



**Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

TITULO: Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición

AUTOR: MOLERO CLOTET, JAUME

DATA DE PRESENTACIÓN: JUNIO, 2020

APELLIDOS: MOLERO CLOTET

NOMBRE: JAUME

TITULACIÓN:

PLAN:

DIRECTOR: Sergi Menargues

DEPARTAMENTO: Departament de Ciència i Enginyeria de Materials (CEM)

QUALIFICACIÓN DEL TFG

TRIBUNAL

PRESIDENTE

SECRETARIO

VOCAL

FECHA DE LECTURA:

Este proyecto tiene en cuenta aspectos medioambientales: Si No

RESUMEN

En este proyecto se analiza y mejora el comportamiento en pista de un turismo de competición. Para ello, en primer lugar, se analiza el vehículo en servicio, en una situación dinámica real y se comentan las sensaciones con el piloto, de esta manera podemos ver donde mejorar el vehículo, para que el comportamiento de este y la confianza del piloto con él sea óptima, consiguiendo de este modo la reducción del tiempo de vuelta.

En este primer análisis se determina que los puntos a mejorar están relacionados con la parte trasera del vehículo, ya que se encuentran carencias en la tracción del eje trasero y en la estabilidad del alerón debido a una modificación improvisada.

El vehículo objeto de estudio es un Subaru Impreza GC8 modificado para su uso en circuito, buscando siempre reducir el tiempo de vuelta. El coche ha sido modificado buscando una buena rigidez con el menor peso posible, siguiendo esta línea daremos preferencia a conseguir los requisitos del sistema con el menor peso posible dentro de un gasto económico razonable.

Tras detectar el problema de estabilidad del alerón trasero, se decide renovar la estructura entera. Se realiza un estudio aerodinámico del vehículo, para optimizar la colocación del alerón. Una vez definidas las cargas aerodinámicas implicadas proporcionadas por el fabricante del alerón, se procede a la parte de diseño de la estructura.

Junto con un escaneo en 3D de la zona del coche donde montaremos la estructura, y conociendo las condiciones de contorno aerodinámicas, se realiza un diseño inicial. Este será en chapa doblada, buscando que la fabricación y montaje del mismo sea lo más simple posible. Se estudiará para mejorar y cumplir con los requisitos establecidos. Se hará uso de la optimización topológica como herramienta de diseño y optimización. Con estas herramientas y la utilización de programas de simulación de cargas escogeremos el diseño y material que mejor cumpla con nuestros requisitos.

Paraules clau (màxim 10):

Automoci3n	Competici3n	Simulaci3n	Estructura
Material	Aerodinàmica	Anti-sustentaci3n	Aler3n
Diseño	Optimizaci3n		

ABSTRACT

This project analyses and improves the handling on the track of a circuit car. Firstly, the vehicle is analysed on a real dynamic situation and then ask the main pilot for him impressions, so we can see where to improve the vehicle, with the main point on increasing the handling of the car, and the pilot's confidence with it, achieving a reduction in lap time.

In this first analysis it is determined that the points to improve are related to the rear of the vehicle, since deficiencies are found in the traction of the rear axle and in the spoiler stability due to an improvised modification.

The vehicle under study is a modified Subaru Impreza GC8, planed for using it on the circuit, always seeking to reduce lap time. The car has been modified looking for good rigidity with the least possible weight, and we will follow this same line giving preference to achieve the system requirements with the least possible weight within a reasonable economic cost.

After detecting the stability problem of the rear wing, it was decided to renovate the entire structure. An aerodynamic study of the vehicle is carried out to optimize the placement of the spoiler. Once the implied aerodynamic loads provided by the spoiler manufacturer have been defined, we proceed to the design part of the structure.

With a 3D scan of the area of the car, where we will mount the structure, and knowing the aerodynamic contour conditions, an initial design is made. This will be in folded sheet metal, seeking to make its manufacture and assembly as simple as possible. It will be studied to improve and meet the established requirements. Topological optimization will be used as a design and optimization tool. With these tools and the use of load simulation programs, we will choose the design and material that best meets our requirements.

Keywords (10 maximum):

Competition	Simulation	Structure	Material
Aerodynamics	Downforce	Drag	Design
Optimization	Spoiler		

Índice de contenidos

1.	INTRODUCCIÓN.....	10
1.1.	OBJETIVOS DEL PROYECTO	10
1.2.	MOTIVACIÓN	10
2.	ANÁLISIS DEL COCHE	11
2.1.	NUESTRO COCHE	11
2.1.1.	ESPECIFICACIONES DEL COCHE	13
2.1.2.	USO Y OBJETIVOS.....	13
2.1.3.	EXPERIENCIA.....	14
2.2.	ASPECTOS A MEJORAR	14
2.2.1.	CONTEXTO DEL OBJETIVO DEL PROYECTO.....	15
3.	ESCANEADO DE LA ZONA DE ANCLAJE	16
3.1.	TECNOLOGÍAS DE ESCANEADO 3D	16
3.1.1.	ESCANERES DE CONTACTO	16
3.1.2.	FOTOGRAMETRÍA	17
3.1.3.	ESCANERES LASER Y ESCANERES DE LUZ ESTRUCTURADA	18
3.2.	TECNOLOGÍA UTILIZADA.....	20
3.3.	ARCHIVOS.....	22
4.	ESTUDIO AERODINÁMICO	24
4.1.	TIPO DE FLUJO	24
4.1.1.	MACH	24
4.1.2.	REYNOLDS.....	25
4.1.3.	CAPA LÍMITE	26
4.2.	GENERACIÓN DE LAS FUERZAS AERODINÁMICAS	27
4.2.1.	ECUACIÓN DE LA CONTINUIDAD	28
4.2.2.	ECUACIÓN DE BERNOULLI	29
4.2.3.	COEFICIENTES AERODINÁMICOS	30
4.3.	SIMULACIÓN AERODINÁMICA CFD.....	31
4.3.1.	ZONA DE ESTUDIO Y MALLADO	33
4.3.2.	MÉTODO DE CÁLCULO CFD.....	36
4.3.3.	CARGA AERODINÁMICA GENERADA POR EL ALERÓN.....	38
5.	DISEÑO Y SIMULACIÓN.....	40
5.1.	DISEÑO	41
5.1.1.	DISEÑO INICIAL.....	43
5.2.	SIMULACIÓN.....	46
5.2.1.	SIMULACIÓN DEL DISEÑO INICIAL	47

5.2.2.	NUEVOS DISEÑOS Y SIMULACIONES.....	52
5.2.3.	SIMULACIÓN FINAL.....	53
6.	OPTIMIZACIÓN	56
	CONCLUSIONES	61
	RECOMENDACIONES	61
	BIBLIOGRAFÍA.....	63

INDICE DE FIGURAS

Ilustración 1 Subaru Impreza GC8 original [1]	11
Ilustración 2: Detalle frontal proyecto	12
Ilustración 3: Detalle jaula de seguridad	12
Ilustración 4: Detalle canards	13
Ilustración 5: Imagen trasera del coche con esquema	15
Ilustración 6: Brazo FARO Quantum Faro Arm [3]	16
Ilustración 7: Interfaz programa fotogrametría 3Dflow [4]	17
Ilustración 8: Estudio topográfico realizado con un dron y fotogrametría [4]	18
Ilustración 9: Patrón laser y patrón de luz estructurada	18
Ilustración 10: EinScan-Pro [6]	20
Ilustración 11: Esquema típico de un sistema de un escáner de luz estructurada [7]	21
Ilustración 12: Uso del escaner en el proyecto	21
Ilustración 13: Imagen del archivo durante el escaneado	22
Ilustración 14: Vista lateral, planta y alzado del archivo en bruto	23
Ilustración 15: Archivo de la superficie del fondo de maletero preparado	23
Ilustración 16: Descomposición de las fuerzas aerodinámicas	24
Ilustración 17: Líneas de corriente en un flujo laminar	25
Ilustración 18: Líneas de corriente en un flujo turbulento	25
Ilustración 19: Capa limite a lo largo de un ala de avión [8]	26
Ilustración 20: Representación teórica del desprendimiento de la capa limite [8]	26
Ilustración 21: Distribución de las fuerzas aerodinámicas [9]	28
Ilustración 22: Esquema de volumen de control [8]	28
Ilustración 23: Tubería por la que circula un fluido.	29
Ilustración 24: Representación de las líneas de fluido a lo largo del alerón. [8]	29
Ilustración 25: Representación de la distribución de presiones alrededor de un ala [8].	30
Ilustración 26: Croquis inicial para el modelado[11]	31
Ilustración 27: Modelado del vehículo	32
Ilustración 28: Modelo sobre una superficie	32
Ilustración 29: Área de estudio con simetría	33
Ilustración 30: Proceso de generación de nodos [10]	34
Ilustración 31: Refinamiento de la malla [10]	34
Ilustración 32: Malla refinada en las zonas de contacto	35
Ilustración 33: Patrones de velocidad resultantes para diferentes mallados	36
Ilustración 34: Sección del flujo representando la velocidad y dirección del flujo	37
Ilustración 35: Distribución de la presión dinámica del aire	37
Ilustración 36: Perfil alar del alerón[12]	38
Ilustración 37: Escaneo con referencias para el diseño	41
Ilustración 38: Esquema de diseño	42
Ilustración 39: Diagrama de flujo	42
Ilustración 40: Escuadra para montaje de las columnas	43
Ilustración 41: Columna de soporte del alerón	43
Ilustración 42: Esbozo sin estructura de cruz	44
Ilustración 43: Subconjunto de soportes tipo cruz	45
Ilustración 44: Piezas del conjunto ensambladas	45
Ilustración 45: Estudio de reacciones	46
Ilustración 46: Resultado de reacciones para la posición 18º AOA	47

Ilustración 47: Mallado grueso de la estructura preparada para la simulación.....	48
Ilustración 48: Vista general de las tensiones de von Mises.....	48
Ilustración 49: Tensiones principales de un elemento	49
Ilustración 50: Detalle de las zonas conflictivas y sus valores nodales	50
Ilustración 51: Propiedades físicas de la estructura con chapa de 5mm de acero AISI 304.....	50
Ilustración 52: Vista general de los desplazamientos.....	51
Ilustración 53: Vista frontal de los desplazamientos.....	51
Ilustración 54: Ejemplo de cotas dependientes del conjunto.....	52
Ilustración 55: Simulación precisa del diseño seleccionado	53
Ilustración 56: Detalle del refinamiento de la malla.....	54
Ilustración 57: Estado de tensiones.....	54
Ilustración 58: Detalle de tensiones	55
Ilustración 59: Estado de desplazamientos	55
Ilustración 60: Pasos de la optimización.....	56
Ilustración 61: Esbozo para la pieza extruida	57
Ilustración 62: Resultados de la simulación optimizada.....	57
Ilustración 63: Tensiones de von Mises rediseño optimizado	58
Ilustración 64: Distribución de los desplazamientos	59
Ilustración 65: Comprobador de pernos	60
Ilustración 66: Vehículo de simulación con el alerón y los soportes montados	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Especificaciones del escáner EinScan-Pro [6].....	20
Tabla 2: Coeficientes de arrastre básicos [8].....	30
Tabla 3: Condiciones iniciales para el estudio	32
Tabla 4: Diferentes mallados y resultados.....	35
Tabla 5: Resultados del estudio CFD proporcionado por APR Performance. [12]	40
Tabla 6: Resumen de la simulación del diseño inicial.....	51
Tabla 7: Resumen de las simulaciones	52
Tabla 8: Comparación de diseños.....	59

ÍNDICE DE GRAFICAS

Gráfico 1: Valor de la fuerza downforce en las diferentes configuraciones del AOA	38
Gráfico 2: Valor de la fuerza drag en las diferentes configuraciones del AOA	39
Gráfico 3: Relación de la eficiencia aerodinámica y la velocidad para cada AOA	39

GLOSARIO

Aerodinámica: Rama de la mecánica de fluidos que trata del movimiento del aire y de otros fluidos gaseosos, y de las fuerzas que actúan sobre los cuerpos cuando se trasladan en el seno de tales fluidos o cuando dichos fluidos se mueven contra o alrededor de los cuerpos

Aleron: Elemento situado en la parte trasera del vehículo, destinado a interactuar con el aire que circula alrededor y con la finalidad de proporcionar carga aerodinámica mejorando así el comportamiento de este.

Capa límite: se denomina así a la zona donde el movimiento de un fluido es perturbado por la interacción con un sólido.

Carga aerodinámica: fuerza de sustentación negativa, o downforce por su palabra inglesa, que es capaz de generar un cuerpo.

FIA: Federación Internacional del Automóvil

Flujo laminar: Régimen de desplazamiento de las partículas de un fluido en las que se mueven de manera ordenada y cuyas trayectorias forman líneas paralelas entre sí.

Flujo turbulento: Régimen de desplazamiento de las partículas de un fluido en las que se mueven de forma caótica y desordenada.

Mecánica de fluidos Computacional (CFD): Rama de la mecánica de fluidos que utiliza diferentes métodos matemáticos para resolver problemas mediante el uso de ordenadores.

Número de Reynolds: número adimensional utilizado en mecánica de fluidos que sirve para caracterizar el movimiento de un fluido.

Optimización topológica: Es un método matemático que optimiza el diseño del material dentro de un espacio de diseño dado, para un conjunto dado de cargas, condiciones de límite y restricción es con el objetivo de maximizar el rendimiento del sistema.

Von Mises: Criterio de fallada que determina una tensión por la cual el material entra en plasticidad

1. INTRODUCCIÓN

En este proyecto se efectúa todo el estudio de ingeniería para la mejora de la estructura de un alerón instalado en un turismo de competición. Este vehículo ya disponía de un alerón, se decidió desechar la estructura anterior para partir de cero y optimizar al máximo esta pieza.

En el mundo de la competición la mayoría de componentes y diseños son muy personalizados, ya que cada uno de los vehículos ha evolucionado de manera diferente y cada propietario ha decidido hacer diferentes modificaciones que afectarían en el diseño final.

Por ello, y como veremos a lo largo del proyecto, usaremos un escáner 3D para poder trabajar sobre el vehículo concreto sin necesidad de estar en el taller.

1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo principal del proyecto es diseñar y simular una estructura donde anclar el alerón, que sea capaz de soportar la fuerza ejercida por este sin tener problemas de estabilidad y fiabilidad, para conseguir mejorar el comportamiento del vehículo. Para ello se limitará el material a chapa cortada y doblada, a escoger del catálogo de proveedores locales. Realizaremos las simulaciones y optimizaciones necesarias para cumplir nuestro objetivo. De este modo se tendrá la posibilidad de fabricar el producto final de una forma sostenible, rápida y lo más económica posible.

1.2. MOTIVACIÓN

La modificación y personalización de turismos para uso en circuito es una afición cada vez más común, y en la que muchas veces se realizan proyectos poco respaldados desde el punto de vista de la ingeniería. Más bien realizados con material “aftermarket”, ya sea general o específico para un modelo de coche, pero sin tener en cuenta si este coche ha sido modificado anteriormente. Esto puede llevar a los propietarios, por desgracia, a desestimar una modificación o realizarla de forma improvisada e inapropiada.

En este caso, la motivación de poder resolver un problema generado por esto y la posibilidad de realizar un proyecto en el que fuera necesario usar tanto maquinaria de trabajo como programas de simulación, me daba la oportunidad de adquirir un amplio conocimiento de estos campos, enriqueciendo así mi experiencia en más de un área.

2. ANALISIS DEL COCHE

Para empezar, analizaremos el vehículo en cuestión. En este punto, todo nos sirve para tener una buena base del proyecto y conocer con que estamos trabajando. Desde las medidas del coche, las modificaciones, los objetivos futuros e incluso las sensaciones del piloto.

En el caso a estudio, y teniendo en cuenta que queremos mejorar el comportamiento del vehículo, nos centraremos en la comunicación con el piloto y la observación del coche en un ambiente dinámico para determinar los aspectos a mejorar, y mejorarlo desde el punto de vista más funcional posible. Otros puntos a analizar y no menos importantes serán las medidas del coche, las modificaciones ya realizadas, objetivos competitivos del propietario e información que él nos pueda ofrecer sobre las capacidades del vehículo, etc.

2.1. NUESTRO COCHE

En nuestro caso procedemos a analizar un Subaru Impreza GC8 (Ilustración 1) modificado. Algunas de las especificaciones que han sido modificadas, tenían originalmente estos valores según la ficha técnica del fabricante según el manual de servicio del fabricante [1]:

-Potencia del coche: 211 CV/ 5600 rpm

-Par: 290 N·m / 4000 rpm

-Medidas del coche (Largo/ ancho/ alto): 4340 mm / 1690 mm / 1400 mm

-Altura libre al suelo: 150 mm

-Peso: 1288 kg

-Velocidad máxima: 231 km/h



Ilustración 1 Subaru Impreza GC8 original [1]

La unidad en concreto con la que trabajaremos tiene muchas modificaciones, siempre buscando mejorar el comportamiento en pista para reducir el tiempo de vuelta.

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición Jaume Molero Clotet

En las modificaciones del sistema motriz podemos destacar la reconstrucción y reprogramación completa del motor cambiando las piezas críticas por piezas de mayor rendimiento, a la par que se optimizó el sistema de refrigeración y ventilación del motor (Ilustración 2), consiguiendo así una potencia estable de 445 CV a 6300 rpm y un par motor de 537 N·m a 5700 rpm. Para soportar esta potencia también se reforzó la caja de cambios y los ejes que llevan la potencia a las ruedas.



Ilustración 2: Detalle frontal proyecto

Para mejorar el manejo del coche se modificaron las medidas de las ruedas, se cambiaron las suspensiones por unas regulables de competición, se optimizó la frenada, se vació el coche para eliminar cualquier peso innecesario, se sustituyeron las ventanas, capo y maletero por versiones con materiales más ligeros y se añadió una jaula de seguridad que también añadirá una rigidez al chasis del vehículo (Ilustración 3). Lo que se estima que haya significado una reducción en el peso total respecto al de origen dejando el coche con un peso por debajo del mínimo requerido por las normativas de la Federación Internacional del Automóvil (FIA) para este modelo y categoría.



Ilustración 3: Detalle jaula de seguridad

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición Jaume Molero Clotet

En cuanto a la parte aerodinámica del coche veremos como el alerón ha sido substituido por uno de competición de fibra de carbono con soportes caseros. En la parte frontal podemos destacar los canards (Ilustración 4) y el sistema de evacuación de aire del vano motor, realizados por Nisuba Motorsport. También cabe destacar que en compromiso con el aumento de ancho de vías y carga aerodinámica frontal, tendremos una mayor área frontal del vehículo, aumentando la fuerza de arrastre o “drag”.



Ilustración 4: Detalle canards

2.1.1. ESPECIFICACIONES DEL COCHE

Debido a estas modificaciones, a tener en cuenta, resultamos con un coche totalmente diferente, un contexto que influirá en las posibilidades y compromisos del proyecto.

-Potencia del coche: 445 CV / 6300 rpm

-Par: 537 N·m / 5700 rpm

-Medidas del coche (Largo/ ancho/ alto): 4355 mm / 1840 mm / 1400 mm

-Altura libre al suelo: 155 mm

-Peso: 1040 kg

-Velocidad máxima: 280 km/h

2.1.2. USO Y OBJETIVOS

El propietario comentó que usos le da al coche, por el momento es algo recreacional, de autosuperación y diversión, ya que todavía no se ha introducido en ninguna competición regulada, pero sí está interesado en poder cumplir el reglamento FIA de la categoría pertinente, para poder acceder a más eventos dentro de las categorías de aficionado.

Las modificaciones ya existentes están enfocadas en el rendimiento en circuito, conseguir el menor tiempo posible, buscando un balance perfecto entre la velocidad en rectas y en curvas. Además, se ha vigilado que las modificaciones se mantengan lo más viables posible ya sea por

tener una facilidad de mantenimiento o carecer de este, buscando que sea un coche lo más fiable posible.

Este apartado únicamente lo tendremos en cuenta para no perder la esencia del proyecto, así como para conservar sus objetivos futuros con nuestro trabajo.

2.1.3. EXPERIENCIA

Hemos comentado con el piloto del coche sus sensaciones en pista para poner el coche en contexto. Este apartado de experiencia puede ser muy revelador en cuanto a las carencias del vehículo, ya que probablemente, y si es un piloto experto, él será el primero en conocer estas carencias y junto con una buena comunicación y un breve análisis del coche seremos capaces de determinar en qué puntos trabajaremos.

Comentando la dinámica del coche con el piloto vemos que lo más preocupante del comportamiento del coche es la estructura del alerón. Esta estructura fue realizada sin ningún tipo de estudio estructural, ha aguantado hasta el momento, pero no como se esperaba desde un inicio. Esto hace que la experiencia de conducción no sea óptima, ya que existe una desconfianza del piloto por culpa de los movimientos que realiza el alerón en las inercias de las curvas y durante las rachas de viento. Además, encontramos una carencia en la cantidad de fuerza de anti sustentación conseguida por el mismo, perdiendo tracción en la parte trasera del vehículo. Veremos más a fondo a que puede ser debido en el capítulo 4.2 relacionado con las fuerzas aerodinámicas del vehículo.

En la cultura japonesa, y es algo que se ha extendido al mundo del motor, existe el término "jinba ittai" que proviene de los Yabusame, arqueros montados a caballo que debían practicar sus disparos en movimiento. Este término se refería a la conexión entre el caballo y el jinete, esencial para que el disparo fuera efectivo. En el mundo de la automoción fue la compañía Mazda quien adoptó el término y, como en la antigüedad, se refiere a la unidad entre el conductor y el vehículo.

En nuestro caso, este término queda bastante afectado debido a que las sensaciones en el coche no son las mejores, debido al comportamiento de la estructura y aerodinámica del alerón. Estudiaremos si es posible la optimización de esta estructura, y si estos problemas de estabilidad y fiabilidad pueden ser mejorados.

2.2. ASPECTOS A MEJORAR

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, se procedió a comentar con el piloto cual sería la zona a trabajar del coche. En este caso, todo el soporte trasero del alerón será modificado. Pudimos ver como la estructura se balanceaba lateralmente, debido a las inercias propias de una conducción deportiva e incluso con las rachas de viento lateral en las rectas. Esto, como nos comentó el piloto, le resultaba frustrante y le generaba mucha desconfianza en el comportamiento y la fiabilidad de la parte trasera del coche, por lo que nos centraremos en mejorar este elemento.

Esto supone un reto estructural ya que las modificaciones ya realizadas, que se quieren conservar, y la forma del vehículo impiden una solución fácil. Debido a las modificaciones en la

zona del maletero, donde se sustituyó el portón del maletero original por uno de fibra de vidrio mucho más ligero, ya que se deshecho el sistema de anclaje original, y este está sujeto al coche por dos pasadores y cuatro puntos de apoyo. Este no ofrece ningún soporte estructural, por lo que el alerón no puede apoyarse en esta pieza y debemos fijar la estructura al fondo del maletero, aprovechando también la estabilidad estructural que ofrece el chasis del coche. Además, debido a que el coche es tipo berlina, deberemos realizar una estructura lo suficientemente alta para encontrar aire limpio y aprovechar al máximo la carga aerodinámica del alerón.

Este punto de aerodinámica lo veremos más a fondo a lo largo del capítulo 4, explicado de una forma muy simple lo principal es que, para el buen funcionamiento del alerón, este tiene que estar expuesto a un régimen de aire libre de turbulencias y, debido a la altura de la zona del habitáculo propia de las berlinas, se ve afectado el flujo de aire en la parte trasera. Determinaremos entonces la altura necesaria para conseguir nuestros objetivos.

2.2.1. CONTEXTO DEL OBJETIVO DEL PROYECTO

Sabiendo en que parte del coche se quiere trabajar, se toman medidas críticas que nos ayudaran en la fase de diseño (Ilustración 5). También se realiza un escaneo de la zona donde anclaremos el alerón, que veremos en el capítulo 3.2, esto también permitirá posteriormente tomar referencias dimensionales para el diseño, así como validarlo una vez tengamos la estructura diseñada en nuestro programa CAD.



Ilustración 5: Imagen trasera del coche con esquema

Las medidas tomadas fueron las siguientes:

- Ancho del hueco del maletero: 1150 mm
- Alto del fondo del maletero al exterior de la carrocería: 490 mm
- Altura del asfalto al punto más bajo del maletero: 265 mm
- Ancho entre cierres del maletero: 1090 mm

3. ESCANEADO DE LA ZONA DE ANCLAJE

Cada vez los trabajos personalizados y a medida están cobrando más protagonismo en la industria. Las nuevas tecnologías y metodologías de trabajo permiten cada vez más la personalización de los productos antes de llegar al cliente, accesorios personalizados y producciones de series pequeñas.

La impresión 3D es un buen ejemplo de ello, una tecnología que cada vez se destaca más de su uso en prototipaje y es capaz de realizar piezas para su uso en todos los campos. Esta brinda la posibilidad de realizar piezas únicas y cambios en el diseño constantes, agilizando así la personalización del producto.

Para todos estos campos, el escaneado 3D es una herramienta excelente para la fase de diseño. Este nos permite tener una referencia de forma y dimensional en un archivo digital del modelo o alojamiento de nuestro producto. De esta manera podemos recurrir a este archivo siempre que queramos referenciarlo en él, ya sea para medir dimensiones, utilizar superficies como referencias o incluso ver nuestro producto en su futuro montaje.

3.1. TECNOLOGÍAS DE ESCANEADO 3D

Para obtener archivos CAD de objetos reales tenemos diferentes tecnologías de escaneo 3D [2], todas tienen sus ventajas e inconvenientes, y por ello haremos una selección de estas tecnologías y veremos cuál de ellas es la más usada para este tipo de trabajos y porqué.

3.1.1. ESCANERES DE CONTACTO

Esta tecnología está generalmente relacionada con la metrología y el control de calidad, ya que se debe destacar su altísima precisión en las medidas. Se debe destacar también la flexibilidad de materiales a escanear, ya que tendrá la misma precisión independientemente del material o la textura escaneada. Por todo ello, puede ser ideal para escanear piezas mecánicas de alta precisión.

Aunque podemos obtener una gran precisión, este es un proceso muy lento (30 puntos/s) además, están normalmente anclados a una base fija y nos limitan el tamaño de los modelos. Podemos ver (Ilustración 6) como un escáner de contacto nos limitaría dimensionalmente [3].



Ilustración 6: Brazo FARO Quantum Faro Arm [3]

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición Jaume Molero Clotet

Por las bases de nuestro trabajo, en el que queremos escanear zonas de un vehículo que no podemos mover a nuestra elección, el escáner que necesitamos no puede estar fijo en una estación de trabajo, debe poder operarse a mano alzada.

Esto nos hace desechar aquellas tecnologías relacionadas con el escaneo 3D por contacto.

El resto de tecnologías están basadas en luz rebotada, y se dividen en tres categorías: la fotogrametría, el escáner basado en laser y el escáner de luz estructurada.

3.1.2. FOTOGRAMETRIA

La fotogrametría se basa en un software que, a través de algoritmos complejos, procesa fotografías (cuantas más mejor) de un mismo objeto en un entorno y nos ofrece la posibilidad de realizar archivos 3D con prácticamente cualquier cámara, aunque la definición de estos archivos dependerá también de la definición de la cámara usada. [4]

Esta tecnología es descartada por la opción de fallo que tenemos, ya que no será hasta que el programa haya solucionado todos los algoritmos cuando obtengamos nuestro modelo, generado a partir de imágenes en 2D desde diferentes ángulos como vemos en la Ilustración 7. Este proceso además puede durar mucho. En caso de fallar algún punto del escaneado no lo sabremos hasta pasadas demasiadas horas y deberíamos empezar todo el proceso de nuevo.



Ilustración 7: Interfaz programa fotogrametría 3Dflow [4]

Esta tecnología es ampliamente utilizada para situaciones donde otras no tienen cabida, como estudios topográficos (Ilustración 8) o escaneos de bajo presupuesto (para uso recreacional), donde el error dimensional admisible es holgado.

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición Jaume Molero Clotet

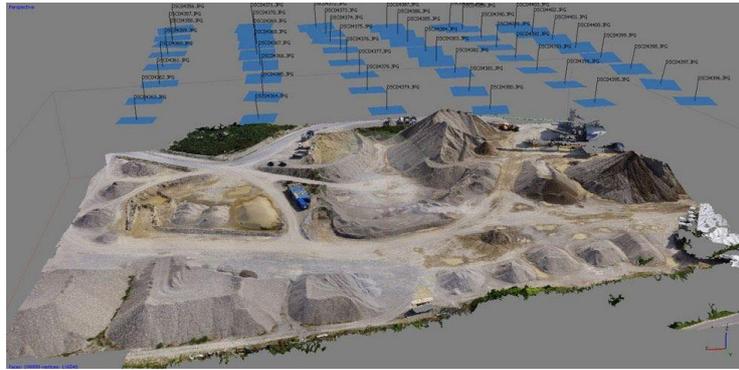


Ilustración 8: Estudio topográfico realizado con un dron y fotogrametría [4]

El resto de las tecnologías tenidas en cuenta, normalmente nos muestran por la pantalla del ordenador aquellas partes que vamos escaneando en tiempo real, aunque sea en una resolución menor. Esto nos permitirá finalizar el trabajo cuando tengamos la información necesaria o incluso, si vemos que falla en algún punto, reiniciar el trabajo sin tener que terminar. Por ello descartamos también la fotogrametría.

3.1.3. ESCANERER LASER Y ESCANERES DE LUZ ESTRUCTURADA

Finalmente, entre el escáner laser y el de luz estructurada no hay diferencias muy notables, y ambos nos servirán para el uso que queremos darle [2]

Este tipo de escáneres, utilizan lo que se conocen como métodos activos de iluminación. Iluminar de forma activa permite conocer el patrón original de la luz para así facilitar la reconstrucción 3D. Entre ellos, diferenciamos fundamentalmente el tipo de luz que proyectan en nuestro objeto. La siguiente Ilustración 9 muestra respectivamente el tipo de patrones que encontramos, uno usando una luz laser [5,6] y el otro proyectando una luz normal con diferentes patrones según la necesidad, pudiendo ser estos patrones líneas verticales, horizontales u otros.



Ilustración 9: Patrón laser y patrón de luz estructurada

Ambas tecnologías nos permiten escanear a mano alzada y tienen tamaños similares, lo que nos permitirá transportarlos y usarlos en prácticamente cualquier zona del vehículo. La resolución de ambos escáneres será similar y suficiente para referenciarlos y medir nuestro modelo a través del programa de modelado. Podemos encontrarlos en el mismo rango de precios, estos oscilando entre 3000-7000€.

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición

Jaume Molero Clotet

Las mayores diferencias entre el láser y la luz estructurada son la sensibilidad a la luz o material a escanear y la velocidad, siendo el escáner laser el más versátil en cuanto a los materiales a escanear y el menos sensible a los cambios de luz ambiental, por el contrario, la luz estructurada nos permite realizar escaneados más rápidos sin perder precisión. Además, la tecnología láser puede tener problemas con el ruido ambiental [7], y esto puede ser un factor poco controlable en talleres de automoción.

Bajo nuestro punto de vista, las debilidades relacionadas con el material a escanear son fácilmente solucionables con botes de spray matificantes, e incluso puede jugar en nuestro beneficio si quisiéramos que el escáner obviara alguna superficie, como podría ser la base de escaneo, cubriendo esta con un vinilo brillante. Esto y el escaneado más rápido nos hace seleccionar el escáner de luz estructurada como mejor tecnología para nuestra aplicación.

3.2. TECNOLOGIA UTILIZADA

En concreto para este trabajo hemos usado, gracias a la colaboración con Nisuba Motorsport Engineering, el escáner Einscan Pro (Ilustración 10), que utiliza la tecnología de escaneado de luz estructurada.

Este tipo de escáneres se componen mínimamente de un proyector y una cámara, en este caso, desde dos cámaras para una mayor precisión.



Ilustración 10: EinScan-Pro [6]

En el caso del escáner Einscan pro, como podemos ver en la tabla 1, la relación de punteos tiene una precisión de hasta 0.1mm usando el modo de escaneado preciso a mano alzada y de hasta 0.3mm con el modo de escaneado rápido a mano alzada.

Tabla 1: Especificaciones del escáner EinScan-Pro [6]

Modo	HD scan	Rapid scan
Precisión disparo unico	0.1mm	0.3mm
Velocidad de escaneado	90.000 points/s	550.000 points/s
Distancia entre puntos	0.2 – 2mm	0.5 – 2mm
Modos de trazado	Solo con marcadores	Con marcadores, características de la superficie, o ambos

Este tipo de escáneres funcionan esquemáticamente de la siguiente manera. El proyector lanza un patrón de luz a nuestro objeto, que por otro lado captara la cámara del escáner una vez ha rebotado en nuestro objeto, creando así esta triangulación que podemos observar en la ilustración 11. A través de los algoritmos del software, interpreta la distorsión del patrón que genera nuestro objeto y crea un archivo de nube de puntos, con relación entre ellos, que irán formando la superficie escaneada. [7]

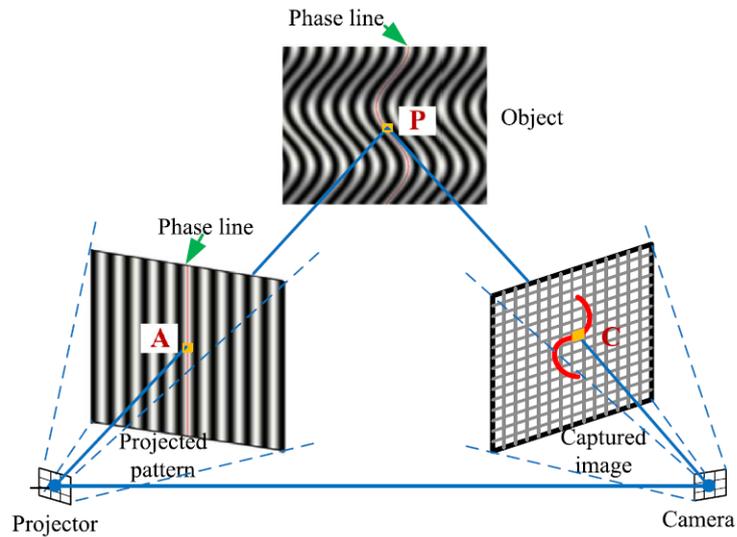


Ilustración 11: Esquema típico de un sistema de un escáner de luz estructurada [7]

Cumpliendo los puntos básicos, podemos encontrar diferentes añadidos a esta para maximizar las capacidades del escáner. En el caso del escáner utilizado tenemos diferentes mejoras respecto a la tecnología básica como pueden ser: varias cámaras receptoras, reconocimiento de puntos de control físicos (adhesivos temporales) para mejorar el seguimiento del escaneo, o algoritmos de reconocimiento de geometrías singulares, que como vemos en la Ilustración 12, son abundantes en nuestro caso. Esto mejora tanto la precisión del escáner como la usabilidad del mismo.



Ilustración 12: Uso del escáner en el proyecto

3.3. ARCHIVOS

Durante el escaneado, se generan una serie de puntos relacionados entre ellos, este archivo de nube de puntos es el que el programa de escaneado nos muestra por pantalla en tiempo real como vemos en la ilustración 13, que posteriormente podremos exportar en diferentes formatos, generalmente con el objetivo de convertir esta nube de puntos en un archivo de superficies.



Ilustración 13: Imagen del archivo durante el escaneado

El archivo exportado tras el escaneado podrá ser: en formato “.STL”, el más común al compartir archivos; “.OBJ”, con superficies que conservan el mallado original en el que se basan, y capaz de conservar información de texturas; “.PLY”, generalmente relacionado con la fotogrametría ya que además de generar superficies conserva su textura; y “.ASC”, que únicamente conserva información sobre la nube de puntos.

Para nuestras necesidades, ya que solo nos interesa la geometría de la pieza, utilizaremos el formato “.STL” por versatilidad y velocidad de trabajo. Si nos interesase conservar las texturas de la pieza, necesitaríamos instalar un accesorio en el escáner y utilizar un formato compatible. También deberíamos tener en cuenta que el archivo será más pesado, más difícil de procesar, y por lo tanto más tedioso trabajar con él. Es recomendable no usar este accesorio si no es información útil para nuestro caso, pero puede ser útil en situaciones donde el contraste de colores nos ayude a distinguir diferentes piezas o materiales.

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición Jaume Molero Clotet

Este es el archivo una vez exportado en formato “.STL” del fondo del maletero, la zona que hará de bancada para nuestra estructura.

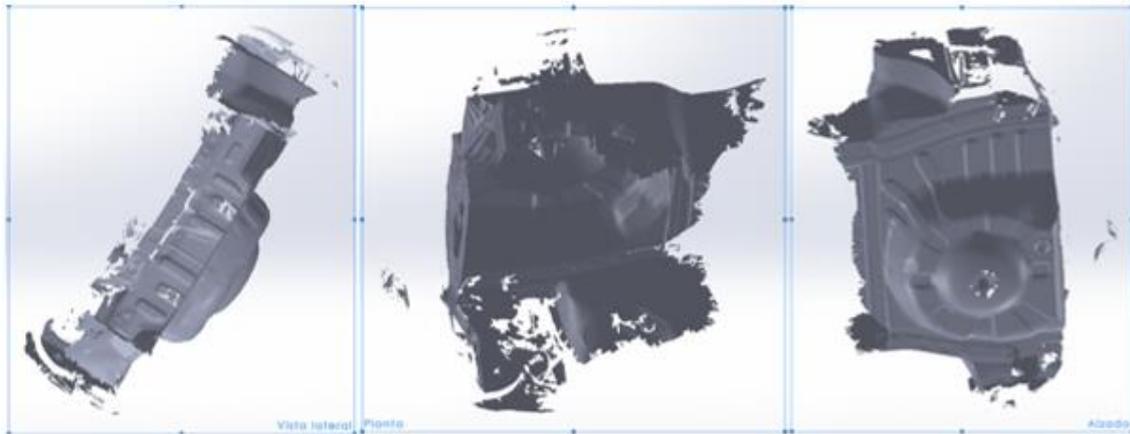


Ilustración 14: Vista lateral, planta y alzado del archivo en bruto

Como podemos ver en la ilustración 14, el archivo en bruto tiene algunas superficies satélites además de no tener una correcta colocación de los ejes de coordenadas, cosas que deberemos corregir si queremos trabajar con este archivo. Podremos limpiar el archivo de diferentes superficies generadas que no sean de nuestro interés, para conseguir una mayor fluidez en el programa de diseño. Aun así, recomendamos conservar el archivo original para verificar con el diseño final.

Para ello, referenciándonos en el propio archivo, podemos generar diferentes planos y ejes, como podemos ver en la ilustración 15, que nos darán la posibilidad de situar el eje de coordenadas en una posición correcta para trabajar el conjunto final de la estructura del alerón.

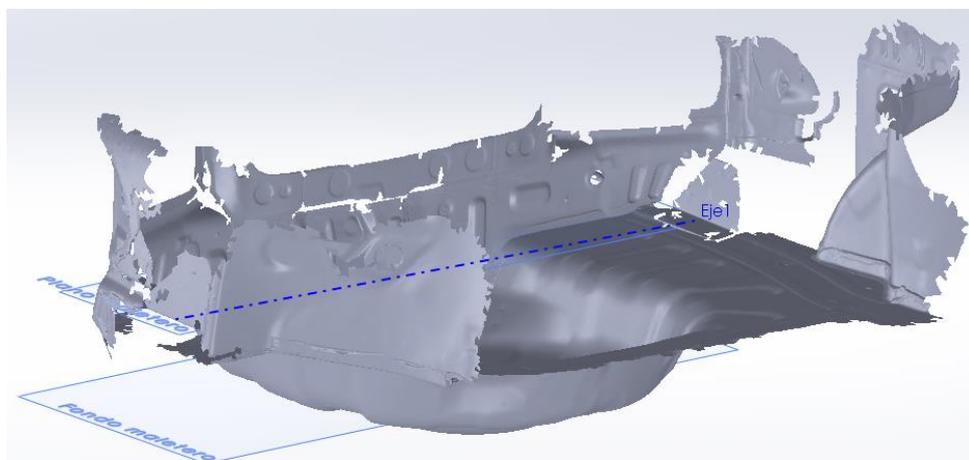


Ilustración 15: Archivo de la superficie del fondo de maletero preparado

4. ESTUDIO AERODINÁMICO

En este apartado pondremos en contexto las fuerzas generadas por la carga aerodinámica del alerón, porque son necesarias y como podremos sacar el máximo partido de las mismas.

El funcionamiento de la carga aerodinámica se puede resumir en dos fuerzas, representadas en la imagen 16 como sustentación y arrastre, en el caso de un alerón la sustentación resulta negativa. La sustentación es aquella resultante perpendicular al flujo del fluido, y la fuerza de arrastre es aquella que genera una resistencia al avance. La relación entre ellas será cuanto más eficiente resulta aerodinámicamente cada situación, dependiendo principalmente de la velocidad del fluido y el ángulo de ataque para un mismo perfil alar.

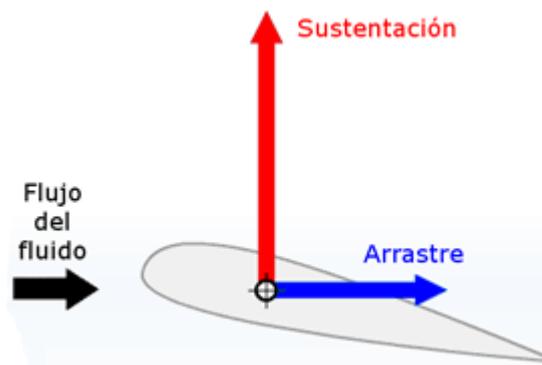


Ilustración 16: Descomposición de las fuerzas aerodinámicas

4.1. TIPO DE FLUJO

Para poner en contexto el funcionamiento y las características del flujo de aire, veremos primero la definición del tipo de flujo.

Para ello contamos con el número de Reynolds (Re) y el número de Mach (M).

4.1.1. MACH

Este valor adimensional nos pondrá en contexto para conocer qué tipo de estudio aerodinámico aplicar. En líneas generales, podemos clasificar la aerodinámica según el tipo de fluido, pudiendo encontrar aerodinámica compresible e incompresible.

Mach es el cociente entre la velocidad del flujo y la velocidad del sonido en el mismo fluido. Para un valor de $M < 0.3$ consideraremos el flujo incompresible. En nuestro caso, para velocidades inferiores a 100m/s (360km/h). Este es el régimen en el que se realizara el estudio. [8]

4.1.2. REYNOLDS

Este valor, adimensional, nos da información sobre el tipo de flujo de nuestro fluido. En nuestro caso, el aire.

Su valor viene dado por la siguiente formula:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad [\text{Ecu.1}] [8]$$

Donde:

- ρ : Indica la densidad del fluido en kg/m^3
- v : Indica la velocidad del fluido en m/s
- L : Indica la longitud característica en m
- μ : Indica la viscosidad dinámica del fluido en $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$

Este resultado está directamente relacionado con el tipo de flujo. Un Re considerado pequeño se asocia con un flujo laminar, donde las partículas seguirán un orden paralelo y ordenado como podemos observar en la ilustración 17

Laminar Flow

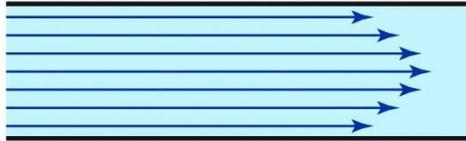


Ilustración 17: Líneas de corriente en un flujo laminar

Por el contrario, un flujo turbulento hará que las partículas del fluido sigan una trayectoria caótica como vemos en la ilustración 18.

Turbulent Flow

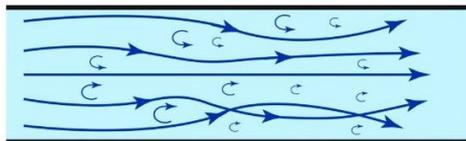


Ilustración 18: Líneas de corriente en un flujo turbulento

4.1.3. CAPA LÍMITE

La capa límite se define como aquella zona del fluido (Ilustración 19) que es perturbada por la interacción con un sólido, en nuestro caso el vehículo y el alerón. Esta zona, como cualquier fluido, puede ser lamiar o turbulenta, pero normalmente podemos observar como a lo largo de la interacción adquiere diferentes estados.

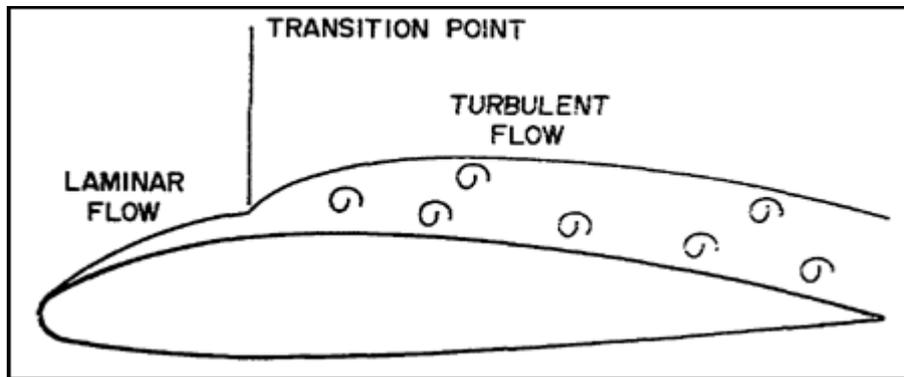


Ilustración 19: Capa límite a lo largo de un ala de avión [8]

Como podemos ver en la ilustración 19, las partículas más cercanas al sólido son las que sufren una mayor perturbación. Los flujos laminares en alas de avión, resultan más eficientes en aerodinámicamente, y lo ideal sería poder mantener durante el máximo tiempo posible este estado.

Por lo general, para una misma ala, a mayor ángulo de ataque obtendremos mayor régimen turbulento, generando una menor eficiencia aerodinámica.

En la capa límite laminar, las partículas más cercanas al sólido pierden energía, llegando a tener una velocidad relativa nula (o incluso negativa) generando el fenómeno conocido como desprendimiento de la capa límite representado en la Ilustración 20. Esto ocurre cuando las partículas del fluido dejan de seguir la forma del sólido y que nos generara una pérdida total de la sustentación a partir de ese punto, aumentando también la fuerza de arrastre debido a la diferencia de presiones.

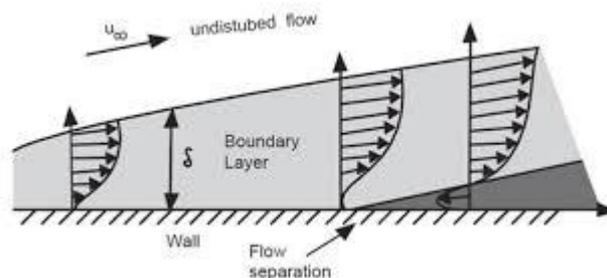


Ilustración 20: Representación teórica del desprendimiento de la capa límite [8]

En la capa límite turbulenta, por el contrario, este fenómeno es más difícil que ocurra debido al movimiento caótico de las partículas [9] Aunque este tipo de flujo sea menos eficiente debido a las pérdidas energéticas por una mayor fricción, nos puede interesar para evitar la pérdida total de la sustentación durante más tiempo.

4.2. GENERACIÓN DE LAS FUERZAS AERODINÁMICAS

En este apartado se expone que principios aerodinámicos son los que nos generan las fuerzas aerodinámicas. Entender su funcionamiento básico nos ayudará a entender la información proporcionada por el fabricante y podremos optimizar nuestro diseño para aprovechar al máximo el diseño del alerón.

En líneas generales tendremos dos componentes de fuerza aerodinámica, la componente de sustentación y la de arrastre, “lift” y “drag” si vemos su nomenclatura inglesa.

Y vienen definidas por las siguientes ecuaciones 2 y 3:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C_L \quad \text{[Ecu.2] [9]}$$

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C_D \quad \text{[Ecu.3] [9]}$$

Donde:

- ρ : Indica la densidad del fluido en kg/m^3
- v : Indica la velocidad del fluido en m/s
- A : Representa el área proyectada (frontal para F_D y de referencia para F_L) en m^2
- C_L : Es el coeficiente de sustentación (adimensional)
- C_D : Es el coeficiente de arrastre (adimensional)
- F_L : Fuerza de sustentación en N y que actúa perpendicular al fluido (Ilustración 21)
- F_D : Fuerza de arrastre en N y que actúa en línea con el fluido (Ilustración 21)

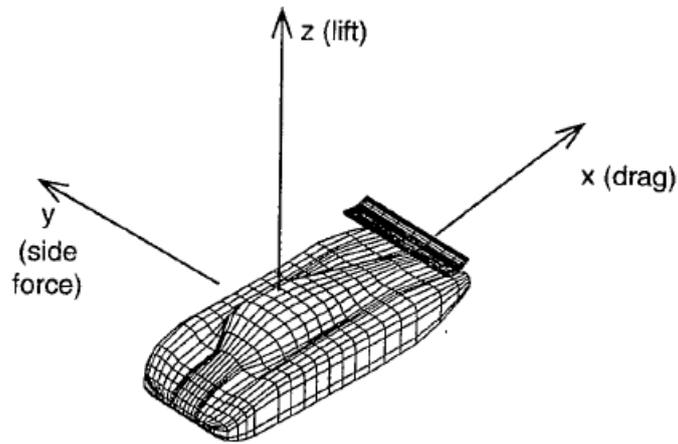


Ilustración 21: Distribución de las fuerzas aerodinámicas [9]

4.2.1. ECUACIÓN DE LA CONTINUIDAD

Esta está considerada la ecuación de la conservación de la energía en el ámbito aerodinámico.

Se debe tener en cuenta que esta se puede utilizar para aquellos fluidos considerados incompresibles. Este es nuestro caso como hemos visto en el capítulo 4.1 debido al resultado de número de Mach considerado.

La ecuación de la continuidad [Ecu.4] define que, dado un volumen de control, todo aquel volumen de fluido que entre en un intervalo de tiempo, es el que debe salir, cumpliendo con que el volumen de control albergará siempre masa constante de fluido. [8]. Como vemos en la ilustración 22, este volumen de entrada se define por la fórmula general de caudal masico (\dot{m}):

$$\dot{m}_{in} = A_{in} \cdot \rho_{in} \cdot v_{in} = A_{out} \cdot \rho_{out} \cdot v_{out} = \dot{m}_{out} \quad \text{[Ecu.4]}$$

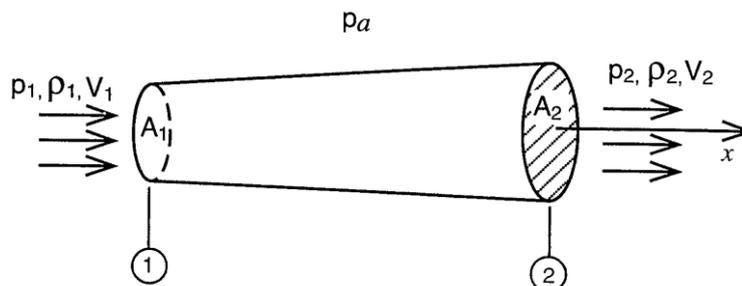


Ilustración 22: Esquema de volumen de control [8].

Siendo A el área de la sección de control, ρ la densidad del fluido y v la velocidad instantánea del fluido. Cabe destacar que esto debe cumplirse independientemente de la forma o recorrido que exista desde el punto 1 al punto 2.

4.2.2. ECUACIÓN DE BERNOULLI

La ecuación de Bernoulli es aquella que nos relacionará la diferencia de presiones a lo largo de una línea de flujo con la velocidad del fluido en dicho punto. De manera esquemática, podemos ver en la ilustración 23, como tenemos una tubería con una zona de menor sección.

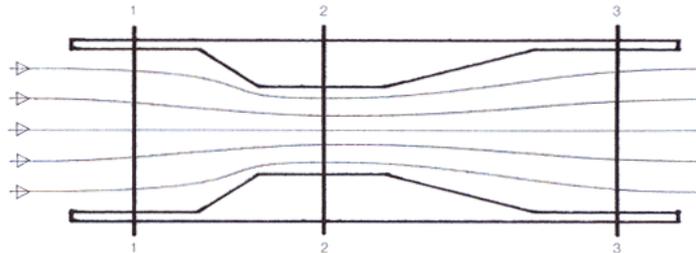


Ilustración 23: Tubería por la que circula un fluido.

El principio de Bernoulli en su forma básica nos define que, según la ecuación 5, la presión estática (p) y la presión dinámica ($\frac{1}{2}\rho v^2$) del fluido resultan en una constante. Donde rho (ρ) es la densidad del fluido y (v) representa la velocidad del fluido [8].

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{constante} \quad [\text{Ecu.5}]$$

Como ya hemos visto en el apartado anterior, el caudal masico entre la entrada y la salida será el mismo, por lo tanto, la velocidad será mayor en la zona 2 que en la 1 de la ilustración 23. Siguiendo el principio de Bernoulli, y siendo la densidad una constante, en la zona 2 de la ilustración tendremos una presión estática menor debido al aumento de la velocidad.

Conocer estos principios nos sirve para entender de forma básica el funcionamiento del alerón, donde encontraremos una entrada de fluido y una salida, que serán el inicio y final del mismo alerón.

Como vemos en la ilustración 24, unas líneas de fluido deben recorrer una mayor distancia para llegar al otro extremo del ala, mientras otras tienen un recorrido más corto. Aquellas partículas que deban recorrer una mayor distancia deberán aumentar su velocidad para mantener la ecuación de continuidad. Esta diferencia de velocidades entre la parte superior y la inferior del alerón es la que generará una diferencia de presiones (ilustración 25), generando una fuerza de anti-sustentación o downforce.

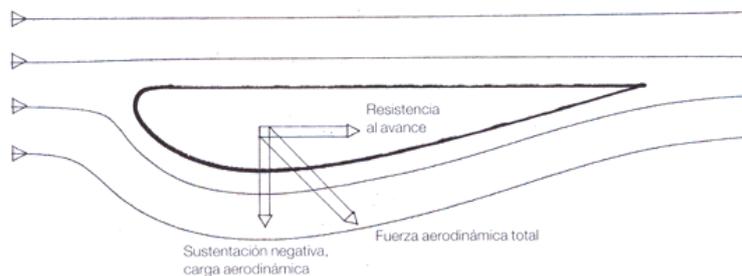


Ilustración 24: Representación de las líneas de fluido a lo largo del alerón. [8].

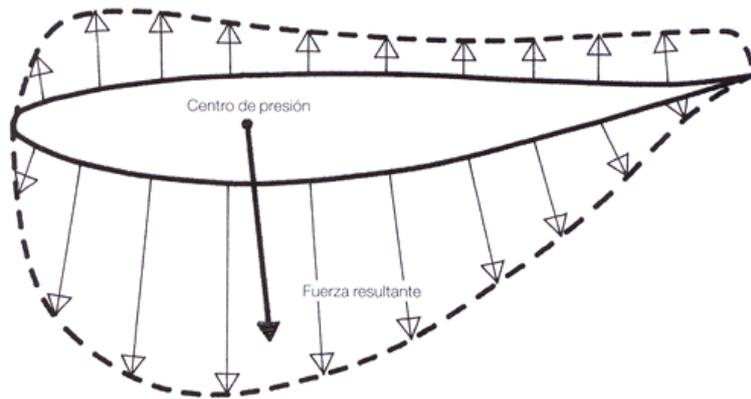


Ilustración 25: Representación de la distribución de presiones alrededor de un ala [8].

4.2.3. COEFICIENTES AERODINAMICOS

Los coeficientes aerodinámicos, son valores adimensionales relacionados con la facilidad o dificultad de un cuerpo para avanzar por un fluido. Este valor, como vemos en las fórmulas 2 y 3, servirá para calcular la fuerza ejercida por la carga aerodinámica.

Al ser característico de cada geometría, se obtiene de forma experimental. El túnel de viento o las simulaciones CFD (Computational Fluid Dynamics) son los métodos más comunes para su obtención. A pesar de ello, existen tablas recopilatorias de diferentes geometrías básicas que pueden ayudar a la estimación de diferentes situaciones de diseño.

Tabla 2: Coeficientes de arrastre básicos [8].

Shape	Drag Coefficient
Sphere → ○	0.47
Halfsphere → ◐	0.42
Cone → ◁	0.50
Cube → □	1.05
Angled Cube → ◊	0.80

Como podemos ver en la tabla 2, pequeñas diferencias en la geometría pueden significar un gran cambio, por ello, para el caso de alerones o vehículos, será necesario utilizar alguna de las técnicas anteriores para su obtención. En nuestro caso, la simulación CFD ha sido el método usado por la empresa APR Performance, fabricante del alerón de referencia escogido, y que estudiaremos en el capítulo 4.3.3.

En el caso del estudio de un alerón, un concepto necesario para la interpretación de su funcionamiento es la eficiencia aerodinámica, definida por el cociente entre los coeficientes aerodinámicos que podemos ver en la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia aerodinámica} = \frac{C_L}{C_D} \quad \text{[Ecu.6]} \quad [9]$$

Debido a los cambios del ángulo de ataque, un mismo alerón tendrá diferentes eficiencias aerodinámicas [Ecu.6] según el montaje estudiado.

La situación más eficiente será aquella con la que se genere una mayor sustentación con una menor fuerza de arrastre. Esto ayuda a decidir, qué ángulos de ataque son más interesantes en cada situación.

4.3. SIMULACIÓN AERODINÁMICA CFD

Este capítulo recogerá el funcionamiento de las simulaciones CFD, así como el estudio de la circulación del fluido en nuestro vehículo para el que se ha utilizado el módulo de simulación de fluidos de SOLIDWORKS Flow Simulation [10]. El objetivo de esta simulación será determinar qué posición será óptima para la colocación de nuestro alerón, así como entender la información proporcionada por el fabricante del mismo.

Para ello se ha modelado mediante el programa SOLIDWORKS, un modelo a tamaño real la forma básica de nuestro vehículo a través de unos planos 2D, como podemos ver en las siguientes ilustraciones. En la ilustración 26 se muestran las imágenes del coche [10] situadas en los planos correspondientes. Creando un croquis resiguiendo la forma del vehículo, se realiza una primera extrusión, que al recortarse con el resto de perfiles, crea una forma básica de cómo es el vehículo. En la ilustración 27 se muestra el resultado del esbozo 3D.

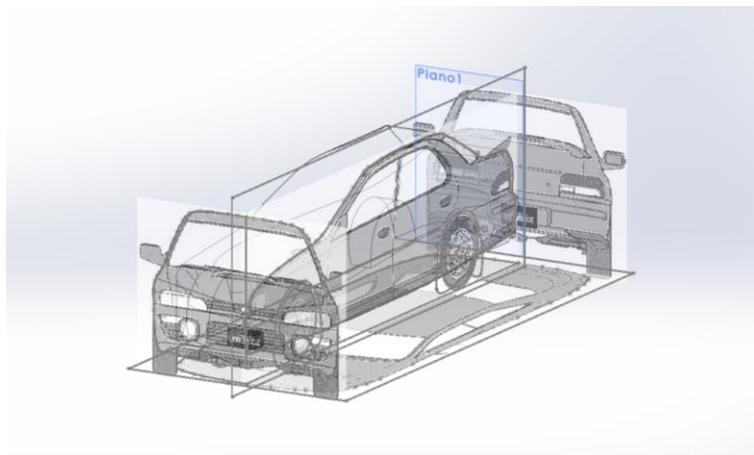


Ilustración 26: Croquis inicial para el modelado[11]

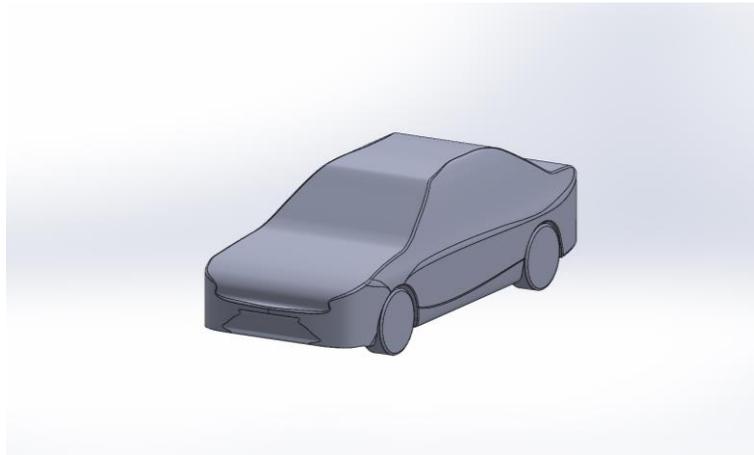


Ilustración 27: Modelado del vehículo

Este modelo se sitúa sobre una superficie que representa el pavimento sobre el que circula, este deberá alcanzar toda el área de estudio como se muestra en la ilustración 28, y se simulará bajo las condiciones de la tabla 3.

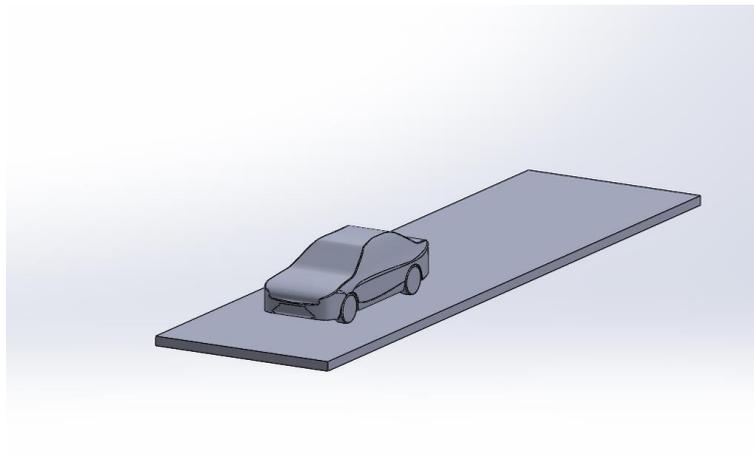


Ilustración 28: Modelo sobre una superficie

Tabla 3: Condiciones iniciales para el estudio

Tipo de análisis	Externo sin cavidades
Tipo de flujo	Laminar y turbulento
Fluido	Aire
Presión	101325 Pa (1 atm)
Temperatura	293,2K (20°C)
Velocidades	14/28/44/71 m/s

4.3.1. ZONA DE ESTUDIO Y MALLADO

Para las simulaciones aerodinámicas más completas, debemos determinar una zona de estudio. Esta recogerá aquella zona por la que queramos estudiar el paso del fluido, así como las zonas solidas con las que interactuará. En el caso de flujos exteriores, añadiremos márgenes con el objetivo de que veamos la interacción completa del fluido. Unos márgenes correctos nos permitirán ver tanto el flujo perturbado por nuestro objeto como aquel que no ha sido prácticamente afectado. En la ilustración 29 se aprecia el área de estudio, así como la función de simetría para optimizar el tiempo de simulación

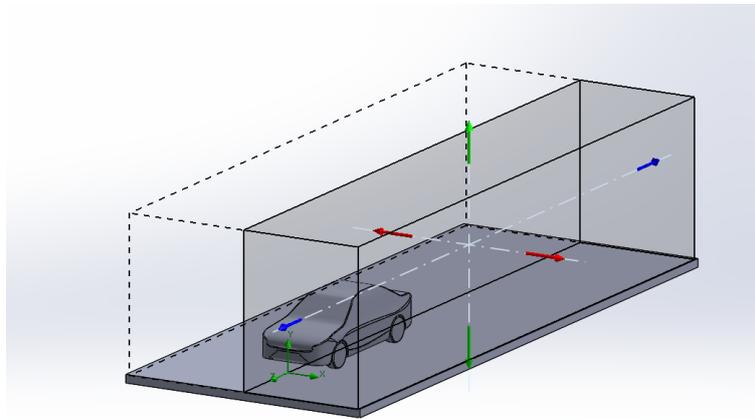


Ilustración 29: Área de estudio con simetría

El software de simulación distingue entre el estudio referido a las zonas de fluido, y el estudio de las zonas solidas [10] Este proyecto se centra en los estudios referentes a las zonas de fluido, ya que el estudio de las zonas solidas está relacionado con parámetros que no son de nuestro interés, como puede ser las transferencias térmicas o la corriente eléctrica.

Para ello se realiza un estudio basado en elementos finitos, un mallado de la zona de estudio que ya hemos definido, determinará los nodos donde se calcula la solución exacta del comportamiento del fluido. Por lo tanto, la precisión del mallado tendrá mucha importancia en la precisión del estudio. En la ilustración 30 vemos este proceso de la generación de nodos, y en la ilustración 31 vemos como tenemos la posibilidad de refinar el mallado cercano a elementos de nuestro modelo. Esto es importante porque, como vemos también en la ilustración 30, nuestro modelo CAD no tendrá importancia en la simulación CFD, y considerará únicamente el mallado.

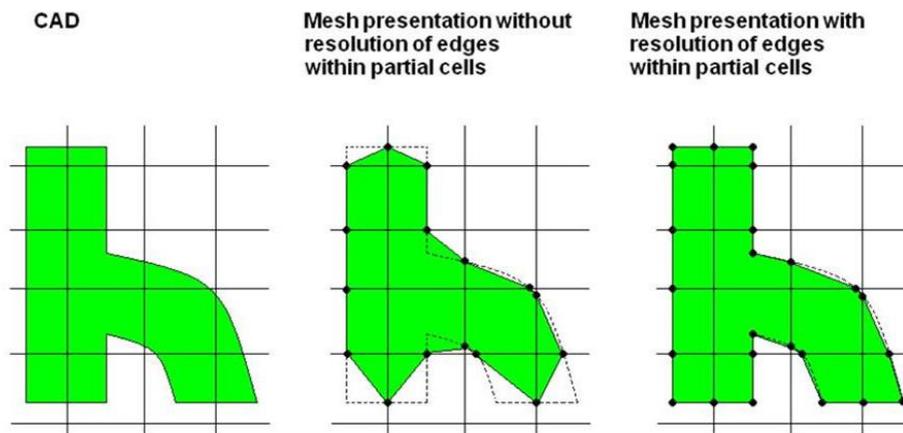


Ilustración 30: Proceso de generación de nodos [10]

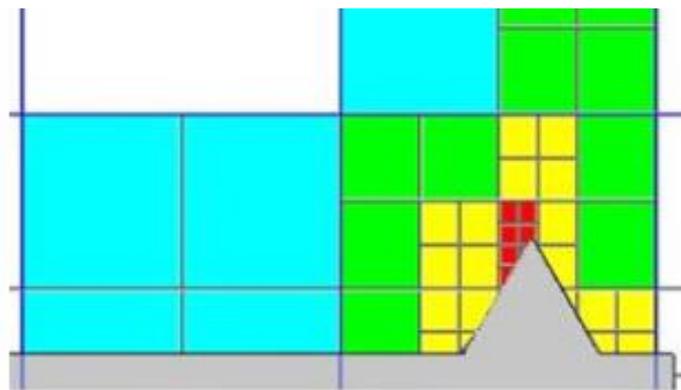


Ilustración 31: Refinamiento de la malla [10]

Por esta razón es tan importante el mallado y encontrar aquel que mejor se adapte a nuestras necesidades. Para encontrar una precisión en el mallado entorno a nuestro sólido y poder conservar la geometría, podemos hacer uso del refinado de mallado en contacto con el sólido (Ilustración 32), esto hará que aumente la precisión entorno a nuestro sólido sin afectar las celdas más lejanas, agilizando así el cálculo en esas zonas.

Este refinado se mide por niveles, donde cada nivel de refinamiento significará una división del anterior nivel en cuatro celdas que rellenan el nivel anterior, siendo el nivel más preciso aquel que estará en contacto con el sólido.

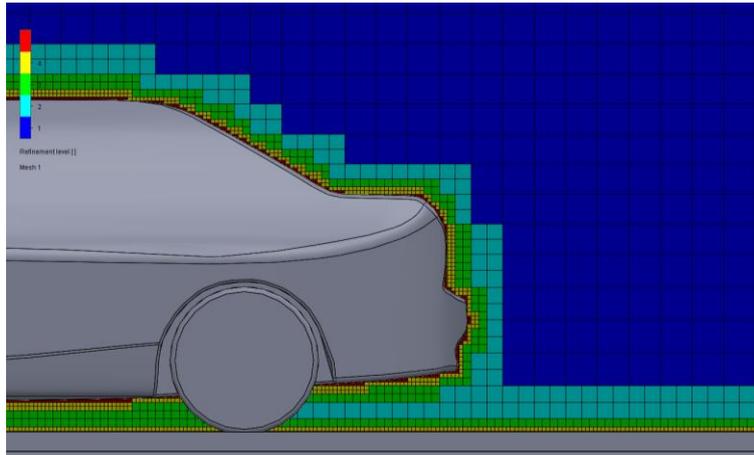


Ilustración 32: Malla refinada en las zonas de contacto

Para determinar el mallado que se utilizará, se preparan cinco estudios con diferentes grados de refinamiento que se compararán entre ellos. Como podemos ver en la tabla 4, los resultados de velocidad en los puntos de control de los diferentes estudios, se estabilizan mientras aumenta la precisión del mallado. En el punto de control seleccionado (punto de control 2 en la tabla 4) y que veremos su posición en el capítulo 4.3.2, vemos como la velocidad se estabiliza en valores cercanos a 12.7 m/s.

Tabla 4: Diferentes mallados y resultados

	Mallado 1	Mallado 2	Mallado 3	Mallado 4	Mallado 5
Celdas totales	82.443	283.350	813.530	1.005.049	1.421.811
Celdas en contacto	3.609	91.198	184.566	365.632	633.481
Tiempo Mallado	10 s	23 s	58 s	1 min 30 s	3 min
Tiempo Simulación	5 min	15 min	40 min	1 hora 16 min	1 hora 50 min
Usabilidad del PC	Total	Total	Comodo	Aceptable	Alerta
V punto de control 1	15,06 m/s	14,68 m/s	14,78 m/s	14,20 m/s	13,70 m/s
V punto de control 2	14,07 m/s	13,96 m/s	13,96 m/s	12,71 m/s	12,70 m/s
Vy punto de control 1	-3,85 m/s	-2,89 m/s	-2,61 m/s	-2,25 m/s	-2,18 m/s
Vy punto de control 2	-3,96 m/s	-2,85 m/s	-2,60 m/s	-1,93 m/s	-1,96 m/s
Vz punto de control 1	-14,56 m/s	-14,40 m/s	-14,56 m/s	-14,03 m/s	-13,60 m/s
Vz punto de control 2	-14,23 m/s	-13,66 m/s	-13,71 m/s	-12,58 m/s	-12,54 m/s

En la ilustración 33 vemos los diferentes patrones de velocidad, y como se estabilizan los resultados a partir del “Mallado 4” al que hace referencia la tabla 4. Este será el utilizado finalmente en las próximas simulaciones, ya que se aprecia una estabilización de los valores de control a partir de este nivel de detalle, y se considera valido para nuestros objetivos evitando consumir excesivo tiempo.

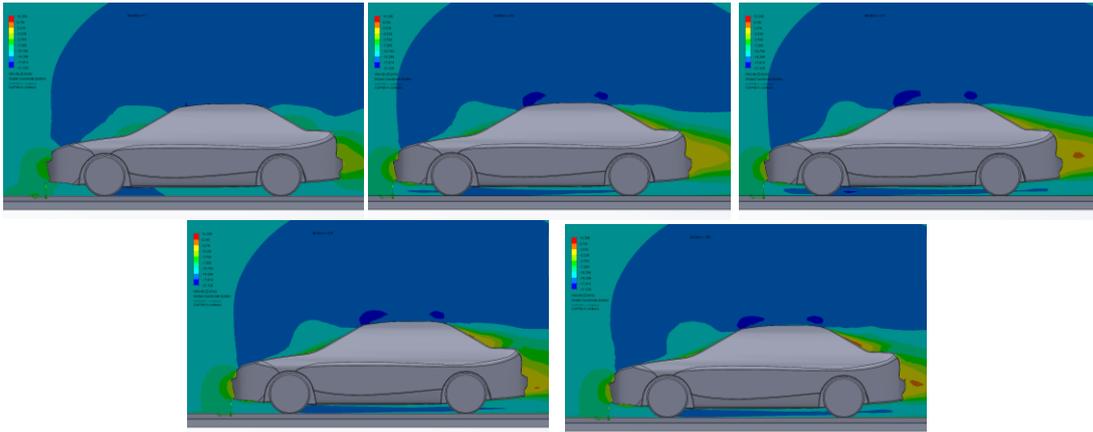


Ilustración 33: Patrones de velocidad resultantes para diferentes mallados

4.3.2. MÉTODO DE CÁLCULO CFD

Para la resolución de la simulación en la región del fluido, el programa resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes [10], un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales de conservación de la masa, momento y energía, utilizadas en fluidos newtonianos o de viscosidad constante.

Estas ecuaciones mostradas a continuación [Ecu. 7-10], son resueltas de manera iterativa.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad [\text{Ecu.7}]$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad [\text{Ecu.8}]$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i \right) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \epsilon + S_i u_i + Q_H \quad [\text{Ecu.9}]$$

$$H = h + \frac{u^2}{2} \quad [\text{Ecu.10}]$$

Para determinar completamente el fluido, se utiliza el modelo modificado de $k-\epsilon$ [10] que consigue determinar los flujos laminares, turbulentos y de transición.

Con el flujo totalmente definido, tendremos varias herramientas para analizar el resultado. Este proyecto nos mostrará de manera gráfica las diferentes velocidades en la dirección de avance del fluido, y junto al análisis puntual, donde podremos ver todos los parámetros de la velocidad y presión, escogeremos la posición óptima donde situar nuestro alerón.

Como vemos en la ilustración 34, el flujo de aire se separa del coche debido a la poca progresividad en la curva de esta zona, dejando una estela de velocidades bajas y remolinos. Estas zonas no son apropiadas para un alerón ya que el flujo de aire no es estable y aquellos estudios realizados por el fabricante [12] no nos servirían de referencia.

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición

Jaume Molero Clotet

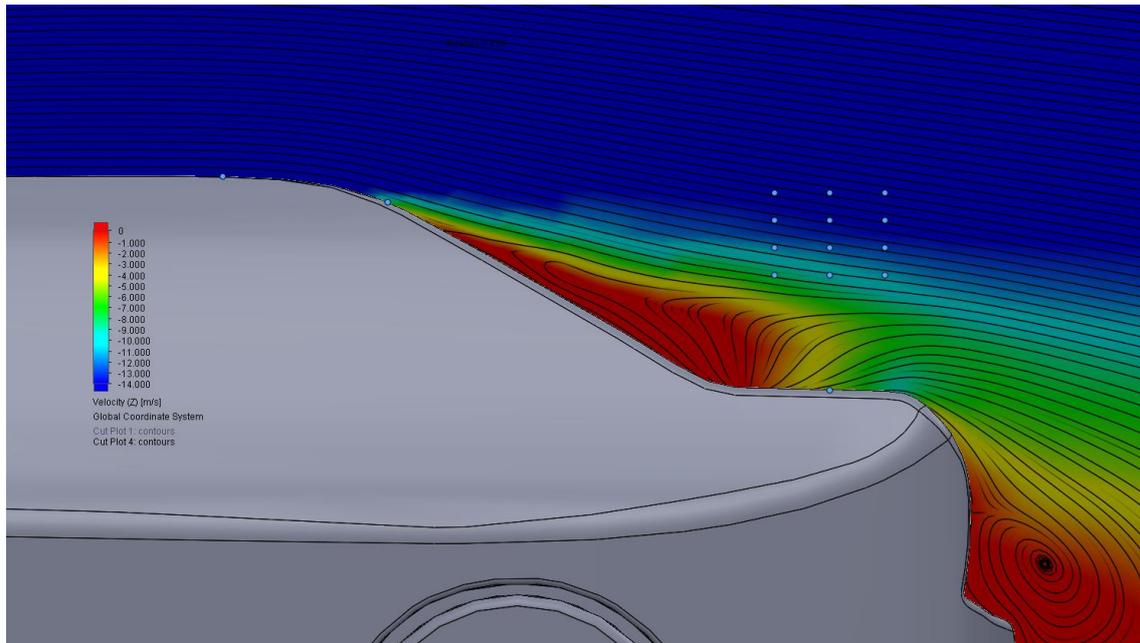


Ilustración 34: Sección del flujo representando la velocidad y dirección del flujo

Tomaremos de referencia la velocidad de 14 m/s para el análisis de los puntos que vemos en la ilustración 34. Para esta velocidad, la separación del flujo ocurre antes, dejando zonas de baja presión dinámica representadas en la ilustración 35.

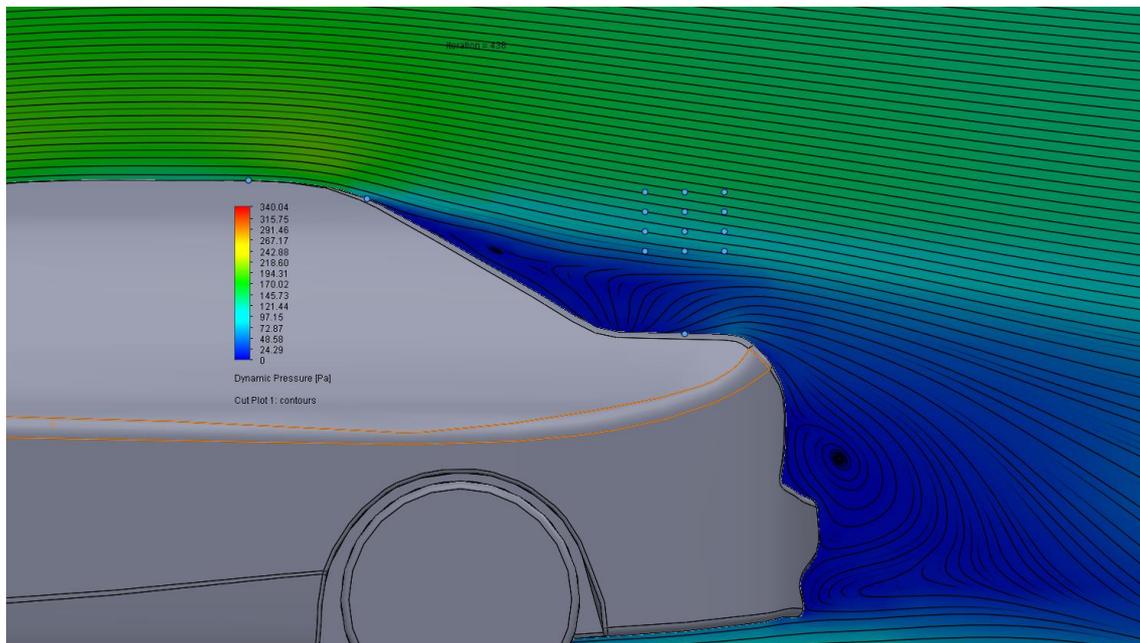


Ilustración 35: Distribución de la presión dinámica del aire

Los resultados de las simulaciones muestran que, para todas las velocidades estudiadas, la posición óptima para el posicionamiento del alerón está 80mm por debajo del techo del coche, y a 180mm del vértice del maletero. Que en las ilustraciones 34 y 35 corresponde al segundo punto más alto de la columna central.

4.3.3. CARGA AERODINÁMICA GENERADA POR EL ALERÓN

La carga aerodinámica entendida como la fuerza de anti-sustentación que genera un alerón, será la otra condición de contorno para realizar nuestro diseño del soporte.

El fabricante APRperformance está especializado en la fabricación de elementos aerodinámicos para su uso en competición, en su página web [13] proporciona una documentación extensa y detallada sobre los alerones que fabrican. [12] Este apartado analizará la información disponible para el modelo GTC-500, cuyo perfil alar podemos ver en la ilustración 36.

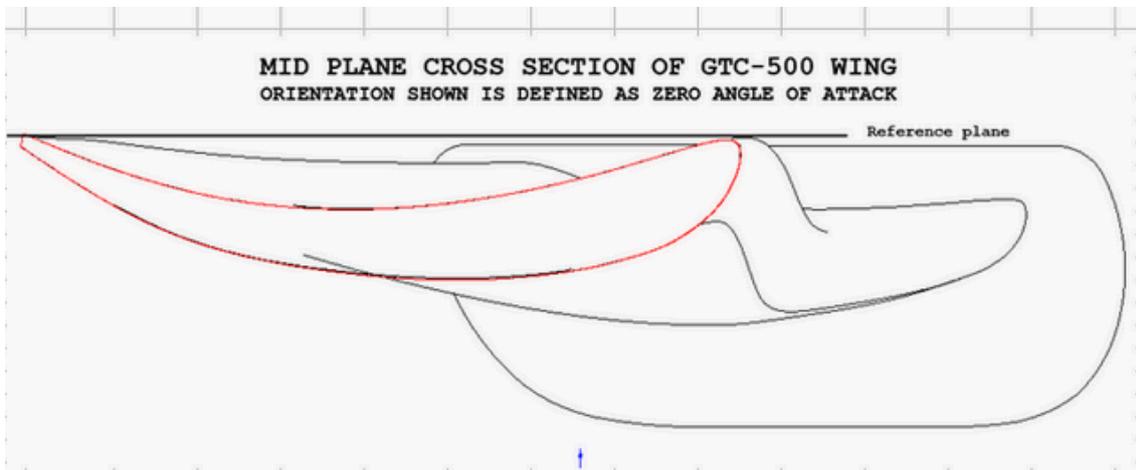


Ilustración 36: Perfil alar del alerón[12]

El GTC-500 es el modelo de un solo elemento que mayor carga aerodinámica genera de su catálogo. Mide 1803 mm de envergadura lo que le da una mayor superficie con la que generar fuerza.

Se ha escogido un modelo de un solo elemento, siendo el ángulo de ataque (AOA) principal su única variable, ya que será más fácil su configuración en circuito, ofreciendo una gran carga aerodinámica.

En los gráficos 1 y 2 vemos los datos recogidos en el estudio [12] del fabricante APR Performance, exponiendo la fuerza downforce y drag respectivamente, en relación a la velocidad del vehículo para cada AOA estudiado.

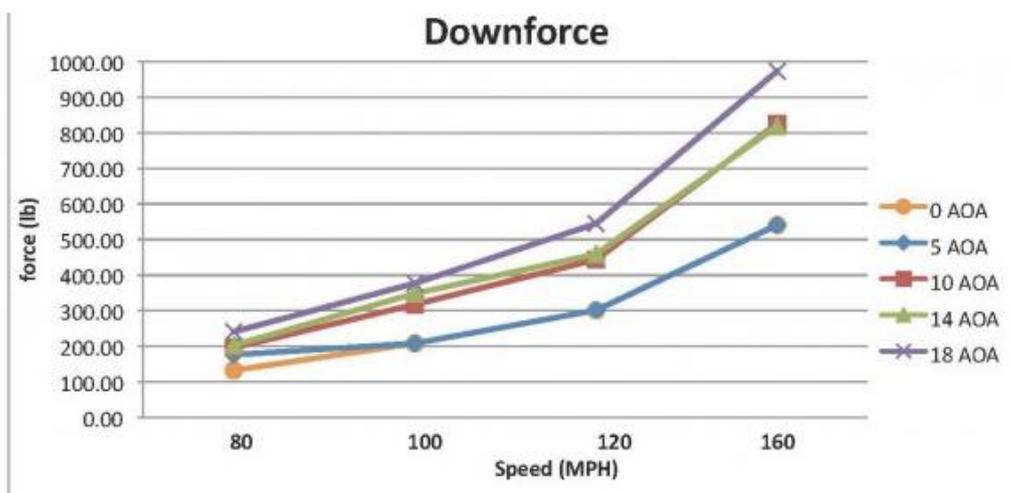


Gráfico 1: Valor de la fuerza downforce en las diferentes configuraciones del AOA

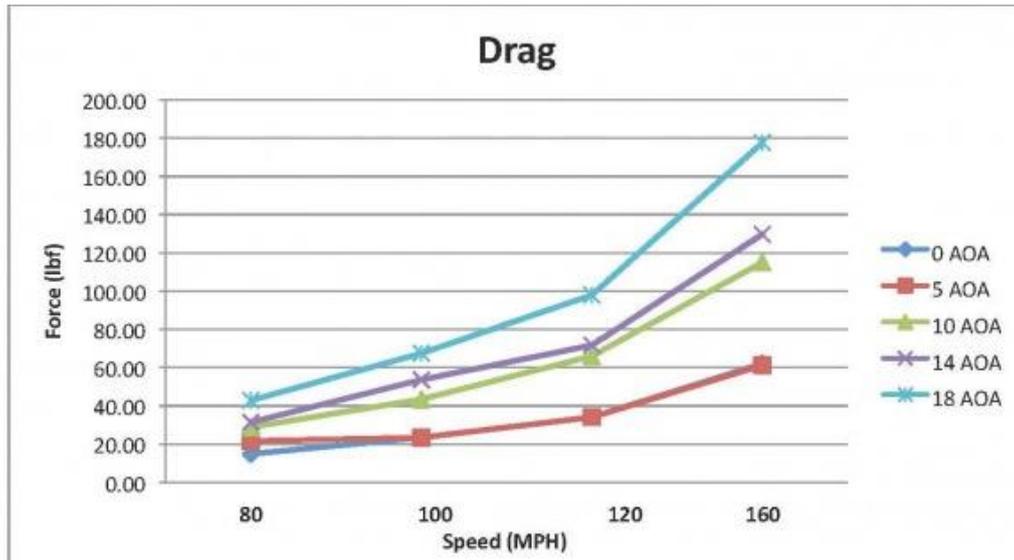


Gráfico 2: Valor de la fuerza drag en las diferentes configuraciones del AOA

Estos gráficos son de vital importancia en cuanto al ajuste de la posición para cada circuito, donde se tendrá en cuenta, por ejemplo, donde es necesaria una mayor carga aerodinámica para reducir las distancias de frenado, en el caso de un circuito con drásticos cambios de velocidad; y donde puede ser interesante prescindir de la misma para tener una mejor velocidad punta, aprovechando la potencia máxima de cada relación engranada. [13]

La eficiencia aerodinámica, resultante de la relación entre las dos graficas anteriores, la podemos ver en el gráfico 3.

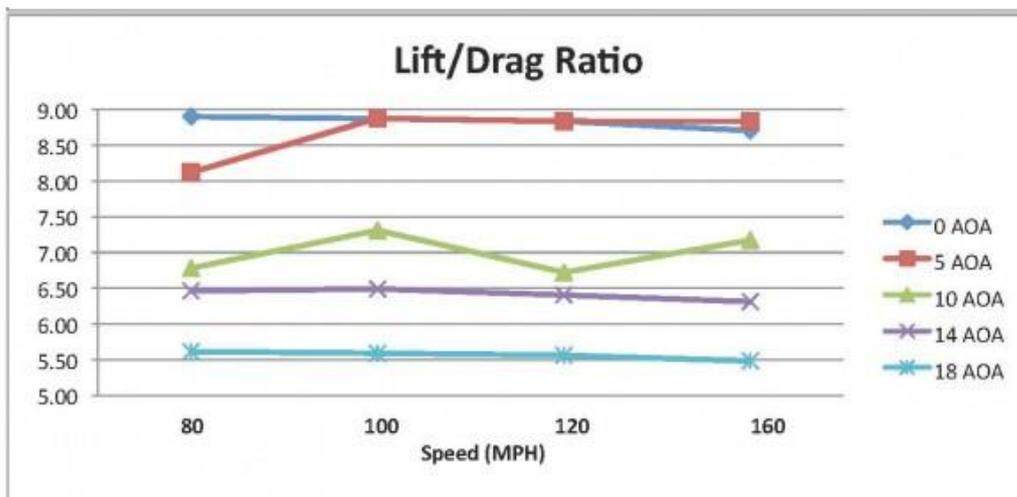


Gráfico 3: Relación de la eficiencia aerodinámica y la velocidad para cada AOA

Tabla 5: Resultados del estudio CFD proporcionado por APR Performance. [12]

APR WING CFD DATA PROFILE: APRO08 UPDATED GTC500 2014.7.1
All values are pound force (lbf)
Fz = Lift Fx = Drag L/D = Lift/Drag ratio
Positive Fz values are downforce

Prepared by: AMB Aero

AOA	Fz	Fx	L/D	Speed
0	132.44	14.88	8.90	80
0	208.07	23.45	8.87	100
0	301.29	34.10	8.84	120
0	540.71	62.11	8.71	160
5	176.15	21.69	8.12	80
5	208.17	23.45	8.88	100
5	301.41	34.11	8.84	120
5	541.03	61.23	8.84	160
10	195.79	28.87	6.78	80
10	317.70	43.46	7.31	100
10	443.65	66.00	6.72	120
10	825.05	115.02	7.17	160
14	202.93	31.40	6.46	80
14	348.38	53.67	6.49	100
14	459.24	71.70	6.41	120
14	818.94	129.75	6.31	160
18	240.79	42.89	5.61	80
18	377.22	67.47	5.59	100
18	544.76	97.94	5.56	120
18	973.43	177.54	5.48	160

Por último, en la tabla 5 se resume la combinación de los anteriores gráficos cuyos valores están representados en lbf y mph. Los factores de conversión a N y m/s son los siguientes:

- 1 lbf \equiv 4,448 N
- 1 mph \equiv 0,447 m/s

De esta se extrae que las cargas aerodinámicas máximas estudiadas son de 973,43 lbf (4330N) para la fuerza de anti-sustentación (F_L), y de 177,54 lbf (789,7N) para la fuerza de arrastre (F_D). Estas serán las condiciones de contorno de referencia para nuestro diseño.

5. DISEÑO Y SIMULACIÓN

En este capítulo, pondremos en conjunto todas las condiciones para el diseño que se han determinado en los anteriores capítulos. Teniendo también en cuenta las directrices de la Federación Internacional del Automóvil (FIA).

La FIA es la organización reguladora más presente en el mundo de la competición, regula y da directrices respecto a que tipos de elementos pueden montarse en un vehículo para mejorar sus prestaciones, así como su seguridad y dimensiones. [14]

Para el caso de este proyecto, el que se plantea competir en categorías recreacionales como puede ser "Hill Climb". Según el apéndice 7 de regulación técnica de esta categoría [15], nuestro diseño deberá cumplir las dimensiones y especificaciones generales del apartado de carrocería, no tener ningún grado de libertad y estar inmóvil respecto al chasis del vehículo.

Usando el programa SOLIDWORKS se preparará un conjunto donde podamos visualizar el escaneado del fondo del maletero, que se tomará de referencia para dimensionar la estructura. También se simulará la estructura, con el objetivo de seleccionar el material más adecuado disponible del catálogo del proveedor, consiguiendo la mínima deflexión posible y conservando una estructura lo más ligera posible.

5.1. DISEÑO

En la ilustración 37 se muestra el escaneado con diferentes planos. Estos representan el fondo del maletero, el punto más bajo del coche y el plano del techo del vehículo respectivamente, que se han situado según las cotas tomadas en el capítulo 2.2.1, también se modela un esbozo del alerón con sus soportes, y se sitúa en la posición escogida según el capítulo 4.3.2.

Con estas referencias, queda limitado el espacio de trabajo y se diseña una estructura conociendo las limitaciones del montaje.

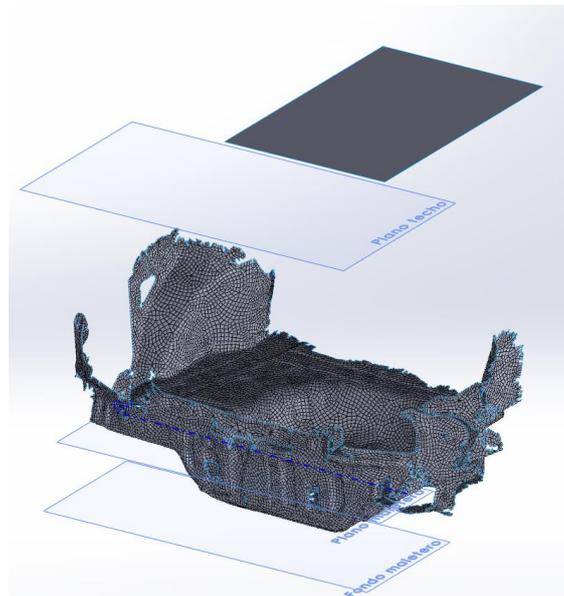


Ilustración 37: Escaneo con referencias para el diseño

Se sitúan también las dimensiones tomadas en el capítulo 2.2.1, que como podemos ver en la ilustración 38, constan de las distancias que no es posible extraer del escaneado, como puede ser la altura del portón del maletero de 490 mm, cota hasta la cual la estructura no puede curvarse para no interferir con la chapa interior del maletero; o la posición del alerón determinada en el capítulo 4.3.2.

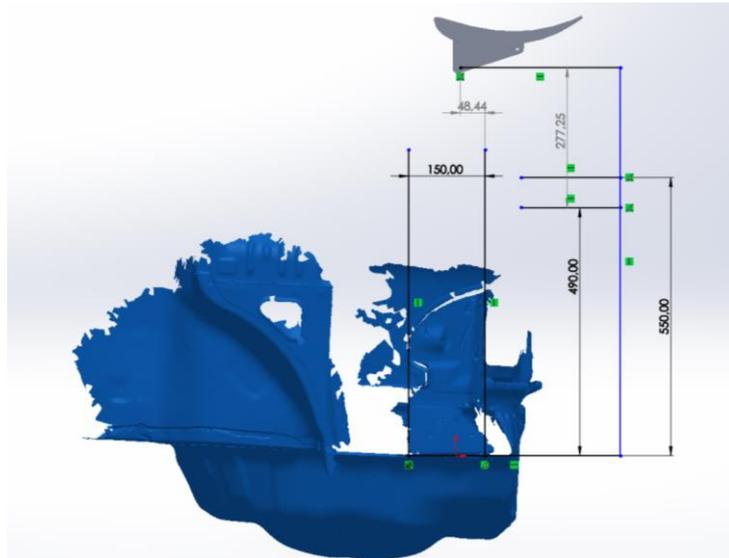


Ilustración 38: Esquema de diseño

En base a estos parámetros se diseña una estructura inicial con las condiciones de contorno y la funcionalidad que el alerón debe de tener, como es el poder regular el ángulo de ataque del alerón. Y para encontrar el diseño final seguiremos el diagrama de flujo mostrado en la ilustración 39, con el objetivo de definir un diseño valido para nuestros objetivos.

Una vez definamos un diseño como valido, llevaremos este a un estudio de optimización topológica con el objetivo de reducir su masa sin comprometer la estructura ya validada.

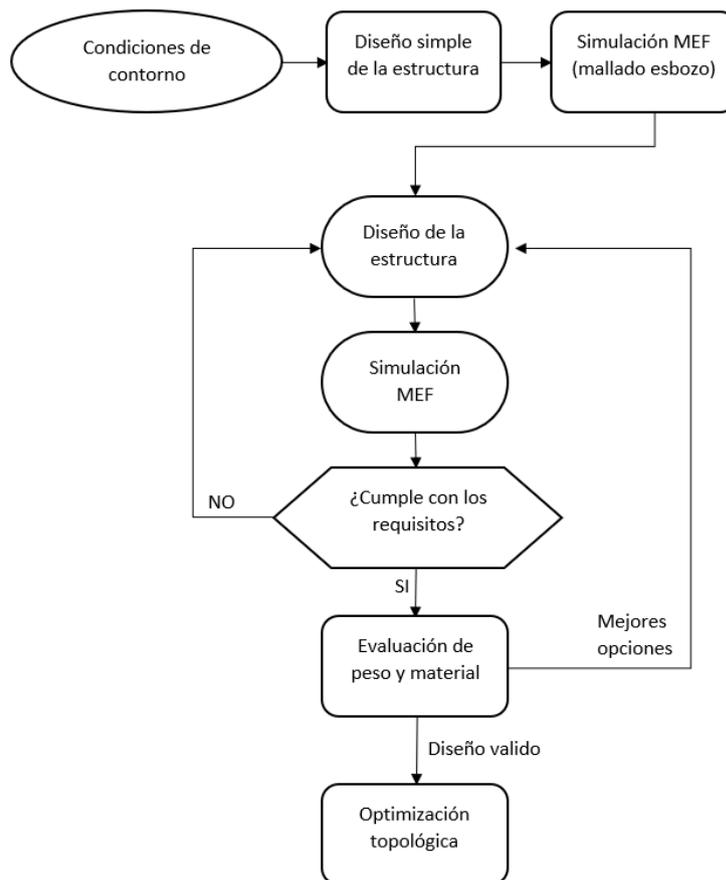


Ilustración 39: Diagrama de flujo

5.1.1. DISEÑO INICIAL

Para poder anclar el alerón al chasis del coche, se necesita de una escuadra (Ilustración 40), es la pieza que unirá el chasis del coche con el resto de la estructura. Esta se propone realizarla en acero inoxidable AISI 304 de un grosor de 5mm. Como diseño inicial se mantiene el mismo material y grosor para todas las piezas. En los siguientes capítulos veremos las cargas que tienen que soportar estas piezas, y evaluaremos los resultados para ver cuáles son las más demandadas y si nuestra elección de material y grosor, cumple con nuestros objetivos, modificando estos para llegar al diseño final.

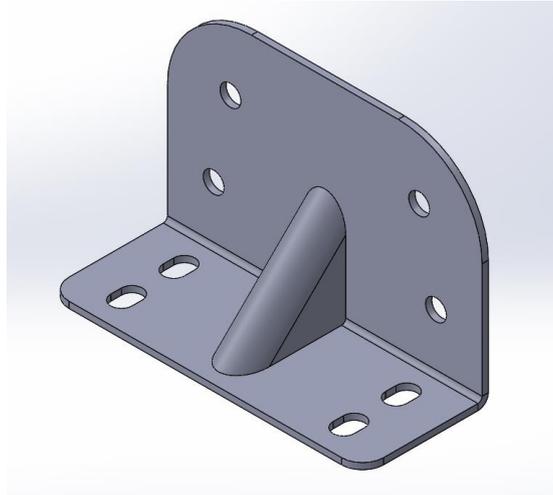


Ilustración 40: Escuadra para montaje de las columnas

En esta escuadra se montarán las columnas (Ilustración 41) que conectan directamente con el alerón y serán las encargadas de transmitir las fuerzas generadas por este hacia nuestro vehículo.

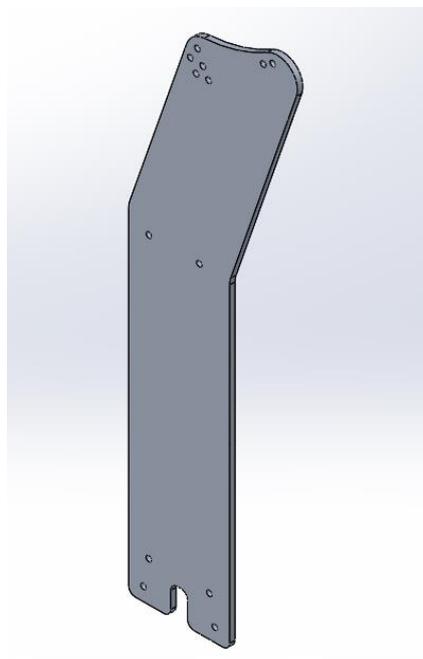


Ilustración 41: Columna de soporte del alerón

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición
Jaume Molero Clotet

Al ser una estructura alta fabricada en chapa que soportará grandes cargas, la flexión en la dirección X es excesiva, debido a su reducido momento de inercia en el eje Z en este caso [16]. Se ha realizado un esbozo de simulación para ilustrar este hecho en la Ilustración 42. Aplicando unas cargas hasta 10 veces inferiores a nuestra condición de contorno, la deflexión en su punto máximo es de 88,6 mm.

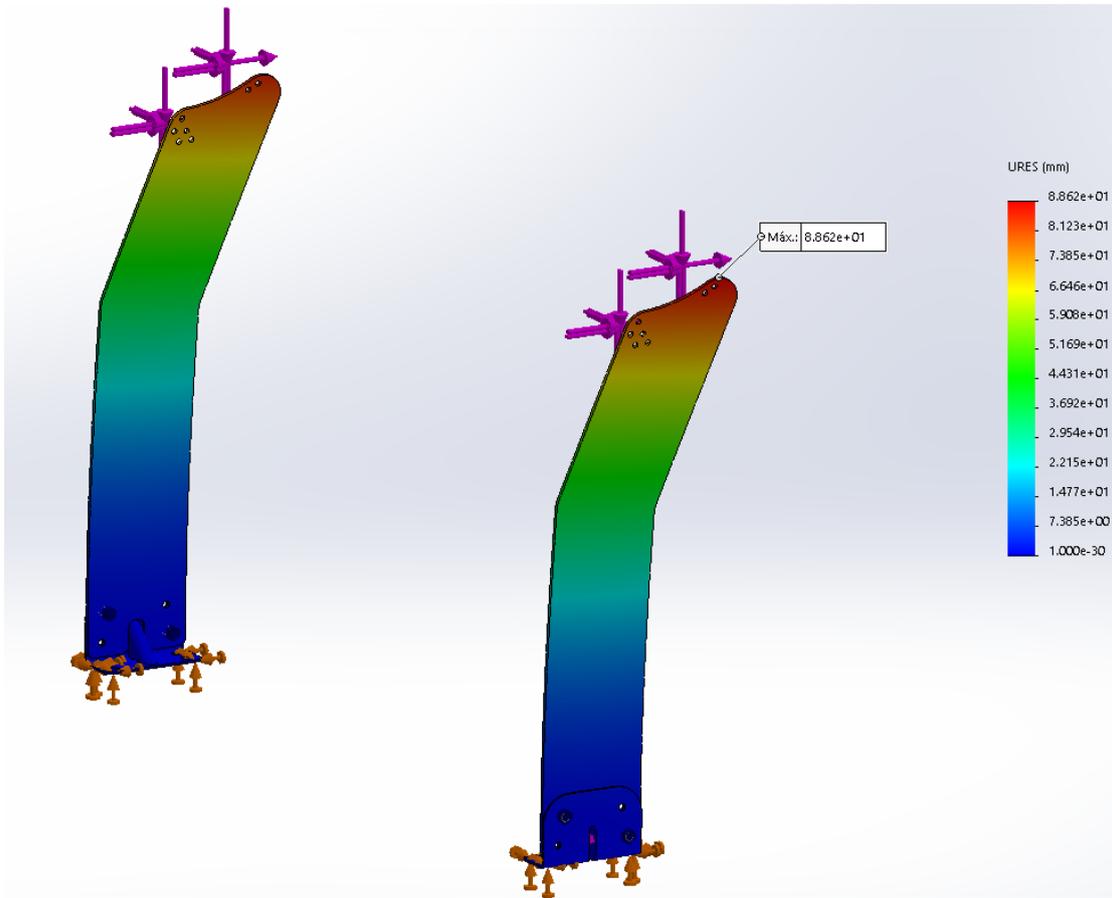


Ilustración 42: Esbozo sin estructura de cruz

Por esta razón, se realiza el conjunto de tres piezas que podemos ver en la ilustración 43, que unidas entre ellas forman una cruz que sujeta la base y la zona media de las columnas. Se consigue el objetivo de reducir el voladizo de estas y evitar una flecha excesiva en la parte superior debida los desplazamientos a lo largo de la columna.

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición
Jaume Molero Clotet

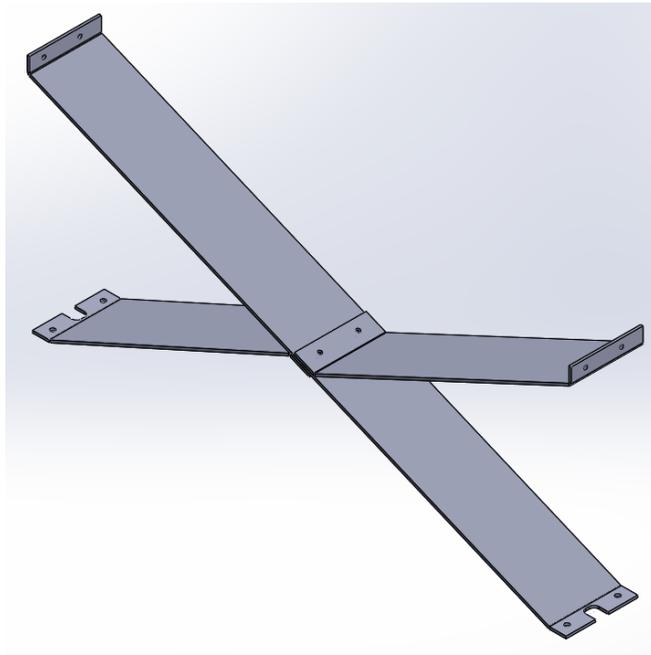


Ilustración 43: Subconjunto de soportes tipo cruz

Este (Ilustración 44) será nuestro conjunto inicial ensamblado. Lo uniremos con pernos de acero según el estandar DIN 933 [20] M8x1,25 calidad 8.8.

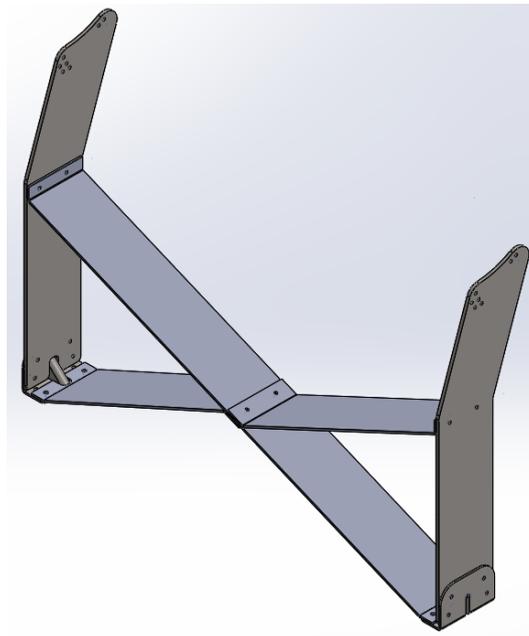


Ilustración 44: Piezas del conjunto ensambladas

5.2. SIMULACIÓN

Para las simulaciones estáticas que realizaremos, se hará uso del módulo de simulación de SOLIDWORKS. Estas simulaciones estáticas por el método de elementos finitos (MEF), tras definir los parámetros necesarios y realizar un mallado de la pieza, calculan los valores de fuerzas transmitidas entre elementos, teniendo estos un equilibrio entre fuerzas internas y externas [19], y llevando a cada elemento y al conjunto final a un equilibrio estático.

Para la simulación, deberemos definir los siguientes elementos:

- Solver: En este caso y para todo el estudio, utilizaremos el solver FFEPlus por su eficacia en problemas grandes. [19]
- Material: SOLIDWORKS tiene un catálogo de materiales definido, aunque también es posible generar un material personalizado si fuera necesario.
- Mallado: Como en el capítulo 4.3.1, el tamaño de la malla será esencial para la precisión del estudio MEF. Es posible escoger diferentes tipos de mallado según nuestro interés, en este caso se realiza un mallado basado en curvatura. Este disminuye de forma automática el tamaño de los elementos en las zonas singulares como ángulos o curvas.
- Sujeciones: Estas nos permiten definir en este caso, donde se ancla el alerón y, por lo tanto, donde no existirá desplazamiento.
- Cargas externas: Estas serán aquellas cargas externas que afectarán nuestro sólido.

Esta simulación, además de las cargas generadas por el alerón ya definidas en el capítulo 4.3.3, tiene en cuenta que para situaciones en las que el viento lateral sea elevado, las fuerzas generadas por este pueden llegar a tener la misma magnitud que el de las fuerzas de arrastre [9] Esta será la situación más desfavorable para nuestra estructura.

Para definir las cargas que actuarán directamente en nuestra estructura, se prepara una simulación de las cargas en el alerón (Ilustración 45) y se extraen las reacciones que actuarán en los pernos de conexión. Se pueden ver estos valores en la ilustración 46.

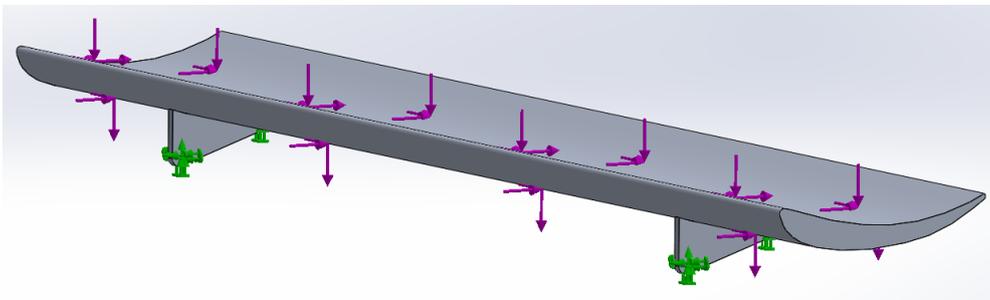


Ilustración 45: Estudio de reacciones

Estas cargas representadas en la Ilustración 45 tienen los siguientes valores:

- Downforce: 4430 N
- Drag: 790 N
- Lateral force: 790 N

Y que a través de la simulación del elemento, obtendremos los valores de reacciones de la Ilustración 46.

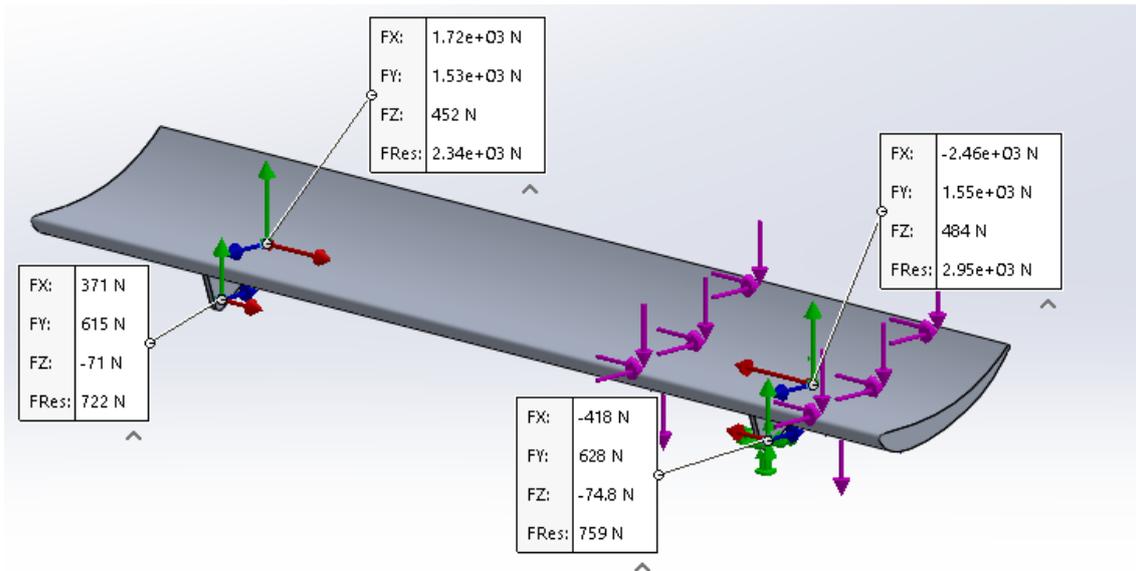


Ilustración 46: Resultado de reacciones para la posición 18º AOA

Estas reacciones cambiadas de signo, serán las fuerzas que este soportando nuestra estructura, y serán válidas para cualquiera de las simulaciones que queramos realizar desde este punto.

5.2.1. SIMULACIÓN DEL DISEÑO INICIAL

Para las simulaciones de ensamblajes, además de las definiciones ya definidas en el capítulo 5.2, deberemos definir dos parámetros:

- Conectores: Son aquellos que nos definen como interactúan nuestras piezas entre ellas, en nuestro caso se limitan a pernos que unen nuestra estructura, y dos conexiones tipo vínculo, barras rígidas con bisagras en los extremos, que simularán el alerón conectado en sus extremos.
- Contacto entre componentes: Representa que tipo de interacción tienen los componentes entre ellos. Para nuestro caso definimos un tipo "sin penetración" indicado para componentes sólidos.

El objetivo, teniendo en cuenta que todavía no se tiene una idea de cómo reacciona la estructura, será entender las cargas y como se transmiten a través del material. Esta primera simulación se prepara con un mallado simple grueso, con elementos principales de 20mm y minimos de 1mm (Ilustración 47) para que la simulación no sea muy larga de ejecutar, analizando qué piezas resultan más demandadas según el resultado de las tensiones de von Mises [17] y los desplazamientos.

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición

Jaume Molero Clotet

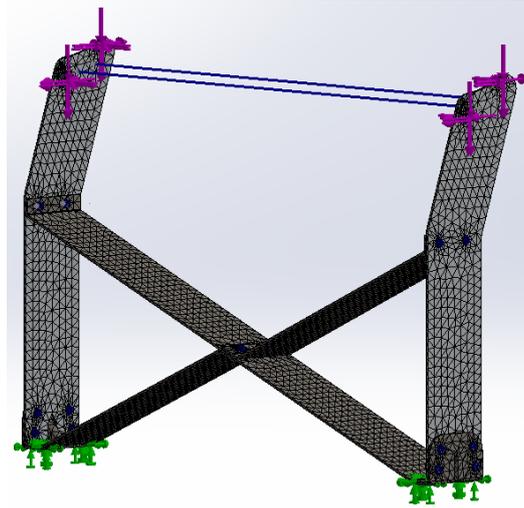


Ilustración 47: Mallado grueso de la estructura preparada para la simulación

Las siguientes ilustraciones 48 a 52 representan el estado de la estructura bajo carga. En las ilustraciones 48 y 49 se muestra gráficamente el resultado de las tensiones de von Mises, representando en color negro aquellas tensiones por encima del límite elástico del material.

Como podemos ver en la ilustración 48, la estructura en cruz presenta un estado general aceptable, no se considera representativo debido al tipo de mallado, pero para esta simulación nos centraremos en la pieza crítica, que como podemos ver en la ilustración 49 son las columnas, especialmente en la unión con el resto de la estructura.

En la simulación final (Capítulo 5.2.3) verificaremos si la estructura en cruz es la más adecuada, ya que podremos ver su estado de carga real.

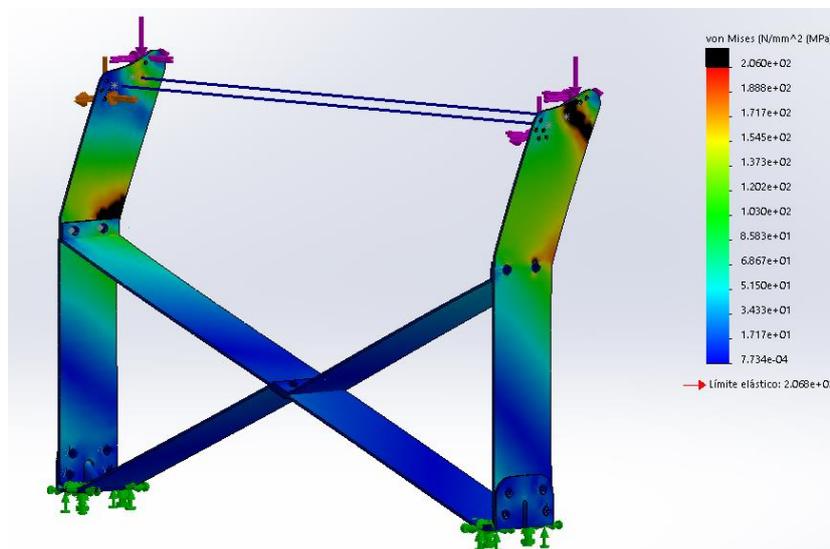


Ilustración 48: Vista general de las tensiones de von Mises

La variable a evaluar en los estudios de carga será el estado tensional de los elementos según el criterio de von Mises [17]. Este, determina una tensión equivalente para un estado tensional complejo o multiaxial. Dadas unas tensiones principales como las de la ilustración 49, la tensión de von Mises equivalente, se calcularía con la ecuación 11.

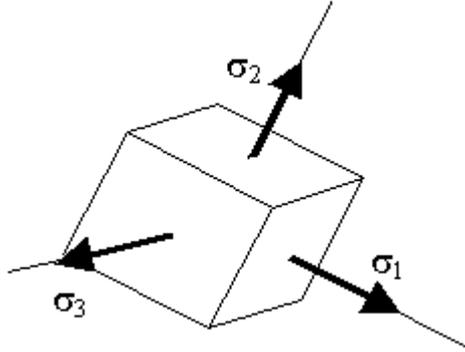


Ilustración 49: Tensiones principales de un elemento

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad [\text{Ecu. 11}]$$

Esta tensión equivalente de von Mises es comparable a la tensión de límite elástico del material, por lo tanto, en aquellos puntos donde existan tensiones de von Mises superiores a la tensión de límite elástico, se estará produciendo plastificación del material, y daremos por fallida la estructura.

En el detalle, en la ilustración 50, se aprecian las zonas conflictivas y sus valores nodales. Estos exceden la tensión de límite elástico, con valores de hasta 500 MPa por encima del límite elástico en la zona de anclaje con la parte inferior de la estructura.

Esta zona de conflicto, debido al posicionamiento respecto al vehículo, está limitada geoméricamente. Para el rediseño de esta pieza estudiaremos modificar el grosor del material y la definición del perno si fuera necesario.

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición

Jaume Molero Clotet

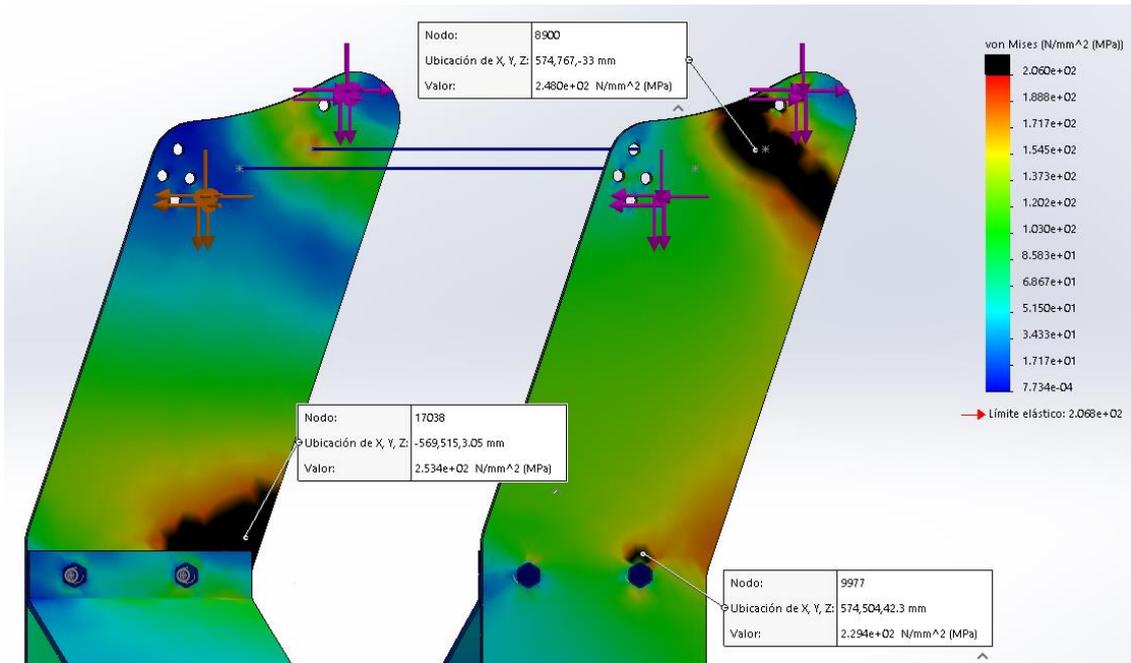


Ilustración 50: Detalle de las zonas conflictivas y sus valores nodales

El estudio de propiedades físicas nos muestra una masa de 27,21 kg (Ilustración 51), esto se tendrá en cuenta al comparar los diseños finales ya que será uno de los criterios, junto a los desplazamientos, que tendremos en cuenta para seleccionar un material y diseño.

Masa = 27.21 kilogramos
Volumen = 3401225.00 milímetros cúbicos
Área de superficie = 1426248.55 milímetros cuadrados
Centro de masa: (milímetros)
X = 0,30
Y = 285,22
Z = 67,96

Ilustración 51: Propiedades físicas de la estructura con chapa de 5mm de acero AISI 304

En cuanto a los desplazamientos y la flecha máxima del estudio, vemos en la ilustración 52 que la estructura en cruz está cumpliendo su función minimizando el desplazamiento hasta el inicio del voladizo, con valores inferiores a los 2 mm hasta este punto. Por el contrario, la flecha máxima en nuestra estructura es de 29.2 mm (Ilustración 53).

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición
Jaume Molero Clotet

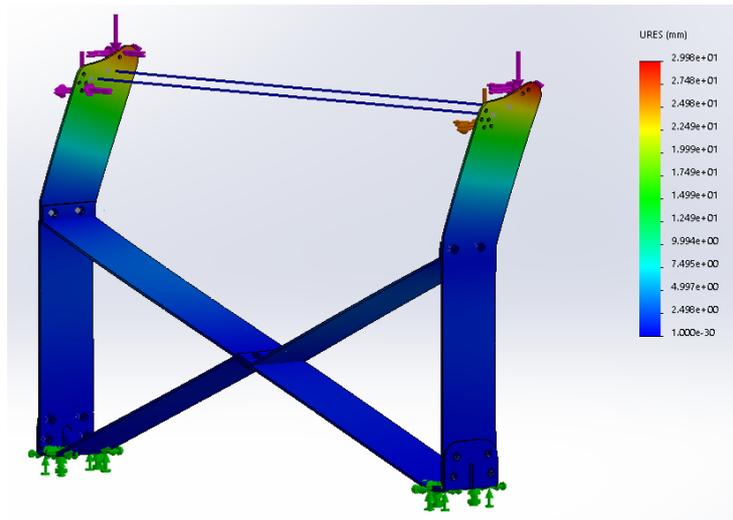


Ilustración 52: Vista general de los desplazamientos

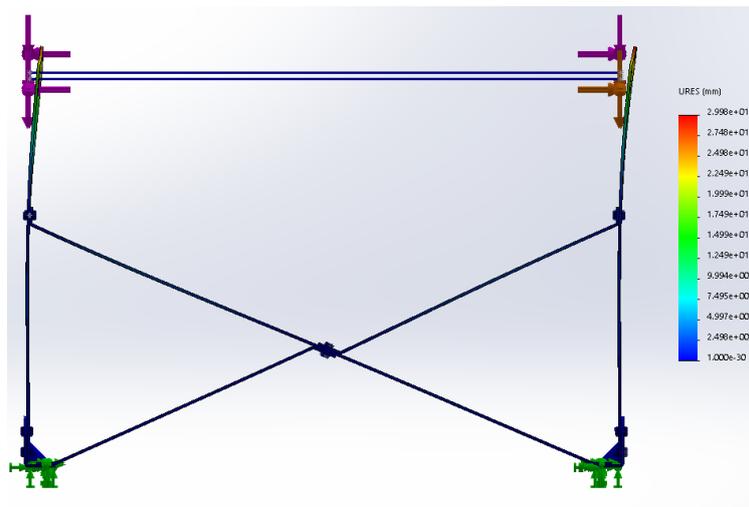


Ilustración 53: Vista frontal de los desplazamientos

En la tabla 6 se muestran los valores que se tendrán en cuenta para la comparación con las diferentes simulaciones a realizar. Estos datos se compararán teniendo en cuenta que, debido al mallado grueso, no pueden ser interpretados como valores absolutos. Para este fin, simularemos con precisión la estructura final.

Tabla 6: Resumen de la simulación del diseño inicial

Tensión límite elástico	Tensión von Mises máxima	Desplazamiento máximo	Peso total	Menor variabilidad de material
206,2 MPa	2600 MPa	29,2 mm	27,25 kg	MISMO MATERIAL Acero AISI 304

5.2.2. NUEVOS DISEÑOS Y SIMULACIONES

Vistos los resultados del diseño inicial, decidimos que el elemento a modificar sería la columna central. Esta es la que resulta más crítica en el mecanismo.

Para poder agilizar este proceso de rediseño y simulación, se ha tenido en cuenta que las cotas de los soportes en cruz son directamente dependientes del grosor de las columnas y se han rediseñado.

Para ello se ha hecho uso del modelado dentro del ensamblaje, dejando las cotas necesarias siendo dependientes de los modelos en contacto como vemos en la ilustración 54. De este modo, cada iteración de diseño realizada será más rápida y precisa, ya que los soportes en cruz se adaptarán automáticamente y no cabe la posibilidad de olvidarse algo por modificar.

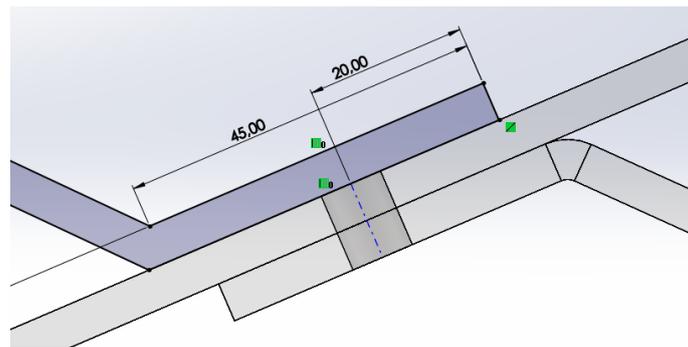


Ilustración 54: Ejemplo de cotas dependientes del conjunto

Se han simulado y estudiado los resultados de las siguientes situaciones, todas combinadas con las escuadras y la estructura tipo cruz en Acero AISI 304.

- Columnas de 8mm Acero AISI 304
- Columnas de 8mm Aluminio 5754
- Columnas de 12mm Aluminio 5754

Se expone un resumen de los resultados en la siguiente tabla 7:

Tabla 7: Resumen de las simulaciones

Caso simulado	Tensión límite elástico	Tensión von Mises máxima	Desplazamiento máximo	Peso total	Menor variabilidad de material
8 mm Acero AISI 304	206,2 MPa	193,2 MPa	8,7 mm	32,4 kg	Distintos grosores de Acero AISI 304
8 mm Aluminio 5754	180 MPa	185,3 MPa	20,7 mm	22,3 kg	Distintos grosores y material
12 mm Aluminio 5754	180 MPa	129,5 MPa	7,4 mm	24,9 kg	Distintos grosores y materiales

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición Jaume Molero Clotet

Tras analizar los resultados, se descarta una estructura completamente de acero por su peso. Además, al ser de distinto grosor que el resto de la estructura, no supone ningún beneficio ya que no se podría aprovechar la misma chapa para la fabricación y si se quisiera fabricar la subestructura también en chapa de 8 mm, el peso aumentaría significativamente.

Por otro lado, la simulación del caso de aluminio en 8 mm, muestra una tensión de von Mises máxima superior a la tensión de límite elástico. Esta se encuentra en uno de los agujeros donde se aplica la carga inicial, y nos hace pensar que es debido a la reducida superficie de contacto.

Finalmente, es la estructura con columnas de aluminio 5754 de 12 mm de grosor la que muestra un mejor comportamiento. Sin mostrar grandes diferencias de peso respecto a la de 8 mm, su comportamiento en cuanto a tensiones y desplazamiento es el mejor de todas.

5.2.3. SIMULACIÓN FINAL

Una vez seleccionado el material, la simulación de esta estructura se repite, realizándola esta vez con una malla mucho más precisa (Ilustración 55), con elementos de 15 mm y un refinamiento hasta llegar a elementos de 1 mm en zonas con singularidades (Ilustración 56) como aristas, pernos o curvaturas pronunciadas.

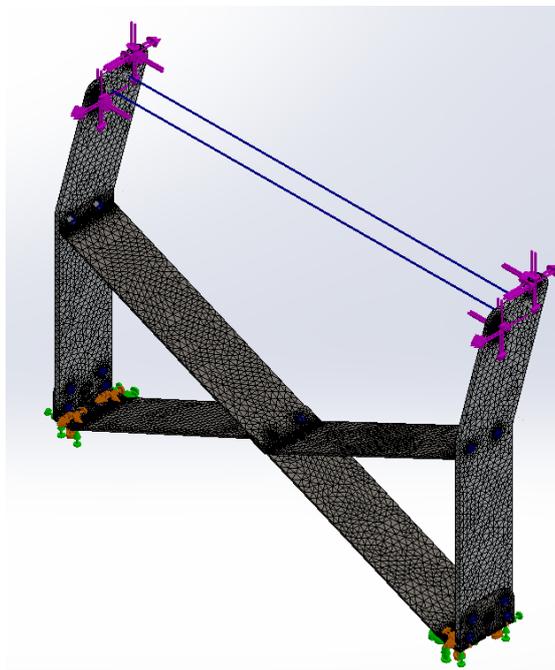


Ilustración 55: Simulación precisa del diseño seleccionado

Este nivel de refinamiento que vemos en la Ilustración 56 es necesario para verificar que no existan tensiones que no estamos viendo con mallados más gruesos. Esto se debe a que las tensiones más altas pueden ser totalmente puntuales, y con un mallado grueso no somos capaces de calcularlas ya que se reparte entre más superficie.

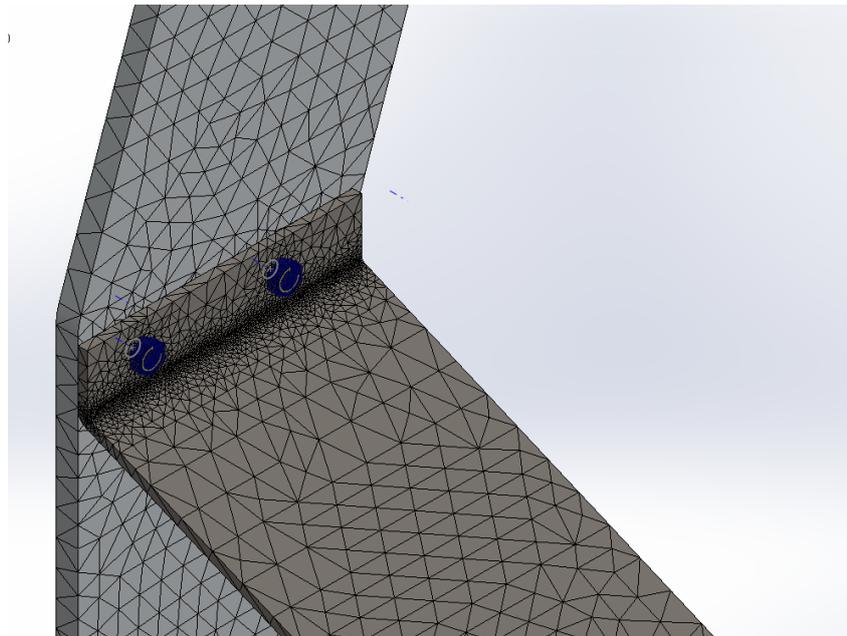


Ilustración 56: Detalle del refinamiento de la malla

El resultado de esta simulación ha sido el esperado. Como vemos en la Ilustración 57, el reparto de tensiones es uniforme en general. Incrementan los valores en las singularidades que se han querido evaluar, aun así, no están cerca de la deformación plástica. El valor máximo de la tensión de von Mises es de 151,7 MPa. Estando este punto en el la escuadra de acero AISI 304 cuyo limite elástico es de 206,8 MPa.

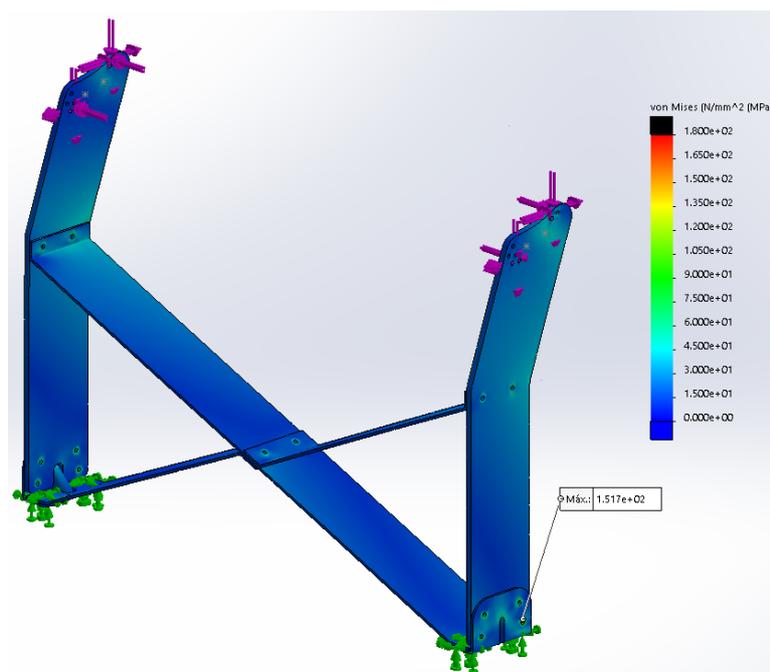


Ilustración 57: Estado de tensiones

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición

Jaume Molero Clotet

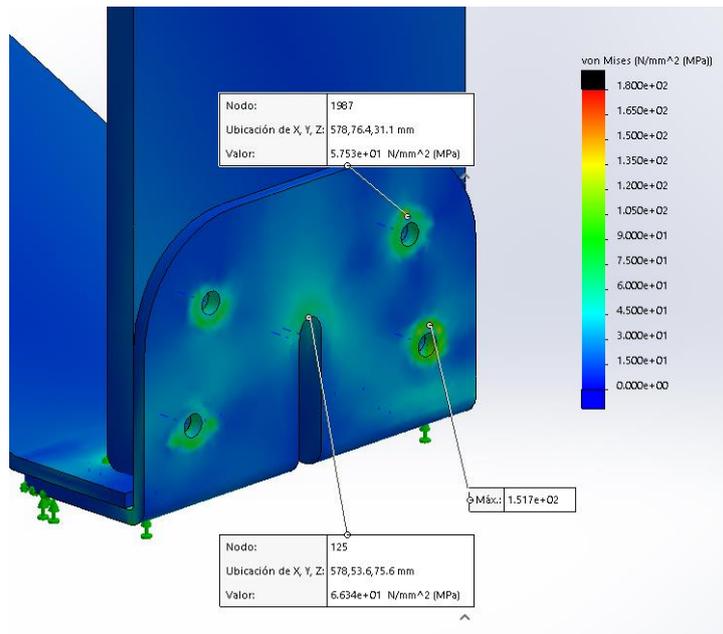


Ilustración 58: Detalle de tensiones

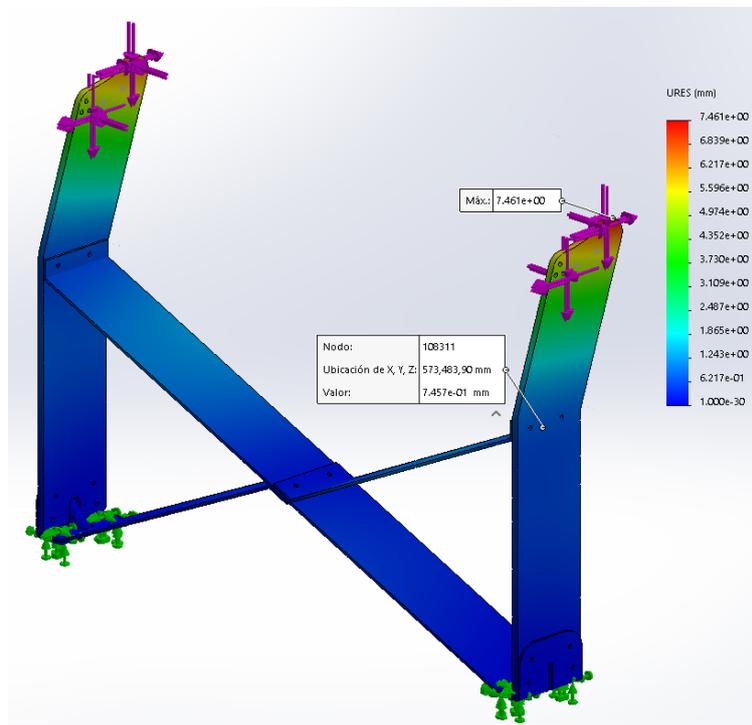


Ilustración 59: Estado de desplazamientos

6. OPTIMIZACIÓN

Este último apartado expone la optimización topológica, realizada con SOLIDWORKS, de la estructura seleccionada en el capítulo 5.2.3. Una vez realizada esta optimización se deberá verificar el resultado simulando esta nueva estructura. Si fuera necesario, volveríamos a rediseñar la pieza, combinando este modelo de optimización topológica con aquellos refuerzos que creamos que nos ayudarán. En estos casos es importante entender los resultados ofrecidos por el programa de simulación y como relacionarlos con el resultado.

La optimización topológica explora de forma iterativa los diseños geométricos válidos para unas condiciones concretas [18]. Para ello deberemos introducir los siguientes parámetros [19]:

- Material a utilizar
- Cargas aplicadas en su posición de actuación.
- Objetivos y restricciones, podremos introducir hasta dos de las tres opciones:
 - Mayor rigidez al cociente de peso
 - Minimizar el desplazamiento máximo
 - Minimizar la masa con restricción de desplazamiento
- Condiciones de contorno como la inmovilización de un punto, o el espesor mínimo requerido si lo hubiera.
- Controles de fabricación que permiten evitar formas demasiado orgánicas o vaciados que no nos interesen.

Con estos parámetros introducidos, y junto con un mallado tipo MEF, el algoritmo evaluará en cada elemento, la carga del mismo comparada con la densidad del material. Esto permite dividir el mallado en lo que se denominan elementos blandos y elementos sólidos [18], siendo los blandos aquellos de los que podremos prescindir cumpliendo con los requerimientos determinados.

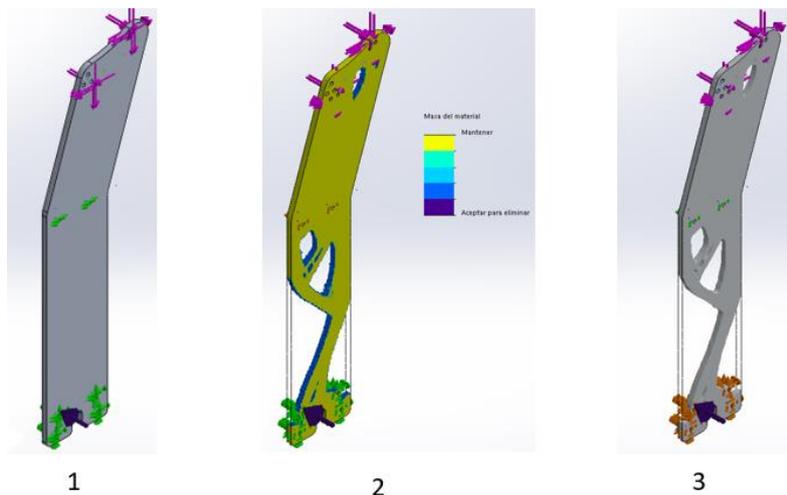


Ilustración 60: Pasos de la optimización

Este estudio, aunque es bastante largo de realizar, corre en segundo plano y no nos impide seguir trabajando. Una vez finalice, podremos exportar el sólido generado y usarlo de referencia para el rediseño de la pieza, ya que los resultados suelen ser muy orgánicos y difíciles de fabricar por métodos tradicionales.[18] En la ilustración 60 se pueden apreciar tres fases de la optimización, siendo la 60.1 la preparación, la 60.2 el resultado del solver en el que podemos

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición Jaume Molero Clotet

ajustar parámetros como el porcentaje de reducción de peso, al que finalmente se realiza un suavizado de malla para obtener la pieza de la ilustración 60.3

Como ya se ha comentado, las soluciones de la optimización son geometrías que no son fáciles de trabajar. Por lo tanto, el post-procesado de esta pieza es esencial. Haciendo uso de la visualización de simulación en el entorno del modelo, recortaremos aquellas partes que no existan en la optimización. Como se muestra en la ilustración 61.

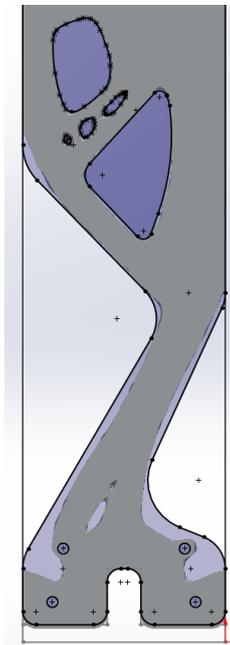


Ilustración 61: Esbozo para la pieza extruida

Para comprobar si la optimización consigue lo que buscamos, se realiza una simulación al conjunto completo, para ver cómo reacciona al rediseño de esta parte.

Se aprecia en la ilustración 62 los resultados de esta simulación, y como la estructura se ha debilitado. Aunque las cargas estuvieran bien planteadas, al no poder simular un conjunto, las interacciones entre componentes durante el estado de carga no se plantearon bien.

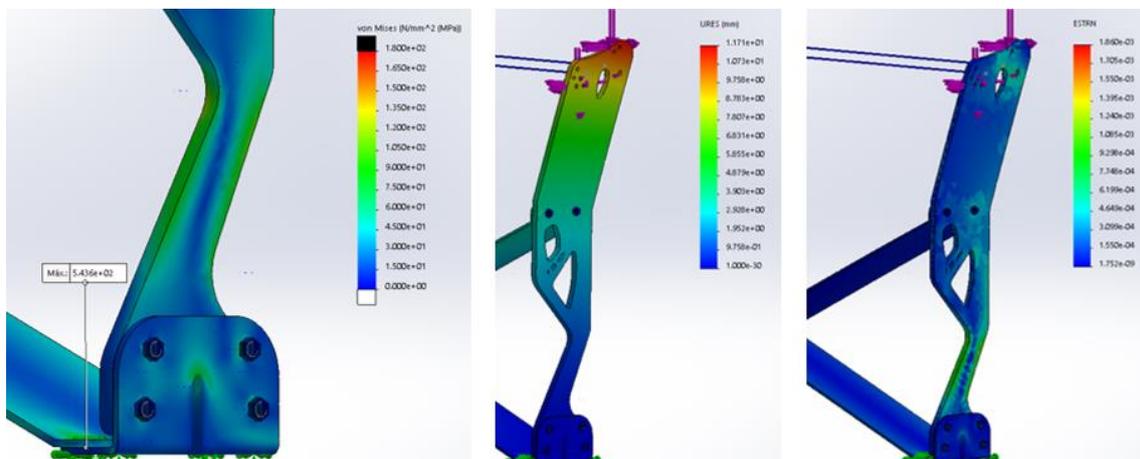


Ilustración 62: Resultados de la simulación optimizada

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición Jaume Molero Clotet

Viendo estos resultados, se plantea un rediseño intentando conservar parte del vaciado para la reducción de peso. Gracias a las representaciones y entendiendo que representan cada una de ellas, se determina que el problema de estabilidad es ahora principalmente debido a la parte inferior de la columna. Esto se interpreta así por la gran concentración de deformaciones unitarias en ese punto. Reducir estas deformaciones unitarias añadiendo material, hará que la columna recupere en gran parte la rigidez original. En la ilustración 63 vemos el resultado de las tensiones de von Mises del rediseño optimizado.

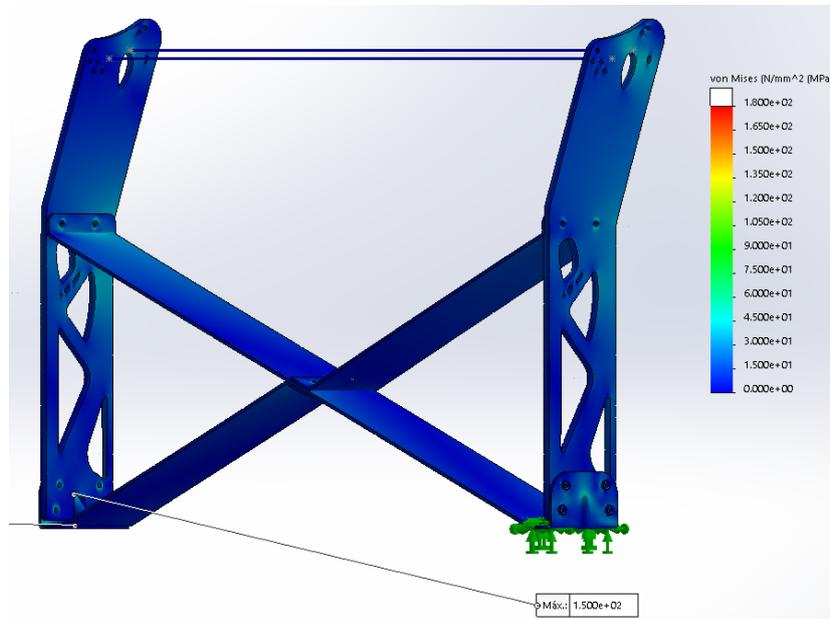


Ilustración 63: Tensiones de von Mises rediseño optimizado

En cuanto a los desplazamientos, como vemos en la ilustración 64, no son unos valores significativos respecto al diseño original.

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición
Jaume Molero Clotet

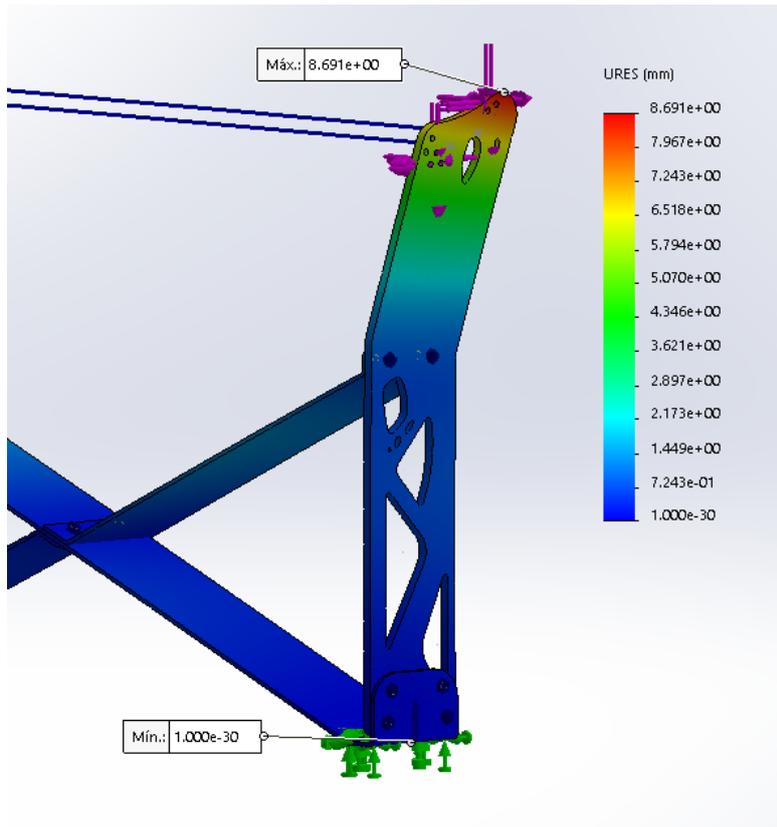


Ilustración 64: Distribución de los desplazamientos

Como se puede ver en la tabla 8, esta optimización topológica se da por fallida. Entendemos que un mal planteamiento en las relaciones o una mala selección de los objetivos han causado este problema. Proponemos usar esta optimización como punto de partida de un diseño más conservador e intentando no perder mucha reducción de material. Estos diseños se comparan también en la tabla 8.

Tabla 8: Comparación de diseños

	Original	Optimizado	Rediseño optimizado
Tensión VM max	151,7 MPa	543,6 MPa	150 MPa
Desplazamientos Centro/Voladizo	0,75 / 7,5 mm	3,3 / 11,7 mm	0,86 / 8,7 mm
Deformaciones unitarias	Principalmente al inicio del voladizo	Principalmente concentradas en la parte baja	Repartidas entre la parte baja y media
Peso estructura	24,9 kg	22,5 kg	23,1 kg
Peso de la pieza	3,8 kg	2,8 kg	3,1 kg

Finalmente escogemos el rediseño optimizado para nuestra estructura, puesto que es el más ligero de los tres y la diferencia entre el original y este en cuanto a los desplazamientos es mínima.

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición Jaume Molero Clotet

Una vez escogido nuestro modelo definitivo, definimos completamente los pernos y tuercas según las especificaciones del catálogo de referencia [20]. Nuestros pernos y tuercas estarán definidos según DIN 933 M8 y según la definición de [20] y con una calidad de 9.8. Los resultados del comprobador de pernos no dan ningún error (Ilustración 65). Mientras en el supuesto inicial de calidad 8.8, en tres de ellos no se cumplía con los requerimientos.

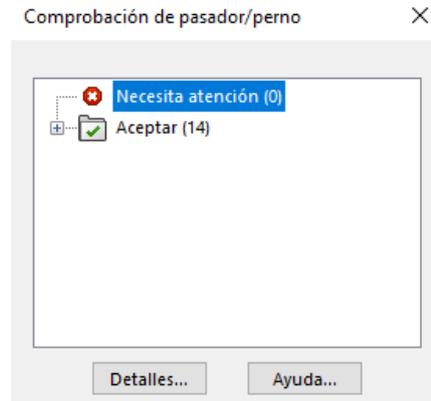


Ilustración 65: Comprobador de pernos

Con todo ya terminado, el resultado es satisfactorio según lo aprendido en este proyecto.

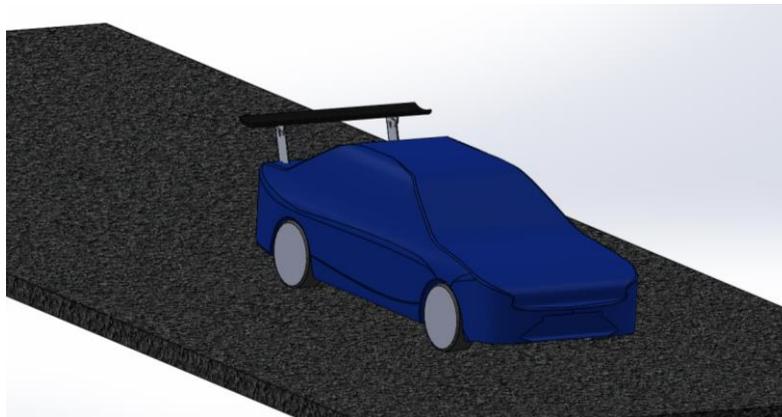


Ilustración 66: Vehículo de simulación con el alerón y los soportes montados

CONCLUSIONES

El diseño final del soporte de alerón creado en este trabajo, es sólido y resistente a los esfuerzos y tensiones generadas por el viento, la estructura está diseñada trabajando sobre simulaciones de flujo que nos indican la posición correcta de la pala del alerón, por lo que se ha conseguido generar un soporte que sujete la pala en la posición más óptima para su funcionamiento.

Gracias al escaneo 3D hemos conseguido trabajar sobre superficies fiables, con bajas tolerancias y, por tanto, se ha podido diseñar y simular tanto los esfuerzos transmitidos a las partes fijas como las simulaciones de flujo con un margen de error muy bajo. Se ha demostrado que trabajar con esta herramienta facilita y precisa mucho el trabajo de obtención de datos reales, por tanto, puedo afirmar que la herramienta de escaneo 3D tiene una gran proyección de futuro en el campo de la ingeniería inversa.

Con este método de trabajo se reducen las iteraciones de diseño, nos ayuda a prescindir de pruebas y nos reduce a la mínima expresión la recopilación de medidas y datos sobre la geometría con la que se quiere trabajar.

Gracias a la simulación de flujo y las simulaciones de tensiones y esfuerzos en distintos materiales, se ha reducido al máximo todas las pruebas necesarias para poder determinar la posición más óptima de la pala del alerón, si no se hubiera hecho este cálculo computacional se tendría que haber determinado la altura mediante pruebas experimentales en un circuito, invirtiendo dinero en piezas y en combustible y obteniendo resultados menos precisos.

Finalmente, la optimización topológica nos ha permitido reducir el material necesario haciendo que la pieza resultante sea fiable, pese poco y tenga menor coste económico.

En general, todas las herramientas utilizadas en este trabajo de final de grado nos ayudan a reducir tiempo y recursos económicos, reduciendo pruebas e iteraciones de diseño y posibles fallos, dando acceso a empresas y estudiantes con menos recursos a realizar trabajos más precisos, como es el caso de este proyecto.

Se ha conseguido determinar la altura óptima para alcanzar una buena situación aerodinámica sin comprometer el diseño del soporte del alerón. Esto junto a la precisión y agilidad de los simuladores, nos ha permitido realizar una estructura confiable, y que seguro contribuye a la mejora del comportamiento del vehículo en competición.

RECOMENDACIONES

Para futuros proyectos, planteamos algunos puntos a tener en cuenta de lo aprendido durante este proyecto.

- Estudiar elementos con capacidad de reducción de la fuerza de arrastre vehículos tipo berlina
- La aerodinámica alrededor de un spoiler trasero
- Estudiar la carga aerodinámica frontal
- Un soporte exterior, sujeto al soporte de viguetas del parachoques.

En el caso de estudios de topología, es de vital importancia realizar los estudios posteriores pertinentes para validar la correcta ejecución del estudio de topología.

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición
Jaume Molero Clotet

En aerodinámica, como ya expone este trabajo, el mallado del estudio es de vital importancia validar que este se está realizando bajo unas condiciones confiables.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Subaru. *Subaru Impreza 97-98 service manual*. 1997
- [2] Engineering & Manufacturing Services, Inc. *3D Scanning Technologies Overview*. [En línea] Florida: EMS 2020 [Consulta: Marzo 2020] Disponible en: <https://www.ems-usa.com/tech-papers/3D%20Scanning%20Technologies%20.pdf>
- [3] FARO Technologies, Inc. *FARO QUANTUM FAROARM*. [En línea] Florida [Consulta: Marzo 2020] Disponible en: <https://www.faro.com/es-es/productos/3d-manufacturing/faroarm/>
- [4] 3D Collective. *Guía de fotogrametría*. [En línea] España, abril 2018 [Consulta: Marzo 2020] Disponible en: <https://3dcollective.es/fotogrametria/>
- [5] Creaform. *HandySCAN 3D*. [En línea] Canada [Consulta: Marzo 2020] Disponible en: <https://www.creaform3d.com/en/portable-3d-scanner-handyscan-3d>
- [6] Shining 3D. *EinScan Pro* [En línea] [Consulta: Marzo 2020] Disponible en: <https://www.einscan.com/handheld-3d-scanner/einscan-pro/>
- [7] Song Zhang. *High-speed 3D shape measurement with structured light methods: A review*. Optics and lasers in engineering Vol 106. Julio 2018, páginas 119-131. Elsevier
- [8] McBeath, S. *Aerodinámica del automóvil de competición*. Barcelona: CEAC. 2005. ISBN: 9788432911675
- [9] Katz, J. *Race Car Aerodynamics*. Cambridge: Bentley Publishers, 1996. ISBN: 9780837601427
- [10] Dr. A. Sobachkin, Dr. G. Dumnov, Dr. A. Sobachkin. *Numerical Basis of CAD-Embedded CFD*. SOLIDWORKS white paper. Febrero 2014.
- [11] [En línea] Catalogo de imágenes y esquemas de vehículos. [Consulta: Mayo 2020] Disponible en: <http://autoautomobiles.narod.ru/english/subaru/Subaru-Impreza-WRX-4-Door-1996/>
- [12] APR Performance, Inc. *CFD data for the GTC-500 adjustable wing*. [En línea] California: APR Performance, 2019 [Consulta: Abril 2020] Disponible en: <https://aprperformance.com/racing-product/gtc-500-adjustable-wings/>
- [13] APR Performance, Inc. *CFD data & analysis for the GTC-300 adjustable wing*. [En línea] California: APR Performance, 2019 [Consulta: Abril 2020] Disponible en: <https://aprperformance.com/racing-product/gtc-300-adjustable-wings/>
- [14] FIA. *Organización*. [En línea] [Consulta: Mayo 2020] Disponible en: <https://www.fia.com/es/organizacion>
- [15] FIA. *Technical Appendix to the Sporting Regulations of the FIA European Hill Climb Championship – Category 1 Cars*. [En línea] Marzo 2020 [Consulta: Mayo 2020] Disponible en: <https://www.fia.com/es/regulation/category/738>
- [16] Ferdinand Pierre Beer, E. Russell Johnston. *Mecánica de materiales*. Quinta edición. México, D.F.; Editorial McGraw Hill Educación, 2010. ISBN-13: 978-607-15-0263-6
- [17] Tensión de von Mises en Wikipedia [En línea] Wikimedia foundation [Consulta: Junio 2020]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Tensi%C3%B3n_de_Von_Mises

Análisis y mejora del comportamiento en pista de un turismo de competición
Jaume Molero Clotet

[18] SOLIDWORKS. *Design through analysis: improving product design and automating manufacturability with topology optimization*. SOLIDWORKS white paper.

[19] Editora Macro EIRL, 2014. *Simulación con SolidWorks*, Perú; Editorial Macro EIRL, 2014 ISBN: 9786123042141

[20] Tormetal. *Propiedades mecánicas*. [En línea] Tormetal catalogos técnicos [Consulta: Junio 2020] Disponible en: <https://tormetal.com/wp-content/uploads/2017/03/6-TMT-CAT-FIX-AP-Tecnico-Propiedades-Mecanicas.pdf>