

Trabajo de Fin de Grado  
Grado de Ingeniería Aeroespacial

Diseño, desarrollo y fabricación de Maqueta de un  
alerón delantero de Fórmula Student

Autor: Manuel Fernando Torres Espejo

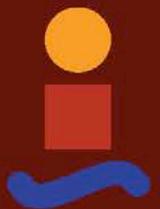
Tutor: Sergio Esteban Roncero

Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de  
Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016





Trabajo de Fin de Grado  
Grado de Ingeniería Aeroespacial

# **Diseño, desarrollo y fabricación de Maqueta de un alerón delantero de Fórmula Student**

Autor:

Manuel Fernando Torres Espejo

Tutor:

Sergio Esteban Roncero

Profesor titular

Dep. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Proyecto Fin de Carrera: Diseño, desarrollo y fabricación de Maqueta de un alerón delantero de Fórmula Student

Autor: Manuel Fernando Torres Espejo

Tutor: Sergio Esteban Roncero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

# Agradecimientos

---

A mis profesores, todos y cada uno de ellos siempre dejan una huella, una pequeña huella imborrable que pasa a forma parte de este pequeño logro que es la Ingeniería Aeroespacial. Especialmente a mi tutor, demostrando su pasión por lo que hace no es más que el pilar en la sombra de este proyecto.

Al equipo ARUS, que es algo más que un coche, es una pasión, es un sueño, es un deseo, todo ello mezclado en la experiencia más estresante y enriquecedora que he tenido en estos años universitarios y estoy seguro que no sólo ha marcado mi presente sino ha marcado ya mi futuro.

A la eterna Team Leader, porque ella es una parte fundamental del equipo y sin ella, seguramente nuestra pequeña máquina sería un poquito menos compleja y a mi modo de ver triste y fea.

A todos aquellos que hicieron un encargo de maquetas de un pequeño vehículo monoplaça y que de no ser por ellos, este proyecto no sería una realidad.

A mi familia porque son los que después de un día duro están ahí para lo que necesite, y siempre con una sonrisa por respuesta.

A mi segunda familia, esa familia que se elige, esa familia que hace que la vida Universitaria sea la experiencia más enriquecedora a la que me he enfrentado.

## Índice

Referencias.....	2
Índice de Figuras .....	2
Índice de Tablas.....	5
1.-Introducción.....	6
1.1.-Estado del Arte.....	6
1.2.- El Equipo ARUS.....	8
1.3.-Objetivos .....	10
2.-Análisis 2D.....	11
2.1.-Uso de Java Foil.....	11
2.2.-Velocidad de Operación (Número de Reynolds).....	17
2.3.-Casos y evolución del estudio .....	19
2.4.-Conclusiones del estudio .....	35
3.-Análisis 3D.....	37
3.1.-Diseño modelo completo 3d del alerón.....	37
3.2.-Uso de Ansys Fluent.....	42
3.3.-Distintos casos estudiados y evolución de los resultados .....	49
3.4.-Conclusiones .....	56
4.-Fabricación Maqueta 3D.....	57
4.1.-Adaptación de Impresora 3D del departamento de Aeroespacial .....	57
4.2.-Uso de la impresora 3D.....	63
4.3.-Fabricación del modelo y decisión de la escala .....	65
4.4.-Preparación del modelo para su introducción en túnel de viento .....	72
5.- Ensayo de Control en Túnel de viento .....	78
5.1.-Resultados en Fluent para Modelo completo de alerón y Morro .....	78
5.2.-Condiciones de ensayo .....	79
5.3.-Resultado de ensayo .....	80
6.-Conclusiones .....	81
6.1.-Trabajos Futuros .....	81
Anexo 1.-Uso de Ansys Fluent.....	82
Anexo 2.-Manual de uso de la impresora 3D.....	96

## Referencias

### Índice de Figuras

Ilustración 1 Formula Student Germany 2015	6
Ilustración 2 Prueba de Design FS Germany 2015	7
Ilustración 3 ART-14	8
Ilustración 4 ART-15	9
Ilustración 5 Organigrama ARUS	9
Ilustración 6 Pantalla Geometría Java Foil	11
Ilustración 7 Pantalla Modificar perfiles Java Foil	12
Ilustración 8 Pantalla Modificar perfiles java Foil (2)	13
Ilustración 9 Pantalla Velocidad Java Foil	14
Ilustración 10 Ejemplo Resultados de velocidad	15
Ilustración 11 Ejemplo resultados Campo Fluido	16
Ilustración 12 Ejemplo resultado Cp-Vectors	16
Ilustración 13 Circuito FS Germany	17
Ilustración 14 Normativa de colocación de Elementos Aerodinámicos	19
Ilustración 15 Plantilla de colocación de elementos aerodinámicos	20
Ilustración 16 Modelo 1 Análisis 2D	21
Ilustración 17 Resultados modelo 1 (1)	22
Ilustración 18 Resultados modelo 1 (2)	22
Ilustración 19 Resultados modelo 1 (3)	23
Ilustración 20 Resultados modelo 1 (4)	23
Ilustración 21 Resultados modelo 1 (5)	24
Ilustración 22 Resultados modelo 1 (6)	24
Ilustración 23 Modelo 2 Análisis 2D	26
Ilustración 24 Resultados modelo 2 (1)	26
Ilustración 25 Resultados modelo 2 (2)	27
Ilustración 26 Resultados modelo 2 (3)	27
Ilustración 27 Modelo 3 Análisis 2D	29
Ilustración 28 Resultados modelo 3 (1)	29
Ilustración 29 Configuración 15º modelo 3	31
Ilustración 30 Resultados configuración 15º modelo 3	31
Ilustración 31 Configuración 25º modelo 3	32
Ilustración 32 Resultados configuración 25º modelo 3	32
Ilustración 33 Configuración 30º modelo 3	33
Ilustración 34 Resultados configuración 30º modelo 3	33
Ilustración 35 Posición de alerón respecto a la plantilla	36
Ilustración 36 Archivo excel para perfil en CATIA	37
Ilustración 37 Interior archivo excel	38
Ilustración 38 Archivo excel modificado	38
Ilustración 39 Puntos perfil 2D alerón modelo 3	39

Ilustración 40 Modelo 1 3D descartado	40
Ilustración 41 Modelo 2 3D final	40
Ilustración 42 Vista lateral Modelo 2 3D	41
Ilustración 43 Condición de contorno en la carretera	43
Ilustración 44 Condición de contorno en la entrada de velocidad	44
Ilustración 45 Condición de contorno de salida	45
Ilustración 46 Proyección de áreas para adimensionalización	46
Ilustración 47 Convergencia de CI	47
Ilustración 48 Convergencia de CI segundo orden	47
Ilustración 49 Líneas de corriente 15º	50
Ilustración 50 Campo de presiones etapa central 15º	50
Ilustración 51 Campo de presiones zona principal 15º	51
Ilustración 52 Líneas de corriente 25º	52
Ilustración 53 Campo de presiones etapa central 25º	52
Ilustración 54 Campo de presiones zona principal 25º	53
Ilustración 55 Líneas de corriente 30º	54
Ilustración 56 Campo de presiones etapa central 30º	55
Ilustración 57 Campo de presiones zona principal 30º	55
Ilustración 58 Piezas realizadas para la adaptación de la impresora 3D	58
Ilustración 59 Instalación del Hot-End	59
Ilustración 60 Comparación de los tipos de extrusor	60
Ilustración 61 Electrónica Impresora 3D del departamento	61
Ilustración 62 Heated Bed (Cama caliente)	62
Ilustración 63 Pantalla LCD con lector de tarjetas incorporado	62
Ilustración 64 Importación de modelo	63
Ilustración 65 Selección de perfil de impresión	63
Ilustración 66 Tiempo de impresión	64
Ilustración 67 Cantidad de material	64
Ilustración 68 Características PLA	66
Ilustración 69 Modelo a imprimir de aleron	67
Ilustración 70 Modelo a imprimir de morro	67
Ilustración 71 Piezas impresas	68
Ilustración 72 Montaje de la maqueta	69
Ilustración 73 Montaje final	69
Ilustración 74 Corte de placas aluminio	70
Ilustración 75 Endplate aluminio	70
Ilustración 76 Morro pegado y listo para su integración con el resto de la maqueta	71
Ilustración 77 Preparación de los perfiles	72
Ilustración 78 Maqueta completa	73
Ilustración 79 Carga Máxima por eje	74
Ilustración 80 Cogida de barras transversales con transductor anclado	74
Ilustración 81 Proceso de fabricación de la abrazadera de aluminio	75
Ilustración 82 Placa de aluminio de la cogida interna	75
Ilustración 83 Cogida interna montada	76
Ilustración 84 Maqueta instalada en el túnel de viento	77

Ilustración 85 Líneas de corriente etapa móvil a 25º	78
Ilustración 86 Líneas de corriente con etapa móvil a 25º	79
Ilustración 87 Workbench Ansys	82
Ilustración 88 Modelo importado a la parte de geometría de Fluent	83
Ilustración 89 Blend Realizado	83
Ilustración 90 Enclosure Realizado	84
Ilustración 91 Características Meshing	85
Ilustración 92 Características Meshing (2)	85
Ilustración 93 Program Controlled Inflation	86
Ilustración 94 Datos de Skewness	87
Ilustración 95 Configuración de Solucionador de Fluent	87
Ilustración 96 Selección del modelo de viscosidad que resolveremos	88
Ilustración 97 Condicion de contorno de Carretera	89
Ilustración 98 Condición de contorno de Velocidad de entrada	90
Ilustración 99 Condición de contorno de salida del Enclosure	90
Ilustración 100 Cálculo del Área proyectada para la adimensionalización	91
Ilustración 101 Selección del orden de la ecuación a resolver	92
Ilustración 102 Factores de relajación del problema	93
Ilustración 103 Generación de reportes de datos de Cl y Cd	93
Ilustración 104 Cl convergiendo en Primer orden	94
Ilustración 105 Cl convergiendo en segundo orden	94
Ilustración 106 Pasos por milímetro de los motores de cada eje	96
Ilustración 107 Altura de el final de carrera del eje z con respecto a la punta del Hot-End	97
Ilustración 108 Configuración del puerto serie de la impresora 3D	98
Ilustración 109 Configurando dimensiones de la Impresora 3D	98
Ilustración 110 Panel de control Manual	99
Ilustración 111 Proceso de calibración del autonivel (1)	100
Ilustración 112 Proceso de calibración del autonivel (2)	100
Ilustración 113 Proceso de calibración del autonivel (3)	100
Ilustración 114 Proceso de calibración del autonivel (4)	100
Ilustración 115 Proceso de calibración del autonivel (5)	101
Ilustración 116 Proceso de calibración del autonivel (6)	101
Ilustración 117 Importar modelo para impresión	101
Ilustración 118 Selección del perfil de Impresión	102
Ilustración 119 Tiempo de Impresión	102
Ilustración 120 Cantidad de material	102

## Índice de Tablas

Tabla 1 Resultados Modelo 1	25
Tabla 2 Resultados Modelo 2	28
Tabla 3 Resultados Modelo 3	34
Tabla 4 Comparativa de resultados análisis 2D	35
Tabla 5 Resultado Fluent 15º	49
Tabla 6 Resultado deshaciendo la simetría del modelo 15º	49
Tabla 7 Resultado Fluent 25º	51
Tabla 8 Resultado deshaciendo la simetría del modelo 25º	52
Tabla 9 Resultados Fluent 30º	53
Tabla 10 Resultado deshaciendo la simetría del modelo 30º	54
Tabla 11 Recopilación de resultados Fluent	56
Tabla 12 Resultados Fluent con morro	78
Tabla 13 Resultados túnel de viento	80

## 1.-Introduccion

### 1.1.-Estado del Arte

Para entender el alcance y objetivo de este proyecto conviene primero explicar con cierta profundidad que es la Fórmula Student y qué es el equipo de Fórmula Student ARUS.

La fórmula Student es una de las competiciones a nivel Universitario de alcance mundial más importante del mundo. La competición, también llamada FSAE está regulada por el colegio de ingenieros británico y lleva actualmente 18 ediciones disputada. El número de competiciones que se hacen a lo largo del año, se encuadran principalmente en los meses de verano, ya que, al tratarse de una competición universitaria, son estos meses en los que se pueden disputar sin afectar sobremanera a los calendarios lectivos de las distintas universidades participantes.

Al tratarse de una competición a nivel Mundial se realizan eventos en gran parte del Mundo, desde EE.UU hasta Australia, pasando por Alemania, España, Reino Unido, etc.

Esta competición consiste en el diseño y la fabricación de un monoplaza tipo fórmula (Ruedas descubiertas y sin cabina cubierta). En el apartado de diseño la competición está regida por un reglamento en el que se detalla desde las dimensiones máximas y mínimas del coche, hasta aspectos como la posición del piloto dentro del cockpit o la cilindrada máxima del motor.



Ilustración 1 Formula Student Germany 2015

Los eventos de la Fórmula Student están divididos en dos partes claramente diferenciadas en las que se desarrollan todos los aspectos aplicables a la ingeniería, tenemos por tanto una parte de aplicación de conocimientos

teóricos, que engloban tres pruebas: Design, Business Plan, Cost Report. Para después pasar a una aplicación de conocimientos prácticos que podríamos considerar las pruebas dinámicas como son Acceleration, Skidpad, Autocross y Endurance.

Dentro de las partes de la competición de aplicación teórica nos centraremos en la prueba de design, en la que, ante un jurado experto en el mundo de la automoción hay que defender el diseño y soluciones llevadas a cabo en el monoplaza, en la parte que nos centramos englobamos todo el diseño aerodinámico del mismo, su justificación y pruebas reales del mismo para establecer una relación que vaya desde la hoja de dibujo hasta la pista.



Ilustración 2 Prueba de Design FS Germany 2015

Pasamos ahora a las pruebas dinámicas, donde el monoplaza tiene que demostrar su efectividad atendiendo a los resultados teóricos obtenidos, para evaluar los mismos el monoplaza es sometido a distintas pruebas como ya hemos comentado anteriormente:

- Acceleration: Prueba de aceleración en línea recta, donde interesa una baja resistencia aerodinámica para destinar toda la potencia del motor a acelerar en el menor tiempo posible y recorrer los 75m de los que constan dicha prueba.
- Skidpad: Prueba de aceleración lateral, mediante un circuito de ochos, en esta prueba por tanto, necesitamos unos requisitos totalmente dispares, una alta

carga aerodinámica nos proporcionará mayor downforce y por tanto mayor agarre y aceleraciones laterales

- Autocross: Podríamos considerar esta prueba como una vuelta rápida clasificatoria para carrera por lo que una configuración de aerodinámica adaptada al circuito es sin duda la mejor de las opciones
- Endurance: Prueba de resistencia, lo que podríamos asemejar a una carera, al igual que en la prueba del autocross, lo mejor será sin duda una configuración adaptada al circuito, primando más en las curvas que en las rectas al ser estas habitualmente cortas y con conos en muchas de ellas.

Hay que destacar uno de los requisitos más duros de esta competición en la que para poder competir, el coche tiene que pasar previamente una serie de inspecciones técnicas a modo de verificación de cumplimiento de la reglamentación técnica, siendo esta una de las partes más duras de la competición en la que ante todo prima la seguridad.

## 1.2.- El Equipo ARUS

El equipo ARUS Andalucía Racing Team es el equipo Formula Student que representa a la Universidad de Sevilla. Fue fundado en Septiembre de 2012 y ya está preparando su tercer coche para competir en las pruebas Formula Student Germany y Formula Student Spain que se desarrollarán durante los meses de Julio y Agosto de 2016. Su tendencia ascendente es clara si se ven los dos monoplazas fabricados hasta la fecha:



Ilustración 3 ART-14



Ilustración 4 ART-15

La evolución es clara y como puede observarse, del ART-14, cuyo trabajo estaba basado en la fiabilidad del monoplaça, se da un claro salto competitivamente hablando hacia el ART-15 en el que se añade un paquete aerodinámico para mejorar sus prestaciones en las pruebas comentadas.

Por último mostramos el organigrama del equipo para ver claramente los distintos grupos o departamentos de trabajo en los que se divide.

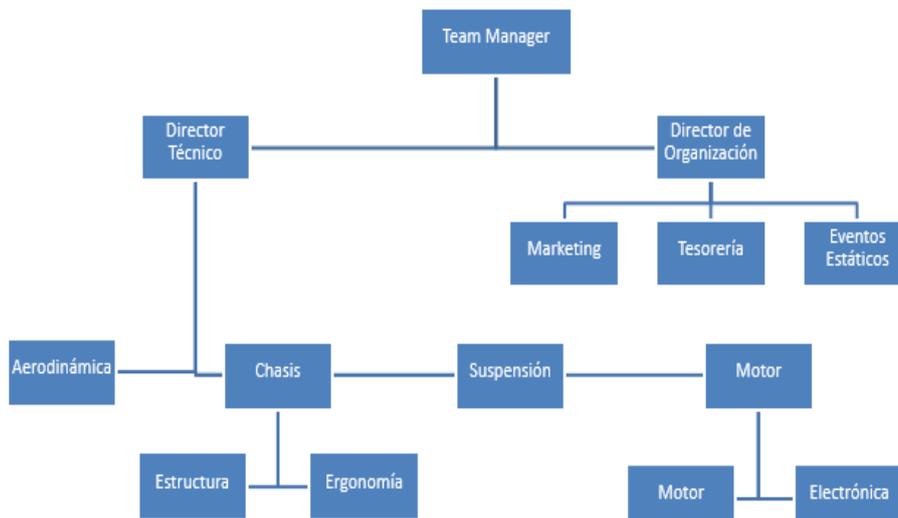


Ilustración 5 Organigrama ARUS

### 1.3.-Objetivos

Expuesto el marco alrededor de este proyecto, nuestro objetivo es el estudio en profundidad del alerón delantero del ART-16 prototipo en actual fase de desarrollo, montaje y prueba. Tomando como clave los desarrollos ya realizados con anterioridad por miembros del equipo durante los años previos.

Tal y como se ha mostrado, lo ideal para la competición que nos ocupa es una aerodinámica fácilmente ajustable a la situación en la que se requiera competir, esto nos proporciona un nicho fácil de explotar en el que conseguir un gran avance en las prestaciones del ART-16 dada cada circunstancia de las distintas pruebas a realizar.

Otro de los factores que impulsan la realización de este proyecto es el poder disponer de las instalaciones de la Escuela técnica superior de Ingeniería de Sevilla, en la que su túnel de viento nos proporciona un factor clave a la hora de analizar modelos a escala de los elementos aerodinámicos del monoplaza. También contando con nuevas tecnologías altamente desarrolladas en los últimos años como es la impresión 3D por adición de material o también conocida como FDM, nos da unas posibilidades enormes a la hora de la fabricación rápida de modelos para su ensayo.

Podemos resumir por tanto los objetivos de este proyecto cómo:

- Estudio 2D detallado de las posiciones de los perfiles del alerón delantero, su tamaño, y la variación del  $C_L$  con el ángulo de ataque de la segunda etapa del mismo. Consiguiendo optimizar dicho coeficiente respetando la normativa de la competición.
- Estudio 3D del modelo de alerón delantero con el objetivo corroborar una relación entre los análisis 2D con los análisis 3D posibilitando el futuro desarrollo rápido utilizando modelos 2D de mucha rapidez en sus cálculos.
- Adaptación de la impresora 3D tipo FDM de la que dispone el departamento de Ingeniería Aeroespacial para su uso en este y en futuros proyectos como herramienta de prototipado rápido.
- Construcción de una maqueta a escala del modelo de alerón para su posterior introducción en túnel de viento.
- Corroborar los resultados obtenidos en túnel de viento con los resultados obtenidos en los análisis por ordenador realizados a lo largo del proyecto

## 2.-Análisis 2D

### 2.1.-Uso de Java Foil

Para el análisis y optimización de la posición de las etapas del alerón delantero se hace uso del programa Java foil, este programa permite realizar de manera rápida una gran cantidad de análisis de distintas configuraciones. De esta forma obtenemos de manera muy rápida unos resultados orientativos que son de gran utilidad en la fase inicial del desarrollo del alerón. Estos resultados nos servirán como guía para el posterior estudio del modelo en 3D mediante el uso de CFD.

La elección del programa java foil se debe principalmente a su sencillez de uso y a su rapidez. El programa nos permite introducir modelos multiplano, para el caso que nos ocupa introduciremos dos planos en nuestros análisis.

A continuación procedemos a explicar el uso del programa java foil. Java foil es una sencilla aplicación programada en java, lo cual permite desde usarlo online sin necesidad de instalar el programa o bien, instalar el programa para poder usarlo de manera offline sin ningún tipo de restricciones.

Vamos a ir navegando a través de su interfaz y explicando poco a poco cada una de sus pantallas.

Geometría del perfil

Nombre: NACA 0012

Coordenadas:

1,00000	0,00000
0,99846	0,00022
0,99384	0,00087
0,98618	0,00194
0,97553	0,00341
0,96194	0,00527
0,94550	0,00747
0,92632	0,00998
0,90451	0,01277
0,88020	0,01581
0,85355	0,01903
0,82472	0,02241
0,79389	0,02590
0,76125	0,02946
0,72700	0,03305
0,69134	0,03661
0,65451	0,04009
0,61672	0,04346

decimal digits: 5

Borrar

Crear un perfil NACA:

Familia: NACA 4 digitos (e.g. 2412)

Numero de Puntos: 81 [-]

Espesor max t/c: 12 [%]

Situación del espesor max xt/c: 30 [%]

Curvatura max f/c: 0 [%]

Situación de la curvatura max xf/c: 0 [%]

Modificar el perfil NACA cerrando el borde de salida

Es una familia de proposito general

Crear un perfil

Forma del Perfil

Para los siguientes análisis el borde de salida debería ser cerrado.

Actualizar vista Copiar (Texto) Pegar (Texto) Abrir... Guardar... Imprimir... Compare...

Ilustración 6 Pantalla Geometría Java Foil

Esta es la pantalla principal de Java foil, en esta primera pantalla es en la que introducimos los puntos que representan el perfil a utilizar en los análisis, en el caso de la imagen el perfil que aparece es un NACA 0012. No obstante para todos nuestros análisis se utiliza un perfil Selig 1223.

Pasamos ahora a la pantalla con la que mas trabajaremos en este programa que es la de modificación de los perfiles

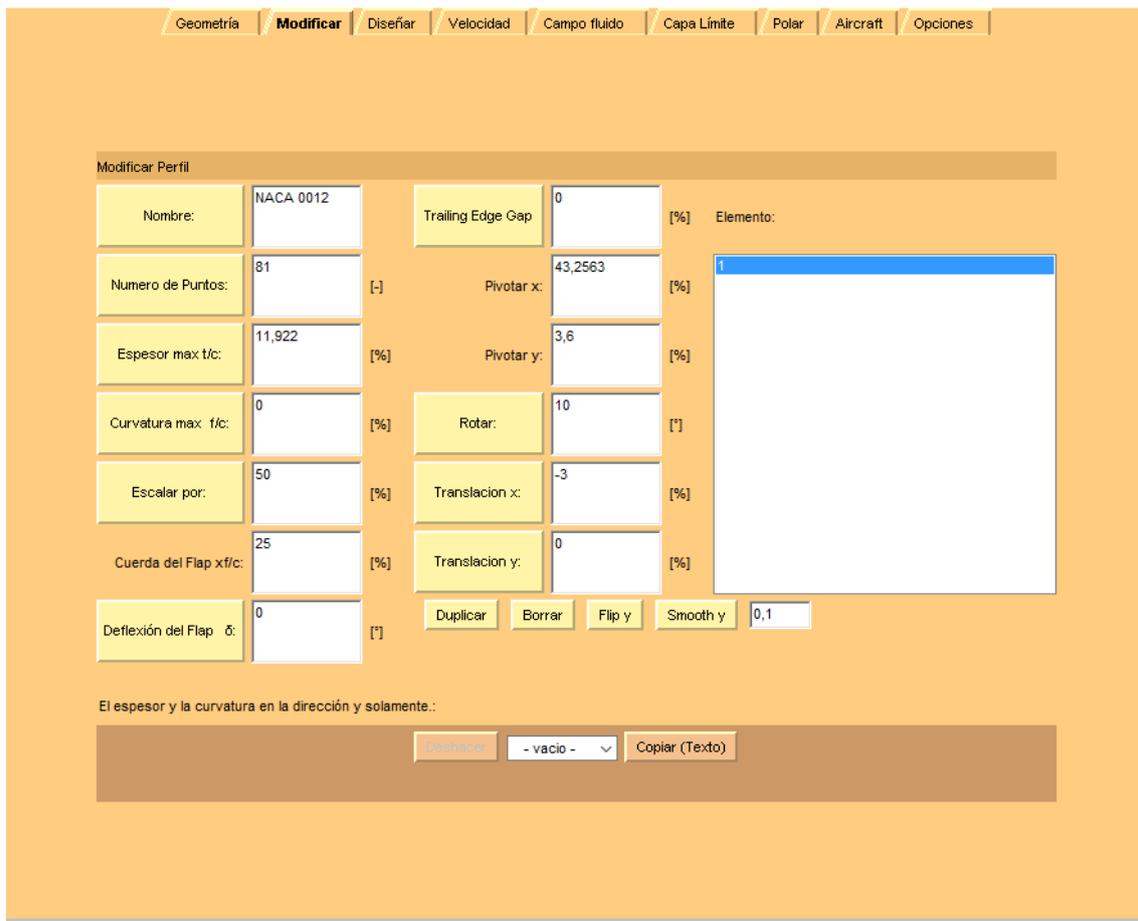


Ilustración 7 Pantalla Modificar perfiles Java Foil

En esta pantalla haremos todos los cambios necesarios al perfil, dentro de los cambios posibles tenemos los siguientes:

-Aumentar el número de puntos del perfil: Puede llegar a ser útil para obtener una representación mas exacta del perfil, sobre todo en los bordes de ataque y de salida que es donde más resolución necesitamos en el análisis.

-Escalar perfil: Esta herramienta la usaremos para dar el tamaño adecuado a los perfiles que conformaran el alerón delantero, el escalado se produce respecto al tamaño inicial del perfil y en porcentaje de cuerda.

Pivotar x y Pivotar y: Estas dos opciones se usan para situar el punto que hará de pivote en las rotaciones que hagamos a los perfiles para cambiar su ángulo de ataque, siendo así, se intentará situar lo más ajustado a  $c/4$  de cada perfil en la medida de lo posible.

Rotar: Usaremos esta herramienta para rotar el perfil el ángulo que necesitemos en cada ensayo que hagamos, siempre teniendo en cuenta que el perfil rotará respecto al punto de pivote que situemos.

Traslación en x y Traslación en y: Esta herramienta se usa para desplazar el perfil en el plano mediante aumentos que seleccionamos manualmente en la casilla, será la herramienta que más usemos teniendo en cuenta el objeto del proyecto

Flip Y: Esta última herramienta sirve para darle la vuelta al perfil, la usaremos como paso inicial en el desarrollo de los análisis ya que como queremos analizar un alerón para Formula Student, los perfiles tienen que generar Downforce en lugar de sustentación. Como detalle importante de esta operación el giro del eje y lo hace respecto a la posición del punto Pivote por lo que es importante que este esté situado en el eje X cuando vayamos a realizar la operación de inversión.

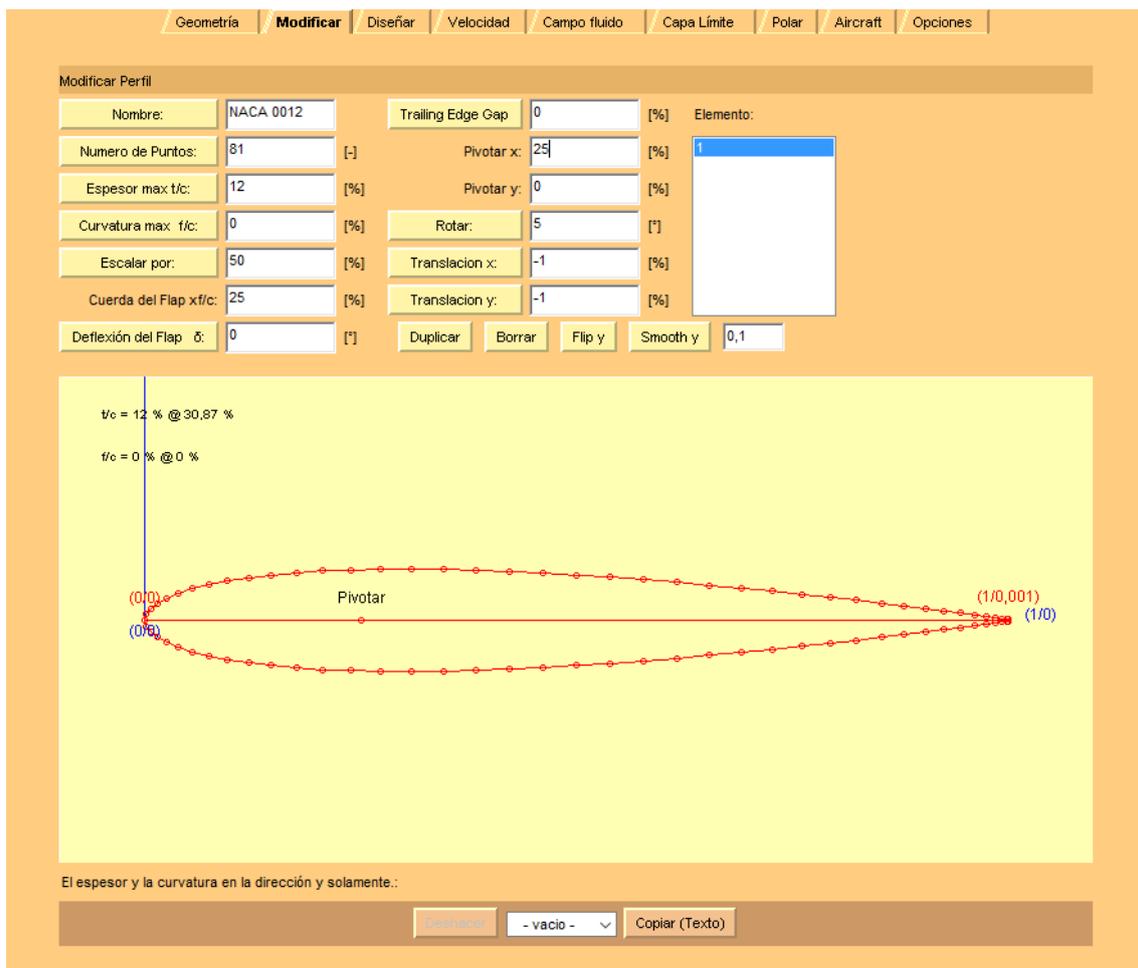


Ilustración 8 Pantalla Modificar perfiles java Foil (2)

Es muy importante remarcar que en la pestaña modificar cuando trabajemos con más de un perfil, es decir, elementos multiplano como es nuestro caso, la transformación que hagamos se realizará sólo en el perfil que tengamos seleccionado en la ventana de la derecha “Elemento”

La siguiente pantalla que explicaremos del programa será la pestaña de velocidad, que una vez abierto tiene este aspecto

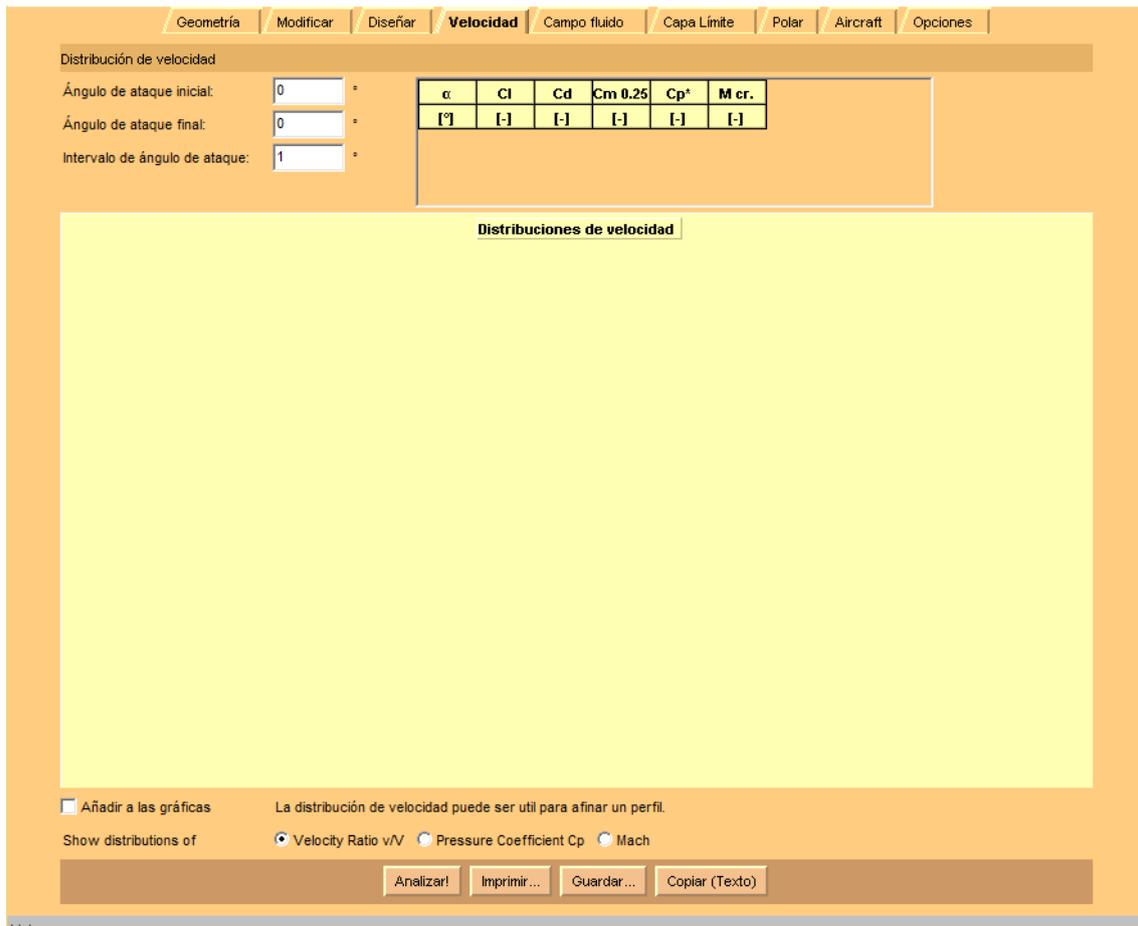
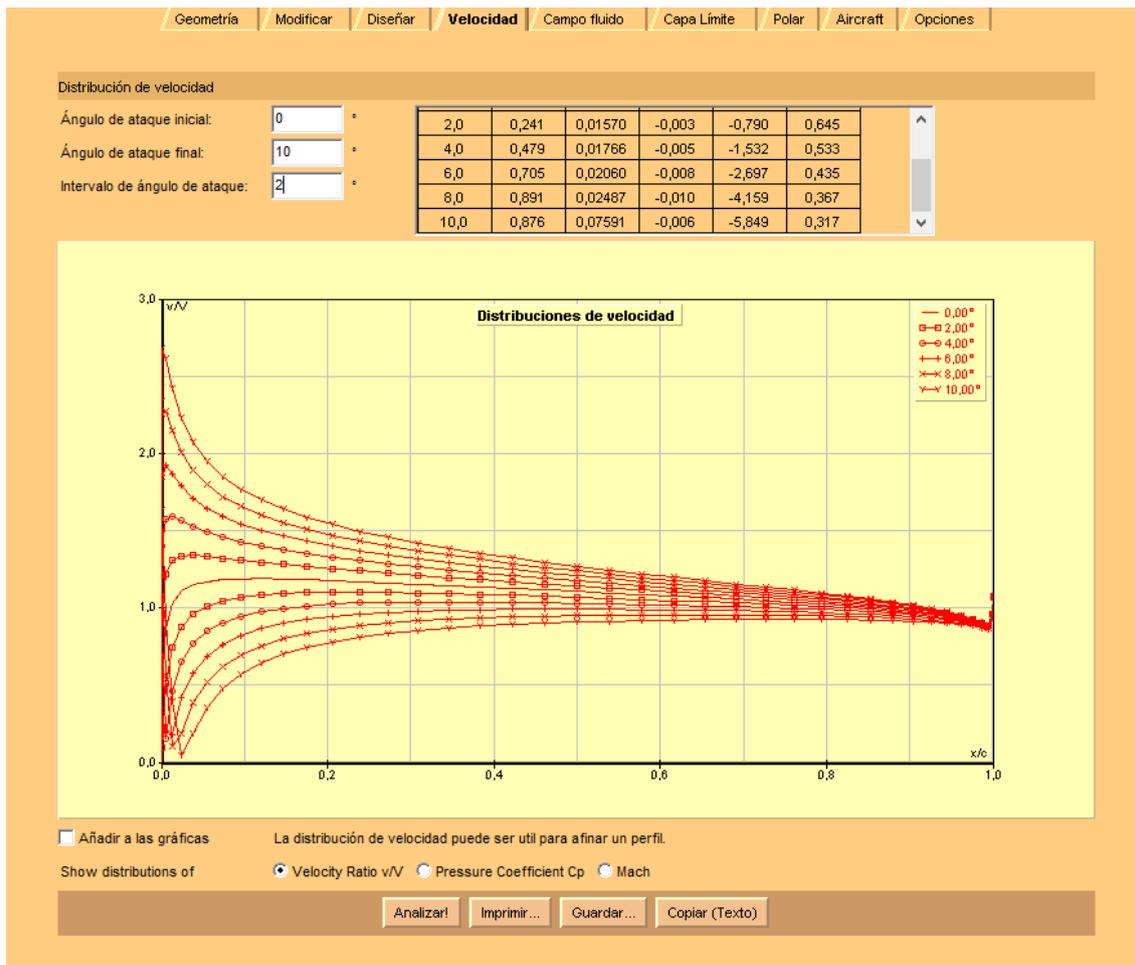


Ilustración 9 Pantalla Velocidad Java Foil

En esta pantalla obtenemos una grafica del perfil de velocidades al que se somete el elemento que tengamos seleccionado en la ventana “Modificar”.

Podemos hacer distintos análisis simultáneos indicando distintos ángulos de ataque de inicio y fin en el análisis, así como el salto entre cada ensayo. Además de mostrar el perfil de velocidades nos muestra el resultado de  $C_L$  y  $C_d$  de cada ensayo además de otros datos como el Mach crítico del perfil en el ensayo.

El aspecto de los resultados mostrados en esta ventana es el siguiente, utilizando distintos ángulos de ataque.



#### Ilustración 10 Ejemplo Resultados de velocidad

Como se puede observar, de esta forma se agiliza sobremanera el trabajo en caso de tener que analizar un único elemento, en caso de tener que analizar dos o más elementos a distintos ángulo de ataque independiente el uno del otro, lo más recomendable es realizar cada ensayo de manera individual.

Pasamos ahora a la siguiente ventana del programa que nos permite observar de forma bastante intuitiva el campo fluido del perfil o perfiles que estamos ensayando. En esta ventana “Campo fluido” además de la representación del campo fluido podemos representar el campo de presiones generado y las líneas de corriente entre otras cosas.

Esta ventana resulta bastante útil a la hora de interpretar cualitativamente si los resultados son coherentes ya que al mostrarnos el campo fluido permite ver con mayor facilidad si la corriente se comporta de manera coherente

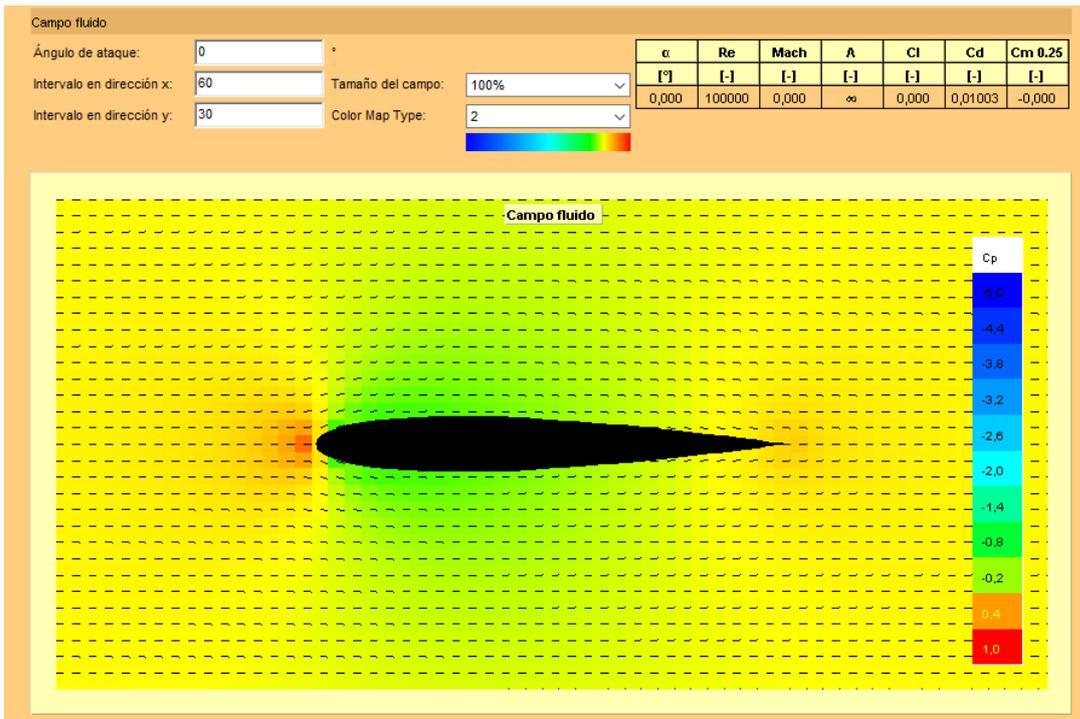


Ilustración 11 Ejemplo resultados Campo Fluido

A continuación presentamos otra imagen con las líneas de corriente los vectores de presión

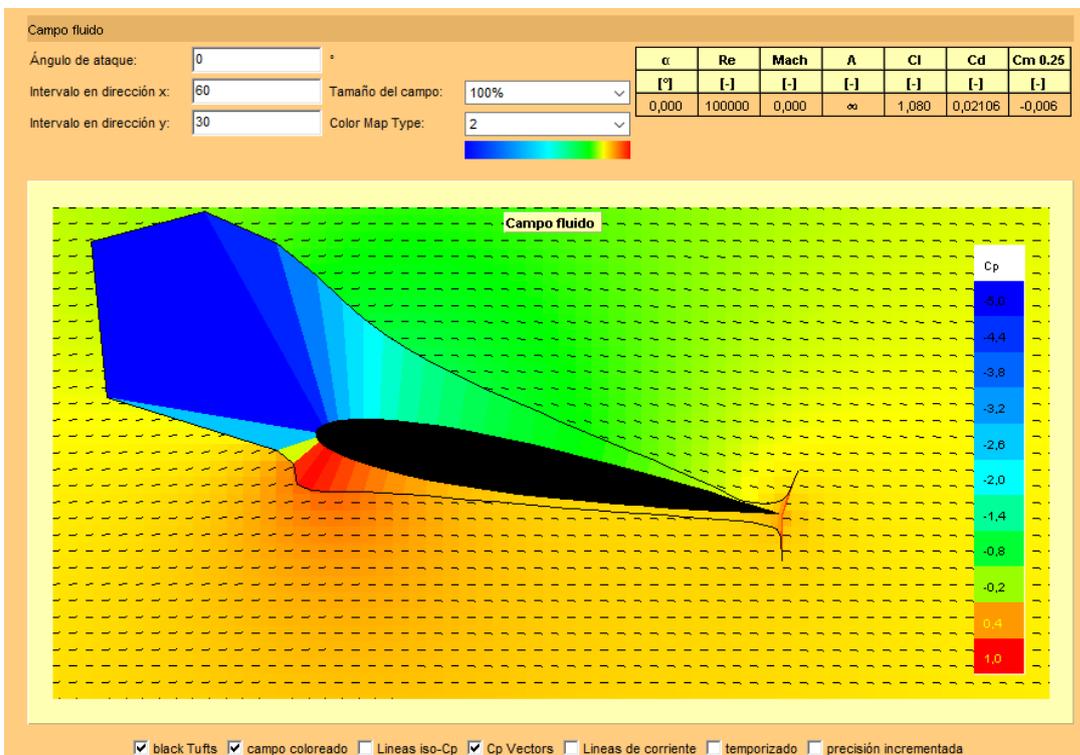


Ilustración 12 Ejemplo resultado Cp-Vectors

Los demás apartados de este programa no se han entrado en profundidad en su uso por lo que no se explicarán en este manual de uso del programa

## 2.2.-Velocidad de Operación (Número de Reynolds)

La pregunta principal que surge a la hora de realizar todos los análisis de elementos aerodinámicos es el encuadre dentro de un marco adecuado de uso. En nuestro caso estamos desarrollando elementos de Formula Student, tratándose de este de un marco bastante desconocido especialmente en España conviene explicar brevemente en qué consiste la competición y en qué tipo de escenarios se lleva a cabo.

Como ya se ha explicado previamente, la Formula Student es una competición Universitaria a Nivel mundial, en el que participan más de 600 Universidades de todo el mundo en las distintas competiciones tanto en Europa como fuera de ella.

Particularmente en Europa, los circuitos se caracterizan por ser muy revirados y sin grandes rectas en las que alcanzar altas velocidades.

Como ejemplo presentamos la imagen del recorrido del año pasado de la competición de Alemania.



Ilustración 13 Circuito FS Germany

Para hacernos una idea de lo revirado y lento que es el circuito sabemos que la longitud del mismo es de 1,2 Km aproximadamente, habiendo en las rectas más largas del mismo zonas de zig-zags en conos (entre las curvas wings y broken dreams) y zonas de adelantamiento de doblados en las otras rectas.

Dadas las características de los circuitos, las velocidades puntas y medias de los monoplazas de la Formula Student no son especialmente altas, por tanto, para todos los ensayos consideraremos una velocidad media de 50Km/h. Esta velocidad nos dará el punto de ensayo de todos los análisis que realicemos de aquí en adelante.

Conociendo que el número de Reynolds viene dado por la velocidad a la que se mueve el vehículo que queramos analizar, así como la longitud característica del alerón. Podemos determinar que el número de Reynolds quedará determinado por la longitud característica del alerón únicamente ya que el resto de datos que definen el número de Reynolds ya son conocidos.

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu}$$

Sustituyendo y dejando en función de la longitud característica del alerón obtenemos que el número de Reynolds queda definido por

$$Re = 1,02 \cdot 10^6 \cdot L$$

Por tanto, el número de Reynolds no queda definido plenamente hasta no decidir el tamaño de los elementos del alerón, pero al conocer la velocidad de operación del monoplaza y teniendo en cuenta que Java Foil trabaja con variables adimensionales podemos continuar con nuestro desarrollo.

### 2.3.-Casos y evolución del estudio

Para comenzar con el diseño del alerón del ART-16 lo primero es conocer la normativa de la competición, la que nos permite colocar en una zona u otra, para ello simplemente tenemos que revisar la normativa de la competición, una normativa que cambia cada año con el fin de mejorar la seguridad y la efectividad de los monoplazas.

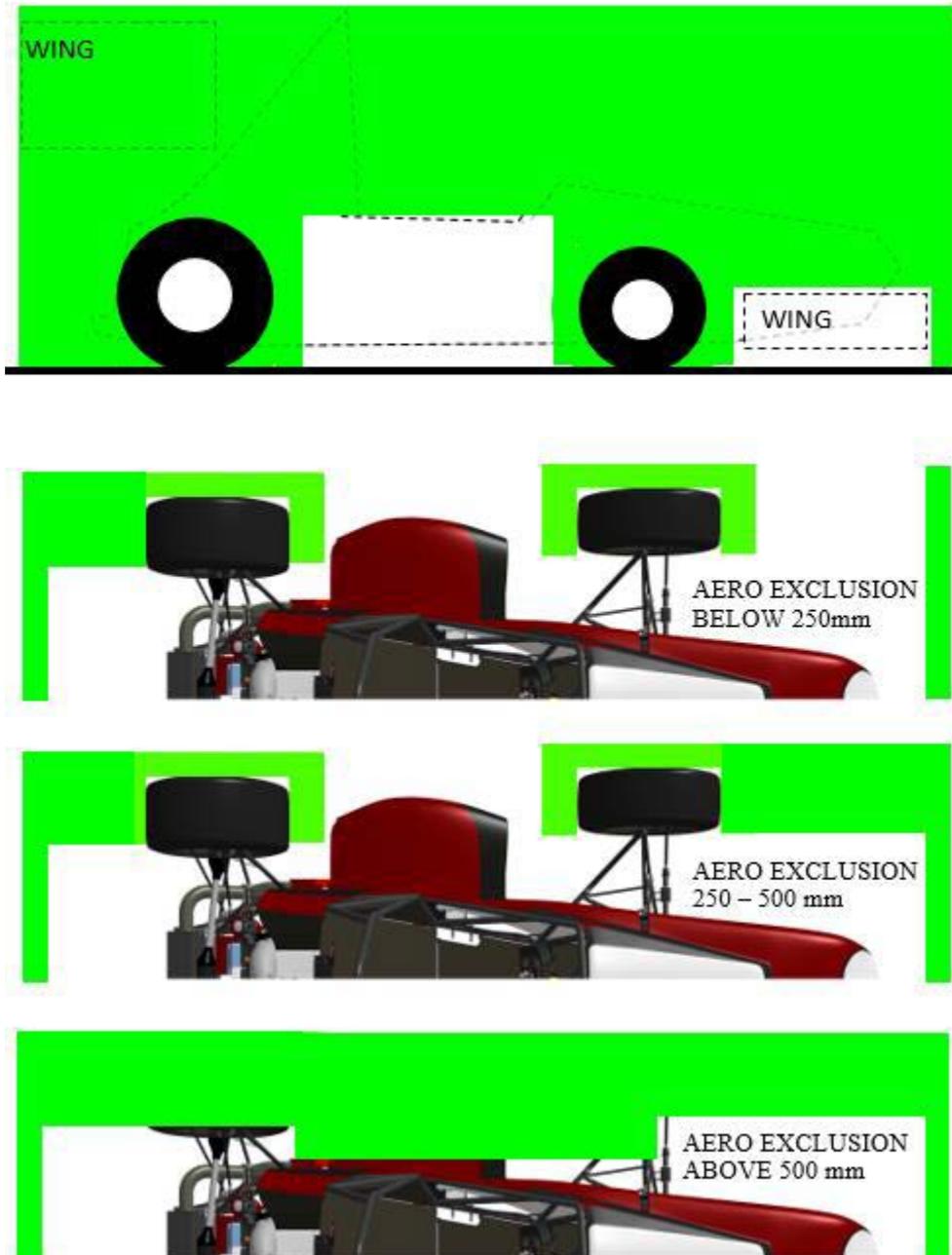


Ilustración 14 Normativa de colocación de Elementos Aerodinámicos

Estas imágenes están extraídas directamente de la normativa para el año 2016 de la competición. Representan de manera gráfica donde y donde no se pueden colocar dispositivos aerodinámicos en los monoplazas.

Básicamente, resumiendo las zonas en las que podemos colocar elementos para el alerón delantero se extienden a 700mm por delante del frontal de los neumáticos delanteros no pudiendo nunca ser más ancho que el exterior de los neumáticos. En altura, tal y como las imágenes indican las zonas blancas son en las que se pueden colocar elementos aerodinámicos, restringiéndose cada vez más según vamos subiendo respecto al suelo.

Trasladando las plantillas proporcionadas por la competición al modelo CAD de nuestro monoplaza, el ART-16, obtenemos la siguiente visión bastante clara en 2D de dónde podemos colocar elementos para nuestro desarrollo.

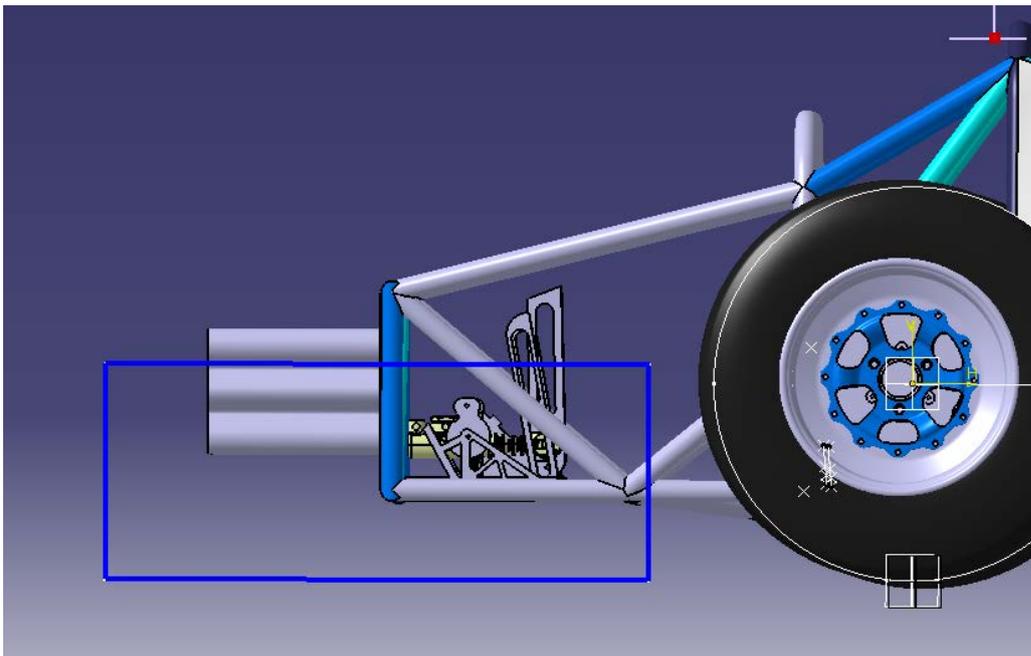


Ilustración 15 Plantilla de colocación de elementos aerodinámicos

Esta será la zona con la que trabajemos a lo largo del desarrollo del alerón delantero en el software 2D Java Foil.

Pasamos por tanto a comentar los sucesivos modelos analizados y las dificultades enfrentadas hasta llegar al modelo final.

Pero antes, tenemos que explicar la metodología de análisis que vamos a seguir para facilitar la comprensión posterior de todos los resultados.

Inicialmente probaremos una configuración con el segundo plano a 20° de ángulo de ataque, con los resultados obtenidos iremos moviendo el perfil 1cm hacia las direcciones positivas y negativas tanto del eje x como del eje y, observaremos si hay alguna mejoría en alguna de las situaciones hasta obtener la configuración deseada final.

## -Modelo 1:

En el primer modelo optamos por aprovechar al máximo el tamaño de la plantilla por lo que el modelo 1 de alerón delantero tiene las siguientes características:

- Cuerda Plano Principal: 437.5mm
- Cuerda Plano Secundario: 218.75mm
- Posición X plano secundario: 39.375%
- Posición Y plano secundario: 9%
- Ángulo perfil principal: 5º
- Ángulo perfil secundario inicial: 20º

Entiéndase la posición X e Y como la translación X e Y que hay que aplicar en Java Foil para situar el perfil en la posición que le corresponde en el plano, importante también que la posición es en porcentaje del total de la longitud de java foil, que interpretamos que es un metro.

Tenemos por tanto la siguiente imagen esquemática del plano 2D del alerón.

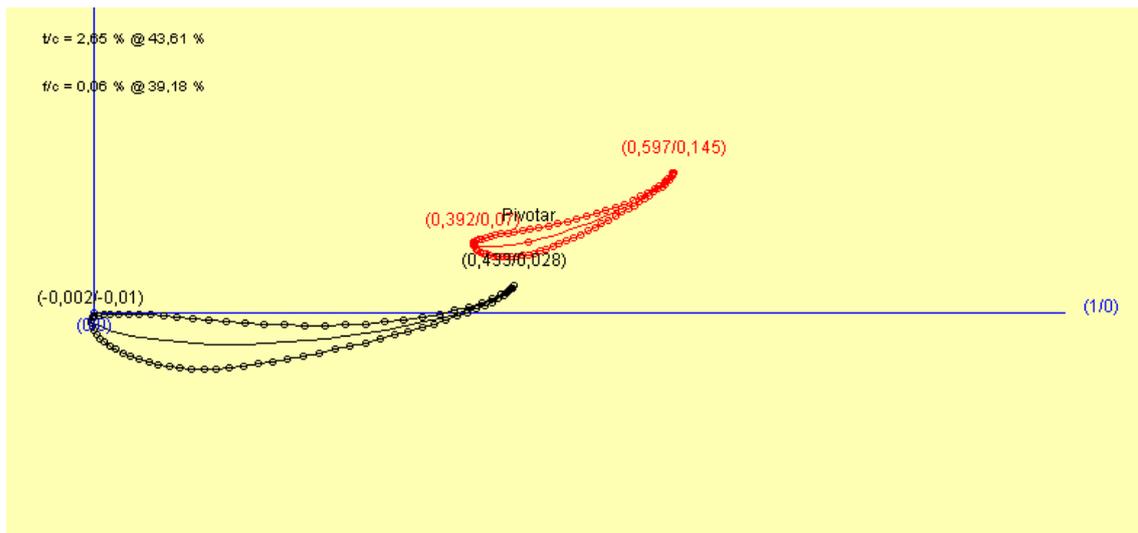


Ilustración 16 Modelo 1 Análisis 2D

Antes de mostrar resultados de este modelo, conviene señalar que, al no ser este, un modelo definitivo, no se darán resultados con la misma profundidad que sí se hará en el último modelo a fin de no caer en la repetitividad.

Mostraremos el resultado inicial y las variaciones con la posición del perfil para posteriormente explicar porque no se elige este modelo como modelo definitivo de alerón.

Pasamos a mostrar los resultados base respecto a los que compararemos las distintas posiciones del perfil secundario del modelo 1.

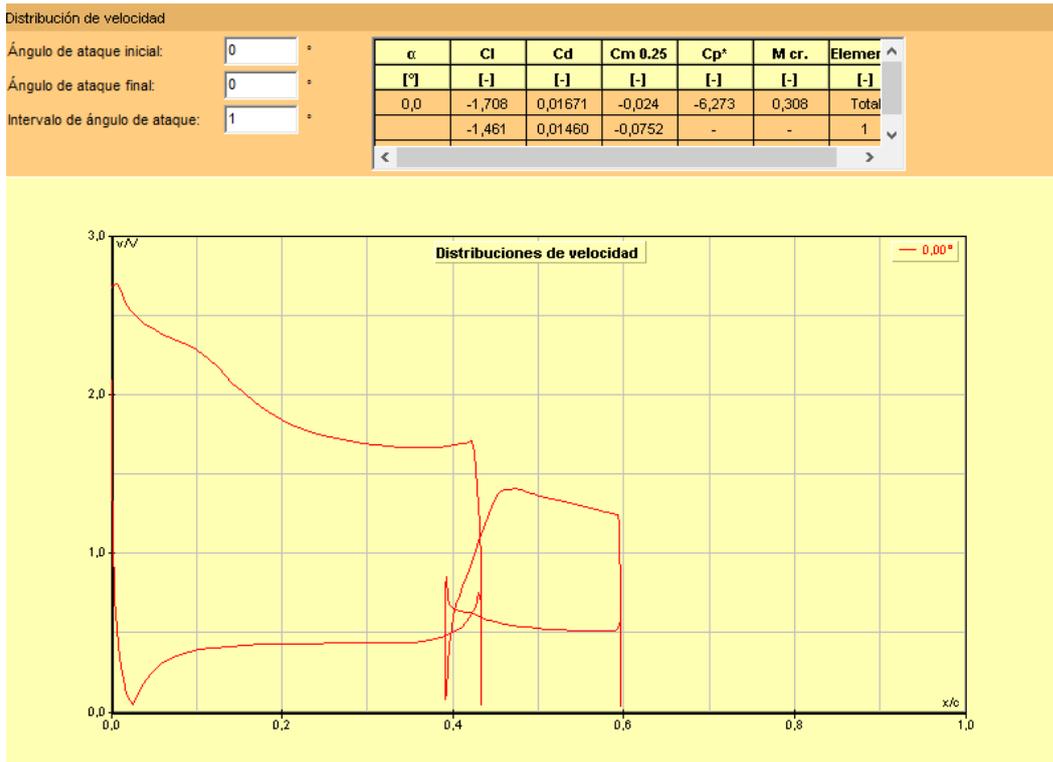


Ilustración 17 Resultados modelo 1 (1)

Vamos indicando ahora los distintos cambios realizados y mostrando los cambios en los resultados para después hacer una tabla resumen.

El primer cambio realizado es subir la posición del segundo perfil 1cm quedando  $y=10$

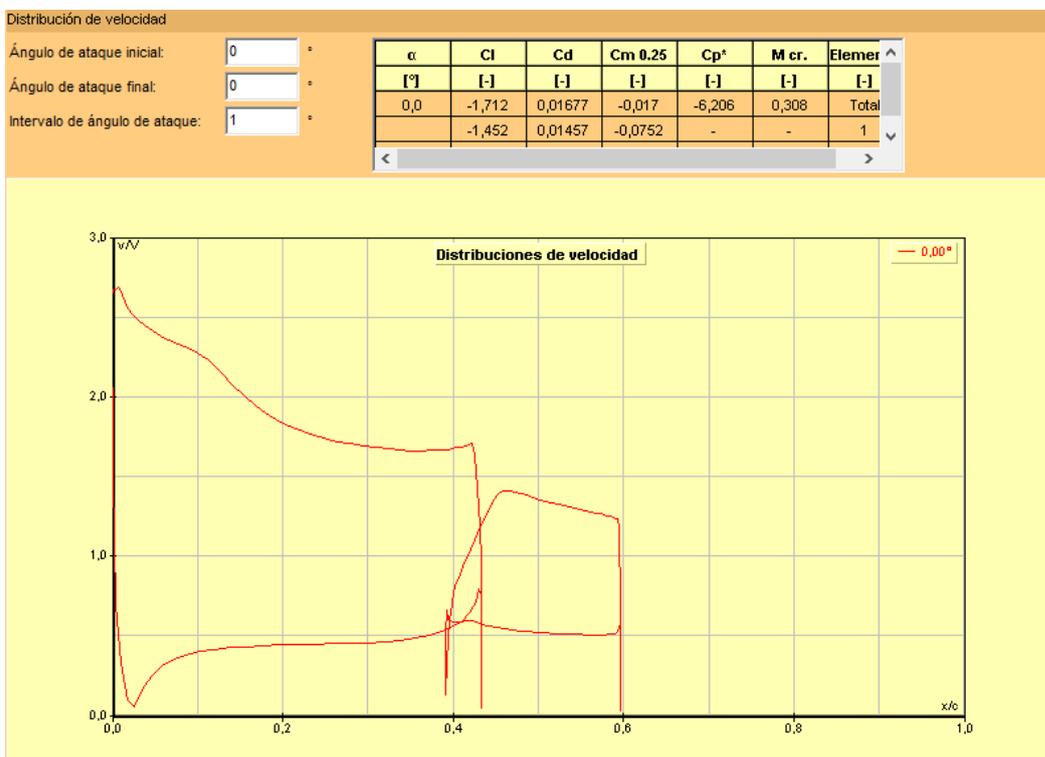


Ilustración 18 Resultados modelo 1 (2)

Subiendo un poco más para tener  $\gamma=11$

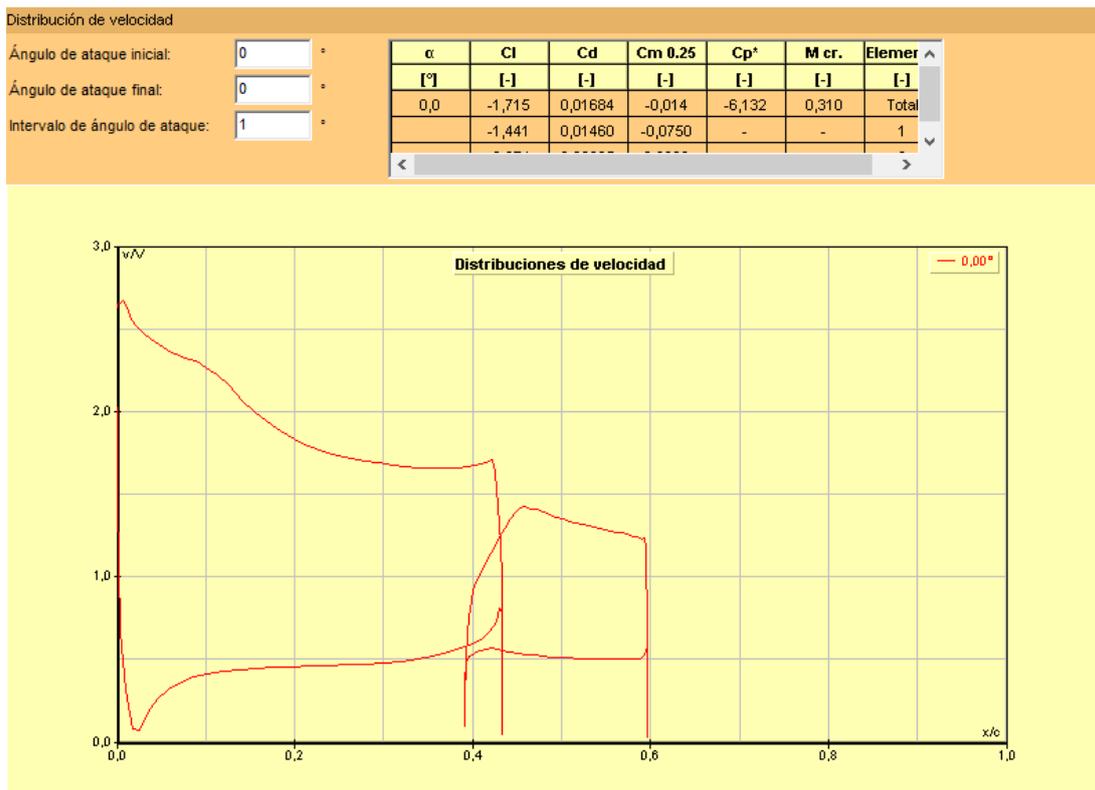


Ilustración 19 Resultados modelo 1 (3)

Decidimos ahora bajar la  $\gamma$  mínimamente hasta 10.5 para comparar resultados

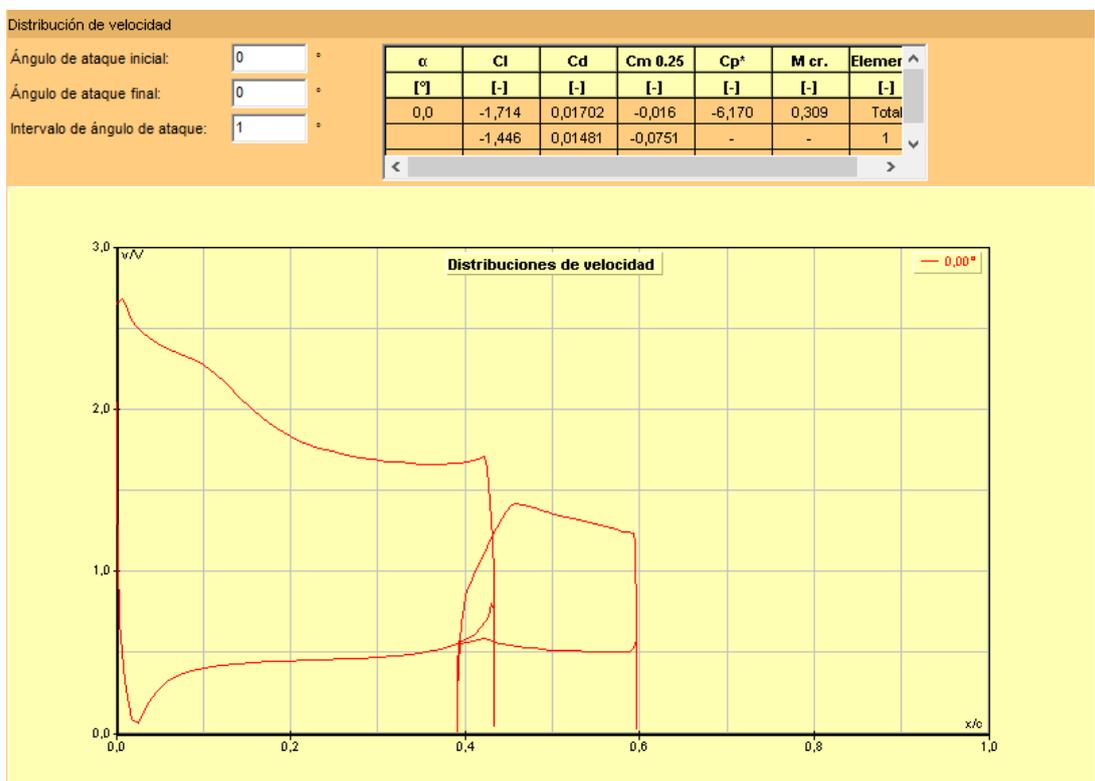


Ilustración 20 Resultados modelo 1 (4)

Seleccionamos esta opción y ahora hacemos cambios de posición en el eje x, alejándolo primero  $x=40.375$

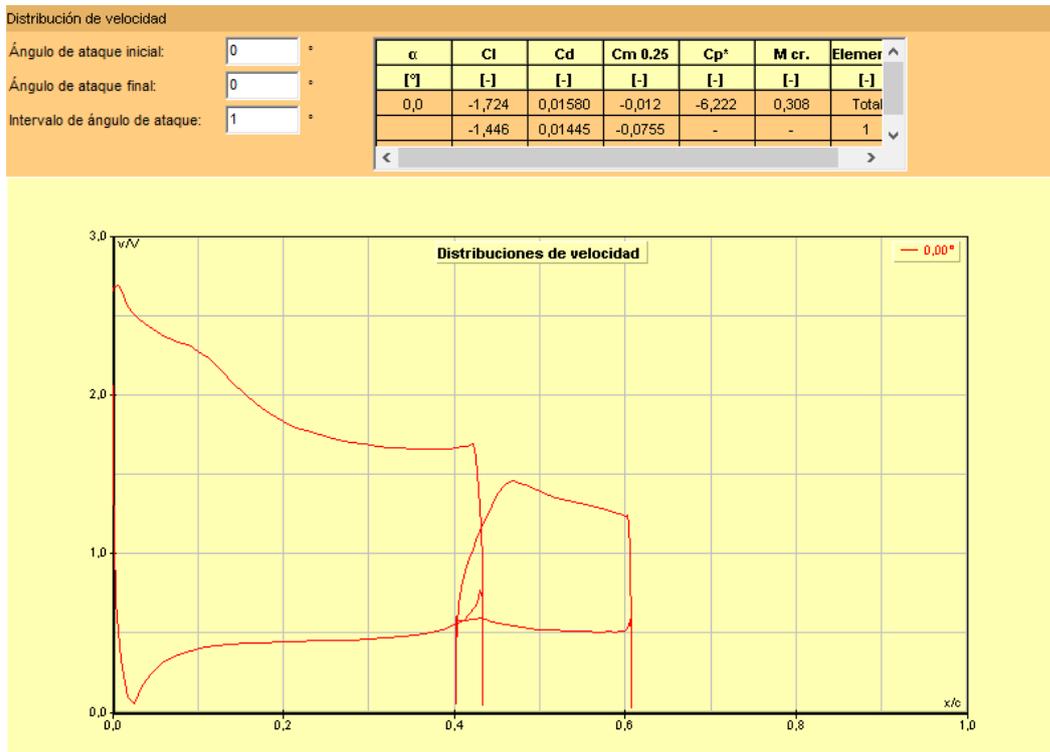


Ilustración 21 Resultados modelo 1 (5)

En vista a la mejora decidimos seguir retrasando el perfil  $x=41,375$

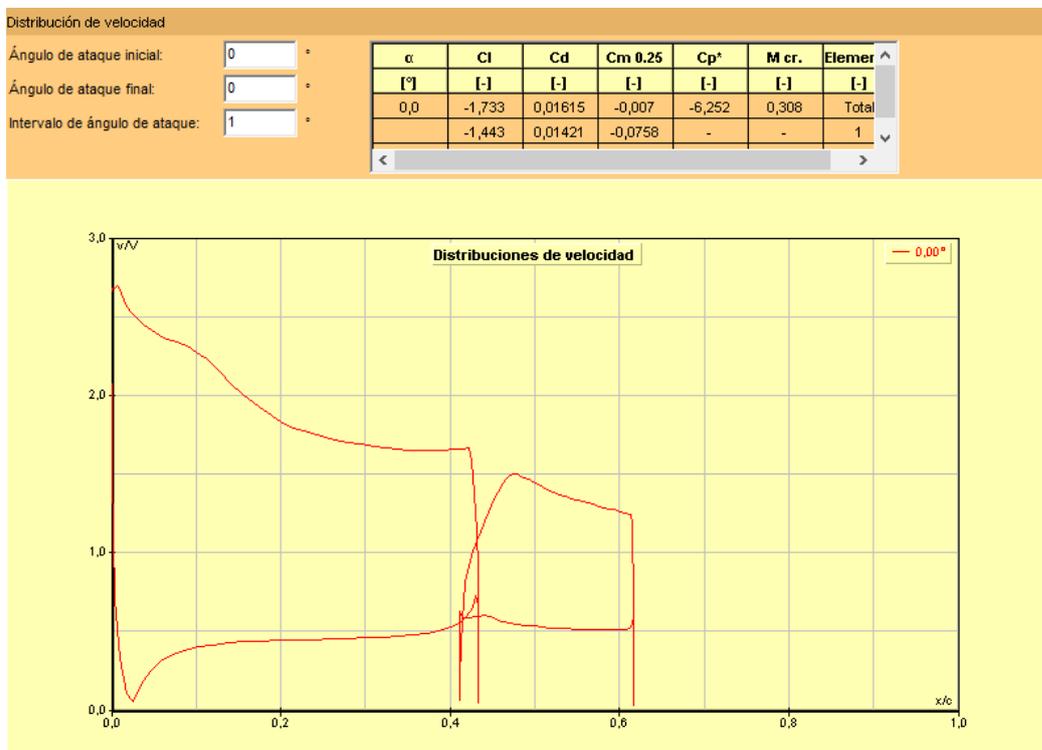


Ilustración 22 Resultados modelo 1 (6)

Mostrando la tabla de resultados correspondiente podemos ver la evolución de los resultados.

Modelo	Posición X	Posición Y	Ángulo 2º perfil	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>
Modelo 1	39.375	9	20º	-1.708	0.01671
Modelo 1	39.375	10	20º	-1.712	0.01677
Modelo 1	39.375	11	20º	-1.715	0.01684
Modelo 1	39.375	10.5	20º	-1.714	0.01702
Modelo 1	40.375	10.5	20º	-1.724	0.01580
Modelo 1	41.375	10.5	20º	-1.733	0.01615

Tabla 1 Resultados Modelo 1

Una vez expuesto el modelo 1 con el que se comenzó el desarrollo, con este modelo optábamos por un aumento de un 25% del tamaño de los perfiles con respecto al monoplaza del año anterior, el ART-15, con el fin de aumentar la carga aerodinámica. El problema con este modelo surge al comprobar la plantilla, ya que no la cumple, los perfiles se salen de la plantilla obligando a realizar otro a realizar otro modelo nuevo en el que esta vez sí se tenga en cuenta el tamaño de la plantilla.

#### **-Modelo 2:**

Tomando como referencia el modelo anterior y su problema respecto a la plantilla se decide disminuir el tamaño del perfil para pasar de un 25% de aumento a un 15% respecto al ART-15.

Sin embargo este tampoco es el modelo final por lo que unido a que es el segundo modelo que se analiza, conocido ya el procedimiento se mostraran menos resultados que en el modelo 1 para pasar rápidamente a la explicación de por qué se rechaza dicho modelo

Comentamos las características del modelo a continuación:

- Cuerda Plano Principal: 402.5mm
- Cuerda Plano Secundario: 201.25mm
- Posición X plano secundario: 36.225%
- Posición Y plano secundario: 9,6%
- Ángulo perfil principal: 5º
- Ángulo perfil secundario inicial: 20º

Una vez presentadas las características, el modelo tiene el siguiente aspecto

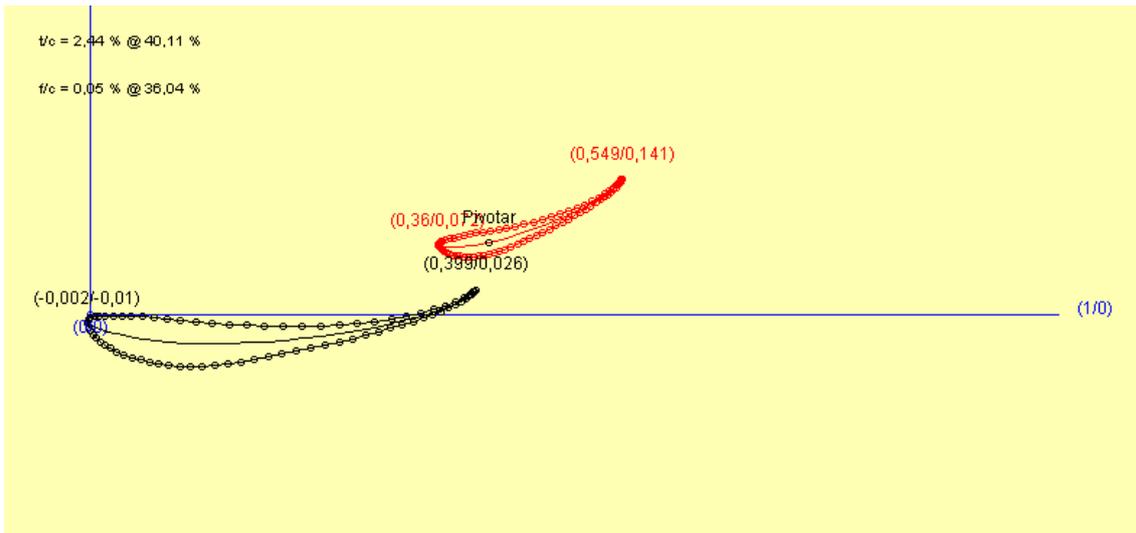


Ilustración 23 Modelo 2 Análisis 2D

Los primeros resultados obtenidos con esta configuración son peores que en el modelo 1 claramente debido al cambio de tamaño de los perfiles.

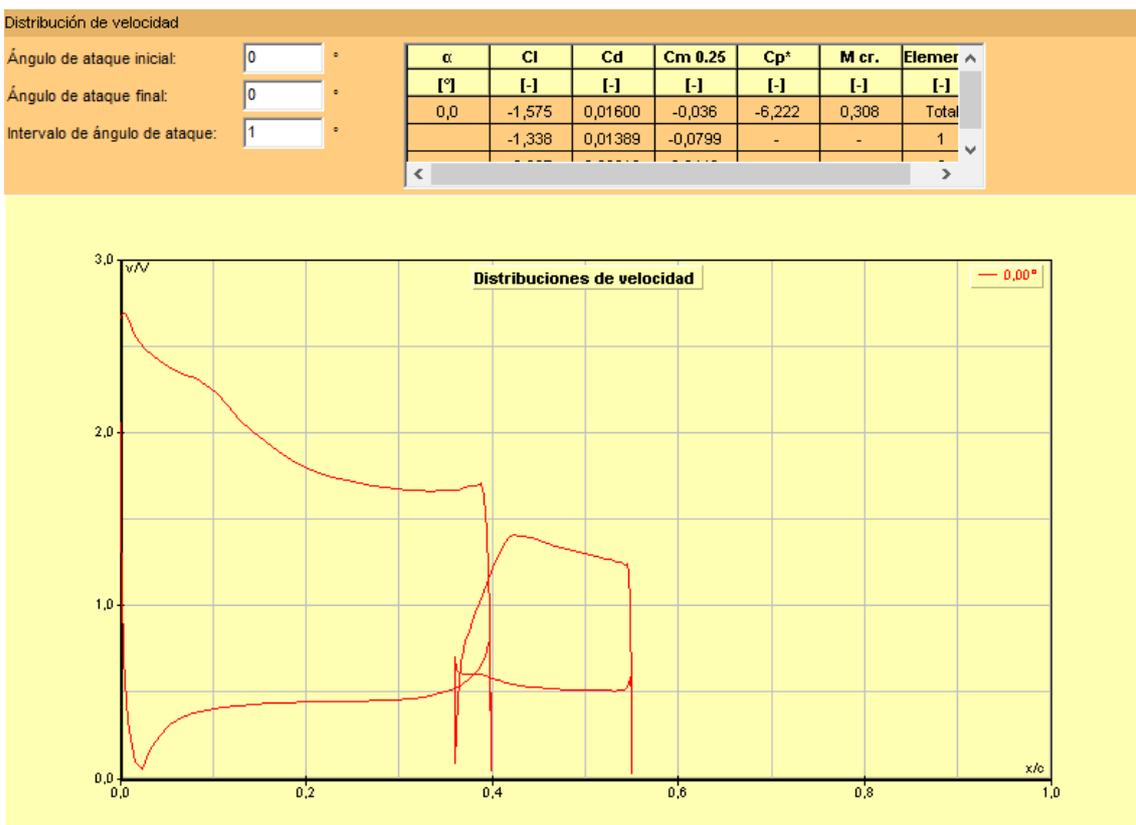


Ilustración 24 Resultados modelo 2 (1)

Al igual que en el modelo anterior se prueba cambiando la posición respecto al eje y subiendo hasta  $y=10.1$

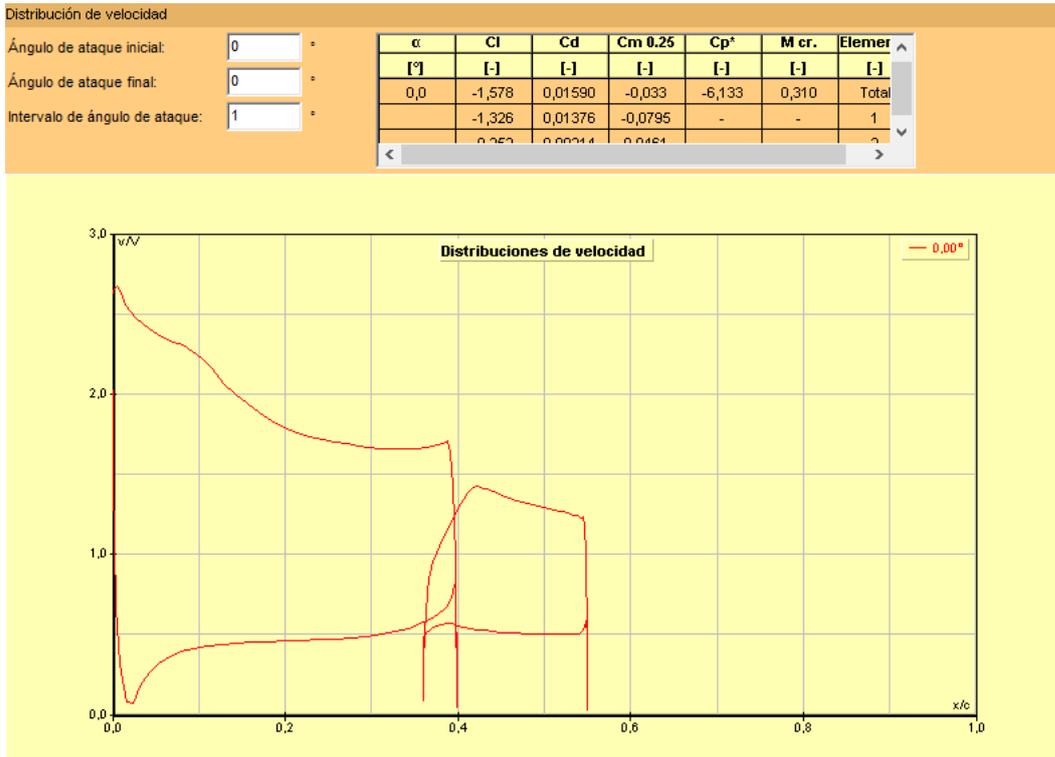


Ilustración 25 Resultados modelo 2 (2)

Retrasando la posición en x hasta  $x=38.225$  obtenemos la configuración final

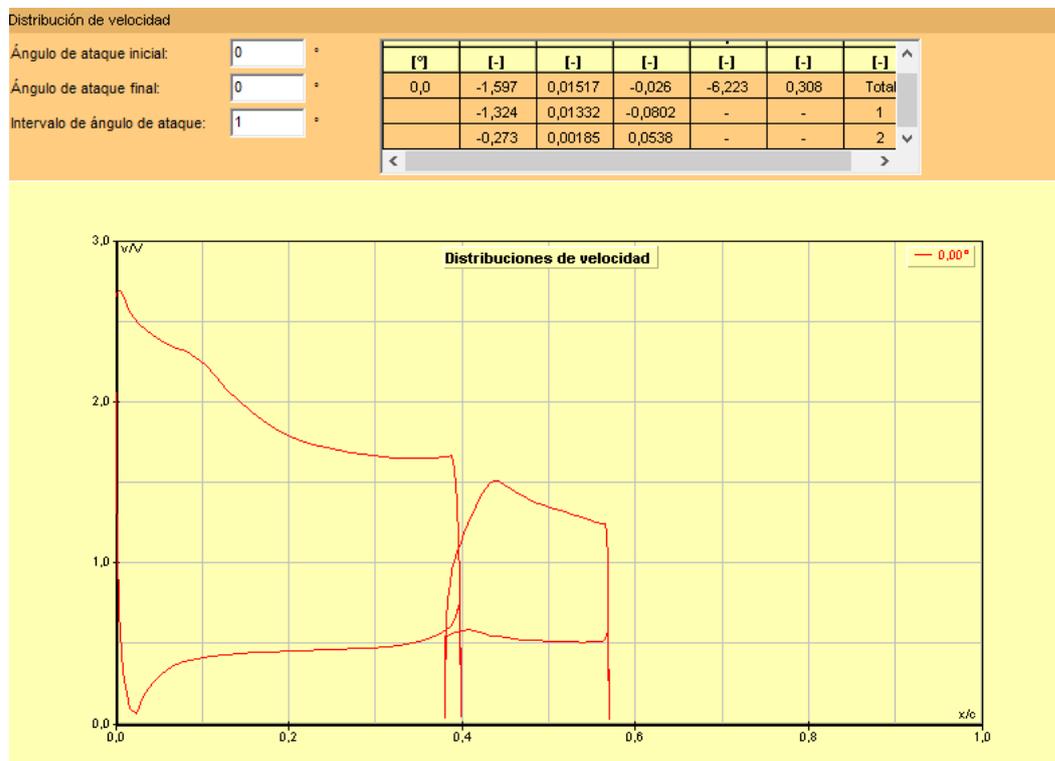


Ilustración 26 Resultados modelo 2 (3)

Presentamos de nuevo la tabla de resultados del modelo 2

Modelo	Posición X	Posición Y	Ángulo 2º perfil	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>
Modelo 2	36.225	9.6	20º	-1.575	0.01600
Modelo 2	36.225	10.1	20º	-1.578	0.01590
Modelo 2	38.225	10.1	20º	-1.597	0.01517

Tabla 2 Resultados Modelo 2

El problema que surge con este modelo es un error en la colocación de la plantilla que se ha mostrado previamente, así como un error en la interpretación de la normativa. La plantilla en lugar de estar colocada empezando a medir desde la carretera, estaba desde el suelo del coche lo que nos restaba 5cm de altura posible para la colocación de perfiles.

Ante esta situación hay que rediseñar de nuevo el alerón para intentar no perder carga aerodinámica en la medida de lo posible

### -Modelo 3:

Finalmente el modelo 3 representa el modelo final del alerón delantero por lo que analizaremos un poco más en profundidad el mismo.

Continuando los análisis y las posiciones del modelo 2, el modelo 3 del alerón tiene las siguientes características.

- Cuerda Plano Principal: 402.5mm
- Cuerda Plano Secundario: 201.25mm
- Posición X plano secundario: 38.225%
- Posición Y plano secundario: 5.1%
- Ángulo perfil principal: 0º
- Ángulo perfil secundario inicial: 20º

Estas características hacen que el alerón conserve las mismas propiedades aerodinámicas aproximadas en 2D, es decir el aspecto de la configuración expuesta y sus resultados son los siguientes.

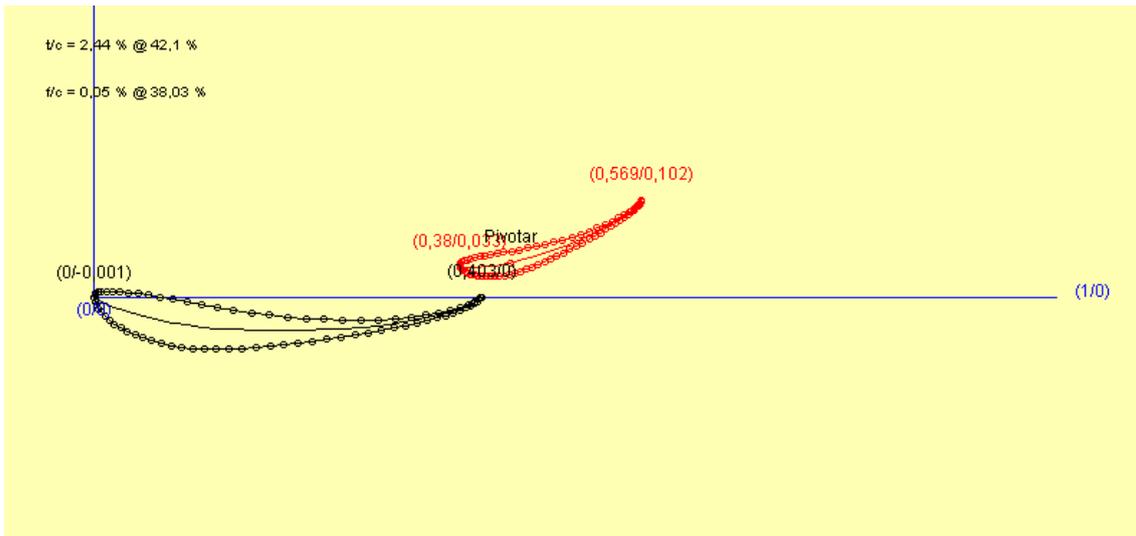


Ilustración 27 Modelo 3 Análisis 2D

Mostramos ahora el análisis de velocidades

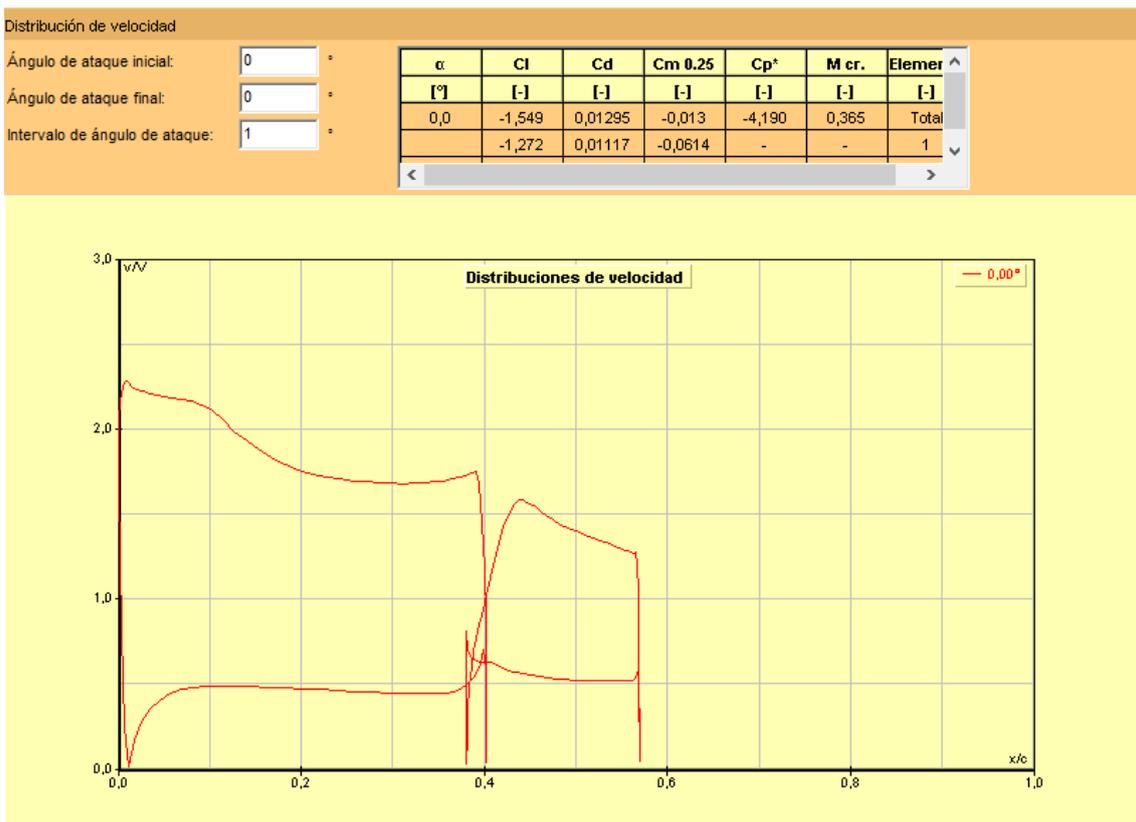


Ilustración 28 Resultados modelo 3 (1)

Podemos observar como apenas hemos penalizado en downforce respecto al modelo 2 sin embargo hemos mejorado sobremanera los resultados de resistencia, lo cual nos indica que podemos aumentar el ángulo de ataque de la segunda etapa del alerón

delantero sin que ello conlleve una gran penalización en la resistencia, pudiendo incluso llegar a los niveles de sustentación del modelo 1.

También conviene señalar que nuestro principal interés en este desarrollo es el downforce ya que los resultados de resistencia siempre son muy bajos ya que no hemos considerado el efecto suelo en nuestro análisis. No obstante sirven para darnos nociones de si aumenta o disminuye.

Llegados a este punto, vamos a analizar los distintos ángulos de ataque del perfil secundario en el alerón, esto lo haremos como innovación para el ART-16, tendremos distintas configuraciones posibles para las distintas pruebas que constituyen la competición.

- Configuración de baja resistencia para la prueba de aceleración, en la que nos interesa el menor drag posible en aras de invertir toda la potencia del motor en aumentar la velocidad del monoplaza, teniendo que vencer la menor resistencia posible
- Configuración de alta carga para la prueba de Skidpad en la que se pide la capacidad de aceleración lateral del coche con lo que una gran carga aerodinámica en la zona delantera del coche nos ayuda a tomar la curva del skidpad a la mayor velocidad posible sin perder la dirección del coche.
- Configuración intermedia para la prueba de endurance, en la que no sólo hay curvas si no rectas en las que el monoplaza tiene que responder con una buena aceleración.

Estas configuraciones se podrán cambiar de forma manual antes de comenzar la prueba correspondiente mediante un sistema de tornillos y agujeros que se analizará en posteriores apartados de este trabajo.

Las configuraciones explicadas, son las que analizamos a continuación empezando desde la de menor ángulo de ataque y por tanto, menor resistencia, hasta la de mayor ángulo.

Configuración de baja resistencia, ángulo de ataque 15º

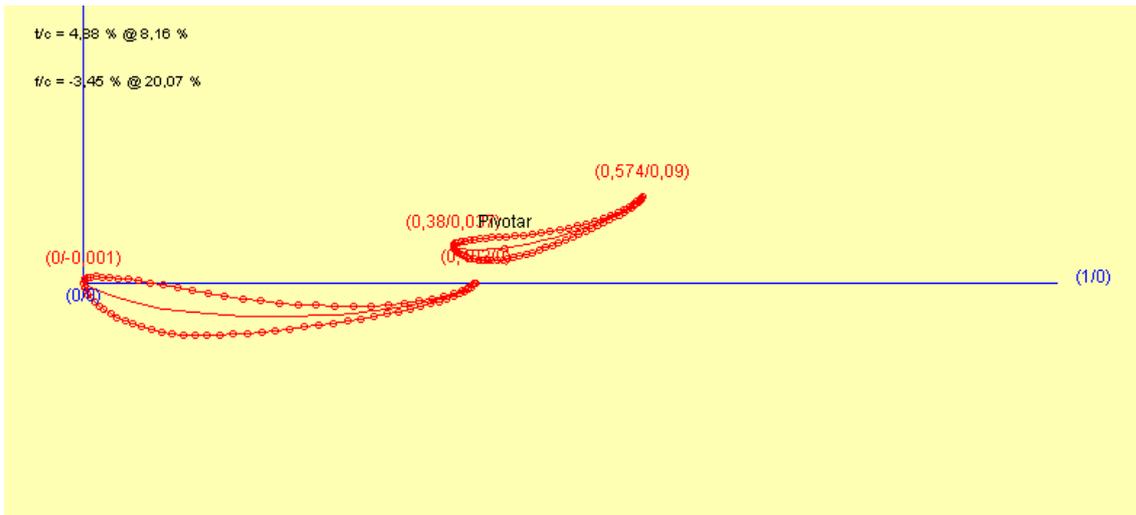


Ilustración 29 Configuración 15º modelo 3

Con esta configuración el perfil de velocidades tiene el siguiente aspecto

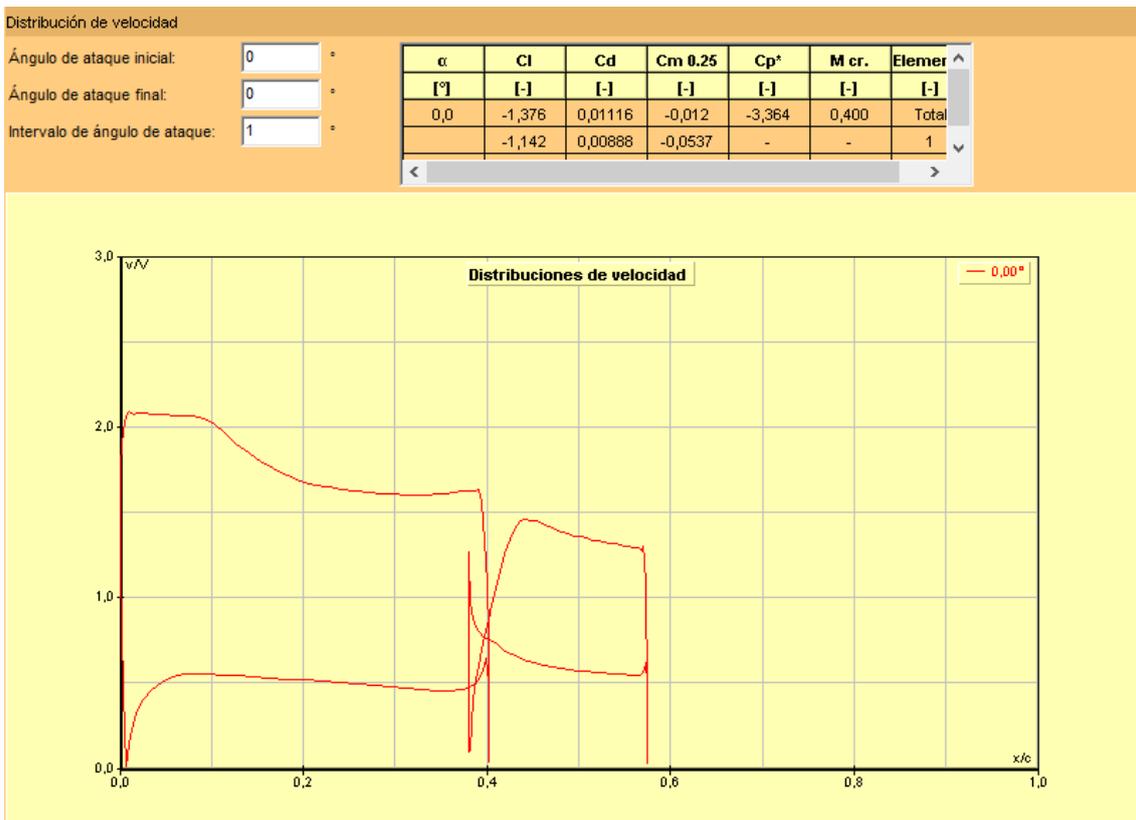


Ilustración 30 Resultados configuración 15º modelo 3

Pasamos ahora a la configuración intermedia, en la que el ángulo de ataque elegido para el segundo perfil es de 25º

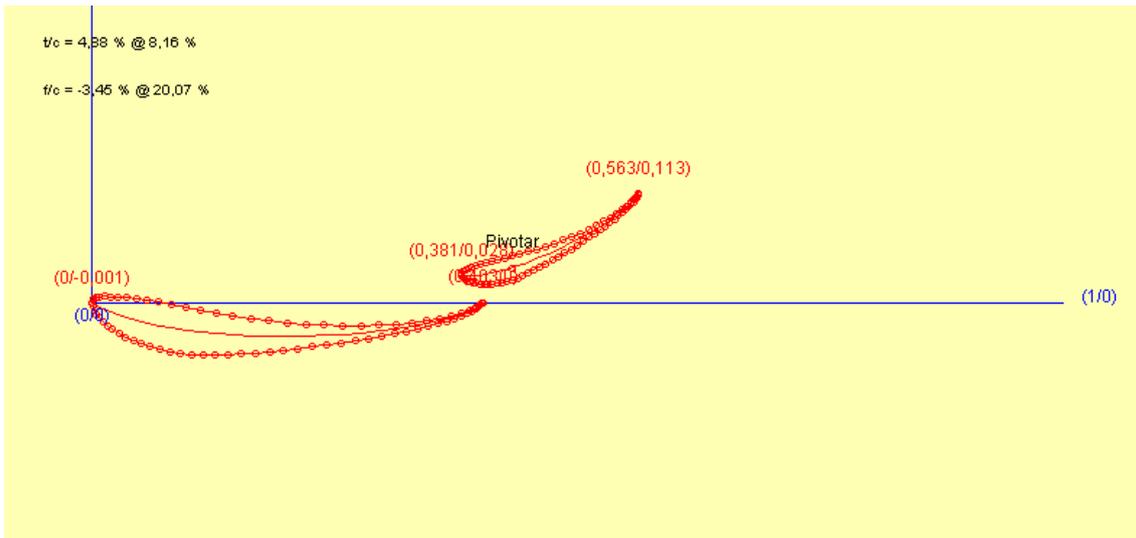


Ilustración 31 Configuración 25º modelo 3

Con esta configuración tenemos un buen equilibrio entre dowforce y resistencia, muy parecido a lo que conseguimos con el modelo 1 pero con unos perfiles más pequeños y dentro de la normativa

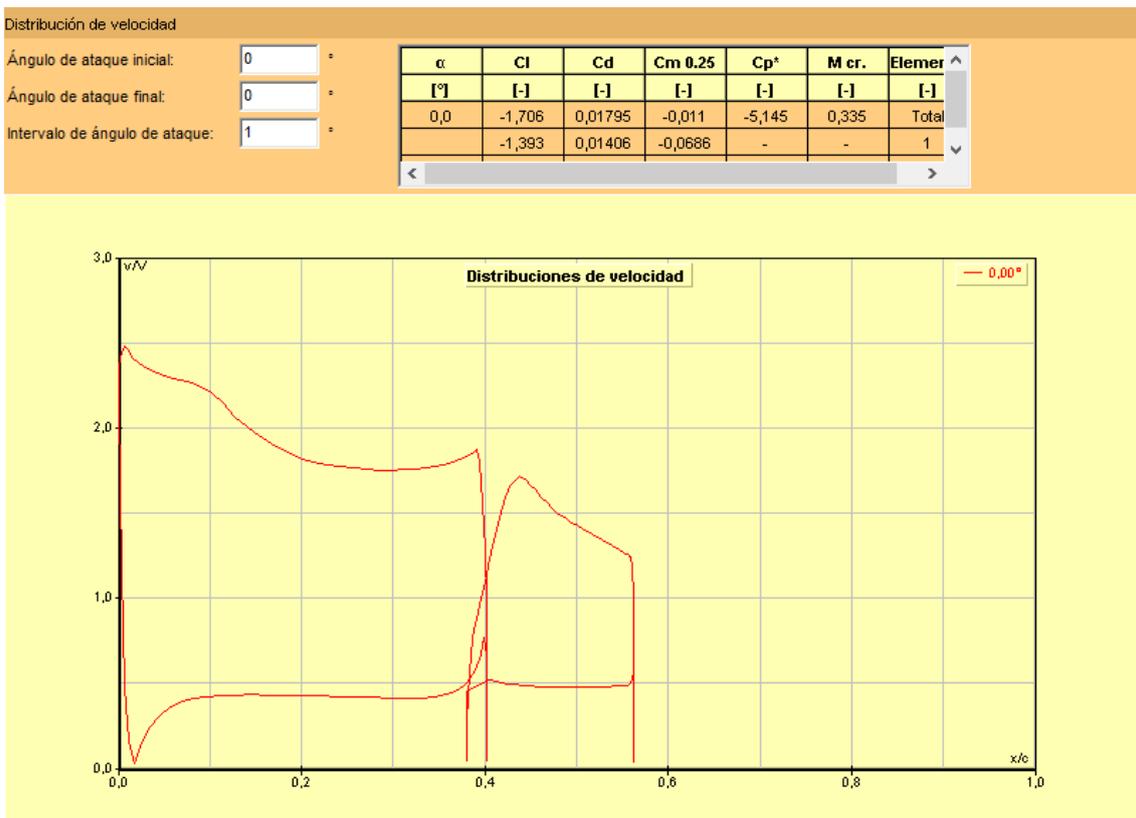


Ilustración 32 Resultados configuración 25º modelo 3

Por último pasamos a la configuración de alta carga aerodinámica, que se usará en la prueba del skidpad y, dependiendo de las características del circuito en el que compita el ART-16 también podría llegar a utilizarse en la prueba de endurance. En esta configuración el perfil tiene un ángulo de 30°.

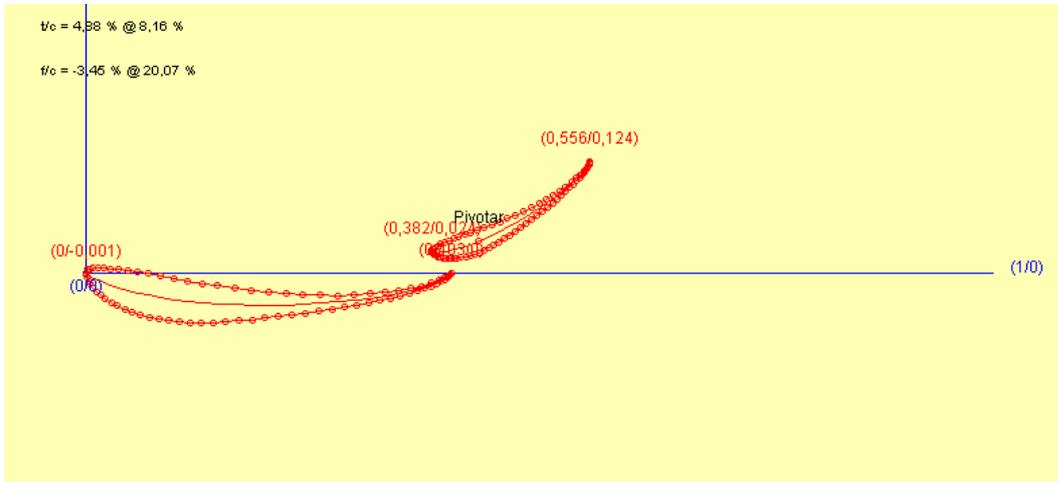


Ilustración 33 Configuración 30° modelo 3

Se ha contemplado la posibilidad de seguir aumentando el ángulo de ataque del perfil secundario pero en caso de hacerlo entraríamos en conflicto con la normativa por lo que se ha descartado, mostrando ahora el perfil de velocidades.

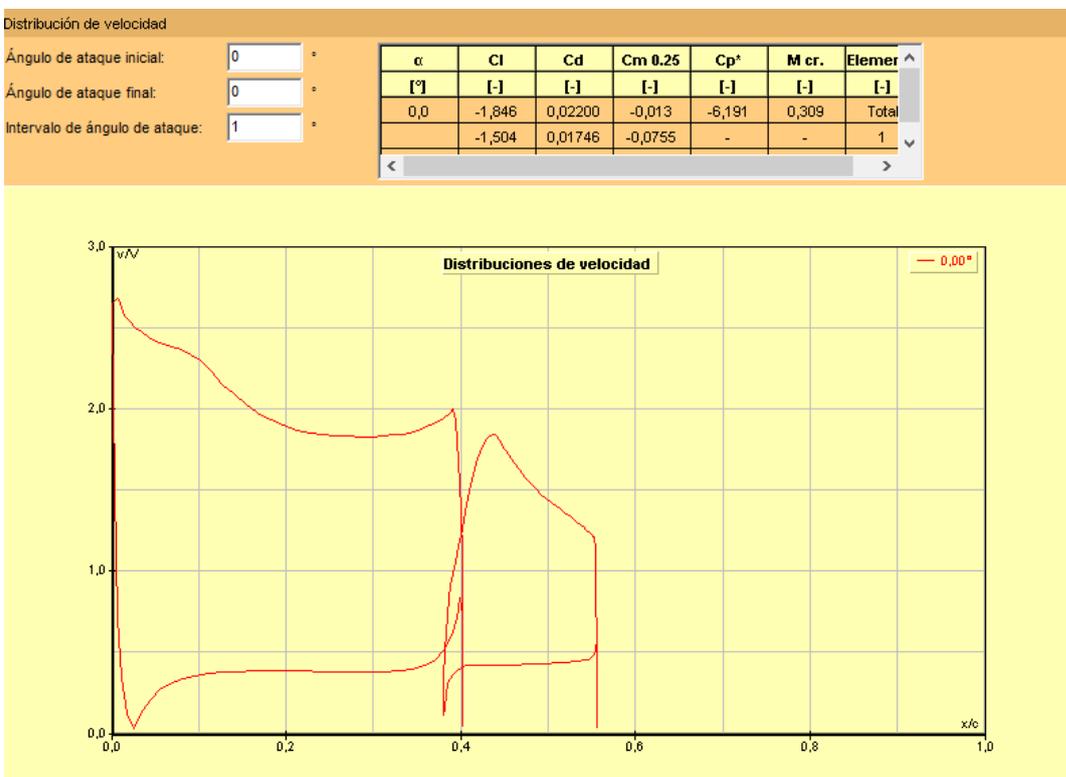


Ilustración 34 Resultados configuración 30° modelo 3

Con estas tres configuraciones estaría constituido el modelo 3, modelo definitivo 2D del alerón delantero para el ART-16.

Al igual que hemos hecho con el resto de modelos, vamos a presentar una tabla con los resultados

Modelo	Posición X	Posición Y	Ángulo 2º perfil	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>
<b>Modelo 3</b>	38.225	5.1	20º	-1.549	0.01295
<b>Modelo 3</b>	38.225	5.1	15º	-1.376	0.01115
<b>Modelo 3</b>	38.225	5.1	25º	-1.706	0.01795
<b>Modelo 3</b>	38.225	5.1	30º	-1.846	0.02200

Tabla 3 Resultados Modelo 3

Con estos resultados finales podemos pasar a la conclusión final del análisis en 2D del alerón para el ART-16

## 2.4.-Conclusiones del estudio

Una vez presentados todos los modelos de alerón conviene juntar todos los resultados en una única tabla para su análisis:

Modelo	Posición X	Posición Y	Ángulo 2º perfil	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>
Modelo 1	39.375	9	20º	-1.708	0.01671
Modelo 1	39.375	10	20º	-1.712	0.01677
Modelo 1	39.375	11	20º	-1.715	0.01684
Modelo 1	39.375	10.5	20º	-1.714	0.01702
Modelo 1	40.375	10.5	20º	-1.724	0.01580
Modelo 1	41.375	10.5	20º	-1.733	0.01615
Modelo 2	36.225	9.6	20º	-1.575	0.01600
Modelo 2	36.225	10.1	20º	-1.578	0.01590
Modelo 2	38.225	10.1	20º	-1.597	0.01517
Modelo 3	38.225	5.1	20º	-1.549	0.01295
Modelo 3	38.225	5.1	15º	-1.376	0.01115
Modelo 3	38.225	5.1	25º	-1.706	0.01795
Modelo 3	38.225	5.1	30º	-1.846	0.02200

Tabla 4 Comparativa de resultados análisis 2D

A la vista de los resultados podemos decir que se ha llegado a un modelo final en el que se ha conseguido un gran desempeño respecto a modelos más grandes, llegando a obtener los mismos resultados de downforce con perfiles más pequeños, lo cual nos indica la optimización y el estudio llevado a cabo.

Dado que los modelos anteriores al modelo 3 se descartan debido al incumplimiento de la normativa conviene como prueba definitiva, mostrar que este modelo 3 cumple sin ningún problema la normativa impuesta por la Formula Student para lo que presentamos una vista en perfil del software CATIA en el que se desarrollará el modelo 3D.

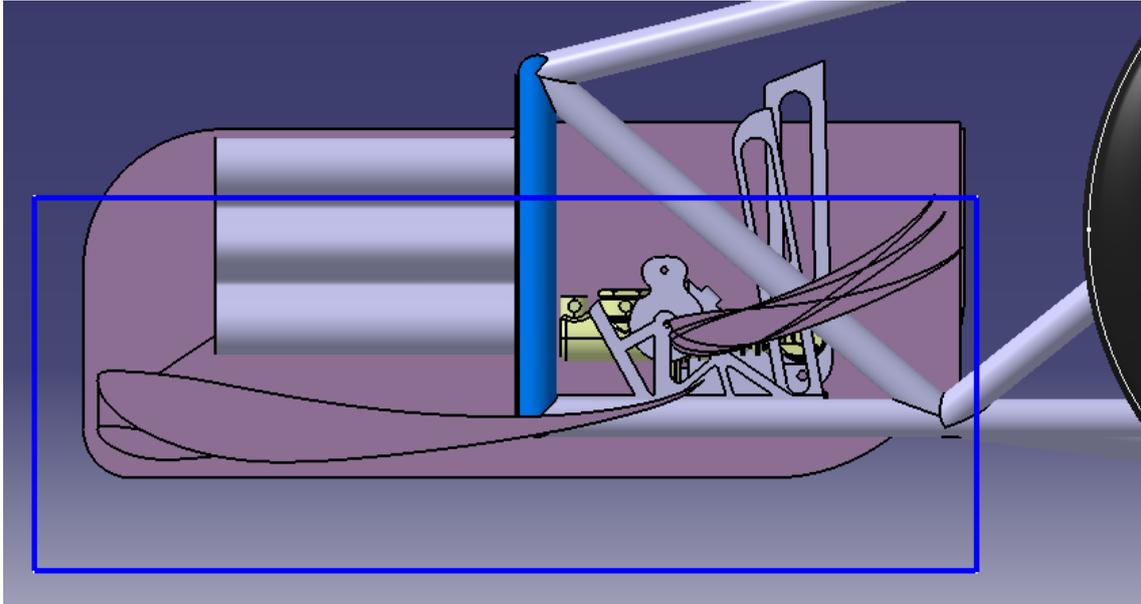


Ilustración 35 Posición de alerón respecto a la plantilla

Vemos como en la posición de mayor ángulo de ataque es la más ajustada con la normativa pero teniendo en cuenta que los bordes de salida no serán tan afilados por dificultades de fabricación, tendrán un redondeo que provocará que se acorten, cumpliendo sin problemas la normativa en cualquier caso de posición del perfil secundario del alerón.

### 3.-Análisis 3D

Como siguiente paso en el desarrollo de este proyecto nos centramos ahora en el desarrollo de un modelo 3D del alerón, que siga las directrices marcadas por el análisis realizado previamente en 2D, por tanto, con el tamaño de los perfiles ya fijados y su posición uno respecto del otro, el siguiente paso es realizar un modelo 3D viable para su introducción en el programa de análisis CFD Ansys Fluent.

#### 3.1.-Diseño modelo completo 3d del alerón

Para poder aprovechar todo el trabajo realizado en 2D en Java Foil, el primer paso es poder traspasar los datos de posición de perfiles de manera sencilla, precisa y rápida al programa de modelado 3D que usaremos, en este caso, CATIA V5. Para ello utilizaremos una macro Excel que CATIA trae implementada en sus archivos de instalación. El archivo en concreto se encuentra en la propia ruta de instalación de CATIA.

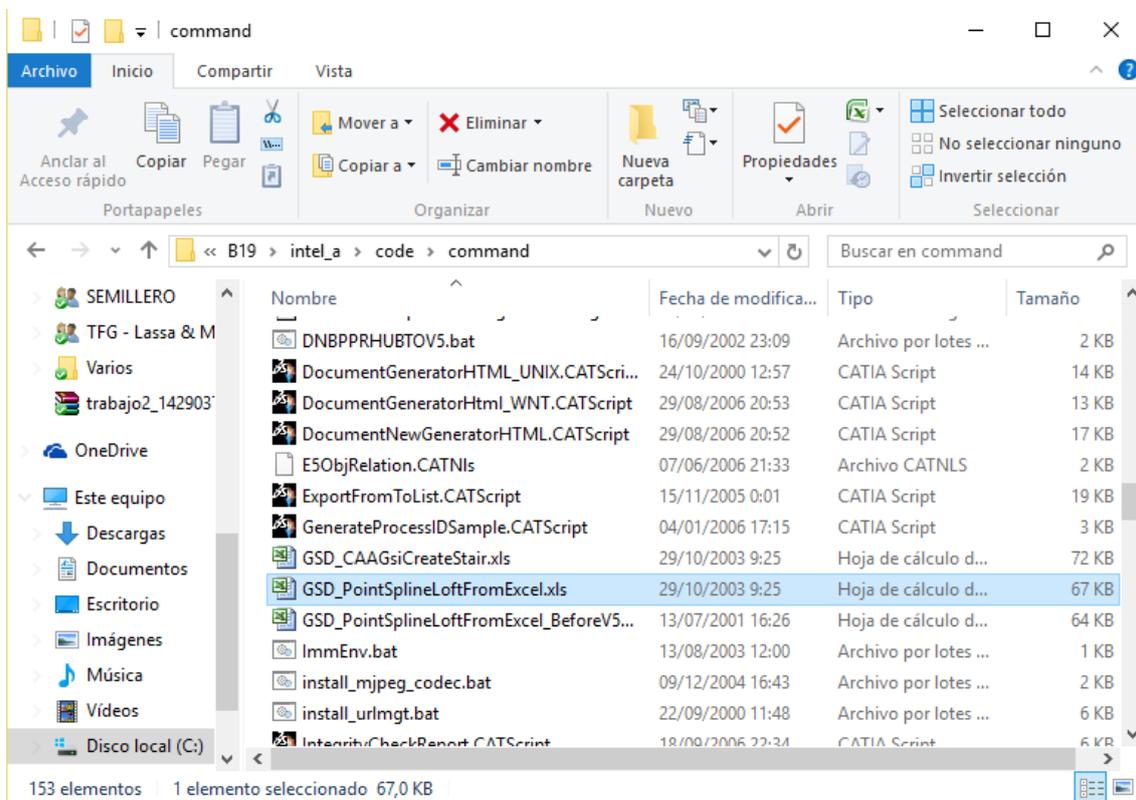


Ilustración 36 Archivo excel para perfil en CATIA

La ruta exacta donde se encuentra este archivo Excel es la que sigue, "**C:\Program Files (x86)\Dassault Systemes\B19\intel\\_a\code\command**", siendo el nombre del archivo que utilizaremos "**GSD\_PointSplineLoftFromExcel.xls**".

Vamos a explicar el uso de este archivo con el fin de que este proyecto no sirva para futuros desarrollos, tanto del equipo ARUS como de cualquier otro interesado.

El archivo Excel tiene inicialmente ese aspecto en el que se pueden identificar claramente varias columnas que corresponden a las tres coordenadas de puntos (X,Y,Z), así como diferentes secciones que comienzan con un "Start Curve" y finalizan con un "End Curve"

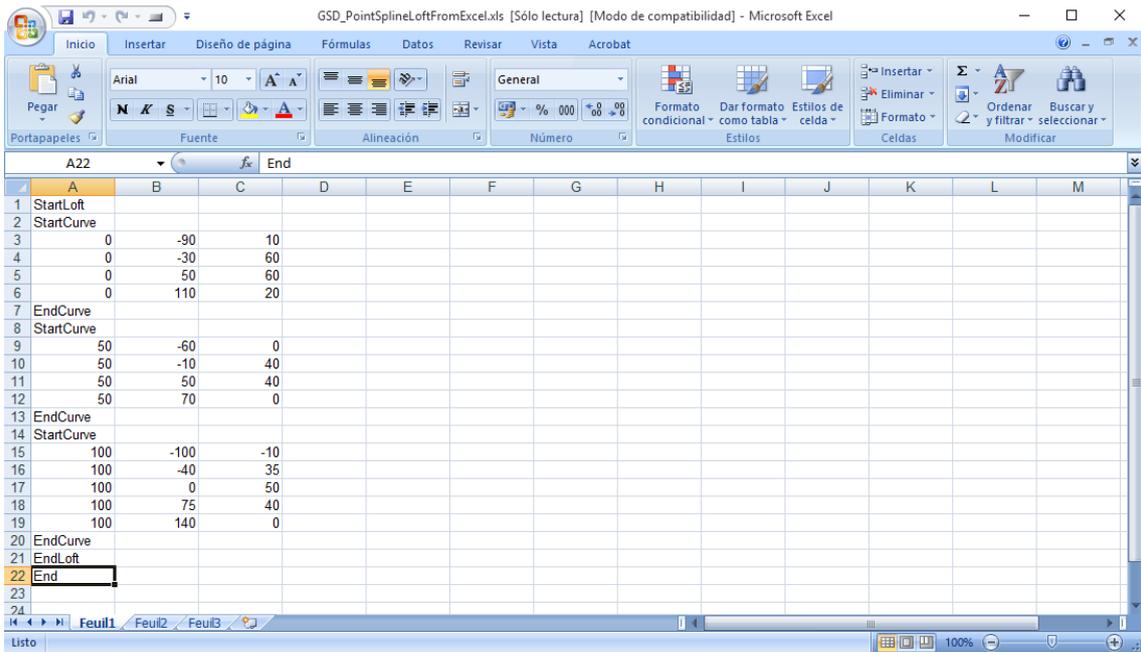


Ilustración 37 Interior archivo excel

En nuestro caso, cada curva que introduzcamos corresponderá a un perfil aerodinámico para CATIA, además en nuestro caso, dada la situación del modelo, todos los perfiles que introduzcamos tienen que estar en el plano XZ por lo que las cordenasas Y de nuestra hoja Excel serán 0 en todo caso.

Para hacer más sencillo el pasar los perfiles de manera correcta desde Java Foil al Excel de la forma adecuada, se modifica este Excel añadiendo más macros y sacando botones para su sencillo uso, teniendo este aspecto final.

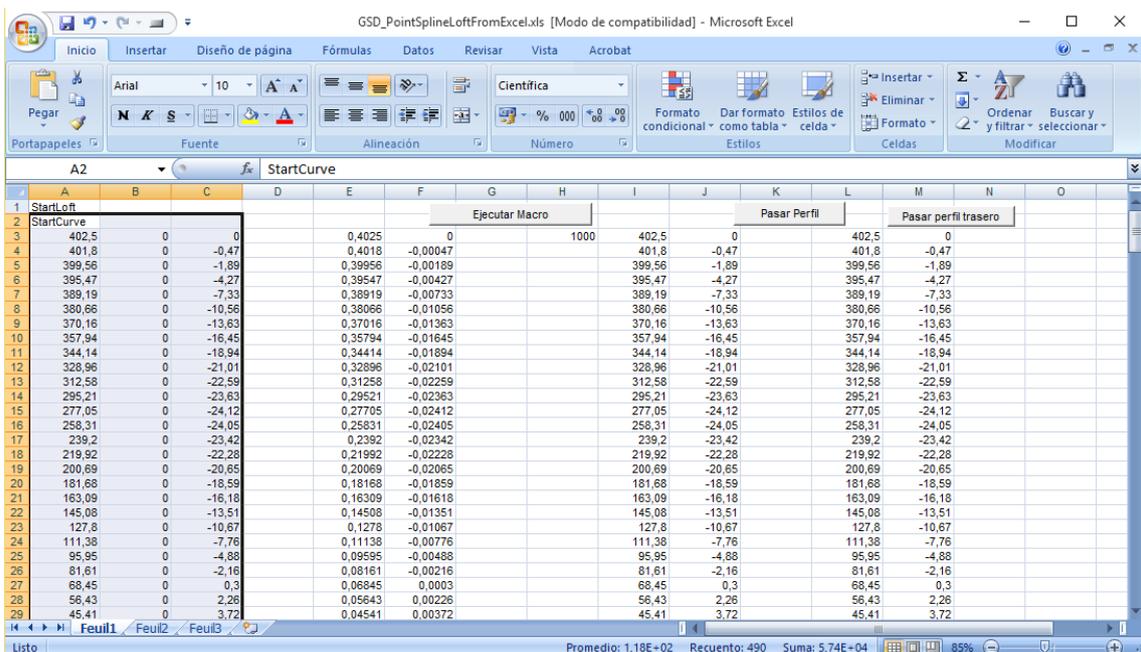
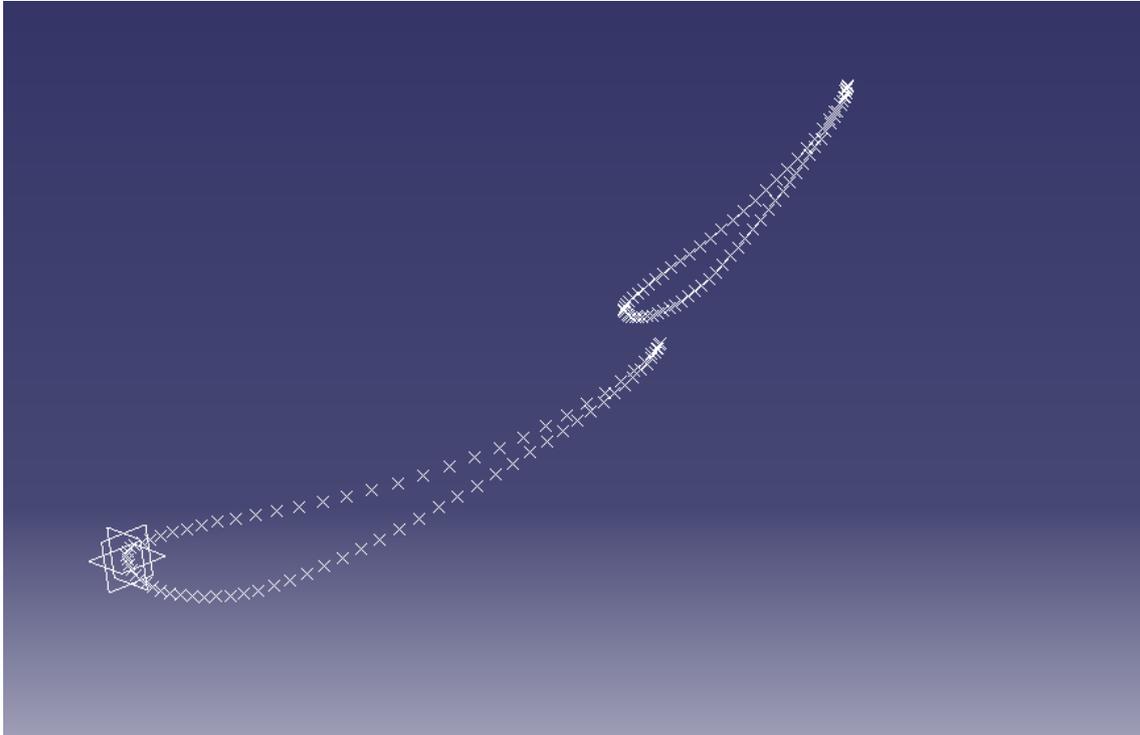


Ilustración 38 Archivo excel modificado

Con los botones, automatizamos todo el proceso de pasar los puntos de Java Foil a la zona adecuada del Excel para ejecutar la macro principal en la que tenemos tres opciones, seleccionaremos la opción 1 para únicamente pasar los puntos a CATIA.

Una vez pasados todos los puntos a CATIA, tenemos este aspecto en el programa



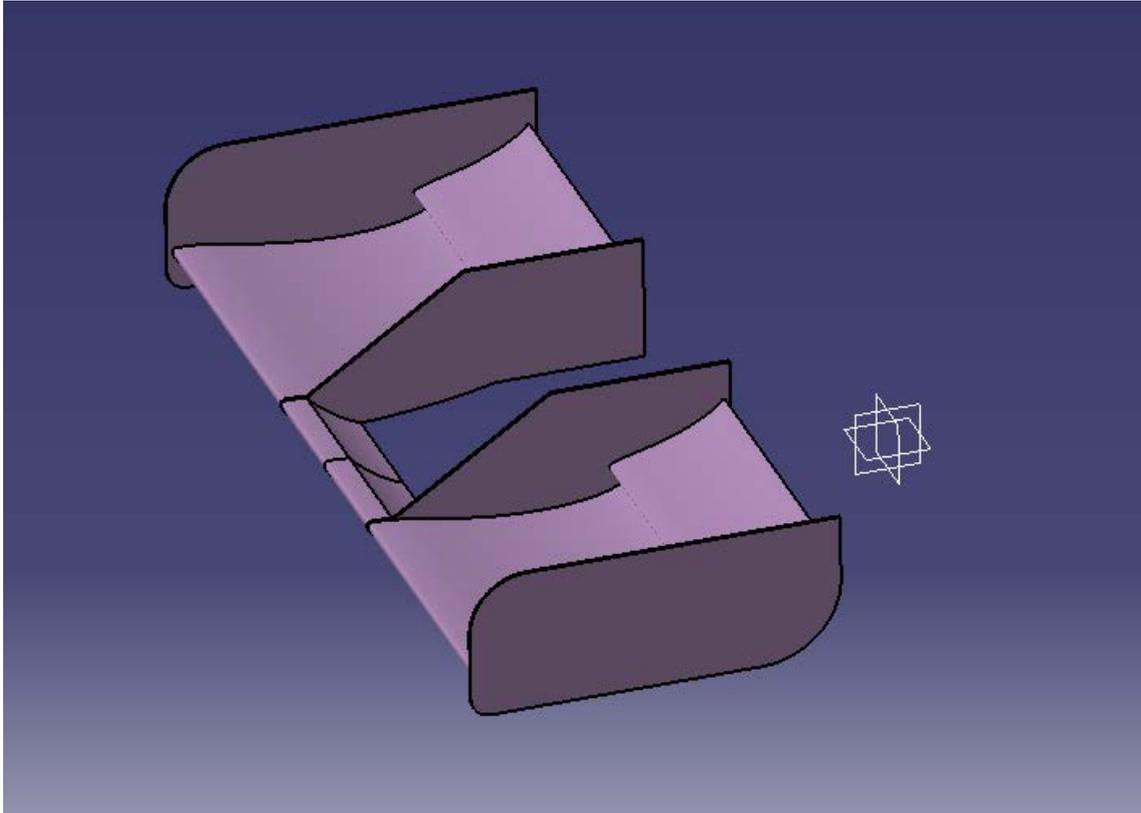
**Ilustración 39 Puntos perfil 2D alerón modelo 3**

Una vez obtenida los puntos de los perfiles, sólo nos queda hacer Splines con estos puntos que nos proporcionarán las secciones del alerón.

Para este desarrollo cabe mencionar que hay que tener muy en cuenta el resto de la zona delantera del monoplaza ya que en la zona central está el morro del coche, que entra en conflicto con el alerón por lo que la solución pasa por modificar la zona central del alerón para dejar el espacio necesario para permitir un flujo de aire adecuado sin penalizar demasiado las características del alerón.

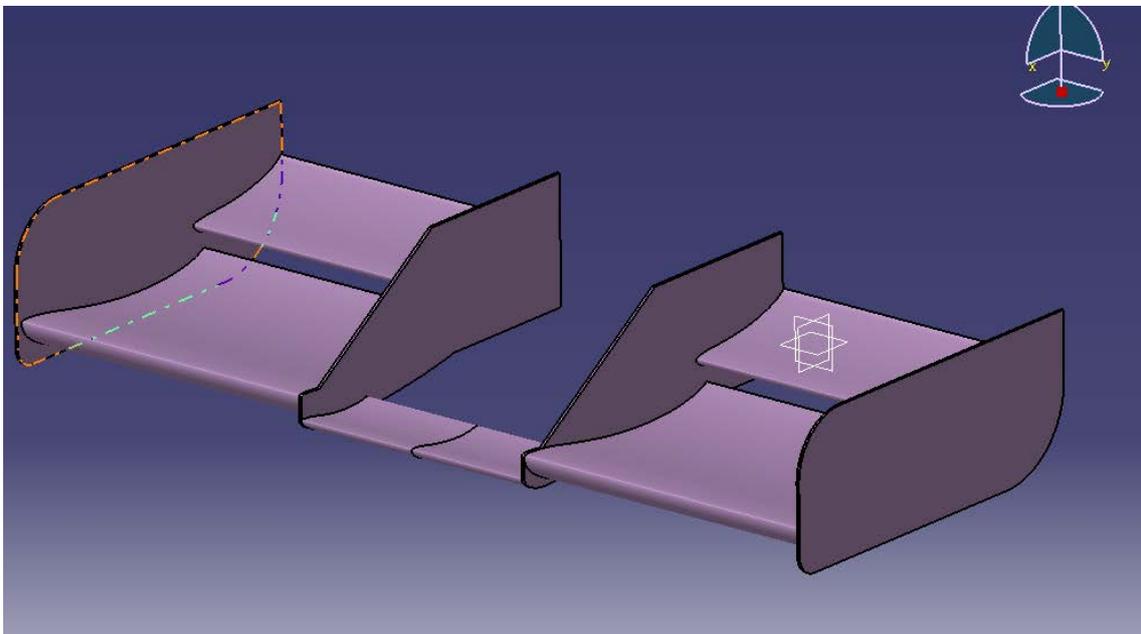
Trabajamos inicialmente con una opción en la que no se obtienen demasiado buenos resultados al introducirlos en Ansys FLuent por lo que no se ahondará demasiado en su desarrollo, este modelo aprovecha el perfil grande modificando su geometría para adaptarse al morro.

Esta opción penalizaba mucho en la sustentación ya que la zona central no aportaba demasiado a la misma, al contrario, generaba bastante resistencia por lo que se piensa en un segundo desarrollo en el que se usa un tercer perfil más pequeño que el resto de los usados y que deja el espacio suficiente para permitir el paso de aire.



**Ilustración 40 Modelo 1 3D descartado**

Este como hemos comentado es el modelo 1 descartado, presentamos ahora el modelo 2 en el que los análisis serán más satisfactorios.



**Ilustración 41 Modelo 2 3D final**

Conviene recordar también que uno de los objetivos de este desarrollo es la utilización de segunda etapa móvil por lo que también tenemos que incluirlas en el modelo para su posterior análisis, mostramos las tres etapas que se analizarán  $15^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$ .

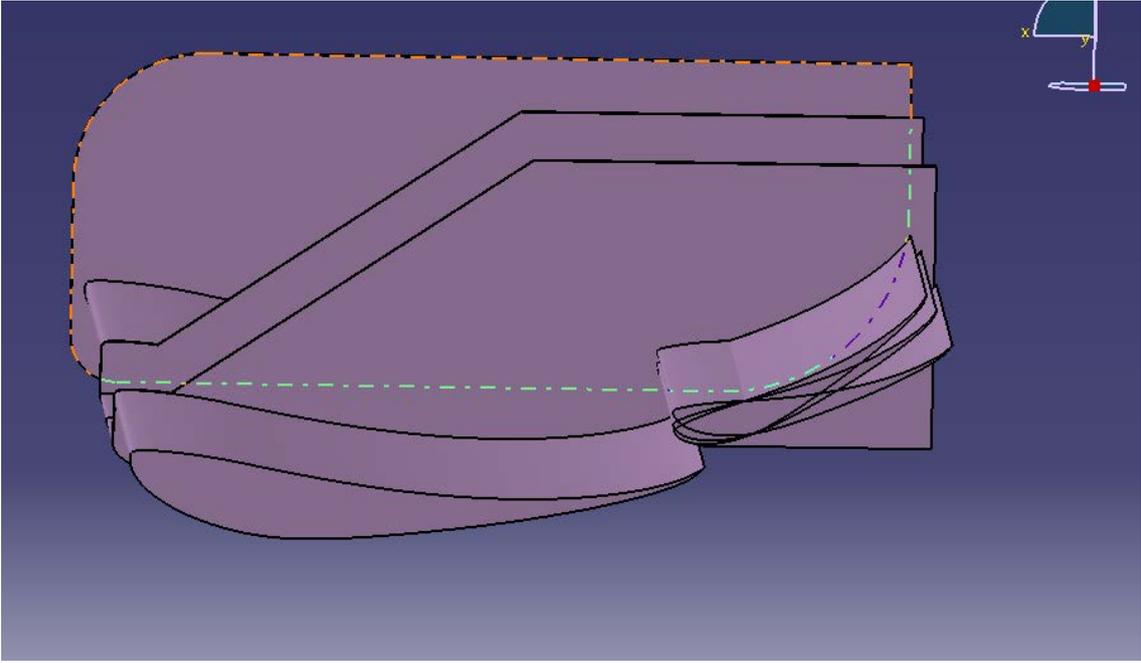


Ilustración 42 Vista lateral Modelo 2 3D

### 3.2.-Uso de Ansys Fluent

Como ya hemos explicado, el análisis del modelo 3D se realizará con el programa de CFD Ansys Fluent, por lo que, conviene explicar al igual que se ha hecho con Java Foil, el uso de Ansys Fluent y la preparación de un análisis completo para después pasar a mostrar resultados y analizar los mismos.

Dicha explicación se encuentra como Anexo al final de este documento, por lo que aquí mostraremos un breve resumen de las condiciones de contorno empleadas para el análisis

Las condiciones de contorno vendrán aplicadas tanto en las paredes del túnel, donde aplicaremos una condición de simetría que implica la no adherencia del flujo a la pared que simplificará sobremanera los cálculos, además daremos una condición de movimiento al aire a 15m/s lo que equivale a unos 50Km/h.

Comenzamos por tanto las condiciones de contorno con la carretera a la que le daremos una condición de Moving-Wall, una de las partes más importantes es darle la velocidad correcta a la carretera en lo que respecta a la dirección del movimiento ya que tal y como Fluent sitúa los ejes de coordenadas.

Teniendo esta condición en cuenta, la dirección de la velocidad de la carretera será en el eje  $-x$  y de magnitud 15 m/s como ya se ha comentado anteriormente.

Dejemos una imagen representativa de cómo tiene que quedar la condición de contorno de Road.

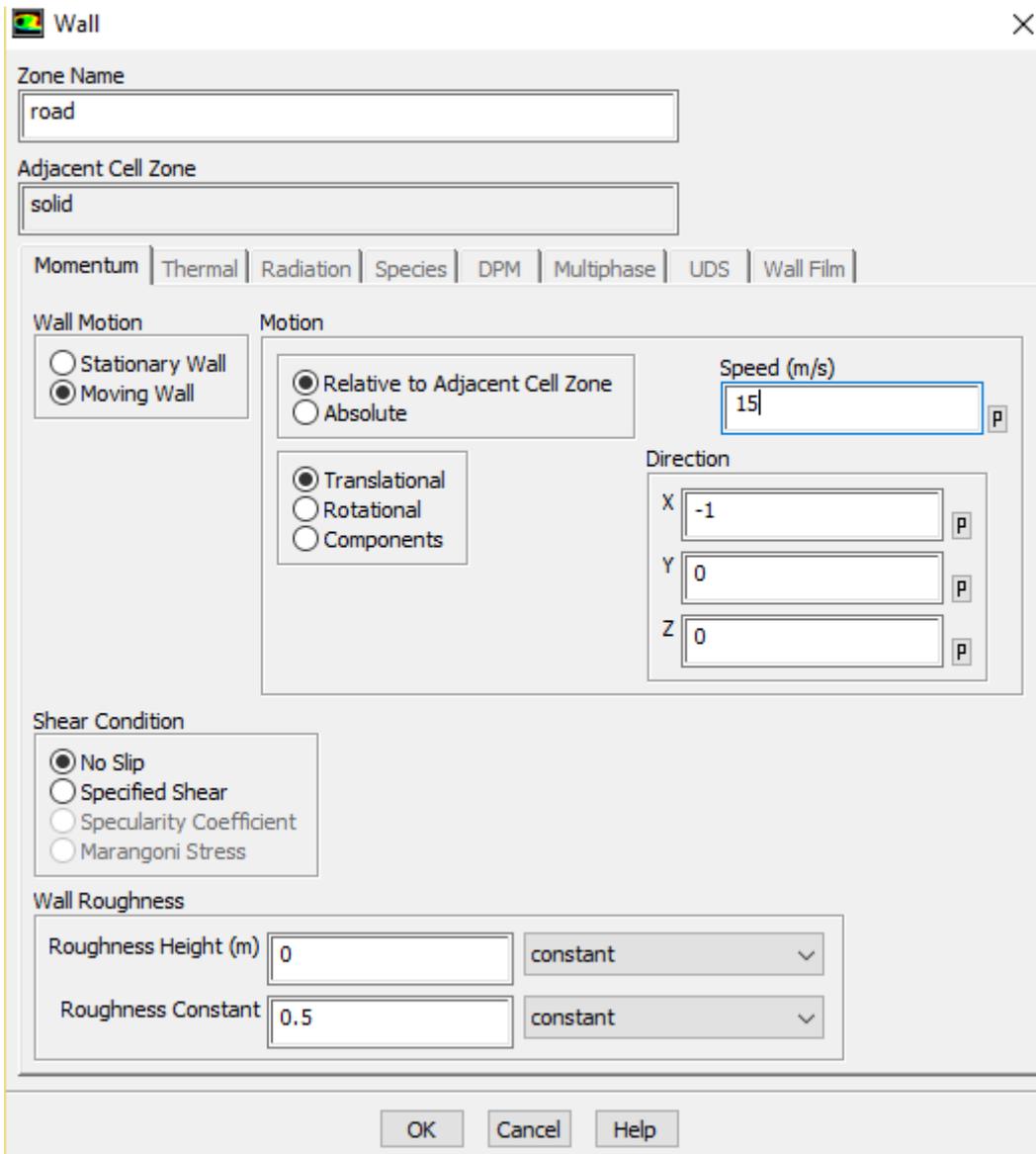


Ilustración 43 Condición de contorno en la carretera

Pasamos ahora a la condición de contorno de Velocidad de entrada en el túnel de viento en la que tendremos que modificar varios parámetros:

- Magnitud de la velocidad 15m/s
- Turbulent Intesity 1%
- Turbulent Viscosity Ratio 5%

Con estas modificaciones quedan fijadas las condiciones de contorno en la entrada del túnel.

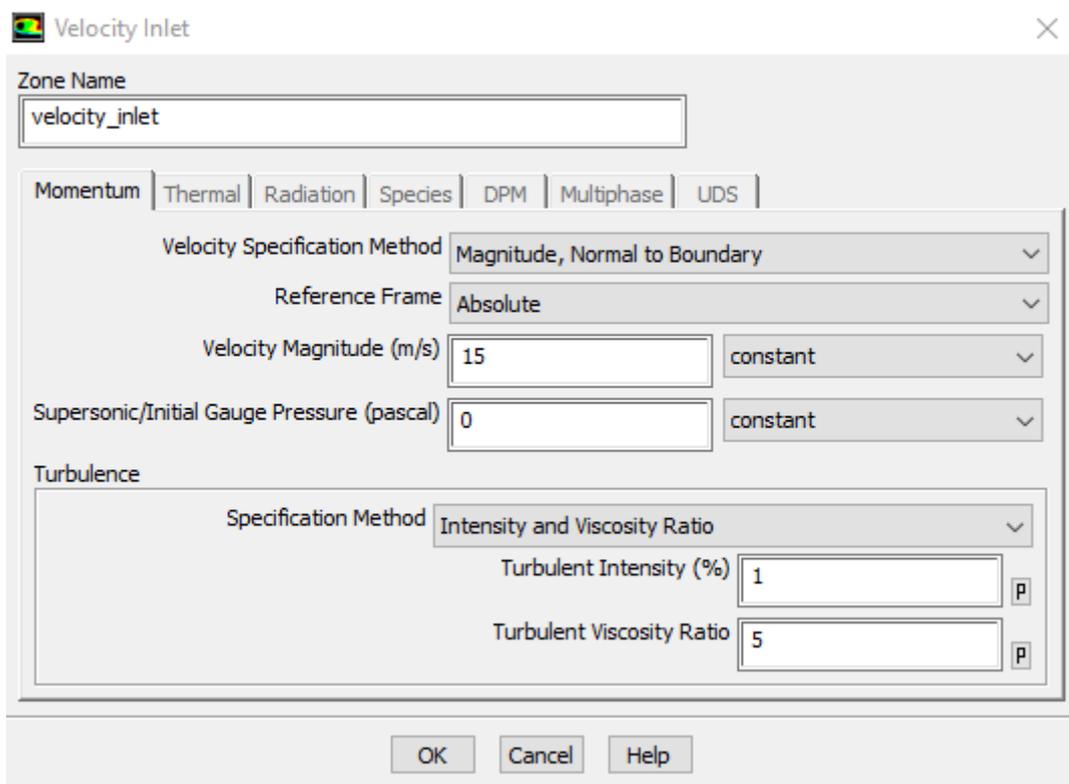


Ilustración 44 Condición de contorno en la entrada de velocidad

Como última condición de contorno tomamos la salida del túnel de viento, pressure outlet en las que modificaremos:

- Backflow Turbulent Intensity: 5%
- Backflow Turbulent Viscosity Ratio: 5%

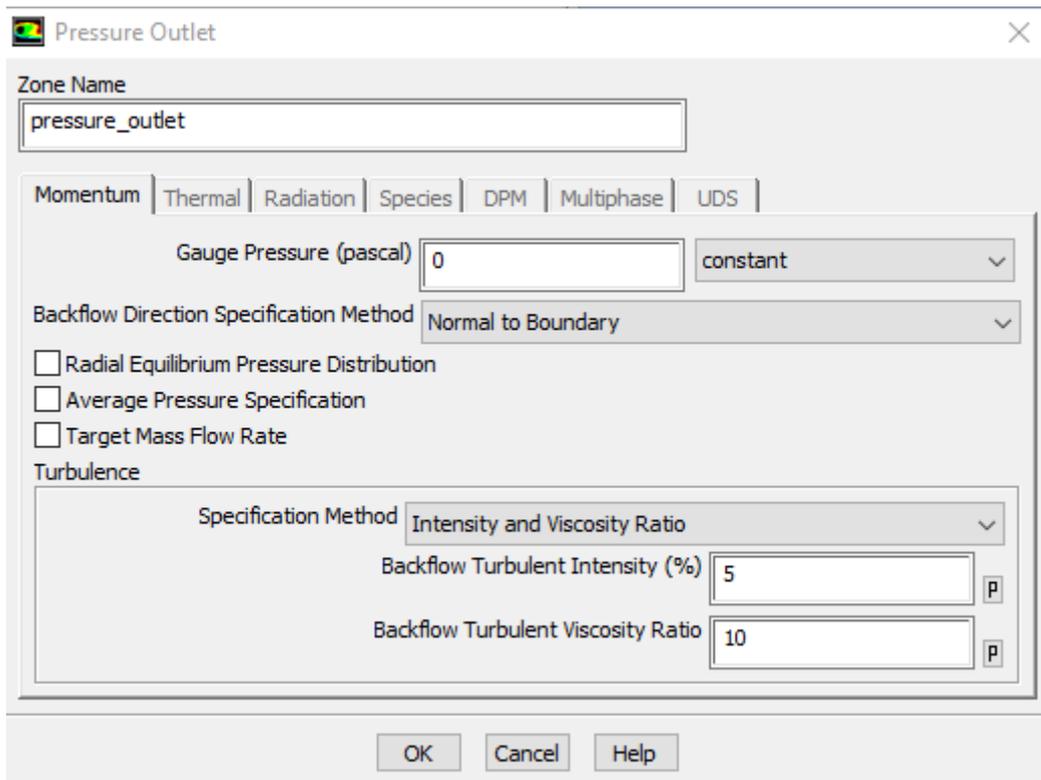


Ilustración 45 Condición de contorno de salida

Terminamos de esta forma las condiciones de contorno del problema, pasamos ahora a los valores de referencia en los que marcaremos en la casilla Compute From, Velocity Inlet y tendremos que modificar además el área proyectada para la adimensionalización del problema.

Usamos la opción que se encuentra al final del solver de reports-projected areas para obtener el área proyectada del alerón, y proyectaremos en este caso el área en plata del alerón.

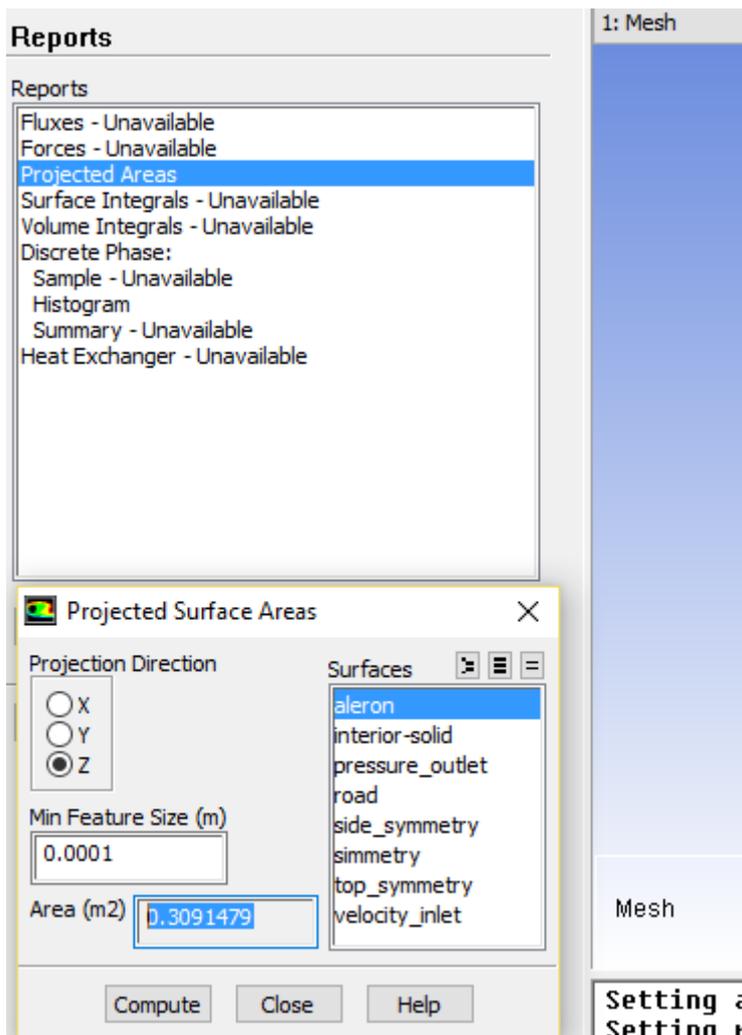


Ilustración 46 Proyección de áreas para adimensionalización

Esta será el área que situaremos en el apartado References Values.

Con esta parte completada pasamos al apartado solution – Solution Methods.

Una vez inicializado el problema podemos calcular la solución en primer orden y esperar a que el residuo de continuidad llegue al orden  $1e-3$  aproximadamente y que  $C_l$  y  $C_d$  hayan convergido como se muestra en la imagen, en este caso para el modelo con un ángulo de ataque de  $30^\circ$ .

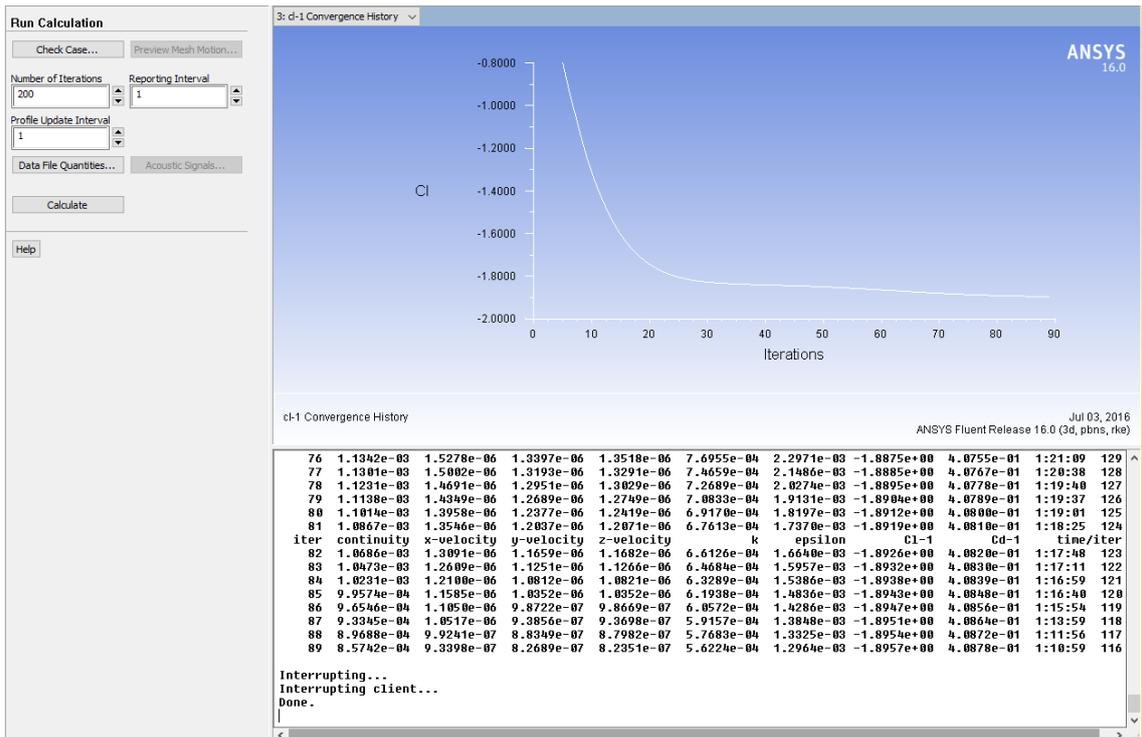


Ilustración 47 Convergencia de CI

Una vez convergido el problema de primer orden pasamos a segundo orden en Solution Methods y ejecutamos el análisis de nuevo hasta que el residuo de continuidad esté en la misma zona que anteriormente.

Finalmente tras resolver hasta que converja el problema en segundo orden ya tenemos el resultado final de nuestro problema

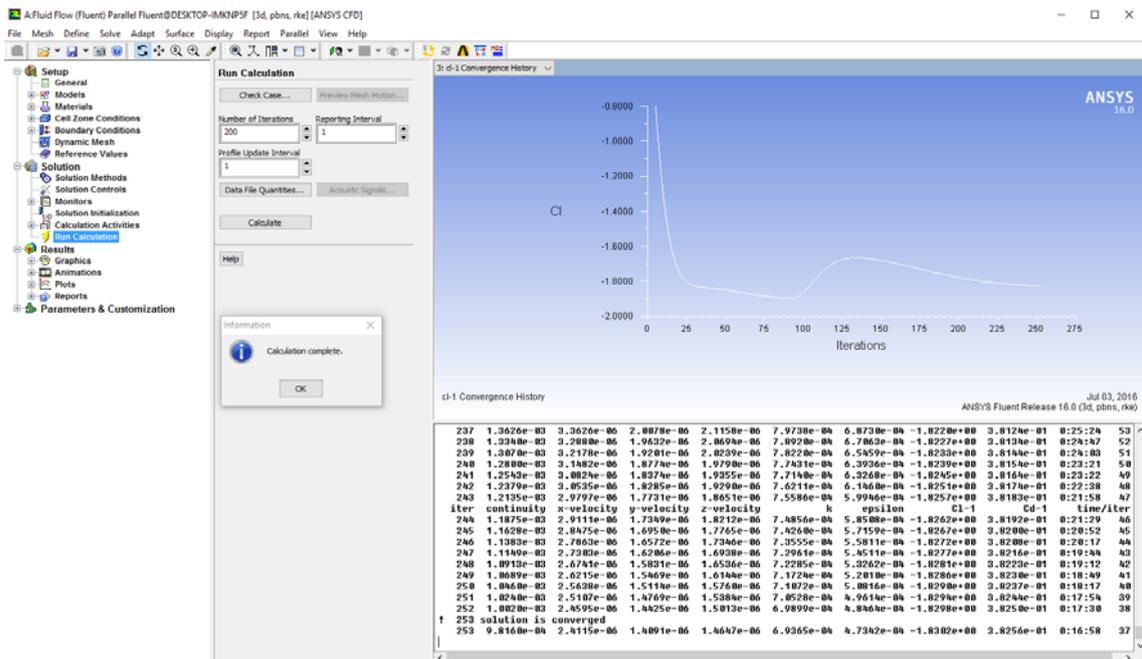


Ilustración 48 Convergencia de CI segundo orden

Una vez hemos obtenido la resolución del problema solo queda observar los resultados en el siguiente apartado de Fluent llamado Results en el cual podremos representar las líneas de corriente y los campos de presiones generados por el alerón delantero en este caso. Sin embargo estos se presentaran directamente en el siguiente apartado de este trabajo

### 3.3.-Distintos casos estudiados y evolución de los resultados

Una vez mostrada la resolución del flujo alrededor de nuestro alerón, conviene ahora presentar de una forma adecuada los resultados obtenidos para nuestra versión final de alerón en sus distintas configuraciones de 15º,25º,30º.

Comenzaremos a mostrar los resultados desde el alerón con menor carga aerodinámica al alerón con mayor carga. Siendo de esta forma, empezaremos con el alerón de 15º.

Seguiremos una aproximación muy parecida a la tomada en 2D, empezaremos mostrando imágenes y resultados de cada ensayo para después en una tabla resumen mostrar las comparaciones con cada configuración de alerón.

- Alerón con etapa móvil a 15º

Esta configuración está claramente destinada a las pruebas que requieran poca carga aerodinámica y sobre todo, una baja resistencia, por tanto podríamos decir que la única prueba en la que se usará esta configuración será en la prueba de *acceleration*.

Una vez obtenidos los resultados de la simulación los mostramos aquí

Ángulo 2ª etapa	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>	Sustentación	Resistencia	Área proyectada
15º	-1.3115	0.1898	-57.429 N	8.315 N	0.317

Tabla 5 Resultado Fluent 15º

Hay que tener en cuenta que en el análisis solo se introduce medio alerón, ya que aplicamos simetría para simplificar y reducir el tiempo de los cálculos por lo que los resultados del alerón completo serían.

Ángulo 2ª etapa	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>	Sustentación	Resistencia	Área proyectada
15º	-1.3115	0.1898	-114.858 N	16.63 N	0.634

Tabla 6 Resultado deshaciendo la simetría del modelo 15º

Vamos a mostrar ahora las líneas de corriente sobre el alerón así como el campo de presiones generado tanto en la zona central como en la zona exterior del alerón. De esta forma lo haremos con todas las opciones de posicionamiento del alerón para poder comparar de forma clara entre las distintas opciones de configuración posible.

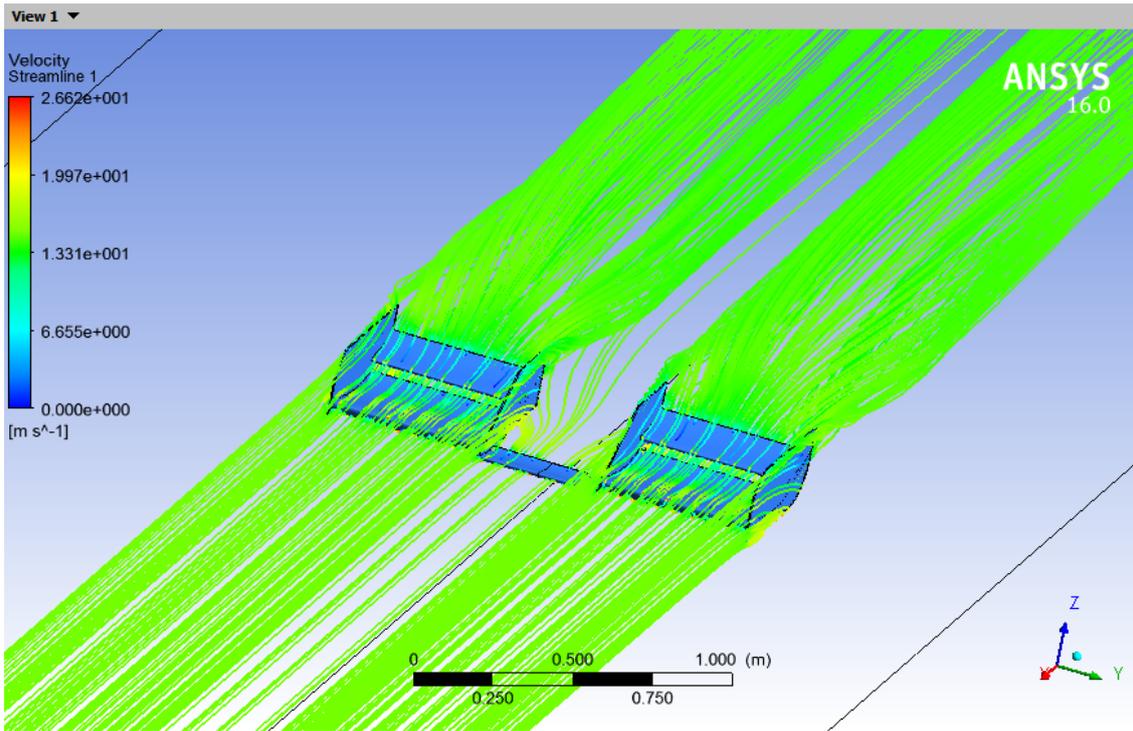


Ilustración 49 Líneas de corriente 15º

Podemos ver como las líneas de corriente de la parte central se redirigen hacia las zonas exteriores lo cual nos conviene teniendo en cuenta que tenemos que refrigerar la zona de los frenos y además dirigimos el flujo hacia el difusor.

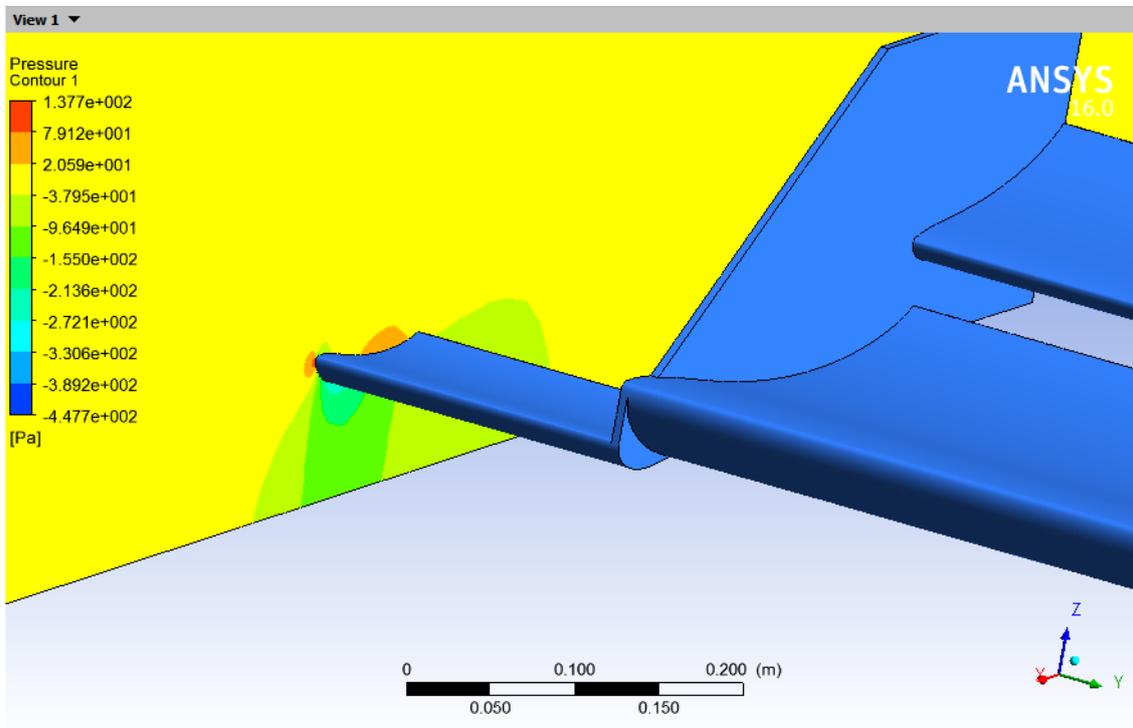


Ilustración 50 Campo de presiones etapa central 15º

Vemos aquí el campo de presiones de la zona central y a continuación el de la zona exterior que corta a las dos etapas más grandes.

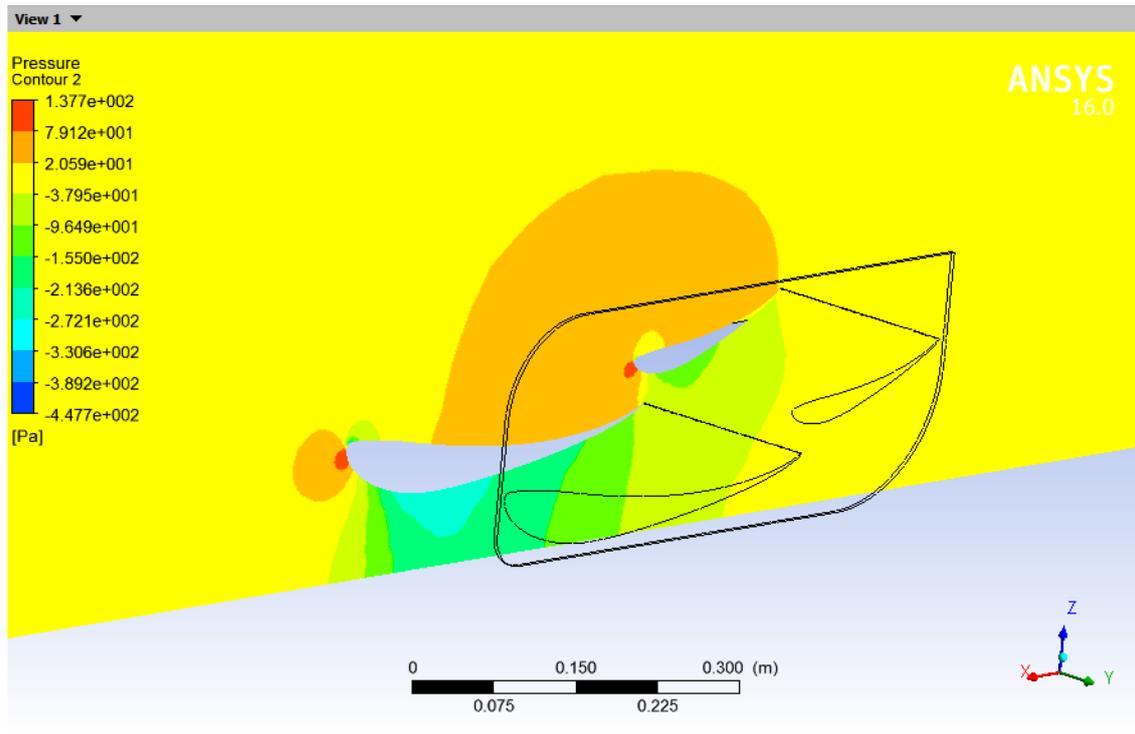


Ilustración 51 Campo de presiones zona principal 15°

Esta sería la zona que más va a cambiar conforme cambiemos la inclinación de la etapa principal

Con esto damos por terminado este primer ensayo

- Alerón con etapa móvil a 25°

Este modelo se toma como solución intermedia a una configuración de baja carga aerodinámica con baja resistencia y una con alta carga aerodinámica con alta resistencia. Esta configuración por tanto, está concebida como una configuración en busca de la eficiencia con su posible uso enfocado a pruebas largas como el *endurance*.

Los resultados del análisis del alerón en Fluent son los siguientes:

Ángulo 2ª etapa	$C_L$	$C_D$	Sustentación	Resistencia	Área proyectada
25°	-1.6683	0.3077	-71.846 N	13.253 N	0.3125

Tabla 7 Resultado Fluent 25°

De nuevo, teniendo en cuenta que lo analizado es medio alerón los datos finales tanto de resistencia como carga aerodinámica son

Ángulo 2ª etapa	$C_L$	$C_D$	Sustentación	Resistencia	Área proyectada
25º	-1.6683	0.3077	-143.692 N	26.506 N	0.625

Tabla 8 Resultado deshaciendo la simetría del modelo 25º

Pasamos ahora a mostrar de igual forma que con el anterior modelo, las imágenes de las líneas de corriente y el campo de presiones de las distintas zonas del alerón.

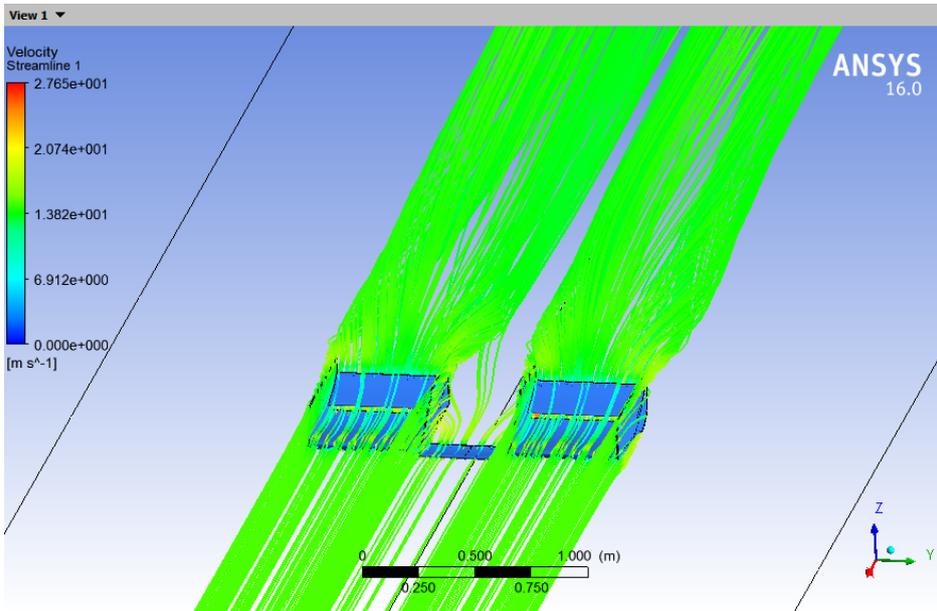


Ilustración 52 Líneas de corriente 25º

Como se puede observar las líneas de corriente en apariencia son bastante similares a las del caso de 15º con el único cambio aparente en el pico máximo de velocidad alcanzado que aumenta en 1m/s aproximadamente

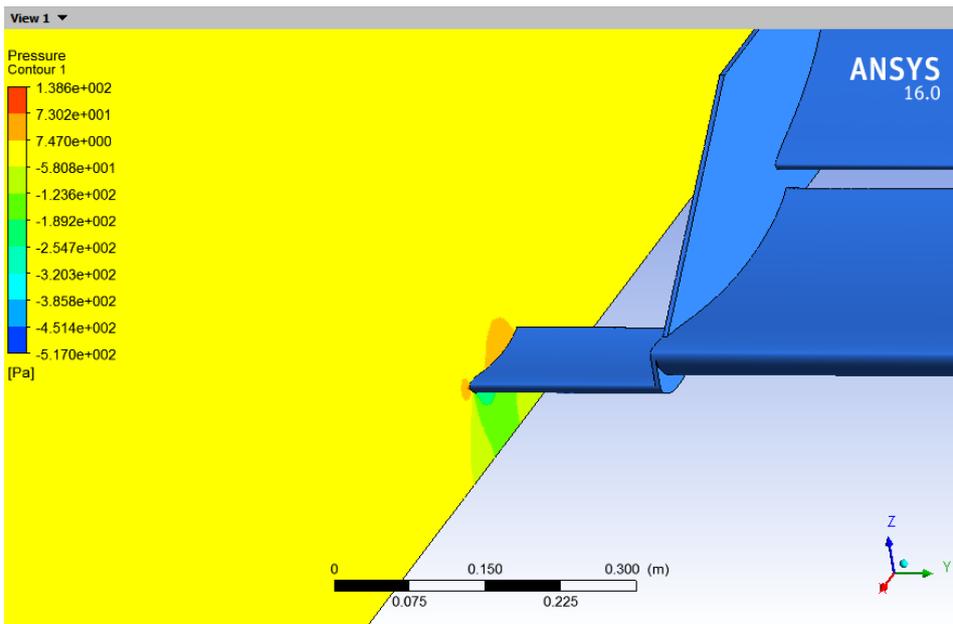


Ilustración 53 Campo de presiones etapa central 25º

Las presiones en la zona central apenas cambian ya que esta zona siempre permanece constante en el alerón.

Pasamos ahora a mostrar la zona exterior, donde si se producen cambios debido al cambio de ángulo de la segunda etapa.

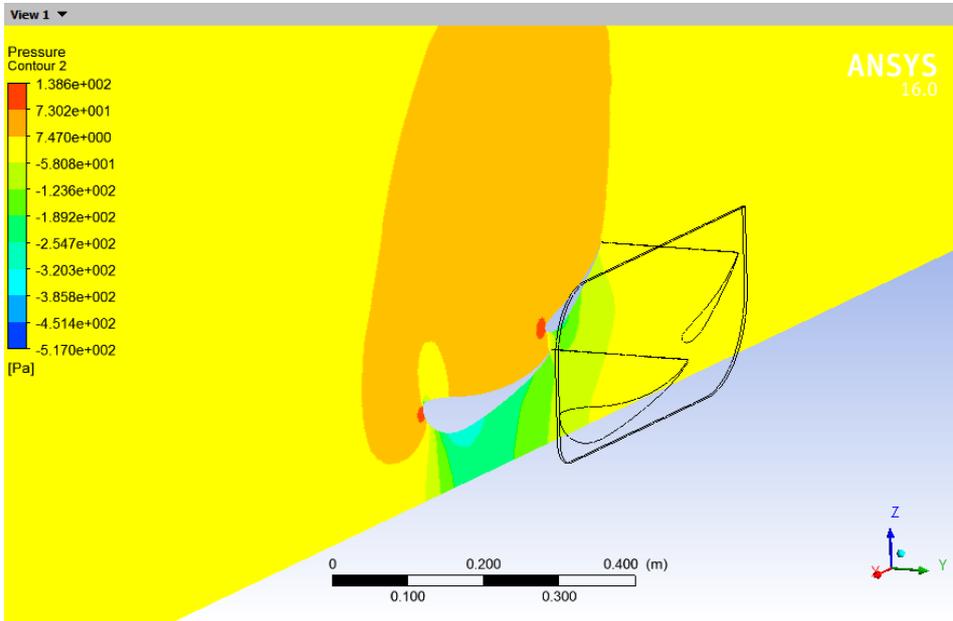


Ilustración 54 Campo de presiones zona principal 25º

Podemos ver como se acentúan los picos de succión en los bordes de ataque de las etapas, así como un aumento de la sobrepresión de intradós y la depresión de intradós, lo buscado para conseguir una mayor carga aerodinámica.

Pasamos ahora a la última configuración analizada.

- Alerón con etapa móvil a 30º

Finalmente, analizamos una configuración de alta carga aerodinámica, destinada a pruebas en las que no se penalice tanto en velocidad punta como si con la falta de adherencia en la parte delantera del monoplaza, esta configuración está destinada a pruebas como el *skidpad* y el *autocross* principalmente.

Los resultados obtenidos de Fluent están reflejados a continuación.

Ángulo 2ª etapa	$C_L$	$C_D$	Sustentación	Resistencia	Área proyectada
30º	-1.8146	0.3753	-77.312 N	15.992 N	0.309

Tabla 9 Resultados Fluent 30º

En el alerón completo por tanto tendremos los siguientes resultados

Ángulo 2ª etapa	$C_L$	$C_D$	Sustentación	Resistencia	Área proyectada
-----------------	-------	-------	--------------	-------------	-----------------

<b>30°</b>	-1.8146	0.3753	-154.624. N	31.984 N	0.618
------------	---------	--------	-------------	----------	-------

Tabla 10 Resultado deshaciendo la simetría del modelo 30°

Mostramos ahora las líneas de corriente y las presiones:

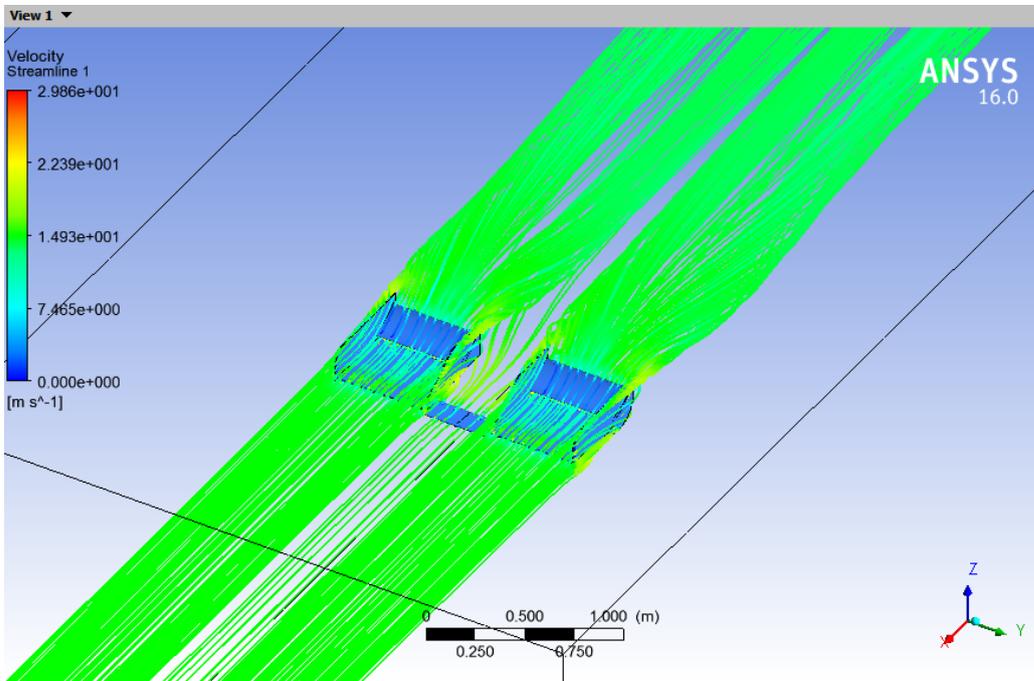


Ilustración 55 Líneas de corriente 30°

Podemos observar ahora que el pico de velocidades alcanzado es más alto aún, sin embargo, se observa como en la zona de intradós las velocidades disminuyen considerablemente indicando que nos acercamos al límite de la adherencia de la capa límite sobre el perfil.

Mostrando ahora el campo de presiones sobre la zona central corroboramos la poca variación sufrida en esta zona central

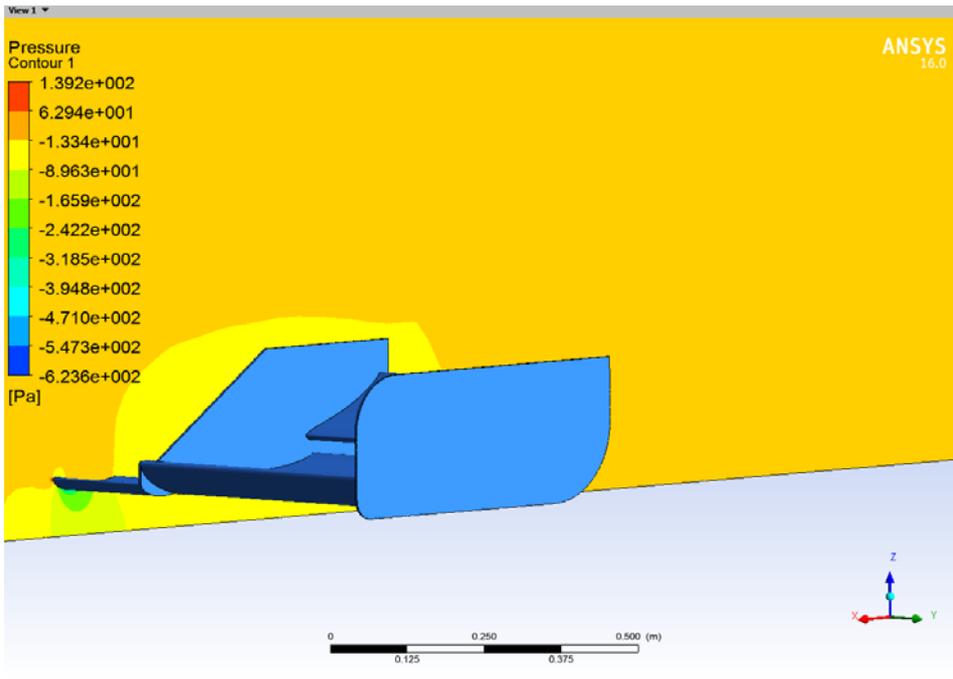


Ilustración 56 Campo de presiones etapa central 30°

Y finalmente mostramos la zona exterior

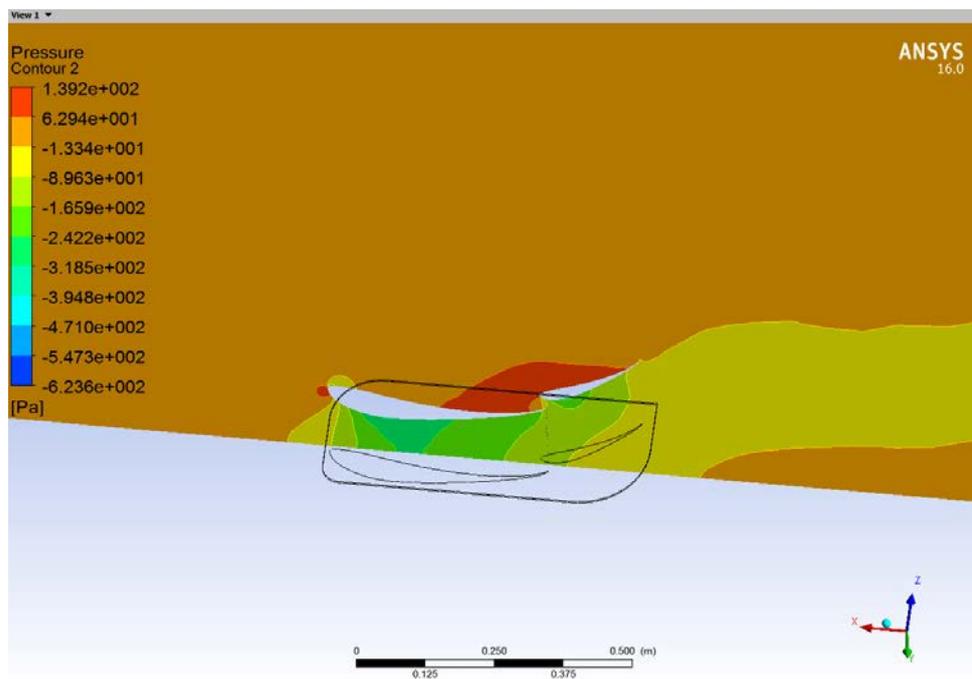


Ilustración 57 Campo de presiones zona principal 30°

Vemos como ahora sí apreciamos un gran cambio en el campo de presiones, acentuándose los valores máximos y los picos de succión.

### 3.4.-Conclusiones

Una vez analizados las tres configuraciones posibles del alerón delantero, podemos presentar los resultados completos para después comentarlos de forma breve.

Ángulo 2ª etapa	$C_L$	$C_D$	Sustentación	Resistencia	Área proyectada
15º	-1.3115	0.1898	-114.858 N	16.63 N	0.634
25º	-1.6683	0.3077	-143.692 N	26.506 N	0.625
30º	-1.8146	0.3753	-154.624. N	31.984 N	0.618

Tabla 11 Recopilación de resultados Fluent

Con estos resultados a la vista, podemos observar claramente la evolución del alerón conforma vamos modificando el ángulo de la segunda etapa, conforme este va aumentando, la carga aerodinámica va aumentando, sin embargo de 25º a 30º es salto que da la resistencia proporcionalmente al que da la sustentación es ligeramente mayor, por lo que podemos concluir que el ángulo de 30º para la segunda etapa del alerón delantero está cerca del límite antes de que empecemos a ganar más en resistencia que en sustentación con la consiguiente pérdida de eficiencia que esto conlleva.

## 4.-Fabricación Maqueta 3D

Para la fabricación de la maqueta del alerón delantero, se he optado por realizarla principalmente con impresión 3D, gracias a su facilidad para producir piezas de tamaño medio y su bajo coste en la producción de series cortas de piezas.

### 4.1.-Adaptación de Impresora 3D del departamento de Aeroespacial

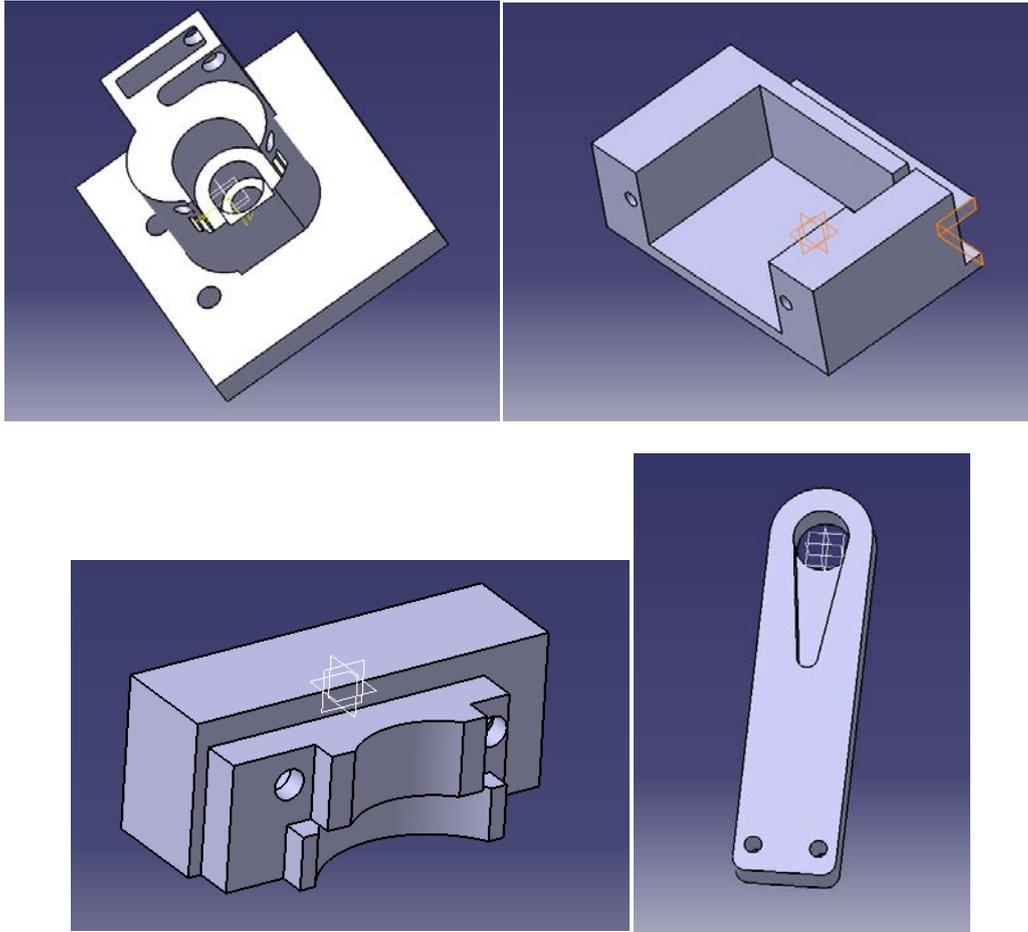
Para comenzar con la fabricación primero se ha mejorado y adaptado la impresora 3D del departamento de Ingeniería Aeroespacial, una impresora modelo Prusa i2 que estaba en desuso debido a algunos problemas con su sistema de extrusión.

Los principales cambios que se han llevado a cabo son los siguientes:

- Instalación de un extrusor mejorado, apto para cualquier material de impresión 3D actualmente, modelo e3d-v6.
- Cambio de motor de extrusión por uno de mayor potencia
- Cambio de la electrónica por una de mayor calidad
- Cambio de la fuente de alimentación por una mayor compacta y potente
- Cambio del driver de control del motor de extrusión por uno de mayor potencia
- Cambio de la base de la impresora para instalar una base caliente que permite la impresión de materiales más robustos como el ABS y el PETG
- Cambio de las barras del eje Z debido al desgaste en su uso anterior
- Instalación de un sistema de autonivel para la base de la impresora
- Rediseño de las cogidas del extrusor con el fin de su adaptación al nuevo modelo
- Instalación de una pantalla LCD para hacer la impresora autónoma

Comenzamos con el cambio de extrusor y la remodelación de todo el carro del eje X para la instalación del sistema de autonivel de la base caliente de la impresora. Hay que diseñar una cogida para extrusor completamente nueva dado que el principal problema de la impresora recaía en que con la cogida anterior no se podía ventilar el hot end o extremo caliente del extrusor por donde sale el plástico fundido, esta circunstancia unida al hecho de que el material de impresión utilizado era PLA que tiende a hincharse con la temperatura provocaba que la impresora quedara atascada con mucha facilidad.

Las nuevas piezas diseñadas en CATIA son impresas en ABS e instaladas en la impresora quedando la zona del extrusor terminada.



**Ilustración 58** Piezas realizadas para la adaptación de la impresora 3D

En estas imágenes también se muestran las piezas diseñadas para la instalación de un microservo cuya función es la de hacer el autonivel de la base de la impresora, este sistema consiste en un servo con un final de carrera en su brazo, este final de carrera se despliega y va tomando medidas en 9 puntos de la base, medidas de altura respecto a la punta del extrusor. Con estas medidas, el programa de la impresora realiza ajustes automáticos durante la impresión mediante los cuales va cambiando su posición en el eje z para ajustarse al posible desnivel de la base.

Finalmente el montaje del carro del eje x quedaría como se muestran en ambas imágenes, todas las piezas grises son las diseñadas e impresas para la adaptación del eje x al nuevo hot end.

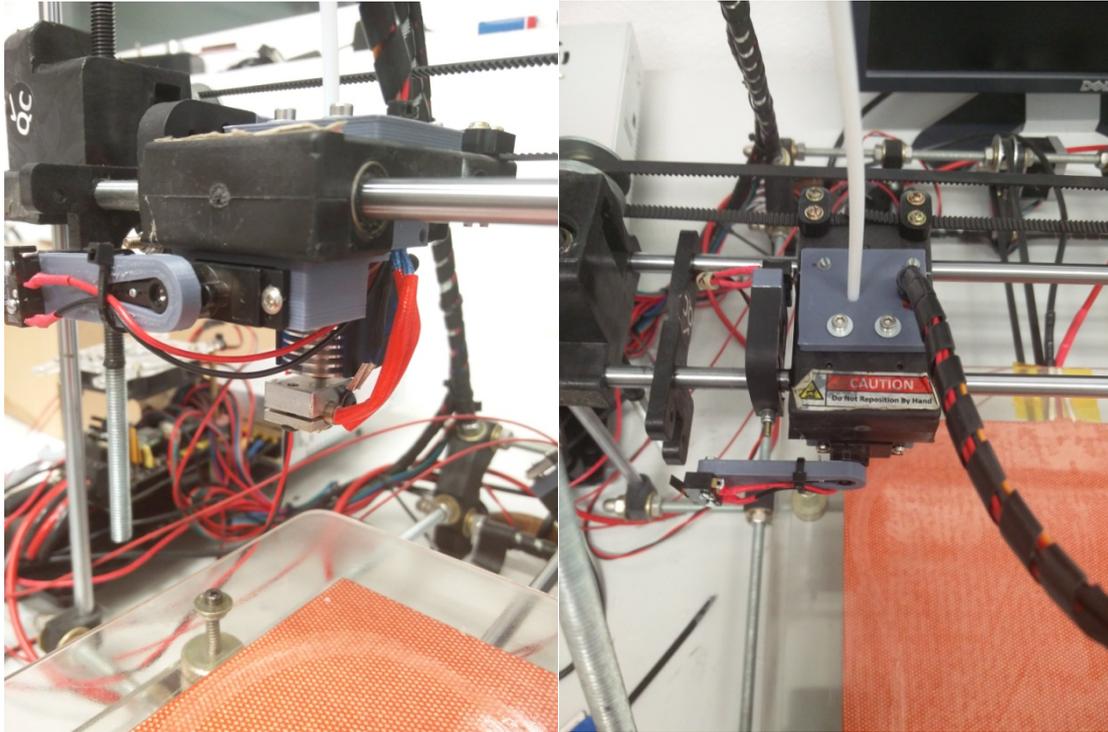
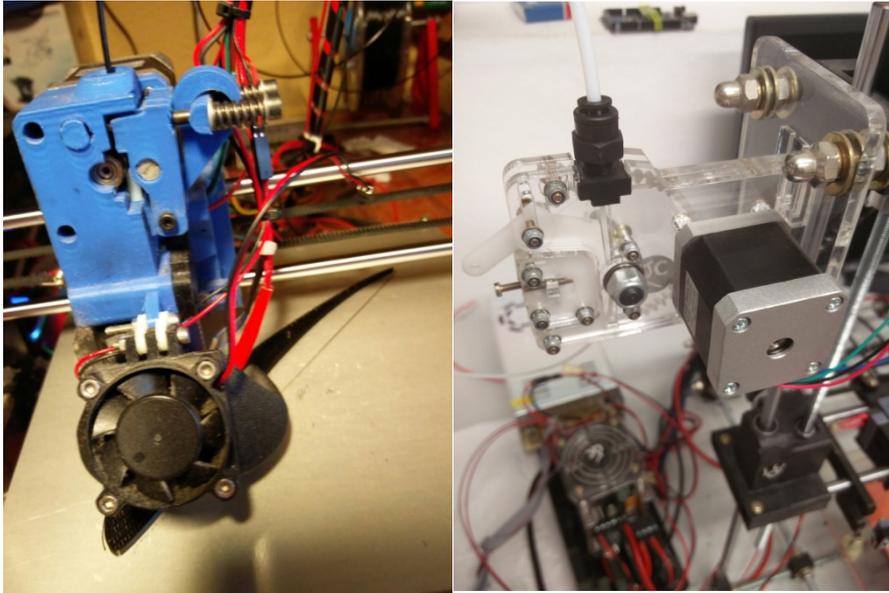


Ilustración 59 Instalación del Hot-End

El siguiente cambio viene provocado por un mal dimensionamiento del sistema de extrusión, pero antes conviene explicar los dos tipos de extrusión existentes en la actualidad en las impresoras 3D de tipo FDM (Fused Deposition Modeling).

- Extrusión directa: En este tipo de extrusión, el motor que empuja el filamento a través del hot end está en el carro del eje x por lo que la distancia que tiene que recorrer es menor y por tanto menor la fuerza
- Extrusión tipo Bowden: En este tipo de extrusión, el de la impresora que nos ocupa, el motor esta fuera del carro del eje X con lo que lo aligera sobre manera, pero su desventaja es que la distancia que tiene que recorrer el filamento es mayor, y por consiguiente la fuerza a realizar por el motor.



**Ilustración 60** Comparación de los tipos de extrusor

Con el cambio del motor original por uno de mayor potencia se resuelven posibles problemas de falta de filamento durante la impresión.

Pasamos ahora al cambio de electrónica y de driver de control de motor de extrusión, la electrónica es uno de los puntos más críticos de la impresora ya que maneja gran cantidad de energía para calentar, tanto la base de la impresora como el hot-end por lo que conviene tener una electrónica de calidad y que no de posibles problemas a largo plazo, esto viene ligado con la introducción de una fuente de alimentación tipo industrial que unido a su pequeño tamaño, proporciona la energía suficiente para todo el sistema.

El driver del motor de extrusión es el modelo DRV-8825 mientras que el del resto de los ejes es el A4988, la diferencia principal entre estos es la cantidad de intensidad que pueden proporcionar al motor siendo la del driver DRV-8825 mayor, consiguiendo de esta forma que el motor pueda producir mayor fuerza.

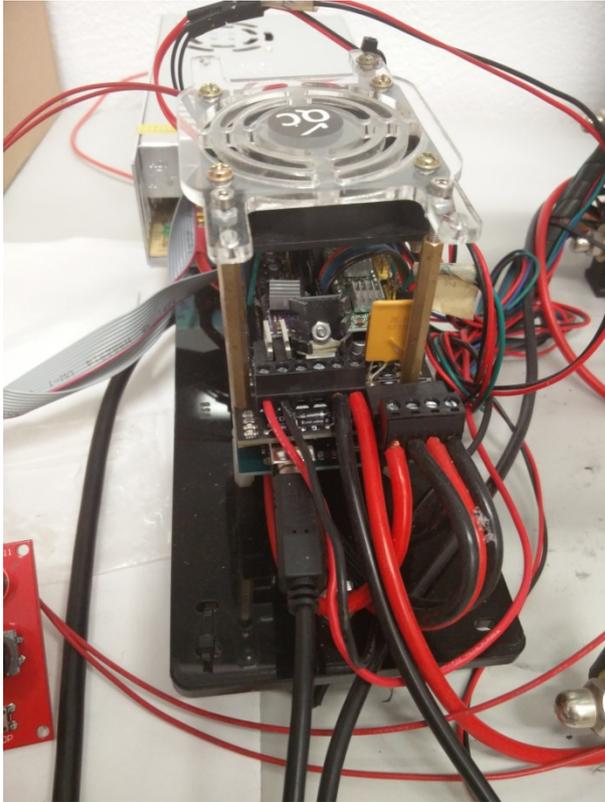


Ilustración 61 Electrónica Impresora 3D del departamento

Aprovechando la electrónica renovada y mejorada se decide montar una base caliente de 240x240 mm, esta base permite imprimir todo tipo de plásticos que por sus características necesitan de una zona caliente para adherirse adecuadamente a la base.

Con esto en mente se instala una cama caliente (heated bed) sobre un cristal de borosilicato, el cual es muy estable térmicamente comparado con otro tipo de cristales, el nivelado de la misma se realiza mediante cuatro tornillos de apriete manual.

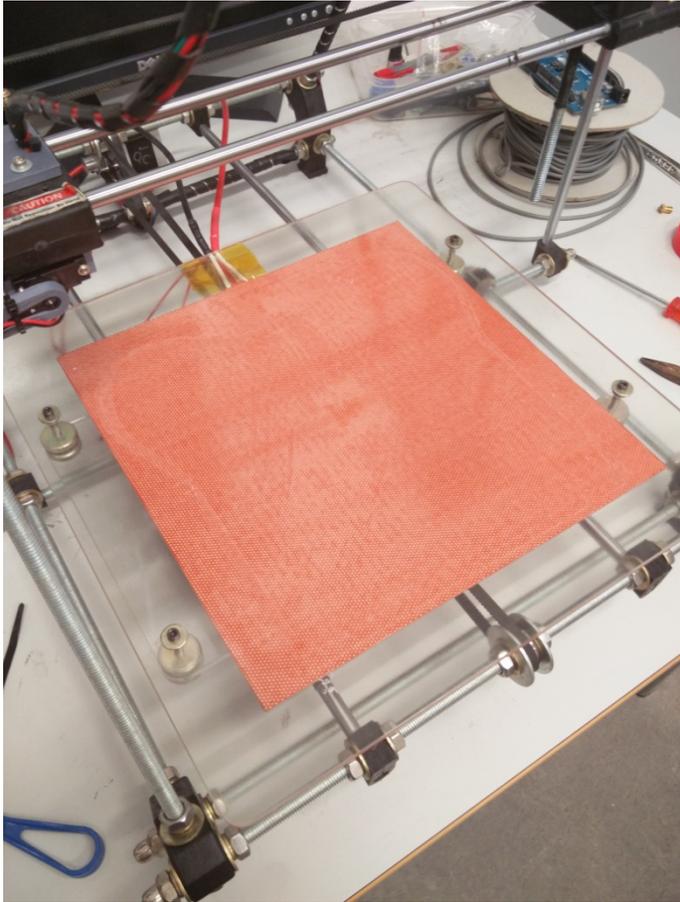


Ilustración 62 Heated Bed (Cama caliente)

Por último, se le añade una pantalla LCD a la impresora con el fin de posibilitar la impresión autónoma, es decir, sin necesidad de estar conectada a un ordenador, esto se realiza mediante el lector de SD que lleva incorporado la pantalla.

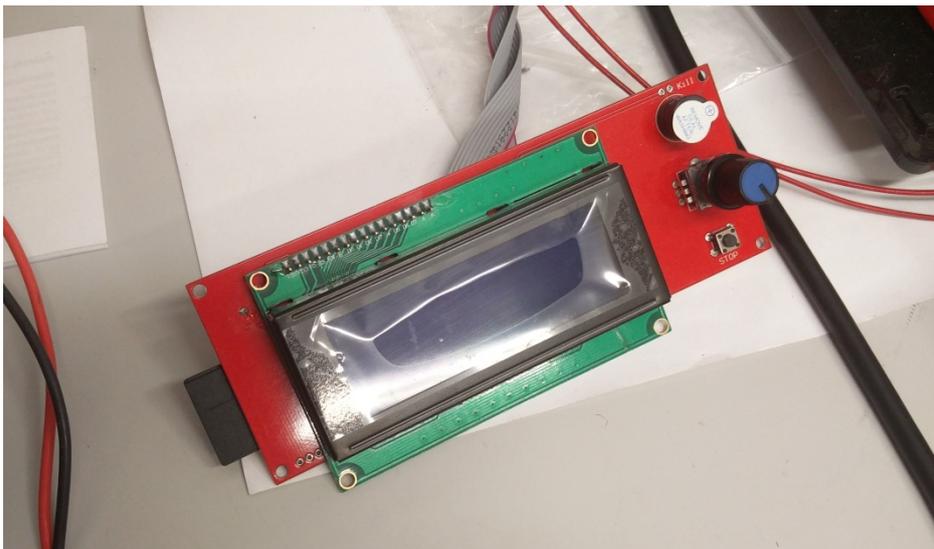


Ilustración 63 Pantalla LCD con lector de tarjetas incorporado

## 4.2.-Uso de la impresora 3D

Una vez modificada la impresora llegamos a la parte de la calibración y puesta en marcha de la misma, explicamos de forma muy breve como importar un archivo en formato stl para su impresión.

Para mayor detalle en el uso y calibración de la impresora se puede consultar el anexo correspondiente al final de este documento.

Este programa trabaja con modelos .stl por lo que vamos a importar por ejemplo el modelo de uno de los perfiles de la maqueta del alerón.

En la pestaña de objetos pulsamos importar y seleccionamos el .stl a imprimir.

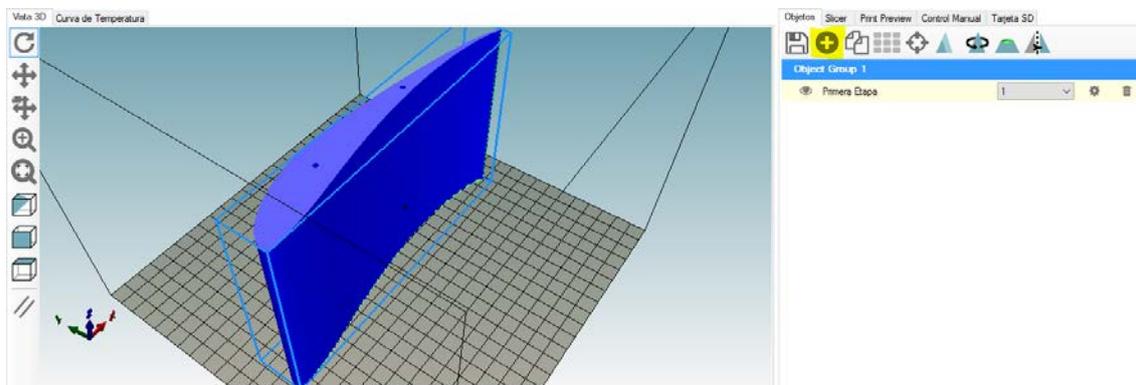


Ilustración 64 Importación de modelo

Para dividir el modelo en capas pasamos a la pestaña "Slicer" en la cual podemos configurar todos los parámetros referentes a la impresión, dado que la cantidad de parámetros es muy grande y que vienen explicados en el propio programa, no vamos a explicar más de lo necesario en este proyecto para no caer en la redundancia.

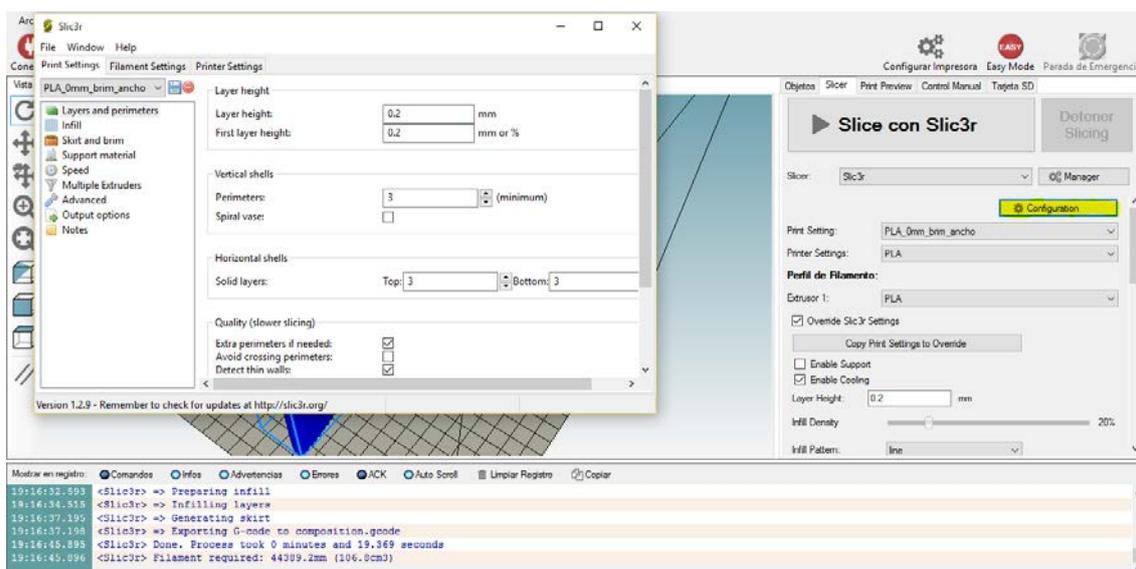


Ilustración 65 Selección de perfil de impresión

Una vez configurado el perfil correspondiente pulsamos el boton "**Slice con Slic3r**" y esperamos a que el programa divida el modelo en capas y haga todo el recorrido de la impresión. Una vez finalizado podemos ver cuánto tarda la impresión y cuanto plástico necesitamos para el modelo.

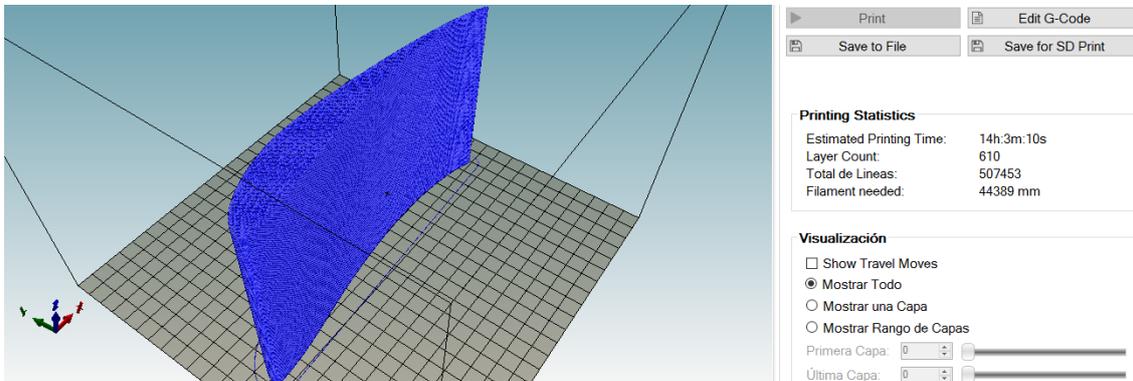


Ilustración 66 Tiempo de impresión

```
<Slic3r> => Preparing infill  
<Slic3r> => Infilling layers  
<Slic3r> => Generating skirt  
<Slic3r> => Exporting G-code to composition.gcode  
<Slic3r> Done. Process took 0 minutes and 19.369 seconds  
<Slic3r> Filament required: 44389.2mm (106.8cm3)
```

Ilustración 67 Cantidad de material

Para comenzar la impresión lo único que tenemos que hacer es pulsar el botón imprimir desde el programa, o en su defecto exportar el .gcode que genera el programa con el boton save to file que podemos ver en la imagen anterior.

Este .gcode se introduciría en la tarjeta sd que está colocada en la pantalla y desde la propia pantalla navegando por sus menús seleccionamos el archivo para preceder a su impresión.

Con estas nociones básicas queda explicado el uso y configuración de la impresora.

### 4.3.-Fabricación del modelo y decisión de la escala

La decisión del tamaño de la maqueta para introducir en el túnel de viento viene dada por diversos factores a tener en cuenta:

- Tamaño máximo de la superficie útil de la impresora 3D
- Tamaño máximo y recomendable de uso del túnel de viento
- Velocidad máxima del túnel de viento
- Facilidad de montaje y preparación posterior de la maqueta.

Empezando por el tamaño útil de la impresora, la base de la impresora del departamento de Ingeniería Aeroespacial es, como ya sabemos de 240x240mm sin embargo, a la hora de la fabricación de los perfiles para la maqueta, se decide hacer en una impresora externa al departamento, por comodidad. Dicha impresora tiene una superficie útil de 200x200mm lo que nos proporciona las limitaciones de tamaño de la cuerda de la etapa principal.

La superficie en proyección de la maqueta no puede superar en un 10% la sección del túnel, y además tenemos que estar separados de las paredes de la cámara de ensayo para que los resultados sean válidos y coherentes.

Tal y como se explicó previamente en el apartado del número de Reynolds, este depende de la longitud, en este caso de la cuerda del perfil principal, para que nuestros resultados en el túnel de viento sean válidos tienen que realizarse al mismo número de Reynolds al que trabajará en las condiciones reales, por lo que la velocidad en la cámara de ensayo del túnel será mayor al ser la escala de la maqueta menor a la real.

El último aspecto es el relacionado con la facilidad de montaje de la misma ya que debido a la forma de montaje no es conveniente alargar sobremanera los perfiles ya que provoca que el modelo a escala pierda rigidez general.

Una vez expuestos los condicionantes en la elección de la escala, se elige realizar el modelo a una escala del 50% del alerón real, con esta escala cubrimos todos los aspectos mencionados anteriormente, siendo el más crítico el de la velocidad máxima del túnel de viento ya que la máxima es justo la necesaria para nuestro ensayo. Teniendo que igualar el número de Reynolds al real, la velocidad del ensayo será de 30m/s para mantener el Reynolds constante en comparación a los ensayos teóricos.

Pasamos ahora a comentar de forma breve la fabricación de todas las piezas realizadas para la maqueta, tanto en impresión 3D como mecanizadas.

La maqueta consta de un total de 15 piezas impresas en 3D, todas ella en PLA, un plástico caracterizado por su baja deformación a la hora de imprimir y quedar depositado sobre la base caliente al contrario que el ABS, que pese a ser más robusto,

su tendencia a levantarse por las esquinas durante las impresiones largas, imposibilita su uso en nuestro caso.

El PLA utilizado está fabricado en España y se utiliza por su gran Calidad de fabricación y acabados y sus excelentes propiedades mecánicas que nos son proporcionadas por el fabricante del mismo.

CHARACTERISTIC	SMARTFIL PLA	UNIT	TEST METHOD
BREAKING RESISTANCE (IZOD)	20	KJ/m <sup>2</sup>	ASTM (D256)
TENSILE STRENGTH	362	Kg/cm <sup>2</sup>	ASTM (D638)
SURFACE HARDNESS (ROCKWELL)	85	Mpa	ISO 2039-1
THERMAL RESISTANCE	75	°C	ISO 306
DENSITY	1,24	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
BENDING STRENGTH	485	Kg/cm <sup>2</sup>	ISO 178

Ilustración 68 Características PLA

Las piezas que por tanto imprimiremos en este material serán las siguientes.

- Cuatro secciones de etapa principal
- Cuatro secciones de etapa móvil
- Dos secciones de etapa central
- 5 secciones de morro

Conviene remarcar que, a pesar de inicialmente no tener previsto ensayar en el túnel de viento el alerón con el morro del monoplaza, por requisitos estructurales del modelo se realiza a posteriori el morro para la maqueta, comentaremos en el apartado de ensayos en túnel de viento los resultados obtenido en Fluent por el alerón con el morro para que sirvan como comparativa. Estos resultados se obtienen de la otra parte de este proyecto colaborativo por lo que no se entrará en profundidad en su obtención.

Los perfiles de nuestro modelo, están impresos como ya hemos comentado en una impresora externa al departamento de Ingeniería Aeroespacial y, por simplicidad y sobre todo por su robustez, todos los perfiles se realizan macizos, sin ningún vaciado a excepción de los agujeros pasantes que posteriormente nos servirán para realizar el montaje de los mismos mediante barras roscadas en el propio perfil.

El perfil utilizado como ya se ha comentado previamente es el Selig 1223 del cual se utilizan distintos tamaños de cuerda. El modelo del morro es un escalado directo del

utilizado en el coche, con un vaciado interno para posibilitar el alojamiento de las cogidas del túnel de viento dentro del mismo.

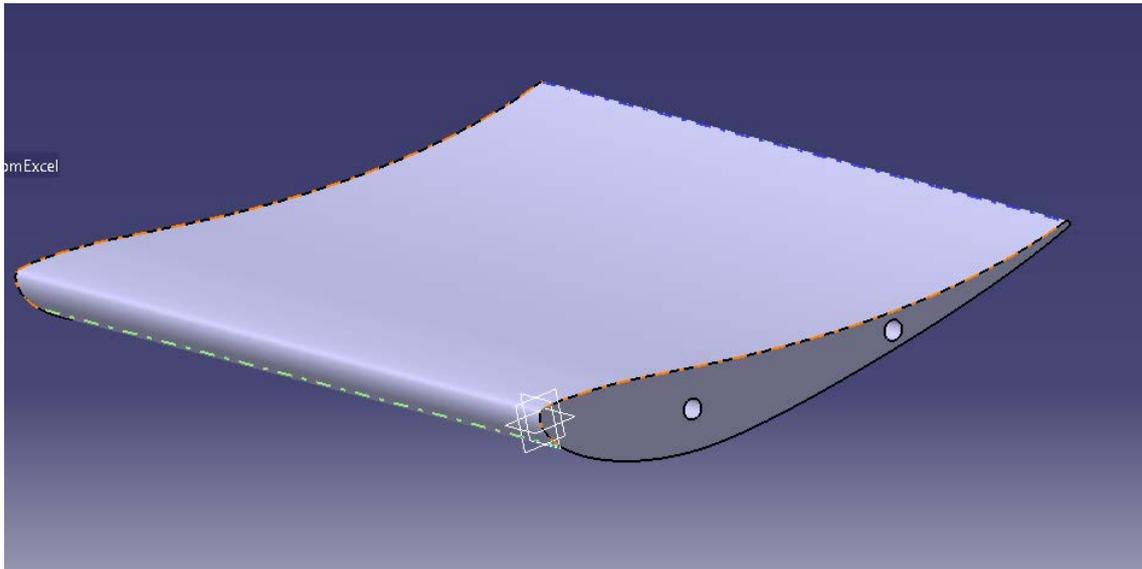


Ilustración 69 Modelo a imprimir de aleron

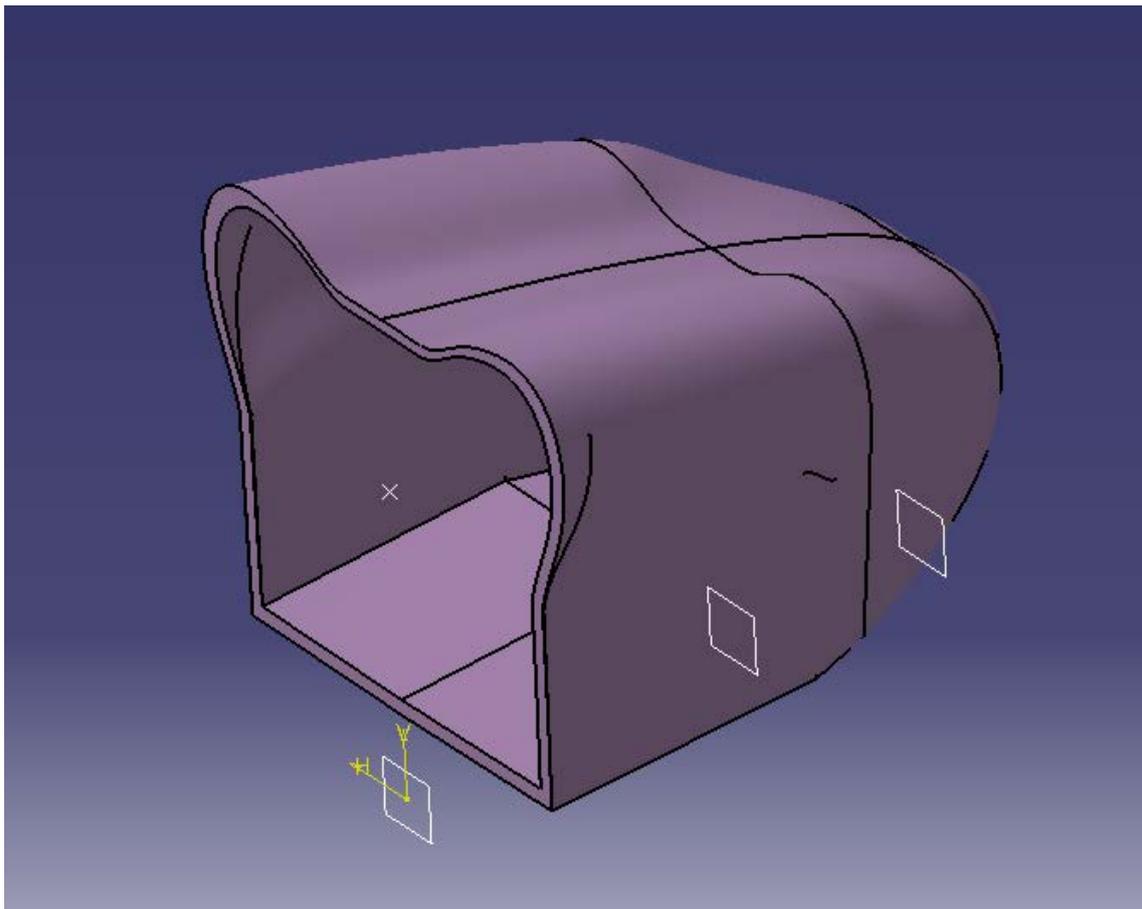


Ilustración 70 Modelo a imprimir de morro

La cantidad total utilizada para los perfiles de la maqueta asciende a 1kg mientras que las piezas del morro pesan en total unos 600g

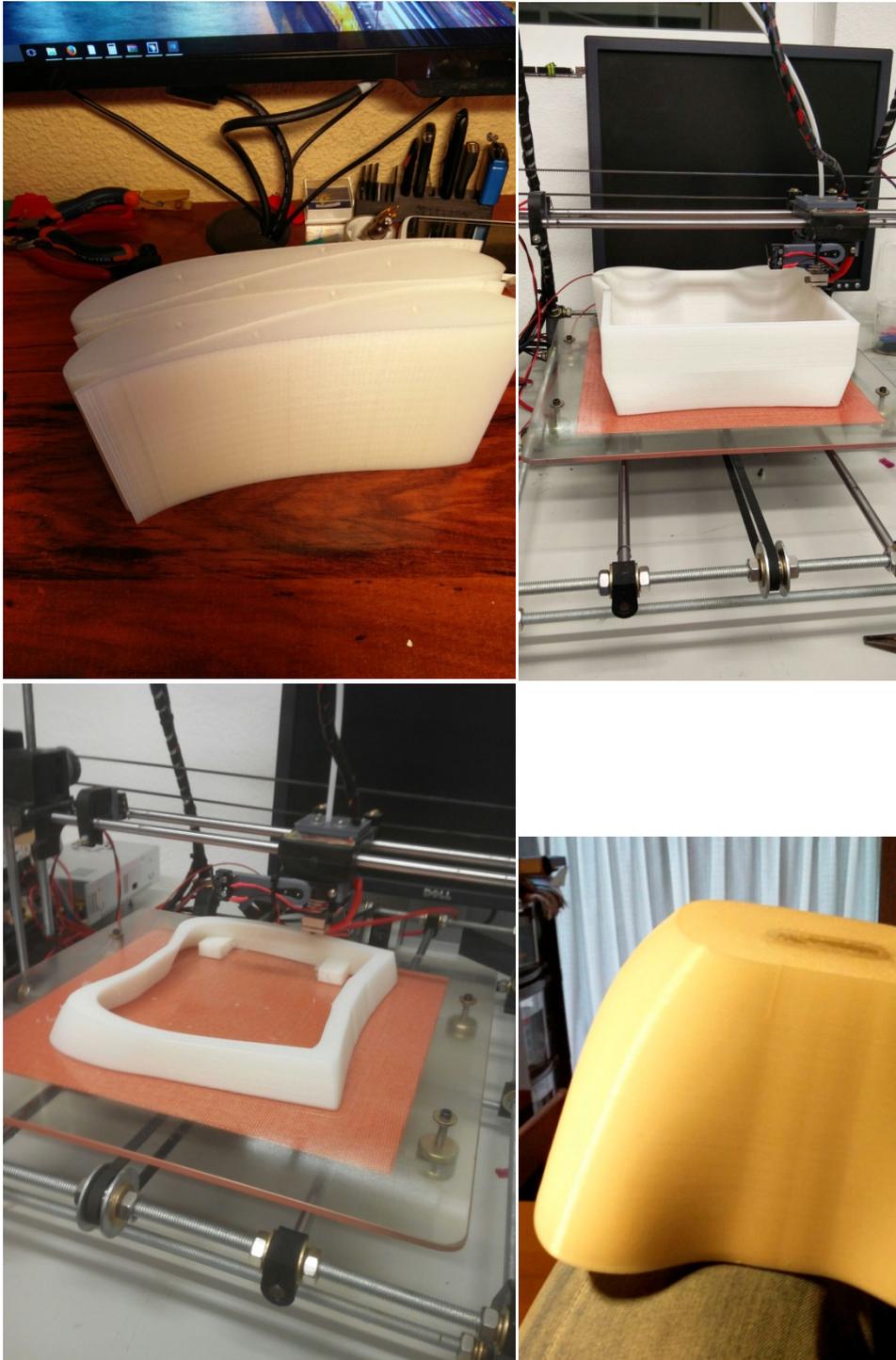


Ilustración 71 Piezas impresas

Una vez impresas todas las piezas necesarias pasamos al montaje. Inicialmente usamos Endplates y placas centrales de madera cortadas con la CNC del departamento de Ingeniería Aeroespacial pero posteriormente como veremos en las imágenes finales

del modelo, las placas son de aluminio ya que eso nos proporcionaría mayor rigidez a todo el conjunto.

El montaje como ya hemos comentado previamente se realiza con barras roscadas en el propio plástico de 3 mm de diámetro, con esto no sólo conseguimos unir las distintas piezas de impresión 3D sino que le aportamos una robustez extra al introducir nervios de acero a lo largo de todo el perfil como se muestra en las imágenes.



Ilustración 72 Montaje de la maqueta

Finalmente tras unir todos los perfiles la maqueta inicial estaba completada



Ilustración 73 Montaje final

Como hemos indicado, las placas de contrachapado se sustituirían posteriormente por unas placas de aluminio cortado en la cortadora CNC de las mismas dimensiones usando el programa Aspire para su programación



Ilustración 74 Corte de placas aluminio



Ilustración 75 Endplate aluminio

Estas placas junto con la adición del morro también impreso en 3D aportan una gran rigidez al modelo final.

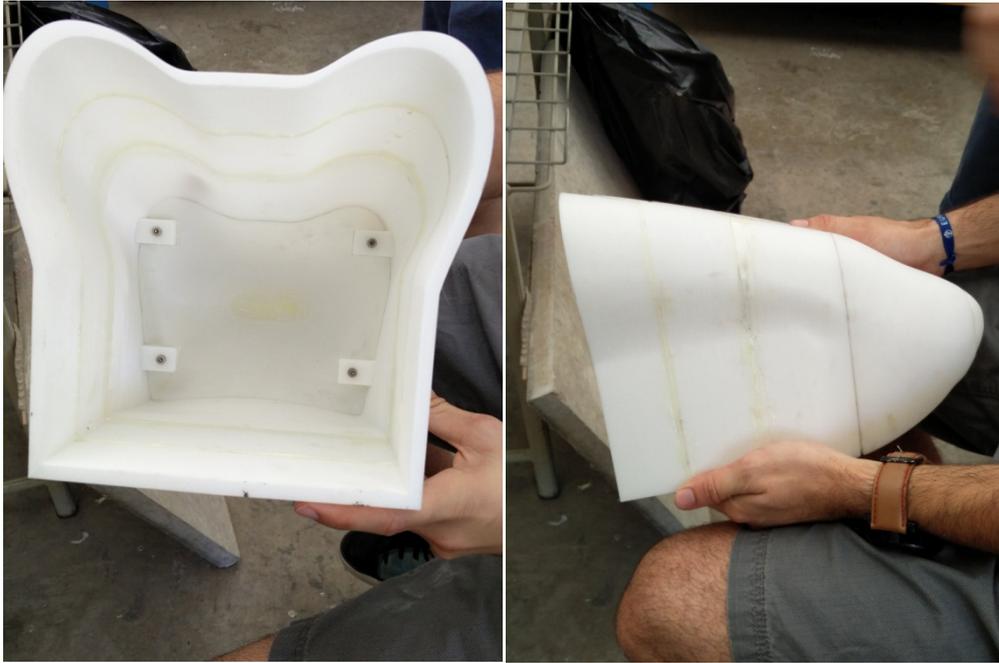


Ilustración 76 Morro pegado y listo para su integración con el resto de la maqueta

#### 4.4.-Preparación del modelo para su introducción en túnel de viento

Una vez impresa la maqueta y montada, el siguiente paso es mejorar su acabado tras la impresión para disminuir en la medida de lo posible los defectos de la misma, para ello se ha optado por un lijado con lija gruesa de todos los perfiles y posterior lija fina para el suavizado de la superficie y su posterior pintado con pistola.

Tras este pintado se volvió a dar una capa de lija fina y una segunda capa de pintura para disminuir aún más las imperfecciones posibles que quedaron tras la primera capa de pintura, siendo el resultado final del pintado el siguiente.



Ilustración 77 Preparación de los perfiles

Tras el montaje final de todas las piezas de alerón y morro junto con las placas mecanizadas en aluminio, el aspecto final de nuestro modelo previo a la realización de las cogidas para el túnel de viento es el mostrado en la siguiente imagen.



**Ilustración 78 Maqueta completa**

El modelo final tiene, gracias en gran parte a la adición del morro, una rigidez mucho mayor que el modelo inicial.

El siguiente paso es la realización de las cogidas del modelo para poder meterlo en el túnel de viento. Esta cogida estará íntimamente relacionada con la balanza de medidas que vamos a usar para todo el proyecto por lo que como primer paso, vamos a explicar dicho sistema de adquisición de datos.

Se trata de un transductor de 6 ejes, el cual nos permitirá medir Fuerzas y momentos en cada uno de los tres ejes de un sistema coordinado

Conviene conocer por tanto las características de medición de dicho transductor para comprobar que estamos dentro de los rangos soportados por el mismo. Consultando el manual del transductor modelo Gamma, observamos que sus características son las siguientes:

Single-Axis Overload	
Fxy	±1200 N
Fz	±4100 N
Txy	±79 Nm
Tz	±82 Nm

Ilustración 79 Carga Máxima por eje

Una vez decidido el transductor a utilizar, conviene describir el sistema de cogidas que se va a utilizar para que la maqueta se mantenga estable en el túnel y no corra peligro de romperse, con el riesgo de dañar el túnel que ello conlleva.

La cogida para la maqueta consiste en unas barras transversales que van de punta a punta del túnel y están atornilladas a la pared del mismo.

Una vez atornillada esta barra que tiene una plataforma en medio, se ancla a ella el transductor que vamos a utilizar.

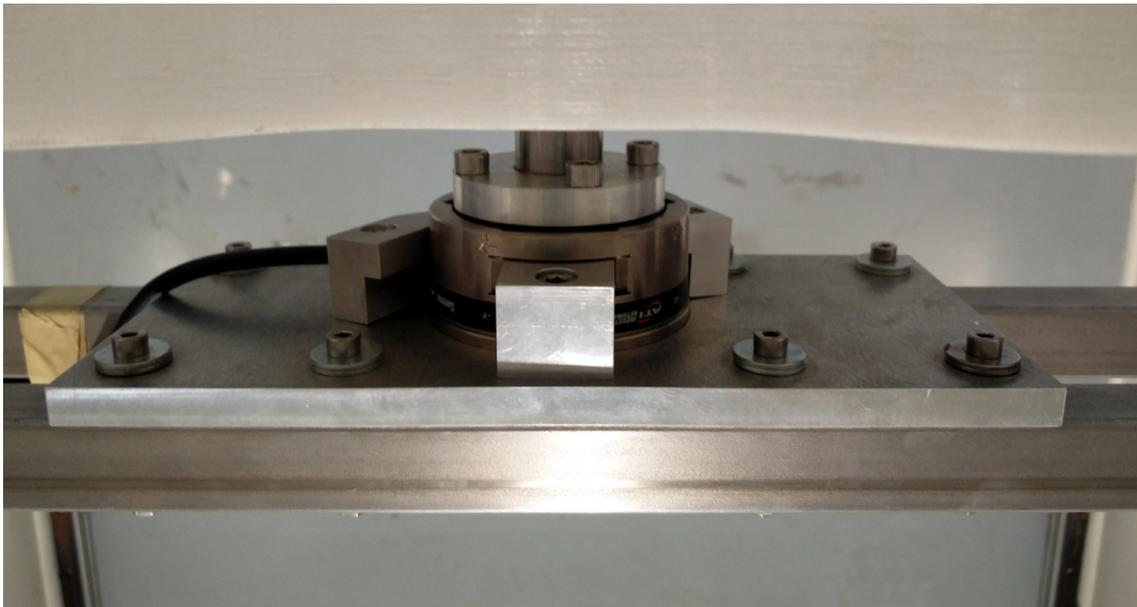


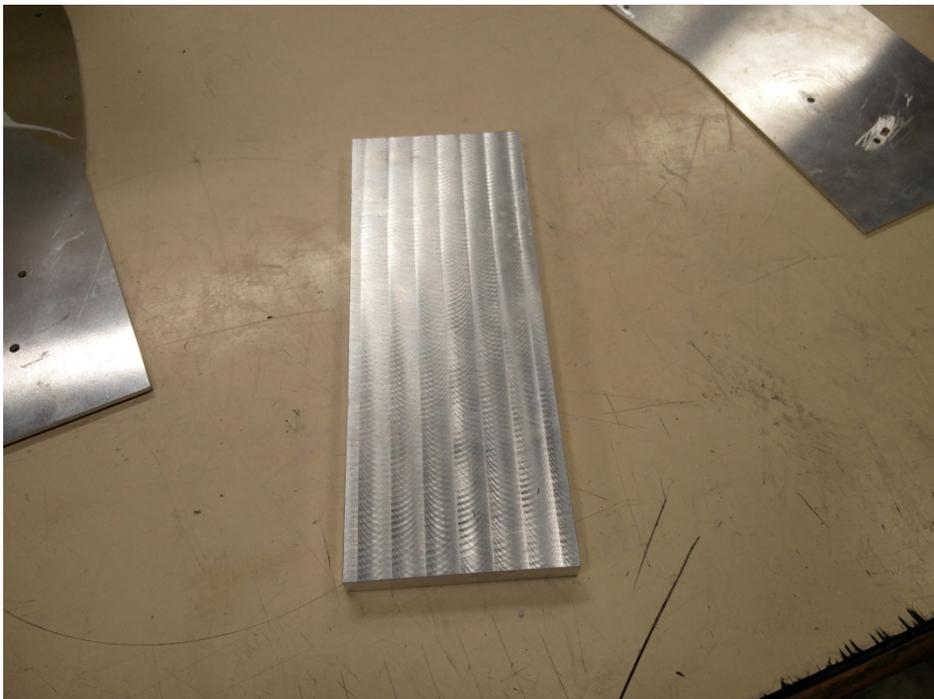
Ilustración 80 Cogida de barras transversales con transductor anclado

Reutilizando una barra de proyectos anteriores, somos capaces de anclar la maqueta mediante una placa y abrazadera mecanizada en aluminio que mostramos a continuación.



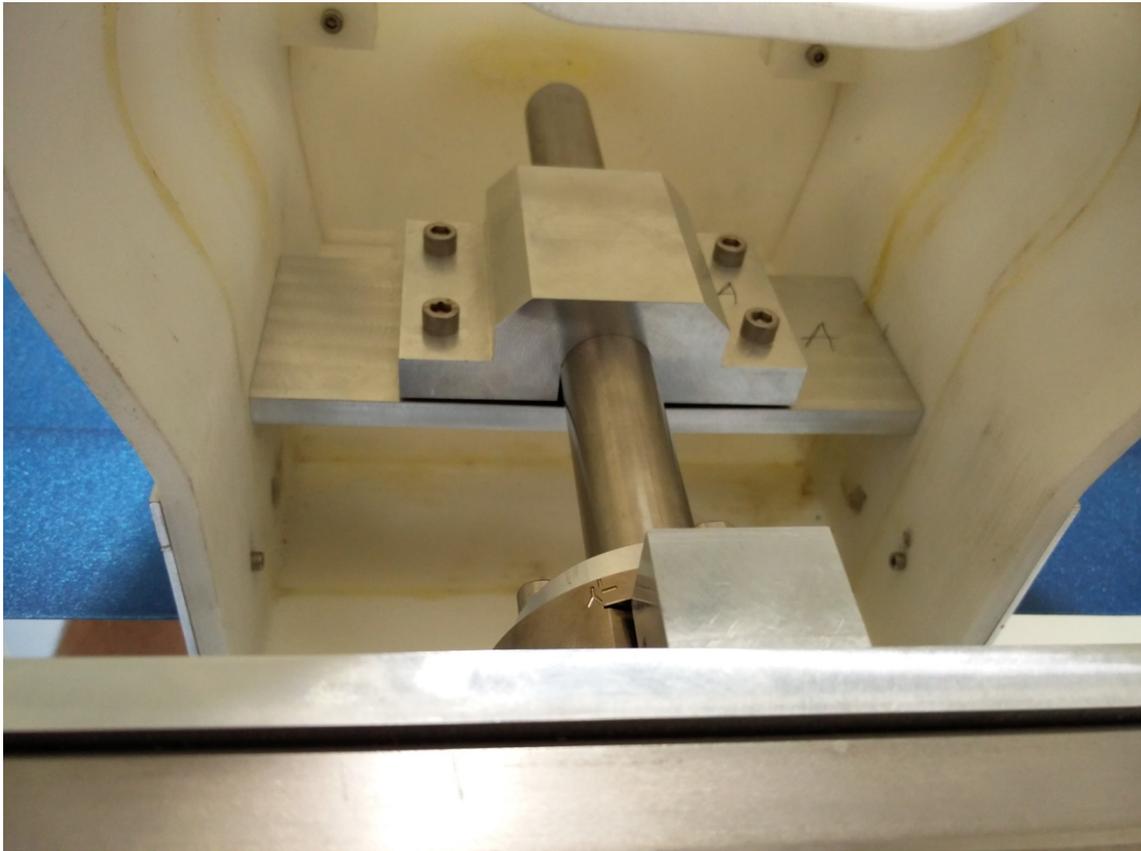
**Ilustración 81** Proceso de fabricación de la abrazadera de aluminio

Postramos también parte del proceso de la placa que atraviesa el morro anclándose a las placas de aluminio externas.



**Ilustración 82** Placa de aluminio de la cogida interna

Una vez montado todo el sistema de cogida el aspecto interno del morro de la maqueta es el siguiente:



**Ilustración 83 Cogida interna montada**

De esta forma, escondemos gran parte del sistema de cogida de la maqueta detrás del morro con lo que simplificamos sobremanera los posteriores cálculos con los resultados obtenidos en el túnel de viento al no producirse una resistencia considerable por la cogida de la maqueta.

Con este quedaría terminado el setup de la maqueta en el túnel de viento.

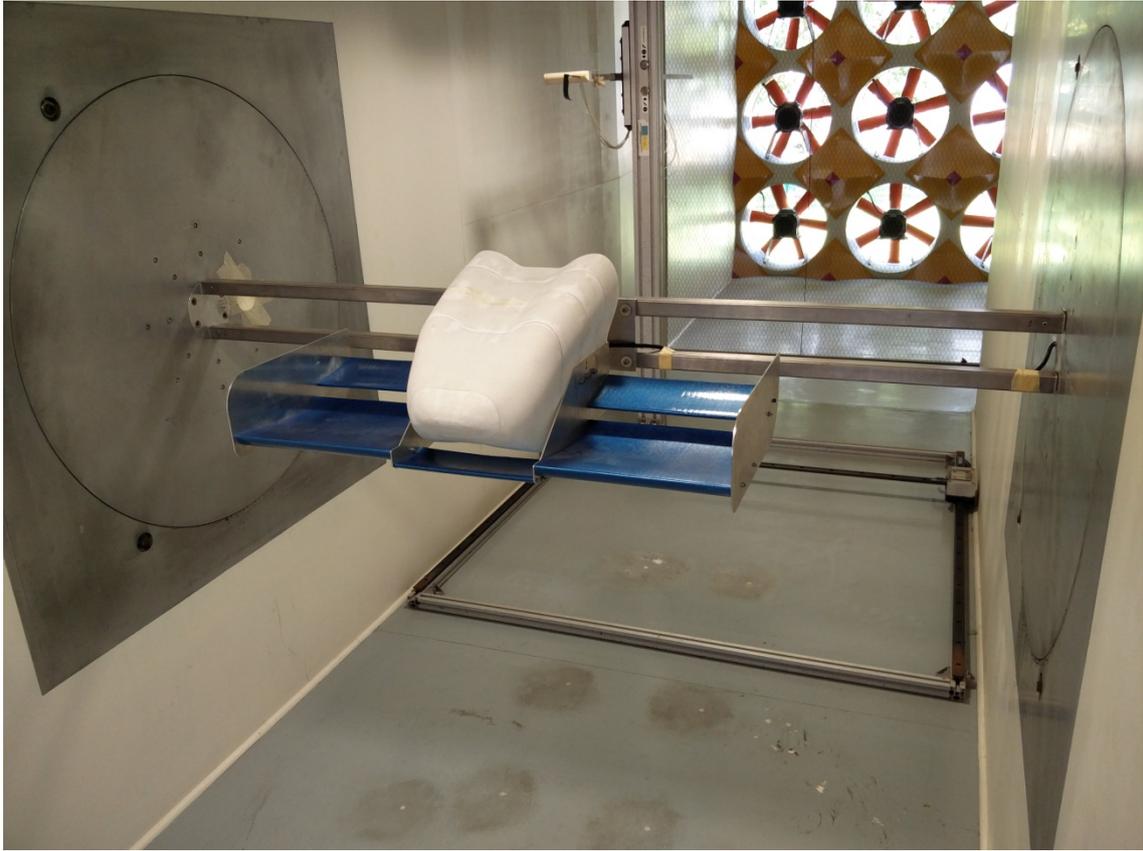


Ilustración 84 Maqueta instalada en el túnel de viento

## 5.- Ensayo de Control en Túnel de viento

### 5.1.-Resultados en Fluent para Modelo completo de alerón y Morro

Como ya hemos visto la maqueta que se va a analizar tiene como parte estructural importante el morro del monoplaza, como recordamos este añadido se hizo principalmente por razones estructurales por lo que conviene analizar en Fluent de nuevo en estas condiciones y comprobar los resultados esperados.

Este análisis se realiza por parte de otro miembro del equipo de aerodinámica del equipo ARUS mostrando a continuación un resumen de resultados del mismo así como unas imágenes de las líneas de corriente tal y como se hizo anteriormente con los resultados de los análisis del alerón en solitario

Ángulo 2ª etapa	$C_L$	$C_D$	Sustentación	Resistencia	Área proyectada
15º	-2.4793	0.4980	-140.567 N	28.235 N	0.4114
25º	-3.0133	0.5866	-184.669 N	34.907 N	0.4318
30º	-3.2478	0.6263	-197.834 N	38.150 N	0.4420

Tabla 12 Resultados Fluent con morro

Presentamos a modo ilustrativo las líneas de corriente del ensayo de Fluent con un ángulo en la segunda etapa de 25º.

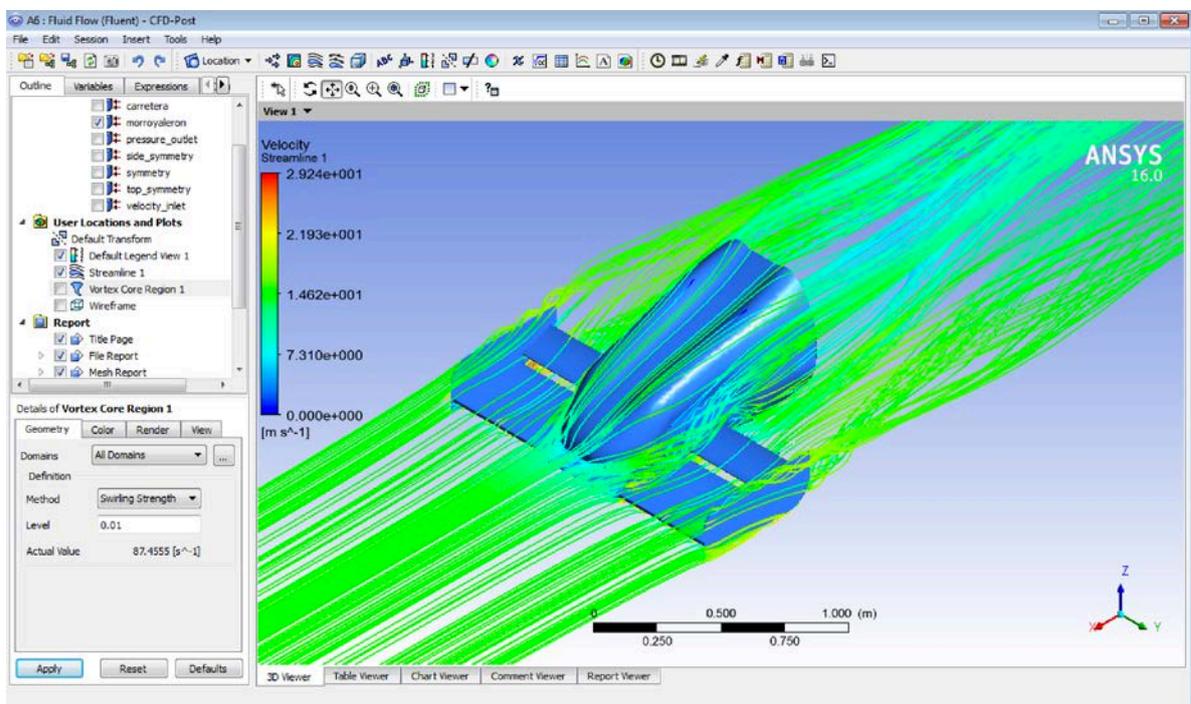
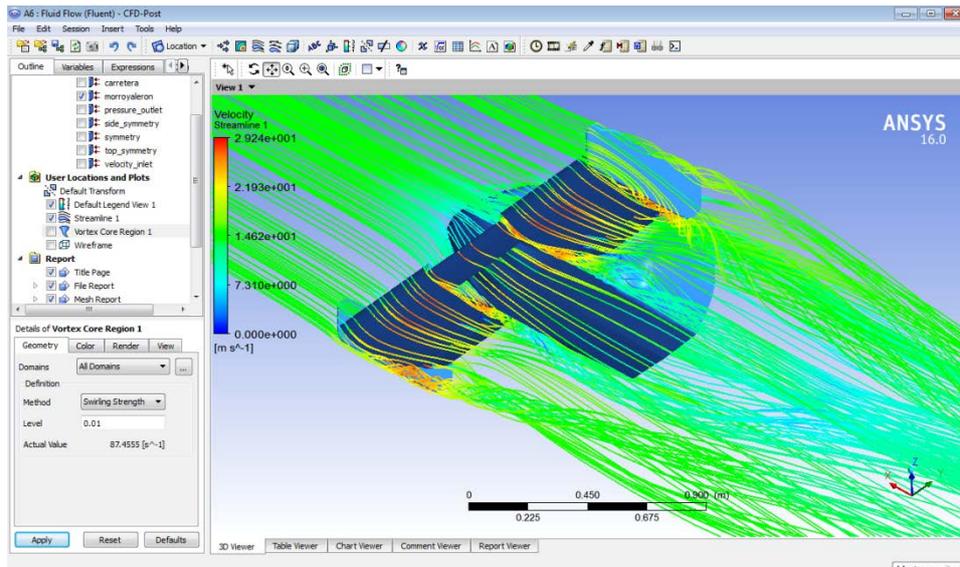


Ilustración 85 Líneas de corriente etapa móvil a 25º



**Ilustración 86** Líneas de corriente con etapa móvil a 25°

Se puede observar que la interacción del alerón delantero con el morro del monoplaza produce un extra de sustentación bastante importante, que viene penalizado debido lógicamente al aumento de área frontal, sin embargo, teniendo en cuenta que la relación peso potencia de nuestro monoplaza es muy alta, prima más el aumento de downforce aunque penalicemos ligeramente en resistencia que tendrá que vencer el motor.

## 5.2.-Condiciones de ensayo

Se ha comentado en puntos anteriores el setup de la maqueta en el túnel de por lo que podemos pasar directamente a analizar los resultados obtenidos y compararlos con lo que se debería obtener atendiendo a los resultados de fluent .

Conviene comentar previamente que no se entrará en profundidad el setup del sensor en el túnel de viento y todo el proceso de calibración llevado a cabo ya que se considera parte del otro proyecto colaborativo asociado al alerón delantero.

Teniendo en cuenta las limitaciones eléctricas del túnel de viento, la velocidad máxima a la que se realizan los ensayos en el túnel es de 78 km/h en lugar de los 100Km/h que corresponderían para mantener el número de Reynolds dada que la escala es 1:2, es decir la longitud característica es la mitad que el modelo real.

Suponemos por tanto que el número de Reynolds no baja lo suficiente como para afectar a la pendiente de  $C_L$  con lo que simplemente manteniendo el  $C_L$  constante haremos un cálculo a la velocidad del túnel y obtenemos unos valores teóricos que compararemos con los obtenidos en el túnel

Una vez explicadas las condiciones en las que se realizan el ensayo con la respectiva corrección podemos pasar a mostrar los resultados

### 5.3.-Resultado de ensayo

Ángulo 2ª etapa	Valor túnel de viento	Valor teórico
15º	-60.123 N	-73.546 N
25º	-78.625 N	-96.621 N
30º	-83.080 N	-103.509 N

Tabla 13 Resultados túnel de viento

Como podemos observar hay una pérdida de aproximadamente un 20% respecto al valor teórico, entendiéndose por teórico el obtenido con Ansys Fluent.

Esta pérdida la podemos explicar debido a que la situación y disposición de la maqueta en el túnel de viento hace que no se tenga en cuenta el efecto suelo producido por el alerón, además al tampoco tener una carretera en movimiento la pérdida se ve acusada

## 6.-Conclusiones

Viendo en retrospectiva todos los análisis realizados durante todo el proceso y finalmente los resultados obtenidos, podríamos decir que se ha realizado un proceso de diseño y desarrollo completo, a falta de la pruebas en pista con el modelo real para comprobar los datos obtenidos en túnel de viento.

Esta forma de desarrollo podemos decir que es la más parecida a la llevada a cabo por los equipos de Fórmula 1 y a la vista de los resultados podemos considerar que tienen una clara correlación con la realidad si comparamos el análisis en CFD con el análisis en túnel de viento.

### 6.1.-Trabajos Futuros

Como trabajos futuros de este proyecto, se podrían proponer una gran cantidad de ellos:

- Estudio del efecto sombra: Sombra producida por los endplates del alerón durante las curvas
- Tener en cuenta el efecto suelo mediante la correcta colocación del modelo en la cámara de ensayos y la simulación de una carretera móvil
- Estudiar la influencia del flujo producido por el alerón delantero en el alerón trasero, lo que conllevaría la introducción de dos modelos simultáneamente en la cámara de ensayo del túnel de viento.

Y una gran cantidad más de trabajos haciendo uso de una tecnología de prototipado rápido y económico como es la impresión 3D que podría llegar a permitir introducir el coche completo a menor escala de manera relativamente económica.

## Anexo 1.-Uso de Ansys Fluent

Como ya hemos explicado, el análisis del modelo 3D se realizará con el programa de CFD Ansys Fluent, por lo que, conviene explicar al igual que se ha hecho con Java Foil, el uso de Ansys Fluent y la preparación de un análisis completo para después pasar a mostrar resultados y analizar los mismos.

Ansys Fluent es un programa de elementos finitos usado para resolver el movimiento de fluidos en el entorno de un objeto.

En nuestro caso dicho objeto será el modelo de alerón delantero que hemos realizado previamente.

Una vez abrimos el Workbench de Ansys seleccionamos un nuevo trabajo en Fluent, tal y como se muestra en la imagen.

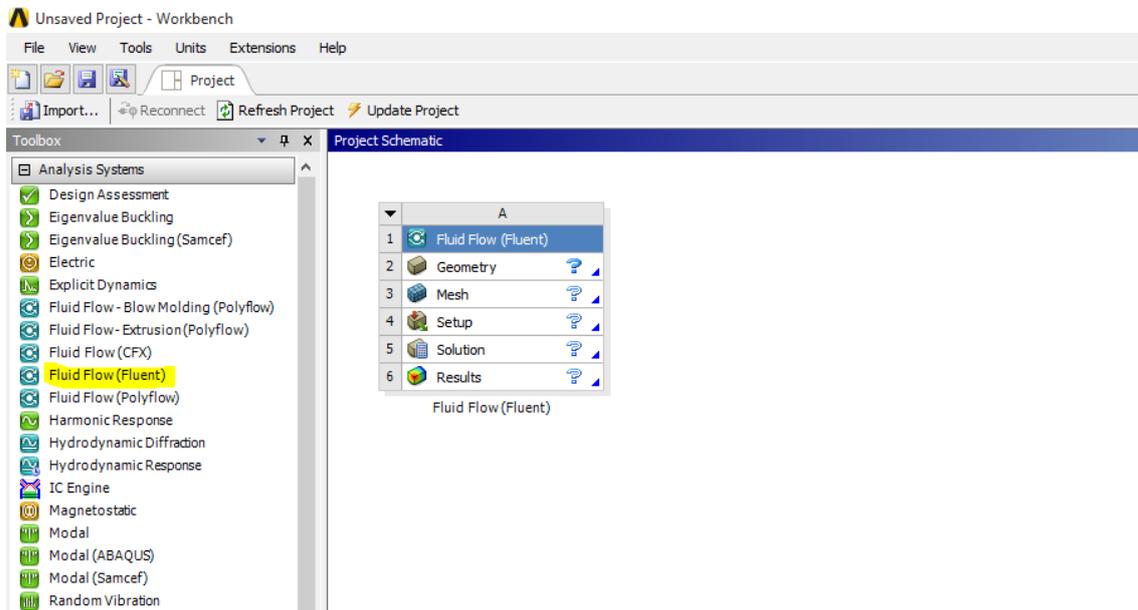
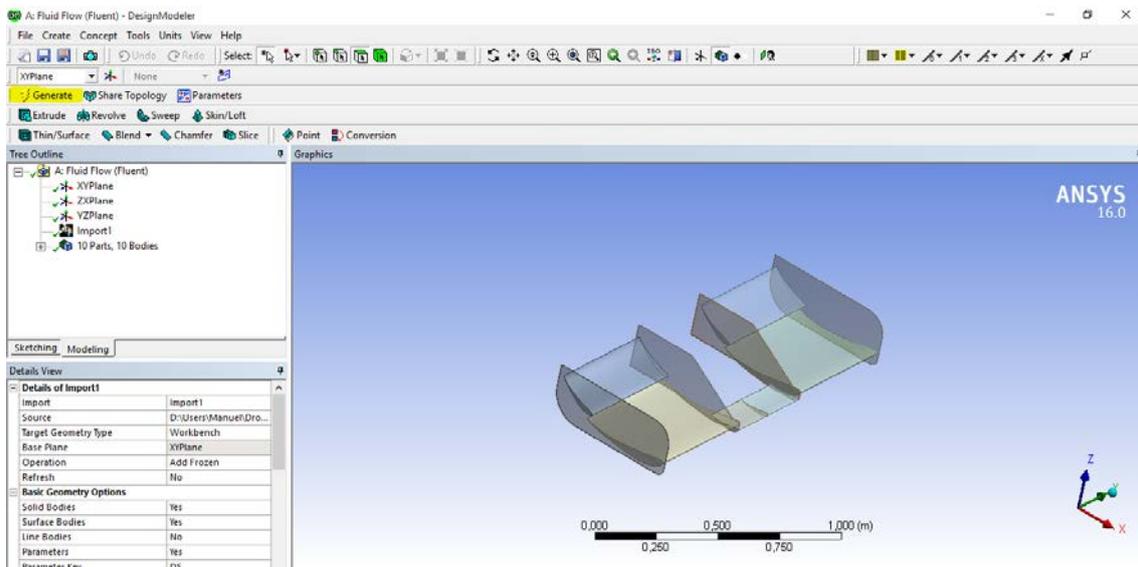


Ilustración 87 Workbench Ansys

Una vez creado el nuevo proyecto de Fluent tenemos que abrir la sección de geometría en la que crearemos el modelo que vamos a analizar con elementos finitos.

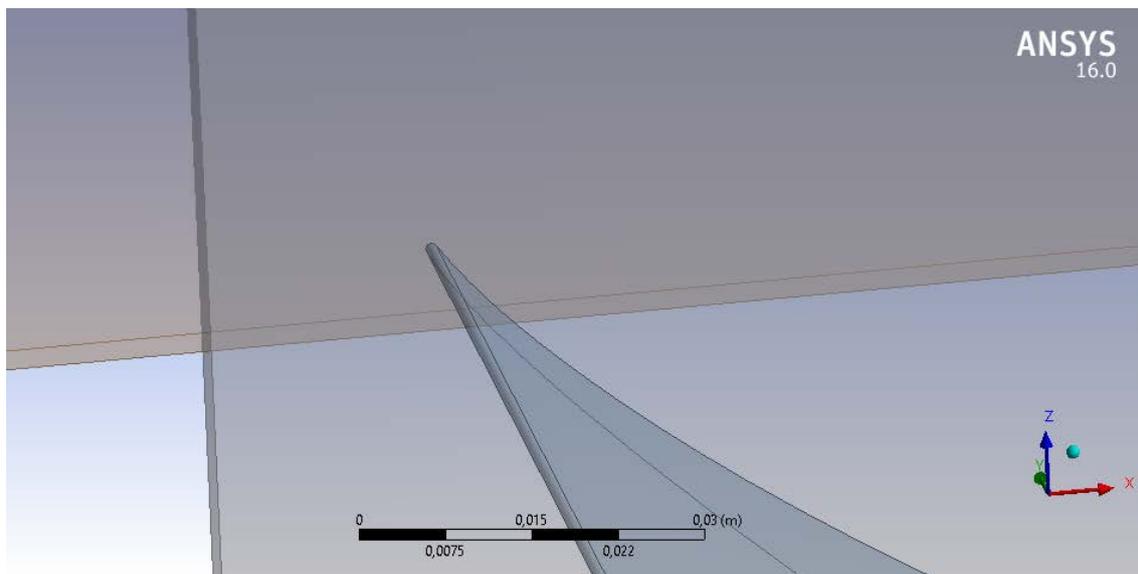
Dicho modelo lo importaremos en Fluent como un .model este formato lo obtenemos exportando de nuestro modelo en CATIA. En este archivo introduciremos únicamente el alerón delantero que se ha mostrado en el apartado previo.

Una vez seleccionado el archivo solo tenemos que generar la transformación y ya visualizaremos el modelo que vamos a analizar en Fluent.



**Ilustración 88** Modelo importado a la parte de geometría de Fluent

La siguiente operación a realizar en el modelo es el suavizado y preparación del mismo para evitar en la medida de lo posible todos los bordes angulosos, en este caso redondearemos los bordes de salida de los perfiles del alerón con la herramienta 'blend'.



**Ilustración 89** Blend Realizado

Pasamos ahora a preparar el volumen de control del problema, para lo que vamos a utilizar la herramienta enclosure siempre teniendo en cuenta que tenemos que dejar espacio suficiente alrededor del modelo para obtener buenos resultados.

Una vez hecho el enclosure, hacemos simetría en el volumen de control, ya que al ser el coche simétrico, lo es también el alerón proporcionando esto mayor simplicidad y rapidez a la hora de la resolución del problema.

Finalmente el volumen de control que analizaremos en nuestro programa de CFD es el siguiente:

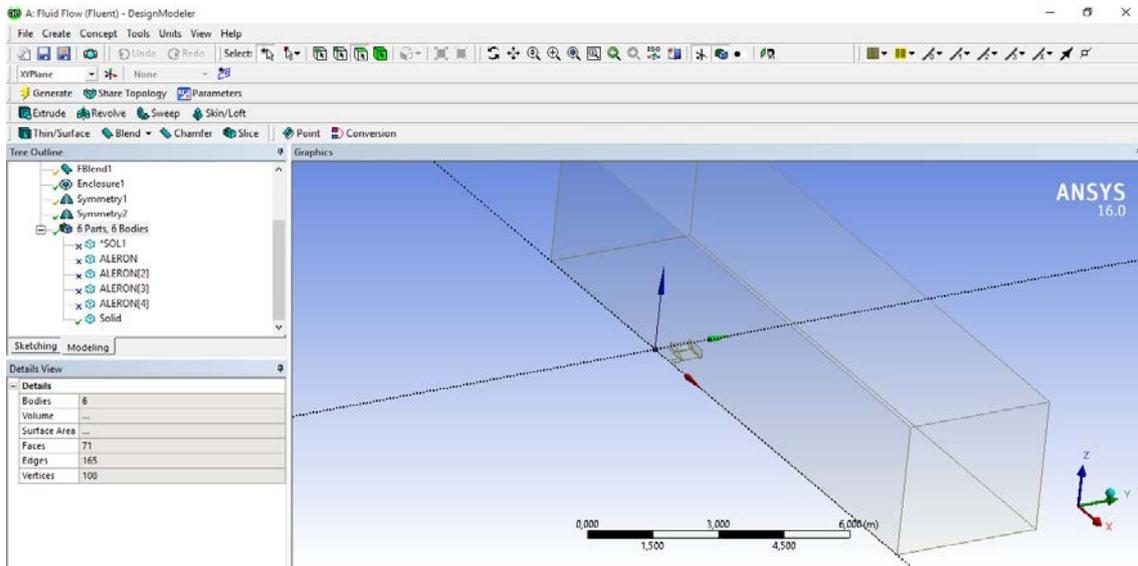


Ilustración 90 Enclosure Realizado

No nos podemos olvidar de suprimir los cuerpos utilizados para crear el volumen de control ya que si los dejamos Fluent entenderá que el modelo del alerón también forma parte del volumen y hará una malla en su interior.

Pasamos al segundo paso de la creación del problema, el mallado, para ello cerramos el módulo de 'Mesh'.

En este modulo vamos a realizar la malla para la resolución por elementos finitos de nuestro problema, es sin duda una de las partes más cruciales de todo el análisis, ya que una buena malla nos facilitará la resolución del problema considerablemente.

Para comenzar con el mallado del problema tenemos que dar nombres a las paredes de nuestro volumen de control para posteriormente establecer las condiciones de contorno.

De esta forma los nombres para las paredes son los siguientes:

- Symmetry
- Side Symmetry
- Top Symmetry
- Road
- Velocity Inlet
- Pressure Outlet
- Aleron

Los nombres van directamente ligados a las condiciones de contorno y es importante el nombre que se le da a las paredes de simetría ya que si no se le dan el nombre *symmetry* el flujo quedara adherido en las paredes, cosa que no es realista debido a que el coche en la realidad no circulará a través de un túnel.

El siguiente paso es preparar el mallado con la configuración siguiente:

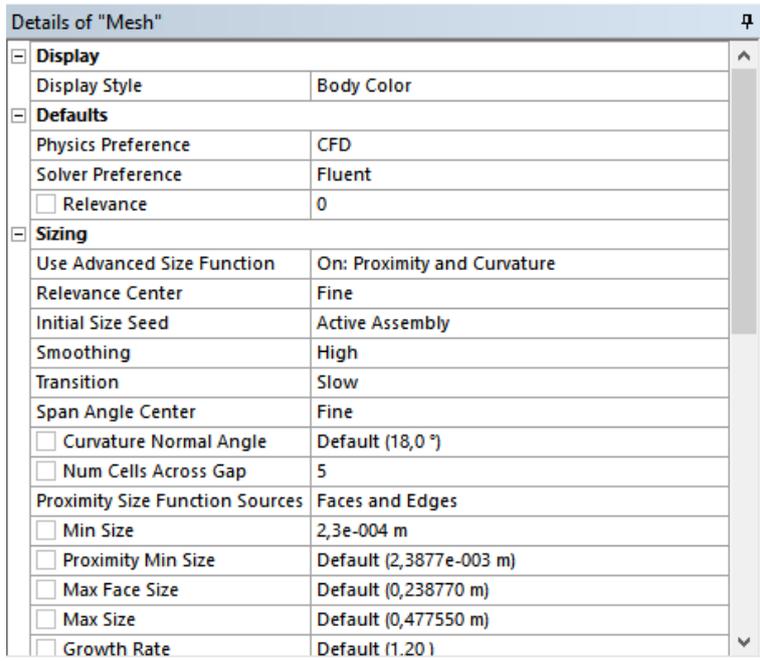


Ilustración 91 Características Meshing

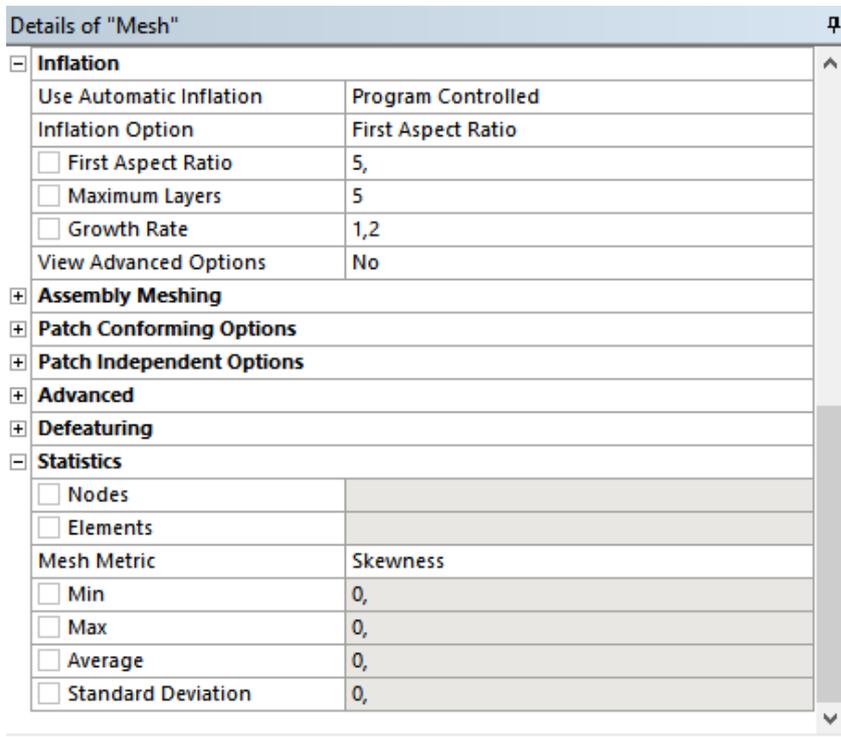


Ilustración 92 Características Meshing (2)

La inflación se usa para las zonas en las que tenemos que tener en cuenta la capa límite, es decir, en el alerón y en la carretera, por lo que en sus superficies activaremos la inflación controlada por programa como vemos en la siguiente imagen.

Details of "Aleron" <span style="float: right;">⌵</span>	
[-] <b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	30 Faces
[-] <b>Definition</b>	
Send to Solver	Yes
Visible	Yes
Program Controlled Inflation	Include
[-] <b>Statistics</b>	
Type	Manual
Total Selection	30 Faces
Suppressed	0
Used by Mesh Worksheet	No

Ilustración 93 Program Controlled Inflation

Una vez configurada la malla nos queda comprobar que las medidas de la estabilidad de la malla sean adecuadas, comprobamos que la malla es una buena malla con el skewness, y para que la resolución del problema sea buena tiene que estar como máximo entre 0.93-0.97.

Como podemos observar el skewness de nuestro mallado esta dentro de los límites pero en caso de no estarlo, las modificaciones a hacer vendrán señaladas al pulsar sobre la columna de mayor skewness que nos señalará la zona más conflictiva para el mallado, la solución puede ir desde aumentar el radio de redondeo de los bordes afilados del modelo, hasta la disminución del tamaño de los elementos para poner elementos más pequeños en la zona conflictiva, aunque esta solución solo es factible si tenemos recursos computacionales sobrantes, y quizás no es la más ideal.

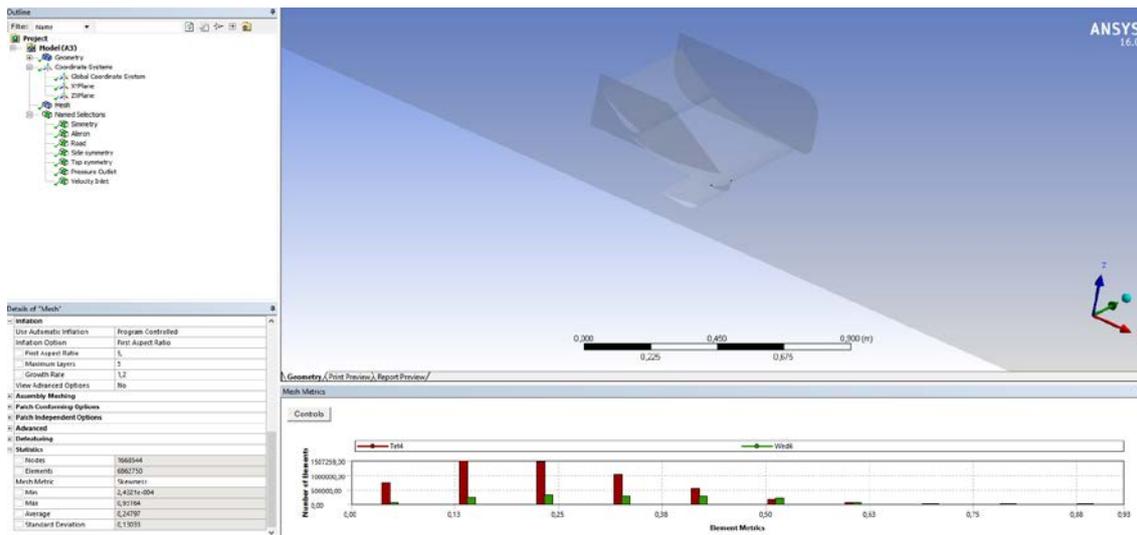


Ilustración 94 Datos de Skewness

Dando el mallado por finalizado, pasamos a la parte de setup en las que elegiremos desde el número de núcleos a usar durante la resolución hasta las condiciones de contorno del problema.

En el caso de la elección del número de núcleos a usar durante la resolución dependeremos del numero de núcleos de nuestro procesador, en nuestro caso usamos 7 para dejar un núcleo libre y poder seguir usando el ordenador durante el análisis.

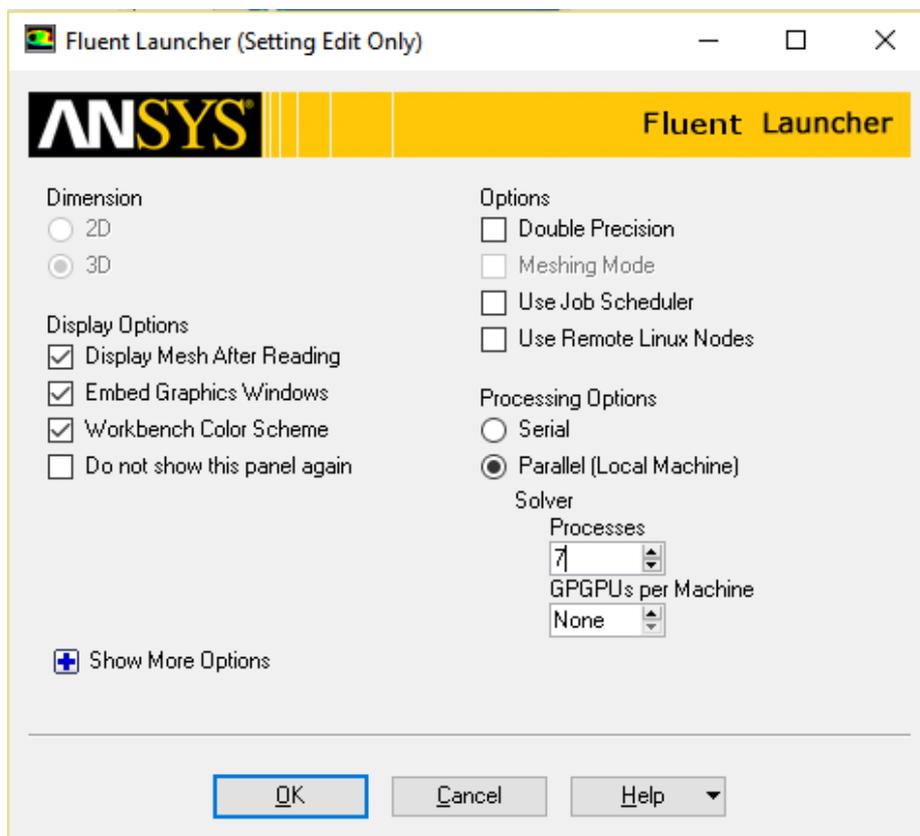


Ilustración 95 Configuración de Solucionador de Fluent

Una vez Abierto el solver de Fluent, tenemos que seleccionar el modelo de viscosidad laminar con la opción k-epsilon (2eqn) y en el cuadro de opciones k-epsilon model elegimos realizable. Por último en Near-Wall-Treatment seleccionamos Non-Equilibrium Wall Function

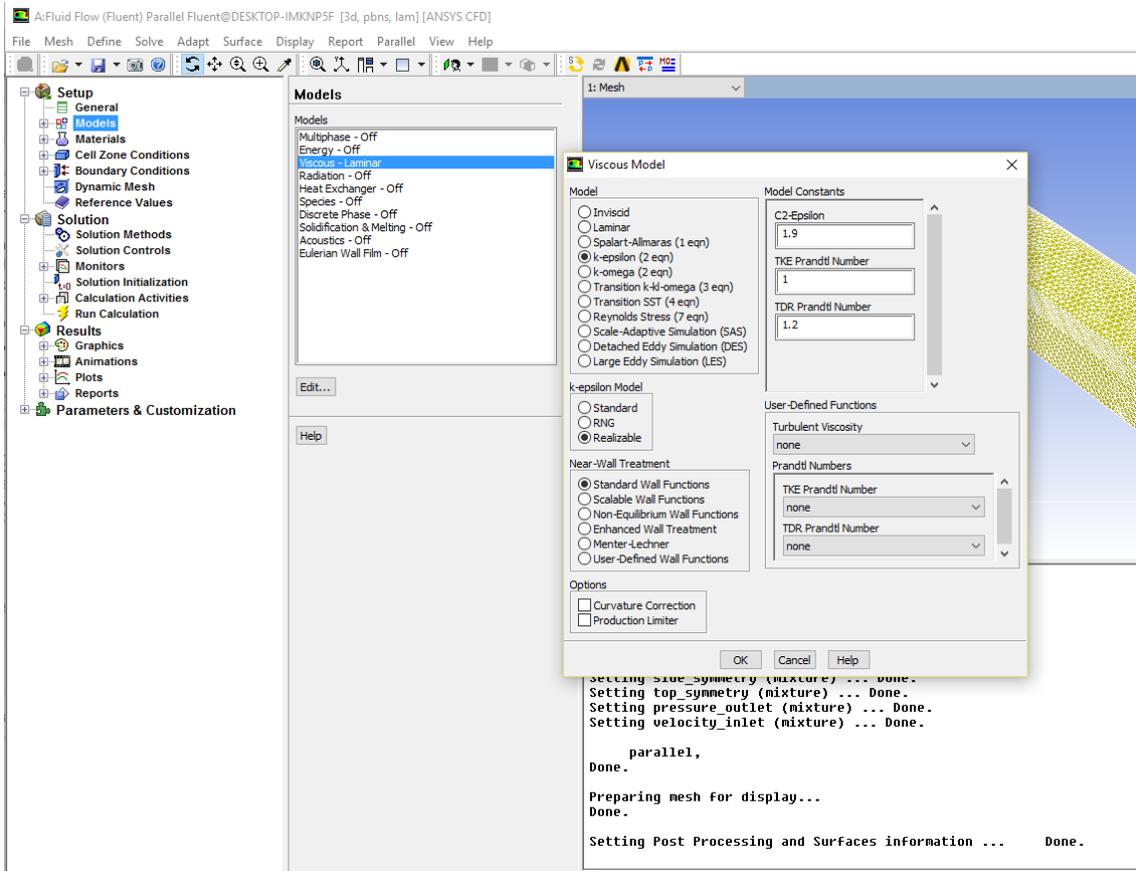


Ilustración 96 Selección del modelo de viscosidad que resolveremos

Una vez elegido el modelo de viscosidad pasamos a la sección de condiciones de contorno, es ahora cuando tenemos que establecer las condiciones de contorno de nuestro problema, que en este caso estarán establecidas tanto en la entrada como en la salida del túnel y en la carretera ya que simulamos un coche en movimiento a 15m/s

Comenzamos por tanto las condiciones de contorno con la carretera a la que le daremos una condición de Moving-Wall, una de las partes más importantes es darle la velocidad correcta a la carretera en lo que respecta a la dirección del movimiento ya que tal y como Fluent situa los ejes de coordenadas.

Teniendo esta condicioon en cuenta, la dirección de la velocidad de la carretera será en el eje -x y de magnitud 15 m/s como ya se ha comentado anteriormente.

Dejemos una imagen representativa de cómo tiene que quedar la condición de contorno de Road.

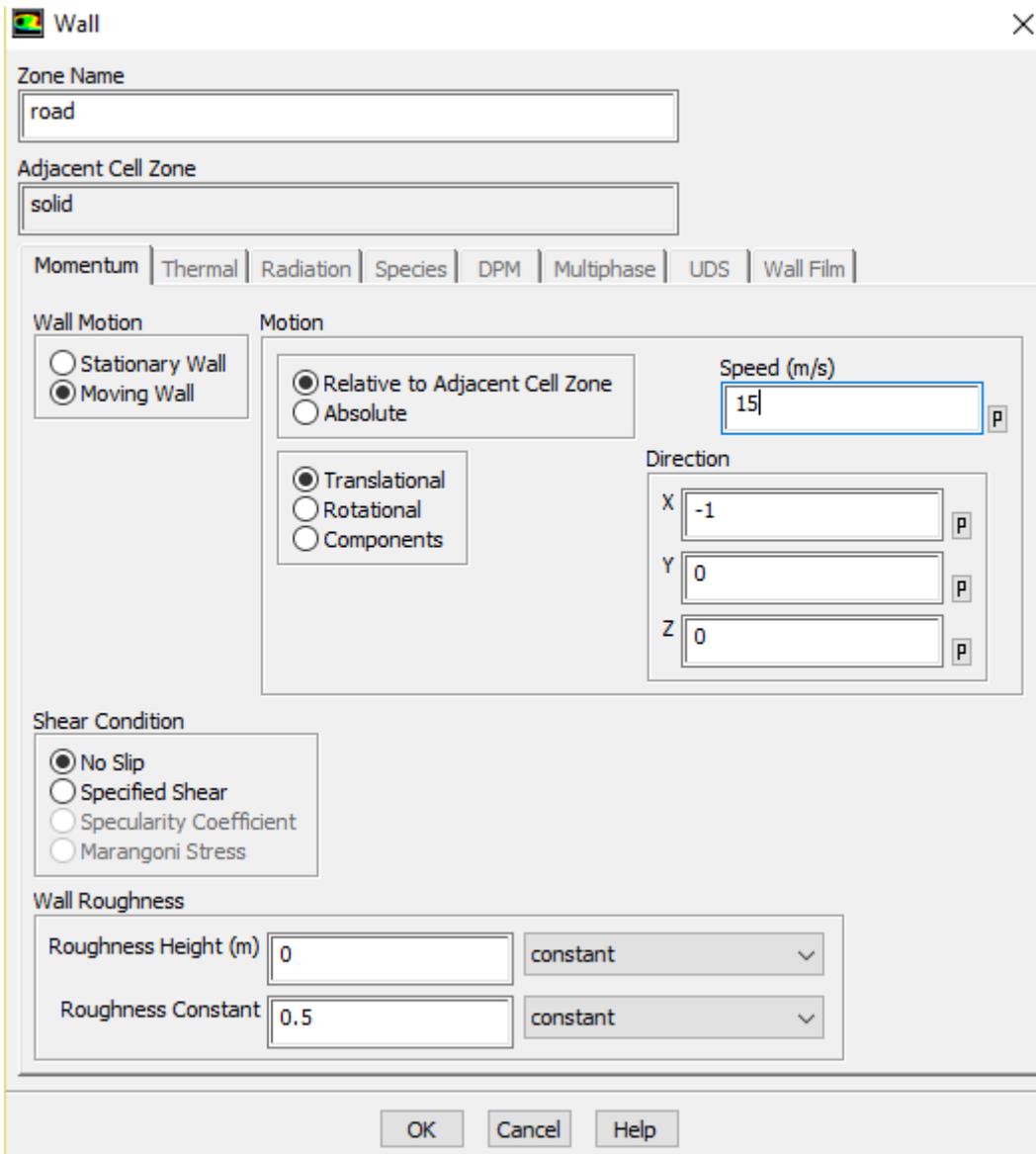


Ilustración 97 Condición de contorno de Carretera

Pasamos ahora a la condición de contorno de Velocidad de entrada en el túnel de viento en la que tendremos que modificar varios parámetros:

- Magnitud de la velocidad 15m/s
- Turbulent Intesity 1%
- Turbulent Viscosity Ratio 5%

Con estas modificaciones quedan fijadas las condiciones de contorno en la entrada del túnel.

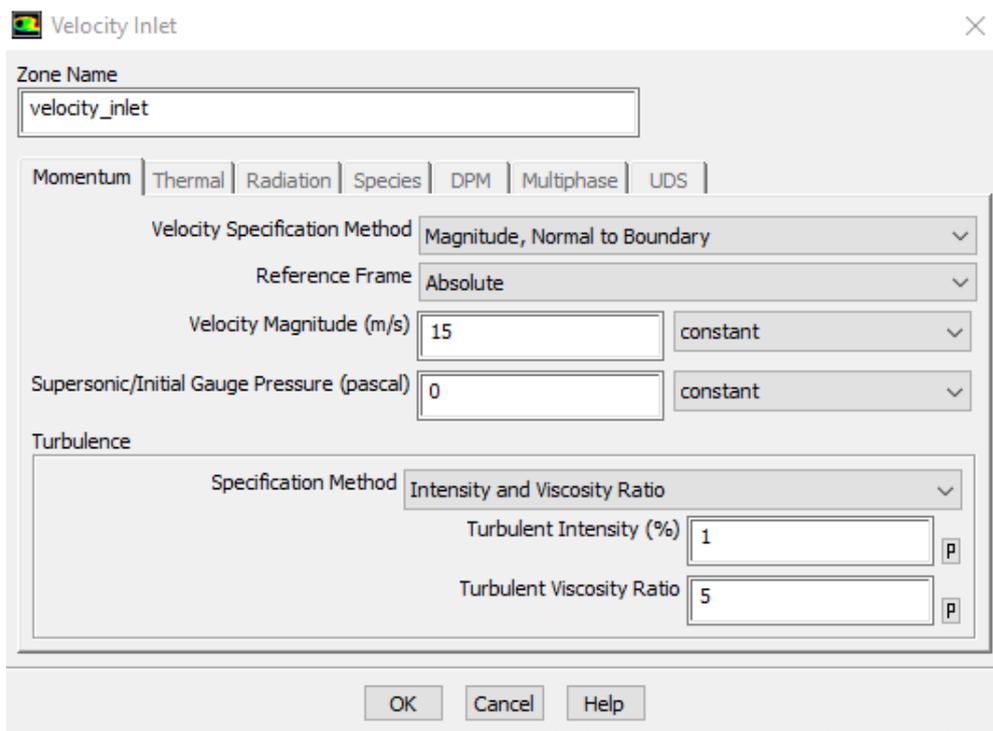


Ilustración 98 Condición de contorno de Velocidad de entrada

Como última condición de contorno tomamos la salida del túnel de viento, pressure outlet en las que modificaremos:

- Backflow Turbulent Intensity: 5%
- Backflow Turbulent Viscosity Ratio: 5%

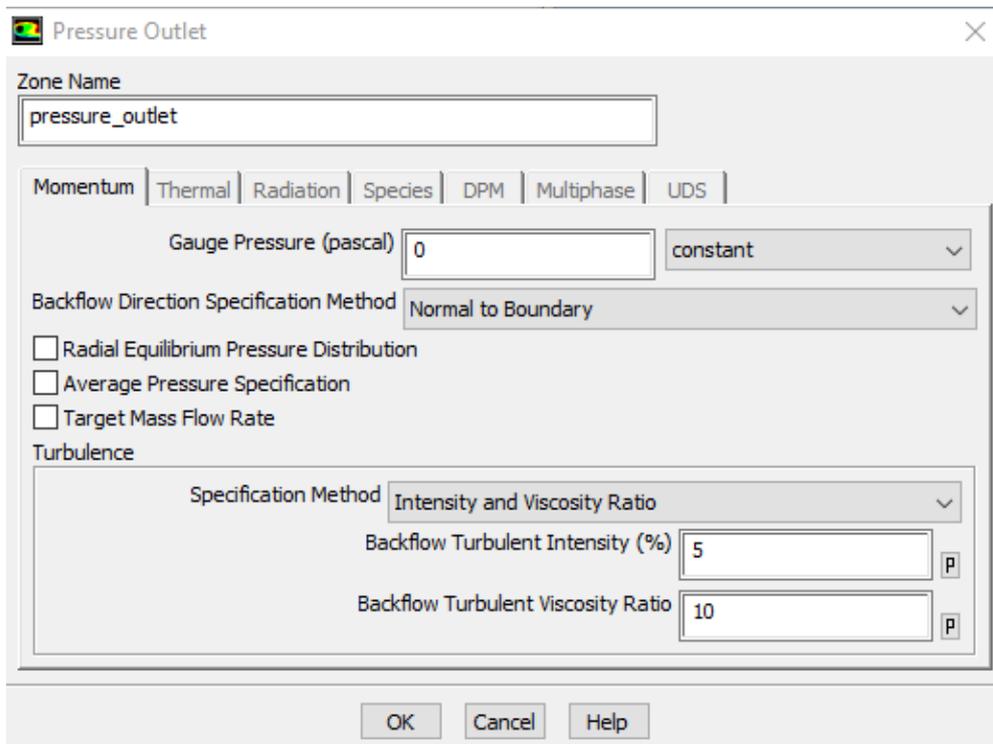


Ilustración 99 Condición de contorno de salida del Enclosure

Terminamos de esta forma las condiciones de contorno del problema, pasamos ahora a los valores de referencia en los que marcaremos en la casilla Compute From, Velocity Inlet y tendremos que modificar además el área proyectada para la adimensionalización del problema.

Usamos la opción que se encuentra al final del solver de reports-projected areas para obtener el área proyectada del alerón, y proyectaremos en este caso el área en plata del alerón.

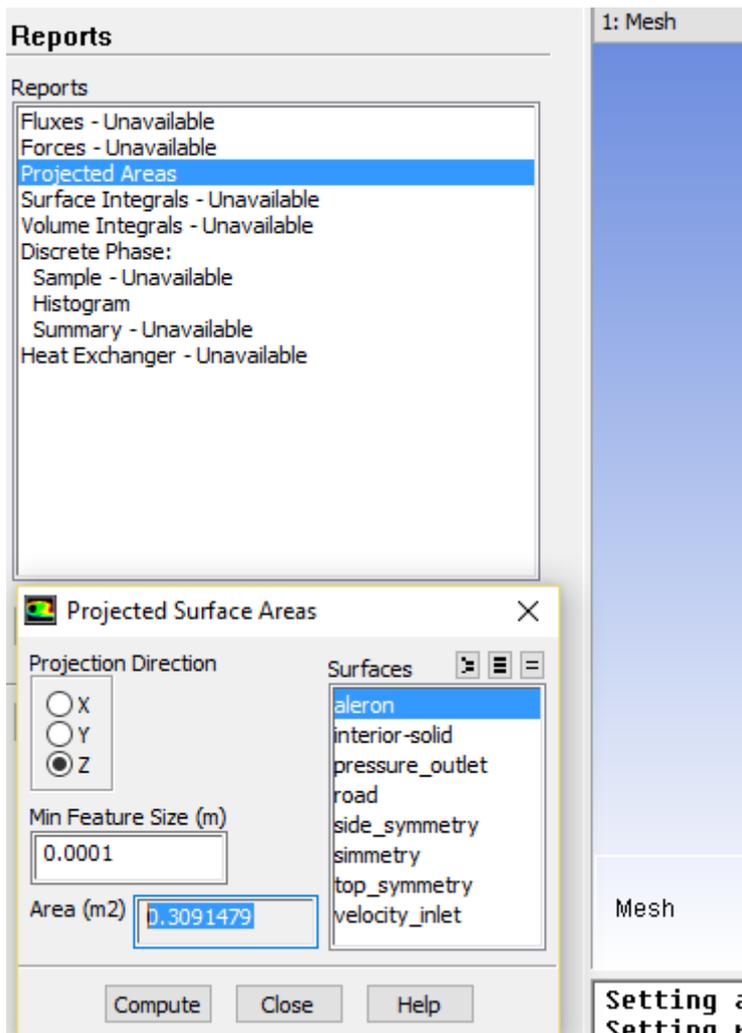


Ilustración 100 Cálculo del Área proyectada para la adimensionalización

Esta será el área que situaremos en el apartado References Values.

Con esta parte completada pasamos al apartado solution – Solution Methods.

Primeramente tenemos que resolver el problema en primer orden por lo que cambiaremos las opciones resaltadas en amarillo en la imagen a primer orden para resolver en la primera parte del problema.

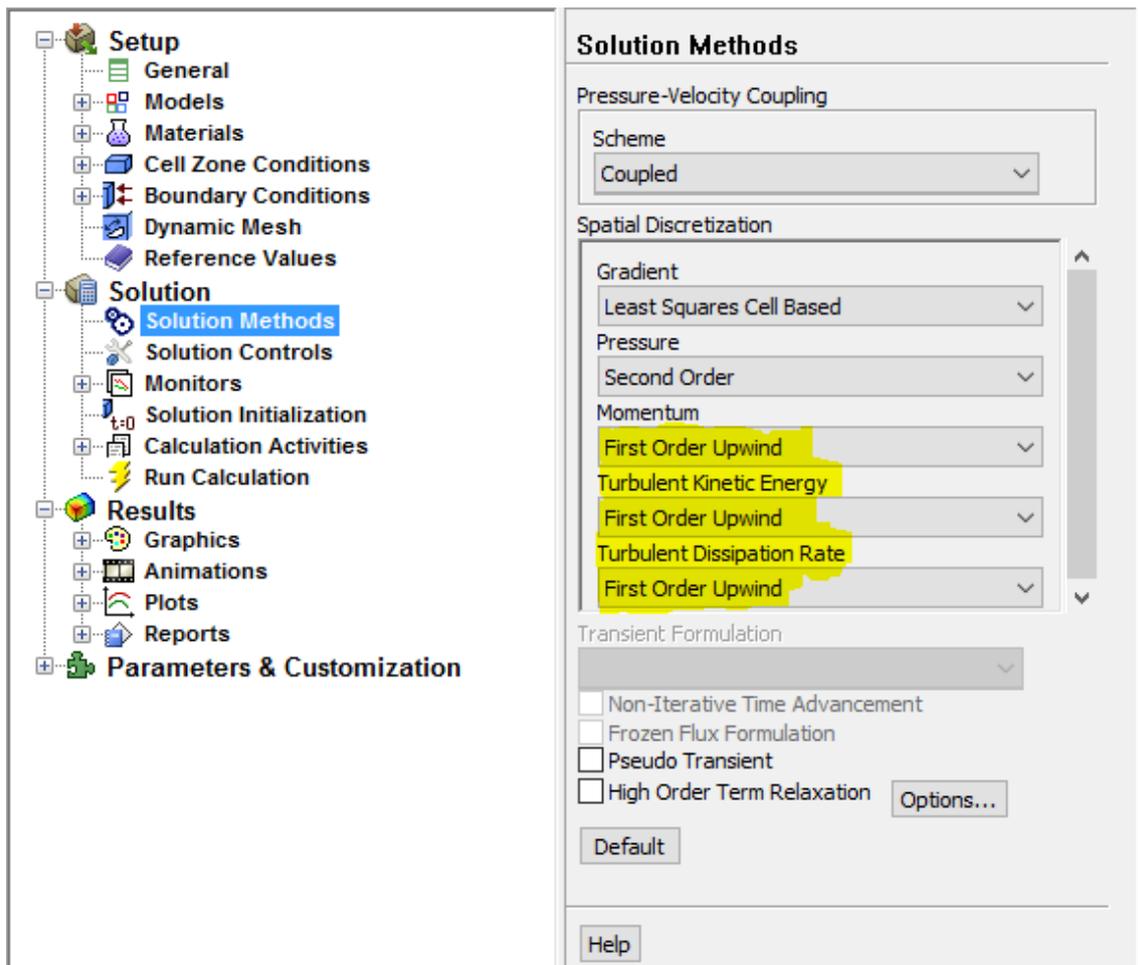


Ilustración 101 Selección del orden de la ecuación a resolver

Pasamos ahora al siguiente apartado, Solution Control, en el que se modificaran varios coeficientes de relajación del problema, a saber:

- Momento: 0.25
- Pressure: 0.25
- Turbulent Viscosity: 0.85

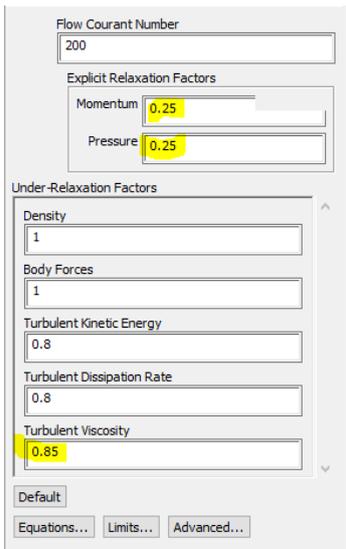


Ilustración 102 Factores de relajación del problema

Vamos ahora a crear los monitores de resultados para ir visualizando los valores de  $C_l$  y  $C_d$  a lo largo del análisis, para crear ambos monitores dejamos la configuración que hay que establecer en las siguientes imágenes.

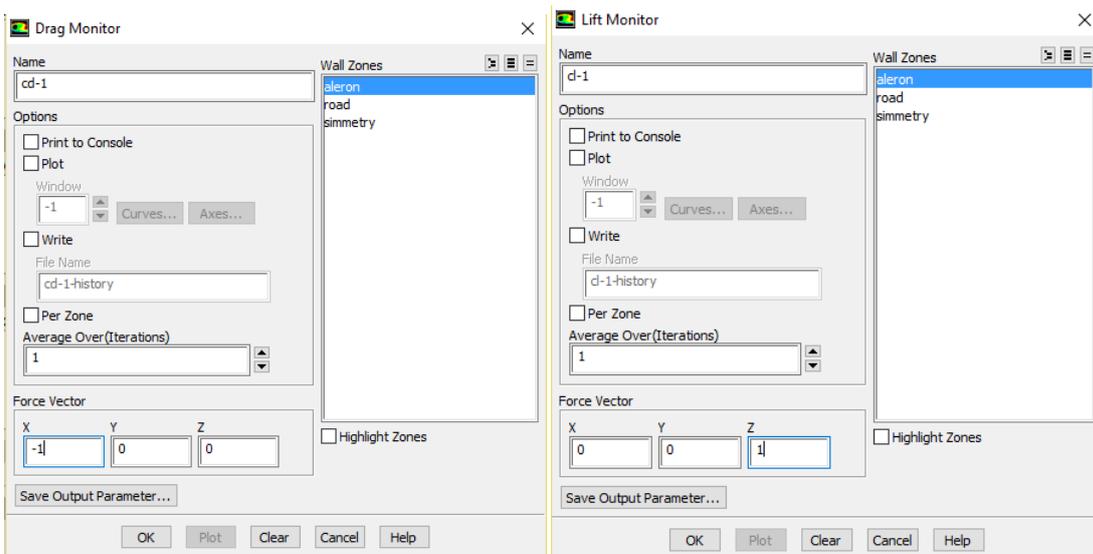


Ilustración 103 Generación de reportes de datos de  $C_l$  y  $C_d$

Una vez creado todos los monitores de solución inicializamos la solución en Hybrid Initialization con 10 iteraciones.

Una vez inicializado el problema podemos calcular la solución en primer orden y esperar a que el residuo de continuidad llegue al orden  $1e-3$  aproximadamente y que  $C_l$  y  $C_d$  hayan convergido como se muestra en la imagen, en este caso para el modelo con un ángulo de ataque de  $30^\circ$ .

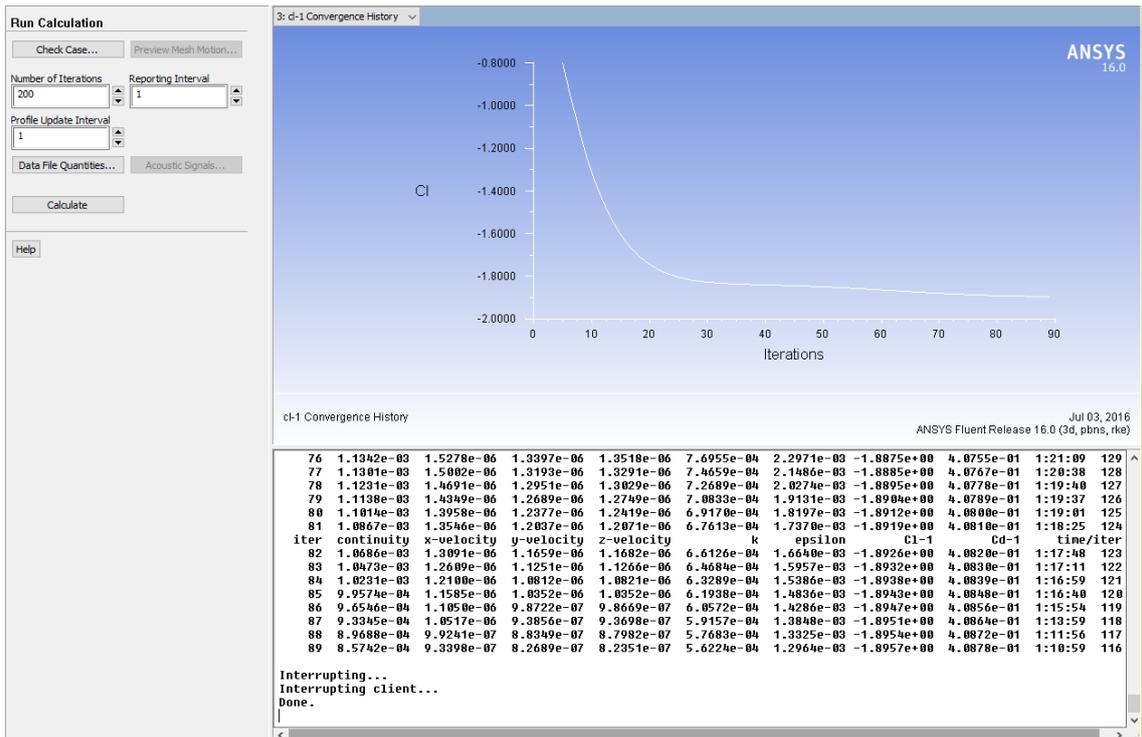


Ilustración 104 CI convergiendo en Primer orden

Una vez convergido el problema de primer orden pasamos a segundo orden en Solution Methods y ejecutamos el análisis de nuevo hasta que el residuo de continuidad esté en la misma zona que anteriormente.

Finalmente tras resolver hasta que converja el problema en segundo orden ya tenemos el resultado final de nuestro problema

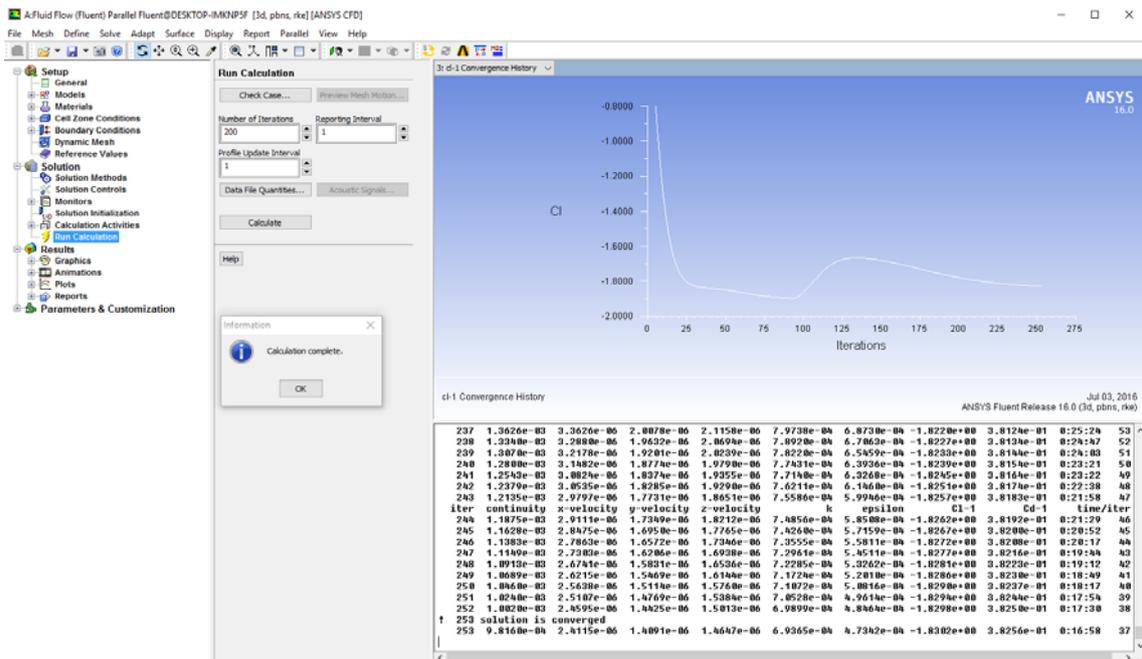


Ilustración 105 CI convergiendo en segundo orden

Una vez hemos obtenido la resolución del problema solo queda observar los resultados en el siguiente apartado de Fluent llamado Results en el cual podremos representar las líneas de corriente y los campos de presiones generados por el alerón delantero en este caso. Sin embargo estos se presentaran directamente en el siguiente apartado de este trabajo

## Anexo 2.-Manual de uso de la impresora 3D

Una vez modificada la impresora llegamos a la parte de la calibración y puesta en marcha de la misma, en este apartado explicaremos los conceptos básicos para poder manejar el firmware de la impresora y su configuración. Así como el manejo del programa usado para producir los Gcode necesarios para la impresión.

El firmware utilizado por la impresora es Marlin, un firmware opensource altamente utilizado por la gran mayoría de impresoras del mercado, en continua evolución y altamente configurable para cualquier tipo de impresora. Dicho firmware se modifica desde la GUI de Arduino, y dependiendo del tipo de impresora se configura de la manera pertinente siendo el propio código de Marlin bastante auto explicativo.

Explicaremos por su mayor complejidad las zonas de código referentes a la calibración de la máquina así como la calibración del autonivel de la misma.

Para abrir Marlin, solo tenemos que descargarlo de su página oficial y descomprimirlo todo en una carpeta, una vez descomprimido en la carpeta Marlin abrimos el archivo Marlin.ino y de ahí vamos a la pestaña configuration.h

Este es el archivo donde están todos los parámetros a modificar para la configuración completa de la impresora.

Desplazándonos a la línea 676 del código podemos ver que empieza toda la zona de configuración del numero de pasos/mm, esto es el número de pasos que tiene que dar el motor para recorrer un milímetro en cada uno de los ejes como se muestra en la imagen en la que se ha seleccionado la zona donde viene el numero actual para la impresora ya calibrada.

```
// Section movement

/**
 * MOVEMENT SETTINGS
 */

#define HOMING_FEEDRATE {50*60, 50*60, 2*60, 0} // set the homing speeds (mm/min)

// default settings

#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {57.14,57.14,2618,1818} // default steps per unit for Ultimaker
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {300, 300, 2, 25} // (mm/sec)
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {1000,1000,15,10000} // X, Y, Z, E maximum start speed for accelerated moves. E

#define DEFAULT_ACCELERATION 1000 // X, Y, Z and E acceleration in mm/s^2 for printing moves
#define DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION 3000 // E acceleration in mm/s^2 for retracts
#define DEFAULT_TRAVEL_ACCELERATION 1000 // X, Y, Z acceleration in mm/s^2 for travel (non printing) moves

// The speed change that does not require acceleration (i.e. the software might assume it can be done instantaneously)
#define DEFAULT_XYJERK 20.0 // (mm/sec)
#define DEFAULT_ZJERK 0.4 // (mm/sec)
#define DEFAULT_EJERK 5.0 // (mm/sec)
```

**Ilustración 106 Pasos por milímetro de los motores de cada eje**

El ajuste de este parámetro se hace con una impresión de un cubo de calibración de 20x20x10 mm y conforme ese cubo mida más o menos se ajustan los pasos de cada uno de los ejes.

Configurando ahora el sistema de autonivel, el único parámetro a configurar de forma relativamente asidua es la altura respecto a la base de la punta del extrusor.

Este parámetro lo encontramos en la línea de código 608

```
//
//  +-- BACK ---+
//  |           |
//  L | (+) P | R <-- probe (20,20)
//  E |       | I
//  F | (-) N (+) | G <-- nozzle (10,10)
//  T |       | H
//  |       (-) | T
//  |           |
//  O-- FRONT --+
//  (0,0)
#define X_PROBE_OFFSET_FROM_EXTRUDER -9 // X offset: -left +right [of the nozzle]
#define Y_PROBE_OFFSET_FROM_EXTRUDER -59 // Y offset: -front +behind [the nozzle]
#define Z_PROBE_OFFSET_FROM_EXTRUDER -12.00 // Z offset: -below +above [the nozzle]

#define XY_TRAVEL_SPEED 3000 // X and Y axis travel speed between probes, in mm/min.

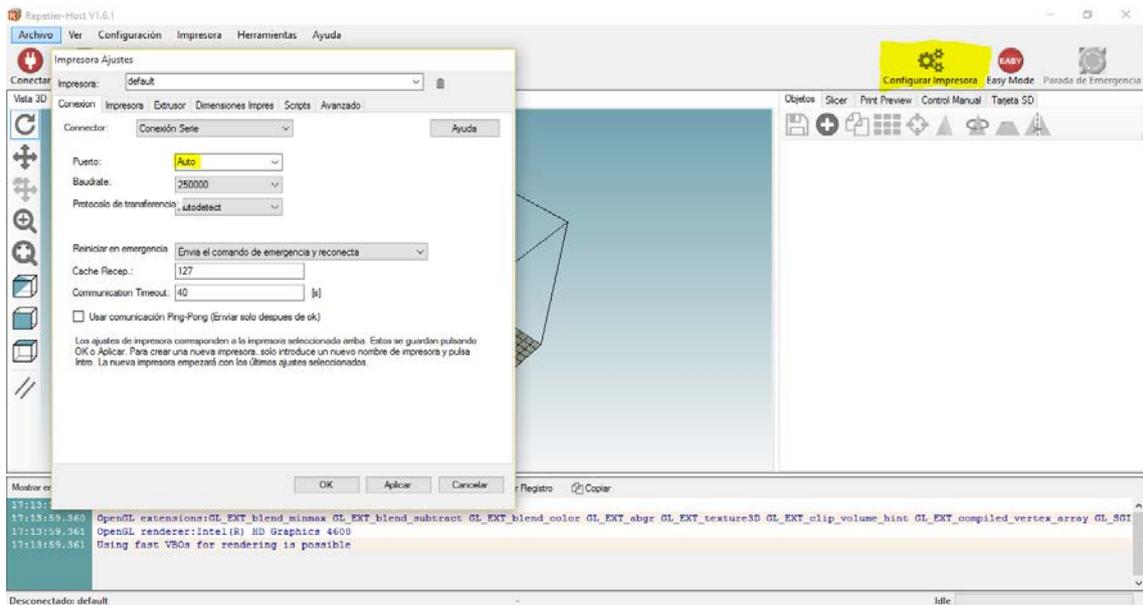
#define Z_RAISE_BEFORE_PROBING 15 // How much the Z axis will be raised before traveling to the first probing point.
#define Z_RAISE_BETWEEN_PROBINGS 5 // How much the Z axis will be raised when traveling from between next probing points.
#define Z_RAISE_AFTER_PROBING 15 // How much the Z axis will be raised after the last probing point.
```

#### Ilustración 107 Altura de el final de carrera del eje z con respecto a la punta del Hot-End

Para obtener este valor, tenemos que realizar algunas operaciones con la impresora desde el programa de control de la misma por lo que vamos a proceder a explicar el funcionamiento del programa desde los movimientos de posicionamiento hasta la configuración de parámetros de impresión haciendo un inciso para la configuración del autonivel.

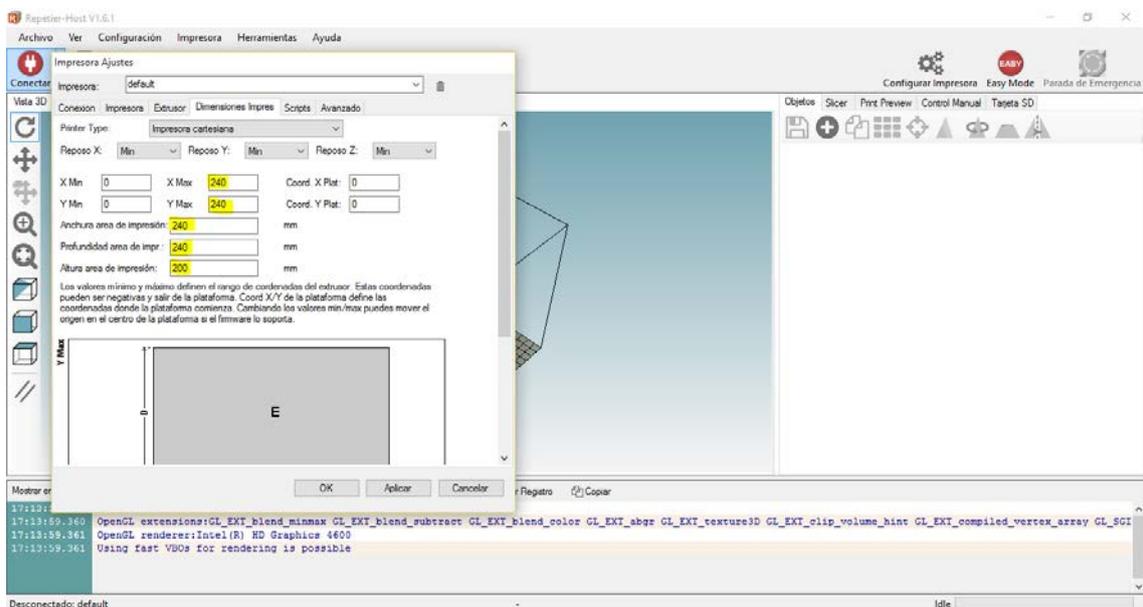
El programa que usaremos para el manejo de la impresora desde el ordenador se llama Repetier Host, de nuevo es un programa opensource que se utiliza comúnmente con la mayoría de impresoras de este tipo.

Al abrir Repetier Host tendremos que configurar las dimensiones de la impresora, esto sólo tendremos que hacerlo si es la primera vez que la utilizamos.



**Ilustración 108 Configuración del puerto serie de la impresora 3D**

En esta primera pantalla dejamos la conexión serie como auto y pasamos a dimensión de la impresora, en la que tendremos que poner las dimensiones de la impresora que queramos controlar, en este caso, 240mm en el eje x, 240mm en el eje y, 200mm en el eje z.



**Ilustración 109 Configurando dimensiones de la Impresora 3D**

Una vez configurada podemos controlar la impresora manualmente pulsando conectar, para realizar este control manual, en el menú de la derecha tenemos que pulsar control manual, y aparecerá un menú con flechas que pulsaremos para mover los distintos ejes.

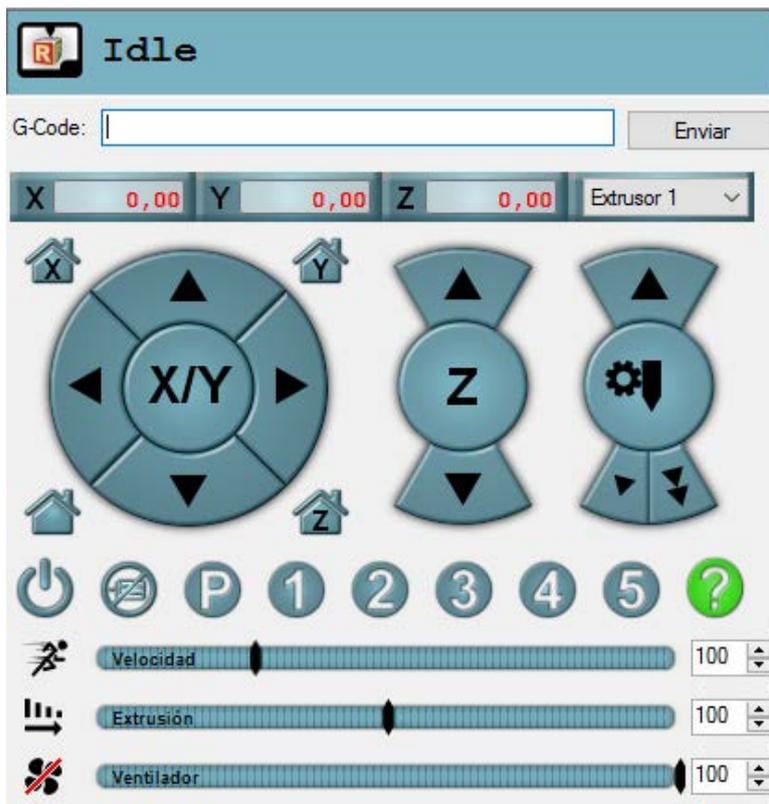


Ilustración 110 Panel de control Manual

Vamos ahora a configurar la distancia del autonivel tal y como dijimos anteriormente, lo primero que tenemos que hacer es un movimiento de posicionamiento completo de la impresora, el cual se realiza pulsando en el icono de la casa en el panel de control, o escribiendo **G28** en la barra de comandos manuales.

Una vez hayamos completado el posicionamiento, moveremos la punta del extrusor hasta el centro de la base con las flechas del panel de control, en nuestro caso,  $x=120$  y  $y=120$ .

Bajaremos ahora la punta del extrusor hasta que este tocando ligeramente con el cristal de la base, en caso de que el programa no nos deje bajar del todo la punta, tendremos que escribir en la barra de comandos manuales un cambio de posición "virtual" para que el programa crea que aún puede bajar más el extrusor, por ejemplo diremos que la punta del extrusor está realmente en la posición  $Z=20$  cuando no es así realmente para ello escribiremos **G92 Z20** y pulsaremos enter, para confirmar que ha recibido el código, tendremos que escribir **M114** y pulsar enter de nuevo, y aparecerá una línea de dialogo en el programa confirmando dicha posición.

```

CUBOCA~1.GCO
End file list
echo:DEBUG:INFO,ERRORS
echo:Active Extruder: 0
X:0.00 Y:0.00 Z:20.00 E:0.00 Count X: 0 Y:0 Z:52360
X:120.00 Y:120.00 Z:20.00 E:0.00 Count X: 6857 Y:6857 Z:52360

```

Ilustración 111 Proceso de calibración del autonivel (1)

Seguiremos bajando la posición del extrusor hasta que la punta toque con la base del cristal levante, en este momento tendremos que indicarle al programa que estamos en el punto 0 del eje Z, esto lo haremos escribiendo **G92 Z0** y después confirmaremos la posición con un **M114**.

```

End file list
echo:DEBUG:INFO,ERRORS
echo:Active Extruder: 0
X:0.00 Y:0.00 Z:20.00 E:0.00 Count X: 0 Y:0 Z:52360
X:120.00 Y:120.00 Z:20.00 E:0.00 Count X: 6857 Y:6857 Z:52360
X:120.00 Y:120.00 Z:0.00 E:0.00 Count X: 6857 Y:6857 Z:0

```

Ilustración 112 Proceso de calibración del autonivel (2)

Ahora subiremos "físicamente" la posición del eje z para permitir al brazo del servo desplegarse y escribiremos **M401** y el brazo del servo se desplegará, ahora trasladamos la punta del interruptor hasta el centro de la base y la bajamos hasta que toque la base de cristal, comprobaremos que el final de carrera esté tocando el cristal ejecutando el comando **M119** en la barra de comandos, y saldrá la posición **TRIGGERED** en el eje Z, en caso de aparecer **OPEN** bajaremos 0.1mm el eje z y volvemos a ejecutar el comando **M119**.

```

y_min: open
z_min: open
Reporting endstop status
x_min: open
y_min: open
z_min: open

```

Ilustración 113 Proceso de calibración del autonivel (3)

```

y_min: open
z_min: open
Reporting endstop status
x_min: open
y_min: open
z_min: TRIGGERED

```

Ilustración 114 Proceso de calibración del autonivel (4)

Repetiremos este proceso hasta que la respuesta del comando **M119** sea **TRIGGERED** en el eje Z, en este momento ejecutaremos el comando **M114** que nos dirá la posición

actual del extrusor, y nos quedaremos con el número que aparezca en el eje Z que será el que situemos en el código de Marlin.

```
z_min: open
Reporting endstop status
x_min: open
y_min: open
z_min: TRIGGERED
X:120.00 Y:120.00 Z:12.00 E:0.00 Count X: 6857 Y:6857 Z:31416
```

Ilustración 115 Proceso de calibración del autonivel (5)

Una vez realizamos este proceso escribimos en la barra de comandos **M402** para retraer el brazo del servo, cabe señalar que para guardar esa posición que hemos escrito en el código de Marlin, así como cualquier otra modificación que realicemos, tenemos que cargar el programa en el Arduino que forma parte de la electrónica conectándolo al ordenador previamente.

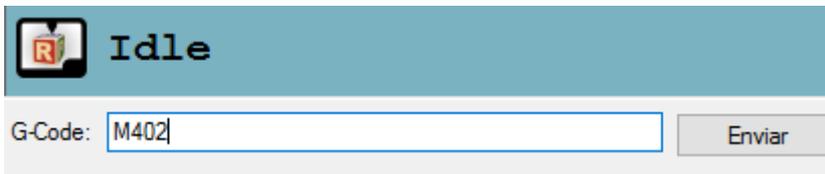


Ilustración 116 Proceso de calibración del autonivel (6)

Una vez explicado este proceso vamos a explicar el uso del programa y la configuración del mismo para dividir la pieza en capas "imprimibles".

Este programa trabaja con modelos .stl por lo que vamos a importar por ejemplo el modelo de uno de los perfiles de la maqueta del alerón.

En la pestaña de objetos pulsamos importar y seleccionamos el .stl a imprimir.

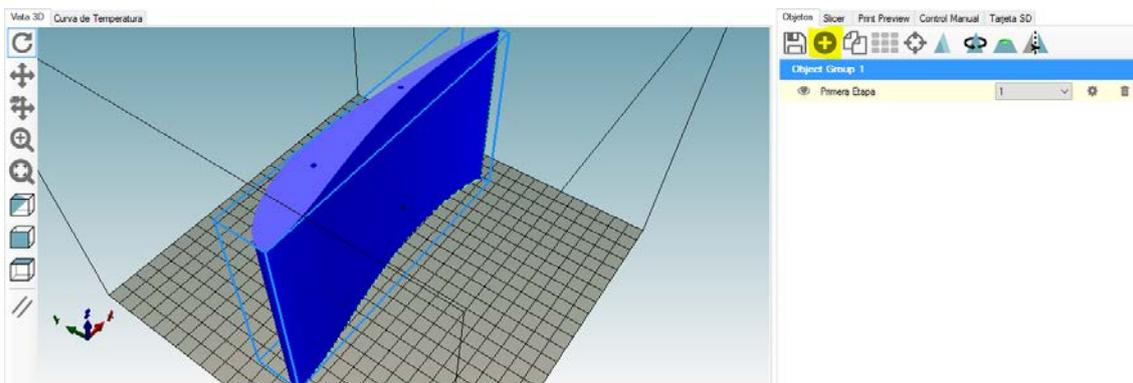


Ilustración 117 Importar modelo para impresión

Para dividir el modelo en capas pasamos a la pestaña "Slicer" en la cual podemos configurar todos los parámetros referentes a la impresión, dado que la cantidad de

parámetros es muy grande y que vienen explicados en el propio programa, no vamos a explicar más de lo necesario en este proyecto para no caer en la redundancia.

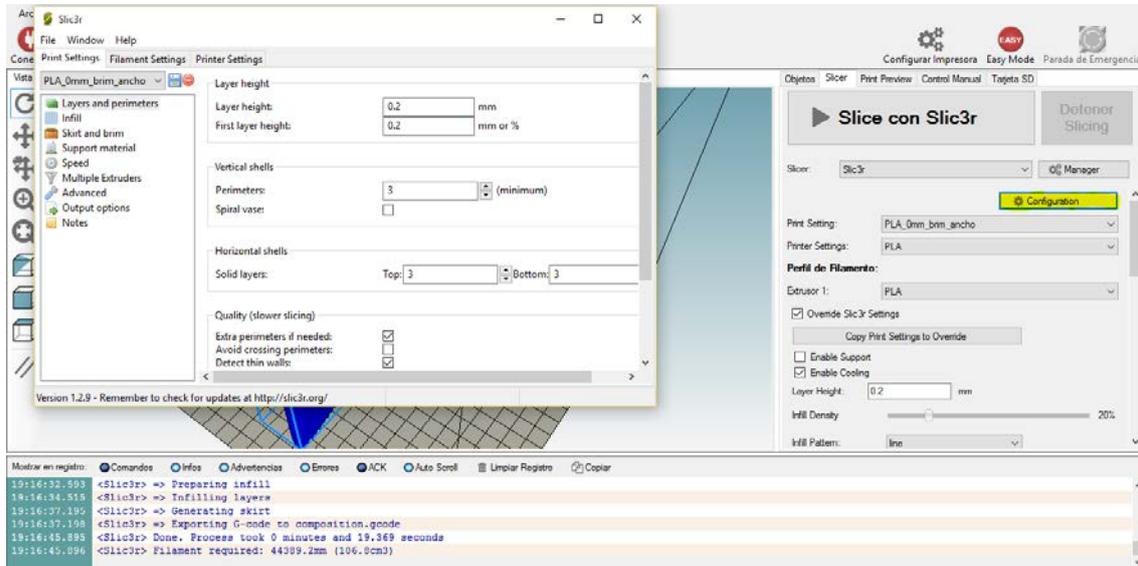


Ilustración 118 Selección del perfil de Impresión

Una vez configurado el perfil correspondiente pulsamos el boton "**Slice con Slic3r**" y esperamos a que el programa divida el modelo en capas y haga todo el recorrido de la impresión. Una vez finalizado podemos ver cuánto tarda la impresión y cuanto plástico necesitamos para el modelo.

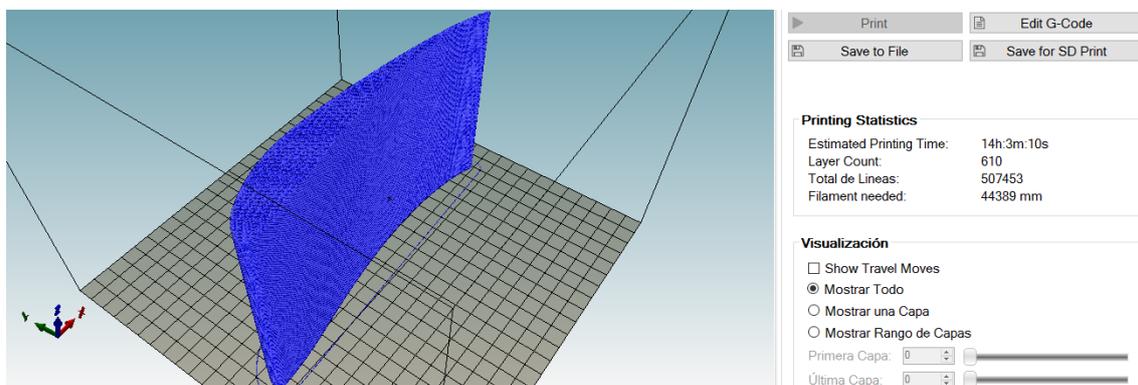


Ilustración 119 Tiempo de Impresión

```

<Slic3r> => Preparing infill
<Slic3r> => Infilling layers
<Slic3r> => Generating skirt
<Slic3r> => Exporting G-code to composition.gcode
<Slic3r> Done. Process took 0 minutes and 19.369 seconds
<Slic3r> Filament required: 44389.2mm (106.8cm3)

```

Ilustración 120 Cantidad de material

Para comenzar la impresión lo único que tenemos que hacer es pulsar el botón imprimir desde el programa, o en su defecto exportar el .gcode que genera el programa con el botón save to file que podemos ver en la imagen anterior.

Este .gcode se introduciría en la tarjeta sd que está colocada en la pantalla y desde la propia pantalla navegando por sus menús seleccionamos el archivo para proceder a su impresión.

Con estas nociones básicas queda explicado el uso y configuración de la impresora.