



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES (GITI)

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL CARENADO PARA VEHÍCULO DE COMPETICIÓN FORMULA STUDENT

Autor: Sergio Hernández Blanco

Director: Jesús Ramón Jiménez Octavio

Madrid

AGOSTO de 2019

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Sergio Hernández Blanco DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL CARENADO PARA UN VEHÍCULO DE COMPETICIÓN FORMULA STUDENT, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a TREINTA de AGOSTO de 2019

ACEPTA

Fdo



Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL CARENADO PARA UN VEHÍCULO DE COMPETICIÓN
FORMULA STUDENT

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2018-2019 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni
total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Sergio Hernández Blanco

Fecha:30/08/2019

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Jesús Ramón Jiménez Octavio

Fecha: 30/ 08/ 2019



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES (GITI)

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL CARENADO PARA VEHÍCULO DE COMPETICIÓN FORMULA STUDENT

Autor: Sergio Hernández Blanco

Director: Jesús Ramón Jiménez Octavio

Madrid

AGOSTO de 2019

DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL CARENADO PARA FORMULA STUDENT

Autor: Hernández Blanco, Sergio.

Director: Jiménez Octavio, Jesús Ramón.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Introducción:

En el 2015 un grupo de estudiantes de la *Universidad Pontificia Comillas-ICAI* de apasionados del mundo del motor decidió juntarse para crear el *ICAI Speed Club (ISC)*. Esta agrupación debutó en la competición de *MotorStudent Petrol* de la temporada 2015-2016.

Desde entonces esta asociación ha ido generando mayor interés y congregando en cada temporada a más alumnos hasta el punto de participar en tres competiciones distintas: *MotorStudent Petrol*, *MotorStudent Electric* y *FormulaStudent Electric*.

El equipo de *FormulaStudent Electric* se centra en la concepción de un monoplaza de competición eléctrico cuyo diseño del carenado para esta temporada es de lo que trata este Trabajo de Fin de Grado, ubicado en el departamento de mecánica, pero más precisamente en el subdepartamento de aerodinámica.



La aerodinámica en el automovilismo es un concepto relativamente nuevo que no se llegó a explotar del todo hasta la segunda mitad del siglo XX. Se ha pasado de diseñar unos primeros coches cuyo carenado servía simplemente como barrera de protección a monoplazas de competición donde el diseño aerodinámico del carenado es un factor de absoluta relevancia para su rendimiento.

Hoy en día, el diseño aerodinámico del carenado ya no solo en automóviles, sino también en aeronaves, trenes y barcos, está cobrando cada vez más importancia. La reducción de la resistencia aerodinámica y el mejor aprovechamiento del fluido en el rendimiento de estas máquinas son los principales objetivos para reducir los costes de servicio y mantenimiento, pero sobre todo para consumir menos energía y reducir la huella medioambiental.

Por esto, el carenado del que se habla en este trabajo pretende cumplir con todo lo mencionado anteriormente. Será una pieza que tenga el mejor rendimiento aerodinámico posible, viable económicamente y que agrade estéticamente.

Metodología:

La forma de trabajar se divide en las dos etapas principales del trabajo que son el diseño y la fabricación de la pieza.

A la hora de diseñar se ha seguido la siguiente metodología de trabajo:

- Comparación de posibles diseños de carenado:

Se compararon las distintas geometrías que tenían los carenados de los equipos que han participado en competiciones de *FormulaStudent* en Europa (Eindhoven University of Technology, Munich Motorsport, Warwick University, Politécnica de Barcelona ...) teniendo en cuenta el diseño del carenado de la temporada pasada para posibles mejoras de rendimiento y estéticas.

- Diseño de distintas geometrías del carenado:

En esta etapa de trabajo simplemente se diseñaron distintas formas de carenado en *SolidWorks* en el módulo de superficies que servirían como base para los posteriores análisis computacionales.

Se empezó a diseñar la pieza partiendo de dos alternativas: orientado a desviar el aire incidente hacia el *cockpit* (morro hacia abajo, PROTOTIPO A) o enviándolo al fondo plano (morro hacia arriba, PROTOTIPO B).

- Análisis computacional de los diseños:

Se han ensayado los distintos diseños con *ANSYS* en el módulo de *Fluent* con el fin de ver cual presentaba mejores prestaciones aerodinámicas.

En un principio se pensó aportar modificaciones al prototipo que mejor se comportara aerodinámicamente, pero por ajustes de chasis hasta última hora y plazos de tiempo no se pudieron hacer mejoras.

En cuanto a la fabricación se siguió el siguiente orden:

- Elección del material:

La elección del material tenía que ser de modo que no disparara el coste de fabricación de la pieza y que permitiese que la pieza cumpliera con la norma.

Al tener un mayor presupuesto este año, el material escogido fue la fibra de carbono. Este material proporciona un cómodo margen para crear una gran variedad de

geometrías y tiene propiedades mecánicas muy ventajosas que nos aseguraban cumplir con la norma.

- Obtención de la pieza:

La pieza se ha obtenido a partir de un molde hembra en dos mitades de madera mediante la técnica de infusión. Posteriormente las dos mitades de la pieza se han unido para obtener la pieza final.

Objetivos:

Desde un punto de vista del diseño se espera cumplir con los siguientes objetivos:

- Diseñar un carenado que cumpla con su función aerodinámica, es decir obtener los mejores valores posibles de 'lift' y 'drag': mejorar los valores obtenidos del año pasado hasta obtener un $C_D=0.163$ y disminuir (hacer más negativo) el 'lift' en un 20% como mínimo, resultando $C_L=-0.137$.
- Escoger un diseño de carenado que genere la mayor carga aerodinámica que ayude a mejorar el rendimiento del monoplaza.

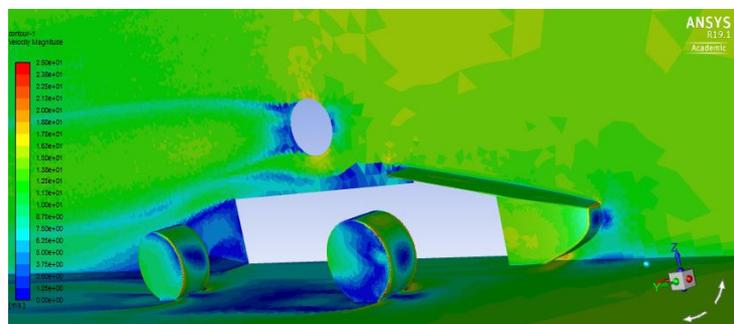
En el ámbito de la fabricación los principales objetivos son los siguientes:

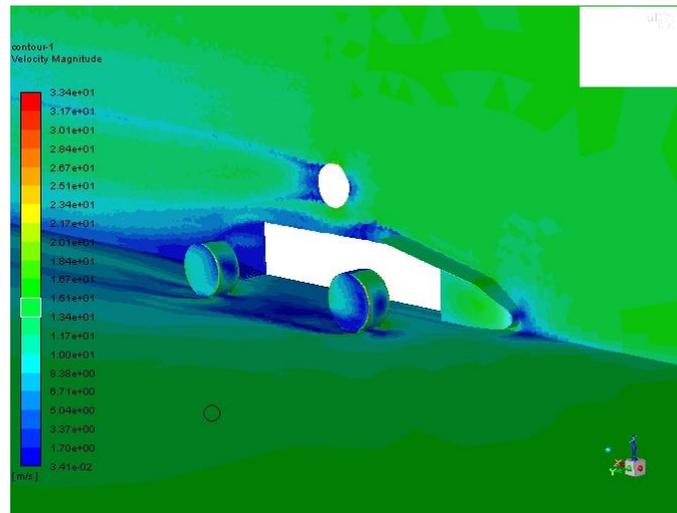
- Fabricar un carenado viable económicamente relativamente sencillo
- Cumplir con la norma
- Base para añadir futuros elementos aerodinámicos como unos alerones delanteros.

Resultados:

Las simulaciones del prototipo A dieron unos buenos resultados con respecto a los objetivos fijados: $C_D=0,129$, $C_L= -0,402$.

Sin embargo, las simulaciones del prototipo B arrojaron mejores resultados aún ya que a pesar de que el coeficiente de drag hubiese aumentado ligeramente se obtenía una mejora considerable en el coeficiente de lift: $C_D=0,133$ $C_L= -0,423$. Por estos motivos se ha optado por fabricar esta versión para el monoplaza de esta temporada.





Conclusiones:

Cabe destacar que se han conseguido alcanzar los objetivos propuestos en cuanto al rendimiento aerodinámico de la pieza, ya que los valores obtenidos a partir de las simulaciones son mucho mejores de los que se preveían alcanzar.

Por otro lado, se ha conseguido una pieza que a pesar de haber sido fabricada en un material bastante caro como la fibra de carbono ha sido viable económicamente y se ha obtenido con una mayoría de métodos disponibles en la universidad.

Para posibles desarrollos futuros la pieza concebida puede servir de base para nuevas modificaciones y aportaciones, propuestas por los miembros del área de innovación, que este año se han visto apartadas del diseño final por plazos y presupuesto.

Por supuesto se ha comprobado que los conocimientos adquiridos en asignaturas de la carrera como mecánica de fluidos, ciencia de materiales, diseño mecánico y tecnologías de fabricación son de mucha importancia a la hora de crear una pieza desde el diseño hasta la fabricación.



DESIGN AND MANUFACTURING PROCESSES FOR FORMULA STUDENT FRONT FAIRING

Author: Hernández Blanco, Sergio.

Director: Jiménez Octavio, Jesús Ramón.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

PROJECT SUMMARY

Introduction

In 2015 the *ICAI Speed Club (ISC)* was formed by a group of students from the *Universidad Pontificia Comillas-ICAI* passionate about engine mechanics. Its first participation was in the *MotorStudent Petrol* competition in the 2015-2016 season.

Since then, this student association has become more attractive for students to get introduced in the motor racing world and has been joined by many of them until the point the club is participating in three different competitions this season: *MotorStudent Petrol*, *MotorStudent Electric* y *FormulaStudent Electric*.

The team of the *FormulaStudent Electric* focuses on the design and manufacturing processes of an electric racing single-seater which front fairing design is what concerns this end-of-degree project, included in the aerodynamics sub-department inside the mechanical department.



Aerodynamics in motorsport is a relatively new concept that was not fully exploited until the second half of the 20th century. It has gone from designing first cars whose front fairing served simply as a barrier of protection to racing cars where the aerodynamic design of the fairing is a factor of absolute relevance to its performance.

Today, the aerodynamic design of the fairing, not only in cars, but also in aircraft, trains and ships, is becoming increasingly important. Reducing the aerodynamic drag and the better use of fluid in the performance of these machines are the main objectives to reduce

service and maintenance costs, but above all to consume less energy and reduce the ecological footprint.

For this reason, the fairing that is discussed in this work aims to fulfill everything described above. It will be a piece that has the best possible aerodynamic performance, economically viable and aesthetically pleasant.

Methodology

The way of working is divided into the two main stages of the project that are the design and manufacture of the piece.

The following working methodology has been followed when designing:

- Comparison of possible fairing designs:

The different geometries of teams that have participated in *FormulaStudent* competitions in Europe (Eindhoven University of Technology, Munich Motorsport, Warwick University, Polytechnic of Barcelona...) were compared with the fairing design of last season for possible performance and aesthetic improvements.

- Design of different fairing geometries:

At this stage of work, different fairing shapes were simply designed in *SolidWorks* in the surface module that would serve as the basis for subsequent computational analyses.

The piece was started to be designed from two alternatives: oriented to divert the incident air to the *cockpit* (bottom nose, PROTOTYPE A) or by sending it to the flat bottom (upward nose, PROTOTYPE B).

- Computational analysis of designs:

The different designs have been tested with *ANSYS* in the *Fluent* module to see which had better aerodynamic performance.

Initially it was intended to make modifications to the prototype that best behaved aerodynamically, but because of chassis adjustments until the last minute and timeframes no improvements could be made.

As for the manufacture, the following order was followed:

- Material Choice:

The materials were chosen in order to not increase the manufacturing cost of the piece and that it allows to comply with the norms.

With a larger budget this year, the material chosen was carbon fiber. This material provides a comfortable margin to create a wide variety of geometries and has very advantageous mechanical properties that ensured we met the standard.

- Obtaining the piece:

The piece has been obtained from a female mold in two wood halves using the infusion technique. Subsequently the two halves of the part have been joined together to obtain the final part.

Objectives:

From a design point of view, it is expected to meet the following objectives:

- Design a fairing that fulfills its aerodynamic function, i.e. get the best possible worth of 'lift' and 'drag': perform the values obtained last year until having a $C_D=0.163$ and decrease (more negative) the 'lift' by at least 20%, resulting in $C_L=-0.137$.
- Choose a fairing design that generates the highest aerodynamic load to help improve the performance of the single seater.

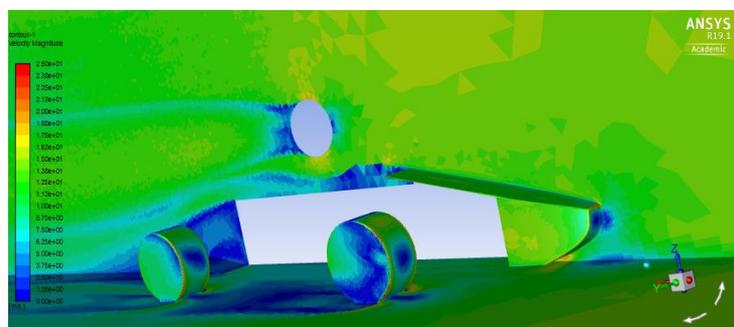
In the field of manufacturing, the main objectives are as follows:

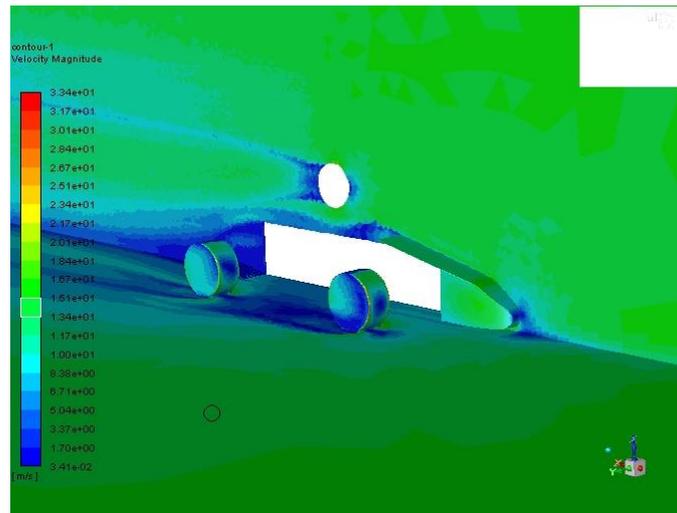
- Making a relatively simple and economically viable fairing
- Comply with the norm
- Build a base to add future aerodynamic elements such as front spoilers

Results:

The simulations of prototype B performed well with respect to the objectives set: $C_D=0,129$ and $C_L=-0.402$.

However, the simulations of prototype A yielded even better results since even if the drag coefficient had increased slightly, a considerable improvement in the lift coefficient was obtained: $C_D=0.133$ and $C_L=-0.423$. For these reasons it has been chosen to manufacture this version for this season's single seater.





Conclusions:

It should be noted that the proposed objectives in terms of aerodynamic performance of the part have been achieved, since the values obtained from the simulations are much better than those that were expected to be achieved.

On the other hand, despite being manufactured in a rather expensive material such as carbon fiber the manufacturing of the piece has been economically viable and has been obtained with most of methods and facilities available at the university.

For possible future developments the designed part can serve as a basis for further modifications and contributions, proposed by the members of the innovation area, which this year have been set aside from the final design by deadlines and budget.

Of course, it has been proven that the knowledge acquired in career subjects such as fluid mechanics, materials science, mechanical design and manufacturing technologies are of great importance when creating a piece from design to manufacturing.





Índice de contenido:

1.	Introducción	9
1.1.	Contexto	9
1.2.	Estado de la cuestión	10
1.2.1.	Vista atrás y evolución.....	10
1.2.2.	La aerodinámica en la actualidad y aplicación al IFS-02	12
1.3.	Motivación	13
1.4.	Objetivos	14
1.5.	Recursos empleados	14
2.	Bases teóricas.....	15
2.1.	Definición de un fluido y propiedades	15
2.2.	Dinámica de fluidos.....	20
2.3.	Comportamiento de un fluido alrededor de un cuerpo.....	23
2.3.1.	Concepto de capa límite y número de Reynolds.....	23
2.3.2.	Fuerza de sustentación (lift).....	25
2.3.3.	Fuerza de arrastre (drag).....	26
2.3.4.	Efecto suelo	27
2.3.5.	Centro de presiones	28
3.	Normativa de diseño para los elementos aerodinámicos.....	29
3.1.	Definición de elemento aerodinámico.....	29
3.2.	Restricciones dimensionales de los elementos aerodinámicos	29
3.2.1.	Restricciones de altura	29
3.2.2.	Restricciones de anchura	30
3.2.3.	Restricciones de longitud	30
3.2.4.	Radio mínimo de aristas de los elementos aerodinámicos.....	30
3.2.5.	Resistencia y estabilidad de los elementos aerodinámicos	30
4.	Procesos de diseño y análisis de prototipos	33
4.1.	Metodología de trabajo	33
4.2.	Diseño.....	36
4.3.	Análisis computacional.....	38
4.3.1.	Geometría	39
4.3.2.	Mallado.....	41
4.3.3.	Configuración de los parámetros de simulación.....	44
4.4.	Prototipos.....	46
4.4.1	Primeros carenados.....	46



4.2.2. Prototipos A y B.....	48
4.4. Resultados	53
4.5.1. Resultados de los primeros prototipos	53
4.5.2. Resultados de los prototipos A y B.....	55
5. Fabricación	59
5.1. Composite de fibra de carbono.....	59
5.2. Metodología de fabricación	62
6. Conclusiones y desarrollos futuros	65
7. Bibliografía	67

Índice de figuras

<i>Figura 1-1: IFS-01 en el circuito de Montmeló.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 1-2:Primera generación de Ford T (1908)</i>	<i>10</i>
<i>Figura 1-3:‘La gota de agua’ de Rumpler</i>	<i>11</i>
<i>Figura 1-4: Modelo Mercedes-Benz W196.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 1-6: Nuevo prototipo de tren MAGLEV en China.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 1-5: Sharklets del modelo A350.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2-1: deformación de un fluido vs. deformación de un sólido</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2-2: Esfuerzo cortante en función de la velocidad de deformación para distintos tipos de fluido</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2-3: Caudal en un Volumen de Control.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2-4: Representación gráfica de la velocidad media</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2-5: Comportamiento de la capa límite y efectos en la sustentación</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2-6: Resistencia aerodinámica en función de la geometría de un cuerpo</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3-1: Esquema resumen de las restricciones.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 4-1: Carenado que dirige el aire incidente hacia arriba</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4-2: Carenado que dirige el aire incidente hacia abajo.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4-3: Perfil carenado en alzado.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4-4: Perfil carenado en planta.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4-5: Carenado en bruto</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4-6: Dzus Fasteners</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4-7: Taladros para enganches dzus fasteners</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4-8: Etapas de ANSYS Fluent</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4-9: Geometría importada</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4-10: Dimensiones del volumen de control</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4-11: Capture Proximity entre el fondo plano y el suelo</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4-12: Modelo viscosos k-epsilon.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4-13: Prototipo 1</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4-14: Prototipo 2</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4-15: Prototipo 3</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4-16: Prototipo 4</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4-17: Prototipo A.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4-18: Prototipo B</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4-19: Inflation aplicada sobre la cabeza del piloto</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4-20: Inflation sobre el carenado</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4-21: Elementos de malla malos</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4-22: Redondeo intersección plano suelo y neumático.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4-23: Asignación velocidad angular a los neumáticos delanteros</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4-24: Asignación velocidad angular a los neumáticos traseros</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4-25: Mapa de velocidades carenado 4</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4-26: Vectores velocidad carenado 4</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4-27: Mapa de presiones carenado 4.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4-28: Líneas de velocidad prototipo A.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4-29: Líneas de velocidad prototipo B.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4-30: Campo de presiones sobre el prototipo A</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4-31: Campo de presiones sobre prototipo B.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4-32: Redondeo esquina carenado.....</i>	<i>58</i>



<i>Figura 5-1: Plancha de Fibra de Carbono</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5-2: Prótesis de un brazo en fibra de carbono.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5-3: Carenado con la fibra vista</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5-4: Diagrama comparativa entre Módulo de Young y densidad</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5-5: Mitad del molde del carenado</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5-6: Método de fabricación por infusión.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5-7: Carenado montado en el coche durante la competición</i>	<i>64</i>
<i>Figura 6-1: Equipo del ISC Formula Student en competición (2019)</i>	<i>66</i>



Índice de tablas:

<i>Tabla 2-1: Cuadro comparativo entre los líquidos y los gases</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2-2: Tipo de flujo en función del número de Reynolds.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 4-1: Resumen metodología de trabajo.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 4-2: Tamaño elementos de la malla en los cuerpos de influencia.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 4-3: Configuración Inflation.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 4-4: Clasificación calidad Skewness.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 4-5: Condiciones de contorno</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 4-6: Parámetros calidad malla prototipo A.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 4-7: Parámetros calidad malla prototipo B.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 4-8: Resultados simulación prototipos 3 y 4.....</i>	<i>53</i>





Índice de ecuaciones:

<i>Ecuación 2-1: Ecuación de la densidad.....</i>	<i>16</i>
<i>Ecuación 2-2: Ecuación de los gases ideales.....</i>	<i>17</i>
<i>Ecuación 2-3: Ecuación de la presión (columna de fluido)</i>	<i>17</i>
<i>Ecuación 2-4: Ecuación viscosidad.....</i>	<i>18</i>
<i>Ecuación 2-5: Ecuación teorema de Transporte de Reynolds.....</i>	<i>20</i>
<i>Ecuación 2-6: Ecuación del gasto másico</i>	<i>21</i>
<i>Ecuación 2-7: Ley de Conservación de la Masa</i>	<i>21</i>
<i>Ecuación 2-8: Ley Conservación Cantidad de Movimiento.....</i>	<i>22</i>
<i>Ecuación 2-9: Ecuación Conservación Momento Cinético</i>	<i>22</i>
<i>Ecuación 2-10: Ecuación de la Energía</i>	<i>22</i>
<i>Ecuación 2-11: Ecuación Básica de Bernouilli.....</i>	<i>22</i>
<i>Ecuación 2-12: Número de Reynolds (Re).....</i>	<i>24</i>
<i>Ecuación 2-13: Ecuación Fuerza de Arrastre</i>	<i>25</i>
<i>Ecuación 2-14: Ecuación Fuerza de Sustentación.....</i>	<i>26</i>
<i>Ecuación 5-1: Cálculo del límite elástico de los materiales compuestos</i>	<i>61</i>



1. Introducción

1.1. Contexto

En el 2015 se creó en la *Universidad Pontificia Comillas-ICAI* un grupo de estudiantes dispuestos a participar en competiciones en el mundo del motor de forma voluntaria, por absoluta vocación y con ganas de aprender a la vez que ponían en práctica los conocimientos adquiridos durante los años de carrera, el *ICAI Speed Club (ISC)*.

Esa misma temporada (2015-2016) el *ISC* se estrenó en la edición de *MotorStudent Petrol*. Esta competición consiste en diseñar y fabricar una moto de combustión para someterla a pruebas dinámicas y estáticas en competición. Una vez concluida esta primera competición para el *ISC*, la asociación se diversificó en otros dos proyectos de gran calibre: *MotorStudent Electric* y *FormulaStudent Electric*. Este último consiste en el diseño, desarrollo, construcción y competición de un monoplaza eléctrico siguiendo la normativa de la *FormulaStudent Deutschland* y es donde se ubica este Trabajo de Fin de Grado.

El verano pasado, el equipo fue capaz de sacar adelante el primer prototipo de monoplaza eléctrico, el *IFS-01*, que participó en la competición de Montmeló. A raíz de las pruebas de exigencia en la competición en circuito, el *ICAI Speed Club* supo analizar los principales defectos que tenía el diseño del prototipo *IFS-01*, y lo más importante, establecer las prioridades en el proceso de desarrollo para los monoplazas de las temporadas siguientes. El equipo se propuso diseñar un coche más sencillo pero que superara todas las pruebas y fuera apto para correr en el circuito. Para cumplir con ello, el equipo animó al mayor número de alumnos posible a sumarse a este desafío porque necesitaban a más gente para trabajar y, ofrecieron la oportunidad de vincular el Trabajo de Fin Grado al desarrollo del prototipo de la temporada 2018-2019, el *IFS-02*.



FIGURA 1-1: IFS-01 EN EL CIRCUITO DE MONTMELÓ [1]

El equipo se organiza en distintos departamentos: electrónico, eléctrico, mecánico y organización. Dentro del departamento mecánico existen distintos subdepartamentos que son los siguientes: motor, chasis, suspensiones y aerodinámica. A su vez estos subdepartamentos tienen sus propias divisiones que en el caso de la aerodinámica son las siguientes: innovación, fondo plano y carenado, siendo este último el contexto del trabajo, aunque se verá que el diseño del carenado se hará en paralelo con el del fondo plano.

1.2. Estado de la cuestión

1.2.1. Vista atrás y evolución [2]

La aerodinámica en el mundo de la automoción ha pasado de ser el patito feo a convertirse en uno de los sectores que concentra mayor desarrollo e investigación. El constante afán por conseguir que los vehículos alcanzasen mayores velocidades conllevó un desarrollo paralelo de la aerodinámica que demostró ser fundamental para el rendimiento y seguridad del automóvil, sobre todo en el mundo de la competición.

La gran mayoría de los coches de principios del siglo XX eran demasiado lentos como para cuestionarse sobre el rendimiento aerodinámico y por lo tanto el carenado cumplía con una función de proteger el equipamiento interno del coche de los elementos externos. Por ejemplo, el Ford T fue un vehículo que se asemejaba más a carruaje que a un coche motorizado. El techo era de lona y favorecía la aparición del ‘efecto bolsa’, aumentando la resistencia aerodinámica del conjunto.



FIGURA 1-2: PRIMERA GENERACIÓN DE FORD T (1908) [3]

En 1921, el inventor alemán Edmund Rumpler, diseñó un coche con un carenado que, además de ayudar al buen mantenimiento del coche, presentaba buenas prestaciones aerodinámicas que es conocido como ‘la gota de agua’ pero que generó muy poco interés. La forma de este elemento de la naturaleza fue lo que inspiró al inventor a la hora de diseñar el coche y consiguió que el coeficiente de fricción (C_D) fuera de tan solo 0,27. Más allá de un intento fallido de Chrysler para diseñar vehículos teniendo en cuenta el

factor aerodinámico, no fue hasta después de la Gran Depresión de los años treinta y de la Segunda Guerra Mundial que se produjeron importantes innovaciones.



FIGURA 1-3: 'LA GOTTA DE AGUA' DE RUMPLER [4]

Al comienzo de la segunda mitad del siglo XX, con los inicios de los túneles de viento, se empezaron a diseñar carenados específicos para reducir los efectos aerodinámicos en el rendimiento de los coches de competición. Por ejemplo, Mercedes fue la primera escudería en la *Formula 1* en introducir un coche totalmente carenado, el W196 con el que consiguieron el título de 1954. Más adelante, esta aplicación impulsó nuevas mejoras en los vehículos fuera del mundo de la competición que se quedaron restringidas a modelos de alta gama de fabricantes como Citroën Lotus o Porsche.



FIGURA 1-4: MODELO MERCEDES-BENZ W196 [5]

Durante los años 60 se incrementó la potencia de los motores de los coches de la *Formula 1*, llegando a alcanzar los 450 CV. Este avance y la voluntad de mejorar tiempos en competición generó problemas de tracción, sustentación y agarre en los monoplazas que supuso un gran desafío para los ingenieros, más allá de aumentar la superficie de contacto neumático-calzada y ablandar el compuesto del neumático, conceptos aeronáuticos que ya se conocían de antemano.

Fue Jim Hall, en 1966, quién tomó de referencia la forma alar de los aviones para solucionar el problema y cambiar el modo de pensar acerca de las prestaciones de los dispositivos aerodinámicos. Estos no solo servirían para reducir la interacción entre el fluido y el vehículo, sino que se usarían para aprovechar la corriente incidente para mejorar el rendimiento y las prestaciones. Hall pensó que invertir la posición de un alerón generaría una fuerza de sustentación negativa, lo que implicaría mayor agarre al suelo. Esta teoría resultó ser todo un éxito y marcó un antes y un después en el mundo de la

Formula 1. Al invento de Hall se le fueron sumando pequeñas mejoras como la de Chapman que, además de instalar pequeños alerones en la parte delantera del carenado para equilibrar las fuerzas sobre el coche, creó un alerón que cubría todo el ancho del coche y de una altura considerable para favorecer la entrada de aire no turbulento. Desde entonces la *FIA* tuvo que reglamentar el uso de estos dispositivos aerodinámicos porque se incrementaron tanto sus dimensiones que los soportes y ejes del monoplaça no podían sujetarlos, produciéndose graves accidentes.

Las constantes evoluciones de los túneles de viento han ayudado a afinar el diseño del carenado, a conocer una gran cantidad de trucos aerodinámicos y a usar estos últimos para otras funciones que mejoran el rendimiento del coche, como puede ser la refrigeración. Hoy en día el papel fundamental del carenado es aerodinámico ya que es la pieza que dirige el flujo de aire a lo largo del vehículo para que sea aprovechado por los dispositivos aerodinámicos como alerones, fondo plano o difusores. Por lo tanto, su diseño es determinante para el rendimiento del coche, complejo y exige una gran cantidad de pruebas para optimizarlo.

1.2.2. La aerodinámica en la actualidad y aplicación al IFS-02

Hoy en día el mantenimiento de un túnel de viento resulta muy caro y se ha optado por aprovechar las mejoras tecnológicas para simular el comportamiento del vehículo con el aire. Probar los diseños por simulación nos da total libertad para afinar las geometrías de los vehículos o incorporar innovaciones sin tener que construir un prototipo, lo que conlleva su correspondiente ahorro en dinero y tiempo.

La mayor facilidad a la hora de diseñar los elementos aerodinámicos y de medir sus prestaciones han ayudado a que la aerodinámica sea un elemento fundamental para el desarrollo y nuevas adaptaciones de una gran variedad de medios de transporte, también fuera del mundo de la competición. Debido al efecto directo que la resistencia aerodinámica tiene sobre el consumo de energía, los fabricantes de aviones, coches o trenes están constantemente aportando novedades a sus diseños para abaratar costes de operación, cumplir con los cada vez más exigentes límites de emisiones y reducir el impacto medioambiental. Por ejemplo, la incorporación de *winglets* o *sharklets* en los extremos de las alas de los aviones comerciales, la fabricación de coches cada vez más compactos o el afinamiento de la silueta de los trenes de alta velocidad son distintas soluciones adoptadas en este sentido.



FIGURA 1-5: SHARKLETS DEL MODELO A350 [6]



FIGURA 1-6: NUEVO PROTOTIPO DE TREN MAGLEV EN CHINA [7]



Por todo ello, el diseño del carenado para el monoplaza del equipo de esta temporada se hará en función del rendimiento aerodinámico de carenado que se obtenga de las simulaciones conjuntas con el fondo plano. A raíz de estos resultados, se modificará la geometría y se elegirán las mejores versiones de la pieza. Tal y como se ha venido haciendo a lo largo de la historia de la *Formula 1*, mejorar los resultados del año pasado es el principal objetivo del proyecto. Sabiendo que la simulación del carenado del prototipo pasado obtuvo un $C_D=0.181$ y un $C_L= -0.114$ se intentarán mejorar estos resultados a pesar de que el carenado de este año solo incluye la parte delantera del coche y el fondo plano a diferencia del monoplaza de la temporada pasada que iba enteramente carenado.

1.3. Motivación

Como se ha visto previamente el sector de la aerodinámica ha estado en constante evolución desde sus inicios y sigue en pleno desarrollo e investigación. Por esto mismo, el estudio aerodinámico resulta primordial en el diseño de un coche ya que la optimización de la fuerza de resistencia a la corriente de aire incidente permite reducir el consumo de energía o combustible, en el sector de los transportes, o ganar velocidad en competición, en el mundo de la *Formula 1*.

No tenemos más que remontarnos al ejemplo de la temporada de *Formula 1* del 2009, cuando ingeniosas innovaciones aerodinámicas por parte del equipo *BRAWN GP* rompieron con la tónica de temporadas anteriores y representaron un punto de inflexión en esta competición, para demostrar que es un sector puntero, en auge y con un gran potencial de desarrollo.

Además, el buen diseño del carenado es fundamental para las prestaciones aerodinámicas del monoplaza lo que añade un grado de motivación y exigencia. Esta pieza es con la primera que choca la corriente de aire incidente y por lo tanto debe dirigir eficientemente el aire hacia las zonas que nos interesan, para generar los coeficientes de 'lift' y 'drag' más convenientes.

Tampoco hay que olvidarse de la función estética que cumple el carenado, al ser una de las partes más visibles del monoplaza, lo que implica una especial atención en el diseño de la pieza, pero, sobre todo, una minuciosa fabricación.

Con todo esto, se justifica que una motivación de este trabajo es el de establecer un proceso completo de ingeniería desde el diseño hasta la fabricación, pasando por la elección de materiales y la simulación computacional, satisfaciendo la función técnica y estética de la pieza.



1.4. Objetivos

En el lenguaje aerodinámico existen dos conceptos muy importantes que son el ‘drag’, que hace referencia a la fuerza de arrastre que genera el fluido sobre el cuerpo en movimiento, y el ‘lift’, que corresponde con la resultante de la fuerza vertical generada por la diferencia de presiones, en la superficie de la pieza, generada por la variación de velocidad del fluido al chocar con el cuerpo sólido. Con respecto a esto último, los objetivos serán los siguientes:

- Simular un máximo de veces el comportamiento del carenado para intentar conseguir el mejor diseño posible.
- Diseñar un carenado para el cual obtengamos el mínimo coeficiente de ‘drag’ y obtengamos un ‘lift’ lo más bajo posible (cuanto más negativo mejor) para generar la mayor carga aerodinámica posible.
- Se fijará como objetivo reducir el coeficiente de ‘drag’ en un 10%, hasta obtener un $C_D=0.163$ y disminuir (hacer más negativo) el ‘lift’ en un 20% como mínimo, resultando $C_L=-0.137$.

El diseño del carenado tiene que ser geoméricamente sencillo, es decir sin ángulos pronunciados ni excesivas curvas, para que la fabricación de los moldes sea menos compleja, permitiendo así ahorrar dinero. También se tendrá que escoger el buen material de fabricación para sea viable fabricarlo y cumpla con el resto de las restricciones (peso, maleabilidad, resistencia, ...). Todo esto nos lleva a establecer los siguientes objetivos desde el punto de vista de la fabricación:

- Diseñar un carenado asequible y fácil de fabricar, pero lo suficientemente resistente para que cumpla con las normas de la competición.
- Pieza que sea el punto de partida de desarrollos futuros y/o incorporaciones sugeridas por el área de innovación.
- Realización de un proceso completo de ingeniería desde el diseño/concepción hasta la fabricación y el montaje

1.5. Recursos empleados

Para poder cumplir con los objetivos establecidos y elaborar el Trabajo de Fin de Grado se han destinado recursos muy variados ya que existen dos etapas bien diferenciadas: el diseño y la fabricación.

Para la etapa de diseño y análisis se han utilizado sobre todo herramientas informáticas:

- Diseño *CAD*: *SolidWorks*
- Análisis computacional: *ANSYS WORKBENCH (Fluent)*

Para la etapa de fabricación se han utilizado los siguientes recursos:

- Molde del carenado en madera
- Resinas y endurecedor, fibra de carbono
- Material para formación de composites por infusión (malla, bomba de vacío, ...)

2. Bases teóricas

Para poder optimizar el diseño aerodinámico del carenado el Análisis Computacional ha sido la herramienta principal pero también hay que tener presentes unos mínimos teóricos sobre las propiedades y el comportamiento de los fluidos al interactuar con los cuerpos sólidos, lo que se conoce como mecánica de fluidos. Esto será de gran ayuda para poder configurar debidamente los parámetros de simulación y saber interpretar de forma correcta los resultados que arrojan los ensayos ya que al fin y al cabo el estudio aerodinámico consiste en analizar el comportamiento del fluido al incidir sobre la pieza que se desea estudiar.

2.1. Definición de un fluido y propiedades [8]

Un fluido es un cuerpo continuamente deformable cuando está sometido a una tensión cortante (esfuerzo tangencial).

Mientras que un fluido siempre se moverá en mayor o menor medida ante cualquier esfuerzo cortante, en un sólido se producirá un cambio fijo asociado a un determinado valor de tensión cortante aplicada sobre este. Por lo tanto, la deformación de un sólido, siempre que sea elástica, estará asociada a un cierto ángulo de deformación constante a diferencia de un fluido donde se habla de velocidad de deformación.

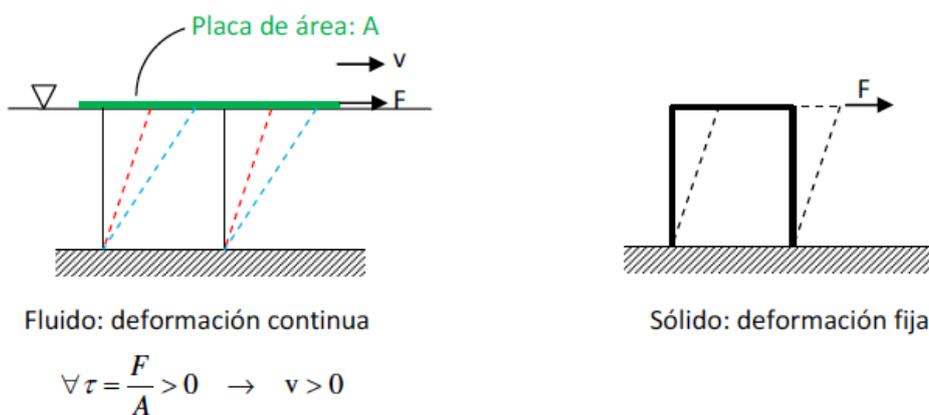


FIGURA 2-1: DEFORMACIÓN DE UN FLUIDO VS. DEFORMACIÓN DE UN SÓLIDO [9]

Los fluidos se distinguen en dos grandes categorías: los líquidos y los gases. En el siguiente cuadro comparativo se pueden apreciar sus respectivas características principales:

	LÍQUIDOS	GASES
Conservación Volumen	Sí	No
Compresibilidad	Muy pequeña (casi despreciable)	Elevada
Cohesión partículas	Fuerte	Despreciable
Distancia intermolecular	Pequeña	Grande

TABLA 2-1: CUADRO COMPARATIVO ENTRE LOS LÍQUIDOS Y LOS GASES

Para este trabajo las propiedades más importantes de los fluidos que vamos a utilizar son las siguientes:

- Densidad ($\frac{kg}{m^3}$):

La densidad corresponde a la masa de una sustancia por unidad volumétrica que ocupa y se escribe de la siguiente forma:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

ECUACIÓN 2-1: ECUACIÓN DE LA DENSIDAD

Con:

$$\rho = \text{densidad} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

$$m = \text{masa} (kg)$$

$$V = \text{volumen} (m^3)$$

Esta magnitud física permite establecer las dos grandes categorías en la mecánica de fluidos: gases y líquidos. En general los líquidos suelen tener una densidad de tres órdenes de magnitud superior a la de los gases a presión atmosférica (1 bar).

Los gases son fluidos cuya densidad depende tanto de la presión (p) como de la temperatura (T), $\rho = f(T, p)$, y se catalogan como fluidos compresibles. De hecho, en un caso ideal, el comportamiento de estos fluidos viene determinado por la ecuación de los gases perfectos cuyas únicas variables son la presión, la temperatura y la densidad.

$$P = \rho * R * T$$

ECUACIÓN 2-2: ECUACIÓN DE LOS GASES IDEALES

Con:

$P =$ presión del aire (Pa)

$\rho =$ densidad del aire ($\frac{kg}{m^3}$)

$R =$ constante específica (para el aire = $287 \frac{m^2}{K * s^2}$)

$T =$ temperatura (K)

En este caso se considerará el aire como gas perfecto y se comportará como rige la ecuación anterior.

Los líquidos son fluidos cuya densidad se considera constante frente a cambios de presión (p) y por lo tanto esta propiedad depende en gran medida de la temperatura (T), $\rho = f(T)$. Aunque se considere que los líquidos son incompresibles, estos son más compresibles que los sólidos.

- Presión (Pa):

La presión es una magnitud escalar que actúa como compresión interna en un cuerpo y ejerce una fuerza perpendicular a la superficie de las paredes sobre las que incide el fluido. Para calcular la presión en un determinado punto se puede calcular como la columna de fluido que se encuentra por encima.

$$P = \rho * g * h$$

ECUACIÓN 2-3: ECUACIÓN DE LA PRESIÓN (COLUMNA DE FLUIDO)

Con:

$P =$ presión (Pa)

$\rho =$ densidad ($\frac{kg}{m^3}$)

$g =$ aceleración gravedad ($\frac{m}{s^2}$)

$h =$ columna de fluido (Pa)



Los gradientes de presión son el origen de desplazamiento de masas de aire como sucede en el ámbito de la meteorología que extrapolado a este caso se podrán determinar los flujos de aire que se generarán sobre el carenado y saber cómo aprovecharlos para optimizar el rendimiento del coche.

En las simulaciones se trabajará con presiones relativas tomando como referencia la presión atmosférica (1 bar), teniendo presiones negativas en el caso de que sean inferiores a esta y positivas en el caso contrario.

- Viscosidad dinámica ($\frac{kg}{m*s}$):

La viscosidad es un parámetro que determina la resistencia al desplazamiento de los fluidos, es decir que se relaciona el esfuerzo con la velocidad de deformación de las partículas. Se asemeja al coeficiente de rozamiento en el caso de los sólidos. Por ejemplo, en el caso de la miel, la viscosidad es mucho mayor que la del agua.

$$\tau = \mu * \frac{du}{dy} = \mu * \frac{U}{h}$$

ECUACIÓN 2-4: ECUACIÓN VISCOSIDAD

Con:

$\tau =$ *esfuerzo cortante (Pa)*

$\mu =$ *viscosidad dinámica ($\frac{kg}{m * s}$)*

$U =$ *velocidad de deformación ($\frac{m}{s}$)*

$h =$ *altura columna de fluido (m)*

La viscosidad es una propiedad de los fluidos que está en constante estudio y recibe el nombre de reología. Esta rama de la física ha determinado que los fluidos pueden dividirse en dos grandes ramas en función de su viscosidad:

-Fluidos Newtonianos: estos fluidos mantienen una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación, por lo que poseen una viscosidad dinámica constante (agua, aire, vino, ...). Debido a esta característica estos fluidos pueden describirse muy bien y presentan muchas ventajas a la hora de trabajar matemáticamente con ellos.

-Fluidos no Newtonianos: la relación entre la velocidad de deformación del fluido y el esfuerzo cortante aplicado no es lineal. De hecho, la relación entre estas dos magnitudes no es igual en todos los fluidos de esta categoría y varía en función de distintas subcategorías.

En el caso de los fluidos pseudoplásticos la resistencia al desplazamiento a medida que el esfuerzo cortante se incrementa disminuye como es el caso de la sangre.

De forma contraria se comportan los fluidos dilatantes cuya resistencia al desplazamiento se incrementa a medida que el esfuerzo cortante es mayor. También existen los plásticos de Bingham que son materiales que se comportan como sólidos para tensiones cortantes pequeñas pero que fluyen viscosamente para esfuerzos mayores a su límite elástico.

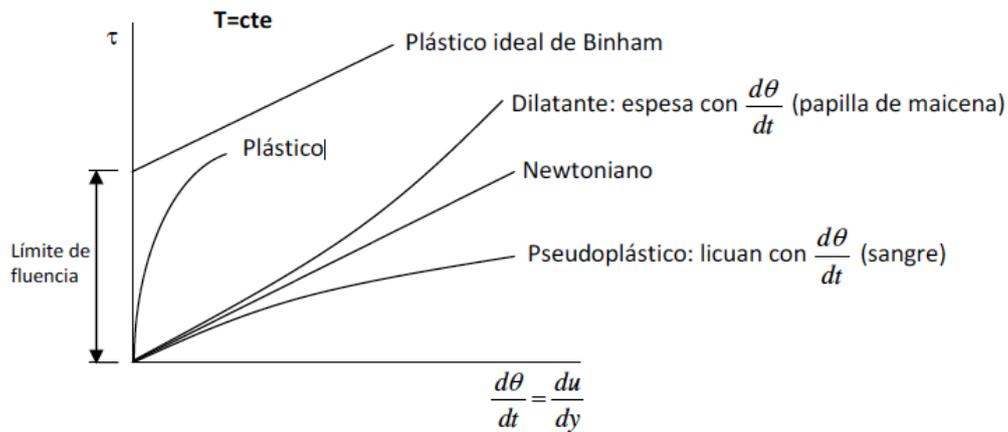


FIGURA 2-2: ESFUERZO CORTANTE EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN PARA DISTINTOS TIPOS DE FLUIDO [9]

2.2. Dinámica de fluidos

En mecánica de fluidos, se sigue un planteamiento Euleriano donde se establece un *Volumen de Control* (VC) no necesariamente fijo por el cual el fluido cuyo comportamiento quiere ser analizado fluye a través de sus límites.

El estudio de la mecánica de fluidos se rige por cuatro leyes [9]:

- Ley de Conservación de la Masa
- Ley de Conservación de la Cantidad de Movimiento
- Ley de Conservación del Momento Cinético
- Ecuación de la Energía

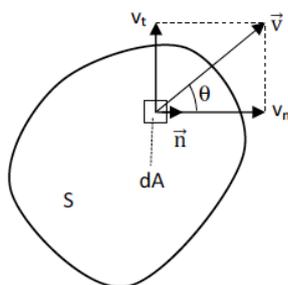
Antes de describir las cuatro leyes es necesario explicar algunos conceptos que están estrechamente ligados a ellas:

- Teorema del Transporte de Reynolds: permite relacionar la derivada temporal de una magnitud física (B) del sistema con la evolución ($\frac{dB}{dt} = \beta$) que esta experimenta dentro del volumen de control. Esto es lo que nos permite pasar de un planteamiento de mecánica clásica a uno de mecánica de fluidos.

$$\underbrace{\frac{dB_{SISTEMA}}{dt}}_{\substack{\text{VARIACIÓN DE LA MAGNITUD} \\ \text{B EN EL SISTEMA}}} = \underbrace{\frac{d}{dt} \int_{VC} \beta \rho dV}_{\substack{\text{VELOCIDAD DE ACUMULACION} \\ \text{DE LA MAGNITUD B EN EL VC}} + \underbrace{\int_{SC} \beta \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA}_{\substack{\text{FLUJO DE LA MAGNITUD} \\ \text{B A TRAVÉS DEL VC}}$$

ECUACIÓN 2-5: ECUACIÓN TEOREMA DE TRANSPORTE DE REYNOLDS [9]

- Caudal ($\frac{m^3}{s}$): volumen que fluye en dirección normal a la superficie que atraviesa por unidad de tiempo



$$dV = v \cos(\theta) dt dA = v_n dt dA = (\vec{v} \cdot \vec{n}) dt dA$$

$$dQ = \frac{dV}{dt} = (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA$$

$$Q = \int_S dQ = \int_S (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA \begin{cases} >0 & \text{sale} \\ <0 & \text{entra} \end{cases}$$

FIGURA 2-3: CAUDAL EN UN VOLUMEN DE CONTROL [9]

- Gasto másico ($\frac{kg}{s}$): masa de fluido que atraviesa perpendicularmente una superficie dada por unidad de tiempo. Se puede calcular a partir del caudal multiplicándolo por la densidad del fluido (ρ).

$$\dot{m} = Q * \rho$$

ECUACIÓN 2-6: ECUACIÓN DEL GASTO MÁSIKO

Con:

$$m = \text{gasto másico} \left(\frac{kg}{s} \right)$$

$$Q = \text{caudal} \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

$$\rho = \text{densidad} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

- Velocidad ($v, \frac{m}{s}$): debido a las condiciones de no deslizamiento en las paredes de un cuerpo por el que circula el fluido la velocidad del flujo no es uniforme y en los cálculos de las leyes anteriores se usa una velocidad media. En el caso del carenado donde el fluido circula abiertamente se considera la velocidad media como la velocidad original del flujo a excepción de la capa límite donde sí que existe un perfil de velocidad no rectilíneo y los cálculos se harán con una velocidad media distinta a la original.

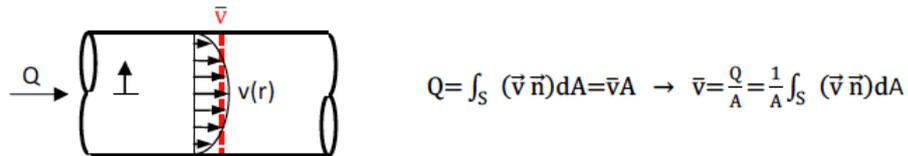


FIGURA 2-4: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA VELOCIDAD MEDIA [9]

Una vez conocidos estos conceptos el desarrollo de las cuatro leyes es el siguiente:

- Ley de Conservación de la Masa ($B = Masa$)

$$0 = \frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA \rightarrow 0 = \frac{dM_{vc}}{dt} + \sum m_{SAL} - \sum m_{ENT}$$

ECUACIÓN 2-7: LEY DE CONSERVACIÓN DE LA MASA

- Ley de Conservación de la Cantidad de Movimiento ($B=$ Cantidad de Movimiento)

$$\underbrace{\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{VC} \vec{v} \rho dV + \int_{SC} \vec{v} \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = \sum \vec{F}}_{2^{\circ} \text{ Ley de Newton}}$$

ECUACIÓN 2-8: LEY CONSERVACIÓN CANTIDAD DE MOVIMIENTO

- Ley de Conservación del Momento Cinético ($B=$ Momento Cinético)

$$\frac{d\vec{H}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{VC} (\vec{r} \times \vec{v}) \rho dV + \int_{SC} (\vec{r} \times \vec{v}) \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = \sum \vec{M}$$

ECUACIÓN 2-9: ECUACIÓN CONSERVACIÓN MOMENTO CINÉTICO

- Ecuación de la Energía ($B=$ Energía)

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{VC} e \rho dV + \int_{SC} e \rho (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA = \dot{Q} - \dot{W}$$

ECUACIÓN 2-10: ECUACIÓN DE LA ENERGÍA

En el caso de particularizar esta ecuación al caso que se está estudiando se tiene que el caudal a la entrada y a la salida es el mismo, sin intercambio de trabajo mecánico y que el flujo es estacionario e incompresible. Por lo tanto, asumiendo todos estos factores se llega a la Ecuación de Básica de Bernouilli:

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} = cte$$

ECUACIÓN 2-11: ECUACIÓN BÁSICA DE BERNOUILLI



2.3. Comportamiento de un fluido alrededor de un cuerpo

Cuando un fluido incide sobre un objeto se produce una desviación en la trayectoria del fluido creando un nuevo campo de velocidades y presiones alrededor del objeto, denominado capa límite. Con respecto al cuerpo sobre el que incide el fluido, estas modificaciones en el flujo externo generan dos tipos de fuerzas aerodinámicas a las que se ve sometido: la fuerza de sustentación, conocida como 'lift', y la fuerza de arrastre, conocida como 'drag'.

2.3.1. Concepto de capa límite y número de Reynolds

La capa límite es una zona donde el perfil de velocidades del flujo incidente sobre un cuerpo se ve alterado por el efecto viscoso, es decir que las partículas del flujo en contacto con el cuerpo tienden a tener una velocidad nula (condición de no deslizamiento) mientras que las más alejadas mantienen la velocidad de partida. Se ha establecido que la capa límite corresponde con la zona donde el fluido tiene una velocidad menor al 99% de la original. Este concepto es de vital importancia porque está íntimamente ligado a la aparición de las fuerzas aerodinámicas y, por lo tanto, del rendimiento aerodinámico del cuerpo.

Existen dos tipos de capa límite: la laminar y la turbulenta. En flujo laminar el fluido se desplaza de forma ordenada en láminas a distintas velocidades sin intercambio de materia entre ellas ya que estas soportan las tensiones cortantes viscosas originadas por la diferencia de velocidades disipando poca energía y reduciendo la fuerza de arrastre aplicada sobre el cuerpo en el que incide. Sin embargo, este tipo de flujo pierde velocidad a medida que recorre la superficie del cuerpo hasta que se frena y acaba por desprenderse, contraproducente para generar fuerza de sustentación.

En cambio, el flujo turbulento es desordenado y disipa gran cantidad de energía, pero se adhiere más fácilmente a la superficie permitiendo que la fuerza de sustentación generada sea mayor. Esto explica por qué las alas de los aviones están diseñadas para que la capa límite sea turbulenta.

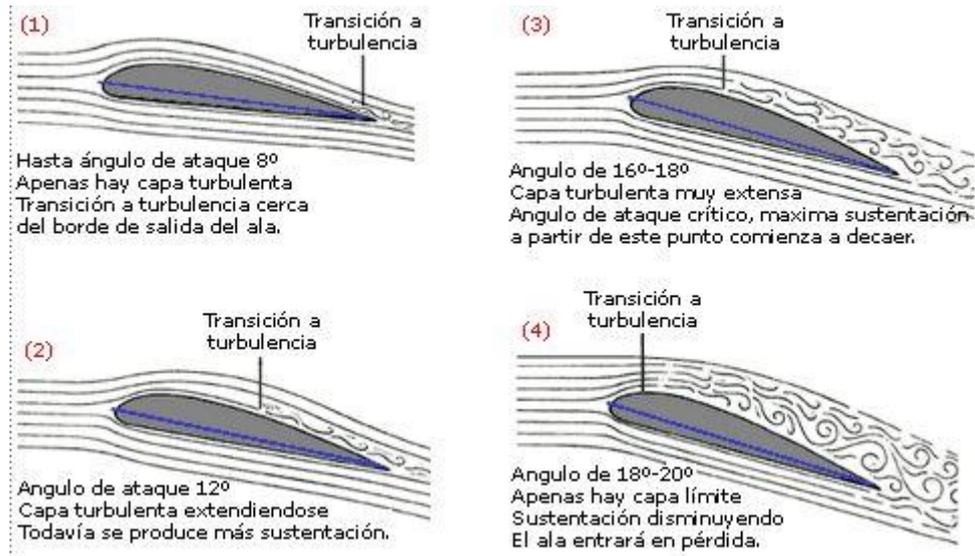


FIGURA 2-5: COMPORTAMIENTO DE LA CAPA LÍMITE Y EFECTOS EN LA SUSTENTACIÓN [10]

En función de la relación entre fuerza de sustentación y fuerza que se pretenda conseguir de arrastre se tendrán que diseñar los elementos aerodinámicos de forma específica para conseguir el tipo de capa límite que permita cumplir con las exigencias propuestas. En el caso del carenado se ha priorizado reducir la fuerza de arrastre con respecto a la fuerza de sustentación por lo que se pretende que el régimen de flujo sea laminar.

Para poder determinar si el flujo es laminar o turbulento existe el número de Reynolds. Este número es adimensional y se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho * L_c * v_c}{\mu}$$

ECUACIÓN 2-12: NÚMERO DE REYNOLDS (RE)

Con:

$Re = \text{Número de Reynolds (adimensional)}$

$\rho = \text{densidad } \left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$v_c = \text{velocidad característica } \left(\frac{m}{s}\right)$

$L_c = \text{longitud característica (m)}$

$\mu = \text{viscosidad dinámica } \left(\frac{kg}{m * s}\right)$

Se han establecido tres intervalos de caracterización del comportamiento del fluido en función del número de Reynolds como se puede observar en la siguiente tabla.

	Número de Reynolds
Laminar	$<10^3$
Transición	$10^3 < Re < 10^6$
Turbulento	$>10^6$

TABLA 2-2: TIPO DE FLUJO EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE REYNOLDS

Un número de Reynolds bajo corresponde con un flujo laminar, es decir bajas velocidades o longitudes características. Los valores de Reynolds medios coinciden con zonas de transición de flujo laminar a turbulento y, en puntos más alejados del cuerpo, se obtienen números de Reynolds elevados que coinciden con flujo turbulento y se tienen velocidades mayores.

2.3.2. Fuerza de sustentación (lift)

La fuerza de sustentación es una fuerza aerodinámica perpendicular a la dirección en la que se desplaza el fluido con respecto al objeto que aparece por la diferencia de presiones existente entre la parte superior e inferior del objeto (también entre los lados en el caso de no ser un objeto simétrico) por la distribución del flujo externo alrededor de este que se obtiene de la siguiente expresión:

$$F_L = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * A * C_L$$

ECUACIÓN 2-13: ECUACIÓN FUERZA DE ARRASTRE

Esta fuerza aparece cuando existe una velocidad relativa entre la dirección del fluido y el cuerpo sobre el cual queremos estudiar el comportamiento aerodinámico. Al incidir el fluido sobre el cuerpo la forma de este desvía el flujo de forma poco predecible y se genera una diferencia de velocidades considerable entre la parte superior e inferior del cuerpo. Este nuevo reparto del campo de velocidades sobre la pieza genera una nueva distribución de las presiones, en la parte donde la velocidad es mayor la presión será menor que en la parte donde la velocidad sea menor, tal y como establece la ecuación básica de Bernouilli. La fuerza de sustentación se ejercerá desde donde existe la mayor presión hacia donde la presión es menor.

La capa límite cumple con un papel muy importante para conseguir la fuerza de sustentación deseada. Se busca que la capa límite quede lo más adherida posible a las



superficies del cuerpo para generar ese efecto de sustentación. lo largo de toda la superficie para generar. Para conseguir este objetivo se tiene que encontrar un equilibrio entre el ángulo de ataque, que corresponde con el ángulo que forma la geometría con el flujo incidente, y maximizar el coeficiente de lift ya que este aumenta a medida que el ángulo de ataque aumenta, pero existe un ángulo de ataque crítico a partir del cual se pierde la sustentación como se ha explicado anteriormente.

El buen diseño de los elementos aerodinámicos es fundamental para el debido funcionamiento de ciertas máquinas ya que son estos elementos los que direccionan el flujo incidente alrededor del cuerpo y generan las zonas de alta y baja presión en función de la función aerodinámica que se busque. En el sector aeronáutico el correcto diseño de las alas es lo que permite que un avión en movimiento se vea sometido a una fuerza de sustentación positiva (hacia arriba) y le permita despegar. En el mundo del automovilismo, especialmente en el ámbito de la competición, el efecto que se busca es precisamente el opuesto, generar la mayor fuerza de sustentación posible negativa (hacia abajo) para maximizar el agarre del coche a pista en las curvas y rodar más rápido en carrera.

2.3.3. Fuerza de arrastre (drag)

La fuerza de arrastre es una fuerza aerodinámica paralela a la dirección en la que se desplaza el fluido con respecto al objeto que aparece por la diferencia de presiones existente entre la parte delantera y trasera del objeto por la distribución del flujo externo alrededor de este. De forma más intuitiva se puede decir que es la fuerza que experimenta un cuerpo al desplazar un determinado volumen de fluido a avanzar en él. Esta fuerza se obtiene de la siguiente expresión:

$$F_D = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * A * C_D$$

ECUACIÓN 2-14: ECUACIÓN FUERZA DE SUSTENTACIÓN

La fuerza de arrastre se genera por las mismas razones por las que aparece la fuerza de sustentación. El hecho de que exista una velocidad relativa entre el cuerpo y el flujo incidente provoca que este último se desvíe al chocar con el cuerpo. Se genera por lo tanto un campo de velocidades muy desigual entre la parte delantera y trasera del cuerpo. En la parte delantera, el fluido incidente se frena de forma repentina por el choque con el cuerpo que conlleva un importante aumento de presión en esa parte del cuerpo. Por el contrario, la parte trasera del cuerpo se ve sometida a una disminución presión por el efecto barrera de la parte delantera. Con esta disposición, la fuerza de arrastre se ejerce desde la parte delantera hacia la trasera, es decir en el sentido del flujo incidente, lo que aumenta la potencia requerida para avanzar por el fluido.

Tal y como sucede para la fuerza anterior la capa límite juega un papel fundamental para intentar reducir los efectos de esta fuerza. El desprendimiento de capa límite, normalmente en la parte trasera del elemento aerodinámico, genera una estela de baja presión contraproducente que aumenta la fuerza de arrastre. Este efecto puede reducirse intentando que no se produzca desprendimiento de capa límite o, al menos, retrasarlo al máximo, afinando las geometrías (cuanto más largo y delgado mejor).

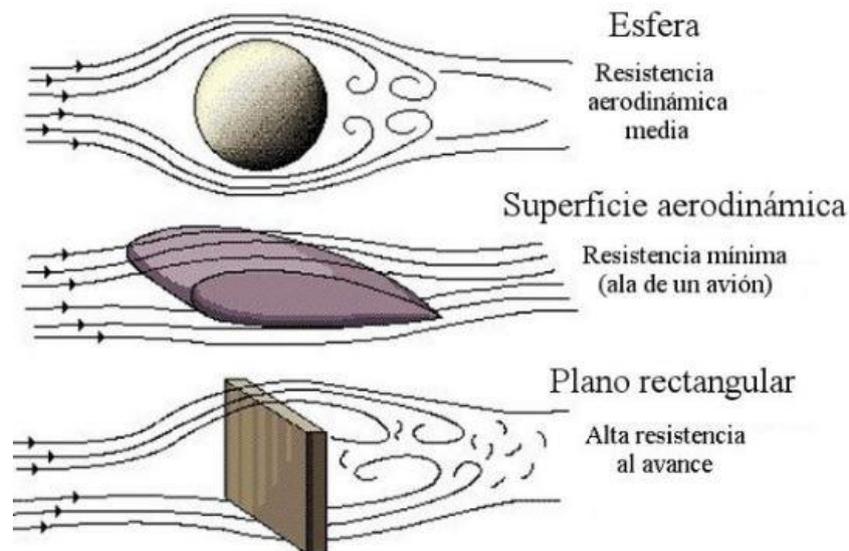


FIGURA 2-6: RESISTENCIA AERODINÁMICA EN FUNCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE UN CUERPO [11]

Por lo tanto, para minimizar la resistencia al avance del monoplaza el diseño del carenado intentará que el drag generado sea lo menor posible para reducir la potencia consumida, pero, en especial, para reducir los tiempos en pista.

2.3.4. Efecto suelo

En automovilismo, el efecto suelo se produce cuando la sección de paso del aire está delimitada por el suelo y un elemento aerodinámico que incrementan la velocidad de paso del fluido y disminuyen su presión generando una carga aerodinámica adicional favorable para el rendimiento del monoplaza.

El carenado cumple con la función de distribuir el aire al resto del coche y, por lo tanto, cuanto más aire distribuya a la parte inferior del coche más efecto suelo se generará. En la parte inferior del monoplaza, la sección de paso del aire se va reduciendo progresivamente hasta quedar reducida al espacio disponible entre fondo plano y asfalto. Esto provoca un aumento de la velocidad del aire y, por consiguiente, se genera una zona de depresión que aumenta el *downforce*.

Por estos motivos los carenados que suelen generar mayor lift debido al efecto suelo son los que tienen el morro orientado hacia arriba porque redirigen mejor el flujo y la sección disminuye progresivamente. Sin embargo, el otro tipo de carenado genera lift por su propia forma que puede ser mayor que el generado por el efecto suelo lo que implica que se tengan que simular los dos modelos para medir sus prestaciones.



2.3.5. Centro de presiones

El Centro de Presiones (CdP) corresponde con el punto del elemento aerodinámico donde se podría posicionar la resultante de las fuerzas horizontal y vertical originadas por la distribución de presiones sobre este. Determinar donde se ubica este punto es muy importante para los diseños aerodinámicos ya que en el caso de que este punto no coincide con el centro de masas se pueden generar momentos que se tendrán que contrarrestar o estudiar para reducir su impacto en posibles desequilibrios que entorpezcan el rendimiento del monoplaza o aeronave.



3. Normativa de diseño para los elementos aerodinámicos

Como en toda competición oficial automovilística existen una serie de normas y restricciones que tienen como objetivo principal el de asegurar un correcto desarrollo del evento sin poner en peligro a los participantes ni al público. Las normas también establecen los límites de las infinitas opciones de diseño que existen para intentar homogeneizar el rendimiento de los coches y así obligar a los ingenieros a investigar e innovar constantemente que hacen más emocionante la competición.

En este caso, la norma que se debe seguir es la estipulada en el apartado 7 de la competición *FormulaStudent Germany* [12].

3.1. Definición de elemento aerodinámico

La norma establece que cualquier pieza del monoplace destinada guiar la corriente de fluido incidente para mejorar el lift y reducir el drag es designada como elemento aerodinámico. Las piezas de sujeción de los elementos aerodinámicos no son consideradas como tal a no ser que estén diseñados para serlo.

3.2. Restricciones dimensionales de los elementos aerodinámicos

3.2.1. Restricciones de altura

- Todos los elementos aerodinámicos que se encuentren por delante del plano vertical generado por la cara frontal del reposacabezas del piloto estando este último en su posición más retrasada, y sin tener en cuenta cualquier tipo acolchado que exista, no pueden sobrepasar una altura de 500 milímetros desde el suelo.
- Todos los elementos aerodinámicos situados por delante del eje delantero y sobrepasando la cara interior de los neumáticos delanteros no pueden sobrepasar una altura de 250 milímetros.
- Todos los elementos aerodinámicos colocados detrás del plano vertical generado por la cara frontal del reposacabezas del piloto en su posición más retrasada, excluyendo cualquier tipo de acolchado, debe tener una altura máxima de 1200 milímetros desde el suelo.



3.2.2. Restricciones de anchura

- Cualquier elemento aerodinámico situado a una altura inferior de 500 milímetros desde el suelo por detrás del eje de los neumáticos delanteros no puede ser más ancho que el plano vertical generado por los puntos más externos de los neumáticos traseros y delanteros.
- Cualquier elemento aerodinámico que exceda una altura de 500 milímetros desde el suelo no puede sobrepasar el plano vertical generado por la cara interna de los neumáticos traseros.

3.2.3. Restricciones de longitud

- Todo elemento aerodinámico debe extenderse menos de 700 milímetros desde el punto más adelantado de los neumáticos delanteros.
- Todo elemento aerodinámico debe estar a una distancia máxima de 250 milímetros desde el punto más retrasado de los neumáticos traseros.

3.2.4. Radios mínimos de aristas de los elementos aerodinámicos

- Todas las aristas frontales horizontales y verticales de los elementos aerodinámicos que son susceptibles de impactar con un peatón deben tener un redondeo de radios superiores a 5 y 3 milímetros respectivamente.
- Todos los bordes frontales en el carenado delantero susceptibles de impactar con un peatón deben tener radios enfrentados de al menos 38 milímetros (1.5 pulgadas). Esta restricción debe extenderse a por lo menos un ángulo de cuarenta y cinco grados relativos a la dirección hacia adelante, a lo largo de la parte superior, ambos lados y la parte inferior de todos los bordes afectados.

3.2.5. Resistencia y estabilidad de los elementos aerodinámicos

- Todos los elementos aerodinámicos deben soportar una fuerza de 200N distribuida en un área mínima de 225 centímetros cuadrados y no deformarse más de 10 milímetros en la dirección de aplicación de la carga.
- Todos los elementos aerodinámicos deben soportar una fuerza puntual de 50N aplicada en cualquier dirección y no deformarse más de 25 milímetros.

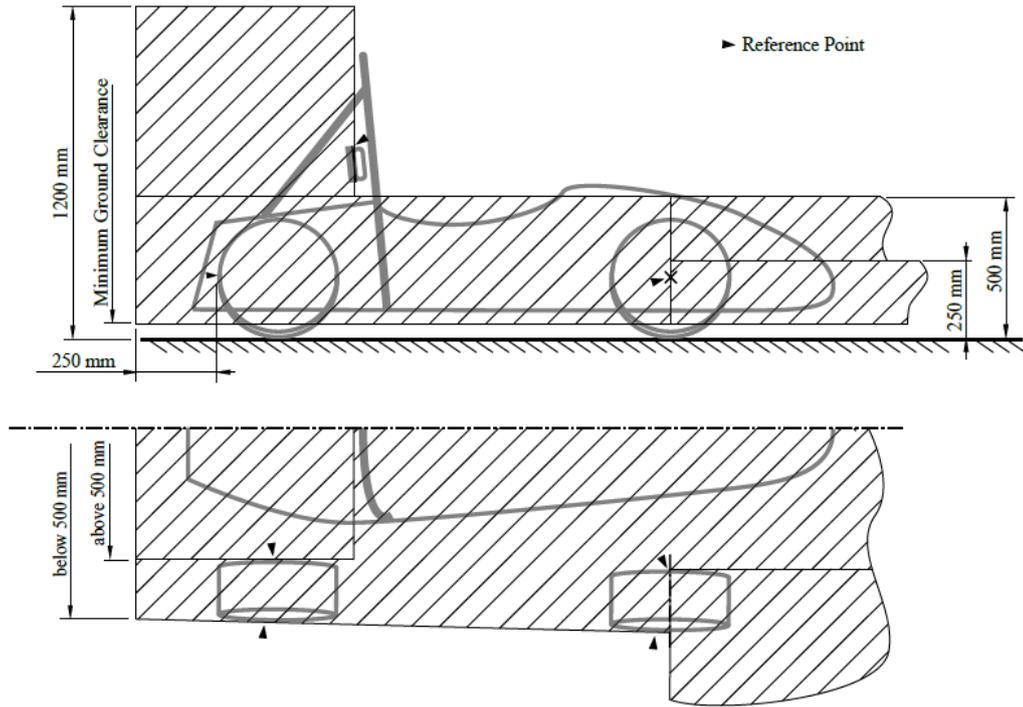


FIGURA 3-1: ESQUEMA RESUMEN DE LAS RESTRICCIONES



4. Procesos de diseño y análisis de prototipos

4.1. Metodología de trabajo

El diseño del carenado consiste en el desarrollo de una pieza que tiene que satisfacer tanto la parte mecánica (dureza, peso, resistencia) como la componente aerodinámica ('drag' y 'lift'), por lo que la concepción de esta pieza: forma, comportamiento aerodinámico, materiales; es compleja.

Por estos motivos, se decidió empezar a diseñar prototipos de carenado a partir de las dimensiones del chasis del monoplaza de la temporada pasada. Esto sería útil para poder coger soltura con el *CAD* utilizado para el diseño, pero sobre todo con el programa *ANSYS Fluent*, que será la herramienta utilizada para el analizar el comportamiento aerodinámico del carenado. El objetivo de todo esto es coger práctica con estos programas para que, cuando se tuviera la nueva versión del chasis, este trabajo realizado previamente sirviese como estudio preliminar para adquirir la metodología de trabajo necesaria para el desarrollo definitivo del carenado.

Se partió sobre dos posibles tipos de carenado, uno que dirigiese el flujo de aire hacia arriba y otro que dirigiese el flujo de aire hacia abajo. Se diseñaron en el módulo de Superficies de *SolidWorks* y simularon en *ANSYS Fluent*. Estas simulaciones nos ayudarían a determinar qué tipo de carenado tendría un mejor comportamiento frente a una corriente de aire incidente (analogía con el coche corriendo) para, posteriormente, seguir con el desarrollo del prototipo que haya dado mejor resultado.



FIGURA 4-1: CARENADO QUE DIRIGE EL AIRE INCIDENTE HACIA ARRIBA [13]



FIGURA 4-2: CARENADO QUE DIRIGE EL AIRE INCIDENTE HACIA ABAJO [14]

En un primer momento se estableció que se simularían los carenados de forma individual, es decir sin ningún otro elemento del monoplace, para obtener unos primeros resultados e ir viendo cual era la dinámica del proceso. Más adelante se empezó a simular el carenado unido al fondo plano y se añadió un bloque macizo para representar el chasis del monoplace, y así empezar a tener resultados aerodinámicos más fiables ya que tenían en cuenta el efecto del fondo plano y de la forma orientativa del chasis, tal y como sucederá en pista.

Antes de seguir trabajando, esperamos a saber cómo iba a ser la versión definitiva del chasis para esta temporada ya que, en el caso de cambiar mucho con respecto al de la temporada pasada, el trabajo realizado hasta aquel momento serviría simplemente como entrenamiento, sin poder utilizarlo como base para un posterior desarrollo. Al tener un chasis distinto, el margen para diseñar el carenado cambia, y, por lo tanto, las libertades de forma y diseño que se habían tomado para los dos diseños de partida ya no serían válidas, obligando a partir de cero con dos diseños de base nuevos.

El nuevo chasis presenta variaciones importantes con respecto al de la temporada pasada así que hemos tenido que volver al punto de partida inicial y diseñar de nuevo los dos prototipos base de carenado. Esta nueva versión del chasis tiene mucho menos margen de maniobra en la zona del morro del monoplace al haber aumentado la batalla, además de contar con el tamaño del amortiguador de impactos y las restricciones de la norma, lo que obliga a diseñar por completo los carenados.

En esta situación se estaba trabajando para diseñar el carenado definitivo que se instalará en el monoplace y las simulaciones que se hicieron tenían en cuenta muchos más factores que las realizadas previamente. Los carenados se simularán directamente con una versión fija del fondo plano teniendo en cuenta las turbulencias generadas por la rotación de los neumáticos, la cabeza del piloto y el chasis del monoplace. De esta forma obtendremos resultados más fieles a la realidad que, después de analizarlos, permitirán afinar más en el diseño del carenado.



	SEMANA 1º	SEMANA 2º	SEMANA 3º	SEMANA 4º
SEPTIEMBRE			Búsqueda de información y repaso de conocimientos de fluidos	Introducción a SolidWorks y primeros diseños provisionales
OCTUBRE	Diseño de carenados a partir del chasis antiguo		Introducción a ANSYS	
NOVIEMBRE	Primeras simulaciones de los carenados	Simulaciones de los carenados		
ENERO		Diseño de los carenados con la nueva versión del chasis		
FEBRERO	Simulaciones con los diseños de carenado + fondo plano/Actualizaciones de los diseños			
MARZO				
ABRIL-AGOSTO	Fabricación			

TABLA 4-1: RESUMEN METODOLOGÍA DE TRABAJO

4.2. Diseño

El carenado del monoplaza es una pieza muy importante del monoplaza con una forma que puede llegar a tener un cierto grado de complejidad para maximizar el rendimiento aerodinámico, sin dejar de lado el componente estético y el cumplimiento de la norma. Además, debido a la constante adaptación que exige el desarrollo del monoplaza tenemos que utilizar una herramienta de diseño que nos permita trabajar de forma rápida, cómoda y flexible.

Por los motivos señalados anteriormente, se ha utilizado el programa de *SolidWorks* y, más precisamente, se ha trabajado con el módulo de superficies debido al delgado espesor de la pieza, unos dos milímetros, y a las posibilidades que este programa nos ofrece en cuanto a variedad de formas que se pueden conseguir.

Como ya se ha explicado previamente, se partió sobre dos posibles diseños de carenado. Estos últimos han sido creados desde el ensamblaje general del coche con el fin de adaptarlo en forma y dimensiones al chasis y atenuador de impacto, siempre controlando que no se infringieran las restricciones de la norma.

Para crear la pieza, se ha dibujado el contorno del perfil del carenado con las opciones de líneas rectas, *Spline* y redondeos. Una vez creado este contorno, se ha extruido la superficie para obtener la parte frontal de la pieza.

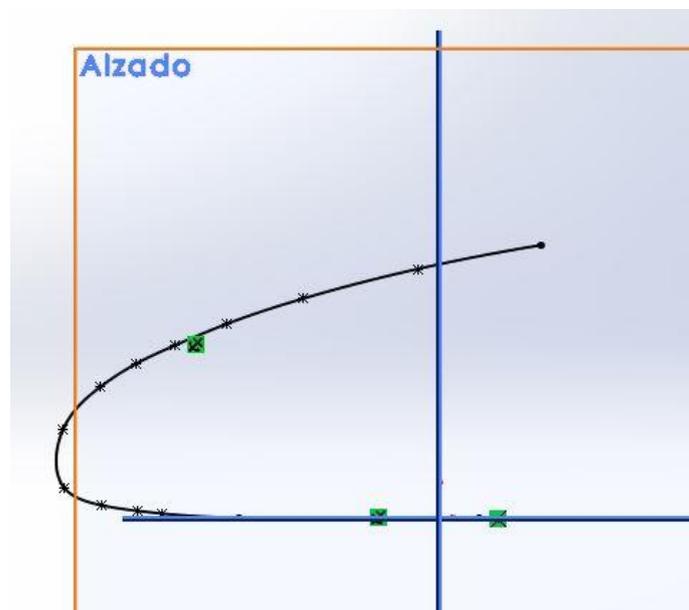


FIGURA 4-3: PERFIL CARENADO EN ALZADO

Para cerrar la pieza por los lados se ha dibujado sobre planta la forma deseada en un lateral para después aplicar una simetría axial y obtener el mismo dibujo en el lado contrario.

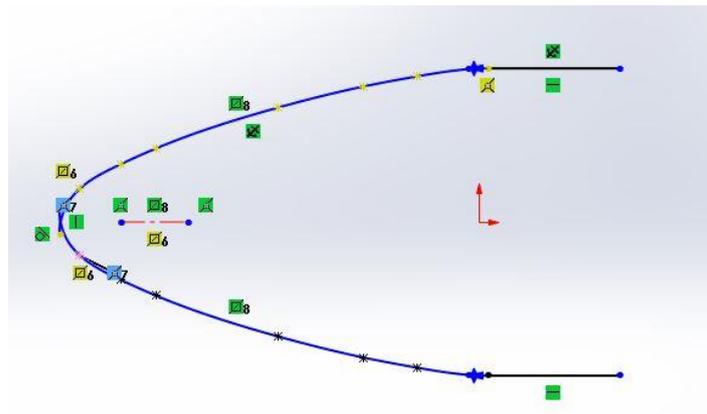


FIGURA 4-4: PERFIL CARENADO EN PLANTA

Una vez que se habían extruido los dos perfiles se recortaban las superficies en exceso para mantener solamente las secciones que formaban las paredes del carenado.

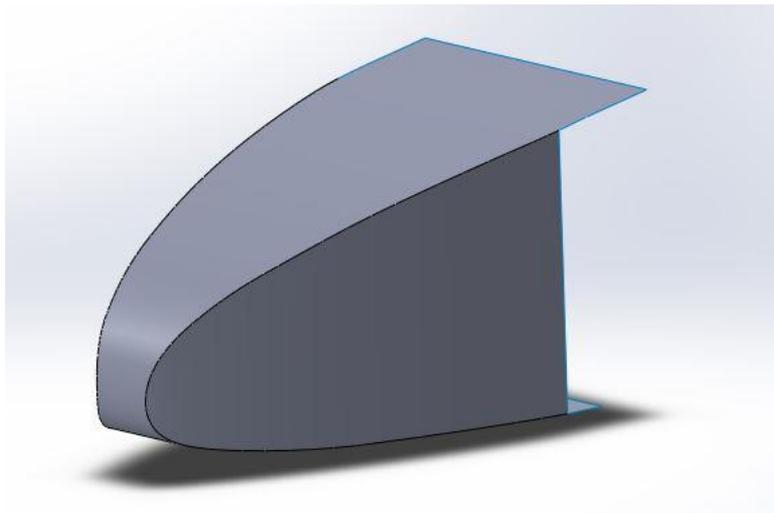


FIGURA 4-5: CARENADO EN BRUTO

Al ser el carenado una pieza había que dar espesor a las paredes que en este caso fue de dos milímetros. Para pulir la geometría del carenado y cumplir con los requisitos de la norma se redondearon las aristas (mínimo de cinco milímetros de radio) y las esquinas.

Para poder enganchar la pieza al chasis se han diseñado también unos enganches en metal de tipo *dzus fasteners* que irán pegados al chasis con resina epoxi. Por lo tanto, se tendrán que diseñar los cortes necesarios en el carenado para poder colocar este tipo de fijaciones.

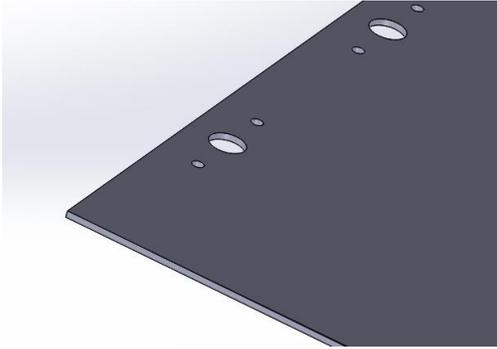


FIGURA 4-7: TALADROS PARA ENGANCHES
DZUS FASTENERS



FIGURA 4-6: DZUS FASTENERS

4.3. Análisis computacional

El análisis aerodinámico de los distintos diseños de carenado se ha realizado usando el programa *ANSYS* en su módulo de *Fluent* porque así es como se hizo el año pasado que ha ayudado a que miembros del equipo hayan adquirido un conocimiento muy elevado acerca de la utilización de esta herramienta que ha agilizado las etapas de trabajo durante esta temporada. Además, esta herramienta computacional es muy robusta y permite extraer una gran cantidad de resultados que serían imposibles de realizar a mano. De todas formas, la obtención de los resultados no es directa y el programa requiere distintas etapas de preparación que se describirán a continuación.

	A
1	Fluid Flow (Fluent)
2	Geometry ✓
3	Mesh ✓
4	Setup ✓
5	Solution ✓
6	Results ✓

Fluid Flow (Fluent)

FIGURA 4-8: ETAPAS DE ANSYS FLUENT

En el módulo *Geometry* se importa la geometría sobre la que queremos analizar el comportamiento del fluido. En segundo lugar, se procede al mallado en la opción *Mesh* que hay que afinar con una serie de parámetros para conseguir una malla de calidad que no resulte en errores durante la posterior simulación. Por último, se tienen que configurar los parámetros de simulación en la opción de *SetUp* para poder lanzar el ensayo y obtener una solución (*Solution*) a partir de la cual obtendremos los resultados (*Results*).

4.3.1. Geometría

La geometría es la fase más importante de trabajo porque a partir de esta se generará la malla que es la base para los cálculos que se realizan durante la simulación. Por ello, este proceso requiere de varios pasos que se tienen que ejecutar de forma ordenada.

En primer lugar, se importan los elementos de la geometría desde un archivo *SolidWorks* o *STEP*.

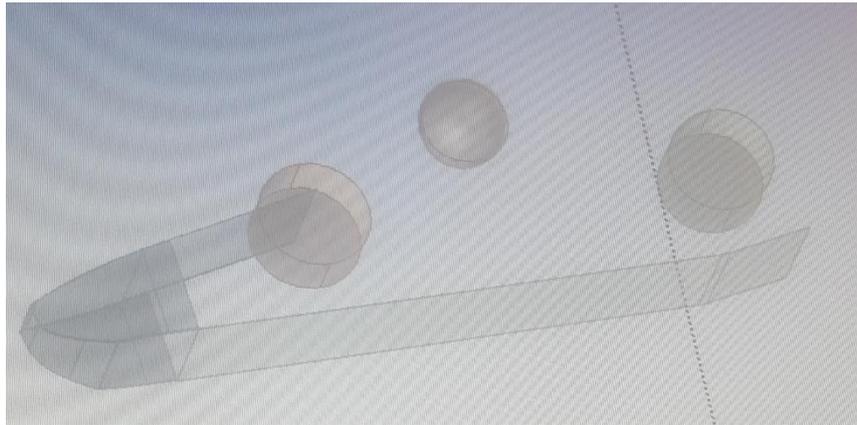


FIGURA 4-9: GEOMETRÍA IMPORTADA

Una vez que la geometría se haya importado correctamente hay que generar todos los planos que fuesen a ser útiles para tareas posteriores. Se generaban cuatro planos:

- El primero a 4 centímetros de la cara inferior del fondo plano que haría de suelo
- El segundo coincidente con la cara superior del fondo plano
- El tercero coincidente con una de las caras de los neumáticos traseros
- El cuarto coincidente con una de las caras de los neumáticos delanteros

Cuando se define la geometría hay que pensar en optimizar el uso de memoria del ordenador durante el proceso de mallado y las simulaciones por lo que se creó una simetría a partir del plano medio longitudinal de la geometría importada gracias a la opción de *Symmetry*. Al ser el monoplaza simétrico, se supone que si se conoce el comportamiento del aire en una de sus mitades sucederá lo mismo en la otra con lo que este paso nos permite ahorrar memoria y tiempo de trabajo sin perder información para analizar los resultados.

Una vez aplicada la simetría y en el caso de las simulaciones determinantes se decidió que había que representar de alguna forma el chasis del coche para obtener resultados más fieles a la realidad. Para construirlo se dibujó un croquis rectangular del mismo tamaño que toda la superficie plana del fondo en el plano generado previamente en la cara superior de esta pieza. Después se extruyó hacia arriba hasta coincidir con el borde superior del carenado.

La siguiente etapa consiste en generar el volumen de control sobre el cual se va a trabajar con la opción de *Enclosure*. Este volumen de control puede considerarse como una caja de unas determinadas dimensiones que delimita la zona donde se calcularán los datos que queramos obtener de las simulaciones. Las dimensiones de esta tienen que ser las adecuadas ya que un volumen de control demasiado pequeño no hará que se pierda cierta información que puede ser importante para los resultados y que no podamos apreciar cómo afecta de forma completa la geometría del monoplaza a la corriente incidente y por lo tanto perdamos información que puede ser importante a la hora de obtener los resultados.

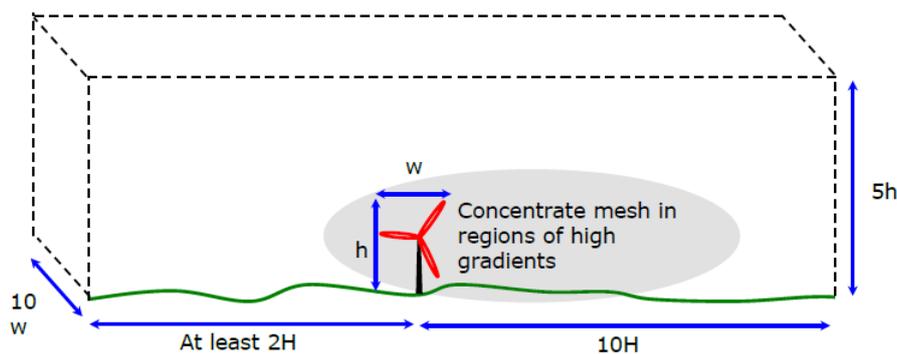


FIGURA 4-10: DIMENSIONES DEL VOLUMEN DE CONTROL

Después, lo que se hace es sustraer al volumen de control la geometría exportada desde *SolidWorks* y la pieza que simula al chasis para trabajar solamente con un cuerpo por donde circulará la corriente de aire y que tendrá ‘grabado’ la forma de las piezas del monoplaza sustraídas. Este paso se ejecuta con la opción de *Boolean*, eligiendo sustraer la geometría del coche y el chasis, y manteniendo el volumen de control.

Una vez ejecutado el paso anterior, lo que se busca es añadir nuevas geometrías al volumen de control que servirán para poder afinar la malla en las zonas donde más nos interese analizar el comportamiento del aire porque se produce el desprendimiento de la capa límite o transición de flujo laminar a turbulento. Una de estas zonas es la parte trasera del coche por lo que en el plano de simetría dibujamos un croquis de un rectángulo que luego se extruye hacia el interior del volumen de control y obtener un cuerpo adicional que se usará en el proceso de mallado.

Los neumáticos también son zonas donde el comportamiento del aire puede ser interesante de analizar sobre todo cuando estos están girando. También se han creado cuerpos de influencia en los dos neumáticos dibujando un rectángulo, que incluyese al neumático, en cada uno de los planos generados en las caras laterales de las ruedas para después extruirlo.

Al final de todo el proceso de preparación de la geometría se tienen cuatro cuerpos: el volumen de control y tres las tres geometrías adicionales situadas en la parte trasera de la celda y a la altura de los neumáticos, en los cuales se genera la malla.

4.3.2. Mallado

El mallado de una geometría consiste en dividir la geometría en pequeños elementos volumétricos, en el caso de una simulación 3D, que por defecto son tetraedros. El programa genera una malla por defecto que después hay que afinar con distintos parámetros para que la calidad de esta sea alta y nos proporcione resultados fiables después de la simulación.

Una vez la malla ha sido generada por defecto, se observa como los distintos cuerpos de la geometría aparecen diferenciados el uno del otro y en cada uno de ellos la malla es distinta. Este efecto era precisamente el que se buscaba porque así se puede ajustar el tamaño de elemento en cada cuerpo según convenga tener mayor o menor información sobre el comportamiento del aire dentro del volumen que ocupa cada uno de ellos. Por lo tanto, para configurar el tamaño de elemento de malla de los cuerpos en las zonas que son de interés para analizar se ha optado por el método de cuerpos de influencia. Se convierte cada uno de estos cuerpos en un cuerpo de influencia (*Body of Influence*) dentro del volumen de control principal y adaptamos el tamaño de elemento para obtener mayor resolución en esas zonas.

	TAMAÑO ELEMENTOS (m)
PARTE TRASERA	0,025
NEUMÁTICOS DELANTEROS	0,05
NEUMÁTICOS TRASEROS	0,05

TABLA 4-2: TAMAÑO ELEMENTOS DE LA MALLA EN LOS CUERPOS DE INFLUENCIA

Para obtener una malla de buena calidad se ha seleccionado la opción de *Capture Proximity*. Esta opción obliga a que los elementos de la malla que se encuentren cerca de curvas y bordes sean más pequeños para ocupar más adecuadamente esos espacios. Esto disminuye la posibilidad de que se generen elementos defectuosos y aumenta la precisión de los cálculos.

ANSYS
2019 R2
ACADEMIC

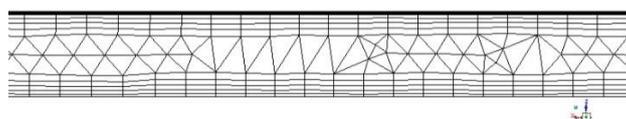


FIGURA 4-11: CAPTURE PROXIMITY ENTRE EL FONDO PLANO Y EL SUELO



Otra opción que se ha tenido en cuenta para incrementar la calidad de la malla es el uso de la función *Inflation*. Además de mejorar la malla esta opción es la más adecuada para poder analizar el comportamiento de un fluido en contacto con caras estacionarias como en este caso. La *Inflation* consiste en definir un número de capas o estratos de elementos volumétricos de la malla, hexaedros en este caso, situados sobre las caras del volumen de control deseadas para poder analizar correctamente el perfil de velocidades en la capa límite. Dentro de esta opción hay una serie de parámetros que se configuraron siguiendo las recomendaciones de la manera siguiente:

USE AUTOMATIC INFLATION	Program Controlled
INFLATION OPTION	First Aspect Ratio
FIRST ASPECT RATIO	5
MAXIMUM LAYERS	5
GROWTH RATE	1,2

TABLA 4-3: CONFIGURACIÓN *INFLATION*

El *Growth Rate* representa el coeficiente de crecimiento de cada capa con respecto a la anterior cuyo valor se ajusta en función del espesor la capa límite que se quiere analizar y de la calidad de los datos que se quieran conocer de esta. Para un mismo número de capas, en el caso de seleccionar una tasa de crecimiento de dos, el espesor total de las capas será mayor que en el caso de elegir una tasa menor, pero también implica que los elementos volumétricos de la *Inflation* sean más grandes y, por lo tanto, los perfiles de velocidades y presiones sean de menor precisión que en el caso de seleccionar una tasa de crecimiento menor. Parece razonable que se haya escogido un valor de 1,2 para esta opción.

En cuanto al número de capas se ha optado por cinco porque es un número razonable que permite tener un espesor de la *Inflation* suficientemente bueno como para obtener resultados bastante precisos y no aumentar en exceso el número de elementos.

El *First Aspect Ratio* consiste en que las capas de la *Inflation* sean elementos ortogonales perfectos sin ninguna oblicuidad (*Element Quality* igual a 1). Es por ello que se ha elegido el mismo número de elementos de capas de la *Inflation* que de elementos de la *Inflation* con equiangulares.

Posteriormente, se tiene que verificar la calidad de malla que viene determinada principalmente por dos parámetros:

- *Skewness*: parámetro de ‘oblicuidad’, es decir cuánto de próximo está el elemento de malla de un elemento perfecto: las caras perfectas siendo triángulos equiláteros y las bases siendo rectángulos. Existen unos intervalos de clasificación de calidad para este parámetro:

VALOR SKEWNESS	CALIDAD ELEMENTO
1	Degenerado
MAYOR DE 0,9	Malo
[0,75; 0,9]	Pobre
[0,5; 0,75]	Correcto
[0,25; 0,5]	Bueno
MENOR DE 0,25	Muy bueno
0	Equilátero

TABLA 4-4: CLASIFICACIÓN CALIDAD SKEWNESS

- *Element Quality*: parámetro estadístico, comprendido entre 0 y 1, que establece una relación entre el volumen del elemento y los lados de cada cara del elemento. En 3D este parámetro representa la relación entre el volumen de cada elemento y la raíz cuadrada del cubo de la suma del cuadrado de la longitud de todos sus bordes.

Cuando este parámetro vale cero significa que el elemento no tiene volumen y será un elemento degenerado con lo que cuanto más cerca de la unidad se encuentre el valor del parámetro el elemento será mejor.

Antes de saltar a la siguiente etapa hay que nombrar a las distintas superficies del volumen de control sobre las que se aplicarán condiciones de contorno en el *SetUp* tal y como se puede ver en la tabla 4-5.

Todos los pasos mencionados previamente permiten conseguir una buena calidad de malla que es fundamental para que los cálculos en los ensayos no den errores y los resultados obtenidos sean fiables, pero multiplica el número de elementos de malla hasta alcanzar más de cinco millones lo que obliga a utilizar un ordenador con mucha más memoria que los que se disponen en las aulas de informática de la universidad.

4.3.3. Configuración de los parámetros de simulación

Antes de lanzar las simulaciones con *Fluent* hay que fijar una serie de parámetros numéricos y de funcionamiento que en su totalidad han sido recomendados.

Una vez dentro del módulo hay que verificar algunos aspectos generales:

- Parámetros de volumen y dimensiones:
 - el volumen mínimo tiene que ser positivo
 - proporciones de las geometrías para valorar la necesidad de escalar

- Tipo de solucionador:
 - velocidades, presiones y densidades relativas y/o absolutas
 - régimen estacionario o transitorio

Para este caso se ha seleccionado un solucionador de velocidades absolutas y presiones relativas en régimen estacionario ya que las condiciones del volumen de control son contantes.

Cuando están configurados todos los parámetros generales se pasa a elegir el tipo de modelo con el que se quiere trabajar, este caso es de tipo viscoso *Realizable k-epsilon* (ϵ) por recomendación. Es el modelo más utilizado en CFD que se basa en la vorticidad del flujo y en la resolución de dos ecuaciones cuyas incógnitas son la energía cinética turbulenta (k) y el ratio de disipación de la energía turbulenta (ϵ). Se usa sobre todo en los casos que se requiere condiciones de contorno simples o donde el gradiente de presiones no es grande. Las aplicaciones precedentes de este modelo muestran que se pueden obtener coeficientes aerodinámicos con un margen de error de entre el 2 y 5% respecto al valor obtenido en ensayos reales. [16]

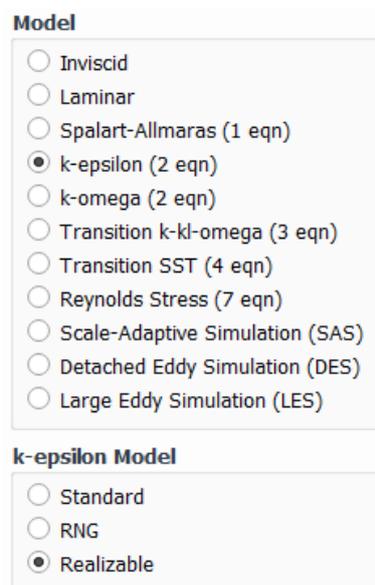


FIGURA 4-12: MODELO VISCOSOS K-EPSILON

Para determinar las condiciones de contorno, aplicadas sobre las superficies nombradas en la última etapa del mallado, se tiene que indicar también de que tipo son estas superficies:

Nombre Superficie	Condición de contorno	Velocidad	Specification method	TI (%)	TVR
Carenado	Wall	-	-	-	-
Cabeza	Wall	-	-	-	-
Road	Wall	-	-	-	-
Ruedas	Dynamic wall	-	-	-	-
Wall-side	Symmetry	-	-	-	-
Wall-up	Symmetry	-	-	-	-
Side	Symmetry	-	-	-	-
Velocity-inlet	Velocity-inlet	16,66 m/s	Intensity and viscosity ratio	1	10
Pressure-outlet	Pressure-outlet	-	Intensity and viscosity ratio	5	10

TABLA 4-5: CONDICIONES DE CONTORNO



Con:

TI (%): Intensidad de turbulencia (valor recomendado para flujos externos donde no se conoce la intensidad de la turbulencia)

TVR: Ratio de viscosidad de turbulencia (valor recomendado para flujos externos donde no se conoce el ratio de viscosidad)

Wall: Condición de no deslizamiento para una superficie

Dynamic Wall: Condición de superficie con velocidad

Symmetry: Condición de contorno para una superficie que no altera el comportamiento del fluido

Velocity inlet: superficie de entrada del fluido

Pressure outlet: superficie de salida del fluido

En cuanto a las propiedades del fluido, en este caso es aire, se ha tomado $1,225 \text{ kg/m}^3$ para la densidad y una velocidad de $16,66 \text{ m/s}$ (igual a 60 km/h), en dirección del eje X, que es la velocidad media alcanzada por los monoplazas durante las pruebas, en especial la de *endurance*, en circuito.

4.4. Prototipos

4.4.1 Primeros carenados

Como ya se ha mencionado en el apartado de Metodología de Trabajo el diseño de los primeros carenados se hizo para tener una primera toma de contacto con todas las herramientas informáticas que se iban a usar y familiarizarse con la dinámica de trabajo.

En función de las dos alternativas de diseño de las que se partía se fueron dibujando distintos tipos de carenado en *SolidWorks*. A falta de un chasis definitivo para esta temporada, estos prototipos preliminares se diseñaron a partir de las medidas del chasis de la temporada pasada.

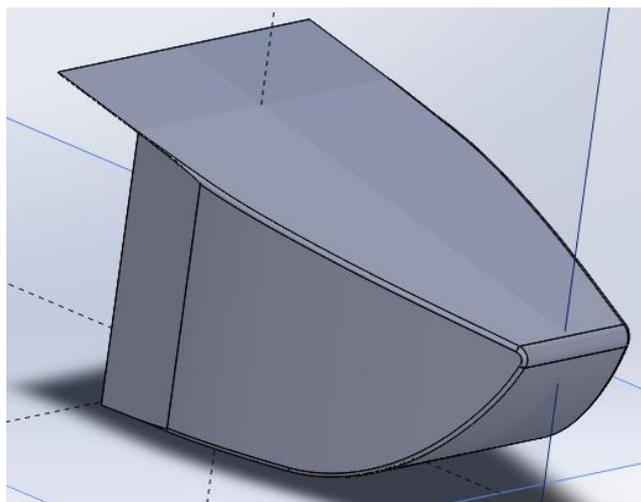


FIGURA 4-13: PROTOTIPO 1

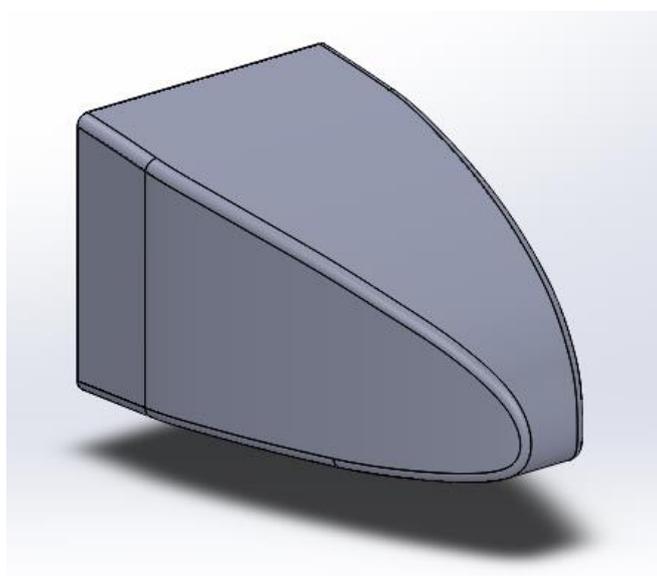


FIGURA 4-14: PROTOTIPO 2

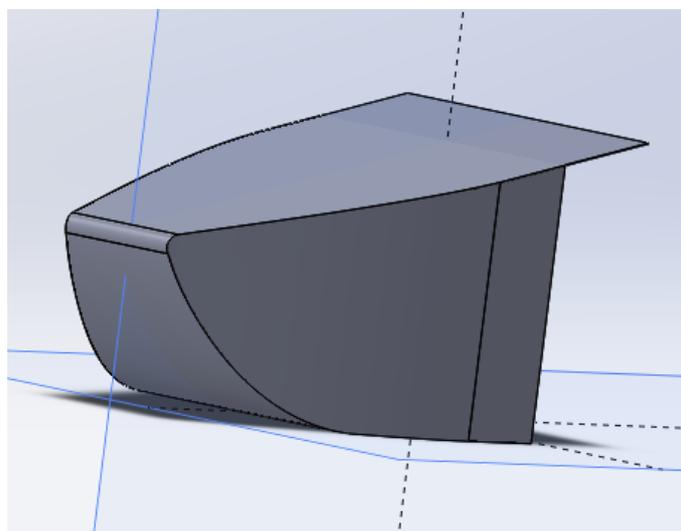


FIGURA 4-15: PROTOTIPO 3

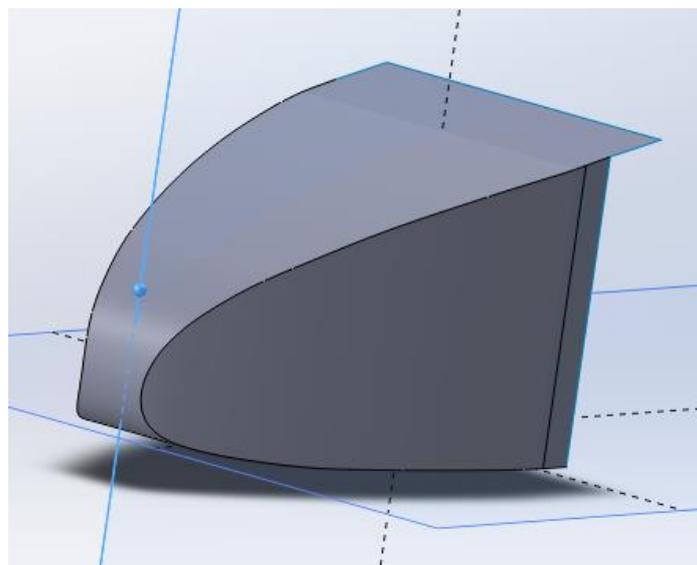


FIGURA 4-16: PROTOTIPO 4

Para empezar a manejar la herramienta de análisis computacional *ANSYS* en el módulo de *Fluent* se ensayaron los prototipos 3 y 4 de forma sencilla. Esto quiere decir que se ensayaron las piezas por separado sin ningún elemento adicional como fondo plano, ruedas o chasis.

La geometría importada consistió simplemente en el carenado que se fuese a ensayar y se siguieron los pasos explicados anteriormente.

Una vez obtenida la malla se configuraron los distintos parámetros del *SetUp* del módulo de *Fluent* y se lanzó la simulación de la cual se pretendía obtener los coeficientes de drag y lift generados por cada uno de los prototipos y empezar a observar algunos detalles del comportamiento del aire en contacto con el carenado a través de los campos de velocidad y presión.

4.2.2. Prototipos A y B

Esta parte del trabajo expone el diseño de los dos tipos de carenados posibles a partir del chasis del monoplaza para esta temporada. Se simularon los diseños bajo las mismas condiciones, que se explicarán más adelante, y se escogió el que tuvo mejores resultados.

El prototipo A es el primero de los dos diseños y consiste con el que tiene el morro orientado hacia abajo. Este diseño genera lift por su propia forma ya que el aire que incide sobre la pieza es desviado hacia la parte superior del coche, aumentando la presión en esta zona, y ejerce una fuerza negativa sobre el carenado que aumenta el agarre del coche y consigue el efecto de ‘sustentación inversa’ buscado.

El prototipo B corresponde con el diseño del carenado con el morro orientado hacia arriba. Este diseño genera lift gracias al efecto suelo. El aire incidente es desviado hacia la parte inferior del coche cuya sección se va reduciendo progresivamente haciendo que el fluido aumente de velocidad y, por consiguiente, se reduzca la presión. Se genera así una zona de baja presión en la parte inferior del carenado que favorece la aparición de una fuerza de empuje hacia abajo, justo lo que se pretende.

Para dibujarlos se usó *SolidWorks* siguiendo las pautas que ya han sido descritas previamente.

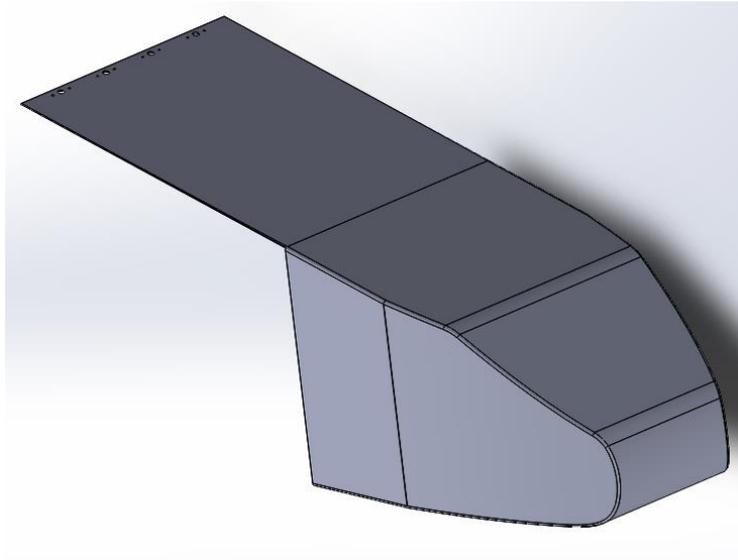


FIGURA 4-17: PROTOTIPO A

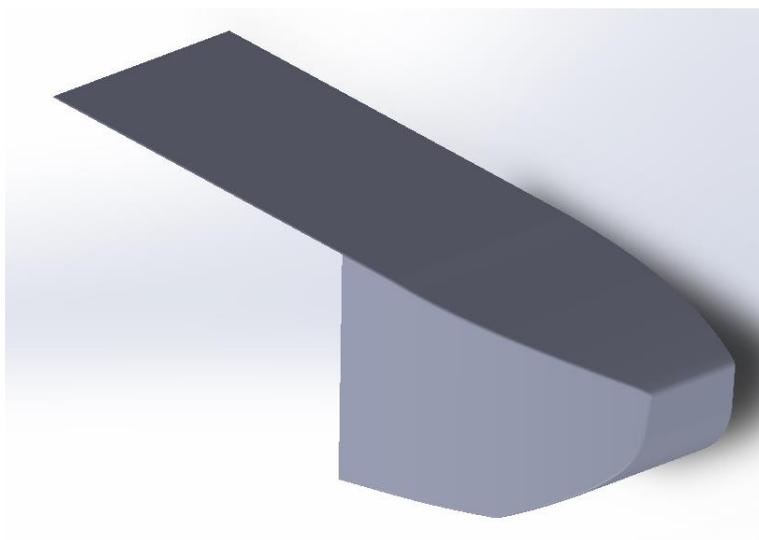


FIGURA 4-18: PROTOTIPO B

Ya en *ANSYS*, se estableció la geometría a ensayar. Esta consistía en el prototipo de carenado que se fuese a simular, un fondo plano con un ángulo de salida de 15° , un bloque para simular el chasis, los neumáticos y la cabeza del piloto.

Además de construir el elemento de simulación del chasis, en este caso se añadieron todas las geometrías adicionales que permitirá afinar la malla en la parte trasera del monoplaza y en los dos neumáticos. La geometría queda por lo tanto con cuatro elementos: el volumen de control y los tres cuerpos añadidos a posteriori.

En la etapa de mallado lo primero que se hizo fue aplicar los cuerpos de influencia en la parte trasera del coche y sobre los neumáticos con un tamaño de elemento de 0,025 y 0,005 metros respectivamente.

Para poder afinar la malla en las caras que nos interesan y preparar la configuración en *Fluent* hacemos las *Named Slection* tal y como se ha expuesto más arriba.

Se aplicó la *Inflation* en las caras del carenado y del fondo plano en contacto con el aire, pero también sobre la cabeza del piloto.

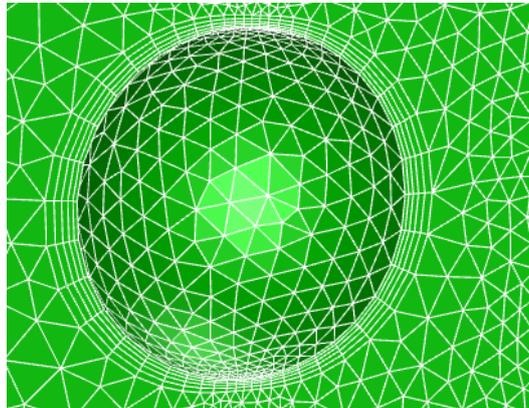


FIGURA 4-19: INFLATION APLICADA SOBRE LA CABEZA DEL PILOTO

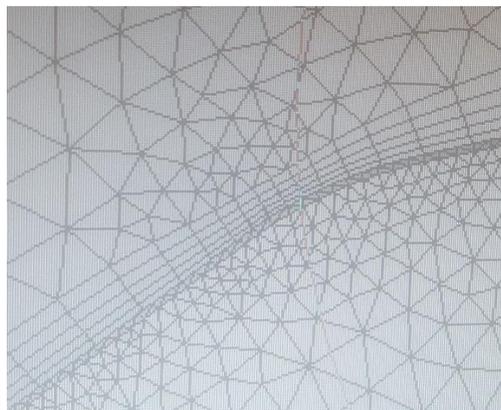


FIGURA 4-20: INFLATION SOBRE EL CARENADO

Antes de proceder a la configuración del módulo de *Fluent* se verifica la calidad de la malla. En los dos casos obtuvimos valores de *Skewness* máxima que indicaba que existían elementos malos que habría que corregir. Por ejemplo, en el caso de prototipo A, existía una *Skewness* máxima de 0,9427 que excedía el valor máximo fijado de 0,85. Estos elementos se concentraban en la intersección entre el plano del suelo y los neumáticos ya que esta formaba un ángulo muy agudo.

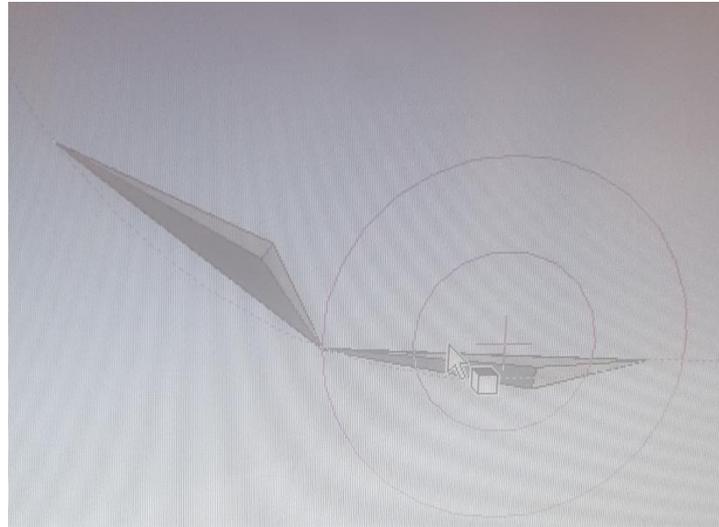


FIGURA 4-21: ELEMENTOS DE MALLA MALOS

Para resolver este problema se decidió dar un paso atrás y modificar la geometría para evitar que esta no formara aristas en las que los elementos de la malla no pudieran ajustarse debidamente. Se realizó un redondeo del ángulo partiendo de un croquis de una circunferencia de cinco milímetros de radio tangente a la rueda y al plano del suelo dibujado sobre el plano previamente generado en una de las caras del neumático y extruyendo el croquis hasta el otro lateral del neumático.

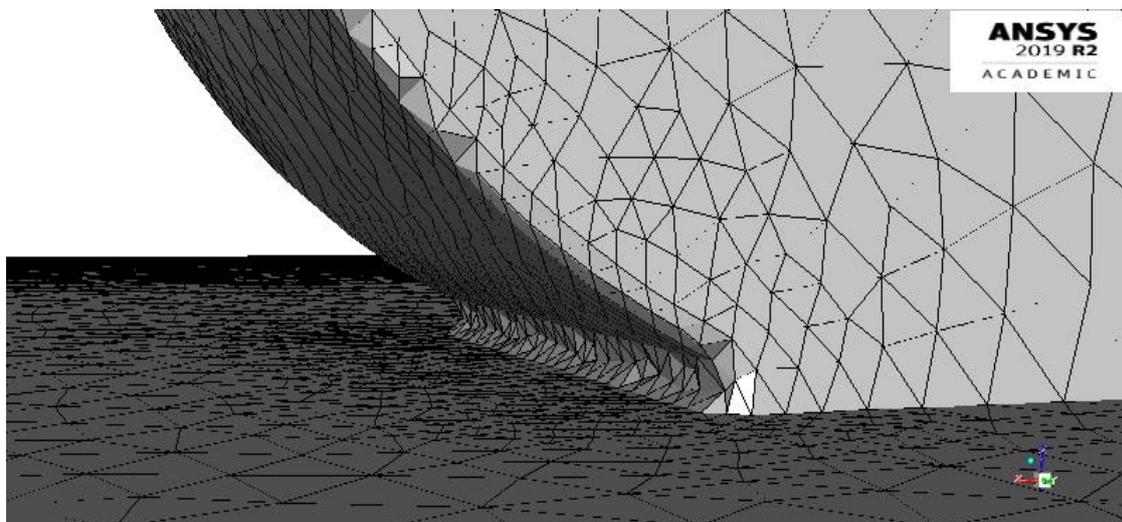


FIGURA 4-22: REDONDEO INTERSECCIÓN PLANO SUELO Y NEUMÁTICO

Los parámetros de calidad de la malla, sobre todo el valor máximo de la *Skewness*, mejoraron sustancialmente hasta obtener los siguientes valores finales:

PARÁMETROS	VALORES
<i>Element Quality</i>	0,82813
<i>Average Skewness</i>	0,21529
<i>Min. Skewness</i>	4,1658e ⁻⁴
<i>Max. Skewness</i>	0,84987

TABLA 4-6: PARÁMETROS CALIDAD MALLA PROTOTIPO A

PARÁMETROS	VALORES
<i>Element Quality</i>	0,81567
<i>Average Skewness</i>	0,21568
<i>Min. Skewness</i>	1,22377e ⁻⁴
<i>Max. Skewness</i>	0,84997

TABLA 4-7: PARÁMETROS CALIDAD MALLA PROTOTIPO B

Además de todo lo explicado previamente, en la configuración del módulo de *Fluent* se asignó la velocidad de giro a las ruedas. Para ello, había asignar una velocidad angular (87,178 rad/s) desde el eje de giro cuya referencia eran sus coordenadas que se obtenían automáticamente desde *SolidWorks*.

Speed (rad/s) 82.178

Rotation-Axis Origin	Rotation-Axis Direction
X (m) -1.52144	X 0
Y (m) 0.6	Y -1
Z (m) 1.80966	Z 0

FIGURA 4-23: ASIGNACIÓN VELOCIDAD ANGULAR A LOS NEUMÁTICOS DELANTEROS

Speed (rad/s) 82.178

Rotation-Axis Origin	Rotation-Axis Direction
X (m) 0.03886	X 0
Y (m) 0.59	Y -1
Z (m) 1.80966	Z 0

FIGURA 4-24: ASIGNACIÓN VELOCIDAD ANGULAR A LOS NEUMÁTICOS TRASEROS

4.4. Resultados

4.5.1. Resultados de los primeros prototipos

	PROTOTIPO 3	PROTOTIPO 4
COEFCICIENTE DRAG	0,044	0,029
COEFCICIENTE LIFT	-0,240	-0,164

TABLA 4-8: RESULTADOS SIMULACIÓN PROTOTIPOS 3 Y 4

Estos primeros resultados arrojados por las simulaciones sirvieron para conocer en qué orden de magnitud se moverían los coeficientes aerodinámicos a pesar de que no se tuvieron en cuenta para el diseño final del carenado. En el caso del coeficiente de lift se obtuvieron resultados coherentes, pero en el caso del coeficiente de drag llama la atención los valores tan pequeños que se obtuvieron. Se dedujo que esto se podía deber a la falta de geometrías asociadas al carenado como el fondo plano, el chasis o la cabeza del piloto que seguramente aumentarían el efecto del drag sobre el carenado cuando se simulen todas estas partes en conjunto y se obtendría un rendimiento más fiel a la realidad.

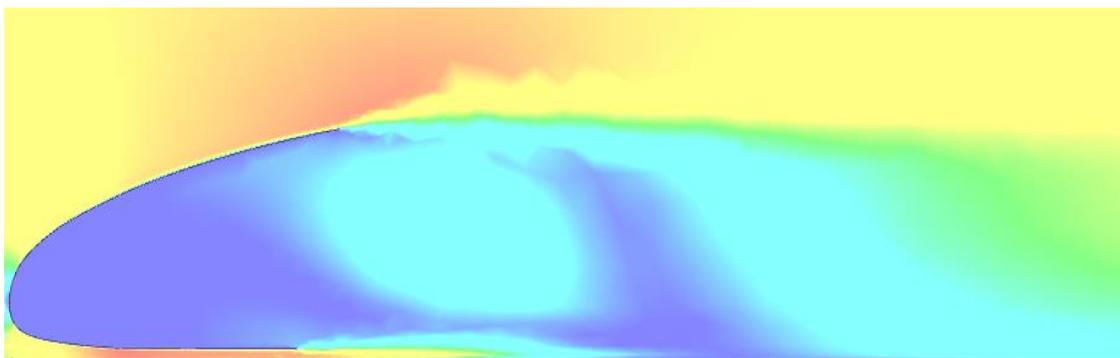


FIGURA 4-25: MAPA DE VELOCIDADES CARENADO 4

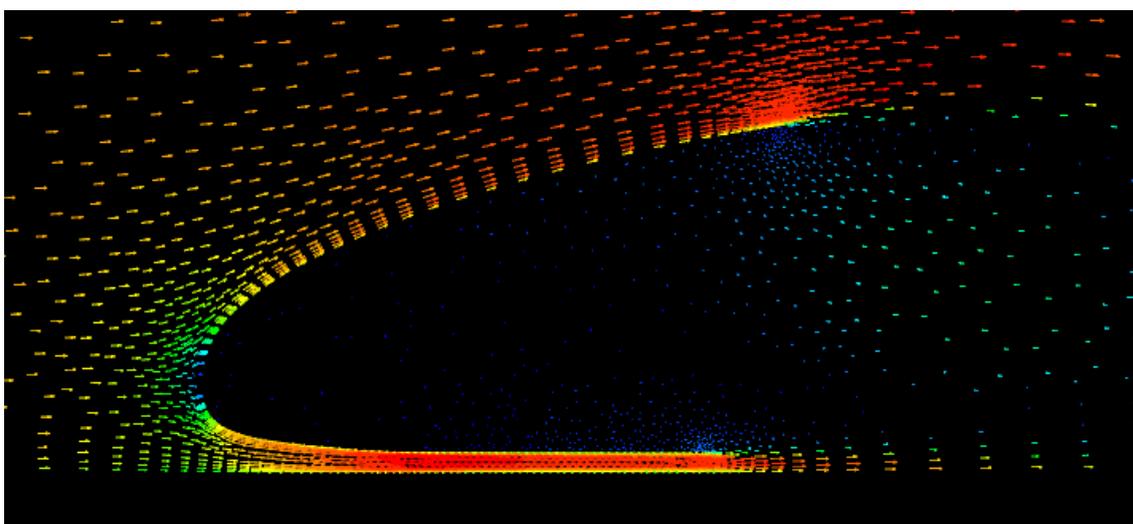


FIGURA 4-26: VECTORES VELOCIDAD CARENADO 4

En estas primeras simulaciones se verificó que el comportamiento del fluido era el que se esperaba de forma intuitiva. Tanto en el mapa de velocidades como en la figura de los vectores de velocidad se aprecia como el aire al chocar con la pieza se frena de golpe. A partir de ahí el flujo se distribuye entre la parte superior y la parte inferior del carenado siguiendo la geometría de este. También se observa de forma clara el efecto suelo generado entre el carenado y la calzada ya que es ahí donde el aire alcanza su máxima velocidad.

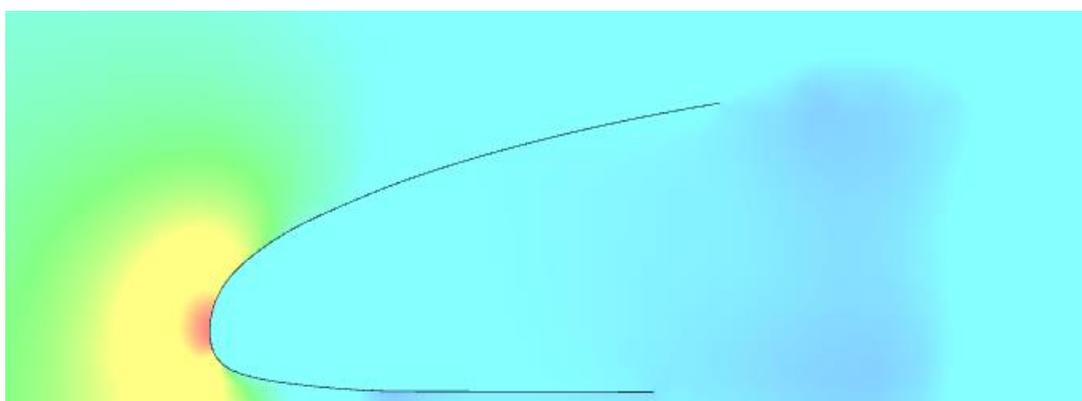


FIGURA 4-27: MAPA DE PRESIONES CARENADO 4

En cuanto a la distribución de presiones se produce lo establecido por la ecuación de Bernoulli. En los puntos donde la velocidad es mayor se produce una depresión (tonos azulados) como por ejemplo en la parte trasera del coche y en la sección libre entre el carenado y el suelo. El punto donde se existe la mayor presión es donde el aire incidente choca con el carenado al producirse un decremento de velocidad como se ha visto anteriormente.

4.5.2. Resultados de los prototipos A y B

Los resultados que se obtuvieron de las simulaciones fueron los siguientes:

	PROTOTIPO A	PROTTIPO B
COEFICIENTE DRAG	0,133	0,129
FUERZA DE ARRASTRE (N)	36,8	16,2
COEFICIENTE LIFT	-0,423	-0,402
FUERZA DE LIFT (N)	-132,6	-68,7

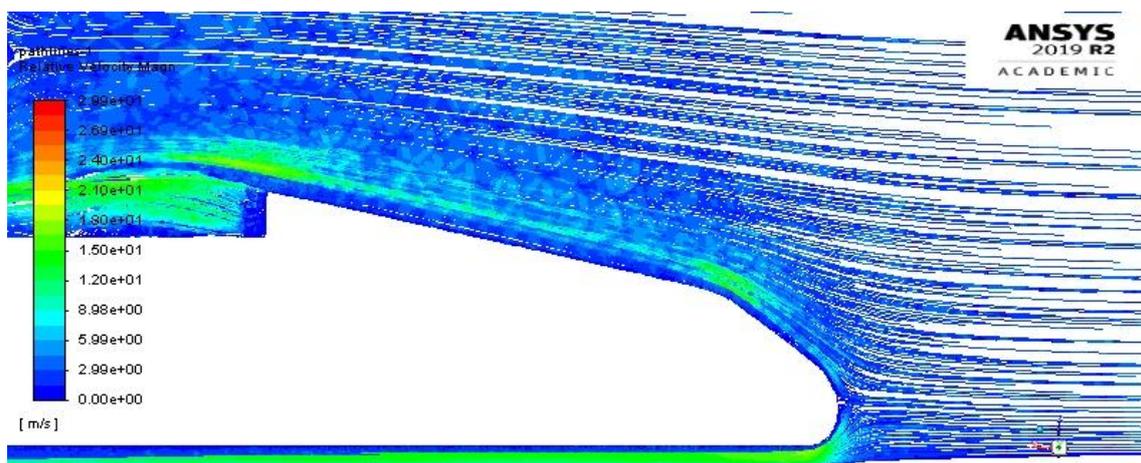


FIGURA 4-28: LÍNEAS DE VELOCIDAD PROTOTIPO A

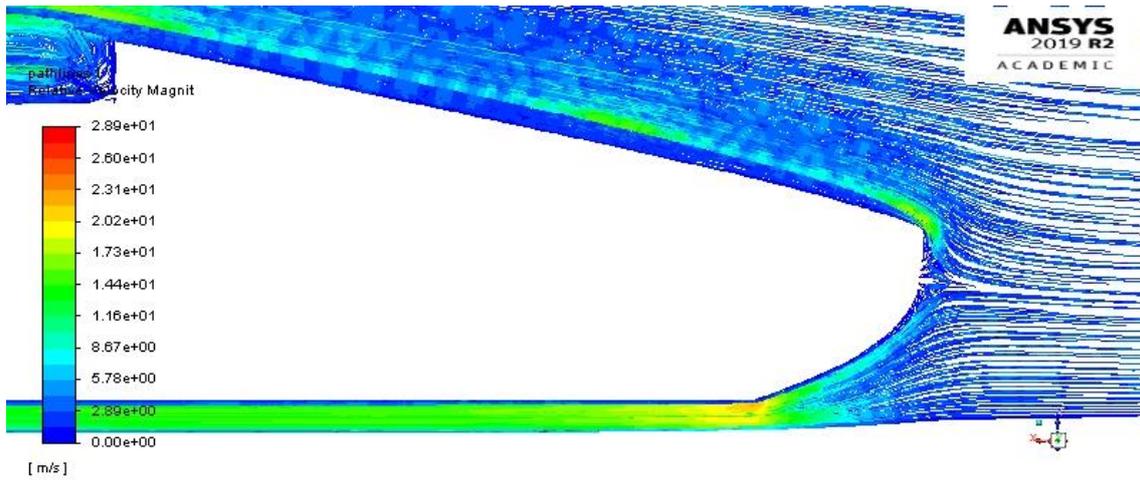


FIGURA 4-29: LÍNEAS DE VELOCIDAD PROTOTIPO B

En cuanto al campo y las líneas de velocidades, se aprecia que los dos carenados generan el ya mencionado efecto suelo. En los dos casos, el flujo de aire incrementa su velocidad en la sección de paso delimitada entre el carenado y el plano del suelo. Sin embargo, en el caso de prototipo B el efecto conseguido es mayor ya que se alcanzan velocidades de hasta 23,1 m/s con respecto a la velocidad inicial del flujo, es decir una velocidad absoluta de casi 40 m/s, a diferencia de los 35m/s en el caso del prototipo A.

Respecto a las velocidades del aire en la parte superior del carenado se ve como se acelera con respecto a la velocidad original en los dos casos, aunque en menor medida que en la parte inferior. En este caso pasa lo contrario que lo explicado previamente, es decir que el aire circula con mayor velocidad en el caso del prototipo B, más especialmente en la mitad de la sección.

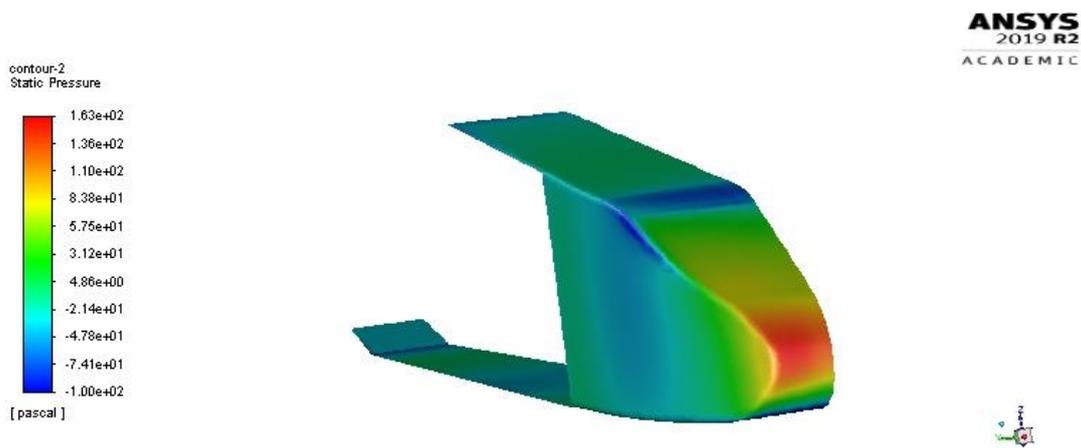


FIGURA 4-30: CAMPO DE PRESIONES SOBRE EL PROTOTIPO A

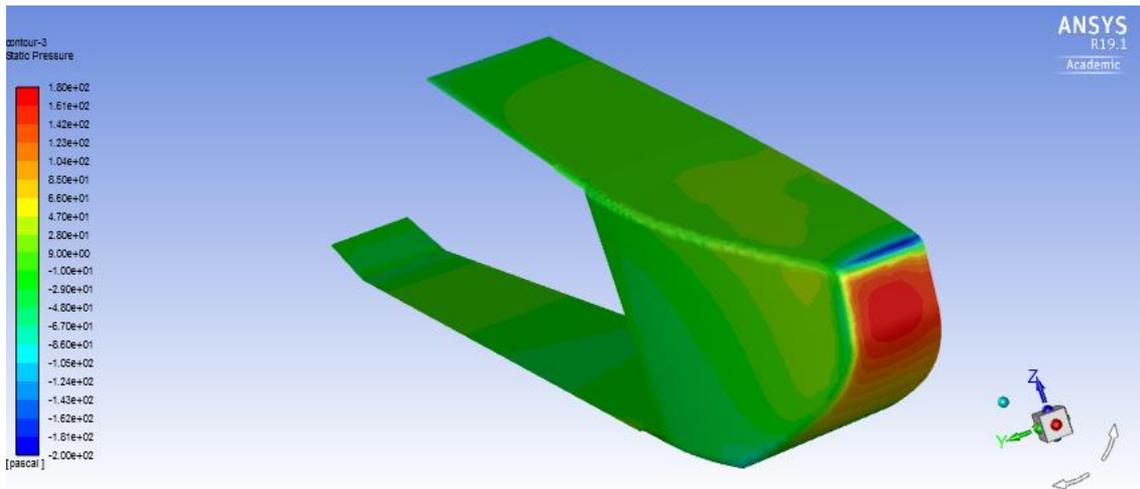


FIGURA 4-31: CAMPO DE PRESIONES SOBRE PROTOTIPO B

La distribución de las presiones es coherente con el campo de velocidades. Allí donde la presión es más alta, la velocidad es menor. En estos casos se ve como la zona de impacto del fluido con la pieza soporta presiones muy grandes mientras que las partes traseras sufren menores presiones. Esta distribución es la fuente de la aparición del coeficiente de drag. Por ello el carenado A presenta un mayor coeficiente de drag y fuerza de arrastre ya que la diferencia de presiones entre la parte delantera y la parte trasera es mayor que en el caso B. Sin embargo, estos campos de presión también revelan que la presión sobre la cara superior del carenado es mayor en el caso del prototipo A lo que implica un mayor empuje hacia abajo generado por la diferencia de presiones entre la parte superior e inferior de la pieza.

Por lo tanto, a la vista de los resultados de los ensayos de los dos prototipos anteriores se ha escogido el prototipo A. Este diseño tiene un coeficiente de drag y fuerza de arrastre superiores al otro, lo que resulta perjudicial para el rendimiento del coche. Sin embargo, la mejora del coeficiente de lift es mayor proporcionalmente al aumento del coeficiente de drag. Este diseño tiene por lo tanto una mejor relación entre el coeficiente de drag y de lift, es decir mejores propiedades aerodinámicas. Además, el diseño seleccionado añade una carga aerodinámica dos veces mayor que el otro y mejora el agarre del coche a pista que es lo que se ha priorizado.

Con motivo de cambios en el chasis de última hora, la geometría de la pieza se modificó para que cupiesen las suspensiones que al final irían por fuera. Se acortó la parte superior del carenado ya que este llegaba hasta el *cockpit* y delante de este era donde se iban a colocar las suspensiones. Por motivos estéticos también se redondearon las esquinas señaladas en la figura 4-32.

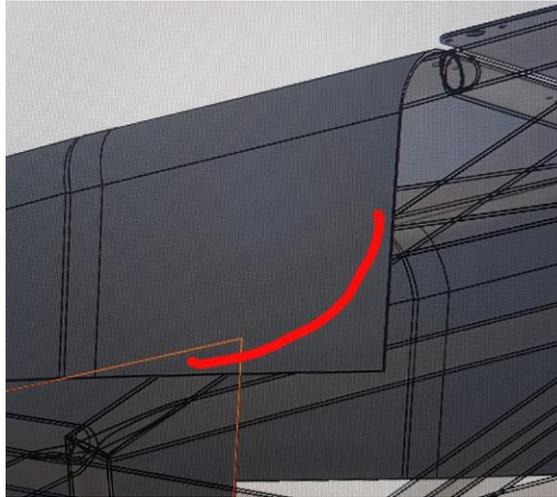


FIGURA 4-32: REDONDEO ESQUINA CARENADO

Una vez se efectuaron los cambios el plazo para el diseño de las piezas del coche ya se había agotado y por lo tanto no se pudo ensayar este nuevo carenado ni versiones con pequeñas modificaciones para intentar mejorar sus prestaciones aerodinámicas.

5. Fabricación

En el proceso de fabricación del carenado han participado distintos miembros del equipo debido a los ajustados márgenes de tiempo de los que se disponía y que el periodo destinado a esta fase coincidía con exámenes finales y vacaciones.

Al final se ha podido fabricar toda la pieza sin ningún contratiempo mayor gracias a la gran dedicación de todo el equipo.

5.1. Composite de fibra de carbono

En primer lugar, un composite se define como un material formado por dos o más materiales unidos entre ellos mediante procesos físicos y/o químicos que adquiere unas propiedades distintas a las de los dos materiales que lo constituyen por separado.

El carenado está fabricado de un material compuesto de resinas, actuando como elemento de cohesión, y fibra de carbono, actuando como elemento de refuerzo, que recibe el nombre de composite de fibra de carbono.



FIGURA 5-1: PLANCHA DE FIBRA DE CARBONO

Uniendo estos dos materiales, se consiguen excelentes prestaciones en el sector del automóvil y la aerodinámica porque la combinación de estos dos materiales resulta en unas propiedades sustancialmente mejores que la de cada uno de los elementos por separado como se explica a continuación. Este tipo de material es por lo tanto idóneo para sectores de innovación y competitivos como la ingeniería biomecánica o, por supuesto, el de la *Formula Student*.

Por un lado, la resina epoxi es un polímero termoestable que tiene una gran variedad de utilidades industriales: construcción de moldes, adhesivos, pintura o acabado superficial. En este caso el uso de la resina cumple con varias de sus utilidades. En primer lugar, al

aplicarla entre las distintas capas de fibra de carbono actúa como adhesivo entre ellas. Además, cuando se empapan las capas de fibra de carbono por vacío la gran cantidad de resina que se impregna en ellas ayuda a prevenir la corrosión, a conservar la forma original de la matriz frente a variaciones de temperatura y, mezclada con el endurecedor, aporta aún mayor rigidez a la pieza. La resina también ayuda a conseguir un acabado superficial homogéneo que facilita la posterior aplicación de las capas de pintura que se le aplican encima.

Por otro lado, la fibra de carbono es un material sintético, fabricado a partir del poliacrilonitrilo, formado por una gran cantidad de microfibras de carbono del orden de diez micrómetros de grosor orientadas heterogéneamente (al azar). Su uso es de gran utilidad ya que tiene dos importantes ventajas: su resistencia mecánica es comparable a la del acero, tiene incluso mayor resistencia al impacto que este, y su peso es parecido al del plástico. Estas propiedades hacen que la fibra de carbono sea un material enormemente usado en multitud de ramas industriales donde se busquen las mejores prestaciones mecánicas y la optimización de peso estructural. [17]



FIGURA 5-2: PRÓTESIS DE UN BRAZO EN FIBRA DE CARBONO [18]

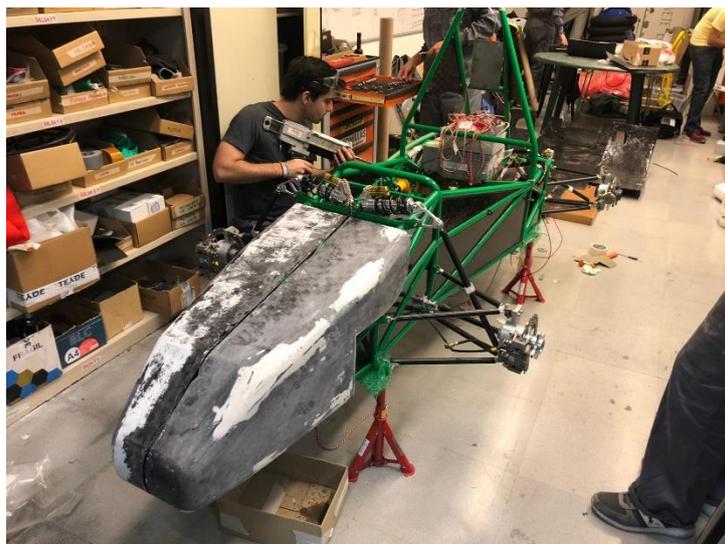


FIGURA 5-3: CARENADO CON LA FIBRA VISTA

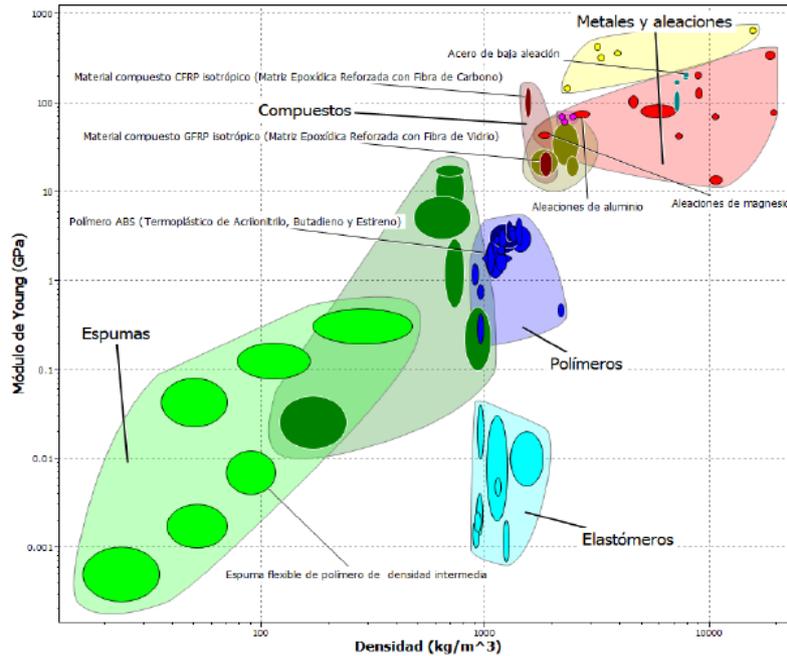


FIGURA 5-4: DIAGRAMA COMPARATIVA ENTRE MÓDULO DE YOUNG Y DENSIDAD

Conjuntamente estos dos materiales actúan como un compuesto de gran resistencia y fiable que han contribuido enormemente a aligerar el peso de las estructuras mejorando sus propiedades mecánicas y revolucionando el sector de la construcción en áreas tecnológicas como la industria militar, automovilística o aeroespacial al permitir total libertad a la hora de diseñar. En este caso el uso del composite de fibra de carbono ha servido para dar bastante más libertad a la hora de diseñar el carenado además de obtener una pieza ligera y muy resistente que nos permite cumplir con la norma de la competición.

$$\sigma = f_m \sigma_m + f_f \sigma_f$$

ECUACIÓN 5-1: CÁLCULO DEL LÍMITE ELÁSTICO DE LOS MATERIALES COMPUESTOS [19]

Con:

σ , resistencia del material (MPa)

σ_f , resistencia de las fibras (MPa)

σ_m , resistencia de la matriz (MPa)

f_f , fracción volumétrica de las fibras

f_m , fracción volumétrica de la matriz

5.2. Metodología de fabricación

Para la fabricación del carenado lo más importante era elegir el material con el que se va a fabricar la pieza. Estaba predeterminado que el monoplaza de esta temporada se iba a fabricar en composite de fibra de carbono, cuatro capas de fibra y resina epoxi, pero se utilizó el programa de *CES EDUPACK* para asegurarnos que este material era adecuado para la pieza (precio, resistencia, maleabilidad, ...).

Para obtener la pieza se valoraron distintas ideas. En primer lugar, se optó por construir un molde a mano en madera, pero resultó ser inviable por la complejidad de la geometría y la falta de herramientas adecuadas para tratar bien y rápidamente la madera. Al final, se encargó el molde a una empresa que lo fabricó de madera hembra en dos mitades sobre las cuales irían pegadas las distintas capas de fibra de carbono con la resina y al desmoldar se obtendría directamente la pieza.



FIGURA 5-5: MITAD DEL MOLDE DEL CARENADO

Como ya se ha mencionado previamente, la pieza se iba a fabricar con cuatro capas de fibra de carbono pegadas con resina epoxi pero para que se adaptasen bien a la forma de las paredes del molde se cortaron ocho patrones de fibra, cuatro para cada molde, de tres formas distintas. Uno tipo de patrón para el lateral superior del molde, otro para el inferior y uno más para el fondo. Estos patrones se cortaron con creces de entre cinco y diez centímetros para asegurarse que no se dejaba ningún hueco del molde sin cubrir y se obtenía un espesor bastante homogéneo de la pieza.

A la hora de colocar los patrones de fibra, las creces con las que se habían cortado producían ciertas dobleces que había que cortar con tijera para poder adaptar por completo la forma de patrón a la del molde. Se tuvo especialmente cuidado al colocar los patrones



que formaban la primera capa de fibra ya que esta sería la cara visible del carenado, una vez desmoldada la pieza.

Después de colocar las distintas capas se empapó en vacío con una mezcla de resina (200 gramos) y endurecedor (70 gramos) para aumentar la rigidez de la pieza, pegar las distintas capas y homogeneizar el espesor de la futura pieza, lo que se conoce como método de fabricación de composites por infusión. De esta forma se aseguraba que las capas de composite se adaptaran lo más posible a la forma del molde y quedaran bien pegadas entre ellas. Para que el desmoldeo fuese más fácil y no se quedará la pieza pegada al molde se aplicó una capa de cera antes de colocar las capas de composite.

Para empapar todo el molde con la mezcla de resina y endurecedor existen dos elementos clave: la malla y hacer el vacío. Sobre las capas de composite se coloca una malla por encima que se empapará de resina y por capilaridad mojará todo lo que cubra. Por encima de la malla se colocan dos boquillas pegadas con cinta adhesiva, una por donde se introducirá la mezcla y por la otra saldrá el aire que se succione al hacer el vacío.

Para aislar el molde y la red de las condiciones atmosféricas se coloca un plástico que cubra todo el molde holgadamente. Este último detalle es muy importante ya que al hacer el vacío lo ideal es que el plástico se adapte lo mejor posible a la forma del molde para que la resina impregne bien las capas de composite y minimizar así el riesgo de que se generen bolsas de aire. Para sellar este montaje se usó una pasta adhesiva y se perforaron dos pequeños orificios encima de las boquillas para introducir los tubos por donde circulan los fluidos (aire y mezcla de resina con endurecedor) que también se aseguraron con la pasta adhesiva.

Para proceder al llenado por vacío simplemente falta conectar un tubo a un depósito de recuperación que recoge la mezcla sobrante que puede ser absorbida conectado a la bomba de vacío e introducir el otro tubo en un vaso lleno de mezcla. Cuando la bomba empieza a aspirar aire hay que dar forma al plástico pegándolo a las esquinas y curvaturas del molde a medida que la presión disminuye, más o menos hasta 0,7 bar. Esta diferencia de presión entre el vaso donde se encuentra la mezcla, situado a presión atmosférica, y el interior del plástico hace que la mezcla ascienda por el tubo para introducirse en el molde y empapar la malla. Este proceso se lleva a cabo hasta que se observa que todo está impregnado de mezcla y el tubo de aspiración absorbe mezcla con unas pocas burbujas de aire.

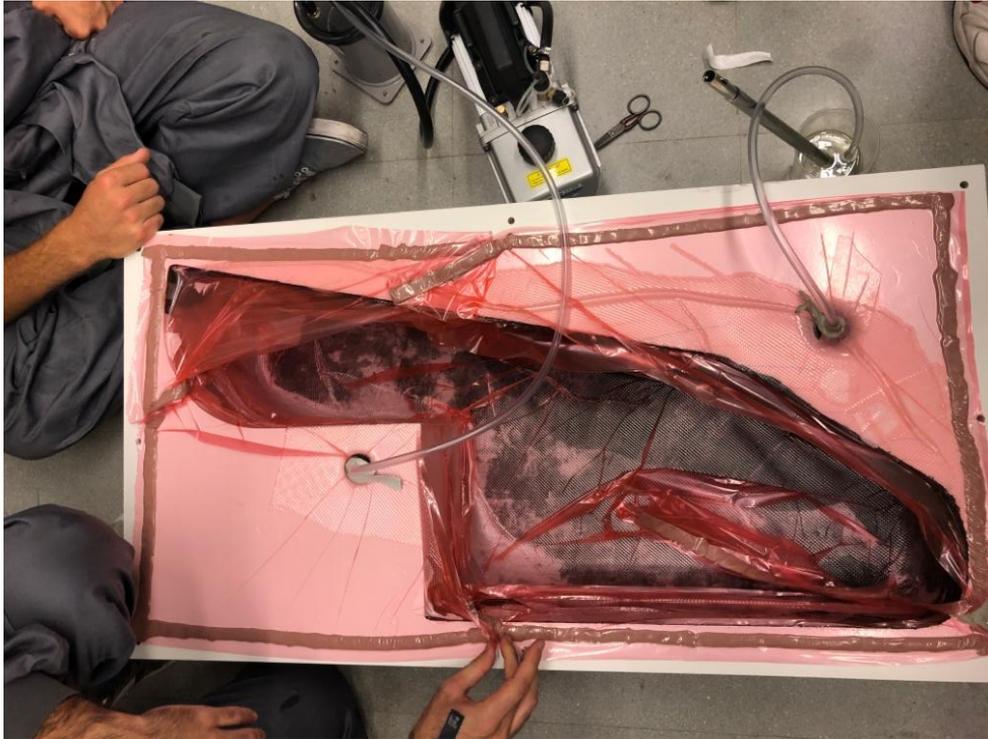


FIGURA 5-6: MÉTODO DE FABRICACIÓN POR INFUSIÓN

El proceso de secado tiene que durar al menos veinticuatro horas para que la resina se impregne bien en la fibra de carbono. Después del secado, se procedió al desmoldeo de las dos mitades que no fue tan fácil como se esperaba porque las piezas se quedaron pegadas al molde. Al final el molde resultó muy dañado pero las piezas salieron con un buen acabado superficial y con la forma deseada.

Para conseguir la pieza final, se unieron las dos mitades con un par de capas muy estrechas adicionales de fibra de carbono y resina. Una vez que esta última operación fue realizada se pintó y ya en competición se pegaron los vinilos antes de quedar montado en el monoplaça.



FIGURA 5-7: CARENADO MONTADO EN EL COCHE DURANTE LA COMPETICIÓN



6. Conclusiones y desarrollos futuros

La realización de este Trabajo de Fin de Grado ha conseguido alcanzar los objetivos fijados en relación con las prestaciones aerodinámicas de la pieza diseñada. Los resultados que han arrojado las simulaciones han sido muy positivos ya que se ha conseguido diseñar un carenado que aporte grandes ventajas al rendimiento general del coche al ofrecer un coeficiente de lift mejorado un 5,2% y una doble carga adicional con respecto al prototipo descartado.

Se espera que el diseño de esta temporada sirva para futuros desarrollos de los elementos aerodinámicos que por falta de plazos y presupuesto esta temporada no ha sido viable implantar algunas innovaciones previstas. Hubiese faltado poder mejorar el diseño de la pieza finalmente escogida haciendo nuevas versiones de esta que mejorasen los resultados obtenidos o por lo menos ensayarla con las últimas modificaciones realizadas debido a las modificaciones de última hora del chasis, pero no pudo llevarse a cabo por contratiempos en la organización y los plazos disponibles.

En cuanto a la fabricación, se ha conseguido obtener una pieza viable económicamente a pesar de haberse utilizado un material caro que ha sido fabricada utilizando recursos disponibles en la universidad, a excepción del molde hembra. Con respecto a las mejoras propuestas la temporada pasada para la fabricación del carenado se ha podido construir la pieza a partir de un molde hembra que ha ayudado a que el acabado superficial de la pieza de esta temporada haya mejorado considerablemente.

A nivel académico se ha comprobado que los conocimientos adquiridos en las asignaturas de mecánica de fluidos, ciencia de materiales, diseño mecánico y tecnologías de fabricación, entre otras, durante los años de grado son de enorme utilidad en proyectos de este calibre. Para intentar alcanzar los objetivos propuestos, ha sido imprescindible el uso de estas asignaturas de forma conjunta lo que demuestra la complejidad de un proceso ingenieril.

Además, sirve como introducción en la simulación multifísica permite a apreciar la capacidad que tienen las herramientas análisis computacional para resolver y manejar una enorme cantidad de datos que sería inviable con métodos más tradicionales. Respecto al uso del análisis computacional, se han podido mejorar las condiciones de ensayo en ANSYS para ofrecer resultados más fieles a la realidad ya que se ha asignado un modelo de malla móvil (rotación) a las caras de los neumáticos que son un elemento relevante en la aerodinámica del vehículo.

A nivel personal, todas las conclusiones establecidas anteriormente ayudan a ver el gran potencial que tiene un futuro ingeniero y, por lo tanto, a empezar a elegir por donde se quiere aplicar ese potencial en una próxima vida en el entorno laboral.



FIGURA 6-1: EQUIPO DEL ISC FORMULA STUDENT EN COMPETICIÓN (2019)

7. Bibliografía

- [1]: “IFS-01 en el circuito de Montmeló”:
<https://www.instagram.com/p/Bm8k5pLFS1a/>
- [2]: “La aerodinámica en los coches: historia y evolución”:
<https://www.motorafondo.net/la-aerodinamica-en-los-coches-historia-y-evolucion/>
- [3]: “Primera generación de Ford T (1908)”:
<https://www.diariomotor.com/espacio-ford/2017/07/13/las-mejores-imagenes-de-las-24-horas-de-ford-2017/>
- [4]: “La gota de agua de Rumpler”
<https://www.motorafondo.net/la-aerodinamica-en-los-coches-historia-y-evolucion/>
- [5]: “Modelo Mercedes-Benz W196”
https://es.wikipedia.org/wiki/Mercedes-Benz_W196#/media/Archivo:KlingK-MB-W196-1976.jpg
- [6]: “Sharklets del modelo A350”
<https://www.transponder1200.com/de-winglets-sharklets-y-dispositivos-de-punta-alar/>
- [7]: “Nuevo prototipo de tren MAGLEV en China”
<https://www.motorpasion.com/tecnologia/asi-tren-maglev-chino-que-promete-alcanzar-600-km-h-2021-gracias-a-levitacion-magnetica>
- [8]: “Apuntes de Mecánica de Fluidos”-Agustín Martín Domingo-UPM-2011:
<http://oa.upm.es/6531/1/amd-apuntes-fluidos.pdf>
- [9]: Apuntes Mecánica de Fluidos de la Universidad Pontificia de Comillas (ICAI) // Frank M. White: “*Mecánica de Fluidos*” (Sexta edición)
- [10]: “Comportamiento de la capa límite y efectos producidos en la sustentación”
<https://aviacion-y-un-poco-mas.webnode.mx/news/capa-limite/>
- [11]: “Resistencia aerodinámica en función de la geometría de un cuerpo”
<http://www.angelfire.com/scifi2/coheteria/aerodinamica/aerodinamica.htm>
- [12]: *Formula Student Germany Rules 2017*
- [13]: “Carenado que dirige el aire incidente hacia arriba”
<https://etseib.upc.edu/ca/noticies/completat-el-disseny-del-cat11e>
- [14]: “Carenado que dirige el aire incidente hacia abajo”
https://warwick.ac.uk/newsandevents/pressreleases/top_ten_performance/



[15]: “Dzus fasteners”

<https://dmeracing.com/product/dzus-fasteners/>

[16]: A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high *Reynolds* number turbulent flows –
Tsan-HsingShih, William W.Liou, AmirShabbir, ZhigangYang, JiangZhu -
Computers Fluids, 24(3):227-238 - 1995.

[17]: CarboSystem

<http://carbosystem.com/fibra-de-carbono-2/>

[18]: “Prótesis de un brazo en fibra de carbono”

<http://centrobionico.com/pages/protesis/fibra-de-carbono.php>

[19]: Apuntes de Ingeniería de Materiales de la Universidad Pontificia Comillas
(ICAI)