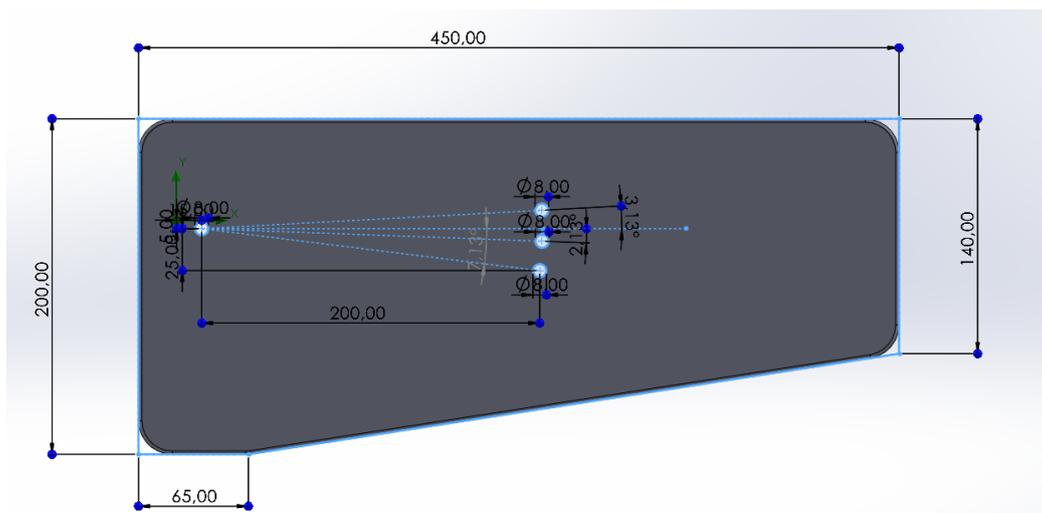


Figura 42: Croquis Orificios Derivas Laterales [26]

Para hacer esto posible también se deben de hacer agujeros en el perfil alar y así poder atornillar las derivas laterales en función del ángulo de construcción del alerón. Para ello se han realizado dos orificios de 20 mm a cada lado de este mediante la operación extruir corte, quedando de la siguiente manera:

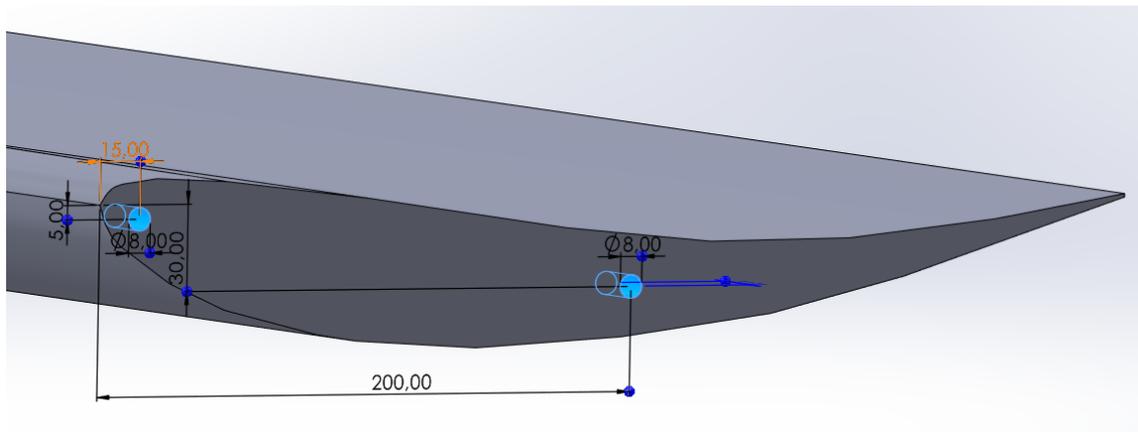


Figura 43: Croquis Orificios Perfil Alar [26]

Por otra parte, el rediseño de los soportes parte con la premisa de ubicar los orificios con los que el alerón en su conjunto se acoplará a la carrocería del vehículo.

Además, también hay que tener en cuenta que estos soportes son las únicas partes en contacto entre ambos elementos, y son los encargados de transmitir la fuerza generada por el ala al vehículo. Estos deben de ser resistentes a la par que lo más aerodinámicos y ligeros posibles.

Estos soportes constan con 2 alturas diferentes para ser colocados, esto juega un papel imprescindible ya que no solo se puede configurar el ángulo de ataque del ala sino también el área frontal de aplicación. Esto puede ser de utilidad, por ejemplo, en una competición en la que se requiera de una baja carga aerodinámica se puede colocar el ala a 0° y la altura del dispositivo lo más baja posible. En cambio, para maximizar la carga aerodinámica sin importar la resistencia en una competición, se puede colocar el ala a 10° y el dispositivo en su configuración más alta, permitiendo un mayor flujo de aire hacia el mismo, mejorando sus capacidades y la creación de *downforce*.

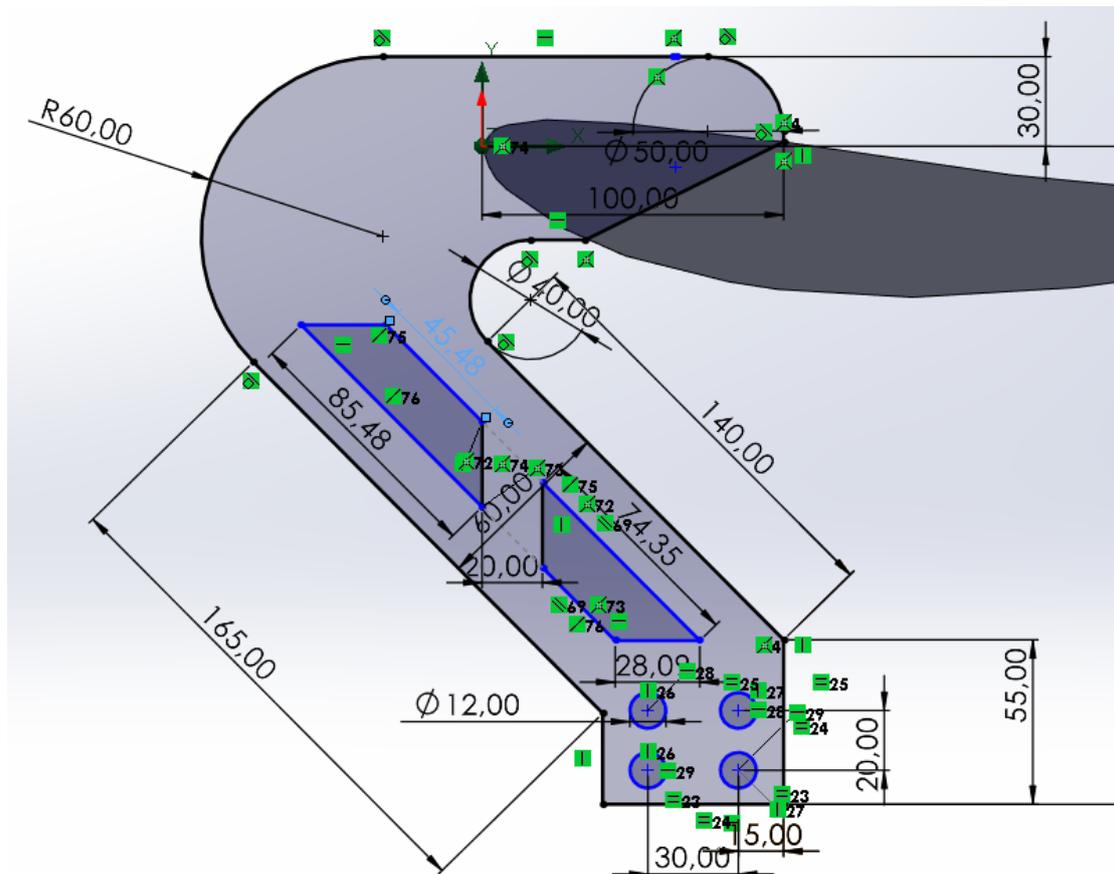


Figura 44: Croquis Soportes Alerón [26]

También se puede observar en la anterior imagen que se han realizado unos cortes en su parte media para tratar de aligerar el dispositivo sin afectar su función principal, la parte superior del mismo se ha dejado “plano” para que canalice y sirva de guía al flujo de aire, aumentando la velocidad en esa zona.

Para terminar, se ha realizado un redondeo en las aristas de los soportes, para intentar ser lo más aerodinámicos posibles y facilitar al aire su paso por estos, reduciendo el *drag*. Ya que esta pieza tiene una anchura de 10 mm el redondeo a cada lado se realiza con un radio de 5mm para que coincidan en su parte intermedia y no quede ninguna cara totalmente plana.

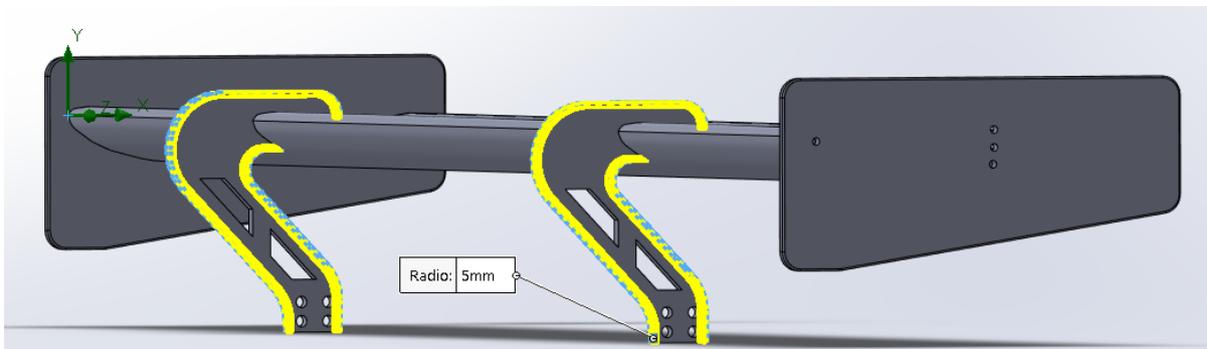


Figura 45: Redondeo Soportes Alerón [26]



ANEXO 4 - MATERIALES Y PROCESOS DE FABRICACIÓN

A-4.1. Materiales.

Tradicionalmente a lo largo de la historia del automovilismo se han construido piezas aerodinámicas de diferentes materiales, en un principio se construían con finas chapas de acero y aluminio hasta el momento en que estos materiales quedaron obsoletos y comenzaron a modelarse con materiales de tipo compuesto.

Mediante fibra de vidrio en primera instancia y más adelante con la introducción de la fibra de carbono lograron construir estos dispositivos de una manera más eficiente y precisa, ya que no necesitaban de grandes máquinas para darles forma y, a su vez, ahorraban una gran cantidad de peso. Esto se debía a que gracias a estos materiales compuestos podían superar las capacidades técnicas de los materiales más tradicionales, como el aluminio, con espesores aún más finos.

Se puede entender como material compuesto aquel que está formado por dos o más elementos diferentes, naturales o artificiales, que permiten obtener al formarse unas propiedades mecánicas superiores a la de los componentes originales.

Estos materiales se crean por medio de uniones químicas o físicas y tienen como característica su heterogeneidad. Dichos compuestos son de tipo anisotrópico, es decir, varía su comportamiento en función del tipo de mezcla y las orientaciones de los materiales de refuerzo que los componen.

A-4.1.1. Clasificación de Materiales Compuestos.

Una de las características fundamentales de estos materiales es la obtención de prestaciones muy superiores a la de los mismos compuestos por separado, las propiedades más destacables de estos son las siguientes:

- **Alta relación resistencia / peso**
- **Elevada rigidez y flexibilidad**
- **Baja densidad**
- **Gran comportamiento frente a fatiga**
- **Alta resistencia a la corrosión**
- **Capacidad de crear formas complejas**

A-4.1.1.a. Clasificación en Función de la Matriz.

Este es el componente encargado de dar cohesión a las fibras y mantenerlas unidas para que puedan trabajar correctamente, según el tipo pueden ser:

- **Compuestos de matriz metálica (MMC):** Alta resistencia con muy bajo peso.
- **Compuestos de matriz cerámica (CMC):** Alta resistencia y tenacidad, especialmente a bajas temperaturas.
- **Compuestos de matriz polimérica (PMC):** Altas propiedades mecánicas, gran resistencia frente a la corrosión y los agentes químicos.
 - **Termoplásticos:** Tienen la característica de poder ser remodelados.
 - **Termoestables:** Su estructura molecular entrecruzada tiende a dar productos de elevada rigidez.
 - **Elastómeros:** Compuesto por cadenas con alta libertad molecular, da lugar a una alta flexibilidad.

A-4.1.1.b. Clasificación en Función de los Refuerzos.

Componente encargado de otorgar la resistencia mecánica, dureza y rigidez a los materiales. El hecho de poder cambiar estos componentes ofrece la posibilidad de variar sus propiedades.

- **Compuestos reforzados por partículas:** Formados por la integración de partículas dispersas al azar o bien uniformemente.

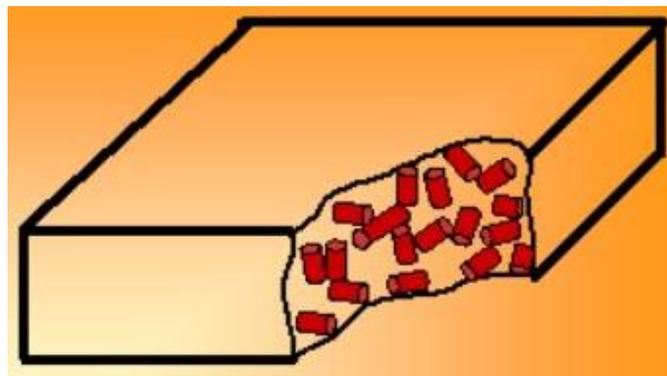


Figura 46: Compuesto reforzado por partículas.[27]

- **Compuestos reforzados por fibras:** Son los más importantes y fabricados, se pueden formar tanto con fibras unidireccionales como con telas o laminados bidireccionales, en función del propósito y el objetivo que se desee obtener.

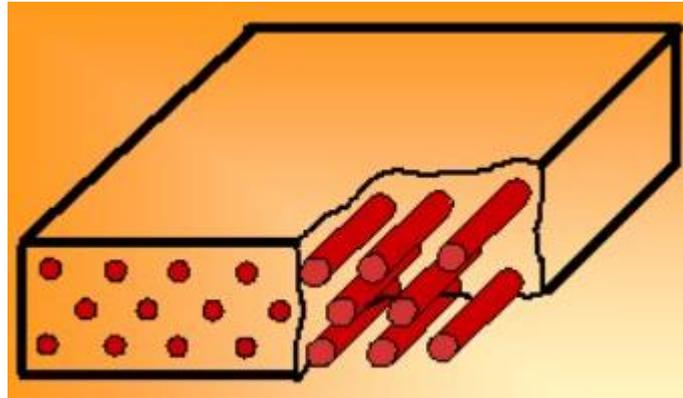


Figura 47: Compuesto reforzado con fibras unidireccionales.[27]

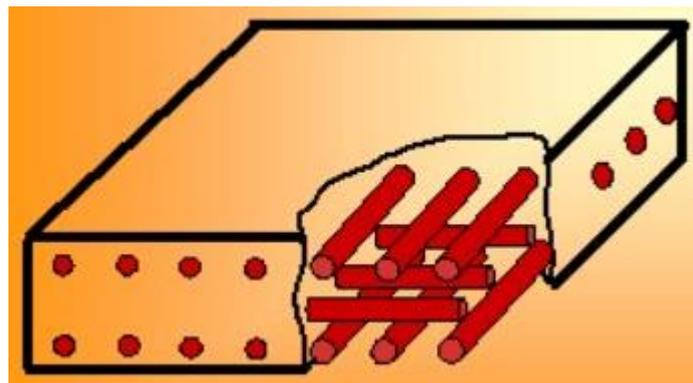


Figura 48: Compuesto reforzado con fibras bidireccionales.[27]

- **Compuestos estructurales:** También conocidos como composites “Tipo Sándwich” ya que se forman a base de capas, pueden ser de diferentes morfologías.

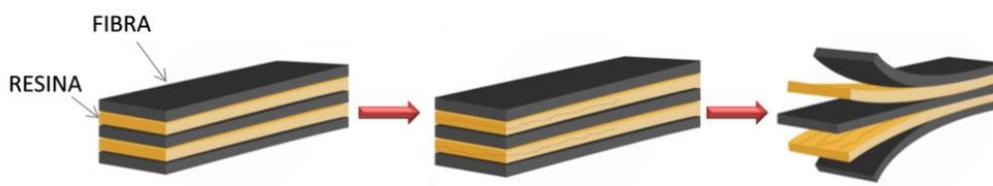


Figura 49: Compuesto estructural tipo “Sándwich”. [28]

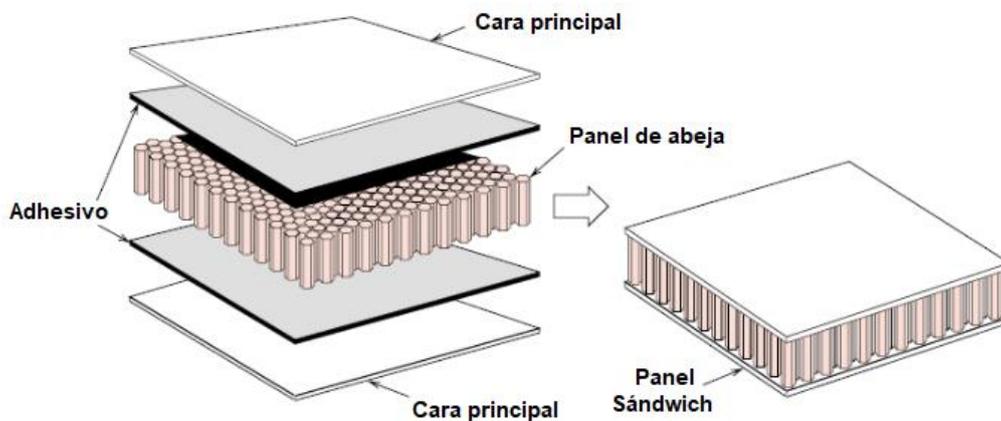


Figura 50: Compuesto estructural tipo "Panel de Abeja". [5]

A-4.1.2. Elección Material.

A la hora de elegir el material más apropiado para la realización de este proyecto se deben de tener en cuenta cuáles son las propiedades más importantes a tener en cuenta, entre ellas destacan las siguientes:

- **Ligereza.**
- **Rigidez.**
- **Resistencia a la compresión.**

Por estos motivos, los materiales a priori más adecuados para la fabricación de un alerón de competición sería la fibra de carbono, de aramida y la de basalto. Todos estos componentes se mezclarán con una matriz de epoxi, que servirá como método de unión de las fibras, para comparar sus propiedades mecánicas entre sí.

En la siguiente tabla se pueden observar las diferentes características de los materiales pre-seleccionados, estas propiedades se han obtenido mediante el modelo micromecánico de Chamis. Además, también se puede identificar las características en las que cada material destaca para finalmente concluir diciendo que el material más apropiado es la fibra de carbono de alto módulo (HMS), en la que la parte de fibras representa un 70% con respecto a la de epoxi de un 30%. En concreto se utiliza este

material ya que es mecánicamente superior a la fibra de carbono convencional, este último tan sólo destaca en cuanto a su densidad, diferenciándose apenas en 20 kg/m³ menos.

Tabla 8: Comparativa de propiedades mecánicas para los diferentes materiales.[5]

	FIBRA DE BASALTO + EPOXI	FIBRA DE ARAMIDA + EPOXI	FIBRA DE CARBONO + EPOXI	FIBRA DE CARBONO HMS + EPOXI
Ex (MPa)	66225	4364,5	247712,8	266498
Ey (MPa)	15766,3	1798,2	14629,2	16625
Ez (MPa)	15766,3	1798,2	14629,2	16625
Gxy (MPa)	5906,96	1299,28	6245,6	7297
Gyz (MPa)	5906,96	1299,28	6245,6	6976
Gxz (MPa)	5906,96	497,51	6017,3	7297
Xt (MPa)	219,7	75,4	1625	1750
Yt (MPa)	46,7	65,1	46,9	48
Xc (MPa)	219,7	754	975	1050
Yc (MPa)	87,5	121,9	87,8	90
Le (MPa)	197,7	67,9	1462,5	1750
ρ (kg/m ³)	2370	1400	1600	1620

A-4.2. Procesos de Fabricación.

En primer lugar, hay que destacar que además de los siguientes procesos de moldeo existen más que no van a ser descritos en este proyecto ya que no podrían ser utilizados con el material elegido para el proceso de fabricación del dispositivo. Sin embargo, en este apartado se van a describir todos ellos con la finalidad de encontrar el proceso más adecuado para nuestra pieza.

A-4.2.1. Procesos de Molde Abierto.

A-4.2.1.a. Moldeo por Colocación Manual.

Se trata de un proceso de conformado artesanal en el cual se van añadiendo y compactando mediante rodillos capa a capa la resina y las fibras de refuerzo en la orientación que se desee. Además, también se aplica un producto desmoldeante que consigue a su vez un mejor acabado superficial de las piezas, llamado Gelcoat.

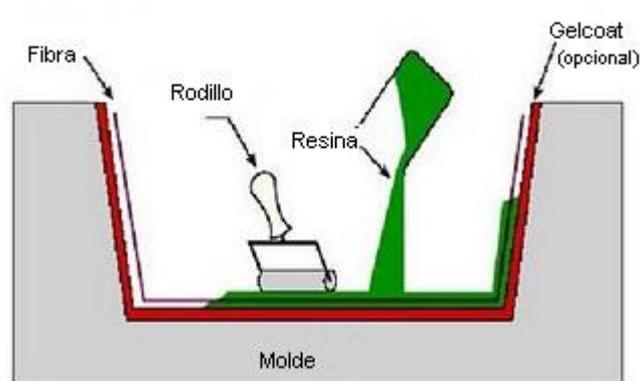


Figura 51: Moldeo por colocación manual. [29]

Finalmente, para que este “sándwich” de componentes se endurezca y se convierta en una única pieza, la resina se mezcla con un catalizador para que esta se endurezca, la proporción de endurecedor recomendada se encuentra entre el 1% para curados lentos hasta el 3% para curados rápidos.

Hay que destacar que este proceso de fabricación permite la elaboración de piezas con formas y geometrías complejas a cambio de tratarse de un procedimiento lento, por el hecho de tratarse al completo de un proceso puramente manual.

A-4.2.1.b. Moldeo a Vacío y Presión de Aire.

Este proceso no tiene una gran diferencia con el anterior salvo la forma en la que se compactan las capas, en este caso se crea un vacío en el molde para unificar todos los componentes, como se puede observar en la siguiente imagen.

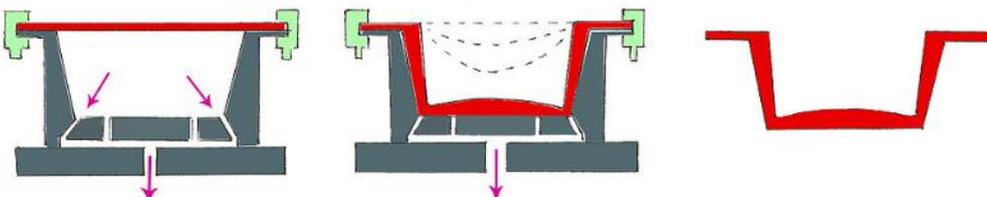


Figura 52: Moldeo por vacío. [30]

Gracias a la compactación con fuerzas superiores a las que se conseguirían con un método manual, se pueden conseguir laminados con altos porcentajes de refuerzos, vital si se desean construir objetos de grandes prestaciones mecánicas.

Sin embargo, evidentemente, al tratarse de un procedimiento que no es puramente manual, se incrementa el gasto general a la hora de la fabricación de piezas. Otro aspecto a destacar es que tan sólo la cara en contacto con el molde tiene un buen acabado superficial, hecho que puede ocasionar en que no sea recomendado para todo tipo de piezas.

A-4.2.1.c. Moldeo en Autoclave.

Este proceso utiliza también la alta presión para la compactación de laminados de materiales compuestos. En este caso, consta de grandes recipientes con forma cilíndrica donde se consiguen altas presiones y temperaturas para conformar piezas con estos compuestos.



Figura 53: Autoclave [31]

Mediante este método se evita el problema que suponía el anterior en cuanto al acabado final de una de las caras de la pieza, de esta manera se obtienen laminados más homogéneos y fuertes. También se evita la posible formación de burbujas que podría ocasionar puntos de concentración de tensiones, perjudiciales para la estructura de las piezas. Se trata a su vez de un procedimiento muy caro, debido al alto consumo energético que supone, pero a cambio de grandes prestaciones y acabados.

A-4.2.2. Procesos de Molde Cerrado.

A-4.2.2.a. SMC (Sheet Moulding Compound)

La principal característica de este procedimiento es que la mezcla se realiza “in situ”, se prepara, mezcla y aplica la resina a la vez que se añaden las fibras y refuerzos al laminado. Se trata de un proceso de tipo continuo, lo que favorece la industrialización de esta técnica.

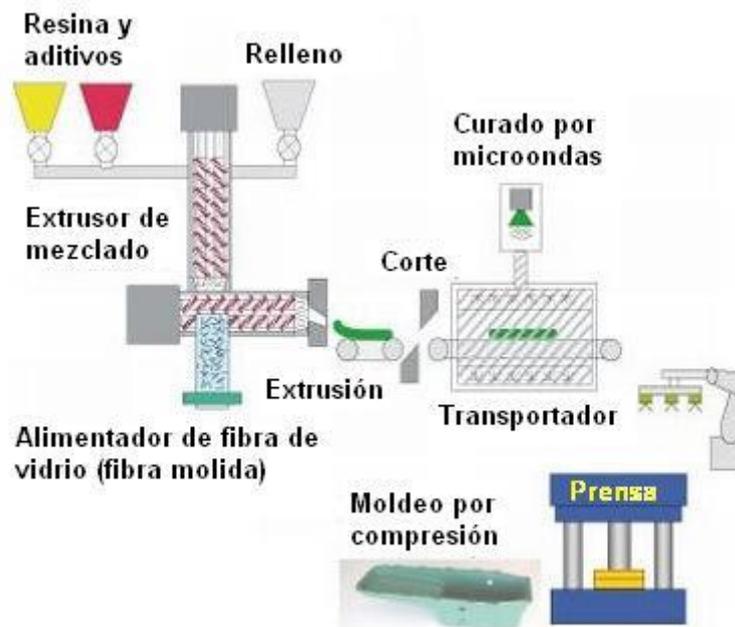


Figura 54: Proceso moldeado SMC [32]

Se consiguen grandes cantidades de piezas en poco tiempo, sin embargo, no se pueden producir con las calidades obtenidas en otro tipo de procesos, se utilizan una gran variedad de componentes, entre los que destacan los reforzados cerámicos o de fibra de vidrio.

A-4.2.2.b. Moldeo por Compresión en Caliente.

Se trata de un procedimiento muy sencillo en el que se impregnan las fibras con resina y se aplica fuerza y calor a través del molde para darle la forma deseada. Tiene ciertas ventajas como puede ser el buen acabado superficial, el bajo coste operacional y la facilidad de construcción del molde, ya que no necesita de cavidades interiores ni de salida para conformar la pieza.

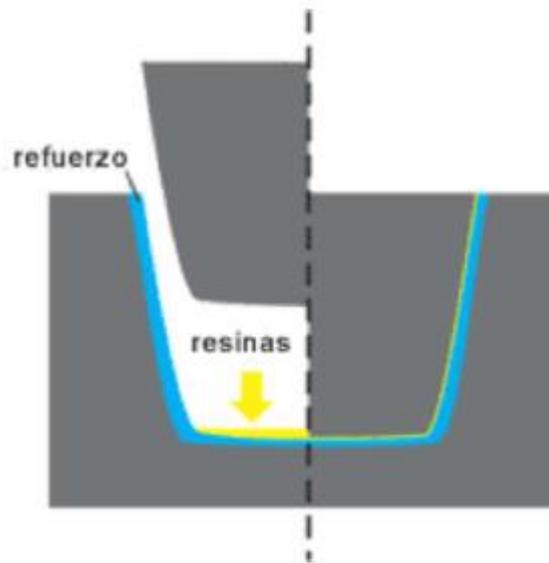


Figura 55: Moldeo por compresión en caliente. [27]

A-4.2.2.c. Infusión.

Este tipo de moldeo es una combinación entre varios tipos de procesos, se basa en el efecto de succión, así como en la presión y el calor aportado por un horno o un autoclave para la compactación de los compuestos.

En primer lugar se aplican las fibras y la resina en un molde así como una bolsa de vacío en su parte superior. Cuando se reduce la presión en el interior del molde se adhieren estos componentes entre sí y se endurecen gracias al calor aportado. También encontramos en la parte exterior una cuba en la que se deposita el exceso de resina absorbido para que sea utilizada en otro proceso de moldeo.

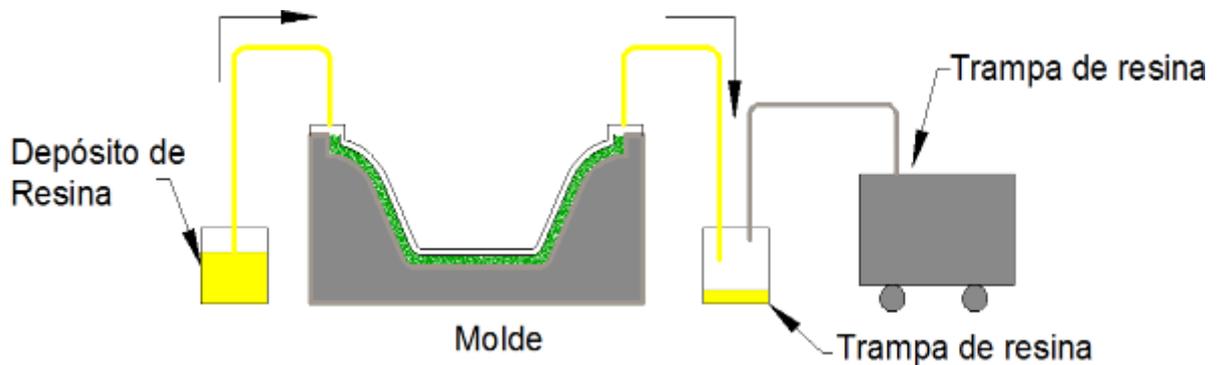


Figura 56: Moldeado por infusión. [33]

A-4.3. Elección Procesos Fabricación Alerón.

Para la fabricación del alerón de este proyecto va a ser dividido en dos partes diferentes. En primer lugar, para el conformado de las derivas laterales se va a utilizar el proceso de infusión, ya que es un método fácil a la par que preciso.

Estas derivas tan sólo tienen 10 mm de espesor y tienen una forma geométrica muy sencilla, se procedería primero a cortar las fibras pre-impregnadas mediante un bisturí o cualquier objeto afilado, para más tarde colocar el compuesto en el interior del molde. Mediante succión se comprimiría la mezcla, y se introducirían en un horno para comenzar el proceso de curado.

Una vez se tiene la pieza terminada, se procedería al desmoldeo para realizar los últimos retoques. Se generarían orificios para poder atornillar la pieza al perfil alar, se lijaría toda la superficie y se generarían los cantos mediante un redondeo para darle el aspecto final.

En cuanto a la fabricación del conjunto del perfil alar y los soportes se va a seccionar en dos partes, en primer lugar, debido a que ambos componentes se fabrican unidos en un mismo molde, el proceso elegido va a ser el de tipo manual mediante la utilización de fibras pre-impregnadas. Esto facilita en gran medida la fabricación, ya que al utilizarlas, la orientación de las láminas es mucho más sencilla de elaborar, para más tarde introducirlo en un autoclave y continuar con el proceso de compactación y curado.



Se utiliza este procedimiento puesto que se trata de una pieza de altas prestaciones, no tiene tanta importancia el coste y el tiempo que suponga conformarla sino su calidad y resistencia. Además, cuenta con una configuración de fibras muy específica en cuanto a su orientación y un alto grado de proporción de las mismas, en concreto del 70%.

La parte del moldeado manual comenzaría con la realización del propio molde, una vez se tuviese, se procedería capa a capa a introducir las láminas de fibra de carbono en su dirección determinada y su compactación mediante rodillos no sería necesaria al utilizar las fibras de tipo pre-impregnadas mencionadas previamente, puesto que llevan la cantidad requerida de resina tampoco sería necesario agregar este componente durante el moldeado.

Una vez terminada la pieza, se recubriría de una bolsa de vacío para más tarde ser introducida en el autoclave a alta presión y temperatura. Además, con este método de fabricación, también se evitaría la posible formación de burbujas que podría ocasionar problemas estructurales, así como un uso excesivo de resina. De este modo, se consigue la estructura lo más rígida y uniforme posible, cosa que repercutirá enormemente en sus propiedades mecánicas. La elección de este método es precisamente por el acabado que se obtiene, se trata de un proceso caro, pero de altas prestaciones que resulta vital para este tipo de conformado de piezas.

Para terminar, se haría lo mismo que con las derivas laterales, se lijarían y se daría los retoques finales para darle el acabado deseado. Finalmente, se realizarían los orificios en la parte inferior de los soportes del perfil alar para poder ser anclado al vehículo.



ANEXO 5 - SIMULACIONES



A-5.1. ESTUDIO AERODINÁMICO

A-5.1.1. Objetivo Estudio.

El principal objetivo de este apartado es medir la fuerza y la resistencia generada por el dispositivo en función del aumento de la velocidad. Determinando así su comportamiento y el rendimiento de este.

Va a ser analizado en diferentes velocidades desde los 80 hasta los 325 km/h, siendo esta la velocidad punta de un turismo GT3 en competición. Ya que a bajas velocidades la interacción con el aire no es tan alta se va a profundizar más en la simulación a medias-altas velocidades estas serán las siguientes: 80, 120, 160, 200, 225, 250, 275, 300 y 325 km/h.

A-5.1.1.a. Procedimiento.

Para realizar este análisis vamos a utilizar el programa SolidWorks, en concreto el complemento de “Flow Simulation” integrado en el propio software.

El primer paso es crear una nueva simulación, abriendo el “wizard” y otorgándole un nombre al proyecto.

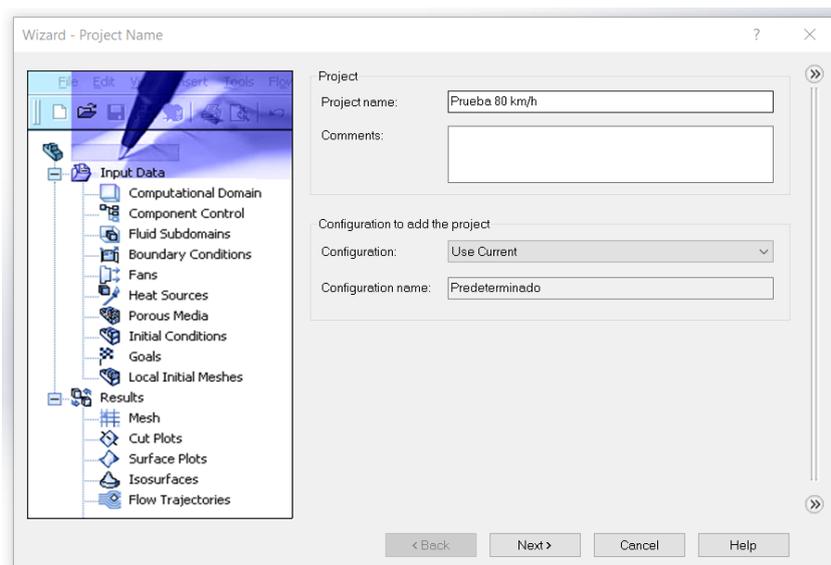


Figura 57: Inicio simulación. [26]

Acto seguido se selecciona el S.I. como unidades principales de medida, se cambia la unidad de velocidad de m/s a km/h y se establece el tipo de análisis a “externo” ya que queremos observar el flujo de aire que se genera alrededor del dispositivo, esto se hace de la siguiente manera.

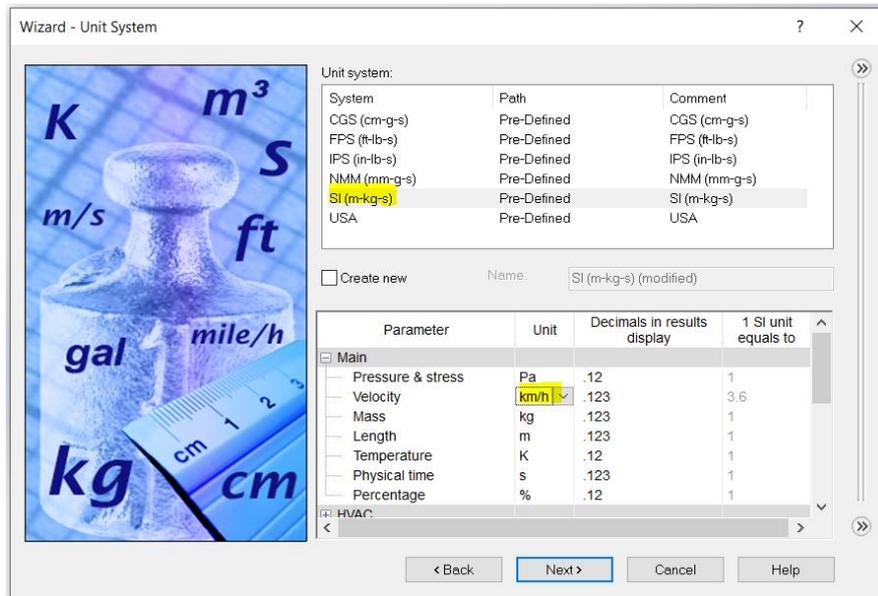


Figura 58: Introducción Sistema de Medida. [26]

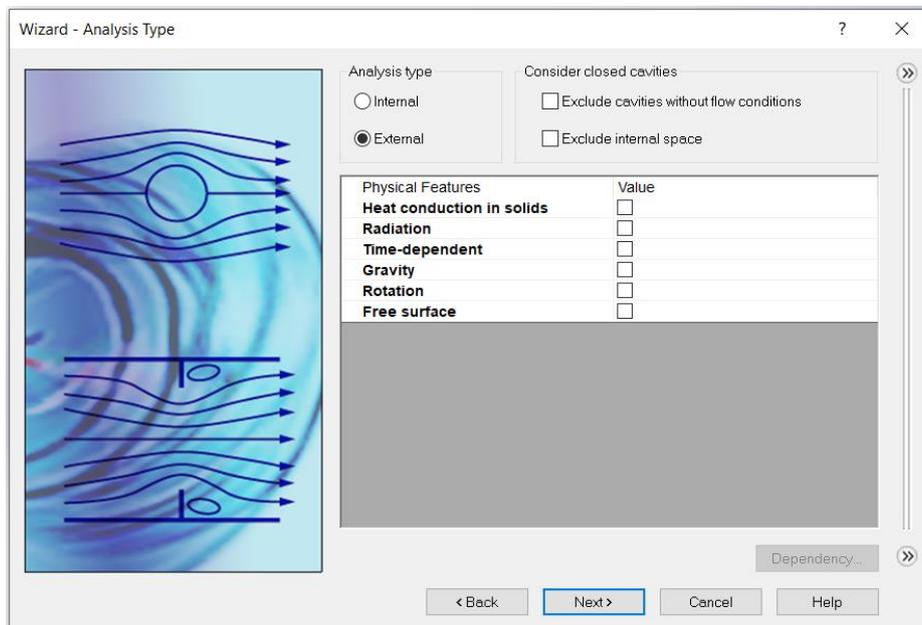


Figura 59: Introducción tipo de análisis. [26]

Lo siguiente es añadir el fluido con el que queremos trabajar y darle la velocidad requerida, este último paso cambiará cada vez que realicemos un nuevo estudio con una velocidad diferente.

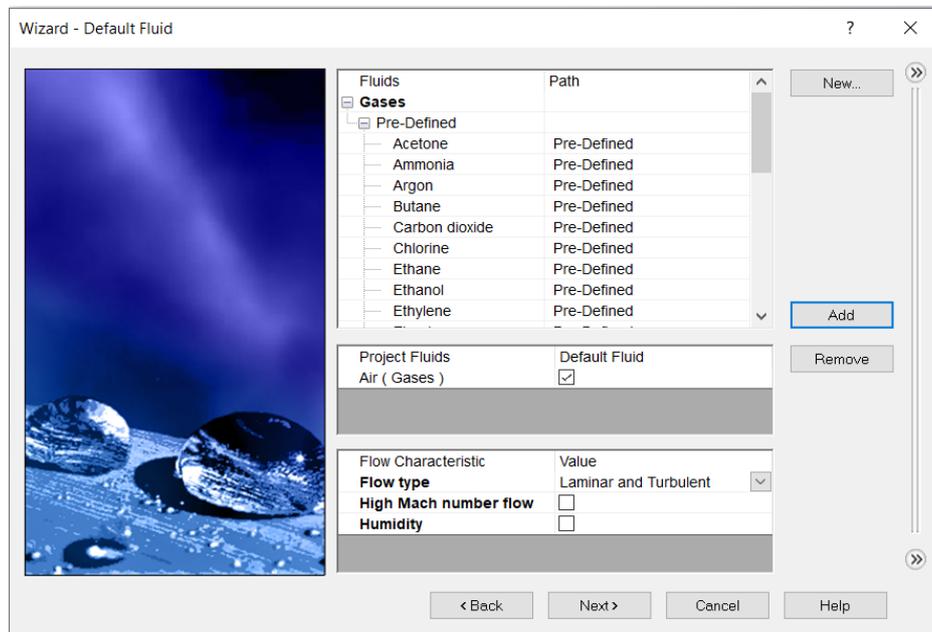


Figura 60: Introducción tipo de fluido. [26]

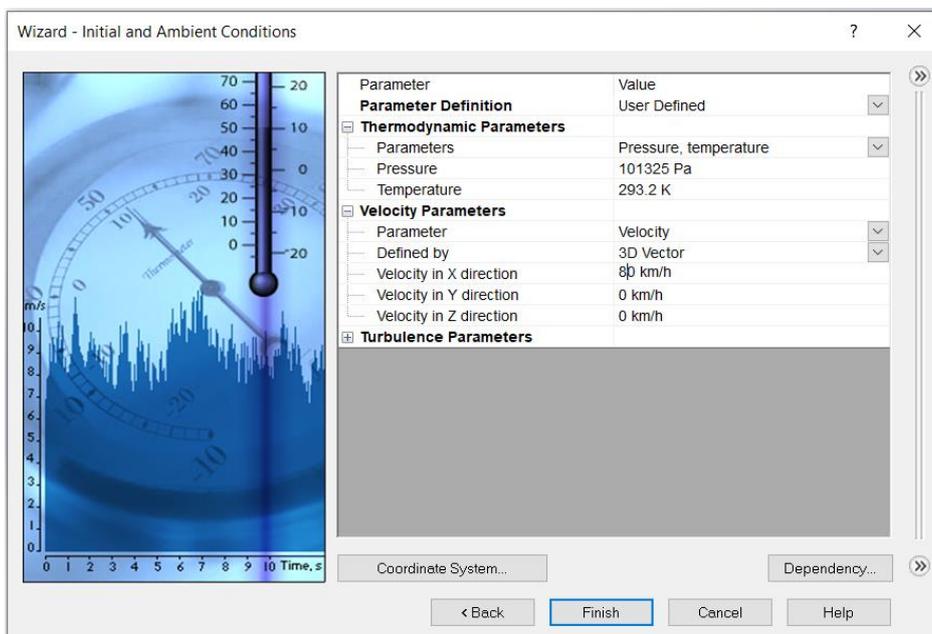


Figura 61: Introducción velocidad del fluido. [26]

Para continuar hay que establecer el dominio computacional, aquí interesa el comportamiento del fluido a lo largo del recorrido viendo como se desplaza tanto vertical como lateralmente. Esto será para todos los casos iguales y tendrá unas dimensiones de 10 m de largo y de 1,5 m de altura.

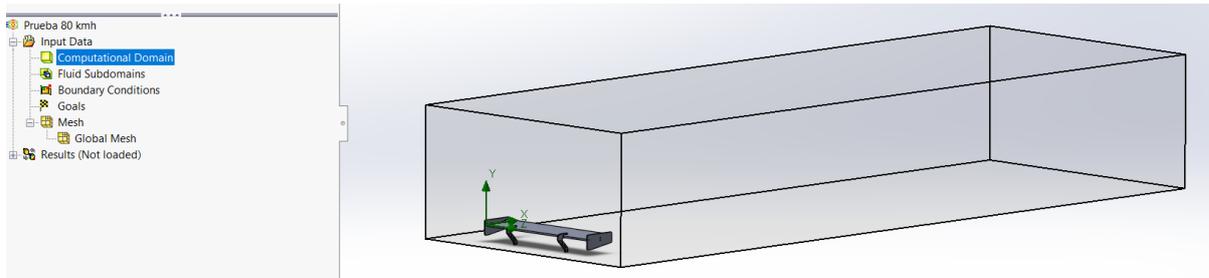


Figura 62: Selección dominio computacional. [26]

Añadimos de la siguiente manera los objetivos de cálculo que queremos obtener, estos son la fuerza en X y en Y, correspondientes al *downforce* y al *drag* generado por el alerón.

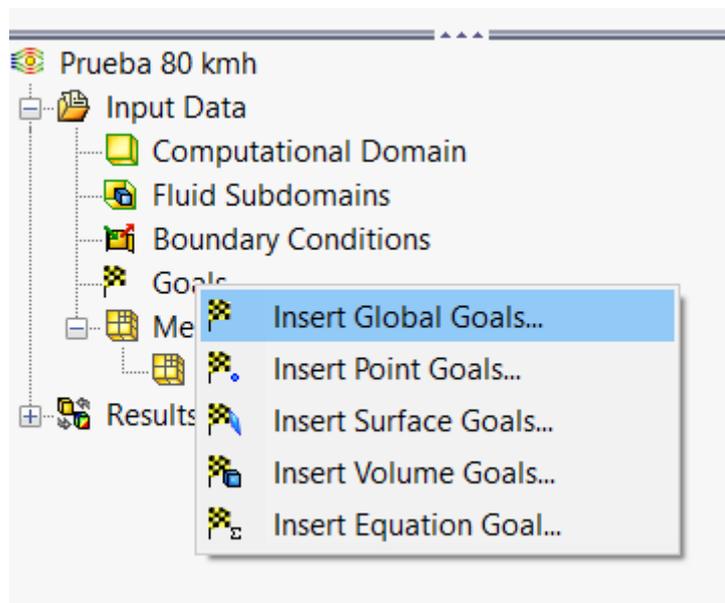


Figura 63: Selección datos a calcular. [26]

Por último, creamos la malla con un nivel de precisión alto, en este caso 6 de 7, para obtener de esta manera unos resultados más precisos y coherentes.

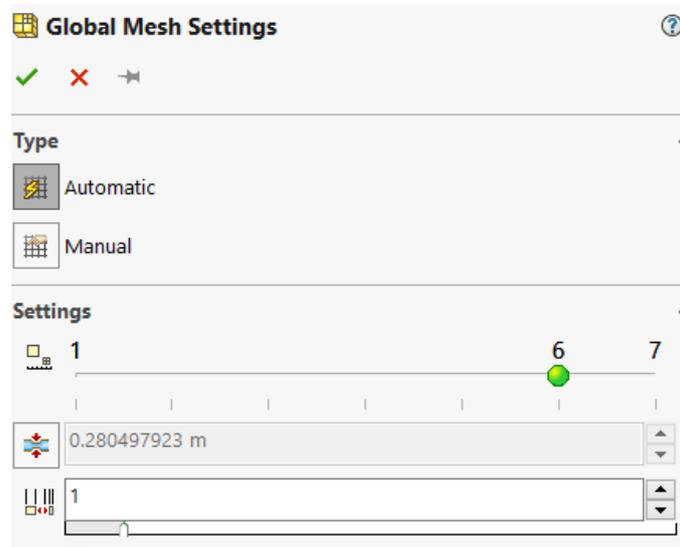


Figura 64: Configuración mallado. [26]

Ya solo faltaría ejecutar el estudio y esperar a los resultados, esto se hace de la siguiente forma.

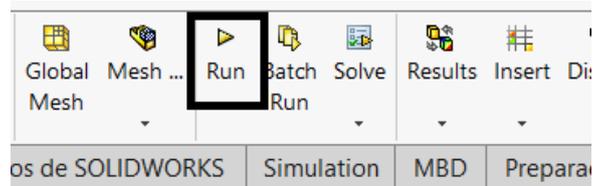


Figura 65: Icono ejecución estudio. [26]

Para terminar, una vez finalizado el Solver procedemos a insertar tanto una simulación de flujo como una tabla de resultados y observar tanto el comportamiento como las fuerzas que genera el dispositivo.

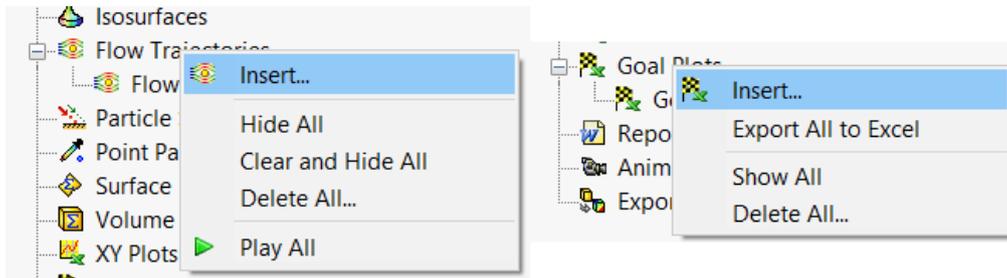


Figura 66: Introducción simulación de flujo. [26]

A-5.1.2. Simulaciones Aerodinámicas.

En este apartado se van a plasmar los resultados obtenidos mediante la simulación de flujos “Flow Simulation”. El alerón diseñado es de tipo modular, es decir, se podría variar el ángulo de ataque del perfil alar entre 0° , 5° y 10° . Sin embargo, ya que el comportamiento del fluido sería muy parecido en estos diferentes casos, se va a simular el dispositivo en su configuración intermedia de 5° o media-carga y analizar la carga y resistencia que este produce.

A-5.1.2.a. 80 km/h.

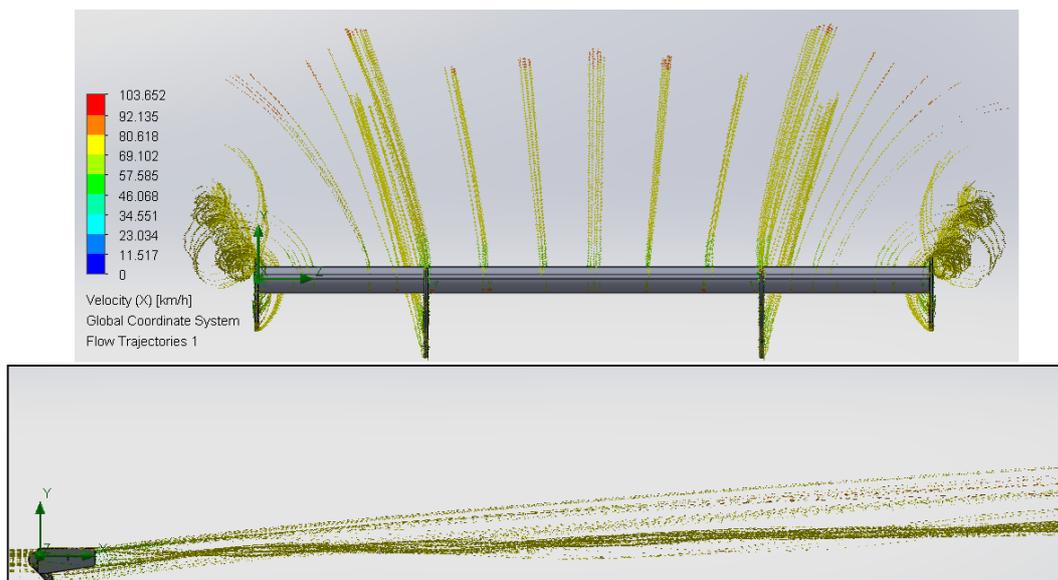


Figura 67: Simulación aerodinámica 80 km/h. [26]

A-5.1.2.b. 120 km/h.

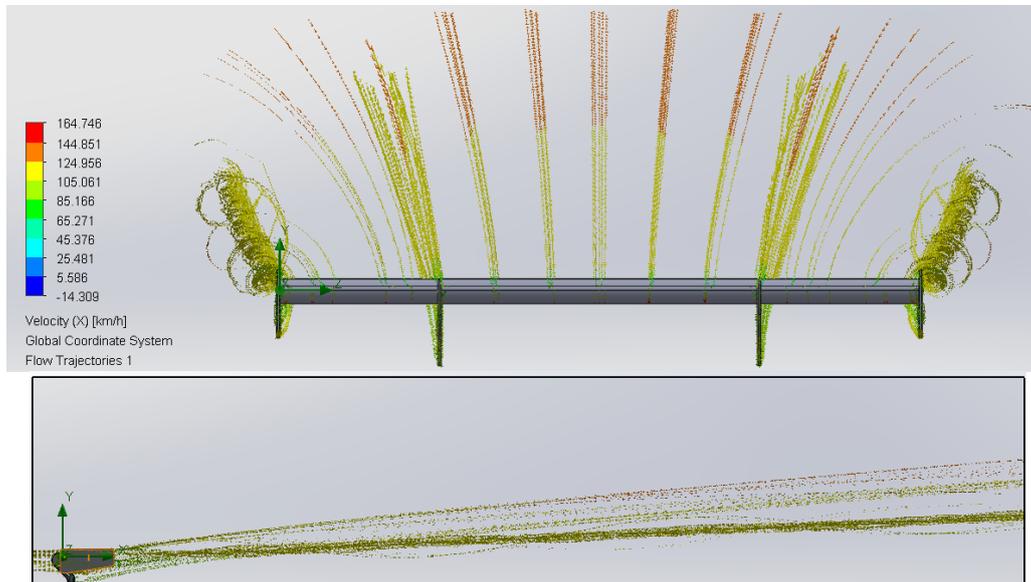


Figura 68: Simulación aerodinámica 120 km/h. [26]

A-5.1.2.c. 160 km/h.

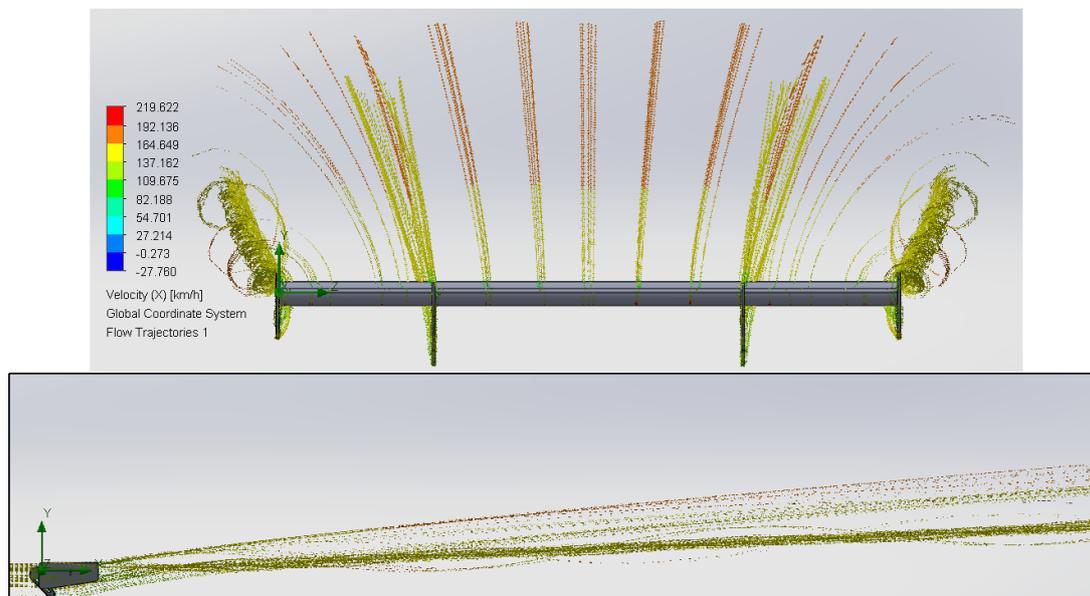


Figura 69: Simulación aerodinámica 160 km/h. [26]

A-5.1.2.d. 200 km/h.

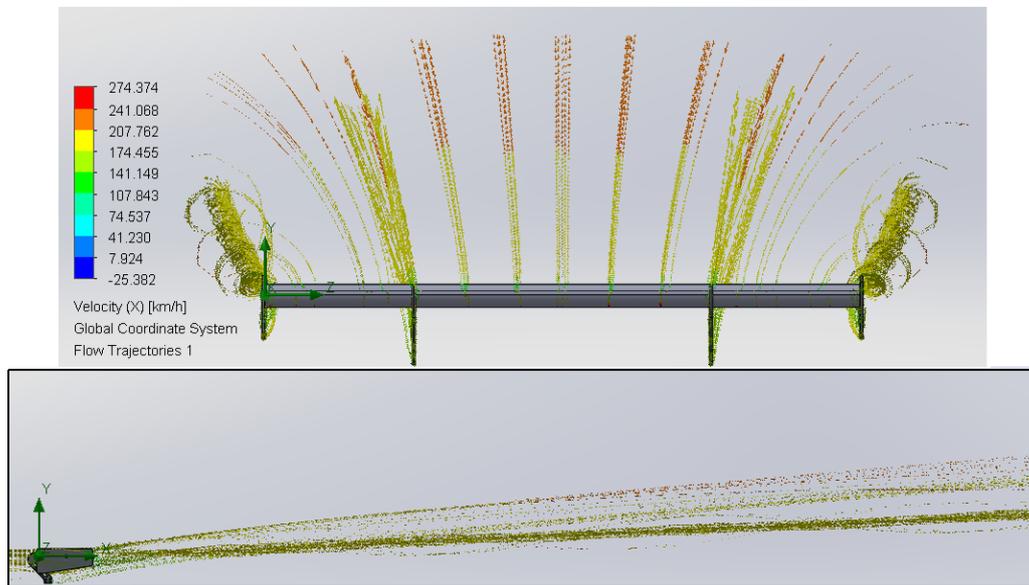


Figura 70: Simulación aerodinámica 200 km/h. [26]

A-5.1.2.e. 225 km/h.

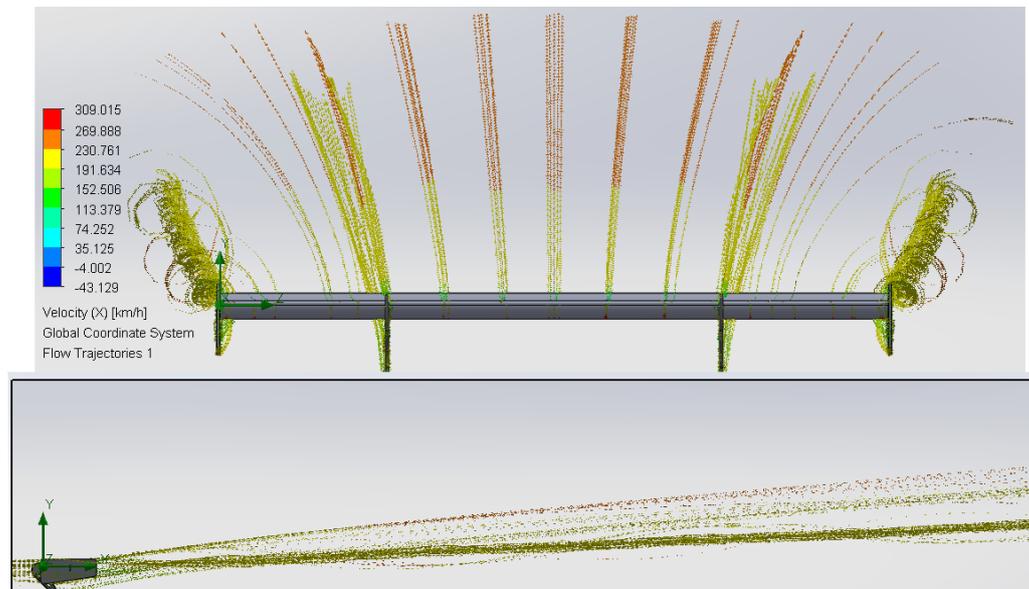


Figura 71: Simulación aerodinámica 225 km/h. [26]

A-5.1.2.f. 250 km/h.

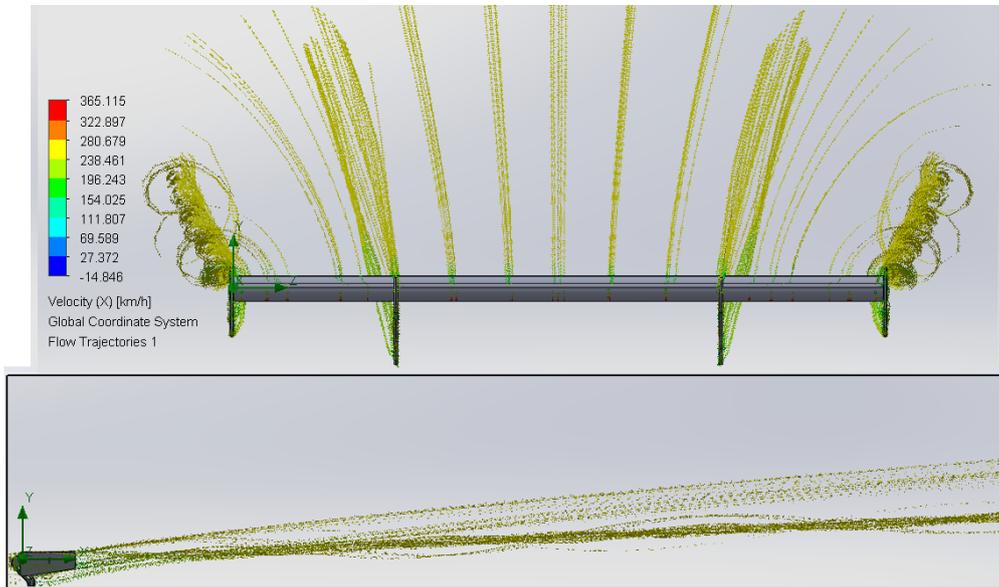


Figura 72: Simulación aerodinámica 250 km/h. [26]

A-5.1.2.g. 275 km/h.

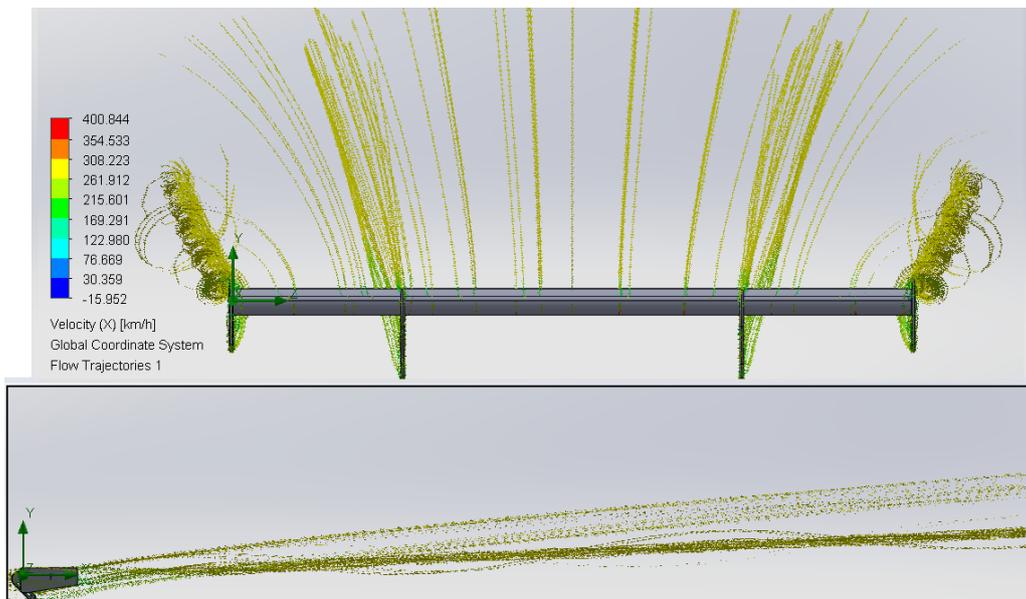


Figura 73: Simulación aerodinámica 275 km/h. [26]

A-5.1.2.h. 300 km/h.

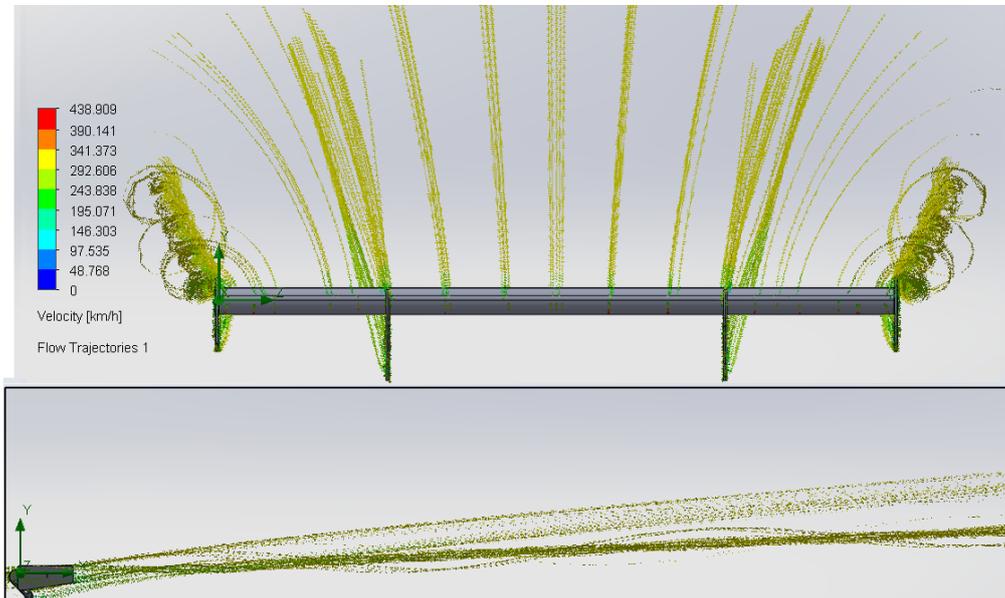


Figura 74: Simulación aerodinámica 300 km/h. [26]

A-5.1.2.i. 325 km/h.

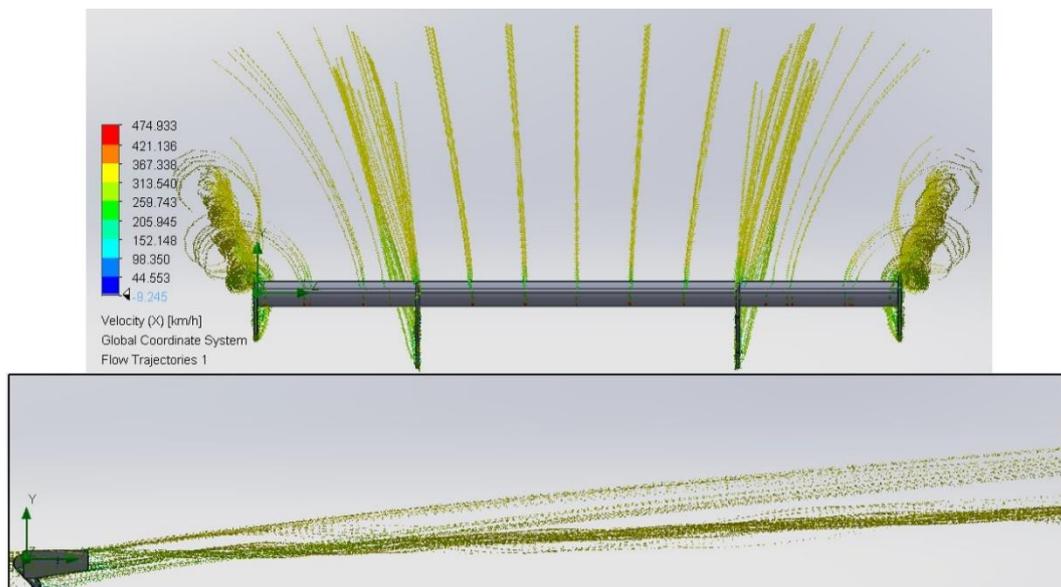


Figura 75: Simulación aerodinámica 325 km/h. [26]

A-5.1.3. Resultados.

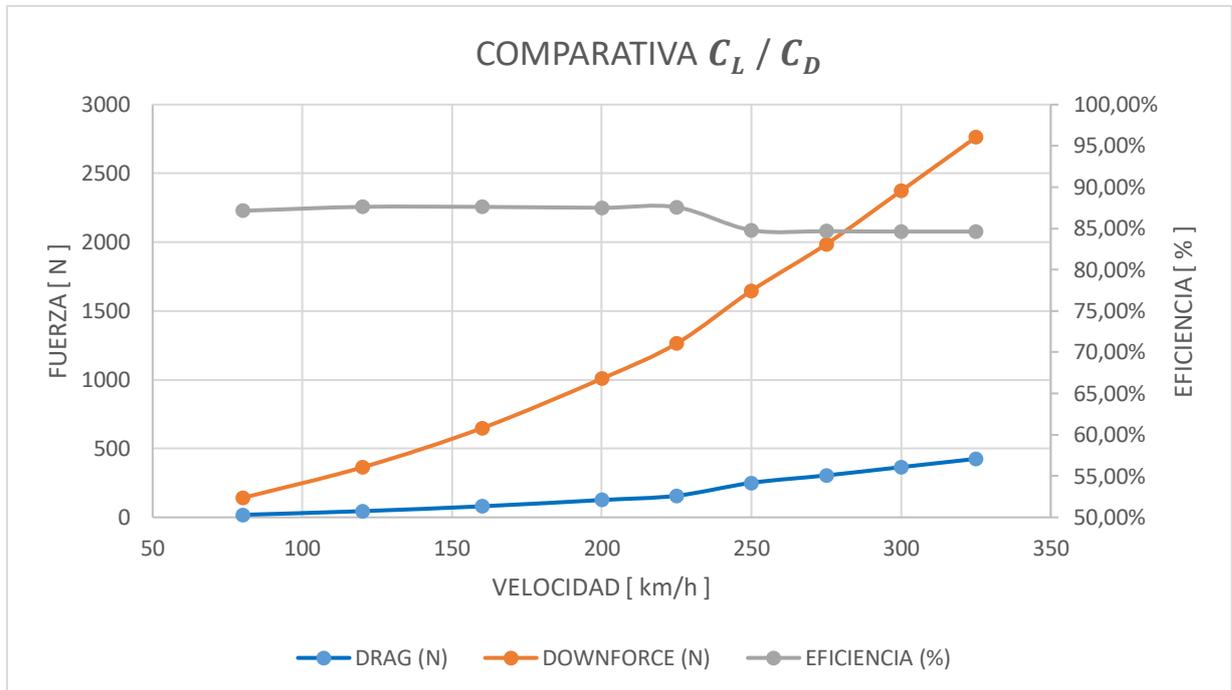
Los siguientes datos han sido tomados directamente en cada una de las simulaciones anteriores a partir del software SolidWorks, mediante la herramienta “Goals”, capaz de medir las fuerzas generadas por el alerón en cada uno de los ejes de coordenadas. En este caso, las fuerzas provenientes del eje X hacen referencia a la resistencia aerodinámica (*drag*), por otra parte, las obtenidas en el eje Y vienen asociadas a la carga producida (*downforce*) por el dispositivo.

Tabla 9: Resultados simulaciones aerodinámicas. [5]

km/h	DRAG (N)	DOWNFORCE (N)	EFICIENCIA (%)
80	18,1	141,0	87,1%
120	45,0	363,1	87,6%
160	80,3	648,1	87,6%
200	125,9	1007,6	87,5%
225	157,1	1263,3	87,6%
250	250,6	1646,9	84,8%
275	304,5	1985,1	84,7%
300	364,9	2372,4	84,6%
325	424,9	2762,5	84,6%

Finalmente, en la siguiente gráfica se observa la evolución y la cantidad total de fuerza generada tanto de resistencia como de carga aerodinámica, así como el rendimiento obtenido, todo esto en función de las velocidades estudiadas.

Tabla 10: Gráfica evolución propiedades alerón.[5]





A-5.2. ESTUDIO RESISTENTE

A-5.2.1. Objetivo Simulación Mediante FEM.

En este apartado se va a analizar principalmente el comportamiento estructural del diseño bajo condiciones máximas de funcionamiento. En este caso, la fuerza máxima generada verticalmente es de 2762,5 N a 325 km/h, por tanto, simplificando el estudio y para garantizar aún más la integración estructural del mismo se va a someter la pieza a una carga descendente de 2800 N sobre el perfil alar, así como la correspondiente a la resistencia aerodinámica generada con una fuerza de 425 N.

A-5.2.2. Procedimiento.

En primer lugar y una vez abierto el complemento “Simulation” contenido en el software SolidWorks, entramos en Nuevo Estudio y seleccionamos la opción de “Análisis estático”.

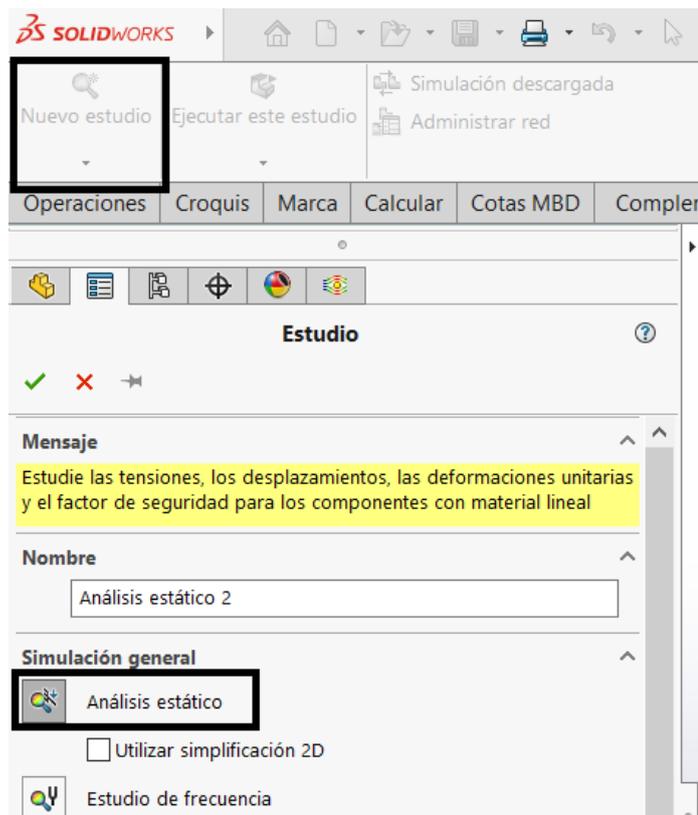


Figura 76: Ejecución análisis estático. [26]

Posteriormente debemos indicarle al programa una serie de características y requisitos para poder realizar el cálculo que estamos buscando. Para ello se comienza otorgando al sólido a analizar el material previamente elegido y la orientación de las fibras, así como el grosor del compuesto y las caras donde se va a definir el laminado, todo esto se realiza de la siguiente manera.

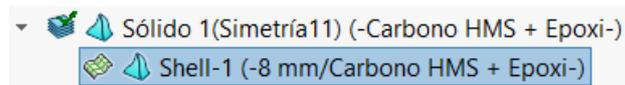


Figura 77: Sólido a analizar. [26]

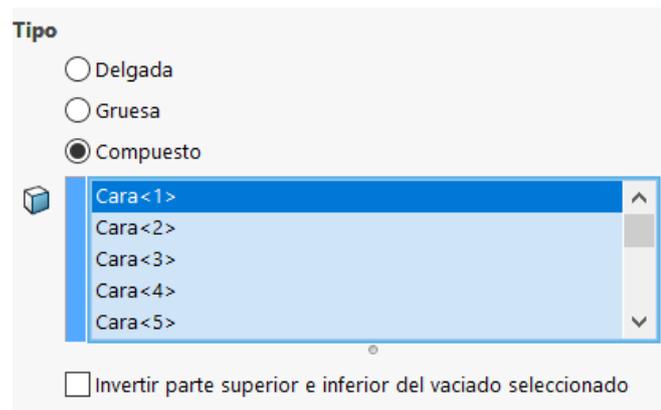


Figura 78: Selección de caras. [26]

El material de la pieza se aplica mediante SolidWorks de la forma en la que se puede observar en la siguiente imagen. Además, el compuesto utilizado responde a la Tabla 5 en la que se han comparado las características mecánicas de los materiales preseleccionados y se ha elegido el carbono HMS como fibra principal, debido a sus altas prestaciones.

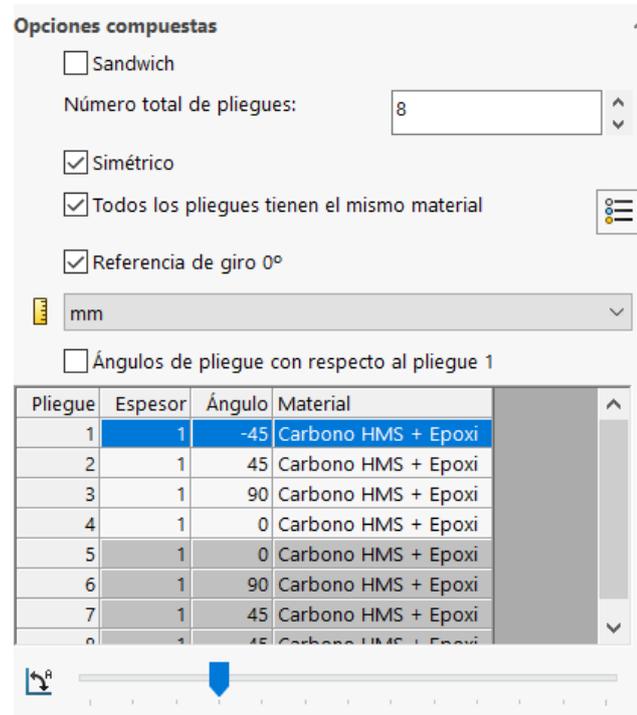


Figura 79: Introducción propiedades material. [26]

En segundo lugar, se indican las fuerzas (2800N y 425N) y la superficie donde van a ser aplicadas, en este caso la cara superior del alerón, ya que dichas fuerzas van a tener una dirección descendente y longitudinal sobre esta cara del sólido.

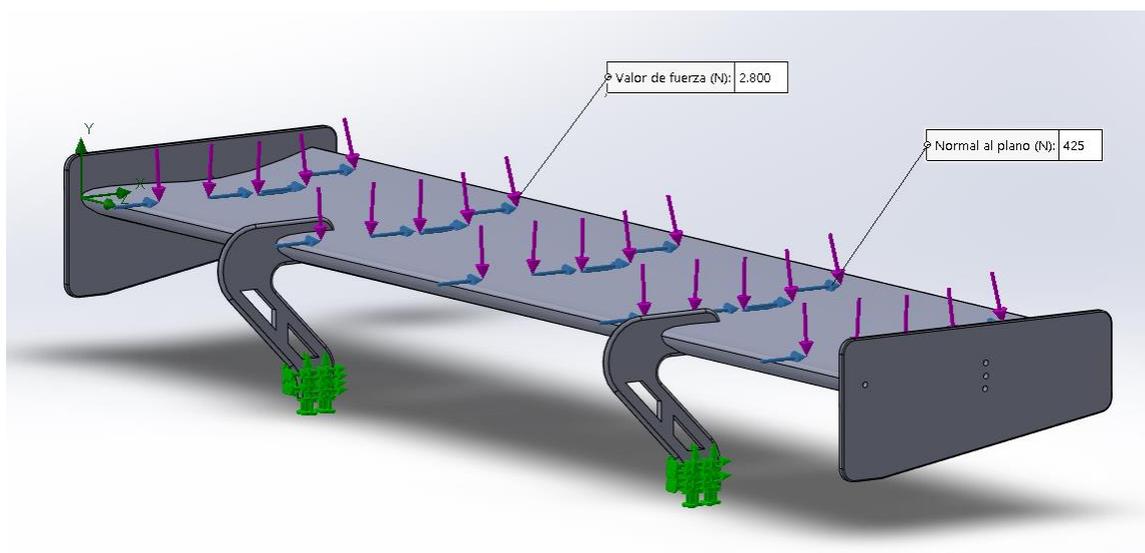


Figura 80: Introducción valores y direcciones de fuerzas aplicadas. [26]

El siguiente paso sería ubicar las sujeciones donde el dispositivo se acoplará al vehículo, en este caso los orificios situados en la parte inferior de los soportes.

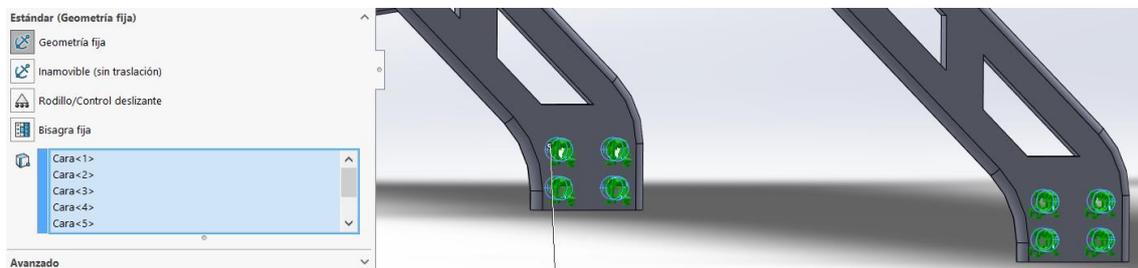


Figura 81: Sujeciones alerón. [26]

Para concluir, se realiza el mallado del sólido dándole la calidad de malla que se prefiera, para este estudio se ha utilizado la versión más precisa, y finalmente se ejecutaría el análisis para comprobar los resultados obtenidos.

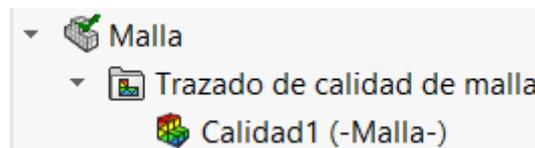


Figura 82: Mallado. [26]

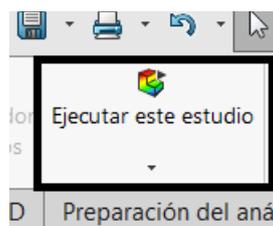


Figura 83: Ejecución del estudio. [26]

A-5.2.3. Resultados.

Tras ejecutar el estudio se puede visualizar y analizar los cálculos en el apartado “resultados” como aparece en la siguiente imagen.

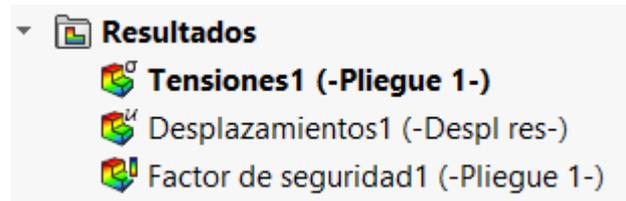


Figura 84: Resultados análisis. [26]

Para simplificar el cálculo estructural de la pieza y tener una mejor visualización de los elementos que soportan el perfil alar, se han descartado del estudio las derivas laterales. Esto se debe a que estas partes no están sometidas a fuerzas ni deformaciones debido a que no tienen una finalidad estructural sino más bien tienen como objetivo canalizar el flujo de aire a través de la superficie del alerón.

A-5.2.3.a. Análisis de Estados Tensionales.

En primer lugar, se procede a observar las tensiones que se generan en la pieza y concluir si esta es capaz de resistir la fuerza aplicada.

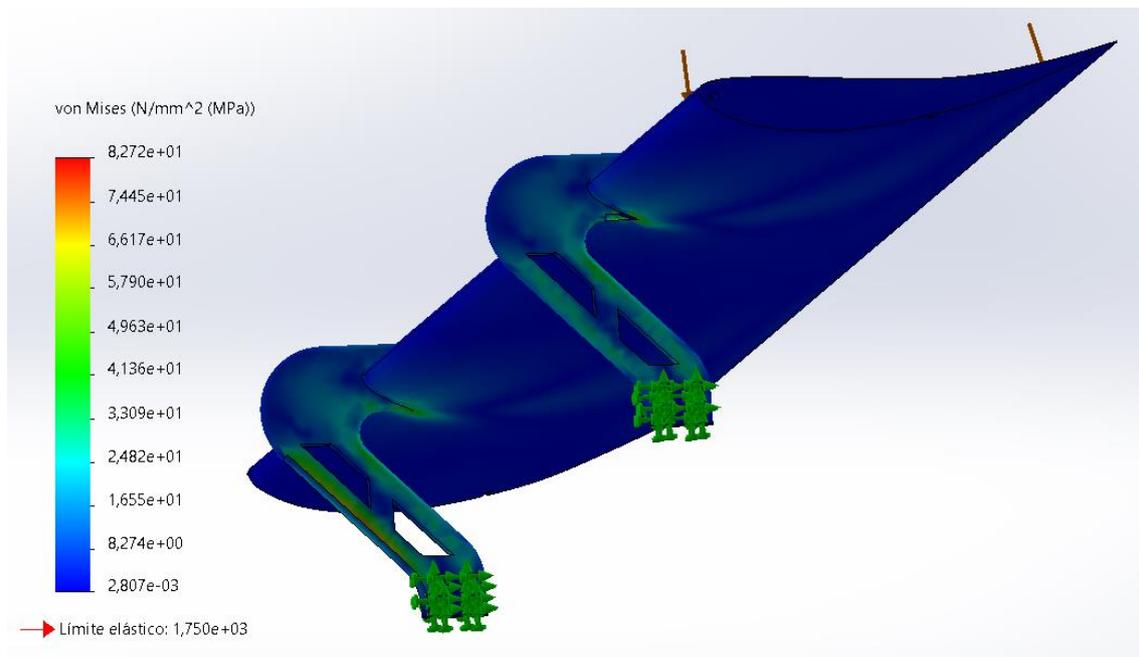


Figura 85: Tensiones alerón. [26]

Como se puede observar en la anterior imagen las zonas más comprometidas son los soportes, ya que tienen que resistir toda la fuerza aplicada. De hecho, es la unión soporte-alerón la más perjudicada dentro del cálculo tensional. Sin embargo, aún podrían resistir mayores esfuerzos sin sufrir una deformación permanente ya que, como se aprecia, no llega a la zona plástica del compuesto, siendo el valor máximo obtenido en el cálculo de 82,72 MPa < 1750 MPa, este último valor correspondería al del límite elástico del material.

A-5.2.3.b. Análisis de Desplazamientos.

En cuanto a las deformaciones obtenidas, se visualiza que la salida del perfil alar es la que mayor desplazamiento sufre, este punto es el más perjudicado debido principalmente a la longitud que hay entre este punto y los soportes. Sin embargo, el valor máximo que se alcanza es de tan sólo 1,628 mm, este desplazamiento se puede observar más de cerca en las siguientes imágenes.

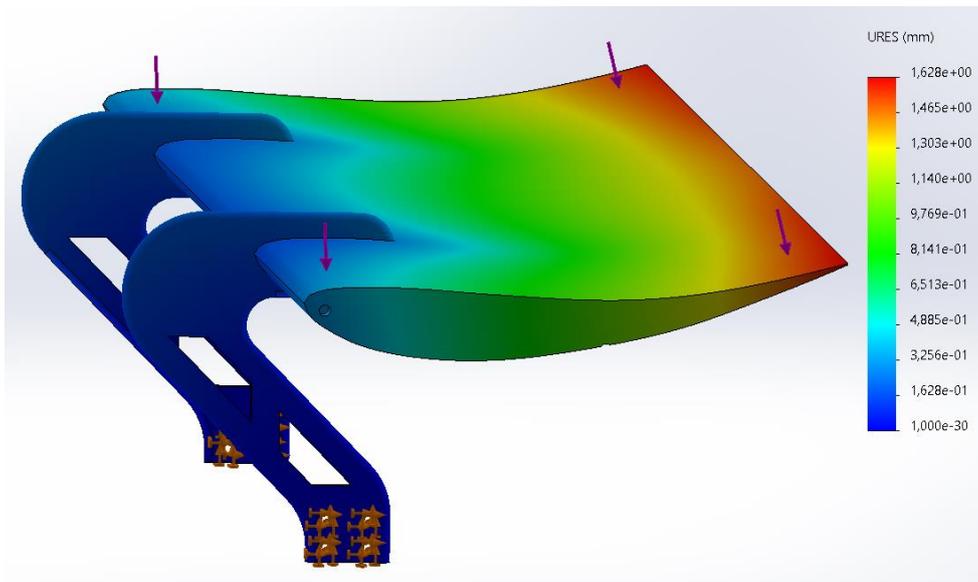


Figura 86: Desplazamientos alerón. [26]

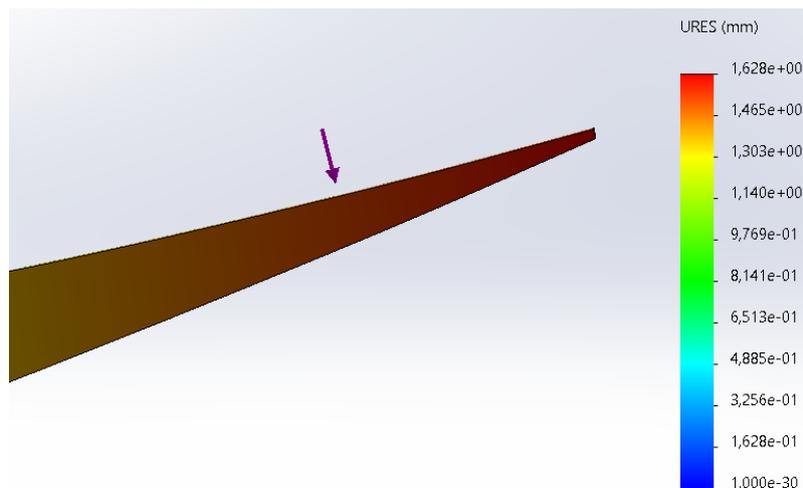


Figura 87: Detalle desplazamiento. [26]

A-5.2.3.c. Trazado de Factor de Seguridad.

Finalmente, haciendo referencia al factor de seguridad, se comprueba de nuevo que la parte más sensible siguen siendo los soportes, de todas maneras, estos siguen resistiendo de manera correcta. Ya que se trata de un elemento destinado a la competición, no se requiere de un alto valor de FDS, esto es debido a que prima más la ligereza que la resistencia.

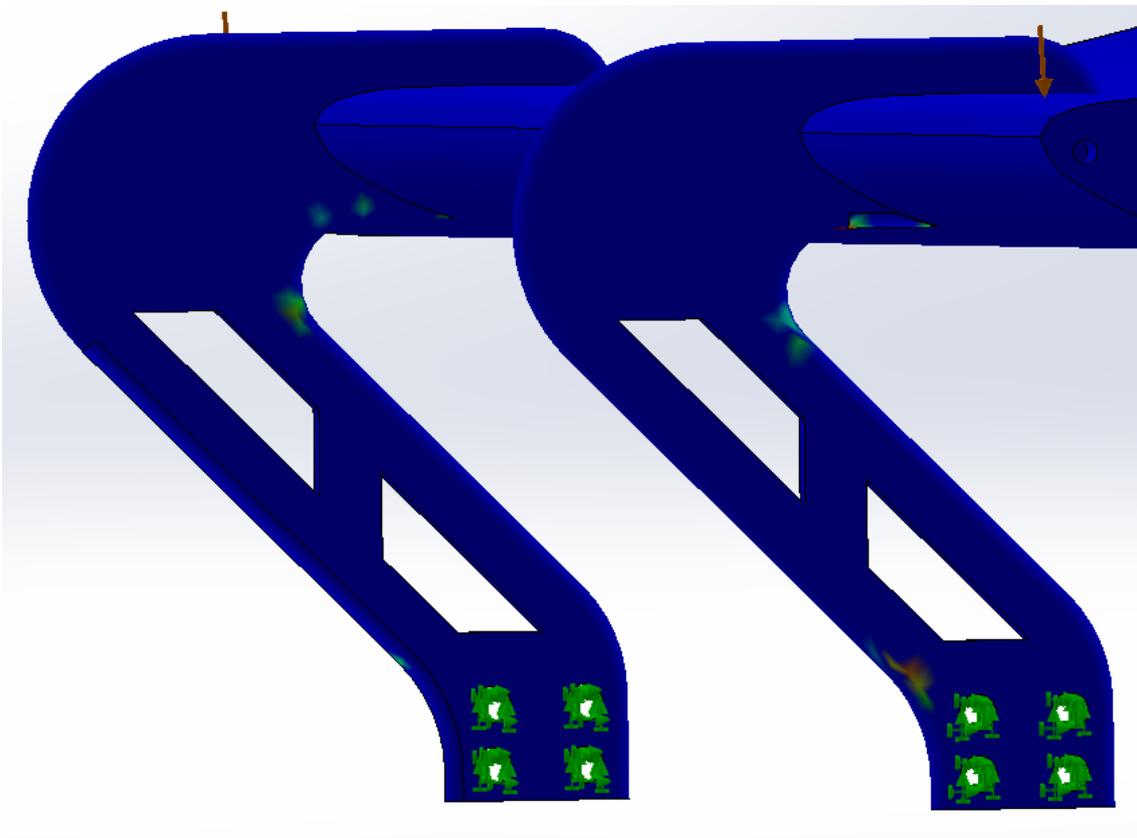


Figura 88: FDS alerón. [26]



Como se puede observar en la siguiente tabla los valores de FDS varían entre 1,55 y 1,63, en función del criterio que se utilice. En primer lugar, se observa el más restrictivo de todos, el criterio de Tsai-Hill y posteriormente, algo más permisivos los criterios de Tsai-Wu y el correspondiente al de las tensiones máximas.

Tabla 11: Valores FDS. [5]

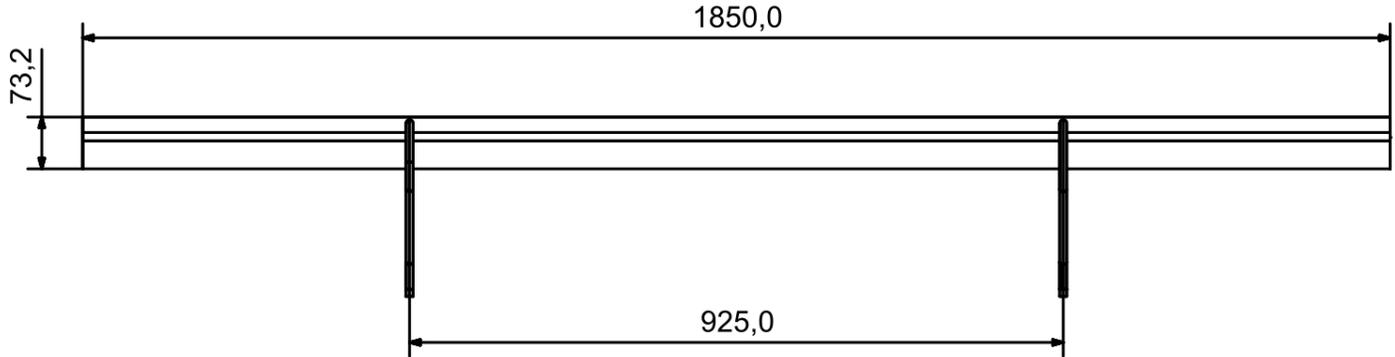
CRITERIO	FDS (FACTOR DE SEGURIDAD)
TSAI-HILL	1,55
TSAI-WU	1,63
TENSIÓN MÁX	1,60



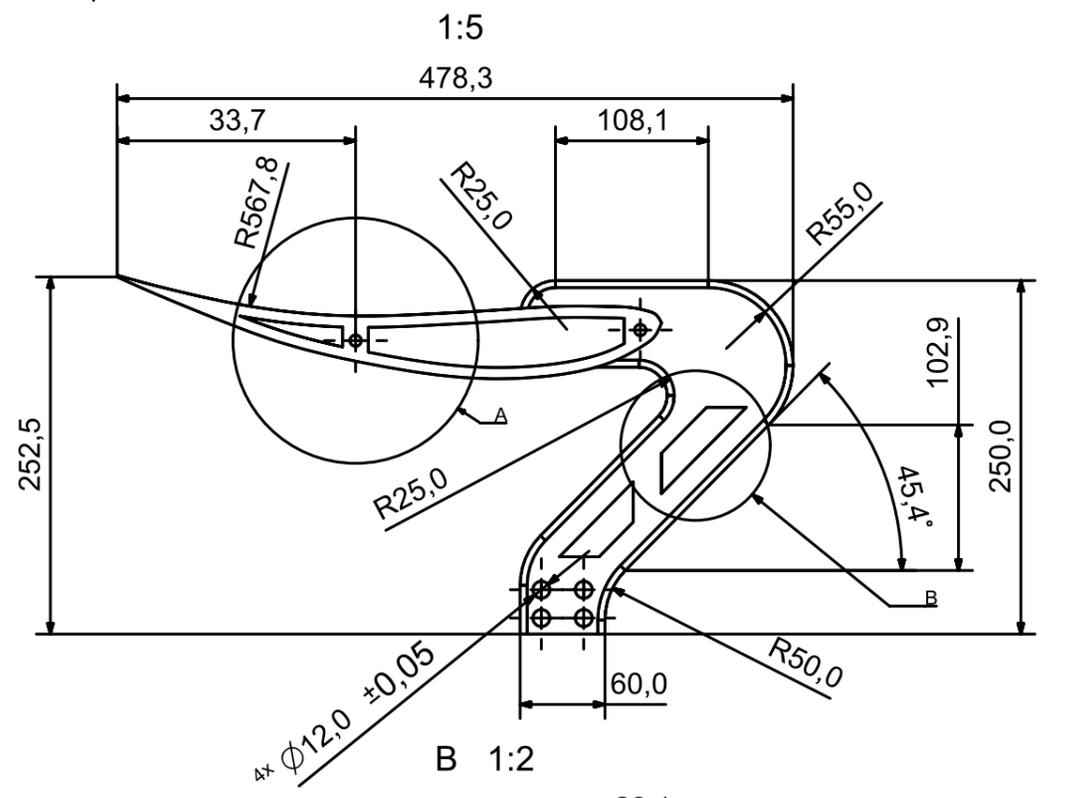
III. PLANOS

1 2 3 4 5 6 7 8

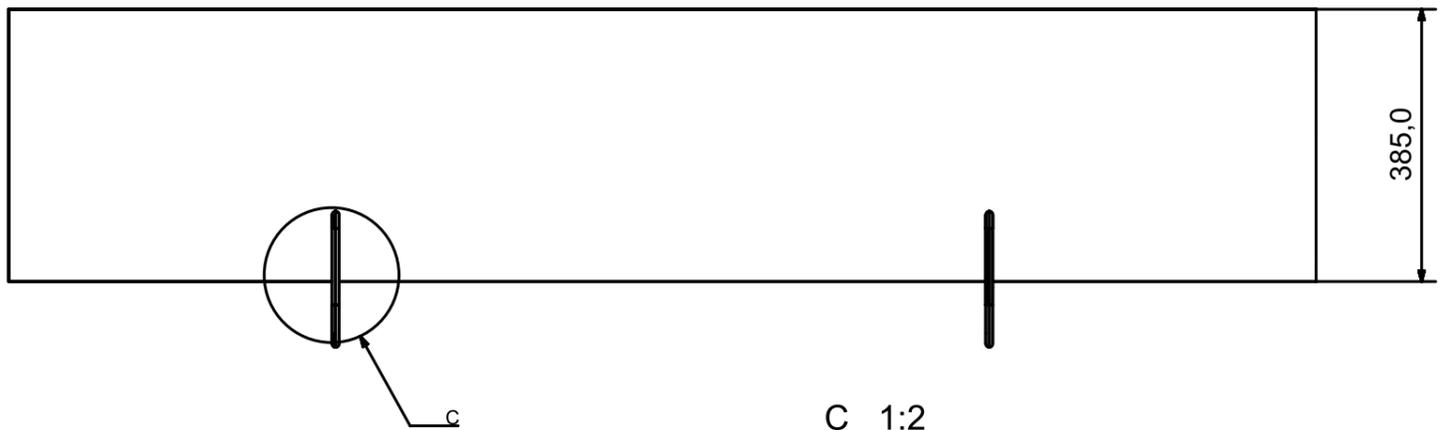
A



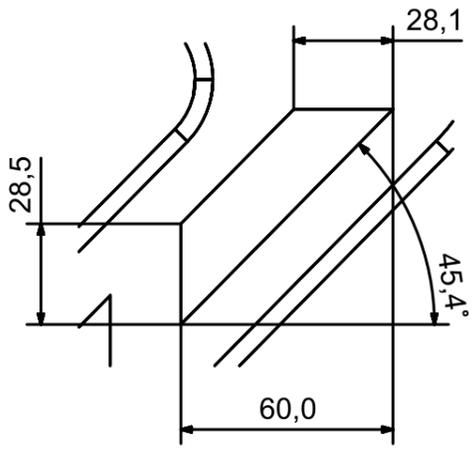
B



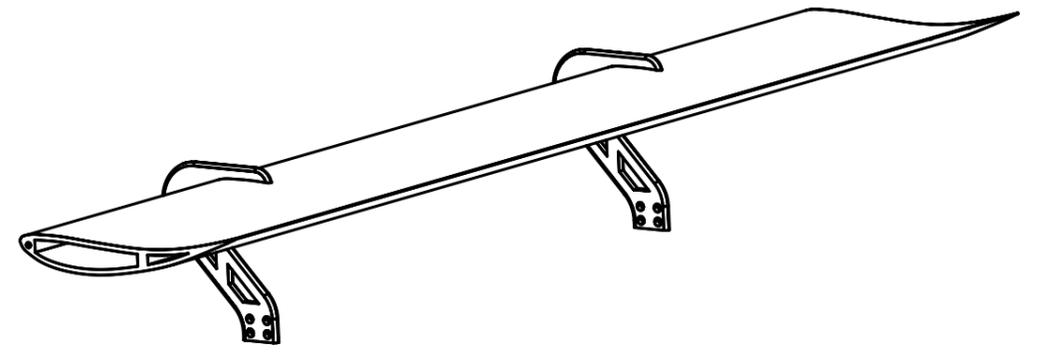
C



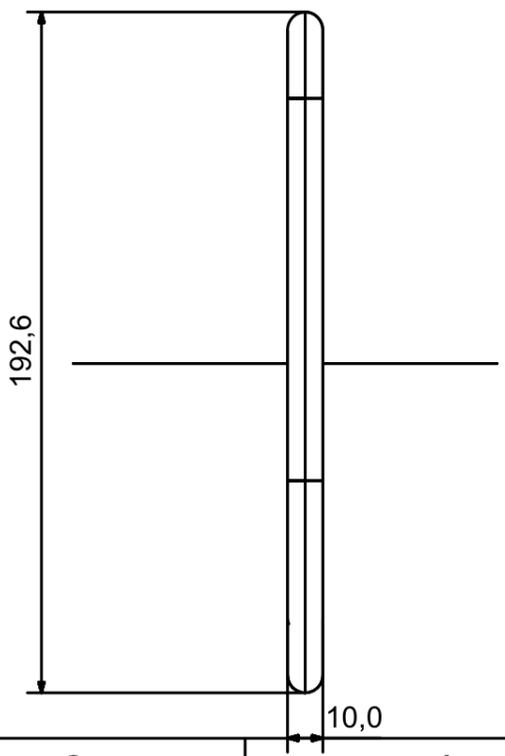
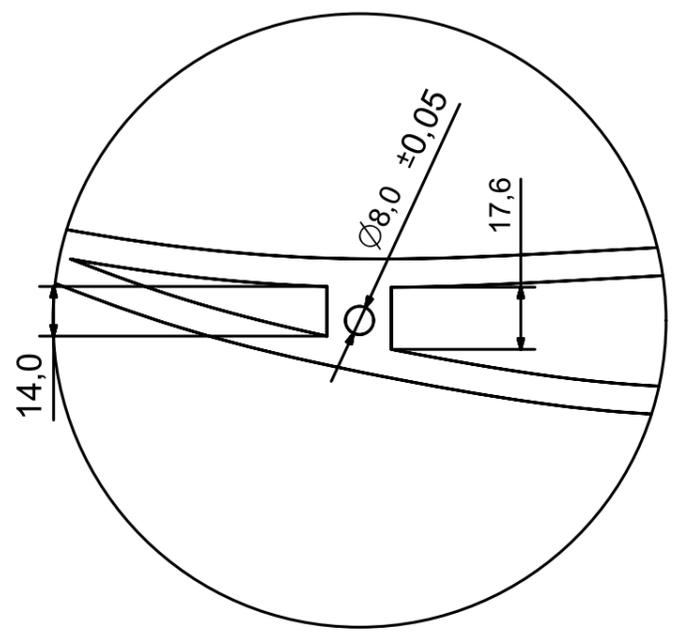
D



E



F



A 1:2

C 1:2

B 1:2

	Nombre	Fecha		
Autor	Alejandro Arce Oliver	29/06/2022		
MATERIAL:	SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: -LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM -TOLERANCIAS ±0,1 N7			
Escala	Denominación			Número
1:10	Alerón sin derivas			1 / 1

1 2 3 4 5 6 7 8

A

B

C

D

E

F

1

2

3

4

A

A

B

B

C

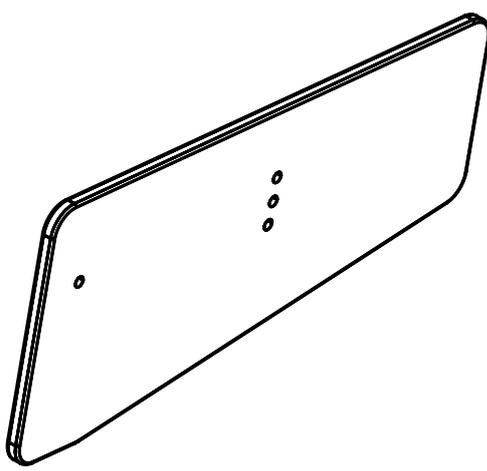
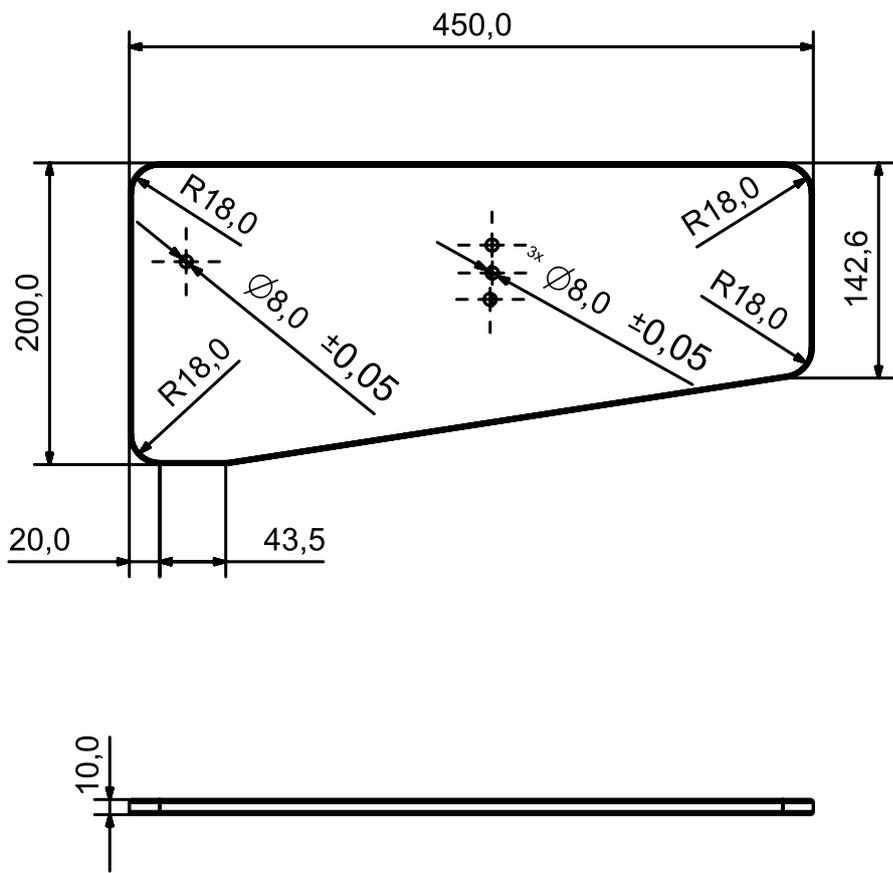
C

D

D

E

E



	Nombre	Fecha	  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	Propuesta de Diseño y Cálculo de un Alerón trasero para un Automóvil de Competición
Autor	Alejandro Arce Oliver	29/06/2022		
MATERIAL: Fibra de Carbono HMS + Epoxi	SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: -LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM -TOLERANCIAS ±0,1 -RUGOSIDAD N7			
Escala	Denominación			Número
1:5	Derivas			1/1

1

2

3

4

F

F



IV. PLIEGO DE CONDICIONES

IV.1. Materiales y Fabricación.

Todos los materiales y procesos de fabricación de este proyecto han sido seleccionados y analizados para optimizar la pieza al máximo, estos requisitos se ven reflejados en el ANEXO 4 – MATERIALES Y PROCESOS DE FABRICACIÓN, donde se puede consultar con mayor detalle.

Además, los aspectos relacionados con la fabricación y las tolerancias dimensionales de los componentes se recogen según la normativa UNE-EN ISO 8015:2012 y en la UNE-EN ISO 22768-1:1994 respectivamente.

Finalmente, cualquier cambio o reemplazo en los materiales o en los procesos de fabricación deberán ser por obligatorio cumplimiento iguales o superiores en cuanto a sus características y/o propiedades mecánicas, siempre siendo realizado o supervisado por un Ingeniero.

IV.2. Almacenamiento.

En cuanto al almacenamiento, habría distinguirlo en función de si se trata de las fibras previas a la construcción de la pieza y al alerón en sí.

Esto se debe a que las fibras preimpregnadas o prepegs para evitar un curado indeseado deben mantenerse refrigeradas a una temperatura de en torno a los -18°C , puesto que a temperatura ambiente la resina que contiene las láminas podría llegar a curarse por completo y solidificarse. En el momento que se quieran utilizar se deberían sacar del refrigerador para ser moldeadas en el acto.

Por otra parte, el alerón o las piezas ya moldeadas no podrán estar a la intemperie o sin supervisión climática, deberán igualmente ser conservadas bajo un ambiente controlado de no más de 30°C , para evitar de esta manera influenciar en las características de los materiales y perder sus propiedades mecánicas.



IV.3. Manual de Montaje.

En primer lugar, se deberán de tener todas las piezas necesarias para el correcto montaje del elemento aerodinámico, así como con sus dimensiones y acabados correspondientes.

Existen dos elementos diferentes para el montaje del alerón, el primero de ellos el conjunto de los soportes moldeados directamente sobre el propio perfil alar y, el segundo de ellos, las derivas laterales, contando con una de ellas a cada lado del perfil.

Tanto el perfil a sus extremos como las derivas laterales cuentan con orificios para la introducción de tornillería tamaño M8x40, en el caso de que se quisiera variar el ángulo de ataque del alerón en una futura reconstrucción del proyecto. Sin embargo, ya que el objeto de este proyecto es realizarlo de tipo fijo, para esta unión se debe utilizar un adhesivo acrílico estructural de tipo MMA, como el *Permabond TA4246*, utilizado con fines aeroespaciales y militares que garantizaría una sujeción segura y fuerte.

Finalmente, para la unión del alerón con la carrocería del vehículo los soportes cuentan con ocho orificios de $\varnothing 12$ mm, donde se podrían elegir los más adecuados para la sujeción en función de la altura que se le quiera dar al elemento.



V. PRESUPUESTO

V.1. Presupuesto.

En este apartado se detallará el coste total de la producción del alerón trasero, se hará un análisis sobre el coste del diseño, de materiales y de fabricación, todo esto se realizará de la forma lo más aproximada posible.

V.1.1. Coste de Diseño.

En primer lugar, se ha considerado los equipos y software necesarios para la realización de este proyecto. Se ha seleccionado tanto un ordenador como una licencia de software SolidWorks para 3 meses, ya que es la licencia mínima que existe y se ha calculado el coste proporcional al uso de dicho material.

Tabla 12: Coste Equipos [5]

	Precio (€)	Vida Útil (años)	Uso (años)	Coste (€)
Ordenador	1.500,00 €	4	0,25	93,75 €
SolidWorks	1.200,00 €	0,25	0,25	1.200,00 €
				1.293,75 €

A continuación, se ha calculado el tiempo aproximado que se tardaría en realizar este proyecto con una persona dedicada a ello en jornada completa. Se ha seleccionado un Ingeniero con una jornada mensual de 200 h y 2500€ de salario, lo que supone un coste de 12,50 €/h.

Tabla 13: Coste Diseño [5]

Diseño Pieza (h)	10
Estudios Aerodinámicos y Resistentes (h)	20
Redacción Memoria (h)	20
Tiempo Total (h)	50

Coste Ingeniero (€/h)	12,50 €
Coste Total (€)	625,00 €

V.1.2. Coste de Materiales.

En la siguiente tabla se puede observar la lista de materiales necesarios para la fabricación del componente, así como la cantidad y el coste de cada uno de ellos. Para calcular la cantidad requerida de fibras se ha hecho un cálculo entre el peso total de fibra de carbono necesaria y la densidad de las láminas pre-impregnadas, hasta dar con un total de 20 m² o lo que es lo mismo 13 kg, contando que cada m² son 650 g.

Tabla 14: Coste Materiales [5]

	Precio Ud. (€)	Unidades (U)	Coste (€)
Fibra de Carbono Láminas Preimpregnadas (5 m2)	370,89 €	4	1.483,56 €
Gelcoat (1,3 Kg)	41,01 €	1	41,01 €
Desmoldeante (1L)	10,37 €	1	10,37 €
Bolsa Vacío (rollo 200m)	1.026,64 €	0,02	20,53 €
Lijadora Neumática	301,11 €	1	301,11 €
Lija 360	2,44 €	1	2,44 €
Lija 1000	2,34 €	1	2,34 €
Rodillo desaireador	10,89 €	1	10,89 €
Rodillo caucho para Prepegs	40,15 €	1	40,15 €
Llave Allen (8 mm)	1,29 €	1	1,29 €
Tornillo Allen (8 mm)	0,32 €	4	1,30 €
Taladro Eléctrico	59,26 €	1	59,26 €
Bomba de Vacío	243,75 €	1	243,75 €
		Total	2.218,00 €

V.1.3. Coste de Fabricación.

En este apartado se ha calculado el tiempo requerido para el conformado de las piezas del alerón y, a su vez, el coste total de las operaciones. En este caso, se cuenta con un operario con una remuneración mensual de 1800€ distribuidas en 200h de jornada, lo que supone un coste de 8,75€/h.

Tabla 15: Costes Fabricación [5]

	Derivas Laterales	Perfil Alar + Soporte
Preparación Material (h)	0,5	1
Fabricación Componente (h)	2	6
Moldeo y Curado (h)	6	24
Desmoldeo y Retocado (h)	1	2
Post-procesado (h)	1	2
Tiempo Fabricación (h)	10,5	35
Tiempo Total (h)	45,5	

Coste Operario (€/h)	8,75 €
Coste Total (€)	398,13 €

V.1.4. Presupuesto Total.

Finalmente, en la siguiente tabla encontramos el presupuesto total asociado al conjunto de gastos desde el diseño hasta la fabricación completa del alerón. Y donde se añaden también los porcentajes respectivos de impuestos, gastos generales y de beneficio industrial.

Tabla 16: Presupuesto Final [5]

Costes Materiales	2.218,00 €
Costes Equipo	1.293,75 €
Costes Mano de Obra	1.023,13 €
Total Presupuesto Parcial	4.534,87 €
Gastos Generales (13%)	589,53 €
Beneficio Industrial (6%)	272,09 €
Presupuesto Sin Impuestos	5.396,50 €
IVA (21%)	1.133,26 €
Precio Presupuesto Final	6.529,76 €

Por tanto, el presupuesto final para la completa realización de este proyecto sería de:

SEIS MIL QUINIENTOS VEINTINUEVE CON SETENTA Y SEIS CÉNTIMOS