

Resumen

Viajar en coche ha sido siempre una de las opciones preferidas de moverse a destinos relativamente lejanos al ser uno de los modos de transporte más económicos en comparación a otros. Pero no todos los vehículos disponen de espacio suficiente para transportar todos los objetos deseados. Por ello, muchos son los usuarios que utilizan el cofre para aportar un espacio extra de almacenaje a su vehículo. Sin embargo, la instalación del cofre al coche modifica totalmente el comportamiento aerodinámico de éste: aporta mayor resistencia al movimiento respecto el que tendría el propio vehículo, necesitando de esta manera más potencia por parte del motor y, por lo tanto, consumiendo mayor cantidad de combustible.

El objetivo de éste proyecto es el de diseñar un cofre que, para un mismo volumen, presente menor resistencia al avance y a la sustentación que un cofre convencional existente en el mercado. En definitiva, obtener un diseño con mejor comportamiento aerodinámico. Para ello, en primer lugar, se realizará el estudio aerodinámico del cofre convencional, se tomarán éstos resultado cómo referente y, tras realizar el mismo estudio en el nuevo diseño, se compararán los resultados de los dos cofres en cuestión.

Para realizar dicho estudio, se usará la dinámica de fluidos computacional (CFD), la cual permite una simulación rápida y eficaz del flujo de fluidos que pasan alrededor de un cuerpo.

Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
1. GLOSARIO	5
2. PREFACIO	6
2.1. Origen del proyecto	6
2.2. Motivación	6
2.3. Requerimientos previos.....	7
3. INTRODUCCIÓN	9
3.1. Objetivos del proyecto	9
3.2. Alcance del proyecto	10
4. INTRODUCCIÓN A LA AERODINÁMICA	11
4.1. Historia de la aerodinámica	11
4.2. Teoría y principios de la aerodinámica.....	12
4.2.1. Teorema de Bernoulli.....	12
4.2.2. Las fuerzas aerodinámicas	13
5. ESTUDIO AERODINÁMICO DE UN COFRE CONVENCIONAL	16
5.1. Geometría del cofre convencional.....	16
5.2. Modelización	18
5.2.1. Geometría dentro de la modelización	19
5.2.2. Mallado	21
5.2.3. Condiciones de contorno	23
5.2.4. Soluciones	28
5.2.5. Resultados	31
5.2.6. Conclusiones de la primera simulación.....	34
5.3. Modelización con una malla refinada	35
5.3.1. Malla refinada	35
5.3.2. Resultados con la malla refinada	36
5.3.3. Nueva malla refinada	38
5.3.4. Resultados de la nueva malla refinada	40
5.4. Modelización con otro modelo de turbulencia	42
5.4.1. Elección de un nuevo modelo de turbulencia.....	42
5.4.2. Mallado para el nuevo modelo de turbulencia.....	43
5.4.3. Resultados con el nuevo modelo de turbulencia y el nuevo mallado	47

5.5.	Conclusiones del estudio aerodinámico del cofre convencional	50
5.6.	Resultados finales del estudio	51
6.	DISEÑO DE UN COFRE MÁS AERODINÁMICO	55
6.1.	Cuerpo semi-infinito de Rankine.....	55
6.2.	Geometría del nuevo diseño.....	58
6.3.	Simulación y resultados del nuevo diseño.....	62
7.	PRESUPUESTO	66
8.	IMPACTO AMBIENTAL	69
9.	CONCLUSIONES	71
10.	BIBLIOGRAFÍA	73

1. Glosario

- **C_D**: Coeficiente de resistencia al avance
- **C_L**: Coeficiente de sustentación
- **v**: Velocidad
- **P**: Presión
- **ρ**: Densidad del fluido
- **g**: aceleración gravitatoria (9,8 m/s²)
- **CFD**: Computational Fluid Dynamics
- **MEF**: Método de los elementos finitos
- **Re**: Número de Reynolds, utilizado en el campo de mecánica de fluidos para caracterizar el movimiento de un fluido.

Prefacio

1.1. Origen del proyecto

La fuerte crisis económica que ha sufrido España en estos últimos años ha afectado significativamente a varios sectores, cerrando fábricas y comercios y, en consecuencia, perjudicando a muchos españoles que se han visto irremediadamente en las listas del paro. Dicho paro ha llevado a miles de familias a tener que reducir drásticamente su consumo para poder llegar a final de mes. Para ello, el gasto en ocio se ha visto notablemente mermado en muchos hogares españoles. Por ejemplo, algo tan sencillo y esperado como viajar en periodo vacacional ha sido para más de una familia un lujo lejos de su alcance.

A pesar de ello, muchos españoles no han querido renunciar a viajar y han cambiado destinos algo más exóticos, a los que sólo se puede llegar en avión, a otros más cercanos a los que pudiera llegar con su vehículo particular. Pero, en muchos casos, uno de los principales inconvenientes de éste modo de transporte es la falta de espacio cuando todos los ocupantes quieren llevar consigo sus respectivas pertenencias. Es por ello que la utilización de los portaequipajes o cofres para coches es una buena opción para maximizar el transporte de equipaje.

La utilización de cofres para coches cuenta con múltiples ventajas como, por ejemplo, la ganancia de espacio, comodidad y seguridad a la hora de transportar el equipaje. Aunque, lamentablemente, también cuenta con desventajas como el aumento del consumo de combustible o la inestabilidad del vehículo haciéndose más difícil la conducción de éste.

1.2. Motivación

Dentro de la intensificación de fluidotécnica, se incluye la asignatura de Aerodinámica Industrial, donde realicé, en un trabajo en equipo, el estudio aerodinámico de un cofre para coche. Dentro de dicho trabajo, se realizó una comparativa entre dos cofres mediante simulación 3D y, una vez hecha la comparativa, se creó un diseño nuevo con el objetivo de minimizar los costes de consumo y económico.

A mi parecer, éste fue el trabajo más interesante realizado entre las múltiples asignaturas incluidas en la carrera de ingeniería industrial. Por este motivo, el presente proyecto trata ampliar y profundizar en dicha temática.

1.3. Requerimientos previos

Para llevar a cabo el presente proyecto son necesarios conocimientos en aerodinámica, mecánica de fluidos y cierta destreza en diferentes programas informáticos de simulación de fluidos (Ansys Fluent) y diseño CAD tanto en 3D (Autodesk Inventor, Solidworks, Solid edge, etc) como en diseño 2D (Autodesk Autocad).

2. Introducción

El objeto de estudio de éste proyecto es un portaequipajes o cofre para vehículo, que, básicamente, puede describirse como un maletero adicional que va sujeto a la baca del coche. Su objetivo principal es el de aumentar el espacio de almacenaje del vehículo.

Aunque el cofre es una buena solución para transportar un extra de carga, también presenta diversos inconvenientes como, por ejemplo, los que se listan a continuación:

- El anclaje del cofre a la baca debe ser robusta para asegurar la seguridad de los miembros que viajen en el vehículo así como del propio elemento.
- Aumenta el peso del conjunto. Esto implica mayor fuerza del motor y por lo tanto mayor consumo de carburante.
- La instalación del cofre al coche modifica drásticamente el perfil aerodinámico para el cual había sido diseñado inicialmente y, por lo tanto, aumentado el coeficiente de resistencia al avance. Esto también implica un aumento en el consumo.
- Varía el centro de gravedad del conjunto aumentando las posibilidades de sufrir algún accidente

2.1. Objetivos del proyecto

El objetivo del proyecto es el de diseñar un cofre de coche donde se vean minimizados la resistencia al avance, la sustentación y, por lo tanto, el consumo de combustible respecto a un portaequipajes existente en el mercado. Todo ello sin renunciar al volumen y forma para transportar el equipaje deseado.

Para llevar a cabo el diseño en cuestión, se analizará previamente un diseño de cofre existente usando el método de los elementos finitos, el cual nos dará información sobre la distribución del campo de presiones, las velocidades alrededor del objeto en cuestión, el coeficiente de resistencia al avance C_D y el coeficiente de sustentación C_L del objeto. Una vez obtenida toda ésta información, se usarán como referencia para poder optimizarlos en el nuevo diseño, todo ello sin alterar el volumen del cofre.

Una vez obtenidos los resultados teóricos, se testearán en el túnel de viento los prototipos utilizados previamente impresos en 3D. De ésta manera se podrá realizar una comparativa entre los resultados teóricos y prácticos.

2.2. Alcance del proyecto

El proyecto engloba el estudio de conceptos teóricos relacionados con mecánica de fluidos y aerodinámica, herramientas de CAD necesarias para poder realizar diseño en 3D y varias simulaciones del objeto a través de un fluido.

3. Introducción a la aerodinámica

3.1. Historia de la aerodinámica

La palabra aerodinámica tiene origen griego y está compuesta por “aero” que significa “aire y “dynamos” que expresa “fuerza”, y es la rama de la mecánica de fluidos que estudia las acciones que aparecen sobre los cuerpos sólidos a causa de los movimientos relativos entre estos y los gases.

Históricamente, la aerodinámica empezó a tomar importancia a raíz de la fabricación de los coches, sin embargo, antes de la aparición del primer vehículo, muchos eran los científicos que ya se habían fijado en el desplazamiento de los fluidos observando a aves y peces en su hábitat natural. Tuvieron que pasar varias décadas para que estos conocimientos se aplicasen en el diseño de carrocerías. En esa época, a principios del siglo XX, todos los esfuerzos en mejorar la “aerodinámica” del vehículo eran para conseguir que éste tuviera una mejor penetración en el aire y así conseguir una mayor velocidad.

Para conseguir dicho objetivo, tras realizar múltiples ensayos, surgió que la “forma de gota” era la óptima. Por consecuencia, el 1914 se fabricó el Rumpler Tropfenwagen, con una forma similar a la mencionada, el cual fue el primer vehículo en ser diseñado para ser aerodinámicamente óptimo.

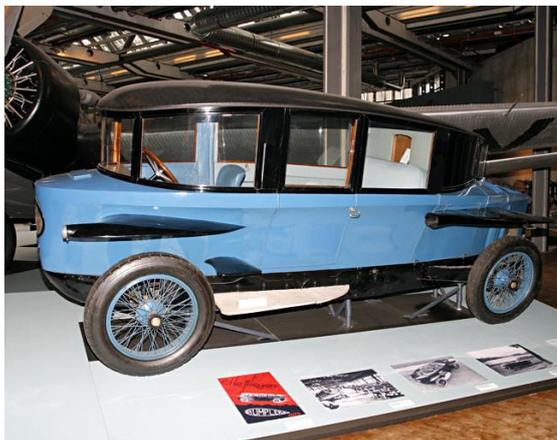


Figura 3.1 Rumpler Tropfenwagen [1]

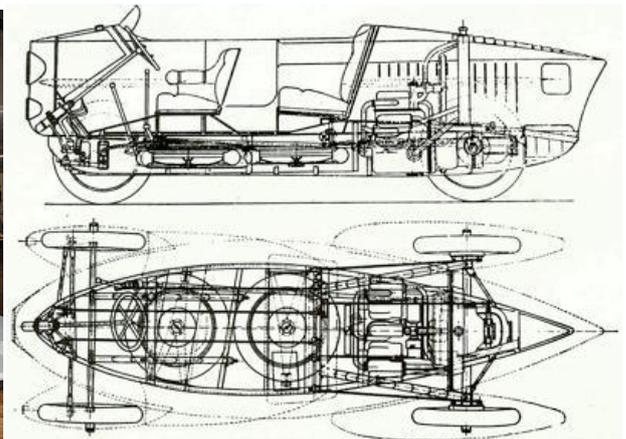


Figura 3.2 Vista planta y alzado del Rumpler Tropfenwagen [2]

Los primeros coches tuvieron un escaso éxito comercial, sin embargo, la segunda versión del Rumpler Tropfenwagen tuvo un carácter más práctico ya que fue confeccionado para ser más

ligero, ágil y equipado de un motor más pequeño. Todo ello sumado a su forma con baja resistencia al aire ayudó a superar los resultados comerciales de la primera versión.

Tras la segunda guerra mundial, el bajo precio del petróleo hizo que la aerodinámica pasara a segundo plano, teniéndola sólo en cuenta en el diseño de coches deportivos. Posteriormente, alrededor de los años 70, la crisis del petróleo volvió a incorporar la aerodinámica como una prioridad en el diseño de coches comerciales para así obtener el máximo rendimiento con el mínimo consumo de combustible.

3.2. Teoría y principios de la aerodinámica

A lo largo del proyecto se tendrán en cuenta varios aspectos de la aerodinámica, por este motivo se explicarán algunos principios de éste campo para poder comprender y analizar los resultados obtenidos.

3.2.1. Teorema de Bernoulli

El teorema de Bernoulli, también conocido como ecuación de Bernoulli o trinomio de Bernoulli, explica el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente. Su descubridor fue Daniel Bernoulli y la expuso en su obra *Hidrodinámica* (1738).

El teorema expone que la energía de un fluido ideal, sin viscosidad ni rozamiento y en circulación por un conducto cerrado, permanece constante a lo largo de todo su recorrido. Esta energía consta de tres componentes:

- Cinética: energía debida a la velocidad del fluido
- Potencial gravitacional: Energía debida a la altitud en la que se encuentre el fluido.
- Energía de flujo: Energía que tiene un fluido a causa de la presión que la posee.

De esta manera la ecuación de Bernoulli queda descrita de la siguiente manera:

$$\frac{v^2 \rho}{2} + P + \rho gh = \text{cte} \quad (3.1)$$

Donde:

v: Velocidad del fluido.

ρ : Densidad del fluido.

P: Presión del fluido.

g: Aceleración gravitatoria.

h: Altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.

3.2.2. Las fuerzas aerodinámicas

Un cuerpo sumergido en un fluido experimenta fuerzas a causa de éste. El resultado total de estas fuerzas es muy complejo, sin embargo, para realizar el estudio del comportamiento del cuerpo dentro del fluido, dos son los tipos de fuerzas que destacan sobre las demás: las fuerzas de arrastre y sustentación.

3.2.2.1. Arrastre (Drag)

El arrastre sería conocido como la fricción que aparece entre el cuerpo y el fluido en el cual se mueve. Esta fricción es debida a las imperfecciones del cuerpo en estudio y es la suma de las fuerzas aerodinámicas o hidrodinámicas que actúan en la dirección del fluido externo. Teniendo en cuenta este último punto, el arrastre es una fuerza que va en sentido contrario al movimiento del objeto, es la resistencia que ofrece el cuerpo al avanzar por el fluido.

La fuerza de arrastre se puede calcular numéricamente mediante la siguiente fórmula:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A C_D v^2 \quad (3.2)$$

Donde:

F_D : Fuerza de arrastre

ρ : Densidad del fluido

A: Sección frontal proyectada

C_D : Coeficiente de arrastre

v: Velocidad relativa entre el objeto y el fluido

Shape	Drag Coefficient
Sphere	0.47
Half-sphere	0.42
Cone	0.50
Cube	1.05
Angled Cube	0.80
Long Cylinder	0.82
Short Cylinder	1.15
Streamlined Body	0.04
Streamlined Half-body	0.09

Measured Drag Coefficients
Figura 3.3 C_D para diferentes
geometrias [3]

Uno de los valores que interesa para este proyecto es el de la C_D . Este coeficiente es un valor que indica la facilidad con la que una forma pasa a través de un fluido (o un fluido pasa alrededor de un cuerpo). La C_D será más alta para los cuerpos con formas que ofrecen mucha resistencia al avance y más pequeña para cuerpos que ofrezcan una menor resistencia al avance.

3.2.2.2. *Sustentación (lift)*

Es la fuerza que se genera en un cuerpo en dirección perpendicular a la velocidad del corriente incidente. Como en el caso de la fuerza de arrastre, existe un modelo matemático para obtener un valor numérico de la sustentación con tal de facilitar los cálculos y diseños. Este modelo viene dado por la siguiente expresión:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho A C_L v^2 \quad (3.3)$$

Donde:

F_L : Sustentación.

ρ : Densidad del fluido.

A: Superficie alar.

C_L : Coeficiente de sustentación.

v: Velocidad relativa entre el objeto y el fluido.

El valor del coeficiente C_L también es interesante ya que indica la efectividad que tiene la forma de un cuerpo para producir la sustentación. En este proyecto se buscará que este valor sea lo más próximo a cero, ya que el cofre tiene que ir lo más enganchado al techo del coche y así evitar esfuerzos perpendiculares en los anclajes que lo sujetan.

3.2.2.3. *¿Por qué vuelan los aviones?*

En el caso de los aviones, la respuesta al porque vuelan reside en la sustentación. La fuerza que se produce en las alas supera el peso del avión permitiéndole volar.

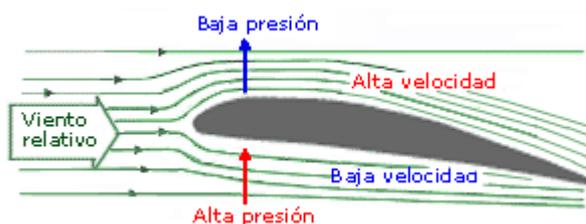


Figura 3.4 Presión y velocidad en el ala de un avión [4]

De entrada, lo que más llama la atención de la figura 4.4 es el ángulo que se forma entre la cuerda del perfil de ala con la dirección del viento. Éste ángulo es necesario para crear sustentación en el ala y es conocido como el ángulo de ataque.

Al avanzar el avión por la pista de despegue, el viento entra en contacto en un punto del ala de avión. Éste punto es conocido como el punto de estancamiento y tiene como características principales que la presión es máxima y la velocidad local del fluido es cero. Ésta presión es conocida como presión de estancamiento.

A partir del punto de estancamiento las partículas del fluido tienen dos posibles caminos a seguir, por arriba o por abajo. Las partículas que circulan por la parte superior del ala tienen mayor facilidad para avanzar ya que se produce una zona de presiones bajas, y por la ecuación de Bernoulli, la velocidad aumenta. Por otra parte, las partículas que van por la parte posterior lo tienen más difícil para avanzar ya que se crea una zona de presiones altas y, como consecuencia, a mayor presión menor velocidad.

A causa de esta diferencia de presiones aparece la sustentación, que tiende a ir de altas presiones a bajas presiones.



Figura 3.5 Sustentación en el perfil alar [5]

De esta manera, el avión vuela ya que los motores superan la resistencia al avance y hace que la sustentación supere el peso del avión obteniendo una fuerza resultante hacia arriba.

4. Estudio aerodinámico de un cofre convencional

Para realizar el estudio se utiliza la fluido-dinámica computacional (CFD). La CFD es una herramienta que se utiliza para la simulación numérica de sistemas para analizar el comportamiento del flujo fluido, la transferencia de calor, reacciones químicas etc. Para éste proyecto, la simulación utilizada será la del flujo fluido, ya que el estudio se basa en el comportamiento de un objeto alrededor del aire.

Para poder obtener una referencia, se va a realizar el estudio de un cofre convencional y así, de esta manera, poder realizar una comparativa con el futuro diseño y mejorar los resultados.

Como cofre de referencia se ha escogido el modelo KE734-30000, que presenta las siguientes características:



Figura 4.1 Cofre convencional KE734-30000 [6]

KE734-30000	
MARCA	Nissan
CAPACIDAD	530 litros
DIMENSIONES	2250x800x420 mm
CARGA MÁXIMA	75 kg
PRECIO	330 €

Tabla 4.1 Características del cofre de estudio

Para realizar el estudio se ha querido partir del caso más desfavorable posible. Por este motivo, se ha escogido el modelo con mayores dimensiones que ofrecía la marca.

4.1. Geometría del cofre convencional

Para la realización y modelización de la geometría en 3D del cofre convencional, se ha utilizado el programa Autodesk Inventor. Teniendo las dimensiones 2250x800x420 mm como

base del dibujo, se ha intentado reproducir de la manera más fidedigna las demás dimensiones i formas del modelo consiguiendo las siguientes representaciones.

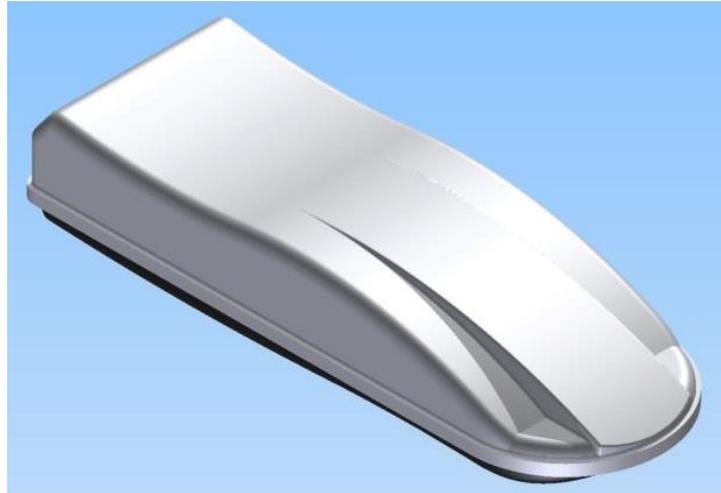


Figura 4.4 Vista isométrica 1 del cofre convencional

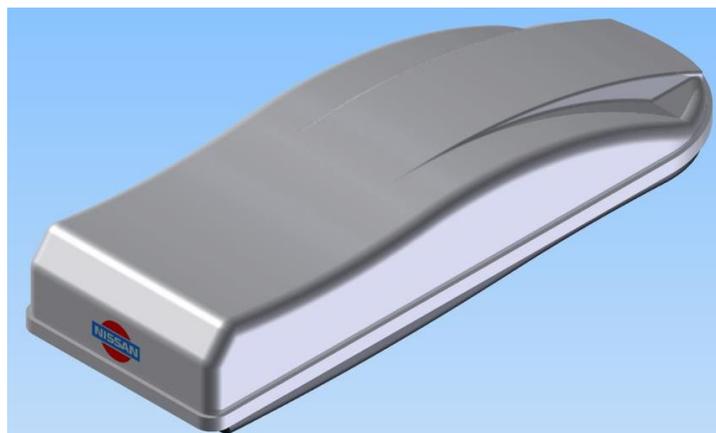


Figura 4.3 Vista isométrica 2 del cofre convencional



Figura 4.2 Perfil del cofre convencional

4.2. Modelización

Una vez creada la geometría del cofre convencional, el siguiente paso en la simulación es el de la modelización. Lo cual se basa en la creación de una representación o modelo con el fin de investigar la realidad.

Tal y como se ha comentado anteriormente, la herramienta utilizada es la de CFD, y para realizar el estudio, se utiliza el programa *Ansys Workbench*. Dentro del mismo programa se pueden realizar varios tipos de estudio entre los cuales se utilizará el *Fluid Flow (Fluent)*.

Esta simulación requiere ir completando una serie de pasos ordenadamente. Estos pasos se listan a continuación:

1. Geometría
2. Mallado
3. Condiciones de contorno
4. Soluciones
5. Resultados

Tal y como se muestra en la imagen 5.5 extraída del programa.

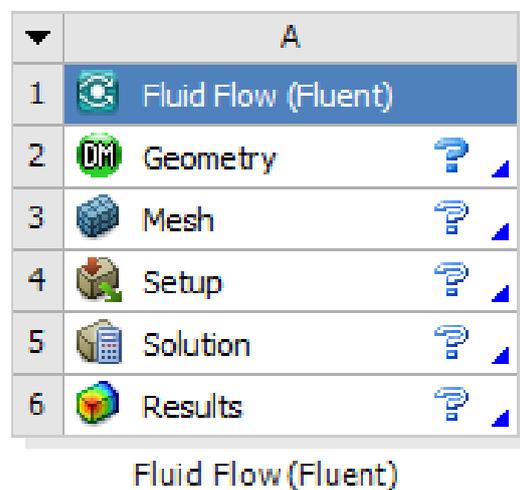


Figura 4.5 Pasos a completar para la simulación

4.2.1. Geometría dentro de la modelización

La geometría del cofre convencional ha sido realizada previamente con el programa *Autodesk Inventor* en un archivo *.ipt*. Para realizar el estudio dentro del apartado de geometría de la modelización se importa el archivo *.ipt* dentro del software *Ansys*.

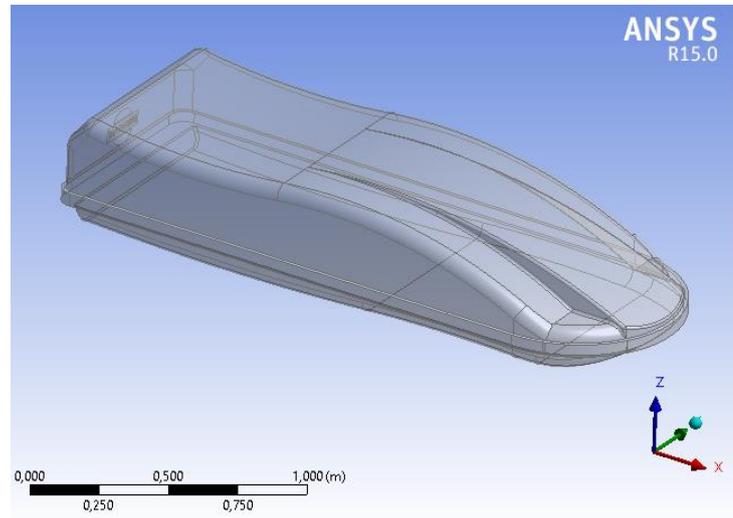


Figura 4.6 Importación archivo *.ipt* a Ansys

Observando la imagen, no ha habido prácticamente ningún cambio respecto a la geometría realizada con *Autodesk Inventor*, sin embargo dentro de *Ansys* se tienen que hacer una serie de cambios dentro de la geometría para seguir adelante en la simulación.

Para empezar, hay que destacar que el cuerpo de estudio es totalmente simétrico respecto al plano XZ. Esto facilita el estudio, ya que al ser simétrico se puede estudiar la mitad de la geometría simplificando el número de elementos y los cálculos que realiza el programa.

El estudio tiene como objetivo analizar el comportamiento del fluido alrededor del cofre convencional, es decir, lo único que interesa estudiar es su forma. Dentro del programa *Ansys*, para poder representar el aire alrededor del cofre, se debe hacer un negativo de la pieza, es decir, realizar un cuerpo de extrusión alrededor del cofre y sustraer el cuerpo del cofre extruido. La idea de esta operación es la de que el fluido irá a través del cuerpo extruido. El efecto del aire alrededor del cofre se consigue simular ya que éste no puede pasar a través del cofre al no haber sólido en esta zona.

Para mayor comprensión, a continuación se adjuntan algunas figuras donde se observa cada paso de la preparación de la geometría.

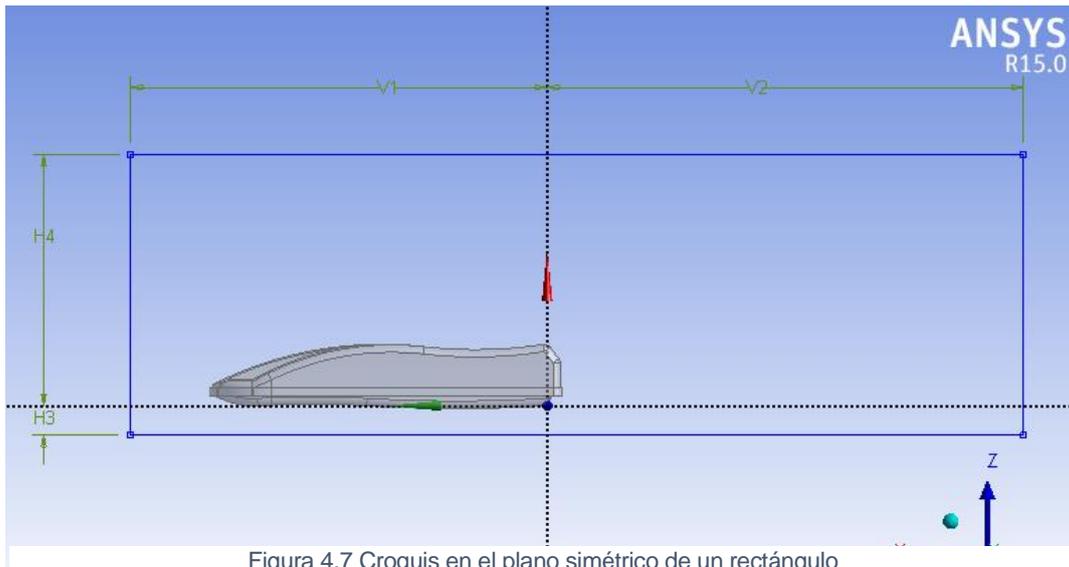


Figura 4.7 Croquis en el plano simétrico de un rectángulo

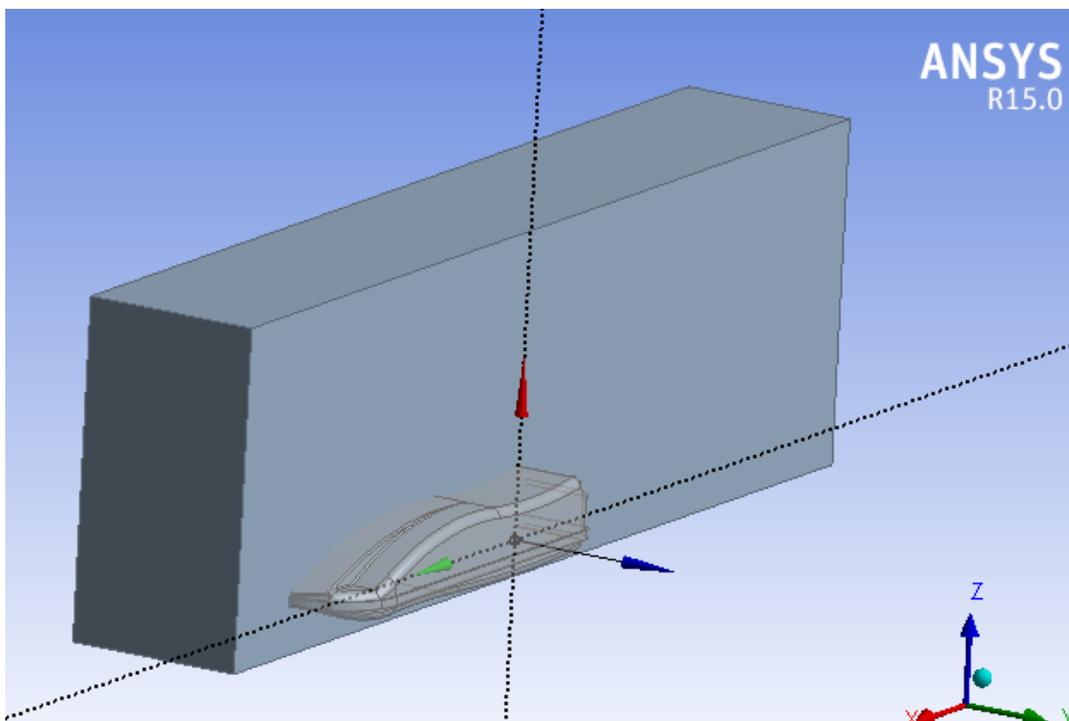


Figura 4.8 Extrusión del cuerpo rectangular desde el plano simétrico

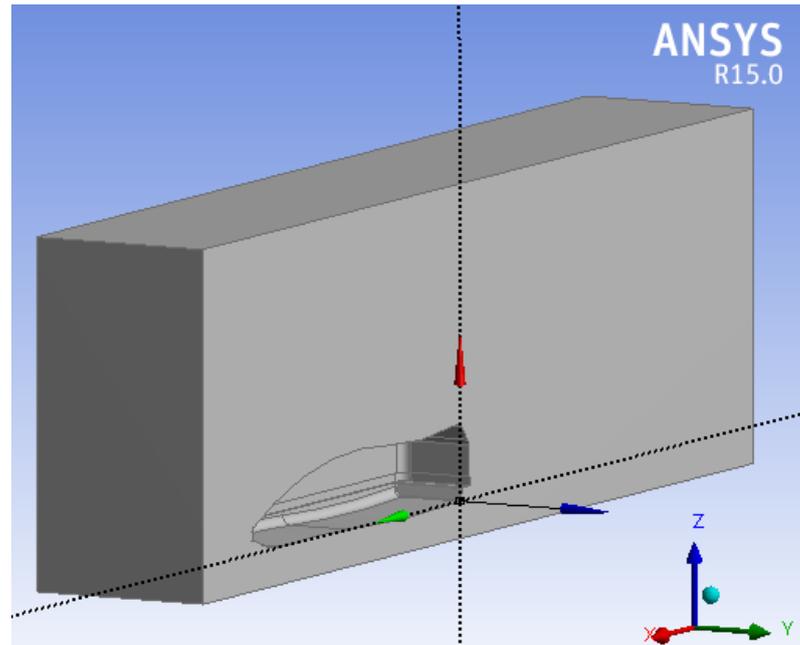


Figura 4.9 Vaciado del cuerpo extruido

En la figura 5.9 se puede observar que las zonas con mayor espacio son las superiores y posteriores al cofre, esto se debe a que estas dos zonas son, a priori, las zonas que más interesan estudiar cómo se verá más claramente en los resultados. Por otra parte, la zona delantera no interesa tanto ya que es la zona que sufre las consecuencias inmediatas del choque del fluido contra el cofre. Finalmente, se puede observar que por la parte inferior al cofre se ha dejado poco espacio con tal de hacerlo lo más realístico posible ya que el cofre respecto al techo del coche se colocaría a una distancia similar. En este caso, se ha definido una distancia de 0,2 m.

4.2.2. Mallado

Para realizar el estudio se utiliza el método de los elementos finitos (MEF). Este método consiste obtener una solución numérica aproximada dividiéndola en pequeños subdominios, conocidos como elementos finitos, los cuáles están formados por unos puntos representativos denominados nodos. El conjunto de nodos es conocido como la malla.

Los nodos son los puntos donde el ordenador hace sus cálculos para llegar a un resultado, de esta manera se puede deducir que en cuantos más nodos, más preciso será el resultado. Por el contrario, en cuantos más nodos, más operaciones se tendrán que realizar, es decir, el tiempo de cálculo para llegar a la solución será mayor. Por este motivo interesa encontrar un equilibrio entre la cantidad de nodos y la exactitud de la solución para definir la malla necesaria.

El primer mallado que se realizará será el que crea *Ansys* por defecto. Este se tomará como referencia y tras mirar los resultados que se obtienen a partir de él, se intentará optimizar desde el punto de vista de fiabilidad de la solución y tiempo de cálculo.

En primer lugar, se nombran las superficies de trabajo para poder diferenciarlas en el momento de trabajar con ellas, tal y como se observa en la imagen:

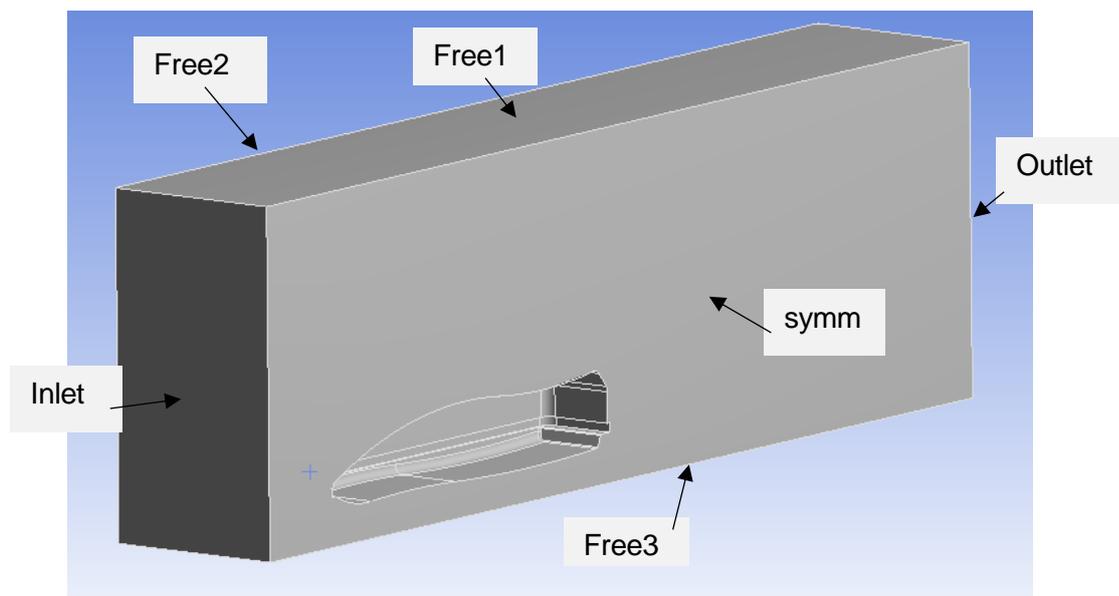


Figura 4.10 Creación de los nombres a las superficies de trabajo

Seguidamente, se da orden de generar la malla, *Generate Mesh*, así *Ansys* crea una malla por defecto sobre el cuerpo de estudio resultando de la siguiente manera.

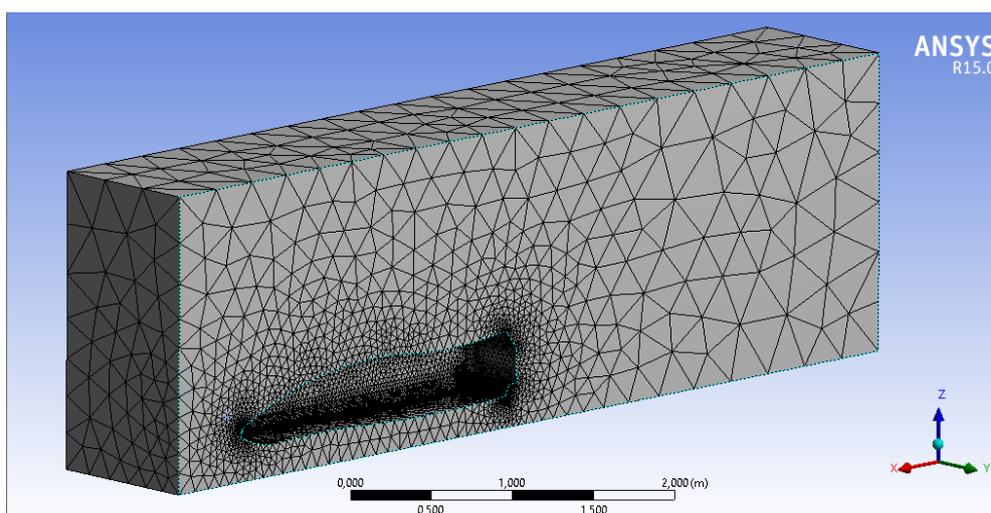


Figura 4.11 Mallado por defecto de Ansys

Como se observa en la figura 5.11, el mallado que crea Ansys tiene elementos más grandes por las zonas lejanas al cofre, mientras que por las zonas cercanas se tienen elementos mucho más pequeños. Esto es positivo ya que las zonas de estudio de más interés se encuentran justo alrededor del cofre.

4.2.3. Condiciones de contorno

Una vez terminada la malla, se procede a definir las condiciones de contorno para llevar a cabo la simulación y extraer los primeros resultados.

4.2.3.1. Modelos de turbulencia

Para realizar la simulación de dinámica de fluidos, es necesario conocer el comportamiento de cada uno de los parámetros del fluido, entre ellos uno de los más característicos es el de la turbulencia. A lo largo de la historia, se han expresado varias teorías matemáticas del modelado de fluido. Aun así, aún no se ha conseguido un modelo preciso a causa de la turbulencia al ser un fenómeno muy complejo.

La turbulencia es un régimen de flujo en el que las diferentes partículas del fluido sufren cambios espacio-temporales de presión y velocidad muy rápidos, creando un aparente desorden entre todas ellas, tal y como se muestra en la figura 5.12.

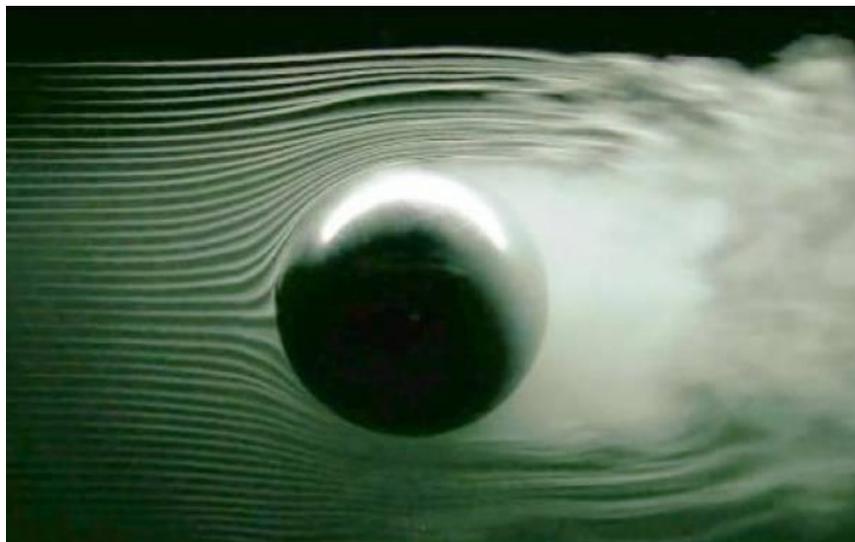


Figura 4.12 Turbulencia causada por una esfera [7]

Los modelos de turbulencia se pueden clasificar en tres categorías principales que son DNS, SRS y RANS. De entre estos tres modelos se ha escogido el RANS.

Se ha descartado el modelo DNS (*Direct Numerical Simulation*), ya que es un modelo numérico de resolución completo de las ecuaciones de Navier – Stokes de todas las características de la turbulencia en cualquier espacio y tiempo. Por una parte sería positivo al obtener un resultado muy preciso pero, por el contrario, tendría un coste computacional muy elevado. Por lo que éste modelo se limita a geometrías simples y Reynolds bajos.

También se ha descartado el modelo SRS (*Scale Resolving Simulation*), ya que requiere mallas muy finas, y esto implica mayor número de iteraciones que conlleva a mayor tiempo de cómputo. El modelo SRS presenta resultados más exactos que los RANS, y puede dar información adicional como la cavitación, fenómenos acústicos, resultados aerodinámicos de alta precisión etc. Sin embargo se descarta ya que a pesar de sus ventajas sigue presentando un alto coste computacional.

Se escoge finalmente el modelo RANS, dado que es un modelo que presenta facilidades para realizar una gran variedad de procesos en cualquier ordenador de hoy en día. A más, presenta grandes ventajas al simular flujos que se encuentran unidos a las paredes, dato que será de interés en la lectura los futuros resultados.

Dentro del modelo RANS, hay varios modelos. Entre ellos, en primer lugar se escoge el modelo más estándar y más utilizado en el CFD, el modelo *Standard k-ε*.

Ansys aplica las ecuaciones de Navier-Stokes y la de continuidad en todos los nodos en forma diferencial. Estas ecuaciones diferenciales son de segundo orden y no lineales, por lo tanto es un sistema que no tiene solución. Para poder obtener un resultado, el programa pasa estas ecuaciones en forma algebraica y añade las ecuaciones que aporta el modelo de turbulencia. En este caso, el modelo *Standard k-ε* aporta dos ecuaciones de transporte que permiten obtener por un lado la k , que sería la energía cinética turbulenta, y por otra parte la ϵ , que sería la disipación de la turbulencia.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\rho} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\rho} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4.2)$$

Donde:

U_i : Representa la componente de la velocidad en la dirección correspondiente.

E_{ij} : Representa la componente de la deformación.

μ_t : Representa la viscosidad

Las ecuaciones también intervienen algunas constantes, cuyos valores se han llegado por iteraciones ajustando datos para abarcar una amplia gama de flujos turbulentos.

$$C_\mu = 0.09$$

$$\sigma_k = 1$$

$$\sigma_E = 1.3$$

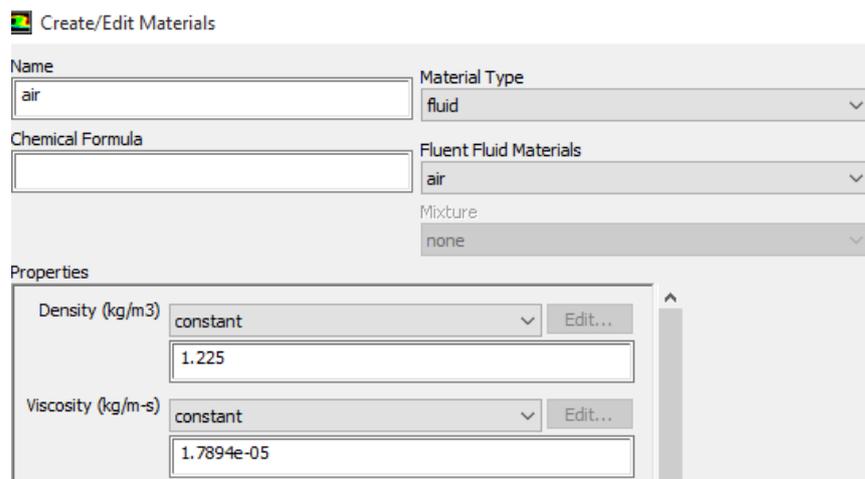
$$C_{1E} = 1.44$$

$$C_{2E} = 1.92$$

Es un modelo adecuado para distintas aplicaciones de ingeniería y ha sido ampliamente utilizado. Es simple de implementar, los cálculos convergen relativamente rápido y dan resultados coherentes para distintos tipos de fluido.

4.2.3.2. **Material**

Seguidamente se debe escoger el tipo de material con el que se va a realizar la simulación. El programa nos da dos opciones a elegir: sólido o fluido. En este caso el fluido de estudio será el aire que una vez escogido, el programa ya presenta por defecto las propiedades que va a utilizar de éste, tal y como se muestra en la siguiente figura.



The image shows a software interface for defining material properties. It includes fields for Name, Material Type, Chemical Formula, Fluent Fluid Materials, Mixture, and Properties. The Properties section is expanded to show Density and Viscosity settings.

Property	Value
Name	air
Material Type	fluid
Chemical Formula	
Fluent Fluid Materials	air
Mixture	none
Density (kg/m ³)	constant 1.225
Viscosity (kg/m-s)	constant 1.7894e-05

Figura 4.13 Elección del fluido de trabajo

4.2.3.3. **Velocidad del fluido**

El objetivo del proyecto es el de extraer los resultados de la simulación de un cofre de coche, entre ellos se quiere conocer el valor de la C_D , el cual depende de la velocidad del fluido, tal como expresa la ecuación 4.2. Por este motivo, esta condición es muy importante ya que de él dependerá el resultado.

Para escoger la velocidad de simulación del fluido se ha planteado la hipótesis siguiente:

El cofre se utiliza para aumentar la capacidad de transporte, en general, de un coche. Actualmente, se utilizado en largos recorridos. En estos casos se suelen usar autopistas, es decir, la velocidad a la que circulará el coche será de unos 120 km/h (33,33 m/s), suponiendo que no hay muchos obstáculos. Se ha escogido esta velocidad ya que, como se ha comentado anteriormente, se quiere estudiar el caso más desfavorable que se pueda presentar, es decir, circular a máxima velocidad con un cofre grande.

A parte de la velocidad a la que circula el coche, también es importante tener en cuenta la velocidad del viento, en este caso se ha supuesto que la velocidad del viento es de 5 m/s y que éste circula en sentido opuesto al desplazamiento del coche.

Para realizar la simulación en *Ansys*, se debe definir la velocidad relativa del fluido respecto el cofre, que teniendo en cuenta las hipótesis anteriores, la velocidad que se utilizará para la simulación es de 38 m/s.

Una vez definida la velocidad, se tiene que transmitir esta información al programa. Anteriormente se le dieron nombres a las distintas superficies de trabajo, una de ellas el *inlet*, llamada así por ser la superficie que simulará la entrada del aire.

También es importante tener en cuenta el sistema de referencia en el que estamos trabajando, en este caso será el que se muestra en la figura 5.14.

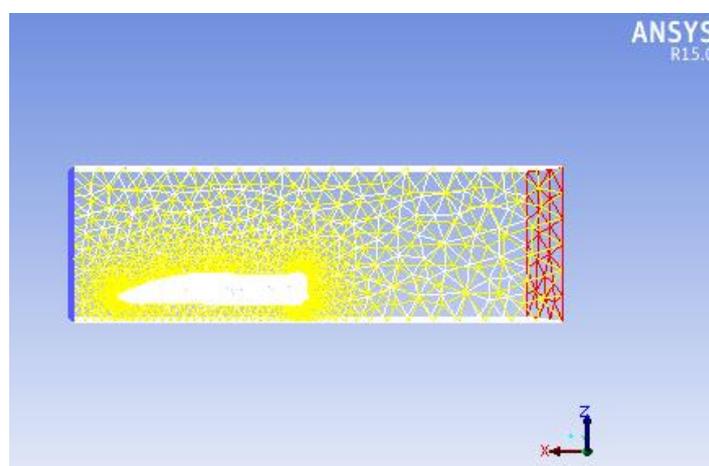


Figura 4.14 Sistema de referencia de la simulación

La superficie *inlet* queda entonces a la izquierda de la figura 5.14, y el sentido del aire para la simulación es de izquierda a derecha que, en el sistema de referencia de trabajo, sigue el vector (-1,0,0).

Por lo tanto la velocidad se definirá en la superficie *inlet*, y en el campo *Velocity Specification Method* se selecciona la opción magnitud y dirección. En el caso de la magnitud, se especifica la velocidad en valor absoluto que en este caso se supone que es de 38 m/s, y en el caso de la dirección, el vector (-1,0,0), tal y como se muestra en la figura 5.15.

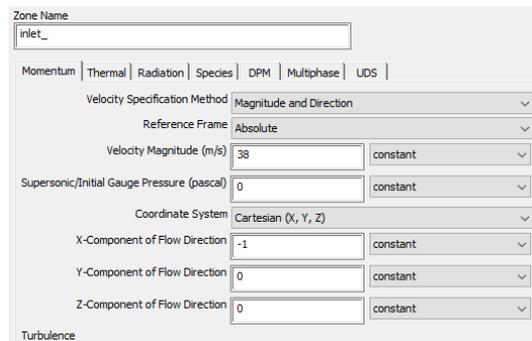


Figura 4.15 Introducción de la velocidad de simulación

4.2.3.4. Área proyectada

Tal como expresa la ecuación de la fuerza de arrastre (4.2), la C_D depende de la sección frontal proyectada en la superficie *inlet*. En este estudio sólo se toma en cuenta sólo la mitad del cofre ya que se trata de una pieza simétrica y, de esta manera, se simplifican los elementos y se reducen los cálculos del programa.

Para aproximar la geometría del cofre, se ha cogido como base la dimensión de un paralelepípedo de 2250x800x420 mm. De esta manera, se utiliza esta dimensión para calcular la superficie proyectada frontal, que en este caso será la mitad de la pieza total ya que se está trabajando con la mitad de la pieza.

$$A_{\text{PROYECTADA}} = \frac{b \cdot h}{2} = \frac{0,8 \cdot 0,42}{2} = 0,168 \text{ m}^2 \quad (4.3)$$

A continuación se introduce el resultado obtenido al programa tal y como se muestra en la figura 5.16.

Reference Values	Value
Area (m ²)	0.168
Density (kg/m ³)	1.225
Enthalpy (J/kg)	0
Length (m)	1
Pressure (pascal)	0
Temperature (K)	288.16
Velocity (m/s)	38
Viscosity (kg/m-s)	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4

Figura 4.16 Introducción de la superficie frontal proyectada

4.2.4. Soluciones

El programa es capaz de extraer gran información de la simulación. Sin embargo, no toda la información es de interés para éste estudio por lo que se configura para que extraiga la información que interesa.

4.2.4.1. Configuración para la extracción de la C_D y la C_L

Uno de los objetivos principales del análisis es obtener la C_D para ver la resistencia al avance que tiene el cofre, el cual se comparará con las posteriores simulaciones que se realizarán.

La C_D es uno de los coeficientes más interesantes de extraer como resultado, sin embargo otro coeficiente interesante de obtener es el valor de la C_L . Con este último se quiere corroborar que el valor se aproxima a cero evitando así la posible sustentación que se puede originar al hacer la simulación.

En definitiva se pretende visualizar la evolución de la C_D y la C_L a lo largo de las diferentes simulaciones. Para ello, se tiene que acceder al apartado “*Monitors*”, y seleccionar la opción “*Create*”. Una vez seleccionado, aparecen tres opciones para crear que son el “*drag*”, “*lift*” y “*Moment*”, tal y como se muestra en la figura 5.17.

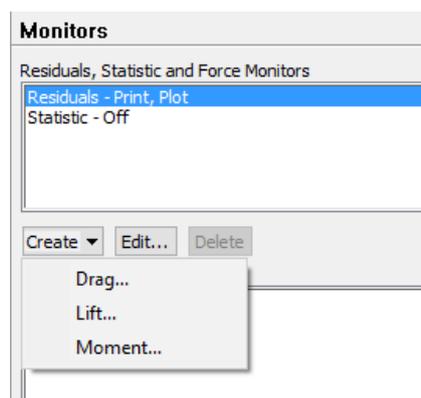


Figura 4.17 Creación del Drag y el Lift

La creación del “*Drag*” y el “*Lift*” son muy similares habiendo muy pocas diferencias entre ellas.

Primeramente se escoge el “*Drag*”, donde el dato más importante que hay que definir es la dirección en la que actúa la C_D . Para tener una referencia se observan las fuerzas que actúan en un perfil de ala de avión como se observa en la imagen 5.18.

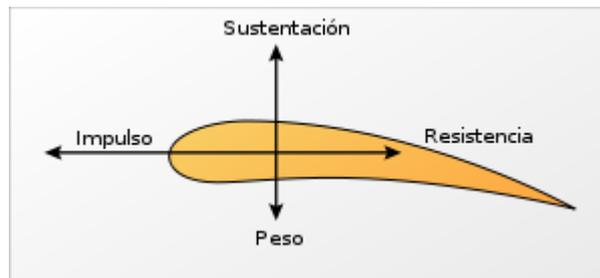


Figura 4.18 Fuerzas que actúan en el perfil de ala de avión [8]

La resistencia al avance, tal como se observa en la imagen 5.18, va en la misma dirección que el fluido y sentido contrario al avance del objeto de estudio. Teniendo en cuenta estos datos y recordando el sistema de referencias en el que se está trabajando, el vector de trabajo que se tiene que definir en la creación del “*Drag*” es el $(-1,0,0)$, tal y como muestra la figura 5.19.

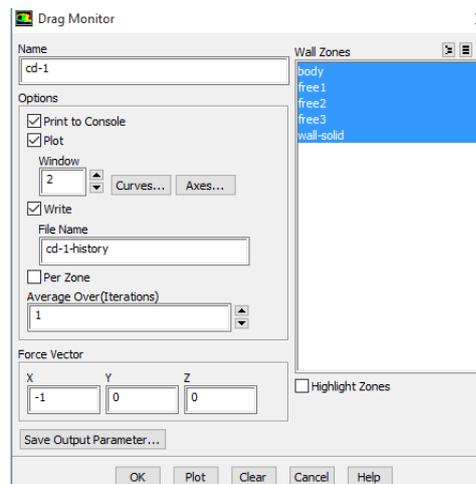


Figura 4.19 Introducción dirección y sentido de la influencia de la C_D

En el caso de la configuración del “*Lift*”, se realiza de la misma manera que el “*Drag*”, sin embargo, cambia la dirección y sentido que en este caso viene dado por la sustentación, que recordando la figura 5.18, se observa que la sustentación va hacia arriba.

De entrada se supone que la sustentación va hacia arriba, es decir, el vector que determina la creación del “*Lift*”, teniendo en cuenta el sistema de referencia en el que se está trabajando, es el $(0,0,1)$.

En el caso de la fuerza de resistencia al avance, no hay duda de que la dirección y sentido viene determinada por el fluido, sin embargo, de la sustentación se sabe que está en la dirección perpendicular al avance pero no se sabe con certeza si el sentido es hacia arriba o hacia abajo. A pesar de esta duda, el programa ofrece el resultado en función de lo que se haya configurado, es decir, que si se supone que va hacia arriba, el programa informa que el sentido es contrario al que se ha definido, presentado un negativo delante del valor obtenido de la C_L .

Tal como se observa en la figura 5.19, también se ha marcado la opción “*Write*”, de esta manera se le está pidiendo al programa que presente la evolución de los dos coeficientes en función del número de iteraciones.

4.2.4.2. Inicio del cálculo de la simulación

Una vez llegado a este punto, se han introducidos todos los datos para poder realizar la simulación. Sólo falta introducir un dato más: el número de iteraciones deseadas. Este valor es importante ya que si no se define un número de iteraciones suficiente, los resultados pueden ser incorrectos dando un error significativo.

Para evitar este error, *Ansys* proporciona la solución cuando los valores residuales son suficientemente pequeños (del orden de 10^{-4} ó 10^{-5}), es decir, que el mismo programa avisa cuando la solución converge. Con esta información, si se define un número de iteraciones determinado y el programa considera que la solución no ha convergido, implica que no se han considerado suficientes iteraciones.

Dentro del apartado *Solution*, en “*Run Calculation*”, se define el número de iteraciones que se quieren para realizar la simulación. Antes de ello, existe una opción en el programa la cual permite comprobar que la simulación que se va a realizar está bien configurada. De ésta manera, el mismo programa advierte si hay algún problema. Ésta opción se denomina “*check case*”, que en este caso no presenta ningún problema.

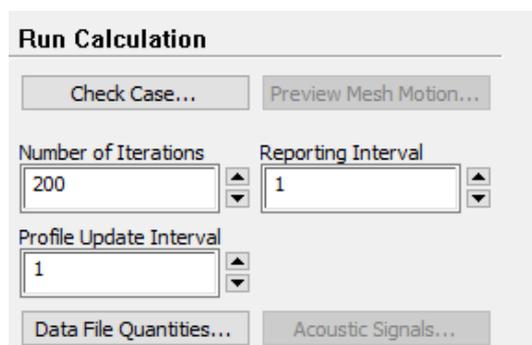


Figura 4.20 Introducción del número de iteraciones

Tal como se muestra en la figura 5.20, para empezar la simulación se realizarán 200 iteraciones. Más adelante se valorará si son suficientes analizando los resultados.

4.2.5. Resultados

Una vez iniciada la simulación, se ha comprobado que con 200 iteraciones la solución no converge. Esto quiere decir que el número de iteraciones definido es insuficiente. Por lo que se aumenta el número de iteraciones a 50000, dando margen para asegurar que convergirá.

4.2.5.1. Coeficiente de arrastre y coeficiente de la sustentación

La simulación ha durado aproximadamente 3 horas. Finalmente, la solución ha convergido en la iteración número 1163. A partir de esta iteración se pueden extraer los valores de la C_D y la C_L .

iter	continuity	x-velocity	y-velocity	z-velocity	k	epsilon	Cl-1	Cd-1	time/
1156	1.1843e-03	1.1335e-05	7.6210e-06	8.1038e-06	3.9099e-04	9.1469e-04	2.6266e-02	6.2452e-01	1:34:53
1157	1.1478e-03	1.0977e-05	7.4742e-06	7.9310e-06	3.9265e-04	9.1198e-04	2.6383e-02	6.2461e-01	1:35:29
1158	1.1288e-03	1.0659e-05	7.2804e-06	7.7643e-06	3.9600e-04	9.0977e-04	2.6156e-02	6.2466e-01	1:35:57
1159	1.0913e-03	1.0364e-05	7.1690e-06	7.6268e-06	3.9360e-04	9.0553e-04	2.6160e-02	6.2476e-01	1:36:17
1160	1.0673e-03	1.0111e-05	7.0035e-06	7.5000e-06	3.9331e-04	9.0398e-04	2.6088e-02	6.2491e-01	1:33:44
1161	1.0333e-03	9.9416e-06	6.9047e-06	7.3974e-06	3.8700e-04	8.9904e-04	2.6106e-02	6.2502e-01	1:34:29
1162	1.0087e-03	9.7467e-06	6.7435e-06	7.3164e-06	3.8194e-04	8.9454e-04	2.6032e-02	6.2508e-01	1:35:03
1163	solution is converged								
1163	9.8497e-04	9.6443e-06	6.6804e-06	7.2331e-06	3.7475e-04	8.9136e-04	2.6159e-02	6.2515e-01	1:35:29

Figura 4.21 Convergencia del primer estudio

Observando la figura 5.21, se pueden extraer los valores numéricos de los coeficientes de arrastre y de sustentación del primer estudio, que servirán para tener una referencia para los siguientes estudios.

$$C_D = 0,625$$

$$C_L = 0,0262$$

Tal como se ha comentado anteriormente, la simulación converge cuando los valores residuales son del orden de 10^{-4} ó 10^{-5} , detalle que se puede observar en la figura 5.21 ya que en la iteración 1662 todos los valores són del orden de 10^{-4} o más pequeños, salvo uno del orden de 10^{-3} . Este mismo valor, en la iteración 1163, pasa a tener orden de 10^{-4} y, de esta manera, se cumplen que todos los valores residuales sean suficientemente pequeños para converger.

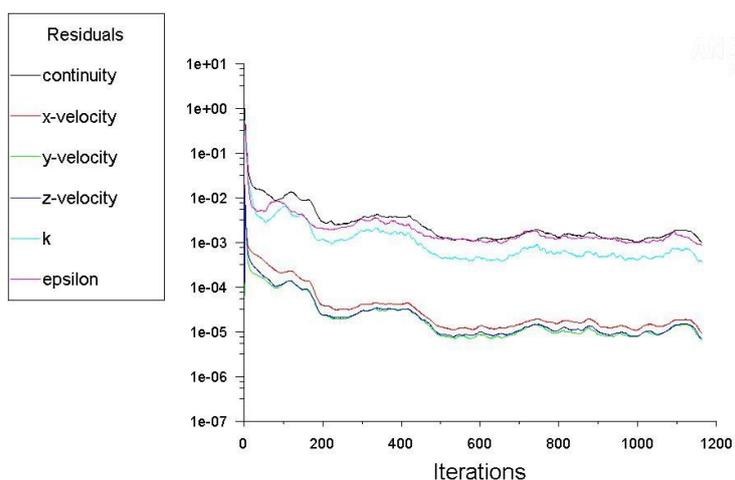


Figura 4.22 Evolución de los valores residuales respecto las iteraciones

4.2.5.2. Distribución de presiones

Una vez realizado el estudio se pueden extraer varios gráficos, entre ellos el de la distribución de presiones alrededor del cofre convencional.

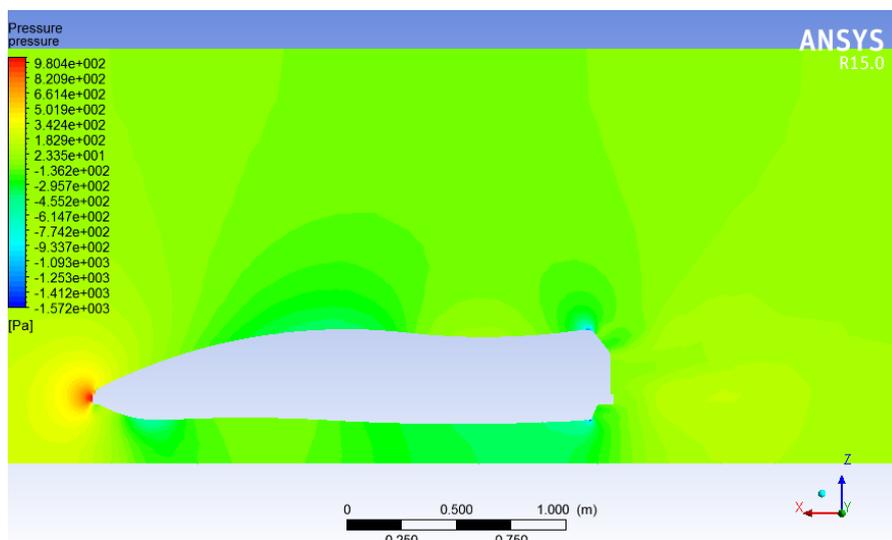


Figura 4.23 Distribución de presiones

Observando la figura 5.23 se pueden comentar algunos datos al respecto. En primer lugar, podemos observar la leyenda de presiones y la forma en que está distribuido en el diagrama.

Se puede observar que las zonas de máximas presiones son de color rojo, mientras que las de baja presión son de color azul. Las zonas de máximas presiones se presentan en la zona de contacto del fluido con el cofre, en concreto, se puede identificar un punto donde se produce la presión máxima, éste se conoce como punto de estancamiento. En este caso el valor de la presión máxima es de $1,034 \cdot 10^3$ Pa.

El flujo del fluido se compone de líneas de corriente, una de ellas choca directamente con el objeto, en ese instante la velocidad es nula y, teniendo en cuenta la ecuación de Bernoulli (4.1), si ésta es nula, la presión es máxima produciendo de ésta manera el punto de estancamiento.

Una vez el fluido avanza por el perímetro superficial, se puede observar que se produce un primer desprendimiento de la capa límite a mitad de la longitud, donde las presiones son mínimas. Sin embargo, al tener el cuerpo más longitud, se produce un reenganchamiento de tal manera que el fluido avanza hasta prácticamente el final de la pieza, momento en el que se produce otro desprendimiento definitivo de la capa límite.

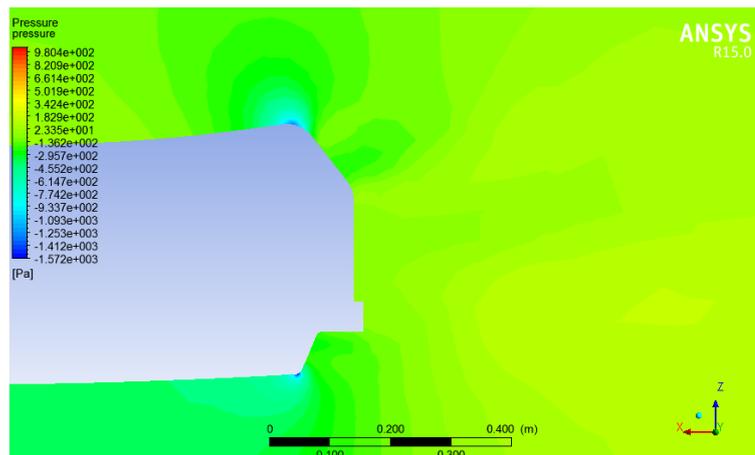


Figura 4.24 Desprendimiento definitivo de la capa límite

El tener más de un desprendimiento de la capa límite no es positivo para la aerodinámica de la pieza. Éste efecto crea más zonas de turbulencia dificultando el avance del cuerpo por el aire. Por otra parte, en la parte inferior del cofre también se produce un reenganchamiento con la diferencia que se produce a una cota de longitud menor que en la parte superior.

4.2.5.3. **Distribución de velocidades**

Otro diagrama que se puede extraer del programa es el de velocidades.

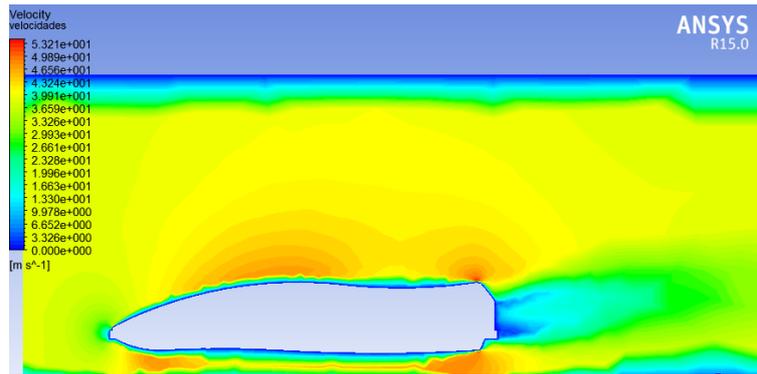


Figura 4.25 Distribución de velocidades

En la figura 5.25 se puede observar que la velocidad en el momento del impacto es prácticamente nula, definición del punto de estancamiento. Por otra parte, las velocidades van aumentando a medida que se avanza por el perímetro del cofre llegando a desprenderse la capa límite por primera vez. Tal como se ha observado en el diagrama de presiones, se produce el reenganchamiento de la capa de tal manera que vuelven a aumentar las velocidades hasta llegar al desprendimiento definitivo de la capa límite.

De esta manera se puede deducir que en las zonas de desprendimiento de la capa límite, cuando se producen las máximas velocidades, es cuando las presiones son mínimas, confirmando así la ecuación de Bernoulli.

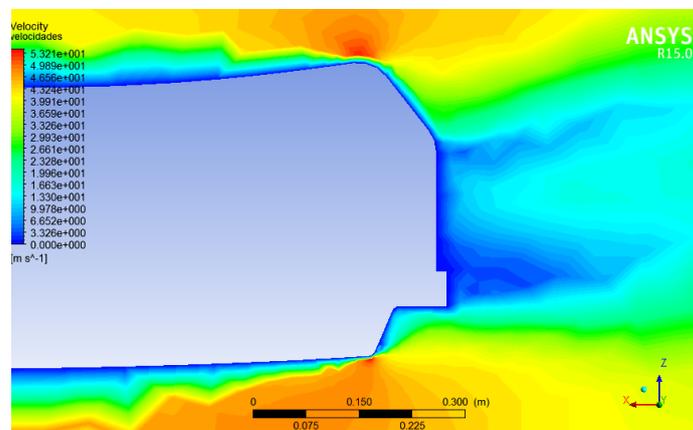


Figura 4.26 Desprendimiento definitivo de la capa límite.

4.2.6. Conclusiones de la primera simulación

Una vez realizada la primera simulación se pueden extraer dos conclusiones claras. Una de ellas es que se observa que en la parte delantera y superior del cofre, tanto la velocidad como

la presión sufren cambios que se ven reflejados por zonas de distinto color los cuales salen cortados a causa de la geometría de la modelización. Por lo tanto, para futuras simulaciones, se va a añadir material tanto por encima como por delante del cofre para evitar estas zonas cortadas.

Por otra parte también se pueden sacar otras conclusiones con tal de tenerlas en cuenta para el futuro diseño del cofre. En la zona donde se producen las máximas velocidades, se encuentra un cambio muy brusco de la curvatura del material. Esto provoca que la velocidad disminuya de manera más significativa mientras que la presión aumenta. Al haber un gradiente de presiones desfavorable se produce el desprendimiento de la capa límite. Una buena solución para atrasar este fenómeno sería realizar una curvatura más suave haciendo la pieza más plana por esa zona. A más, se produce un desprendimiento de la capa límite tanto en la parte superior como inferior del cofre, produciéndose un reenganchamiento, fenómeno que se intentará evitar para el nuevo diseño ya que perjudica la aerodinámica del cuerpo.

4.3. Modelización con una malla refinada

Estos primeros resultados servirán para tener una referencia y realizar una comparativa con las potenciales mejoras que se van a realizar a continuación. En el primer estudio se realizó la simulación con una malla "automática" que el mismo programa define por defecto. El tiempo de cómputo fue muy elevado a causa de la gran cantidad de elementos de la malla. Para evitarlo, se intentará realizar una simulación con una malla con menos elementos, más uniforme y así permitir al programa converger más fácilmente. Todo ello sin comprometer la fiabilidad de los resultados llegando incluso a mejorarlos.

4.3.1. Malla refinada

Primeramente, se ha querido limitar el tamaño de los elementos en todo el cuerpo. En este caso se ha restringido con un *Body Sizing* a que el tamaño más grande del elemento sea de 0,2m.

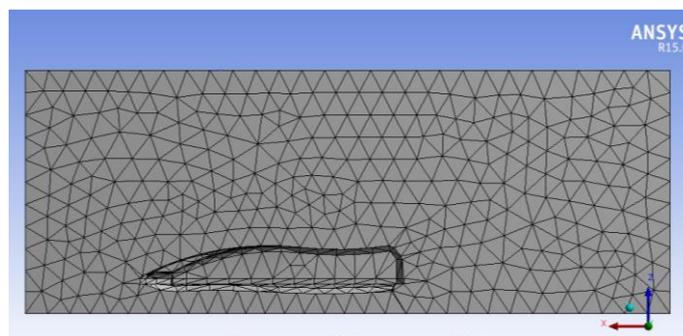


Figura 4.27 Body Sizing de 0,2m

Como se observa en la figura 5.27, se han tenido en cuenta las conclusiones de la simulación anterior, es decir, se ha añadido material delante y encima del cofre. La malla es bastante uniforme por todo el cuerpo, sin embargo, para extraer los resultados hay que refinarla en las zonas más conflictivas del estudio, en este caso, las zonas próximas al cuerpo. Para ello se va a realizar un *Face sizing*, marcando todas las caras interiores del cofre dándoles un tamaño de elemento más pequeño.

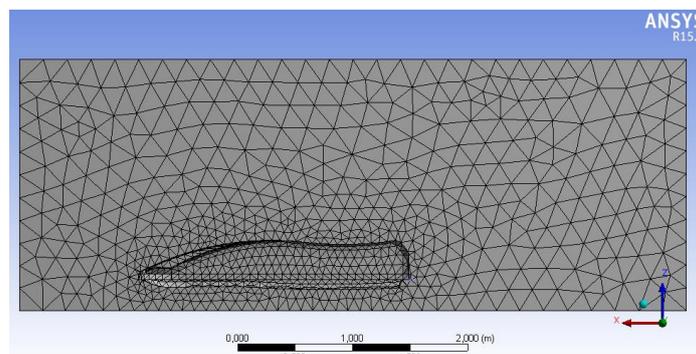


Figura 4.28 Face Sizing en las superficies del cofre

En este caso se ha dado como tamaño de elemento de 0,07m, más pequeños que en el *Body Sizing*. De esta manera, habrá más elementos en la zona de estudio que más interesa y, así, tener más nodos para que el programa pueda realizar más cálculos en las zonas próximas al cofre.

Cabe destacar que se puede elegir el comportamiento (*behavior*) del *Sizing*: puede ser *soft* o *hard*. Con la opción *soft*, el programa hará el mallado teniendo en cuenta las restricciones que se han definido aunque, si existe una malla que el programa considera mejor, la hará. En cambio si se define *hard*, sólo tendrá en cuenta las restricciones que se han introducido. En este caso, se ha impuesto que el comportamiento sea *hard*.

4.3.2. Resultados con la malla refinada

Una vez se obtiene la malla refinada, se procede a simularla con las mismas condiciones de contorno que en la simulación anterior. Sin embargo, al verificar que todo esté correcto antes iniciar los cálculos, el programa advierte de un problema en la malla.

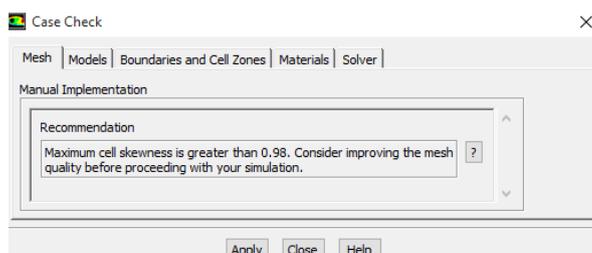


Figura 4.29 Aviso de valores de skewness mayores de 0,98

El programa advierte que el *Skewness* es mayor que 0,98 siendo aconsejable mejorar la calidad de la malla antes de proceder a la simulación. Para ello es necesario entender que es el *Skewness*.

4.3.2.1. *Skewness*

El *skewness* es una de las principales medidas para ver la calidad de una malla. En este estudio, la forma del elemento que se ha utilizado es la tetraédrica aunque por la geometría que tiene el cofre, es difícil dar esta forma a todo el entorno de estudio. El valor de *skewness* informa como de cerca están los elementos de la malla de su forma ideal, es decir, como de cerca están los tetraedros de la malla conseguida respecto los tetraedros equiangulares.

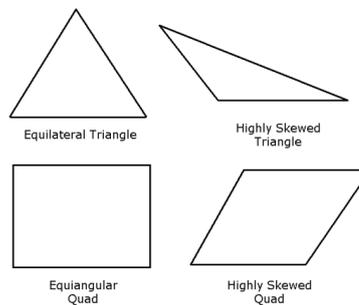


Figura 4.30 Formas ideales y no-ideales [9]

En la imagen 5.30 en la parte de la izquierda se pueden observar las formas perfectas de malla, por otra parte, a la derecha están las mismas formas pero con un *skewness* que indica que no es el perfecto. Para entender mejor el *skewness*, se tiene una fórmula para extraer valores numéricos y poder realizar la comparativa del elemento obtenido con el ideal.

$$\text{Skewness} = \frac{\text{Optimal Cell Size} - \text{Cell Size}}{\text{Optimal Cell Size}} \quad (4.4)$$

Con esta fórmula se pueden extraer valores numéricos del *skewness* y así, de esta manera, realizar una tabla de intervalos numéricos donde en cada uno de ellos se obtiene una calidad de elemento buena o mala según el intervalo en el que se encuentre.

Skewness	Calidad del elemento
1	Degenerada
0.9–1	Mala
0.75–0.9	Pobre
0.5–0.75	Justa
0.25–0.5	Buena
0–0.25	Excelente

Tabla 4.2 Calidad de la malla según el skewness

El mismo programa ha notificado que los valores del *skewness* no son muy buenos. Esto puede causar que en el momento de realizar la simulación, los resultados sean erróneos o que la solución ni siquiera llegue a converger. Por este motivo, es necesario realizar una mejora de la malla para solucionar este problema.

4.3.3. Nueva malla refinada

Para mejorar la zona donde el *skewness* es muy alto, primero hay que identificar dichas zonas y observar los elementos que no cumplen este requisito. El programa permite visualizar los elementos entre intervalos de los valores de *skewness* que se quieren, en este caso se ha definido que se visualice los elementos conflictivos que, en este caso, son los que tienen valores entre 0.98 y 1.

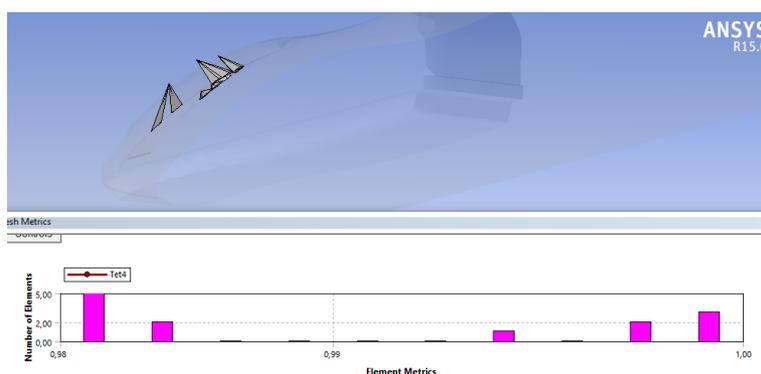


Figura 4.31 Elementos conflictivos con valores de skewness no deseados

Actualmente la malla tiene un total de 15627 elementos donde 13 de ellos superan un valor de 0.98 de *skewness*, tal como muestra la figura 5.31. Para solucionar este hecho, se va a proceder a refinar la zona que se ha identificado como conflictiva.

Una vez refinada la zona de conflicto, se consigue disminuir el valor máximo del *skewness* hasta el 0,977, evitando así los posibles errores de la simulación. Este proceso ha sido complicado ya que al refinar la malla en la zona conflictiva se creaban nuevas zonas con valores altos de *skewness*, es por este motivo que no solo se ha modificado la zona donde inicialmente se producían valores mayores de 0.98, sino también se ha refinado todo el cuerpo. De esta manera la malla queda tal y como muestra la figura 5.32.

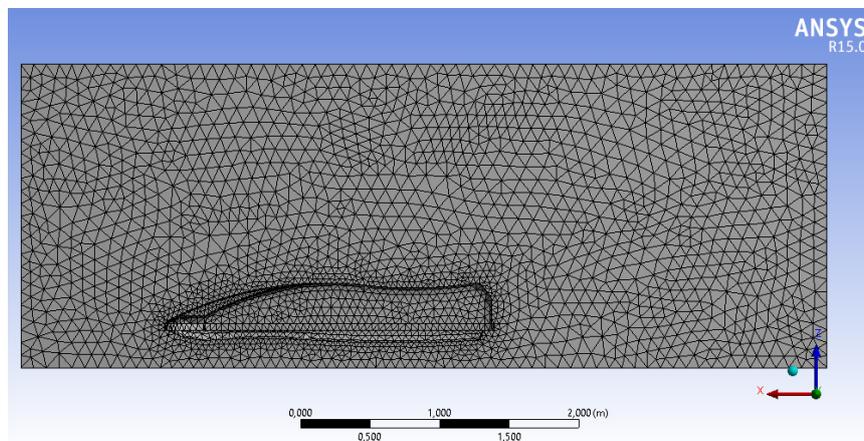
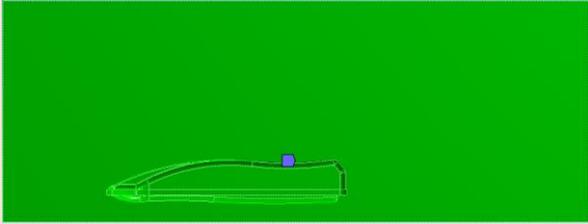


Figura 4.32 Nueva malla refinada

Con las características siguientes:

ZONAS AFECTADAS	TAMAÑO DE MALLA
	Body sizing de 0,1m

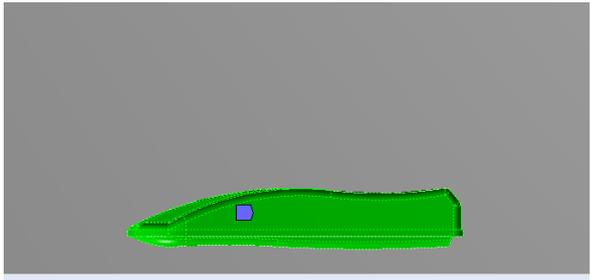
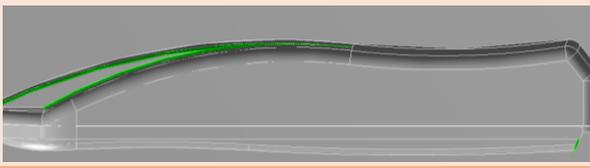
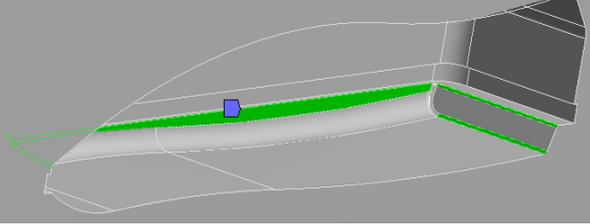
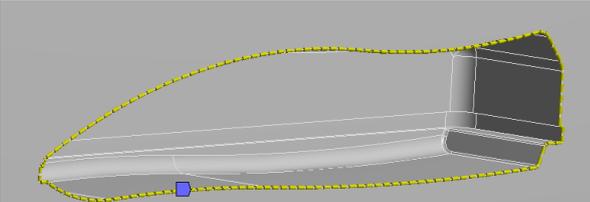
	Face sizing de 0,06m
	Face sizing de 0,03m
	Face sizing de 0,05m
	Edge sizing de 0,04m

Tabla 4.3 Características de la nueva malla refinada

Una vez se ha obtenido la nueva malla refinada, evitando el problema de valores altos de *skewness*, ya se puede proceder a la simulación para extraer los resultados.

4.3.4. Resultados de la nueva malla refinada

Poniendo las mismas condiciones que la primera simulación, esta vez el programa no hace ninguna advertencia que pueda hacer peligrar los resultados. De esta manera, se procede a comenzar la simulación definiendo 50000 iteraciones, asegurando así que la simulación converja.

Esta vez la solución ha convergido más rápido, tal y como se muestra en la figura:

131	9.9880e-04	8.8048e-05	3.9525e-05	4.6132e-05	1.0836e-03	2.5267e-03	9.9398e-02	6.6744e-01
132	9.8818e-04	8.5152e-05	3.8896e-05	4.4806e-05	1.0000e-03	2.1267e-03	1.2486e-01	6.7989e-01
iter	continuity	x-velocity	y-velocity	z-velocity	k	epsilon	C1-1	Cd-1
133	9.6967e-04	8.1818e-05	3.7051e-05	4.2970e-05	8.9250e-04	1.0601e-03	9.5352e-02	6.6709e-01
134	9.6400e-04	7.9456e-05	3.6649e-05	4.2297e-05	9.2313e-04	1.3592e-03	1.2167e-01	6.7934e-01
!	135	solution is converged						
135	9.3745e-04	7.6526e-05	3.5148e-05	4.0518e-05	8.3297e-04	8.2348e-04	9.2100e-02	6.6664e-01

Figura 4.33 Convergencia del segundo estudio

También se pueden extraer los valores de la C_L y la C_D , que como se observa en la figura son:

$$C_D = 0,666$$

$$C_L = 0,092$$

El coeficiente de resistencia al avance no ha sufrido un cambio muy significativo, sin embargo, el coeficiente de sustentación sigue siendo del orden de 10^{-2} pero siendo muy próximo al orden de 10^{-1} . En este caso, la sustentación tendrá un valor más alto que en el caso anterior, sin embargo sigue siendo pequeño aunque debería disminuir con el objetivo que el efecto de la sustentación sea mínimo.

4.3.4.1. Distribución de presiones y velocidades

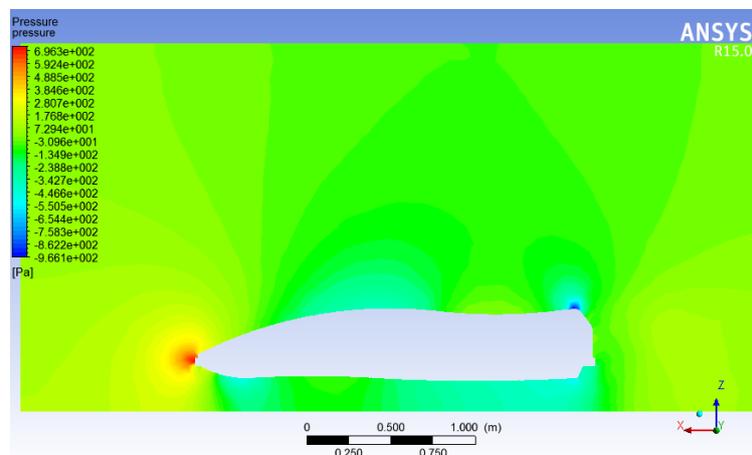


Figura 4.34 Distribución de presiones malla refinada

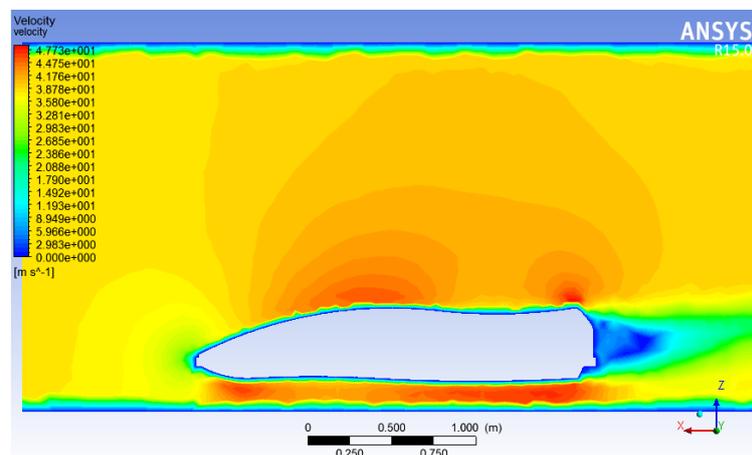


Figura 4.35 Distribución de velocidades de la malla refinada

Como se observa en las figuras 5.34 y 5.35, las distribuciones de presión y velocidades no han variado mucho. Sin embargo, se puede destacar que los valores máximos han disminuido a causa del nuevo mallado. A más, ahora el efecto del choque del fluido con el cofre se puede ver en su totalidad, detalle que anteriormente aparecía incompleto. Por otra parte, la zona que está encima del cofre sigue apareciendo cortada. A pesar de ello, en la distribución de velocidades se puede observar que aparece prácticamente toda la zona afectada, estando cortada una pequeña parte.

4.4. Modelización con otro modelo de turbulencia

Hasta ahora siempre se ha simulado con el mismo modelo de turbulencia que ha sido el k-epsilon standard, que se ha escogido ya que es el modelo más ampliamente utilizado en el CFD y tiene un coste computacional que puede resistir el ordenador.

Tal y como se ha explicado anteriormente, existen varios modelos de turbulencia, pero actualmente no existe ningún criterio universalmente aceptado que determine que un modelo de turbulencia sea capaz de resolver cualquier simulación que se le presente. Por este motivo, se va a realizar otra simulación cambiando el modelo de turbulencia, y para escogerlo, a parte del coste computacional bajo, se va a mirar las zonas que se quieran tener más detalle.

4.4.1. Elección de un nuevo modelo de turbulencia

Para empezar, el primer modelo que se escogió ha sido el k-epsilon standard, sin embargo este modelo no es muy bueno para las zonas interiores de la capa límite, que justamente es la zona que más interesaría tener buenos resultados. Por este motivo se ha decidido realizar una simulación cambiando el modelo de turbulencia, escogiendo alguno que sea bueno para las zonas de la capa límite.

Un modelo que es bueno para estas zonas de interés es el k-w standard, que al igual que el k-epsilon, presenta dos ecuaciones para complementar la de continuidad y Navier-Stokes, una para la k (energía cinética turbulenta) y otra para la w (tasa específica de disipación). Este modelo va bien justamente en la zona donde va mal con el modelo k-epsilon, pero va mal en las zonas donde el modelo k-epsilon va bien, que son las que están fuera de la capa límite. De esta manera se creó un modelo, que es la fusión del k-epsilon y k-w, conocido como el k-w sst.

El modelo k-w sst combina las mejores características del k-epsilon y el k-w. En la capa límite interna se desarrolla con el modelo k-w, y en la región fuera de la capa límite se maneja k-epsilon. Por este motivo se ha decidido escoger este modelo para hacer la siguiente simulación.

4.4.2. Mallado para el nuevo modelo de turbulencia

Una vez escogido el modelo de turbulencia, se procede a hacer la simulación de nuevo. Los pasos serán los mismos que las anteriores simulaciones, solamente se cambiarán dos detalles respecto a las anteriores.

El primero de ellos, tal y como se ha comentado con anterioridad, se escogerá el modelo de turbulencia k-w SST. Este modelo combina lo mejor de los modelos k-e y k-w, es decir, para regiones exteriores de la capa límite k-epsilon y para las interiores k-w. En consecuencia, el mallado, segundo detalle que se cambiará respecto a las anteriores simulaciones, se deberá tratar de manera distinta ya que el comportamiento del fluido a la zona perimetral y próximas del cofre es diferente que las de las zonas fuera de la capa límite, por este motivo, a diferencia de las anteriores simulaciones, se hará un mallado distinto en la zona de la capa límite que fuera de ella.

Fuera de la capa límite el mallado se tratará de manera similar que en los otros estudios, sin embargo la zona que se va a trabajar más es la de dentro de la capa límite. En esta zona, tanto la velocidad como la presión, sufren cambios bruscos rápidamente, por este motivo se va a utilizar una herramienta que ayudará a tener los elementos más finos y ordenados, y es conocida como "Inflation".

4.4.2.1. Inflation

El "Inflation", hace un mallado más refinado en la zona de la capa límite obteniendo de esta manera más nodos y por lo tanto más puntos en los que el ordenador podrá hacer los cálculos para extraer los resultados. Para ello el programa permite introducir la altura de la capa límite y el número de capas con las que se quieren dividir esta zona, de tal manera que cuanto más capas, más refinado estará el mallado.

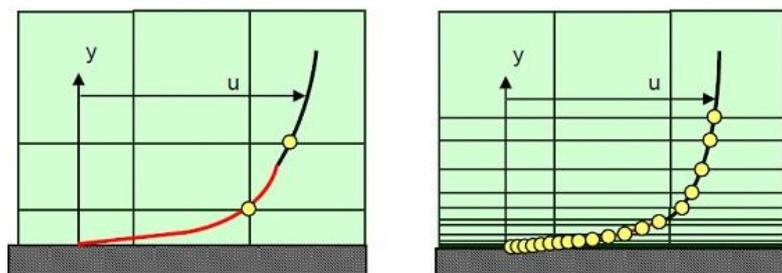


Figura 4.36 Efecto del "Inflation" en un mallado [10]

En la figura 5.36, se puede observar el efecto que tiene la velocidad a las zonas cercanas a una pared, esto se debe a la condición de no deslizamiento en frontera del sólido. También se puede apreciar el efecto que tiene el “*Inflation*” en la malla. En la parte de la izquierda el “*Inflation*” no está aplicado, mientras que en la parte de la derecha sí, donde se consiguen más nodos utilizando la división de la zona de la capa límite por capas.

Esta zona es importante por los cambios bruscos que presenta el fluido, que a causa de ellos, es distinto tener pocos nodos que muchos ya que puede alterar los resultados obtenidos de manera significativa.

4.4.2.2. Realización de la malla

Para realizar la malla se ha partido de una base de la malla de la anterior simulación, es decir, se han aplicado los mismos “*sizing*” en algunas zonas, que son las siguientes:

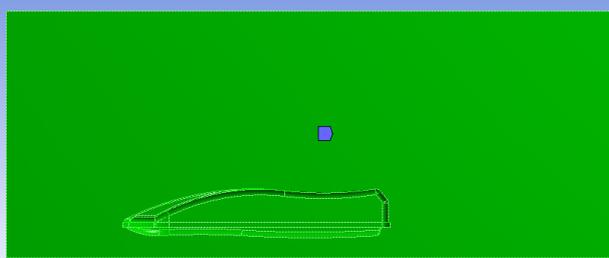
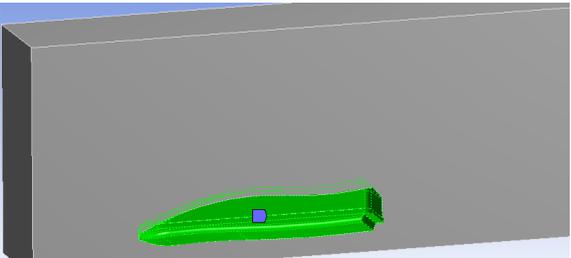
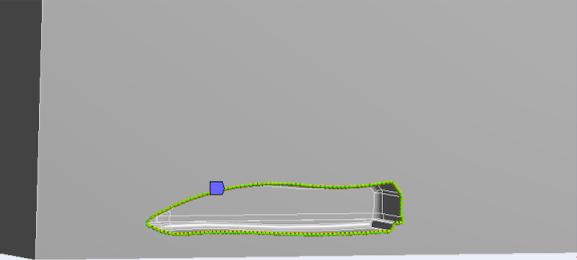
ZONAS AFECTADAS	TAMAÑO DE MALLA
	<p>Body sizing de 0,1m</p>
	<p>Face sizing de 0,06m</p>
	<p>Edge sizing de 0,04m</p>

Tabla 4.4 Características de la malla sin el *inflation*

Una vez introducidos estos tamaños, la malla resultante es muy parecida a la anterior simulación, sin embargo cabe recordad que con estos datos la malla tenía un *skewness* muy alto en algunos elementos, y a partir de aquí se refinó la malla con el objetivo de que el *skewness* bajará hasta el valor que recomendaba el programa al hacer el *check* antes de empezar las iteraciones.

A diferencia de la refinación, en esta malla se va a introducir el *"inflation"* con el objetivo de mejorar los valores obtenido alrededor del cuerpo y así disminuir el valor del *skewness*.

Para hacer el *"inflation"* hay varias opciones, la diferencia entre ellas son los valores que se deben entrar en el programa. Sin embargo lo que interesa es poder entrar el número de capas y la altura máxima.

Por una parte, interesa poder introducir el número de capas del *"inflation"*, ya que como se ha explicado anteriormente interesa dividir en varios nodos la parte cercana al cuerpo, ya que es la zona donde el fluido sufre más cambios y puede alterar los resultados de manera significativa. Por otra parte, será de gran utilidad poder introducir la altura máxima del *"inflation"* ya que con este parámetro se podrá asegurar que se abarca toda la zona de la capa límite.

En la opción de *"total thickness"* se introducen tres datos que son, la máxima altura del *"inflation"*, la tasa de crecimiento y el número de capas. El objetivo es abarcar la zona de la capa límite con el *"inflation"* sin alterar la uniformidad del mallado.

Para empezar se hace el *"inflation"*, con la opción de *"total thickness"*, con los valores por defecto que son los siguientes:

Maximum height: 0,1m

Growth rate: 1,2m

Number of layers: 5

De esta manera, el *"inflation"* queda como se observa en la siguiente figura:

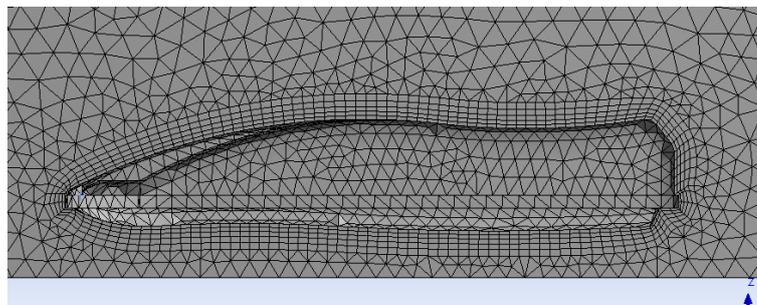


Figura 4.37 Inflation con los valores por defecto

Como se puede observar en la figura 5.37, el “inflation” se ha realizado correctamente, sin embargo hay que asegurar que cubre toda la zona de la capa límite. Para ello se va a suponer que el cuerpo es una placa plana y primeramente se va a determinar de qué tipo es la capa límite, utilizando el valor de Reynolds de transición de capa límite laminar a turbulenta.

Primeramente se quiere encontrar a que distancia se produce la transición de la capa límite para ello se va a utilizar la fórmula siguiente:

$$Re = \frac{v_s \cdot x}{\nu} \quad (4.5)$$

Donde:

$Re = 2.5 \cdot 10^5$ (Reynolds de transición de capa límite laminar a turbulenta)

$v_s = 38$ m/s (velocidad característica del fluido)

$\nu = 1,5 \cdot 10^{-5}$ m²/s

De esta manera se puede despejar la incógnita x obteniendo 0.0989 m que es mucho menor que la largada del cofre que es de 2.25m. Por lo tanto se puede suponer que toda la capa es turbulenta, utilizando así la siguiente fórmula para calcular el grosor de la capa límite.

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0.16}{Re_x^{1/7}} \quad (4.6)$$

Donde δ es el grosor de la capa límite, x es la longitud del cofre, que es de 2.25 m y el Re_x , se calcula con la formula anterior, obteniendo un grosor de capa límite de 0.039 m.

El grosor de la capa límite ha dado de un valor muy pequeño de tal manera que se puede confirmar que con el “inflation” inicial abarca toda la zona de la capa límite. A pesar de ello, se considera que no hay suficientes nodos en la zona cercana al cofre, por este motivo se aumenta el número de capas de 5 a 7.

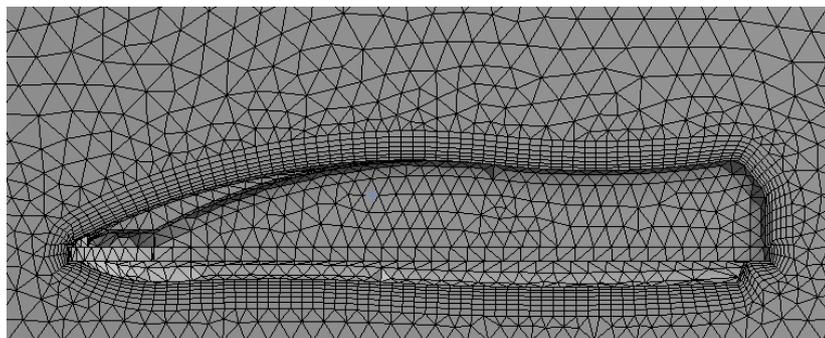


Figura 4.38 Inflation con 7 capas

Con este cambio se han aumentado el número de nodos en la zona de la capa límite, pudiendo facilitar al programa calcular resultados más precisos alrededor del cofre. Sin embargo, al calcular el grosor de la capa límite se ha partido de la hipótesis de que se tiene una placa plana, teniendo un cofre. Esta hipótesis puede tener un margen de error, por este motivo se ha decidido aumentar la altura máxima del “inflation” a 0.2.

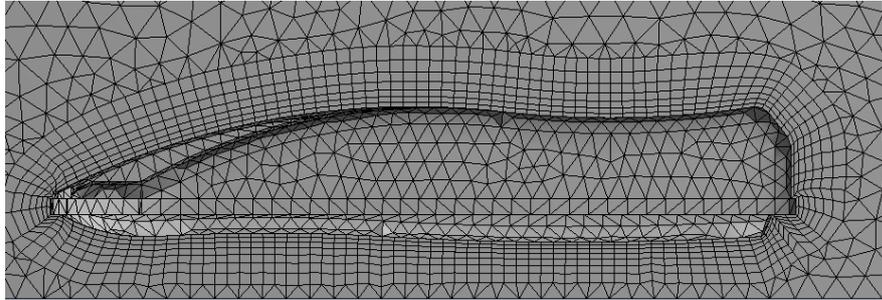


Figura 4.39 “Inflation” aumentando el “maximum height” del elemento a 0,2m

Con este cambio se asegura abarcar la zona de la capa límite, aumentando el número de nodos de manera ordenada alrededor del cuerpo. Hay que destacar que de los tres parámetros que se pueden modificar, sólo se han modificado 2. El parámetro no modificado (*growth rate*), tiene la formula siguiente:

$$\text{Growth rate} = \frac{h_{n+1}}{h_n} \quad (4.7)$$

Donde h_n es la altura de los elementos de la capa n y h_{n+1} la de la capa consecutiva, es decir, que la altura de una capa depende de la anterior. En este caso el valor por defecto del “*growth rate*” es de 1,2, lo que quiere decir que la altura de una capa es un 20% más alta que la anterior. Se ha decidido dejar este valor por defecto, ya que es un valor que si se aumenta mucho crearía una malla con una transición de tamaño de elemento muy rápida, así al tener un valor próximo a 1, el elemento va aumentando creando una transición más lenta obteniendo una malla más uniforme.

4.4.3. Resultados con el nuevo modelo de turbulencia y el nuevo mallado

Una vez se ha obtenido la malla se procede a realizar la simulación, donde hay que tener en cuenta a la hora de entrar el modelo, hay que introducir el modelo k-w SST, tal y como se muestra en la siguiente figura.

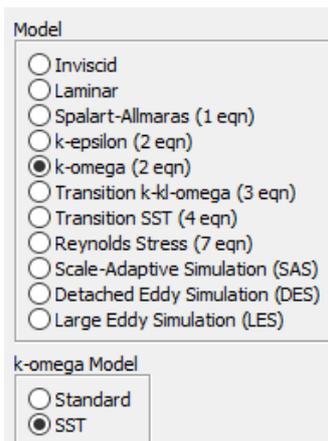


Figura 4.40 Introducción del modelo k-w SST

Una vez introducido el modelo de turbulencia, se siguen exactamente los mismos pasos que las anteriores simulaciones, donde en este caso también se han puesto 50000 iteraciones para dar margen al programa para que pueda converger.

iter	continuity	x-velocity	y-velocity	z-velocity	k	omega	C1-1	Cd-1	time/
155	1.1233e-03	6.9199e-06	4.7246e-06	4.4554e-06	1.7900e-04	4.3416e-06	1.1986e-01	6.0170e-01	17:29:29
156	1.1199e-03	6.7920e-06	4.6402e-06	4.3676e-06	1.8069e-04	4.2083e-06	1.1985e-01	6.0145e-01	16:45:43
157	1.1050e-03	6.7463e-06	4.5382e-06	4.2848e-06	1.8058e-04	4.1134e-06	1.1996e-01	6.0123e-01	16:10:42
158	1.0845e-03	6.7395e-06	4.4446e-06	4.2268e-06	1.7806e-04	4.0361e-06	1.1997e-01	6.0106e-01	15:42:41
159	1.0610e-03	6.7438e-06	4.3710e-06	4.1623e-06	1.7350e-04	3.9488e-06	1.2005e-01	6.0091e-01	15:20:16
160	1.0357e-03	6.7557e-06	4.3191e-06	4.1229e-06	1.6689e-04	3.8034e-06	1.2005e-01	6.0079e-01	15:02:20
161	1.0107e-03	6.7946e-06	4.2735e-06	4.1082e-06	1.5938e-04	3.6746e-06	1.2011e-01	6.0067e-01	14:47:59
162	solution is converged								
162	9.9048e-04	6.8015e-06	4.2355e-06	4.1016e-06	1.5273e-04	3.5397e-06	1.2007e-01	6.0059e-01	14:36:30

Figura 4.41 Convergencia de la simulación con el nuevo modelo de turbulencia

En este caso la simulación ha convergido a la iteración 162 en un tiempo de 7 minutos aproximadamente, dando los resultados siguientes de la C_L y C_D .

$$C_D = 0,601$$

$$C_L = 0,120$$

El valor del coeficiente de resistencia al avance se ha visto alterado a causa del mallado, dando un valor más pequeño respecto las otras simulaciones, sin embargo el coeficiente de la sustentación ha aumentado, dato que no interesa que pase, a pesar de ello el valor sigue siendo pequeño.

4.4.3.1. Distribución de presiones y velocidades

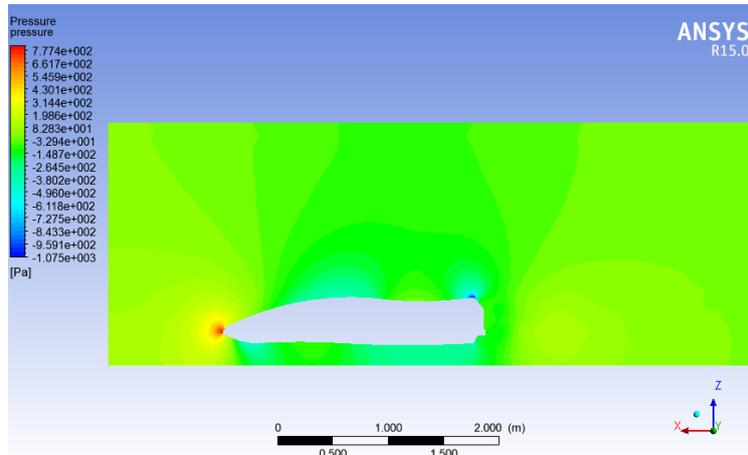


Figura 4.42 Distribución de presiones con el nuevo modelo de turbulencia y nuevo mallado

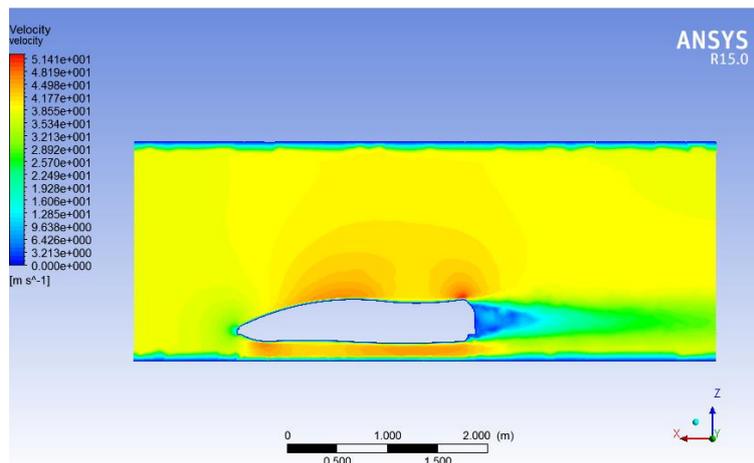


Figura 4.43 Distribución de velocidades con el nuevo modelo y nuevo mallado

Los diagramas son muy parecidos a las anteriores simulaciones, sin embargo lo que se puede apreciar es que los valores máximos de presión y velocidad se han modificado de nuevo dando unos valores mayores que la segunda simulación pero menores que la primera, esto se debe al mejorado del mallado, obteniendo una zona de elementos más refinada en las zonas próximas al cofre.

4.5. Conclusiones del estudio aerodinámico del cofre convencional

Se han realizado tres simulaciones con tres mallados diferentes cambiando también el modelo de turbulencia, de esta manera se han obtenido tres resultados distintos del mismo cofre convencional. El objetivo de este estudio es escoger el mejor resultado, para utilizar ese modelo de turbulencia con un mallado similar a la hora de hacer la simulación del futuro diseño de cofre más aerodinámico.

Los diagramas de presiones y velocidades son muy similares en todos los casos, ya que al fin y al cabo es el mismo objeto de estudio. Para escoger el mejor modelo va a ser a través de los resultados de la C_L y la C_D

Desde el principio se ha destacado la importancia de los valores de la C_D y la C_L , es por eso que se va a realizar una comparativa de estos valores obtenidos en las tres simulaciones.

	C_D	C_L
1ª simulación	0,625	0,0262
2ª simulación	0,666	0,092
3ª simulación	0,601	0,120

Tabla 4.5 Cuadro resumen de la C_D y la C_L obtenidas

En la tabla 5.5, se puede observar los valores obtenidos de la C_D y la C_L para las diferentes simulaciones realizadas. Por una parte está la C_D , coeficiente que interviene en la fórmula de (4.2), de tal manera que cuanto más alto el coeficiente más alto el valor de la fuerza de arrastre. Que aumente la fuerza de arrastre no interesa, ya que este aumento implica que al cofre le costará más avanzar por el aire, es decir, será menos aerodinámico. Por este motivo de entre las tres simulaciones que se han realizado se escoge la que tiene el valor más pequeño del coeficiente de resistencia al avance, en este caso, la tercera simulación que ha sido realizada con el modelo de turbulencia k-w SST utilizando un mallado con “inflation”.

Por otra parte, a medida que se ha ido simulando el valor del coeficiente de la sustentación ha ido aumentando. El aumento de este valor tampoco interesa ya que la C_L , interviene en la fórmula (4.3), de manera que cuanto mayor sea el coeficiente mayor será la sustentación. Esto se debe al espacio que hay entre el cofre y el techo del coche, ya que pasa fluido y éste

crea una distribución de presiones por debajo del cofre, donde hay zonas que la presión es más alta que la que existe encima del cofre, tal y como se puede observar en los diagramas de presiones, creando así la sustentación. A pesar de ello el coeficiente de sustentación sigue siendo de un valor muy bajo, provocando un valor de sustentación bajo.

Este resultado demuestra la importancia del mallado y el modelo de turbulencia a la hora de hacer las simulaciones, ya que a pesar de utilizar el mismo cofre en las tres simulaciones, variando sobretodo el mallado los resultados pueden cambiar. A más a más, la idea de refinar la zona de la capa límite ha sido buena ya que los resultados han sido más precisos y de esta manera han mejorado respecto a los resultados anteriores.

Hasta ahora se han hecho simulaciones del cofre convencional en situaciones lo más reales posibles, teniendo en cuenta el espacio que deja el anclaje entre el cofre y el techo del cofre. Este espacio implica un paso para el fluido en el que se producen rozamientos de éste con el cofre lo que provoca un aumento de la fuerza de resistencia al avance. Por este motivo cuando se realice el nuevo diseño, se eliminará este espacio para mejorar aún más los resultados, quedando fuera del estudio el tipo de anclaje que se realizaría en este caso.

Antes de empezar el nuevo diseño, se quiere tener un referente utilizando el modelo de turbulencia escogido y un mallado similar, eliminando el espacio entre techo y cofre y así extraer resultados que servirán para hacer una comparativa con el futuro diseño.

4.6. Resultados finales del estudio

En el apartado anterior, se ha escogido el modelo k-w SST para realizar la simulación utilizando un *"inflation"* en el mallado, ya que era la que ha proporcionado mejores resultados. Siguiendo como ejemplo la opción escogida, se va a realizar una última simulación dentro del estudio similar a la escogida pero eliminando el espacio entre coche y cofre para evitar los rozamientos causados entre cofre y fluido mejorando así los resultados.

Los pasos a seguir de esta última simulación serán los mismos que la elección escogido variando en algunos puntos. El primer punto es donde se produce el cambio más significativo ya que como se ha dicho anteriormente, se quiere eliminar el espacio entre coche y cofre, y esto se debe modificar en el apartado de la geometría de la modelización de la simulación.

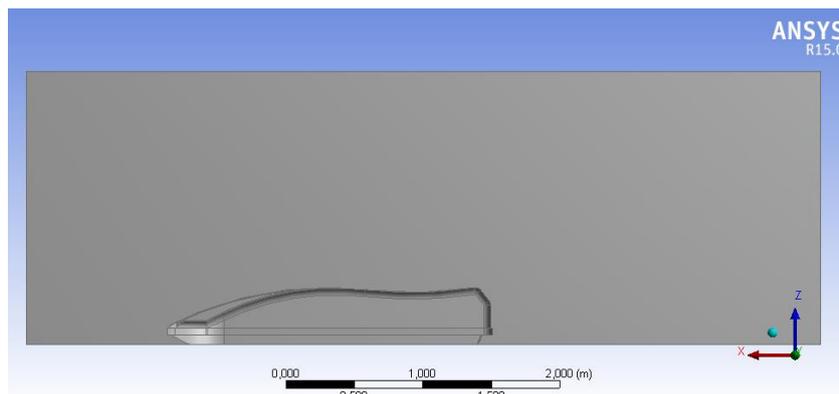


Figura 4.44 Perfil de la geometría sin espacio

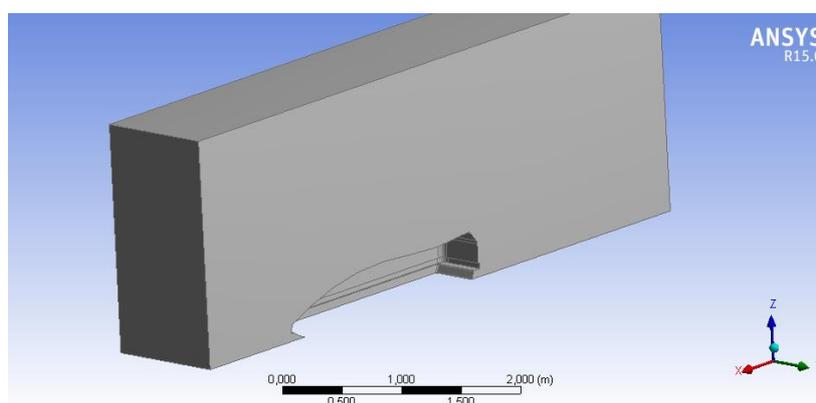


Figura 4.45 Vista isométrica de la geometría sin espacio

Al poner las dimensiones del rectángulo en 2D, se han mantenido todas las cotas menos la que está por debajo del cofre. En este caso se ha puesto una cota muy pequeña con el objetivo de cortar de manera poco significativa el cofre, simulando así que por debajo del cofre no hay material, es decir que no pasará fluido.

Otro punto que varía respecto a la simulación escogida es el mallado, ya que al cambiar la geometría de modelización éste será diferente. A pesar de este cambio, se han cogido de entrada las mismas características de mallado que se observan en la tabla 4 más el “inflation” correspondiente, obteniendo como resultado la figura siguiente.

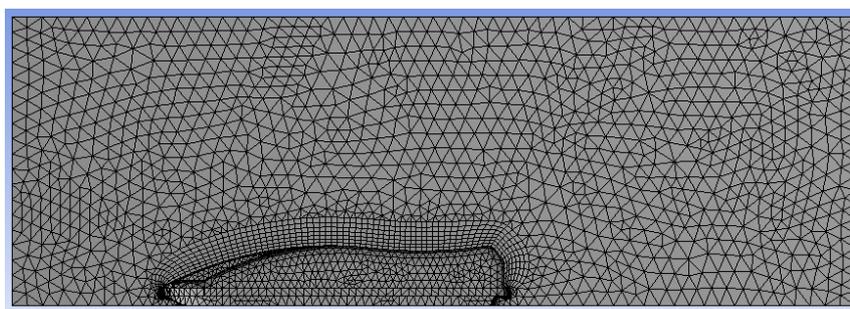


Figura 4.46 Mallado con las mismas características que el de la simulación escogida

A pesar de los cambios realizados en la geometría de modelización, el mallado resultante ha sido satisfactorio, ya que observando el valor máximo del “skewness” no supera el valor máximo de 0,98 que recomienda el programa.

Una vez realizado el mallado, los pasos siguientes se realizan exactamente igual que la tercera simulación, así de esta manera se obtiene los resultados siguientes.

iter	continuity	x-velocity	y-velocity	z-velocity	k	omega	C1-1	Cd-1	time/
133	9.7066e-04	9.1832e-05	3.8369e-05	6.1747e-05	1.0677e-03	4.0524e-05	1.3869e-01	5.4127e-01	133:31:14
134	9.4582e-04	8.8508e-05	3.7374e-05	5.9525e-05	1.0211e-03	3.9743e-05	1.3571e-01	5.4115e-01	134:35:11
!	135 solution is converged								
135	9.1797e-04	8.5478e-05	3.6146e-05	5.7365e-05	9.7557e-04	3.8738e-05	1.3328e-01	5.4114e-01	135:26:21

Figura 4.47 Convergencia de la simulación sin espacio

$$C_D = 0,541$$

$$C_L = 0,133$$

A causa de que el fluido tiene menos rozamiento con el cofre, el valor de la C_D ha disminuido significativamente consiguiendo así una situación más aerodinámica que antes. Sin embargo el valor de la C_L no se ha visto alterado, y esto se debe a la forma frontal que presenta el cofre.

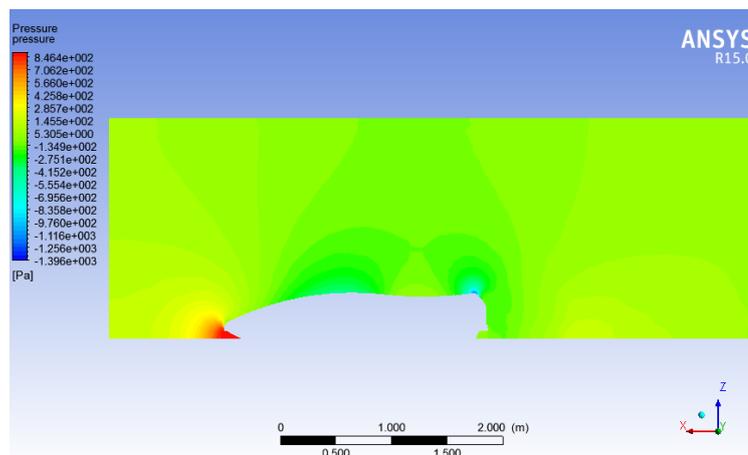


Figura 4.48 Distribución de presiones del cofre sin espacio

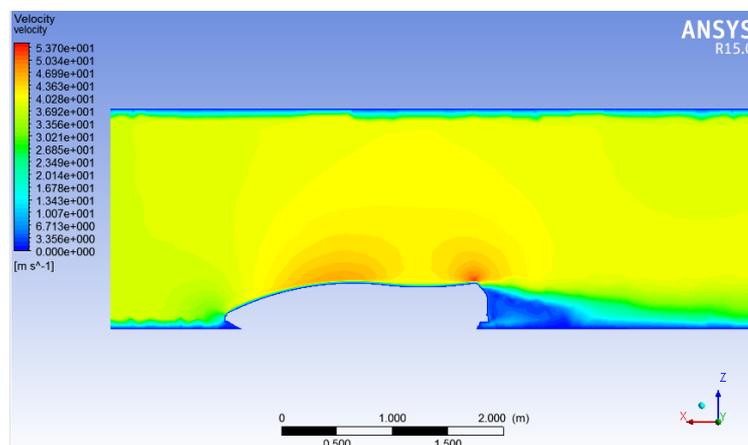


Figura 4.49 Distribución de velocidades del cofre sin espacio

La parte delantera del cofre presenta un espacio debajo que aumenta la sustentación del cofre, ya que como se observa la figura 5.48, en esta zona se producen las presiones más altas del diagrama. La sustentación aparece cuando hay un gradiente muy grande de presiones, y su sentido es de altas a bajas presiones, de esta manera al producirse la zona de altas presiones en la parte inferior delantera del cofre crea la sustentación resultante obtenida hacia arriba.

5. Diseño de un cofre más aerodinámico

La primera parte del proyecto trataba de estudiar un cofre convencional del mercado para extraer resultados que servirán para tener un referente y realizar una comparativa con los resultados que se quieren obtener con el diseño que se quiere realizar.

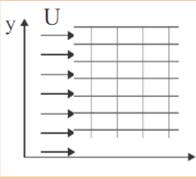
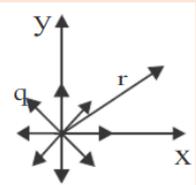
El objetivo del nuevo diseño es conseguir un cofre que tenga las mismas propiedades que el convencional (peso, tamaño, volumen...), pero con la diferencia que se quiere hacer el cofre más aerodinámico, es decir, reducir el valor del coeficiente de resistencia al avance.

Por otra parte, la sustentación que aparece en los cofres se compensa con el anclaje del techo del coche, sin embargo, interesa que sea lo más pequeña posible ya que de esta manera el anclaje sufrirá menos esfuerzos. Para conseguirlo se tendrá como objetivo tener una C_L lo más pequeño posible.

Se quiere realizar un cofre que sea más aerodinámico, para ello se va a coger el cuerpo más aerodinámico posible dentro de un fluido, este cuerpo es conocido como el cuerpo semiinfinito de Rankine.

5.1. Cuerpo semiinfinito de Rankine

Existen tres tipos de flujos potenciales planos elementales que son, la corriente uniforme en la dirección del eje x, fuente o sumidero bidimensional en el origen y el torbellino bidimensional en el origen. Cada flujo se puede representar mediante líneas de corriente y líneas equipotenciales, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Flujo	Esquema	L. de corriente	L. equipotenciales
Corriente uniforme		$\Psi = U_0 \cdot r \cdot \sin\theta$	$\Phi = U_0 \cdot r \cdot \cos\theta$
Fuente o sumidero		$\Psi = m \cdot \theta$	$\Phi = m \cdot \ln r$

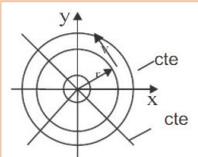
Torbellino		$\Psi = -K \cdot \ln r$	$\Phi = K \cdot \theta$
-------------------	---	-------------------------	-------------------------

Tabla 5.1 Flujos potenciales planos elementales

A partir de estos flujos elementales se puede formar superposiciones entre ellas simplemente sumándolas, donde aparecen composiciones de soluciones que resultan muy interesantes y prácticas. Entre estas composiciones se encuentra la combinación de una fuente continua paralela al eje x más un sumidero, que su solución es conocida como el cuerpo semiinfinito de Rankine.

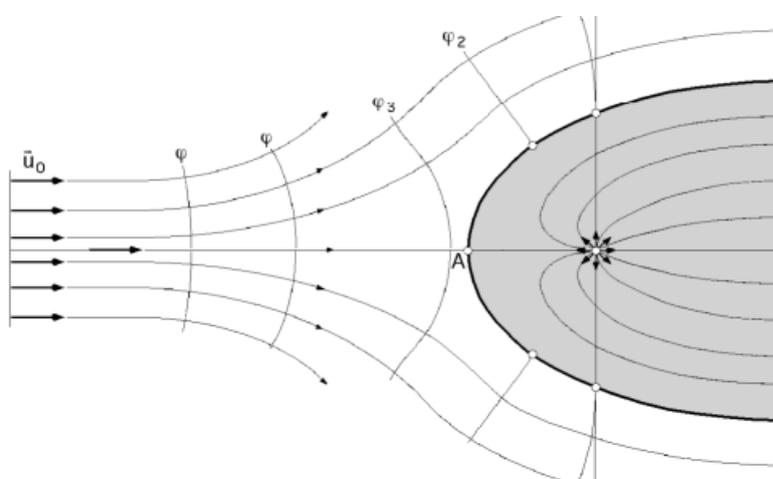


Figura 5.1 Cuerpo semiinfinito de Rankine [11]

Si la fuente se posiciona en el origen, la superposición de la fuente continua con un sumidero tiene como función de corriente resultante la siguiente:

$$\psi = U_0 r \sin \theta + m\theta \tag{5.1}$$

Como se observa en la ecuación 6.1, las líneas de corriente del cuerpo semiinfinito de Rankine son simplemente la suma de las líneas de corriente de los flujos respectivos, ya que el primer sumando corresponde a las líneas de corriente de la fuente continua, mientras que el segundo sumando son las líneas del sumidero.

Las expresiones para las componentes de la velocidad en función de la derivada de Ψ son las siguientes:

$$v_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad (5.2)$$

$$v_\theta = -\frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (5.3)$$

Una vez aplicada las derivadas y aplicando Pitágoras se obtiene la ecuación de la velocidad en cualquier punto:

$$V = U_0^2 + 2U_0 \frac{m}{r} \cos \theta + \frac{m^2}{r^2} \quad (5.4)$$

Un dato interesante de conocer es el punto de estancamiento del cuerpo, que por definición es el punto donde la velocidad es nula. Teniendo la ecuación de la velocidad se puede encontrar las soluciones donde se presenta esta condición, que en este caso son en $r = m/U_0$ en un ángulo de $\theta = \pm\pi$.

También se puede determinar la forma del perfil del cuerpo, ya que se sabe que el cuerpo estará dado por una $\Psi = \text{cte}$. Anteriormente se ha determinado el punto de estancamiento, de esta manera se puede calcular la línea de corriente que forma el cuerpo ya que este punto forma parte de la superficie del cuerpo. Sustituyendo el punto de estancamiento en la ecuación 6.1, se obtiene la siguiente expresión.

$$\psi = \pm m\pi \quad (5.5)$$

A partir de la ecuación 6.5 si se iguala a la ecuación 6.1 se consigue una expresión en la que se encuentra el radio de cualquier punto de la parte superior del cuerpo semiinfinito de Rankine respecto el ángulo θ .

$$r = \frac{m(\pi - \theta)}{U_0 \sin \theta} \quad (5.6)$$

Este cuerpo se llama semiinfinito ya que por un lado tiende al infinito, así la mitad del grosor del cuerpo (y^*) se puede calcular con el límite de la ecuación 6.1 pasándola a coordenadas cartesianas cuando x tiende a infinito.

$$\lim_{x \rightarrow \infty} (U_0 y^* + m \cdot \operatorname{atg}\left(\frac{y^*}{x}\right)) = U_0 y^* \quad (5.7)$$

Sabiendo que el contorno del cuerpo es $\Psi = \pm m\pi$

$$\pm m\pi = U_0 y^* \rightarrow y^* = \pm \frac{\pi m}{U_0} \quad (5.8)$$

El nuevo diseño de cofre se quiere extraer del cuerpo semiinfinito de Rankine ya que es un cuerpo que varía según los valores utilizados pero que siempre presentará una aerodinámica muy buena. Para ello sólo se necesitará la parte simétrica superior respecto el eje x ya que presenta un perfil parecido al cuerpo que se quiere diseñar, que viene dado por la ecuación 6.6.

5.2. Geometría del nuevo diseño

El objetivo es crear un cofre más aerodinámico que el convencional, para ello se va a utilizar el cuerpo semiinfinito de Rankine extrayendo una parte del cuerpo para crear el nuevo diseño. A pesar de ser un nuevo diseño se van a mantener las cotas principales del cofre convencional que eran 2250x800x420 mm.

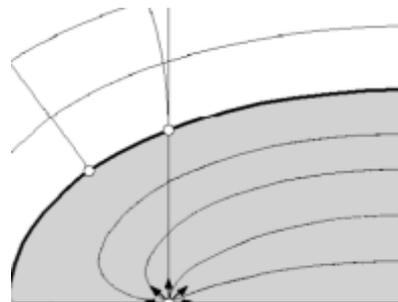


Figura 5.2 Parte del cuerpo semiinfinito de Rankine que se quiere extraer [12]

La parte extraída del cuerpo se observa en la figura 6.2 que viene dada por la ecuación 6.4. En dicha ecuación sale una U_0 , que en este caso es la velocidad de la corriente continua, es decir, en este caso práctico es la velocidad de 38 m/s utilizado en todas las simulaciones. Por otra parte sale una “m”, que es una constante de las líneas de corriente del sumidero. Esta

constante se encuentra a partir de la ecuación 6.8, ya que la mitad del grosor del cuerpo se va a suponer que es de 0.42 m, que es la cota utilizada en el cofre convencional.

Para representar esta ecuación se van a dar valores de θ encontrando su r correspondiente, sin embargo para representar esta función se tiene que pasar a coordenadas cartesianas.

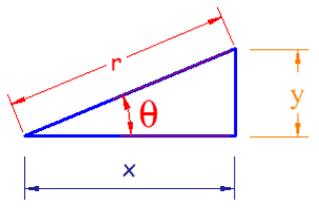
Coordenadas polares – Coordenadas cartesianas	
	$x = r \cdot \cos\theta$
	$y = r \cdot \text{sen}\theta$

Tabla 5.2 Relación entre coordenadas polares y cartesianas

Una vez conseguidas las coordenadas cartesianas de la función se procede a representarla con el programa Autodesk Autocad. Para ello se utiliza el comando “*spline*”, donde se introducen todos los valores de x e y de la ecuación 6.6 formando así la figura siguiente.

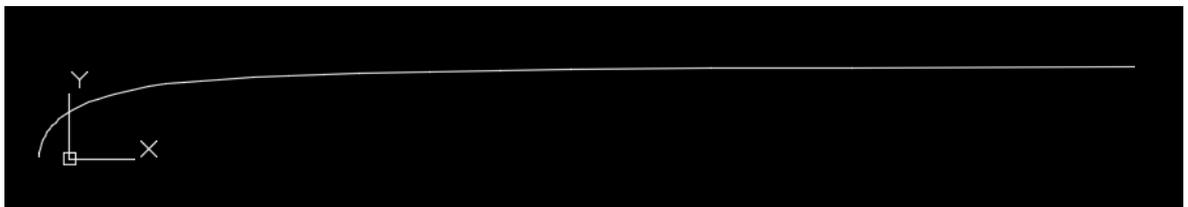


Figura 5.3 Representación de la parte superior del cuerpo semiinfinito de Rankine

Una vez representada la parte del cuerpo que interesa, el siguiente paso es extraer un perfil 2D para utilizarla de base a la hora de realizar el nuevo diseño. Para ello se va a estudiar toda la parte superior del cuerpo semiinfinito de Rankine cortándola en alguna recta $x = \text{cte}$ para ver los efectos del fluido en este cuerpo, creando una extrusión 3D a partir del 2D utilizando el programa Autodesk Inventor.

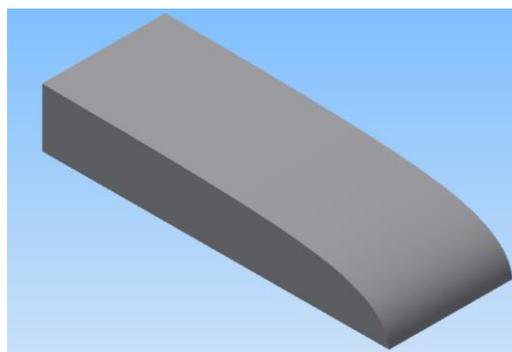


Figura 5.4 Cuerpo extruido con el 2D de la parte superior del cuerpo semiinfinito de Rankine

El nuevo diseño se quiere que tenga, aproximadamente, las mismas cotas que el cofre convencional, por este motivo la cota de extrusión de la figura 6.4 se ha impuesto que sea de 0.8 m, misma profundidad que el cofre estudiado anteriormente. A priori, parece que la parte frontal del perfil es muy vertical, lo cual hace sospechar que las presiones sean muy altas en esta zona, así la parte extraída del cuerpo será a partir de la recta $z = \text{cte}$ que evite esta zona de altas presiones.

Para hacer la simulación con el cuerpo extruido, se aplica la misma mecánica que la última simulación escogiendo el mismo modelo de turbulencia y un mallado similar, en este caso lo que más interesa es la distribución de presiones.

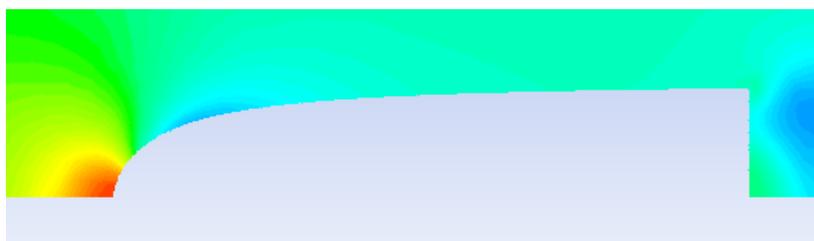


Figura 5.5 Perfil de velocidades de la parte superior del cuerpo semiinfinito de Rankine

Tal y como se observa en la figura 6.5, se forma una zona de altas presiones que dificulta el avance del cuerpo a través del fluido. Para evitar esta zona de altas presiones, se va a cortar el perfil por la recta $z = \text{cte}$ en el que se evite esta zona.



Figura 5.6 Recta horizontal que evita la zona de altas presiones

Así de esta manera, el perfil 2D que se va a utilizar para hacer el nuevo diseño es el creado por la recta horizontal representada en la figura 6.6, que se encuentra a 2.16 m del origen, con la parte superior a esta recta del perfil superior del cuerpo semiinfinito de Rankine, quedando el perfil 2D de la siguiente manera.

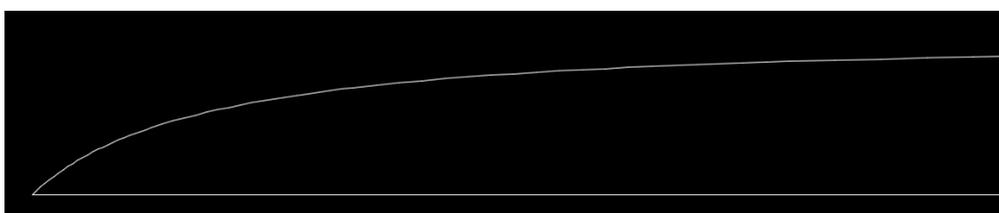


Figura 5.7 Perfil 2D extraído de la parte superior del cuerpo semiinfinito de Rankine

Como se ha mencionado con anterioridad, se quiere hacer un cofre más aerodinámico manteniendo las cotas principales del cofre convencional, que son 2250x420x800 mm.

La media anchura del cuerpo semiinfinito de Rankine obtenido se ha supuesto que es de 0,42m, sin embargo al cortar el perfil el grosor se ha visto modificado. Para mantener las cotas se escala el perfil 2D obtenido hasta tener la cota deseada de grosor. Así de esta manera la cota que se ha conservado es la largada de 2.25 m, reduciendo la altura del cuerpo 5 cm a causa del corte horizontal realizado.

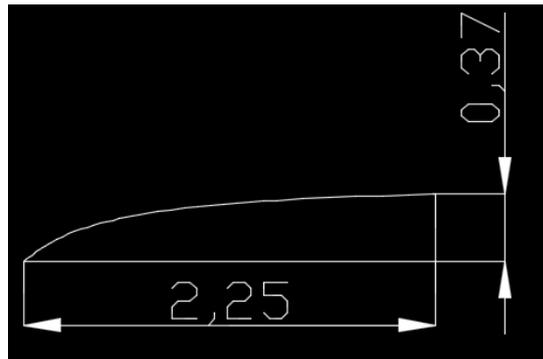


Figura 5.8 Perfil 2D para base del diseño 3D del cofre

Una vez escogido el perfil 2D con el que se va a trabajar, se copia de Autocad y se copia a plano de trabajo de Autodesk Inventor para trabajar el nuevo diseño 3D utilizando esta base. De esta manera y siguiendo el modelo del cofre convencional, se ha obtenido la siguiente geometría.

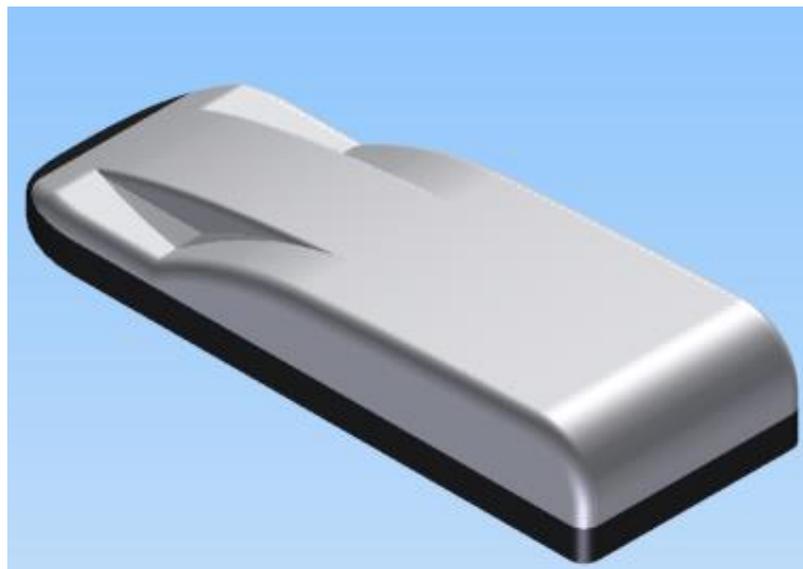


Figura 5.9 Vista isométrica 1 del diseño nuevo del cofre

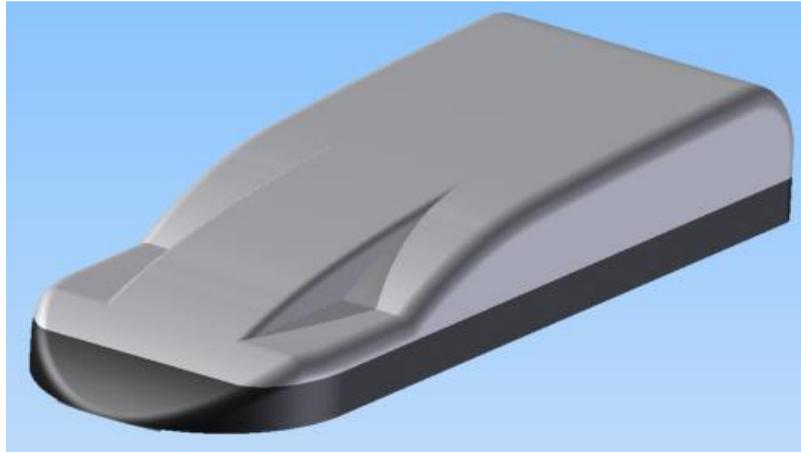


Figura 5.10 Vista isométrica 2 del diseño nuevo de cofre



Figura 5.11 Perfil del diseño nuevo de cofre

Como se observan en las figura 6.9, 6.10 y 6.11, se ha intentado seguir el diseño del cofre convencional, manteniendo el perfil encontrado con el cuerpo semiinfinito de Rankine como se observa en la figura 6.11.

5.3. Simulación y resultados del nuevo diseño

Tal y como se ha comentado anteriormente, la simulación se realizará siguiendo el mismo criterio que la escogida en las simulaciones del cofre convencional, es decir, manteniendo una malla similar y utilizando el modelo de turbulencia escogido, el modelo k-w SST.

Para el mallado cabe destacar que al suponer que no hay espacio entre cofre y techo de cofre, no hay paso para el fluido en ese espacio, esto implica que el cofre queda cortado de tal manera que a la geometría no hay solido entre el negativo de la pieza y el espacio de trabajo de la geometría de modelización.

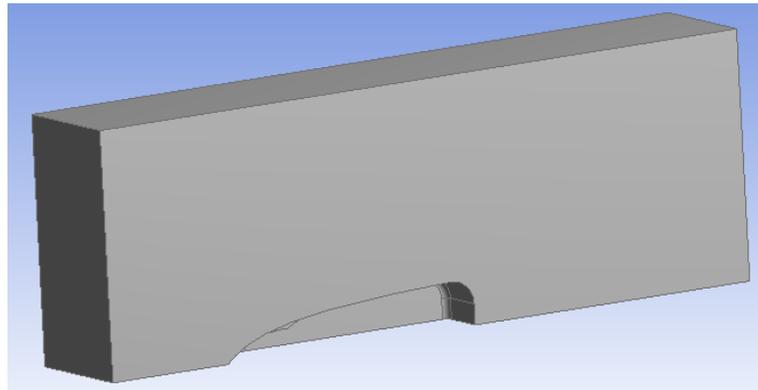


Figura 5.12 Geometría de modelización del nuevo diseño

En las simulaciones donde se conservaba el espacio era una zona conflictiva para el mallado ya que no había suficiente espacio para el *"inflation"* y se creaban elementos muy pequeños con un alto valor de *"skewness"*. Al no haber el espacio también simplifica más el mallado ya que hay menos elementos y se elimina esta zona conflictiva, facilitando así el mallado.

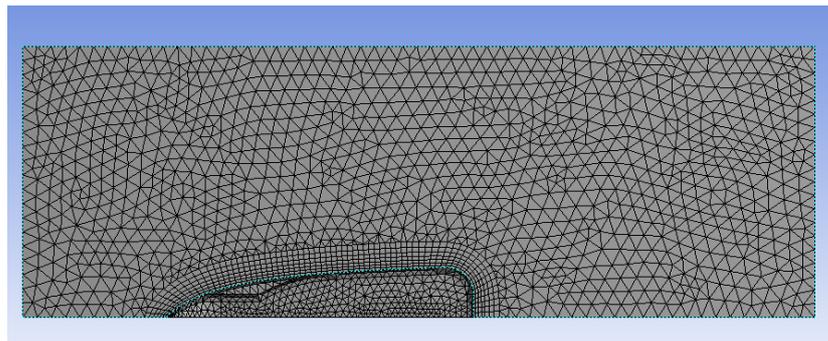


Figura 5.13 Mallado del nuevo diseño

Para realizar el mallado que se observa en la figura 6.13, se han utilizado exactamente las mismas características que la tabla 5.4, a más a más también se ha añadido el *"inflation"* cogiendo los mismos valores que la simulación del cofre convencional sin espacio.

Posteriormente los pasos son los mismos que en las demás simulaciones, sólo destacando que el modelo utilizado es el k-w SST y que la superficie proyectada se ha visto modificada a causa del corte realizado en el perfil del cuerpo semiinfinito de Rankine.

$$A_{\text{PROYECTADA}} = \frac{b \cdot h}{2} = \frac{0,8 \cdot 0,37}{2} = 0,148 \text{ m}^2 \quad (5.9)$$

Como en todos los casos se ha visto el valor máximo del *"skewness"* y se ha visto que es inferior a 0.98, que es el valor conflictivo el cual el programa avisa que si se trabaja con un mallado de valores más altos se pueden obtener resultados distorsionados de la realidad.

Finalmente se ha procedido a la simulación poniendo 50000 iteraciones para dar margen y asegurar que convergirá.

iter	continuity	x-velocity	y-velocity	z-velocity	k	omega	C1-1	Cd-1	time/
155	1.0119e-03	5.7728e-06	2.7615e-06	3.6532e-06	1.4625e-04	2.9669e-06	3.9645e-02	5.2851e-01	14:12:26
156	1.0064e-03	5.6437e-06	2.7256e-06	3.6226e-06	1.4867e-04	2.9806e-06	3.9454e-02	5.2853e-01	14:08:05
157	1.0050e-03	5.5177e-06	2.6926e-06	3.5771e-06	1.4999e-04	2.9981e-06	3.9581e-02	5.2852e-01	14:04:35
158	1.0006e-03	5.4003e-06	2.6558e-06	3.5417e-06	1.5109e-04	2.9849e-06	3.9424e-02	5.2853e-01	14:01:48
159	solution is converged								
159	9.9888e-04	5.2833e-06	2.6246e-06	3.5037e-06	1.5113e-04	2.9897e-06	3.9573e-02	5.2850e-01	13:59:34

Figura 5.14 Convergencia de la simulación del nuevo diseño

En este caso ha convergido en la iteración 159, obteniendo los resultados siguientes:

$$C_D = 0,528$$

$$C_L = 0,039$$

Se han podido disminuir los valores de los coeficientes, por una parte el valor de la C_D ha disminuido de manera muy poco significativa, sin embargo toda disminución es sinónimo de aumento de la facilidad para que el cofre vaya a través del fluido. Por otra parte el valor de la C_L si ha bajado significativamente, lo cual implica una gran reducción de la sustentación.

Los diagramas de distribución de presiones y velocidades que se han obtenido son los siguientes:

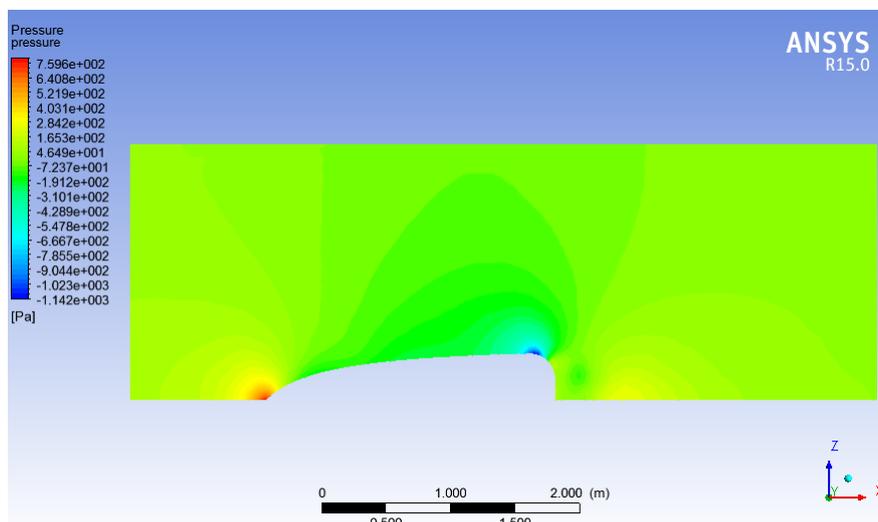


Figura 5.15 Distribución de presiones del nuevo diseño

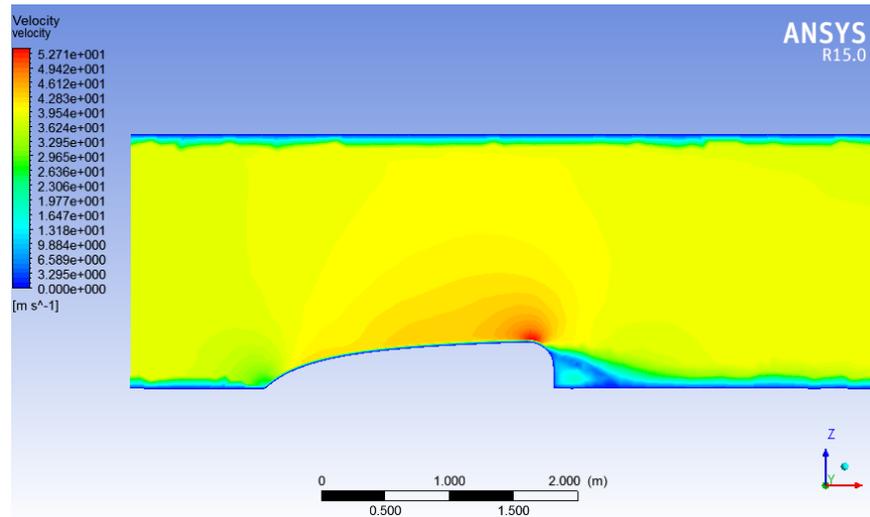


Figura 5.16 Distribución de velocidades del nuevo diseño

A diferencia de las diagramas de distribuciones de las otras simulaciones, en este caso se ha conseguido que solamente haya un desprendimiento de la capa límite, facilitando así el paso de las partículas de fluido que van por la superficie superior del cofre, mejorando así el valor del coeficiente de resistencia al avance.

Si se observa la figura 6.15, se puede ver que tal y como pasa en los otros casos, en el punto de estancamiento se produce la zona de máximas presiones, el fluido continúa avanzando por el perímetro superficial del cofre y va ganando velocidad disminuyendo así la presión. A diferencia de los anteriores casos no se produce ninguna distribución de presiones ni de velocidades por debajo del cofre ya que se ha supuesto que no existe espacio, por este motivo se produce una diferencia de presiones menor entre la parte superior y la inferior del cofre, disminuyendo significativamente el valor de la C_L .

6. Presupuesto

El siguiente apartado pretende hacer un estudio de los costes y ahorros asociados para analizar la viabilidad de la producción del nuevo diseño de cofre de coche.

La realización del proyecto implica para el estudiante una dedicación orientativa de 540 horas totales a un coste de 8 euros por hora, que es el precio medio actual de un estudiante en prácticas laborales, representa un total de 4320 euros.

Se realizan reuniones con el tutor del proyecto de una hora y media de media cada dos o tres semanas para llevar a cabo revisiones, supervisiones y análisis. El coste por hora representa de 20 euros a la hora, de manera que considerando unas seis sesiones con el tutor asciende el coste en 120 euros.

A más a más se tiene que contar el coste de la gasolina utilizada para realizar las reuniones con el tutor, teniendo en cuenta que el recorrido es de 42 km, el consumo del coche es de 4,7 l/km y el gasoil cuesta 1€/l, el coste de la gasolina para los desplazamientos ha sido de 197,4 euros.

Entrando en el campo de la tecnología, se ha necesitado un ordenador potente para soportar los programas utilizados para el proyecto, en este caso se ha comprado un ordenador de 700 euros.

Para llevar a cabo el proyecto se han utilizado una serie de programas, con los que se tiene que tener en cuenta su coste de adquisición. Para ello se han encontrado precios por mes, y se supone que el proyecto ha tenido una duración de 4 meses.

Programas	Precios	Precio Total
Autodesk Inventor	260 €/mes	1040 €
Autodesk Autocad	211,75 €/mes	847 €
Office 2016	149 €	149 €
Ansys Workbench 15.0	3032,5 €/mes	12130 €
Total		14166 €

Tabla 6.1 Precio total de los programas utilizados en el proyecto

Para finalizar hay que contar con el precio de impresión y encuadernación del proyecto con toda las copias del cd, que en este caso ha sido de 100 €. A más a más, se quiere tener un 15% de beneficio y finalmente se le añade un 21% de IVA obteniendo el precio final al mercado.

Gasto	Coste [€]
Estudiante	4320 €
Tutor	120 €
Gasolina	197.4 €
Ordenador	700 €
Programas	14166 €
Impresión y encuadernación	100 €
Subtotal	19603.4 €
Beneficio (15%)	2940.51 €
Precio antes de impuestos	22543.91 €
IVA (21%)	4734.22
Precio después de impuestos	27.278.13 €

Tabla 6.2 Coste total del proyecto

Cabe destacar que dentro del precio total del proyecto no se ha tenido en cuenta ni el material ni la construcción del cofre, ya que esta parte queda fuera del alcance del proyecto.

En la figura 7.1, se puede observar la distribución de los costes del proyecto respecto el total.

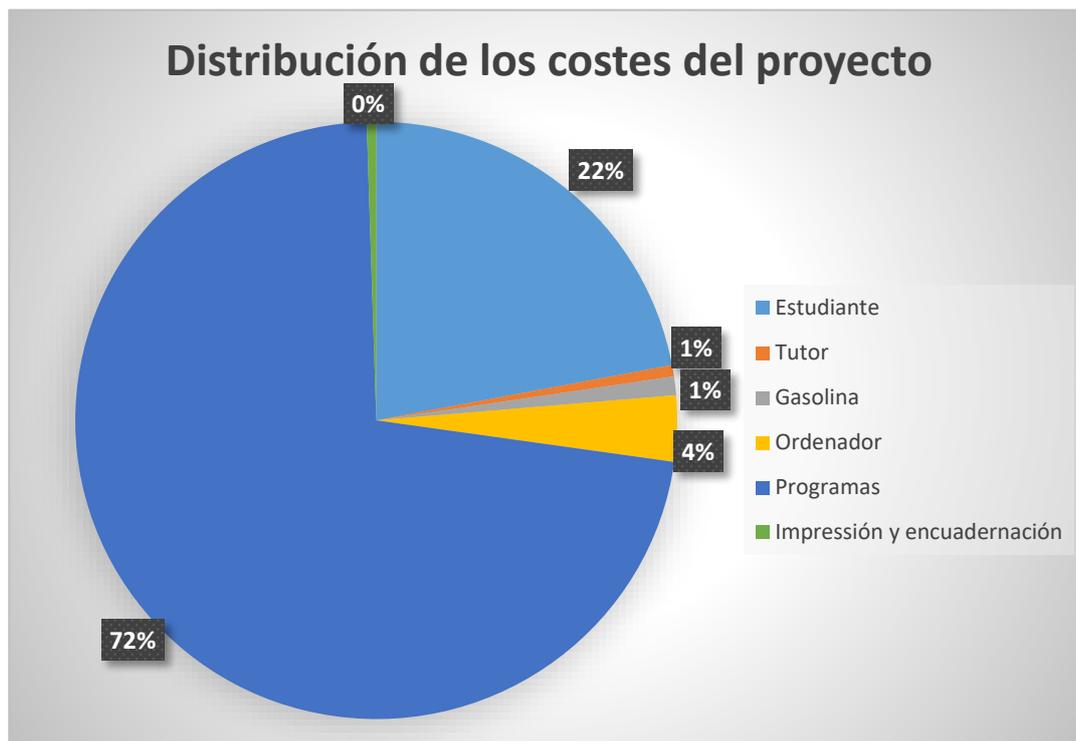


Figura 6.1 Distribución de los costes del proyecto respecto el total

Claramente se puede observar que los costes del programa son los más altos del proyecto, ya que ocupan un 72% del total, a pesar de que se han cogido tarifas mensuales siendo éstas las más económicas. Seguidamente, el coste más alto es el sueldo del estudiante, que en este caso es del 22%, ya que se ha sido el encargado de llevar a cabo el proyecto, recopilando información y realizando varias simulaciones, ocupando así varias horas de trabajo.

Todos los otros costes presentan menos del 10% del total, sólo destacar el coste de adquisición del ordenador que representa un 4% ya que se tuvo que buscar uno de tal manera que fuera suficientemente potente para soportar los programas de diseño y simulación.

7. Impacto ambiental

Conociendo el contexto energético mundial, la importancia de promover la reducción de las emisiones de CO₂ en el transporte y de difundir el mensaje de la eficiencia energética para reducir el consumo energético mundial, este proyecto también nace con la voluntad de contribuir en la reducción del impacto ambiental.

Actualmente el consumo de gasolina es muy alto por la gran cantidad de coches que circulan a diario, sin embargo tiene su parte negativa y es que todos ellos producen CO₂ contaminando así el aire que respiramos. Este problema va aumentando día tras día, habiendo ciudades como Madrid que están limitando la circulación de los coches por la ciudad a causa de la contaminación detectada.

El hecho de llevar un cofre en el techo del coche, aunque este vacío, aumenta el consumo total del coche. Por este motivo, el impacto ambiental también se ha tenido en cuenta en este proyecto ya que al disminuir la fuerza de resistencia al avance, se disminuye la fuerza que tiene que realizar el motor del coche para remolcar el conjunto coche-cofre, y así consiguiendo una disminución del consumo de combustible.

El dióxido de carbono es uno de los gases que se producen al quemar combustible, y uno de los principales gases del efecto invernadero. A causa de ello en la atmósfera se está acumulando las concentraciones de CO₂, que tiene las siguientes consecuencias entre otras:

- La temperatura media de la superficie terrestre se ha incrementado a lo largo del siglo XX 0.6°C. En el siglo XXI se prevé que la temperatura global se incremente entre 1 y 5°C.
- En el siglo XXI el nivel del mar subirá entre 9 y 88 cm dependiendo de las concentraciones en las diferentes zonas.
- Aumento y propagación de enfermedades infecciosas.

Por estos motivos, entre otros, con este proyecto también se ha intentado disminuir el consumo de combustible, y por lo tanto el de CO₂, aumentando la aerodinámica del cofre. Se plantea un caso numérico para ver más claramente las consecuencias de esta reducción.

Se supone el coche Ford Fiesta Ecometic 1,6 TDCi DPF 3dr, que actualmente está en el mercado y que según la página oficial de FORD este coche emite 98 gCO₂/km. Cuando se lleva un cofre en el coche el consumo aumenta un 16% aproximadamente, sin embargo en este proyecto se ha creado un cofre más aerodinámico en el que reduce el consumo total y que se va a suponer que en este caso el aumento es de un 12%. Como se utiliza el cofre para viajes de larga distancia se supone también un viaje de 300 km, teniendo estos datos se puede calcular las emisiones tanto para el cofre convencional como con el de diseño nuevo.

Emisiones del conjunto coche-cofre convencional:

$$1.16 \times \frac{9.8gCO_2}{km} \times 300km = \mathbf{3410.4 g de CO_2} \quad (7.1)$$

Emisiones del conjunto coche-cofre del diseño nuevo:

$$1.12 \times \frac{9.8gCO_2}{km} \times 300km = \mathbf{3292.8 g de CO_2} \quad (7.2)$$

Claramente se puede observar que existe una reducción de las emisiones de CO₂, concretamente de 117.6 gramos para un viaje de 300 km, que puede parecer poco, sin embargo, si se tuviera en cuenta todos los coches que hacen un viaje con un cofre la reducción total de CO₂ aumentaría notablemente.

8. Conclusiones

La primera parte del proyecto ha sido estudiar un cofre convencional que se puede encontrar en el mercado actualmente, y se ha podido comprobar que según el mallado y el modelo de turbulencia utilizados en la simulación pueden variar los resultados. De esta manera se realizaron tres simulaciones, obteniendo los mejores resultados en la simulación que se utilizaba un mallado con un “inflation” y el modelo de turbulencia k-w SST.

Una vez obtenido un resultado del cofre convencional se quería como referencia para el futuro diseño. Sin embargo, para el nuevo diseño se quería eliminar el espacio entre coche y cofre, por este motivo se ha hecho una última simulación del cofre convencional en las mismas condiciones que el diseño nuevo, es decir, sin espacio entre coche y cofre con el objetivo de realizar una comparativa con los resultados del futuro diseño.

Para el diseño nuevo de cofre, se ha utilizado el concepto de flujo potencial bidimensional para extraer un perfil 2D más aerodinámico que el cofre convencional. Para ello se ha utilizado lo que se conoce cuerpo semiinfinito de Rankine, posteriormente se ha realizado un diseño 3D y se ha procedido a hacer su simulación.

Al finalizar la simulación del nuevo diseño se han obtenido los valores de la C_D y la C_L , con los que se pueden calcular tanto la fuerza de resistencia al avance como la sustentación. Para hacer una comparativa con los resultados del cofre convencional se calculan estas dos fuerzas en los dos casos, utilizando las ecuaciones 4.2 y 4.3.

	C_D	C_L	$A_D(m^2)$	$A_L(m^2)$	$F_D(N)$	$F_L(N)$
Cofre convencional	0.541	0.133	0.168	1.8	78.75	207.42
Cofre diseño nuevo	0.528	0.039	0.148	1.8	67.70	60.82

Tabla 8.1
Fuerzas
aerodinámicas
obtenidas

Por una parte, si se observa el valor de las C_D obtenidas, aparentemente no ha habido un cambio muy significativo, sin embargo al calcular la fuerza de resistencia al avance se puede ver un cambio más significativo, consiguiendo una disminución de 11.05 N respecto el cofre convencional, lo cual implica que al nuevo diseño le cuesta menos esfuerzo avanzar a través del fluido que al diseño convencional. A pesar de que los valores de la C_D sean muy similares, existe una pequeña disminución, pero a más a más se le tiene que añadir la disminución de superficie frontal que ha sufrido el cuerpo.

Por otra parte, el valor de la C_L ha sufrido una disminución mucho más significativa que la C_D , y en este caso la superficie proyectada no ha sufrido ningún cambio ya que en el nuevo diseño

se mantuvieron las cotas del cofre convencional. Con lo cual el valor de la sustentación ha sufrido una disminución de 146.6 N.

Sin embargo no sólo ha habido una disminución de las fuerzas aerodinámicas, sino también del volumen total del cofre. Por una parte la capacidad del cofre convencional, tal y como pone en la tabla 1, es de 530 litros, y para calcular el volumen del diseño nuevo del cofre se utiliza el programa Autodesk Inventor, en el que se puede encontrar una pestaña donde te informa de sus propiedades físicas informando que el volumen es de 486 litros. De esta manera se puede ver que hay una disminución de 8.3% respecto el volumen inicial.

En conclusión, se ha conseguido una disminución de las dos fuerzas aerodinámicas, de tal manera que el cofre obtenido es más aerodinámico que el convencional y no sufre una sustentación tan elevada. Al haber una disminución de las dos fuerzas esto implica también que el anclaje sufrirá menos esfuerzos para mantener el cofre en el techo del coche, ya que es el encargado de compensar las fuerzas externas. En cuanto el volumen, se ha visto reducido, a pesar de ello la capacidad obtenida sigue siendo muy buena para poder llevar el equipaje de viaje de toda la familia.

Uno de los objetivos también era encontrar resultados prácticos utilizando un túnel de viento, ya que se tenía pensado imprimir en 3D los cofres tanto convencional como el de diseño nuevo, a una escala reducida para probarlas en el túnel. La intención era extraer los resultados del túnel de viento y utilizando la teoría de la semejanza encontrar los resultados con las dimensiones reales y ver si se aproximaban a los resultados obtenidos con *Ansys Fluent*. Sin embargo el túnel de viento previsto sufrió una avería imposibilitando la práctica pensada.

9. Bibliografía

Las referencias bibliográficas indicadas a continuación han sido las fuentes que se han utilizado a lo largo del proyecto.

- [1] <http://www.taringa.net/post/autos-motos/13746337/Rumpler-Tropfenwagen-de-1921.html>
- [2] <http://www.taringa.net/post/autos-motos/13746337/Rumpler-Tropfenwagen-de-1921.html>
- [3] https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_arrastre
- [4] <http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV12.html>
- [5] <https://abcienciade.wordpress.com/2009/06/19/tubo-de-pitot-en-los-aviones/>
- [6] <http://www.arnex.ru/accessories/patrol62.php>
- [7] <http://m.forocoches.com/foro/showthread.php?t=1650311&page=9>
- [8] <https://es.wikipedia.org/wiki/Sustentaci%C3%B3n>
- [9] https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/enus/help/tgd_usr/tgd_user_report_qualitymeasure.html
- [10] <http://www.computationalfluidynamics.com.au/tips-tricks-inflation-layer-meshing-in-ansys/>
- [11] <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/mecanica-de-fluidos-y-maquinas-hidraulicas/materiales/T03.pdf>
- [12] <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/mecanica-de-fluidos-y-maquinas-hidraulicas/materiales/T03.pdf>