



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo de  
Producto**

**Aplicación de un programa de optimización  
topológica al diseño de un chasis para  
Formula Student**

**Autor:**

**Pérez Cobo, Marta**

**Tutor(es):**

**Magdaleno Martín, Jesús  
Departamento: Construcciones  
Arquitectónicas, Ingeniería del  
Terreno y Mecánica de Medios  
Continuos y Teoría de Estructuras.**

**Valladolid, junio 2021.**



## RESUMEN

El consiguiente proyecto trata sobre la aplicación de un programa en el diseño de un chasis para Formula Student mediante optimización topológica.

Para ejecutarlo, se necesitará analizar previamente las herramientas que ofrece el software, por lo que en este proyecto se describen los aspectos principales para alcanzar un manejo fluido del programa, en lo que se refiere a diseño, análisis de tensiones y optimización topológica.

Asimismo, se describen los pasos precisos para lograr el diseño de un chasis ajustado a las condiciones y restricciones de Formula Student, además de los resultados obtenidos en cada análisis ejecutado.

Palabras clave:

Formula Student, Monoplaza, Vehículo, Chasis, Optimización topológica.

## ABSTRACT

The consequent project deals with the application of a program in the design of a chassis for Formula Student by means of topological optimization.

To execute it, it will be necessary to previously analyze the tools that the software offers, so this project describes the main aspects to achieve a fluid management of the program, in terms of design, stress analysis and topological optimization.

Likewise, the precise steps to achieve the chassis design adjusted to the conditions and restrictions of Formula Student are described in addition to the results obtained in each analysis performed.

Palabras clave:

Formula Student, Single-seater, Vehicle, Chassis, Topological optimization.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

---

<b>1. Objetivos y planificación</b> .....	<b>13</b>
1.1. Objetivos.....	13
1.2. Planificación.....	13
1.3. Antecedentes .....	14
1.4. Estructura de la memoria .....	14
<b>2. Estado del arte</b> .....	<b>15</b>
2.1. Formula Student.....	15
2.1.1 Evolución histórica .....	15
2.1.2. Categorías de competición .....	16
2.1.3. Disciplinas.....	17
2.1.4. Inspecciones técnicas.....	19
2.2. Optimización topológica .....	21
2.2.1. Historia .....	22
2.2.2. Principales aplicaciones.....	22
2.3. Autodesk Fusion 360.....	24
2.3.1. Características Fusion 360.....	24
2.3.2. Conocimientos previos sobre la utilización de Fusion 360.....	26
2.4. Chasis .....	34
2.4.1. Introducción.....	34
2.4.2. Restricciones de la Formula SAE que afectan al chasis.....	35
<b>3. Diseño del chasis</b> .....	<b>43</b>
3.1. Bocetos 2D de las estructuras principales.....	43
3.2. Resto de estructuras.....	46
<b>4. Análisis y estudios</b> .....	<b>51</b>
4.1. Estudio modelo 1.....	51
4.1.1. Pruebas.....	52
4.1.2. Optimización topológica.....	61
4.2. Estudio modelo 2.....	73
4.2.1. Optimización topológica.....	74
<b>5. Diseño final</b> .....	<b>77</b>
<b>6. Conclusiones y posibles líneas futuras</b> .....	<b>85</b>
6.1. Conclusiones.....	85

6.2. Otras consideraciones.....	85
6.3. Líneas futuras .....	86
7. Bibliografía.....	87

## ÍNDICE ILUSTRACIONES

---

Ilustración 1. Coche de Formula SAE de la Universidad de Texas en Arlington, 1986 [4]	16
Ilustración 2. Circuito Skidpad [14]	18
Ilustración 3. Porcentaje de las pruebas (Elaboración propia)	19
Ilustración 4. Optimización topológica de una silla [19]	21
Ilustración 5. Moto Light Rider [8]	23
Ilustración 6. Productos de Autodesk [5]	24
Ilustración 7. Funciones Fusion 360 [2]	26
Ilustración 8. Interfaz (Elaboración propia)	27
Ilustración 9. Panel de control	27
Ilustración 10. Perfil y preferencias	28
Ilustración 11. Workspace	28
Ilustración 12. Barra principal de Design	29
Ilustración 13. Design create	30
Ilustración 14. Ejemplo de un ensamblaje [6]	31
Ilustración 15. Design inspect	31
Ilustración 16. Barra de herramientas Simulation	32
Ilustración 17. Uno de los primeros chasis de la historia [17]	34
Ilustración 18. Partes principales de un chasis [12]	35
Ilustración 19. Triangulación de las barras del chasis [14]	37
Ilustración 20. Referencias sobre el diseño del volante y los tirantes [14]	38
Ilustración 21. Referencias sobre el diseño del arco principal [14]	38
Ilustración 22. Las medidas del conductor [14]	39
Ilustración 23. Estructura de impacto lateral [14]	40
Ilustración 24. Plantilla para la abertura de la cabina [14]	40
Ilustración 25. Plantilla para la sección transversal interna [14]	40
Ilustración 26. Dimensiones de las barras [14]	40
Ilustración 27. Dimensiones de cada barra [14]	41
Ilustración 28. Base	44
Ilustración 29. Plano frontal	44
Ilustración 30. Arco frontal	45
Ilustración 31. Arco principal	45
Ilustración 32. Barra en el arco principal	46
Ilustración 33. Skecht suspensiones delanteras	47

Ilustración 34. Skecht suspensiones traseras .....	48
Ilustración 35. Anclajes del motor .....	48
Ilustración 36. Perforación para simulación del asiento .....	49
Ilustración 37. Modelo 1 .....	49
Ilustración 38. Render modelo 1 .....	51
Ilustración 39. Impacto frontal, tensiones (aplicación de una fuerza) .....	52
Ilustración 40. Impacto frontal, desplazamientos (aplicación de una fuerza) .....	52
Ilustración 41. Impacto frontal, tensiones (aplicación de una aceleración) .....	53
Ilustración 42. Impacto frontal, desplazamientos (aplicación de una aceleración) ....	53
Ilustración 43. Impacto lateral, tensiones (aplicación de una fuerza) .....	54
Ilustración 44. Impacto lateral desplazamientos (aplicación de una fuerza) .....	54
Ilustración 45. Impacto lateral, tensiones (aplicación de una aceleración) .....	54
Ilustración 46. Impacto lateral, desplazamientos (aplicación de una aceleración) ....	54
Ilustración 47. Impacto lateral, tensiones (aplicación de una fuerza, segundo ensayo) .....	55
Ilustración 48. Impacto lateral, desplazamientos (aplicación de una fuerza, segundo ensayo) .....	55
Ilustración 49. Impacto lateral, tensiones (aplicación de una aceleración, segundo ensayo) .....	55
Ilustración 50. Impacto lateral, desplazamientos (aplicación de una aceleración, segundo ensayo) .....	55
Ilustración 51. Rigidez a torsión, tensiones .....	56
Ilustración 52. Rigidez a torsión, desplazamientos .....	56
Ilustración 53. Rigidez a flexión, tensiones .....	57
Ilustración 54. Rigidez a flexión, desplazamientos .....	57
Ilustración 55. Frenada, tensiones (aplicación de una fuerza) .....	57
Ilustración 56. Frenada, desplazamientos (aplicación de una fuerza) .....	57
Ilustración 57. Frenada, tensiones (aplicación de una aceleración) .....	58
Ilustración 58. Frenada, desplazamientos (aplicación de una aceleración) .....	58
Ilustración 59. Aceleración, tensiones (aplicación de una fuerza) .....	59
Ilustración 60. Aceleración, desplazamientos (aplicación de una fuerza) .....	59
Ilustración 61. Aceleración, tensiones (aplicación de una aceleración) .....	59
Ilustración 62. Aceleración, desplazamientos (aplicación de una aceleración) .....	59
Ilustración 63. Vuelco, tensiones (aplicación de una fuerza) .....	60
Ilustración 64. Vuelco, desplazamientos (aplicación de una fuerza) .....	60
Ilustración 65. Vuelco, tensiones (aplicación de una aceleración) .....	60

Ilustración 66. Resultado vuelco, desplazamientos (aplicación de una aceleración)	60
Ilustración 67. Elementos no optimizables, modelo 1	60
Ilustración 68. Optimización modelo 1, vista 1 (aplicación pruebas con fuerza)	62
Ilustración 69. Optimización modelo 1, vista 2 (aplicación pruebas con fuerza)	62
Ilustración 70. Optimización modelo 1, vista 2 (aplicación pruebas con fuerza)	62
Ilustración 71. Gradiente de color	63
Ilustración 72. Optimización modelo 1, vista 1 (aplicación pruebas con aceleración)	63
Ilustración 73. Optimización modelo 1, vista 2 (aplicación pruebas con aceleración)	63
Ilustración 74. Optimización modelo 1, vista 3 (aplicación pruebas con aceleración)	63
Ilustración 75. Comparación malla 1 con la malla por defecto (malla 1 ilustración derecha)	66
Ilustración 76. Optimización malla 1	66
Ilustración 77. Malla 2	67
Ilustración 78. Optimización malla 2	67
Ilustración 79. Malla 3	67
Ilustración 80. Optimización malla 3	67
Ilustración 81. Malla 4	68
Ilustración 82. Optimización malla 4	68
Ilustración 83. Malla 5	68
Ilustración 84. Optimización malla 5	68
Ilustración 85. Malla 6	69
Ilustración 86. Optimización malla 6	69
Ilustración 87. Malla combinada	69
Ilustración 88. Optimización malla combinada, vista 1	70
Ilustración 89. Optimización malla combinada, vista 2	70
Ilustración 90. Optimización malla combinada, vista 3	70
Ilustración 91. Malla final	71
Ilustración 92. Optimización malla final, (38,35% del volumen inicial)	71
Ilustración 93. Optimización malla final, vista 1 (54,56% del volumen inicial)	71
Ilustración 94. Optimización malla final, vista 2 (54,56% del volumen inicial)	72
Ilustración 95. Optimización malla final, vista 3 (54,56% del volumen inicial)	72
Ilustración 96. Render modelo 2	73

Ilustración 97. Modelo 2, vista 1 .....	73
Ilustración 98. Modelo 2, vista 2 .....	74
Ilustración 99. Modelo 2, vista 3 .....	74
Ilustración 100. Elementos no optimizables, modelo 2 .....	74
Ilustración 101. Modelo 2, con los parámetros de la malla final .....	75
Ilustración 102. Optimización modelo 2 .....	75
Ilustración 103. Modelo de barras .....	77
Ilustración 104. Impacto frontal, modelo de barras, ensayo 1 (tensiones) .....	78
Ilustración 105. Impacto frontal, modelo de barras, ensayo 1 (desplazamientos) .....	78
Ilustración 106. Primeras barras añadidas .....	79
Ilustración 107. Impacto frontal, modelo de barras, ensayo 2 (tensiones) .....	79
Ilustración 108. Impacto frontal, modelo de barras, ensayo 2 (desplazamientos) .....	79
Ilustración 109. Segundas barras añadidas .....	79
Ilustración 110. Impacto frontal, modelo de barras, ensayo 3 (tensiones) .....	80
Ilustración 111. Impacto frontal, modelo de barras, ensayo 3 (desplazamientos) .....	80
Ilustración 112. Impacto lateral, modelo de barras (tensiones) .....	80
Ilustración 113. Impacto lateral, modelo de barras (desplazamientos) .....	80
Ilustración 114. Rigidez a torsión, modelo de barras (tensiones) .....	81
Ilustración 115. Rigidez a torsión, modelo de barras (desplazamientos) .....	81
Ilustración 116. Rigidez a flexión, modelo de barras (tensiones) .....	81
Ilustración 117. Rigidez a flexión, modelo de barras (desplazamientos) .....	81
Ilustración 118. Frenada, modelo de barras (tensiones) .....	82
Ilustración 119. Frenada, modelo de barras (desplazamientos) .....	82
Ilustración 120. Aceleración, modelo de barras (tensiones) .....	82
Ilustración 121. Aceleración, modelo de barras (desplazamientos) .....	82
Ilustración 122. Vuelco, modelo de barras (tensiones) .....	83
Ilustración 123. Vuelco, modelo de barras (desplazamientos) .....	83
Ilustración 124. Modelo final .....	84

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Características del material utilizado .....	47
Tabla 2. Valores de la malla por defecto.....	64
Tabla 3. Valores combinados de la malla .....	69
Tabla 4. Parámetros óptimos para la malla .....	70



## 1. Objetivos y planificación

### 1.1. Objetivos

El presente proyecto se puede dividir principalmente en dos objetivos.

En primer lugar, el de tener la información necesaria sobre el programa utilizado (Autodesk Fusion 360), del cual hoy en día no hay gran contenido sobre su manejo, además de contrastar diferentes pruebas para saber cómo reacciona el software o cuales son las posibles respuestas a pequeños cambios.

En segundo lugar, el diseño de un chasis reglamentario para Formula Student, a partir de una optimización topológica. El objetivo no era obtener el diseño final de un chasis, ya que debido a la falta de experiencia lo más seguro habría sido que el resultado no fuera el deseado, por lo que el siguiente proyecto se ha centrado en que sea un diseño que cumpla con la normativa y soporte de forma correcta todas las pruebas a las que será sometido. Es decir, diseñar un chasis sobre el que un futuro equipo pueda partir y avanzar.

No es el primer proyecto que se realiza sobre el diseño de un chasis para Formula Student, pero sí lo es sobre la aplicación de Fusion 360 al diseño de un chasis, por lo que se pretende que sirva para desarrollar líneas futuras.

### 1.2. Planificación

En primer lugar, se realizará una búsqueda sobre trabajos ya presentados que traten el mismo tema, además de tomar ciertos valores de ellos para poder ejecutar los ensayos, ya que para el desarrollo de este proyecto no se tiene la capacidad de poder calcular todos los valores necesarios a la hora de realizar las pruebas.

En segundo lugar, se adquirirán los conocimientos necesarios para poder manejar el programa utilizado, además de conocer todas las restricciones e información que se deberá saber acerca de Formula Student para así cumplir con su normativa.

Una vez llegado a este punto, se procederá a empezar con un diseño “cáscara” del chasis, el cual se optimizará y finalmente se obtendrá un chasis formado por perfiles tubulares.

### 1.3. Antecedentes

En el caso de la utilización de Fusion 360 no se ha tenido ningún trabajo como referencia, pero en lo referente a la optimización del diseño de un chasis viene encabezado por otros proyectos que han sido realizados y tutelados por integrantes de la Universidad de Valladolid. Estos proyectos han servido como guía para una planificación previa y a la hora de la realización de las simulaciones.

Son los siguientes:

Monge Francés, Samuel [2017]: diseñó y optimizó el chasis de un monoplaza Formula Student mediante el método de elementos finitos.

Manso Agudez, Jaime [2019]: analizó y optimizó un chasis para Formula Student.

### 1.4. Estructura de la memoria

La estructura de la memoria es la siguiente:

- Estado del arte: se presenta la información necesaria para la participación en la competición Formula Student, los conceptos principales respecto a la optimización topológica y respecto al programa que se emplea.
- Diseño del chasis: se especifican las dimensiones y el proceso para la creación de la estructura del chasis.
- Análisis y estudios: se muestran todos aquellos estudios necesarios para llegar a la optimización, y el desarrollo de esta.
- Diseño final: definición del chasis apto para la competición, de la mano de los resultados de las pruebas imprescindibles.
- Conclusiones y posibles líneas futuras: se presentan las conclusiones finales y posibles mejoras futuras.
- Bibliografía: por último, el listado de todo lo consultado para la elaboración de este proyecto.

## 2. Estado del arte

### 2.1. Formula Student

La Fórmula SAE es un campeonato que nace en Estados Unidos en el año 1982 bajo el patrocinio de la Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE) [1]. Es una competición entre universitarios que se agrupan en equipos para pensar, diseñar, confeccionar, desarrollar y competir con coches de carrera pequeños [2], bajo la idea de que es un equipo contratado por una empresa, donde además de diseñar tienen que gestionar los recursos que poseen, ya que contarán con limitaciones tanto económicas como técnicas [3].

El principal objetivo de esta competición consiste en motivar a los jóvenes universitarios, permitiéndoles poner en práctica lo aprendido teóricamente en las aulas. De esta forma se les da la posibilidad de desarrollar sus habilidades profesionales, ya que tienen que aprender a gestionarse como una empresa, viendo todo lo que ello conlleva [1].

#### 2.1.1 Evolución histórica

La primera competición comenzó a prepararse en 1979 con un docente de la Universidad de Houston, Mark Marshek, el cual contactó con la SAE. Pero no fue hasta 1982, como se ha señalado anteriormente, cuando se organiza la primera edición de Formula SAE, en la Universidad de Texas (Austin)

El planteamiento inicial era la construcción de un vehículo similar a un Car-Cross. Pero fueron conscientes de que esta opción limitaba mucho la autonomía de los universitarios, por lo que tuvieron que buscar un modelo que les permitiera más libertad. Así llegaron al actual modelo de monoplace pequeño.



*Ilustración 1. Coche de Formula SAE de la Universidad de Texas en Arlington, 1986 [4].*

En 1981, participaron 6 equipos con un conjunto de 40 alumnos, cuyos números han ido creciendo, hasta llegar a la actualidad donde se celebran competiciones en muchos países como Japón, Brasil, Alemania... alcanzándose las cifras de hasta 120 equipos y más de 2.000 estudiantes.

La primera competición en España fue en 2010 con únicamente 11 equipos, entre ellos, cinco alemanes y cuatro españoles. Este evento es posible gracias a la STA (Sociedad Española de Ingenieros de Automoción) y a la ayuda de empresas e instituciones españolas que actúan sin ánimo de lucro [5].

Para concluir, es importante mencionar que en todos los países se utiliza la misma normativa elaborada por Formula SAE, y una vez concluida la competición se elabora un ranking mundial [3].

### 2.1.2. Categorías de competición

A la hora de clasificar las categorías de las que se compone la competición se debe tener en cuenta por un lado el tipo de motor (de combustión interna o eléctricos) del que están dotados y por otro lado el grado de fabricación en el que se encuentra el automóvil, siendo la clase 1 en la que más participantes hay, y la clase 2 y clase 3 para los equipos con menos experiencia.

- Clase 1

En dicha categoría se inscriben aquellos equipos con el monoplaza totalmente terminado, pudiendo competir en las pruebas dinámicas. Únicamente pueden presentarse con el mismo modelo de automóvil

durante un año, si ha pasado el plazo se deben hacer cambios importantes, sin la posibilidad de reutilizar el chasis, promoviendo así la innovación.

- Clase 2

Categoría para equipos que tienen el vehículo elaborado, pero se encuentra incompleto en alguna de sus características o funciones. Tan sólo puntúan las pruebas de diseño, presentación y coste. Como requisito para poder presentarse a este nivel es tener el chasis completamente fabricado, además se pueden presentar con el mismo modelo de automóvil siempre que se suba una categoría respecto a años previos.

- Clase 3

Por último, la categoría para los equipos más principiantes, en ella presentan los modelos en fase de diseño o de validación del modelo, y puntuarán sólo en las pruebas estáticas. Como regla general, un equipo no se puede presentar a esta categoría dos años seguidos, con la intención de fomentar el desarrollo, pero puede haber excepciones si el equipo también se presenta a las clases 1 o 2 [5].

### 2.1.3. Disciplinas

Ya que se trata de la simulación de una situación real, cada equipo dependiendo de la categoría a la que se presente, deberá superar unas pruebas u otras. En ellas se demostrarán las prestaciones que poseen los monoplazas. Primeramente, los equipos deben pasar primero las pruebas estáticas para poder acceder a las dinámicas.

#### 1. Pruebas estáticas

- Business Plan: los equipos presentan el plan de negocio del vehículo construido, convenciendo al jurado de que su producción ofrece más beneficios y ventajas frente a otros. Para así evaluar la capacidad del equipo para desarrollar y entregar un caso comercial, logístico, de producción o técnico integral.
- Cost and Manufacturing: donde se entregará un documento con los costos de todas y cada una de las piezas del monoplaza. Estimando su capacidad para considerar los presupuestos.

- Engineering Design: informando de todas las especificaciones del diseño, los motivos de haber tomado esas decisiones, así como sus ventajas, para que puedan ser evaluadas por el equipo de jueces.

## 2. Pruebas dinámicas

- Skidpad: para demostrar la aceleración lateral, haciendo círculos a izquierda y derecha con el vehículo, en un circuito en “ocho” como se observa en la ilustración 2.

El circuito está compuesto por dos pares de círculos concéntricos, el exterior tiene un diámetro de 21,25 m y el interior de 15,25 m, a su vez la distancia entre los centros es de 18,25 m. Cada equipo puede intentar hasta cuatro carreras, con dos conductores diferentes, pudiendo realizar cada uno de ellos dos carreras.

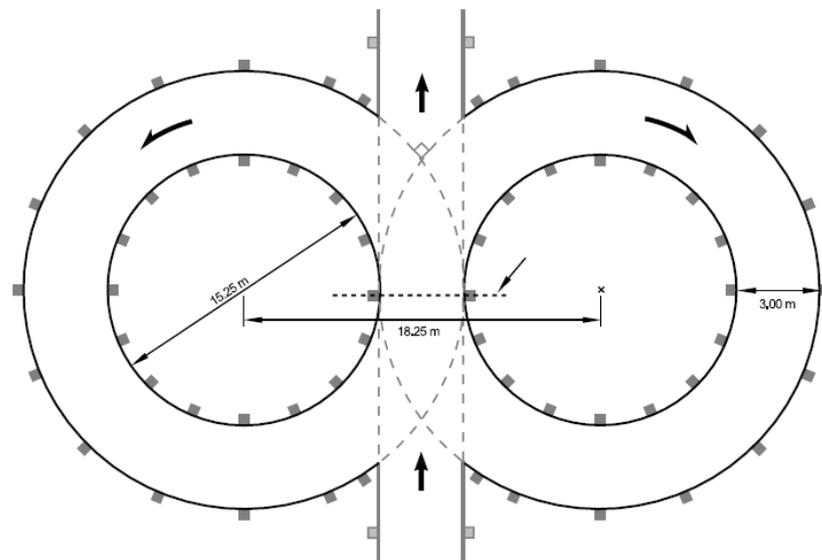


Ilustración 2. Circuito Skidpad [6].

- Acceleration: el monoplaza tiene que, en el menor tiempo posible acelerar en una línea recta de 75 metros. Se puede intentar hasta cuatro veces, haciéndolo con dos conductores, limitando a dos carreras por conductor.
- Autocross: se trata de conducir el coche durante un kilómetro en un circuito a una velocidad entre 40 km/h y 48 km/h, cuyo tiempo indicará las cualidades dinámicas y de maniobrabilidad.

Al igual que las anteriores pruebas, se puede realizar hasta cuatro carreras con dos conductores diferentes.

- Endurance: es la demostración más relevante. Durante 22 kilómetros los coches tienen que demostrar todas sus capacidades para hacer distancias largas. La velocidad promedio debe ser de 48 km/h a 57 km/h con velocidades máximas alrededor de 105 km/h.

Se debe hacer una parada a los 11 kilómetros apagando el motor y volviéndolo a arrancar para observar la fiabilidad del vehículo al límite.

- Efficiency: se calcula la energía que ha necesitado el monoplaza para realizar la prueba de resistencia. Se basa en una métrica de la cantidad de combustible consumido y el tiempo promediado en cada vuelta [1].

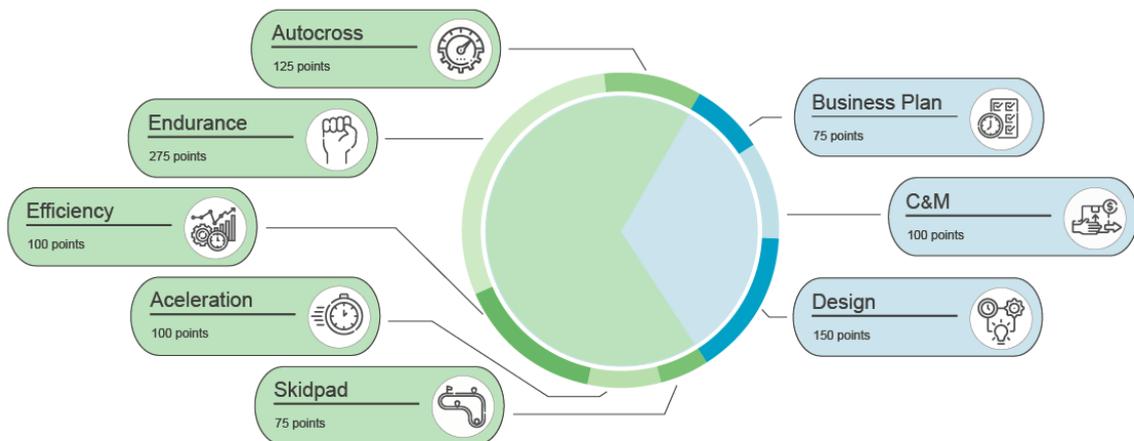


Ilustración 3. Porcentaje de las pruebas (Elaboración propia).

#### 2.1.4. Inspecciones técnicas

Una de las bases de Fórmula Student es la seguridad, por lo que antes de proceder a las pruebas dinámicas, el monoplaza tiene que superar cuatro inspecciones técnicas que no puntúan.

Las cuales se describen a continuación:

- Scrutineering: se revisan todas las especificaciones de la normativa de la competición referentes a distancias, geometrías y materiales. Y se hace

una prueba en la que el piloto tiene que ser capaz de salir del monoplaza en menos de cinco segundos.

- Tilt Test: se posiciona el monoplaza con el piloto en una plataforma horizontal y se inclina inicialmente 45 grados para comprobar que no existe ningún tipo de pérdida de líquidos y a continuación 60 grados para comprobar que no vuelca, demostrando su estabilidad frente a las fuerzas laterales.
- Noise Test: el nivel del sonido se medirá durante una prueba estacionaria, con la caja de cambios del vehículo en punto muerto, se medirá a 0,5 m desde el final de la salida del escape y el sonido no puede superar los 110 dB.
- Brake Test: para demostrar la capacidad de frenada del monoplaza, en un tramo concreto debe frenar bloqueando las cuatro ruedas a la vez y sin desviarse de su trayectoria.
- Rain Test: esta prueba deben pasarla los monoplazas eléctricos para comprobar su perfecto aislamiento al rociar el auto.

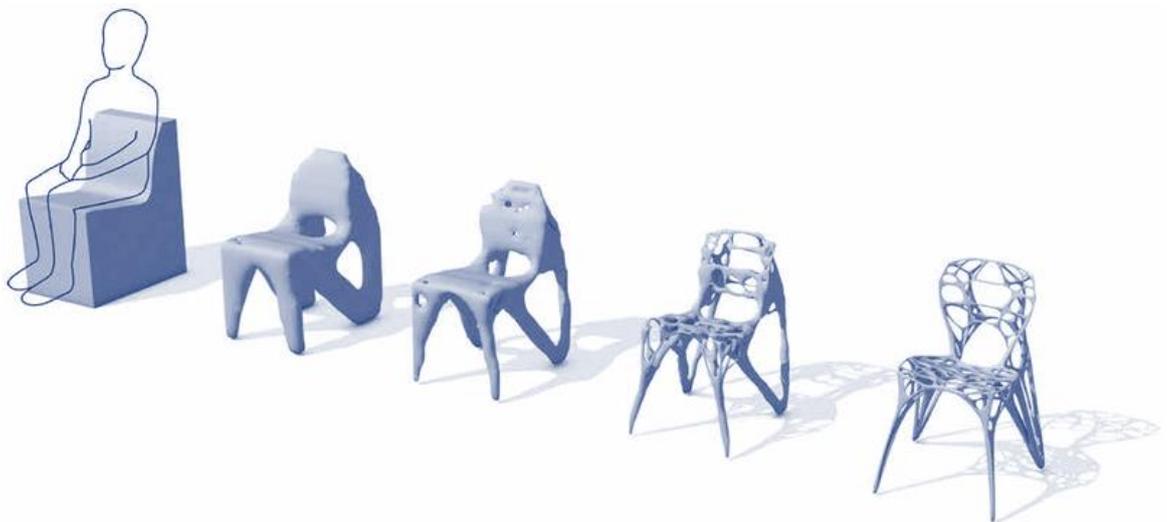
## 2.2. Optimización topológica

La optimización topológica es un subcampo del diseño digital que posibilita alcanzar gracias a fórmulas matemáticas, la distribución idónea de materia en un volumen establecido, el cual se encontrará sometido a tensiones mecánicas [7].

Su principal objetivo es la simplificación estructural manteniendo las propiedades mecánicas del objeto, por ello está enfocada a aquellos componentes en los que el peso es una característica crucial. En la actualidad, la optimización topológica es usada principalmente en las industrias aeroespacial, automotriz y de obras civiles [8].

En los procesos tradicionales de diseño digital para comprobar si una pieza aguanta las cargas a las que va a estar sometida, lo que se hace es aplicarlas en la pieza ya fabricada, y una vez ahí, el ingeniero será el encargado de pensar los cambios que necesita para que se comporte correctamente. En cambio, con la optimización topológica esas cargas van a ser los datos de entrada con los que el software trabajará y propondrá una geometría mejorada para esas situaciones de carga [9].

Ahora bien, se debe tener siempre presente que los resultados de la optimización en ningún caso son la solución de diseño en sí misma, sino que es una referencia que le servirá de ayuda al profesional para el posterior CAD. Dicha operación busca la simplicidad pensando en el proceso de fabricación, por lo que en muchos casos no podrá tener la forma más optimizada posible [7].



*Ilustración 4. Optimización topológica de una silla [10].*

En la realización de una optimización topológica, se deben de tener en cuenta varios aspectos; el espacio de diseño, el o los casos de carga a los que va a estar la pieza, el material y el proceso de su fabricación.

Por lo tanto, es primordial el conocimiento de las características y exigencias del objeto de estudio por parte del diseñador o ingeniero, para la correcta realización de la optimización e interpretación de las soluciones [11].

Los principales beneficios de la optimización podrían ser, la reducción de peso y volumen, la maximización de la resistencia, la reducción de costes, la minimización de tiempos de fabricación y la posibilidad de crear diseños orgánicos y atractivos [12].

### 2.2.1. Historia

En 1960 Schmidt, propuso una idea innovadora; se dio cuenta de que los ingenieros tendían a diseñar productos que aguantaran su vida útil soportando los esfuerzos máximos a los que iban a estar sometidos, y todo esto al mínimo coste, por lo tanto, esta preocupación por el diseño se podría resolver de forma sistemática con problemas de minimización de restricciones, y existiría la capacidad de solucionarlo con técnicas de programación no lineal recurriendo a ordenadores.

A raíz de esto, y al gran desarrollo de las tecnologías de fabricación aditiva y el desarrollo de materiales, hoy en día es posible fabricar multitud de productos y componentes que hace décadas era impensable y hace que muchos aspectos del trabajo de los ingenieros sean mucho más fáciles, rápidos y económicos [11].

### 2.2.2. Principales aplicaciones

En primer lugar, se hará referencia a la industria automotriz la cual lo aprovechó para reducir la cantidad de materias primas y con ello costes.

A continuación, se ve el chasis impreso en 3D del Light Rider, que tiene un peso de tan sólo 6 kilos. Es la primera motocicleta impresa en 3D, cuya invención le corresponde a Apworks.



*Ilustración 5. Moto Light Rider [13].*

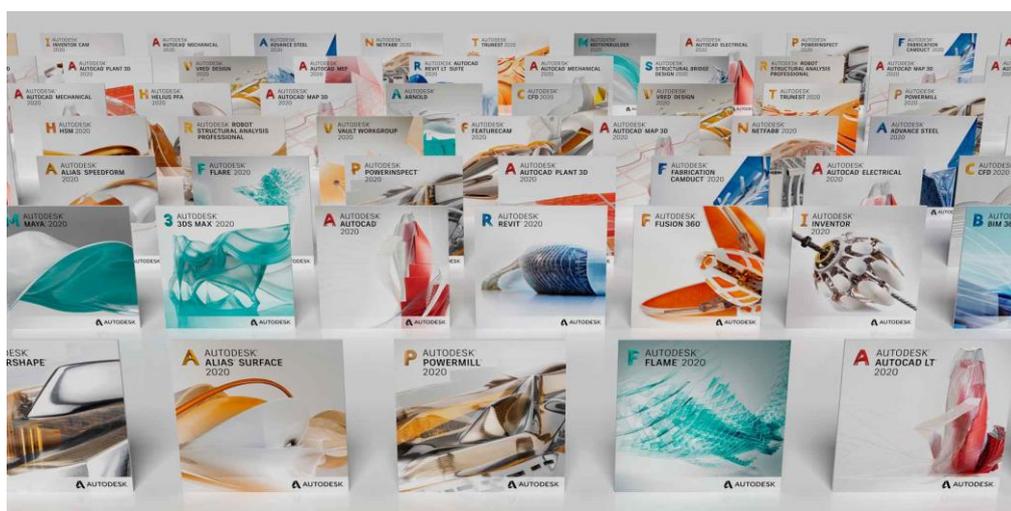
La aeronáutica indudablemente es otro de los sectores interesados en la optimización topológica, tanto para reducir costes directos como indirectos. El conjunto de cambios lo que acaba generando en una aerolínea son ahorros muy considerables.

Por último, mencionar la medicina la cual también está haciendo uso de este método de diseño, el cual ofrece grandes facilidades a la hora de fabricar implantes a medida, con incluso mejores prestaciones que los tradicionales [9].

## 2.3. Autodesk Fusion 360

Autodesk fue fundada en 1982 por John Walker y otros doce cofundadores, actualmente tiene su sede en Estados Unidos. Es una empresa especializada en software de diseño en 2D y 3D, cuyo propósito es el de servir como soporte y herramienta para numerosas industrias de ingeniería, fabricación, construcción y arquitectura, a la hora de diseñar, construir y simular sus proyectos.

El producto más notable de dicha compañía es AutoCAD, el cual permite crear dibujos técnicos detallados. Pero también se deben destacar otros programas de Autodesk como Inventor, Revit, 3DMax o Fusion 360, que será en el que se centrará y empleará este Trabajo Fin de Grado [14].



*Ilustración 6. Productos de Autodesk [15].*

### 2.3.1. Características Fusion 360

Fusion 360 es un programa extraordinario de ingeniería que combina el diseño industrial y mecánico, dotado de todas las herramientas necesarias para construir un prototipo físico. Es un software alojado en la nube, que más allá de su faceta de diseño CAD, verá las opciones de CAE, con las que elaborará amplia variedad de simulaciones, estudiará las de CAM y desarrollará los diseños para la fabricación final, posibilitando de esta forma unificar el diseño, la ingeniería y la fabricación en un único programa [16].

Además de la aplicación web, tiene una app disponible para móviles lo cual hace muy versátil ya que se puede mostrar el proyecto en cualquier momento de forma improvisada [17].

A continuación, se enumeran algunos de los motivos por los que se recurre a este programa y el razonamiento de que sea un software tan versátil:

- Herramienta integral: abarca desde el desarrollo del diseño hasta la posible exportación del modelo para una posterior impresión 3D, pasando por la realización de simulaciones que permitirán ver el comportamiento del modelo ante las situaciones de la vida real.
- Elimina barreras: aquellas que siempre han estado presentes entre el diseño y la fabricación, ya que permite realizar formas complejas capaces de ser mecanizadas.
- Modelado flexible: gracias a todas sus opciones en el momento de diseñar, pues incluye modelado poligonal Sub-D, modelado de superficies NURBS, modelado R-Splines, modelado de curva Bezier...
- Importación y exportación de archivos: da muchas facilidades a la hora de los tipos de archivos en los que se pueden guardar los trabajos (.OBJ,.DXF,.DWG, .SLDPRT...).
- Diseño generativo y simulación avanzada: permitiendo generar varias alternativas a un mismo diseño, dependiendo de las condiciones que se hayan aplicado al modelo.
- Gestión integrada de datos: el propio programa se encargará de administrar automáticamente versiones anteriores a las que se puedan acceder con facilidad para modificar o acceder a datos que puedan ser de utilidad en el presente.
- Colaboración: al ser un programa alojado en la nube da la opción de poder trabajar varias personas y de conectar diferentes partes externas en un mismo proyecto.
- Fabricación: incluye el núcleo HSM y la utilidad de impresión 3D [18].

“Autodesk envisions Fusion360 as a single design and manufacturing platform, hosted in the cloud, that you’ll never have to leave. NO string of different software, no emailing files back and forth, no data translation errors - a fusion of all of Autodesk’s technology covering 360 degrees of the design and manufacturing process. Is that visión a reality today? Nos entirely. But Fusion 360 is getting closer all the time, and Autodesk is dedicated to its grand plan.” [19]



Ilustración 7. Funciones Fusion 360 [19].

### 2.3.2. Conocimientos previos sobre la utilización de Fusion 360

#### a) Formas de crear objetos

- Modelado de sólidos: consiste en la construcción de objetos mediante formas básicas en 3D, o mediante el diseño de bocetos en 2D que luego pasan a ser en 3D.
- Modelado de superficies: se utiliza para la creación de cuerpos sin volumen con un grosor cero, aunque posteriormente se les pueda dar el espesor deseado.
- Modelado de formas libres: este tipo de modelado da mucha libertad ya que da la opción de crear formas con un aspecto más fluido y orgánico, generalmente se construyen desplazando aristas, vértices o caras, y después se pueden convertir a sólidos.

- Sheet Metal: permite crear objetos mediante el doblado de chapa metálica teniendo en cuenta todas sus características.
- Importación y edición de Mesh: gracias a este apartado es posible manipular la malla de un objeto aunque sea de forma limitada, ya que se pueden importar ficheros en formato STL y OBJ [17].

## b) La interfaz

En ella se realiza todo el trabajo y es la que proporciona las diferentes herramientas para poder construirlo. A continuación, se ven aquellas secciones más importantes y las que más se utilizan para este trabajo [17].

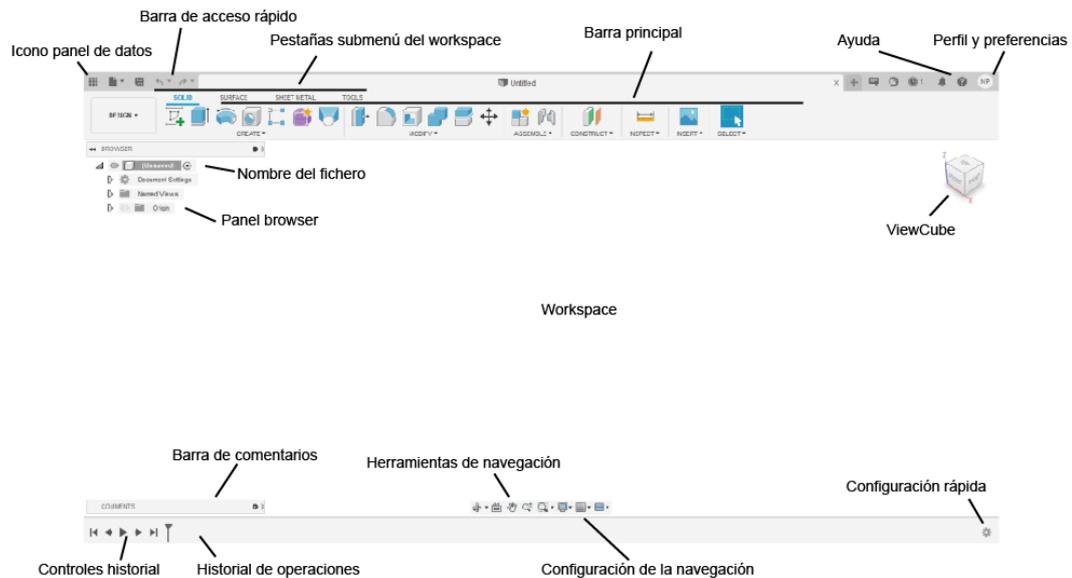


Ilustración 8. Interfaz (Elaboración propia).

- Panel de control: desde aquí se tiene acceso a todos los proyectos en la nube, además de poder importar ficheros y añadir colaboradores (Ilustración 9).

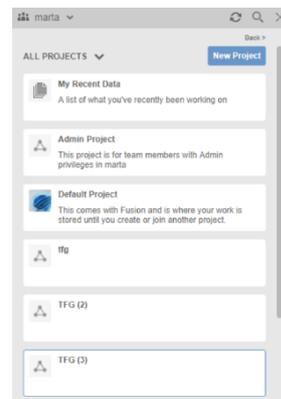


Ilustración 9. Panel de control.

- Barra de acceso rápido: en ella se observan funciones relativas al fichero, guardar, deshacer y rehacer. De las funciones del fichero se tiene la posibilidad de crear un nuevo diseño, abrir uno existente, guardar cómo, exportar el fichero o incluso prepararlo para impresión 3D.
- Perfil y preferencias: desde donde se accede a la cuenta personal, a los ficheros en la nube y a las preferencias de la aplicación, las cuales son interesantes revisar antes de comenzar el proyecto.

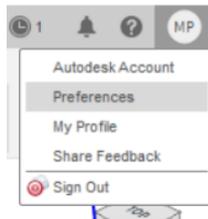


Ilustración 10. Perfil y preferencias.

- Ayuda: dirige directamente a la documentación de ayuda de la web, pero también se puede acceder a un panel de ayuda Learning Panel y a contenido de tutoriales.
- Workspace: aquí se accede para definir qué tipo de modelado se quiere utilizar, dependiendo de ello la barra principal cambiará (Ilustración 11).

Design se utiliza para el diseño de objetos, bien sean modelos sólidos, superficies, objetos de chapa metálica...

Generative design crea diseños que satisfacen los requisitos de fabricación, rendimiento y costes.

Render se utiliza para crear imágenes fotorrealistas del modelo.

Animation para crear vídeos de los ensamblajes en una vista de explosión, incluso se le añade movimiento tanto a la cámara como a los propios sólidos que componen el ensamblaje.

Simulation es donde se realizan los ensayos de carga con las diferentes condiciones de contorno, además de la optimización topológica.

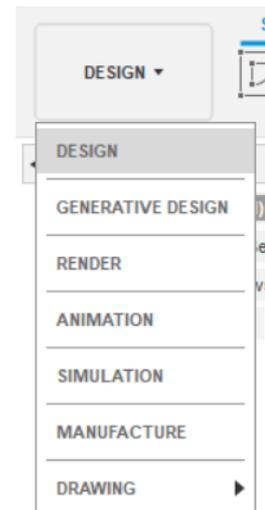


Ilustración 11.  
Workspace.

Manufacture para generar la programación de maquinarias de control numérico.

Y por último Drawing para obtener los planos técnicos de los objetos creados.

- Barra principal: como ya se ha mencionado, variará en función del Workspace. En ella se encuentran las herramientas que se pueden utilizar para ejecutar las acciones que se deseen en cada Workspace, las que más se utilizarán en el presente proyecto serán las de los apartados de Design y de Simulation por lo que serán descritas a continuación en los apartados 2.3.2.c y 2.3.2.d respectivamente.
- ViewCube: permite mover la cámara de forma rápida. El icono de la casa lleva a la posición por defecto, lo cual se puede definir previamente.
- Panel browser: aparecen los elementos creados, así como el origen de coordenadas y las vistas predefinidas.
- Barra de comentarios: los cuales son únicamente visibles para los colaboradores.
- Historial de operaciones: muestra todas las operaciones que se han ido realizando en orden cronológico, y deslizando con los cursores se puede retroceder omitiendo las acciones que se hicieron posteriores al momento deseado.
- Herramientas de navegación: para poder desplazarse y cambiar las vistas del panel.
- Configuración de la navegación: para modificar la configuración de visualización de la ventana [17].

### c) Barra principal Design

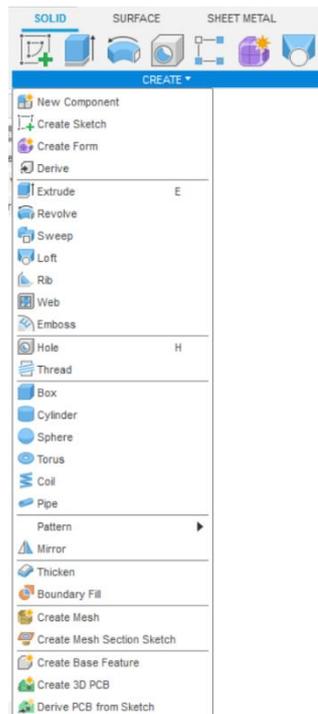


*Ilustración 12. Barra principal de Design.*

Se encuentran varias partes con desplegados en cada una de ellas (Ilustración 12). La primera parte concede mucha libertad para el diseño de los componentes. Comenzando con un Sketch con el que después se puede

“jugar” con las numerosas opciones, como utilizar Extrude, Revolve, Sweep..., o bien utilizar las herramientas de figuras simples en las que se obtiene directamente un cubo, un cilindro...

Dos de las herramientas muy utilizadas de este apartado son Pattern y Mirror, la primera permite crear un patrón que se va a repetir en el objeto, por ejemplo, en un cilindro, un taladro de 10 mm de diámetro a 50 mm del centro cada 20 grados, y la segunda para piezas que son simétricas respecto a un eje, ya que se puede crear solamente una de las mitades y el programa generará la mitad omitida.



*Ilustración 13. Design create.*

La segunda parte (Modify) se utiliza para modificar la geometría creada previamente, por ejemplo combinando dos cuerpos, cortando por la intersección que forman o redondeando aristas. También da la posibilidad de vaciar un cuerpo, de atribuirle un material o incluso de escalar el objeto, entre otras muchas.

Assamble da la opción de ensamblar componentes, posicionándolos entre sí y definiendo el movimiento relativo. Coloca articulaciones en una componente o bloquea la posición relativa.

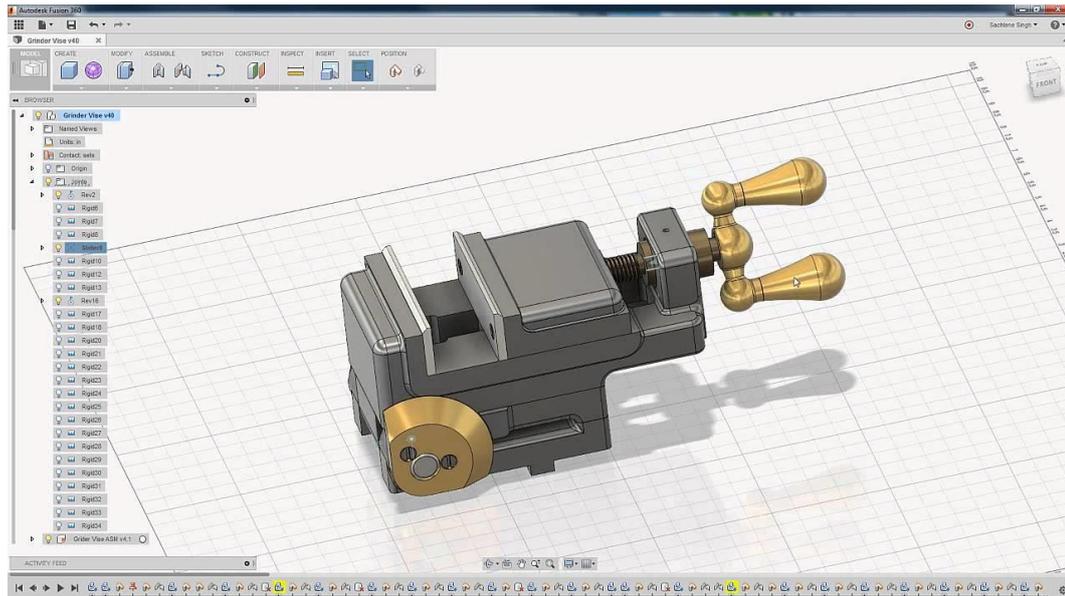


Ilustración 14. Ejemplo de un ensamblaje [20].

Construct genera tanto planos como aristas y vértices, se utiliza para generar el diseño, son elementos que no se muestran en el boceto final pero que sirven de base para su construcción.

Inspect tiene herramientas para medición y análisis, aparte de permitir la visualización de diferentes análisis que pueden servir de ayuda.

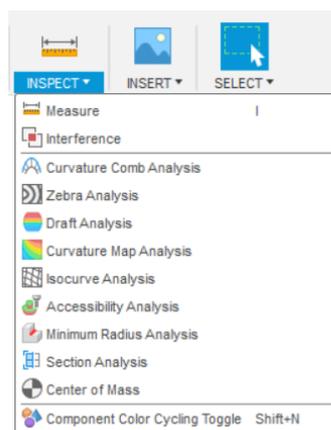


Ilustración 15. Design inspect.

Insert habilita el poder incluir elementos ajenos en el diseño.

Y la última herramienta Select, da la opción de selección por ventana, selección libre o selección pintando caras.

#### d) Barra principal Simulation

Simulation es el Workspace más utilizado por los ingenieros. Existen ocho tipos de simulaciones:

- Static Stress: se utiliza para materiales que tienen un comportamiento lineal, generalmente metales y analiza la deformación y el estrés debido a restricciones y cargas que se le aplican al objeto.
- Model Frequencies: determina las frecuencias modales del componente.
- Thermal: para observar como actuaría un modelo en diferentes condiciones de temperatura.
- Thermal Stress: combina Static Stress y Thermal en un único estudio.
- Structural Buckling: para estudiar el pandeo del objeto.
- Nonlinear Static Stress: se utiliza para materiales con un comportamiento no lineal, y corresponde a la versión compleja de Static Stress.
- Event Simulation: se observa la conducta del modelo al aplicarle cargas que varían en el tiempo.
- Shape Optimization: determina la reducción de masa que se puede realizar en un modelo a partir de unas cargas y restricciones introducidas previamente [17].

En concreto se procede a describir la barra principal de Static Stress ya que será la que mayoritariamente se utiliza para el desarrollo del trabajo.



*Ilustración 16. Barra de herramientas Simulation.*

En primer lugar se ve Study, que sólo se utiliza para crear un nuevo estudio.

Después se observa el apartado Simply con el que se simplifica la geometría del modelo eliminando las partes que no son relevantes.

En tercer lugar Materials, para aplicar el material deseado.

Constraints permite definir las restricciones del objeto bien sean fijas o con limitaciones de movimiento.

Loads define las fuerzas a aplicar.

Contacts da la opción de crear contactos entre los diferentes componentes de forma automática o manual.

Con Display se define que es lo que se quiere ver en pantalla, el modelo, los resultados del estudio o la malla generada.

Manage permite ver varios criterios del estudio a la vez.

Gracias a Solve se procede a ejecutar la simulación y muestra los posibles fallos o información relevante sobre el cálculo.

Y por último Results donde se observan los resultados de las simulaciones.

## 2.4. Chasis

### 2.4.1. Introducción

En la industria automotriz se podría decir que uno de los elementos más importantes del vehículo es el chasis.

Se considera como una de las unidades más primordiales debido a su función principal, que es la de soportar y fijar los diferentes elementos que forman el auto, como lo son el sistema de frenos, de dirección, de suspensión, transmisión, anclaje de motor y carrocería.

Hoy en día, a la hora de diseñar el chasis uno de los factores que más influye es la seguridad del conductor, por lo que se tiene en cuenta a la hora de crear barras de protección para un posible vuelco, o hacer que la propia estructura sea la que absorva la energía en caso de accidente.

Hay tres aspectos fundamentales para la construcción de un chasis; la ligereza, la rigidez y la economía. Todo ello va a ser tratado en el proyecto, en primer lugar la ligereza por lo que se realiza la optimización para conseguir el mínimo peso necesario, combinándolo con la rigidez para conseguir la resistencia que se requiere para poder superar las pruebas a las que va a ser sometido, y por último la economía lo cual también está estrechamente relacionado, ya que a menos material menos costos.



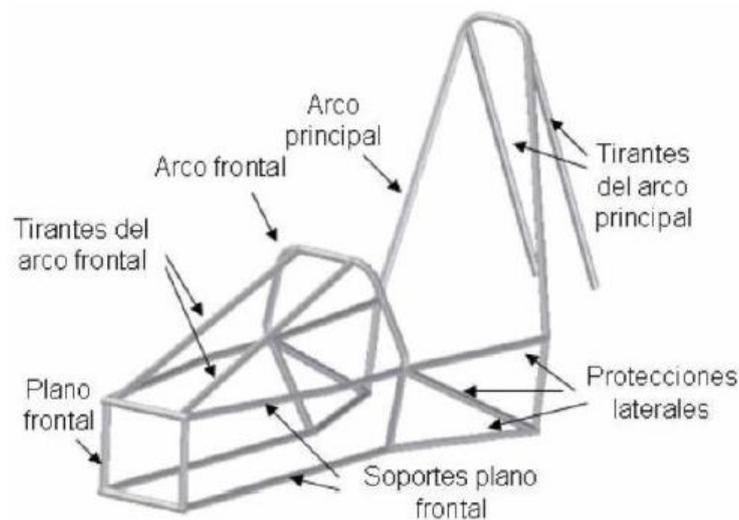
*Ilustración 17. Uno de los primeros chasis de la historia [21].*

Se pueden definir dos tipos de chasis, tubulares y monocasco. Los chasis monocasco integran el chasis a la carrocería. En cambio, los tubulares son un componente a parte de la carrocería, generalmente contruidos con secciones

rectangulares, llegando a una fabricación más sencilla que los monocasco y una mayor resistencia a torsión, algo que a continuación se verá que es un factor muy importante a considerar en los coches de competición, y por lo que este tipo de chasis es el más utilizado [21].

Un chasis está formado por lo menos por los siguientes elementos (Ilustración 18):

- Arco principal: barra antivuelco situada detrás del conductor.
- Arco frontal: barra antivuelco situada delante del conductor, sobre sus piernas.
- Tirantes de los arcos: estructuras necesarias para dar más rigidez a los arcos anteriormente nombrados.
- Estructura de impacto lateral: para unir los dos arcos, y proteger al conductor en caso de accidente.
- Plano frontal: dota de protección a la zona de los pedales [22].



*Ilustración 18. Partes principales de un chasis [22].*

#### 2.4.2. Restricciones de la Formula SAE que afectan al chasis.

Una vez se está inscrito en la Formula SAE, se está comprometido a cumplir las normas generales y específicas vigentes del año. Y es responsabilidad del

propio equipo y de la facultad, leer y comprender las reglas de la categoría en la que participan.

Las reglas son aplicables a todos los vehículos, excepto en el caso en el que se especifique que son únicamente para monoplazas de combustión interna o para monoplazas eléctricos. En este caso, el vehículo irá provisto de un motor de combustión interna por lo que será a las reglas a las que se harán referencia en este documento.

A continuación se presentan aquellas restricciones que se tendrán que tener en cuenta y que se tendrán que comprobar a la hora de diseñar el chasis.

- Los vehículos deben fabricarse de acuerdo con el diseño, los materiales y los procesos descritos en el SES.
- La cabeza y las manos del conductor no deben tener contacto con el suelo en ningún momento.
- La distancia mínima entre los ejes de las ruedas, midiéndolo desde el centro de contacto de la rueda delantera con el centro de contacto de la rueda trasera será igual o superior a 1525 mm.
- La distancia más pequeña entre ruedas del mismo eje, en ningún caso debe de ser inferior al 75% de la distancia entre los dos ejes.
- La estructura primaria se debe construir con tuberías de acero, materiales alternativos o materiales compuestos que cumplan con la normativa. Las curvas deben de ser suaves y continuas.
- El mamparo delantero debe estar construido con tubería de sección cerrada que cumpla la normativa.
- El arco pincipal y el frontal deben extenderse desde el punto más bajo de un lado de la estructura hasta el punto más bajo del lado contrario.
- El arco principal debe estar construido de una sola pieza de tubería con sección cerrada, continua y sin cortar, y con un material que cumpla con la normativa.
- El arco frontal debe estar construido con tubería de sección cerrada, con un material que cumpla la normativa. Puede estar constituido de más de una pieza de tubería.

- El arco principal y el arco frontal deben integrarse de forma segura en la estructura primaria mediante la triangulación correcta (Ilustración 19).

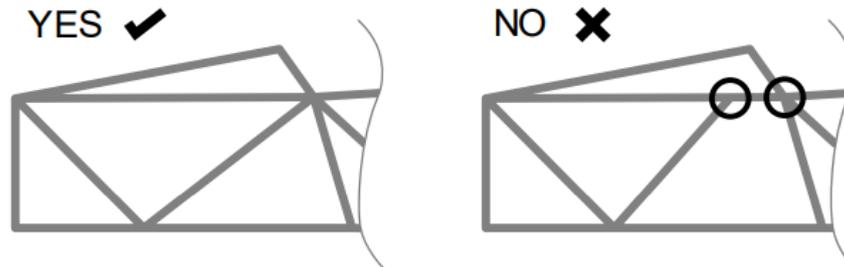


Ilustración 19. Triangulación de las barras del chasis [5].

- En la vista frontal, las verticales del arco principal deben tener una distancia mínima de 380 mm en el punto en el que se unen con los tubos de la estructura principal del chasis.
- Desde la vista lateral, el arco frontal o cualquier parte del mismo no debe estar inclinado a más de  $20^\circ$  de la vertical. De igual manera pasa con el arco principal, no debe estar inclinado a más de  $10^\circ$  desde la vertical.
- La superficie superior del arco frontal no debe estar más baja que la parte superior del volante (Ilustración 20).
- Debe existir un mínimo de 50 mm desde la línea recta trazada desde la parte superior del arco frontal hasta el extremo del refuerzo si se extiende hacia atrás (Ilustración 20).
- Debe existir un máximo de 160 mm por debajo de la superficie superior del arco principal para colocar los tirantes los cuales serán rectos y sin curvas, dichos tirantes formarán con el arco principal como mínimo  $30^\circ$ . En el caso de que el arco esté inclinado hacia atrás los tirantes estarán hacia atrás, y si el arco está inclinado hacia delante los tirantes estarán hacia delante (Ilustración 20).

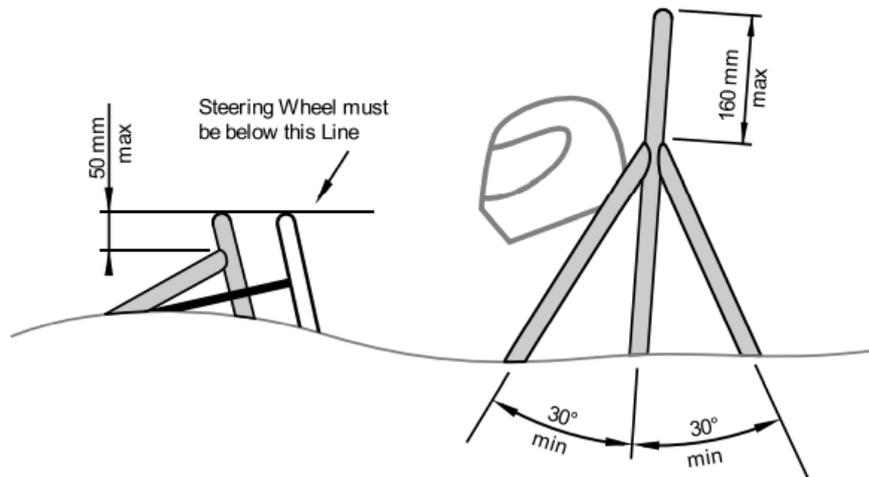


Ilustración 20. Referencias sobre el diseño del volante y los tirantes [5].

- Al estar el conductor totalmente sentado y sujeto por el sistema de sujeción debe existir un mínimo de 50 mm desde la línea recta trazada desde la parte superior del arco principal hasta la parte superior del arco frontal y el casco del conductor (Ilustración 21).

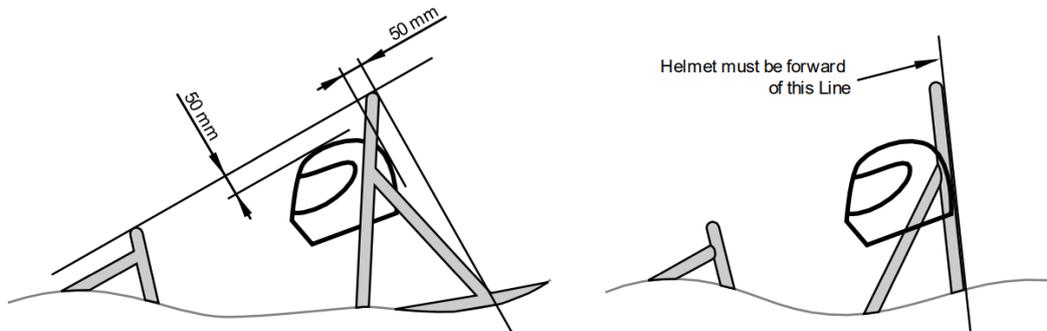


Ilustración 21. Referencias sobre el diseño del arco principal [5].

- La cabina debe ser diseñada para que pueda ser utilizada por una persona que se encuentre entre el percentil 5 femenino al percentil 95 masculino. A continuación se ven las dimensiones máximas de dicho rango.

El círculo superior de 300 mm representa la cabeza con casco, después se observan dos círculos de 200 mm, el primero representa los hombros y el segundo las caderas (Ilustración 22).

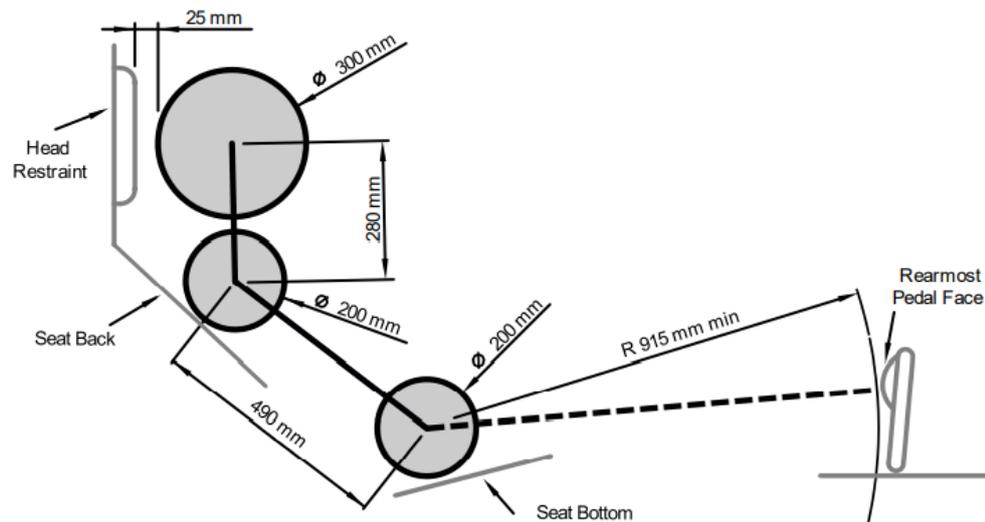


Ilustración 22. Las medidas del conductor [5].

- La estructura de impacto lateral debe estar construida con tubos de sección cerrada con un material que cumpla con la normativa, y con una triangulación adecuada. Puede estar constituido de más de una pieza de tubería.

Debe estar compuesta por al menos tres miembros tubulares a cada lado del conductor cuando se encuentra sentado en posición normal.

El miembro superior de impacto lateral debe:

- a) Conectar el arco frontal con el arco principal.
- b) Estar en una zona paralela al suelo entre 240 mm y 320 mm por encima del punto más bajo de la superficie superior del miembro de impacto lateral inferior.

El miembro inferior de impacto lateral debe:

- a. Conectar la parte inferior del arco frontal con el arco principal.

El miembro diagonal de impacto lateral debe:

- a. Conectar el miembro de impacto lateral superior y el miembro de impacto lateral inferior como se muestra en la Ilustración 23.

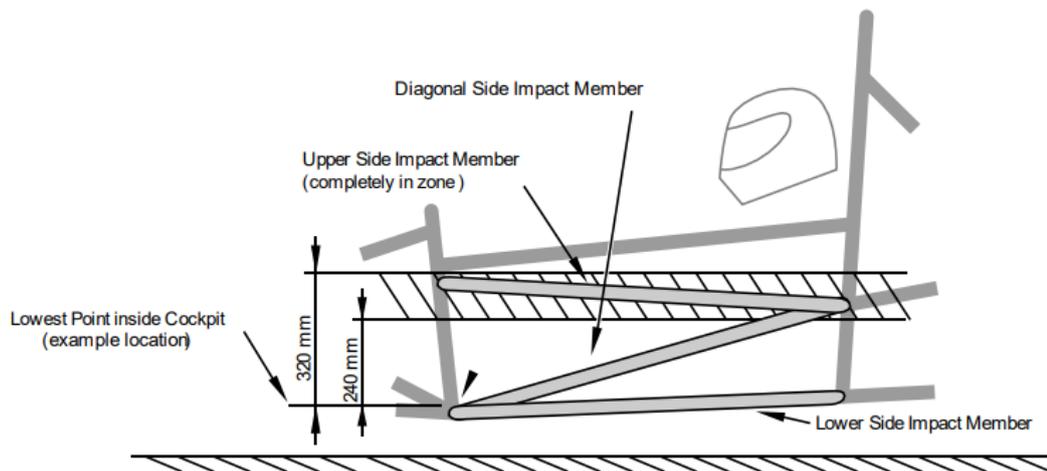


Ilustración 23. Estructura de impacto lateral [5].

- La plantilla que se muestra a continuación debe caber en la abertura de la cabina (Ilustración 24) .
- Se debe mantener una sección transversal interna libre para permitir el paso de la plantilla mostrada a continuación (Ilustración 24).

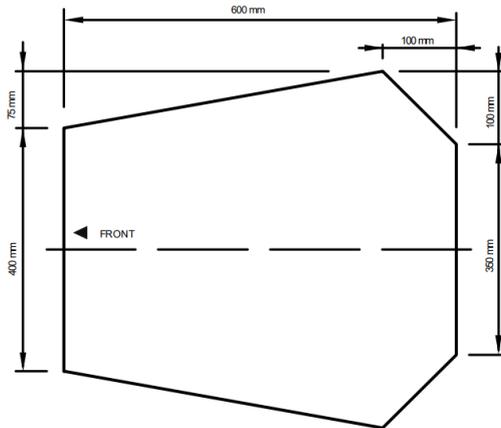


Ilustración 24. Plantilla para la abertura de la cabina [5].

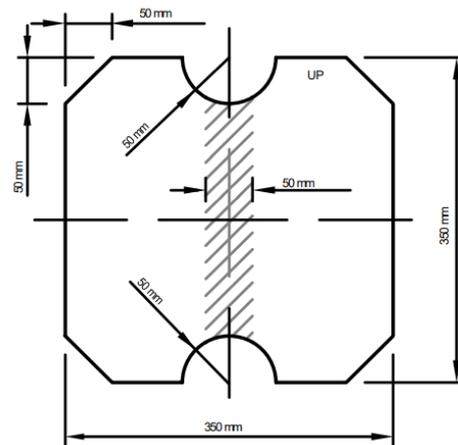


Ilustración 25. Plantilla para la sección transversal interna [5].

- El material con el que se construya el chasis debe ser de un metal o material no metálico que cumpla con UL94-VD, FAR25 o un aprobado equivalente (material no inflamable).
- Las propiedades del material continuo deben ser:

Modulo de Young (E) =200 GPa

Límite elástico (Sy) = 305 MPa

Resistencia máxima (Su) = 365 MPa

- Las propiedades del material discontinuo deben ser:

Límite elástico (Sy) = 180 MPa

Resistencia máxima (Su) = 300 MPa

- Se pueden utilizar otros materiales, pero en ese caso deberán incluirse los cálculos, en los que se demuestren que son equivalentes o mejores [14].

Tube	Minimum Area Moment of Inertia	Minimum Cross Sectional Area	Minimum Outside Diameter or Square Width	Minimum Wall Thickness	Example Sizes of Round Tube
a. Size A	11320 mm <sup>4</sup>	173 mm <sup>2</sup>	25.0 mm	2.0 mm	1.0" x 0.095" 25 x 2.5 mm
b. Size B	8509 mm <sup>4</sup>	114 mm <sup>2</sup>	25.0 mm	1.2 mm	1.0" x 0.065" 25.4 x 1.6 mm
c. Size C	6695 mm <sup>4</sup>	91 mm <sup>2</sup>	25.0 mm	1.2 mm	1.0" x 0.049" 25.4 x 1.2 mm
d. Size D	18015 mm <sup>4</sup>	126 mm <sup>2</sup>	35.0 mm	1.2 mm	1.375" x 0.049" 35 x 1.2 mm

Ilustración 26. Dimensiones de las barras [5].

Application	Steel Tube Must Meet Size per F.3.4:	Alternative Tubing Material Permitted per F.3.5 ?
a. Front Bulkhead	Size B	Yes
b. Front Bulkhead Support	Size C	Yes
c. Front Hoop	Size A	Yes
d. Front Hoop Bracing	Size B	Yes
e. Side Impact Structure	Size B	Yes
f. Bent Upper Side Impact Member	Size D	Yes
g. Main Hoop	Size A	NO
h. Main Hoop Bracing	Size B	NO
i. Main Hoop Bracing Supports	Size C	Yes
j. Driver Restraint Harness Attachment	Size B	Yes
k. Shoulder Harness Mounting Bar	Size A	NO
l. Shoulder Harness Mounting Bar Bracing	Size C	Yes
m. Accumulator Protection Structure	Size B	Yes
n. Component Protection	Size C	Yes
o. Other Structural Tubing	Size C	Yes

Ilustración 27. Dimensiones de cada barra [5].



### 3. Diseño del chasis

Como se ha descrito anteriormente el chasis más utilizado para los coches de carreras es uno tubular, por lo que será el objetivo.

Aunque primeramente se realice una estructura cerrada, después se procederá con la optimización para observar la gran eficiencia de la herramienta a utilizar (Fusion 360), y las diferentes posibilidades que se podrían adoptar para construir el chasis.

Es decir, se diseñará un chasis que sin estar perfeccionado cumpla con los requisitos que marca la normativa, y después se comprobarán sus características con las pruebas que tiene que superar para observar cómo se comporta en las diferentes situaciones, obteniendo información de cuáles son los aspectos que se podrían cambiar o mejorar, ya que se calculan los puntos más críticos del modelo. Posteriormente se procederá con la optimización topológica, la cual se analizará y estudiará para llegar a la mejor solución. Y finalmente, se construirá el diseño final del chasis formado por barras.

#### 3.1. Bocetos 2D de las estructuras principales

Una vez se han conocido todas las restricciones geométricas a las que va a estar sometido el chasis y las principales herramientas que se van a utilizar del software, se procede a realizar los modelos 2D de cada una de las partes necesarias para definir el modelo.

- Base

La primera estructura definida es la base, ya que servirá como referencia guía para la colocación de las estructuras restantes. En ella se ha tenido en cuenta la distancia mínima entre ejes de 1525 mm, de la relación entre el eje mayor y el menor, las medidas del piloto, así como la distancia mínima entre los laterales del arco principal cuando entra en contacto con la estructura principal del chasis que es de 380 mm (Ilustración 28).

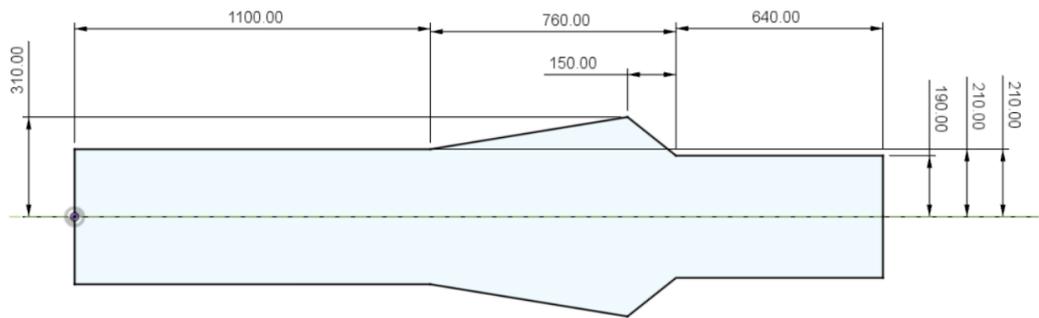


Ilustración 28. Base.

- Plano frontal

Es aquel encargado de absorber la energía en caso de impacto, las dimensiones han sido diseñadas teniendo en cuenta las dimensiones de los pedales del auto (Ilustración 29).

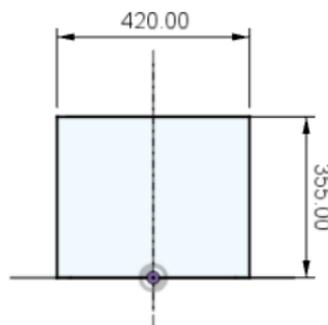


Ilustración 29. Plano frontal.

- Arco frontal

A continuación se observan las dimensiones del arco frontal, el cual irá delante del conductor sobre sus piernas. Se le ha aplicado una inclinación de  $15^\circ$  respetando la normativa mencionada anteriormente. La altura está pensada para la correcta colocación del volante y para que en una posible volcadura el piloto no entre en contacto con el suelo (Ilustración 30).

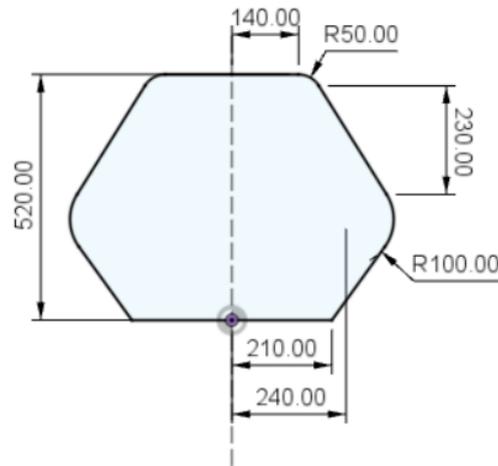


Ilustración 30. Arco frontal.

- Arco principal

Para su diseño se ha tenido en cuenta la distancia mínima inferior de 380 mm, y se le ha aplicado 5° de inclinación respecto de la vertical para ofrecer una mayor comodidad al conductor a la hora de conducir, respetando la normativa de no tener un ángulo mayor a 10°. Tiene una altura total de 1100 mm desde la base del chasis (Ilustración 31).

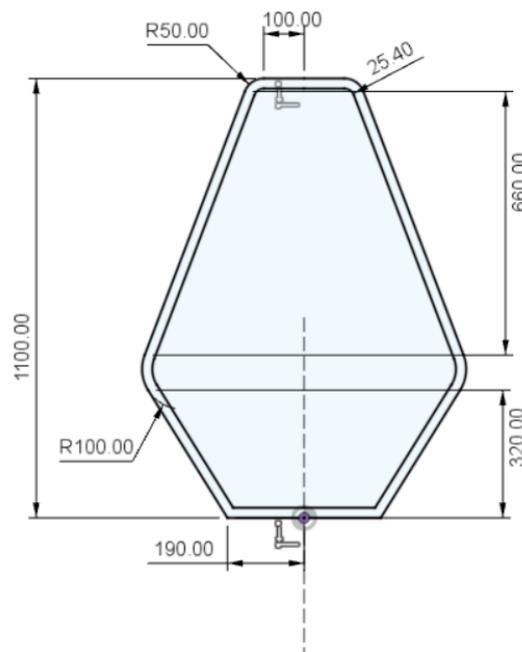


Ilustración 31. Arco principal.

Posteriormente, se ha añadido una barra en el arco principal ya que debido a sus dimensiones y a las cargas a las que va a estar sometido es necesario para asegurar la integridad de la estructura (Ilustración 32).

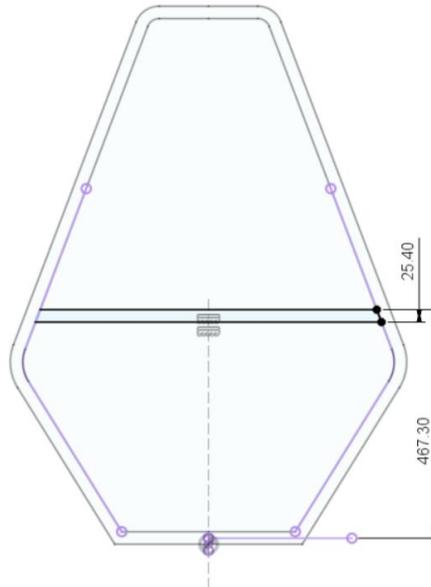


Ilustración 32. Barra en el arco principal.

Se le ha dado a cada perfil un grosor de 25,4 mm, simulando así el diámetro que se tiene previsto para las barras que irán colocadas finalmente.

### 3.2. Resto de estructuras

Una vez se han creado los perfiles principales lo que se hace es relacionar unos con otros obteniendo la estructura deseada en 3D, también se ha agregado el material de acero que será el que se aplicará a todo el chasis, y tiene las siguientes características (Tabla 1).

Density	$7,85 \cdot 10^{-06} \text{ kg/mm}^3$
Young's Modulus	210 GPa
Poisson's Ratio	0,3
Yield Strength	305 MPa
Ultimate tensile Strength	365 MPa
Thermal Conductivity	0,056 W / (mm C)
Thermal Expansion Coefficient	$1,2 \cdot 10^{-05} \text{ C}$
Specific Heat	480 J/(kg C)

Tabla 1. Características del material utilizado.

Por último, se deben tener en cuenta los anclajes de los pesos principales que soportará el chasis, como lo son los anclajes de las suspensiones de las ruedas, del motor y del asiento. Para las dimensiones de dichos anclajes debido a la falta de un equipo completo para la realización de todos los estudios necesarios, se han tomado valores de estudios previos al proyecto.

Para la simulación lo que se hace es, hacer unas perforaciones en el material donde se hará actuar las fuerzas que van a soportar esas secciones, los cuales serán meros elementos de transmisión de carga para ver de una forma aproximada su comportamiento.

Para las suspensiones se utilizará un diámetro de 20 mm, respetando la distancia mínima entre ejes de 1525 mm y con unas distancias como se pueden observar en la ilustración 33.

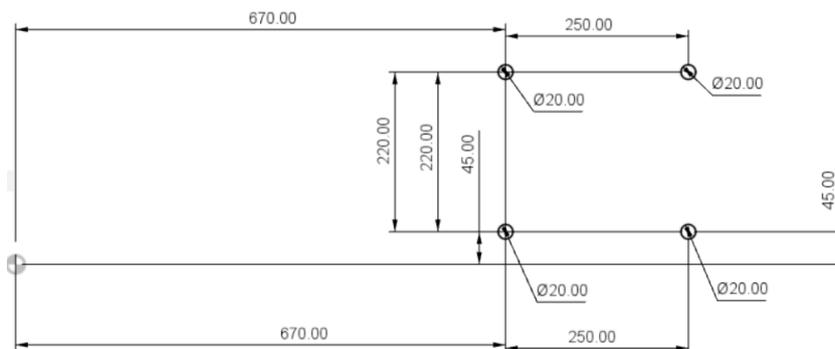
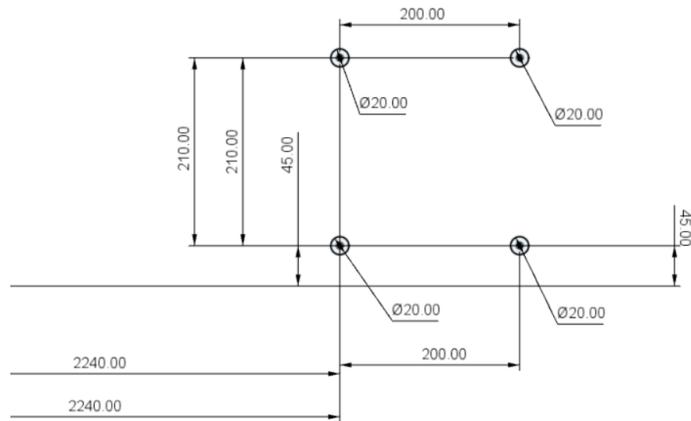
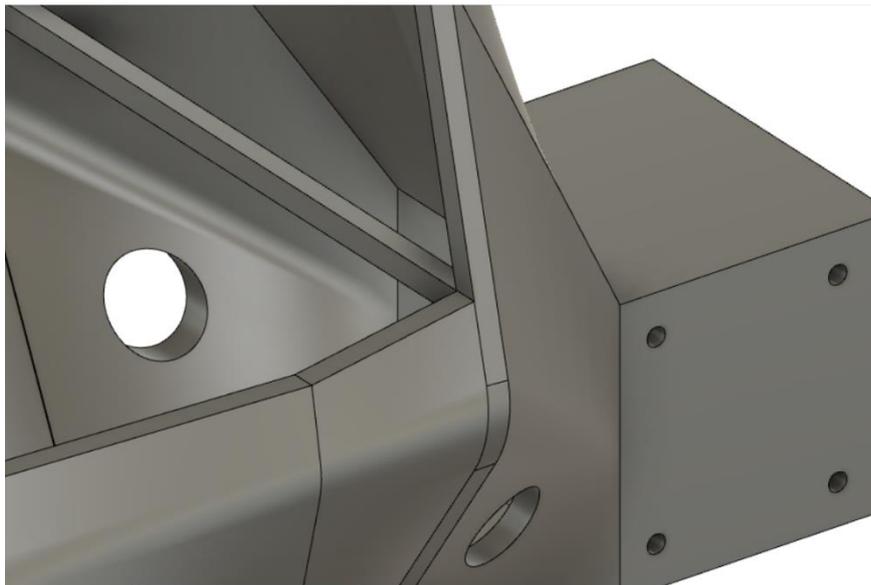


Ilustración 33. Skecht suspensiones delanteras.



*Ilustración 34. Skecht suspensiones traseras.*

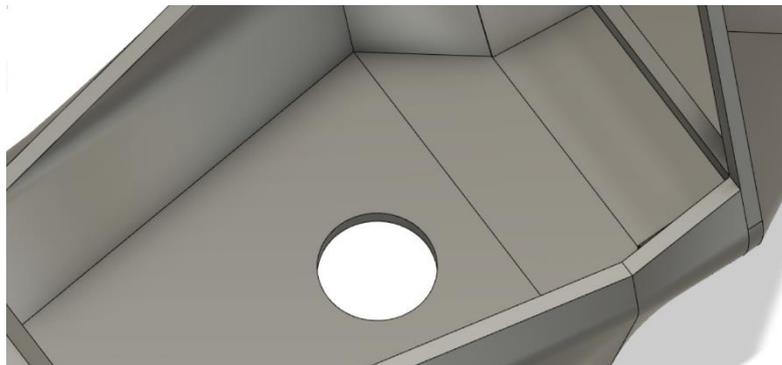
En segundo lugar se procede a anclar el motor directamente al monoplaza mediante unos anclajes, para así intentar impedir que las vibraciones se transmitan al chasis, irá alojado en la parte trasera del auto, detrás del conductor y tendrá dos amarres principales, uno a cada lado del chasis con un diámetro de 92 mm, a 2000 m del plano frontal y una altura desde la base de 180 mm (Ilustración 35).



*Ilustración 35. Anclajes del motor.*

Por último, se ha creado la simulación del asiento del conductor, es decir el punto donde se aplica la mayor fuerza en el momento en el que el piloto está

sentado, lo que se ha representado con una circunferencia de diámetro 165 mm, a 1550 mm del plano frontal (Ilustración 36).



*Ilustración 36. Perforación para simulación del asiento.*

Como resultado de todo lo descrito anteriormente se obtiene la geometría a la cual se aplicarán los estudios de carga para finalmente optimizar (Ilustración 37).



*Ilustración 37. Modelo 1.*



## 4. Análisis y estudios

### 4.1. Estudio modelo 1



*Ilustración 38. Render modelo 1.*

En este estudio del modelo 1 se procede a realizar todos aquellos ensayos necesarios. El objetivo es llegar a la optimización para observar donde se puede reducir masa y obtener de una forma más fácil, el modelo final construido con barras.

Para ello se accede a la parte de simulación en la que uno por uno se verán los resultados obtenidos en las simulaciones. Esos resultados servirán de guía, ya que al interpretarlos se puede ir tanteando como va a quedar la optimización y por defecto ir conociendo aquellos puntos en los que se necesita material y aquellos en los que no.

Inicialmente se aplican unas condiciones, fijas para todos y cada uno de los ensayos. Estas condiciones comunes son los principales pesos que va a soportar el chasis, en primer lugar en la zona de anclaje del asiento una fuerza equivalente a 70 kg, en los anclajes del motor el peso del motor el cual también le va a aportar rigidez al monoplaça, de igual manera 70 kg, lo cual pasa a ser una fuerza de 686 N, en dirección vertical y hacia la base del vehículo. Tampoco se debe olvidar la fuerza de gravedad, que evidentemente actuará en todos los ensayos.

Se ha reflexionado sobre si aplicar una fuerza o una aceleración para simular las acciones de los ensayos en el chasis, y se ha decidido observar, qué comparaciones se pueden sacar entre las dos formas. Como bien se conoce, al aplicar una fuerza, ésta únicamente actúa sobre la cara en la que se coloca, en

cambio la aceleración actúa en cada diferencial de volumen, es decir actúa como si estuviese repartida en todo el volumen por lo que el efecto es diferente.

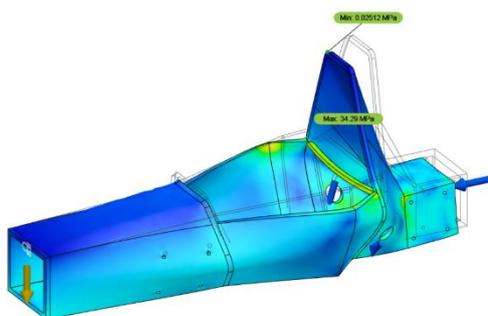
#### 4.1.1. Pruebas

##### - Impacto frontal

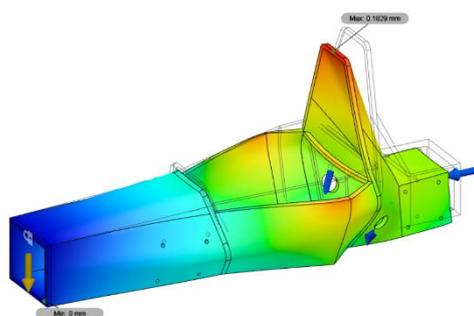
Para certificar que el chasis no va sufrir una rotura en un choque frontal, según la normativa debe soportar un impacto equivalente a 25g.

Como ya se ha comentado anteriormente, se van a observar que diferencias hay entre aplicar una fuerza o una aceleración. En primer lugar para realizar la simulación se fija el plano frontal y se aplica una fuerza en el plano trasero de 150 kN, en horizontal y hacia el plano frontal.

Al generar la malla se observa que no es totalmente correcta, ya que hay zonas incompletas, pero es algo que de momento no se debe dar importancia ya que lo que se está obteniendo son unos resultados aproximados. En el momento en el que se quiera obtener el modelo definitivo entonces si que se tendrá que tener más cuidado en este aspecto.



*Ilustración 39. Impacto frontal, tensiones (aplicación de una fuerza).*



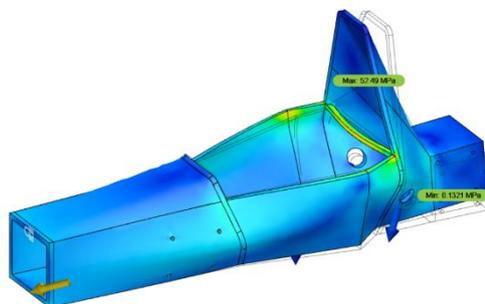
*Ilustración 40. Impacto frontal, desplazamientos (aplicación de una fuerza).*

Lo primero que se obtiene es el valor del factor de seguridad el cual es muy usado en ingeniería e industria. Es el cociente entre el valor calculado de la capacidad máxima de un sistema y el valor del requerimiento esperado real al que se verá sometido. E indica el peligro de rotura que tiene el objeto analizado.

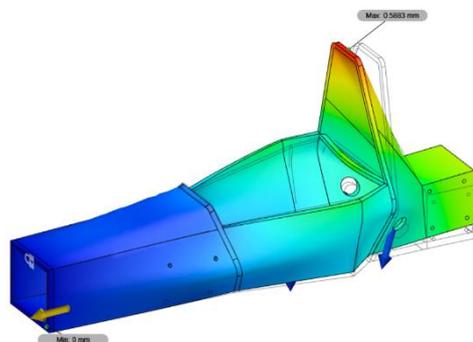
Después se observa que el valor máximo de tensiones es 34,29 MPa y el máximo de desplazamientos es 0,183 mm, por lo que son valores aceptables e insignificantes para la estructura que se está analizando, además son muy

pocos los puntos en los que se generan puntos críticos, ya que incluso hay puntos en los que no se presenta ningún cambio en la estructura.

Para la segunda opción, se mantiene la restricción pero esta vez se aplica una aceleración de 25g en sentido horizontal y hacia la parte delantera del monoplaza.



*Ilustración 41. Impacto frontal, tensiones (aplicación de una aceleración).*



*Ilustración 42. Impacto frontal, desplazamientos (aplicación de una aceleración).*

El resultado de la tensión máxima es de 52,49 MPa y el desplazamiento máximo es 0,588 mm, cuyos datos también se pueden considerar admisibles.

Se observa que se obtienen resultados diferentes, en el caso de aplicar una aceleración, los valores máximos son mayores ya que en este caso es un estudio más real, ya que actúa sobre todo el modelo pero tampoco hay una gran diferencia. Respecto a los puntos críticos son muy semejantes, por lo que en general no hay muchas diferencias entre los dos estudios.

#### - Impacto lateral

El análisis de impacto lateral es primordial ya que si el vehículo no actúa como debe, se puede poner en peligro la integridad del conductor. Es muy común recibir un impacto lateral de otro vehículo por lo que son muy importantes las estructuras laterales.

Para este caso, se fija la estructura de impacto lateral de un único lado del chasis. En la estructura de impacto lateral restante, se aplica una fuerza de 57 kN que tiene un ángulo de 45° con la horizontal. El sentido de esta fuerza es hacia el lateral restringido.

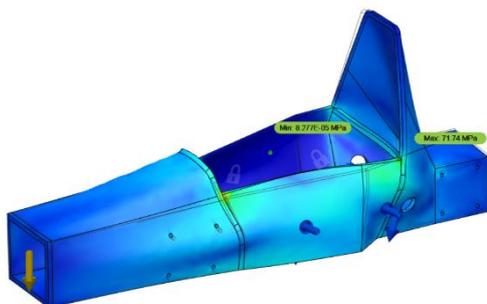


Ilustración 43. Impacto lateral, tensiones (aplicación de una fuerza).

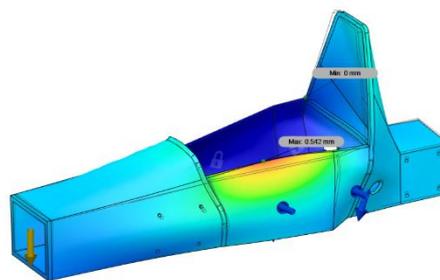


Ilustración 44. Impacto lateral desplazamientos (aplicación de una fuerza).

El valor de la tensión máxima es un poco superior al ensayo anterior ya que es 71,74 MPa, pero sigue siendo un valor muy pequeño, y en el caso de desplazamientos se tiene como valor máximo 0,542 mm, algo que ni siquiera se tiene que tener en cuenta ya que no llega ni a 1 mm.

En la segunda opción, se mantiene la restricción de movimiento de la estructura de impacto lateral, pero en vez de aplicar una fuerza de 57 kN, se aplica una aceleración 5g en sentido horizontal hacia el lateral restringido y 8g en sentido vertical hacia la base del chasis.

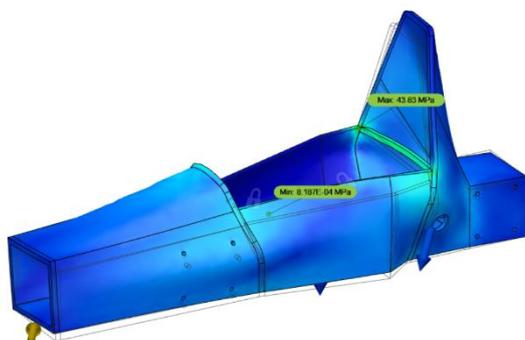


Ilustración 45. Impacto lateral, tensiones (aplicación de una aceleración).

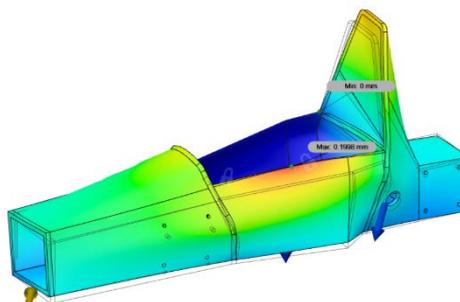


Ilustración 46. Impacto lateral, desplazamientos (aplicación de una aceleración).

La tensión máxima es 43,83 MPa, y el desplazamiento máximo es 0,2 mm.

Una vez realizados estos dos estudios se observa que aquellas partes que se fijan y aquellas donde se aplica una fuerza no serán optimizadas, algo que no interesa, así que se modifica el estudio y en vez de fijar toda la estructura de impacto lateral de un lado del chasis, se fija únicamente los puntos de anclaje de las suspensiones de ese mismo lado.

Para hacer el ensayo con fuerza en vez de una fuerza de 57 kN se aplica una fuerza de 35 kN pero también se modifica su lugar de aplicación, ya que ahora

será en los puntos de anclaje de las suspensiones del lado contrario al que se ha fijado, lo que simulará el golpe en esos puntos.

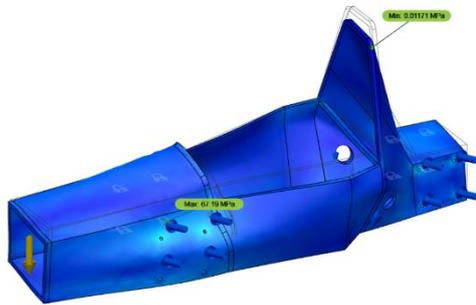


Ilustración 47. Impacto lateral, tensiones (aplicación de una fuerza, segundo ensayo).

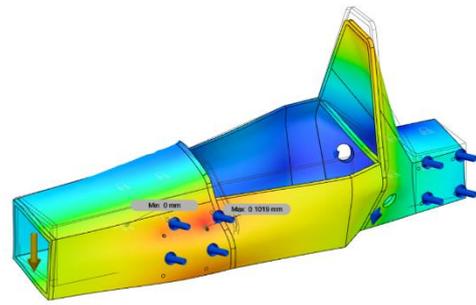


Ilustración 48. Impacto lateral, desplazamientos (aplicación de una fuerza, segundo ensayo).

En este caso los valores máximos son menores, en el caso de la tensión es de 67,19 MPa y del desplazamiento de 0,102 mm, algo insignificante.

Para hacer el ensayo con una aceleración, la restricción es igualmente en los anclajes de las suspensiones de un lado del chasis y aplico 5g y 8g de igual manera que en el primer ensayo.

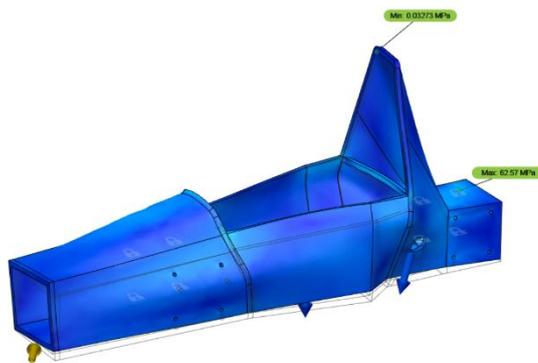


Ilustración 49. Impacto lateral, tensiones (aplicación de una aceleración, segundo ensayo).

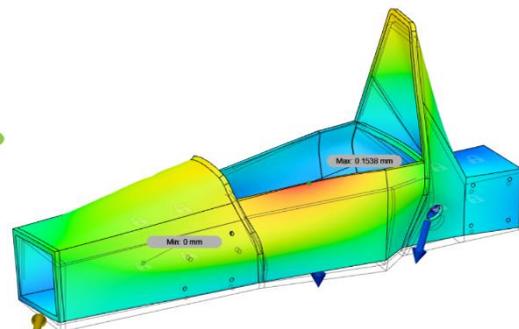


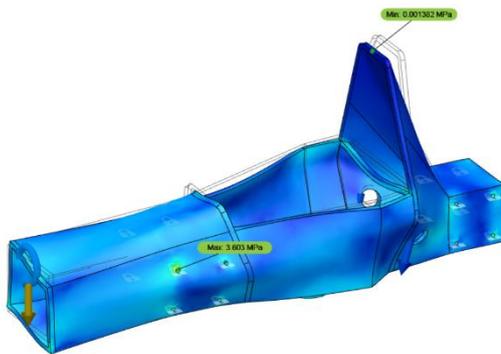
Ilustración 50. Resultado impacto lateral, desplazamientos (aplicación de una aceleración, segundo ensayo).

La tensión máxima es 62,57 MPa y el desplazamiento máximo es 0.154 mm, por lo que se concluye diciendo que todos son valores aceptables en los que no habrá peligro de rotura y que apenas varía entre la aplicación de fuerza frente a la aplicación de aceleración, pero en cierto grado parece más razonable el comportamiento al aplicarle una aceleración.

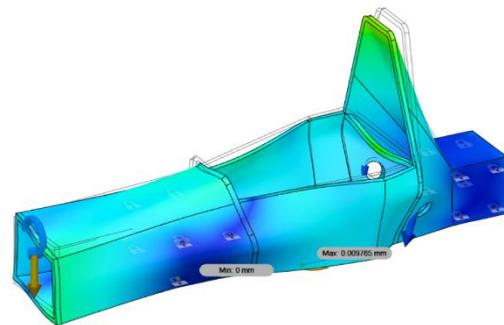
- Rigidez a torsión

La rigidez a torsión en uno de los estudios más importantes a analizar, es muy representativo debido a que es un desplazamiento dinámico normal en los autos. Una buena rigidez a torsión confirma un buen comportamiento del monoplaza en el paso por curva y por el contrario si se comporta de forma demasiado rígida y no es razonable, incrementa en exceso su peso.

Para realizarlo se ha fijado los 16 anclajes de las suspensiones y aplicado un momento equivalente a 1000 Nm en el plano frontal y otro de igual valor pero sentido contrario en el plano trasero.



*Ilustración 51. Rigidez a torsión, tensiones.*



*Ilustración 52. Rigidez a torsión, desplazamientos.*

Se obtienen unos valores totalmente insignificantes de 3,603 MPa y 0,009 mm.

- Rigidez a flexión

En primer lugar se ha restringido el movimiento en los anclajes de las suspensiones y después se ha distribuido el peso aproximado del vehículo en los diferentes miembros del vehículo, el monoplaza pesa 786 kg por lo que se aplica un fuerza de 7,7 kN en las zonas superiores. Ocurre como en el ensayo de impacto lateral, no interesa colocar la fuerza en todas las zonas superiores porque no lo optimizará, por lo que sólo se colocan en aquellas zonas que se tiene conocimiento previo de que irá una barra después de la optimización.

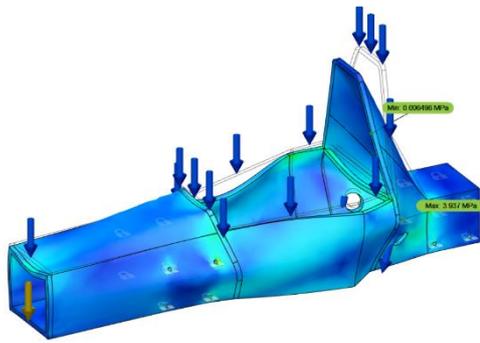


Ilustración 53. Rigidez a flexión, tensiones.

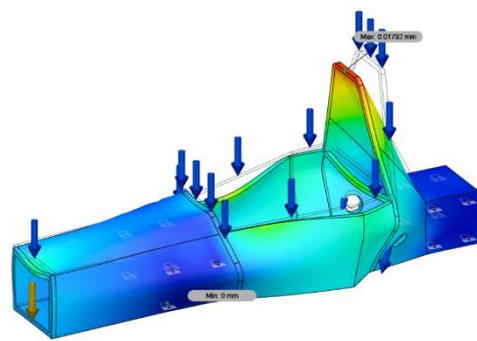


Ilustración 54. Rigidez a flexión, desplazamientos.

Al resolver este ensayo se obtiene una tensión máxima de 3,937 MPa y un desplazamiento máximo de 0,017 mm, lo cual se puede despreciar.

- Frenada

En el caso de la simulación con fuerza, se ha procedido a fijar los anclajes de las suspensiones y a aplicar en ellas una fuerza horizontal y una fuerza vertical. La fuerza horizontal va a ser igual en todos los anclajes con un valor de 940 N, y la fuerza vertical va a ser de 472 N en las ruedas traseras y de 868 N en las ruedas delanteras. Como ya se ha mencionado antes, al no tener un equipo completo con el que poder calcular todo lo necesario, estos datos han sido extraídos de un TFG posterior al presente [23], que en su caso si que se pudo analizar todo lo necesario para conocer las fuerzas que iba a tener que soportar el chasis.

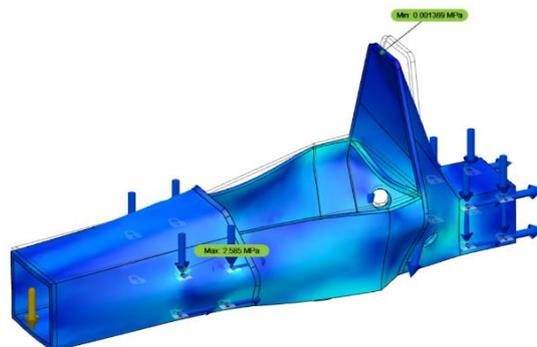


Ilustración 55. Frenada, tensiones (aplicación de una fuerza).

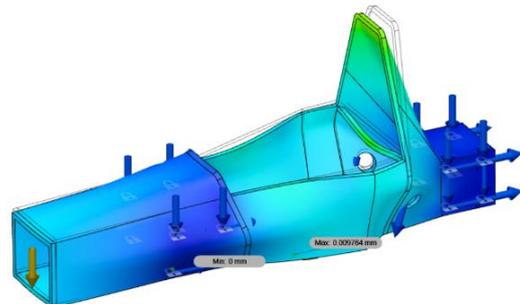
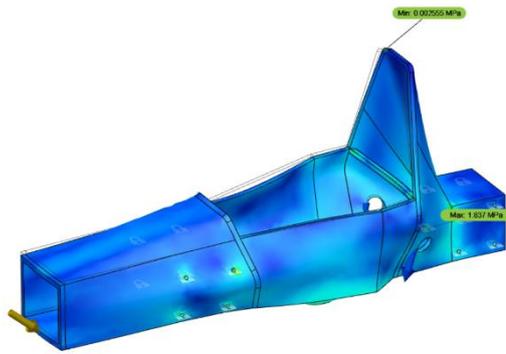


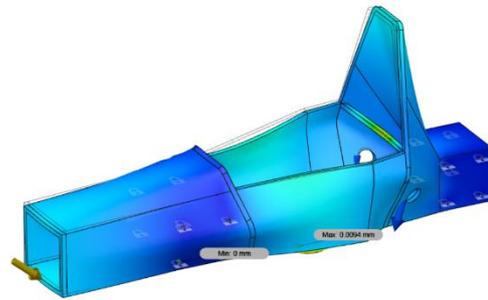
Ilustración 56. Frenada, desplazamientos (aplicación de una fuerza).

Los resultados máximos de la tensión y del desplazamiento son 2,585 MPa y 0,01 mm, respectivamente.

Para la segunda opción, es decir en la que se aplica una aceleración, se han fijado igualmente todos los anclajes de las suspensiones y aplicado una aceleración 1.2g horizontal y hacia el plano trasero del chasis.



*Ilustración 57. Frenada, tensiones (aplicación de una aceleración).*



*Ilustración 58. Frenada, desplazamientos (aplicación de una aceleración).*

En este caso los resultados son un poco menores 1,837 MPa como tensión máxima y 0,009 mm como desplazamiento máximo.

#### - Aceleración

Los ensayos de aceleración y frenada son muy similares, es cierto que el de frenada debe ser más duro, pero en el caso de aplicar una fuerza se pondrán los mismos valores para ver la situación más crítica que se podría dar.

Por ello se actúa igual que en la frenada, se fijan los anclajes de las suspensiones, se aplican las mismas fuerzas verticales en cada uno de ellos y sólo se modifica la fuerza horizontal, la cual cambia de sentido y sólo se aplica en las ruedas traseras.

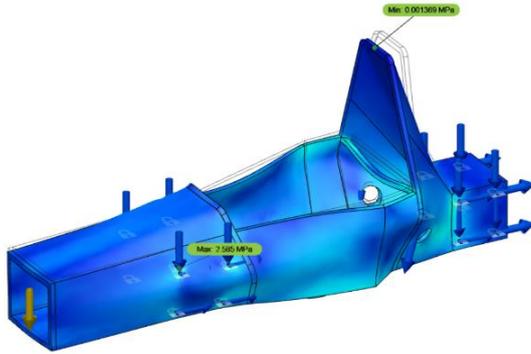


Ilustración 59. Aceleración, tensiones (aplicación de una fuerza).

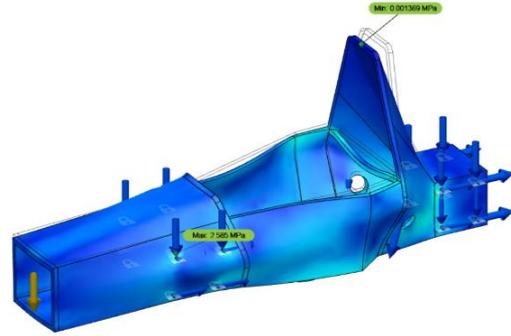


Ilustración 60. Aceleración, desplazamientos (aplicación de una fuerza).

Para el caso de aplicar una aceleración, se modifica el valor de 1.2g a 0.7g, y se coloca en sentido opuesto.

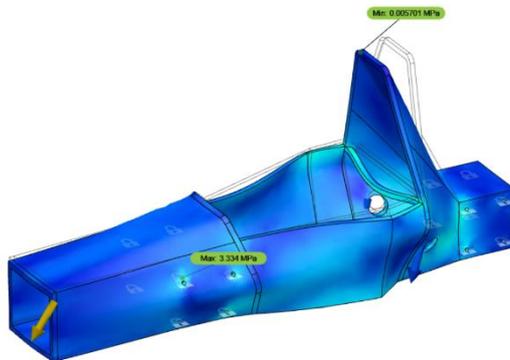


Ilustración 61. Aceleración, tensiones (aplicación de una aceleración).

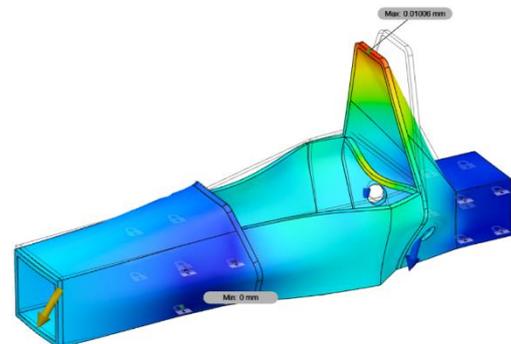


Ilustración 62. Aceleración, desplazamientos (aplicación de una aceleración).

Se observa que en los dos ensayos los valores son muy similares, y que el punto crítico se encuentra en la zona superior del arco principal, pero aún así son unos resultados peligrosos.

En el ensayo de fuerza los resultados son 2,585 MPa para la tensión máxima frente a 3,334 MPa del segundo ensayo, y respecto al desplazamiento en los dos es aproximadamente 0,01 mm. Estos valores son muy pequeños y no ponen en peligro el funcionamiento del vehículo.

- Vuelco

Y por último, se realiza una simulación para comprobar que no habrá una situación de vuelco que ponga en peligro la integridad del conductor.

Para ello en primer lugar se fijan sólo las suspensiones de un lado del chasis, y después se aplica en el lado contrario al fijado, en el punto más alto del arco principal una fuerza de 1,5 kN, ésta tiene una posición horizontal orientada hacia el lado restringido.

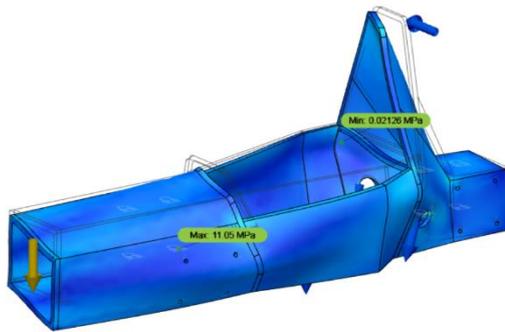


Ilustración 63. Vuelco, tensiones (aplicación de una fuerza).

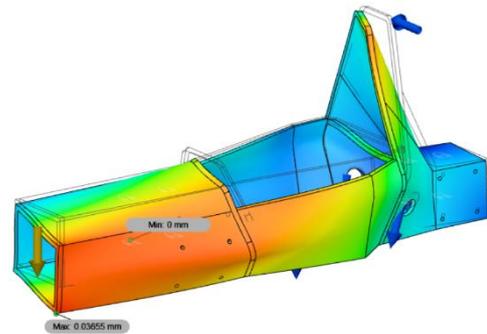


Ilustración 64. Vuelco, desplazamientos (aplicación de una fuerza).

Se observan valores más altos que los analizados anteriormente, la tensión máxima se concentra en uno de los anclajes traseros con un valor de 11,05 MPa y el desplazamiento máximo en el punto más alto del chasis pero sin ser un valor alarmante, 0,04 mm.

En el segundo ensayo se mantienen las restricciones sólo en las suspensiones de un lado del auto y se aplica en vez de una fuerza, una aceleración de 3g en el mismo sentido que estaba colocada la fuerza.

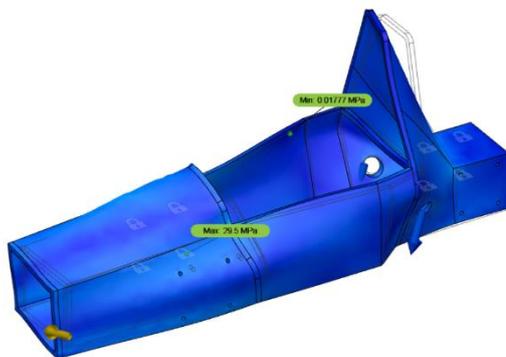


Ilustración 65. Vuelco, tensiones (aplicación de una aceleración).

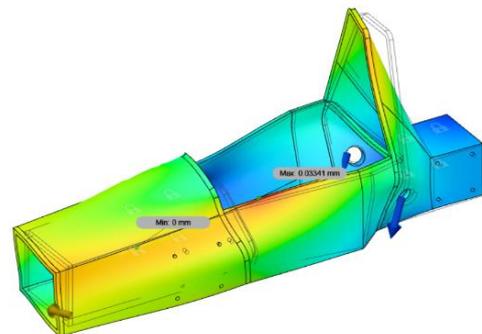


Ilustración 66. Vuelco, desplazamientos (aplicación de una aceleración).

Se observa que los resultados disminuyen bastante ya que en este caso es más preferible la aplicación de una fuerza en vez de una aceleración. Ya que, al aplicar una aceleración, el estudio es igual que el de impacto lateral, pero modificando el valor.

La tensión máxima es de 29,5 MPa y está en uno de los anclajes delanteros y el desplazamiento máximo es de 0,033 mm y pasa a estar en una de las barras laterales.

#### 4.1.2. Optimización topológica

El proceso de optimización se basa en el análisis de las cargas a las cuales va a estar sometido un elemento, y desde ahí ya se puede determinar un modelo definido.

Una vez se ha observado y analizado cada uno de los ensayos que deberá superar el chasis, se procede a ejecutar la optimización. Se ha querido hacer dos para ver si hay muchas diferencias entre ellos o no, en una de ellas se han incluido los ensayos de fuerza y en otra los de aceleración. Evidentemente las pruebas de rigidez y flexión están incluidas en ambas optimizaciones.

En primer lugar, se crea un estudio de optimización y se generan las restricciones que debe de haber. Se selecciona cierta geometría que no se podrá tocar, y por lo tanto no será optimizada, esta geometría es: el arco frontal, arco principal y los dos planos delantero y trasero, además de sobredimensionar un área alrededor de cada elemento que se ha creado para la transmisión de carga; en las suspensiones se ha puesto un radio de 25 mm, en el motor 70 mm y en el asiento 130 mm (Ilustración 67). También se ha puesto la condición de que el resultado sea simétrico.

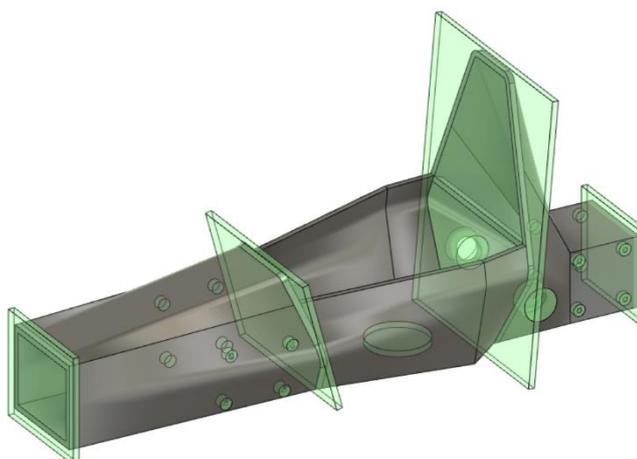
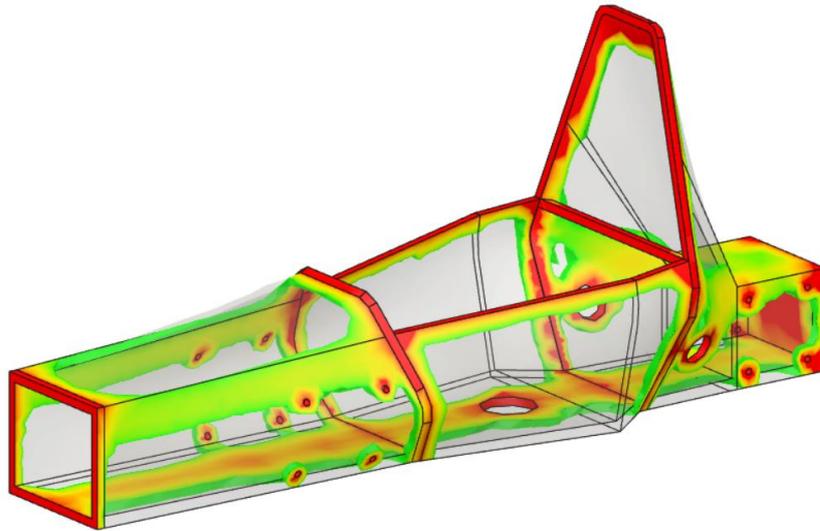


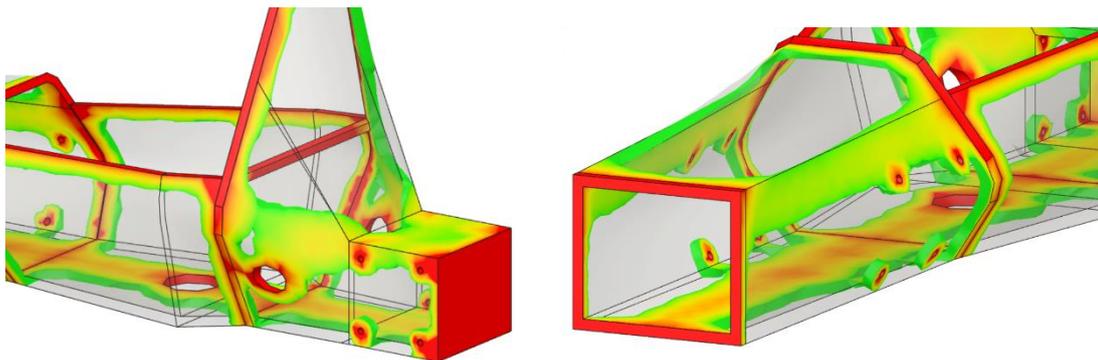
Ilustración 67. Elementos no optimizables, modelo 1.

En un primer momento, se mantuvo el plano frontal completo, pero al ejecutar la solución era una zona que daba problemas, por lo que se decidió hacerlo hueco ya que era algo que previamente se conocía que finalmente quedaría de esa forma en el modelo de barras, con lo cual lo dejamos como un marco.

El resultado de la optimización con los ensayos de fuerza es el siguiente:



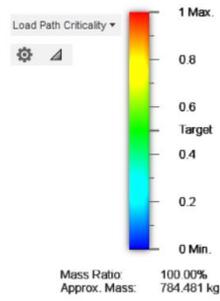
*Ilustración 68. Optimización modelo 1, vista 1 (aplicación pruebas con fuerza).*



*Ilustración 69. Optimización modelo 1, vista 2 (aplicación pruebas con fuerza).*

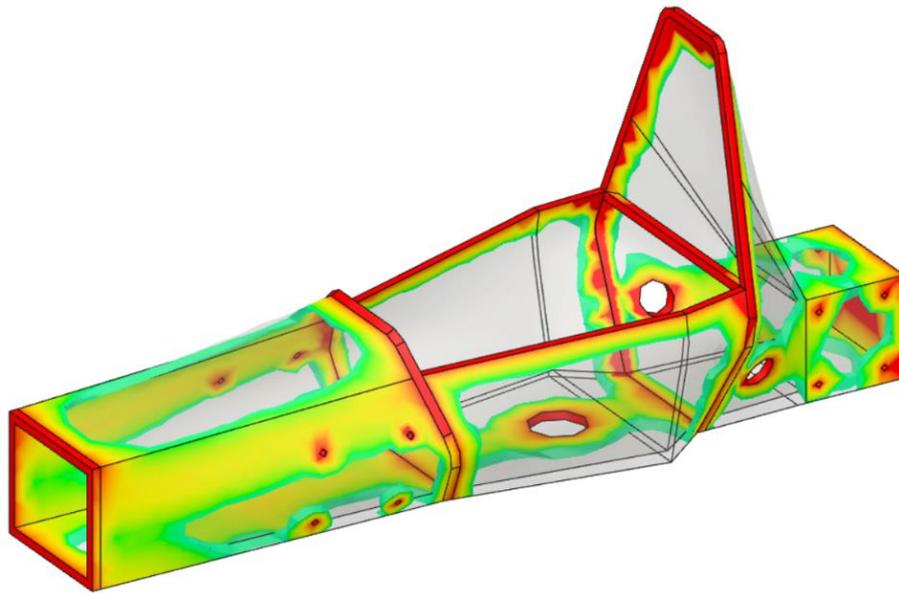
*Ilustración 70. Optimización modelo 1, vista 3 (aplicación pruebas con fuerza).*

Aparece una imagen a la derecha del Workspace (Ilustración 71) con un gradiente de color, se puede arrastrar la barra para variar los límites de los colores, para poder observar únicamente los que interesen [17]. Está diseñado para que indique en colores más cálidos aquel material más relevante en cada ensayo, o aquel que puede llegar a dar problemas y en colores más fríos, el material el cual se verá afectado por los ensayos en menor escala.

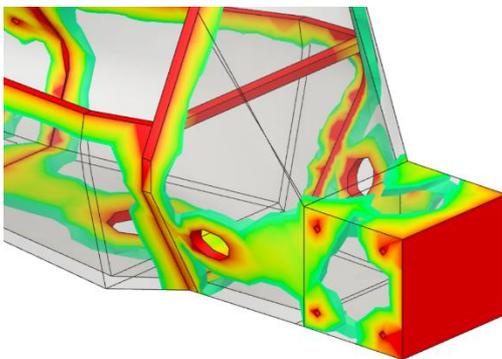


*Ilustración 71. Gradiente de color.*

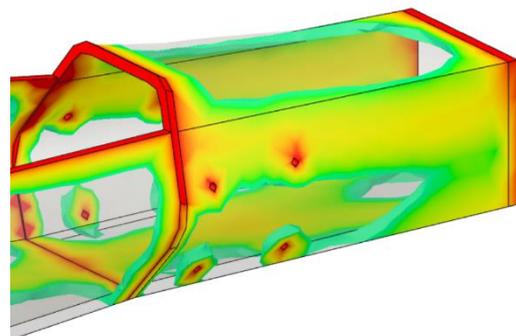
El resultado de la optimización con los ensayos de aceleración es el siguiente:



*Ilustración 72. Optimización modelo 1, vista 1 (aplicación pruebas con aceleración).*



*Ilustración 73. Optimización modelo 1, vista 2 (aplicación pruebas con aceleración)*



*Ilustración 74. Optimización modelo 1, vista 3 (aplicación pruebas con aceleración).*

Se observa que no da muchas pistas sobre donde deben ir colocadas las barras en el diseño final ninguna de las dos optimizaciones. Pero según lo analizado anteriormente con las pruebas aisladas se decide realizar las optimizaciones siguientes únicamente con el modelo en el que se aplican aceleraciones, excepto la prueba de vuelco, que se utiliza en la que se le aplica una fuerza.

Una vez eliminada una de las dos opciones que se tenía desde un principio, se procede a cambiar la configuración de la malla ya que se había dejado la que estaba por defecto. Los valores de dicha malla son los siguientes:

Model-based Size	5%
Element Order	Linear
Max. Turn Angle on curves (Deg)	60 deg
Max. Adjacent Mesh Size Ratio	1,5
Max. Aspect Ratio	10
Minimum Element Size	20

*Tabla 2. Valores de la malla por defecto.*

A continuación se harán diferentes pruebas para analizar como varían los resultados de la optimización al modificar los diferentes valores señalados en la Tabla 2.

Pero primero señalar algunos aspectos importantes respecto a la generación de la malla. En primer lugar, saber que la malla se genera como un calco de la geometría del modelo, por lo cual si en el modelo hay pequeñas separaciones, salientes o geometría muy compleja se pueden dar problemas a la hora de la creación de la malla. Esto se puede solucionar diviendo el modelo en partes más pequeñas y aplicando la malla de forma independiente, a parte de aplicar una malla más fina para esas zonas problemáticas.

Aquellos valores que se van a modificar para configurar la malla lo que hacen es especificar el tamaño y el grosor de la malla y evidentemente cuanto más pequeños pongamos los elementos que componen la malla el tiempo de resolución será mayor.

Es posible refinar la malla manualmente en aquellas zonas específicas que más interesan, pero en este caso con la modificación de la configuración será suficiente.

En primer lugar, se activará una casilla que se dejará activa para todas las mallas posteriores, que es la de Scale mesh size per part, gracias a la cual

genera una malla que es dependiente del tamaño de las partes, con lo cual genera una malla más fina para los elementos más finos.

Después se debe conocer lo que se modifica en la malla al variar sus valores:

- Model-based Size: modifica el tamaño del elemento en relación con el tamaño del modelo. Cuanto menor sea el valor, más densa será la malla.
- Element Order: define la clase de elemento que va a formar la malla, por defecto está puesto en lineal, pero los expertos aconsejan ponerlo en parabólico, en especial para aquellos modelos con curvas.
- Max. Turn Angle on curves: es el ángulo máximo de giro y afecta al número de elementos de las superficies curvas, con lo cual cuanto mayor sea el ángulo, menor será el número de elementos de la malla en una curva.
- Max. Adjacent Mesh Size Ratio: el cual afecta a la uniformidad de la transición de la malla entre la malla fina y gruesa. Especifica la relación de la longitud de arista máxima entre las aristas de elementos adyacentes.
- Max. Aspect Ratio: es la relación entre el lado más largo y el más corto del modelo. Un análisis de tensiones necesita una malla más fina en este aspecto que un análisis de desplazamientos.
- Minimum Element Size: permite realizar un refinado automático en las zonas pequeñas y el valor que se introduce es una fracción del tamaño medio.

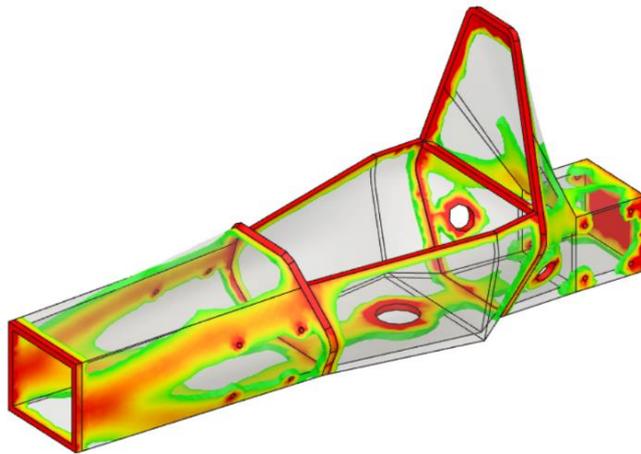
Para observar en primera línea como se modifica la malla al variar estos parámetros, se irán variando uno a uno para poder analizarlos.

- Modificación de malla 1

En este caso, se crea una malla más densa, modificando el primer valor de la tabla a 3%.



*Ilustración 75. Comparación malla 1 con la malla por defecto (Malla 1 ilustración derecha).*



*Ilustración 76. Optimización malla 1.*

Se observa que se generan muchos más elementos en la malla, y que en el resultado de la optimización se ve una mejora, ya que en la parte trasera del arco principal se comienzan a visualizar dos tirantes. También se observa un nervio en la parte trasera del chasis.

- Modificación de malla 2

Para la segunda malla, se volverá a poner el valor de Model-based Size en un 5%, y se cambiará el tipo de elemento de lineal a parabólico.

Respecto a la generación de la malla se ve una gran diferencia, ya que no hay ninguna zona en la que no se haya creado, por lo que es mucho más completa.



Ilustración 77. Malla 2.

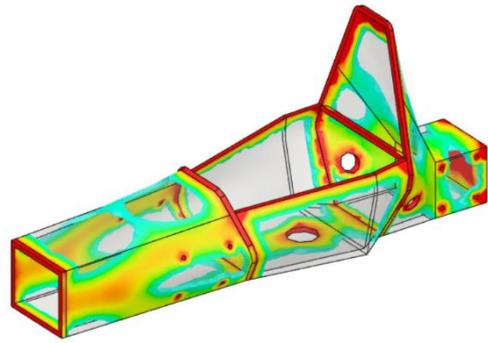


Ilustración 78. Optimización malla 2.

En esta ocasión, si que es verdad que se obtiene un resultado mucho mejor, en el que nos completa los tirantes traseros además de indicarnos que tenemos que incluir un perfil en la parte delantera, pero no se puede asegurar que merezca la pena, ya que el tiempo de resolución ha sido mucho mayor, al finalizar los estudios se tomará una decisión.

- Modificación de malla 3

En la malla 3, se va a volver a poner el tipo de elemento a lineal, y se variará el ángulo máximo en las curvas con un valor de 30 grados.



Ilustración 79. Malla 3.

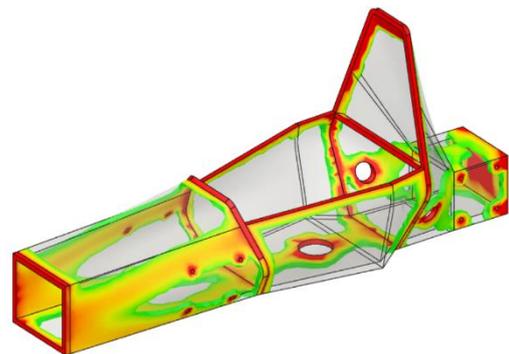


Ilustración 80. Optimización malla 3.

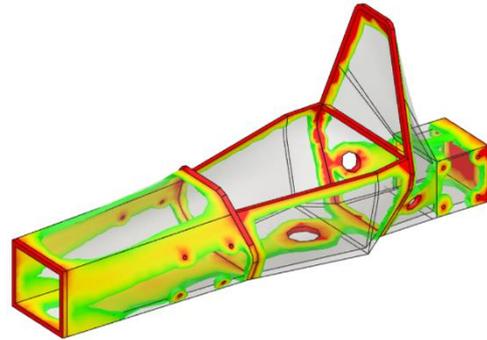
Se puede observar que la malla no sufre una gran variación pero sí que es verdad que en aquellas zonas curvas se completa un poco mejor, pero el resultado no es admirable, ya que da menos pistas que los resultados anteriores, probablemente si el ángulo fuera aún más pequeño y se combinara con la modificación de otros parámetros, el resultado podría ser mejor.

- Modificación de malla 4

En este caso con todos los valores iguales a los predeterminados, sólo se modificará la relación entre las aristas adyacentes a 3.



*Ilustración 81. Malla 4.*

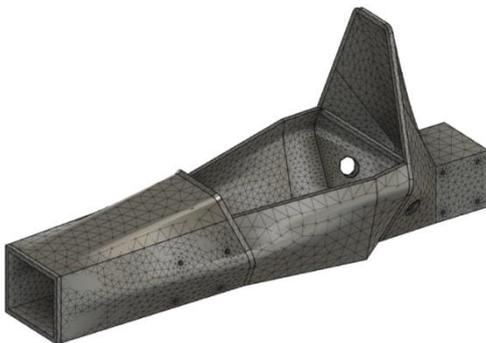


*Ilustración 82. Optimización malla 4.*

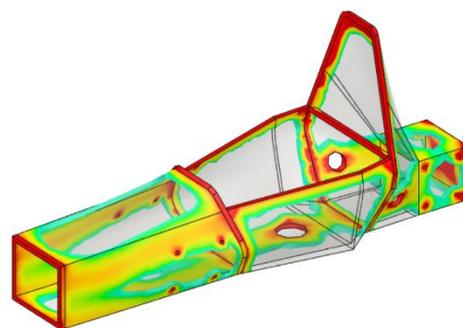
Aparentemente no se ven modificaciones en la malla, pero el resultado es bastante peor, por lo que si en un futuro variamos este parámetro deberemos hacerlo hacia valores menores.

- Modificación de malla 5

Para la penúltima malla que se va a generar se vuelven a resetear los valores por defecto, y se modificará el Max. Aspect Ratio a un valor de 5.



*Ilustración 83. Malla 5.*



*Ilustración 84. Optimización malla 5.*

Inicialmente en la malla no se observan cambios, y en el resultado de la optimización tampoco nos facilita mucho la interpretación, con lo cual será uno de los valores que se dejará el que esté por defecto.

- Modificación de malla 6

Para terminar, se cambiará el valor de Minimum Element Size a 60, para observar que cambios se producen.



Ilustración 85. Malla 6.

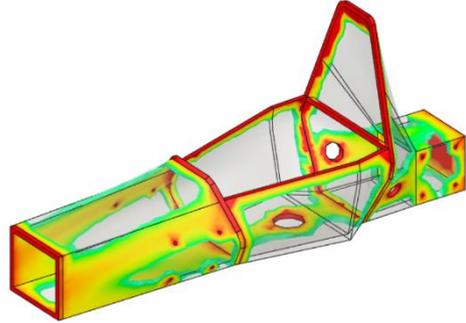


Ilustración 86. Optimización malla 6.

Los elementos de la malla son sutilmente más grandes, y el resultado muy parecido al inicial, con lo cual para posteriores ensayos se dejará con un valor de 20.

Después de analizar cada uno de los parámetros que componen la malla se va a crear una nueva combinando aquellos con los que hemos obtenido mejores resultados, para con ello llegar a una optimización aceptable que pueda servir de guía para el modelo final.

Se han puesto los siguientes parámetros:

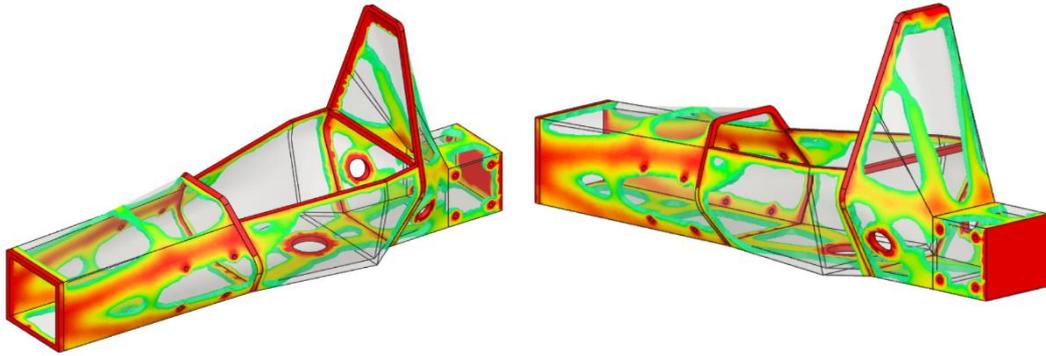
Model-based Size	3%
Element Order	Linear
Max. Turn Angle on curves (Deg)	15deg
Max. Adjacent Mesh Size Ratio	1,5
Max. Aspect Ratio	10
Minimum Element Size	20

Tabla 3. Valores combinados de la malla.



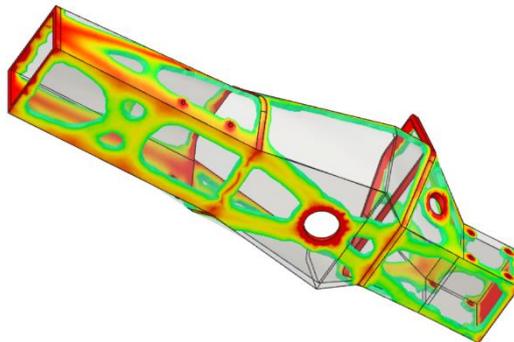
Ilustración 87. Malla combinada.

En esta malla no se ha puesto el tipo de elemento parabólico debido al costo de su resolución, para comprobar si merece la pena o de lo contrario no es necesario.



*Ilustración 88. Optimización malla combinada, vista 1.*

*Ilustración 89. Optimización malla combinada, vista 2.*



*Ilustración 90. Optimización malla combinada, vista 3.*

Se obtiene el resultado más satisfactorio hasta el momento, pero puede que realmente se note la diferencia cambiando el tipo de elemento a parabólico, con lo cual se va a realizar la prueba con los siguientes parámetros de la malla.

Model-based Size	3%
Element Order	Parabolic
Max. Turn Angle on curves (Deg)	15deg
Max. Adjacent Mesh Size Ratio	1,5
Max. Aspect Ratio	10
Minimum Element Size	20

*Tabla 4. Parámetros óptimos para la malla.*



Ilustración 91. Malla final.

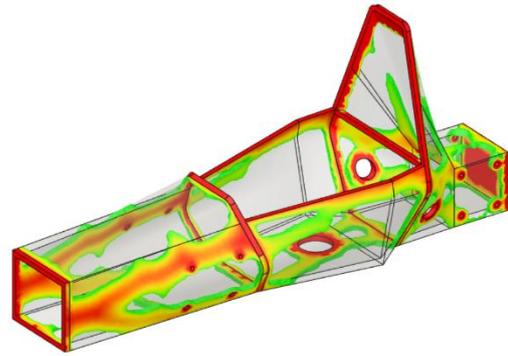


Ilustración 92. Optimización malla final (38,35% del volumen inicial).

Se observa un resultado excelente, incluso observando únicamente el 38,35% del volumen inicial, pero si que es cierto que si se aumenta un poco este valor se ve un optimización lo suficientemente aceptable, así que se ha puesto en un 54,56% y efectivamente ahora se puede afirmar que es de gran valor modificar el tipo de elemento a parabólico ya que es el mejor resultado de todos con una gran diferencia.

Se han generado los dos tirantes del arco principal acorde con la normativa, además de incluir dos barras en la parte donde irá la estructura de impacto lateral, la cual ya viene definida por la Formula SAE. En la zona delantera ha creado una especie de red que facilitará mucho el trabajo en esa zona al igual que la parte inferior del chasis, mostrando donde se tendrán que poner los mayores refuerzos.

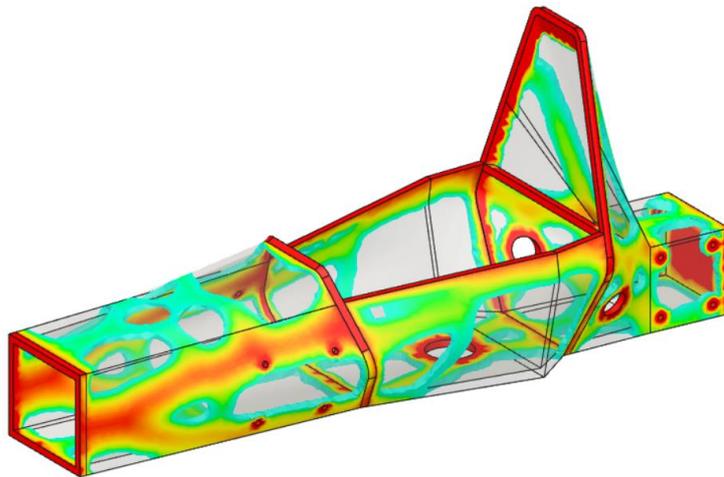
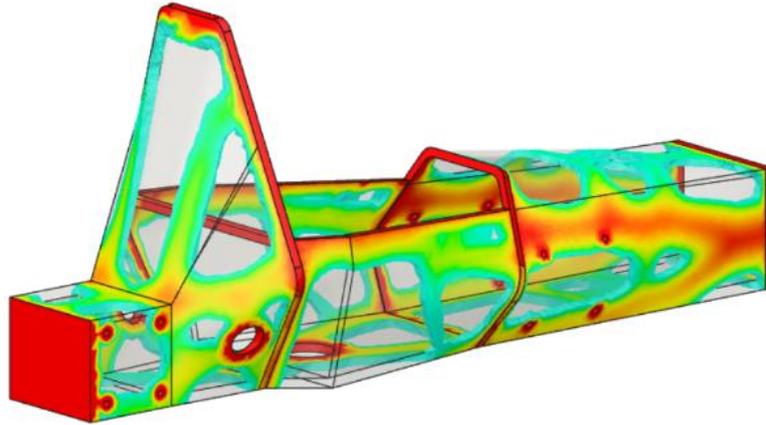
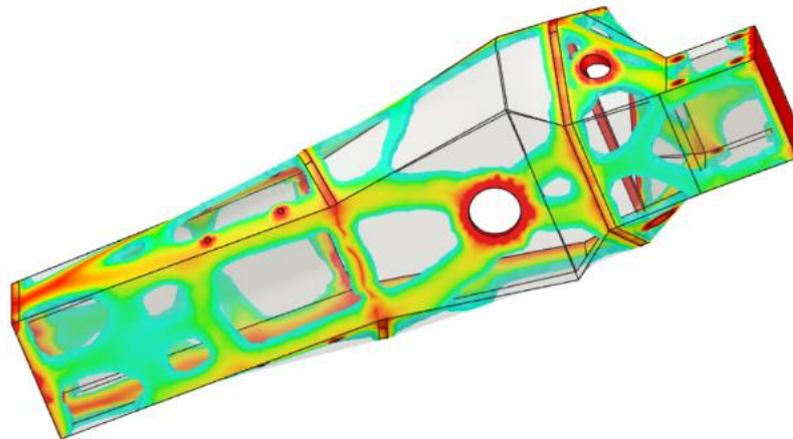


Ilustración 93. Optimización malla final, vista 1 (54,56% del volumen inicial).



*Ilustración 94. Optimización malla final, vista 2 (54,56% del volumen inicial).*



*Ilustración 95. Optimización malla final, vista 3 (54,56% del volumen inicial).*

#### 4.2. Estudio modelo 2

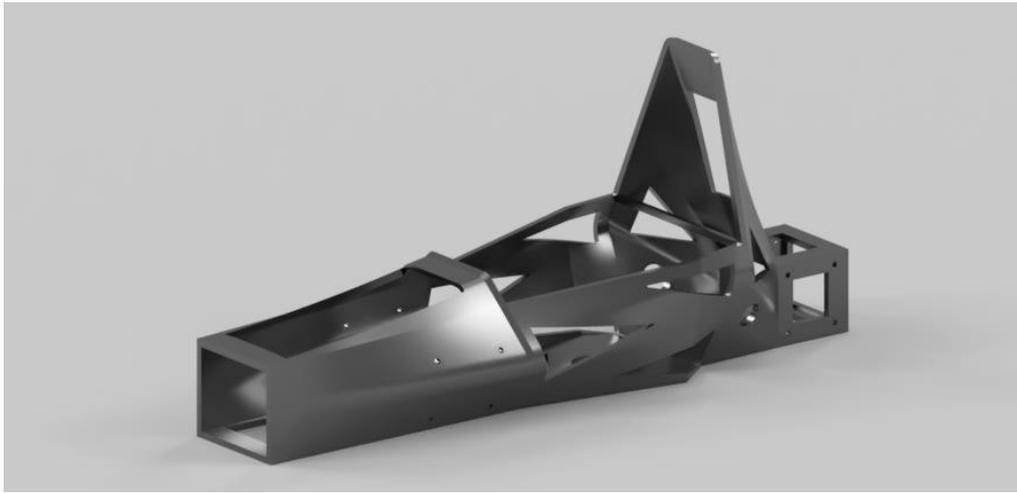


Ilustración 96. Render modelo 2.

Para intentar conseguir una mejor aproximación, se van a realizar una serie de agujeros en el primer modelo para simplificarlo y ver si se puede obtener una solución más orientativa a pesar de haber obtenido una muy buena aproximación con la resolución de la malla final.

El modelo 2 para estudiar, se muestra a continuación.



Ilustración 97. Modelo 2, vista 1.

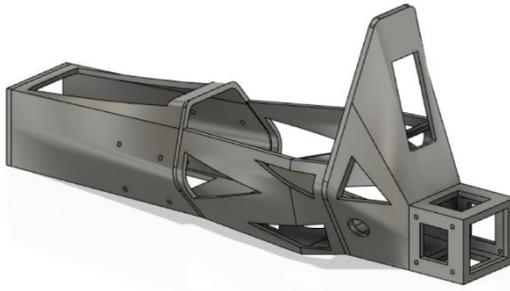


Ilustración 98. Modelo 2, vista 2.



Ilustración 99. Modelo 2, vista 3.

#### 4.2.1. Optimización topológica

Para las optimizaciones de este segundo modelo, se aplicarán las mismas restricciones (elementos que no se van a optimizar) que al primero, es decir a los planos principales del chasis, y aquellos orificios creados para representar la transmisión de carga. Además de la condición de simetría.

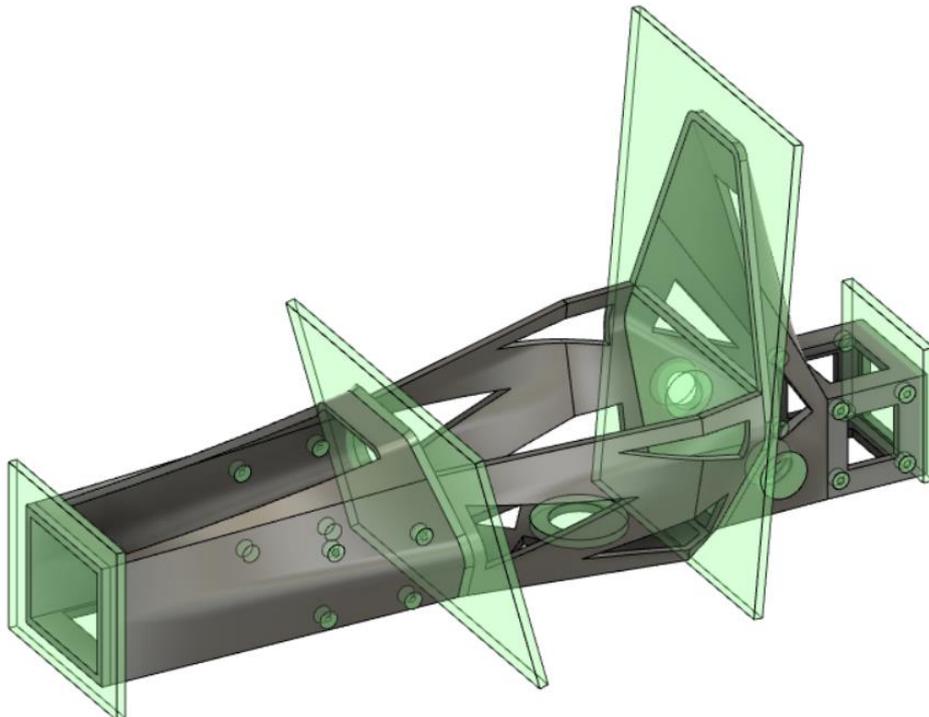
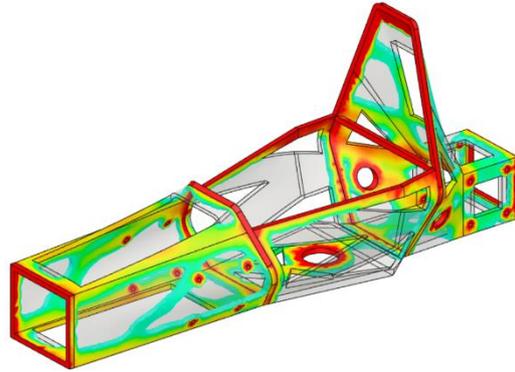


Ilustración 100. Elementos no optimizables, modelo 2.

Se vuelve a ejecutar la optimización sin realizar cambios en la malla sin expectativas de un buen resultado, lo cual se termina corroborando. Por lo que ahora se procede a hacer el estudio correcto, con los parámetros óptimos de la malla que hemos calculado anteriormente.



*Ilustración 101. Modelo 2, con los parámetros de la malla final.*



*Ilustración 102. Optimización modelo 2.*

Aunque en un principio se pensaba que podía ser una buena idea eliminar directamente material, hemos llegado a la conclusión de que a pesar de haber obtenido un buen resultado, se elegirán los resultados de la optimización realizada en el modelo 1, ya que es más acorde con los objetivos, y a partir de esa optimización con la malla final del modelo 1 y de cumplir con la normativa se construirá el modelo final generado con barras.



## 5. Diseño final

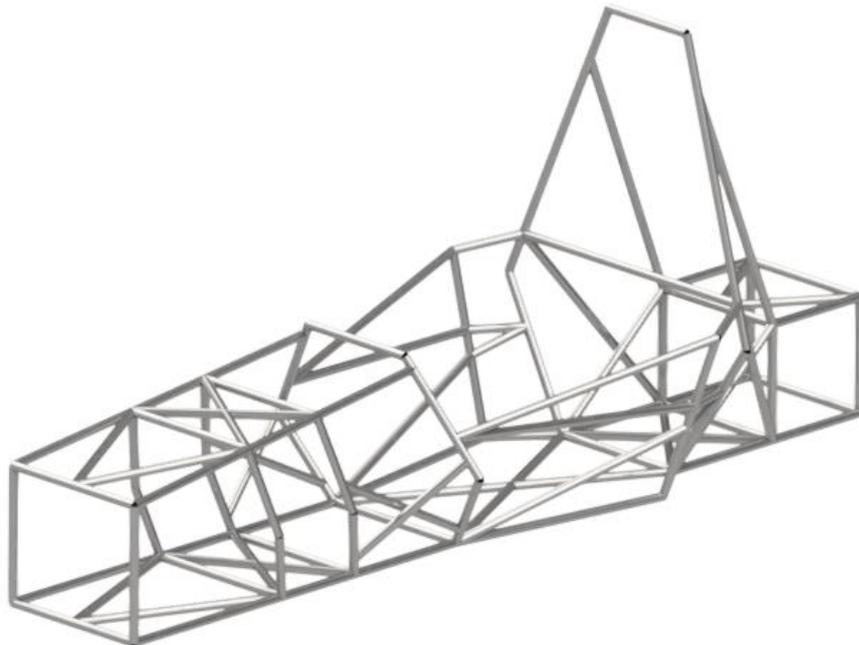
Finalmente gracias al análisis previo completo, se ha alcanzado a construir un chasis que además de cumplir con la normativa SAE, actúa correctamente ante las diferentes situaciones que se pueden dar durante su utilización.

En primer lugar, se ha procedido a la construcción de los perfiles principales, plano frontal, arco frontal, arco principal plano trasero y la estructura de impacto lateral. Todos estos perfiles están definidos por la normativa, inicialmente se diseñaron con cierta curvatura en la unión de barras pero para un estudio más óptimo se han aproximado estas curvas a uniones rectas, ya que a la hora de la generación de los nodos para poder aplicar las condiciones del entorno es mucho más eficiente que en cada unión únicamente genere un nodo.

Después teniendo como referencia el resultado del estudio óptimo, se han ido incluyendo barras de refuerzo donde indicaba la optimización que debía de haber material que soportara las cargas ejercidas por los diferentes estudios.

Por último se ha convertido el boceto a una estructura de barras de acero al carbono con un diámetro de 25,4 mm y un espesor de pared de 2,4 mm, cumpliendo así con la normativa previamente mencionada.

Y a continuación se muestra el resultado del chasis:



*Ilustración 103. Modelo de barras.*

Para comprobar que es un modelo aceptable, se debe volver a someterlo a las condiciones que tiene que soportar. Para ello se le ha aplicado unas condiciones equivalentes a los estudios anteriores, manteniendo las fuerzas sobre el chasis tanto del conductor como del motor alojado en la zona trasera del monoplaza.

En ningún caso debe producirse un desplazamiento mayor a 25 mm, ni una tensión superior al límite elástico (350 MPa), ya que se pondría en peligro la integridad del chasis y con ella la del conductor.

Para el diseño del modelo de barras y sus correspondientes simulaciones se ha utilizado el programa Autodesk Inventor, debido a que es uno de los mejores programas para los análisis de estructuras ya que facilita mucho el proceso.

#### - Impacto frontal

Fijando el plano frontal y aplicando una aceleración de 25g, se obtiene un desplazamiento máximo de 16,83 mm cuyo valor es aceptable. En cambio, la tensión adquiere un valor de 406,1 MPa superando así el límite elástico y poniendo en peligro la estructura con lo cual tendremos que reforzar esos puntos.

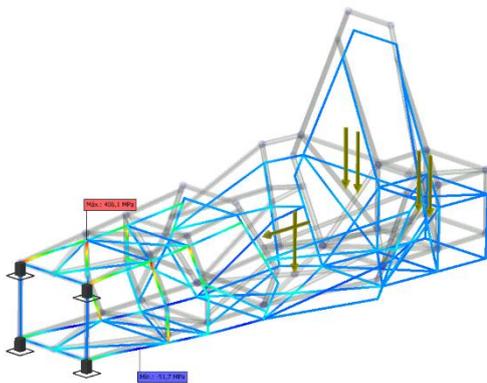


Ilustración 104. Impacto frontal, modelo de barras, ensayo 1 (tensiones).

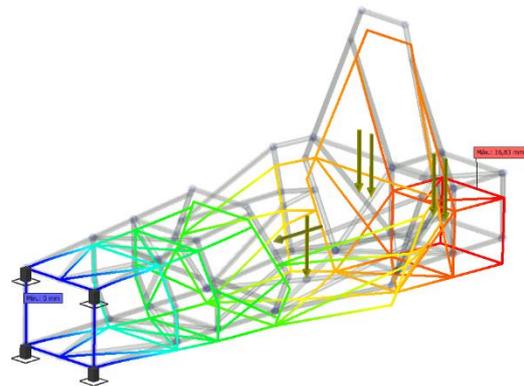


Ilustración 105. Impacto frontal, modelo de barras, ensayo 1 (desplazamientos).

Debido a que ese valor de la tensión no es admisible, se incluyen una barra a cada lado reforzando esos puntos, como se observa a continuación:

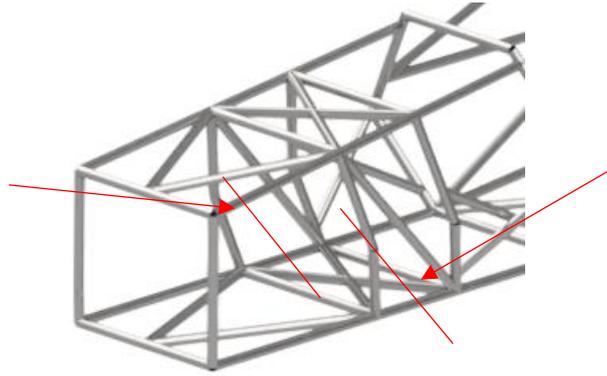


Ilustración 106. Primeras barras añadidas.

Una vez incluidas estas barras se vuelve a realizar el estudio, obteniendo unos resultados mejores, el desplazamiento máximo se reduce a 11,44 mm, y se consigue una tensión de 343,4 MPa es un valor inferior al límite de rotura pero está demasiado próximo, con lo cual se realizará la misma operación añadiendo una barra a cada lado para reforzar esos puntos críticos.

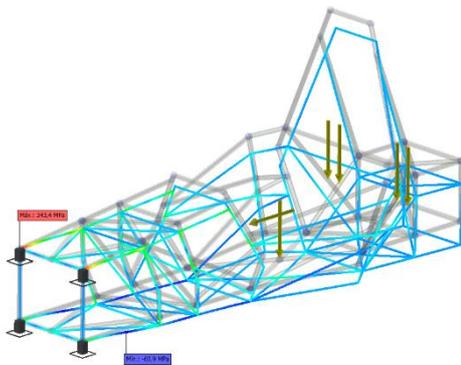


Ilustración 107. Impacto frontal, modelo de barras, ensayo 2 (tensiones).

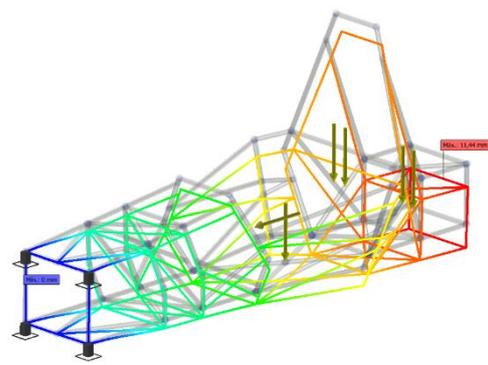


Ilustración 108. Impacto frontal, modelo de barras, ensayo 2 (desplazamientos).

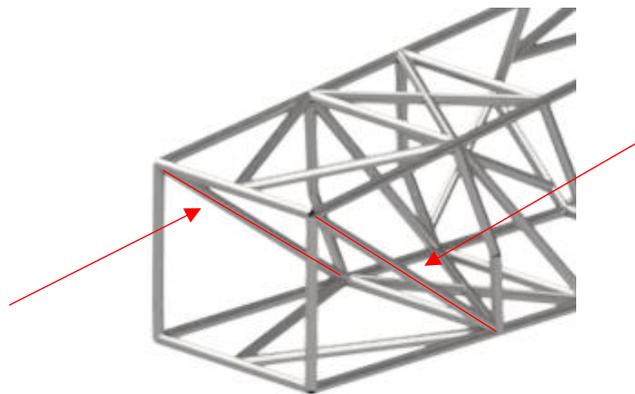


Ilustración 109. Segundas barras añadidas.

Una vez se han añadido las dos barras de refuerzo en la parte delantera, se obtiene un desplazamiento de 6,01 mm y una tensión de 178,4 MPa, valores que ahora sí se pueden dar por válidos.

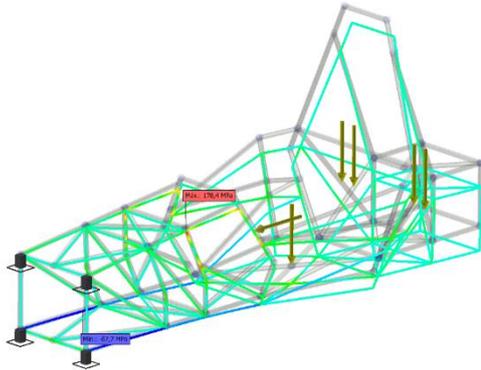


Ilustración 110. Impacto frontal, modelo de barras, ensayo 3 (tensiones).

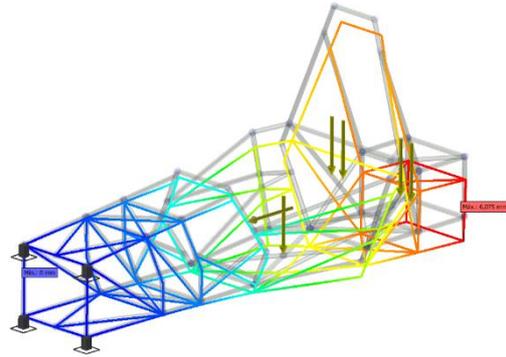


Ilustración 111. Impacto frontal, modelo de barras, ensayo 3 (desplazamientos).

- Impacto lateral

En este segundo ensayo se han fijado los anclajes de las suspensiones de un solo lateral del chasis, y se ha aplicado una aceleración de 6g horizontal hacia el lateral fijado del monoplaza.

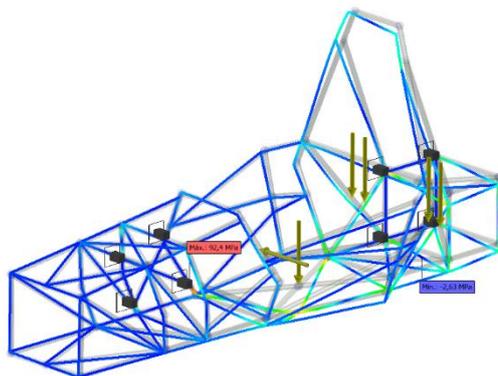


Ilustración 112. Impacto lateral, modelo de barras (tensiones).

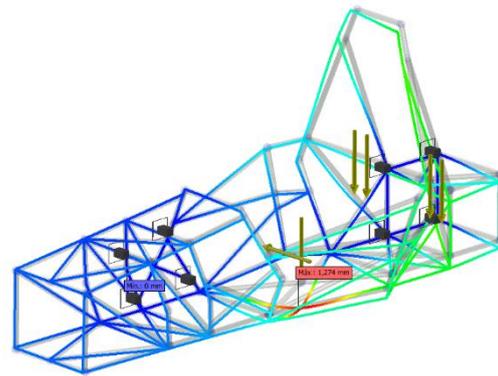


Ilustración 113. Impacto lateral, modelo de barras (desplazamientos).

Los valores del desplazamiento máximo y de la tensión máxima, toman los valores de 1,27 mm y 92,4 MPa respectivamente, siendo unos valores aptos para nuestro vehículo.

- Rigidez a torsión

Para este ensayo, se fijan los 16 anclajes de las suspensiones y se aplica un momento de 1000 Nm en los planos tanto trasero como frontal, pero con diferente sentido. Ya que no se puede colocar el momento en el plano, se dividirá el valor entre los cuatro nodos de cada plano.

Alcanza unos valores aceptables, como desplazamiento máximo 1 mm, y como tensión máxima 241,1 MPa que a pesar de ser un valor alto no hay peligro de rotura, ya que los ensayos a los que se esta sometiendo al chasis son extremos.

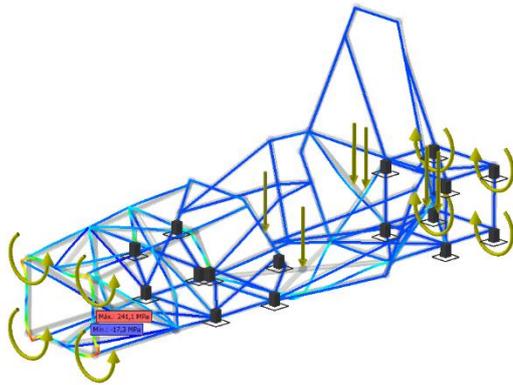


Ilustración 114. Rigidez a torsión, modelo de barras (tensiones).

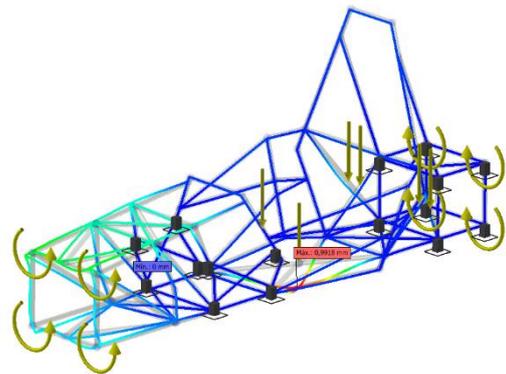


Ilustración 115. Rigidez a torsión, modelo de barras (desplazamientos).

- Rigidez a flexión

En el ensayo de rigidez a flexión se han fijado del mismo modo las suspensiones, y se ha aplicado una carga continua equivalente a 7,7 kN sobre las barras superiores principales.

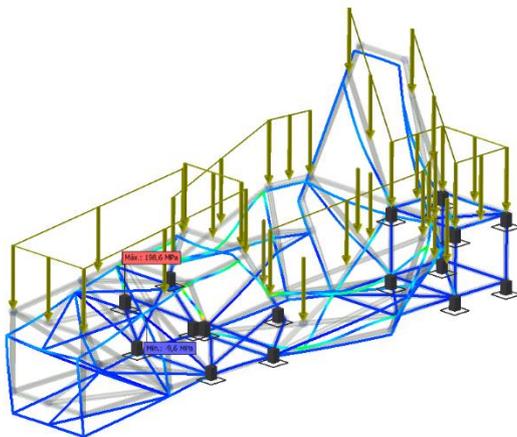


Ilustración 116. Rigidez a flexión, modelo de barras (tensiones).

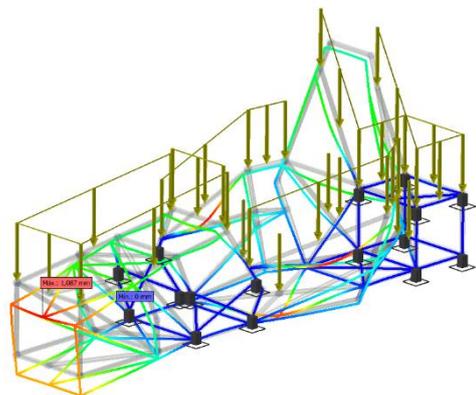


Ilustración 117. Rigidez a flexión, modelo de barras (desplazamientos).

El desplazamiento máximo es 1,1 mm, un valor imperceptible para este caso y la tensión máxima es 198,6 MPa, con lo cual se puede dar el estudio por válido sin necesidad de hacer cambios en la estructura.

- Frenada

En este caso se aplica una aceleración 1,2g en horizontal y hacia la parte trasera del chasis, además de la fijación de todos los anclajes de las suspensiones, y se obtienen unos valores muy aceptables. Un desplazamiento máximo de 1 mm y una tensión máxima de 76,11 MPa.

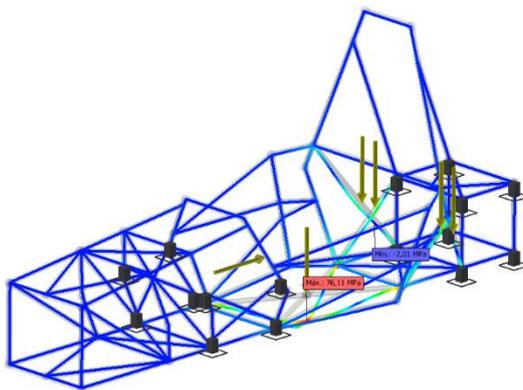


Ilustración 118. Frenada, modelo de barras (tensiones).

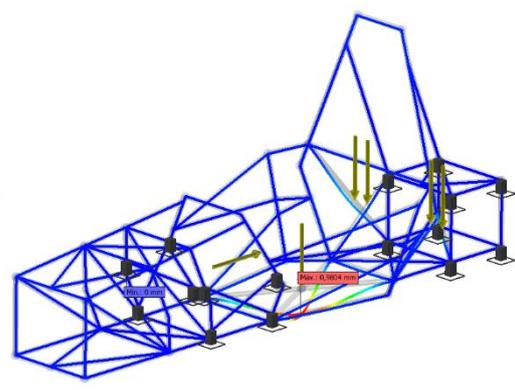


Ilustración 119. Frenada, modelo de barras (desplazamientos).

- Aceleración

Para este estudio se procede igual que para el de frenada, pero con un valor de la aceleración de 0,7g y en sentido contrario, es decir en horizontal hacia la parte delantera del chasis.

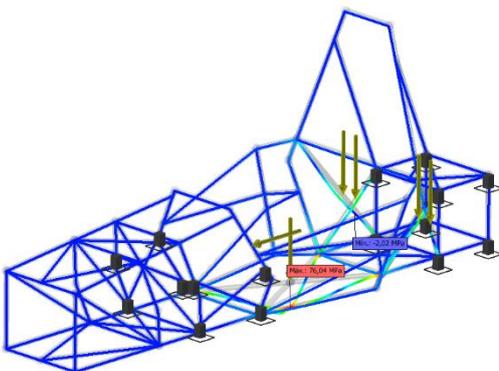


Ilustración 120. Aceleración, modelo de barras (tensiones).

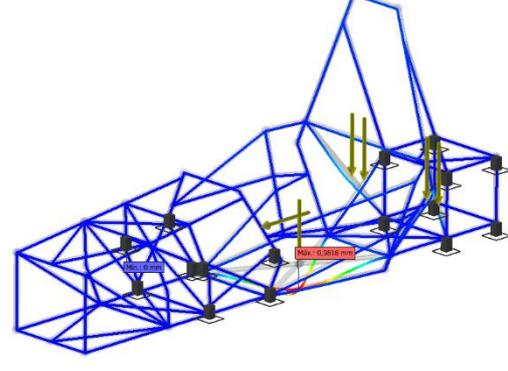


Ilustración 121. Aceleración, modelo de barras (desplazamientos).

Respecto a los resultados no hay problema, ya que son similares al ensayo de frenada. El desplazamiento máximo es 1 mm y la tensión máxima es 76,04 MPa.

- Vuelco

Para finalizar se realiza el ensayo de vuelco, fijando los anclajes de las suspensiones de un lado del chasis y aplicando una fuerza 1,5 kN en el punto más alto del arco principal en sentido horizontal y hacia el lateral fijado del chasis. Se obtienen unos resultados altos, pero dentro de los límites, un desplazamiento máximo de 13,02 mm y una tensión máxima de 341 MPa, la cual sería aconsejable incluir unos refuerzos en esos nudos, por ejemplo una cartela.

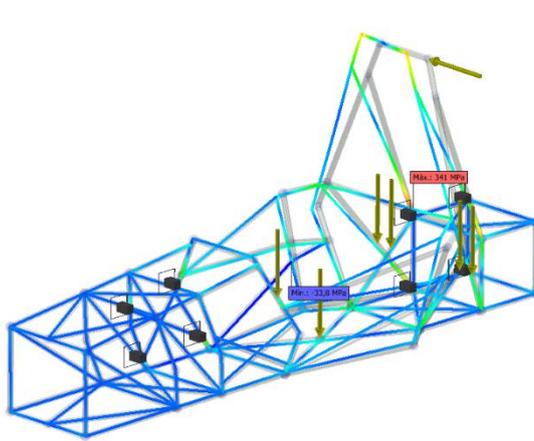


Ilustración 122. Vuelco, modelo de barras (tensiones).

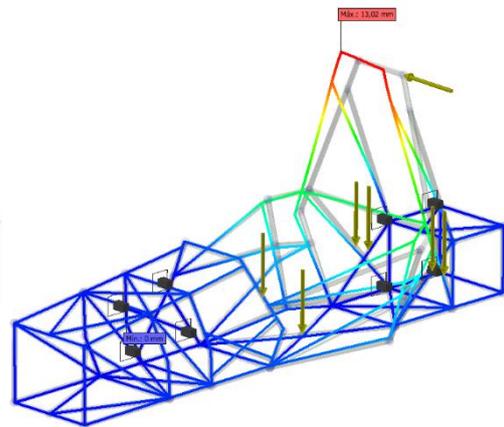
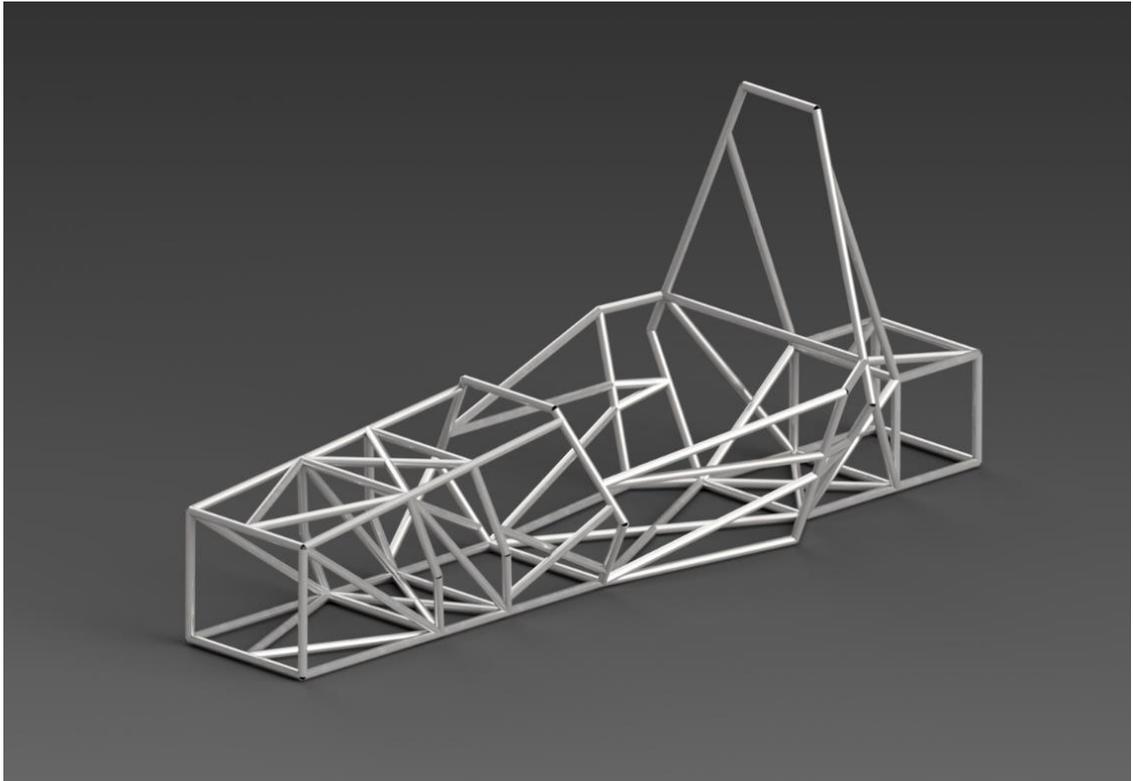


Ilustración 123. Vuelco, modelo de barras (desplazamientos).

Después de resolver las deficiencias del modelo de barras inicial, se puede observar finalmente el modelo de chasis definitivo.



*Ilustración 124. Modelo final.*

## 6. Conclusiones y posibles líneas futuras

### 6.1. Conclusiones

Finalmente se ha obtenido un chasis válido para la competición Formula Student mediante la utilización de un software relativamente nuevo sobre el cual se han investigado aquellos apartados de mayor interés para este Trabajo Fin de Grado.

Los resultados de las simulaciones han sido generalmente favorables, y en los casos contrarios se ha buscado solución, añadiendo apoyos o modificando la geometría, para obtener definitivamente un buen resultado en el comportamiento del chasis ante las diferentes pruebas.

Ahora se puede añadir, que para futuros estudios, se debe tener en cuenta a la hora de realizar las simulaciones, la importancia de conocer previamente dónde y cómo van a ser aplicadas las fuerzas y restricciones, y que en aquellos elementos a los que se las asigne, no serán optimizables.

También, destacar el conocimiento sobre la creación de malla para el momento de realizar la optimización, ya que dependiendo de los valores de los parámetros de la misma, se obtendrán resultados muy dispares.

### 6.2. Otras consideraciones

En primer lugar, hay que destacar que el impacto ambiental ha sido mínimo, ya que los recursos utilizados como el ordenador o el ratón serán reciclados en un futuro lejano, y la energía eléctrica consumida ha sido mínima, y que económicamente ha sido un proyecto barato, principalmente debido al acceso gratuito a los programas utilizados.

En conjunto, se han utilizado tres softwares (Word, Fusion 360 e Inventor), los cuales son de pago, pero en este caso estos costes han podido ser eliminados gracias a las licencias para estudiantes gestionadas por la Universidad de Valladolid. Los costes relacionados con la amortización de equipos como el ordenador portátil no serán necesarios incluirlos en el impacto económico.

En relación con la cantidad de horas invertidas, se tiene que hacer con una visión general contando con cada una de las fases del proyecto. En total el tiempo empleado ha sido 450 horas aproximadamente. Conociendo que el salario medio de un Ingeniero de Diseño en España en 2021 con una carga de nivel inicial es de 15,90 euros la hora [24], se calcula que el coste total del proyecto ha sido de 7.155 euros.

### 6.3. Líneas futuras

La optimización y el diseño de un chasis es un trabajo constante, ya que día a día aparecen nuevos materiales, nuevos métodos de fabricación, ideas diferentes..., y todo ello se puede complementar con lo investigado anteriormente. Y ese era el objetivo, que en un futuro se pueda mejorar y avanzar sobre lo trabajado en el presente proyecto.

Las posibles mejoras se pueden enfocar en el diseño, analizando absolutamente cada una de sus secciones, de cómo se comportan ante las diferentes condiciones, eso sí se ha comprobado que mediante optimización topológica cuanto más sencilla sea la geometría mejores resultados se obtendrán.

También se pueden centrar los avances en el estudio de diferentes materiales, comparando sus ventajas e inconvenientes, además de la modificación de la sección de los tubos, ya que en este caso se ha utilizado la misma dimensión para todos ellos por cuestión de simplificación de costes y fabricación. Por lo que para esta cuestión se deberían tener muchos aspectos en cuenta, costos, fabricación, análisis completo de la estructura...

## 7. Bibliografía

- [1] *upm RACING*. (s.f.). Recuperado el 1 de Febrero de 2021, de upm RACING: <http://www.upmracing.es/formula-student>
- [2] *Formula Student Spain*. (s.f.). Recuperado el 1 de Febrero de 2021, de Formula Student Spain: <https://www.formulastudent.es/>
- [3] Sanz, P. M. (s.f.). *Pistonudos*. Obtenido de Pistonudos: <https://www.pistonudos.com/es/que-es-la-formula-student>
- [4] Arlington, U. o. (s.f.). *UTA*. Recuperado el 5 de Marzo de 2021, de UTA: <https://library.uta.edu/digitalgallery/img/10002858>
- [5] *Wikipedia*. (s.f.). Obtenido de Wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%B3rmula\\_Student](https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%B3rmula_Student)
- [6] *FORMULA SAE*. (s.f.). Recuperado el 2 de Marzo de 2021, de <https://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>
- [7] *INGENIUS*. (21 de Febrero de 2019). Recuperado el 11 de Febrero de 2021, de <https://eddm.es/blog-ingenius/design-for-additive-manufacturing-optimizacion-topologica/>
- [8] *CATEC*. (10 de Febrero de 2021). Obtenido de CATEC: <http://www.catec.aero/es/materiales-y-procesos/l%C3%ADnea-de-investigaci%C3%B3n/optimizaci%C3%B3n-topol%C3%B3gica>
- [9] C., L. (16 de Diciembre de 2020). *3Dnatives*. Recuperado el 12 de Febrero de 2021, de 3Dnatives: <https://www.3dnatives.com/es/optimizacion-topologica-10012017/#:~:text=La%20fabricaci%C3%B3n%20aditiva%2C%20a%20diferencia,mec%C3%A1nica%20de%20la%20pieza%20creada.>
- [10] Hemmerling, M. (Diciembre de 2014). *ReserarchGate*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/figure/Form-finding-process-through-topology-optimization\\_fig1\\_301396408](https://www.researchgate.net/figure/Form-finding-process-through-topology-optimization_fig1_301396408)
- [11] *Bibing*. (s.f.). Recuperado el 14 de Febrero de 2021, de Bibing: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4296/fichero/VolumenI%252F4.pdf>
- [12] *EITA*. (11 de Febrero de 2021). Obtenido de EITA: <https://eitaingenieros.com/optimizacion/>
- [13] C, L. (23 de Mayo de 2016). *3Dnatives*. Recuperado el 8 de Marzo de 2021, de 3Dnatives: <https://www.3dnatives.com/es/light-rider-la-moto-impresa-3d-23052016/#>

- [14] AREATECNOLOGICA. (3 de Febrero de 2021). Obtenido de AREATECNOLOGICA: <https://areatecnologia.com/dibujo-tecnico/que-es-autodesk.html>
- [15] Autodesk. (s.f.). Recuperado el 11 de Mayo de 2021, de <https://knowledge.autodesk.com/es/support/inventor/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ESP/Inventor-Help/files/GUID-B73B2C75-4AA4-4F9E-9BC4-4AB8D26C1765-hm.html>
- [16] SPARTAN GEEK. (3 de Febrero de 2021). Obtenido de <https://spartangeek.com/blog/fusion-360-software-de-ingenieria#:~:text=Fusion%20360%20es%20un%20software,y%20maquinado%2C%20todo%20en%20uno>.
- [17] Raoul, N. R. (2020). *Fusion 360 con ejemplos y ejercicios prácticos*. Marcombo.
- [18] GRAITEC 2ACAD. (3 de Febrero de 2021). Obtenido de GRAITEC 2ACAD: <https://www.2acad.es/10-razones-para-utilizar-fusion-360/>
- [19] Alba, M. (14 de Diciembre de 2020). *Engineering.com*. Recuperado el 2 de Abril de 2021
- [20] Autodesk. (21 de Octubre de 2014). *Autodesk Fusion 360*. Recuperado el 15 de Abril de 2021, de <https://www.youtube.com/watch?v=1VE64VQLAgQ>
- [21] Galán, M. (13 de Abril de 2021). *ActualidadMotor*. Obtenido de ActualidadMotor: <https://www.actualidadmotor.com/chasis-coches/#:~:text=Los%20primeros%20veh%C3%ADculos%20que%20se,bastidor%20o%20chasis%20por%20largueros>
- [22] Culcyt. (Agosto de 2013). Recuperado el 2 de Febrero de 2021
- [23] Agundez, J. M. (Junio de 2019). *UVADoc*. Recuperado el 1 de Febrero de 2021, de <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/37839>
- [24] Talent.com. (2021). Recuperado el 14 de Junio de 2021, de <https://es.talent.com/salary?job=ingeniero+de+dise%C3%B1o>