



Universidad
Carlos III de Madrid

Diseño, simulación y fabricación de la aerodinámica de un Formula Student.

PROYECTO DE FIN DE CARRERA

GRADO BILINGÜE EN INGENIERÍA MECÁNICA

por

Alumno: D. Carlos Sánchez Martínez

Tutor: D. Daniel Gómez Lendínez

2016

Contenido

1. Resumen	2
2. Agradecimientos	4
3. Introducción	6
3.1. “ <i>Formula Student</i> ”	6
3.2. Pruebas estáticas (325 puntos)	8
3.2.1. Inspección técnica (0 puntos)	8
3.2.2. “ <i>Business Logic Case</i> ” (75 puntos)	8
3.2.3. Evento de costes y fabricación. (100 Puntos)	9
3.2.4. “ <i>Engineering design</i> ” (150 puntos)	9
3.3. Pruebas dinámicas (675 puntos)	10
3.3.1. “ <i>Acceleration</i> ” (75 puntos)	10
3.3.2. “ <i>Skid Pad</i> ” (50 puntos)	10
3.3.3. “ <i>Autocross</i> ” (150 puntos)	10
3.3.4. “ <i>Endurance</i> ” (300 puntos)	11
3.3.5. “ <i>Efficiency</i> ” (100 puntos)	12
4. Objetivos	13
5. Estado del arte	14
5.1. Historia de la aerodinámica en la competición	14
5.2. Fundamentos aerodinámicos	19
5.3. Caracterización del movimiento de un fluido	19
5.3.1. El aire [2]	20
5.3.2. La resistencia y la carga aerodinámica	22
5.3.3. Flujo laminar y flujo turbulento	24
5.3.4. Números de Mach y de Reynolds	25
5.3.5. Capa límite	26
5.3.6. Efecto Magnus	27
5.3.7. Efecto Venturi	27
5.3.8. Ecuaciones de Navier Stokes en forma integral	28

5.4.	Estado del arte en la “ <i>Formula Student</i> ”	29
5.4.1.	Formas aerodinámicas	29
5.4.2.	Alerones delanteros y traseros	31
5.4.3.	Difusores	32
5.4.4.	Fondo plano	34
5.5.	Marco normativo.	36
5.5.1.	Requisitos generales de diseño. Artículo 2	36
5.5.2.	Elementos aerodinámicos. Artículo 9	36
6.	CFD o “<i>Computational Fluid Dynamics</i>”	40
6.1.	Introducción	40
6.2.	ANSYS Fluent	40
6.2.1.	Metodología	40
7.	Cálculos	45
7.1.	Validación de los resultados CFD con datos experimentales	45
7.2.	Alerón delantero	49
7.3.	Alerón trasero	55
7.4.	Balance Delantero-Trasero	57
7.5.	Difusores	65
7.6.	Estudio del coche completo	70
8.	Producción	79
8.1.	Introducción a los materiales compuestos [7]	79
8.2.	Fabricación de las piezas planas del vehículo	83
8.3.	Fabricación de los alerones delantero y trasero	87
8.4.	Fabricación del morro y los difusores	92
9.	“<i>Timeline</i>”	96
10.	Presupuesto	98
10.1.	Presupuesto en piezas físicas	98
10.2.	Presupuesto en trabajo de ingeniería	100
10.3.	Presupuesto total	101
11.	Desarrollos futuros	102
11.1.	Desarrollo en simulación CFD	102
11.2.	Desarrollo de nuevas geometrías en la carrocería y el aerokit	103
11.3.	Mejora de las uniones	104
12.	Conclusiones	105
13.	Anexo 1: Criterios de costes de la competición para elementos aerodinámicos.	107

CONTENIDO

14. Anexo 2: Costes presentados a la competición de la parte referente a este trabajo fin de grado.	128
15. Anexo 3: Planos	156
Referencias	170

Lista de Figuras

3.1.	Equipo participante de la UC3M EN la prueba de “ <i>Formula Student</i> ” realizada en Montmeló. Fuente: Elaboración propia	6
3.2.	Pegatinas de verificación obtenidas por el equipo Formula UC3M en la “ <i>technical inspection</i> ” de FSS. Fuente: Elaboración propia	9
3.3.	Circuito para la realización de la prueba “ <i>Skid-Pad</i> ”, regulado por normativa. Fuente: FSAE Rules 2015-2016	11
5.1.	Primer automóvil en hacer uso de la aerodinámica para batir el récord de velocidad (1899). Fuente: Noticias Coches	14
5.2.	Bugatti Type-32 (1923). Fuente: Forum-auto	15
5.3.	Mercedes W25. Fuente: Autoviva	16
5.4.	Alerón biplano de prueba instalado en un Brabham de Formula 2. Fuente: Formula 1 en estado puro	17
5.5.	Monoplazas de F1 de la década de los 70, continuista con la tendencia a la forma de cuña. Fuente: The blueprints	18
5.6.	Alerón trasero del equipo Williams F1 Team empleado en el GP de Austria en 2016 con un mayor ángulo de ataque para compensar la reducción de la carga aerodinámica dada la menor densidad debida a la altitud del trazado. Fuente: Motorsport.com	21
5.7.	Relación entre la fuerza lateral y vertical para un neumático genérico en función del ángulo de deriva [3]	23
5.8.	Representación de la diferencia entre un flujo laminar y un flujo turbulento. Fuente: CFD support	24
5.9.	Ilustración representativa del efecto generado por un tubo de venturi. Fuente: Wikipedia	27
5.10.	Ilustración representativa del efecto generado por un tubo de venturi. Fuente: Ángeles en la cabeza	28
5.11.	Monoplaza presentado por el equipo Oxford Brookes Racing para la temporada 2016. Fuente: Oxford Brookes Racing	29
5.12.	Monoplaza presentado por la universidad de Karlstad para la temporada 2016. Fuente: Karlstad FSAE Team	30

LISTA DE FIGURAS

5.13. Diferentes soluciones adoptadas por los equipos de FSAE para los alerones delanteros. Arus 2015 imagen superior y UPV 2016 la inferior. Fuente: ARUS Team y UPV Racing	31
5.14. Diferentes soluciones adoptadas por los equipos de FSAE para los difusores. Fuente: Team Delft, UPV racing y Arus Team.	33
5.15. Gráfica que representa la variación del coeficiente de sustentación en función de la altura al suelo para un perfil dado [3]	34
5.16. Monoplaza de la UPV con el que se ha competido en 2016. Fuente: UPV Racing	35
5.17. Zona de exclusión general para elementos instalados en el vehículo. Fuente: students.sae.org	37
5.18. Zona de exclusión general para elementos instalados en el vehículo. Fuente: students.sae.org	39
6.1. Detalle del mallado en curvatura sobre la superficie de un automovil. Fuente: Hanchagroup	42
6.2. Representación del efecto que puede tener el mallado sobre el resultado final si no se realiza correctamente. Fuente: Pointwise	43
7.1. Dominio del estudio para comparar los resultados experimentales con los obtenidos mediante simulación CFD. Fuente: Elaboración propia.	46
7.2. Dominio del estudio para comparar los resultados experimentales con los obtenidos mediante simulación CFD. Fuente: Elaboración propia	47
7.3. Coeficiente de sustentación del NACA 2415 para diferentes modelos de turbulencia. Fuente: Elaboración propia	49
7.4. Coeficiente de sustentación del NACA 2415 comparando resultados experimentales y obtenidos usando CFD mediante el modelo de turbulencia Spallart Almaras. Fuente: Elaboración propia	50
7.5. Dominio del estudio para evaluar el comportamiento del perfil a su altura de trabajo. Fuente: Elaboración propia.	51
7.6. Valores del coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque del perfil bajo efecto suelo. Fuente: Elaboración propia	52
7.7. Dominio del estudio para evaluar el comportamiento de la cascada de ambos perfiles a su altura de trabajo en el Ala Delantera. Fuente: Elaboración propia	54
7.8. Resultados para el coeficiente de sustentación (En valor absoluto) para la zona biplana del alerón delantero.	55
7.9. Dominio de estudio del alerón trasero del vehículo.	56
7.10. Resultados del coeficiente de sustentación (en valor absoluto) para el alerón trasero.	57
7.11. Modelo de viga biapoyada para el cálculo de las cargas sobre cada eje en el coche sin alerones instalados. Fuente: Elaboración propia	58
7.12. Modelo de viga para el cálculo de las cargas sobre cada eje para el coche con alerones instalados.	60

LISTA DE FIGURAS

7.13. Cambio en la deriva por neumático en el eje delantero y para los casos con y sin alerones. Fuente: Elaboración propia	61
7.14. Cambio en la carga vertical por neumático en el eje delantero y para los casos con y sin alerones. Fuente: Elaboración propia	62
7.15. Cambio en la deriva por neumático en el eje trasero y para los casos con y sin alerones. Fuente: Elaboración propia	63
7.16. Cambio en la carga vertical por neumático en el eje trasero y para los casos con y sin alerones. Fuente: Elaboración propia	64
7.17. Dominio de estudio para comparar las diferentes geometrías de difusor	65
7.18. Geometría del difusor, basado en una “ <i>spline</i> ” con los puntos de origen y fin definidos y con las cotas de curvatura X e Y variando en las diferentes simulaciones.	67
7.19. Carga y resistencia aerodinámica por unidad de longitud generada por los difusores. Fuente: Elaboración propia	67
7.20. Carga aerodinámica por unidad de longitud del falso fondo plano simulado en función de la curvatura del difusor. Fuente: Elaboración propia	68
7.21. Carga aerodinámica por unidad de longitud total del conjunto. Fuente: Elaboración propia	69
7.22. Parrilla de sensores pitot para medir la velocidad y presión del flujo aerodinámico en un cierto punto. Fuente: Omnicorse.it	70
7.23. Separación de los diferentes grupos de superficies para el cálculo CFD. Fuente: Elaboración propia	71
7.24. Volumen de control empleado para el estudio del vehículo completo mediante el “ <i>software</i> ” ANSYS Fluent . Fuente: Elaboración propia	72
7.25. Contornos de presiones y líneas de corriente para el diseño completo del monoplaza para la temporada 2016 en vista frontal. Fuente: Elaboración propia	74
7.26. Contornos de presiones y líneas de corriente para el diseño completo del monoplaza para la temporada 2016 en vista en planta. Fuente: Elaboración propia	75
7.27. Contornos de presiones restringido a presiones menores que 0 MPa de presión relativas para el diseño completo del monoplaza para la temporada 2016 en vista en perspectiva. Fuente: Elaboración propia	76
8.1. Esquema representativo de la clasificación de los diferentes tipos de materiales compuestos. Fuente: Elaboración propia	79
8.2. Relación entre el diámetro de la fibra y la resistencia de las mismas.	80
8.3. Representación pictográfica de los diferentes tipos de tejido que pueden emplearse como refuerzo en un material compuesto.	81
8.4. Relación tensión-deformación para la matriz, el refuerzo y el material compuesto en conjunto.	82
8.5. Relación del módulo de elasticidad y de la resistencia del material en función del ángulo de disposición de las fibras.	83

LISTA DE FIGURAS

8.6. ATL tipo pórtico de la empresa MTorres utilizada para la laminación de las piezas planas.	84
8.7. Diferentes componentes de la bolsa de vacío y de la pieza en el perímetro de la misma.	85
8.8. Mesa de vacío con el Yenil (naranja) y el air-weave (blanco) aplicado sobre las piezas antes de ser cerrada con la bolsa.	86
8.9. Modelo CAD del diseño final del alerón delantero montado en el vehículo. . .	87
8.10. Modelo CAD del diseño final del alerón trasero montado en el vehículo. . . .	88
8.11. Área sometida a cortante en los tornillos que soportan el alerón delantero del vehículo. Fuente: Elaboración propia	90
8.12. Detalle de los componentes de los cables del alerón delantero en la prueba de Formula Student Spain, con los prisioneros, los cables de acero trenzado de 2mm de diámetro y los tensores del cable. Fuente: Elaboración propia	91
8.13. Soportes adicionales al ala trasera: tensor transversal añadido para contrarrestar la flexión de las orejetas de soporte de las barras y sujecciones laterales que evitan la vibración de la zona inferior del end-plate que los jueces de la verificación técnica obligaron a incorporar al ensamblaje en la propia competición. Fuente: Elaboración propia	92
8.14. Modelo CAD del diseño final de las dos piezas que componen el morro del vehículo. Fuente: Elaboración propia	93
8.15. Modelo CAD del diseño final de los difusores del monoplaza en el fondo plano. Fuente: Elaboración propia	93
8.16. Tensores de cable de acero trenzado del lateral izquierdo del monoplaza. Fuente: Elaboración propia	94
9.1. Timeline general seguida a lo largo de la temporada 2016. Fuente: Elaboración propia	96
11.1. Concepto aerodinámico del monoplaza del equipo Formula UC3M para la temporada 2017. Fuente: Elaboración propia	103

Lista de Tablas

7.1. Matriz de dimensiones ampliada	48
7.2. Diferencias entre el coeficiente de sustentación experimental y el coeficiente obtenido mediante CFD.	50
7.3. Valores de coeficiente de sustentación con y sin efecto suelo y diferencia en porcentaje entre ambos valores, en función del ángulo de ataque.	53
7.4. Resultados del coeficiente de sustentación (en valor absoluto) y de resistencia para el extremo del alerón delantero a su altura real de trabajo.	55
7.5. Valores del cociente entre la fuerza vertical (carga) y la fuerza longitudinal (resistencia) del conjunto del estudio.	69
7.6. Resultados para la fuerza en los diferentes ejes para el coche completo con y sin alerones instalados. Fuente: Elaboración propia.	77
7.7. Valores del área frontal con y sin alerones. Fuente: Elaboración propia	77
8.1. Tipos de matrices y fibras más empleados en materiales compuestos.	80
8.2. Pruebas sucesivas para verificar la tornillería que cumple normativa.	90
9.1. Horas de trabajo invertidas en el diseño y fabricación de los componentes de la carrocería y el aero-kit del monoplace de 2016. Fuente: Elaboración Propia	97
10.1. Resumen del presupuesto realizado para el evento de costes de la competición. Fuente: Elaboración propia	99
10.2. Coste total de la ingeniería invertida en el proyecto. Fuente: Elaboración propia.	101

Capítulo 1

Resumen

La finalidad del presente proyecto de fin de carrera es la concepción de la carrocería y aerodinámica del prototipo de Formula Student presentado por el equipo Formula UC3M a la competición de ingeniería “*Formula Student Spain*” disputada en España, en el circuito de Montmeló.

La instalación de la carrocería y del paquete aerodinámico condiciona el paso por curva de un vehículo en casi la totalidad de las categorías del “*motorsport*”, más aun en competiciones como la “*Formula Student*” donde el automóvil ha de reaccionar muy rápido ante cambios de trayectoria bruscos y curvas muy cerradas en las que la carga vertical sobre el neumático puede marcar la diferencia entre perder el control del monoplaça o tomar la curva más rápido que cualquier otro equipo.

Esta memoria abarca desde los conceptos previos requeridos para la concepción de la idea, su desarrollo y estudio, hasta su montaje final en el monoplaça pasando por todas las fases de cálculo, fabricación de utillaje y producción del conjunto final. Además se incluyen tiempos de desarrollo y costes de producción.

En los capítulos 3, 4 y 5 del documento se describen los objetivos del proyecto, la descripción general de la competición y el estado del arte actual, que condiciona el desarrollo de los monoplaças hoy en día en la competición: Normativa, principios aerodinámicos, diseños previos, etc.

En el capítulo 6 se introduce el método de cálculo de la mecánica de fluidos computacional y los conocimientos necesarios para comprender en el capítulo número 7 los cálculos basados en esta técnica, realizados mediante el software ANSYS Fluent.

Posteriormente en el capítulo 8 se muestra el proceso de producción de las piezas que componen el proyecto de fin de carrera, los métodos y útiles empleados así como los modelos CAD de las diferentes piezas (realizado a través del software SolidWorks).

Finalmente en los capítulos 9, 10 y 11 del se muestran las consecuencias del proyecto, tanto

1. Resumen

las conclusiones, los desarrollos futuros, el presupuesto y la planificación que ha conllevado la fabricación de esta importante parte del monoplaza.

Capítulo 2

Agradecimientos

En primer lugar a Daniel Gómez Lendinez por haber sido mi guía en esta aventura que tantas alegrías nos ha dado. Sin ti esto hubiese sido imposible.

A Javier Carrillo, Jorge Vega y Daniel García-Pozuelo por haber creído en este proyecto y haberme permitido formar parte de el.

A Fernando Serrano, por su esfuerzo personal, sus impagables enseñanzas y su apoyo constante en la aventura de fabricar este coche.

A mis padres y hermano por haberme apoyado incondicionalmente en todas las decisiones que he tomado a lo largo de estos cuatro años. Soy lo que soy gracias a ellos.

A Araceli por haber creído siempre en mí y haberme hecho confiar en que las metas por difíciles que sean pueden cumplirse.

A mi familia por ser los primeros en demostrar que juntos podemos con todo lo que se ponga en nuestro camino.

A Ana y Pedro por haberme apoyado y por haber creído en mí aun cuando yo no lo hubiese hecho.

A Javi, Adri, Dani, Pablo y Aparicio por estar siempre orgullosos de mi y no haber dudado nunca de mi. Gracias por todos estos años de amistad.

A Daniel Cubero por acompañarme en mis aventuras en el “motorsport”.

A Jaime, Jorge, Javier, Carlos Herranz y muchos otros compañeros que habéis tenido que soportarme durante estos cuatro años.

A Luis de Santos, porque todo barco necesita un capitán y él es el responsable de que hayamos logrado lo impensable.

2. Agradecimientos

A todos los compañeros del equipo, porque gracias a todo este trabajo que hemos conseguido, a las noches sin dormir en el taller y a las largas tardes de diseño hemos logrado algo increíble. Gracias por hacer que todo el esfuerzo haya valido la pena.

A los patrocinadores que han apoyado a este proyecto, confiando desde el principio en nuestras capacidades.

A Juan, porque desde ahí arriba estaría orgulloso de lo que su nieto ha conseguido.

A Paula, porque empecé este viaje contigo y la vida nos impidió poder terminarlo juntos. Todo esto va por ti.

3.1. “*Formula Student*”

La “*Formula Student*” [1] es una competición internacional en la que, equipos formados por alumnos de grado y master de ingeniería de las diferentes universidades del mundo, compiten en una serie de pruebas con un proyecto consistente en concebir, diseñar, fabricar, desarrollar y competir con un automóvil tipo fórmula, con unas ciertas restricciones en el diseño general del vehículo (ver figura 3.1).



Figura 3.1: Equipo participante de la UC3M EN la prueba de “*Formula Student*” realizada en Montmeló. Fuente: Elaboración propia

3. Introducción

El objetivo de la competición es la creación de un vehículo monoplaza que sea capaz de albergar un amplio rango de pilotos desde el 5 percentil de mujer al 95 percentil de hombre, dentro de las restricciones de diseño impuestas por la normativa de la competición de “*Formula Student*” y teniendo en cuenta factores como la estética, la viabilidad del proyecto, la innovación, el mantenimiento, la fabricabilidad y la fiabilidad del vehículo.

Una vez construido y testado, el equipo tratará de “vender” el proyecto a una “compañía” realizando una presentación del mismo que demuestre su rentabilidad en una tirada de fabricación de 1000 vehículos, aptos para la competición.

Cada cita de la competición la gana aquel equipo que sea capaz de obtener la máxima puntuación sobre 1000 puntos que pueden conseguirse. Por esto la “*Formula Student*” no es una simple competición automovilística, sino que es multidisciplinar de forma que todos los integrantes de equipos de esta categoría se enfrenten a proyectos de ingeniería reales en toda su extensión.

La puntuación de las diferentes pruebas que componen el evento son:

- Pruebas estáticas:
 - Inspección técnica (0 puntos)
 - Presentación del “*Business Logic Case*” o plan de negocio (75 puntos)
 - Análisis de costes (100 puntos)
 - Presentación del diseño del monoplaza o “*Engineering design*” (150 puntos)
- Pruebas dinámicas
 - Prueba de aceleración (75 puntos)
 - “*Skid-pad*” (50 puntos)
 - “*Autocross*” (150 puntos)
 - “*Endurance*” (300 puntos)
 - Eficiencia (100 puntos)

Esta prestigiosa competición se desarrolla a nivel mundial en diferentes citas repartidas por los distintos continentes, entre las que destacan las citas europeas como FSG (“*Formula Student Germany*”), FSUK (“*Formula Student United Kingdom*”) o FSS (“*Formula Student Spain*”) entre otras.

3. Introducción

3.2. Pruebas estáticas (325 puntos)

3.2.1. Inspección técnica (0 puntos)

Esta actividad eliminatoria no implica puntuación alguna, aunque es imprescindible para que el vehículo pueda participar en los eventos dinámicos.

El objetivo de la inspección técnica es establecer si el vehículo presentado por el equipo para competir cumple la normativa de la competición y es seguro para su uso en carrera.

Se considera que cuando el equipo presenta el vehículo a la inspección técnica, este declara que ha determinado por si mismo que el vehículo es apto para competir y cumple las especificaciones la normativa de “*Formula Student*”.

Los elementos para ser inspeccionados en este proceso son:

- El vehículo, las ruedas para condiciones de seco y de mojado, el documento del *SES* o “*Structural Equivalency Spreadsheet*”, el informe del atenuador de impactos y la copia de cualquier aclaración de la normativa realizada en los foros de “*Formula Student*” junto con la respuesta recibida.
- Extintores y “*Push bar*”
- Pilotos y equipación.

Una vez el vehículo ha pasado satisfactoriamente la inspección técnica, se colocan en la parte superior del morro (ver figura 3.2) las pegatinas que indican que se ha pasado la inspección técnica y que a partir de entonces el vehículo no puede ser modificado a excepción de los aspectos considerados en el apartado T1.2 de modificaciones y reparaciones de la normativa de la competición, siendo apto para competir en las pruebas dinámicas.

3.2.2. “*Business Logic Case*” (75 puntos)

El objetivo de este documento es la justificación de la solución escogida por el equipo para sobrellevar el litigio constante entre el diseño para conseguir unas buenas prestaciones, el diseño para simplificar la producción y los costes de la fabricación. En este evento es necesario además demostrar el cumplimiento de los objetivos establecidos por el equipo.

Así mismo en este documento ha de demostrarse que la propuesta realizada por cada equipo es apropiada para el mercado, así como la estrategia o modelo de negocio que el equipo utilizará para amortizar su proyecto, en el supuesto de venta de la producción de 1000 unidades de su monoplaça.

3. Introducción



Figura 3.2: Pegatinas de verificación obtenidas por el equipo Formula UC3M en la “*technical inspection*” de FSS. Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Evento de costes y fabricación. (100 Puntos)

El objetivo de este evento estático es la justificación por parte de los equipos de los costes totales relacionados con la construcción del monoplaza que presentan a la competición.

Este evento requiere de los siguientes documentos:

- “*Cost Report*”: Documento en el que se exponen todos los costes derivados de la producción del monoplaza.
- “*Discussion*”: Este documento no sólo evalúa los costes derivados de la construcción del vehículo si no también la habilidad del equipo para preparar de forma adecuada los costes ingenieriles y de fabricación del mismo.
- “*Real Case*”: Planteamiento de un “escenario real” donde los participantes de cada equipo tendrán que reaccionar ante el desafío de enfrentarse al coste de la fabricación del vehículo.

3.2.4. “*Engineering design*” (150 puntos)

El evento de diseño lleva a cabo la evaluación de calidad de la ingeniería invertida en el valor general del vehículo y sus prestaciones, teniendo en cuenta las innovaciones introducidas

3. Introducción

y las soluciones presentadas a los distintos sistemas del vehículo.

Este documento debe incluir la descripción completa del vehículo, así como de sus objetivos y de los conceptos ingenieriles empleados en el diseño y la manufactura.

3.3. Pruebas dinámicas (675 puntos)

3.3.1. “*Acceleration*” (75 puntos)

Esta prueba evalúa la aceleración del monoplaza en recta, en una zona de asfalto liso de 75 metros de largo y 4,9 metros de ancho, delimitado por conos.

Con la parte principal del vehículo situada a 30 centímetros de la línea de salida, los monoplazas, por turnos, aceleran lo más rápido posible desde el momento en que con una bandera verde se les indica el inicio de la prueba. El cronometraje comienza en el momento en el que el monoplaza cruza la línea de salida y finaliza una vez se cruza la línea de meta.

El piloto tiene un segundo intento para realizar de nuevo la prueba de aceleración inmediatamente después de su primer intento.

3.3.2. “*Skid Pad*” (50 puntos)

Esta prueba tiene como objetivo evaluar el comportamiento del vehículo tomando curvas de radio constante sobre una superficie plana que puede estar o no mojada.

El trazado de la prueba (ver figura 3.3) consiste en dos círculos unidos formando un 8 de modo que el automóvil ha de realizar dos vueltas completas a la curva de radio constante de la derecha, realizar el cambio al trazado de radio constante de la izquierda, completar otras dos vueltas y salir del trazado por la zona habilitada para ello.

3.3.3. “*Autocross*” (150 puntos)

El objetivo de esta prueba es mostrar la capacidad del vehículo para maniobrar en una pista estrecha y con todo tipo de curvas de una longitud en torno a 0,8 kilómetros con el monoplaza solo en pista para evaluar el comportamiento en giro, frenada y aceleración.

Estas pruebas se realizan a una velocidad media de unos 40-50 kilómetros por hora en función de la pista y las condiciones del trazado.

3. Introducción

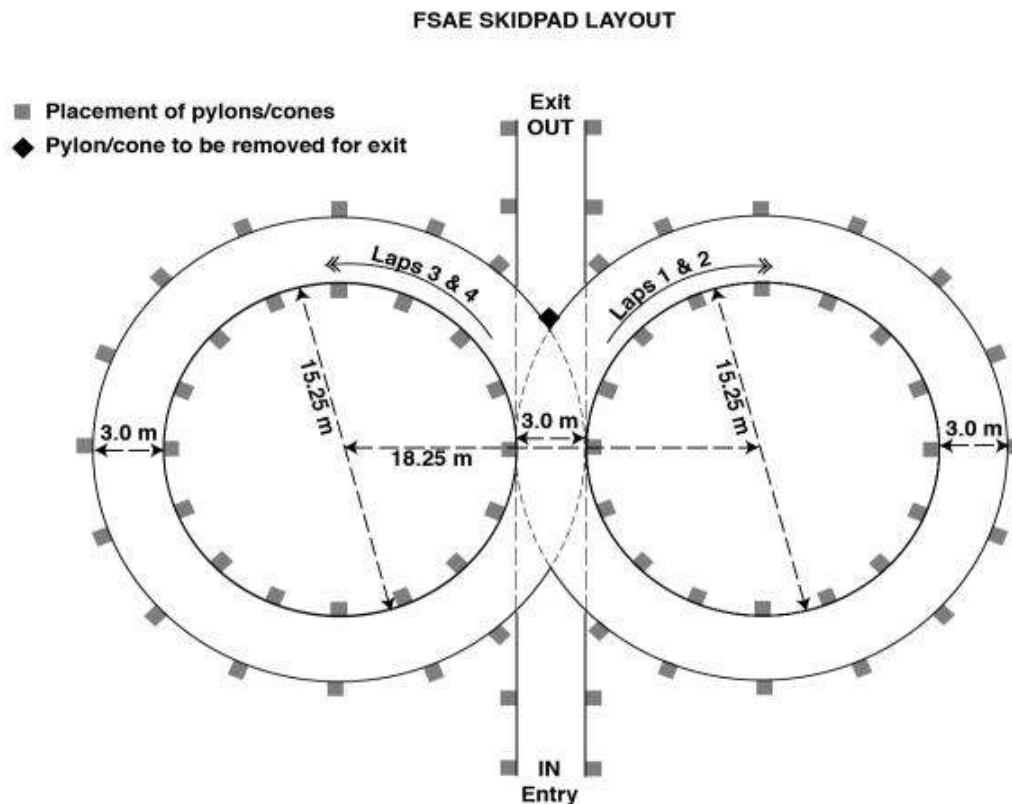


Figura 3.3: Circuito para la realización de la prueba “*Skid-Pad*”, regulado por normativa.
Fuente: FSAE Rules 2015-2016

3.3.4. “*Endurance*” (300 puntos)

El objetivo de esta prueba es verificar el conjunto de las prestaciones del monoplaza en funcionamiento durante 22 kilómetros a una velocidad media de entre 48 y 57 kilómetros por hora y así evaluar su fiabilidad.

El trazado de esta prueba es muy similar al del “*autocross*”, con curvas cerradas, algunas más amplias de radio de curvatura constante, slaloms, chicanes y cambios de carril.

En esta prueba corren hasta 4 vehículos al mismo tiempo, de modo que los adelantamientos han de realizarse bajo instrucción de los comisarios y en las zonas habilitadas para ello.

3. Introducción

3.3.5. “*Efficiency*” (100 puntos)

Esta prueba se realiza simultáneamente con la “*endurance*” y tiene en cuenta el gasto de combustible o energía empleado, el tiempo por vuelta y distancia recorrida.

Capítulo 4

Objetivos

El presente trabajo de fin de estudios tiene los siguientes objetivos:

- Realizar un diseño que permita un buen rendimiento del vehículo y una correcta dinámica en pista a través del estudio de la carrocería y el paquete aerodinámico: Esto se realizará mediante un diseño que se base en una baja resistencia al avance con una alta carga aerodinámica.
- Minimizar los costes reales de la aerodinámica para el equipo y lograr que los costes de acuerdo a los criterios de la competición para el evento de costes sean lo más reducidos posibles.
- Realizar un estudio aerodinámico que permita conseguir puntos en el evento de ingeniería.
- Diseñar uniones sencillas y que permitan un rápido montaje y desmontaje de las piezas.
- Conseguir que el vehículo sea atractivo para los patrocinadores y el público general de la competición.

Capítulo 5

Estado del arte

5.1. Historia de la aerodinámica en la competición

A lo largo de la historia de la competición automovilística, la aerodinámica ha sido uno de los factores que, con el paso del tiempo, ha crecido en importancia hasta el punto de ser determinante en el diseño de cualquier vehículo de este tipo hoy en día.



Figura 5.1: Primer automóvil en hacer uso de la aerodinámica para batir el récord de velocidad (1899). Fuente: Noticias Coches

El concepto de emplear el aire alrededor del vehículo para ir lo más rápido posible comenzó

5. Estado del arte

a utilizarse en automovilismo en los prototipos para batir el récord del mundo de velocidad, donde empezaron a utilizarse formas cilíndricas con el frontal del vehículo acabado en punta, intentando reducir la resistencia longitudinal al avance en su componente aerodinámica y, así, alcanzar velocidades mayores (ver figura 5.1).

La evolución del estudio de la hidrodinámica en barcos, así como la búsqueda de la manipulación del aire para lograr el objetivo de volar, desembocó en una forma de quilla de barco aplicada en los primeros automóviles del siglo XX, que fue progresando hacia una forma tipo “gota”; forma que se mantuvo a lo largo del tiempo, dado su buen resultado en cuanto a la reducción de la resistencia al aire (ver figura 5.2).

Con el paso de los años, comenzaron a utilizarse las caras superiores y laterales de los automóviles de forma conjunta realizando una transición suave entre las mismas para reducir el coeficiente aerodinámico longitudinal, tratando de alterar el flujo de aire lo menos posible. Un ejemplo de esto son los modelos W de Mercedes Benz (ver figura 5.3), en los que la aerodinámica era ya un elemento realmente importante a tener en cuenta en cuanto a mejora de prestaciones en la pista.

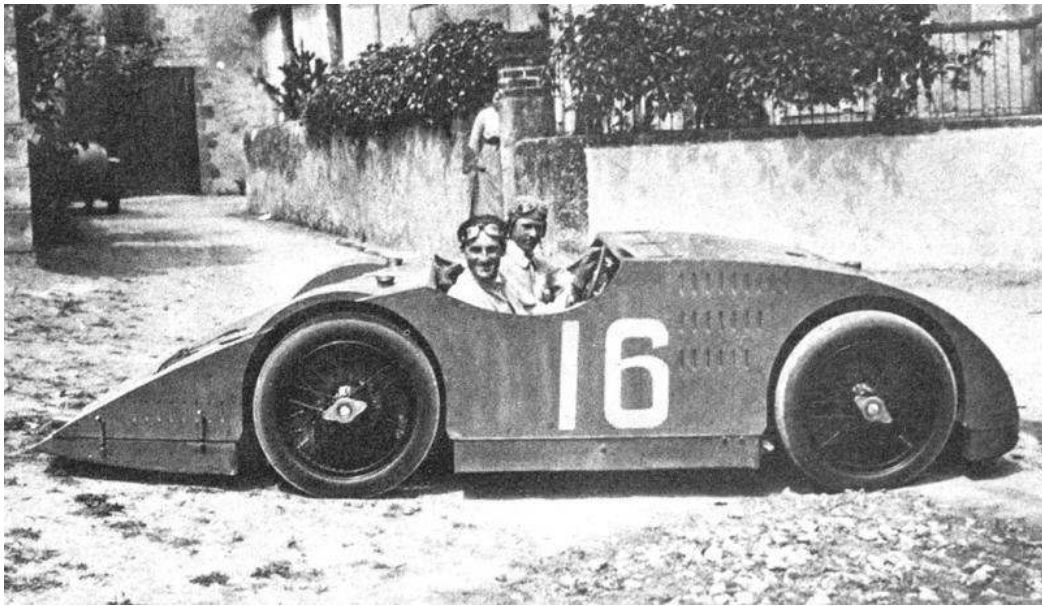


Figura 5.2: Bugatti Type-32 (1923). Fuente: Forum-auto

Las formas evolucionaron gracias a la extensión del uso de los túneles de viento, donde se pasó paulatinamente desde la realización del estudio de piezas sueltas, a modelos a escala y finalmente al estudio del coche completo. Este proceso fue impulsado por los ingenieros alemanes y posteriormente adoptado por los italianos, y por último se expandió a casi todos

5. Estado del arte

los constructores de vehículos de altas prestaciones.



Figura 5.3: Mercedes W25. Fuente: Autoviva

Vemos en la figura 5.3 la influencia del uso del túnel de viento en contraposición con los automóviles previamente vistos en las figuras 5.1 y 5.2; con formas mucho más suavizadas, trabajadas y estudiadas para reducir la resistencia aerodinámica al avance y por tanto mejorar la velocidad punta del vehículo automóvil.

El cambio a motor trasero, permitió emplear la parte delantera del vehículo de forma aerodinámica, lo que finalmente derivó en la forma de “cigarro” que caracteriza a los monoplazas de Formula 1 de la década de los 60.

Uno de los pasos más importantes en la historia del automovilismo de competición fue en 1968 cuando en el Gran Premio de Mónaco aparecieron los primeros alerones traseros en la Formula 1, que acabaron extendiéndose a casi la totalidad de los equipos de la competición ese mismo año.

El desarrollo de los alerones llegó hasta el punto de introducir sistemas de variación del

5. Estado del arte



Figura 5.4: Alerón biplano de prueba instalado en un Brabham de Formula 2. Fuente: Formula 1 en estado puro

ángulo de incidencia según las necesidades de adherencia del piloto en cada momento, con el fin de optimizar el funcionamiento y la prestación del coche en curva (ver figura 5.4).

Estos alerones fueron evolucionado en su geometría desde una forma de gota a forma de perfiles de ala invertida, tratando de crear una sustentación negativa que permitiese al monoplaza ir “pegado” al asfalto, aumentando consecuentemente la velocidad de paso por curva y reduciendo considerablemente el tiempo por vuelta.

Ya en los años 70 comenzó la denominada como la “era moderna de la aerodinámica en la Formula 1”, en la que los monoplazas partían de una forma que, por si misma, buscaba la creación de carga aerodinámica, tal como sucede con el diseño cuneiforme o en forma de cuña que se acabo extendiendo durante esta década (ver figura 5.5).

Otro punto realmente importante en la evolución de la aerodinámica en el “*motorsport*” es lo que se llama “efecto suelo”, que apareció en los denominados “*wing car*”, tendencia de diseño que buscaba el aprovechamiento del aire que circulaba bajo el fondo del monoplaza, en forma de ala invertida, evitando el escape de la corriente de aire con el uso de unas faldillas rígidas deslizantes que generaban una succión que en muchas ocasiones era suficiente como para hacer que los alerones no fuesen necesarios.

5. Estado del arte



Figura 5.5: Monoplazas de F1 de la década de los 70, continuista con la tendencia a la forma de cuña. Fuente: The blueprints

Este aprovechamiento del efecto suelo fue prohibido por motivos de seguridad poco después de ser implantado, puesto que creaba un conducto casi hermético entre el fondo plano y el pavimento en el que cualquier interrupción de la corriente de aire desestabilizaba el monoplaza por completo provocando una reducción importante de la velocidad máxima que el monoplaza podía desarrollar en curva, causando accidentes de gran magnitud.

Trás los diseños de monoplazas cuya forma recordaba una flecha, surgidos como consecuencia de esta prohibición, con la introducción de sistemas de suspensión activa que optimizaban artificialmente la aerodinámica del coche, manteniendo la distancia al suelo constante y mejorando la eficiencia aerodinámica del mismo; la tendencia fue derivando hacia el máximo aprovechamiento posible de la corriente de aire que circula alrededor del vehículo.

Hoy día, la aerodinámica es un factor clave en la competición automovilística en todas sus expresiones, ya sea en competiciones de Grandes Turismos, en categorías de vehículos tipo formula, o incluso en las competiciones de Rally.

Tal es la importancia de la aerodinámica, que en la máxima categoría de monoplazas tipo fórmula, la optimización aerodinámica es un reto, y se utiliza el aire para reducir la resistencia al avance, aprovechar el aire para refrigerar la electrónica, los frenos y la unidad de potencia; así como para crear la máxima carga aerodinámica posible para permitir el paso

5. Estado del arte

por curva sea lo más rápido posible.

5.2. Fundamentos aerodinámicos

El principio básico de la aerodinámica en el que se basa el estudio fluido-mecánico de un automóvil de competición, es la aparición de fuerzas asociadas a la interacción entre un fluido y un cuerpo.

5.3. Caracterización del movimiento de un fluido

Una de las diferencias fundamentales entre un medio sólido y un medio fluido reside en que las partículas fluidas presentan una velocidad tridimensional diferente para cada partícula en cada instante temporal, mientras que en un sólido, todas las partículas están unidas entre sí y no pueden desplazarse de forma independiente.

Dado que cada partícula fluida presenta un vector tridimensional que describe su velocidad y su posición, para caracterizar el movimiento de un fluido es necesario definir un campo vectorial.

$$\vec{q} = \frac{dx}{dt} \cdot \vec{i} + \frac{dy}{dt} \cdot \vec{j} + \frac{dz}{dt} \cdot \vec{k} \quad (5.1)$$

Donde:

- $\vec{q}$ = Vector velocidad para una partícula fluida en un instante temporal t .
- t = Instante temporal considerado.
- $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ = Vectores ortogonales que definen la dirección de cada una de las componentes
- $\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt}$ = Velocidad instantánea en la partícula fluida considerada.

La descripción por tanto, del campo de velocidades del fluido depende del desplazamiento de la partícula fluida. Hay dos alternativas para definir el movimiento de una partícula fluida:

- Descripción Lagrangiana: La posición de cada partícula fluida depende de su posición inicial y del instante temporal.

$$x = (x_0, y_0, z_0, t) \quad (5.2)$$

$$y = (x_0, y_0, z_0, t) \quad (5.3)$$

5. Estado del arte

$$z = (x_0, y_0, z_0, t) \quad (5.4)$$

- Descripción Euleriana: La posición en un instante depende de la posición inicial y de la velocidad instantánea.

$$u_{t+1} = u_t + \frac{du}{dt}_i \cdot \Delta t \quad (5.5)$$

Donde:

- u_{t+1} = Posición de la partícula en el instante siguiente a t.
- u_t = Posición de la partícula en el instante t.
- $\frac{du}{dt}_i$ = Velocidad de la partícula.
- Δt = Tiempo invertido en el desplazamiento.

5.3.1. El aire [2]

El aire, fluido de estudio en los problemas aerodinámicos para automóviles de competición, es una mezcla de gases (71 % Nitrógeno, 21 % oxígeno, y otros gases en menor proporción) cuya interacción entre partículas es la responsable de las fuerzas que aparecen en los problemas aerodinámicos.

Existen dos tipos de interacciones entre las partículas gaseosas:

- Fuerzas normales: implican colisiones entre las partículas sin deslizamiento.
- Fuerzas tangenciales: implican colisiones entre las partículas con deslizamiento

Habitualmente estas fuerzas normales son en magnitud muy superiores a las tangenciales, de tal forma que los esfuerzos tangenciales generados en el fluido como consecuencia de la interacción fluido-cuerpo son despreciables en la mayor parte del fluido a excepción de la fina capa de aire que interacciona directamente con la superficie del vehículo o el pavimento. Esta región se denomina capa límite, que será descrita a continuación en este punto.

Densidad

Uno de los parámetros que más importancia tiene en el fluido de estudio en cuanto a las propiedades del mismo es la densidad. El aire, al igual que cualquier sustancia, tiene una masa, y por tanto goza de una interacción gravitacional. Esta en la superficie terrestre genera una presión que se corresponde con lo que se denomina como 1 atmósfera (101300 Pa).

5. Estado del arte

En los estudios aerodinámicos, se considera presión relativa a la diferencia de presiones respecto a la presión de referencia que se establezca para el estudio, mientras que la presión absoluta se corresponde con la cantidad exacta de pascales que presenta un punto concreto.

La temperatura es un factor que influye en la densidad, puesto que cuanto mayor es la temperatura, mayor el espaciado entre partículas y las velocidades de colisión. De este modo si el interespaciado de las partículas aumenta, la columna de aire se hace más grande y por tanto la densidad disminuye al existir en el mismo volumen, menos partículas del fluido.

Esta densidad, también influye en las fuerzas generadas en el fluido, de tal modo que cuanto mayor es la densidad del aire, mayores son las fuerzas aerodinámicas generadas. Esto es notable dentro del “*motorsport*”, donde en los circuitos en los que la altitud es elevada, se trata de compensar el efecto de la reducción de la carga aerodinámica de los alerones mediante ángulos de ataque más elevados (ver figura ,5.6).



Figura 5.6: Alerón trasero del equipo Williams F1 Team empleado en el GP de Austria en 2016 con un mayor ángulo de ataque para compensar la reducción de la carga aerodinámica dada la menor densidad debida a la altitud del trazado. Fuente: Motorsport.com

5. Estado del arte

Viscosidad

La viscosidad es otra de las propiedades del fluido que caracteriza su comportamiento. Esta se puede considerar como la “pegajosidad” de un fluido, y se corresponde con la aparición de fuerzas cuando en un mismo flujo fluido aparecen diferencias de velocidad. Estas fuerzas viscosas son transmitidas del fluido al cuerpo con el que interacciona en zonas donde la viscosidad toma importancia, por ejemplo en la capa límite, donde en un espacio bastante reducido se pasa de una velocidad relativa entre el fluido y el cuerpo, nula (como consecuencia de la condición de adherencia) a la velocidad aguas arriba del flujo.

5.3.2. La resistencia y la carga aerodinámica

En el caso de estudio, de un automóvil, nos interesan entre otros parámetros, dos fuerzas que aparecen consecuencia del movimiento relativo previamente expuesto: la resistencia aerodinámica y la sustentación o carga.

La resistencia aerodinámica se define como la fuerza opuesta al movimiento relativo de cualquier objeto que se mueve respecto al fluido (aire) de sus alrededores. Es proporcional a la velocidad en flujos laminares, y al cuadrado de la velocidad en flujos turbulentos.

$$R = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot C_D \quad (5.6)$$

- R= Resistencia aerodinámica.
- ρ = Densidad del fluido.
- U= Velocidad del fluido aguas arriba.
- L= Longitud característica.
- A= Área frontal
- C_D = Coeficiente de resistencia aerodinámica.

La sustentación (en contexto buscamos la carga aerodinámica, que por definición se corresponde con una sustentación de valor negativo) se define como la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplace a través de un fluido, y que es de dirección perpendicular a la velocidad de la corriente incidente.

$$C = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot C_L \quad (5.7)$$

- C= Carga aerodinámica.
-

5. Estado del arte

- ρ = Densidad del fluido.
- U = Velocidad del fluido aguas arriba.
- L = Longitud característica.
- A = Área frontal
- C_L = Coeficiente de resistencia aerodinámica.

El uso de la aerodinámica en los automóviles de competición está directamente relacionado con la influencia del comportamiento de los neumáticos, lo que permite mejorar las prestaciones del monoplaza en tracción, frenada y circulación por trayectorias curvilíneas a altas velocidades.

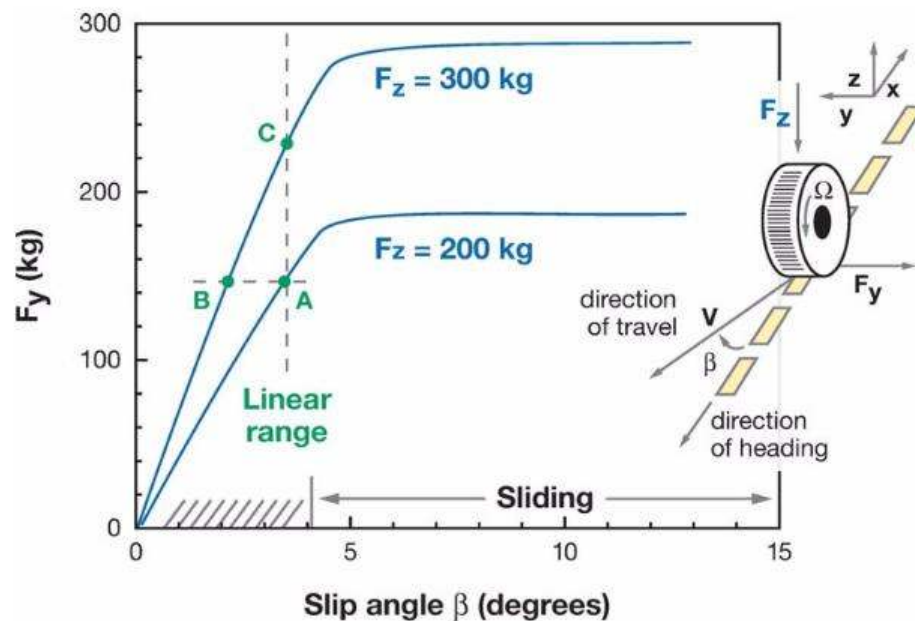


Figura 5.7: Relación entre la fuerza lateral y vertical para un neumático genérico en función del ángulo de deriva [3]

La fuerza lateral que es capaz de proporcionar un neumático depende de la fuerza normal que recae sobre el mismo, y varía linealmente con el ángulo de deriva de las ruedas para pequeños valores de ese ángulo.

Es por tanto que podemos observar dos comportamientos, de tal modo que para un mismo ángulo de deriva, si aumentamos la fuerza vertical sobre el neumático, aumentamos la

5. Estado del arte

fuerza lateral que este es capaz de desarrollar; o bien, si aumentamos la carga vertical sobre el neumático, para una misma fuerza lateral, requerimos de un menor ángulo de deriva.

Esto tiene dos implicaciones principales y es que gracias a la carga aerodinámica aumentamos la carga vertical por neumático y el vehículo puede tomar más rápido una curva sin llegar al límite adherente de los neumáticos, o bien, tomando la curva a la misma velocidad, se requiere de un menor desgaste de estos elementos debido al menor ángulo de deriva requerido (Figura 5.7).

5.3.3. Flujo laminar y flujo turbulento

Se considera flujo laminar aquel en el que las partículas fluidas se desplazan de forma ordenada y paralela de modo que las fuerzas tangenciales tienen gran importancia incluso a velocidades bajas como consecuencia de la viscosidad, elevada incluso con gradientes de velocidad bajos.

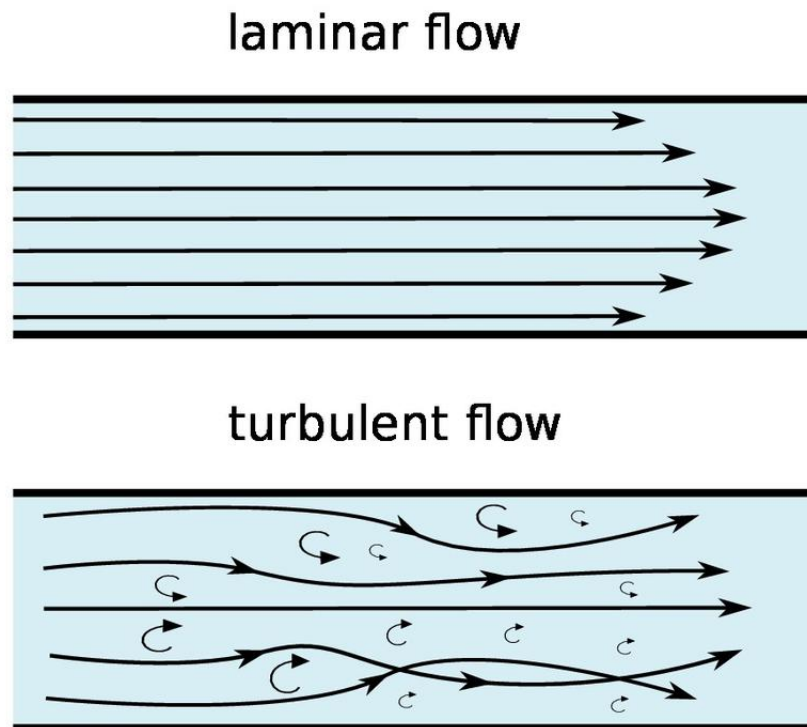


Figura 5.8: Representación de la diferencia entre un flujo laminar y un flujo turbulento.
Fuente: CFD support

5. Estado del arte

El flujo turbulento es caracterizado por un movimiento caótico de las partículas fluidas. En este caso las fuerzas tangenciales generadas son de gran importancia en la zona de contacto con las paredes, la capa límite, mientras que en el seno del fluido son mucho menores.

Además el flujo turbulento tiene una gran convección de momento, baja difusión y un rápido intercambio de presión y velocidad en tiempo y posición.

En la figura 5.8 se observa la diferencia entre ambos regímenes, cuya identificación analítica se realiza a través del número de Reynolds.

5.3.4. Números de Mach y de Reynolds

Otros importantes parámetros necesarios para la realización del estudio de forma correcta son los parámetros adimensionales de Mach y Reynolds, que definirán las características de nuestro problema CFD:

- Número de Reynolds: Parámetro adimensional que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas proporcionándonos una idea de la pérdida de energía debida a la viscosidad. Cuando el número de Reynolds es pequeño, se considera que las fuerzas viscosas tiene un efecto dominante en la pérdida de energía, mientras que si el número de Reynolds es grande, estas fuerzas viscosas tienen un efecto despreciable frente a las fuerzas inerciales. En flujos externos alrededor de un obstáculo como es nuestro caso el flujo turbulento se considera a partir de que el número de Reynolds sea mayor que 20.000 [5].

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} \quad (5.8)$$

Donde:

- Re= Número de Reynolds.
 - ρ = Densidad del fluido.
 - U= Velocidad del fluido aguas arriba.
 - L= Longitud característica.
 - μ = Viscosidad del fluido.
- Número de Mach: Parámetro adimensional que relaciona la velocidad local del flujo con la velocidad del sonido dentro del fluido. En función de su valor podemos clasificar los regímenes del flujo en:
 - Flujo incompresible para M menor que 0.3.
-

5. Estado del arte

- Flujo subsónico para M entre 0.3 y 0.8.
- Flujo transónico para M entre 0.8 y 1.2.
- Flujo supersónico para M entre 1.2 y 5.
- Flujo hipersónico para M mayor que 5.

$$M = \frac{V}{c} \quad (5.9)$$

Donde:

- M = Número de Mach
- V = Velocidad del flujo.
- c = Velocidad de propagación del sonido en el fluido.

A medida que el valor numérico de este parámetro va aumentando, la compresibilidad del fluido toma importancia y ha de tenerse en cuenta al realizar la resolución del problema fluidomecánico propuesto

5.3.5. Capa límite

Un importante efecto aerodinámico influyente en el ámbito de las simulaciones de automóviles de competición es la capa límite. Esta es una región del campo fluido, de pequeño espesor, en la que las partículas presentan una velocidad creciente a medida que se alejan de la superficie, desde cero (las que se encuentran en contacto con el cuerpo, que como resultado de la condición de adherencia tienen velocidad cero) hasta las que presentan un 99 % la velocidad del flujo aguas arriba.

La importancia de la aerodinámica reside en la pérdida de prestaciones de los elementos aerodinámicos cuando la misma produce que el flujo de aire se desprenda de la superficie del cuerpo de estudio, lo que implica generalmente una reducción muy elevada de las fuerzas aerodinámicas de sustentación (o carga aerodinámica) y un aumento importante en la resistencia aerodinámica.

El espesor la capa límite es mayor en flujo turbulento que en flujo laminar, aunque el desprendimiento de la capa límite es más tardío en este primero, es por ello que en aplicaciones automovilísticas y aeronáuticas suele tratarse de transformar el flujo a turbulento mediante elementos denominados turbuladores con el fin de lograr retrasar la entrada en pérdida.

En el caso del suelo rodante, su aplicación se introduce con el fin de eliminar la capa límite que aparecería si en el pavimento que estamos simulando, la condición de contorno es de “pared fija y estacionaria”, aunque en la realidad no es así puesto que la velocidad relativa entre el automóvil y el pavimento es la velocidad a la que dicho vehículo se desplaza.

5. Estado del arte

5.3.6. Efecto Magnus

Fenómeno fluido-mecánico que resulta en la desviación del flujo fluido debido a una velocidad de rotación del cuerpo, con el que éste presenta un movimiento relativo.

En vehículos automóviles tipo fórmula, este efecto es despreciable para ciertos componentes, como por ejemplo los palieres de la transmisión (componentes mecánicos que transmiten el movimiento de giro desde el diferencial a las ruedas traseras), sin embargo tiene una gran importancia en el caso de las ruedas, cuyo giro genera grandes alteraciones en el flujo aerodinámico alrededor del vehículo.

5.3.7. Efecto Venturi

Este efecto se produce cuando el flujo de un fluido se somete a un cambio de sección donde este se acelera. Consecuencia del aumento de la velocidad del fluido se produce una disminución de la presión del mismo. Este efecto se muestra claramente en el experimento del tubo de Venturi, donde la medida de la presión del fluido en la contracción del tubo del experimento es menor que en la zona de mayor sección (ver figura 5.9).

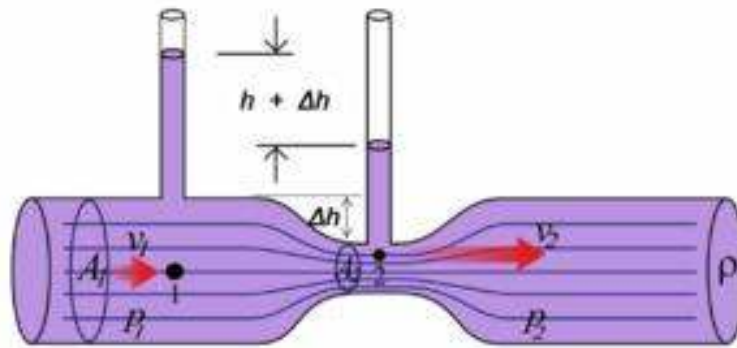


Figura 5.9: Ilustración representativa del efecto generado por un tubo de venturi. Fuente: Wikipedia

Así, el efecto que se genera cuando el flujo de aire que se aproxima a un automovil de competición es muy similar al de un tubo de Venturi en la zona inferior del vehículo, donde el aire pasa de la sección que ocupa naturalmente a una sección mucho más pequeña en la zona del fondo plano, de modo que el flujo aumenta su velocidad generando succión y creando carga aerodinámica (ver figura 5.10).



Figura 5.10: Ilustración representativa del efecto generado por un tubo de venturi. Fuente: Ángeles en la cabeza

5.3.8. Ecuaciones de Navier Stokes en forma integral

- Ecuación de la continuidad: Establece que el volumen fluido permanece constante durante el movimiento del mismo.

$$0 = \frac{d}{dt} \int_{V_m} \rho dV. \quad (5.10)$$

- Ecuación de la cantidad de movimiento: “Expresa matemáticamente como el incremento por unidad de tiempo de la cantidad de movimiento que hay en el volumen de control es igual al flujo convectivo de la cantidad de movimiento que entra en el volumen de control a través de las paredes [...], la resultante de las fuerzas de presión [...], la resultante de las fuerzas de viscosidad [...] y la resultante de las fuerzas másicas.” [5]

$$\frac{d}{dt} \int_{V_f(t)} \rho dV = - \int_{\Sigma f(t)} p \vec{n} d\sigma + \int_{\Sigma f(t)} \tau \cdot \vec{n} d\sigma + \int_{V_f(t)} \rho \vec{f}_m dV \quad (5.11)$$

5.4. Estado del arte en la “*Formula Student*”

Hoy en día, la aerodinámica en el mundo de la Formula Student es un importante factor que se hace un hueco entre los diferentes equipos para tratar de lograr los 1000 puntos a los que se opta en esta competición.

La colocación de elementos aerodinámicos como alerones y los difusores, así como un desarrollo adecuado de las formas del carenado, permiten una reducción sustancial de los tiempos invertidos en la realización de las diferentes pruebas dinámicas.



Figura 5.11: Monoplaza presentado por el equipo Oxford Brookes Racing para la temporada 2016. Fuente: Oxford Brookes Racing

5.4.1. Formas aerodinámicas

En cuanto a las formas aerodinámicas en los automóviles de esta competición hay dos grandes conceptos diferenciados que se usan, ambos muy usados y de buen resultado:

- Carenado muy poco voluminoso, tratando de reducir el área frontal del mismo para minimizar su resistencia aerodinámica.

5. Estado del arte

5.4.2. Alerones delanteros y traseros

Estos elementos permiten a los monoplazas crear una carga aerodinámica que da la capacidad al mismo de aumentar la velocidad de paso por curva, al aumentar la carga vertical sobre cada neumático de forma virtual(sin aumentar la inercia del vehículo).

La mayor parte de equipos con un presupuesto limitado optan por hacer alerones, bien anclados al chasis o bien a las piezas de la carrocería, con geometrías y construcciones diversas (ver figura 5.13). La tendencia general es a conseguir alerones delanteros con dos planos en la zona situada delante del neumático y 3 en la zona entre ese lateral y el morro. Algunos equipos como UPV Racing incluyen la “mesa de té” consistente en un perfil alar situado encima del morro del vehículo aprovechando que la restricción de altura para el alerón delantero es únicamente en la zona que en vista frontal coincide con la rueda.



Figura 5.13: Diferentes soluciones adoptadas por los equipos de FSAE para los alerones delanteros. Arus 2015 imagen superior y UPV 2016 la inferior. Fuente: ARUS Team y UPV Racing

Los equipos que presentan un mayor presupuesto y un mayor desarrollo a lo largo de las temporadas disputadas en esta competición, utilizan una tecnología puntera que permite conectar mecánicamente los alerones con la suspensión.

5. Estado del arte

De este modo cuando el vehículo toma una curva, la zona del coche del interior de la trazada se comprime y mediante el sistema de balancines el alerón se levanta de ese lado y desciende del lado contrario. De este modo el alerón permanece siempre paralelo al pavimento y permite mantener la eficiencia del comportamiento fluidodinámico a su alrededor sin que se altere su distancia al suelo.

Estos alerones suelen utilizar el principio aerodinámico por el cual, colocar dos perfiles de ala invertida situados uno a continuación del otro y con ángulos pronunciados nos permite generar mucha mayor carga aerodinámica que un único perfil de las dimensiones del conjunto de ambas alas, puesto que el espaciado vertical y horizontal entre ambos permite el paso de aire a mayor velocidad y hace que el flujo no se desprenda de la superficie inferior de estos, evitando así el desprendimiento de la capa límite.

Por lo general, los alerones traseros suelen anclarse mediante barras metálicas o de carbono a la estructura tubular utilizando orejetas, de tal forma que no genere excesiva resistencia al avance pero que al mismo tiempo, sea una forma de anclaje segura que cumpla la normativa referente a la flexión del alerón y a la rigidez de sus fijaciones.

Equipos como ARUS Team, han optado por diferentes soluciones, como colocar una gran pieza estructural que lo ancle al “main hoop” o incluso mediante pilares gruesos verticales.

5.4.3. Difusores

Se conoce bajo este nombre a la parte del fondo plano que conecta el flujo que discurre bajo el a alta velocidad con el aire exterior mediante una suave curvatura.

Su función básica es acelerar el flujo de aire bajo el vehículo automóvil creando una baja presión que succiona el vehículo pegándolo al suelo y generando por tanto carga aerodinámica.

Esta carga permite aumentar de forma virtual el peso del vehículo aumentando la adherencia de los neumáticos (que dependen de la fuerza normal, en nuestro, el peso más la carga aerodinámica, y del coeficiente de rozamiento) de modo que aumenta el “*grip*” o agarre del vehículo, complementando al generado por la ruedas y la suspensión.

Éste elemento aerodinámico aumenta el volumen de aire que circula bajo el monoplaza de forma gradual creando un vacío que ha de ser rellenado por el aire que circula bajo el fondo plano, creando un efecto Venturi que hace que el flujo de aire se acelere produciendo una disminución de la presión que pega nuestro automovil al suelo. Dicha transición desde el fondo plano al aire atmosférico ha de ser gradual de forma que se evite la separación del flujo de aire de la superficie del difusor.

5. Estado del arte

Las superficies verticales de separación que se utilizan en los difusores son de gran importancia puesto que evita que el aire se desplace hacia la parte superior del mismo (donde la presión es mayor) reduciendo así considerablemente el efecto conseguido. Además la transición suave permite reducir las turbulencias y la resistencia aerodinámica que un cambio de sección brusco.



Figura 5.14: Diferentes soluciones adoptadas por los equipos de FSAE para los difusores. Fuente: Team Delft, UPV racing y Arus Team.

Este importante elemento es utilizado por casi todos los equipos de Formula Student para optimizar la velocidad de paso por curva de los mismos, permitiendo que el fondo plano funcione correctamente y que la transición del aire desde el fondo plano al aire ambiente sea gradual.(ver figura 5.14)

También se ha generalizado el uso de las derivas laterales en el difusor, que permiten evitar que el flujo de aire se escape de la cara inferior del fondo plano y se desplace hacia la cara superior del mismo debido a las diferencias de presión existentes.

Uno de los problemas al que los diseñadores de los diferentes equipos han de enfrentarse, es la colocación del llamado “*Jacking point*”, que es la barra naranja de la figura 5.14 en la que el gato ha de engancharse y que debe de permitir que el vehículo pueda ser levantado.

5. Estado del arte

5.4.4. Fondo plano

El funcionamiento de este elemento aerodinámico se basa en gestionar el efecto suelo.

Considerese un perfil de alerón en un flujo libre con una distancia al suelo suficiente como para que este no interfiera en el flujo alrededor de ala. En estas condiciones el aire que circula alrededor del perfil genera una diferencia de presiones tal que, se produce una cierta succión.

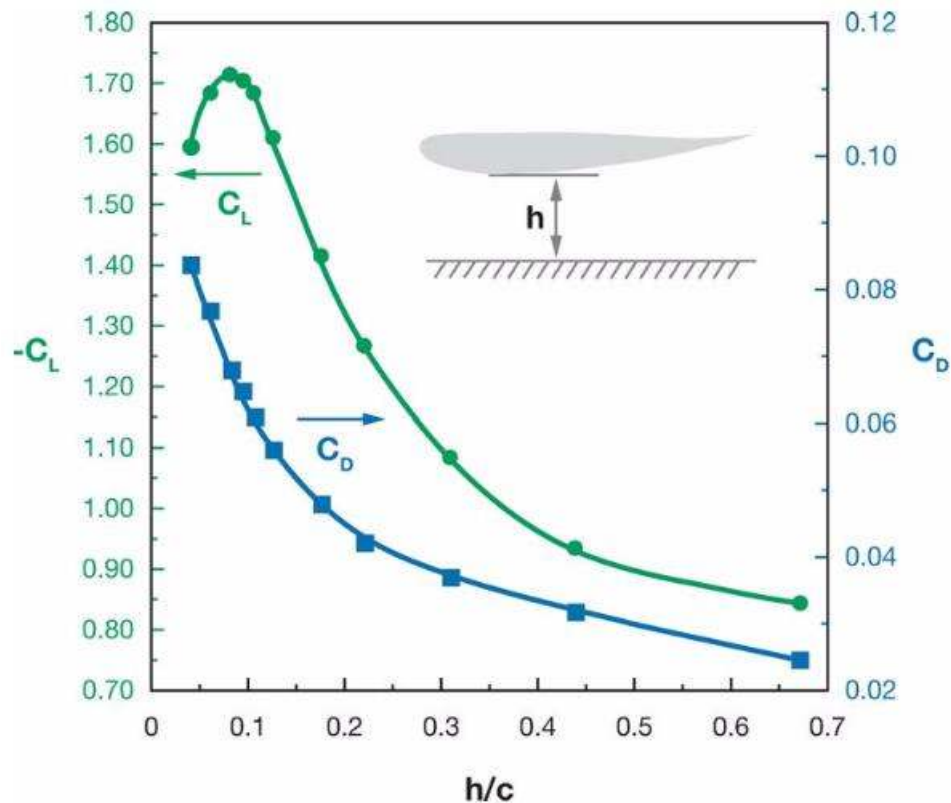


Figura 5.15: Gráfica que representa la variación del coeficiente de sustentación en función de la altura al suelo para un perfil dado [3]

Si se acerca progresivamente dicho perfil al pavimento, se observa que cuanto más próximo se encuentra éste del suelo, mayor diferencia de presión encontramos y por tanto mayor carga aerodinámica es capaz de generar (hasta cierto punto en el que se llega a un bloqueo del flujo de aire y esta desciende, cuando la distancia al suelo es muy pequeña). Esto es consecuencia de un aumento de la velocidad en la parte más baja, lo que genera una menor presión en la cara inferior del perfil que aumenta esa diferencia de presión(ver figura 5.15).

Lo ideal sería conseguir que el vehículo tuviese una forma de ala invertida, pero dado

5. Estado del arte

que no es posible por causas normativas y de estructura propia del automovil se utiliza un fondo plano cuya distancia al suelo es pequeña haciendo que el aire que circula bajo el coche presente una velocidad muy elevada.



Figura 5.16: Monoplaza de la UPV con el que se ha competido en 2016. Fuente: UPV Racing

Para mejorar la eficiencia del conjunto de suelo más difusor y aumentar la carga aerodinámica del ensamblaje de ambos componentes, se utiliza el “*rake*” o ángulo que forma el fondo plano con el suelo y que aproxima la forma general del vehículo a la forma de un ala invertida.

En la figura 5.16 puede verse el diseño aerodinámico para el fondo plano del equipo de la UPV, donde han eliminado los pontones laterales del automovil y han decidido colocar unos planos en cascada que les permiten obtener mayor carga aerodinámica usándolos como alerones pero al mismo tiempo haciendo las veces de difusores laterales.

La barra del “*Jacking point*” limita la envergadura del difusor trasero del vehículo, de tal forma que en su caso se ha optado por colocar dos difusores a los lados de la misma y centrarse en los laterales.

5.5. Marco normativo.

En este apartado se expone la parte de la normativa que afecta directamente a la aerodinámica del vehículo.

Como norma general no esta permitido ningún componente u elemento que se utilice para extraer aire de la parte inferior del vehículo exceptuando los ventiladores utilizados exclusivamente para refrigeración. Cualquier elemento que produzca efecto suelo de forma inducida no esta permitido.

5.5.1. Requisitos generales de diseño. Artículo 2

Congifuración general del vehículo (T2.1)

El vehículo debe ser un monoplaça de cockpit abierto y de ruedas descubiertas con 4 ruedas que no se encuentren en la misma línea recta.

Se considera vehículo de ruedas descubiertas a aquel que satisface los siguientes criterios:

- Los 180 grados superiores de las ruedas no pueden estar obstruidos cuando se observa el vehículo en vista superior.
- Las ruedas no pueden verse obstruidas en vista lateral.
- Ninguna parte del vehículo puede entrar en la zona de exclusión definida por dos líneas verticales que se encuentran a 75mm del diámetro externo de la rueda, y por la anchura del neumático de seco con la dirección recta. figura 5.17.
- Ha de cumplir los requisitos de dimensiones y requisitos del artículo 9 referido a componentes aerodinámicos.

Carrocería (T2.2)

No han de existir aperturas en la carrocería hacia el compartimento del piloto desde el frontal hasta el arco anti-vuelco a excepción de aperturas mínimas para los componentes de la suspensión

5.5.2. Elementos aerodinámicos. Artículo 9

Aerodinámica y efecto suelo. General. (T9.1)

Todos los elementos aerodinámicos del vehículo han de cumplir los requisitos expuestos a continuación.

5. Estado del arte

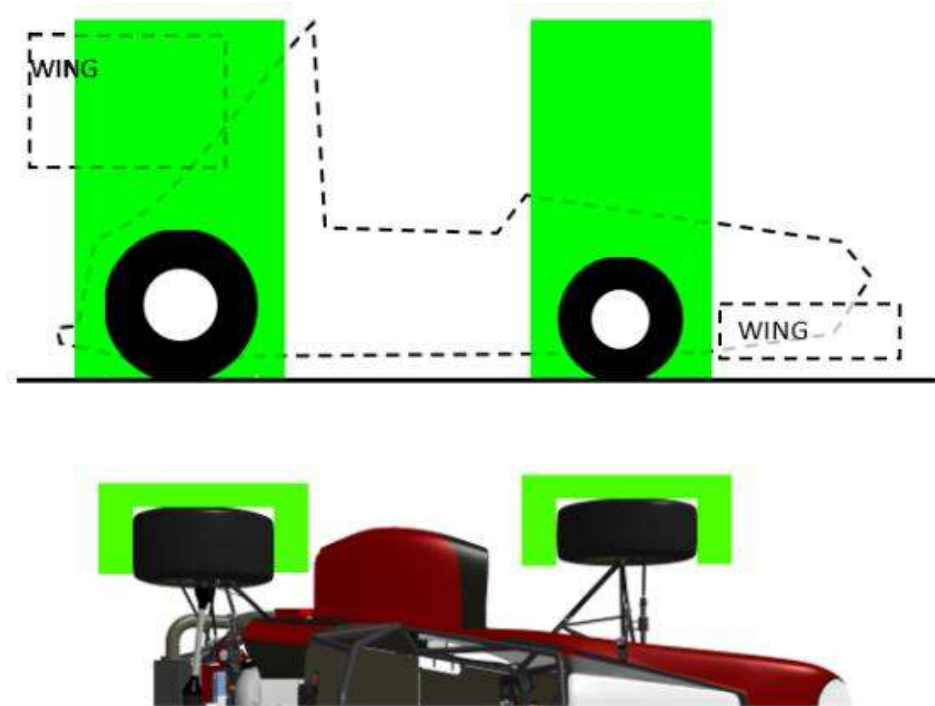


Figura 5.17: Zona de exclusión general para elementos instalados en el vehículo. Fuente: students.sae.org

Elementos montados en la zona frontal. (T9.2)

T9.2.1: En vista en planta, ningún elemento aerodinámico del vehículo puede sobresalir más de 700 mm de la parte más adelantada de los neumáticos frontales, así como sobresalir hacia afuera de la llantas (medido a la altura del centro de la rueda).

T9.2.2: La altura máxima de los elementos aerodinámicos colocados en la parte frontal del vehículo es de 250 mm, dejando por encima de esta cota un espacio no obstruido con la excepción de los 'endplates' o derivas laterales de menos de 25 mm de espesor.

Elementos montados en la zona trasera. (T9.3)

T9.3.1: En vista en planta, ningún elemento aerodinámico colocado en la parte trasera del automovil puede:

- Sobresalir más de 250 mm de la parte más atrasada de las ruedas posteriores.
 - Sobresalir parte más atrasada de la cara frontal del soporte de la cabeza del piloto.
 - En vista en planta, ningún elemento aerodinámico puede sobresalir del espacio comprendido entre la cara interna de las ruedas traseras.
-

5. Estado del arte

T9.3.2: Ningún elemento aerodinámico puede superar los 1200mm respecto del suelo medidos sin piloto.

Localización general. (T9.4)

T9.4.1: En general, entre las líneas centrales de los ejes delantero y trasero, un elemento aerodinámico puede extenderse hacia fuera hasta una línea que conecte las superficies exteriores de las ruedas delanteras y traseras a la altura de los centros de las ruedas.

T9.4.2: Cualquier elemento aerodinámico localizado entre los ejes delantero y trasero no debe exceder los 500 mm de altura medidos respecto al suelo y sin piloto. (Los carenados laterales planos situados a menos de 400 mm de separación del eje longitudinal del vehículo son excluidos de esta norma). Además ha de mantenerse intactas las zonas de exclusión T2.1

Este apartado se resume en la figura 5.18.

Radio mínimos para las aristas de elementos aerodinámicos (T9.5)

T9.5.1: Todas las aristas situadas mirando a la dirección de avance del coche que puedan contactar con un individuo (alerones, fondo plano, etc.) tiene que tener un radio de redondeo mínimo de 5mm para las aristas horizontales y 3mm para las aristas verticales.

Elementos de efecto suelo (T9.6)

No se permite ningún elemento que requiera de potencia para mover o remover aire de la parte inferior del vehículo excepto ventiladores diseñados exclusivamente para refrigeración.

Estabilidad y resistencia de los elementos aerodinámicos (T9.7)

T9.7.1: En cuanto a la resistencia y estabilidad de los elementos aerodinámicos, han de estar diseñados de tal modo que aporte una rigidez suficiente tanto en estático, como cuando el vehículo se encuentra en movimiento de tal modo que no oscile ni se mueva excesivamente.

Durante la inspección técnica, con el fin de asegurar que el elemento en cuestión no se desprenda, se pueden aplicar los siguientes tests:

- Si la deflexión en algún elemento es significativa, se podrá aplicar una fuerza de unos 200N que no ha de resultar en una deflexión elástica de no más de 25mm, y una deflexión permanente de 5mm.
 - Si durante alguna de las pruebas, algún elemento muestra un comportamiento extraño, grande e incontrolado, los comisarios mostrarán una bandera negra que hará que el vehículo tenga que acercarse a inspección técnica de modo que este queda excluido
-

5. Estado del arte

hasta que el problema sea solucionado.

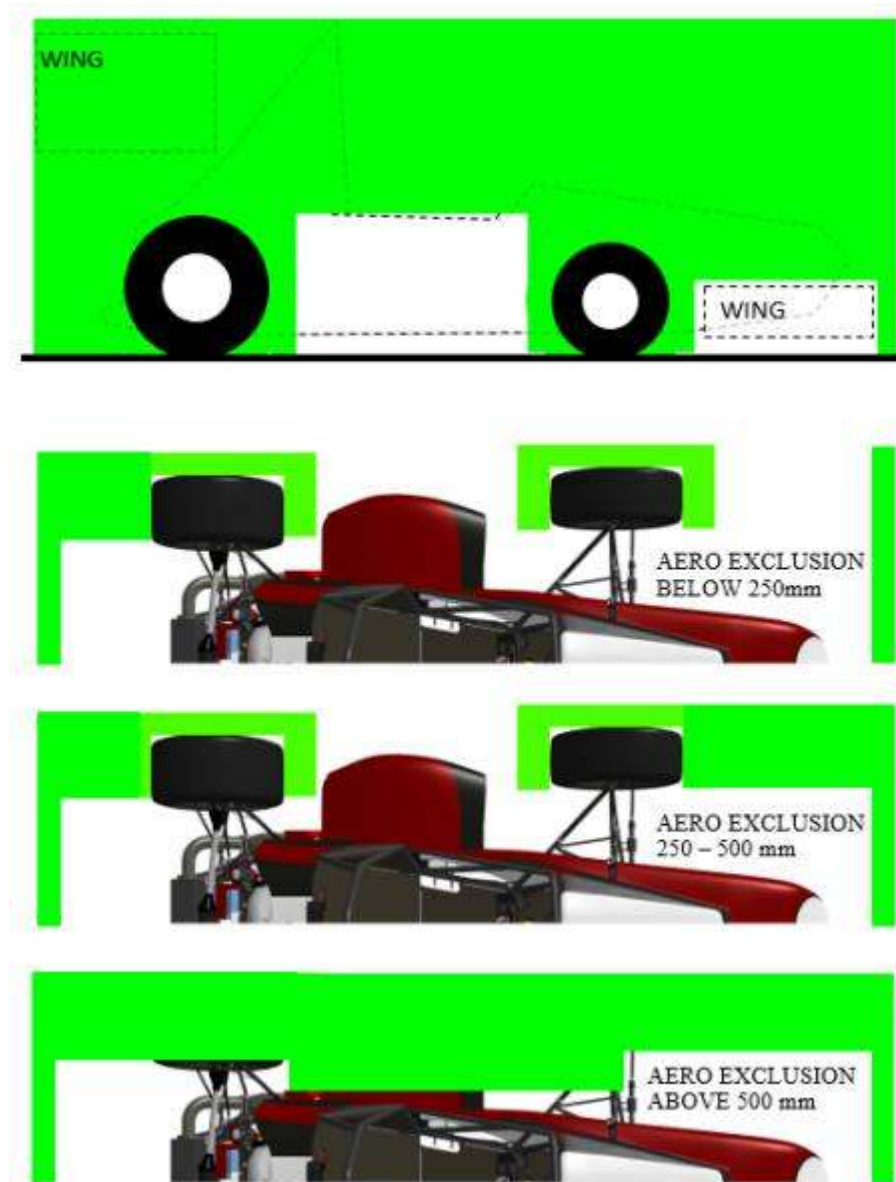


Figura 5.18: Zona de exclusión general para elementos instalados en el vehículo. Fuente: students.sae.org

CFD o “*Computational Fluid Dynamics*”

6.1. Introducción

La dinámica de fluidos computacional es una herramienta que permite el estudio del comportamiento de los fluidos a través de la solución de las ecuaciones de la fluidodinámica partiendo de una geometría que se discretiza en unos elementos en los que estas ecuaciones se resuelven de forma iterativa. Se considera que se ha obtenido la resolución del problema cuando los residuales (diferencia numérica entre el valor de la variables en la iteración previa y la actual) generados por el proceso iterativo alcanzan un valor de convergencia definido por el usuario.

- Permite realizar iteraciones en diseño con mucho menor coste que el que implica el ensayo físico en túnel de viento.
- Permite simular condiciones complicadas de recrear experimentalmente de forma más sencilla.
- Sin esta herramienta, el diseño superficies aerodinámicas es mediante ensayo y error.

6.2. ANSYS Fluent

6.2.1. Metodología

La dinámica de fluidos computacional se basa en una metodología muy clara, que requiere de un proceso secuencial que va desde el planteamiento del problema fluidomecánico sobre el papel hasta la obtención del resultado numérico y el análisis de los resultados obtenidos.

6. CFD o “*Computational Fluid Dynamics*”

Geometría del estudio

Definir la geometría es la primera parte del proceso de análisis fluidomecánico de un problema mediante CFD. Esta parte condiciona todas las fases posteriores dado que si la geometría es excesivamente detallista se consumen recursos computacionales excesivos, y si se realiza una geometría poco detallada, los resultados no se corresponderán con los resultados correspondientes al problema real.

Hay que tener una serie de consideraciones al realizar la geometría:

- El modelo ha de representar una cámara cerrada, de modo que limite totalmente al volumen o superficie interna que se va a estudiar.
- El objeto o geometría a estudiar ha de corresponderse con un cascarón cerrado de lo que se quiere estudiar. En el caso de un problema aerodinámico esta ha de corresponderse con todo aquello que “que toca aire”.
- Las paredes que limitan la cámara de estudio han de estar situadas de forma adecuada para evitar que estas influyan en el resultado cuando no deben de hacerlo.
- Cada superficie o línea a la que quiera otorgarse una condición de contorno ha de separarse y nombrarse previamente al proceso de mallado, puesto que una vez realizado el cálculo no se podrán sacar resultados de aquellas superficies que no estén separadas de los alrededores, por ejemplo, si una vez realizado el estudio aerodinámico de un automóvil se quiere saber la fuerza de resistencia al avance que recibe el retrovisor, si este no se ha separado previamente, no se podrá obtener dicho valor.

Mallado

Este proceso condiciona la validez de la solución final. Durante esta fase se realiza la discretización espacial del volumen o superficie de estudio. Por lo general cuanto mas elementos, más precisión se consigue, aunque para números excesivamente elevados puede llevar a errores numéricos muy elevados debido a la interacción entre las celdas de estudio. Los elementos de malla o celdas computacionales han de ser además lo más regulares posibles, puesto que cuanto mayor sea la diferencia entre las caras del elemento, más compleja es la interpolación de los valores al centro del elemento y por tanto mayor error en la solución final.

En este proceso es necesario establecer cual es el tamaño máximo y mínimo de los elementos que el programa realizará durante la fase de discretización. Además dado que cuanto mayor sea curvatura presenta un cuerpo, más necesario es estudiar esa zona de cambio, puesto que el flujo tenderá a cambiar de comportamiento en esas regiones, por lo tanto es necesario aumentar el número de elementos en esas regiones. Es por esto que el algoritmo de Fluent parte de esta curvatura para colocar un mayor densidad de elementos cuanto mayor es la curvatura de la superficie cercana.

6. CFD o “*Computational Fluid Dynamics*”

En la figura 6.1 se observa, como la densidad de elementos aumenta considerablemente en las zonas donde existe una mayor curvatura en las diferentes superficies que componen la geometría del automóvil.

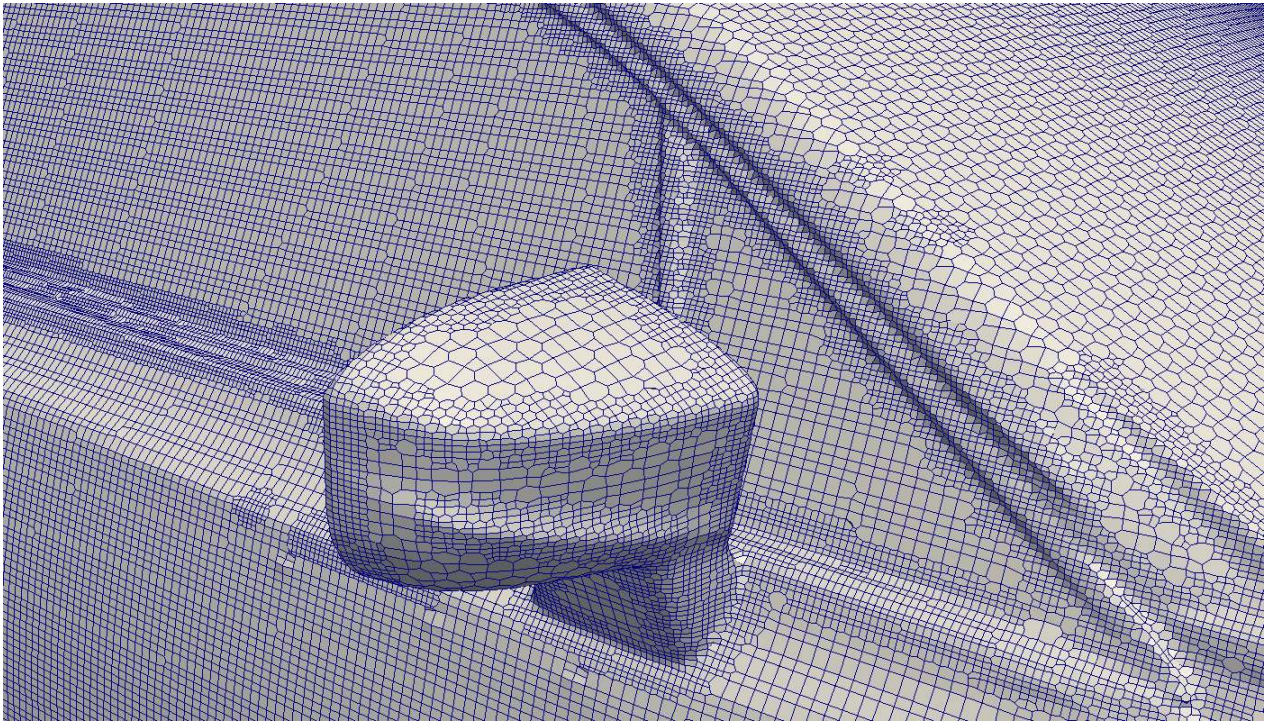


Figura 6.1: Detalle del mallado en curvatura sobre la superficie de un automovil. Fuente: Hanchagroup

Las repercusiones de una mala malla computacional en el resultado final de un estudio son muy significativas, como se observa en la figura 6.2. Una mala elección de la geometría de los elementos, así como una desproporción muy grande en el tamaño de elementos contiguos, genera distorsiones en el resultado del problema de estudio.

“*Set-up*”

El planteamiento correcto del modelo de resolución del problema fluidomecánico es una parte muy importante en la obtención de resultados consistentes. Modificando las ecuaciones de resolución que queremos aplicar se consigue tanto mejorar la convergencia como aumentar la precisión del resultado final.

En general hay dos métodos fundamentales de los que se puede partir en ANSYS Fluent para realizar estudios fluidodinámicos:

6. CFD o “*Computational Fluid Dynamics*”

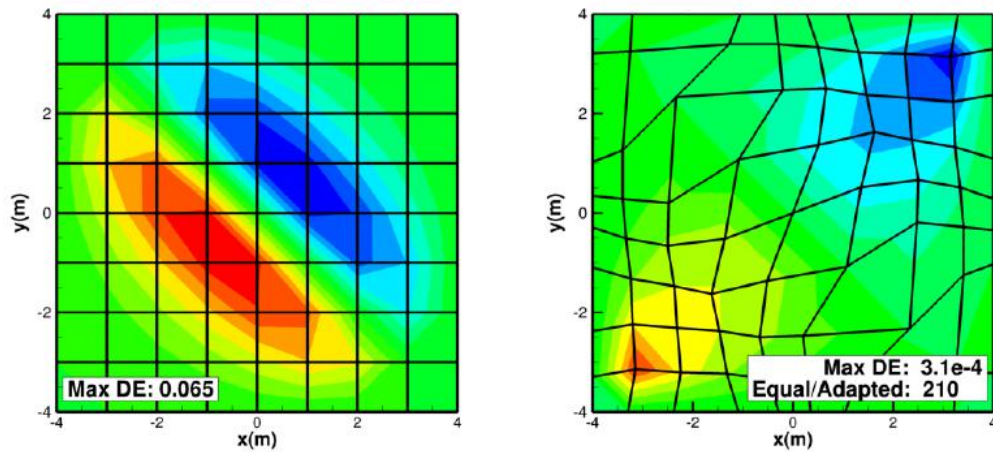


Figura 6.2: Representación del efecto que puede tener el mallado sobre el resultado final si no se realiza correctamente. Fuente: Pointwise

- Método basado en presión: Los momentos y la presión son las variables primarias fundamentales y sus ecuaciones se pueden resolver:
 - De forma segregada: La presión y los momentos se resuelven de forma secuencial.
 - De forma acoplada: La presión y los momentos se resuelven simultáneamente.
- Método basado en densidad: En este caso la presión se obtiene a través de la ecuación de estado.

Dada la capacidad computacional de los estudios aerodinámicos que son objeto del presente trabajo de fin de grado, el método escogido es el basado en presión por su menor consumo de memoria y su aplicabilidad a un número razonable de casos.

Es necesario además, establecer si en el problema se considera que el fluido es o no compresible. En la realidad el aire es siempre compresible, pero a velocidades de un orden de magnitud no muy elevado los efectos de la compresibilidad del aire son despreciables a efectos de cálculos, teniendo una influencia mínima. El umbral entre compresibilidad y no compresibilidad se cuantifica en función del número de Mach.

Es necesario además establecer si el problema es estacionario o al contrario es transitorio y la solución varía con el tiempo. En esta fase han de establecerse los modelos físicos, donde asignamos al modelo si es o no turbulento, si hay transferencia de calor o no, etc...

En todos los problemas fluidodinámicos de estudio el flujo es considerado turbulento y por tanto se ha de establecer un modelo de turbulencia para resolver el problema fluidodinámico:

6. CFD o “*Computational Fluid Dynamics*”

- Spallart-Allmaras: Modelo de turbulencia de 1 ecuación que resuelve la ecuación de transporte para una variable Spallart-Allmaras referida a la viscosidad. Es un modelo de bajo coste que resuelve las ecuaciones RANS (“Reynolds Averaged Navier Stokes”) para la viscosidad de Eddy modificada. Éste modelo se utiliza especialmente en simulaciones de perfiles aerodinámicos y aplicaciones aeronáuticas.
- k- ϵ : modelo semi empírico basado en las ecuaciones de transporte de la energía cinética turbulenta (k) y la disipación de la misma (ϵ). Este modelo de dos ecuaciones se ha utilizado en el estudio del coche completo dado su buen funcionamiento en casos de geometrías complejas tridimensionales, particularmente en automovilismo.

Postprocesado

Una vez se ha finalizado el estudio fluidodinámico se procede al análisis de los resultados. Durante esta fase se requiere al programa de los resultados numéricos obtenidos ya sea mediante cómputo de fuerzas, momentos, diagramas de presiones, líneas de corriente (lugar geométrico de los puntos tales que el vector velocidad es perpendicular a la línea en cada punto), líneas de flujo, etc.

7.1. Validación de los resultados CFD con datos experimentales

La primera fase para realizar el estudio y diseño de los alerones de nuestro vehículo, es la elección de la geometría del perfil de los planos que compondrán los mismos.

Para ello se ha escogido un perfil aeronáutico invertido, que crea alta sustentación a bajas velocidades (carga aerodinámica para nuestras condiciones de estudio), el NACA 2415 [4], que presenta un alto grosor (15 % de la cuerda del perfil de estudio) lo que permite que el desprendimiento de la capa límite sea más suave respecto a los perfiles con un grosor menor, aunque como consecuencia obtengamos un menor ángulo de ataque máximo, y por tanto menor carga aerodinámica máxima.

Para el perfil escogido en el presente estudio, las características vienen expresadas por su nomenclatura:

- Primer dígito, **2**: Indica el “*camber*” máximo o asimetría del perfil, que cuantifica la diferencia máxima en porcentaje entre la distancia a la cara superior y a la inferior del mismo.
- Segundo dígito, **4**: Éste multiplicado por 10 indica el porcentaje de la cuerda desde el borde de ataque al que se encuentra el “*camber*” máximo previamente descrito.
- Tercer y cuarto dígito, **15**: Estos indican el porcentaje de espesor máximo en función de la cuerda. Por lo general mayores espesores implican desprendimiento de la capa límite con mayor suavidad.

Partiendo de dicho perfil, se procede a la realización de un estudio de la carga aerodinámica y de la resistencia al avance generada por el perfil considerado y en función del ángulo de incidencia del mismo.

7. Cálculos

Para verificar que “*set-up*” es necesario utilizar, para que los datos obtenidos de las simulaciones se correspondan con los datos experimentales tomados en el túnel de viento, se ha diseñado un experimento CFD de un perfil centrado en un dominio de dimensiones lo suficientemente grandes como para que la disposición de los límites del volumen de control no influya en el cómputo fluidodinámico alrededor del perfil (Figura 7.1), pero lo suficientemente pequeño como para que no se dispare el coste computacional (cuanto más grande sea la malla, más tiempo se empleará en su cálculo).

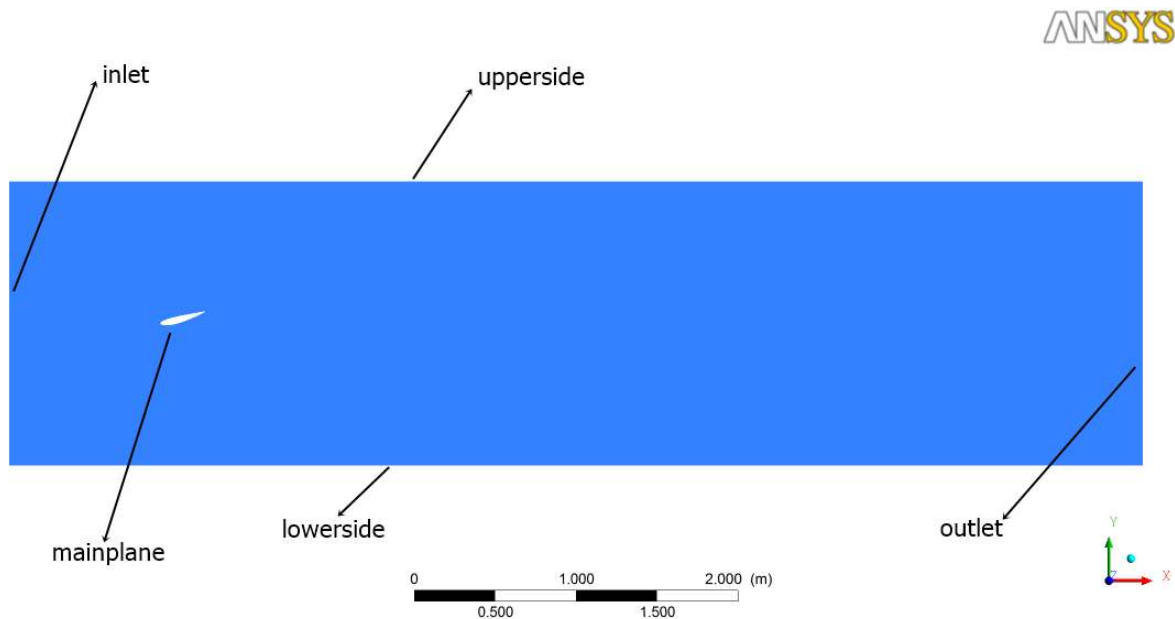


Figura 7.1: Dominio del estudio para comparar los resultados experimentales con los obtenidos mediante simulación CFD. Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones de contorno escogidas para el dominio de análisis son las siguientes:

- **“inlet”**: Entrada de aire tipo “*velocity inlet*” con 22,222 m/s con velocidad normal a la superficie.
 - **“upperside”**: Zona superior de la superficie, correspondiente con la zona límite de la región del aire. Entrada de aire tipo “*velocity inlet*” con 22,222 m/s con velocidad en dirección $x=1$ e $y=0$.
 - **“outlet”**: Zona de salida del aire. Tipo “*Pressure Outlet*”.
 - **“lowerside”**: Zona inferior de la superficie, correspondiente con la zona límite de la región del aire. Entrada de aire tipo “*velocity inlet*” con 22,222 m/s con velocidad en dirección $x=1$ e $y=0$.
-

7. Cálculos

- “*mainplane*”: Tipo “*Wall*” y correspondiente con el perfil del ala.

Para definir el “*set-up*” de la simulación, es decir, como se resolverán las ecuaciones RANS para este problema concreto, es necesario conocer que parámetros definen adimensionalmente el problema fluidomecánico.

Con el fin de establecer dichos parámetros se realiza un estudio adimensional del problema aplicando el teorema de pi para obtener las variables o parámetros adimensionales de los que depende el problema, considerando como variables características las expresadas en la Figura 7.2.

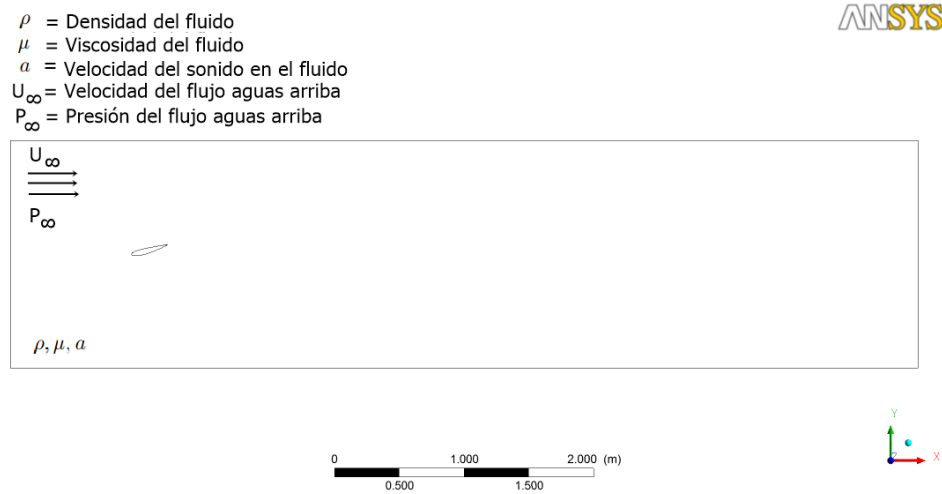


Figura 7.2: Dominio del estudio para comparar los resultados experimentales con los obtenidos mediante simulación CFD. Fuente: Elaboración propia

Una vez definidas las variables características del flujo del problema de estudio (figura 7.2) se puede proceder a expresar la fuerza resultante sobre el perfil considerado en función de los parámetros característicos del problema. Además para adimensionalizar utilizamos aquellos tres parámetros que nos permiten obtener las mismas unidades que la fuerza (permitiéndonos dejar a esta sin unidades), que son la velocidad y la presión aguas arriba del flujo; y la densidad del fluido de estudio.

$$F = f(U_\infty, P_\infty, \rho, \mu, a, L) \quad (7.1)$$

$$\pi_0 = \frac{F}{\rho \cdot U_\infty^2 \cdot L^2} \quad (7.2)$$

7. Cálculos

Cuadro 7.1: Matriz de dimensiones ampliada

	F	L	U	ρ	μ	P	a
M	1	0	0	1	1	1	1
L	1	1	1	-3	-1	-1	0
T	-2	0	-1	0	-1	-2	-1

$$\pi_1 = \frac{\mu}{\rho \cdot U_\infty \cdot L} = Re \quad (7.3)$$

$$\pi_2 = \frac{P_\infty}{\rho \cdot U_\infty^2} = E \quad (7.4)$$

$$\pi_3 = \frac{U_\infty}{a} = M \quad (7.5)$$

Donde:

- M= Número de Mach.
- E= Número de Euler.
- Re= Número de Reynolds.
- $\pi_0, \pi_1, \pi_2, \pi_3$ = Grupos adimensionales resultantes de aplicar el teorema de π -Buckingham.

Una vez obtenidos los grupos adimensionales previamente expresados se puede reescribir la fuerza sobre el perfil como dependiente de los números de Euler, Mach y Reynolds. Aunque el número de Euler y el número de Mach aparecen explícitamente en la adimensionalización realizada, no intervienen físicamente en este problema dado que la velocidad del fluido (22,222 m/s) es muy inferior a la velocidad de propagación del sonido en el aire. Eso nos da un Mach para el problema inferior a 0.3 (valor umbral para considerar un flujo como subsónico y no como incompresible) de modo que el fluido mantendrá su densidad constante por ser incompresible, y podremos concluir que el problema solo depende del número de Reynolds:

$$F = f(Re) \quad (7.6)$$

Para este estudio particular el Reynolds se corresponde con:

$$Re = \frac{\rho \cdot U_\infty \cdot L}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 22,222 \cdot 0,284}{1,7894 \cdot 10^{-5}} \approx 4,6 \cdot 10^5 \quad (7.7)$$

Donde:

- ρ = Densidad, de valor 1,225 kg/m³
 - U= Velocidad del fluido aguas arriba, de valor 22.222 m/s.
-

7. Cálculos

- L = Longitud característica, correspondiente con la cuerda del perfil estudiado, de 0.284m.
- μ = Viscosidad del fluido, de valor $1,7894 \cdot 10^{-5}$.

Dado que se considera flujo turbulento alrededor de un cuerpo a aquel cuyo número adimensional de Reynolds supera el valor numérico de 20000, tendremos que emplear en el modelo de resolución, un modelo de turbulencia.

7.2. Alerón delantero

Para comprobar que modelo aporta una correspondencia mayor entre los resultados de nuestra simulación CFD y los resultados experimentales obtenidos en el túnel de viento, realizamos el problema fluidodinámico planteado en la Figura 7.1 con los modelos de turbulencia Spallart-Almaras (Recomendado en la bibliografía como el más apropiado para simulaciones bidimensionales) y el modelo K-epsilon (con todas sus variantes incluidas). Los resultados obtenidos se muestran en la figura 7.3

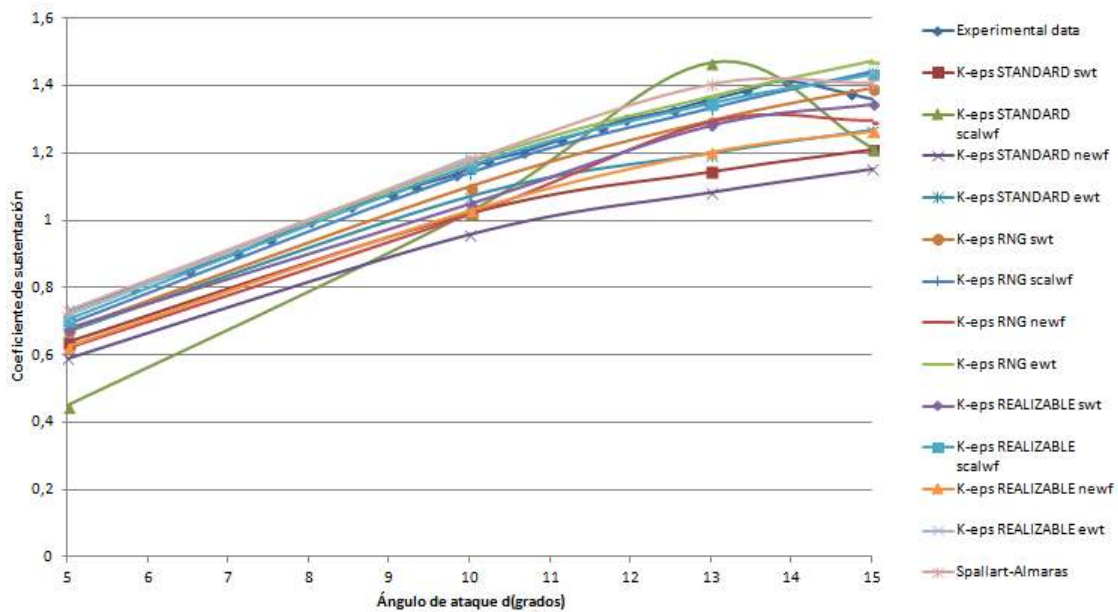


Figura 7.3: Coeficiente de sustentación del NACA 2415 para diferentes modelos de turbulencia. Fuente: Elaboración propia

Se observa que el modelo cuya curva de sustentación se aproxima más a la curva real es el correspondiente al modelo de turbulencia de una ecuación Spallart-Almaras (Figuras 7.3

7. Cálculos

y 7.4).

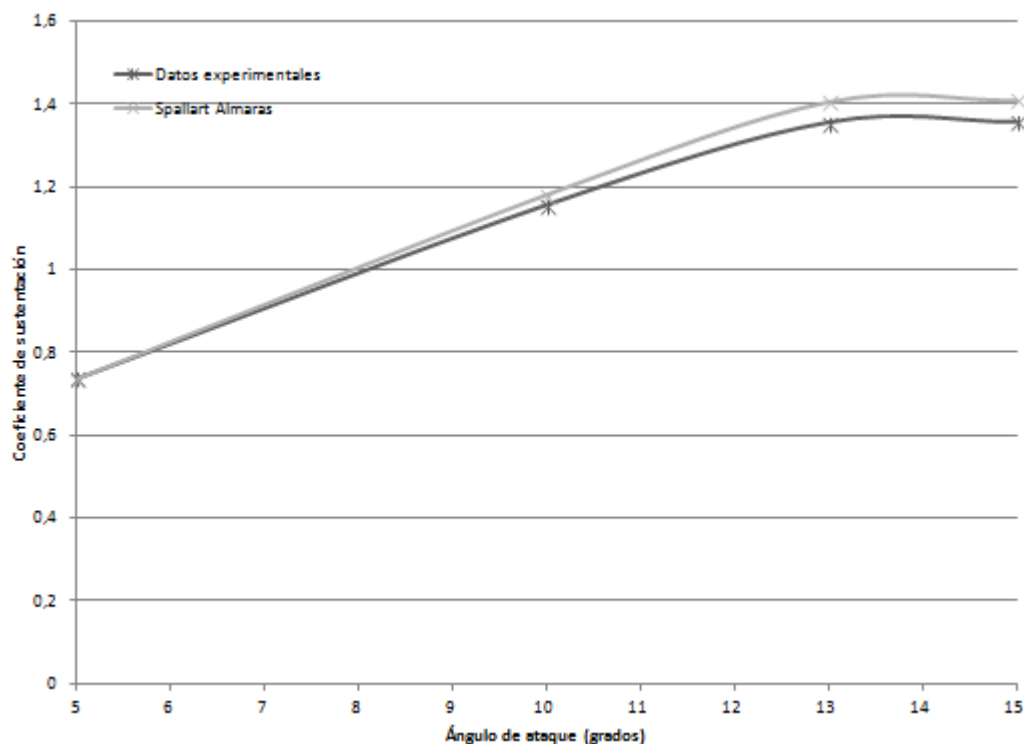


Figura 7.4: Coeficiente de sustentación del NACA 2415 comparando resultados experimentales y obtenidos usando CFD mediante el modelo de turbulencia Spallart Almaras. Fuente: Elaboración propia

En el presente estudio, para el perfil NACA 2415 los resultados experimentales concuerdan con un margen de error de un máximo de un 4% (ver cuadro 7.2) para el modelo de turbulencia Spallart Almaras.

Cuadro 7.2: Diferencias entre el coeficiente de sustentación experimental y el coeficiente obtenido mediante CFD.

	S-A	Exp	Difference
5	0,734	0,738	0,586
10	1,179	1,15695	1,906
13	1,404	1,356	3,54
15	1,407	1,357	3,707

Una vez se ha validado el modelo de resolución escogido para nuestro estudio previo, se procede al análisis CFD del perfil del alerón en su altura de montaje real respecto al suelo,

7. Cálculos

correspondiente a 90,76 mm desde el borde de ataque del perfil primario al asfalto.

Para ello es necesario modificar la geometría de estudio en la que la línea “ground” se encuentre a la distancia apropiada de 90,76mm del perfil, y la línea wall 1 se corresponda con una zona lo suficientemente alejada como para poder imponer la condición de “*velocity inlet*” de 22,222 m/s en la dirección longitudinal del dominio ($x=1$, $y=0$) (Figura 7.5) sin falsear los resultados.

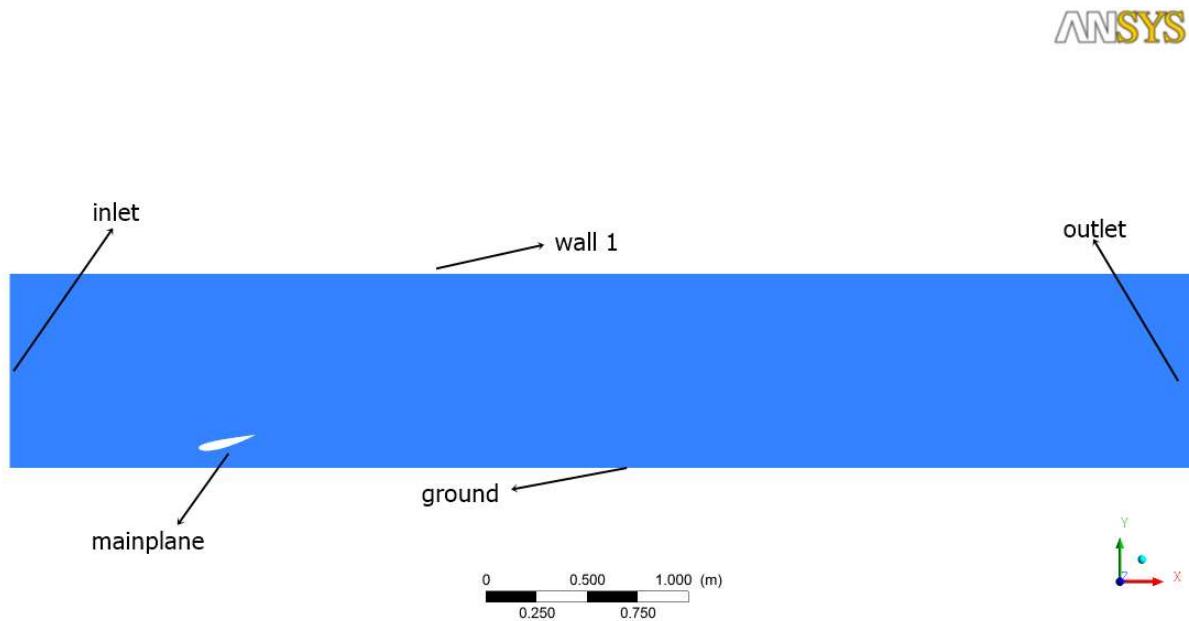


Figura 7.5: Dominio del estudio para evaluar el comportamiento del perfil a su altura de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

En este caso es además necesario cambiar las condiciones de contorno del dominio de estudio para adaptarse a las nuevas características del problema fluidomecánico:

- **“Inlet”**: Entrada de aire tipo “*Velocity inlet*” con 22,222 m/s con velocidad normal a la superficie.
 - **“Wall 1”**: Zona superior de la superficie de estudio, correspondiente con la zona límite de la región del aire. Tipo “*Velocity Inlet*” de 22,222 m/s en dirección $x=1$ e $y=0$.
 - **“Outlet”**: Zona de salida del aire. Tipo “*Pressure Outlet*”.
 - **“Ground”**: Suelo rodante. Tipo “*Wall*” con velocidad tangencial de 22,222 m/s.
 - **“Wing”**: Tipo “*Wall*” y correspondiente con el perfil del ala.
-

7. Cálculos

Conociendo ya los valores previos del Reynods y el Mach, dado que el estudio solo cambia en posicionamiento de las “boundaries” y no en la velocidad o la cuerda del perfil, se puede de nuevo aplicar el modelo Spallar Almaras y representar el valor del nuevo coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque, teniendo en cuenta la acción del efecto suelo (Figura 7.6).

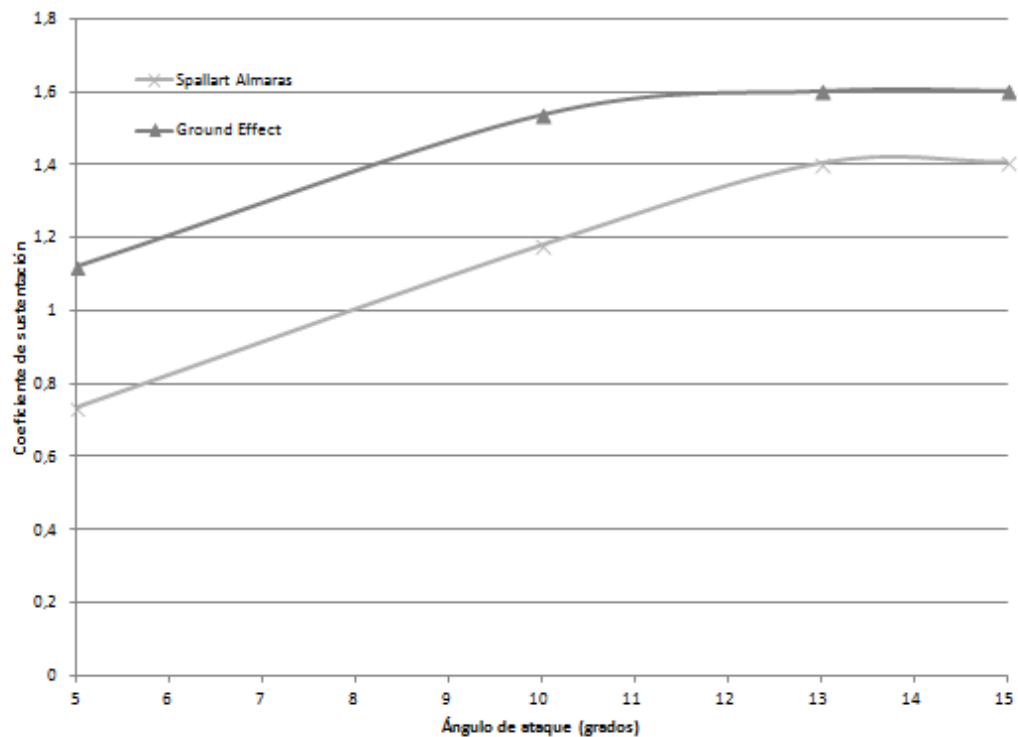


Figura 7.6: Valores del coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque del perfil bajo efecto suelo. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en el cuadro 7.3, existe un claro incremento del coeficiente de sustentación en estas condiciones, aunque dado la complejidad del comportamiento del fluido bajo la zona del perfil, el modelo de turbulencia empieza a dar problemas de convergencia en las zonas donde ya se generan los fenómenos de desprendimiento de la capa límite.

Como se observa en la figura 7.6, a partir de los 12 grados, la zona de desprendimiento de capa límite y el máximo de sustentación, quedan limitados por los complejos efectos fluido-mecánicos que requerirían de un mayor coste computacional para su resolución concreta. En este caso particular, la elección del ángulo de ataque del perfil primario se ha establecido en 12 grados, para trabajar del lado de la seguridad, puesto que es a partir de este valor donde

7. Cálculos

Cuadro 7.3: Valores de coeficiente de sustentación con y sin efecto suelo y diferencia en porcentaje entre ambos valores, en función del ángulo de ataque.

Angle of attack	cl (ground eff)	cl (no ground eff)	%
5	1,12	0,73	34,46
10	1,54	1,18	23,37
13	1,60	1,40	12,47
15	1,60	1,41	12,30

la convergencia de la simulación CFD mediante este modelo de turbulencia deja de alcanzar los valores estipulados de $10\text{exp}-6$.

Una vez escogido este ángulo de ataque para el perfil primario del alerón frontal se procede al análisis de la cascada formada por los dos NACA 2415 de cuerdas de valores 286 mm para el perfil primario, y de 148 mm para el perfil secundario. Esta reducción de la cuerda para el perfil secundario es necesaria dadas las limitaciones de espacio bajo la premisa de no obstrucción en vista frontal del neumático delantero. Esta obstrucción ha de ser no superior a 250mm desde el suelo.

Para estudiar el efecto del ángulo de ataque del segundo perfil en el caso de la posición real del alerón delantero en cuanto a altura respecto del suelo, se emplea el mismo dominio computacional que en el estudio previo aunque aumentando la altura y modificando la longitud (ver figura 7.7).

En este caso es además necesario cambiar las condiciones de contorno del dominio de estudio para adaptarse a las nuevas características del problema fluidomecánico:

- **“Inlet”**: Entrada de aire tipo *“Velocity inlet”* con 22,222 m/s con velocidad normal a la superficie.
- **“Wall 1”**: Zona superior de la superficie de estudio, correspondiente con la zona límite de la región del aire. Tipo *“Velocity Inlet”* de 22,222 m/s en dirección $x=1$ e $y=0$.
- **“Outlet”**: Zona de salida del aire. Tipo *“Pressure Outlet”*.
- **“Ground”**: Suelo rodante. Tipo *“Wall”* con velocidad tangencial de 22,222 m/s.
- **“Mainplane”**: Tipo *“Wall”* y correspondiente con el perfil del ala.
- **“Secplane”**: Tipo *“Wall”* y correspondiente con el perfil del ala.

Una vez establecida la geometría para el estudio considerado (ver figura 7.8), se procede a la ejecución de las simulaciones bajo las mismas condiciones que los estudios previos, de

7. Cálculos

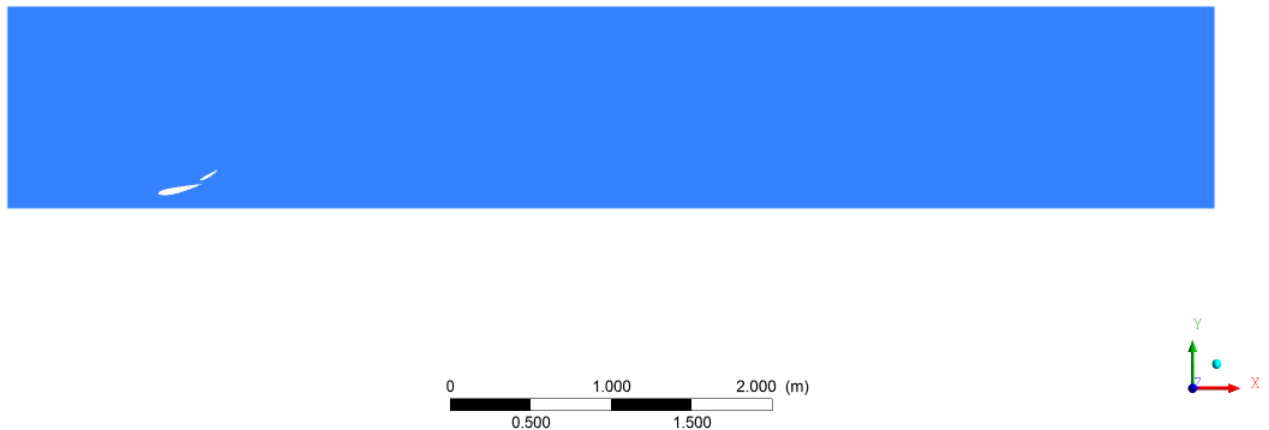


Figura 7.7: Dominio del estudio para evaluar el comportamiento de la cascada de ambos perfiles a su altura de trabajo en el Ala Delantera. Fuente: Elaboración propia

tal forma que se puedan validar los resultados obtenidos dada la correspondencia previa.

En la Figura 7.8 se observa como el máximo ángulo de ataque que el segundo plano de la zona de los extremos del ala frontal, que abarca la anchura del neumático de seco, se encuentra en torno a los 30 grados de inclinación, ángulo de ataque a partir del cual la carga generada comienza a ser menor para mayor resistencia aerodinámica.

Dadas las desconocidas tolerancias de fabricación y apoyando la decisión del ángulo de ataque en la propia reglamentación, que impide que ningún elemento aerodinámico montado en la zona frontal del monoplaza supere los 250 mm de altura respecto al suelo y medido sin piloto, el ángulo finalmente escogido es de 25 grados de inclinación de modo que la altura final del conjunto es de 230 mm (margen de seguridad de 20 mm debido a posibles cambios de altura).

7. Cálculos

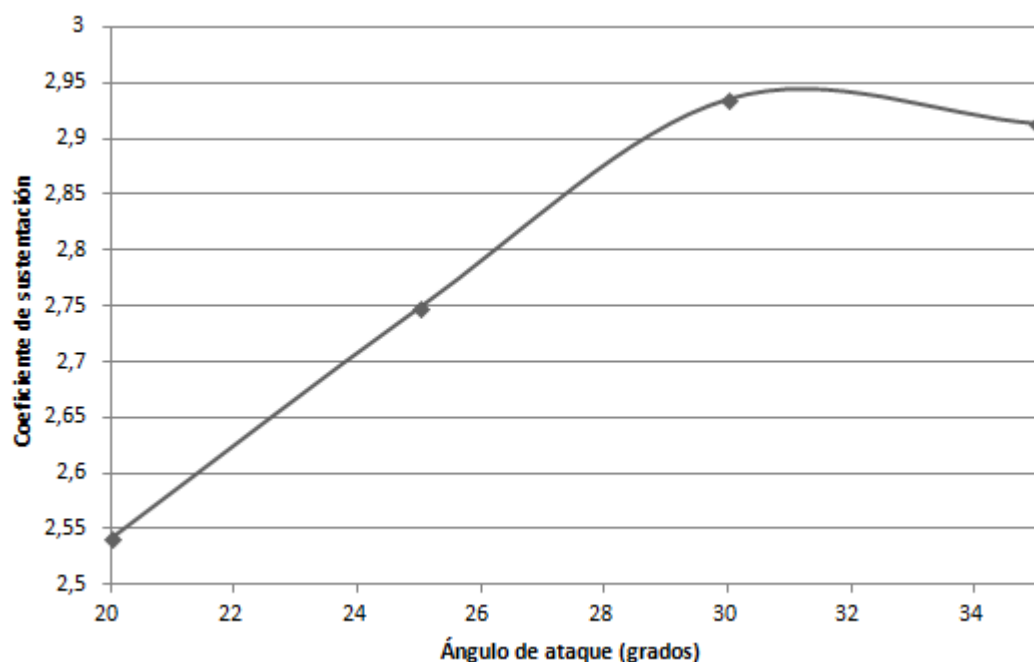


Figura 7.8: Resultados para el coeficiente de sustentación (En valor absoluto) para la zona biplana del alerón delantero.

Cuadro 7.4: Resultados del coeficiente de sustentación (en valor absoluto) y de resistencia para el extremo del alerón delantero a su altura real de trabajo.

Ángulo	C_L	C_d
35	2,91	0,39
30	2,94	0,32
25	2,75	0,26
20	2,54	0,21

Los resultados numéricos para las simulaciones realizadas se muestran a continuación en el Cuadro 7.4.

7.3. Alerón trasero

El alerón trasero del monoplaza de estudio se ha realizado con los dos mismos perfiles primario y secundario que el alerón delantero del vehículo con el fin de reducir costes de utillaje de cara a la fabricación.

El estudio del coeficiente de sustentación que produce el movimiento relativo entre el flujo

7. Cálculos

de aire y los perfiles (movimiento modelizado para este estudio con alerón fijo y aire móvil, similar al sistema de referencia que se utiliza en los experimentos en túnel de viento) para este caso requiere de un aumento de la altura del dominio computacional en que se realizará el proceso de mallado, con el fin de evitar posibles alteraciones generadas por efecto de la intervención de las condiciones de contorno en estos límites en los resultados numéricos, dada la gran deflexión del flujo consecuencia del ángulo de ataque. El dominio final empleado en el estudio del alerón trasero se representa a continuación en la Figura 7.9.

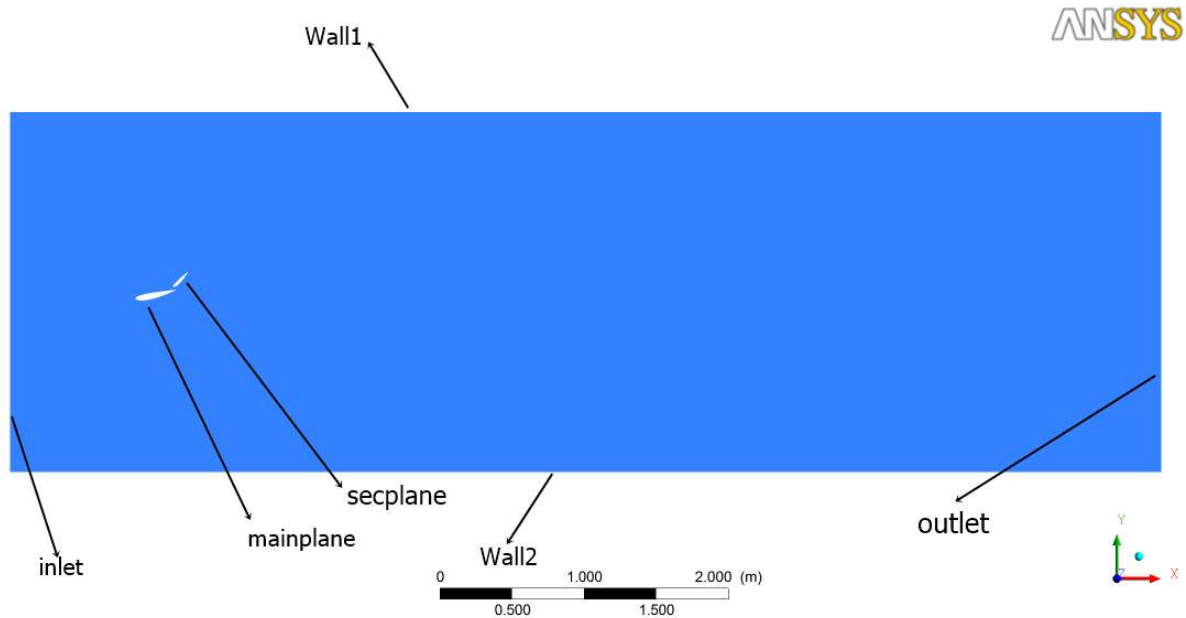


Figura 7.9: Dominio de estudio del alerón trasero del vehículo.

- **“Inlet”**: Entrada de aire tipo “*Velocity inlet*” con 22,222 m/s con velocidad normal a la superficie.
 - **“Wall 1”**: Zona superior de la superficie de estudio, correspondiente con la zona límite de la región del aire. Tipo “*Velocity Inlet*” de 22,222 m/s en dirección $x=1$ e $y=0$.
 - **“Wall 2”**: Zona superior de la superficie de estudio, correspondiente con la zona límite de la región del aire. Tipo “*Velocity Inlet*” de 22,222 m/s en dirección $x=1$ e $y=0$.
 - **“Outlet”**: Zona de salida del aire. Tipo “*Pressure Outlet*”.
 - **“Mainplane”**: Tipo “*Wall*” y correspondiente con el perfil primario del ala delantera.
 - **“Secplane”**: Tipo “*Wall*” y correspondiente con el perfil secundario del ala trasera.
-

7. Cálculos

Con estas condiciones de contorno y resolviendo el problema en las mismas condiciones de resolución que las empleadas en la verificación de los resultados experimentales se procede a la resolución del problema fluidomecánico de estudio, cuyos resultados se muestran en la Figura 7.10.

Es importante destacar como los valores obtenidos de sustentación para el alerón trasero son muy inferiores a los del alerón delantero, dado que en este último, el efecto suelo nos permite generar mayores cargas en igualdad de condiciones (casi un 30 % más) aunque con una penalización en resistencia aerodinámica (que aumenta un 150 %, aunque aun así los valores son muy reducidos ya que pasamos del orden de 0.1 al orden de 0.26).

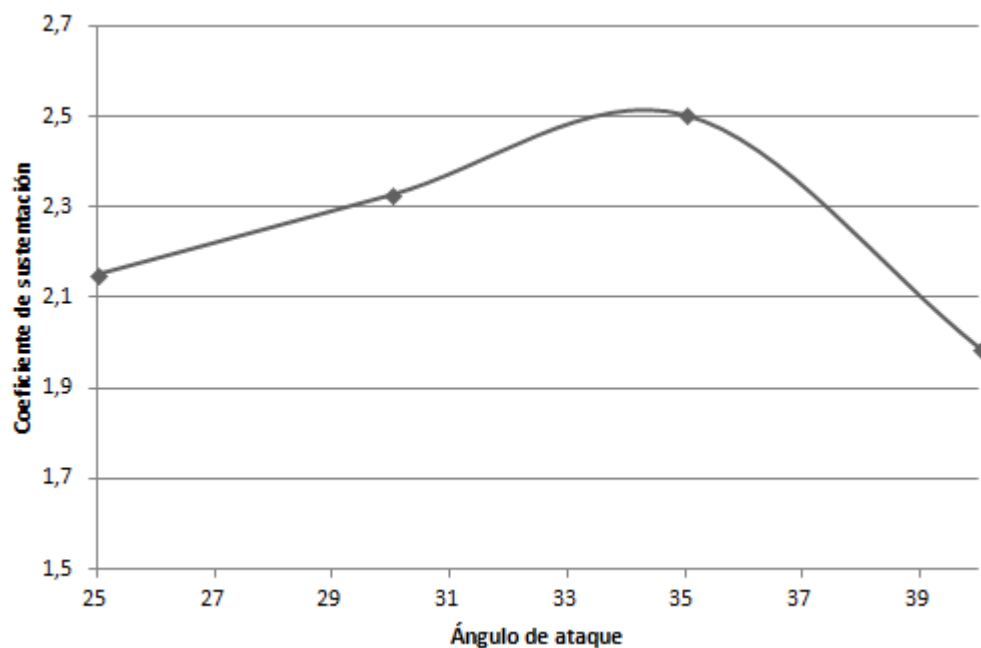


Figura 7.10: Resultados del coeficiente de sustentación (en valor absoluto) para el alerón trasero.

7.4. Balance Delantero-Trasero

Para identificar cual es el reparto de cargas sobre los neumáticos del vehículo, planteamos un modelo de viga para obtener cuales son las reacciones correspondientes a la masa del

7. Cálculos

vehículo sobre el asfalto en el área de contacto del neumático (ver figura 7.11).

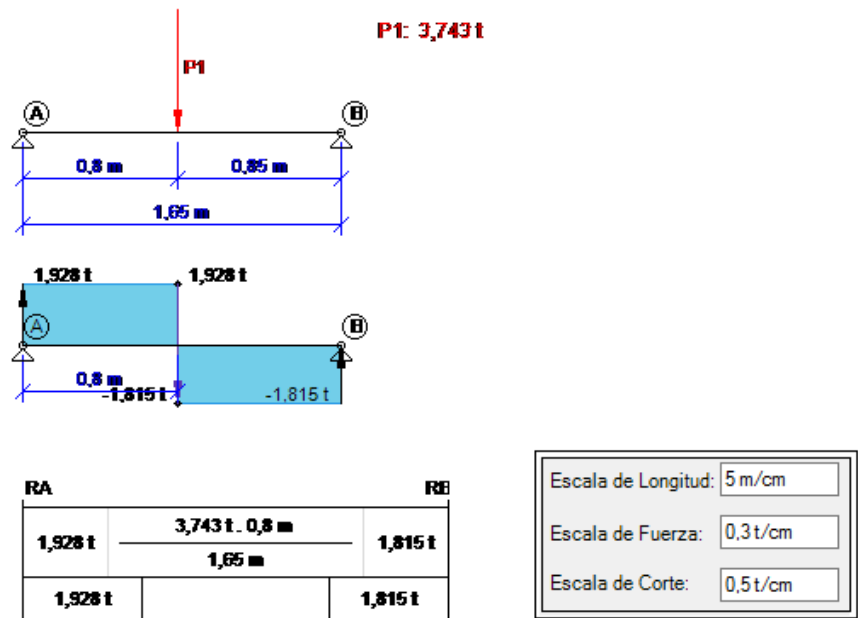


Figura 7.11: Modelo de viga biapoyada para el cálculo de las cargas sobre cada eje en el coche sin alerones instalados. Fuente: Elaboración propia

Cuando el vehículo no tiene los alerones instalados, se observa como la carga vertical por rueda se estima en 964 N por neumático para el eje delantero y 908 N para el eje trasero. Esto proporciona una relación de carga delantera y carga trasera de 51,5 % en el eje frontal y 48,5 % detrás.

Para obtener la carga por eje en el vehículo con los alerones instalados y circulando a 22,222 metros por segundo se modeliza la carga aerodinámica creada por los alerones, situándola en los centros de gravedad de ambos componentes. Esto es así ya que se considera que no merece la pena el gasto computacional que conlleva realizar el cálculo del centro de presiones del conjunto de los perfiles.

El alerón trasero en la configuración escogida, consistente en 12 grados de ángulo de ataque del plano principal y 25 grados de inclinación del plano secundario presenta un C_L de valor 2,15.

Aplicando la expresión (3.7) adaptada para coeficientes de sustentación en simulaciones bidimensionales sustituyendo el área de referencia A por la cuerda del perfil, sacamos la fuerza vertical generada por el alerón.

7. Cálculos

$$C = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot L \cdot C_L = \frac{1}{2} \cdot 225 \cdot 22,222^2 \cdot 0,428 \cdot 2,15 = 278,18 N/m \quad (7.8)$$

Dado que la carga obtenida es por unidad de longitud, y el ala tiene una envergadura de 1,1 m se obtiene la carga aerodinámica total del ala trasera:

$$278,18 N/m \cdot 1,1 m = 306 N \quad (7.9)$$

Para el alerón delantero, aplicando el mismo procedimiento aplicado para computar la carga del ala trasera para un C_L de 1,60 en la zona con 1 único plano y de 2,75 para la zona biplana.

$$C = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot L \cdot C_L = \frac{1}{2} \cdot 225 \cdot 22,222^2 \cdot 0,284 \cdot 1,60 = 137,44 N/m \quad (7.10)$$

$$0,271 m \cdot 2 \cdot 137,44 N/m = 74,79 N \quad (7.11)$$

$$C = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot L \cdot C_L = \frac{1}{2} \cdot 225 \cdot 22,222^2 \cdot 0,428 \cdot 2,75 = 356 N/m \quad (7.12)$$

$$0,209 m \cdot 2 \cdot 356 N/m = 148,8 N \quad (7.13)$$

Para el alerón delantero diseñado, tenemos a cada lado del mismo dos zonas que generan carga aerodinámica. La zona con la cascada de perfiles de ángulos de ataque iguales a los correspondientes en el ala trasera se restringe a la anchura de la rueda debido a las posibles alteraciones del flujo de aire que se dedica a la refrigeración de los frenos.

Sumando ambas cantidades para las dos zonas de monoperfil (74,79 N) y las dos zonas de cascada (148,8 N) obtenemos un total de 223,6 N de carga aerodinámica generada por el ala delantera.

Aplicando de nuevo la simplificación del vehículo como viga colocando adicionalmente las cargas generadas por los alerones en la posición de los centros de masas de los componentes se obtienen las reacciones mostradas en la figura 7.12.

En el vehículo con alerones instalados, la carga por rueda se estima en 1164 N por neumático para el eje delantero y 1052 N para el eje trasero. Esto proporciona una relación de carga delantera y carga trasera de 52,53 % en el eje frontal y 47,47 % en el trasero.

Cada neumático presenta unas curvas características que muestran en función de la carga vertical del neumático (F_Z), cual es el valor de la fuerza lateral (F_Y) que admite el neumático

7. Cálculos

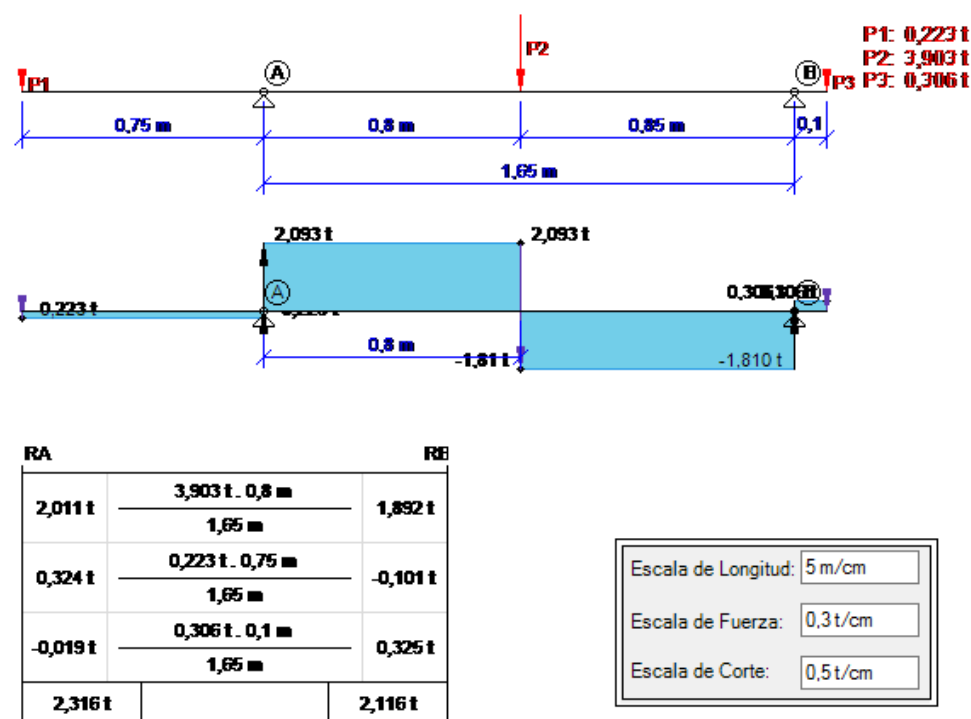


Figura 7.12: Modelo de viga para el cálculo de las cargas sobre cada eje para el coche con alerones instalados.

en curva para un cierto ángulo de deriva (α) generado al realizar el proceso de girado de las ruedas delanteras del vehículo. Estas curvas en el caso del presente proyecto de fin de carrera son proporcionadas por el patrocinador Michelin.

Las gráficas previamente descritas muestran que para una misma fuerza lateral desarrollada en curva, reducimos el ángulo de deriva del neumático cuando aumentamos la carga vertical sobre el mismo. Aplicar alerones al monoplace implica que la carga vertical aumenta sustancialmente sobre el neumático reduciendo el ángulo de deriva y por tanto reduciendo el desgaste de los mismos. Esto se resume en que si realizásemos exactamente la misma vuelta con la misma trayectoria y la misma velocidad, el neumático montado con alerones sufre un menor desgaste al reducirse el ángulo de deriva.

Comparando la figura 7.11 con la figura 7.12 se observa como la colocación de alerones, aunque no proporciona un reparto de cargas propicio (que sería con una mayor carga en los neumáticos del eje tractor) aumenta la carga vertical por rueda y por tanto aumenta la cantidad de fuerza lateral admitida por los mismos.

Observando las figuras 7.13 y 7.14 se aprecia que para el mismo ángulo de deriva del

7. Cálculos

neumático, con alerones se pueden generar 200 N más de fuerza lateral por neumático, lo que permite tomar la curva más rápido y con una aceleración lateral en torno a $2\frac{m}{s^2}$ para el vehículo rodando con una masa de unos 400 kg aplicando la segunda ley de Newton.

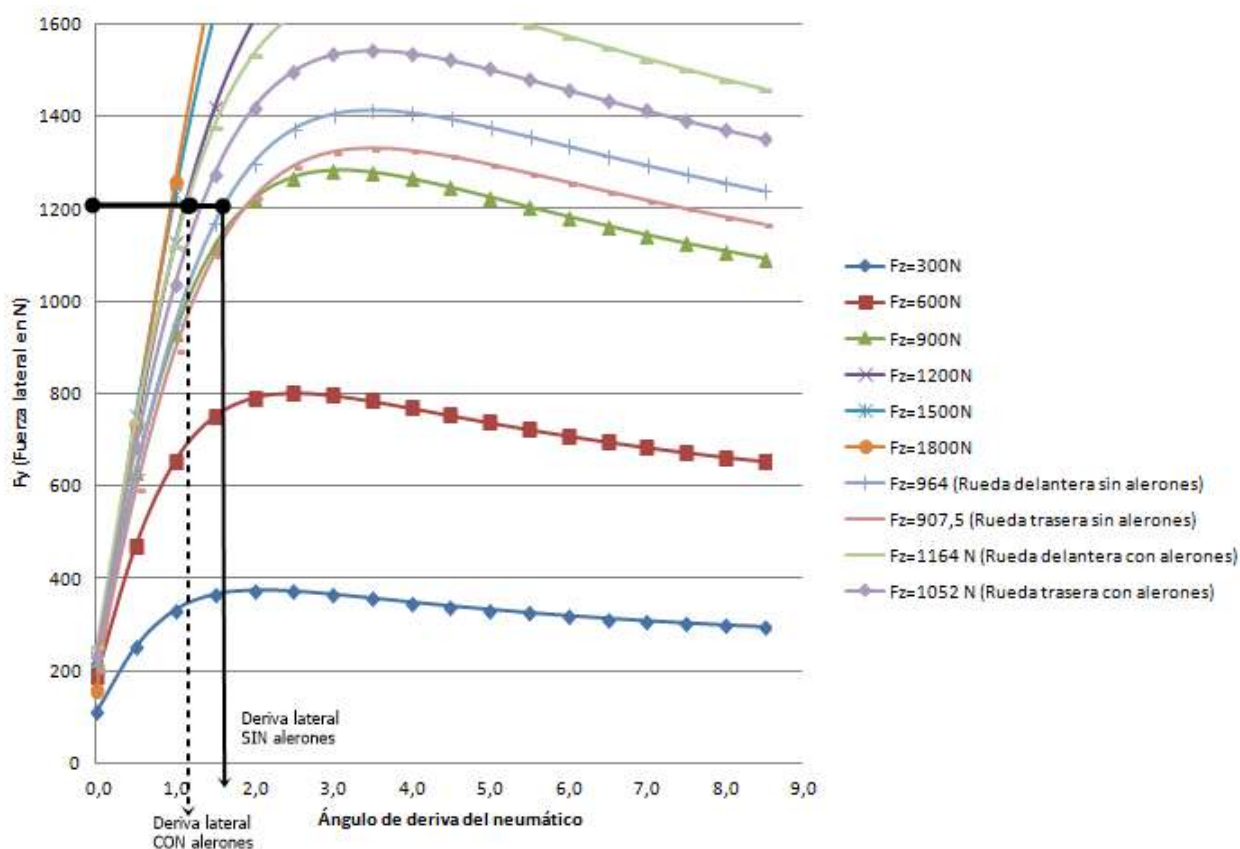


Figura 7.13: Cambio en la deriva por neumático en el eje delantero y para los casos con y sin alerones. Fuente: Elaboración propia

Este fenómeno referente a la reducción de la deriva del neumático es de vital importancia a la hora de reducir el desgaste de neumáticos a la hora de la realización de test en los que se invierte el tiempo en preparar el “*set-up*” del vehículo y quiere reducirse el gasto de ruedas.

Observando las figuras 7.15 y 7.16 se aprecia de igual forma que para el eje delantero que, para el mismo ángulo de deriva del neumático, con alerones se puede generar más fuerza lateral como consecuencia de la fuerza aerodinámica, lo que permite tomar la curva más rápido y aumentar la aceleración lateral.

7. Cálculos

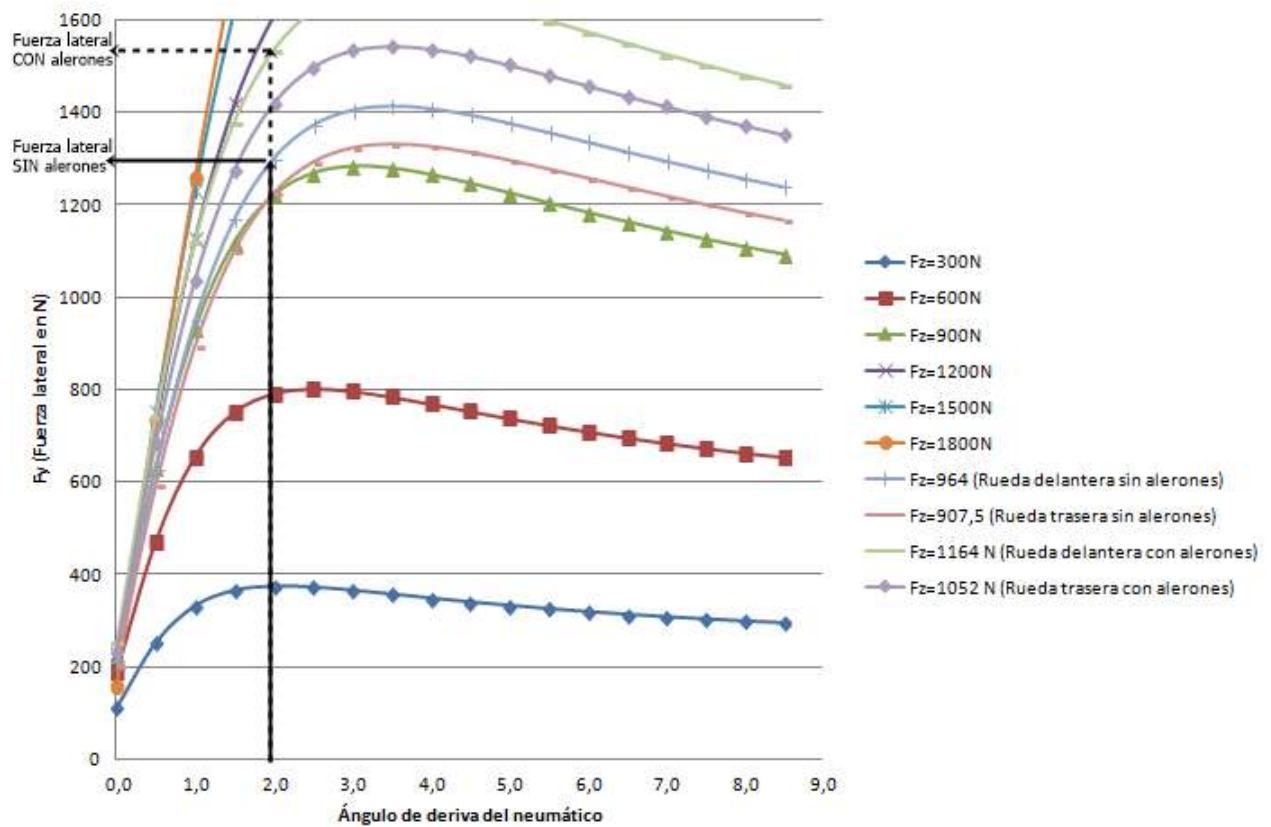


Figura 7.14: Cambio en la carga vertical por neumático en el eje delantero y para los casos con y sin alerones. Fuente: Elaboración propia

7. Cálculos

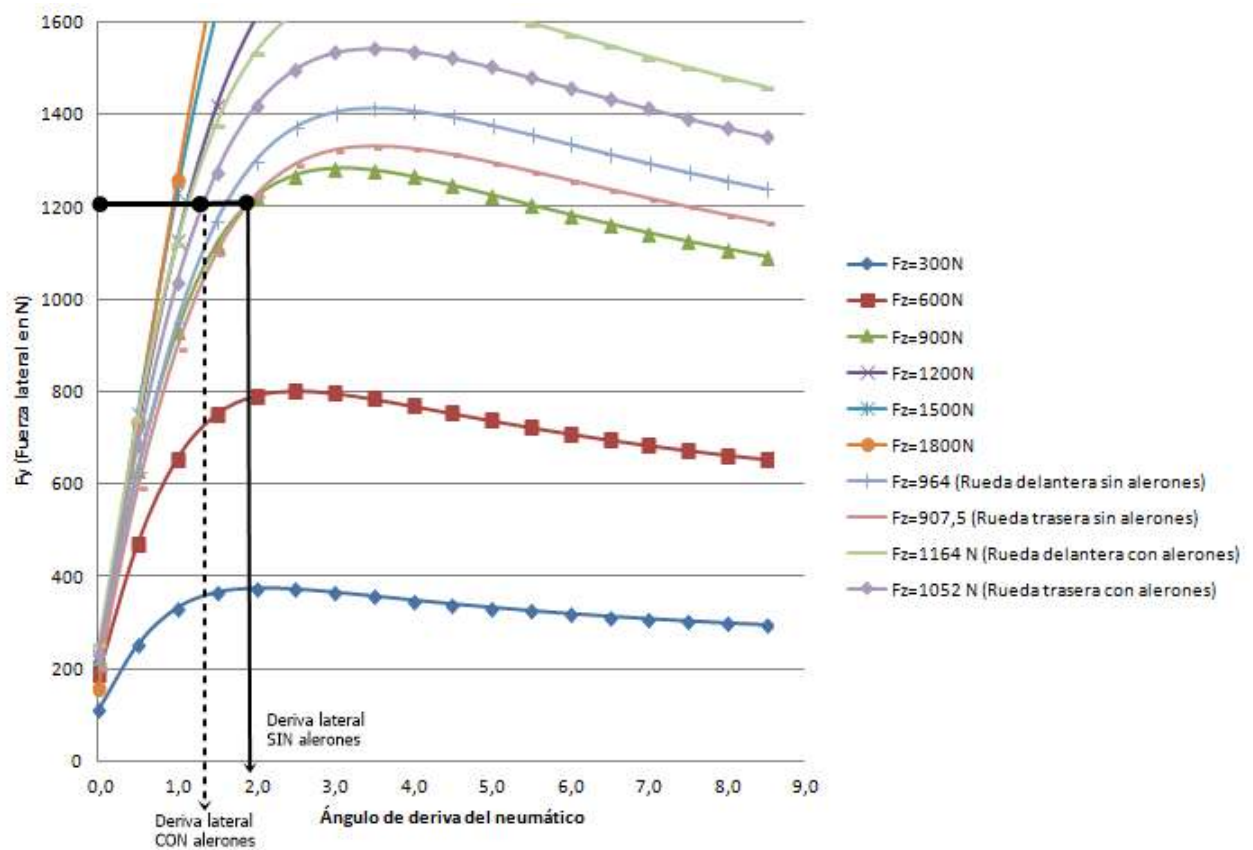


Figura 7.15: Cambio en la deriva por neumático en el eje trasero y para los casos con y sin alerones. Fuente: Elaboración propia

7. Cálculos

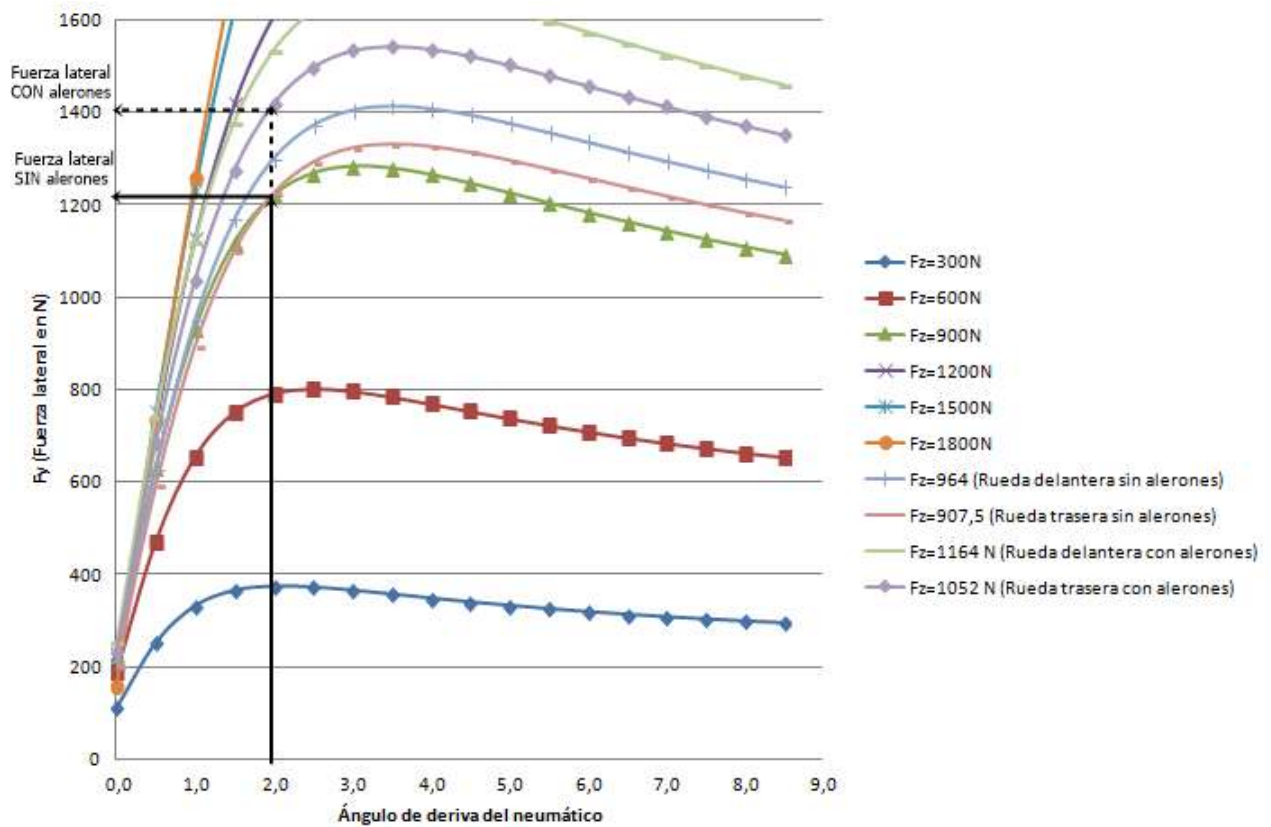


Figura 7.16: Cambio en la carga vertical por neumático en el eje trasero y para los casos con y sin alerones. Fuente: Elaboración propia

7.5. Difusores

Para el experimento referente a la elección de la curvatura del difusor con el fin de optimizar el funcionamiento del fondo plano se diseña una geometría bidimensional de tal modo que presente una zona que haga las veces de fondo plano con la geometría del difusor en la parte final. De este modo, cualitativamente podremos escoger una curvatura del difusor que optimice el conjunto (ver figura 7.17).

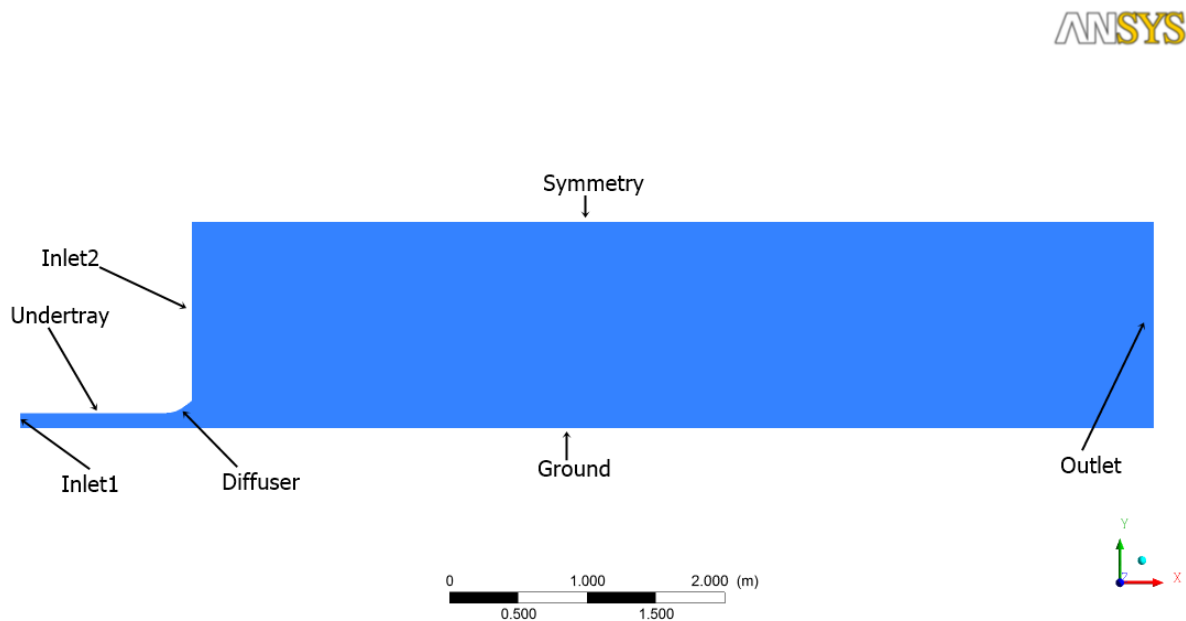


Figura 7.17: Dominio de estudio para comparar las diferentes geometrías de dfusor

- “*inlet 1*”:Entrada de aire tipo “*velocity inlet*” con 22,222 m/s con velocidad normal a la superficie.
 - “*inlet 2*”:Entrada de aire tipo “*velocity inlet*” con 22,222 m/s con velocidad normal a la superficie.
 - “*symmetry*”: Zona superior de la superficie, correspondiente con la zona límite de la región del aire tipo “*symmetry*”.
 - “*outlet*”: Zona de salida del aire. Tipo “*Pressure Outlet*”.
 - “*ground*”: Zona inferior de la superficie, correspondiente con lo que sería el asfalto en el problema real. Tipo “*wall*” con velocidad tangencial de 22,222 m/s en la dirección de avance del fluido.
-

7. Cálculos

- “*diffuser*”: Tipo “*Wall*” y correspondiente con la geometría variable que varía para cada simulación.

Para este estudio particular, es necesario comprobar si es o no turbulento el flujo aerodinámico. Para ello se emplea el número adimensional de Reynolds para este problema particular que se calcula con:

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot L}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 22,222 \cdot 1,250}{1,7894 \cdot 10^{-5}} \approx 1,9 \cdot 10^6 \quad (7.14)$$

Donde:

- ρ = Densidad, de valor 1,225 kg/m³
- U= Velocidad del fluido aguas arriba, de valor 22,222 m/s.
- L= Longitud característica, correspondiente con la longitud del fondo plano más el difusor, de 1,250m.
- μ = Viscosidad del fluido, de valor $1,7894 \cdot 10^{-5}$.

Dado que se considera flujo turbulento alrededor de un cuerpo a aquel cuyo número adimensional de Reynolds supera el valor numérico de 20000, tendremos que emplear en el modelo de resolución, un modelo de turbulencia, que dada la correlación con los resultados experimentales obtenida en el estudio de los perfiles para el ala delantera, escogemos el modelo Spallar Almaras.

Para el estudio se han tomado como base siguientes cotas (ver figura 7.18):

- Altura máxima de 90mm, como resultado de las limitaciones en los laterales generadas por los conductos de refrigeración, que chocarían si la altura fuese mayor; y como consecuencia localización de la barra del “*jacking point*”, que ha obligado a eliminar material de la parte alta del difusor mediante un corte en el laminado de fibra de carbono.
- cota de 250mm desde el tubo más retrasado de la estructura del chasis, dado que la fabricación del difusor fue previa a la colocación de los puntos de la suspensión y se optó por trabajar del lado de la seguridad para evitar que el difusor incumpliese la norma T9.3.1.

Los resultados obtenidos del estudio bidimensional de curvatura del difusor muestra que para una resistencia al avance aerodinámica muy constante, con variaciones del orden de 1 N/m como máximo, la carga aerodinámica varía con diferencias hasta de 4 N/m (ver figura 7.19).

7. Cálculos

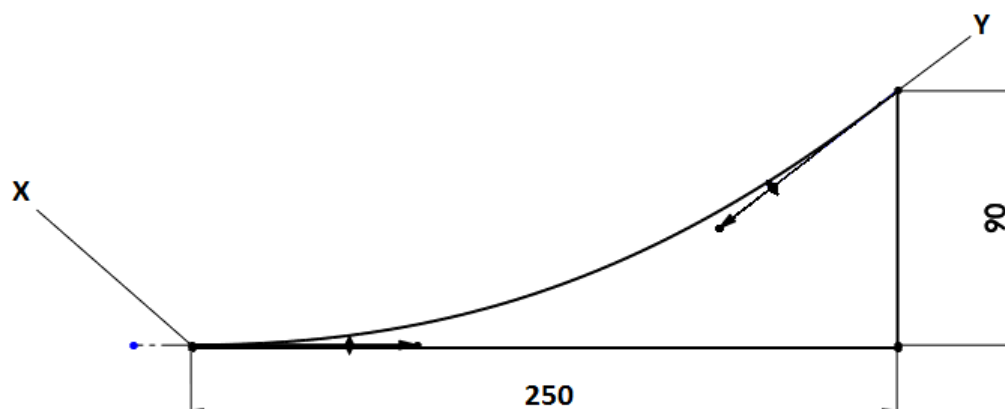


Figura 7.18: Geometría del difusor, basado en una “*spline*” con los puntos de origen y fin definidos y con las cotas de curvatura X e Y variando en las diferentes simulaciones.

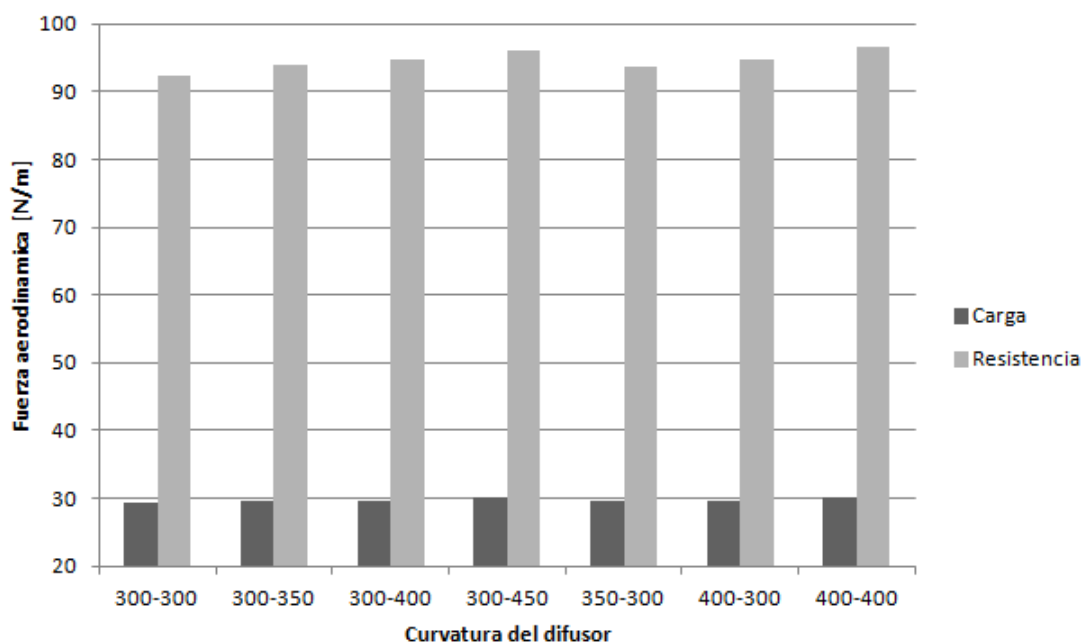


Figura 7.19: Carga y resistencia aerodinámica por unidad de longitud generada por los difusores. Fuente: Elaboración propia

7. Cálculos

Analizando por separado la gráfica de la carga aerodinámica del fondo plano (ver figura 7.20) se observa que las pequeñas variaciones que genera la curvatura del difusor en su resistencia al avance y su carga vertical, es el fondo plano el que recibe la mayor parte de la carga aerodinámica.

Comparando las figuras 7.19 y 7.20 se observa que cuanto mayor es la carga aerodinámica generada por el difusor menos optimiza el fondo plano y viceversa, lo que se ve claramente en la curvatura 400-400, donde el difusor genera la carga más alta de todas las geometrías ensayadas, y el fondo plano genera la carga más baja de todas las ensayadas.

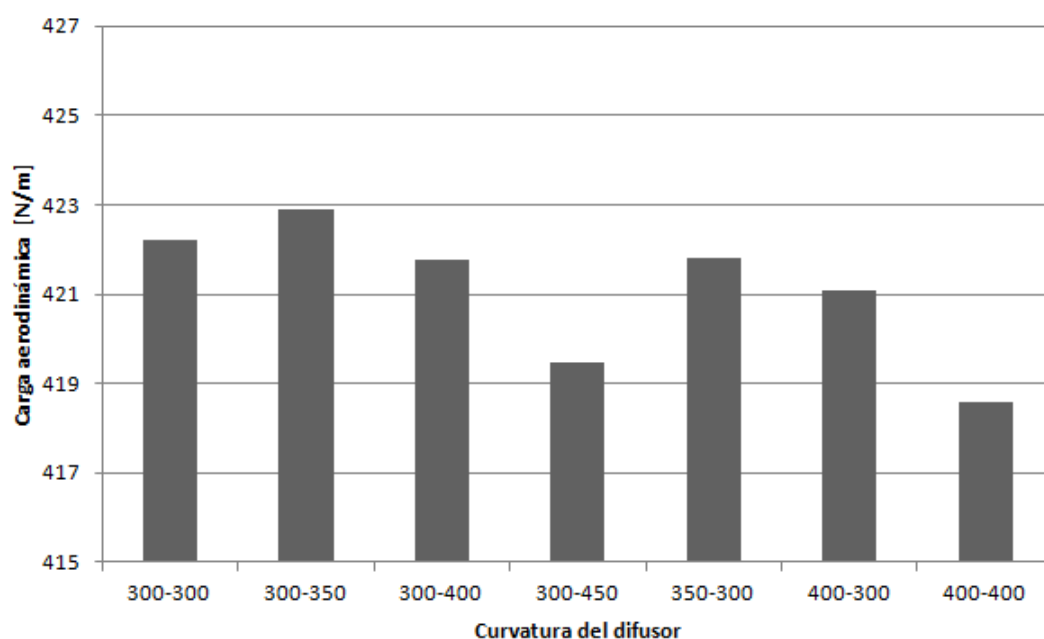


Figura 7.20: Carga aerodinámica por unidad de longitud del falso fondo plano simulado en función de la curvatura del difusor. Fuente: Elaboración propia

Para tomar por tanto la decisión final sobre la geometría de esta pieza del kit aerodinámico ha de tenerse en cuenta el total de carga comparado con el total de resistencia, de tal modo que se consiga la curvatura más óptima de las ensayadas en este estudio (ver figura 7.21).

Aunque la mayor carga total la aporta el difusor de curvatura 300-350, es el 300-300 el que permite una relación entre carga y resistencia aerodinámica más óptima como se observa en el cuadro 7.5.

7. Cálculos

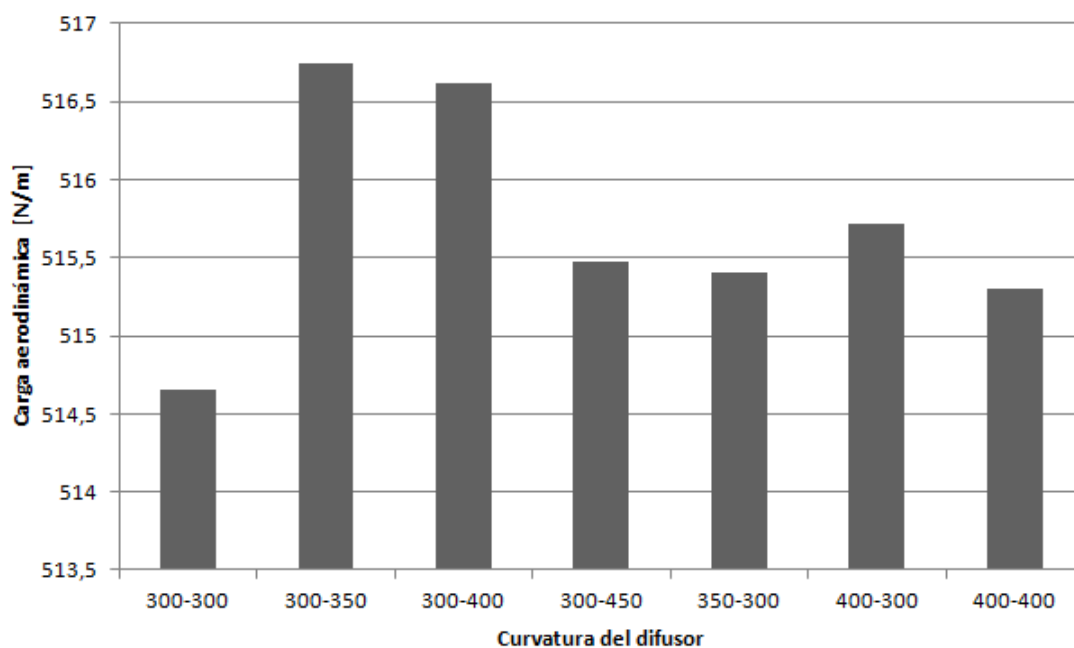


Figura 7.21: Carga aerodinámica por unidad de longitud total del conjunto. Fuente: Elaboración propia

Cuadro 7.5: Valores del cociente entre la fuerza vertical (carga) y la fuerza longitudinal (resistencia) del conjunto del estudio.

	FZ/FX
300-300	17,57
300-350	17,47
300-400	17,41
300-450	17,18
350-300	17,48
400-300	17,38
400-400	17,04

Es importante recordar que la selección de la geometría del difusor, aun con base numérica, es una selección cualitativa, que se ha realizado comparando resultados de una simulación aproximada, puesto que en la realidad, el flujo de aire bajo el fondo plano presenta una mayor velocidad al ser comprimido desde el flujo exterior a una sección transversal mínima bajo el monoplaza, lo que aumenta la velocidad del aire y genera bajas presiones o succión; además el fluido que circula por encima del difusor, en la realidad no es un flujo laminar y ordenado sino turbulento y caótico como consecuencia de la interacción del aire con el motor y los tubos del chasis que se encuentran en esa región. Es por tanto que en desarrollos futuros sería necesario

7. Cálculos

realizar experimentación con el automóvil en pista midiendo las velocidades del flujo en las zonas que idealizamos como superficies tipo “*velocity inlet*” a través de, por ejemplo parrillas de tubos pitot como las empleadas en la formula 1 para comprobar la correlación de datos entre el túnel de viento y el CFD (ver figura 7.22).



Figura 7.22: Parrilla de sensores pitot para medir la velocidad y presión del flujo aerodinámico en un cierto punto. Fuente: Omnicorse.it

7.6. Estudio del coche completo

El objetivo inicial de la creación del paquete aerodinámico del monoplaza es la obtención de carga aerodinámica que pegue el vehículo al suelo, de tal forma que la carga vertical que actúa sobre los neumáticos sea mayor y por tanto el vehículo goza de una mayor adherencia en curva.

Este objetivo se une al de disponer los alerones de tal forma que se reduzca la resistencia de componentes como la rueda delantera para que el cómputo global resistencia al avance al incorporar los alerones sea la mínima posible.

La eficiencia aerodinámica del vehículo la evaluamos observando la relación entre sustentación y resistencia, de tal modo que cuanto mayor sea este coeficiente, mayor eficiencia aerodinámica.

7. Cálculos

$$Eff = \frac{C_l}{C_d} \quad (7.15)$$

Donde:

- Eff= Eficiencia aerodinámica
- C_l = Coeficiente de sustentación del vehículo.
- C_d = Coeficiente de resistencia aerodinámica

Para hacer la simulación CFD completa del vehículo automóvil en 3D es necesario realizar un modelo CAD en formato compatible con el “software” ANSYS Fluent (generalmente .stp o .igs) que simplifique el modelo para evitar que el consumo de recursos de cálculo se dispare innecesariamente.

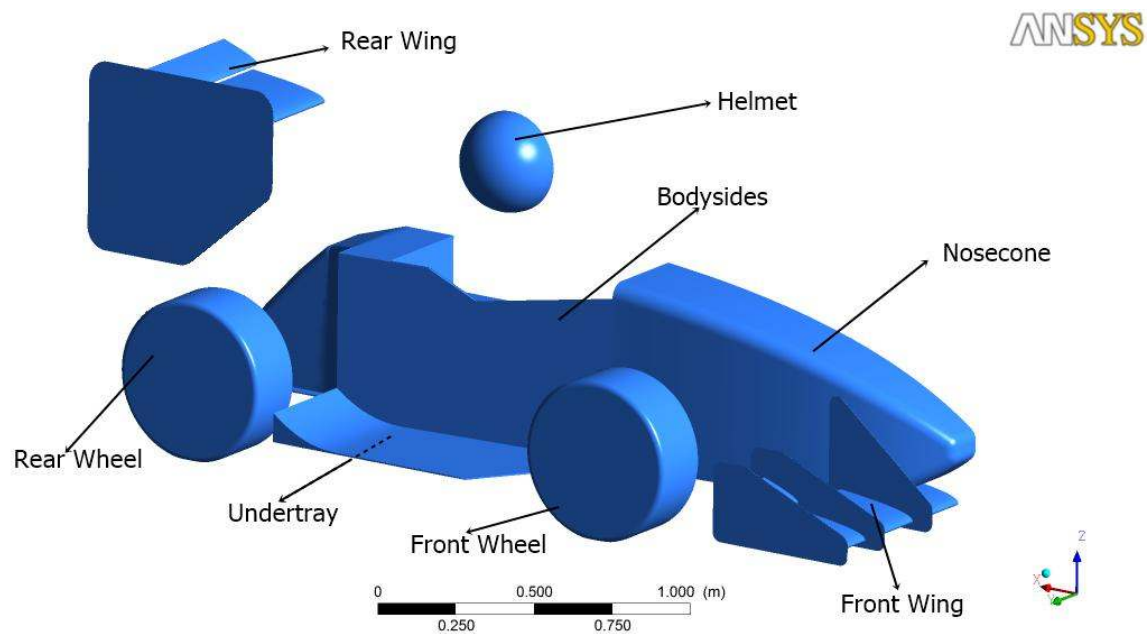


Figura 7.23: Separación de los diferentes grupos de superficies para el cálculo CFD. Fuente: Elaboración propia

Las diferentes partes del vehículo han de separarse correctamente para poder recurrir posteriormente si fuese necesario a verificar la fuerza que realiza el fluido al interactuar con una cierta parte del automóvil (ver figura 7.23).

7. Cálculos

Una vez el vehículo ha sido definido en su geometría, se procede a definir los límites del volumen de control para el estudio aerodinámico del fluido alrededor del automóvil. Para ello ha de establecerse un volumen de control que sea lo suficientemente grande en las tres dimensiones como para que los límites del volumen no interfieran en la solución del problema (ver figura 7.24).

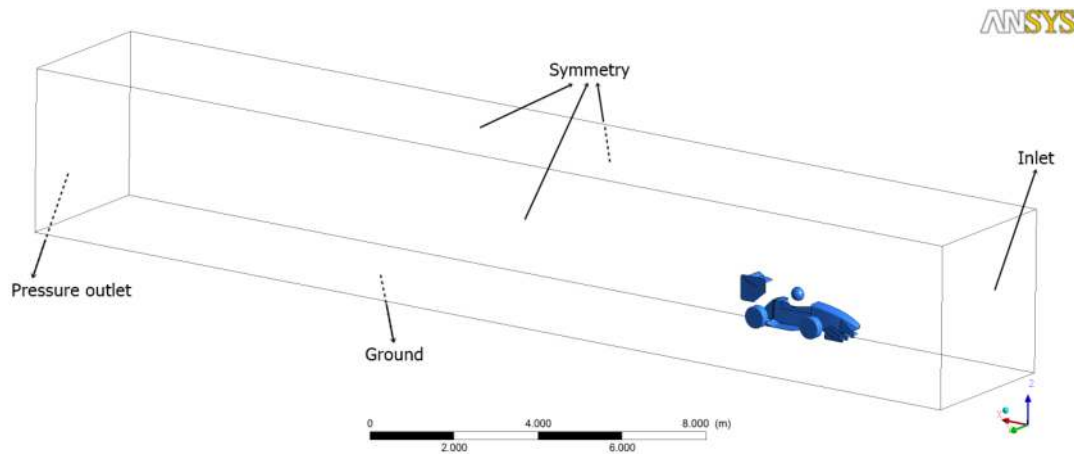


Figura 7.24: Volumen de control empleado para el estudio del vehículo completo mediante el “software” ANSYS Fluent . Fuente: Elaboración propia

Una vez definido el volumen de control es necesario dar a las diferentes superficies sus condiciones de contorno.

- “*inlet*”: Entrada de aire tipo “*velocity inlet*” con 22,222 m/s con velocidad normal a la superficie.
- “*symmetry*”: Zonas superior, y laterales del volumen correspondientes con la zona límite de la región del aire. Tipo “*symmetry*”.
- “*outlet*”: Zona de salida del aire. Tipo “*Pressure Outlet*”.
- “*ground*”: Zona inferior de la superficie, correspondiente con lo que sería el asfalto en el problema real. Tipo “*wall*” con velocidad tangencial de 22,222 m/s en la dirección de avance del fluido.
- Todas las demás superficies del problema: Tipo “*Wall*” y correspondiente con la geometría.

El objetivo de esta comparación es el de observar el comportamiento del flujo aerodinámico alrededor del vehículo para dos casos: cuando el vehículo tiene los alerones instalados y

7. Cálculos

cuando no los tiene instalados en la aerodinámica.

Se obtendrán a demás el cómputo total de fuerza aerodinámica del vehículo de tal forma que se obtenga cuantitativamente cual es la diferencia entre carga y resistencia para el vehículo con y sin el paquete aerodinámico instalado.

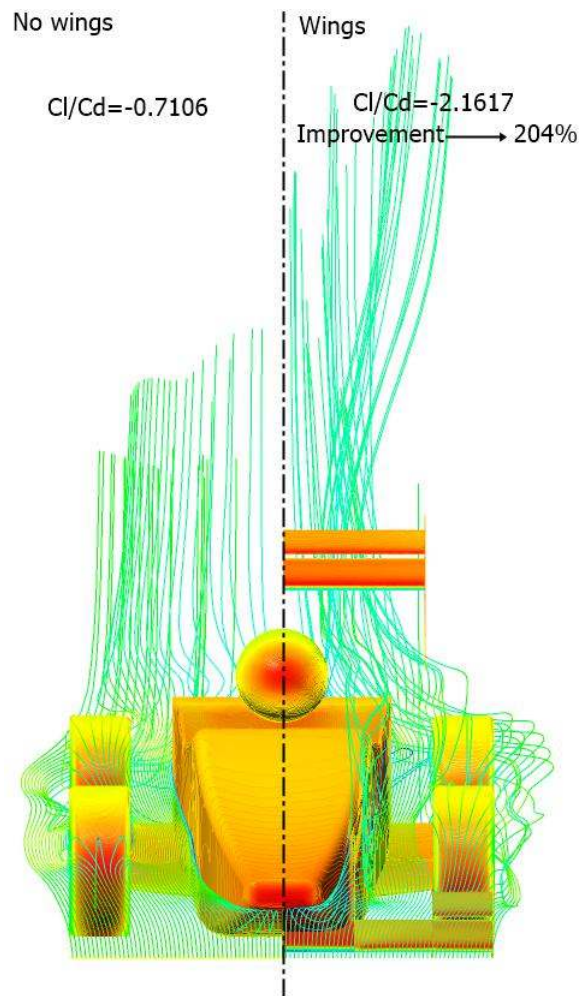


Figura 7.25: Contornos de presiones y líneas de corriente para el diseño completo del monoplaza para la temporada 2016 en vista frontal. Fuente: Elaboración propia

El flujo aerodinámico del automóvil sin el paquete aerodinámico instalado genera una altísima presión positiva (resistencia) en la rueda delantera debido al efecto de rotación del neumático, cuya velocidad en el cuarto superior del neumático en el sentido de avance es contraria al flujo de aire, mientras que en la parte inferior acompaña al fluido. Es por esto que el flujo tiende a frenarse contra el neumático y cambiar de trayectoria debido al giro del neumático, de tal modo que el estancamiento del flujo de aire es muy elevado generando una

7. Cálculos

resistencia al avance realmente grande.

Es por esto que el ala frontal del vehículo presenta justo delante del neumático una cascada de dos perfiles alares, para tratar de deflectar el flujo de aire por encima del neumático y reducir así la resistencia, lo que se observa en la figura 7.25 donde los colores son notablemente más rojos que en la rueda delantera con el ala frontal instalada.

La instalación además del paquete aerodinámico en el vehículo produce que la columna de aire con motivo de la curvatura del alerón trasero junto con los difusores y la depresión de cola, produce que el flujo aerodinámico defleccione considerablemente hacia arriba, esta deflexión es una demostración clara de la creación de carga dado que por la segunda ley de Newton, si levantamos una corriente de aire el efecto que genera es una carga que empuja el vehículo hacia el pavimento produciendo el efecto buscado.

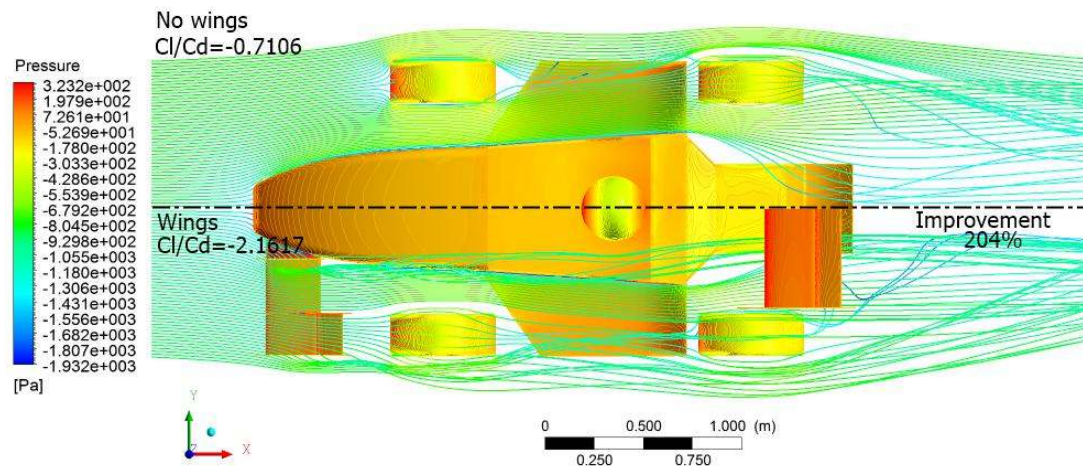


Figura 7.26: Contornos de presiones y líneas de corriente para el diseño completo del mono-plaza para la temporada 2016 en vista en planta. Fuente: Elaboración propia

En vista en planta, se observa como parte del flujo aerodinámico es dirigido directamente al ala trasera mediante el vórtice generado por la deriva vertical que soporta al ala delantera del vehículo. Este vórtice es generado como consecuencia de la tendencia del aire a desplazarse de zonas de más a menos presión. Dado que en la zona del morro cerrada por el alerón delantero la presión es más grande que en la zona del ala donde hay un único perfil el aire tiende a desplazarse de una región a otra generando un torbellino de aire que es elevado, pasa por el lado del casco del piloto y desemboca en la zona inferior del ala trasera, contribuyendo a la creación de carga aerodinámica (ver figura 7.26).

Mediante una de las opciones que el software empleado (ANSYS Fluent) nos permite

7. Cálculos

realizar, se consigue una visualización de los contornos de presiones de modo que se eliminan de la visualización todas aquellas superficies que presentan una presión mayor que el límite que se imponga como máximo. En el caso de la visualización 3D de la figura 7.27 se eliminan las zonas en las que la presión es mayor o igual a 0 Pa de presión relativa.

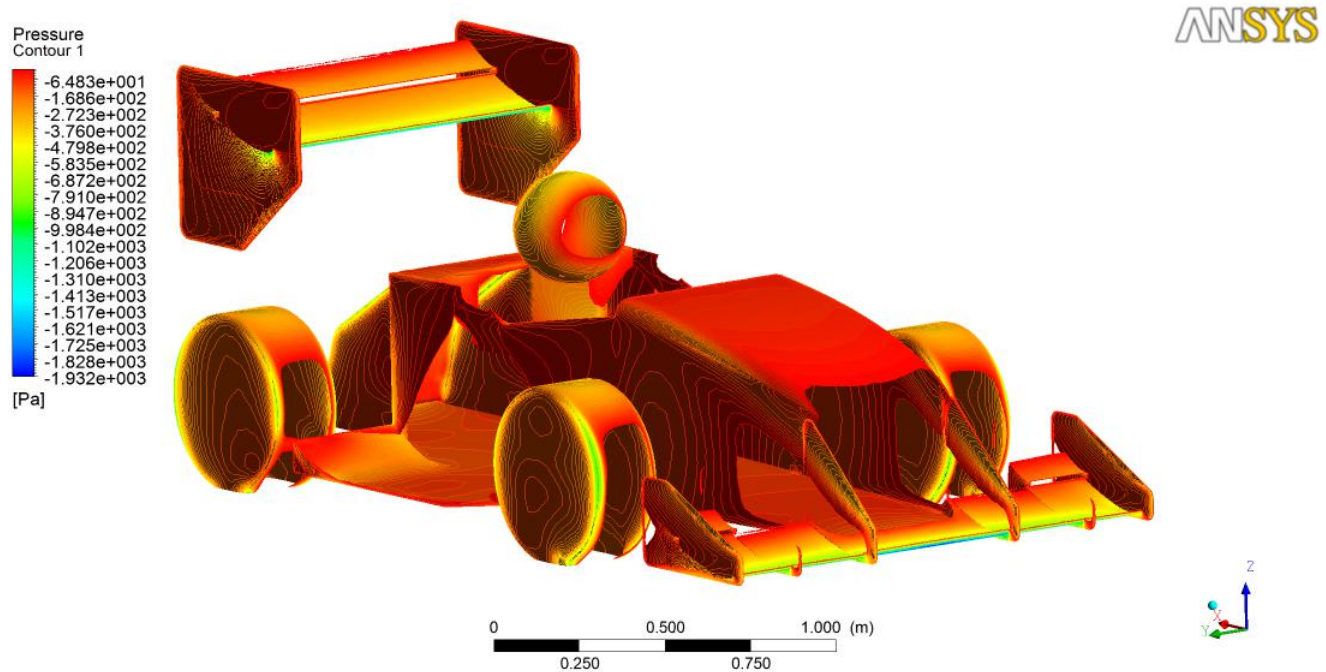


Figura 7.27: Contornos de presiones restringido a presiones menores que 0 MPa de presión relativas para el diseño completo del monoplaza para la temporada 2016 en vista en perspectiva. Fuente: Elaboración propia

La carga aerodinámica conseguida no es gratuita, y es que incluir el aero-kit ha generado un aumento de la resistencia al avance en la rueda trasera. Este es consecuencia de las turbulencias generadas por las perturbaciones en la trayectoria del flujo aerodinámico que causa el giro de la rueda. Este efecto claramente negativo no ha sido tenido en cuenta dado que el monoplaza presenta al lado derecho el escape con su cubierta, que no se incluyeron en las simulaciones debido a que la geometría real no fue definida hasta su construcción física por problemas de interferencias; y en el lado izquierdo presenta el radiador del Honda Civic, que realmente genera alteraciones muy complejas en el aire que superan la capacidad computacional disponible. Al mismo tiempo este no estuvo definido y en su posición real hasta finales de la temporada 2016. Esto implica que el flujo de aire encontrará bastantes obstáculos en su camino hasta los neumáticos traseros y por tanto el drag de estos elementos se verá reducido.

7. Cálculos

Cuadro 7.6: Resultados para la fuerza en los diferentes ejes para el coche completo con y sin alerones instalados. Fuente: Elaboración propia.

	No wings		Wings	
	Fx	Fz	Fx	Fz
Front Wheel	33,34	22,58	28,74	23,16
Helmet	1,6	8,16	1,6	8,16
Nosecone	9,48	27,42	25,32	37,66
Rear Wheel	15,48	12,12	30,26	30,854
Undertray	18,99	-134,81	24,12	-265,94
Front Wing	-	-	10	-222,42
Rear Wing	-	-	27,32	-226,16
Total	132,7	-85,82	214,98	-526,68

Los resultados numéricos correspondientes a las fuerzas de resistencia y sustentación del vehículo completo obtenidas a través de esta simulación de coche completo son las mostradas en el cuadro 7.6.

Para evaluar la diferencia de eficiencia aerodinámica en ambos casos es necesario establecer cuál es el área frontal del vehículo con y sin alerones. Esto se ha realizado mediante el propio programa de CAD obteniendo los valores mostrados en el cuadro 7.7.

Cuadro 7.7: Valores del área frontal con y sin alerones. Fuente: Elaboración propia

	m^2
Área frontal con alerones	0,954
Área frontal sin alerones	0,8

$$C_L^{nowings} = \frac{C \cdot 2}{\rho \cdot U^2 \cdot A} = -0,39 \quad (7.16)$$

$$C_D^{nowings} = \frac{D \cdot 2}{\rho \cdot U^2 \cdot A} = 0,55 \quad (7.17)$$

$$Eff_{nowings} = \frac{C_L}{C_D} = -0,7106 \quad (7.18)$$

$$C_L^{wings} = \frac{C \cdot 2}{\rho \cdot U^2 \cdot A} = -1,83 \quad (7.19)$$

$$C_D^{wings} = \frac{D \cdot 2}{\rho \cdot U^2 \cdot A} = 0,85 \quad (7.20)$$

7. Cálculos

$$Eff_{wings} = \frac{C_L}{C_D} = -2,1617 \quad (7.21)$$

Se observa por tanto como el vehículo con alerones presenta una eficiencia aerodinámica de -2,1617 mientras que sin alerones esta cifra es de -0.7106, lo que implica que la instalación de estos elementos mejora la eficiencia en un 204 %

8.1. Introducción a los materiales compuestos [7]

Son materiales compuestos aquellos materiales que se componen de una matriz continua y uno o varios refuerzos discontinuos, de forma que el conjunto es más resistente que cada uno de los componentes por separado y de tal modo que no se produzca reacción química entre los mismos.

Los materiales compuestos se clasifican en función de dos criterios: el tipo de matriz y el tipo de refuerzo (ver Figura 8.1).

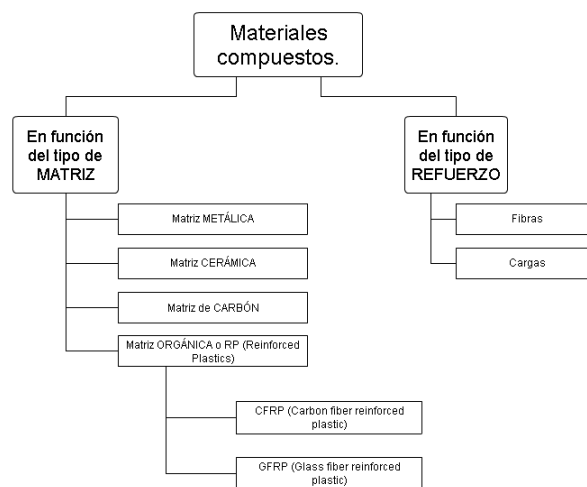


Figura 8.1: Esquema representativo de la clasificación de los diferentes tipos de materiales compuestos. Fuente: Elaboración propia

Los materiales compuestos más habituales en el sector industrial en que se ubica el presente trabajo (el sector del automóvil de competición) son los basados en matriz orgánica,

8. Producción

los *RP* o “***Reinforced Plastics***”; con refuerzos de elementos tipo fibra (con relación de longitud entre diámetro L/D mayor de 100), ya sean de vidrio o de carbono. Esto es así gracias a las buenas propiedades de las fibras ante solicitaciones mecánicas y a las ventajas que ofrecen las matrices orgánicas en estos conjuntos:

- Transmisión adecuada de las cargas al refuerzo.
- Evita la propagación de grietas en el material.
- Protege del deterioro físico y químico al refuerzo.

Dentro de los *RP* basados en fibras, existe un amplio rango de matrices y refuerzos que dan al material compuesto las propiedades adecuadas para su vida en funcionamiento (ver cuadro 8.1).

Cuadro 8.1: Tipos de matrices y fibras más empleados en materiales compuestos.

Tipos de matriz	Tipos de refuerzos
Termoplástica (bajas solicitaciones)	Fibras de vidrio
Elastomérica	Fibras de carbono
Termoestable (materiales de alta resistencia)	Fibras orgánicas
Epoxis	Fibras cerámicas
Bismaleimidas	
Poliamidas	
Fenólicas	

Así mismo, las fibras aportan la resistencia al material (y se relaciona directamente con el diámetro de la misma como se muestra en la Figura 8.2) pueden clasificarse en función de su forma y disposición en:

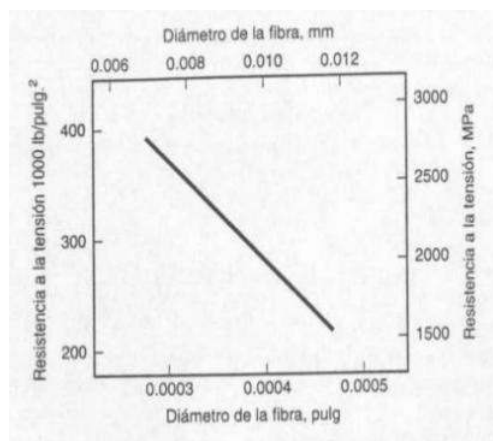


Figura 8.2: Relación entre el diámetro de la fibra y la resistencia de las mismas.

8. Producción

- Hilos, ya sean formados por un único filamento o por varios entrelazados, trenzados, etc.
- Cintas, formadas por hilos unidireccionales dispuestos unos a continuación de otros
- Tejidos, formados por fibras cruzadas entre si. Según la forma de entrecruzarse distinguimos (ver Figura 8.3):
 - Tafetán (A)
 - Esterilla (B)
 - Semiesterilla (C)
 - Sarga (D)
 - Raso (E)
 - Setén de espiguilla (F)

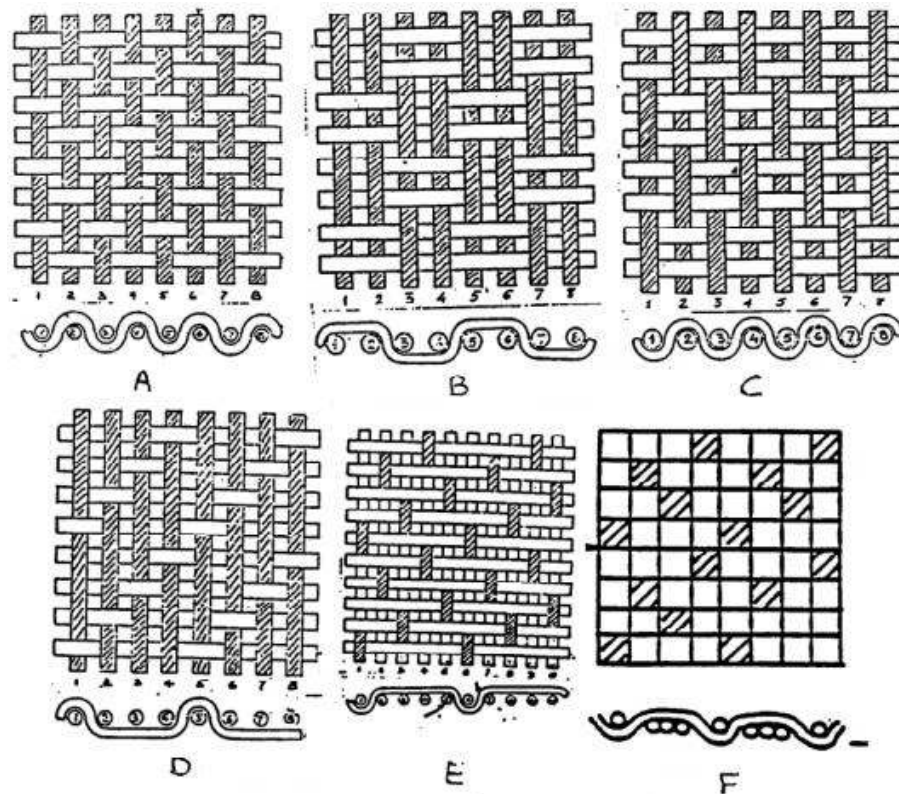


Figura 8.3: Representación pictográfica de los diferentes tipos de tejido que pueden emplearse como refuerzo en un material compuesto.

8. Producción

El comportamiento de los materiales compuestos ante sollicitaciones mecánicas se encuentra a medio camino entre la respuesta de la matriz y la respuesta del refuerzo. La fibra, por si sola, presenta una tensión de rotura muy elevada, mayor que la del compuesto, y es la deformación a la que esta tensión de rotura es producida en la que se considera que el material compuesto ha sufrido el fallo. La matriz por otro lado, presenta una curva tensión deformación mucho más reducida puesto que esta actúa como unión entre las fibras permitiendo a las mismas que trabajen correctamente (ver Figura 8.4).

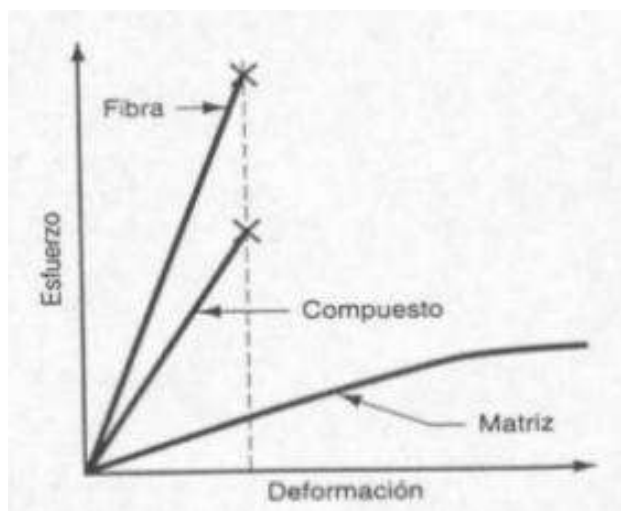


Figura 8.4: Relación tensión-deformación para la matriz, el refuerzo y el material compuesto en conjunto.

Así mismo, la resistencia mecánica de cada una de las fibras viene determinada por su geometría. Al tratarse de fibras de relaciones L/D muy elevadas (fibras esbeltas), el pandeo es posible si la matriz no cubre por completo la fibra, puesto que la matriz arriestra (evita) el pandeo de las fibras, permitiendo el aumento en la resistencia mecánica de la misma a compresión.

Además, la orientación de las fibras de carbono es de vital importancia, así cuanto más colineal sea la directriz del filamento con la dirección de aplicación de la carga, mayor es la resistencia del conjunto (ver figura 8.5).

Esta alta resistencia, junto con el bajo peso que le confiere su estructura, hacen de los CFRP (*“Carbon Fiber Reinforced Plastic”*) y los GFRP (*“Glas Fiber Reinforced Plastic”*) los materiales más utilizados en la actualidad en el ámbito de la competición automovilística, porque permiten reducir considerablemente el peso manteniendo o incluso mejorando las propiedades mecánicas del conjunto. Esto permite reducir el peso del monoplace y en categorías como la Formula 1 esto implica que se pueden colocar más lastres en las zonas más

8. Producción

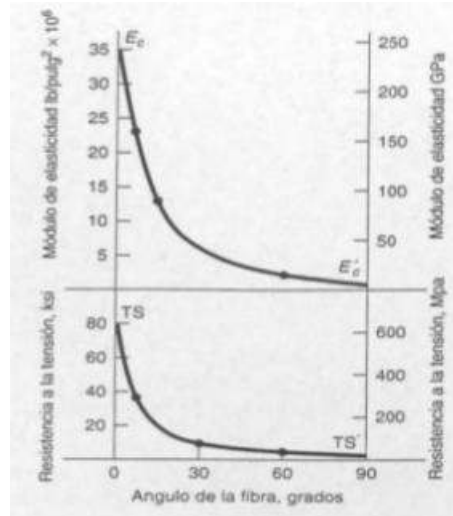


Figura 8.5: Relación del módulo de elasticidad y de la resistencia del material en función del ángulo de disposición de las fibras.

bajas del automóvil rebajando la altura del centro de gravedad del mismo y mejorando el comportamiento y la estabilidad del vehículo al trazar las curvas.

8.2. Fabricación de las piezas planas del vehículo

La fabricación de piezas planas en CFRP mediante cintas unidireccionales es un problema de costosa resolución, puesto que a pesar de tener a su favor la sencillez de la fabricación gracias a la ausencia de formas complejas, es necesario realizar correctamente la orientación de las fibras unidireccionales. Es por esto que para la fabricación de estas piezas la mejor opción es la utilización del **ATL** o “**Automated Tape Laying**”. Esta máquina permite la deposición de las cintas de fibra pre-impregnada aprovechando la mayor cantidad de material posible. Al mismo tiempo, la empresa MTorres incorporó a la máquina empleada un PANEX, herramienta de corte por ultrasonido que proporciona las funciones adecuadas de vibración a alta frecuencia para conseguir las mejores condiciones de avance y corte (ver figura 8.6).

8. Producción



Figura 8.6: ATL tipo pórtico de la empresa MTorres utilizada para la laminación de las piezas planas.

El proceso de laminación comienza con el forrado manual de la base donde se realizará la deposición de la cinta con a-4000 a modo de *peel-ply* de modo que este plástico fino se coloca sobre la mesa y una vez terminado el corte y el encintado se puede quitar la pieza en verde (sin pasar el proceso de curado) de la mesa sin complicación.

A continuación el operario de la máquina ejecuta el programa de encintado creado previamente donde, de igual modo que en una impresora 3D, traduce la secuencia de capas a movimientos de la máquina como son traslados, deposiciones de cinta, corte, etc... mientras el ingeniero encargado supervisa los solapes entre cintas y los posibles defectos de la cinta, ya sean zonas muy escasas de resina o zonas con incrusión.

Tras analizar las solicitaciones a las que estará sometido el vehículo se optó bajo el asesoramiento del patrocinador FIDAMC por colocar un laminado unidireccional de 6 capas con secuencia +45, -45, 0, 0 (Refuerzo), -45, +45.

En caso de que aparezcan solapes en el proceso es necesario “afeitar” las fibras dejando la capa a nivel y evitando los solapes que pueden generar problemas en la pieza final.

Además para reforzar los extremos de las piezas finales y proteger de la posible delaminación generada al realizar los taladros de anclaje en este tipo de fibras unidireccionales, se decidió colocar unos refuerzos de **GFRP** en tejido “*prepreg*” (ver número 1 en figura 8.7).

8. Producción



Figura 8.7: Diferentes componentes de la bolsa de vacío y de la pieza en el perímetro de la misma.

Una vez el proceso de encintado ha finalizado y se han colocado todas las capas de fibra de carbono pre-impregnada en la orientación de diseño, la máquina activa el PANEX y tras la revisión de la cuchilla y del sistema, bajo las condiciones de seguridad adecuadas, se procede al corte.

Una de las ventajas de este tipo de fabricación de los materiales compuestos es que la presión ejercida sobre el encintado permite que una vez terminado el proceso, se tenga la pieza terminada y se pueda trasladar a la mesa de vacío sin que las capas puedan deslizarse unas sobre otras como sucede con facilidad al aplicar el método húmedo.

Una vez finalizado el proceso de laminado las piezas terminadas son desplazadas a la mesa

8. Producción

de vacío, donde se colocan diferentes componentes para preparar el proceso de curado en el autoclave:

- Masilla: Cinta adhesiva de 3mm de grosor muy deformable que une la mesa a la bolsa de vacío de forma hermética.
- Cinta adhesiva de una cara: Mediante la aplicación de la misma en el contorno de la pieza conseguimos que la aplicación del corcho adhesivo sea mas fácil de eliminar de la mesa tras el curado. Número 4, Figura 8.7
- Corcho adhesivo: Mediante este material forramos todos los contornos de las piezas de forma que el grosor de corcho sea superior al grosor de la pieza. Durante el curado, la resina pasara a ser fluida pudiendo colarse a la bolsa produciendo la rotura de la misma. El corcho evita esta posible fuga. Número 2, Figura 8.7
- Yenil: Se coloca este tejido en la superficie de las piezas de forma que realiza la función de absorber el posible exceso de resina y preparar la superfice final.
- Air-weave: Tejido áspero de fibras blancas que permite que el aire se desplace al realizar el vacío y que no se produzca el colapso del vacío, dado que las dimensiones de piezas como el fondo plano requieren de una mesa de vacío muy grande y pueden quedar zonas donde el vacío sea menor y no se produzca la presión adecuada que compacte el refuerzo en la matriz.
- Bolsa de vacío: Plástico más grueso, naranja que es la capa externa de la bolsa de vacío de modo que ha de ser capaz de resistir los posibles agentes externos que puedan rajar la bolsa y producir un curado inapropiado.

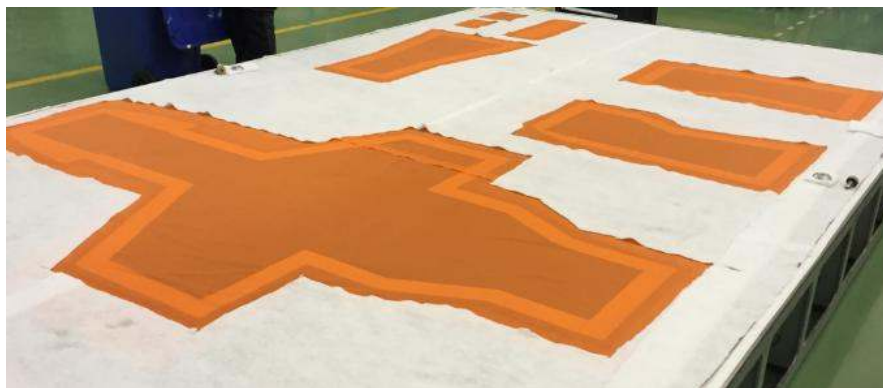


Figura 8.8: Mesa de vacío con el Yenil (naranja) y el air-weave (blanco) aplicado sobre las piezas antes de ser cerrada con la bolsa.

8. Producción

Una vez la bolsa de vacío se ha terminado y se ha comprobado que no presenta fugas, se procede a introducir la mesa en el autoclave TEICE de 8m de longitud y 6m de diámetro en el que se alcanzan temperaturas máximas de 450°C y presiones máximas de 236 Psi. Además dispone de 56 tomas de termopares y 24 conexiones de vacío.

Dadas las grandes dimensiones de la bolsa de vacío, se seleccionaron 4 tomas de vacío, una en cada cara de la mesa para tratar de evitar diferencias de presión que puedan alterar el acabado de las mismas, en cuanto a estructura interior y distribución de la matriz polimérica. Además se instalaron 4 termopares a útil y 4 a pieza, para mantener el control de las piezas durante el ciclo.

8.3. Fabricación de los alerones delantero y trasero

La fabricación del alerón delantero y trasero para obtener el producto final (ver figura 8.9 y 8.10

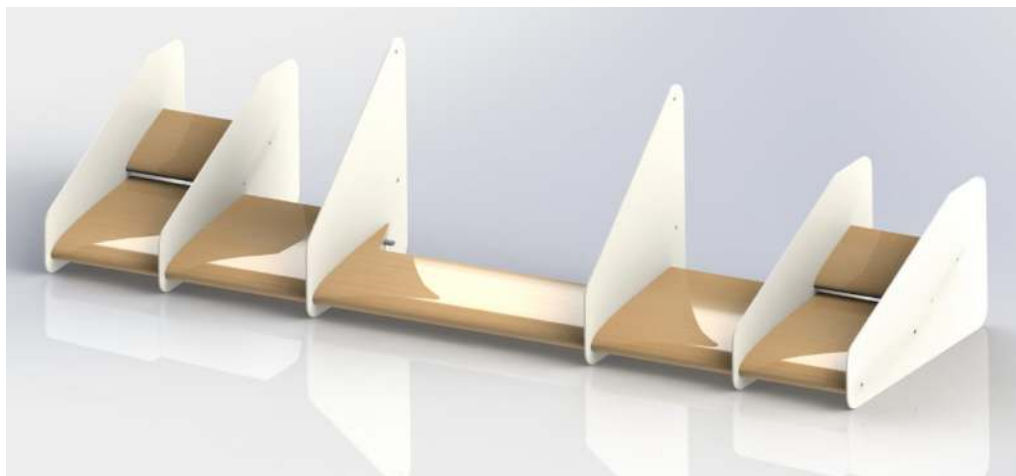


Figura 8.9: Modelo CAD del diseño final del alerón delantero montado en el vehículo.

La fabricación de los núcleos alares macizos ha sido realizada en madera de balsa mediante el marcaje mediante rotulado del contorno del NACA 2415 a la escala apropiada para tanto los perfiles principales como los secundarios.

Para el perfil secundario se emplean listones de madera de balsa de 50x80x1000 mm en los que se dibuja el contorno en la cara rectangular de 110x1000 y se realiza el corte mediante una sierra de cinta por fuera de la marca del rotulador, dejando la misma para ser lijada e igualar el conjunto de 21 piezas completas y un fragmento de la pieza 22 que componen el plano secundario del ala trasera y las 6 piezas que constituyen los dos planos secundarios de

8. Producción

la cascada delantera.



Figura 8.10: Modelo CAD del diseño final del alerón trasero montado en el vehículo.

La colocación de los mismos se ha realizado colocando la cara más plana de los perfiles en la cara plana del listón para simplificar los cortes al operario.

Para el perfil primario, se emplean listones de madera de balsa de 80x130x1500 mm en los que de igual modo que en el perfil secundario se marcan los perfiles sobre la madera en la cara de dimensiones 130x1500 mm y se realiza el corte de igual modo, mediante sierra de cinta dejando el margen de lijado para igualar el conjunto de 13 piezas completas de 80 mm de espesor. Tras esto se realiza el taladrado de los orificios pasantes que contienen las varillas de acero, de 10mm en el caso del perfil primario y 5mm para el perfil secundario.

Para asegurar que el paquete aerodinámico cumple con la normativa de la competición (máxima deflexión elástica de 25mm y permanente de 5mm al aplicar 200 N de fuerza.) la madera de balsa es reforzada internamente con tubos de acero S235 de 10mm de diámetro y 2mm de espesor para el plano principal, y de 5mm de diámetro y uno de espesor para el “flap” secundario de la cascada.

Este conjunto es reforzado con fibra de vidrio y adherido al núcleo mediante la resina epoxy empleada durante la fabricación del refuerzo de material compuesto. El recubrimiento del ala con el material compuesto cumple fundamentalmente dos funciones:

- Aportar mayor rigidez estructural posible al conjunto de los alerones del automóvil.

8. Producción

- Soportar los sensores de deflexión y curado proporcionados por el patrocinador oficial IMDEA Materiales para medir tanto deformaciones como los parámetros del proceso de curado en el interior de la bolsa de vacío.

El refuerzo de GFPR consta de 3 capas de fibra de vidrio recubriendo la totalidad del perfil de tal modo que solapando las capas de tejido en la cara más plana del perfil se favorece el lijado de la intersección de las láminas y se asegura un acabado del conjunto del material compuesto más homogéneo dada su sencillez de lijado. Así mismo la estructura queda cerrada con las derivas verticales o “end-plates” de metacrilato de 3mm para las que únicamente cumplen función aerodinámica; y de 4mm de espesor para los que cumplen función estructural.

Estas piezas han de cortarse por láser para evitar la fragmentación del material y la aparición de grietas que pueden derivar en roturas a fatiga dadas las vibraciones generadas por la naturaleza fluctuante del flujo aerodinámico. Las derivas se han realizado en metacrilato dada la ligereza y facilidad de trabajo de este material, así como su forma totalmente plana. La otra alternativa a considerar es el contrachapado de aeromodelismo basado en madera de abedul encolado con resina fenólica (disponible tanto en 7 como en 4 capas) pero aunque dispone de una alta resistencia mecánica, presenta torsión en sus piezas como consecuencia de las tensiones internas generadas al realizar el encolado de láminas, así como por la sensibilidad de la madera a la temperatura y a la humedad del ambiente.

Una vez realizada la fabricación del alerón como pieza, se procede a su instalación en el automóvil lo que implica:

- Diseño y calculo de las uniones al vehículo: Para la instalación de elementos aerodinámicos que permitan la creación de carga aerodinámica en un monoplaza de formula student acorde a la normativa vigente, es necesario realizar el cálculo de rotura de las uniones entre el alerón y la estructura para comprobar que en caso de impacto, el apéndice aerodinámico no impide el correcto funcionamiento del atenuador de impactos, situado en la parte frontal del automóvil. Para ello se establece que el conjunto de atenuador de impactos con alerón delantero no exceda una deceleración pico de 300 kilogramos a 40 g o 120 kN. En la misma norma se establece que la forma de comprobar esta especificación si el monoplaza emplea el atenuador de impactos estándar consiste en suponer una carga pico para este de 95 kN y verificar que el conjunto de esa carga más la carga de rotura de la unión del alerón (calculada a partir de la rotura de los tornillos y uniones) no supera los 120 kN impuestos como límite.

Para el cálculo de la carga de rotura de una unión atornillada a cortadura simple se emplea la siguiente formula [6]

$$F_{rot} = \frac{0,5 \cdot F_{ut} \cdot A_s}{C_s} \quad (8.1)$$

Donde:

8. Producción

- Frot: Fuerza de rotura del tornillo por cizalladura.
- Fut: Fuerza última de rotura del tornillo. Para un tornillo de calidad X.Y, la tensión de rotura se corresponde con 100 veces X en MPa, e Y se corresponde con el porcentaje de la tensión de rotura que se corresponde con el límite de fluencia. En el caso particular de la tornillería empleada, calidad 8.8, el tornillo presenta una tensión de rotura de 800 MPa.
- As: Área del tornillo sometida a cizalladura (ver figura 8.11).
- Cs: Coeficiente de seguridad. Se considera 1 para este análisis por imposición de la organización.

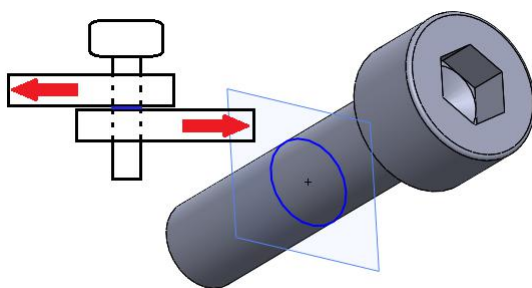


Figura 8.11: Área sometida a cortante en los tornillos que soportan el alerón delantero del vehículo. Fuente: Elaboración propia

En un tornillo trabajando a cortadura, el área sometida a los esfuerzos es el área transversal del tornillo (ver figura 8.11), dependiente de la métrica del mismo. Puesto que una mala calidad del tornillo en la unión puede generar problemas de rotura en montaje y desmontaje, se ha optado por partir de la calidad 8.8 e ir disminuyendo la métrica hasta alcanzar la rotura del conjunto de los 4 tornillos que soportan el alerón.

Cuadro 8.2: Pruebas sucesivas para verificar la tornillería que cumple normativa.

	Ac [mm ²]	Frot [N]	Max [N]	¿Válido?
M8	50,27	80424,7719	25000	No
M7	38,48	61575,216	25000	No
M6	28,27	45238,9342	25000	No
M5	19,63	31415,9265	25000	No
M4	12,57	20106,193	25000	Si

Según se expresa en el cuadro ?? la unión entre el alerón y el chasis del automóvil se realiza mediante 4 tornillos de métrica 4 con calidad de acero 8.8 verificando la norma T3.22.3 de la normativa de FSAE y de cabeza Allen.

8. Producción

- Producción y ensamblaje del conjunto final: Tras realizar el ensamblaje del conjunto se observa que para verificar la normativa de flexión expuesta en la normativa FSAE (Norma T9.7) en el ala delantera es necesaria la colocación de unos refuerzos que permiten una menor deflexión del ala. Dado que colocar tensores rígidos a otros tornillos de sujeción de la aerodinámica implicaría reducir aun más la métrica de la tornillería, se colocan dos cables de acero (ver figura 8.12) desde el extremo a la unión del tramo de morro tras los amortiguadores, de M5 y calidad 8.8. De este modo, en caso de impacto frontal, los cables sufrirían compresión y por tanto no actúan, haciendo que no sea necesario alterar la tornillería de sujeción del mismo. De este modo, el alerón delantero soporta 200N en voladizo con una deformación elástica de 22mm verificando por tanto la normativa vigente.



Figura 8.12: Detalle de los componentes de los cables del alerón delantero en la prueba de Formula Student Spain, con los prisioneros, los cables de acero trenzado de 2mm de diámetro y los tensores del cable. Fuente: Elaboración propia

Por su parte el alerón trasero requiere de un tensor de tubo de acero cruzado para evitar el balanceo lateral del mismo (ver figura 8.13). Tras realizar un ensayo experimental, se obtiene que el alerón trasero soporta 200N con una deformación elástica de 5mm, muy inferior a los 25 máximos permitidos.

8. Producción

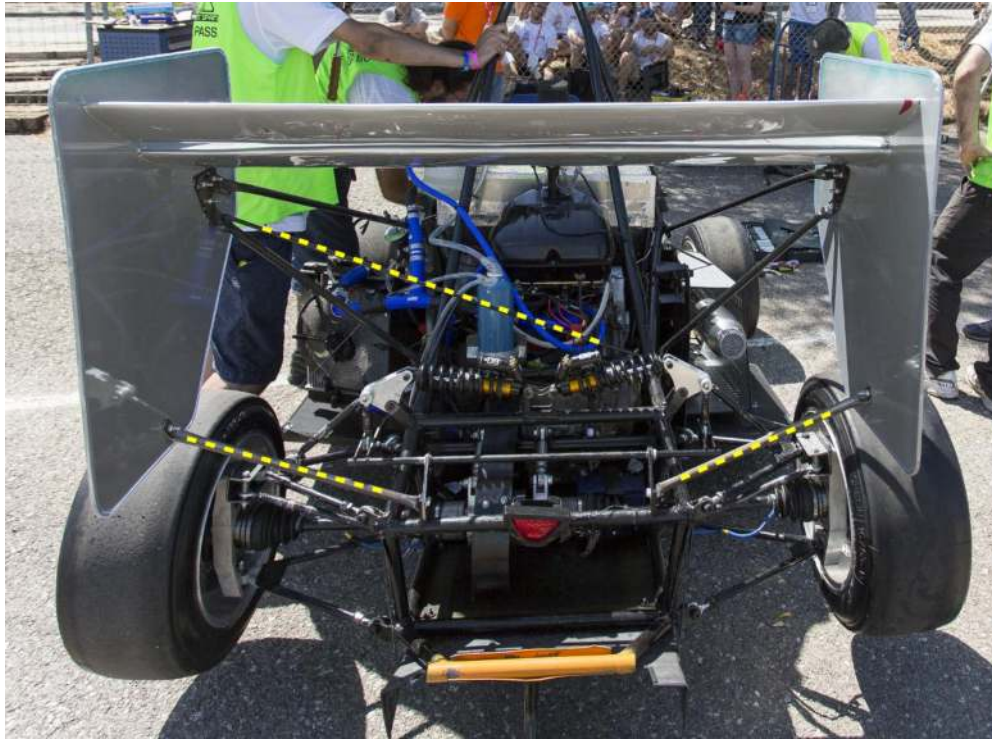


Figura 8.13: Soportes adicionales al ala trasera: tensor transversal añadido para contrarrestar la flexión de las orejetas de soporte de las barras y sujeciones laterales que evitan la vibración de la zona inferior del end-plate que los jueces de la verificación técnica obligaron a incorporar al ensamblaje en la propia competición. Fuente: Elaboración propia

8.4. Fabricación del morro y los difusores

La fabricación de las piezas del monoplaza que presentan curvatura, como el morro (ver Figura 8.14) y los difusores (ver Figura 8.15) del monoplaza es realizada mediante tejido seco a través del método húmedo.

El método húmedo se basa en la aplicación del tejido seco sobre el utillaje que actúa de molde, sobre el que de forma manual se realiza la aplicación de la matriz en estado líquido, cuyo curado comenzará al cabo de aproximadamente 1 hora.

Habitualmente los componentes de fibra de carbono que se producen mediante tejido seco y aplicación de resina, presentan unas muy buenas prestaciones, dado que la resina es inyectada al mismo tiempo que se realiza vacío en el conjunto de las telas sobre el utillaje. Esto es demasiado caro para una carrocería, cuya función principal es ser ligera y lo suficientemente resistente como para que estas no deflecten como consecuencia de los efectos aerodinámicos. Por ello se ha escogido la aplicación manual de la resina junto con la aplicación de vacío para

8. Producción



Figura 8.14: Modelo CAD del diseño final de las dos piezas que componen el morro del vehículo. Fuente: Elaboración propia

conseguir un conjunto compacto, aunque pierde resistencia respecto al método previo.

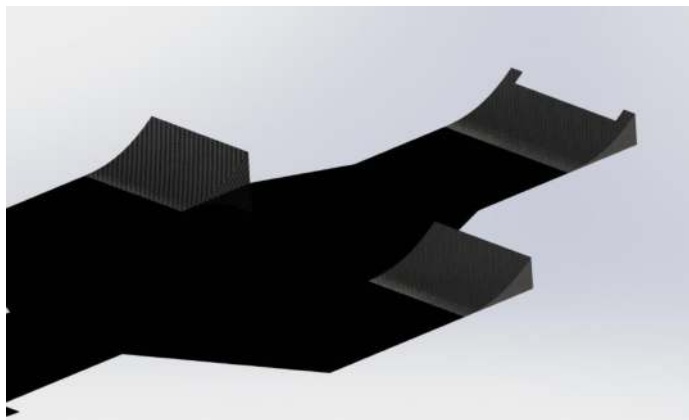


Figura 8.15: Modelo CAD del diseño final de los difusores del monoplaza en el fondo plano. Fuente: Elaboración propia

Aun así las propiedades mecánicas del conjunto siguen siendo muy buenas y apropiadas para el prototipo en cuestión.

El proceso de fabricación se inicia con la preparación del utillaje para el desmoldeo de las piezas que serán producidas posteriormente, de modo que toda la superficie del utillaje sobre la que se aplicará resina y tejido se recubre de un material que evitará que la resina penetre

8. Producción

en la espuma poliestileno y se rompa el molde al extraer la pieza final.

Tanto para la colocación de ese vinilo protector como para el corte de las telas que constituyen el refuerzo del material compuesto del morro, es necesario obtener un patronaje que se adapte correctamente a la forma del utillaje y que no genere arrugas en el producto final. Para formas sin curvatura pronunciada el método habitual es realizar un patronaje aproximado a partir del modelo CAD. Dado que en este caso los planos son curvados tridimensionalmente y no en un único plano, el patronaje es necesario realizarlo “in-situ” con plástico de bolsa de vacío (dentro de los materiales probados para la realización de estos patrones, la bolsa de vacío es la que se comporta de forma más similar al carbono en cuanto a la aparición de arrugas). Además para asegurar la superficie superior del morro, que es la que más destaca estéticamente y que junto con la zona del lateral dirigen el flujo aerodinámico hacia el resto del coche y puede generar problemas en cuanto al aire que es dirigido al radiador lateral del vehículo o hacia las aletas de refrigeración del conjunto de la electrónica. Se toma como mejor opción la división de la superficie del morro en 3 fragmentos por capa: dos tapas laterales y una cubierta que abarque la cara superior e inferior del utillaje. Se emplearon 4 capas de tejido 0-90 para darle integridad pero sin tener que resistir grandes esfuerzos dado que son carenados de función aerodinámica.



Figura 8.16: Tensores de cable de acero trenzado del lateral izquierdo del monoplaça. Fuente: Elaboración propia

8. Producción

Para los difusores no es necesario realizar un patronaje específico previo en otro material que no sea carbono, puesto que la forma es más sencilla y el tejido se adapta fácilmente al utillaje debido a la separación entre los grupos de fibras, que en el tejido usado es relativamente grande.

Para el montaje de los difusores se utiliza 1 escuadra metálica con orificios de métrica 6, que unen el lateral interior del difusor al fondo plano mediante 4 tornillos, y una pletina que sujeta el extremo libre del mismo al lateral externo del fondo plano. Así mismo para dar rigidez el conjunto (únicamente en su desplazamiento vertical hacia abajo dado que el fondo plano y los difusores están sometidos a succión hacia el suelo) se colocan unos tensores realizados con alambre de acero trenzado mediante un taladro de mano, lo que permite tensar a gusto y a medida el cable sin necesidad de prisioneros.

Dada la disposición diferente de los componentes en los laterales, la colocación de los cables no es simétrica, y el lateral del radiador cuenta con un tensor al difusor y uno con tensor manual similar al del alerón delantero que va del carenado al extremo del fondo (ver figura 8.16), mientras que el lateral del escape utiliza un tensor para el difusor y escuadras metálicas que unen la cubierta de seguridad del escape al fondo.

Capítulo 9
“*Timeline*”

La realización de todo el proceso que conlleva producir una carrocería y un paquete aerodinámico partiendo de cero requiere de una planificación clara, que ha de cumplirse escrupulosamente y que requiere de un reparto del tiempo entre los montadores tal que optimice los recursos.

La carga laboral se ha organizado en turnos de 8h de trabajo, de tal modo que cada empleado puede realizar un máximo de 1 turno por día, y puede realizar un máximo de 21 horas semanales (equivalente a 3 turnos) para evitar la fatiga y el cansancio en un proceso de fabricación de larga duración como es la fabricación de la piel externa de un monoplaza.

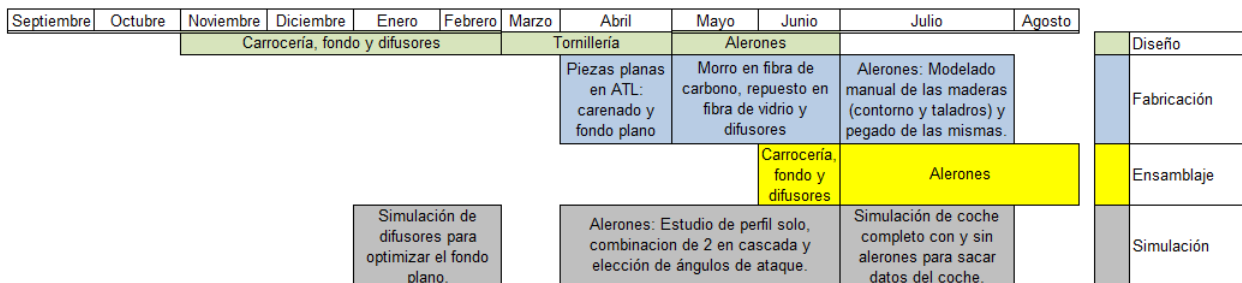


Figura 9.1: Timeline general seguida a lo largo de la temporada 2016. Fuente: Elaboración propia

La planificación mensual se muestra en la figura 9.1. La generalidad de esta planificación reside en la incertidumbre de plazos concretos a la semana por motivo de la disponibilidad de las máquinas y operarios de supervisión de la planta de FIDAMC en Getafe. Una vez la hoja de proceso es completada, ha de esperarse a que entre en la planificación junto con el resto de piezas, que nuestro patrocinador tenía planificadas para sus propios proyectos de desarrollo.

9. “Timeline”

Cuadro 9.1: Horas de trabajo invertidas en el diseño y fabricación de los componentes de la carrocería y el aero-kit del monoplaza de 2016. Fuente: Elaboración Propia

		Trabajadores	Semanas	Turnos	Horas	Total
Diseño y simulación	Carrocería	1	5	1/4	100	220
	Difusores	1	2	1/2	40	
	Alerones	1	3	1	60	
	Uniones	1	1	1/4	20	
Morro	Molde	4	4	2	320	467,2
	Laminado	2	2	1	80	
	Corte	1	1/5	1/4	4	
	Preparado y pintado	3	1	2	60	
	Vinilado	1			3	
	Ensamblado	2			1/5	
Difusores	Molde	3	1	2	60	164,2
	Laminado	2	1	1	40	
	Corte	1	1/5	1/4	4	
	Preparado y lacado	3	1	2	60	
	Ensamblado	2			1/5	
Piezas planas	Laminado	3	1	1	60	63
	Vinilado	1			3	
Alerones	Conformado de la madera	3	4	1	240	380,2
	Laminado	2	2	1	80	
	Preparado y pintado	3	1	2	60	
	Ensamblado	2			1/5	
Ensamblado y interferencias		3			8	24
TOTAL						1318,6 h

10.1. Presupuesto en piezas físicas

Para la realización del presupuesto de la fabricación de esta carrocería (sin contar las horas invertidas en la producción) se ha recurrido a los costes estandarizados según los criterios oficiales de FSAE, empleados como referencia para el informe de costes que se ha entregado en la competición.

El resultado final del presupuesto en material, utillaje y tornillería se muestra en el cuadro 10.1. Para más detalle consultar el anexo 2.

Estos documentos dividen los costes estandarizados en 3 partes:

- **Materiales:** se estandariza el coste de los materiales que se utilizan en la fabricación de todas las piezas del coche. Esto abarca desde rodamientos de marcas específicas hasta un coste estándar por lámina de fibra de carbono en función del peso o incluso por componentes de ciertos fabricantes.
- **Procesos:** se estandariza el coste de los procesos de fabricación que se llevan a cabo para crear el monoplaza. Abarca desde coste de ensamblar dos piezas con un cierto peso, si en ese ensamblaje hay o no interferencia, lijados, mecanizados, soldadura de cableados, inyección de plásticos, laminación de compuestos, aplicación de resina de diferentes formas entre muchos otros.
- **Tornillería:** Incluye aranderlas de diferentes métricas, tornillería y tuercas de diferentes tipos y calidades, fijadores de rodamientos y muchos otros complementos.
- **“Tooling”:** Incluye todo lo referente a utillajes empleados para realizar ciertos procesos para laminados, fundición y demás.

Estos costes para este caso particular han de realizarse teniendo en cuenta que todas las piezas del coche se han realizado por el equipo y por tanto cuentan como “*Made*”. Solo unos pocos componentes del automóvil que figuran como “*bought*” en las referencias empleadas, se cuentan como compradas, si no el equipo ha de realizar el estudio de costes como si ellos la hubiesen fabricado.

10. Presupuesto

Cuadro 10.1: Resumen del presupuesto realizado para el evento de costes de la competición.

Fuente: Elaboración propia

Parte	Pieza	Precio	Cantidad	Total por parte
Morro	Nosecone fixed	879,303	1	1335,484
	Nosecone removable	456,181	1	
Fondo plano	Undertray	843,734	1	843,734
Difusores	Lateral diffuser	380,09	2	907,863
	Rear Diffuser	147,683	1	
Carenado	Bodywork	381,58	2	763,16
Alerón delantero	Cover central mainplane FW	71,55	2	966,01
	Cover lateral mainplane FW	23,23	2	
	Cover lateral secondaryplane FW	28,19	2	
	Cover mainholder	75,79	1	
	Core central mainplane FW	96,94	2	
	Core lateral mainplane FW	73,22	2	
	Core lateral secondaryplane	44,96	2	
	Core mainholder	202,84	1	
	Front wing inner endplate	1,84	2	
	Front wing outer endplate	1,88	4	
Alerón trasero	Cover mainplane RW	200,08	1	962,21
	Cover secondaryplane RW	118,37	1	
	Core mainplane	419,3	1	
	Core secondaryplane RW	218,72	1	
	Rear wing endplate	2,87	2	
TOTAL				5778,461

Materiales

- Morro, carenados, fondo plano, difusores y fondo estructural: para las piezas de fibra de carbono se ha calculado el coste por peso y lámina de material compuesto. Esto se ha obtenido pesando la pieza y dividiendo el peso de la misma entre el número de capas.
- Recubrimiento de los alerones: para el recubrimiento de los planos de los alerones se ha utilizado GFRP, cuyo coste se calcula pesando el alerón antes de aplicar el recubrimiento y después, obteniendo el coste por lámina y peso.
- Núcleos de los alerones y endplates: realizados de madera de balsa maciza mecanizada (en el caso de los planos) y cortada por láser (en el caso de los endplates).

Procesos

- Morro, carenados, fondo plano, difusores y fondo estructural: el proceso seguido depende de si la pieza es plana o no:
-

10. Presupuesto

- Piezas planas: Para las piezas planas el proceso de fabricación del CFRP ha consistido en laminación manual, aplicación de vacío y cura en autoclave. Además se han incorporado en cada pieza realizada los taladros para su fijación en el automóvil. Además se ha incorporado un proceso de recubrimiento correspondiente a las lacas y pinturas aplicadas y el ensamblaje del mismo en función del peso.
 - Piezas con curvatura: Para las piezas con curvatura el proceso de fabricación del CFRP ha consistido en laminación manual, aplicación de vacío y cura en autoclave. Además se han incorporado en cada pieza realizada los taladros para su fijación en el automóvil. Además se ha incorporado de igual modo un proceso de recubrimiento correspondiente a las lacas y pinturas aplicadas y el ensamblaje del mismo en función del peso, así como múltiples procesos de preparación final de la superficie realizados previamente al pintado.
- Recubrimiento de los alerones: para el recubrimiento de los planos de los alerones se ha utilizado GFRP, cuyo coste se calcula pesando el alerón antes de aplicar el recubrimiento y después, obteniendo el coste por lámina y peso.
 - Núcleos de los alerones y endplates: realizados de madera maciza mecanizada (en el caso de los planos) y cortada por láser (en el caso de los endplates).

Tornillería

Toda la tornillería se ha seleccionado de calidad 8.8, mínima calidad exigida por la normativa.

Tooling

La forma que los jueces tienen de evaluar el coste de los utillajes empleados en la fabricación es mediante los costes estimados de las tablas aportadas por la competición para “tooling”. A este coste se le ha de aplicar el factor PVF o Factor de Volumen de Producción.

$$Coste_{pieza}^{utillaje} = \frac{Coste_{pieza}^{Tabulado}}{PVF \cdot Partes} \quad (10.1)$$

El valor de PVF depende de si la pieza es o no un monocasco. Para monocasco su valor es de 120 y para cualquier otro elemento su valor es 3000. En el caso de las piezas aerodinámicas que requieren de utillaje consideramos 1 molde por pieza (caso más restrictivo) y de tipo “lamination” de tal forma que obtenemos el coste de utillaje total de la pieza.

10.2. Presupuesto en trabajo de ingeniería

Dado que este proyecto ha sido realizado por ingenieros, han de tenerse en cuenta los honorarios de los mismos. Para ello se tiene en como referencia el salario de un ingeniero de

10. Presupuesto

proyectos de la Universidad Carlos III de Madrid, valorado en 22,8 \$ a la hora Sumando las tasas tanto de Seguridad Social como desempleo. Para un ingeniero supervisor se estima en 30 \$.

Toda la fabricación de las piezas se ha realizado por ingenieros y por tanto ha de considerarse el mismo coste horario expresado anteriormente no solo para el diseño sino para la producción.

En resumen, considerando las horas justificadas en el capítulo ” *Timeline* “ y las horas de supervisión del tutor de este proyecto de fin de carrera se obtiene el coste total expresado en el cuadro 10.2.

Cuadro 10.2: Coste total de la ingeniería invertida en el proyecto. Fuente: Elaboración propia.

	Horas	Coste horario
Ingeniero (Supervisor)	240	30
Ingeniero del proyecto	1318,6	22,8
Total: 37264,08 \$		

10.3. Presupuesto total

El presupuesto total se corresponde con la suma de las cantidades del presupuesto en trabajo de ingeniería y el presupuesto de piezas físicas para el total de las 1000 unidades de la tirada de fabricación. Esto completa un coste total de 5185725,08 \$ que por unidad de vehículo se corresponde con 5185,725 \$ de coste para la aerodinámica de cada unidad.

Capítulo 11

Desarrollos futuros

El presente trabajo de fin de grado constituye el primer diseño de carrocería para un monoplaza de Formula student que se ha llegado a fabricar en la Universidad Carlos III de Madrid. Es por esto que toda la fase de fabricación y ensamblaje ha sido una novedad para el equipo y los conocimientos aprendidos han de servir de base para los miembros futuros a la hora de desarrollar nuevos paquetes aerodinámicos y nuevas carrocerías.

Los desarrollos futuros a trabajar pueden dividirse en varios grupos:

11.1. Desarrollo en simulación CFD

Correlación entre la realidad y los resultados obtenidos mediante CFD

Para simplificar el primer estudio en profundidad de la aerodinámica del Formula Student del primer monoplaza no se han tenido en cuenta rugosidades del asfalto, de la pintura y de los neumáticos. Este factor puede ser importante a tener en cuenta sobre todo en la dinámica del fluido en la zona del fondo plano, donde la interacción con las rugosidades del asfalto pueden intervenir.

Además, sería interesante poder comprobar experimentalmente en un túnel de viento la carga aerodinámica total que genera el vehículo a la velocidad utilizada para el estudio con el fin de tocar los modelos de resolución de la simulación para conseguir la mayor correlación posible entre los datos físicos y de simulación.

Para realizar pequeños experimentos se esta planteando la posibilidad de construir un túnel de viento con una cámara de ensayos donde poder probar a escala 1:10 componentes del vehículo como son los perfiles alares o incluso el vehículo completo. Los modelos de testeo serán de impresión 3D en PLA o ABS con un tratamiento superficial para minimizar la rugosidad.

En poder del equipo hay además dos potentes herramientas de simulación fluidodinámica muy útiles:

11. Desarrollos futuros

- Desarrollo de un código en FreeFEM++: Partiendo de un código básico realizar barridos paramétricos, primero de figuras conocidas y luego de un vehículo con alerones.
- Desarrollo de un código en OpenFOAM en colaboración con una empresa de CFD que nos proporcionaría soporte.

11.2. Desarrollo de nuevas geometrías en la carrocería y el aerokit

La idea de desarrollo fundamental es la integración de la aerodinámica y la estructura del vehículo para crear un monocasco mixto que permita simplificar y aligerar el vehículo al mismo tiempo, permitiendo un flujo de aire mucho más controlado y dirigido (ver figura 11.1)

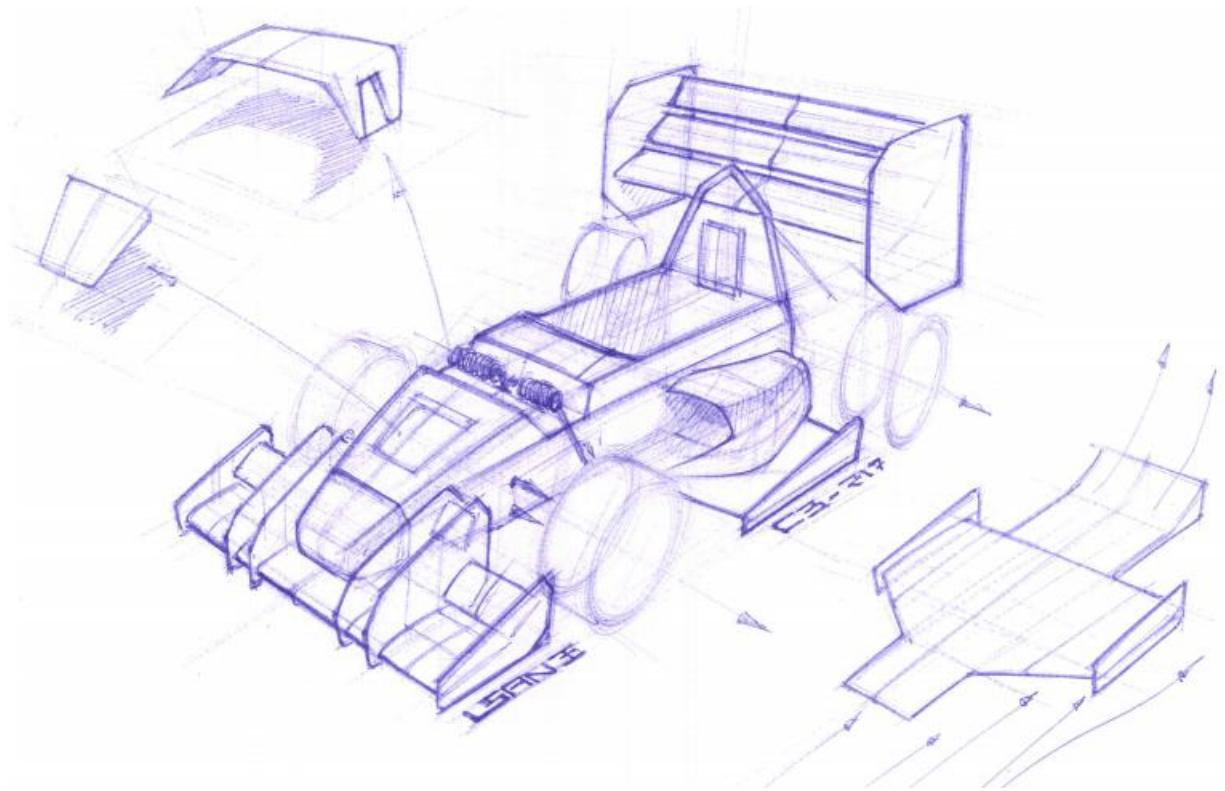


Figura 11.1: Concepto aerodinámico del monoplaza del equipo Formula UC3M para la temporada 2017. Fuente: Elaboración propia

Es prioritario el desarrollo de un atenuador de impactos propio para poder realizar un morro mucho más compacto y ahorrar espacio de esos 700 mm que impone la normativa para

11. Desarrollos futuros

poder optimizar el flujo de aire que circula por el alerón delantero y además ahorrar peso.

En cuanto al aero-kit se plantea el desarrollo natural de los alerones actualmente montados, con 3 planos en cascada en la zona del alerón delantero que se encuentra fuera de la zona de exclusión y con 2 en la zona de la rueda. Para el ala trasera sería interesante aumentar la carga colocando 3 planos en todo el ala, además de incorporar un DRS o “Drag Reduction System” ya sea activo (actuado por el piloto) o pasivo (con un resorte que en función de la resistencia levante el plano aerodinámico para aumentar la velocidad punta al reducir la resistencia al avance), o bien un montaje que permita regular el ángulo de ataque de todos los planos para colocar de ángulo de incidencia cero para la prueba de aceleración y de ángulo de incidencia máximo para la prueba de resistencia y de vuelta cronometrada.

Otra línea de estudio a desarrollar es la optimización del fondo plano, colocando un “Anti-difusor” que canalice el aire al fondo plano aumentando el flujo de aire que circula por el y generando más carga aerodinámica; así como la colocación de unas placas verticales en los laterales del fondo para permitir que el aire no escape del fondo y generar mucha mas carga.

En función de la colocación del radiador o no en los laterales y del material del que se disponga esta temporada sería interesante hacer kits intercambiables para los pontones laterales, uno en forma de ala colocado cerca del centro de gravedad para que la carga se reparta equitativamente entre ambos ejes y que el balance se realice en el propio ala; y unos pontones que canalicen el flujo aerodinámico hacia unos posibles radiadores en la zona trasera.

Carenar la zona de los amortiguadores es una prioridad, por lo que se debería intentar realizar una cubierta para el monocasco en esta zona que permita acceso facil y rápido. Esto va ligado al concepto de diseño que se ha de implantar para facilitar a los jueces la inspección técnica, desmontando el mínimo número de componentes posibles.

11.3. Mejora de las uniones

Aunque las uniones empleadas en el prototipo de esta temporada son eficientes en servicio, requieren de mucho tiempo y precisión en el montaje y desmontaje de los componentes, es por esto que una prioridad para la temporada 2017 es el uso de uniones atornilladas mediante “*dzus fasteners*” u otro tipo de uniones que permitan un montaje y desmontaje rápido de los componentes aerodinámicos.

Capítulo 12

Conclusiones

Mejorar el rendimiento del vehículo y su dinámica en pista a través del diseño de la carrocería y el paquete aerodinámico: Esto se realizará mediante un diseño que se base en una baja resistencia al avance con una alta carga aerodinámica.

Este objetivo ha sido cumplido y queda demostrado por:

- Relación $\frac{C_L}{C_D}$ de -2.1617, lo que constituye una relación entre carga aerodinámica y resistencia aerodinámica al avance notablemente elevada.
- Aumento de la fuerza lateral admitida por cada neumático como consecuencia de la carga aerodinámica, lo que permite tomar las curvas a mayor velocidad, o al tomarla igual desgastar menos los neumáticos.

Conseguir unos costes reales reducidos para el equipo y unos costes de acuerdo a los criterios de la competición bajos para el evento estático de costes.

En este caso el objetivo no se ha cumplido en el caso de los costes del “evento de costes”, puesto que la cifra ha ascendido a casi un 40 % del coste total tabulado del monoplaza.

El coste real del equipo ha sido muy reducido porque:

- El material y fabricación de los materiales compuestos ha sido realizada en FIDAMC, que ha cedido los materiales y ha permitido a dos miembros del equipo realizar la fabricación de las piezas en sus instalaciones.
- Los tubos metálicos de los alerones han sido donados por Tubos Mecánicos.
- Los materiales de adhesivos y madera han sido costeados por la Universidad.

Conseguir un estudio aerodinámico que permita aumentar la cantidad de puntos obtenida en el evento de justificación del diseño.

Dado que las justificaciones al diseño son fundamentadas en cálculos y que el diseño ayuda a mejorar el funcionamiento en pista del monoplaza, el juez del “*design*” nos expresó que el

12. Conclusiones

diseño aerodinámico del monoplaça ayudó positivamente a la puntuación del diseño en esta prueba estática.

Diseñar uniones sencillas y que permitan montar y desmontar las piezas rápido.

Este objetivo no se ha cumplido en los alerones aunque si se ha cumplido en el resto de elementos del vehículo. El ala delantera requería de mucha precisión a la hora de su anclaje como consecuencia de la soldadura de las orejetas de unión una vez realizados los taladros en la fibra de forma previa. Además las tuercas estriadas no eran suficiente para aguantar con el par de apriete y fueron sustituidas por tuercas con freno.

Conseguir que el vehículo sea atractivo para los patrocinadores y el público general de la competición.

Gracias a la pintura plateada que Mercedes-Benz Madrid proporcionó como patrocinio junto con los toques turquesa aplicados para imitar la pintura de los monoplazas actuales de Formula 1 de Mercedes y con el añadido de los vinilos monocromáticos en negro cedidos por Vinilo para todo, el automovil de la UC3M fue el centro de atención y de todas las fotografías durante la competición.

Anexo 1: Criterios de costes de la competición para elementos aerodinámicos.

En las siguientes tablas se muestran los criterios de costes impuestos por la competición para la realización del “*cost-report*”

Material ID	Material	Supplier	Category	Table Price	Unit 1	Unit 2	Comments
	Adhesive Film	Any	Composite	\$ -	m^2		Included in composite cost
	Aramid (Kevlar) Fiber, 1 Ply	Any	Composite	\$ 150,00	kg		Dry or Pre-Preg. Both include resin. Hand trimming allowed.
	Basalt Fiber, 1 Ply	Any	Composite	\$ 110,00	kg		Dry or Pre-Preg. Both include resin. Hand trimming allowed.
	Carbon Fiber Reinf Carbon	Any	Composite	\$ 0,0092	mm ^3		Note: actual cost is \$0.0092 even though display shows \$0.01 actual value is used in math.
	Carbon Fiber Reinf Silicon Carbide, Brake Pads	Any	Composite	\$ 0,0012	mm ^3		Note: actual cost is \$0.0012 even though display shows \$0.01 actual value is used in math.
	Carbon Fiber Reinf Silicon Carbide, Brake Rotors	Any	Composite	\$ 0,0092	mm ^3		Note: actual cost is \$0.0092 even though display shows \$0.01 actual value is used in math.
	Carbon Fiber, 1 Ply	Any	Composite	\$ 200,00	kg		Dry or Pre-Preg. Both include resin. Hand trimming allowed.
	Ceramic Matrix Composite, 1 Ply	Any	Composite	\$ 500,00	kg		Includes resin(matrix). Hand trimming allowed.
	Flax Fiber, 1 Ply	Any	Composite	\$ 110,00	kg		Dry or Pre-Preg. Both include resin. Hand trimming allowed.
	Glass Fiber, 1 Ply	Any	Composite	\$ 100,00	kg		e.g. S-Glass. Dry or Pre-preg. Both include resin. Hand trimming allowed.
	Honeycomb, Aluminum	Any	Composite	\$ 50,00	kg		Any cell size and density. Hand trimming allowed.
	Honeycomb, Cardboard	Any	Composite	\$ 10,00	kg		Any cell size and density. Hand trimming allowed.
	Honeycomb, Nomex	Any	Composite	\$ 125,00	kg		Any cell size and density. Hand trimming allowed.
	Honeycomb, Plastic	Any	Composite	\$ 20,00	kg		

	Polypropylene, High Modulus	Any	Composite	\$ 35,00	kg		Includes 'Tegris' and 'Innegra' fibers
	Structural Foam	Any	Composite	\$ 125,00	kg		Any cell size and density. Hand trimming allowed.
	Carbon Fiber Tubes, Purchased (All Cost as Made)	Any	Composites	\$ -	unit		This item should be cost as made whether the team made it or bought it. Please see Rule C3.12 for more information.
	Composite Panel Insert, Potted-in (NAS) Style, Torlon	Torlon	Composites	\$ 2,00	unit		Any Size
	Composite Panel Insert, Press Fit, Torlon	Torlon	Composites	\$ 2,00	unit		Any Size
	Composite Tubes, Purchased (All Cost as Made)	Any	Composites	\$ -	unit		This item should be cost as made whether the team made it or bought it. Please see Rule C3.12 for more information.
	Aluminum Metal Matrix Composite	Any	Raw Material	\$ 33,00	kg		
	Aluminum, Normal	Any	Raw Material	\$ 4,20	kg		e.g. 2024, 6061, A356, A380
	Aluminum, Premium	Any	Raw Material	\$ 4,20	kg		e.g. 7075
	Brass	Any	Raw Material	\$ 2,20	kg		
	Bronze	Any	Raw Material	\$ 2,20	kg		
	Copper	Any	Raw Material	\$ 2,20	kg		

	Cork	Any	Raw Material	\$ 0,0050	cm^3		
	Foam, Expanding, Non-Structural	Any	Raw Material	\$ 15,00	kg		Expanding foam such as is used for seats. Not to be used as core in a composite sandwich panel.
	Inconel	Any	Raw Material	\$ 22,00	kg		Please submit an Add Item Request
	Iron	Any	Raw Material	\$ 1,00	kg		
	Magnesium	Any	Raw Material	\$ 6,00	kg		
	Magnet, ferrite	Any	Raw Material	\$ 10,00	kg		
	Magnet, neodymium high strength	Any	Raw Material	\$ 80,00	kg		
	Nickel	Any	Raw Material	\$ 2,20	kg		
	Plastic, ABS	Any	Raw Material	\$ 3,30	kg		PVC, Thermoplastic
	Plastic, Acetal	Any	Raw Material	\$ 3,30	kg		Delrin, Turcite, Acetal Copolymer
	Plastic, Acrylic	Any	Raw Material	\$ 3,30	kg		Extruded, Cast
	Plastic, Flouropolymers	Any	Raw Material	\$ 3,30	kg		Teflon® PTFE, PTFE (polytetrafluoroethylene), ETFE (ethylene tetrafluoroethylene), PFA (perfluoroalkoxy fluorocarbon), CTFE (chlorotrifluoroethylene), PVDF (Kynar), ECTFE (Halar), FEP (fluorinated ethylene-propylene), Rulon®
	Plastic, Garolite	Any	Raw Material	\$ 3,30	kg		Industrial Laminates, Phenolics, Thermosets
	Plastic, Nylon	Any	Raw Material	\$ 3,30	kg		Nylon 6/6, Nylon 6/12
	Plastic, PEEK	Any	Raw Material	\$ 3,30	kg		
	Plastic, Polycarbonate	Any	Raw Material	\$ 3,30	kg		

	Plastic, Polyethylene	Any	Raw Material	\$ 3,30	kg		LDPE (low density polyethylene), UHMW (ultra high molecular weight), HDPE (high density polyethylene), VHMW (very high molecular weight)
	Plastic, Polyoxymethylene (POM)	Any	Raw Material	\$ 3,30	kg		Delrin
	Plastic, Polypropylene	Any	Raw Material	\$ 3,30	kg		
	Plastic, PVC	Any	Raw Material	\$ 3,30	kg		Type I, Type II, CPVC, Expanded Rigid PVC
	Rubber	Any	Raw Material	\$ 3,30	kg		
	Silicon Carbide (or any ceramic)	Any	Raw Material	AIR	kg		Please submit an Add Item Request
	Steel, Alloy	Any	Raw Material	\$ 2,25	kg		e.g. 4130, Chrome Moly, etc.
	Steel, Mild	Any	Raw Material	\$ 2,25	kg		e.g. 1010, 1025 etc.
	Steel, Stainless	Any	Raw Material	\$ 2,25	kg		
	Titanium	Any	Raw Material	\$ 22,00	kg		e.g. Ti6Al4V
	Wood, Hard	Any	Raw Material	\$ 0,004	cm^3		Oak, Maple, Birch
	Wood, Medium Density Fiberboard	Any	Raw Material	\$ 0,002	cm^3		MDF
	Wood, Soft	Any	Raw Material	\$ 0,003	cm^3		Balsa, Bass
	Aluminum Metal Matrix Composite (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 33,00	kg		
	Aluminum, Normal (per	Any	Raw Material	\$ 4,20	kg		e.g. 2024, 6061, A356, A380

	kg)		(per kg)						
	Aluminum, Premium (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 4,20	kg			e.g. 7075	
	Brass (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 2,20	kg				
	Bronze (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 2,20	kg				
	Copper (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 2,20	kg				
	Foam, Expanding, Non-Structural (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 15,00	kg			Expanding foam such as is used for seats. Not to be used as core in a composite sandwich panel.	
	Iron (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 1,00	kg				
	Magnesium (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 6,00	kg				
	Nickel (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 2,20	kg				
	Plastic, ABS (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 3,30	kg			PVC, Thermoplastic	
	Plastic, Acetal (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 3,30	kg			Delrin, Turcite, Acetal Copolymer	
	Plastic, Acrylic (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 3,30	kg			Extruded, Cast	
	Plastic,	Any	Raw	\$	kg			Teflon® PTFE, PTFE (polytetrafluoroethylene), ETFE (ethylene tetrafluoroethylene), PFA (perfluoroalkoxy	

	Fluoropolymers (per kg)		Material (per kg)	3,30			fluorocarbon), CTFE (chlorotrifluoroethylene), PVDF (Kynar), ECTFE (Halar), FEP (fluorinated ethylene-propylene), Rulon®
	Plastic, Garolite (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 3,30	kg		Industrial Laminates, Phenolics, Thermosets
	Plastic, Nylon (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 3,30	kg		Nylon 6/6, Nylon 6/12
	Plastic, PEEK (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 3,30	kg		
	Plastic, Polycarbonate (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 3,30	kg		
	Plastic, Polyethylene (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 3,30	kg		LDPE (low density polyethylene), UHMW (ultra high molecular weight), HDPE (high density polyethylene), VHMW (very high molecular weight)
	Plastic, Polyoxymethylene (POM) (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 3,30	kg		Delrin
	Plastic, Polypropylene (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 3,30	kg		
	Plastic, PVC (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 3,30	kg		Type I, Type II, CPVC, Expanded Rigid PVC
	Rubber (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 3,30	kg		
	Steel, Alloy (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 2,25	kg		e.g. 4130, Chrome Moly, etc.
	Steel, Mild (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 2,25	kg		e.g. 1010, 1025 etc.
	Steel, Stainless (per	Any	Raw Material	\$ 2,25	kg		

	kg)		(per kg)						
	Titanium (per kg)	Any	Raw Material (per kg)	\$ 22,00	kg			e.g. Ti6Al4V	

Process ID	Process	Unit Cost	Unit	Category	Tooling Required	Near Net Shape	Multiplier Type Used	Comments
	None	\$ -						
	Die Casting	\$ 4,00	kg	Basic Forming	Yes	Yes		
	Investment Casting	\$ 8,00	kg	Basic Forming		Yes		
	Plastic injection molding	\$ 2,75	kg	Basic Forming	Yes	Yes		
	Powder Metal Forming	\$ 3,00	kg	Basic Forming	Yes	Yes		
	Rapid Prototype - Metal	\$ 330,00	kg	Basic Forming		Yes		Updated terminology for clarity
	Rapid Prototype - Plastic	\$ 32,00	kg	Basic Forming		Yes		Updated terminology for clarity
	Sand Casting	\$ 3,00	kg	Basic Forming	Yes			
	Vacuum Form	\$ 10,00	m^2	Basic Forming	Yes			
	Exhaust System Ceramic Coating	\$ 25,00	m	Coating				Linear distance of coating on exhaust header and tubing including all runners, etc. Material included.
	Cure, Autoclave	\$ 50,00	m^2	Composite	Yes			Includes all consumable materials and labor.
	Cure, Oven	\$ 20,00	m^2	Composite	Yes			Includes all consumable materials and labor.
	Cure, Room Temperature	\$ 10,00	m^2	Composite	Yes			Includes all consumable materials and labor.
	Lamination, Filament Winding	\$ 25,00	kg	Composite				Cost based on finished part mass of composite fibers and resin.
	Lamination, Manual	\$ 35,00	m^2	Composite				
	Potting	\$	cm	Composite				Cost based on perimeter

		0,50							of insert. Includes potting compound material cost
	Resin application, Infusion Molding	\$ 2,50	m^2	Composite					
	Resin application, Manual	\$ 5,00	m^2	Composite					If prepreg composites are used do not included the resin application step.
	Attach Wire, Fork	\$ 0,25	unit	Electrical - Attach Wires					
	Attach Wire, Quick connect terminal	\$ 0,10	unit	Electrical - Attach Wires					
	Attach Wire, Ring	\$ 0,48	unit	Electrical - Attach Wires					
	Attach Wire, Solder wire, bent	\$ 0,35	unit	Electrical - Attach Wires					
	Attach Wire, Solder wire, not bent	\$ 0,52	unit	Electrical - Attach Wires					
	Attach Wire, Terminated wire with screw	\$ 0,35	unit	Electrical - Attach Wires					
	Attach Wire, Terminated wire with screw and nut	\$ 0,52	unit	Electrical - Attach Wires					
	Attach Wire, Wire to screw	\$ 0,48	unit	Electrical - Attach Wires					
	Attach Wire, Wire to screw with nut	\$ 0,65	unit	Electrical - Attach Wires					
	Attach Wire, Wire to terminal block	\$ 0,35	unit	Electrical - Attach Wires					
	Attach Wire, Wire wrap around terminal post	\$ 0,27	unit	Electrical - Attach Wires					
	Install Tie Wrap (Zip Tie, Cable Clamp)	\$ 0,09	unit	Electrical - Bundle Install					
	Wire Dressing (Install and route)	\$ 1,00	m	Electrical - Bundle Install					

	Insert Bundle Into Tube or Sleeve	\$ 0,02	m	Electrical - Bundle Processing				
	Install Adhesive Cable Clamp	\$ 0,19	unit	Electrical - Bundle Processing				
	Lace	\$ 0,15	unit	Electrical - Bundle Processing				
	Shrink Tube	\$ 0,15	cm	Electrical - Bundle Processing				
	Taping Wire Bundle	\$ 0,04	cm	Electrical - Bundle Processing				
	Connector Install, Circular, Bayonet	\$ 0,11	unit	Electrical - Connections				
	Connector Install, Circular, Friction	\$ 0,14	unit	Electrical - Connections				
	Connector Install, Circular, Screw Thread	\$ 0,24	unit	Electrical - Connections				
	Connector Install, Square, Friction	\$ 0,14	unit	Electrical - Connections				
	Connector Install, Square, Latch/Snap-on Type	\$ 0,17	unit	Electrical - Connections				
	Connector Install, Square, Screw (x2)	\$ 0,50	unit	Electrical - Connections				
	Connector Install, Square, Spring Clip	\$ 0,20	unit	Electrical - Connections				
	Lay Wire - Control	\$ 0,02	m	Electrical - Layout				
	Lay Wire - Power	\$ 0,03	m	Electrical - Layout				
	Lay Wire - Signal	\$ 0,02	m	Electrical - Layout				
	Crimp Wire	\$ 0,17	unit	Electrical - Prep				
	Cut wire	\$ 0,08	unit	Electrical - Prep				
	Strip Multi-Conductor	\$ 0,13	wire(s)	Electrical - Prep				

	Strip Wire	\$ 0,08	unit	Electrical - Prep				
	Tin Wire	\$ 0,13	unit	Electrical - Prep				
	Connector Assembly, Crimp	\$ 0,36	contacts	Electrical - Wire in Connector				
	Connector Assembly, Solder	\$ 0,24	contacts	Electrical - Wire in Connector				
	Hand - Start Only	\$ 0,12	unit	Fasteners				
	Hand, Loose <= 25.4 mm	\$ 0,50	unit	Fasteners				
	Hand, Loose <= 6.35 mm	\$ 0,25	unit	Fasteners				
	Hand, Loose > 25.4 mm	\$ 0,75	unit	Fasteners				
	Hand, Tight <= 6.35 mm	\$ 0,50	unit	Fasteners				
	Power Tool <= 25.4 mm	\$ 0,25	unit	Fasteners				Fastener Installation
	Power Tool <= 6.35 mm	\$ 0,25	unit	Fasteners				Fastener Installation
	Power Tool > 25.4 mm	\$ 0,50	unit	Fasteners				Fastener Installation
	Ratchet <= 25.4 mm	\$ 0,75	unit	Fasteners				Fastener Installation
	Ratchet <= 6.35 mm	\$ 0,50	unit	Fasteners				Fastener Installation
	Ratchet > 25.4 mm	\$ 1,50	unit	Fasteners				Fastener Installation
	Reaction Tool <= 25.4 mm	\$ 0,25	unit	Fasteners				
	Reaction Tool <= 6.35 mm	\$ 0,25	unit	Fasteners				
	Reaction Tool > 25.4 mm	\$ 0,50	unit	Fasteners				
	Screwdriver < 1 Turn	\$	unit	Fasteners				Fastener Installation

	Assemble, 10 kg, Line-on-Line	\$ 1,25	unit	Labor				Assembly	
	Assemble, 10 kg, Loose	\$ 0,63	unit	Labor				Assembly	
	Assemble, 15 kg, Interference	\$ 2,81	unit	Labor				Assembly	
	Assemble, 15 kg, Line-on-Line	\$ 1,88	unit	Labor				Assembly	
	Assemble, 15 kg, Loose	\$ 0,94	unit	Labor				Assembly	
	Assemble, 20 kg, Interference	\$ 3,75	unit	Labor				Assembly	
	Assemble, 20 kg, Line-on-Line	\$ 2,50	unit	Labor				Assembly	
	Assemble, 20 kg, Loose	\$ 1,25	unit	Labor				Assembly	
	Assemble, 3 kg, Interference	\$ 0,56	unit	Labor				Assembly	
	Assemble, 3 kg, Line-on-Line	\$ 0,38	unit	Labor				Assembly	
	Assemble, 3 kg, Loose	\$ 0,19	unit	Labor				Assembly	
	Assemble, 5 kg, Interference	\$ 0,94	unit	Labor				Assembly	
	Assemble, 5 kg, Line-on-Line	\$ 0,63	unit	Labor				Assembly	
	Assemble, 5 kg, Loose	\$ 0,31	unit	Labor				Assembly	
	Brake Bleed - Per Bleeder Valve	\$ 2,50	unit	Labor					
	Brush Apply	\$ 0,02	cm^2	Labor					For use with glue, adhesives, paint, resin, etc.
	Cut (scissors, knife)	\$ 0,06	cm	Labor					
	Engine first start, includes fuel	\$ 50,00	unit	Labor					Includes Fuel

	Heat Treatment	\$ -	unit	Labor				It is not necessary to include any cost for heat treatment. Included for reference only.
	Liquid Applicator Gun	\$ 0,02	cm	Labor				For use with glue, adhesives, paint, resin, etc.
	Liquid Apply - Pour Expanding Foam	\$ 2,00	m^3	Labor	Yes - if not fully captured			Cost based on volume of fully expanded final part before trimming. Added note explaining that if final part is foam (not fully contained in something else) than tooling is required and added tooling for liquid pour operations to tooling table.
	Liquid Apply - Spot	\$ 0,10	unit	Labor				For use with glue, adhesives, paint, resin, etc.
	Machining Setup, Change	\$ 0,65	unit	Labor				The quantity for this process may be used to scale the cost to the number of parts yielded from each setup. For example if 4 parts can be machined from a single plate then the quantity per part may be set to 0.25 to spread the cost out over each part.
	Machining Setup, Install and remove	\$ 1,30	unit	Labor				The quantity for this process may be used to scale the cost to the number of parts yielded from each setup. For

								example if 4 parts can be machined from a single plate then the quantity per part may be 0.25 to spread the cost out over each part.
	Riveting	\$ 0,25	unit	Labor				
	Safety Wire, Install	\$ 0,60	unit	Labor				Unit includes each item or hole included in safety wire path. One item could include bolt, nut, hole in an axle, hub, etc.
	Suspension Setup - Solid Axle (per corner)	\$ 4,50	unit	Labor				
	Suspension Setup- Independent Susp. (per corner)	\$ 8,75	unit	Labor				
	Tape	\$ 0,80	m	Labor				
	Broach, External	\$ 0,50	cm	Material Removal				Linear distance of broach
	Broach, Internal	\$ 0,50	cm	Material Removal				Linear distance of broach
	Drilled hole < 50.8 mm dia.	\$ 0,70	hole	Material Removal			Drill & Tap	Holes >= 50.8 mm must be machined
	Drilled holes < 25.4 mm dia.	\$ 0,35	hole	Material Removal			Drill & Tap	
	EDM - Plunge	\$ 0,30	cm^3	Material Removal			Machining	
	EDM - Wire	\$ 0,20	cm	Material Removal			Machining	
	Gear Shaping (hobbing)	\$ 0,50	cm	Material Removal			Machining	Linear travel of gear shaping. A half-shaft end 5cm long would cost \$2.50

	Grind, Cylindrical	\$ 0,15	cm^2	Material Removal			Machining	0.25mm machine stock
	Grind, Flat	\$ 0,15	cm^2	Material Removal			Machining	0.25mm machine stock
	Grind, Profile	\$ 0,15	cm^2	Material Removal			Machining	0.25mm machine stock
	Hand Finish - Material Removal	\$ 0,20	cm^3	Material Removal			Machining	Hand sanding, grinding, shaping. Any manual material removal process.
	Hand Finish - Surface Preparation	\$ 0,02	cm^2	Material Removal			Machining	Hand sanding, cleaning or other operations used to prepare the surface, such as for bonding.
	Knurling	\$ 0,10	cm	Material Removal			Machining	Linear distance of knurl on part (length of knurl, not diameter)
	Laser Cut	\$ 0,01	cm	Material Removal			Machining	Revised cost for 2011 Competition Years
	Machining	\$ 0,04	cm^3	Material Removal			Machining	Machining can include roughing (1.5mm machine stock min., Tol +/- 0.5mm) and/or finishing (0.5mm machine stock min.). All parts should include the minimum 1.5mm material stock except parts produced by "near net shaped" basic forming processes. It is not necessary to break down rough and finish cuts, only use the correct minimum stock in the calculation of material removed.

	Mill - Form Cutter	\$ 0,10	cm	Material Removal			Machining	0.5mm machine stock min. Linear distance of cutter motion.
	Non-metallic cutting <= 25.4 mm	\$ 0,35	cut	Material Removal			Machining	
	Non-metallic cutting <= 50.8 mm	\$ 0,70	cut	Material Removal			Machining	
	Non-metallic cutting <= 76.2 mm	\$ 1,05	cut	Material Removal			Machining	
	Non-metallic cutting > 76.2 mm	\$ 1,40	cut	Material Removal			Machining	
	Plasma Cutting	\$ 0,10	cm	Material Removal			Machining	
	Reamed hole	\$ 0,35	hole	Material Removal			Machining	Reamed holes must first be drilled or machined
	Saw or tubing cuts	\$ 0,40	cm	Material Removal			Machining	
	Tapping holes	\$ 0,35	hole	Material Removal			Drill & Tap	
	Threading, External (machining)	\$ 0,10	cm	Material Removal				Linear distance of thread (length of bolt thread, not diameter)
	Threading, Internal (machining)	\$ 0,10	cm	Material Removal				Linear distance of thread (length of bolt thread, not diameter)

ID	Tooling Process	Tool	Cost	Unit	Comments
1	All	None	\$ -		
2	Die Casting	Die Casting - Die	\$ 10.000	die	Per die not die set. Minimum number of dies is 2 per die set.
3	Lamination	Lamination - Aluminum Tool	\$ 20.000	m^2	Use surface area of tool that is used to form part geometry.
4	Lamination	Lamination - Composite Tool	\$ 10.000	m^2	Use surface area of tool that is used to form part geometry.
5	Lamination	Lamination - Flat Panel Tool	\$ 1.500	m^2	Use surface area of tool that is used to form part geometry. To use this tooling type composite part must have geometry that is possible to obtain from sheet metal tool with no complex curvature or shape. For example flat panel parts are allowed or parts with curvature in only one axis.
6	Lamination	Lamination - Steel Tool	\$ 40.000	m^2	Use surface area of tool that is used to form part geometry.
7	Plastic injection molding	Plastic injection molding - Die	\$ 10.000	die	Per die not die set.
8	Powder Metal Forming	Powder Metal Forming - Die	\$ 10.000	die	Per die not die set.
9	Sand Casting	Sand Casting - Die	\$ 10.000	die	Per die not die set.
10	Sand Casting	Sand Casting - Sand Core Package	\$ 5.000	core	Per core not core package.
11	Welds	Welds - Welding Fixture	\$ 500	point	Each point is a pickup or support point.
12	Braze	Brazing Fixture	\$ 500	point	Each point is a pickup or support point.
13	Liquid Apply - Pour Expanding Foam	Pouring Fixture	\$ 10.000	m^2	Use surface area of tool that is used to form part geometry, e.g. fully expanded final volume.

ProcessMultiplierID	Process Multiplier	Multiplier	Use	Comments
1	Assemble - Length > 0.5m	1,25	Assembly	
2	Disassemble	0,8	Assembly	To be used when removing parts or fasteners
3	Fastener Engagement Length > 2D	1,25	Fastener Installation	
4	Fastener Engagement Length > 4D	1,5	Fastener Installation	
5	Machine - Hole Length >= 4D	1,5	Drill, Tap	
6	Machine - Hole Length >= 8D	3	Drill, Tap	
7	Material - Composite	2	Machining	
8	Material - Aluminum	1	Machining	
9	Material - Brass	0,8	Machining	
10	Material - Bronze	1,33	Machining	
11	Material - Cast Iron	2,5	Machining	
12	Material - Foam	0,33	Machining	
13	Material - Inconel	4	Machining	
14	Material - Magnesium	0,8	Machining	
15	Material - MMC	4,25	Machining	
16	Material - Nickel	1,33	Machining	
17	Material - Plastic	0,5	Machining	
18	Material - Stainless Steel	3,75	Machining	
19	Material - Steel	3	Machining	
20	Material - Titanium	3,65	Machining	
21	Material - Wood (Hard or soft)	0,5	Machining	
22	Repeat 2	2		Optional, to show repetition of processes.
23	Repeat 3	3		Optional, to show repetition of processes.
24	Repeat 4	4		Optional, to show repetition of processes.
25	Repeat 5	5		Optional, to show repetition of processes.
26	Repeat 6	6		Optional, to show repetition of processes.

27	Repeat 7		7		Optional, to show repetition of processes.
28	Repeat 8		8		Optional, to show repetition of processes.
29	Repeat 9		9		Optional, to show repetition of processes.
30	Repeat 10		10		Optional, to show repetition of processes.

Anexo 2: Costes presentados a la competición de la parte referente a este trabajo fin de grado.

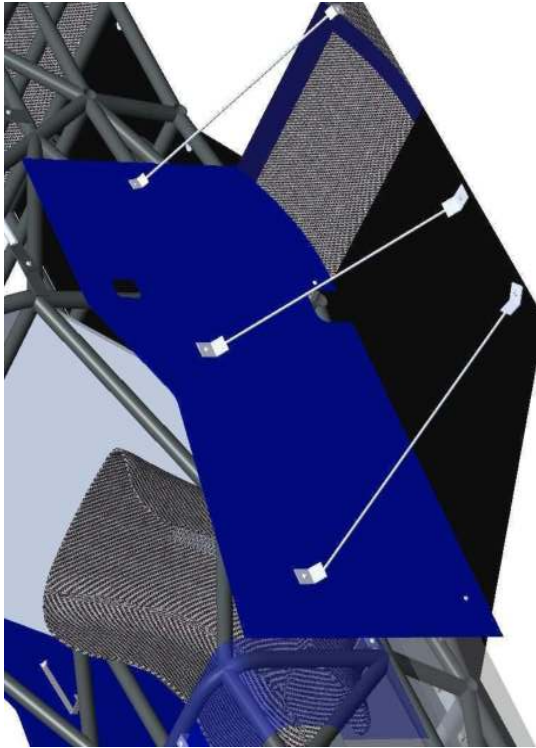
A continuación se muestra el coste detallado de cada una de las piezas que componen el conjunto aerodinámico del vehículo.

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
10	Carbon Fiber, 1 Ply	Bodywork Skin	\$ 200,00	0,1824	kg							6	\$ 218,88
												Sub Total	\$ 218,880

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	Lamination, Manual	Deposition of plies	\$ 35,00	0,6	1		1 \$ 21,00	
20	Vacuum Form	Compaction of First Ply	\$ 10,00	0,6	1		1 \$ 6,00	
30	Cure, Autoclave	Cure	\$ 10,00	0,6	1		1 \$ 6,00	
40	Drilled hole < 50.8 mm dia.	Holes for fitting	\$ 0.70	1.2	5		1.2 \$ 4.20	
50	Hand Finish - Material Removal	Bodywork	\$ 0.20	6.24	1		1 \$ 1.25	
60	Hand Finish - Surface preparation	Surface preparation for fitting and vinyl	\$ 0.70	2.52	1		2 \$ 3.53	
70	Brush Apply	Paint/vinyl	\$ 0.02	6000	1		1 \$ 120.00	
80	Assemble, 1 kg. Line-on-Line		\$ 0.13	1	1	Assembly Length > 0.5m	1.25 \$ 0.16	
							Sub Total	\$ 162.13

ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total
10	Bolt, Grade 8.8	Fitting to the tabs of the frame	\$ 0,02		5 mm		16 mm	2	\$ 0,04
20	Nut, Grade 8.8	Together with item 10	\$ 0,02		5 mm			2	\$ 0,05
								Sub Total	\$ 0,09

ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIndd	Sub Total	
10	Lamination	Mould to give the carbon fiber the final shape. Aluminium tool	\$ 10.000,00	0,14159544	1	3000	1	\$ 0,47	
								Sub Total	\$ 0,47



Carlos III University of Madrid
Frame & Body
Body
Structural Floorboard
P3012
AA
Structural Floorboard

373

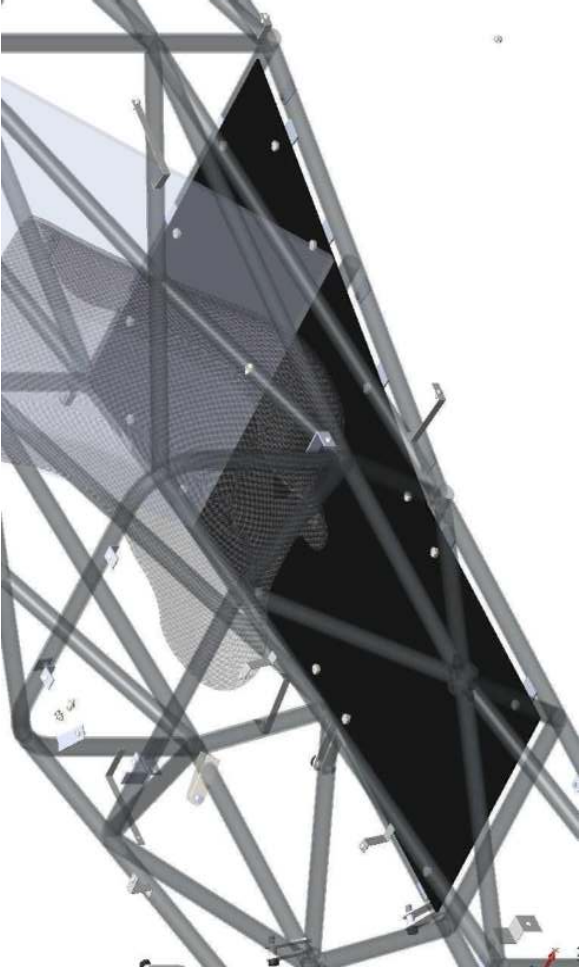
1

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
10	Carbon Fiber, 1 Ply	Ply laminated on the ATL machine	\$	200.00	0.1824 kg							24	\$ 875.52
												Sub Total	\$ 875.520

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	lamination, Manual	Deposition of plies	\$	35.00	0.5	1	\$	17.50
20	Vacuum Form	Compaction of First Ply	\$	10.00	0.6168	1	\$	6.17
30	Cure, Autoclave	Norecone first layer Cure	\$	10.00	0.6168	1	\$	6.17
40	Machining	10cm diam holes	\$	0.04	47.124	13	\$	71.63
50	Brush Apply	Paint/Vynil	\$	0.02	6000	1	\$	120.00
60	Assemble, 1 kg. Line-on-Line	Assemble - Length > 0.5m	\$	0.13	1	1	\$	0.16
								Sub Total \$ 221.62

ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total
10	bolt, Grade 8.8	Fitting to the tabs of the frame	\$	0.02	8 mm	16 mm		15	\$ 0.32
20	nut, Grade 8.8	Together with item 10	\$	0.02	8 mm			15	\$ 0.37
								Sub Total \$ 0.69	

ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	Fractcid	Sub Total
10	Lamination	Mould to give the carbon fiber the final shape, Aluminium tool	\$ 10.000,00	0,5132087	1		3000	\$ 1,71
Sub Total \$								1,71

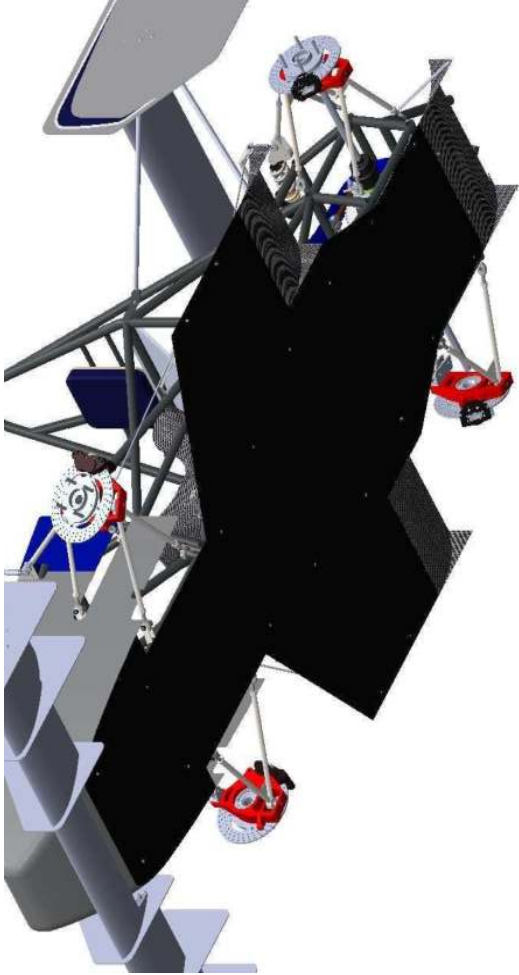


ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
10	Carbon Fiber, 1 Ply	Ply laminated on the ATL machine	\$ 200,00	0,1824	kg								\$ 218,88
												Sub Total	\$ 218,880

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	Lamination, Manual	Deposition of plies	\$ 35,00	2,3568	1		1	\$ 82,49
20	Vacuum Form	Compaction of First Ply	\$ 10,00	2,3568	1		1	\$ 23,57
30	Cure, Autoclave	Nosecone first layer Cure	\$ 10,00	2,3568	1		1	\$ 23,57
40	Drilled hole < 50.8 mm dia.	Holes for fitting	\$ 0,70	1,2	18		1	\$ 15,12
50	Brush Apply	Paint/vynil	\$ 0,02	23568	1		1	\$ 471,36
60	Assemble, 1 kg. Line-on-Line		\$ 0,13	1	1	Assemble - Length > 0.5m	1,25	\$ 0,16
								Sub Total \$ 616,26

ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total
10	Bolt, Grade 8.8	Fitting to the tabs of the frame	\$	0,02	5mm		16mm	16	\$ 0,35
20	Nut, Grade 8.8	Together with item 10	\$	0,02	5mm			16	\$ 0,39
								Sub Total	\$ 0,74

ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	Fracncid	Sub Total
10	Lamination	Mould to give the carbon fiber the final shape. Aluminium tool	\$ 10.000,00	2,3568	1	3000	1	\$ 7,86
								Sub Total \$ 7,86



ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
10	Glass Fiber, 1 Ply	Wing reinforcement skin	\$ 100.00	0.14616	kg							2	\$ 29,23
												Sub Total	\$ 29,232

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	Vacuum Form	Compaction	\$ 10.00	0.192	1	1	1	\$ 1,92
20	Cure, Room Temperature	Cure	\$ 10.00	0.192	1	1	1	\$ 1,92
30	Hand Finish - Surface preparation	Preparation for vinyl installation	\$ 0.02	1923,7284	1	1	1	\$ 38,47
40	Brush Apply	Paint/vynil	\$ 0.02	0.192	1	1	1	\$ 0,00
								Sub Total \$ 42,32

ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total
									\$ -
									Sub Total \$ -

ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIncid	Sub Total
								\$ -
								Sub Total \$ -



University

System

Assembly

Part

P/N Base

Suffix

Details

Carlos III University of Madrid

Frame & Body

Body

Cover lateralsecondaryplane FW

P3016

AA

Cover lateralsecondaryplane FW

Car #

373

Part Cost

Qty

\$ 28,191

2

Extended Cost

\$ 56,383

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
10	Glass Fiber, 1 Ply	Wing reinforcement skin	\$ 100,00	0,0576	kg							2	\$ 11,52
												Sub Total	\$ 11,520

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	Vacuum Form	Compaction	\$ 10,00	0,0756	1	1	\$ 0,76	1 \$ 0,76
20	Cure, Room Temperature	Cure	\$ 10,00	0,0756	1	1	\$ 0,76	1 \$ 0,76
30	Hand Finish - Surface preparation	Preparation for vinyl installation	\$ 0,02	757,8912	1	1	\$ 15,16	1 \$ 15,16
40	Brush Apply	Paint/vynil	\$ 0,02	0,0756	1	1	\$ 0,00	1 \$ 0,00
								Sub Total \$ 16,67

ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total
									\$ -
									Sub Total \$ -

ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIncd	Sub Total
								\$ -
								Sub Total \$ -



University	Carlos III University of Madrid			Car #	373	Part Cost	\$ 23,228
System	Frame & Body					Qty	2
Assembly	Body						
Part	Cover lateralmainplane FW					Extended Cost	\$ 46,456
P/N Base	P3017						
Suffix	AA						
Details	Cover lateralmainplane FW						

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
10	Glass Fiber, 1 Ply	Wing reinforcement skin	\$ 100,00	0,0576	kg							2	\$ 11,52
												Sub Total	\$ 11,520

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	Vacuum Form	Compaction	\$ 10,00	0,0528	1	1	\$ 0,53	1 \$ 0,53
20	Cure, Room Temperature	Cure	\$ 10,00	0,0528	1	1	\$ 0,53	1 \$ 0,53
30	Hand Finish - Surface preparation	Preparation for vinyl installation	\$ 0,02	532,5456	1	1	\$ 10,65	1 \$ 10,65
40	Brush Apply	Paint/vynil	\$ 0,02	0,0528	1	1	\$ 0,00	1 \$ 0,00
						Sub Total	\$ 11,71	

ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total
								\$ -	
								Sub Total	\$ -

ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIncl	Sub Total
								\$ -
							Sub Total	\$ -



University
Carlos III University of Madrid

System Frame & Body

Assembly Body

Part Cover Mainholder

P/N Base	P3018
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
9	9
10	10
11	11
12	12
13	13
14	14
15	15
16	16
17	17
18	18
19	19
20	20
21	21
22	22
23	23
24	24
25	25
26	26
27	27
28	28
29	29
30	30
31	31
32	32
33	33
34	34
35	35
36	36
37	37
38	38
39	39
40	40
41	41
42	42
43	43
44	44
45	45
46	46
47	47
48	48
49	49
50	50
51	51
52	52
53	53
54	54
55	55
56	56
57	57
58	58
59	59
60	60
61	61
62	62
63	63
64	64
65	65
66	66
67	67
68	68
69	69
70	70
71	71
72	72
73	73
74	74
75	75
76	76
77	77
78	78
79	79
80	80
81	81
82	82
83	83
84	84
85	85
86	86
87	87
88	88
89	89
90	90
91	91
92	92
93	93
94	94
95	95
96	96
97	97
98	98
99	99
100	100

Suffix	AA
--------	----

Cover Mainholder

373

373

Part Cost

Qty

\$ 75,795

1

Extended Cost

\$ 75,795

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
10	Glass Fiber, 1 Ply	Wing reinforcement skin	\$ 100,00	0,136	kg							2	\$ 27,20
												Sub Total	\$ 27,200

Item Order	Process	Use	Unit Cost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	Vacuum Form	Compaction	\$ 10.00	0,216	1		1 \$	2,16
20	Cure, Room Temperature	Cure	\$ 10.00	0,216	1		1 \$	2,16
30	Hand Finish - Surface preparation	Preparation for vinyl installation	\$ 0.02	2213,52	1		1 \$	4,27
40	Brush Apply	Paint/vynil	\$ 0.02	0,216	1		1 \$	0,00
							Sub Total	\$ 48,59

ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total
									\$ -
Sub Total									\$ -

ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIncl	Sub Total
							\$	-
							Sub Total	\$ -

University	Carlos III University of Madrid			Car #	373	Part Cost	\$ 118,367
System	Frame & Body					Qty	1
Assembly	Body						
Part	Cover secondaryplane RW					Extended Cost	\$ 118,367
P/N Base	P3020						
Suffix	AA						
Details	Cover secondaryplane RW						

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
10	Glass Fiber, 1 Ply	Wing reinforcement skin	\$ 100,00	0,15912	kg							2	\$ 31,82
												Sub Total	\$ 31,824

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	Vacuum Form	Compaction	\$ 10,00	0,3936	1		1	\$ 3,94
20	Cure, Room Temperature	Cure	\$ 10,00	0,3936	1		1	\$ 3,94
30	Hand Finish - Surface preparation	Preparation for vinyl installation	\$ 0,02	3933,18	1		1	\$ 78,66
40	Brush Apply	Paint/vynil	\$ 0,02	0,3936	1		1	\$ 0,01
							Sub Total	\$ 86,54

ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total
								\$ -	
								Sub Total	\$ -

ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIncl'd	Sub Total
								\$ -
							Sub Total	\$ -



Carlos III University of Madrid
Frame & Body
Body
Fitting rod for rear wing
P3021
AA
Details Fitting rods for the rear wing

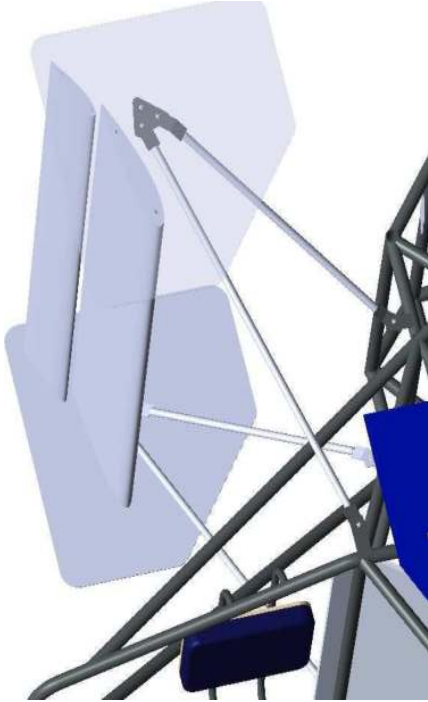
373
2

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
10	Steel, Mild	Rod	\$ 2,25	0,548	kg							2	\$ 2,47
20	Steel, Mild	Tab double hole	\$ 2,25	0,055	kg							1	\$ 0,12
30	Steel, Mild	Tab simple hole	\$ 2,25	0,028	kg							3	\$ 0,19
40	Steel, Mild	Triangular tab	\$ 2,25	0,063	kg							1	\$ 0,14
												Sub Total	\$ 2,466

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	Laser cut	Tab cut from raw (including holes for bolts)	\$ 0,01	cm	145	Steel	3	\$ 4,35
20	Sheet metal bending	Tab geometry assessment	\$ 0,25	bend	4		1	\$ 1,00
30	Tube cut	Cut of the tube with the needed length	\$ 0,15	cm	6,4		1	\$ 0,96
40	Tube end preparation for welding	Preparation of the tube end surface	\$ 0,75	end	4		1	\$ 3,00
50	Weld	Tab and rod junction	\$ 0,15	cm	4		1	\$ 0,60
								Sub Total \$ 9,91

ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total
10	Bolt, Grade 8.8	Bolts to attach the tab to the part	\$ 0.02	5mm	5mm		12mm	5	\$ 0.11
30	Nut, Grade 8.8	Fitted together with Item 10	\$ 0.02	5mm	5mm			5	\$ 0.12
Sub Total									\$ 0.23

ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIncid	Sub Total
10	Welds - Welding fixture	Fixture to keep the tabs and the rod together during the welding	500	point	1	3000	2	\$ 0,33
								Sub Total \$ 0,33

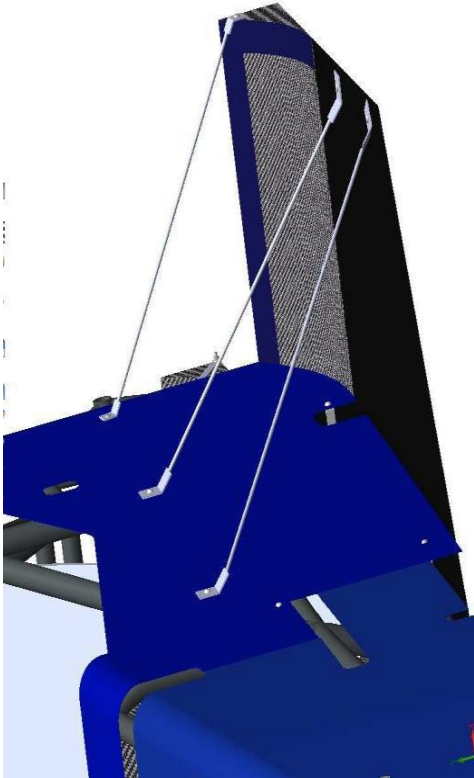


ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
10	Steel, Mild	Rod	\$ 2,25	0,051	kg							1	\$ 0,11
20	Steel, Mild	Tab	\$ 2,25	0,025	kg							2	\$ 0,11
												Sub Total	\$ 0,115

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	Laser cut	Tab	\$ 0,01	cm	38	Steel - Machining	3	\$ 1,14
20	Sheet metal bending	Tab	\$ 0,25		2		1	\$ 0,50
30	Tube cut	Cut of the tube with the needed lenght	\$ 0,15	cm	1		1	\$ 0,15
40	Tube end preparation for welding	Preparation of the tube end surface	\$ 0,75	end	2		1	\$ 1,50
50	Weld	Tab and rod junction	\$ 0,15	cm	2		1	\$ 0,30
								Sub Total \$ 3,59

ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total
10	Bolt, Grade 8.8	Bolts to attach the tab to the part	\$ 0,02		5mm		16mm	2	\$ 0,04
30	Nut, Grade 8.8	Fitted together with Item 10	\$ 0,02		5mm			2	\$ 0,05
								Sub Total	\$ 0,09

ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIncid	Sub Total
10	Welds - Welding fixture	Fixture to keep the tabs and the rod together during the welding	500	point	1		3000	2 \$ 0,33
								Sub Total \$ 0,33



Carlos III University of Madrid
Frame & Body

Body

Core centralmainplane FW

P/N Base

P3023

Suffix

AA

Details

Core centralmainplane FW

373

2

Extended Cost

\$ 193,870

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
30	Wood	Wing Plane	\$ 0,003	5970	cm^3							1	\$ 17,91
												Sub Total	\$ 17,910

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	Machining	Wing plane	\$ 0,04	cm^3	3636,26	Wood	0,5	\$ 72,73
20	Drilled holes < 25.4 mm dia.	Rod holes	\$ 0,35	hole	6	Machine - Hole Length >= 8D	3	\$ 6,30
								Sub Total \$ 79,03

ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total
									\$ -
									Sub Total \$ -

ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracInclcd	Sub Total
								\$ -
								Sub Total \$ -



Part

Core lateralmainplane FW

P/N Base

p3024

Suffix

AA

Details

Core lateralmainplane FW

Extended Cost

\$ 146,436

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
30	Wood	Wing Main Plane	\$ 0,003	4545,75	cm^3							1	\$ 13,64
												Sub Total	\$ 13,637

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	Machining	Wing main plane	\$ 0,04	cm^3	2769,04	Wood	0,5	\$ 55,38
20	Drilled holes < 25,4 mm dia.	Rod holes	\$ 0,35	hole	4	Machine - Hole Length >= 8D	3	\$ 4,20
							Sub Total	\$ 59,58

ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total
								\$ -	
								Sub Total	\$ -

ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIncid	Sub Total
								\$ -
								Sub Total \$ -



Carlos III University of Madrid

Frame & Body

Body

Part Core secondaryplane RW

P/N Base P3025

Suffix AA

Details Core secondaryplane RW

373

1

Extended Cost \$ 218,722

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
30	Wood	Wing Main Plane	\$ 0,003	11550	cm^3							1	\$ 34,65
												Sub Total	\$ 34,650

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	Machining	Wing main plane	\$ 0,04	cm^3	8993,6	Wood	0,5	\$ 179,87
20	Drilled holes < 25.4 mm dia.	Rod holes	\$ 0,35	hole	4	Machine - Hole Length >= 8D	3	\$ 4,20
								Sub Total \$ 184,07

ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total
								\$ -	
								Sub Total \$ -	

ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIncl	Sub Total
								\$ -
							Sub Total	\$ -



University	Carlos III University of Madrid				Car #	373	Part Cost Qty	\$ 419,305
System	Frame & Body							1
Assembly	Body							
Part	Core mainplane RW						Extended Cost	\$ 419,305
P/N Base	P3026							
Suffix	AA							
Details	Core mainplane RW							

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
30	Wood	Wing Main Plane	\$ 0,003	25520	cm^3							1	\$ 76,56
												Sub Total	\$ 76,560

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	Machining	Wing main plane	\$ 0,04	cm^3	16087,24	Wood	0,5	\$ 321,74
20	Drilled holes < 25.4 mm dia.	Rod holes	\$ 0,35	hole	20	Machine - Hole Length >= 8D	3	\$ 21,00
							Sub Total	\$ 342,74

ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total
								\$ -	
								Sub Total	\$ -

ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIncl	Sub Total
								\$ -
							Sub Total	\$ -



Carlos III University of Madrid

Frame & Body

Body

Core mainholder FW

P3028

AA

Core mainholder FW

373

1

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
30	Wood	Wing Main Plane	\$ 0,003	11179,5	cm^3							1	\$ 33,54
												Sub Total	\$ 33,539

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier		Mult. Val.	Sub Total
10	Machining	Wing main plane	\$ 0,04	cm^3	7940	Wood		0,5 \$	158,80
20	Drilled holes < 25,4 mm dia.	Rod holes	\$ 0,35	hole	10	Machine - Hole Length >= 8D		3 \$	10,50
								Sub Total	\$ 169,30

[illegible][illegible]

Carlos III University of Madrid

Frame & Body

Body

Reinforcement rods

P3029

Suffix

FR

Reinforcement steel tubes for both the front and the rear wing

Details

373

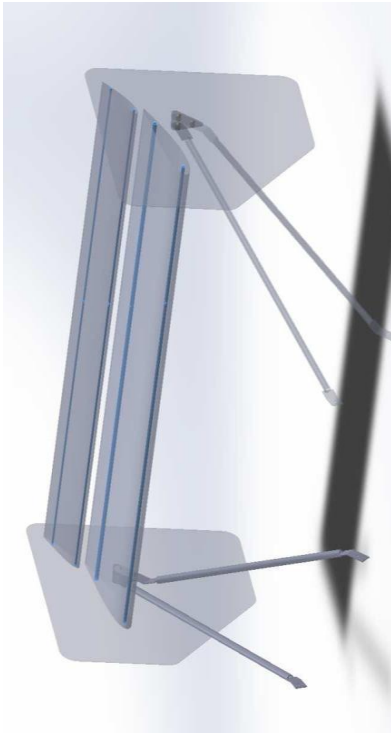
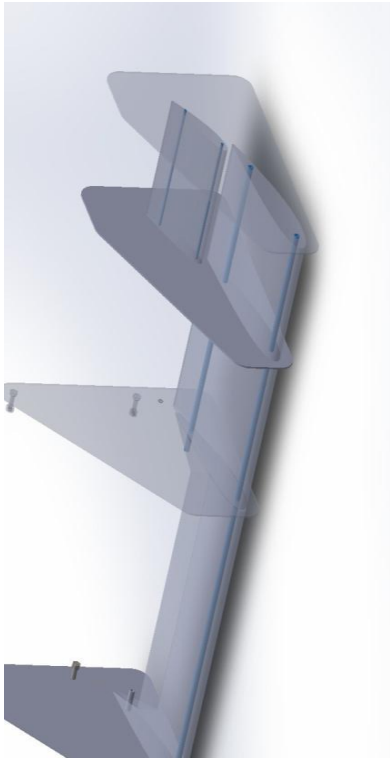
1

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
10	Steel, Mild	Rod, FW, 10x2x1493mm	\$ 2,25	0,589	kg							1	\$ 1,33
20	Steel, Mild	Rod, FW, 10x2x524mm	\$ 2,25	0,207	kg							2	\$ 0,93
30	Steel, Mild	Rod, FW, 5x1x215mm	\$ 2,25	0,021	kg							4	\$ 0,19
13	Steel, Mild	Rod RW 10x2x1104mm	\$ 2,25	0,191	kg							2	\$ 0,86
14	Steel, Mild	Rod RW 5x1x1104mm	\$ 2,25	0,109	kg							2	\$ 0,49
												Sub Total	\$ 1,325

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	Tube cut	Cut of the thick tubes (10mm)	\$ 0,15	cm	10			1 \$ 1,50
11	Tube cut	Cut of the thin tubes (5mm)	\$ 0,15	cm	6			1 \$ 0,90
								Sub Total \$ 1,50

ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total
									\$ -
								Sub Total	\$ -

ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIncl	Sub Total
								\$ -
								Sub Total \$ -



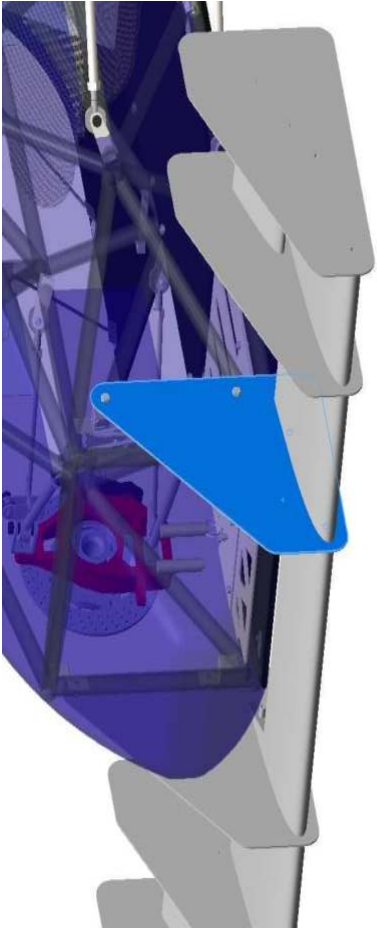
The endplate next to the nosecone

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
10	Wood, Hard		\$ 0.00	288	cm^3							1	\$ 1.15
												Sub Total	\$ 1.152

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	Laser cut	The perimeter and the holes for the bolts are performed in this operation	\$ 0.01	cm	138	Machining - Wood	0.5 \$	0.69
								Sub Total \$ 0.69

ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total
									\$ -
								Sub Total	\$ -

ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIncid	Sub Total
								\$ -
							Sub Total	\$ -



Carlos III University of Madrid

Frame & Body

Body

Front Wing Outer Endplate

P3031

AA

Details The endplate situated in front of the wheels

373

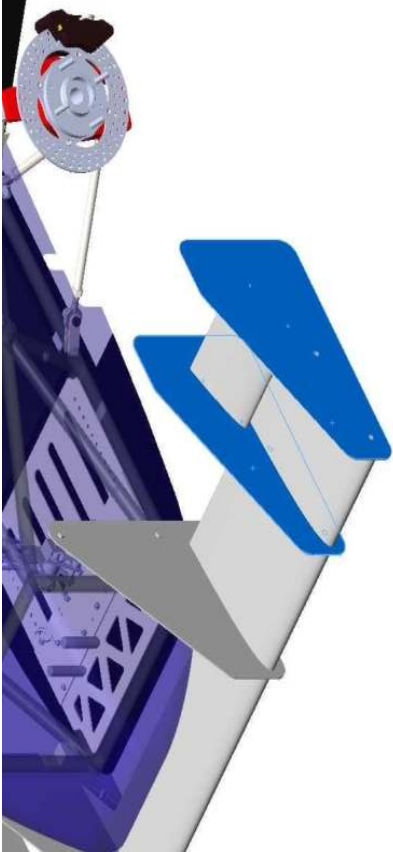
4

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
10	Wood, Hard		\$ 0,00	297	cm^3							1	\$ 1,19
												Sub Total	\$ 1,188

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	Laser cut	The perimeter and the holes for the bolts are performed in this operation	\$ 0,01	cm	143	Machining - Wood	0,5 \$	0,69
								Sub Total \$ 0,69

ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total
									\$ -
								Sub Total	\$ -

ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIndId	Sub Total
								\$ -
								Sub Total \$ -



Carlos III University of Madrid
Frame & Body
Body
Rear Wing Endplate
P3032
AA
Details The endplate for the rear wing

373
2

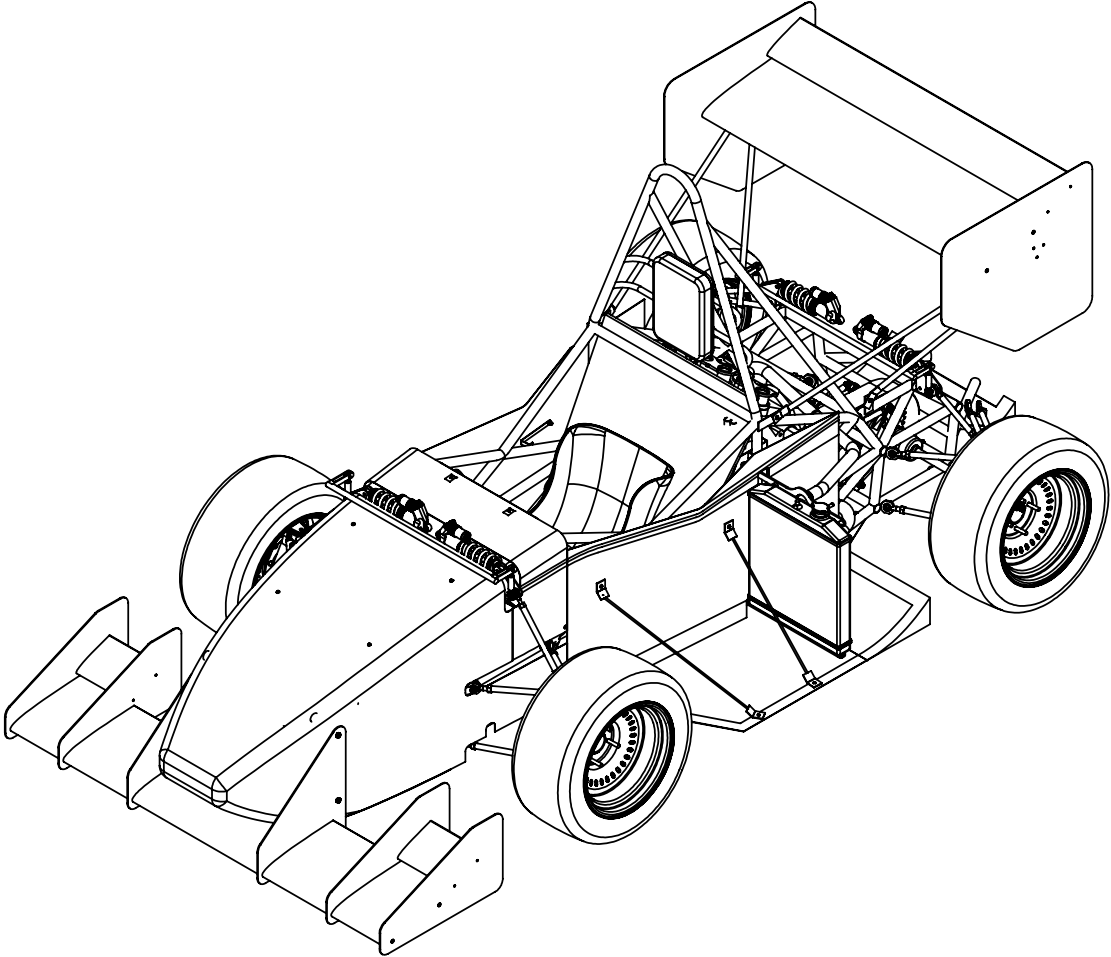
ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
10	Wood, Hard		\$ 0,00	545	cm^3							1	\$ 2,18
												Sub Total	\$ 2,180

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	Laser cut	The perimeter and the holes for the bolts are performed in this operation	\$ 0,01	cm	390	Machining - Wood	0,5	\$ 0,69
								Sub Total \$ 0,69

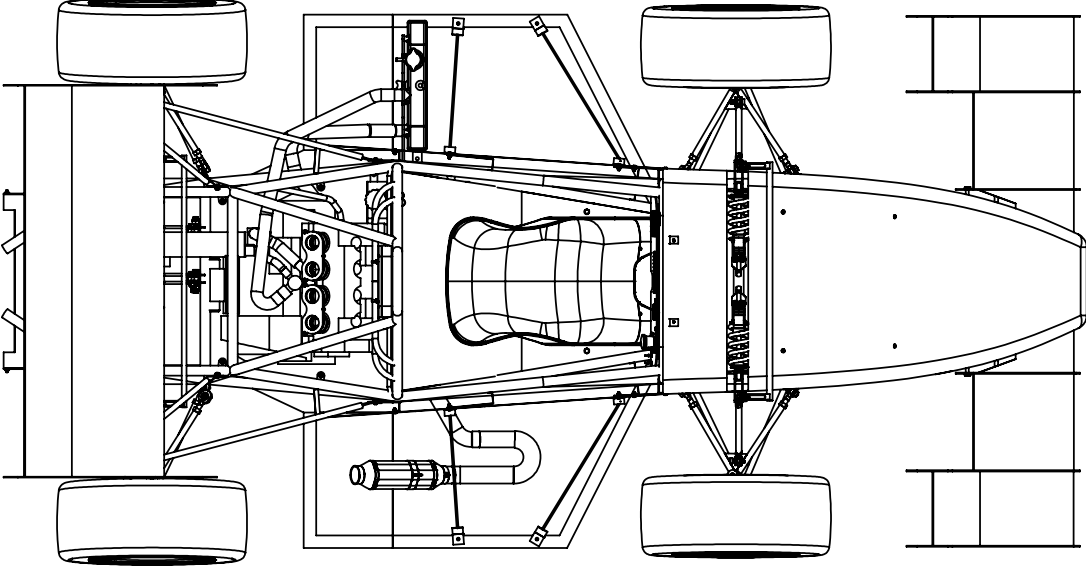
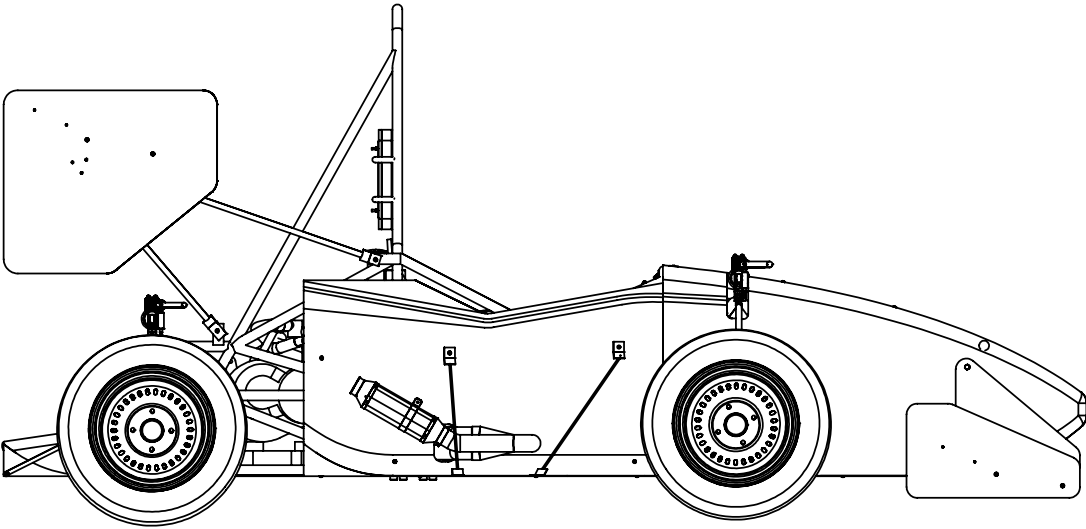
ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total
									\$ -
									Sub Total \$ -

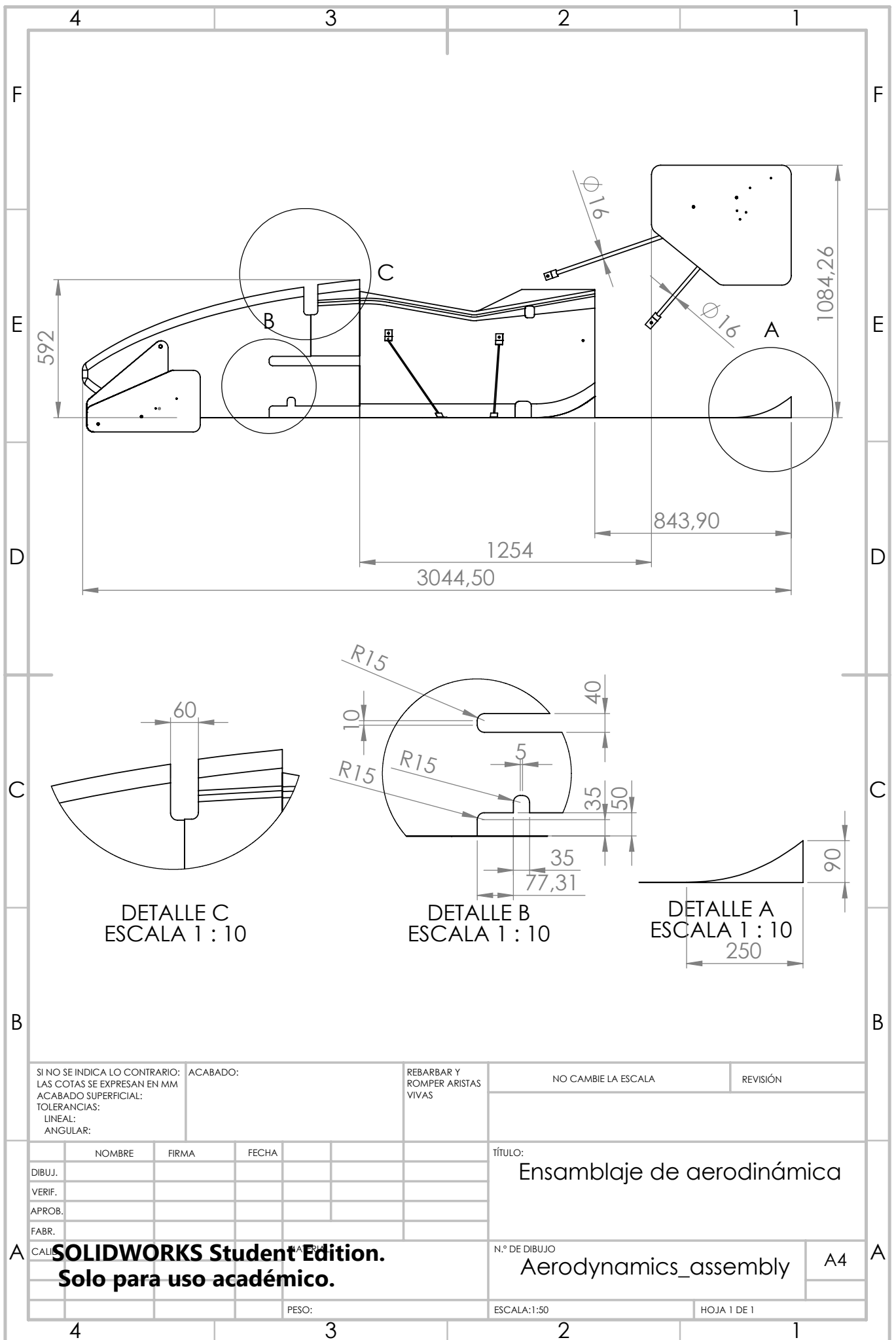
ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracIncl	Sub Total
								\$ -
								Sub Total \$ -



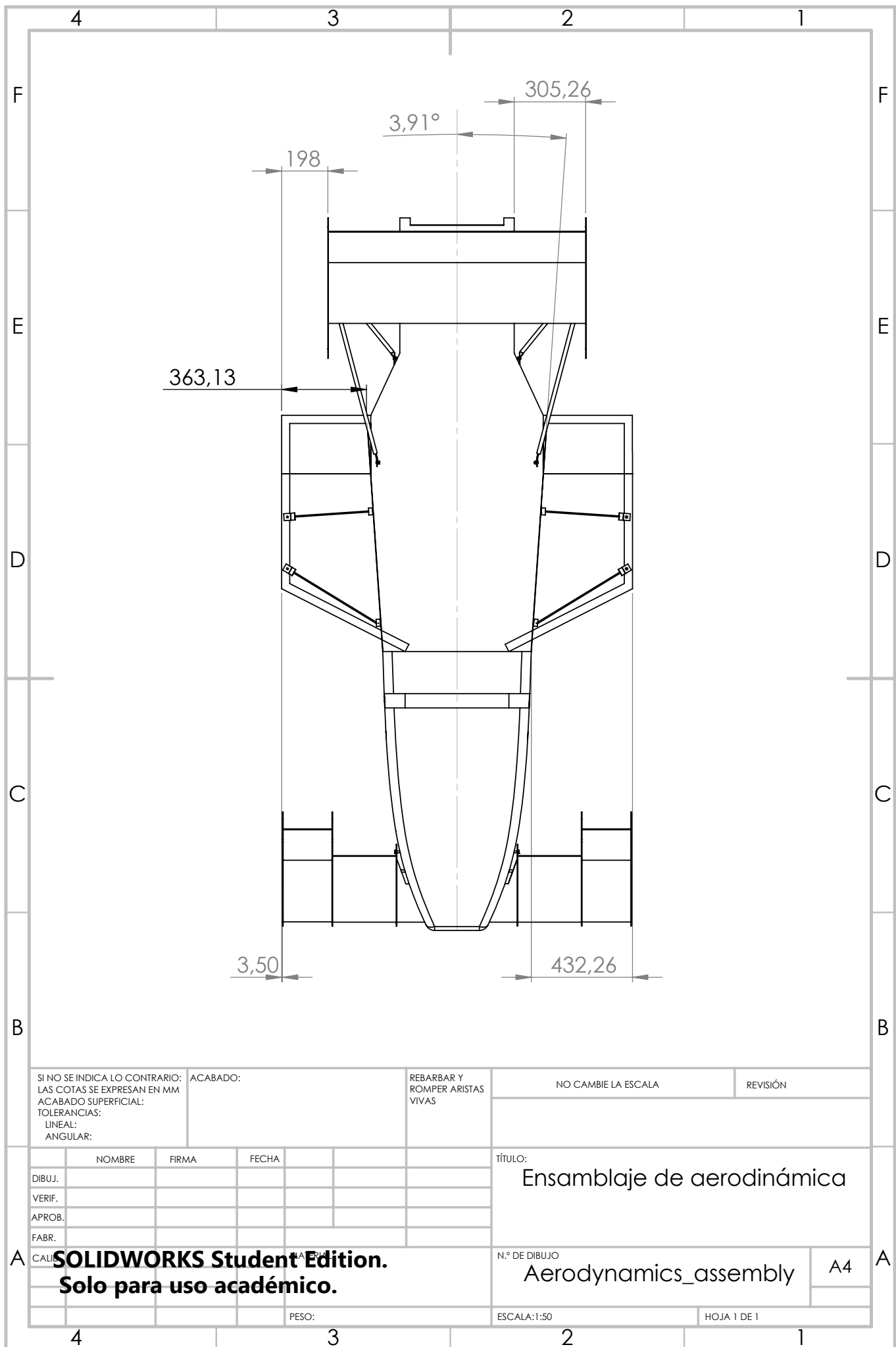
4				3				2				1																																																																																																																																															
F																																																																																																																																																											
E																																																																																																																																																											
D																																																																																																																																																											
C																																																																																																																																																											
B																																																																																																																																																											
																																																																																																																																																											
A																																																																																																																																																											
<table><tr><td colspan="4">SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:</td><td colspan="4">ACABADO:</td><td colspan="4">REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS</td><td colspan="4">NO CAMBIE LA ESCALA</td><td colspan="4">REVISIÓN</td></tr><tr><td colspan="4">DIBUJ.</td><td colspan="4">NOMBRE</td><td colspan="4">FIRMA</td><td colspan="4">FECHA</td><td colspan="4">TÍTULO: 3D</td></tr><tr><td colspan="4">VERIF.</td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td></tr><tr><td colspan="4">APROB.</td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td></tr><tr><td colspan="4">FABR.</td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td></tr><tr><td colspan="4">CALIF.</td><td colspan="4">SOLIDWORKS Student Edition.</td><td colspan="4">N.º DE DIBUJO</td><td colspan="4">FSUC3M_373_1</td><td colspan="4">A4</td></tr><tr><td colspan="4"></td><td colspan="4">Solo para uso académico.</td><td colspan="4">PESO:</td><td colspan="4">ESCALA: 1:20</td><td colspan="4">HOJA 1 DE 1</td></tr></table>																SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:				REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS				NO CAMBIE LA ESCALA				REVISIÓN				DIBUJ.				NOMBRE				FIRMA				FECHA				TÍTULO: 3D				VERIF.																				APROB.																				FABR.																				CALIF.				SOLIDWORKS Student Edition.				N.º DE DIBUJO				FSUC3M_373_1				A4								Solo para uso académico.				PESO:				ESCALA: 1:20				HOJA 1 DE 1			
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:				REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS				NO CAMBIE LA ESCALA				REVISIÓN																																																																																																																																											
DIBUJ.				NOMBRE				FIRMA				FECHA				TÍTULO: 3D																																																																																																																																											
VERIF.																																																																																																																																																											
APROB.																																																																																																																																																											
FABR.																																																																																																																																																											
CALIF.				SOLIDWORKS Student Edition.				N.º DE DIBUJO				FSUC3M_373_1				A4																																																																																																																																											
				Solo para uso académico.				PESO:				ESCALA: 1:20				HOJA 1 DE 1																																																																																																																																											
4				3				2				1																																																																																																																																															

4				3				2				1							
F																			
E																			
D																			
C																			
B																			
A																			
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:				REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS				NO CAMBIE LA ESCALA				REVISIÓN			
DIBUJ.				NOMBRE				FIRMA				FECHA				TÍTULO:			
VERIF.																3D			
APROB.																			
FABR.																			
CALIF.				SOLIDWORKS Student Edition.				N.º DE DIBUJO				FSUC3M_373_2				A4			
				Solo para uso académico.				PESO:				ESCALA: 1:10				HOJA 1 DE 1			
4				3				2				1							

4				3				2				1																																																																																																			
F												F																																																																																																			
E												E																																																																																																			
D												D																																																																																																			
C												C																																																																																																			
B												B																																																																																																			
A												A																																																																																																			
																																																																																																															
																																																																																																															
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR: ACABADO: REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS NO CAMBIE LA ESCALA REVISIÓN																																																																																																															
<table><tr><td colspan="2">NOMBRE</td><td colspan="2">FIRMA</td><td colspan="2">FECHA</td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2">TÍTULO:</td><td colspan="2">3D</td></tr><tr><td colspan="2">DIBUJ.</td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td></tr><tr><td colspan="2">VERIF.</td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td></tr><tr><td colspan="2">APROB.</td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td></tr><tr><td colspan="2">FABR.</td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td></tr><tr><td colspan="2">CALIF.</td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td></tr></table>																NOMBRE		FIRMA		FECHA								TÍTULO:		3D		DIBUJ.																VERIF.																APROB.																FABR.																CALIF.															
NOMBRE		FIRMA		FECHA								TÍTULO:		3D																																																																																																	
DIBUJ.																																																																																																															
VERIF.																																																																																																															
APROB.																																																																																																															
FABR.																																																																																																															
CALIF.																																																																																																															
SOLIDWORKS Student Edition. Solo para uso académico. N.º DE DIBUJO ESCALA: 1:20 HOJA 1 DE 1 A4																																																																																																															
4				3				2				1																																																																																																			



SOLIDWORKS Student Edition.
Solo para uso académico.



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALL.				

TÍTULO:

Ensamblaje de aerodinámica

N.º DE DIBUJO

Aerodynamics_assembly

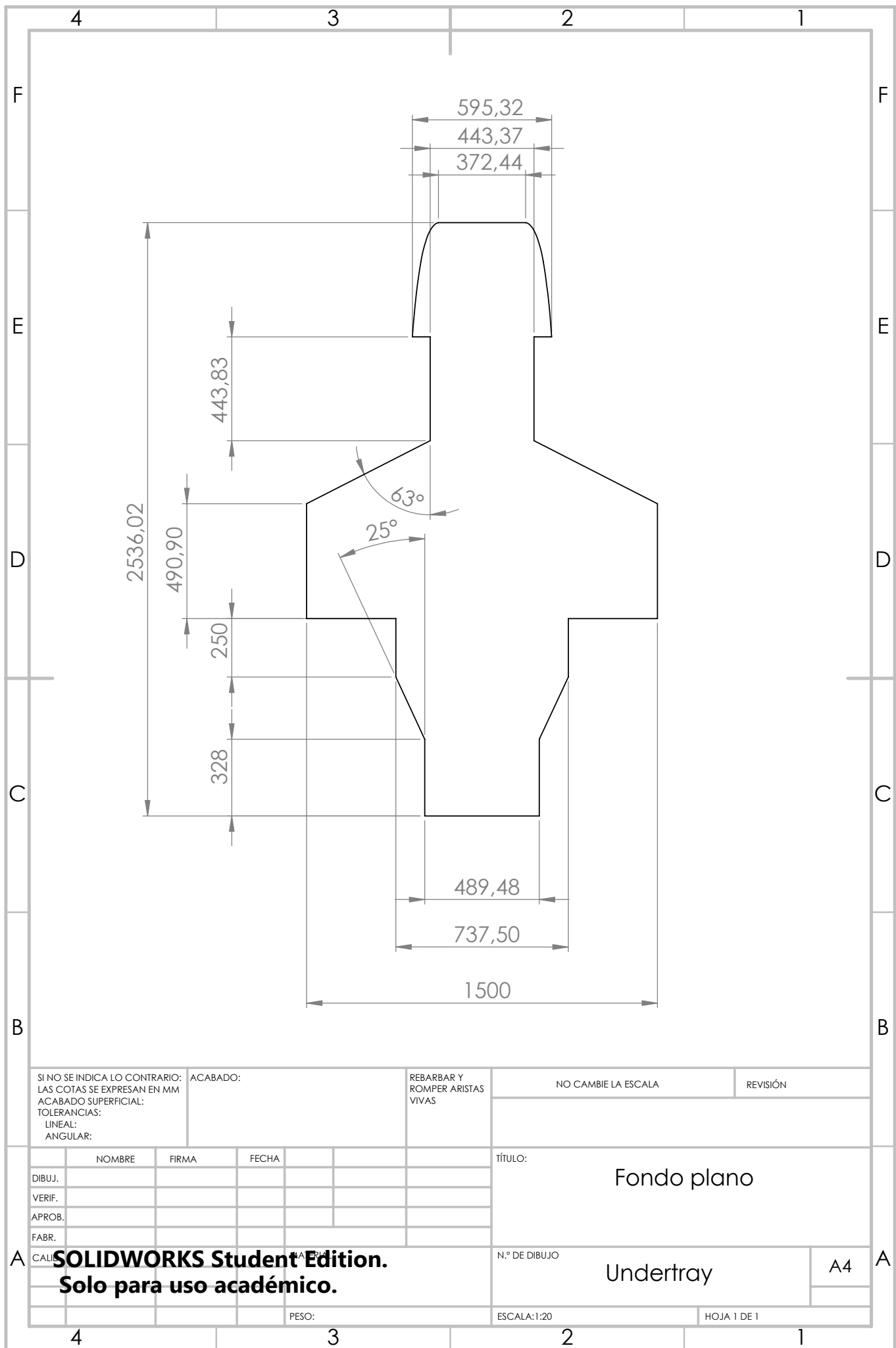
A4

SOLIDWORKS Student Edition.
Solo para uso académico.

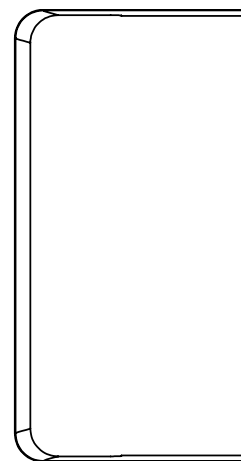
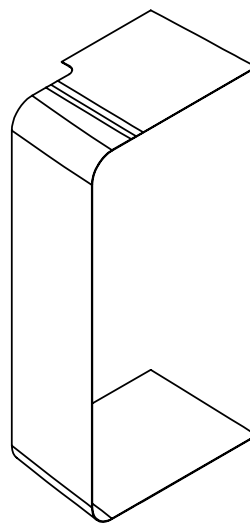
PESO:

ESCALA: 1:50

HOJA 1 DE 1



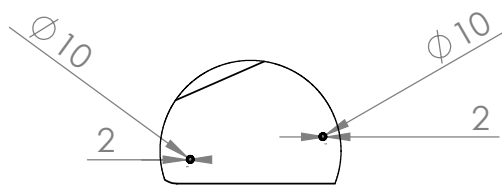
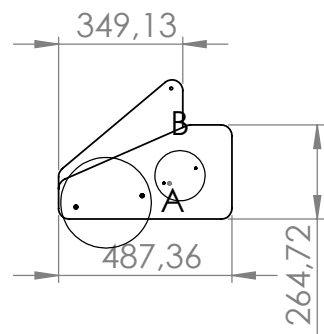
A



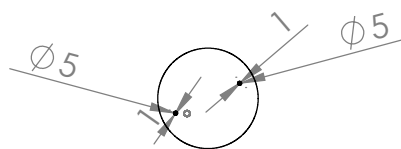
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
		NOMBRE		FIRMA		FECHA			
DIBUJ.									
VERIF.									
APROB.									
FABR.									
CALIFICACIÓN									
SOLIDWORKS Student Edition. Solo para uso académico.						N.º DE DIBUJO		A4	
PESO:						ESCALA: 1:10		HOJA 1 DE 1	
4		3		2		1			

4				3				2				1																																																																																																																																																																																							
F																																																																																																																																																																																																			
E																																																																																																																																																																																																			
D																																																																																																																																																																																																			
C																																																																																																																																																																																																			
B																																																																																																																																																																																																			
A																																																																																																																																																																																																			
Technical drawing of a nose cone part. The drawing includes three views: a front view (top left), a side view (top right), and a top view (bottom right). Dimensions are provided in millimeters (mm). The front view shows a total length of 1190,50 mm, a base width of 389,06 mm, and a height of 172,79 mm. The side view shows a total height of 560,75 mm, a base width of 191,63 mm, and a height of 34,11 mm. The top view shows a total width of 1190,50 mm, a base width of 389,06 mm, and a height of 172,79 mm. The drawing also includes a detail view of the base showing a 40 mm wide flange and a 30 mm wide base. <table><tr><td colspan="4">SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:</td><td colspan="4">ACABADO:</td><td colspan="4">REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS</td><td colspan="4">NO CAMBIE LA ESCALA</td><td colspan="4">REVISIÓN</td></tr><tr><td colspan="4">DIBUJ.</td><td colspan="4">NOMBRE</td><td colspan="4">FIRMA</td><td colspan="4">FECHA</td><td colspan="4">TÍTULO:</td></tr><tr><td colspan="4">VERIF.</td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4">Parte del morro que se quita habitualmente</td></tr><tr><td colspan="4">APROB.</td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4">N.º DE DIBUJO</td></tr><tr><td colspan="4">FABR.</td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4">Nosecone_Removable</td></tr><tr><td colspan="4">CALC.</td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4">A4</td></tr><tr><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4">PESO:</td></tr><tr><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4">ESCALA: 1:20</td></tr><tr><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4"></td><td colspan="4">HOJA 1 DE 1</td></tr></table>																SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:				REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS				NO CAMBIE LA ESCALA				REVISIÓN				DIBUJ.				NOMBRE				FIRMA				FECHA				TÍTULO:				VERIF.																Parte del morro que se quita habitualmente				APROB.																N.º DE DIBUJO				FABR.																Nosecone_Removable				CALC.																A4																				PESO:																				ESCALA: 1:20																				HOJA 1 DE 1			
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:				REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS				NO CAMBIE LA ESCALA				REVISIÓN																																																																																																																																																																																			
DIBUJ.				NOMBRE				FIRMA				FECHA				TÍTULO:																																																																																																																																																																																			
VERIF.																Parte del morro que se quita habitualmente																																																																																																																																																																																			
APROB.																N.º DE DIBUJO																																																																																																																																																																																			
FABR.																Nosecone_Removable																																																																																																																																																																																			
CALC.																A4																																																																																																																																																																																			
																PESO:																																																																																																																																																																																			
																ESCALA: 1:20																																																																																																																																																																																			
																HOJA 1 DE 1																																																																																																																																																																																			

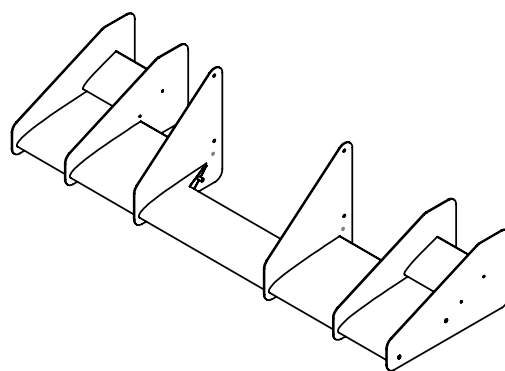
4				3				2				1							
F																			
E																			
D																			
C																			
B																			
A																			
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:				REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS				NO CAMBIE LA ESCALA				REVISIÓN			
DIBUJ.				NOMBRE				FIRMA				FECHA				TÍTULO: Difusor trasero			
VERIF.																			
APROB.																			
FABR.																			
CALC.				SOLIDWORKS Student Edition.				N.º DE DIBUJO				Rear_diffuser				A4			
				Solo para uso académico.				PESO:				ESCALA:1:10				HOJA 1 DE 1			
4				3				2				1							



DETALLE A
ESCALA 1:10



DETALLE B
ESCALA 1 : 10



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		ACABADO: ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
						TÍTULO: Ensamblaje del alerón delantero			
DIBUJ.									
VERIF.									
APROB.									
FABR.									
CALIS						N.º DE DIBUJO		FWassembly	
								A4	
				PESO:		ESCALA:1:20		HOJA 1 DE 1	

Referencias

- [1] “*Institution of Mechanical Engineers*”, www.formulastudent.imeche.org, Consulta a 19/09/2016
- [2] WILLIAM F. MILLIKEN AND DOUGLAS L. MILLIKEN *Race car vehicle dynamics*, Society of Automotive Engineers, Inc; 1995.
- [3] JOSEPH KATZ *Aerodynamics of Race Cars*; Department of Aerospace Engineering, San Diego State University, San Diego, California, 2006.
- [4] MICHAEL S. SELIG, CHRISTOPHER A. LYON, PHILIPPE GIGUERE, CAMERON P. NINHAM AND JAMES J. GUGLIELMO *Summary of Low-Speed Airfoil Data. Volume 2*; University of Illinois; 1995.
- [5] M. VERA COELLO, I. IGLESIAS ESTRADÉ, A. L. SÁNCHEZ PÉREZ, C. MARTÍNEZ BAZÁN *Ingeniería Fluidomecánica*; Universidad Carlos III de Madrid, Paraninfo 2012.
- [6] ENRIQUE MIRAMBELL ARRIZABALAGA, ESTHER REAL SALADRIGAS *Estudio de los diferentes métodos de dimensionamiento para uniones atornilladas y soldadas de acuerdo con la normativa vigente*; Escola Tècnica Superior d’Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, 2009.
- [7] SANTIAGO POVEDA MARTÍNEZ *Materiales compuestos. Representación normalizada de piezas de material compuesto.*; Universidad politécnica de Madrid; Fecha no especificada.