



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

# ESTUDIO Y DISEÑO AERODINÁMICOS DE UN ALERÓN TRASERO PARA UN COCHE DEPORTIVO



## Memoria y Anexos

**Autor:** Julen Martínez Cuello

**Directora:** Tània Torm Obradors

**Departamento:** Mecánica de Fluidos

**Convocatoria:** Junio 2021

## RESUMEN

En el siguiente proyecto se llevará a cabo el estudio y posterior diseño de los elementos aerodinámicos que formarán parte del alerón trasero de un coche deportivo, tomando como referencia un Nissan GT-R.

Enfocado en el campo de la mecánica de fluidos, se hará una introducción a esta así como del origen de estos componentes para después llevar a la práctica dichos conocimientos.

A lo largo del trabajo se irá viendo la metodología llevada a cabo en la realización de las distintas simulaciones, así como el criterio a la hora de seleccionar los distintos parámetros. Además, se hará uso de una tecnología que cada vez es más utilizada y tiene una gran proyección de futuro, la impresión 3D, para así poder validar mediante un túnel de viento las condiciones en las que se han efectuado dichas simulaciones.

## RESUM

En el següent projecte es durà a terme l'estudi i posterior disseny dels elements aerodinàmics que formaran part de l'aleró posterior d'un cotxe esportiu, prenent com a referència un Nissan GT-R.

Enfocat en el camp de la mecànica de fluids, es farà una introducció a aquesta així com de l'origen d'aquests components per a després portar a la pràctica aquests coneixements.

Al llarg del treball s'anirà veient la metodologia duta a terme en la realització de les diferents simulacions, així com el criteri a l'hora de seleccionar els diferents paràmetres. A més, es farà ús d'una tecnologia que cada vegada és més utilitzada i té una gran projecció de futur, la impressió 3D, per a així poder validar mitjançant un túnel de vent les condicions en les quals s'han efectuat aquestes simulacions.

## ABSTRACT

The next project will carry out the study and subsequent design of the aerodynamic elements that will be part of the rear spoiler of a sports car, taking as a reference a Nissan GT-R.

Focused on the field of fluid mechanics, an introduction will be made to this as well as the origin of these components and then put this knowledge into practice.

Throughout the work, the methodology carried out in the realization of the different simulations will be shown, as well as the criterion when selecting the different parameters. In addition, it will make use of a technology that is increasingly used and has a great projection of the future, 3D printing, in order to validate the conditions under which the simulations have been carried out in a wind tunnel.

## AGRADECIMIENTOS

A mi tutora Tània Torm, quien desde un primer momento ha ayudado con el proyecto, ofreciendo sus conocimientos respecto a cualquier tema y en especial la impresión 3D, la cual no podría haberse llevado a cabo sin ella.

A mi compañero de carrera Oriol López, con el cual he ido compartiendo experiencias y dudas a lo largo del trabajo debido a la semejanza de nuestros proyectos.

Finalmente a mi novia, quien me ha mostrado su apoyo y me ha dado fuerzas durante la realización de todo el trabajo.



## GLOSARIO

$Re$	Número de Reynolds	
$Fr$	Número de Froude	
$Ma$	Número de Mach	
$U$	Velocidad	[m/s]
$\rho$	Densidad	[kg/m <sup>3</sup> ]
$P$	Presión	[Pa]
$h$	Altura	[m]
$g$	Gravedad	[m/s <sup>2</sup> ]
$\dot{m}$	Caudal másico	[kg/s]
$S$	Superficie	[m <sup>2</sup> ]
$L$	Longitud característica	[m]
$\mu$	Viscosidad dinámica	[Pa·s]
$C_L$	Coficiente de <i>lift</i>	
$C_D$	Coficiente de <i>drag</i>	
$F_L$	Fuerza <i>lift</i>	[N]
$F_D$	Fuerza <i>drag</i>	[N]
$A$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$f$	Fineza o eficiencia aerodinámica	
AR	Relación de aspecto	

$x,y,z$	Coordenadas cartesianas	[m]
$\partial$	Derivada parcial	
$\Delta$	Diferencia	
$\nabla$	Gradiente	
$t$	Tiempo	[s]
$E$	Energía	[J]
$k$	Energía cinética turbulenta	[J/kg]
$T$	Temperatura	[K]
$E_S$	Fuentes de energía externa	[J]
$R_{ij}$	Tensor de esfuerzos de Reynolds	
$\delta_{ij}$	Delta de Kronecker	
$S_{ij}$	Gradiente de velocidades media	
$\mu_t$	Viscosidad turbulenta	[Pa·s]
$\varepsilon$	Tasa de disipación de k	[m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$\tau_{ij}$	Esfuerzos turbulentos	
CAD	Computer Aided Design	
CFD	Computer Fluid Dynamics	
DNS	Direct Numerical Simulation	
LES	Large Eddy Simulation	
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes	

**Ángulo de ataque:** ángulo formado entre la cuerda del perfil y la dirección del aire incidente.

**Borde de entrada:** primera toma de contacto con el aire, dividiendo la trayectoria de este entre extradós e intradós.

**Borde de salida:** punto en el que los flujos de aire provenientes del extradós e intradós abandonan el perfil.

**Célula de carga:** elemento que convierte una fuerza aplicada sobre este e una señal eléctrica medible.

**Compresibilidad:** propiedad de la materia la cual hace que esta disminuya de volumen cuando se ve sometida a una presión determinada.

**Cuerda:** línea recta que une el borde de entrada con el de salida.

**Extradós:** parte superior del perfil.

**Intradós:** parte inferior del perfil.

**Mallado:** proceso en el cual geometrías complejas se dividen en elementos simples, como triángulos o cuadriláteros.

**Pandear:** curvar algo, normalmente por su centro.

**Tubo Pitot:** instrumento para medir la presión total.

**Tubo Prandtl:** instrumento para medir la presión dinámica.

**Volumen de control:** región fija en el espacio la cual es empleada para el estudio termodinámico de los equilibrios de masa y energía para sistemas de flujos.

**Vórtice:** flujo turbulento con una rotación espiral.



# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUM</b> .....	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>IV</b>
<b>GLOSARIO</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTADO DE FIGURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>LISTADO DE TABLAS</b> .....	<b>XIV</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 MOTIVACIÓN .....	1
1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO .....	1
1.3 REQUERIMIENTOS PREVIOS .....	2
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>3</b>
2.1 INTRODUCCIÓN A LA AERODINÁMICA .....	3
2.1.1 Teorema de Bernoulli .....	4
2.1.2 Efecto Coandă .....	4
2.1.3 Efecto Venturi.....	5
2.1.4 Capa límite y números adimensionales .....	6
2.1.5 Fuerzas y coeficientes aerodinámicos.....	8
2.2 AERODINÁMICA DE UN ALERÓN .....	10
2.2.1 Origen .....	10
2.2.2 Elemento principal: Perfil alar .....	12
2.2.3 Elementos secundarios: derivas laterales y flap Gurney .....	15

<b>3. DISEÑO 3D DEL ALERÓN MEDIANTE SOFTWARE CAD .....</b>	<b>17</b>
3.1 INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE CAD .....	17
3.2 MODELADO DEL ALERÓN .....	18
3.2.1 Perfil alar .....	18
3.2.2 Derivas laterales .....	21
3.2.3 Soporte .....	22
<b>4. ESTUDIO AERODINÁMICO MEDIANTE SOFTWARE CFD .....</b>	<b>23</b>
4.1 INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE CFD .....	23
4.1.1 Ecuaciones implicadas .....	23
4.1.2 Resolución de ecuaciones .....	24
4.1.2.1 Direct Numerical Simulation (DNS) .....	24
4.1.2.2 Large Eddy Simulation (LES) .....	24
4.1.2.3 Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) .....	25
4.1.2.3.1 Modelo Spalart-Allmaras .....	26
4.1.2.3.2 Modelo K-Epsilon .....	26
4.1.2.3.3 Modelo K-Omega .....	27
4.1.3 Procedimiento de simulaciones en Ansys .....	28
4.2 ESTUDIO DEL ALERÓN .....	33
<b>5. VALIDACIÓN DEL ENTORNO DE SIMULACIÓN .....</b>	<b>46</b>
5.1 TÚNEL DE VIENTO .....	46
5.1.1 Componentes del túnel de viento .....	48
5.2 IMPRESIÓN 3D .....	51
5.2.1 Impresora 3D .....	51
5.2.2 Impresiones realizadas .....	53
5.3 CORRELACIÓN DE RESULTADOS .....	55

<b>DESARROLLO DEL PROYECTO.....</b>	<b>58</b>
PLANIFICACIÓN.....	58
PRESUPUESTO .....	62
ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL.....	63
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>64</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>68</b>
DEMOSTRACIÓN RELACIÓN DE ASPECTO (AR) .....	68
DEMOSTRACIÓN EFECTO SUELO .....	69
MALLADO Y CONVERGENCIA DE RESULTADOS.....	72
PLANOS.....	76

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Nissan GT-R. (Fuente:Nissan) [1].....	2
Figura 2. Principio de bernoulli. (Fuente: Wikipedia ) [2] .....	4
Figura 3. Efecto Coandă en una cuchara. (Fuente: Wikipedia) [3].....	5
Figura 4. Tubo Venturi. (Fuente: Researchgate) [4].....	6
Figura 5. Capa límite. (Fuente: Yunus A. Cengel) [5].....	6
Figura 6. Fuerzas generadas en un perfil. (Fuente: Aerodinámica f1) [6].....	8
Figura 7. Porsche Spyder de Michael May. (Fuente: Drivetribe) [7].....	10
Figura 8. Chaparral 2F. (Fuente: Autolegends) [8] .....	11
Figura 9. Partes y regiones de un perfil alar. (Fuente: Wikiwand) [9] .....	12
Figura 10. Alerón multielementos en fórmula 1. (Fuente: Motorsport) [10] .....	13
Figura 11. Simetría y coeficientes de sustentación de un perfil. (Fuente: Fernando Sebastián Rodas Ibáñez) [11].....	14
Figura 12. Coeficiente de resistencia respecto ángulo de ataque. (Fuente: Los secretos de la Fórmula 1) [12].....	14
Figura 13. Función de las derivas laterales. (Fuente: D. Derek Sola Miralles) [13].....	15
Figura 14. Flap Gurney. (Fuente: Graining) [14].....	16
Figura 15. Creación de la curva del perfil alar.....	19
Figura 16. Perfil 3D.....	19
Figura 17. Posición flap Gurney.....	20
Figura 18. Perfil 3D con flap Gurney. ....	20
Figura 19. Deriva lateral sin redondeos. ....	21
Figura 20. Deriva lateral con redondeos. ....	21
Figura 21. Croquis 2D del soporte.....	22
Figura 22. Volumen de control.....	28
Figura 23. Volumen de control en planos XY e YZ.....	28
Figura 24. Mallado volumen de control. ....	29
Figura 25. Mallado del alerón. ....	29
Figura 26. Entrada de aire o inlet.....	30
Figura 27. Salida de aire u outlet.....	30
Figura 28. Paredes o wall. ....	31
Figura 29. Definición Drag y Downforce en Ansys. ....	31

Figura 30. Herramienta "Contour" en Ansys. ....	32
Figura 31. Herramienta "Streamlines" en Ansys.....	32
Figura 32. $C_D$ y $C_L$ vs Cuerda.....	34
Figura 33. Eficiencia vs Cuerda.....	34
Figura 34. $C_D$ y $C_L$ vs Alfa.....	35
Figura 35. Eficiencia vs Alfa.....	36
Figura 36. Gradiente de presiones sin flap Gurney.....	37
Figura 37. Gradiente de presiones con flap Gurney 2%.....	37
Figura 38. Gradiente de velocidades sin flap Gurney.....	38
Figura 39. Gradiente de velocidades con flap Gurney 2%.....	38
Figura 40. $C_D$ y $C_L$ vs % Flap Gurney.....	39
Figura 41. Eficiencia vs % Flap Gurney.....	39
Figura 42. Diseño 1 deriva lateral.....	40
Figura 43. Diseño 2 deriva lateral.....	40
Figura 44. Diseño 3 deriva lateral.....	40
Figura 45. Diseño 4 deriva lateral.....	41
Figura 46. Vórtice generado en el extremo del perfil sin deriva lateral.....	41
Figura 47. Vórtice generado en el extremo del perfil con deriva lateral.....	42
Figura 48. Comparación de variables entre las distintas derivas laterales.....	42
Figura 49. Estudio final del alerón.....	43
Figura 50. Pérdida de velocidad alrededor de los soportes.....	44
Figura 51. Túnel de viento de la EEBE.....	46
Figura 52. Ensayo en Ansys vs Ensayo real.....	47
Figura 53. Ventilador del túnel de viento.....	48
Figura 54. Malla a la entrada del túnel.....	48
Figura 55. Cuadro de control.....	49
Figura 56. Báscula en posición horizontal.....	50
Figura 57. Báscula en posición vertical.....	50
Figura 58. HP Multi Jet Fusion. (Fuente: HP) [15].....	51
Figura 59. Proceso impresión 3D. (Fuente: HP) [16].....	52
Figura 60. Primera iteración de impresión.....	53
Figura 61. Segunda iteración de impresión.....	53

Figura 62. Tercera iteración de impresión vista 1.....	54
Figura 63. Tercera iteración de impresión vista 2.....	54
Figura 64. Cuarta iteración de impresión.....	55
Figura 65. Comparativa Drag ensayo 1. ....	56
Figura 66. Comparativa Downforce ensayo 1. ....	56
Figura 67. Comparativa Drag ensayo 2. ....	57
Figura 68. Comparativa Downforce ensayo 2. ....	57
Figura 69. Diagrama de Gantt Febrero.....	59
Figura 70. Diagrama de Gantt Marzo.....	60
Figura 71. Diagrama de Gantt Abril.....	60
Figura 72. Diagrama de Gantt Mayo.....	61
Figura 73. Diagrama de Gantt Junio.....	61
Figura 74. Eficiencia vs Envergadura.....	69
Figura 75. Distribución de presiones y velocidades con soporte de 20cm.....	70
Figura 76. Distribución de presiones y velocidades con soporte de 25cm.....	70
Figura 77. Distribución de presiones y velocidades con soporte de 30cm.....	70
Figura 78. Distribución de presiones y velocidades con soporte de 40cm.....	71
Figura 79. $C_D$ y $C_L$ vs Altura.....	71
Figura 80. Eficiencia vs Altura.....	72
Figura 81. Enclosure volumen de control de simulaciones realizadas.....	73
Figura 82. Convergencia de resultados.....	75

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Estudio variación de cuerda. ....	33
Tabla 2. Estudio variación de ángulo.....	35
Tabla 3. Comparativa presiones y velocidades con la introducción del flap Gurney 2%. ....	38
Tabla 4. Estudio incorporación flap Gurney. ....	39
Tabla 5. Estudio de los diferentes diseños de derivas laterales.....	42
Tabla 6. Configuración aerodinámica del alerón. ....	43
Tabla 7. Comportamiento del alerón a distintas velocidades.....	45
Tabla 8. Especificaciones túnel de viento. ....	47
Tabla 9. Ensayo 1: Variación de velocidad. ....	55
Tabla 10. Ensayo 2: Variación de ángulo.....	56
Tabla 11. Actividades del proyecto. ....	58
Tabla 12. Presupuesto del proyecto.....	62
Tabla 13. Emisiones totales de CO <sub>2</sub> . ....	63
Tabla 14. Demostración relación de aspecto. ....	68
Tabla 15. Demostración efecto suelo.....	69
Tabla 16. Influencia del tamaño en el volumen de control. ....	73
Tabla 17. Nº de elementos y precisión de mallado.....	74
Tabla 18. Iteraciones finales de simulaciones.....	74

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de la automoción la aerodinámica siempre ha sido un factor clave a la hora de realizar un diseño, y es por ello que a lo largo del tiempo se ha destinado una gran cantidad de recursos y tiempo en el estudio de esta.

Hace unos años era impensable que mediante un programa computacional se pudiera simular hasta el más mínimo detalle la aerodinámica de un elemento, pero hoy en día ese hecho es una realidad y es lo que se pretende demostrar en este trabajo. Para ello, se hará el diseño y el estudio aerodinámicos de un alerón trasero para más tarde verificar todos estos resultados mediante la experimentación en un túnel de viento. También se hará uso de una tecnología la cual cada vez está más implantada en todos los sectores, la impresión 3D, y se verá el gran potencial de esta.

Para obtener la configuración aerodinámica del alerón se hará un análisis de diferentes factores los cuales afectan al comportamiento de este, como pueden ser el tipo de perfil seleccionado y su ángulo de ataque o la incorporación de un flap Gurney.

### 1.1 MOTIVACIÓN

La motivación para la realización de este proyecto viene dada por el interés y afición por los coches desde la infancia, sobre todo en el aspecto del diseño, haciendo todo un sueño el poder trabajar en un futuro diseñando elementos aerodinámicos para coches deportivos.

### 1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO

El primer objetivo del presente proyecto es realizar el diseño de los componentes aerodinámicos de un alerón para un coche deportivo, escogiendo la opción óptima dentro de las diferentes comparativas para así poder obtener un alerón eficiente y a su vez mejorar la aerodinámica del vehículo. También se tiene el propósito de demostrar la gran utilidad de la impresión 3D y de los túneles de viento a la hora de realizar un diseño.



Como no pretende ser un alerón de competición sino para un modelo a poder utilizar en calle, el alerón deberá de cumplir cuatro condiciones para que pueda circular en España (artículo 8.50 del Manual de Reformas del Vehículo):

1. El ancho del alerón no puede ser mayor que el del coche.
2. No puede haber cantos ni perfiles cortantes.
3. No puede impedir la visión de la tercera luz de freno.
4. No contener elementos metálicos.

Para la primera condición, se ha tomado de referencia el ancho de un Nissan GT-R (1895mm).



FIGURA 1. NISSAN GT-R. (FUENTE:NISSAN) [1]

### 1.3 REQUERIMIENTOS PREVIOS

Para la realización del proyecto se han requerido conocimientos sobre mecánica de fluidos principalmente, pero también sobre el uso de programas CAD y CFD, en este caso, SolidWorks para la parte de diseño 3D y Ansys para las simulaciones de fluidos.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 INTRODUCCIÓN A LA AERODINÁMICA

La aerodinámica es la sección de mecánica de fluidos encargada de analizar y estudiar las acciones que aparecen en cuerpos sólidos cuando hay un movimiento relativo entre estos y el fluido que lo envuelve, siendo en este caso un gas como es el aire.

Dentro de este ramal de la mecánica de fluidos se pueden hacer varias clasificaciones:

1. Según su campo de aplicación estaría la aerodinámica aeronáutica, la cual se encarga del estudio de aparatos voladores, y la aerodinámica civil, en la cual se encontrarían los sectores de la automoción, la náutica y la construcción.
2. Según la compresibilidad del fluido, pudiendo este ser incompresible (el cual mantiene su densidad constante, suelen ser líquidos) o compresible (pudiendo variar la densidad, principalmente gases).
3. Según la velocidad que lleva el fluido respecto a la velocidad del sonido, es decir, teniendo en cuenta el número de Mach. Este número adimensional, el cual surge del cociente entre la velocidad del fluido y la velocidad del sonido, hace que un problema aerodinámico se pueda clasificar de la siguiente forma:
  - Subsónico, cuando el número de Mach es menor a 1.
  - Transónico, cuando es cercano a 1.
  - Supersónico, cuando es algo superior a 1.
  - Hipersónico, cuando es mayor a 6.

### 2.1.1 TEOREMA DE BERNOULLI

Este principio se puede resumir en el aumento de la presión de un fluido cuando se produce una disminución de la velocidad. Esta afirmación se hace bajo la condición de un flujo ideal, sin esfuerzos de viscosidad ni rozamiento, por lo cual la energía que posee dicho fluido permanece constante.

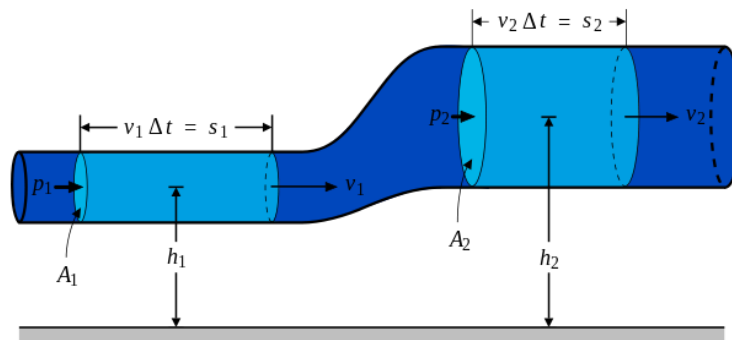


FIGURA 2. PRINCIPIO DE BERNOULLI. (FUENTE: WIKIPEDIA ) [2]

Teniendo en cuenta el fluido como estacionario e incompresible, como es el caso de este estudio, dicho proceso queda descrito por la siguiente ecuación:

$$\frac{U^2 \cdot \rho}{2} + P + \rho gh = cte. \quad (\text{Ec. 2.1.1})$$

Analizando dicha fórmula se puede observar que, si la altura y la densidad se mantienen constantes, como sería el caso de las condiciones en las que normalmente circula un coche, la velocidad depende inversa y únicamente de la presión.

### 2.1.2 EFECTO COANDĂ

Este efecto es uno de los más importantes de la aerodinámica actual ya que permite explicar la razón por la cual un alerón crea una carga aerodinámica. Su explicación reside en la viscosidad del fluido, ya que éste, al encontrarse con un sólido en su camino como podría ser un perfil alar, sigue el contorno y se mantiene pegado a la superficie de dicho perfil, haciendo así que, al redirigir la dirección del fluido, y mediante el principio de acción-reacción (3ª Ley de Newton), se genere la fuerza en sentido opuesto al que circula el viento.



FIGURA 3. EFECTO COANDĂ EN UNA CUCHARA. (FUENTE: WIKIPEDIA) [3]

### 2.1.3 EFECTO VENTURI

Apoyándose en el teorema de Bernoulli y el principio de continuidad, este efecto explica porque la velocidad de un fluido aumenta cuando se disminuye la sección por la cual circula ya que, al mantenerse el caudal constante durante todo el recorrido, una disminución de la sección obliga al fluido a aumentar su velocidad para mantener esta continuidad. Además, tal y como se ha visto anteriormente, un aumento de la velocidad del fluido provoca una caída de la presión de este, por lo tanto, en un estrechamiento se obtendría un flujo a bajas presiones y altas velocidades.

Dicho efecto se ve reflejado en las siguientes ecuaciones:

$$\dot{m} = cte \rightarrow \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (\text{Ec. 2.1.3.1})$$

$$\rho_1 \cdot u_1 \cdot S_1 = \rho_2 \cdot u_2 \cdot S_2 \quad (\text{Ec. 2.1.3.2})$$

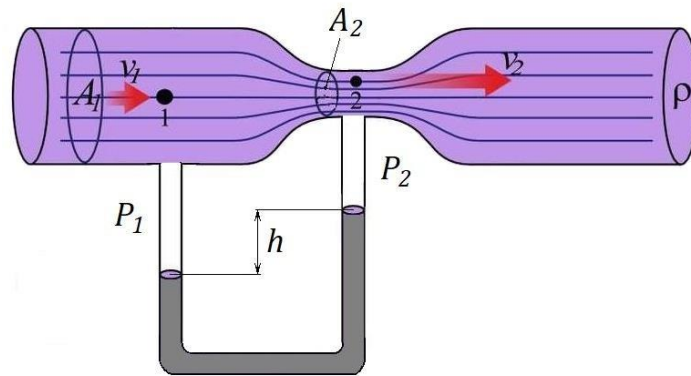


FIGURA 4. TUBO VENTURI. (FUENTE: RESEARCHGATE) [4]

#### 2.1.4 CAPA LÍMITE Y NÚMEROS ADIMENSIONALES

Cuando un flujo a velocidad constante es perturbado por un cuerpo sólido, debido a la viscosidad de éste aparecen unas fuerzas de rozamiento entre la superficie del cuerpo y las capas más próximas del fluido. Este hecho hace que en las capas de fluido más próximas a la superficie se llegue a reducir la velocidad a 0. A medida que las capas están más alejadas de la superficie, este fenómeno desaparece y el fluido conserva su velocidad inicial, formando así un gradiente de velocidades entre la capa más próxima y la primera en la que se mantiene la velocidad inicial. La zona que engloba dicho gradiente es la conocida capa límite, y juega un papel fundamental en la aerodinámica.

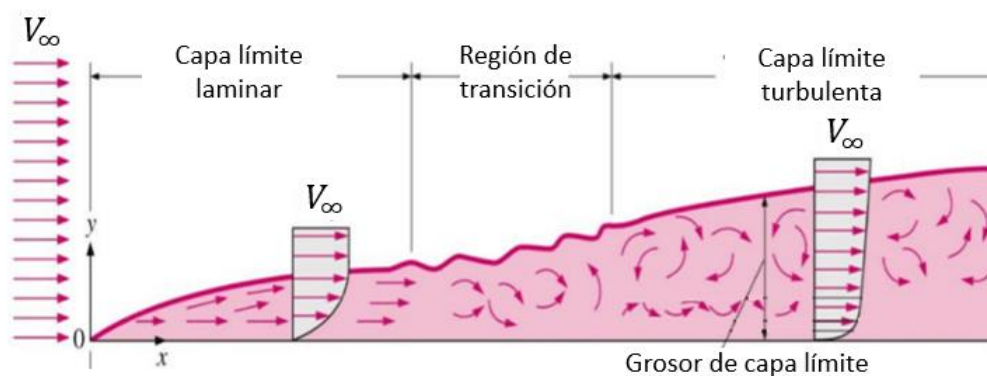


FIGURA 5. CAPA LÍMITE. (FUENTE: YUNUS A. CENGL) [5]

Como se puede apreciar en la imagen, se distinguen tres zonas: la capa límite laminar, donde el fluido circula ordenadamente evitando el contacto con la superficie del cuerpo, la capa límite

turbulenta, donde el fluido avanza de forma desorganizada pero con mayor energía que en la fase anterior, y por último una etapa de transición entre estas dos fases.

El hecho de que en la zona turbulenta se tenga una mayor energía permite contrarrestar el desprendimiento del flujo de la superficie del cuerpo que se puede llegar a producir, haciendo así que esta fase, que a primera vista pareciera la más contraproducente, llegue a ser todo lo contrario, ya que un desprendimiento provocaría un aumento considerable de la resistencia y una pérdida de carga aerodinámica. Además, para ciertos elementos dicho régimen también es beneficioso ya que al poseer mayor energía permite disipar más calor.

Para saber en que etapa se encuentra la capa límite, aparece el primer número adimensional, el número de Reynolds. Dicho número relaciona la densidad, viscosidad y velocidad del fluido con la longitud característica del sólido de la siguiente manera:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu} \quad (\text{Ec. 2.1.4.1})$$

De tal forma que para valores contenidos entre  $10^3$  y  $10^6$  el flujo se encontraría en régimen laminar, y para valores superiores a  $10^6$  en régimen turbulento.

El siguiente número adimensional sería el número de Froude, el cual relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas de gravedad que afectan al fluido.

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (\text{Ec. 2.1.4.2})$$

Siendo  $g$  la aceleración de la gravedad. Este número puede adoptar tres valores:

- Inferior a 1, el cual indica que el flujo es subcrítico y las fuerzas inerciales son menores que las gravitacionales.
- Igual a 1, denominado crítico, donde ambas fuerzas están igualadas.
- Superior a 1, siendo el flujo supercrítico y con mayor presencia de fuerzas inerciales.

Otro número adimensional, ya mencionado, es el número de Mach.

$$Ma = \frac{u}{u_{\text{sonido}}} \quad (\text{Ec. 2.1.4.3})$$

Como se ha comentado en la introducción, sirve para hacer una clasificación de diversos problemas aerodinámicos, pero también está relacionado con la división anterior ya que, para números de Mach que no superen el valor de 0.3, el flujo se considerará incompresible y por lo tanto su densidad se mantendrá constante. En el caso de que fuera mayor a este valor, se deberían considerar los efectos de compresibilidad en la realización de cálculos.

### 2.1.5 FUERZAS Y COEFICIENTES AERODINÁMICOS

Cuando un sólido se interpone en la trayectoria de un fluido, se pueden llegar a generar dos fuerzas: la fuerza de resistencia o *drag*, la cual aparece en todo tipo de cuerpos debido a la oposición al movimiento del fluido, y una segunda fuerza la cual aparece cuando el flujo se ve redirigido por la geometría del cuerpo. Esta segunda fuerza, apoyándose en el efecto Coandă, tendrá la misma dirección pero sentido opuesto a la fuerza ejercida por el fluido al cambiar la trayectoria.

Aplicando esta teoría a un perfil alar, la segunda fuerza se conoce como fuerza de sustentación o *lift*, en el caso de tener sentido ascendente, o *downforce* en caso de sentido descendente.

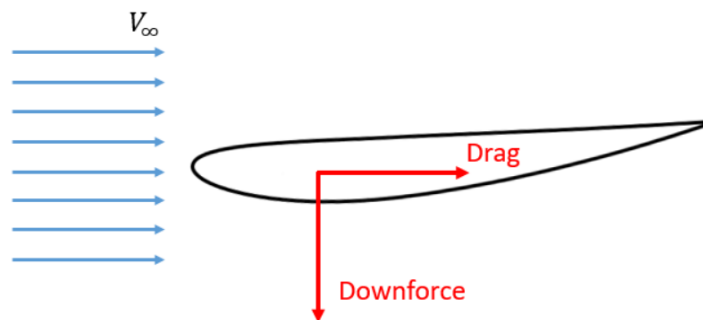


FIGURA 6. FUERZAS GENERADAS EN UN PERFIL. (FUENTE: AERODINÁMICA F1) [6]

Dicha fuerza en la aviación, que sería el caso de *lift*, se utiliza para contrarrestar el peso del vehículo y así poder volar. En automoción, en cambio, se utiliza el *downforce* para mantener el coche lo más pegado al suelo y así tener una mayor adherencia.

En cuanto a la fuerza de resistencia, se puede hacer una división en cuanto a su composición: por un lado se encontraría la resistencia generada a raíz de la diferencia de presiones que puede llegar a producir un perfil alar, por otro, la resistencia que surge de la fricción que tiene lugar entre el fluido y la superficie del cuerpo.

A la hora de realizar estudios aerodinámicos, estas dos fuerzas quedan parametrizadas de forma adimensional mediante los coeficientes de *lift* y de *drag*.

$$C_L = \frac{2 \cdot F_L}{u^2 \cdot \rho \cdot A} \quad (\text{Ec. 2.1.5.1})$$

$$C_D = \frac{2 \cdot F_D}{u^2 \cdot \rho \cdot A} \quad (\text{Ec. 2.1.5.2})$$

Son dos fórmulas sencillas pero hay que tener en cuenta que el área variará según el cuerpo estudiado:

- Se utilizará el área frontal para la mayoría de los casos, como pueden ser esferas, coches, cilindros, misiles, etc.
- Se empleará el área de planta solo para cuerpos anchos y estilizados, teniendo de ejemplo un perfil alar.
- Finalmente, se hará uso del área mojada en el caso de embarcaciones.

Ambos coeficientes se pueden relacionar entre sí, dando lugar a lo que se conoce como eficiencia aerodinámica o fineza.

$$f = \frac{C_L}{C_D} = \frac{F_L}{F_D} \quad (\text{Ec. 2.1.5.3})$$

La función de este es maximizar la sustentación o carga aerodinámica minimizando la resistencia, sirviendo como indicador de la eficiencia del cuerpo.



## 2.2 AERODINÁMICA DE UN ALERÓN

### 2.2.1 ORIGEN

Si bien es cierto que diseñadores e ingenieros fueron experimentando con la forma de los coches desde su invento para hacerlos cada vez más aerodinámicos, no fue hasta el año 1955 cuando se intentó montar el primer alerón en un Porsche Spyder por parte de un ingeniero suizo, Michael May. Dicho alerón estaba situado en el centro de gravedad del coche y se podía inclinar entre  $-3^\circ$  y  $17^\circ$ , pero este no pudo ser probado ya que su uso fue prohibido en la competición que iba a participar.



FIGURA 7. PORSCHE SPYDER DE MICHAEL MAY. (FUENTE: DRIVETRIBE) [7]

A medida que se fueron introduciendo otras mejoras, tales como el diseño más afilados para así reducir la resistencia de avance, o la mejora de motores, neumáticos y suspensión, se fueron incrementando las velocidades que alcanzaban los vehículos tanto en recta como en curva. Este hecho traía consigo un problema, y es que al aumentar la velocidad, y sobre todo en curvas, el coche llegaba a perder adherencia y por tanto rendimiento debido a la falta de elementos que aportasen carga aerodinámica. A raíz de este problema, ingenieros empezaron a experimentar con alerones llegando a la conclusión de que, a pesar de perder velocidad punta debido a la resistencia extra que presentaba dicho elemento, la carga aerodinámica que este generaba permitía un mayor agarre, y por tanto, una mayor velocidad en las curvas, haciendo así que los tiempos por vuelta se redujeran.

El año 1965, Jim Hall, inspirándose en las alas de avión las cuales generaban la suficiente fuerza como para levantar tanto peso, le dio la vuelta al concepto, montando así en su Chaparral un

alerón y pasando a ser conocido como el primer coche en correr con él. Dicho alerón era capaz de variar el ángulo mediante un pedal, haciendo así que en rectas se generase la mínima resistencia posible y en curvas se aprovechara al máximo el elemento aerodinámico.



FIGURA 8. CHAPARRAL 2F. (FUENTE: AUTOLEGENDS) [8]

Otro gran avance en la aerodinámica de competición fue la introducción, a finales de la década de los 70, del llamado efecto suelo por parte de Peter Wright, un ingeniero que trabajaba para la marca Lotus en Fórmula 1. No obstante, el concepto ya se había llevado a cabo antes, en 1930, donde una patente redactaba que un alerón generaba mayor carga aerodinámica cuando este se encontraba cerca del suelo. Este efecto se debe a que, al reducir el paso de flujo por debajo del alerón, la velocidad de este aumenta, creando así un diferencial de presiones mayor y a su vez generando una mayor carga aerodinámica.

A partir de estos sucesos, los alerones se fueron implementando y experimentando en automóviles de competición, sirviendo como ratas de laboratorio para así después poder aplicar los conocimientos a coches no destinados a correr.

### 2.2.2 ELEMENTO PRINCIPAL: PERFIL ALAR

El principal componente de un alerón es el perfil alar y es el elemento que se encarga de generar la carga aerodinámica buscada. Dicho elemento se puede dividir en varias secciones tal y como se ve a continuación:

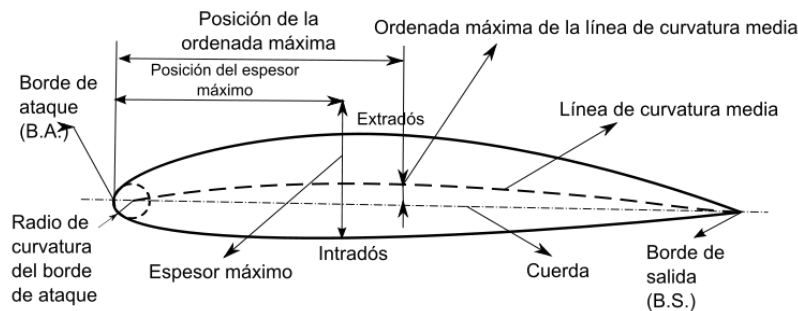


FIGURA 9. PARTES Y REGIONES DE UN PERFIL ALAR. (FUENTE: WIKIWAND) [9]

Para acabar con las secciones del perfil, se debe añadir el concepto de envergadura, el cual hace referencia a la prolongación del perfil alar en el eje Z si se considerara el croquis anterior en el plano XY.

A raíz del número de perfiles alares que forman el alerón se puede hacer la siguiente división:

- Alerón simple. Dicho alerón consta solamente de un perfil, haciendo así que este tenga que generar toda la carga aerodinámica buscada. Este, comparado con el que se expondrá a continuación, genera menos carga y resistencia aerodinámica pero a su vez el estudio para el diseño es más sencillo.
- Alerón multielementos. Esta variante consta de varios perfiles, aumentando así la superficie del alerón, y por consiguiente, la carga aerodinámica generada. Este extra de carga hace que estos alerones, en su mayoría, se utilicen para competición, como es el caso de la Fórmula 1. Además, el estudio realizado para el diseño de estos es más laborioso y costoso ya que las variables de diseño se multiplican, convirtiéndolo en una opción menos viable que el caso anterior para automóviles de calle.



FIGURA 10. ALERÓN MULTIELEMENTOS EN FÓRMULA 1. (FUENTE: MOTORSPORT) [10]

A la hora de diseñar un alerón simple, el cual es objeto de este proyecto, hay cuatro parámetros fundamentales a tener en cuenta para la configuración del ala:

1. Perfil seleccionado. Ante la gran variedad de perfiles existentes en la actualidad, y ante la presencia de un solo perfil, se puede tener dos criterios a la hora de la selección: en el primero, se buscaría la máxima carga aerodinámica dejando en un segundo plano la resistencia generada, y en el segundo, se trataría de buscar la mayor eficiencia posible, balanceando tanto carga aerodinámica como resistencia de avance.
2. Cuerda del perfil. Cuanto más grande sea esta, más superficie tendrá el perfil y por tanto mayor carga aerodinámica generará este, pero a su vez la resistencia también se verá incrementada.
3. Ángulo de ataque. Dicho ángulo es el que se forma entre la dirección del fluido y la cuerda del perfil. Este factor influye directamente, junto al número de Reynolds, en los coeficientes de sustentación y de resistencia. En el caso del primero, el aumento del ángulo conllevará un aumento del coeficiente, hasta cierto punto en el cual el ala entrará en pérdida debido a la separación del flujo de la superficie inferior del ala. Los perfiles asimétricos, respecto a los simétricos, obtienen mejores coeficientes pero llegan anticipadamente al ángulo de pérdida.

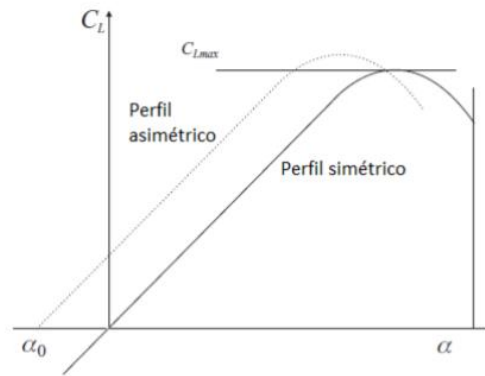


FIGURA 11. SIMETRÍA Y COEFICIENTES DE SUSTENTACIÓN DE UN PERFIL. (FUENTE: FERNANDO SEBASTIÁN RODAS IBÁÑEZ) [11]

El comportamiento del coeficiente de resistencia está relacionado con este ángulo a partir del cual se entra en pérdida ya que, a medida que el ángulo crece, lo hace la resistencia consigo, pero a partir de dicho ángulo este valor se dispara y por consiguiente rebasarlo es un inconveniente a la hora del diseño del alerón.

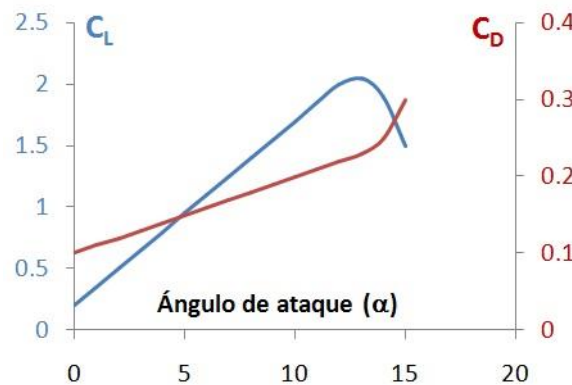


FIGURA 12. COEFICIENTE DE RESISTENCIA RESPECTO ÁNGULO DE ATAQUE. (FUENTE: LOS SECRETOS DE LA FÓRMULA 1) [12]

4. Envergadura. En este apartado aparece el concepto de relación de aspecto, la cual es la relación entre la envergadura y la cuerda del perfil. Una relación de aspecto alta es sinónimo de eficiencia, haciendo que las alas de aviones tengan eficiencias muy superiores a las que se pueden encontrar en un alerón de coche.

$$AR = \frac{\text{envergadura}^2}{\text{área}} = \frac{\text{envergadura}}{\text{cuerda}}$$

### 2.2.3 ELEMENTOS SECUNDARIOS: DERIVAS LATERALES Y FLAP GURNEY

Las derivas laterales, también conocidas como *endplates*, van fijadas a cada lado del perfil y tienen una función muy importante ya que reducen e incluso pueden llegar a evitar la generación de vórtices en los extremos de perfil. Estos vórtices tienden a generarse debido a la diferencia de presiones creada entre el extradós y el intradós puesto que el aire a alta presión intenta escapar a la zona de baja presión. Como se ha comentado, es un elemento a tener en cuenta ya que pueden llegar a incrementar el valor de la carga aerodinámica hasta un 30%. Además de su función aerodinámica, en muchos casos sirven como soporte para el ala principal.

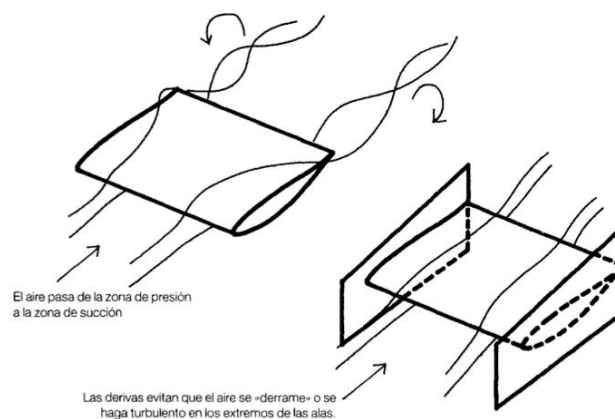


FIGURA 13. FUNCIÓN DE LAS DERIVAS LATERALES. (FUENTE: D. DEREK SOLA MIRALLES) [13]

Otro elemento a destacar es el perfil o flap Gurney. Dicho componente trata de un perfil en forma de ángulo recto el cual se sitúa en el borde de salida del perfil principal. Su función, explicada otra vez gracias al efecto Coandă y gracias a los dos vórtices que genera tras él, es desviar el flujo de aire hacia arriba a la salida del perfil, o en su defecto, hacer que el flujo de aire se mantenga más cercano al intradós de perfil, añadiendo así carga aerodinámica sin prácticamente aumentar la resistencia. Al ser una pieza la cual normalmente es independiente al alerón, es de fácil montaje, dando juego a la variación del tamaño de éste para buscar la configuración óptima. Para sacar el mayor rendimiento a este elemento, han de ser bastante pequeños, haciendo que no superen de altura el 5% de la cuerda del perfil.

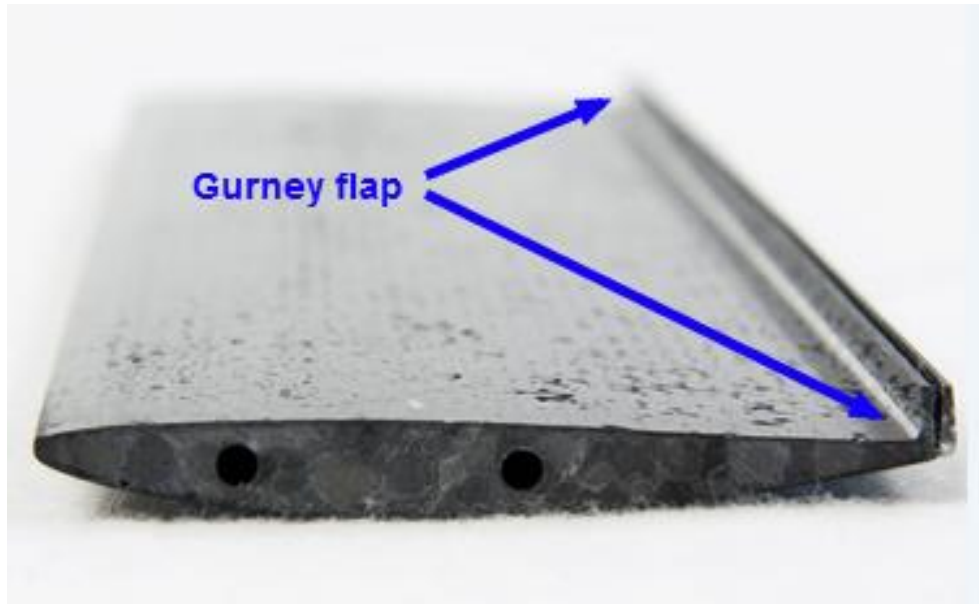


FIGURA 14. FLAP GURNEY. (FUENTE: GRAINING) [14]

### 3. DISEÑO 3D DEL ALERÓN MEDIANTE SOFTWARE CAD

#### 3.1 INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE CAD

Un software CAD se trata de una herramienta que, gracias al uso de un ordenador, permite crear, modificar y analizar modelos y planos tanto en dos como en tres dimensiones.

Su origen se remonta a los años 50, donde el ejército estadounidense desarrolló los primeros trazadores gráficos. A su vez, el MIT acabaría presentando el primer software CAD, el cual daba la posibilidad de dibujar a partir de puntos. No fue hasta los años 60 que este tipo de programas se implantaron en las industrias, como por ejemplo en General Motors. Finalmente en los años 70, debido a la evolución y la accesibilidad de particulares y no solo empresas a ordenadores, se extendió el uso de estos programas.

Dentro de esta clase de softwares se puede hacer la siguiente división:

- 2D. Son aquellos los cuales están ideados para trabajar únicamente en dos dimensiones, haciéndolos más sencillos de usar pero a su vez con menos utilidades.
- 2D-3D. Normalmente se utilizar para trabajar en dos dimensiones, pero ofrecen la posibilidad de diseñar en tres dimensiones, aunque de forma limitada.
- 3D básico. Estos programas están diseñados para trabajar en tres dimensiones directamente y están diseñados para un usuario medio, de forma que la interfaz sea intuitiva y fácil de emplear.
- 3D avanzado. Dicho software suele encontrarse en puestos de trabajo debido a su complejidad y a las exigencias requeridas para poder trabajar con él, haciendo necesario un ordenador con grandes prestaciones.

El paso del dibujo en papel al uso este tipo de software trajo consigo una gran cantidad de ventajas, entre las cuales destacan:



- Aumento de la productividad debido a un aumento de la velocidad en el diseño y la posibilidad de una corrección o modificación sencilla e inmediata de cualquier elemento.
- Mayor precisión y calidad de los productos diseñados.
- Sencillez respecto al uso de herramientas del dibujo clásico.
- Representación en 3D que permite una mejor observación del elemento.
- Reducción de costes gracias al aumento de la productividad.

## 3.2 MODELADO DEL ALERÓN

Para la realización del diseño del alerón se ha hecho uso del programa de CAD SolidWorks, el cual permite modelar elementos tanto en 2D como 3D y elaborar planos a raíz de estos. Este programa también es capaz de realizar simulaciones estructurales y aerodinámicas, pero en estos campos hay softwares que destacan más que este y es por ello que solamente se utilizará para la creación de los componentes del alerón en 3D.

### 3.2.1 PERFIL ALAR

El perfil elegido para el diseño del alerón es el Eppler 423, el cual se ha modelado a partir de una base de datos que proporcionaba las coordenadas de la curva que conforma el perfil.

Lo primero a realizar ha sido la introducción de dicha curva a SolidWorks mediante un archivo de texto con todas las coordenadas.

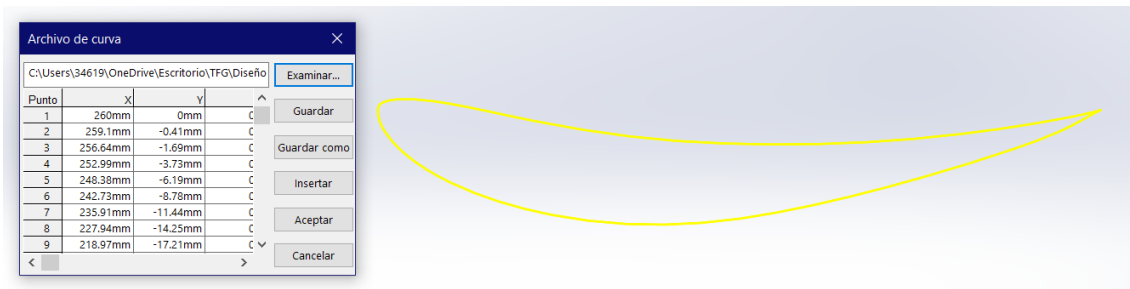


FIGURA 15. CREACIÓN DE LA CURVA DEL PERFIL ALAR.

Una vez realizado esto, mediante la función convertir entidades, se ha trasladado la curva a un plano y a partir de este se ha realizado la extrusión del perfil.

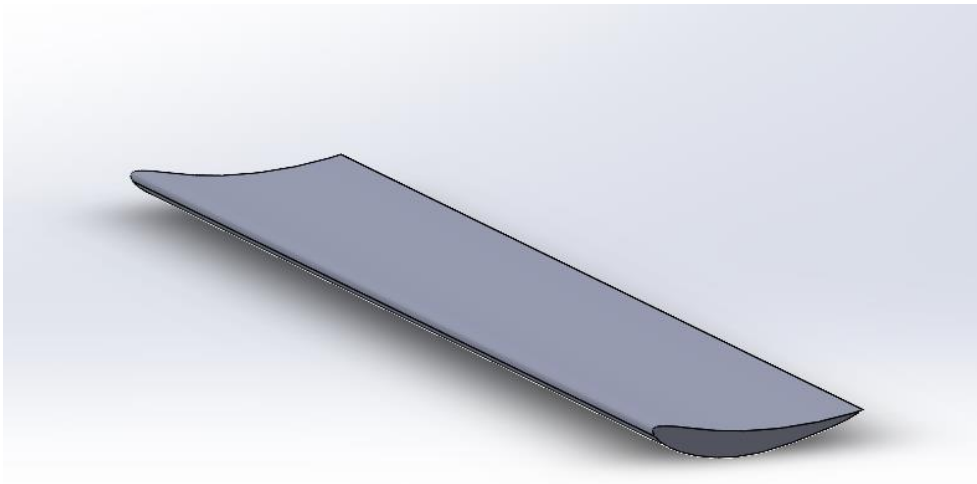


FIGURA 16. PERFIL 3D.

Finalmente se introduce el flap Gurney el cual formará un ángulo de  $90^\circ$  con la cuerda del perfil.

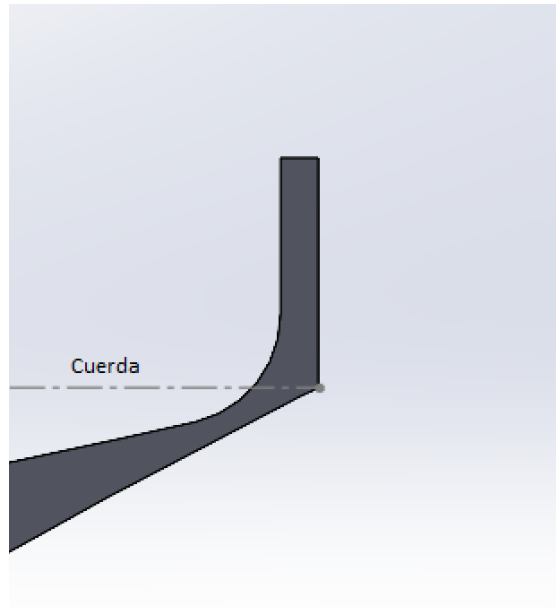


FIGURA 17. POSICIÓN FLAP GURNEY.

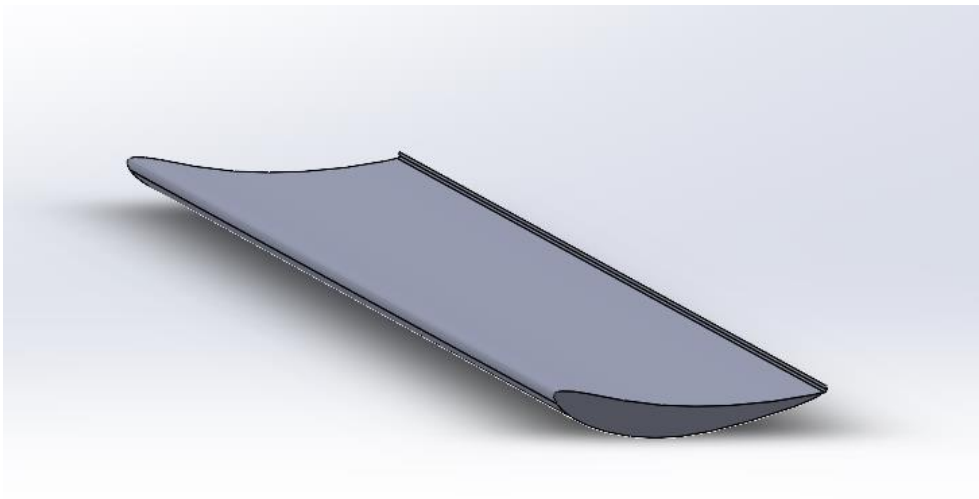


FIGURA 18. PERFIL 3D CON FLAP GURNEY.

### 3.2.2 DERIVAS LATERALES

Para el diseño de éstas la única condición que se ha tenido en cuenta ha sido que no podía tener ningún perfil cortante y por ello se han redondeado todos los bordes.

El primer paso ha sido el diseño del croquis en 2D y un posterior extruido de 7.5 mm de espesor.

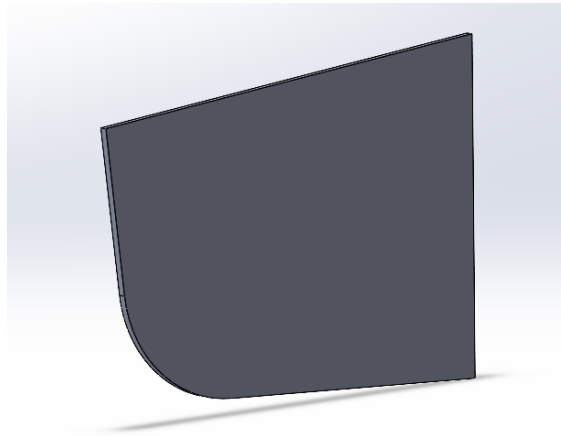


FIGURA 19. DERIVA LATERAL SIN REDONDEOS.

El siguiente y último proceso ha consistido en eliminar todos los cantos existentes para cumplir la condición inicial. Para ello se ha hecho uso de la función redondeo, quedando la deriva lateral sin vértices ni aristas cortantes.

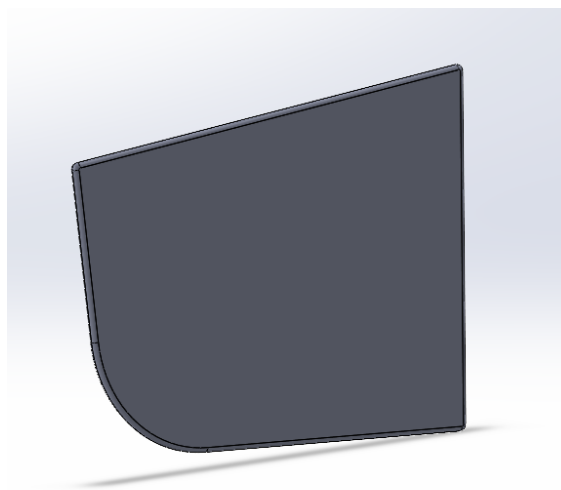


FIGURA 20. DERIVA LATERAL CON REDONDEOS.

### 3.2.3 SOPORTE

El soporte diseñado es un prototipo el cual ha servido para ver un comportamiento más real del alerón. Para un diseño final se tendría que fijar el coche al cual iría acoplado para así adaptar la base de este. El diseño de este se ha realizado de tal forma que sujete una gran parte del perfil y con formas triangulares para una buena distribución de cargas.

El primer paso a realizar es un croquis en 2D teniendo el perfil como referencia para así seguir su curvatura y teniendo en cuenta que el ángulo de ataque de este en la configuración final del alerón será de  $10^{\circ}$ .

Para acabar con el modelado de este, se extruye el croquis 2D y se le da un espesor de 1 cm.

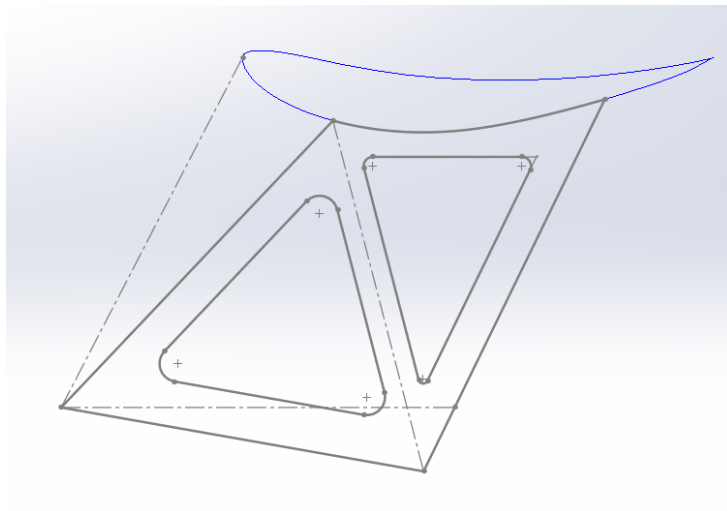


FIGURA 21. CROQUIS 2D DEL SOPORTE.

## 4. ESTUDIO AERODINÁMICO MEDIANTE SOFTWARE CFD

### 4.1 INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE CFD

El CFD es un software el cual permite analizar y resolver de forma numérica las ecuaciones que describen el comportamiento de un fluido cuando interacciona con un cuerpo.

Las ecuaciones implicadas son tan complejas que no se pueden resolver de forma analítica, y esto da a lugar a que los resultados obtenidos sean solo aproximaciones y no valores reales. El uso de este tipo de programas es complejo debido a que es necesario tiempo de aprendizaje para tener buen criterio y saber interpretar los resultados, además de aplicar las simplificaciones adecuadas ya que sin estas el tiempo de cálculo se podría extender días e incluso semanas.

A pesar de la complejidad de estos programas, gracias a ellos se pueden realizar simulaciones de forma más económica ya que se puede evitar la construcción de la mayoría de prototipos y modelos.

#### 4.1.1 ECUACIONES IMPLICADAS

1. Ecuación de conservación de la masa. Esta expresa que la cantidad de masa que pasa por la superficie de entrada de un volumen tiene que ser la misma que la masa que pasa por la superficie de salida.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (\text{Ec. 4.1.1.1})$$

Al considerarse el flujo incompresible, la densidad se mantiene constante y por lo tanto el primer término es 0.

2. Ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento. En estas ecuaciones se explica que el incremento en el momento de una partícula fluida es igual al total de fuerzas que se aplican sobre esta, las cuales corresponden a las generadas por el diferencial de presiones, la gravedad y el rozamiento. Son ecuaciones en tres dimensiones bastante complejas lo que hace que solo se puedan resolver de forma numérica. También son conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes.

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} = -\nabla P + \rho f_v + \mu \Delta U \quad (\text{Ec. 4.1.1.2})$$

3. Ecuación de conservación de la energía. Dicha ecuación no necesita ser planteada cuando se dispone de un régimen subsónico ya que las variables están disgregadas de las ecuaciones anteriores. Esta ecuación se obtiene de la primera Ley de la Termodinámica.

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} = -P \nabla U + \left[ \frac{\partial U_\tau}{\partial x} + \frac{\partial U_\tau}{\partial y} + \frac{\partial U_\tau}{\partial z} \right] + \nabla \cdot (k \nabla T) + E_s \quad (\text{Ec. 4.1.1.3})$$

#### 4.1.2 RESOLUCIÓN DE ECUACIONES

Para la resolución de las ecuaciones anteriormente mencionadas, las cuales constan de una alta complejidad, aparecen tres técnicas.

##### 4.1.2.1 DIRECT NUMERICAL SIMULATION (DNS)

En esta técnica se procede a la resolución de las ecuaciones para todo el rango de turbulencia. Esto hace que este método sea el más preciso, lo cual implica una gran cantidad de recursos computacionales, haciendo que solo se pueda llevar a cabo en lugares específicos.

##### 4.1.2.2 LARGE EDDY SIMULATION (LES)

Esta variante gasta menos recursos computacionales que la anterior, resolviendo solo las escalas más grandes de turbulencia de igual manera que en el DNS, mientras que las pequeñas se aproximan mediante relaciones a los sucesos ocurridos en las grandes, y por lo tanto, no se hace un cálculo directo sobre estas.

#### 4.1.2.3 REYNOLDS AVERAGED NAVIER-STOKES (RANS)

Esta tercera técnica es la más utilizada dentro de los software CFD debido a su bajo coste computacional respecto las anteriores mencionadas. Para conseguir esto, este método basa sus resultados en el flujo medio, descomponiendo las variables en una variable media y otra pulsante (descomposición de Reynolds) y adaptándolas a las ecuaciones de Navier-Stokes.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \cdot \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (\text{Ec. 4.1.2.3.1})$$

Dicha ecuación se diferencia únicamente en el último término de la original de Navier-Stokes. Este elemento se trata del tensor de esfuerzos de Reynolds, el cual expresa la transferencia de momento debido a las fluctuaciones turbulentas. A raíz de esto, se ven implicadas un total de cuatro ecuaciones, tres de cantidad de movimiento y una de continuidad.

Debido a que este tensor se trata también de una incógnita, es necesario recurrir a otro modelo el cual permita cerrar el sistema de ecuaciones. A partir de esta premisa, aparece la hipótesis de Boussinesq, la cual relaciona los esfuerzos turbulentos con el flujo medio.

$$R_{ij} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (\text{Ec. 4.1.2.3.2})$$

Donde  $k$  es la energía cinética turbulenta,  $\delta_{ij}$  el delta de Kronecker,  $S_{ij}$  el gradiente de velocidades media y  $\mu_t$  la viscosidad turbulenta.

$$k = \frac{1}{2} \cdot \overline{u'_i \cdot u'_j} \quad (\text{Ec. 4.1.2.3.3})$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{Ec. 4.1.2.3.4})$$

Generalmente estos modelos suelen contener dos ecuaciones, pese haber alguno de hasta siete.

A continuación se expondrán varios modelos, entre los cuales se encuentra el utilizado para los cálculos de este proyecto.



#### 4.1.2.3.1 MODELO SPALART-ALLMARAS

El primero trata de un modelo viscoso lineal el cual resuelve una ecuación para una variable, llamada Spalart-Allmaras, a partir de expresiones algebraicas. Diseñado para aplicaciones aeronáuticas, trabaja con números de Reynolds bajos y un coste computacional mínimo.

#### 4.1.2.3.2 MODELO K-EPSILON

Este modelo ya incluye dos ecuaciones con dos nuevas variables las cuales representarán las propiedades turbulentas del flujo. Para la energía cinética turbulenta aparece la variable  $k$ , y la variable  $\epsilon$  simboliza la tasa de disipación turbulenta, la cual determina la escala de turbulencia.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (\text{Ec. 4.1.2.3.2.1})$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon j} \frac{\epsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon j} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad (\text{Ec. 4.1.2.3.2.2})$$

Ambas ecuaciones tratan de la misma forma a las distintas variables, siguiendo la estructura de las ecuaciones de transporte: un término acumulativo, uno convectivo, otro difusivo y finalmente un término fuente que cierra la ecuación.

Dicho modelo asume que el flujo es totalmente turbulento además de no considerar los efectos de la viscosidad. Es por ello que para tenerlos en cuenta se utilizan varias funciones de pared. Trabaja bien con números altos de Reynolds, pero perdiendo eficiencia cuando aparecen grandes gradientes de presión.

Debido a que el aire suele estar influenciado por otros coches, generando turbulencias al pasar por este, además de las generadas por el propio vehículo, y a causa de las altas velocidades que se llegarán a alcanzar, se ha considerado dicho modelo como el idóneo para las simulaciones.

#### 4.1.2.3.3 MODELO K-OMEGA

Este método se presenta como antagonista del modelo anterior, trabajando mejor a números de Reynolds bajos y cerca de paredes, donde los gradientes de presiones son mayores.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (\text{Ec. 4.1.2.3.3.1})$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (\text{Ec. 4.1.2.3.3.2})$$

Como se puede apreciar, las ecuaciones se estructuran de la misma forma, a diferencia que ahora se introduce la disipación de energía turbulenta como disipación específica ( $\omega$ ).

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k} \quad (\text{Ec. 4.1.2.3.3.3})$$

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \omega = \frac{\varepsilon}{k} \quad (\text{Ec. 4.1.2.3.3.4})$$

#### 4.1.3 PROCEDIMIENTO DE SIMULACIONES EN ANSYS

Para las simulaciones aerodinámicas se ha hecho uso del software Ansys. El primer paso sería cargar la geometría 3D en el programa y crear un volumen de control lo suficientemente grande para que las paredes no influyan en el desarrollo del flujo.

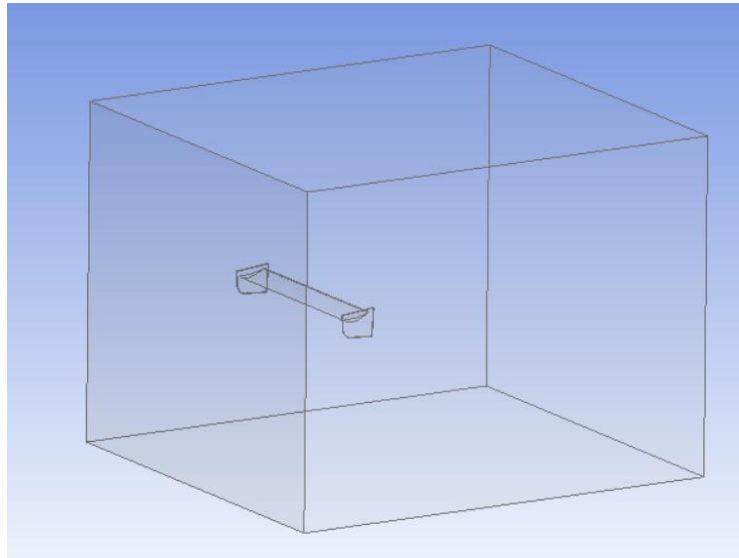


FIGURA 22. VOLUMEN DE CONTROL.

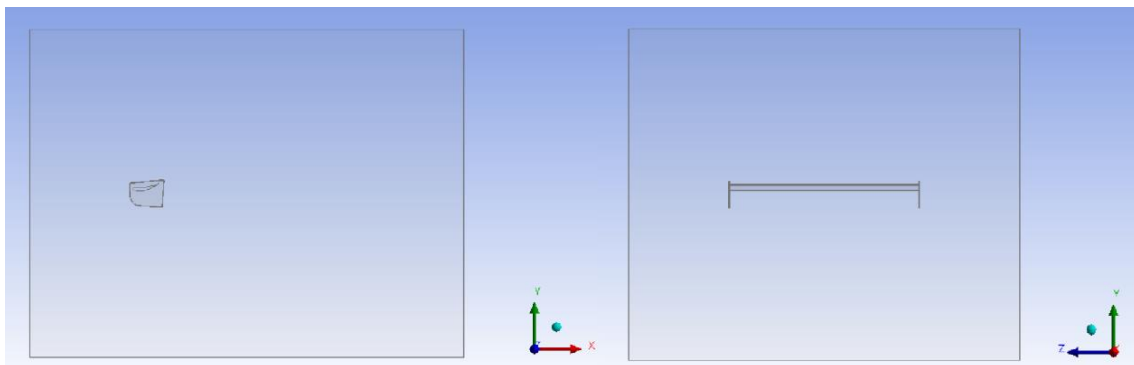


FIGURA 23. VOLUMEN DE CONTROL EN PLANOS XY E YZ.

Una vez definido el volumen de control se pasa al mallado. Debido al uso de una licencia académica del programa, esta se ve limitada a 512.000 elementos, lo cual se ha tenido como referencia en todos los estudios para crear la malla más precisa posible.

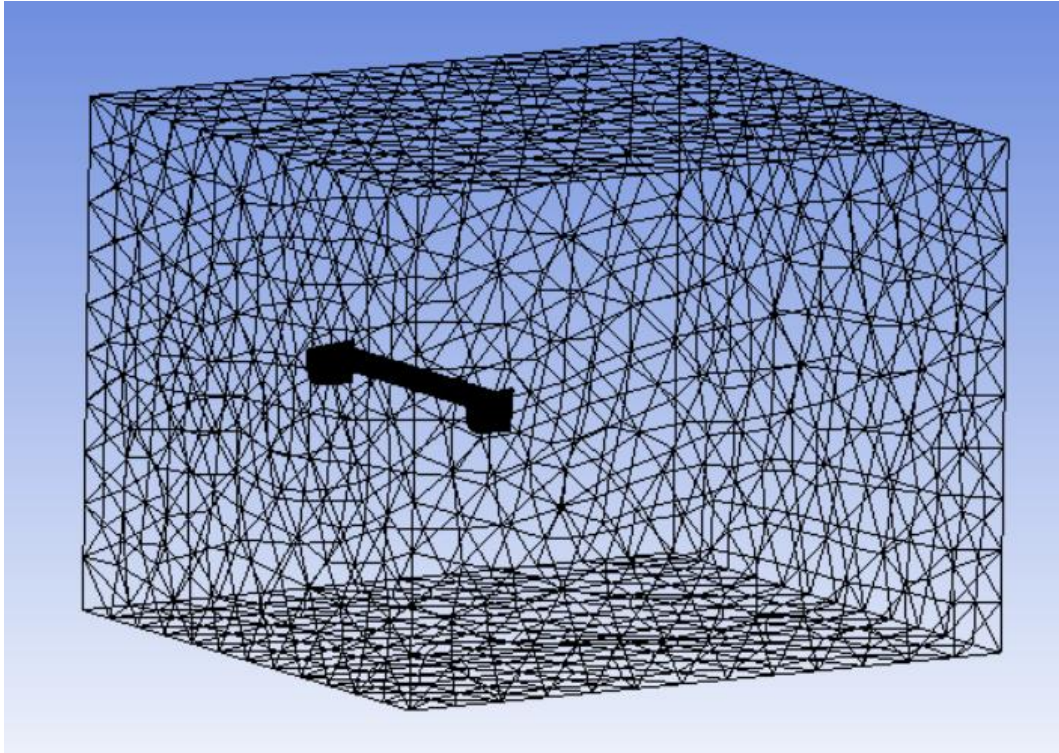


FIGURA 24. MALLADO VOLUMEN DE CONTROL.

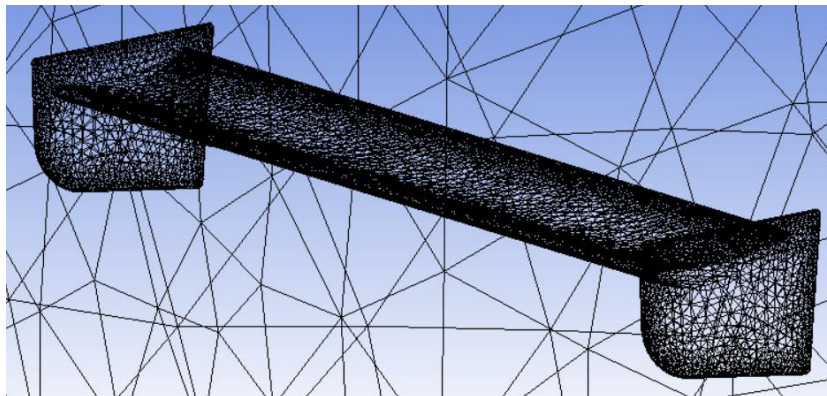


FIGURA 25. MALLADO DEL ALERÓN.

Como se puede apreciar en imágenes, aun teniendo dicha limitación, la malla resultante es de bastante calidad.

Con el mallado ya realizado, se pasan a definir las condiciones que se aplicarán en el ensayo. Lo primero a realizar es definir las condiciones de contorno: entrada (azul) y salida de aire (rojo), y las paredes (gris).

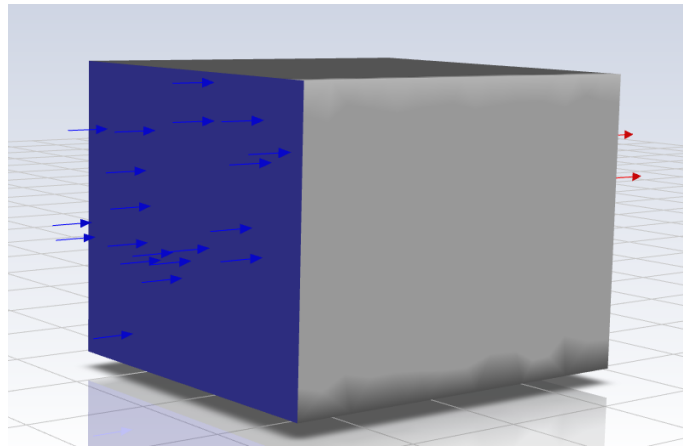


FIGURA 26. ENTRADA DE AIRE O INLET.

Para las condiciones del aire se han usado los mismos valores que se encuentran en el túnel de viento para así trabajar con unos valores conocidos, los cuales son:

- $\rho = 1.1916 \text{ kg/m}^3$ .
- $\mu = 1.8\text{e-}5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .
- $T = 293.15 \text{ K}$ .
- $P = 1002 \text{ mbar}$ .

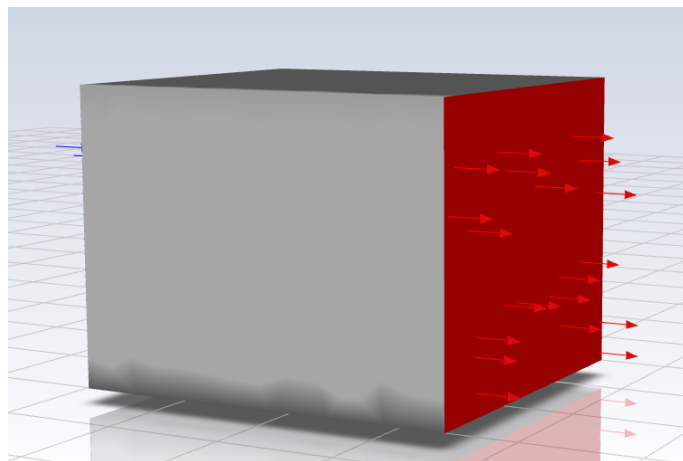


FIGURA 27. SALIDA DE AIRE U OUTLET.

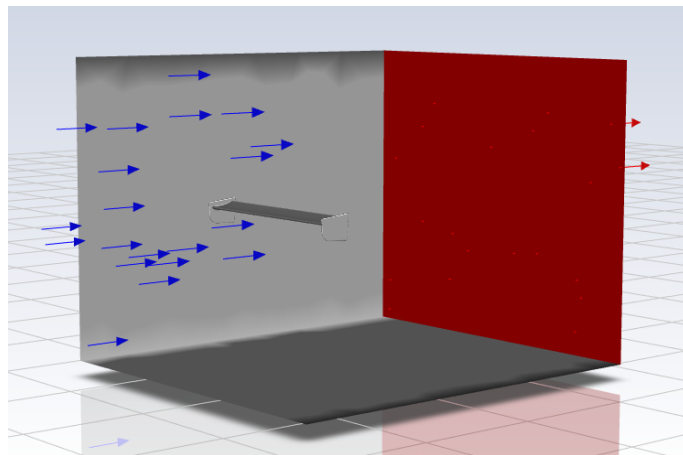


FIGURA 28. PAREDES O WALL.

Como se puede observar, el alerón también tiene aplicada la condición de pared ya que esto lo que hace es que se considere al alerón como un obstáculo para el flujo de aire.

Una vez realizado esto se define el modelo que se quiere utilizar para resolver las ecuaciones. Como ya se ha mencionado anteriormente, debido a las turbulencias a las que se verá sometido el alerón, se ha optado por el modelo k-epsilon.

Finalmente, se establecen las variables que son de interés, en este caso la carga y la resistencia aerodinámica generadas, y se da comienzo a la simulación. Una vez acabada la simulación, se computan dichas variables para la obtención de sus valores.

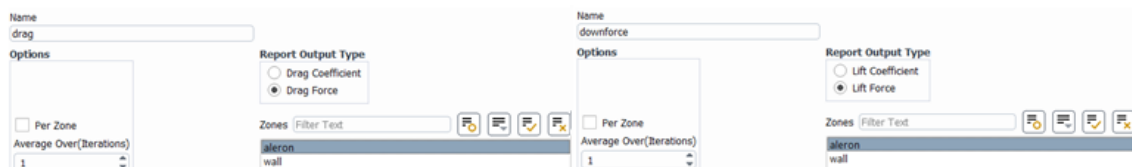


FIGURA 29. DEFINICIÓN DRAG Y DOWNFORCE EN ANSYS.

Para el postproceso, Ansys incluye una gran variedad de herramientas entre las cuales interesa controlar las variaciones de presiones y velocidades, así como la trayectoria del viento al atravesar el alerón.

Con la opción "Contour", encuadrada en rojo, es posible visualizar en un plano las diferentes presiones y velocidades que se generan a medida que el aire atraviesa el perfil, además de poder llegar a apreciar cuando el fluido se separa del perfil debido al ángulo de ataque de este.

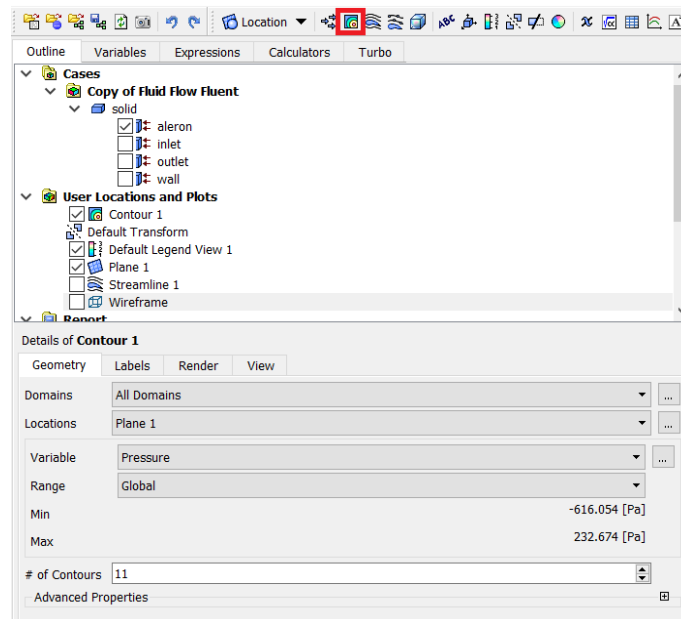


FIGURA 30. HERRAMIENTA "CONTOUR" EN ANSYS.

En el caso de la trayectoria del fluido, se hará uso de la herramienta "Streamlines", la cual permite observar la trayectoria del fluido tanto en 2D como 3D, lo cual será muy útil para observar los vórtices generados en los extremos del alerón.

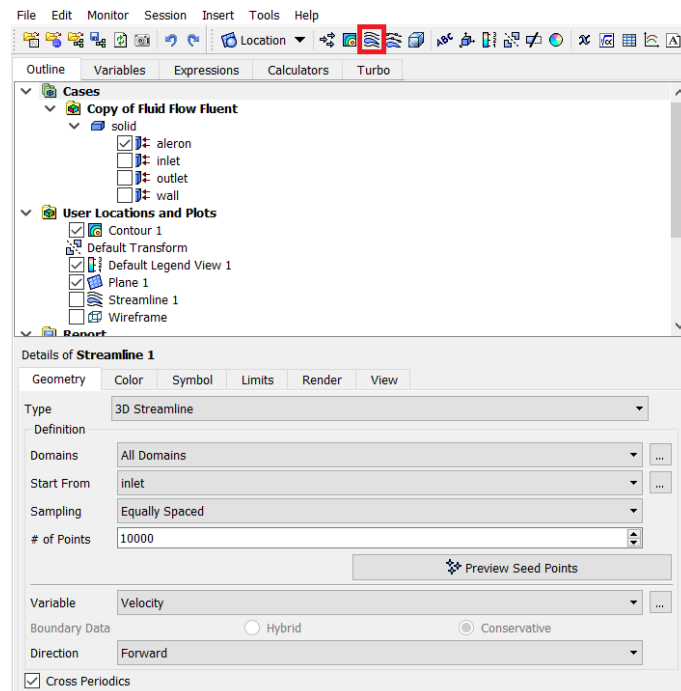


FIGURA 31. HERRAMIENTA "STREAMLINES" EN ANSYS.

## 4.2 ESTUDIO DEL ALERÓN

En este apartado se hará un estudio comparativo de las diferentes configuraciones que podría tener el alerón. Para este estudio se ha usado una velocidad de 20 m/s, la cual se considera idónea ya que se pretende analizar de forma precisa el comportamiento de las distintas opciones, y por tanto un valor muy reducido supondría pequeñas variaciones las cuales no permitirían una correcta diferenciación entre ellas mientras que un valor alto crearía más turbulencia y por lo tanto se tendría menos precisión a la hora del cálculo.

El primer paso es la obtención del perfil. Para ello, se ha hecho uso de una base de datos donde tienen analizados cientos de perfiles en 2D. En el caso de este alerón de un solo elemento y de calle, lo buscado es un perfil que aporte una gran cantidad de carga aerodinámica pero una mínima resistencia. A raíz de esta premisa y de comparar entre más de 100 perfiles, se llegó a la conclusión de que el perfil Eppler 423 era un gran candidato para cumplir los objetivos buscados. Una vez obtenido el perfil, se puede trabajar con este para la obtención del resto de parámetros.

Para la envergadura y la cuerda del perfil, tal y como se ha comentado en la teoría, se buscará una relación de aspecto alta, maximizando una y minimizando otra. Para el caso de la envergadura se cogerá el máximo tamaño posible el cual, debido a las derivas laterales (7.5 mm de espesor cada una), es de 1880 mm. Para la cuerda, sin embargo, se tendrá en cuenta otra consideración y es que, si esta se reduce, se obtendrá un perfil más eficiente pero también se limitará la carga aerodinámica que este genere, y es por eso por lo que se ha de buscar un punto intermedio en el cual el aumento de eficiencia no suponga una carga aerodinámica escasa.

Se hará un estudio variando el valor de la cuerda entre 20 y 30 cm, valorando la mejor alternativa.

Cuerda [cm]	Drag [N]	Downforce [N]	$C_D$	$C_L$	Eficiencia
20	4.953	81.59	0.0557	0.9178	16.47
22	5.553	89.28	0.0568	0.9131	16.08
24	6.137	95.55	0.0575	0.8957	15.57
26	6.718	102.2	0.0581	0.8841	15.21
28	7.340	107.9	0.0590	0.8669	14.70
30	7.933	114.0	0.0595	0.8546	14.36

TABLA 1. ESTUDIO VARIACIÓN DE CUERDA.



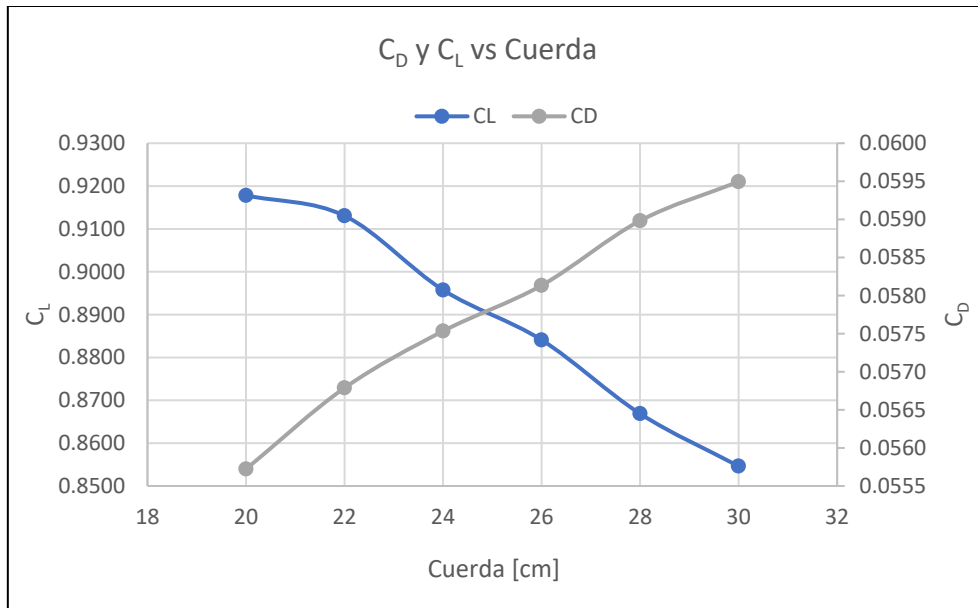


FIGURA 32.  $C_D$  Y  $C_L$  VS CUERDA.

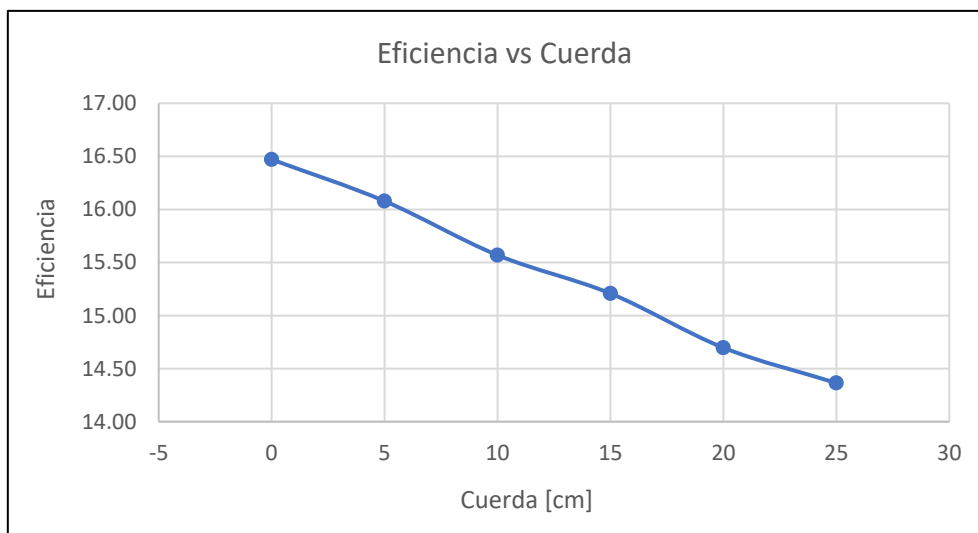


FIGURA 33. EFICIENCIA VS CUERDA.

A raíz de los resultados obtenidos, se ha decidido escoger una cuerda de 26 cm ya que no se pierde ni el 10% de eficiencia respecto al valor más eficiente y la carga aerodinámica generada es aproximadamente un 25% mayor.

Una vez fijados estos dos parámetros, se pasa al estudio de uno de los factores más importantes, el ángulo de ataque. Para este se buscará otra vez un punto intermedio entre eficiencia y carga aerodinámica, ya que los perfiles tienen su mayor eficiencia en valores muy próximos a 0, haciendo que la carga generada sea pequeña.

Ángulo de ataque [°]	Drag [N]	Downforce [N]	$C_D$	$C_L$	Eficiencia
0	6.718	102.2	0.0581	0.8841	15.21
5	11.34	148.5	0.0981	1.2855	13.10
10	18.21	193.5	0.1576	1.6740	10.62
15	26.81	233.7	0.2320	2.0224	8.717
20	35.62	256.3	0.3082	2.2180	7.196
25	43.36	254.7	0.3753	2.2041	5.874
30	53.13	239.6	0.4597	2.0737	4.511

TABLA 2. ESTUDIO VARIACIÓN DE ÁNGULO.

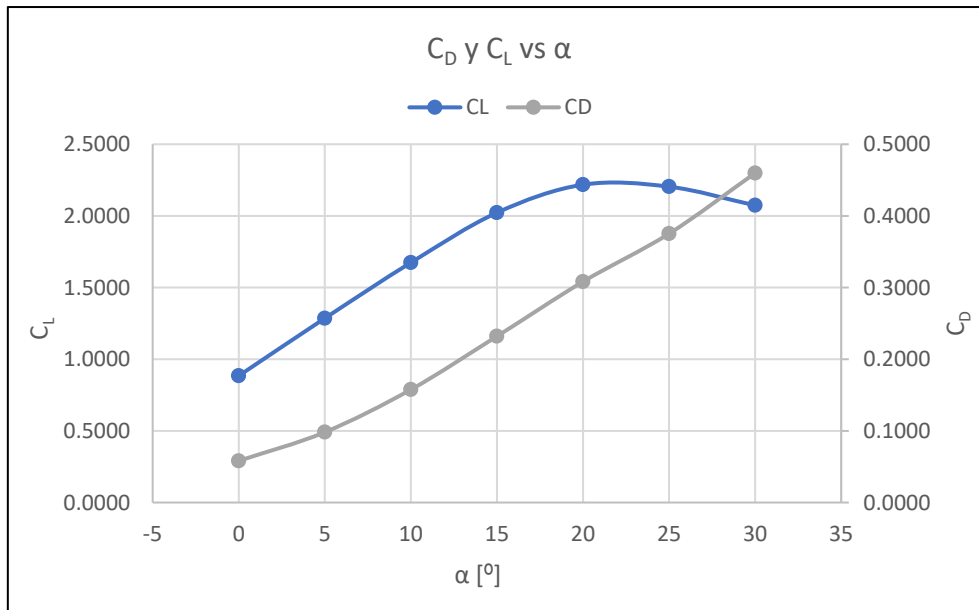


FIGURA 34.  $C_D$  Y  $C_L$  VS ALFA.

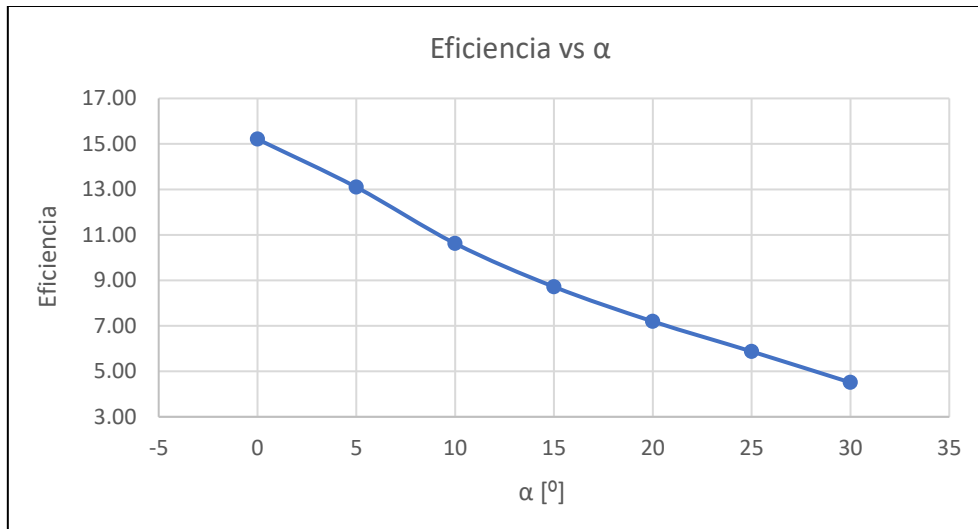


FIGURA 35. EFICIENCIA VS ALFA.

En este caso, la configuración elegida ha sido  $10^\circ$  ya que sí que es cierto que en este caso se pierde más eficiencia, hasta un 30%, pero la carga aerodinámica generada prácticamente se duplica.

Una vez obtenida la configuración del perfil, se realiza un estudio sobre la incorporación de un flap Gurney integrado en el perfil, el cual tendrá una altura relacionada con la cuerda, como se ha visto en la teoría, menor al 5% de esta. El espesor de dicho elemento será de 1 mm.

Con este componente se pretende crear un diferencial de presiones y velocidades mayor entre extradós e intradós, consiguiendo así mayor carga aerodinámica.

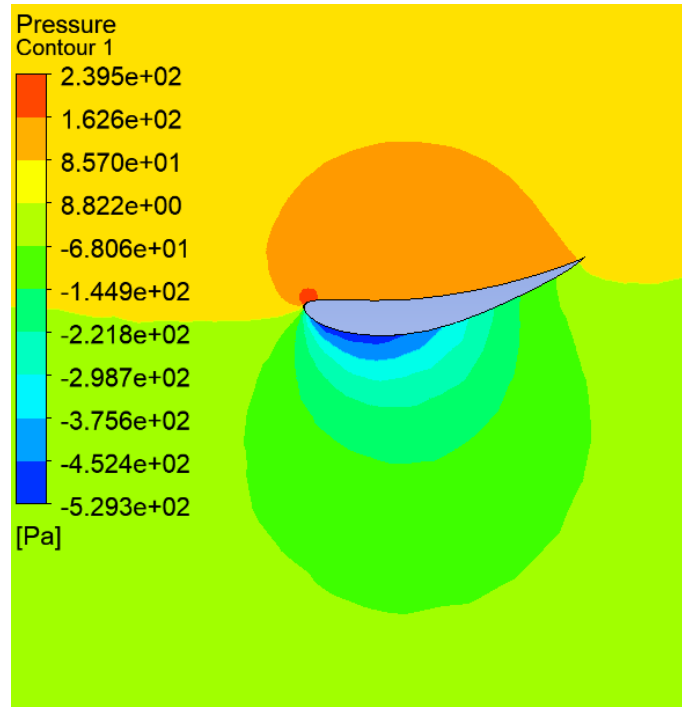


FIGURA 36. GRADIENTE DE PRESIONES SIN FLAP GURNEY.

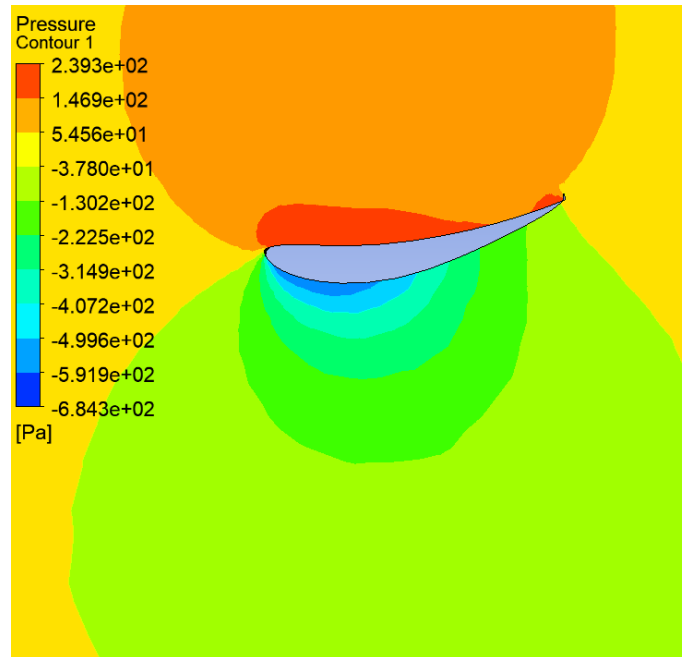


FIGURA 37. GRADIENTE DE PRESIONES CON FLAP GURNEY 2%.

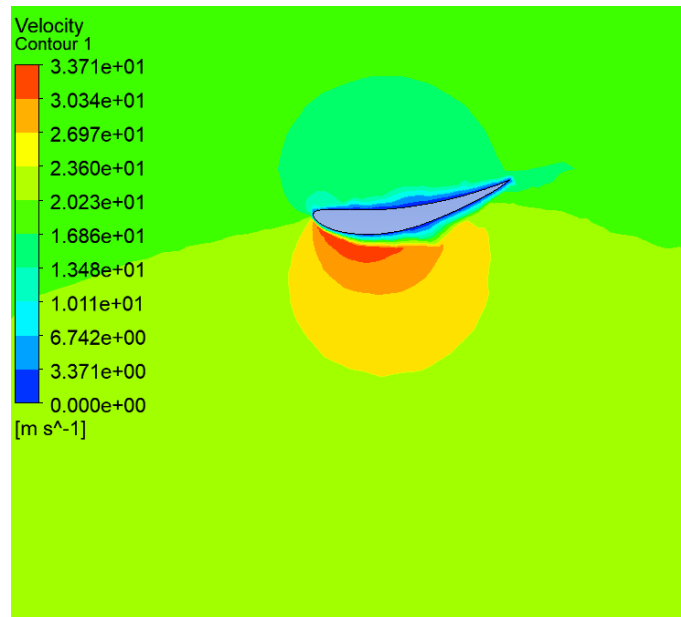


FIGURA 38. GRADIENTE DE VELOCIDADES SIN FLAP GURNEY.

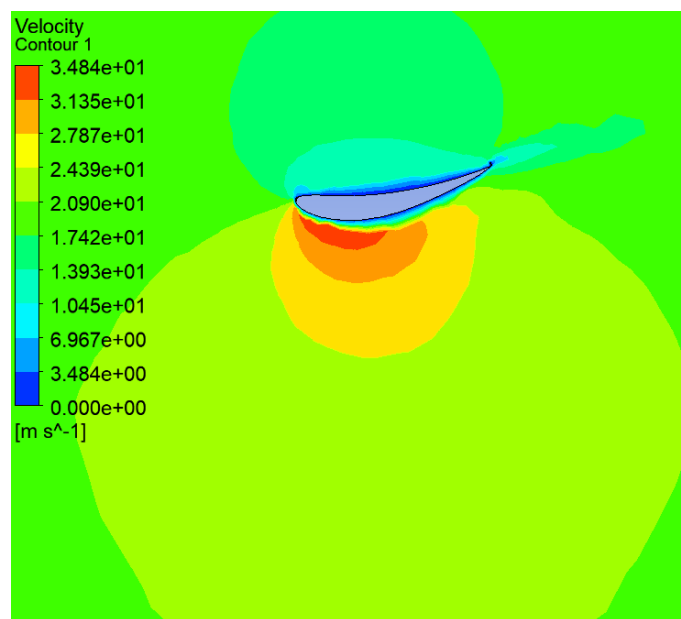


FIGURA 39. GRADIENTE DE VELOCIDADES CON FLAP GURNEY 2%.

Flap Gurney	$P_{\min}$ [Pa]	$P_{\max}$ [Pa]	$U_{\min}$ [m/s]	$U_{\max}$ [m/s]
NO	-529.3	239.5	0	33.71
2%	-684.3	239.3	0	34.84

TABLA 3. COMPARATIVA PRESIONES Y VELOCIDADES CON LA INTRODUCCIÓN DEL FLAP GURNEY 2%.

Habiendo visto la función de dicho flap y su efectividad, se pasa a la obtención de su altura.

% de cuerda	Drag [N]	Downforce [N]	$C_D$	$C_L$	Eficiencia
2	25.74	228.1	0.2228	1.974	8.860
3	28.29	237.9	0.2448	2.059	8.412
4	30.20	244.2	0.2613	2.113	8.086
5	32.34	251.8	0.2799	2.179	7.787

TABLA 4. ESTUDIO INCORPORACIÓN FLAP GURNEY.

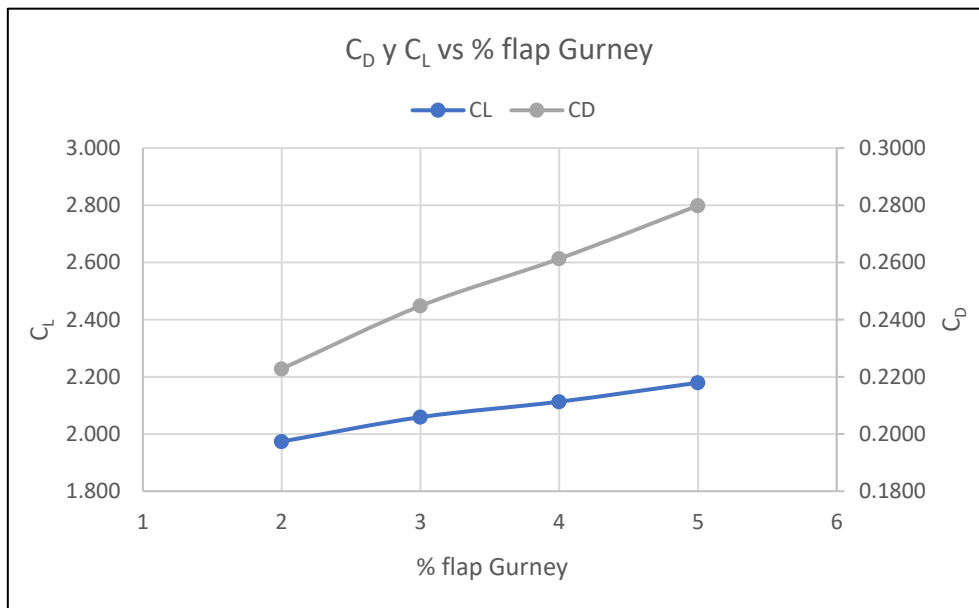


FIGURA 40.  $C_D$  Y  $C_L$  VS % FLAP GURNEY.

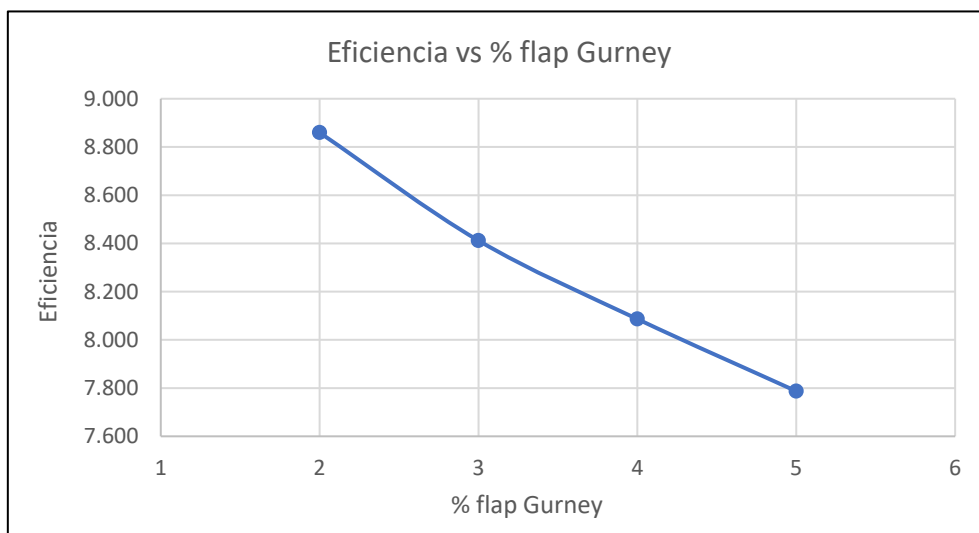


FIGURA 41. EFICIENCIA VS % FLAP GURNEY.

En este caso, al ya haber bajado bastante la eficiencia con otros parámetros, se ha escogido a esta como criterio y se ha decidido incorporar un flap Gurney con una altura del 2% de la cuerda (5.2 mm).

Finalmente, como último elemento a incorporar, se encuentran las derivas laterales. Para estas, como en el caso anterior, se ha tenido como criterio la eficiencia, realizando cuatro diseños diferentes y escogiendo el más eficaz.

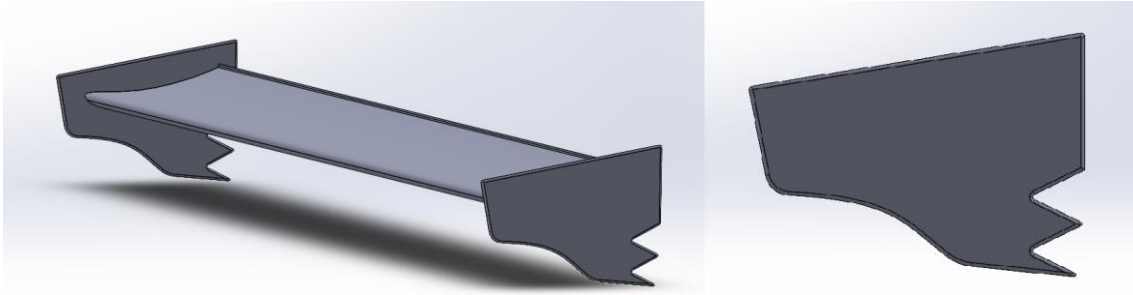


FIGURA 42. DISEÑO 1 DERIVA LATERAL.

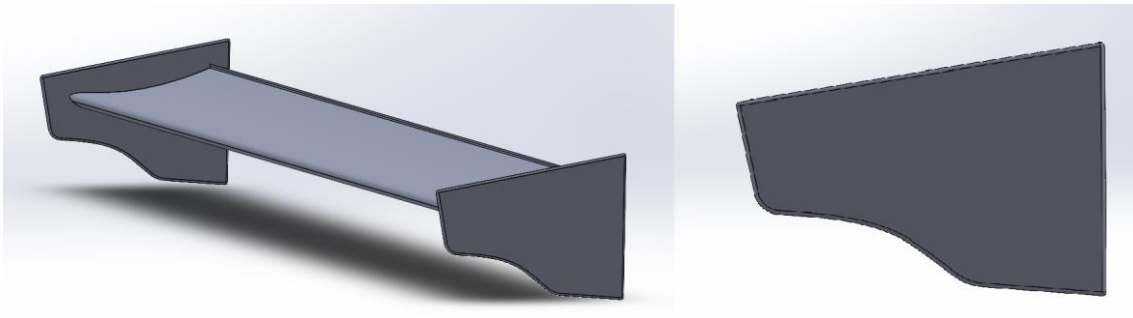


FIGURA 43. DISEÑO 2 DERIVA LATERAL.

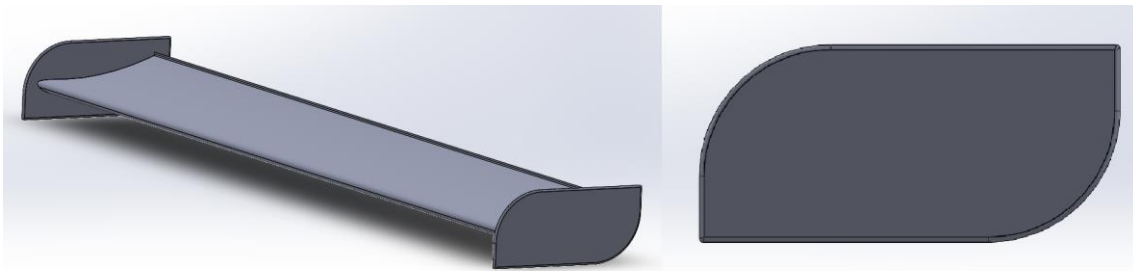


FIGURA 44. DISEÑO 3 DERIVA LATERAL.

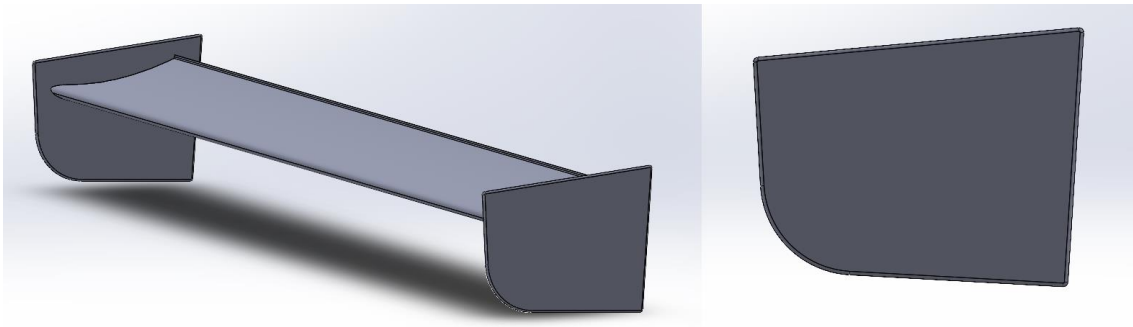


FIGURA 45. DISEÑO 4 DERIVA LATERAL.

Tanto las dimensiones como las posiciones entre perfil y derivas se encuentran en los anexos.

Con este elemento se pretende reducir el impacto de los vórtices generados en los extremos del alerón, sacándole así el máximo partido al perfil.

En las siguientes imágenes, en las cuales se puede observar una vista trasera de un extremo del alerón, se puede apreciar como en el primer caso el aire escapa por el lateral del perfil haciendo que el vórtice entre dentro de este disminuyendo la eficiencia. Sin embargo, como se puede ver en la segunda imagen, con la introducción de la deriva lateral dicho vórtice se ve reducido, haciendo así que el aire siga el perfil en su totalidad, y por lo tanto, aumentando la carga aerodinámica generada por el alerón.



FIGURA 46. VÓRTICE GENERADO EN EL EXTREMO DEL PERFIL SIN DERIVA LATERAL.



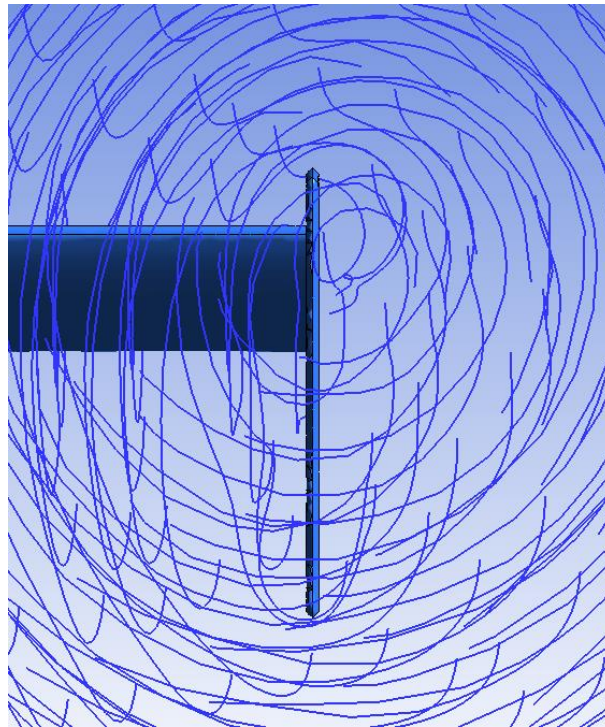


FIGURA 47. VÓRTICE GENERADO EN EL EXTREMO DEL PERFIL CON DERIVA LATERAL.

Derivas laterales	Drag [N]	Downforce [N]	$C_D$	$C_L$	Eficiencia
Opción 1	24.78	242.6	0.2111	2.066	9.790
Opción 2	25.07	244.7	0.2135	2.084	9.762
Opción 3	25.70	242.0	0.2189	2.061	9.414
Opción 4	25.28	248.9	0.2153	2.120	9.843

TABLA 5. ESTUDIO DE LOS DIFERENTES DISEÑOS DE DERIVAS LATERALES.

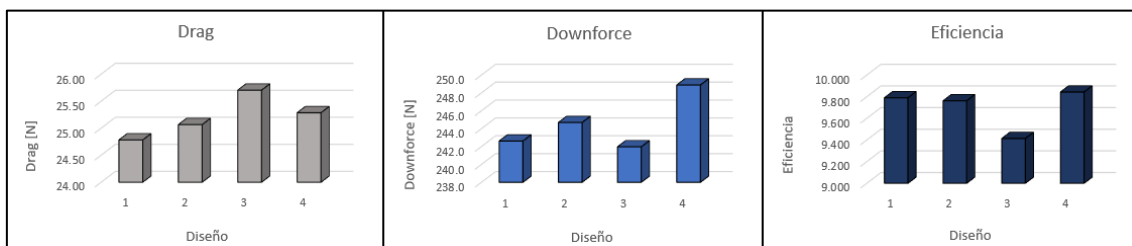


FIGURA 48. COMPARACIÓN DE VARIABLES ENTRE LAS DISTINTAS DERIVAS LATERALES.

Viendo los resultados se puede confirmar la gran labor de dichos elementos, aumentando la carga aerodinámica y llegando a reducir la resistencia. Teniendo la eficiencia como criterio, el último diseño será el escogido.

Configuración aerodinámica del alerón	
Elemento	Descripción
Perfil alar	Perfil: Eppler 423 Cuerda: 26 cm Ángulo de ataque: 10° Envergadura: 1880 mm
Flap Gurney	Altura: 5.2 mm (2% de la cuerda) Espesor: 1 mm
Derivas laterales	Opción 4 Espesor: 7.5 mm

TABLA 6. CONFIGURACIÓN AERODINÁMICA DEL ALERÓN.

Para finalizar el estudio aerodinámico, y para obtener valores que se asemejen más a la realidad, se han añadido los soportes y una plataforma cuadrada a modo de parte trasera de un coche. Se ha decidido hacer de esta forma ya que al tener una limitación con el programa, simular la parte trasera de un coche de forma más real hace que se pierda bastante calidad en la malla, y por lo tanto, los valores son menos fiables. Además, tal y como se aprecia en la siguiente imagen, simplemente se ha dejado el suelo como pared y el resto han pasado a ser salidas de aire para así poder eliminar cualquier mínimo efecto que tuvieran estas y simular una situación realista.

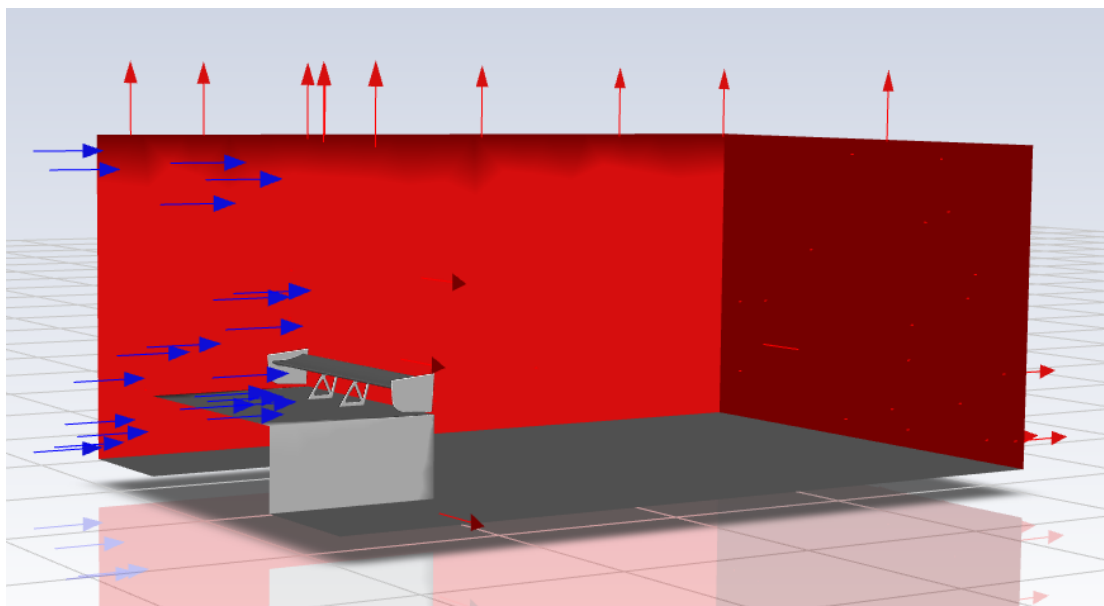


FIGURA 49. ESTUDIO FINAL DEL ALERÓN.

Respecto a la altura de los soportes, debido al efecto suelo, esta se ha configurado de forma que el alerón quede lo más bajo posible, dejando un espacio mínimo entre las derivas laterales y el borde del coche. La separación entre soportes y derivas laterales se ha hecho de forma que influyan lo mínimo en la función de estos elementos.

En estas nuevas condiciones más reales, a la velocidad de 20 m/s, el *drag* se aumenta en un 27% y el *downforce* se reduce un 8%, como era de esperar.

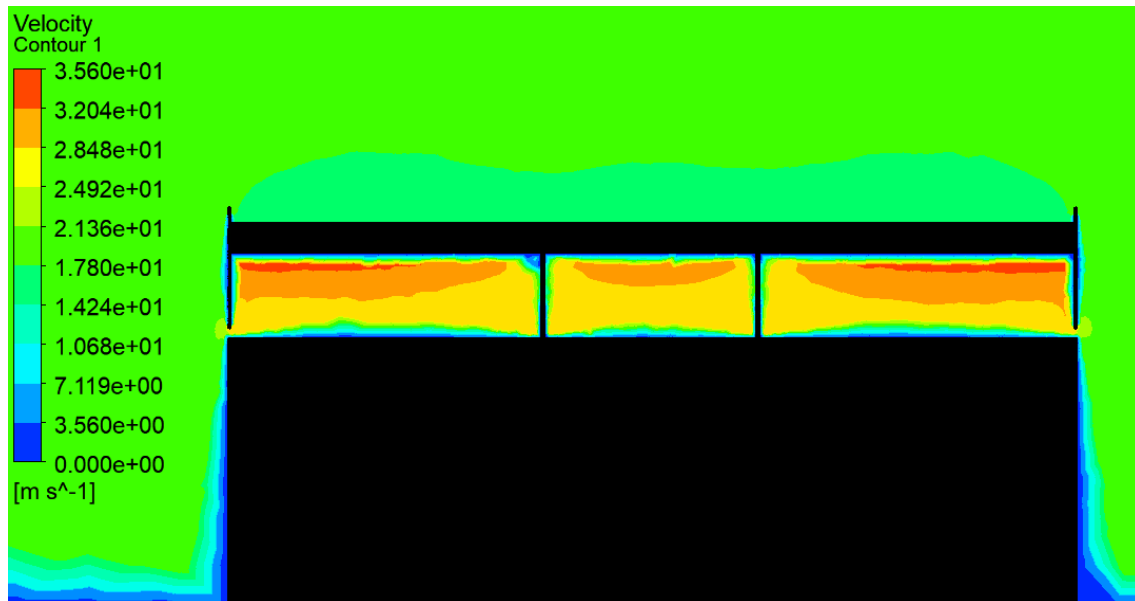


FIGURA 50. PÉRDIDA DE VELOCIDAD ALREDEDOR DE LOS SOPORTES.

En este estudio final se va a ver el comportamiento del alerón a distintas velocidades, empezando por 25 km/h y finalizando con 300 km/h. Aunque sea un alerón diseñado para calle, muchas veces coches como el tomado de referencia, un Nissan GT-R, son llevados a pista, y es por ello que saber el comportamiento del alerón a altas velocidades es algo bastante útil ya que el coche mencionado es capaz de alcanzar los 315 km/h de fábrica.

Velocidad [km/h]	Drag [N]	Downforce [N]	$C_D$	$C_L$	Eficiencia
25	3.892	27.21	0.2750	1.922	6.990
50	15.47	109.9	0.2732	1.940	7.101
75	34.72	248.0	0.2725	1.946	7.141
100	61.63	441.6	0.2721	1.950	7.165
125	96.27	693.5	0.2720	1.960	7.204
150	138.0	993.9	0.2708	1.950	7.201
175	188.4	1358	0.2715	1.957	7.207
200	245.8	1769	0.2713	1.953	7.199
225	311.5	2249	0.2717	1.961	7.220
250	383.6	2772	0.2710	1.958	7.225
275	464.5	3365	0.2712	1.965	7.245
300	553.0	3997	0.2713	1.960	7.226

TABLA 7. COMPORTAMIENTO DEL ALERÓN A DISTINTAS VELOCIDADES.

Dichos valores siguen siendo algo idealistas ya que no se ha tenido en cuenta la posible suciedad que puede haber en el ambiente o el hecho de que el flujo de aire no atraviese de forma transversal el alerón sino con cierta inclinación lateral, debido al paso por una curva, o vertical, debido a la geometría del coche en el cual esté instalado.

Pese a saber esto, lo cual reducirá algo la eficiencia, se ha obtenido un alerón bastante versátil y eficiente, capaz de aportar una gran carga aerodinámica sin aumentar mucho la resistencia aerodinámica del vehículo.

## 5. VALIDACIÓN DEL ENTORNO DE SIMULACIÓN

En este apartado del proyecto se tiene como objetivo respaldar todos los cálculos realizados mediante Ansys. Para esto, se hará uso de un túnel de viento y una impresora 3D.

### 5.1 TÚNEL DE VIENTO

Un túnel de viento es una máquina la cual permite el estudio de los efectos que tiene el aire sobre un cuerpo sólido. Su funcionamiento es sencillo y se basa en hacer pasar un flujo de aire a través de un sólido para ver la interacción que se produce entre ambos.

El túnel utilizado en este proyecto es el que se encuentra disponible en las instalaciones de la EEBE.

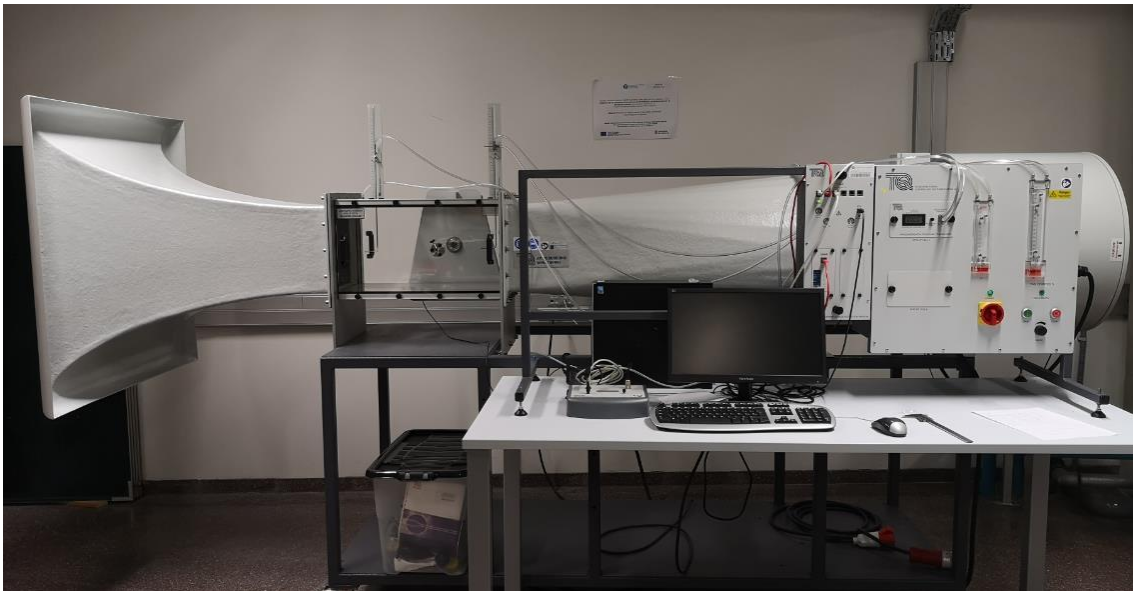


FIGURA 51. TÚNEL DE VIENTO DE LA EEBE.

Elemento	Especificación
Dimensiones y peso	3700mm longitud x 1900mm alto x 1065mm ancho Peso: 293kg
Condiciones de trabajo	Altitud hasta 2000m Temperatura entre 5°C y 40°C Máxima humedad relativa de 80% hasta 31°C, decrece linealmente hasta 50% a 40°C
Dimensiones sección de trabajo	305mm x 305mm x 600mm
Velocidad nominal del aire	0 – 36m/s
Tubo Pitot	Diámetro: 2mm
Tubo Prandtl	Diámetro: 4mm

TABLA 8. ESPECIFICACIONES TÚNEL DE VIENTO.

Debido a sus dimensiones no se ha podido establecer una relación de semejanza entre modelo y prototipo ya que los valores de número de Reynolds distaban bastante entre ambos. Es por ello que para validar el entorno de las simulaciones se ha reproducido en Ansys el mismo ensayo que el llevado a cabo en el túnel de viento.

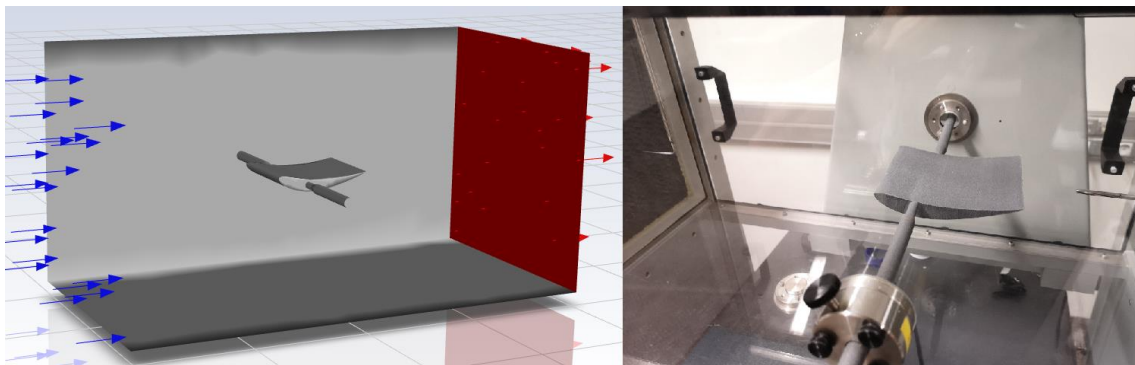


FIGURA 52. ENSAYO EN ANSYS VS ENSAYO REAL.

### 5.1.1 COMPONENTES DEL TÚNEL DE VIENTO

Para comprender el funcionamiento del túnel de viento hay que empezar hablando por el ventilador que se encuentra ubicado en uno de los extremos (en el extremo derecho de la figura 51), el cual cuando se hace girar absorbe el aire creando así un flujo en la sección de trabajo.



FIGURA 53. VENTILADOR DEL TÚNEL DE VIENTO.

Para que dicho flujo entre de manera uniforme al túnel y no de forma desordenada y caótica, se dispone de una malla a la entrada la cual permite ordenar el flujo de aire.

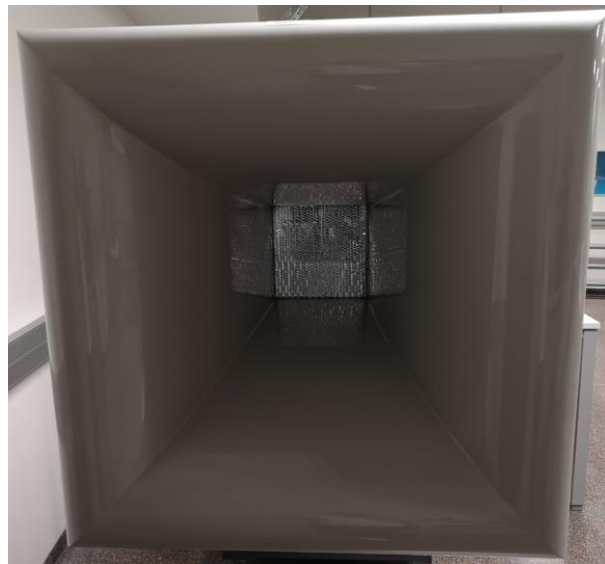


FIGURA 54. MALLA A LA ENTRADA DEL TÚNEL.

En la parte derecha se encuentra el cuadro de control mediante el cual se puede ir variando la velocidad del ventilador y a su vez la del flujo de aire. Además, mediante un tubo Pitot y un tubo Prandtl se puede tener controlada la variación de presión aguas arriba y aguas abajo, respectivamente.

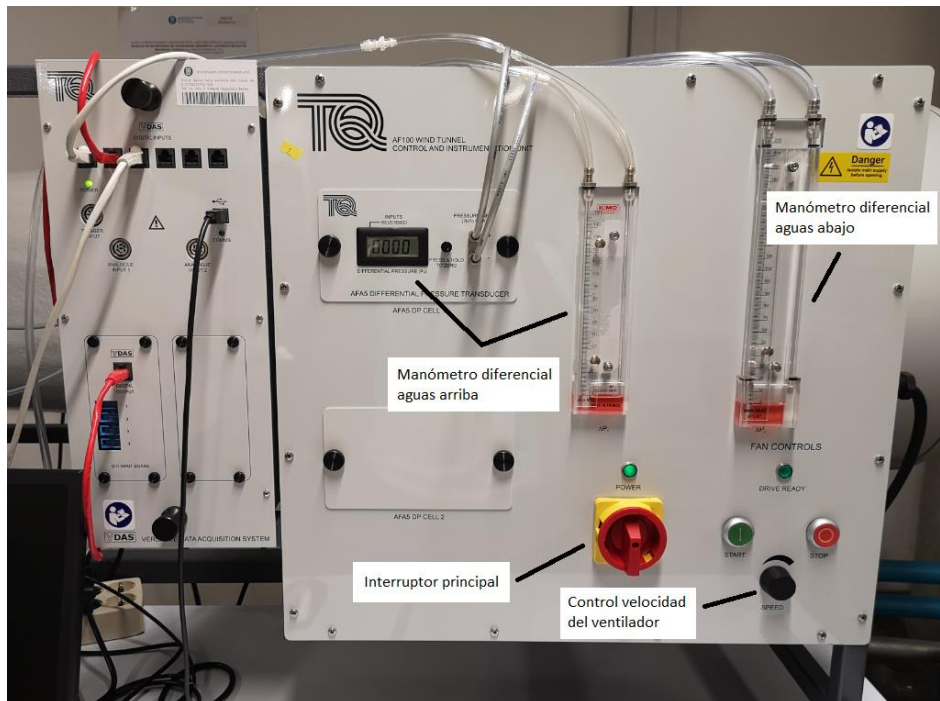


FIGURA 55. CUADRO DE CONTROL.

Para la fijación del modelo y el cálculo de fuerzas se dispone de una báscula, la cual está situada en la parte posterior del túnel de viento. Cuando dicha báscula se sitúa en una posición horizontal, la célula de carga obtiene el *drag* generado en el modelo. Sin embargo, esta se puede mover y colocar de forma vertical, obteniendo así el *lift* o *downforce* de la pieza.



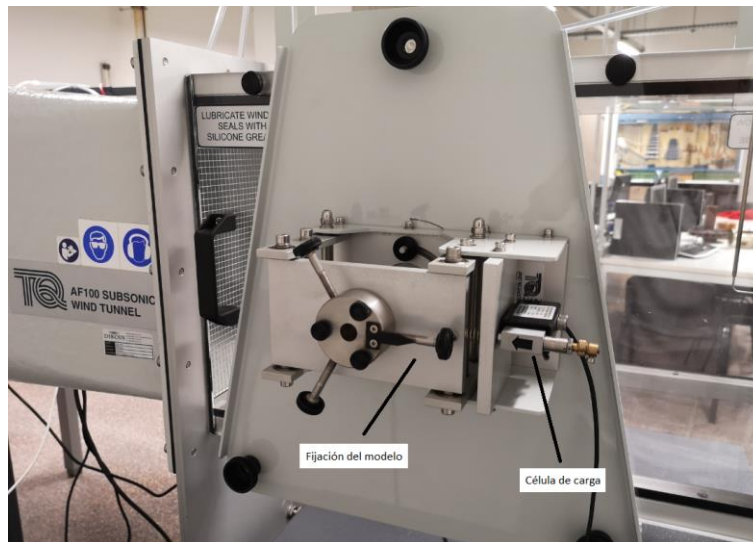


FIGURA 56. BÁSCULA EN POSICIÓN HORIZONTAL.



FIGURA 57. BÁSCULA EN POSICIÓN VERTICAL.

Finalmente, para la lectura de los valores de las fuerzas se dispone de un *display* conectado directamente a la célula de carga incorporada en la báscula el cual facilita un valor con dos decimales.

## 5.2 IMPRESIÓN 3D

### 5.2.1 IMPRESORA 3D

Para la impresión de las piezas se ha hecho uso de una impresora con tecnología puntera en el ámbito de la impresión 3D, la HP Multi Jet Fusion.



FIGURA 58. HP MULTI JET FUSION. (FUENTE: HP) [15]

A la izquierda de la imagen se puede observar el equipo donde se llevará a cabo la impresión 3D. A la derecha se encuentra la unidad de refrigeración, en la cual se puede hacer pasar una corriente de aire para acelerar el proceso o simplemente dejar enfriar de forma natural. En ese módulo también se lleva a cabo una succión del material sobrante para poder ser reutilizado.

El proceso de impresión es sencillo de comprender y se puede dividir en tres fases:

1. Se deposita una fina capa de material en polvo sobre la unidad de trabajo.
2. Una vez depositada la capa se pueden aplicar dos tipos de agentes sobre esta. En primer lugar se encuentra el agente de fusión, el cual se aplicará en aquellas zonas en las cuales se desee que el polvo se fusione para así crear una sección sólida. En segunda lugar se encuentra el agente de detalle, el cual se aplica en aquellas zonas en las que se quiere conseguir superficies lisas y un gran detalle.

- Finalmente, se aplica energía haciendo así que los agentes y el material reaccionen entre ellos, formando así una capa de la pieza final.

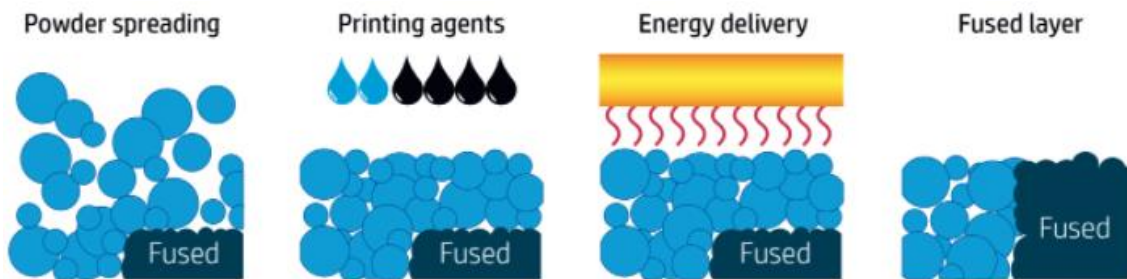


FIGURA 59. PROCESO IMPRESIÓN 3D. (FUENTE: HP) [16]

Este proceso se repite hasta completar la pieza final, la cual será llevada al módulo de refrigeración para así dejarla enfriar y retirar el polvo sobrante.

En cuanto al material empleado en las impresiones, esta impresora trabaja con dos tipos de polímeros: polímeros termoplásticos semicristalinos y polímeros elastómeros termoplásticos.

Dentro de estas categorías, y dependiendo de las cualidades que se buscan en la pieza, aparecen tres materiales:

- HP 3D High Reusability PA 12. Para piezas fuertes, funcionales y herméticas, con una gran resistencia química.
- HP 3D High Reusability PA 12 Glass Beads. Para piezas rígidas y funcionales en dimensiones estables.
- HP 3D High Reusability PA 11. Para piezas fuertes, dúctiles y funcionales, siendo más resistentes ante roturas e impactos. Dicho material ha sido el utilizado para las impresiones 3D.

### 5.2.2 IMPRESIONES REALIZADAS

Hasta la obtención del perfil con el cual se realizaron los ensayos se han realizado un total de cuatro iteraciones. Inicialmente el experimento se iba a realizar con un modelo de alerón, es por ello que en las primeras impresiones aparecen alerones y no solamente el perfil. La primera iteración se realizó con un tamaño de 5 cm, como otros modelos de laboratorio, pero este era demasiado pequeño para introducirlo en el túnel de viento. Debido a su tamaño la impresora lo imprimía dentro de cajas, tal y como se puede observar en la imagen.

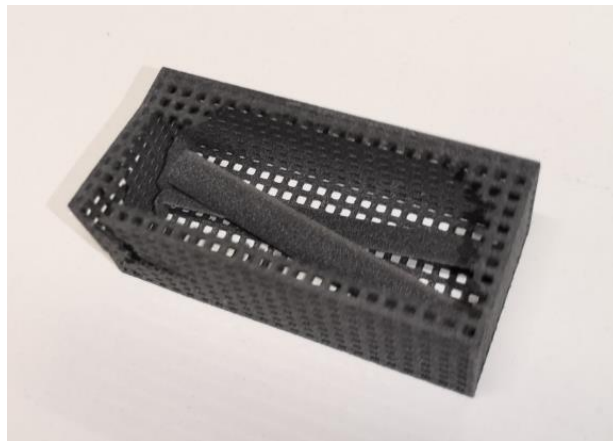


FIGURA 60. PRIMERA ITERACIÓN DE IMPRESIÓN.

Visto esto, se aumentó el tamaño del alerón a 20 cm, pero el soporte que se le diseñó era demasiado fino y al imprimirse se partió.

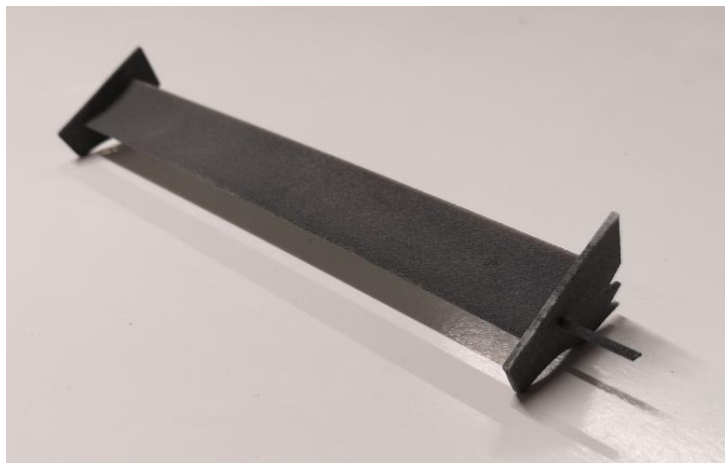


FIGURA 61. SEGUNDA ITERACIÓN DE IMPRESIÓN.

Debido a los problemas con el alerón, en la tercera iteración se envió también para imprimir el perfil alar.

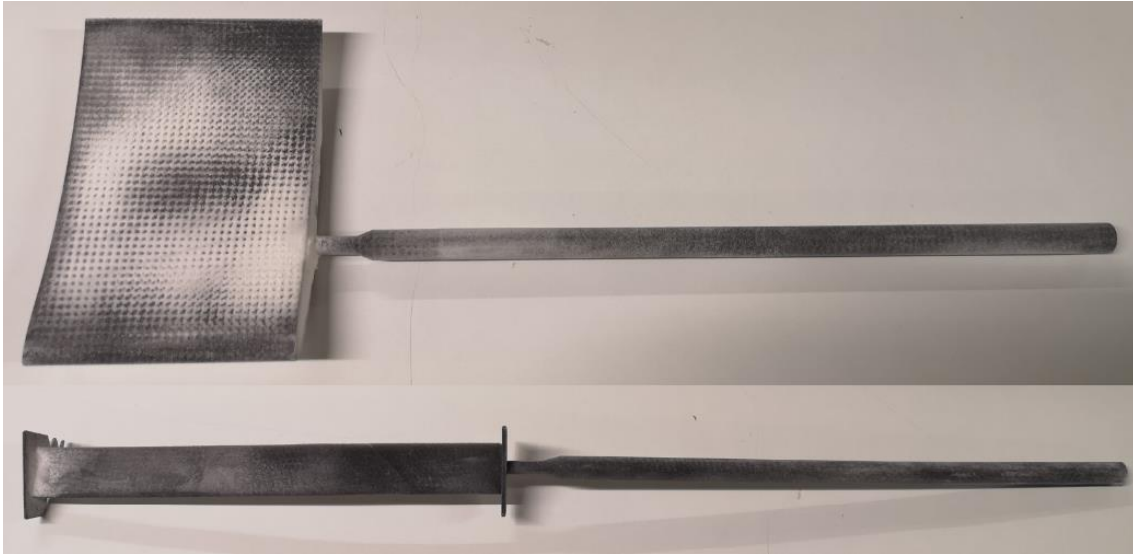


FIGURA 62. TERCERA ITERACIÓN DE IMPRESIÓN VISTA 1.

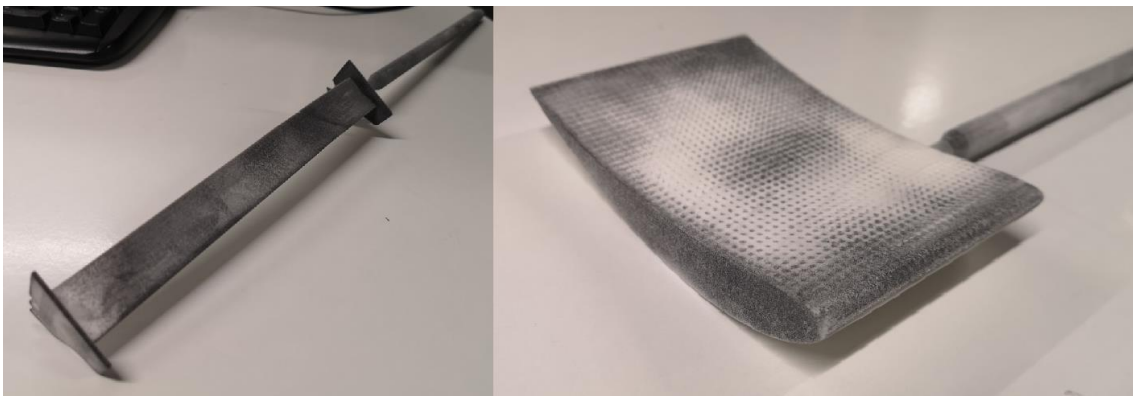


FIGURA 63. TERCERA ITERACIÓN DE IMPRESIÓN VISTA 2.

A raíz de estos dos modelos apareció un nuevo problema el cual debido al poco margen de los tornillos de fijación de la báscula, el soporte era demasiado pequeño y por lo tanto no quedaba fijo. Además, el modelo del alerón, al ser tan esbelto, pandeaba, y por tanto se descartó para una cuarta iteración.

Finalmente, con la corrección en el tamaño del soporte, se pudo fijar a la báscula y realizar los ensayos.



FIGURA 64. CUARTA ITERACIÓN DE IMPRESIÓN.

### 5.3 CORRELACIÓN DE RESULTADOS

Inicialmente en el túnel de viento se iban a realizar distintos ensayos variando la velocidad y el ángulo de ataque, pero al ver que debido a la asimetría y al espesor del perfil este empezaba a vibrar a medida que las fuerzas aumentaban, se redujo el número de experimentos. A raíz de esto, los ensayos se dividieron en dos grupos: el primero con el perfil a  $0^{\circ}$  y variando la velocidad, y un segundo en el cual se estableció una velocidad bastante baja y se fue variando el ángulo de ataque. El hecho de hacerlo así ha permitido que a pesar de que se produjeran dichas vibraciones, estas no fueran lo suficientemente grandes como alterar el comportamiento del perfil.

En las siguientes tablas se observan los resultados, donde "TdV" hace referencia a los resultados de laboratorio y "A" a las simulaciones de Ansys.

P [mm.c.a.]	Velocidad [m/s]	Drag TdV [N]	Drag S [N]	Downforce TdV [N]	Downforce S [N]
10	12.83	0.16	0.15	0.27	0.33
20	18.15	0.36	0.30	0.39	0.54
30	22.23	0.56	0.44	0.66	0.85
40	25.66	0.76	0.57	0.84	1.25
50	28.69	0.94	0.70	1.05	1.60
60	31.43	1.10	0.84	1.25	1.93

TABLA 9. ENSAYO 1: VARIACIÓN DE VELOCIDAD.

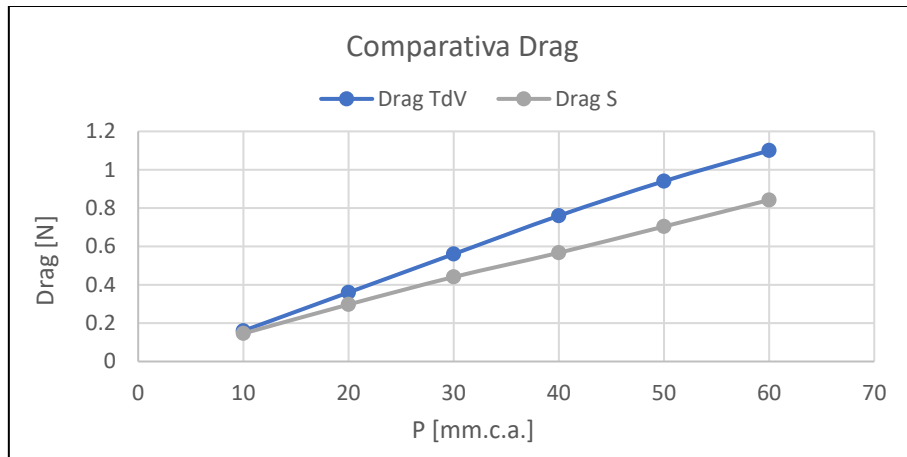


FIGURA 65. COMPARATIVA DRAG ENSAYO 1.

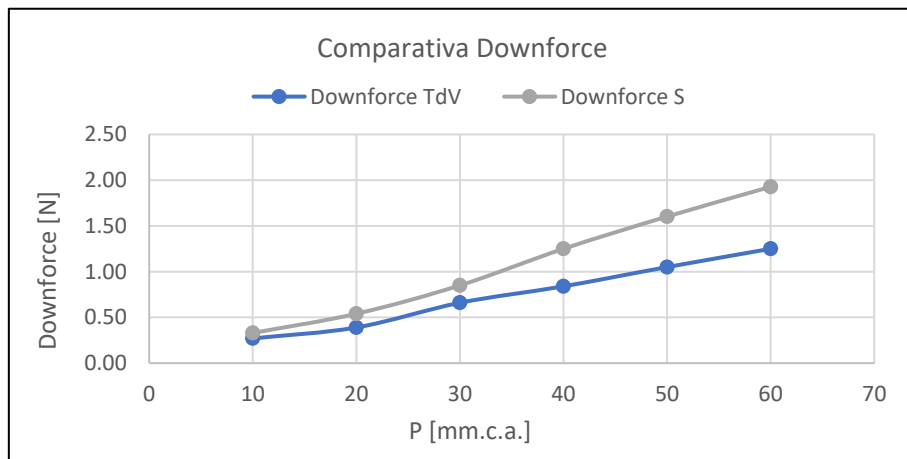


FIGURA 66. COMPARATIVA DOWNFORCE ENSAYO 1.

Ángulo [°]	Drag TdV [N]	Drag S [N]	Downforce TdV [N]	Downforce S [N]
0	0.16	0.15	0.27	0.33
5	0.24	0.19	0.42	0.56
10	0.30	0.26	0.68	0.76
15	0.45	0.37	0.73	1.01
20	0.69	0.52	0.83	1.21

TABLA 10. ENSAYO 2: VARIACIÓN DE ÁNGULO.

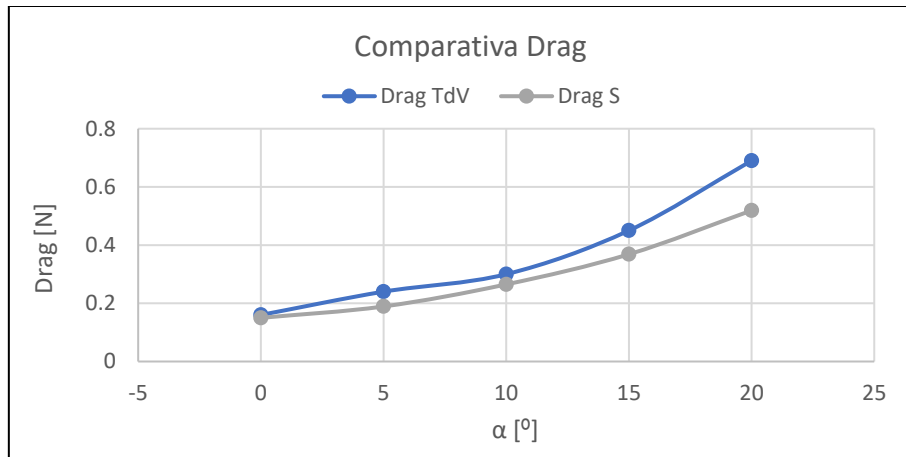


FIGURA 67. COMPARATIVA DRAG ENSAYO 2.

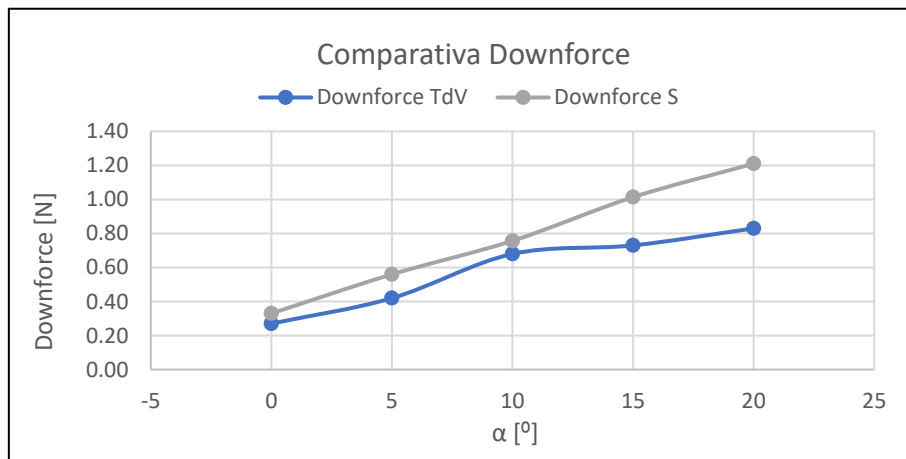


FIGURA 68. COMPARATIVA DOWNFORCE ENSAYO 2.

Como se puede observar, en todas las comparativas se tienen comportamientos y valores muy similares, llegando a apreciar como a medida que aumenta la fuerza generada en el perfil empiezan a distar los valores, algo a esperar debido a las pequeñas vibraciones producidas. También cabe destacar que el modelo de cálculo utilizado, tal y como se ha mencionado antes, trabaja mejor a Reynolds altos, el caso de las simulaciones en los alerones, lo que puede provocar que los valores disten algo más entre sí ya que los números de Reynolds alcanzados en el túnel de viento son bastante bajos.

Pese a esto, y ante estos resultados, se puede dar como válido el entorno en el cual se han llevado a cabo todas las simulaciones del alerón.



## DESARROLLO DEL PROYECTO

### PLANIFICACIÓN

El proyecto se ha llevado a cabo en el segundo cuatrimestre del curso 2020-2021, empezando el 1 de febrero de 2021 y finalizándolo el 6 de junio de 2021.

El trabajo ha sido estructurado de la forma en la que se ve en la siguiente tabla:

ACTIVIDADES DEL PROYECTO				
Referencia	Actividad	Inicio	Duración	Actividad previa
0	Planificación	1	14	-
1	Estudio previo	15	14	0
2	Selección perfil alar	29	7	1
3.1	Diseño 3D de perfiles	36	2	2
3.2	Diseño 3D flap Gurney	48	3	4.1
3.3	Diseño 3D derivas laterales	56	12	4.2
3.4	Diseño 3D de los soportes y ensamblaje del alerón final	75	5	4.3
4.1	Simulaciones CFD para selección de perfil	38	10	3.1
4.2	Simulaciones CFD para introducción flap Gurney	51	5	3.2
4.3	Simulaciones CFD para introducción derivas laterales	68	7	3.3
4.4	Simulaciones CFD alerón definitivo	80	14	3.4
4.5	Simulaciones CFD relación de aspecto	112	3	3.1
4.6	Simulaciones CFD efecto suelo	115	3	3.4
4.7	Simulaciones CFD para túnel de viento	90	3	3.1
4.8	Simulaciones CFD mallado y convergencia de resultados	118	4	3.4
5	Simulaciones en túnel de viento	73,87,94	1	3.1
6	Análisis de resultados	94	5	4.4
7	Planos	108	3	4.4
8	Conclusiones	121	4	6
9.1	Redacción de memoria 1	15	15	-
9.2	Redacción de memoria 2	43	15	-
9.3	Redacción de memoria 3	71	15	-
9.4	Redacción de memoria 4	100	27	-

TABLA 11. ACTIVIDADES DEL PROYECTO.

En primer lugar, se hizo una planificación de este y después una posterior búsqueda de toda la información necesaria para realizarlo. Una vez hecho esto, se empezó con el diseño de los elementos juntamente con sus correspondientes simulaciones, así hasta conseguir la configuración final del alerón.

Una vez se tuvo disponibilidad del túnel de viento de la EEBE se realizaron varios ensayos durante tres días para poder validar el entorno creado en las distintas simulaciones llevadas a cabo.

Finalmente, durante la realización de lo anterior y para finalizar con el proyecto, se procedió con el redactado de la memoria.

A continuación se expondrán los diagramas de Gantt para cada mes y así poder visualizar de forma más clara la planificación llevada a cabo.

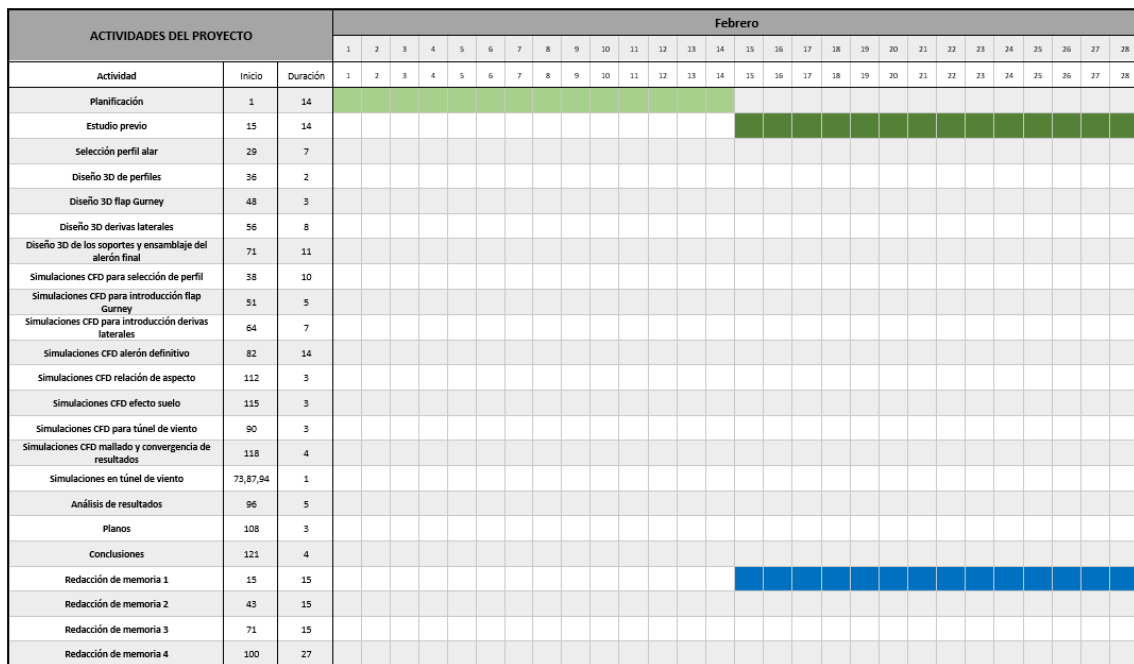


FIGURA 69. DIAGRAMA DE GANTT FEBRERO.



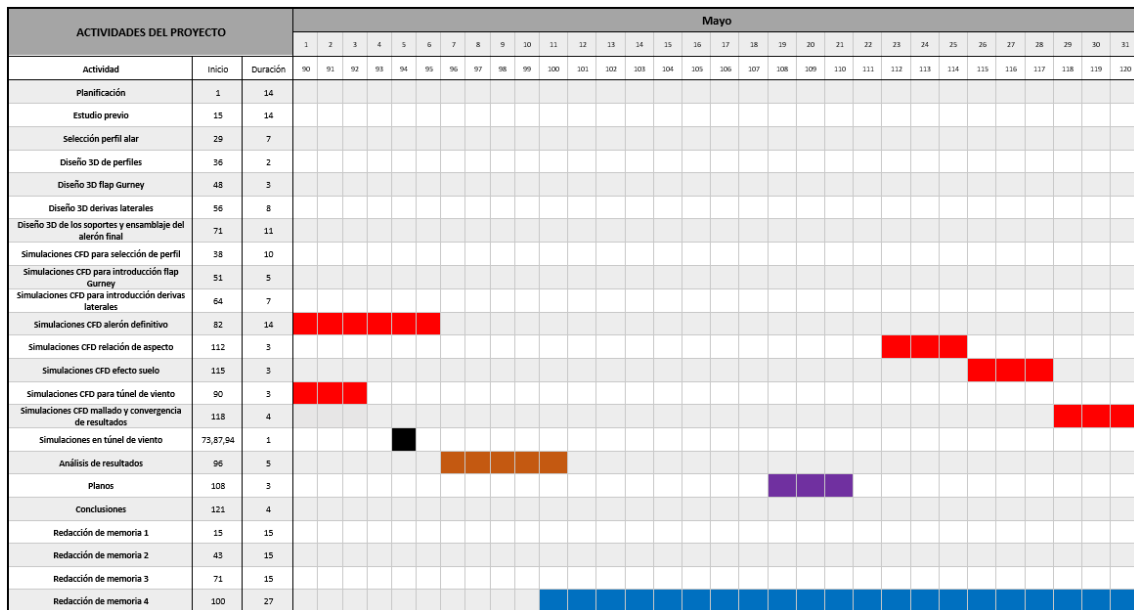


FIGURA 72. DIAGRAMA DE GANTT MAYO.

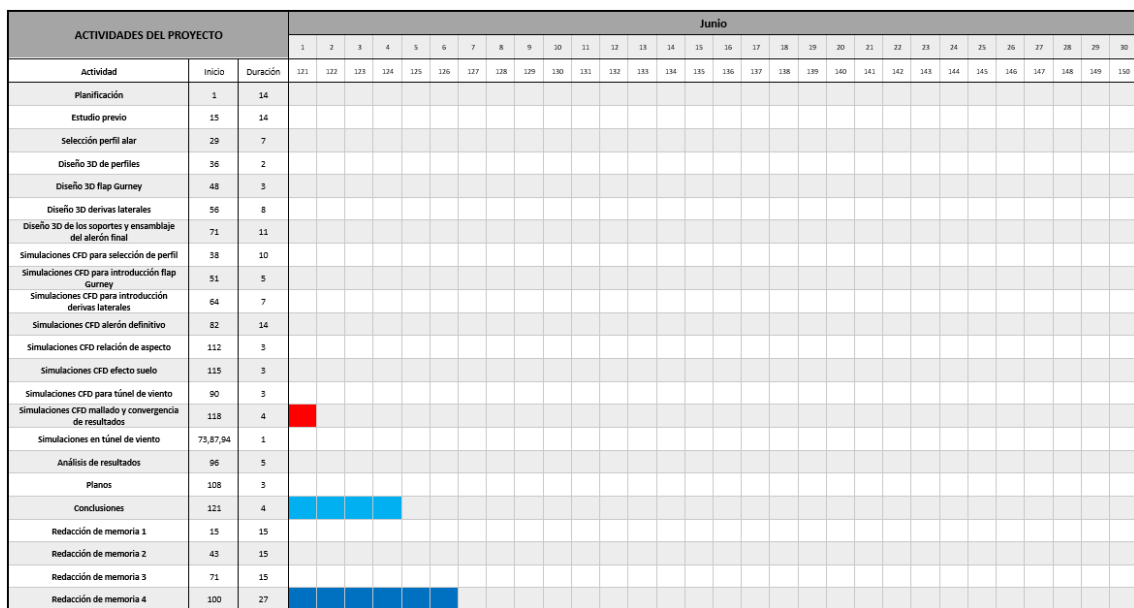


FIGURA 73. DIAGRAMA DE GANTT JUNIO.

## PRESUPUESTO

El presupuesto el cual se ha necesitado para la realización del presente proyecto se puede fraccionar en tres apartados.

Empezando por el salario, se ha hecho un promedio de las horas empleadas en el trabajo, el cual se ha contabilizado como ingeniero junior, y las horas dedicadas por parte de la tutora a la revisión y seguimiento que ha hecho del proyecto, contabilizándolas como ingeniero senior.

Siguiendo a este se encuentra el material utilizado a lo largo del proyecto. Para la realización de las simulaciones se ha utilizado un portátil el cual se adquirió para el último año de carrera con el objetivo de tener un ordenador que soportara todas las horas de computación, por lo tanto se va a considerar la totalidad de su precio. En cuanto a la impresora 3D, solo se tendrá en cuenta el coste de las impresiones ya que esta pertenece al puesto de trabajo de la tutora y la mayoría de su uso se da por parte de la empresa. Con el túnel de viento ocurre algo similar, ya que es propiedad de la EEBE y lo utilizan tanto profesorado como alumnado, por lo cual no se ha tenido en cuenta su precio.

Para finalizar el presupuesto se han introducido los precios de las licencias de programas utilizadas, entre las cuales se encuentran la de SolidWorks para el diseño 3D, Ansys para las simulaciones realizadas y Microsoft para el redactado de la memoria.

PRESUPUESTO					
Apartado	Descripción	Unidad	Cantidad	Coste unitario [€]	Coste [€]
Salario ingeniería	Ingeniero Junior	Horas	500	11	6.700
	Ingeniero Senior	Horas	30	40	
Material	Portátil	-	1	900	1.200
	Iteración 1 3D	-	1	10	
	Iteración 2 3D	-	1	30	
	Iteración 3 3D	-	1	130	
	Iteración 4 3D	-	1	130	
Licencias de programas	SolidWorks 2020	Año	1	6.600	33.035
	Ansys Academic	Año	1	26.400	
	Microsoft 365 Personal	Mes	5	7	
<b>COSTE TOTAL [€]</b>					<b>40.935</b>

TABLA 12. PRESUPUESTO DEL PROYECTO.

## ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL

A la vista del proyecto aparecen varios puntos a analizar en cuanto al impacto que pueden llegar a tener sobre el medio ambiente.

En primer lugar y más visible está el consumo eléctrico. Debido a la gran cantidad de horas dedicadas a la computación y al uso de maquinaria de gran potencia, como son el túnel de viento y la impresora 3D, se puede llegar a pensar que se ha consumido una gran cantidad de energía. Sin embargo, como se muestra en la siguiente tabla, las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por el consumo energético son bastante bajas, equivaliendo aproximadamente a las generadas por un coche eléctrico en 500 km.

Actividad	Potencia [kW]	Horas de uso [h]	Consumo eléctrico [kWh]	Emisiones CO <sub>2</sub> [kg]
Uso portátil	0.2	600	120	18
Uso túnel de viento	10	4	40	6
Uso impresora 3D	12	3	36	5.4
<b>EMISIONES TOTALES DE CO<sub>2</sub> [kg]</b>				<b>29.4</b>

TABLA 13. EMISIONES TOTALES DE CO<sub>2</sub>.

Otro factor que se podría haber tenido en cuenta en este apartado sería el desplazamiento realizado en transporte público. Este se ha despreciado debido a que solo se asistieron tres veces a la universidad para la realización de las pruebas con el túnel de viento y el total de tiempo empleado en el metro supera por poco la media hora, por esta razón no se ha añadido.

Finalmente, aparece la impresión 3D. Como ya se ha comentado anteriormente, una vez se ha impreso la pieza y se ha dejado secar se succiona el polvo de material restante para ser reutilizado, es por ello que durante la fabricación no se generan residuos. Además, el material utilizado se obtiene de una materia prima renovable que se extrae del aceite de ricino vegetal, reduciendo así el impacto ambiental. Las distintas iteraciones realizadas se han quedado como muestras en el laboratorio donde se encuentra el túnel de viento, pero si en algún momento se quisieran deshacer de estas, debido a su composición, son sencillas de reciclar.

## CONCLUSIONES

A lo largo del proyecto se ha ido viendo cómo se han ido cumpliendo todos los objetivos propuestos al principio de este, logrando un diseño el cual permite obtener unos valores considerables de *downforce* sin apenas aumentar el *drag* del vehículo, obteniendo así una gran eficiencia.

También se ha demostrado la gran capacidad de los software CFD, con el cual se ha podido obtener todos los resultados esperados, validándolos gracias a la impresión 3D y al túnel de viento disponible en la EEBE.

Cabe destacar que el estudio realizado en el proyecto es una parte de las varias que componen la creación de un alerón. Es por ello por lo que en un futuro se desearía acabar de diseñar el alerón por completo, llevando a cabo el estudio mecánico para así poder hacer una selección de material y a raíz de esto estudiar el proceso de fabricación, incluyendo las uniones entre los distintos elementos. Además se intentaría obtener una licencia superior en Ansys u otro programa para poder estudiar el alerón junto al coche, acabando así de diseñar por completo los soportes y permitiendo obtener los valores más fieles posibles a la realidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Nissan.** Nissan GT-R. [En línea] [https://www-europe.nissan-cdn.net/content/dam/Nissan/es/brochures/E-Catalago\\_GTR\\_ES.pdf](https://www-europe.nissan-cdn.net/content/dam/Nissan/es/brochures/E-Catalago_GTR_ES.pdf).
- [10] **Motorsport.** Fórmula 1. [En línea] <https://es.motorsport.com/f1/news/elevar-alerones-traseros-cambio-necesario/3168553/>.
- [11] **Fernando Sebastián Rodas Ibáñez.** Programación y análisis de convergencia del método paneles utilizando línea de vórtices y estela transiente. *Universidad de Chile*. [En línea] 2016. <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/138953/Programacion-y-analisis-de-convergencia-del-metodo-de-paneles-utilizando-linea.pdf?sequence=1>.
- [12] **Los secretos de la Fórmula 1.** Los alerones: resistencia aerodinámica. [En línea] <https://secretosf1.wordpress.com/2010/03/27/los-alerones-resistencia-aerodinamica/>.
- [13] **D. Derek Sola Miralles.** Diseño y análisis de un alerón trasero para un vehículo de competición utilizando material compuesto con fibras naturales. *UPV*. [En línea] Julio de 2019. <https://riunet.upv.es/handle/10251/128577>.
- [14] **Graining.** Técnica F1 Gurney Flaps. [En línea] <https://www.graining.es/tecnica-f1-gurney-flaps/>.
- [15] [16] **HP.** HP Multi Jet Fusion. [En línea] <https://reinvent.hp.com/us-en-3dprint-mjfhandbook>.
- [2] **Wikipedia.** Principio de Bernoulli. [En línea] [https://es.wikipedia.org/wiki/Principio\\_de\\_Bernoulli](https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_Bernoulli).
- [3] **Wikipedia.** Efecto Coandă. [En línea] [https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto\\_Coand%C4%83](https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Coand%C4%83).
- [4] **Researchgate.** Diagrama descriptivo del tubo Venturi. [En línea] [https://www.researchgate.net/figure/Diagrama-descriptivo-del-tubo-Venturi\\_fig4\\_328080878](https://www.researchgate.net/figure/Diagrama-descriptivo-del-tubo-Venturi_fig4_328080878).
- [5] **Yunus A. Cengel.** *Heat and Mass Transfer*. McGraw-Hill Education, 2011. 9780071077866.
- [6] **Aerodinámica F1.** [En línea] <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/10/perfiles-aerodinamicos-como-funcionan/>.



[7] **Drivetribe.** Aero Foiled-1955 May Porsche 550 RS Spyder. [En línea] <https://drivetribe.com/p/aero-foiled-1955-may-porsche-550-PF0IBsvrR3uG4C2AscRy7g?iid=ADlxAZ39SPe7qDII2Oyh0A>.

[8] **Autolegends.** La historia del Chaparral 2F. [En línea] <http://autolegends.es/la-historia-del-chaparral-2f/>.

[9] **Wikiwand.** Perfil alar. [En línea] [https://www.wikiwand.com/es/Perfil\\_alar#](https://www.wikiwand.com/es/Perfil_alar#).

**Airfoil Tools.** [En línea] <http://airfoiltools.com/>.

**Ana Bonilla.** Herramientas de diseño e ingeniería. [En línea] Enero de 2003. [https://www.bizkaia.eus/Home2/Archivos/DPTO8/Temas/Pdf/ca\\_GTcapitulo1.pdf?hash=1c59e3184867dd7ffc653c810e84a6a4](https://www.bizkaia.eus/Home2/Archivos/DPTO8/Temas/Pdf/ca_GTcapitulo1.pdf?hash=1c59e3184867dd7ffc653c810e84a6a4).

**Arnau Amores Torres.** Estudi aerodinàmic pel disseny de l'aleró posterior d'un monoplaça de Formula Student. *UPC.* [En línea] Junio de 2019. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/333756>.

**Borja Jiménez Arribas.** Estudio mecánico y aerodinámico del comportamiento del alerón trasero de un automóvil. *Universidad Carlos III de Madrid.* [En línea] Septiembre de 2015. <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/23734>.

**Docplayer.** Aerodinámica exterior. [En línea] <https://docplayer.es/7631943-4-aerodinamica-exterior.html>.

**Forocoches.** Aerodinamica de los coches: el aleron y el difusor. [En línea] <https://www.forocoches.com/foro/showthread.php?t=1650311>.

**Gencat.** Factor de emisión de la energía eléctrica: el mix eléctrico. [En línea] [https://canviclimatic.gencat.cat/es/actua/factors\\_demissio\\_associats\\_a\\_lenergia/](https://canviclimatic.gencat.cat/es/actua/factors_demissio_associats_a_lenergia/).

**Javier Marco Gimeno.** Estudio computacional de un ala y sus partes móviles en condiciones realistas de vuelo. *UPV.* [En línea] Junio de 2017. <https://riunet.upv.es/handle/10251/86734>.

**Joel Leganés Rodríguez.** Diseño de alerones para el vehículo de Formula Student de la UC3M. *Universidad Carlos III de Madrid.* [En línea] Junio de 2014. <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/22620>.

**Joseph Katz.** *Automotive Aerodynamics.* Wiley-Blackwell, 2016. 1119185726.

**Manuel Fernando Torres Espejo.** Diseño, desarrollo y fabricación de Maqueta de un alerón delantero de Fórmula Student. *Universidad de Sevilla*. [En línea] 2016. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90753/fichero/Dise%C3%B1o,+desarrollo+y+fabricaci%C3%B3n+de+Maqueta+de+un+aler%C3%B3n+delantero+de+F%C3%B3rmula+Student.pdf>.

**Ministerio de industria, comercio y turismo.** Manual de reformas de vehículos. [En línea] <https://www.aeca-itv.com/wp-content/uploads/2021/01/ManualReformasVehiculosRev6Corr1.pdf>.

**MundoMotor.** Aerodinámica del automóvil: La Búsqueda Del Diseño Imposible. [En línea] <https://www.mundodelmotor.net/aerodinamica-del-automovil/>.

**Rubén Camúñez Llanos..** Elementos y dispositivos aerodinámicos en la Fórmula 1: parte central del vehículo. *UPC*. [En línea] Julio de 2014. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/24755/TFG%20memoria.pdf>.

**Rubén Carsolio Santiago Octavio y Ángel Chávez Salamanca.** Diseño conceptual de un alerón trasero para un automóvil Fórmula 1. [En línea] Noviembre de 2011. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/10361/1740%202011.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

**Simon McBeath.** *Competition Car Aerodynamics, 3rd Edition*. Veloce Publishing, 2017. 9781787110861.

## ANEXOS

En anexos se hará la demostración de dos valores a la hora del diseño en los que se ha omitido el proceso de selección entre diferentes opciones debido a los conocimientos que se tienen sobre estos, haciendo innecesaria la comparación. Ambas demostraciones se llevarán a cabo en las mismas condiciones que en las comparativas de diferentes configuraciones, a 20m/s.

También se llevará a cabo un estudio del mallado y de la convergencia de los resultados para así demostrar la fiabilidad de los valores obtenidos.

Finalmente se encuentran los planos correspondientes a las distintas derivas laterales y a la posición de los soportes.

### DEMOSTRACIÓN RELACIÓN DE ASPECTO (AR)

Tal y como se ha comentado en teoría, una relación de aspecto alta hace que el perfil sea más eficiente y es por ello que para la envergadura del perfil se ha escogido la máxima posible, que son 1880 mm.

Para esta demostración se partirá del perfil alar utilizado en el alerón y se irá reduciendo su envergadura para así ver la influencia de este factor.

Envergadura [mm]	AR	Drag [N]	Downforce [N]	$C_D$	$C_L$	Eficiencia
1880	7.231	6.718	102.2	0.0581	0.8841	15.21
1800	6.923	6.632	95.52	0.0595	0.8564	14.40
1700	6.538	6.436	89.32	0.0611	0.8479	13.88
1500	5.769	5.907	75.92	0.0635	0.8168	12.85
1000	3.846	4.216	44.67	0.0680	0.7209	10.60

TABLA 14. DEMOSTRACIÓN RELACIÓN DE ASPECTO.

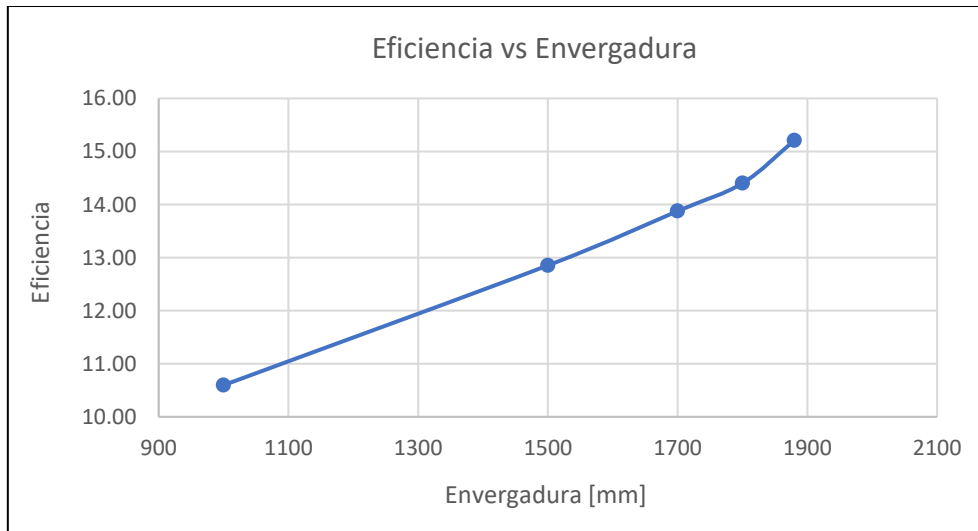


FIGURA 74. EFICIENCIA VS ENVERGADURA.

A raíz de estos resultados se puede observar la importancia de la relación de aspecto y porqué se ha decidido escoger el máximo valor posible para la envergadura del perfil.

### DEMOSTRACIÓN EFECTO SUELO

Dicho efecto se puede contemplar en un tubo Venturi, pero en este caso, en vez de reducir la sección de paso en un tubo se reduce la sección que se crea entre alerón y coche.

Se considera altura a la diagonal que cruza el soporte, la cual se puede apreciar claramente en planos.

Altura [cm]	$U_{min}$ [m/s]	$U_{max}$ [m/s]	$P_{min}$ [Pa]	$P_{max}$ [Pa]	Drag [N]	Downforce [N]	$C_D$	$C_L$	Eficiencia
20	0	35.60	-676.3	185.5	32.01	228.5	0.2726	1.946	7.138
25	0	34.46	-627.8	168.8	33.28	217.2	0.2834	1.850	6.528
30	0	33.38	-587.6	174.9	34.73	214.2	0.2958	1.824	6.166
40	0	33.46	-554.4	195.2	35.53	207.8	0.3026	1.770	5.849

TABLA 15. DEMOSTRACIÓN EFECTO SUELO.

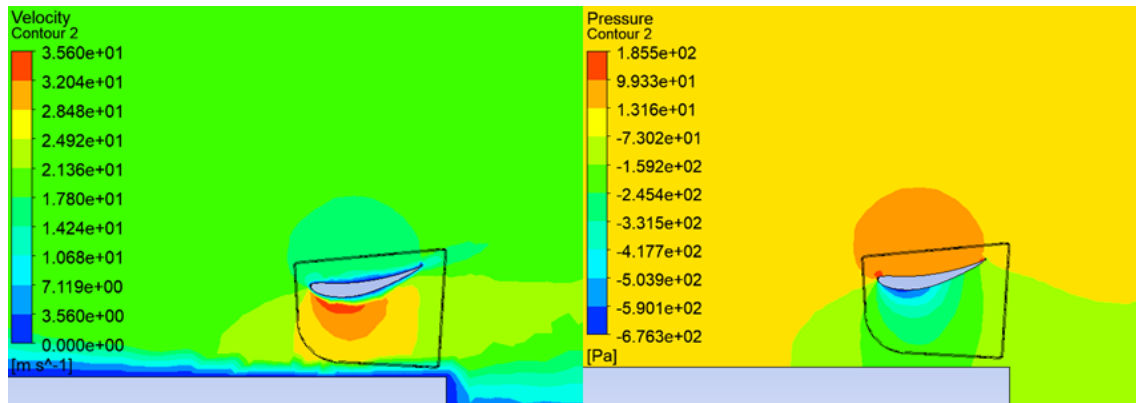


FIGURA 75. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES Y VELOCIDADES CON SOPORTE DE 20CM.

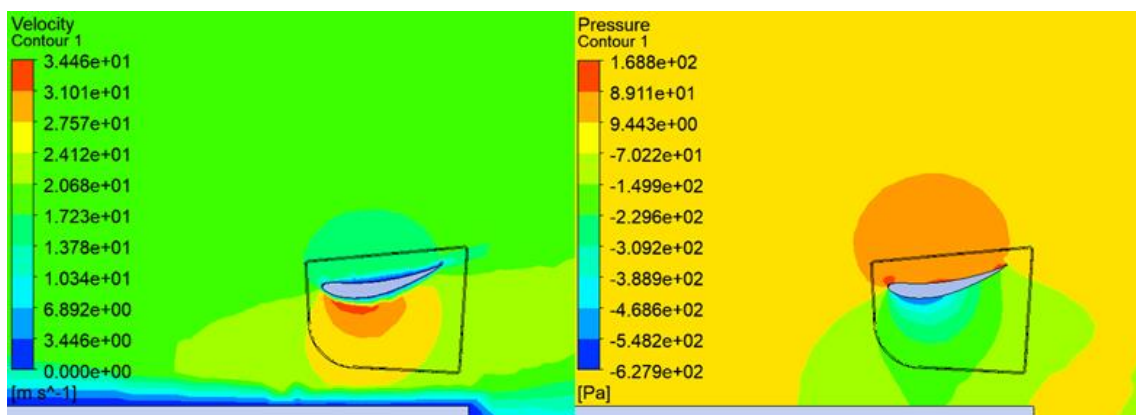


FIGURA 76. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES Y VELOCIDADES CON SOPORTE DE 25CM.

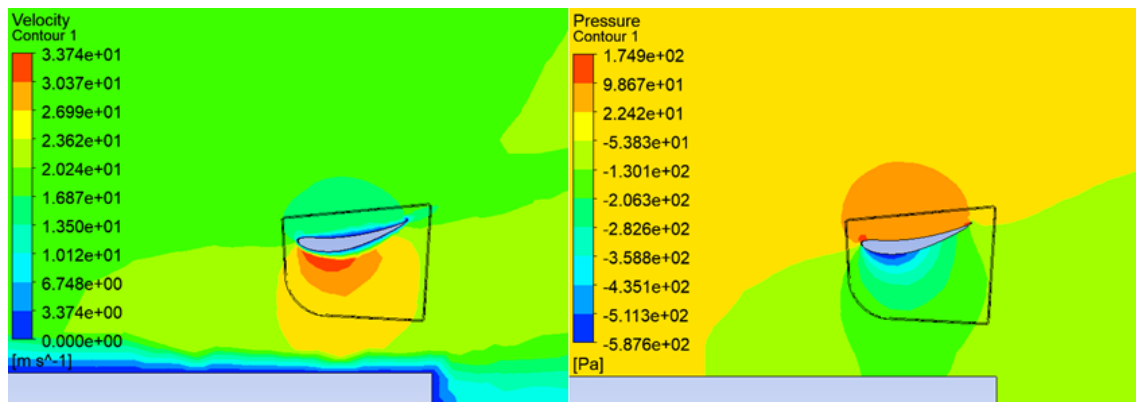


FIGURA 77. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES Y VELOCIDADES CON SOPORTE DE 30CM.

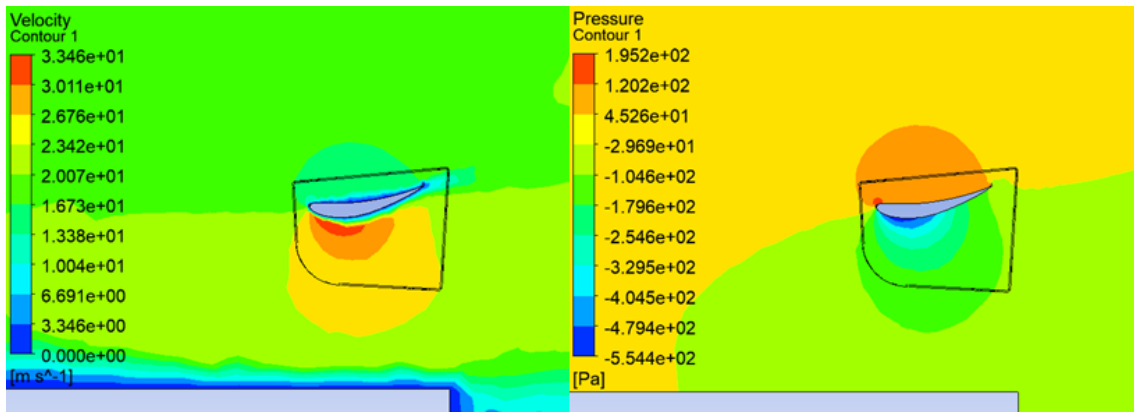


FIGURA 78. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES Y VELOCIDADES CON SOPORTE DE 40CM.

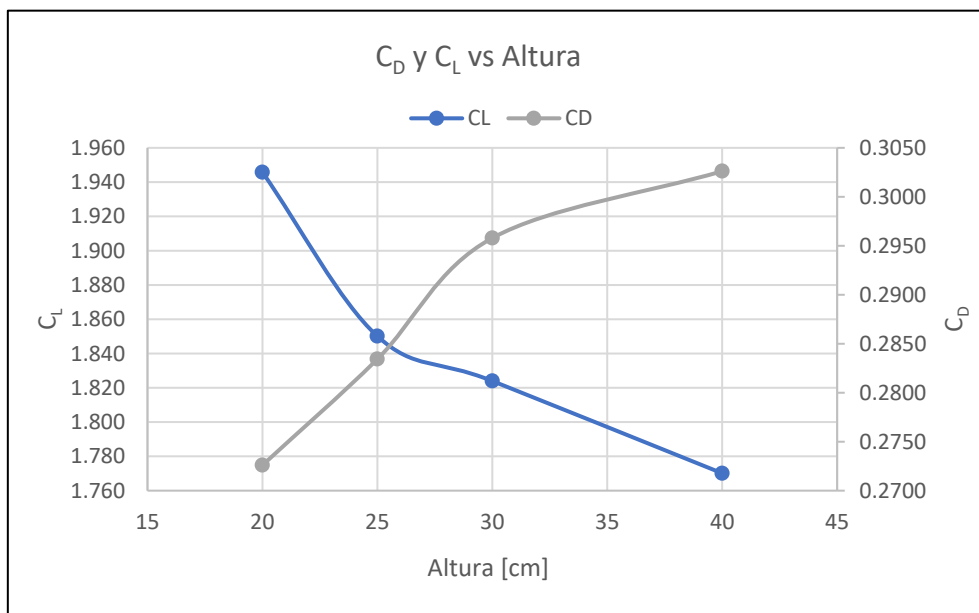


FIGURA 79. C<sub>D</sub> Y C<sub>L</sub> VS ALTURA.

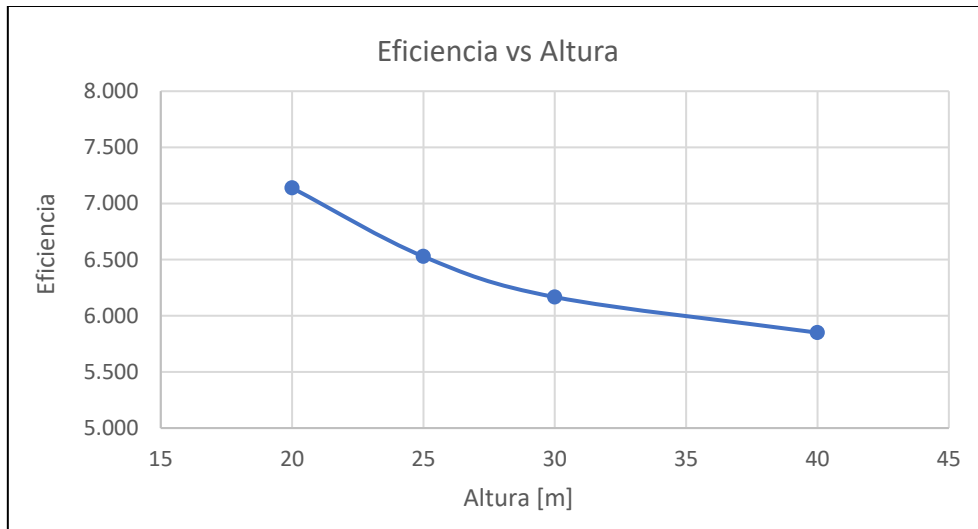


FIGURA 80. EFICIENCIA VS ALTURA.

Los resultados demuestran lo comentado, validando la hipótesis inicial de colocar el alerón lo más bajo posible. Además se puede apreciar que a medida que la distancia va aumentando los resultados se van estabilizando y el efecto suelo va perdiendo relevancia.

## MALLADO Y CONVERGENCIA DE RESULTADOS

En este apartado de anexos se pretende demostrar tres hechos:

1. Volumen de control suficientemente grande en simulaciones.
2. Mallado preciso pese a las limitaciones de la licencia de estudiantes.
3. Iteraciones suficientes en las simulaciones para la convergencia de los resultados.

Para el primer apartado se tomará como referencia un volumen de control de tamaño excesivo de tal forma que se asegure que no afecte al desarrollo del aire. Se elaborarán diferentes volúmenes de control, entre ellos el de las simulaciones, y se verá cómo influye este factor. Para esta demostración solo se medirá el *downforce* generado ya que esta es la variable afectada debido a la diferencia de presiones que puede crear la insuficiencia de espacio. Las dimensiones se irán controlando mediante la función "Enclosure" de Ansys.

Details of Enclosure	
Enclosure	Enclosure
Shape	Box
Number of Planes	0
Cushion	Non-Unif...
<input type="checkbox"/> FD1, Cushion +X value (>0)	3 m
<input type="checkbox"/> FD2, Cushion +Y value (>0)	1,5 m
<input type="checkbox"/> FD3, Cushion +Z value (>0)	1 m
<input type="checkbox"/> FD4, Cushion -X value (>0)	1 m
<input type="checkbox"/> FD5, Cushion -Y value (>0)	1,5 m
<input type="checkbox"/> FD6, Cushion -Z value (>0)	1 m

FIGURA 81. ENCLOSURE VOLUMEN DE CONTROL DE SIMULACIONES REALIZADAS.

Con los valores de la anterior imagen se crea el volumen de control que se puede observar en las figuras 22 y 23. Cabe destacar que para las simulaciones finales, debido a que el alerón tiene situado por debajo el coche, la distancia que se deja entre el alerón y la parte inferior del volumen de control pierde importancia.

Volumen de control	X+	X-	Y+	Y-	Z+	Z-	Downforce [N]	E <sub>absoluto</sub>	E <sub>relativo</sub> [%]
<b>Referencia</b>	15	5	7.5	7.5	5	5	248.0	-	-
<b>3x</b>	9	3	4.5	4.5	3	3	248.5	0.4670	0.1883
<b>2x</b>	6	2	3	3	2	2	248.6	0.5920	0.2387
<b>Simulaciones</b>	3	1	1.5	1.5	1	1	248.9	0.8987	0.3624
<b>0.75x</b>	2.25	0.75	1.125	1.125	0.75	0.75	250.9	2.890	1.166
<b>0.5x</b>	1.5	0.5	0.75	0.75	0.5	0.5	257.5	9.466	3.817
<b>0.25x</b>	0.75	0.25	0.375	0.375	0.25	0.25	269.2	21.22	8.557

TABLA 16. INFLUENCIA DEL TAMAÑO EN EL VOLUMEN DE CONTROL.

Como se puede observar, a medida que se va disminuyendo el volumen, sobre todo en los últimos casos, el *downforce* se ve bastante alterado, haciendo así que esos entornos generados no fueran válidos. Sin embargo, con el utilizado no se llega ni al 0.5% de error relativo, haciendo así que dicho volumen de control genere resultados confiables.

Los dos siguientes puntos se llevarán a cabo con el alerón final en una situación más realista y a 300km/h, donde se producen más turbulencias y por lo tanto el cálculo es más difícil, para así demostrar la fiabilidad de los resultados.



En el segundo, se demostrará que la limitación de 512.000 elementos no impide obtener resultados precisos. Para ello, se partirá del máximo número de elementos posibles, el cual será el más preciso, y se irá reduciendo para ver si los resultados siguen dependiendo de la malla.

Nº Elementos	Drag [N]	Downforce [N]	E <sub>absoluto</sub> Drag	E <sub>relativo</sub> Drag [%]	E <sub>absoluto</sub> Downforce	E <sub>relativo</sub> Downforce [%]
511633	553.0	3997	-	-	-	-
506489	554.6	3999	1.570	0.2839	2.816	0.0705
501211	554.8	3988	1.791	0.3239	8.952	0.2240
487598	552.6	3992	0.3980	0.0720	4.484	0.1122
471479	550.1	3989	2.956	0.5345	7.584	0.1898
441247	563.5	3910	10.46	1.891	86.28	2.159
404440	570.2	3864	17.16	3.103	133.0	3.328
354517	544.7	4079	8.360	1.511	82.12	2.054

TABLA 17. Nº DE ELEMENTOS Y PRECISIÓN DE MALLADO.

Analizando la tabla, se puede llegar a la conclusión de que la limitación dada por el programa no supone un impedimento en la precisión de los cálculos ya que al superar cierto número de elementos los valores se estabilizan, haciendo así que estos no dependan de la malla.

Finalmente, se expondrá el motivo de por el cual se han considerado suficientes 500 iteraciones por simulación.

Iteración	Drag [N]	Downforce [N]	E <sub>absoluto</sub> Drag	E <sub>relativo</sub> Drag [%]	E <sub>absoluto</sub> Downforce	E <sub>relativo</sub> Downforce [%]
400	552.1	3993	0.8362	0.1512	2.208	0.0553
450	552.5	3990	0.4562	0.0825	5.008	0.1254
460	551.9	3990	1.006	0.1820	5.308	0.1329
470	553.6	3993	0.6938	0.1255	1.608	0.0402
480	553.9	3998	1.004	0.1816	3.192	0.0799
485	553.3	3998	0.3338	0.0604	3.592	0.0899
490	552.8	3997	0.0862	0.0156	1.892	0.0474
495	552.9	3995	0.0038	0.0007	0.3923	0.0098
496	553.0	3995	0.0738	0.0134	0.5923	0.0148
497	553.0	3996	0.0638	0.0115	0.6923	0.0173
498	552.9	3996	0.0138	0.0025	0.7923	0.0198
499	553.0	3996	0.0838	0.0152	1.292	0.0323
500	553.0	3997	0.1138	0.0206	1.692	0.0424
Valores medios	552.9	3995	0.3669	0.0664	2.174	0.0544

TABLA 18. ITERACIONES FINALES DE SIMULACIONES.

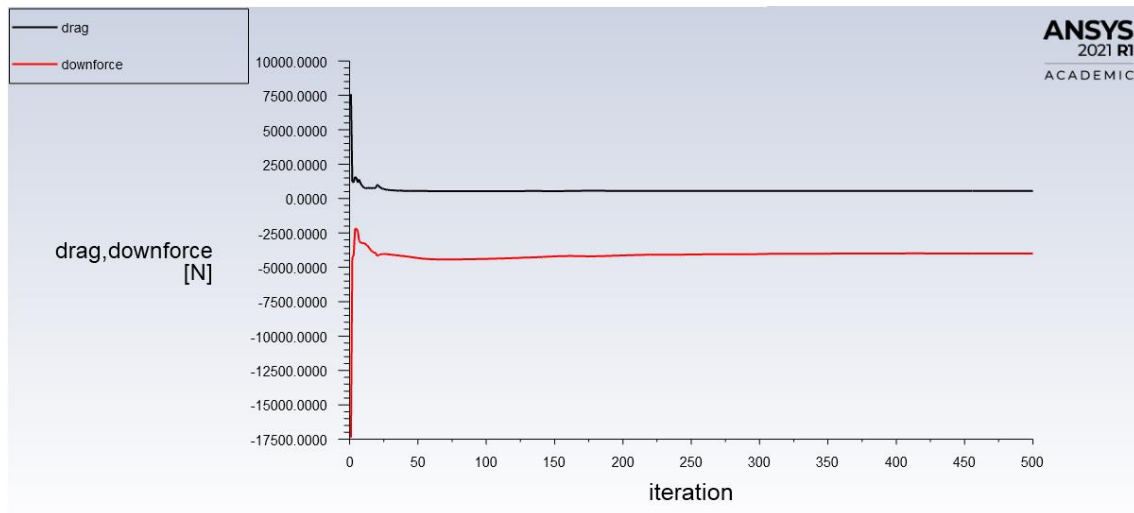


FIGURA 82. CONVERGENCIA DE RESULTADOS.

Tal y como se aprecia, las 500 iteraciones realizadas por simulación son más que suficientes para conseguir estabilizar las variables y que converjan.

Vistos estos tres apartados, y añadiéndolos a la correlación realizada con el túnel de viento, quedan argumentados todos los cálculos llevados a cabo en el proyecto.

PLANOS

