Escuela de Doctorado
y Estudios de Posgrado
Universidad de La Laguna

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER
DISEÑO DE UN CHASIS PARA UN MONOPLAZA ELÉCTRICO DE FORMULA STUDENT

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Alumno: José Juan Macías Solá

Tutor: Dr. Carmelo Militello Militello

Titulación: Máster en Ingeniería Industrial
Especialidad Electromecánica

Fecha: 07/06/2019

1. Índice General

Tabla de contenido

1. Índice General 2
2. Memoria 9
2.1. Objeto 11
2.2. Alcance 11
2.3. Introducción 11
2.3.1. Antecedentes 11
2.4. Requerimientos de diseño 12
2.4.1. Requerimientos básicos 12
2.4.2. Componentes del vehículo 13
2.4.3. Distribución de masa 16
2.4.4. Requerimientos del chasis 18
2.5. Software y condiciones de contorno 24
2.5.1. Modelado 24
2.5.2. Material 25
2.5.3. Proceso de cálculo iterativo 26
2.5.4. Condiciones de contorno 26
2.5.5. Condiciones de contorno fuera de normativa 37
2.6. Diseño 40
2.7. Conclusiones 56
2.8. Bibliografía 57
2.9. Resumen 57
2.10. Abstract 57
3. Anexos 58
3.1. Anexo I - Formula Student 62
3.2. Anexo II - Normativa 73
3.3. Anexo III – Cálculo de la relación de Ackermann 76
3.4. Anexo IV – Estado del arte de los monoplazas 80
3.4.1. Estado del arte de los vehículos del año 2017. 81
3.4.2. Estado del arte de vehículos cuyo chasis es similar al seleccionado 91
3.5. Anexo V - Cuadro de verificaciones 93
3.5.1. T1 DEFINICIONES 93
3.5.2. T2 REQUISITOS GENERALES DE DISEÑO 93
3.5.3. T3 DISEÑO GENERAL DE CHASIS 95
3.5.4. T4 COCKPIT 107

3.5.5. T5 SISTEMA DE RESTRICCION DE CONTROLADOR 112
3.5.6. T10 CINTURONES 116
3.6. Anexo VI – Cálculo de secciones de tubos mínimas 119
3.7. Anexo VII – Diseño 125
3.7.1. Estudio de la caja de baterías 125
3.7.2. Estudio del chasis 130
3.7.2.1. Caso base 131
3.7.2.1.1. Aro principal 131
3.7.2.1.2. Aro frontal 133
3.7.2.1.3. Impacto lateral 134
3.7.2.1.4. Impacto frontal 136
3.7.2.1.5. Anclajes cinturón de hombros 137
3.7.2.1.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino 139
3.7.2.1.7. Impacto frontolateral 140
3.7.2.1.8. Anclajes caja de baterías 142
3.7.2.1.9. Reposacabezas 143
3.7.2.1.10. Conclusiones y resumen de resultados 144
3.7.2.2. Primera Iteración 146
3.7.2.2.1. Aro principal 146
3.7.2.2.2. Aro frontal 148
3.7.2.2.3. Impacto lateral 149
3.7.2.2.4. Impacto frontal 151
3.7.2.2.5. Anclajes cinturón de hombros 152
3.7.2.2.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino 153
3.7.2.2.7. Impacto frontolateral 155
3.7.2.2.8. Anclajes caja de baterías 156
3.7.2.2.9. Reposacabezas 158
3.7.2.2.10. Conclusiones y resumen de resultados 159
3.7.2.3. Segunda Iteración 161
3.7.2.3.1. Aro principal 161
3.7.2.3.2. Aro frontal 163
3.7.2.3.3. Impacto lateral 164
3.7.2.3.4. Impacto frontal 166
3.7.2.3.5. Anclajes cinturón de hombros 167
3.7.2.3.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino 169
3.7.2.3.7. Impacto frontolateral 170

3.7.2.3.8. Anclajes caja de baterías 172
3.7.2.3.9. Reposacabezas....173
3.7.2.3.10. Conclusiones y resumen de resultados 174
3.7.2.4. Tercera Iteración....176
3.7.2.4.1. Aro principal 176
3.7.2.4.2. Aro frontal 178
3.7.2.4.3. Impacto lateral....179
3.7.2.4.4. Impacto frontal 180
3.7.2.4.5. Anclajes cinturón de hombros....181
3.7.2.4.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino....182
3.7.2.4.7. Impacto frontolateral 183
3.7.2.4.8. Anclajes caja de baterías 184
3.7.2.4.9. Reposacabezas....185
3.7.2.4.10. Conclusiones y resumen de resultados 186
3.7.2.5. Cuarta Iteración 187
3.7.2.5.1. Aro principal 187
3.7.2.5.2. Aro frontal 188
3.7.2.5.3. Impacto lateral....189
3.7.2.5.4. Impacto frontal 190
3.7.2.5.5. Anclajes cinturón de hombros....191
3.7.2.5.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino....192
3.7.2.5.7. Impacto frontolateral 193
3.7.2.5.8. Anclajes caja de baterías 194
3.7.2.5.9. Reposacabezas....195
3.7.2.5.10. Conclusiones y resumen de resultados 196
3.7.2.6. Comparación resultados....198
3.7.2.7. Mejoras realizadas en el modelo de la cuarta iteración....200
3.7.2.7.1. Modificación frontal 200
3.7.2.7.1.1. Aro principal 201
3.7.2.7.1.2. Aro frontal 202
3.7.2.7.1.3. Impacto lateral 203
3.7.2.7.1.4. Impacto frontal 204
3.7.2.7.1.5. Anclajes cinturón de hombros 205
3.7.2.7.1.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino 206
3.7.2.7.1.7. Impacto frontolateral.... 207
3.7.2.7.1.8. Anclajes caja de baterías.... 208

3.7.2.7.1.9. Reposacabezas 209
3.7.2.7.1.10. Comparación resultados 210
3.7.2.7.2. Modificación lateral 210
3.7.2.7.2.1. Aro principal 212
3.7.2.7.2.2. Aro frontal 213
3.7.2.7.2.3. Impacto lateral 214
3.7.2.7.2.4. Impacto frontal 218
3.7.2.7.2.5. Anclajes cinturón de hombros 219
3.7.2.7.2.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino 220
3.7.2.7.2.7. Impacto frontolateral 221
3.7.2.7.2.8. Anclajes caja de baterías 222
3.7.2.7.2.9. Reposacabezas 223
3.7.2.7.2.10. Comparación resultados 224
3.7.2.7.3. Combinación de ambas modificaciones 225
3.7.2.7.3.1. Aro principal 226
3.7.2.7.3.2. Aro frontal 227
3.7.2.7.3.3. Impacto lateral 228
3.7.2.7.3.4. Impacto frontal 232
3.7.2.7.3.5. Anclajes cinturón de hombros 233
3.7.2.7.3.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino 234
3.7.2.7.3.7. Impacto frontolateral 235
3.7.2.7.3.8. Anclajes caja de baterías 236
3.7.2.7.3.9. Reposacabezas 237
3.7.2.7.3.10. Comparación resultados 238
3.7.2.7.4. Modificación extra 239
3.7.2.7.4.1. Aro principal 241
3.7.2.7.4.2. Aro frontal 242
3.7.2.7.4.3. Impacto lateral 243
3.7.2.7.4.4. Impacto frontal 251
3.7.2.7.4.5. Anclajes cinturón de hombros 252
3.7.2.7.4.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino 253
3.7.2.7.4.7. Impacto frontolateral 254
3.7.2.7.4.8. Anclajes caja de baterías 255
3.7.2.7.4.9. Reposacabezas 256
3.7.2.7.4.10. Comparación resultados 257
3.7.2.8. Cuarta Iteración (con sólidos) 260

3.7.2.8.1. Aro principal 260
3.7.2.8.2. Aro frontal 263
3.7.2.8.3. Impacto lateral....266
3.7.2.8.4. Impacto frontal 277
3.7.2.8.5. Anclajes cinturón de hombros....280
3.7.2.8.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino....284
3.7.2.8.7. Impacto frontolateral 287
3.7.2.8.8. Anclajes caja de baterías 291
3.7.2.8.9. Reposacabezas....294
3.7.2.8.10. Conclusión de la iteración....297
3.7.2.9. Quinta iteración (con sólidos)....298
3.7.2.9.1. Aro principal 298
3.7.2.9.2. Impacto frontal 299
3.7.2.9.3. Anclajes cinturón de hombros....300
3.7.2.9.4. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino....301
3.7.2.9.5. Impacto frontolateral 302
3.7.2.9.6. Anclajes caja de baterías 302
3.7.2.10. Conclusión final 303
3.7.2.11. Otras simulaciones útiles....305
3.7.2.11.1. Levantamiento del vehículo....305
3.7.2.11.2. Vehículo levantado con apoyo al suelo 307
3.7.2.11.3. Efecto de las suspensiones 309
3.7.2.12. Comparación con otros materiales 312
3.7.2.13. Corrección de fallo....314
3.7.2.13.1.1. Aro principal 315
3.7.2.13.1.2. Aro frontal 316
3.7.2.13.1.3. Impacto lateral 317
3.7.2.13.1.4. Impacto frontal 321
3.7.2.13.1.5. Anclajes cinturón de hombros 322
3.7.2.13.1.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino 323
3.7.2.13.1.7. Impacto frontolateral 324
3.7.2.13.1.8. Anclajes caja de baterías 325
3.7.2.13.1.9. Reposacabezas 326
3.7.2.13.1.10. Comparación resultados 327
4. Planos 330
4.1. Plano 1 – Vistas chasis 332

4.2. Plano 2 – Aro frontal 333
4.3. Plano 3 – Zona frontal 334
4.4. Plano 4 – Zona trasera 335
4.5. Plano 5 – Placa anti-intrusión 336
4.5. Plano 6 – Orejeta de anclajes cinturones 337
4.7. Plano 6.1 – Detalle parte interior habitáculo 328
4.8. Plano 7 – Estructura del mamparo frontal 339
4.9. Plano 8 – Lateral habitáculo 340
4.10. Plano 9 – Aro principal 341
4.11. Plano 9.1 – Detalle soportes reposacabezas del aro principal 342
4.12. Plano 10 – Cama del acumulador 343
4.13. Plano 11 – Rigidizadores aro principal 344

2. Memoria

Tabla de contenido

2. Memoria 9
2.1. Objeto 11
2.2. Alcance 11
2.3. Introducción 11
2.3.1. Antecedentes 11
2.4. Requerimientos de diseño 12
2.4.1. Requerimientos básicos 12
2.4.2. Componentes del vehículo 13
2.4.3. Distribución de masa 16
2.4.4. Requerimientos del chasis 18
2.5. Software y condiciones de contorno 24
2.5.1. Modelado 24
2.5.2. Material 25
2.5.3. Proceso de cálculo iterativo 26
2.5.4. Condiciones de contorno 26
2.5.5. Condiciones de contorno fuera de normativa 37
2.6. Diseño 40
2.7. Conclusiones 56
2.8. Bibliografía 57
2.9. Resumen 57
2.10. Abstract 57

2.1. Objeto

En este *Trabajo de Fin de Máster, se* realiza un diseño de un chasis para un monoplaza eléctrico tipo Formula Student. Para ello, se utilizan las limitaciones marcadas por la normativa en la cual se basa este tipo de vehículos y se emplea información de otros componentes del vehículo, tales como suspensión, baterías, controlador, etc.

El objetivo, por lo tanto, de este TFM, consiste en realizar un dimensionado de la estructura atendiendo a las limitaciones marcadas por la normativa que rige la competición.

2.2. Alcance

Este Trabajo Final de Master, estará acotado a la estructura del vehículo, quedando fuera aquellos elementos que no pertenezcan a ello. Dicho de otra forma, los componentes del vehículo y sus anclajes no serán objeto de estudio, pero si se determinará la posición de estos. Respecto a los anclajes de los cinturones y de la caja de batería, sí pertenecen a este TFM ya que se trata de elementos que estarán fijos a la estructura de forma permanente.

2.3. Introducción

2.3.1. Antecedentes

Este TFM surge como propuesta personal debido a mi implicación en el equipo de Formula Student que se creó el año pasado en esta universidad, y del cual me encargué de su dirección, de coordinar la parte de mecánica y, a mitad del año, del chasis; del cual se basa este TFM.

Desde siempre, me ha atraído el mundo de la competición y, sobre todo, la parte de vehículos y monoplazas. Gracias a que se formó este equipo, pude poner en práctica mis conocimientos adquiridos, así como poder disfrutar de una temática que siempre me ha fascinado.

El equipo surgió a principios de septiembre del curso 17-18. Aquí, tras un proceso de elección, se elige a las personas que dirigirán y darán forma al equipo. El objetivo marcado para ese año fue intentar establecer las bases, es decir, realizar unos estatutos, establecer los diferentes departamentos del equipo y distribuir a los integrantes. No se buscó hacer todo el proyecto del vehículo en el año ya que la experiencia del equipo era nula. Además, una de las bases era establecer las características del monoplaza con el fin de establecer una dinámica de trabajo y empezar a funcionar como equipo. Al finalizar el año, se consiguió que esa dinámica de trabajo se mantuviese más o menos estable y funcionando. Además, todo lo aprendido de ese año, sirvió para el año siguiente; este año 18-19.

En este año, se ha cambiado la dirección del equipo, pero no la posición de los integrantes. Aquí, mi papel se sitúa únicamente en una situación que consiste en finalizar el diseño del chasis y, por ende, el TFM. Se mantiene la misma estructura que la trabajada el año anterior, así como los requerimientos establecidos ese año.

2.4. Requerimientos de diseño

Los requerimientos empleados para el diseño del chasis se recogen en la normativa, en concreto, en el apartado T, pero antes, es necesario establecer los requerimientos de diseño del vehículo para posteriormente, establecer los requerimientos del chasis.

En los anexos se encuentran varios apartados donde se define la Formula Student así como los apartados en los que está distribuida la normativa.

2.4.1. Requerimientos básicos

Estos requerimientos marcan la línea para el resto de requerimientos del vehículo. Por tanto, es necesario una buena definición de estos ya que, como existen varios tipos de vehículos, se debe evitar la interferencia entre estos tipos.

El primer requerimiento, y el más importante, consiste en definir la propulsión del monoplaza. Éste se hará por medio de un motor eléctrico y dispondrá de un sistema de baterías que almacene la energía que consumirá posteriormente.

Otro elemento importante, es la distancia entre ejes del vehículo, la batalla. La normativa establece un mínimo de 1525mm. Además, se establece que el eje menos ancho no debe ser inferior al 75% del eje más ancho. Por simplicidad, para esto último, se considera un ancho de ejes igual tanto delantero como trasero. En cuanto a la batalla, se estudia su efecto mediante la relación de Ackermann estableciendo un ancho de ejes estándar de 1200mm, tras realizar un estado del arte de los monoplazas de los 3 años anteriores (en el anexo consta los del año 2017). Finalmente, resulta ventajoso establecer una batalla cercana o igual a la mínima marcada por la normativa. Por facilidad, se establece una batalla de 1530mm.

Seguidamente, se establece que el chasis será tubular debido a la sencillez en comparación con un monocasco de fibra de carbono. Esto provoca que los vehículos con un chasis similar del estado del arte, pueden ser tomados como guía para comparar.

También hay que añadir la eliminación de elementos aerodinámicos tales como alerones, para simplificar el diseño del vehículo. Además, el uso de estos elementos únicamente tiene su justificación para conseguir mayor puntuación en las pruebas estáticas, ya que en las pruebas dinámicas no se alcanzaría las velocidades de giro elevadas que justifiquen su uso aquí también.

Antes de definir los requerimientos del chasis, de una forma más específica, es necesario establecer los componentes del vehículo, así como de la distribución de masas que se seguirá, por lo que los siguientes apartados, se discutirá estos a aspectos.

2.4.2. Componentes del vehículo

El monoplaza se compone de cientos de elementos, tanto grandes como pequeños que pueden agruparse en las siguientes partes:

- Piloto: persona que conducirá el monoplaza y viene considerada en la normativa como una plantilla con las dimensiones de un hombre dentro del percentil 95. Aunque su peso pueda diferir respecto al piloto, se le considera un peso de 77kg para los cálculos.

- Chasis: se trata del elemento base del cual todos los componentes del monoplaza irán anclados. Puede ser tanto una estructura tubular como monocasco de fibra de carbono, según le interese al equipo, ya que este último es mucho más ligero y resistente que el primero, pero la dificultad de su trabajo hace que se requieran maquinaria muy específica. Su diseño debe estar enfocado a soportar impactos ya que es lo único que le protege. Más adelante se detallará ese punto, ya que es el objetivo de este TFM.

- Atenuador de impacto: consiste en elemento de espuma con forma de pirámide truncada situado en la parte frontal del monoplaza y sujeto a este a través de pernos. Se monta junto con una placa que le separa del chasis. Sirve para absorber la energía que se produce cuando se produce un impacto frontal. Por simplicidad, se tomará la versión estándar cuyos planos vienen dados por la organización y, por tanto, no hace falta realizar los estudios de disipación de energía que obligaría la normativa en el caso de no hacerlo. La masa de este conjunto no se ha tenido en cuenta ya que es despreciable respecto a otros elementos.

- Cinturones de seguridad: son los dispositivos que permiten que el piloto no salga despedido del vehículo tras un impacto. Pueden ser de varios tipos, pero por lo general suelen emplearse cinturones de 5 o 6 anclajes, según la competición. En este caso, se ha utilizado un sistema de 6 anclajes.

- Suspensiones: está formado por barras formando un paralelogramo, conectando el chasis con la mangueta, sistema de anclaje de las ruedas (formado por manguetas, discos de frenos, etc.) y por los amortiguadores y resortes. Este conjunto se encarga de mitigar la transmisión de las irregularidades de la carretera al monoplaza, para así hacerlo más maniobrable. Los puntos de anclaje de estos han sido básicos para la realización del chasis.

- Ruedas: consiste en un conjunto formado por la llanta y la cubierta. Es importante considerar bien su tamaño ya que puede perjudicar en el rendimiento del monoplaza. Esto es:

    - Una llanta grande tiene consigo una inercia grande, que provoca que sea más costoso provocar su movimiento, aunque permite que su velocidad lineal sea mayor. En cambio, una llanta pequeña disminuye su velocidad lineal, pero resulta menos costoso provocar su movimiento. En definitiva, a mayor llanta, mayor velocidad, pero se invierte más energía en provocar su movimiento.

    - Un neumático de perfil alto consigue disponer de un mayor agarre en aceleraciones y permite amortiguar mejor los baches existentes en el suelo. Además, reduce la aparición de aquaplaning. En cambio, el perfil bajo permite disponer mayor agarre lateral, mejorando el tiempo de reacción del vehículo y permite disponer frenos mayores.

  Aquí, se ha tomado unas gomas de R10x7”, aunque también se pensó en algo mayores (R13x7”), se decidió en la reducida debido a los argumentos aportados anteriormente.

- Sistema de dirección: formado por el volante, la columna de dirección, la cremallera y las bieletas de dirección, permite mantener el vehículo en la dirección deseada. Debe tener suficiente recorrido para permitir el giro del vehículo. Su diseño también es importante ya que puede provocar problemas cuando se interactúe con él, los cuales son:

    - Subviraje: fenómeno que aparece cuando el vehículo gira menos de lo que debería en condiciones normales, provocando que siga una trayectoria más rectilínea que la ideal.

    - Sobreviraje: se trata un fenómeno totalmente opuesto al anterior. Ocurre cuando el vehículo gira más de lo que debería en condiciones normales. De esta forma, toma una trayectoria mucho más curva de lo que debería.
      Ambos son totalmente indeseados y pueden ocasionar, en el menor de los casos, dificultad de maniobrabilidad.

- Diferencial: permite partir la energía mecánica del motor en dos energías mecánicas que pueden ser o no iguales dependiendo de la situación en la que se encuentre el vehículo, esto es, en las curvas y permite que la velocidad angular de las ruedas a las que divide la energía (en este caso traseras) sea

diferente, consiguiéndose una mejor maniobrabilidad en curvas. En este vehículo, el diferencial se ha tomado consiste en un diferencial autoblocante que permite controlar el deslizamiento que se produce cuando, en una curva, una rueda pierde su tracción y la otra gira al doble de la velocidad, produciéndose problemas de estabilidad.

- Sistema de frenado y aceleración: está formado por dos sistemas, el acelerador y el freno.

    - Acelerador: es el encargado de solicitar mayor energía. En el caso de un vehículo eléctrico, como es este, se trata de un sistema electrónico que demanda al controlador más potencia. El controlador se encargará luego de gestionarlo y demandarle a las baterías esa energía. Su uso se realiza mediante un pedal con un potenciómetro. su recorrido dará al controlador la cantidad de energía que se requiere.

    - Frenos: se trata de un sistema mixto, mecánico y electrónico, y accionado mediante un pedal. El sistema permite que el vehículo reduzca parcial o totalmente su velocidad empleando un sistema hidráulico. Posee un potenciómetro para medir un rango para una la frenada regenerativa sin sistema hidráulico.

- Acumulador: sistema de almacenamiento de energía formado por las baterías. Éstas, se encuentran en el interior de una caja con compartimentos. Esta caja debe disponer de sistemas de protección que marca la normativa. Se trata de un conjunto muy pesado que implica tener sus masas muy en consideración a la hora de realizar la distribución de masas del monoplaza.

- Motor eléctrico: convierte la energía eléctrica en energía mecánica y permite el movimiento del vehículo. El motor irá conectado al diferencial mediante una correa o cadena. Esta conexión y el motor deben estar protegidos mediante una cubierta que impida la penetración de elementos no deseados. La característica principal de este motor es que su rotor y la carcasa de todo el motor, giran. Su masa, es también un elemento que se debe tener en cuenta a la hora de realizar la distribución de masas.

- Controlador: es el cerebro del monoplaza y se encarga de gestionar la unidad de potencia, esto es, motor, baterías y sensores de aceleración y frenos. Se trata de otro elemento pesado y, por consiguiente, se debe tener en cuenta a la hora de realizar la distribución de masa

- Sistema de refrigeración: se encarga de mantener los equipos que lo requieran en unas temperaturas adecuadas, que en este caso se corresponde con el controlador y el motor. Se utiliza agua destilada como fluido térmico.

2.4.3. Distribución de masa

Para una correcta maniobrabilidad de un vehículo, es muy importante la ubicación del centro de gravedad, o centro de masas, de todo el conjunto. Esto es el punto geométrico en el que, dinámicamente, se comporta como si en él estuviera aplicada la resultante de las fuerzas externas al sistema. Por lo que se puede decir que el sistema formado por toda la masa concentrada en el centro de masas es un sistema equivalente al original.

Si este punto geométrico está desplazado, el sistema no está totalmente equilibrado, pudiéndose observar un pequeño cabeceo, por ejemplo, si está hacia delante, que tendrá entonces que ser compensado mediante un complemento extra que permita su corrección. En el caso de un vehículo, esto puede ser modificando la suspensión, haciendo la más o menos rígida según esté situado el centro de masa.

Ahora bien, lo anterior no es lo adecuado ya que la maniobrabilidad también se ve altamente afectada. Un centro de masas desplazado hacia un lateral, por ejemplo, provoca que se intensifiquen problemas como el sobreviraje y el subviraje, debido a que, en curvas, el peso del vehículo que soporta cada rueda, es muchísimo más dispar respecto a un caso de centro de masas no desplazado.

Por último, su altura influye. Si se observa y se compara los vehículos de carreteras, como los camiones, con vehículos de carrera, como un Formula 1, por ejemplo, se puede concluir que cuanto mayor sea el vehículo, mayor está su centro de masas, implicando un mayor riesgo al vuelco, aparte de las diferencias obvias de potencia, utilidades, estética, etc.

Ante todo esto, es conveniente que el centro de masas se sitúe en el centro geométrico del rectángulo formado por las cuatro ruedas del vehículo y con una altura lo menor posible respecto al suelo. Siguiendo estas reglas, se establece primero la distribución de los elementos en el vehículo, en el que los elementos más pesados estén lo más próximo al centro geométrico del rectángulo y en la parte inferior del interior del chasis. Este primer boceto, se muestra a continuación:

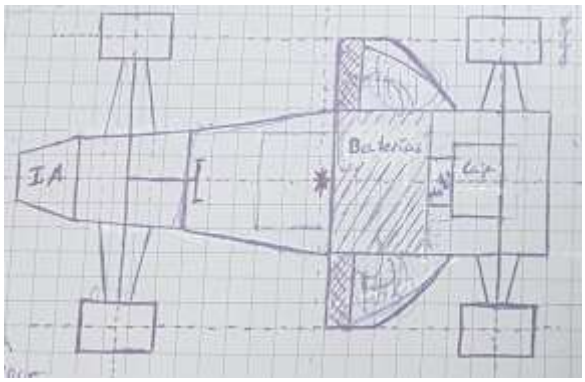


Ilustración 1. Bocetos empleados. Distribución pesos. Fuente: propia

Tras los primeros diseños del chasis, la idea principal del boceto se ha mantenido prácticamente, tomando una distribución tridimensional, como sigue:

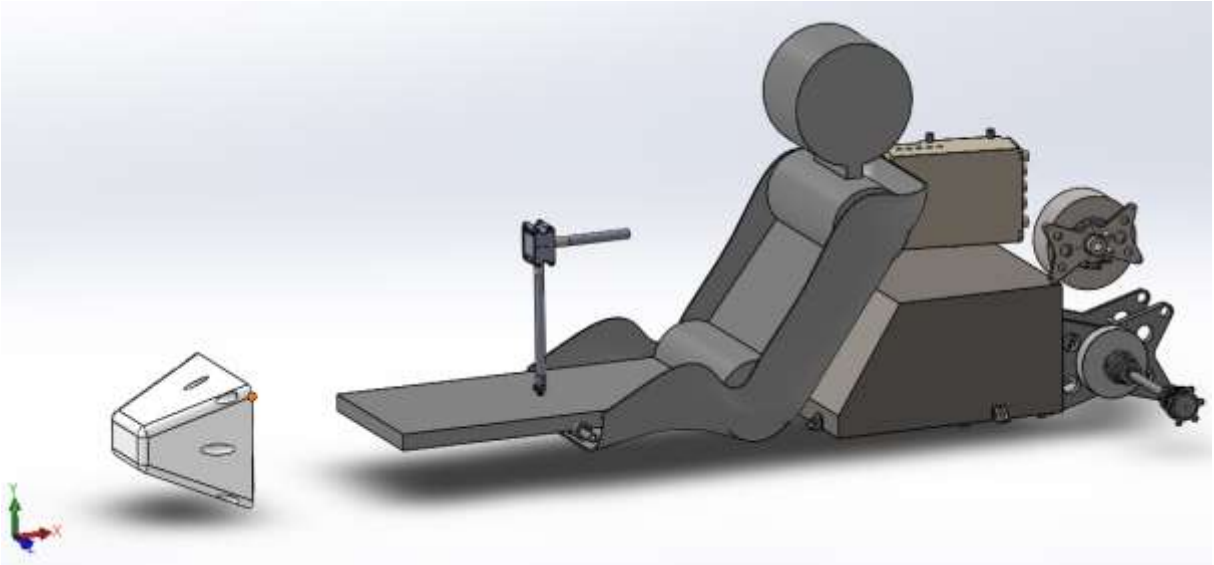


Ilustración 2. Distribución de los componentes del monoplaza. Fuente: propia

Con el centro de gravedad localizado entre el piloto y el acumulador, como se muestra en la siguiente imagen:

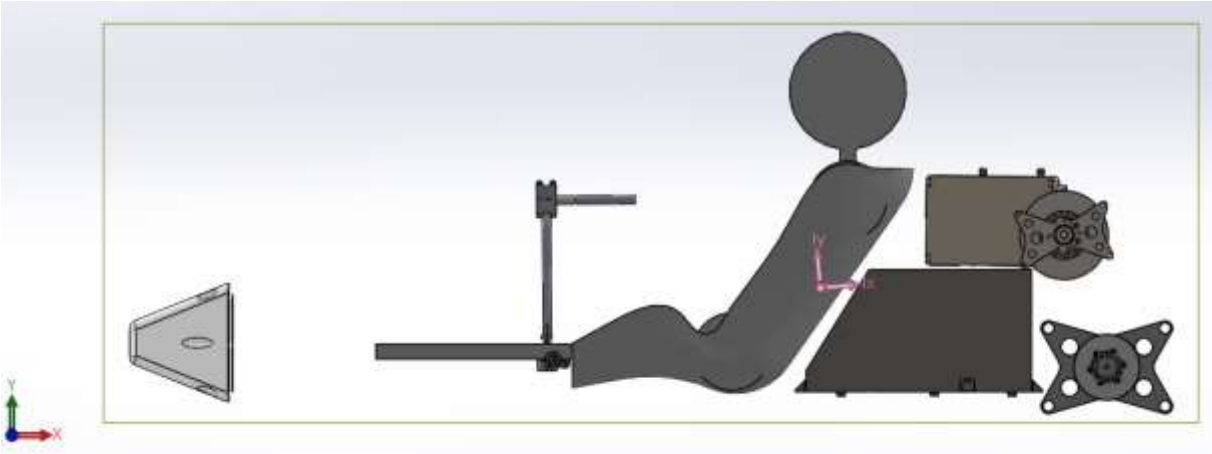


Ilustración 3. Localización del centro de gravedad de los componentes del monoplaza. Fuente: propia

2.4.4. Requerimientos del chasis

En las normativas reflejadas en la introducción, existe un gran apartado referido a este aspecto. En él, se trata los aspectos que debe de cumplir el chasis según su tipología. En el caso de este TFM, se tiene en cuenta los elementos que afecten a un chasis tubular para un vehículo eléctrico.

Es importante diferenciar las partes que componen el chasis. Se determina principalmente por la función que posee y, por consiguiente, los elementos que lo conforman. Estos son:

- Aro principal
- Aro delantero
- Tirantes y soportes de aro rodante
- Estructura de impacto lateral
- Mamparo frontal
- Sistema de soporte frontal de mamparo
- Todos los miembros, guías y soportes del chasis que transfieren la carga del sistema de retención del conductor a los componentes mencionados anteriormente de la estructura primaria

La unión de todos estos elementos se les conoce como “estructura primaria” y es importante que la conexión entre todos ellos se realice mediante triangulación nodo a nodo, como muestra la imagen.

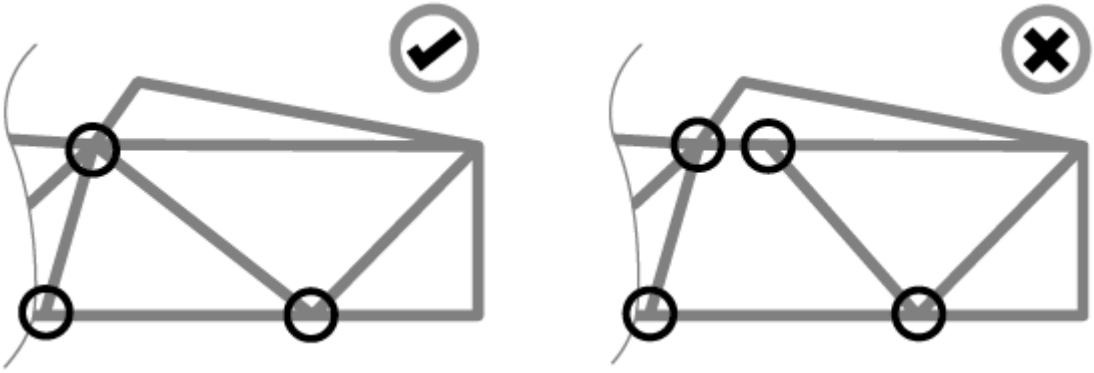


Ilustración 4. Triangulación de la estructura. Fuente: Normativa FS-Germany

Ahora bien, se establece las características mínimas que deben cumplir los elementos estructurales empleados, los cuales se dividen en 3 grupos. Se puede ver que los elementos más críticos, poseen unas limitaciones más estrictas.

Non-welded strength for continuous material calculations:

- Young's Modulus (E) = 200 GPa
- Yield Strength (S_y) = 305 MPa
- Ultimate Strength (S_u) = 365 MPa

Welded strength for discontinuous material such as joint calculations:

- Yield Strength (S_y) = 180 MPa
- Ultimate Strength (S_u) = 300 MPa

Tabla 1. Dimensiones de perfil según aplicación. Fuente: Normativa FS-Germany

Item or application	Minimum wall thickness	Minimum cross sectional area	Minimum area moment of inertia
Main and front hoops, shoulder harness mounting bar	2.0 mm	175 mm^2	11 320 mm^4
Side impact structure, front bulkhead, roll hoop bracing, driver's restraint harness attachment (except as noted above)	1.2 mm	119 mm^2	8509 mm^4
Front bulkhead support, main hoop bracing supports	1.2 mm	91 mm^2	6695 mm^4

Para determinar si los tubos encontrados en catálogos son adecuados, se realizó una hoja Excel que indica si se cumplen los requerimientos mínimos y establece la aplicación válida. Como diámetros de partida para el análisis y que cumplen con la normativa se usan:

Tabla 2. Dimensiones empleadas. Fuente: propia

Clase	Aplicación	Dimensiones (mm)
Tipo 1	Aros principales y barra de sujeción de cinturón de hombros	28x2.5
Tipo 2	Resto	28x1.5

La obtención de estos diámetros, se realiza calculando primero el diámetro mínimo empleando el momento de inercia de la sección transversal y luego se comprueba mediante el cálculo de la sección transversal. En los anexos, se encuentra más detallado.

A continuación, se comenta brevemente los requerimientos para cada una de las partes de la estructura primaria.

- Aro principal:
  - Una sola pieza de acero, sin cortar y de sección cerrada.
  - Inclinación inferior a 10º

- Aro frontal
  - Una sola pieza de acero, sin cortar y de sección cerrada
  - Inclinación inferior a 20º

- Tirantes aro principal
  - No inferior a 160mm por debajo de la superficie superior del aro principal
  - Angulo inclinación superior o igual a 30º
  - Deben ser rectos

- Tirantes aro frontal
  - No inferior a 50mm por debajo de la superficie superior del aro frontal

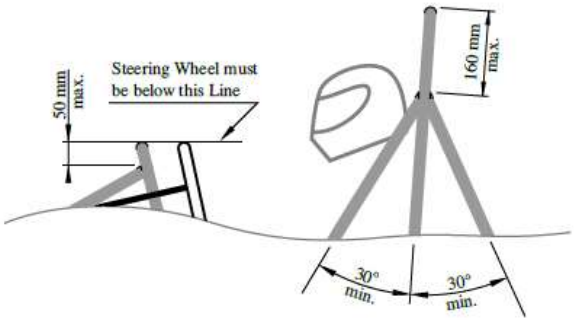


Ilustración 5. Requerimientos de los tirantes del aro principal. Fuente: Normativa FS-Germany

- Mamparo frontal
    - Placa de acero de 1.5mm

- Soportes del mamparo frontal
    - Unido al mamparo frontal un máximo de 50 mm por debajo de la superficie más alta del mamparo delantero, y debe estar unido al aro frontal un máximo de 50 mm por debajo del miembro de impacto lateral superior. Si el punto de unión del miembro superior es superior a 100 mm por encima del miembro de impacto del lado superior, se requiere un refuerzo triangulado nodo a nodo para transferir la carga al aro principal.

- Estructura de impacto lateral
    - Debe estar a una altura entre 240 mm y 320 mm por encima del punto interior más bajo del chasis entre el aro delantero y el principal.

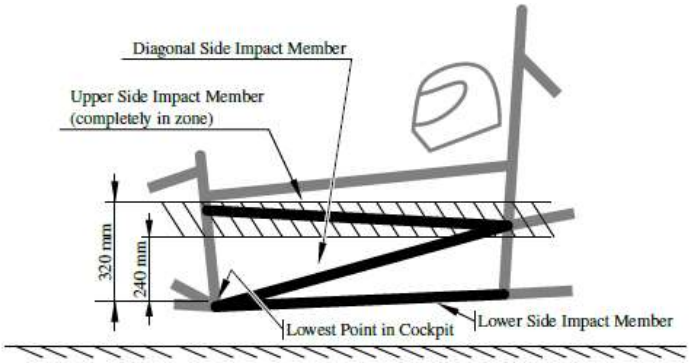


Ilustración 6. Requerimientos de la estructura de impacto lateral. Fuente: Normativa FS-Germany

- Atenuador de impacto
    - Instalado adelante del mamparo frontal.
    - Al menos 100 mm de altura y 200 mm de ancho para una distancia mínima de 200 mm hacia delante del mamparo frontal.
    - No es capaz de penetrar en el mamparo frontal en caso de impacto.
    - Fijado de forma segura y directa a la AIP.
    - No forma parte de la carrocería no estructural.
    - Diseñado con una sección frontal cerrada.
    - No puede ser más ancho o más alto que el AIP.

  Aquí, se empleará un atenuador de impacto estándar, cuyos planos se encuentran adjuntos en el anexo. Este atenuador se trata de una estructura cuyas dimensiones y geometría cumplen con los requerimientos mínimos establecidos por la normativa.

    - Placa de acero de 1.5mm

- Habitáculo del piloto
    - Paso libremente de las plantillas.

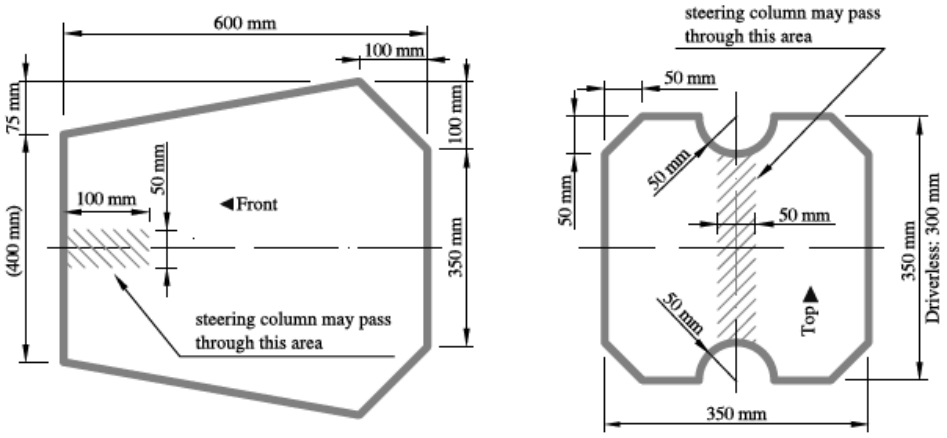


Ilustración 7. Plantillas de sección libre del habitáculo del piloto. Fuente: Normativa FS-Germany

- Piloto
    - Se considera el percentil 95 masculino
    - Debe haber un mínimo de 50mm entre el casco del piloto y la línea que uno las superficies de los aros principales.
    - La parte posterior debe estar en línea con el aro principal si no existen tensores traseros. En el caso de haberlos, puede estar un máximo de 50mm hacia atrás.

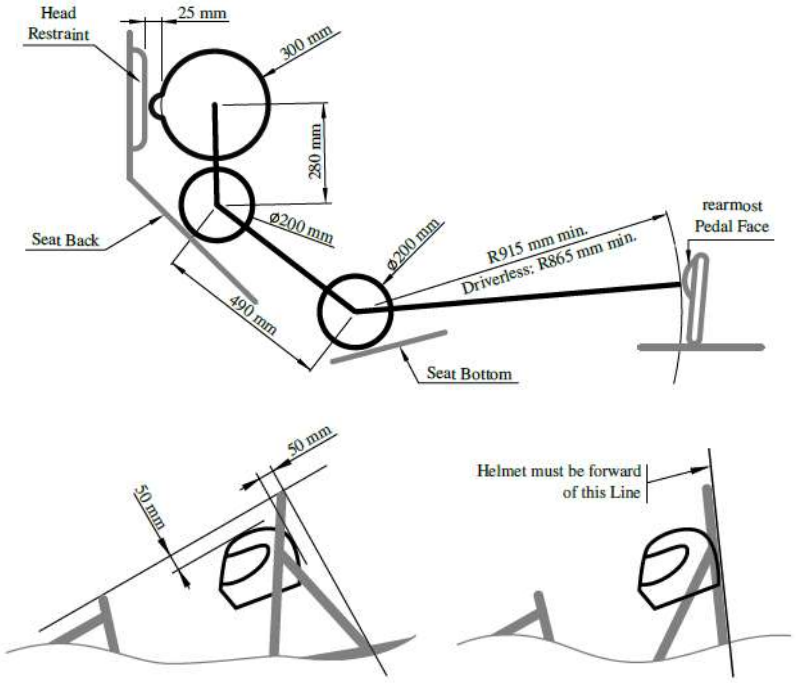


Ilustración 8. Características y posición del piloto. Fuente: Normativa FS-Germany

- Cinturones del piloto y sus placas de anclajes
    - Cinturones de 6 puntos, formado por un cinturón de regazo de dos piezas (ancho mínimo de 50 mm), dos tirantes (ancho mínimo de 75

mm) y dos correas para piernas o antisubmarinos (ancho mínimo de 50 mm).

- Un área de sección transversal mínima de 60 mm2 de acero
- Un espesor mínimo de 1.6 mm

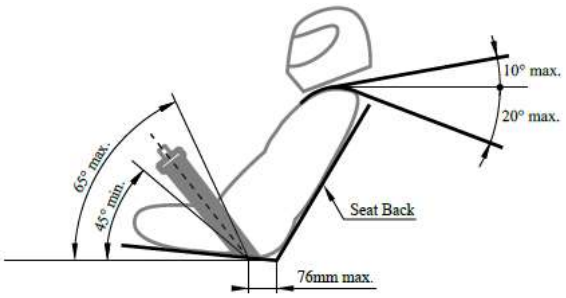


Ilustración 9. Requerimientos cinturones de anclaje del piloto. Fuente: Normativa FS-Germany

Dado que el vehículo es eléctrico, es necesario considerar aquellos componentes que requieran una unión con la estructura primaria. En la normativa, se establece que esta unión debe hacerse para el acumulador, debido, principalmente, al peso que supone. Además, establece que se requiere de una estructura que lo ancle a la estructura primaria, así como que esté protegido contra colisiones laterales o traseras.

En los anexos, se puede encontrar una tabla que muestra todos los requerimientos necesarios con más detalle, pudiéndose determinar si existe una vulneración o no de la normativa.

El primer chasis que cumple estos requerimientos es el siguiente:

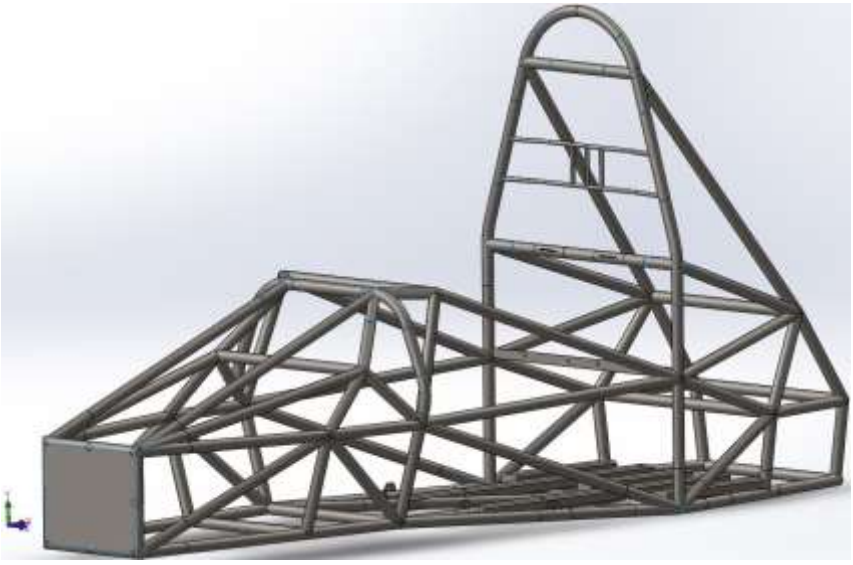


Ilustración 10. Primer chasis válido según la normativa FS-Germany. Fuente: propia

Esta estructura está formada por diferentes tubos de acero de diferentes dimensiones:

- Redondo 28x2.5mm: Estructura primaria
- Redondo 28x1.5mm: Estructura primaria
- Redondo 10x2mm: soporte reposacabeza

- Rectángulo 50x30x2.6mm: soporte caja de baterías
- Perfil L 25x25x4mm: anclaje otros elementos
- Placa plana de espesor 1,5mm: estructura primaria
- Placa plana: anclaje cinturones
    - Espesor 2mm
    - Agujero 10mm diámetro
    - Parte superior
        - Redondeo 5mm diámetro
        - Longitud 25mm
    - Parte inferior
        - Redondeo 10mm diámetro
        - Longitud 50mm

Este chasis presenta un modelado muy característico, que se explicará en el siguiente apartado. Además, en los anexos se presentan otros chasis que no cumplen con la normativa por diferentes causas.

2.5. Software y condiciones de contorno

El software empleado para la resolución de este TFM fue el SolidWorks. Se trata de un programa CAD con multitud de aplicaciones y funcionalidades de análisis de elementos finitos. Su empleo ha sido necesario para poder determinar, principalmente, las tensiones y los desplazamientos de los elementos que conforman la estructura; además de la realización de los planos.

2.5.1. Modelado

El modelado del chasis se ha realizado mediante croquis en 3D a la cual se ha combinado elementos de vigas con elementos sólidos y superficies. Principalmente, el chasis está modelado por elementos de vigas que permiten un modelo más simplificado, evitando el consumo de recursos computacionales en exceso ya que, si se modelase con sólidos, los elementos de malla harían que su computación fuese más pesada.

Dado que existen numerosos nodos, el resultado empleando elementos de vigas no es exactamente realista, por lo que ha sido necesario disponer de otros elementos como sólidos o superficies que permiten observar mejor esos resultados. Para esto, ha sido necesario modelar las uniones como sólidos, al que luego se le aplica una tapa, y a ésta, una superficie equidistante a 0mm de la superficie con un espesor, para posteriormente insertar los elementos de viga. De esta forma, las vigas quedan insertadas a los elementos sólidos modelados anteriormente. En la siguiente imagen, se muestra un croquis que muestra este proceso.

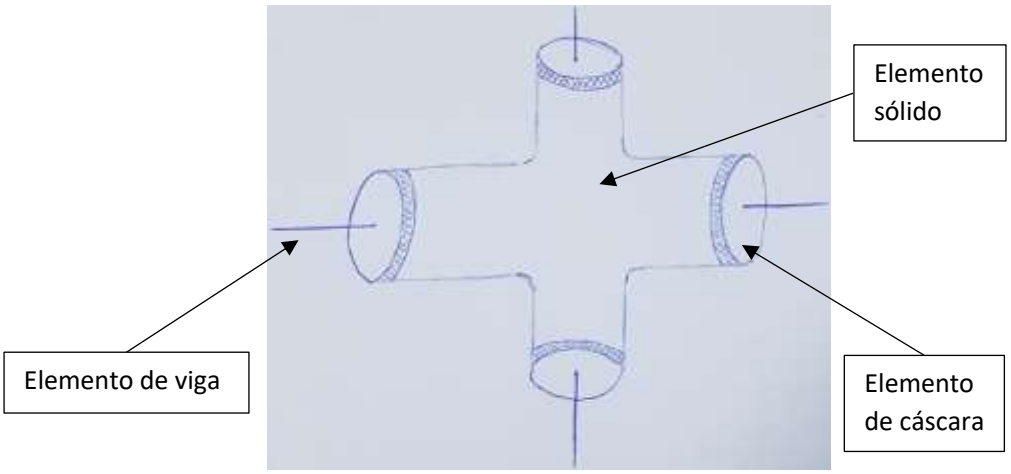


Ilustración 11. Croquis modelado de sólidos con elementos estructurales. Fuente: propia

Este proceso se debe a los grados de libertad que posee cada elemento en un nodo, que no son iguales; una viga posee 6 mientras que un sólido, 3. Ante esto, es necesario disponer de un elemento que permita su unión. Un elemento de cáscara, como son las tapas, lo permite, tomando en el lado del sólido 3 grados de libertad y en el lado de la viga, 6.

Otro aspecto relevante que se produce al realizar el modelado de esta forma es que se podrá visualizar el efecto del abollamiento en las uniones ya que con elementos de viga esto no sería posible. La siguiente imagen, muestra un ejemplo de este efecto:

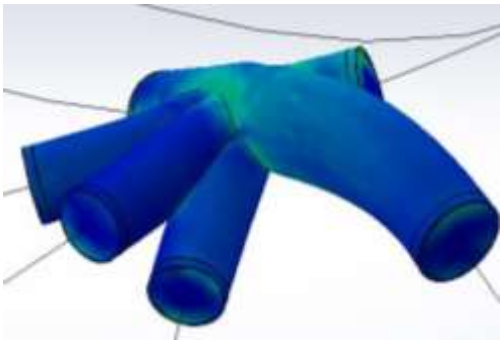


Ilustración 12. Efecto resultante al emplear el modelado de sólidos con elementos de viga y cáscara. Fuente: propia

2.5.2. Material

El material empleado para las simulaciones es AISI 1010 estirado en frío con las siguientes propiedades mecánicas:

Tabla 3. Propiedades mecánicas del AISI 1010

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	7.87	g/cm3
Tensión elástica	305	MPa
Tensión ultima	365	MPa
Módulo elástico	205	GPa
Módulo cizalladura	80	GPa

Relación de poisson	0.29	-
Módulo compresión	160	GPa

Dado que se desea asegurar que se trabaja en el régimen elástico, se establece que la tensión máxima elástica que se desea tener sea el 90% de la tensión elástica del material, esto es, 274.5MPa. Por tanto, esta será la tensión máxima que se debe tener en cada una de las simulaciones.

2.5.3. Proceso de cálculo iterativo

Debido a la complejidad del modelo, que combina sólidos, superficies y elementos estructurales (vigas), el proceso para determinar las dimensiones de los tubos pasa por simplificar al máximo el modelo. Esto es, realizar los diferentes estudios mediante un modelo basado en la teoría de vigas, empleando únicamente elementos estructurales. Tras esto, se comprueba algunas uniones empleándose el modelo con sólidos y superficies. De esta forma, se consigue:

- Simplificar el proceso de calculo
- Observar las diferencias existentes entre ambos modelos
- Conseguir una representación más realista de las uniones

2.5.4. Condiciones de contorno

Para el diseño del chasis, es necesario establecer las condiciones de contorno. En la normativa, se exponen estas condiciones de forma muy detallada y que se trascriben a continuación. Se considera un sistema de referencia igual al de la imagen.

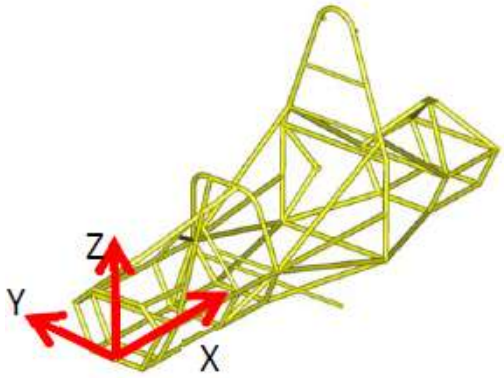


Ilustración 13. Sistema de coordenadas empleado. Fuente: Normativa FSAE

Donde:

- Eje x: Longitudinal
- Eje y: Transversal
- Eje z: Vertical

Además, para cada caso, se establecen algunas anotaciones personales, así como el modelo de partida con las condiciones de contorno.

- Aro principal

  - Carga aplicada
    - Fx = 6.0 kN
    - Fy = 5.0 kN
    - Fz = -9.0 kN

  - Punto de aplicación: Parte superior del aro principal
  - Condiciones de contorno: Desplazamientos fijos (x, y, z) pero no la rotación en los nodos inferiores de ambos lados del aro principal y aro frontal
  - Máxima deflexión permitida: 25mm
  - Criterio: la plastificación no debe ocurrir en ningún lado de la estructura
  - Anotación personal: La carga se aplica en el nodo central del semicírculo del aro principal.
  - Modelo:

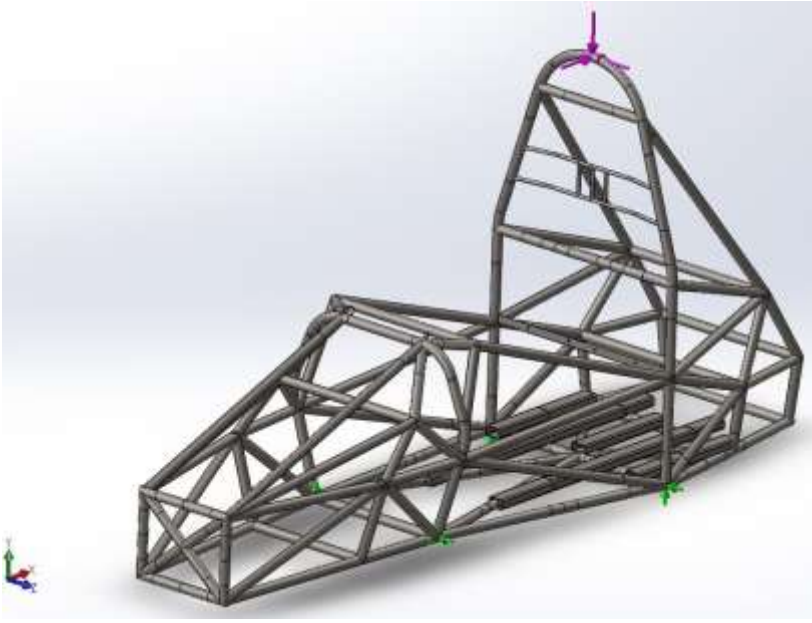


Ilustración 14. Condiciones de contorno para elementos estructurales. Fuente: propia

- Aro frontal
  - Carga aplicada
    - Fx = 6.0 kN
    - Fy = 5.0 kN
    - Fz = -9.0 kN

- Punto de aplicación: Parte superior del aro principal
- Condiciones de contorno: Desplazamientos fijos (x, y, z) pero no la rotación en los nodos inferiores de ambos lados del aro principal y aro frontal
- Máxima deflexión permitida: 25mm
- Criterio: la plastificación no debe ocurrir en ningún lado de la estructura
- Anotación personal: La carga se aplica en los dos nodos que forman la parte superior del aro principal.
- Modelo:

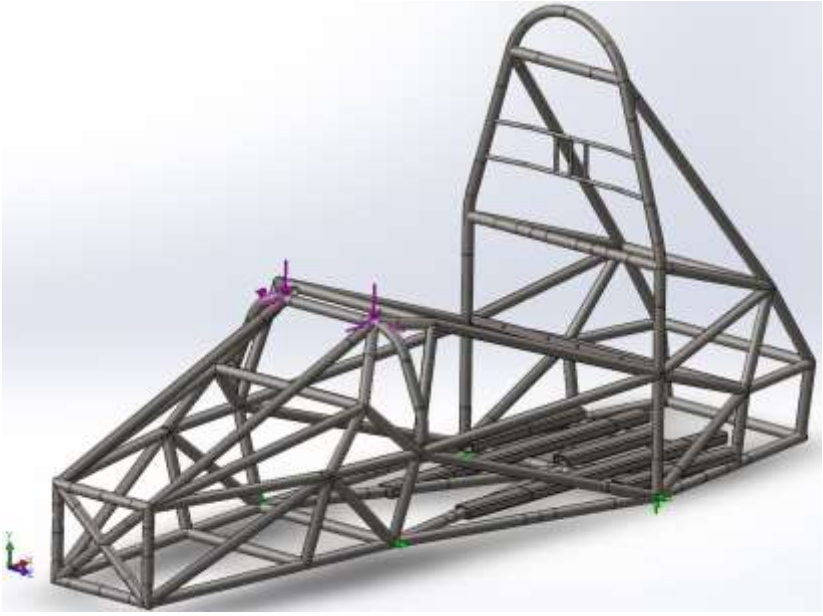


Ilustración 15. Condiciones de contorno para elementos estructurales. Fuente: propia

- Impacto lateral

  - Carga aplicada
    - Fx = 0 kN
    - Fy = 7.0 kN
    - Fz = 0 kN

  - Punto de aplicación: Todas las ubicaciones estructurales entre el aro frontal y el aro principal que también son requeridas por AF6.4 (protección contra intrusiones). La carga se puede distribuir por la superposición del círculo de impacto a los miembros estructurales. Esta zona de impacto está descrita por una circunferencia de 5in de radio.

- Condiciones de contorno: Desplazamientos fijos (x, y, z) pero no la rotación en los nodos inferiores de ambos lados del aro principal y aro frontal
- Máxima deflexión permitida: 25mm
- Criterio: la plastificación no debe ocurrir en ningún lado de la estructura
- Anotación personal: Se añaden al modelo unas barras de una longitud suficientemente largo como para que la carga que se aplique sea prácticamente horizontal. Estas barras únicamente se comportan como barras sometidas a tracción y compresión, de forma que se transmita la carga al chasis de manera adecuada. La carga aplicada se sitúa en el punto de unión de todas estas vigas.
- Modelo:

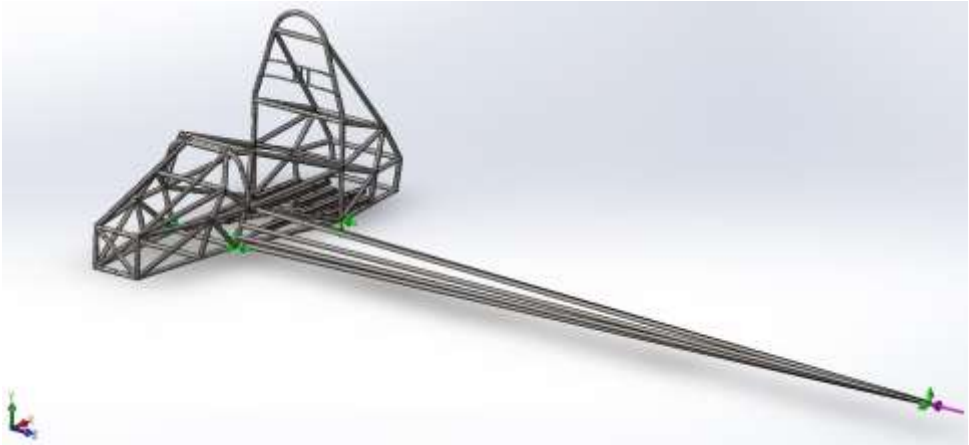


Ilustración 16. Condiciones de contorno para elementos estructurales. Fuente: propia

- Impacto frontal

  - Carga aplicada
    - Fx = 120.0 kN
    - Fy = 0 kN
    - Fz = 0 kN

  - Punto de aplicación: Puntos de anclaje del atenuador de impacto con el mamparo frontal.
  - Condiciones de contorno: Desplazamiento fijo (x, y, z) pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados del aro principal y de ambas ubicaciones donde se conectan el aro principal y el tubo del arnés para hombros.
  - Máxima deflexión permitida: 25mm

- Criterio: La plastificación no debe ocurrir en ningún lado de la estructura
- Anotación personal: Se aplica la carga en el punto de aplicación de la normativa. La sujeción del tubo del arnés para hombros se realiza con la arista que la une con el aro principal.
- Modelo:

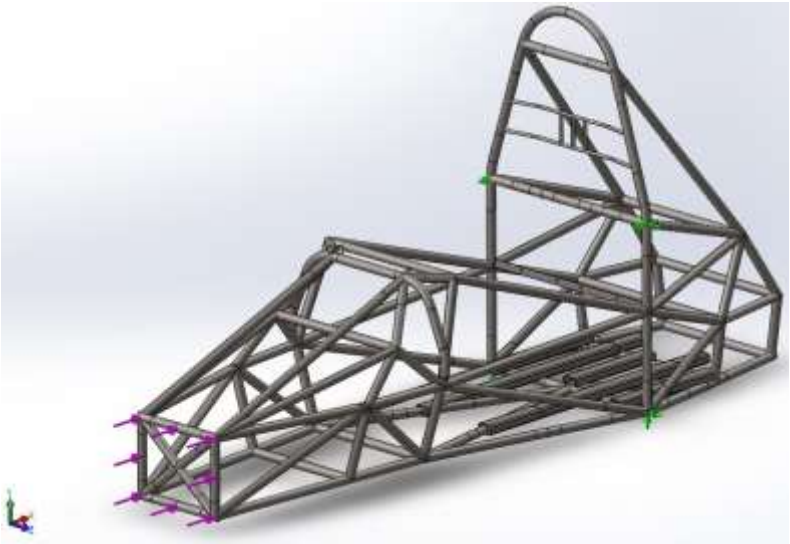


Ilustración 17. Condiciones de contorno para elementos. Fuente: propia

- Anclajes cinturón de los hombros

  - Carga aplicada: 7 kN para estructuras de acero aplicadas en cada punto de fijación
  - Punto de aplicación: Ambos puntos de sujeción del arnés simultáneamente
  - Condiciones de contorno: Desplazamientos fijos (x, y, z) pero no la rotación en los nodos inferiores de ambos lados del aro principal y aro frontal
  - Máxima deflexión permitida: 25mm
  - Criterio: La plastificación no debe ocurrir en ningún lado de la estructura
  - Anotación personal: La carga se aplica a lo largo de la superficie que forma la mitad del cilindro, de manera perpendicular a la dirección de la fuerza. Ésta tiene una distribución no uniforme siguiendo el seno, de forma que la dirección de la carga sea máxima. Esto es:

$$F = F_{normativa} \cdot \sin\theta$$

    La dirección que se toma corresponde con la normal de la cara interior del orificio.

  - Modelo:

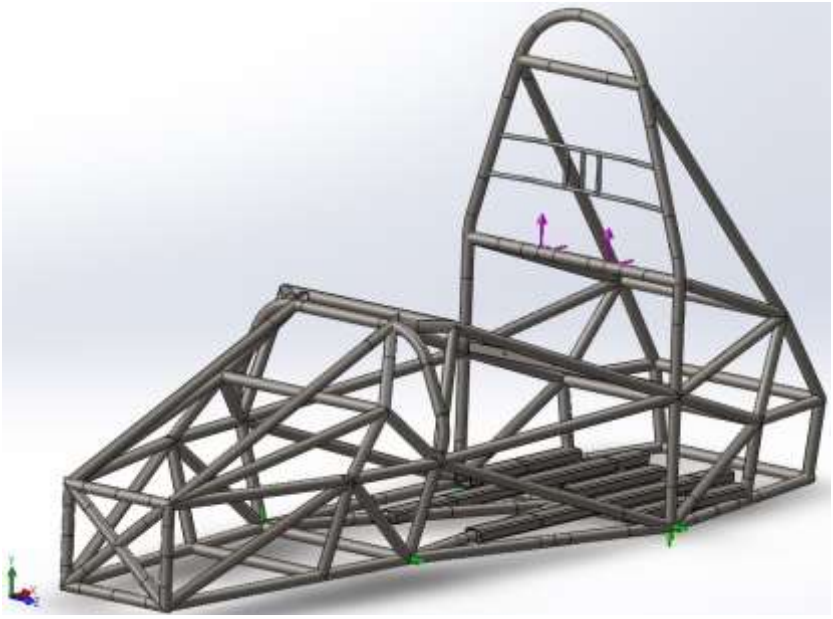


Ilustración 18. Condiciones de contorno para elementos estructurales (superior) y en combinación con sólidos (inferior). Fuente: propia

- Anclajes cinturones del regazo y antisubmarino

  - Carga aplicada:
    - 13 kN aplicada en cada punto de sujeción del cinturón de regazo
    - 6,5 kN en cada punto de sujeción de la correa submarina
    - Si los cinturones de regazo y submarinos comparten los mismos puntos de sujeción: 19.5 kN en cada punto de sujeción de cinturón
  - Punto de aplicación: Ambos puntos de sujeción del arnés simultáneamente
  - Condiciones de contorno: Desplazamientos fijos (x, y, z) pero no la rotación en los nodos inferiores de ambos lados del aro principal y aro frontal
  - Máxima deflexión permitida: 25mm
  - Criterio: La plastificación no debe ocurrir en ningún lado de la estructura
  - Anotación personal: La carga se aplica a lo largo de la superficie que forma la mitad del cilindro, de manera perpendicular a la dirección de la fuerza. Ésta tiene una distribución no uniforme siguiendo el seno, de forma que la dirección de la carga sea máxima. Esto es:

$$F = F_{normativa} \cdot sin\,\theta$$

La dirección que se toma son 55º con la horizontal siguiendo sentido antihorario.

- Modelo:

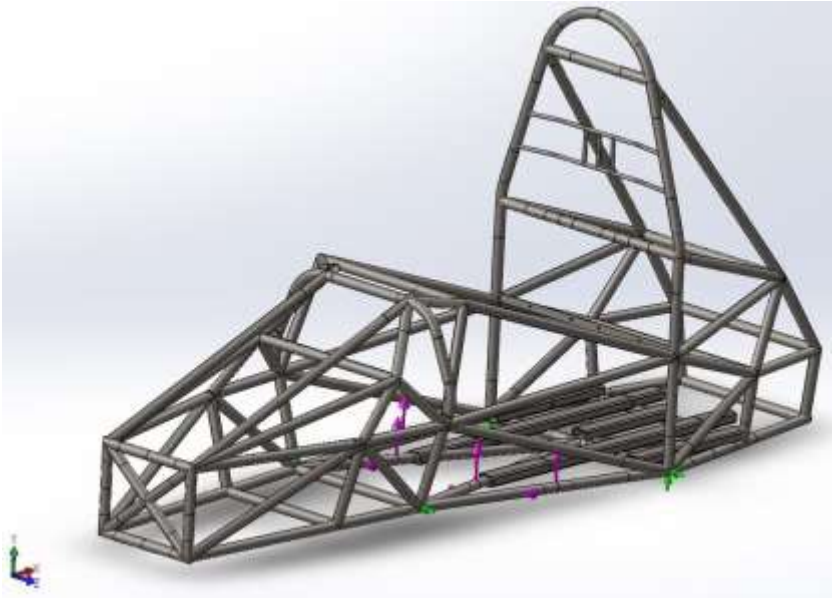


Ilustración 19. Condiciones de contorno para elementos. Fuente: propia

- Impacto frontolateral (frontal fuera de ejes)

  - Carga aplicada
    - Fx = 120.0 kN
    - Fy = 10.5 kN
    - Fz = 0 kN

  - Punto de aplicación: Cree un nodo de aplicación de carga en el plano del mamparo frontal, en el centro del mamparo frontal. El nodo de aplicación de carga puede estar conectado rígidamente al mamparo frontal y a los puntos de conexión del atenuador de impacto.
  - Condiciones de contorno: Desplazamiento fijo (x, y, z) pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados del aro principal y de ambas ubicaciones donde se conectan el aro principal y el tubo del arnés para hombros.
  - Máxima deflexión permitida: 25mm
  - Criterio: fallo no debe ocurrir en ningún lado de la estructura
  - Anotación personal: Se aplica la carga en el punto de aplicación de la normativa como una carga remota con conexión rígida a los

elementos indicados por la normativa. La sujeción del tubo del arnés para hombros se realiza con la arista que la une con el aro principal.

- Modelo:

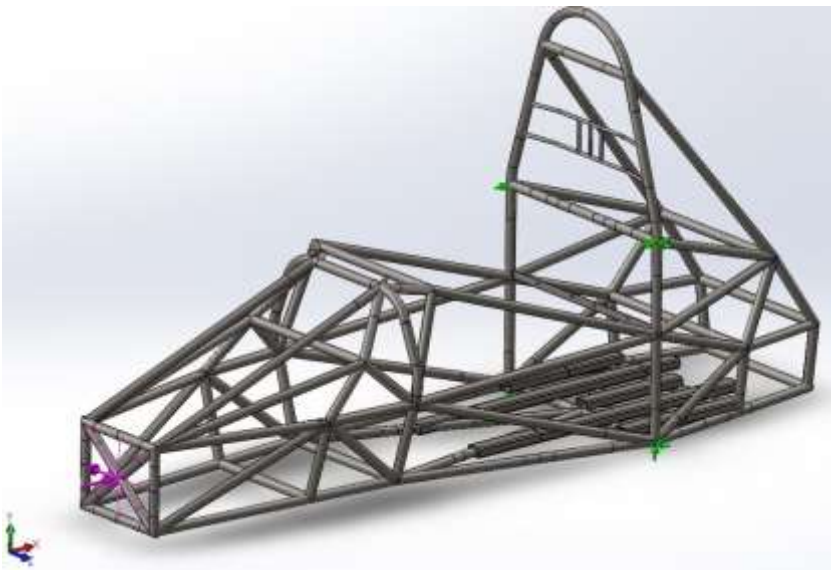


Ilustración 20. Condiciones de contorno para elementos. Fuente: propia

- Anclajes caja de baterías

  - Carga aplicada: La magnitud de las cargas es la masa multiplicada por la aceleración.
    - Chasis con estructura de separación entre acumulador y piloto similar a una estructura de impacto lateral.
      - ax = 20g
      - ay = 20g
      - az = 20g

    - Chasis sin estructura de separación entre acumulador y piloto similar a una estructura de impacto lateral.
      - ax = 40g
      - ay = 40g
      - az = 20g

  - Punto de aplicación: La carga en la estructura del contenedor del acumulador se aplica mediante cargas ubicadas en el centro de gravedad de cada celda / segmento.
  - Condiciones de contorno: Desplazamientos fijos (x, y, z) pero no la rotación en los nodos inferiores de ambos lados del aro principal y aro frontal
  - Máxima deflexión permitida: 25mm

- Criterio: La plastificación no debe ocurrir en ningún lado de la estructura
- Anotación personal: El chasis carece de estructura que separe ambos elementos, por lo que se toman las aceleraciones correspondientes. Ante las dificultades en simular el conjunto de la caja de baterías con el chasis, se ha optado por simular ambos por separado en el que las restricciones que se producen en la caja corresponden, con signo contrario, con las fuerzas que se ejercen sobre el chasis.

    - Las restricciones de la caja se establecen en la parte superior de los agujeros de las lengüetas, donde la cabeza del perno estará en contacto con éstas. se considera que la caja sufre un golpe que desplaza la caja hacia delante.

    - Las cargas provenientes de las restricciones de la caja, se aplican en la cama de la caja de baterías con una orientación según el signo. Esto es, se contempla que pueden estar en las superficies superiores o inferiores de la cama, así como también en el agujero por el cual se encuentra el perno. Las cargas verticales, se aplican en la arista mientras que las longitudinales y transversales, en las caras interiores del agujero.

- Modelo:

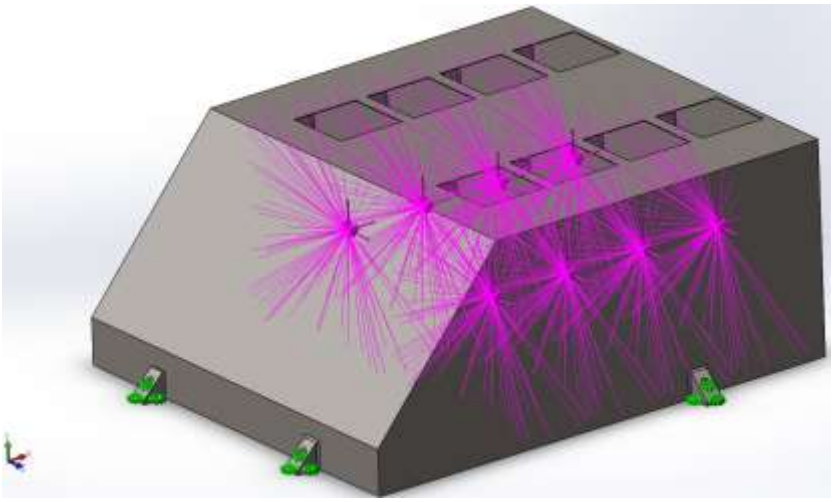


Ilustración 21. Condiciones de contorno para el acumulador. Fuente: propia

Tabla 4. Fuerzas de reacción de los anclajes del acumulador

Anclaje	Fuerzas de reacción (N)		
	Eje x	Eje y	Eje z

1	1281	1093.6	936.13
2	1341.3	1399.4	61.938
3	2449.2	7835.8	5402
4	2258.1	-2331.7	1611.9
5	2963.7	-2210.9	1542.5
6	4115.6	1418.2	4854.4

Nota: Las fuerzas aplicadas al chasis son de signo contrario a las aparecidas en esta tabla

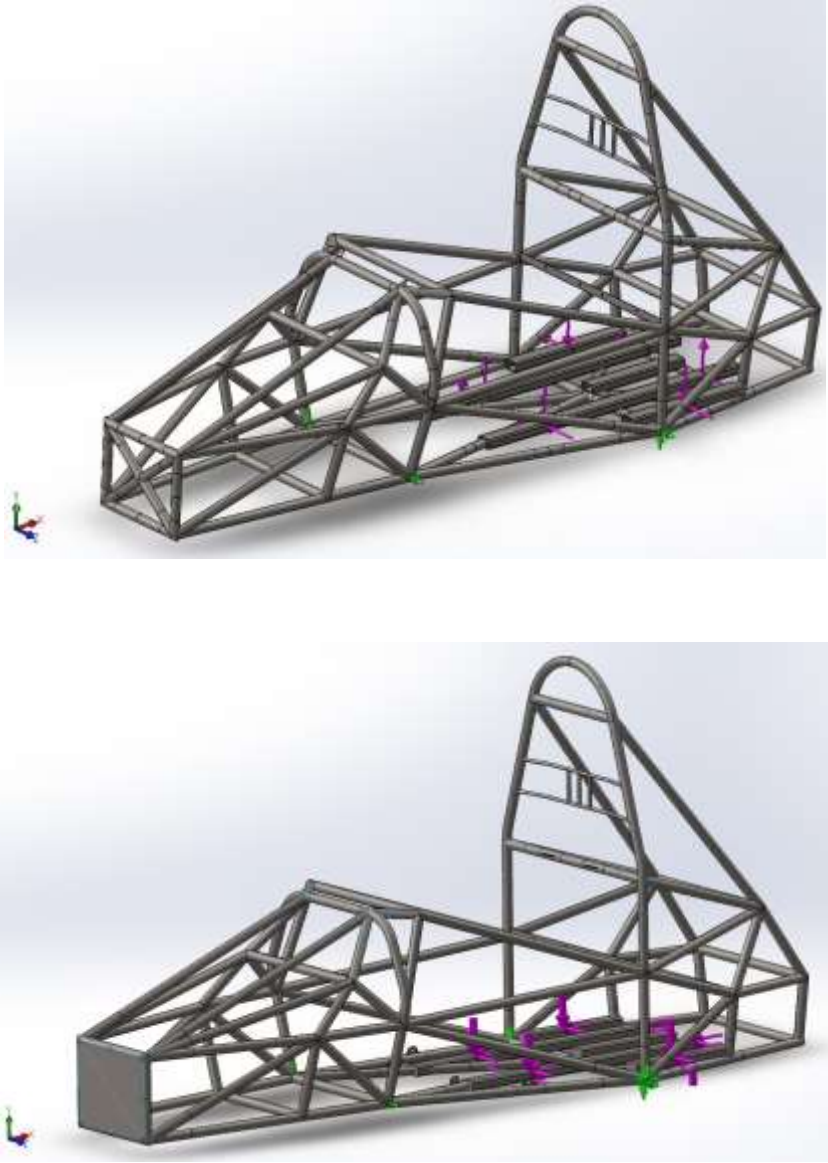


Ilustración 22. Condiciones de contorno para elementos estructurales (superior) y en combinación con sólidos (inferior). Fuente: propia

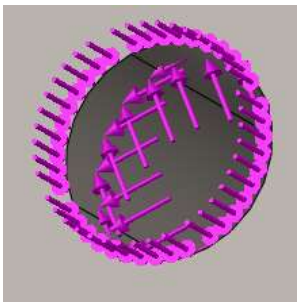


Ilustración 23. Detalle de aplicación de la fuerza. Fuente: propia

- Reposacabezas

  - Carga aplicada
    - Fx = 890 kN
    - Fy = 0 kN
    - Fz = 0 kN

  - Punto de aplicación: No se indica
  - Condiciones de contorno: No se indica
  - Máxima deflexión permitida: No se indica
  - Criterio: No se indica
  - Anotación personal: Dado que únicamente se establece el valor de la carga sin indicar nada más, se establece las siguientes condiciones de forma que se pueda determinar las tensiones y el desplazamiento de los componentes.
    - Punto de aplicación: Nodos de asiento del reposacabezas
    - Condiciones de contorno: Desplazamientos fijos (x, y, z) pero no la rotación en los nodos inferiores de ambos lados del aro principal y aro frontal
    - Máxima deflexión permitida: 25mm
    - Criterio: fallo no debe ocurrir en ningún lado de la estructura

  - Modelo:

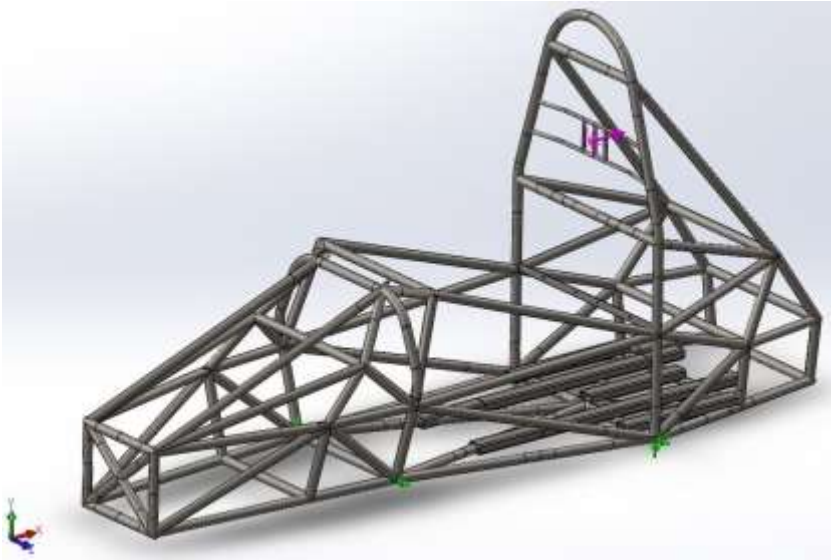


Ilustración 24. Condiciones de contorno para elementos. Fuente: propia

Manteniendo estas consideraciones, es posible realizar las diferentes simulaciones que desembocarán en una solución cuyo objetivo consiste en determinar los diámetros de los diferentes tubos que conforman el chasis.

2.5.5. Condiciones de contorno fuera de normativa

Estas condiciones son complementarias a las anteriores. Aquí se busca estudiar el chasis cuando se le somete a condiciones rutinarias y no puntuales como lo es un impacto. Debido a que no están recogidas en la normativa, se han establecido manteniendo el criterio de este autor. En el anexo 5, se recoge con más detalle el cálculo de los valores dados.

- Levantamiento del chasis

    - Carga aplicada
        - Fx = 0 g
        - Fy = 50g
        - Fz = 0 g

    - Punto de aplicación: Centro de masa
    - Condiciones de contorno: Desplazamientos fijos (x, y, z) pero no la rotación en los nodos inferiores del mamparo frontal y de la parte trasera del vehículo.
    - Máxima deflexión permitida: 25mm
    - Criterio: No superar el límite elástico
    - Modelo:

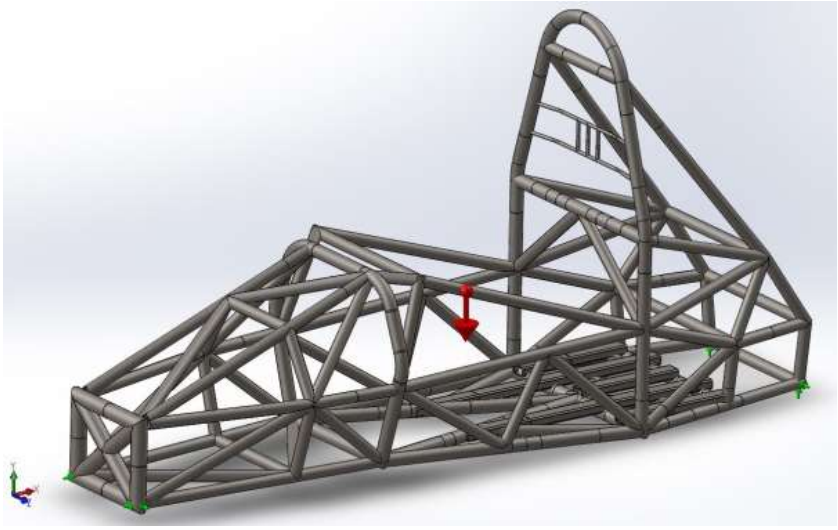


Ilustración 25. Condiciones de contorno para elementos estructurales. Fuente: propia

- Apoyo del chasis levantado

  - Carga aplicada
    - Fx = 0 N
    - Fy = 1000 N
    - Fz = 0 N

  - Punto de aplicación: En cada uno de los nodos de unión de los aros principal y frontal con la parte inferior del chasis
  - Condiciones de contorno: Desplazamientos fijos (x, y, z) pero no la rotación en los nodos inferiores del mamparo frontal y de la parte trasera del vehículo.
  - Máxima deflexión permitida: 25mm
  - Criterio: No superar el límite elástico
  - Modelo:

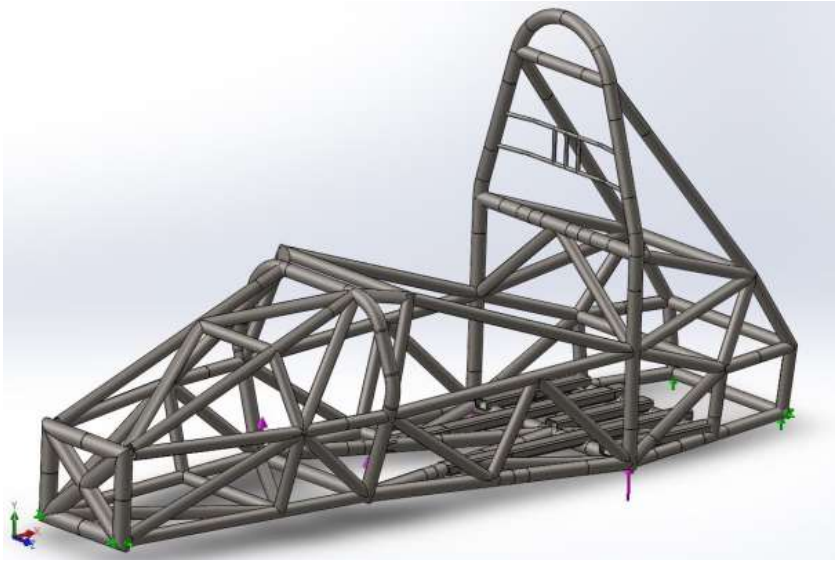


Ilustración 26. Condiciones de contorno para elementos estructurales. Fuente: propia

- Efecto suspensión en el chasis

  - Carga aplicada
    - Fx = 0 N
    - Fy = 1998.04 N
    - Fz = ± 88.45 N (según orientación al interior del chasis)

  - Punto de aplicación: En cada uno de los nodos localizados en el punto medio de los anclajes del triángulo superior de la suspensión.
  - Condiciones de contorno: Desplazamientos fijos (x, y, z) pero no la rotación en los nodos inferiores de los aros principal y frontal.
  - Máxima deflexión permitida: 25mm
  - Criterio: No superar el límite elástico
  - Anotación personal: Se ha supuesto un ángulo de incidencia de la resultante de 67.5º respecto a la horizontal, resultando las fuerzas mostradas.
  - Modelo:

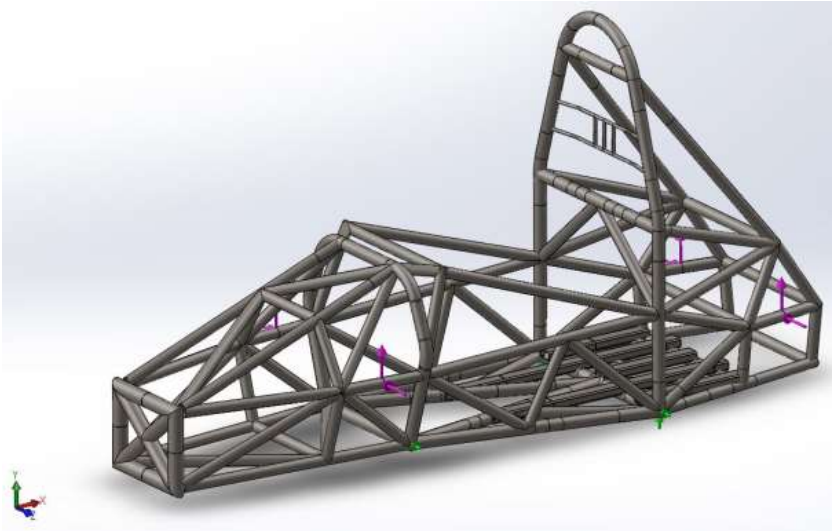


Ilustración 27. Condiciones de contorno para elementos estructurales. Fuente: propia

2.6. Diseño

Siguiendo con el esquema del modelado presentado en el apartado anterior, la malla que se muestra en el siguiente apartado resume bien el método de resolución empleado para el análisis correcto de las uniones.

Ilustración 28. Modelo mallado. Fuente: propia

Como se puede ver en la imagen, existen 3 tipos diferentes de mallas:

- Sólidos: elementos grises mallado de forma triangular
- Vigas: elementos grises mallado de forma longitudinal
- Cáscaras: elementos naranjas mallados de forma triangular

Es necesario destacar que los elementos sólidos se han modelado uno a uno, siendo de sección hueca y teniendo cuidado con las interferencias entre ellos. En las siguientes imágenes, se puede ver un detalle de alguna de éstas.

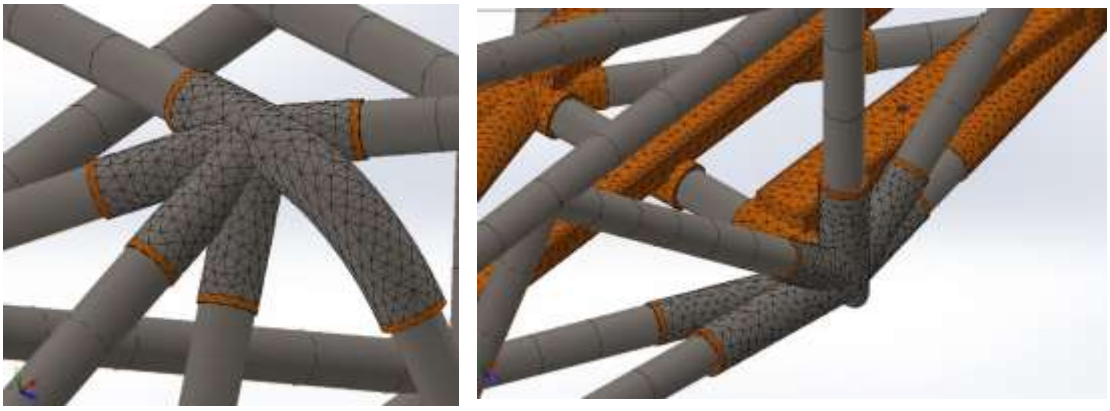


Ilustración 29. Detalles mallas del modelo. Fuente: propia

Siguiendo con el diseño del chasis, se puede resumir como un diseño iterativo en el cual el objetivo es determinar las dimensiones de los elementos que lo componen. Tras simular las condiciones de contorno explicadas en el apartado anterior, se consigue los resultados mostrados en los anexos. A continuación, se presenta una pequeña parte de estos resultados, así como de una tabla que los resume. En el anexo 5, se puede encontrar los resultados de los análisis con más detalle.

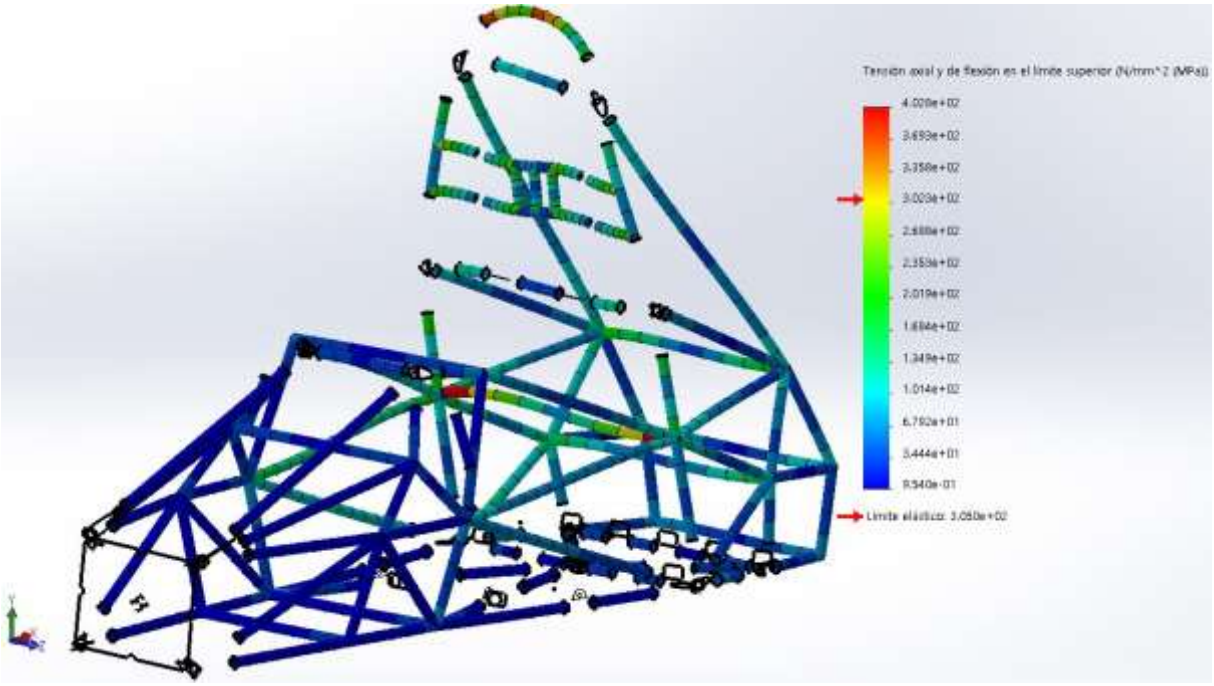


Ilustración 30. Resultado de la simulación del aro principal. Fuente: propia

En imagen superior se muestra una de las soluciones obtenidas en el estudio del aro principal, en donde se puede ver que se supera el límite elástico, por lo que será necesario redimensionar estos perfiles.

En la imagen siguiente, se puede observar que también se supera el límite elástico, pero esta vez, se produce únicamente en las orejetas, por lo que se redimensionarán para no superar el límite elástico. Además, también se muestra el efecto que se produce en las barras, mostrando el cambio de sección y de forma al estar sometido a una carga. Por suerte, este cambio de sección se produce dentro del régimen elástico, por lo que, al volver al reposo, mantendrán la sección y forma inicial.

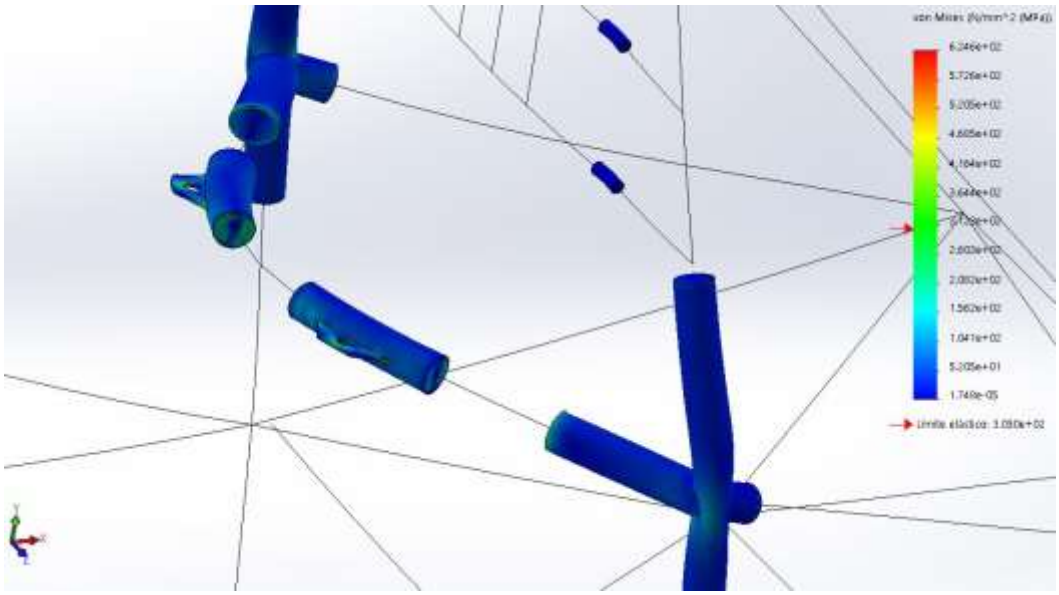


Ilustración 31. Detalle simulación de anclajes de hombros. Fuente: propia

En esta última imagen, se muestra los desplazamientos que se producen en el chasis, al someterlo a las cargas producidas por la caja de baterías. Se puede comprobar, que es muy inferior al máximo permitido, aunque la imagen muestre un efecto mucho mayor.

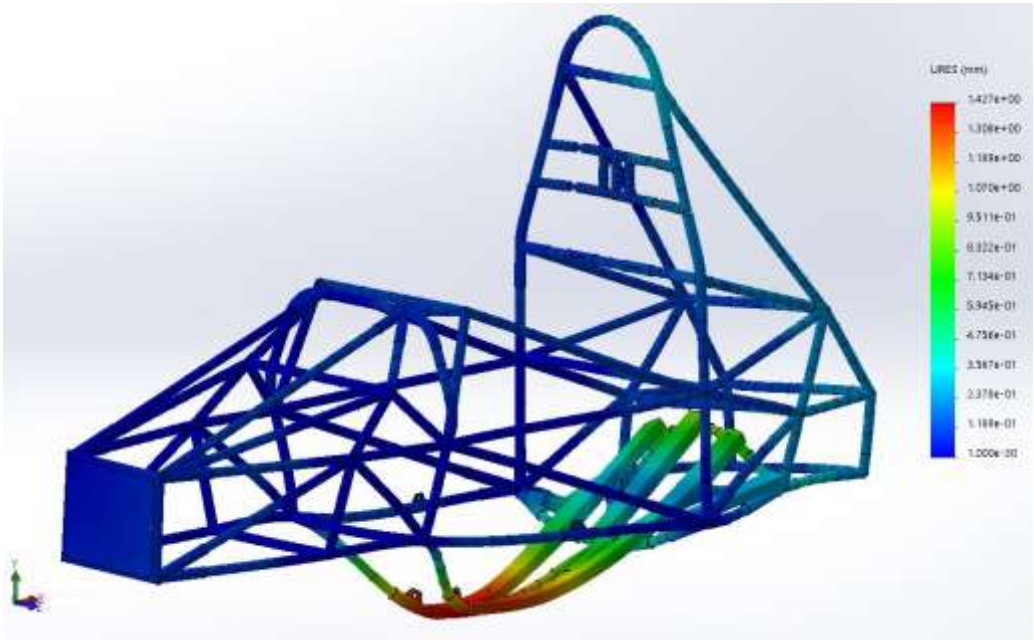


Ilustración 32. Simulación del efecto de la cama del acumulador en el chasis ante un impacto frontal. Fuente: propia

Recopilando todos los datos obtenidos en las simulaciones, se obtiene esta tabla, en la cual se indica la acción que lleva según el superar o no el límite elástico.

Tabla 5. Resumen resultados para el diseño inicial. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos	¿Supera?	Acción
	Elemento	Valor	Unid.			
Aro principal	Sólidos/superficies	+305	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Vigas	402.8	MPa		SI	
	Desplazamiento	10.78	mm	25mm	NO	
Aro frontal	Sólidos/superficies	+305	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Vigas	231	MPa		NO	
	Desplazamiento	4.47	mm	25mm	NO	
Impacto lateral	Sólidos/superficies	118.6	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Vigas	210.5	MPa		NO	
	Desplazamiento	0.78	mm	25mm	NO	
Impacto frontal	Sólidos/superficies	+305	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Vigas	377.6	MPa		SI	
	Desplazamiento	7.18	mm	25mm	NO	
Anclajes cinturón de hombros	Sólidos/superficies	+305	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Vigas	138.3	MPa		NO	
	Desplazamiento	2.09	mm	25mm	NO	
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Sólidos/superficies	+305	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Vigas	283.6	MPa		SI	
	Desplazamiento	4.02	mm	25mm	NO	
Impacto frontolateral	Sólidos/superficies	+305	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Vigas	648.2	MPa		SI	
	Desplazamiento	18.44	mm	25mm	NO	
Anclajes caja de baterías	Sólidos/superficies	+305	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Vigas	175.5	MPa		NO	
	Desplazamiento	1.43	mm	25mm	NO	
Reposacabezas	Sólidos/superficies	89.01	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Vigas	270.5	MPa		NO	
	Desplazamiento	2.28	mm	25mm	NO	

En este caso base, se observa que en varios estudios se supera el límite elástico y, por lo tanto, es necesario redimensionar los elementos estructurales. Para una primera iteración, se realizará las siguientes tareas:

- Aumentar la longitud que está en contacto entre el anclaje de los cinturones y las barras que lo unen.
- Aumentar el diámetro y, si procede, el espesor de las siguientes barras:
    - Aro principal
    - Aro frontal

- Mamparo frontal
- Barras inferiores de la estructura de impacto lateral
- Barras inferiores que une el mamparo frontal y el aro primario.

El criterio de cambio de las dimensiones de las barras para las iteraciones, se basa en seleccionar perfiles cuya inercia sea superior al del perfil seleccionado anteriormente, e intentando que la masa por metro de perfil sea lo menor posible, así como su área. De esta forma, se consigue una estructura más rígida y más ligera. Se ha mantenido un espesor de 2mm para facilitar la soldadura de las uniones, por lo que el aumento de área no es tan elevado como el de la inercia.

Tras varias iteraciones, el resultado final del chasis se muestra a continuación. Se puede observar los diferentes resultados obtenidos durante el proceso iterativo en el anexo.

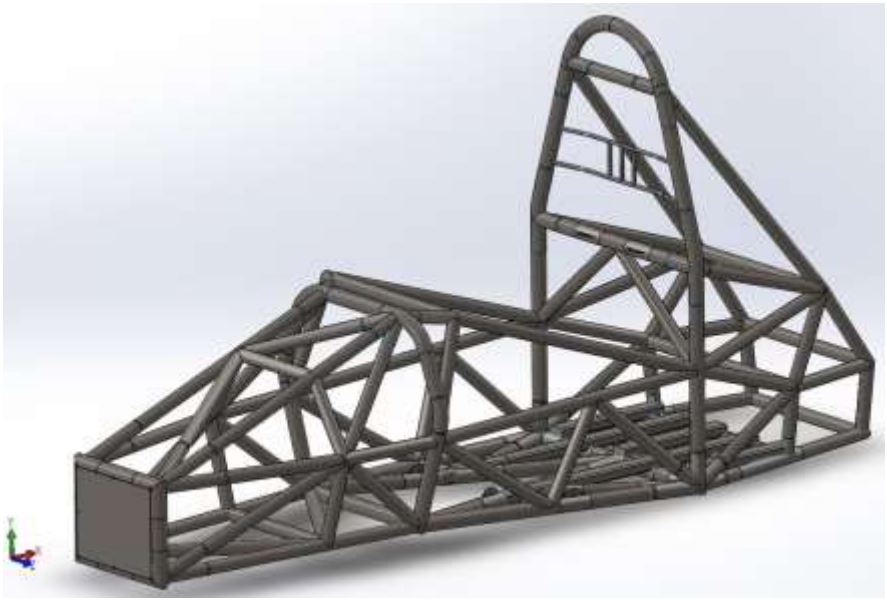


Ilustración 33. Resultado final. Fuente: propia

En la siguiente tabla muestra los resultados de las diferentes iteraciones que se han realizado.

Tabla 6. Resumen de los resultados de las iteraciones usando elementos estructurales. Fuente: propia

Estudio	Resumen resultado iteraciones						
	Elemento	Iteración 0	Iteración 1	Iteración 2	Iteración 3	Iteración 4	Unid.
Aro principal	Vigas	488.9	467	283.1	248.4	248.4	MPa
	Desplaz.	14.59	13.58	6.69	4.24	4.53	mm
Aro frontal	Vigas	294.6	306.8	180.5	1.531	185.9	MPa
	Desplaz.	7.03	6.76	3	2.35	2.39	mm
Impacto lateral	Vigas	216.9	161.3	103.4	62.72	50.1	MPa
	Desplaz.	0.78	0.71	0.514	0.38	0.21	mm
Impacto frontal	Vigas	961.7	384.9	345.8	275.6	274.5	MPa
	Desplaz.	6.64	6.54	3.58	3.13	3.44	mm
Anclajes hombros	Vigas	1067	698.2	406.9	242.8	243.9	MPa
	Desplaz.	13.85	10.74	5.23	3.19	3.37	mm
Anclajes regazo y antisub	Vigas	1566	1077	647.4	276.5	251.2	MPa
	Desplaz.	19.75	13.25	6.34	1.1	1.6	mm
Impacto frontolateral	Vigas	648.2	551.1	349.7	267	265.8	MPa
	Desplaz.	14.44	13.54	6.94	11.82	9.41	mm
Anclajes caja de baterías	Vigas	302.8	292.1	175.2	172.4	173	MPa
	Desplaz.	1.5	1.44	0.75	0.37	0.38	mm
Reposacabezas	Vigas	274.6	272.7	267.7	262.4	262.5	MPa
	Desplaz.	2.47	2.42	1.96	1.82	1.84	mm

Posteriormente, se realizan unas pequeñas modificaciones con el objetivo de mejorar la seguridad del piloto y reducir el peso del vehículo. En la siguiente tabla se resume la comparación entre dos modelos, el que se finaliza tras una cuarta iteración y la combinación de varias modificaciones realizadas en ese mismo modelo.

Tabla 7. Resumen de resultado entre la cuarta iteración y el chasis con la modificación extra usando elementos estructurales. Fuente: propia

Estudio	Comparación resultados			
	Elemento	Iteración 4	Modificación extra	Unid.
Aro principal	Vigas	248.4	248.3	MPa
	Desplaz.	4.53	4.1	mm
Aro frontal	Vigas	185.9	144.6	MPa
	Desplaz.	2.39	2.43	mm
Impacto lateral 1	Vigas	50.1	66.32	MPa
	Desplaz.	0.21	0.43	mm
	Vigas	50.1	137.8	MPa
	Desplaz.	0.21	0.94	mm
Impacto lateral 2	Vigas	50.1	100.3	MPa
	Desplaz.	0.21	0.77	mm
	Vigas	50.1	115.2	MPa
	Desplaz.	0.21	0.92	mm
Impacto lateral 3	Vigas	50.1	177.8	MPa
	Desplaz.	0.21	1.4	mm

	Vigas	50.1	101.5	MPa
	Desplaz.	0.21	0.78	mm
Impacto lateral 4	Vigas	50.1	118.7	MPa
	Desplaz.	0.21	0.83	mm
	Vigas	50.1	118.6	MPa
	Desplaz.	0.21	0.89	mm
Impacto frontal	Vigas	274.5	280.8	MPa
	Desplaz.	3.44	2.9	mm
Anclajes cinturón de hombros	Vigas	243.9	246.7	MPa
	Desplaz.	3.37	3.1	mm
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	251.2	190.9	MPa
	Desplaz.	1.6	1.2	mm
Impacto frontolateral	Vigas	265.8	288.0	MPa
	Desplaz.	9.41	1.44	mm
Anclajes caja de baterías	Vigas	173	181.1	MPa
	Desplaz.	0.38	0.42	mm
Reposacabezas	Vigas	262.5	263.1	MPa
	Desplaz.	1.84	1.81	mm

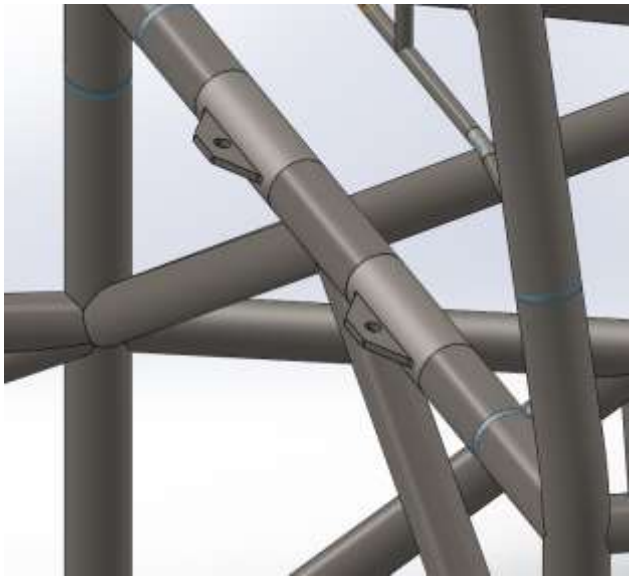
Con esta modificación, se ha conseguido reducir el peso del chasis en 4.5 kg, pasando de 87.97 kg a 83.41 kg.

Por último, se emplea el método explicado en los apartados anteriores, en el que se modelan algunas uniones como sólidos para estudiarlas más detalladamente. En el anexo 5 se muestra mejor estos resultados de manera gráfica, pero se muestra que se tuvo que repetir los estudios del aro frontal, el de los anclajes de los hombros y el de los anclajes de antisubmarino y regazo ya que existían zonas donde existe una concentración de tensiones significativa para el material.

Para solventar esto, se tuvo que añadir una serie de elementos rigidizadores para dificultar el movimiento de los elementos problemáticos, y así evitar una concentración de tensiones que haga que el material plastifique, como se puede ver en la siguiente imagen.

Ilustración 34. Detalle rigidizadores del aro principal. Fuente: propia

Como aspecto diferenciador, se ha tenido en cuenta en las simulaciones los anclajes de los cinturones para ver su efecto en el chasis. Esto son unas chapas con una perforación pasante. Sus dimensiones han variado desde el principio, pero finalmente se ha concluido que con una chapa de 5mm es suficiente.



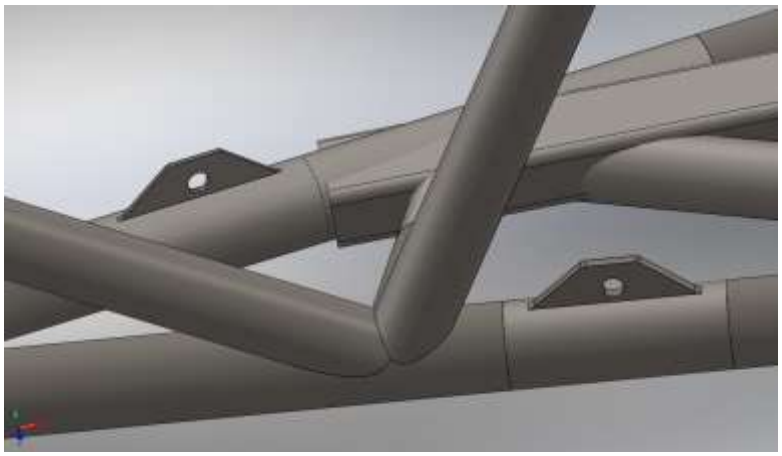


Ilustración 35. Detalle anclajes cinturones hombros (superior) y regazo y antisubmarino (inferior). Fuente: propia

Además, el material necesario debe ser AISI-1020 ya que existen regiones donde se produce una concentración de tensiones que no es suficiente con los rigidizadores. Este material tiene las siguientes propiedades mecánicas.

Tabla 8. Propiedades mecánicas acero AISI-1020

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	7.87	g/cm3
Tensión elástica	350	MPa
Tensión ultima	420	MPa
Módulo elástico	200	GPa
Módulo cizalladura	72	GPa
Relación de poisson	0.29	-
Módulo compresión	148	GPa

Por último, algunos de los resultados obtenidos para esta solución se presentan a continuación. En el anexo 5, aparece reflejado todas las simulaciones para todos los casos estudiados.

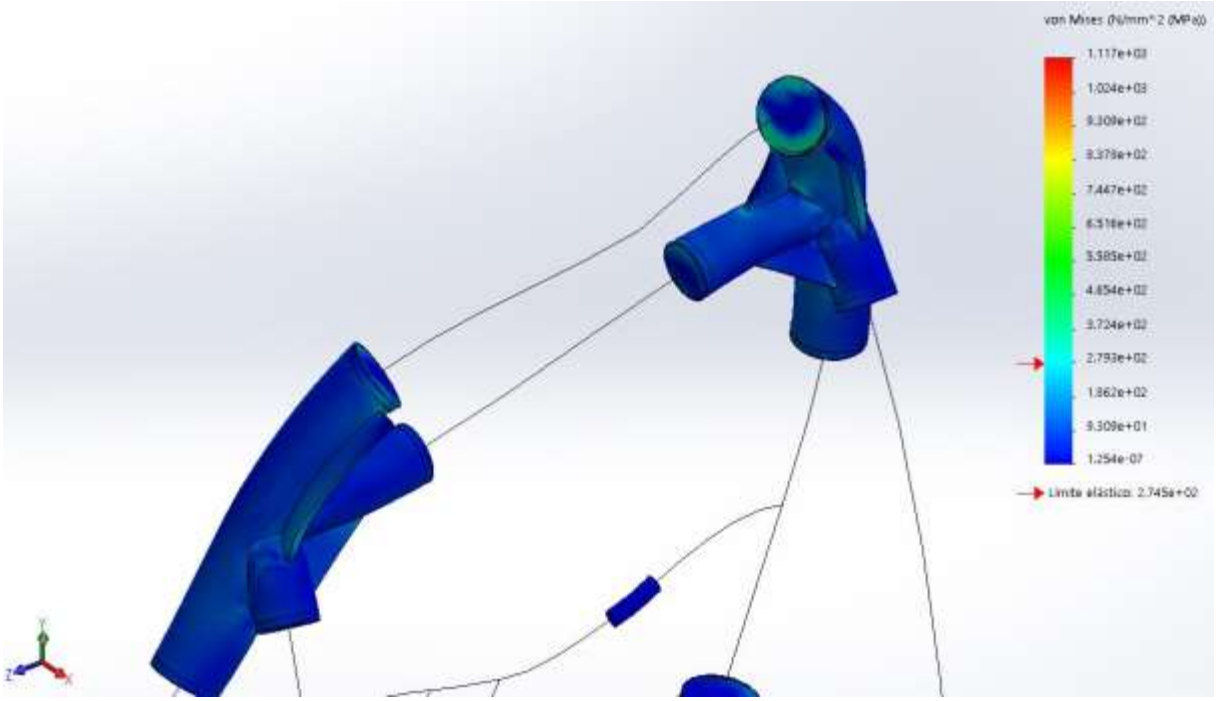


Ilustración 36. Tensiones resultantes en el aro principal tras añadir rigidizadores. Fuente: propia

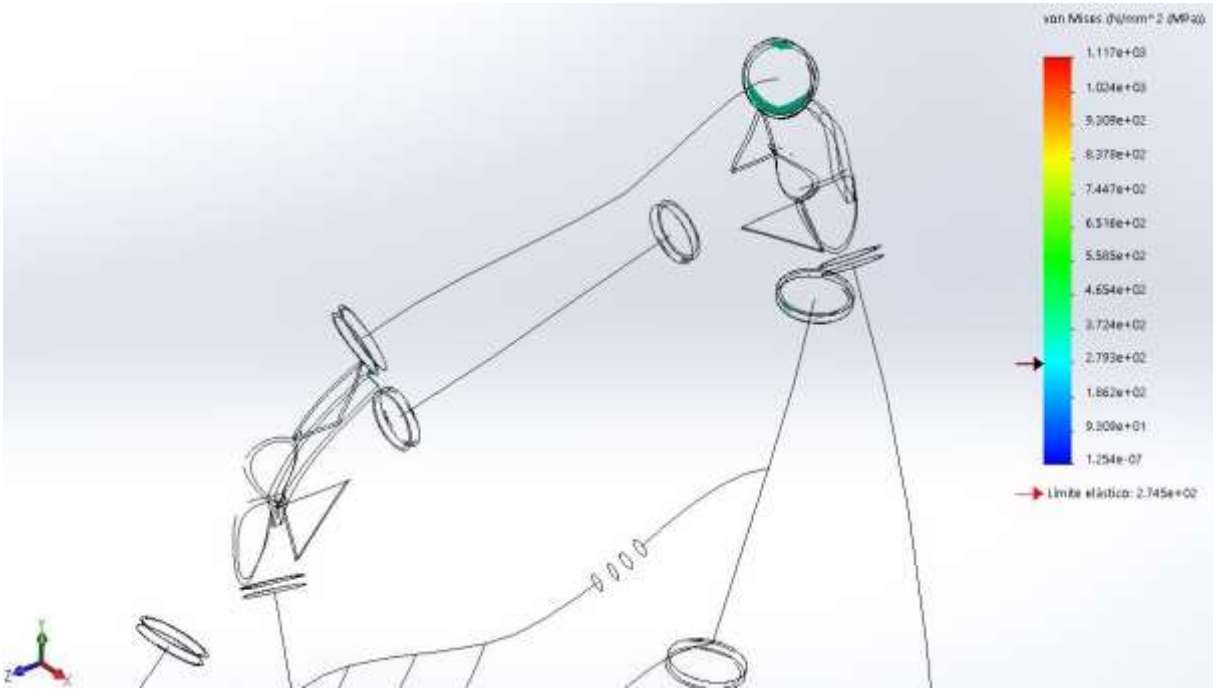


Ilustración 37. Tensiones resultantes que superan el límite elástico tras añadir rigidizadores, empleándose isosuperficies. Fuente: propia

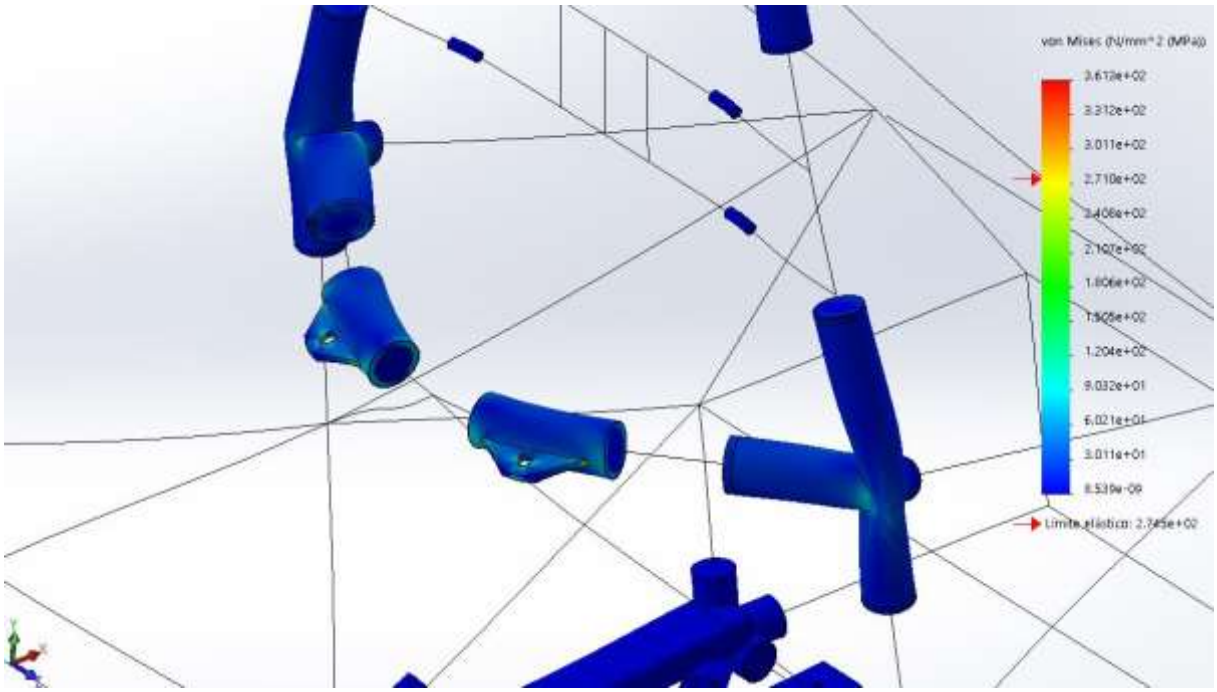


Ilustración 38. Tensiones resultantes en los anclajes de hombros. Fuente: propia

Para completar este apartado de diseño, se decide estudiar el comportamiento del monoplaza ante tres situaciones muy diferentes.

La primera consiste en estudiar la situación del levantamiento del vehículo. La segunda, cuando este se apoya en sobre su chasis en una plataforma, y la tercera, el efecto de la suspensión. Los resultados mostrados a continuación muestran cada uno de estos estudios y señalan que no se compromete la integridad de la estructura. En el anexo 5 se puede visualizar mejor los resultados, así como las condiciones de contorno.

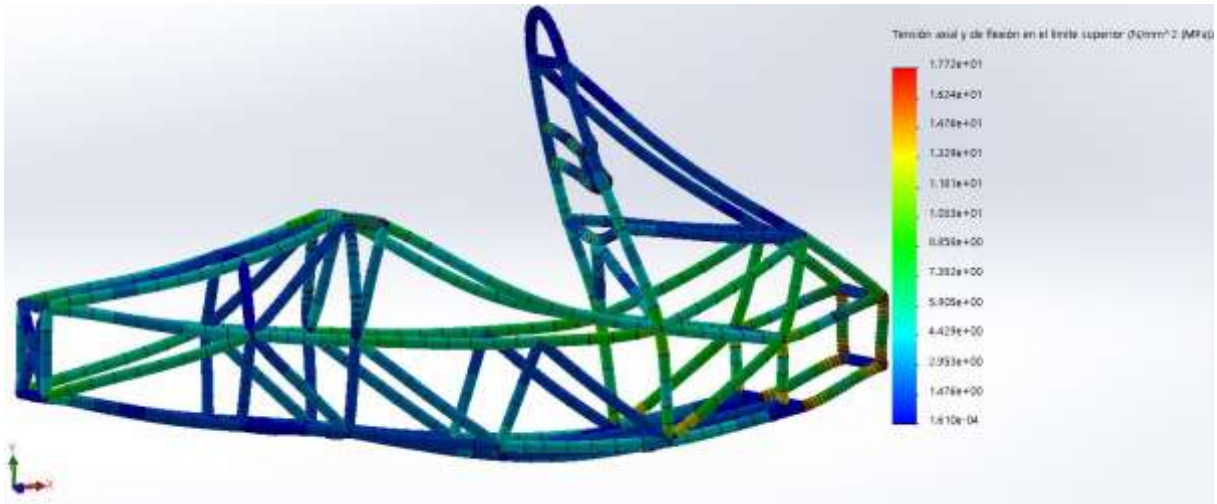


Ilustración 39. Tensiones resultantes en el levantamiento del vehículo. Fuente: propia

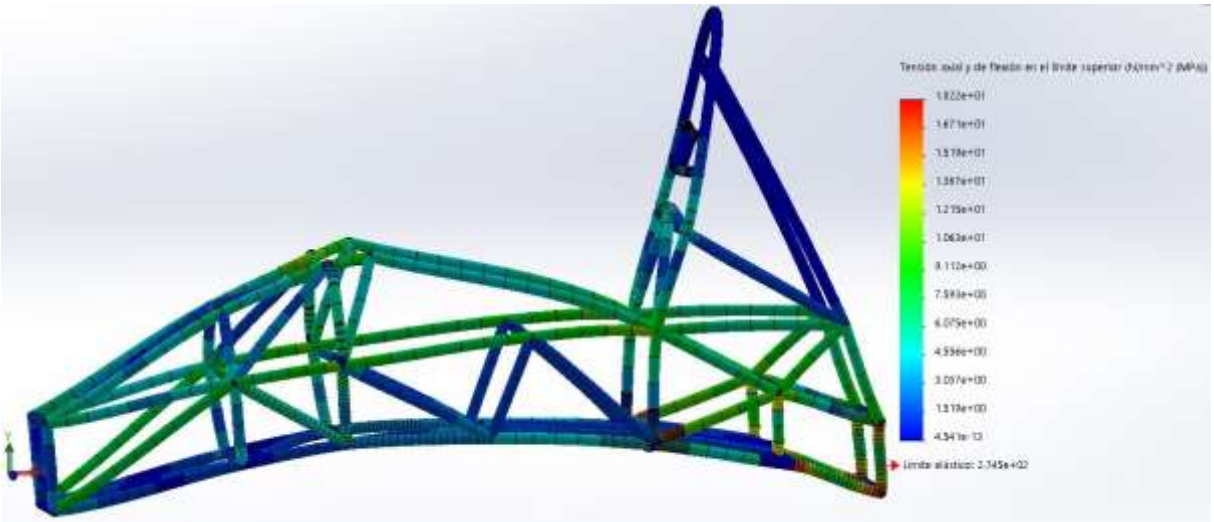


Ilustración 40. Tensiones resultantes en el apoyo del chasis en una superficie. Fuente: propia

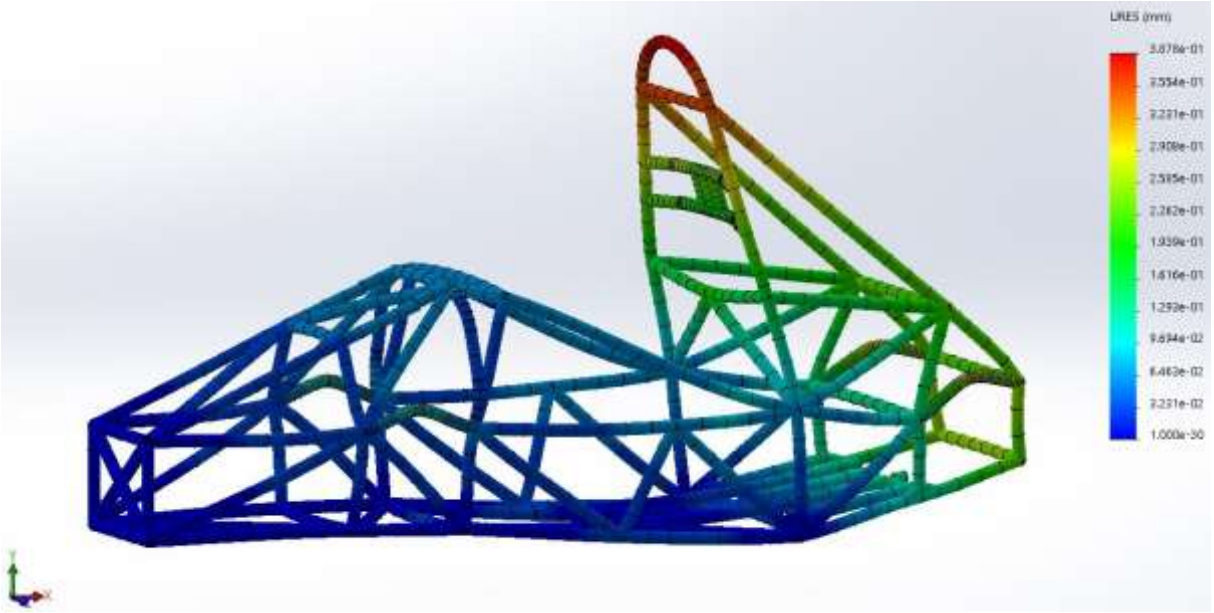


Ilustración 41. Tensiones resultantes debido al efecto de las suspensiones. Fuente: propia

Por otro lado, también se estudió el efecto que tiene el material en el peso. Se buscaba reducir el peso mediante un material con propiedades mecánicas similares al AISI-1020, pero si modificar las secciones de los perfiles. Aunque el PVC no tenga, ni de lejos, la resistencia de un acero, su aparición se debe a que, si se compara con la fibra de carbono, se aprecia que la masa de este último se aproxima mucho al PVC.

Por lo tanto, se puede concluir que es necesario dar el salto hacia la fibra de carbono, ya que su reducción de peso es muy significativo, consiguiéndose además, una resistencia mayor que el acero seleccionado. Esto se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 9. Peso del vehículo modificando el material y sin variar las secciones de los perfiles

	Acero AISI-1020	Acero aleado 4130	Aleación Aluminio 5445-H34	Fibra de carbono Hexcel AS4C (3000 filamentos)	PVC
Peso chasis (kg)	83.41	83.41	28.51	19.81	13.78

Recopilando los aspectos destacables de todos los estudios realizados durante el TFM, el resultado final consta, por lo tanto, de los elementos resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 10. Dimensiones perfiles finales. Fuente: propia

Tipo sección	Dimensiones (mm)	Longitud (mm) / unidades (unid)	Empleo
Circular hueca	48x2	1107.44	Mamparo frontal
	40x3	650	Barra anclajes cinturones de hombros
	40x2	8971.9 (2055.64 Aro frontal + 3316.26 Aro principal + 3600 base habitáculo)	Aro principal, aro frontal y base habitáculo
	35x2	31549.42	Resto de componentes
	10x2	1375.74	Reposacabezas
Rectangular	50x30x2.6	2786.41	Cama caja de baterías
Chapa	Espesor = 5mm	6 unid (anclajes cinturones) + 2 unid (rigidizadores)	Rigidizadores aro principal y anclajes cinturones regazo, antisubmarino y hombros
Chapa	Espesor = 2mm	2 unid	Rigidizadores aro principal
Chapa	Espesor = 1.5mm	1 unid	Mamparo frontal

Además, el material empleado debe ser AISI 1020. También puede ser otro material, siempre y cuando tenga unas propiedades mecánicas iguales o superiores. En el caso de emplear otro, se debe tener cuidado con la soldabilidad del material. En este caso, como se utiliza un AISI-1020, sus propiedades son:

- Masa: 83.41 kg
- Longitud: 2410mm

- Altura máxima: 1240mm
- Anchura máxima: 690mm

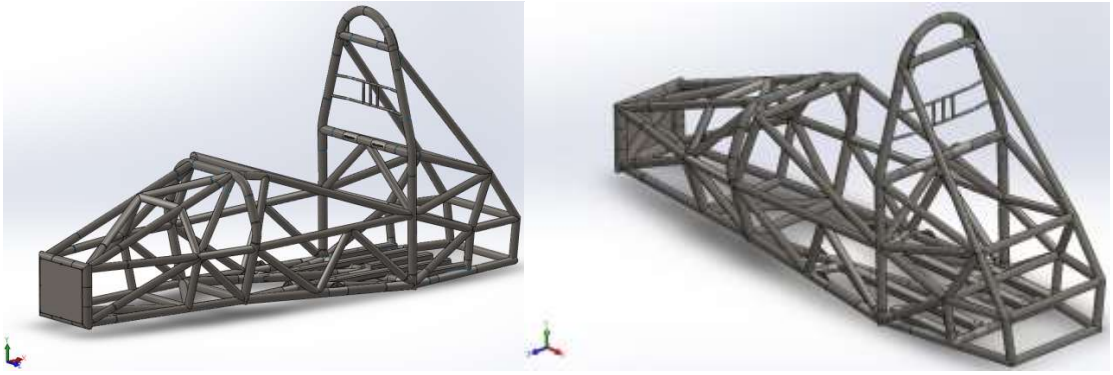


Ilustración 42. Vistas del chasis final. Fuente: propia

Por último, se realizó una comprobación de cada requerimiento del chasis, considerando todos los componentes del vehículo, y se detectó que el habitáculo no presentaba el espacio suficiente para que la plantilla pasase, ya que existía un conflicto con la caja de baterías, como se aprecia en la imagen:

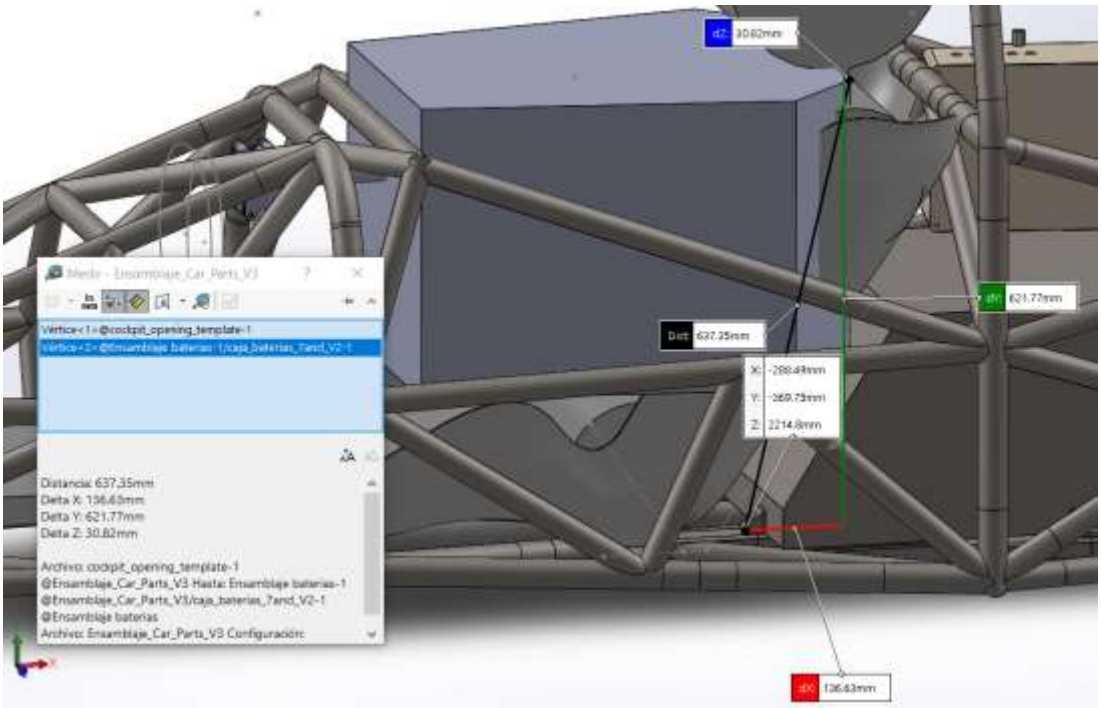


Ilustración 43. Conflicto entre acumulador y plantilla. Fuente: propia

Midiendo la distancia necesaria, se observa que es necesario abrir el habitáculo unos 13cm. Esta abertura, se realiza de forma longitudinal, sin afectar a las dimensiones totales del chasis, pero si a la distancia entre ejes y a la posición de la gravedad.

Tras este cambio, es necesario verificar que no existen cambios significativos con los cálculos del mismo modelo, pero con el habitáculo menor. Esto es, tomar el chasis del punto 3.5.2.7.4 para compararlo con este nuevo. En la siguiente tabla se recogen los resultados obtenidos de las simulaciones de este chasis modificado:

Tabla 11. Comparación chasis. Fuente: propia

Estudio	Comparación resultados			
	Elemento	Chasis 3.5.2.7.4	Corrección	Unid.
Aro principal	Vigas	248.3	243.8	MPa
	Desplaz.	4.1	4.1	mm
Aro frontal	Vigas	144.6	147.5	MPa
	Desplaz.	2.43	2.33	mm
Impacto lateral 1	Vigas	137.8	159.4	MPa
	Desplaz.	0.94	1.3	mm
Impacto lateral 2	Vigas	115.2	133.1	MPa
	Desplaz.	0.92	0.98	mm
Impacto lateral 3	Vigas	101.5	104.4	MPa
	Desplaz.	0.78	0.86	mm
Impacto lateral 4	Vigas	118.6	120.3	MPa
	Desplaz.	0.89	0.9	mm
Impacto frontal	Vigas	280.8	301	MPa
	Desplaz.	2.9	3.46	mm
Anclajes cinturón de hombros	Vigas	246.7	246.7	MPa
	Desplaz.	3.1	3.1	mm
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	190.9	200.1	MPa
	Desplaz.	1.2	1.77	mm
Impacto frontolateral	Vigas	288.0	274.8	MPa
	Desplaz.	1.44	4.6	mm
Anclajes caja de baterías	Vigas	181.1	180.7	MPa
	Desplaz.	0.42	0.42	mm
Reposacabezas	Vigas	263.1	263.1	MPa
	Desplaz.	1.81	1.81	mm

Como se puede ver en la tabla anterior, el efecto de hacer el cockpit mayor sin alterar las dimensiones totales del chasis apenas se aprecia, por lo que no hace falta realizar un estudio de las uniones más detallado.

Por tanto, este chasis tiene las siguientes características muy similares al chasis 3.5.2.7.4, pero en cuanto a su centro de gravedad y su distancia de ejes, varia significativamente.

La nueva distancia entre ejes se queda en 1665 mm, antes 1530mm. En cuanto al centro de gravedad, éste queda como muestra la imagen.

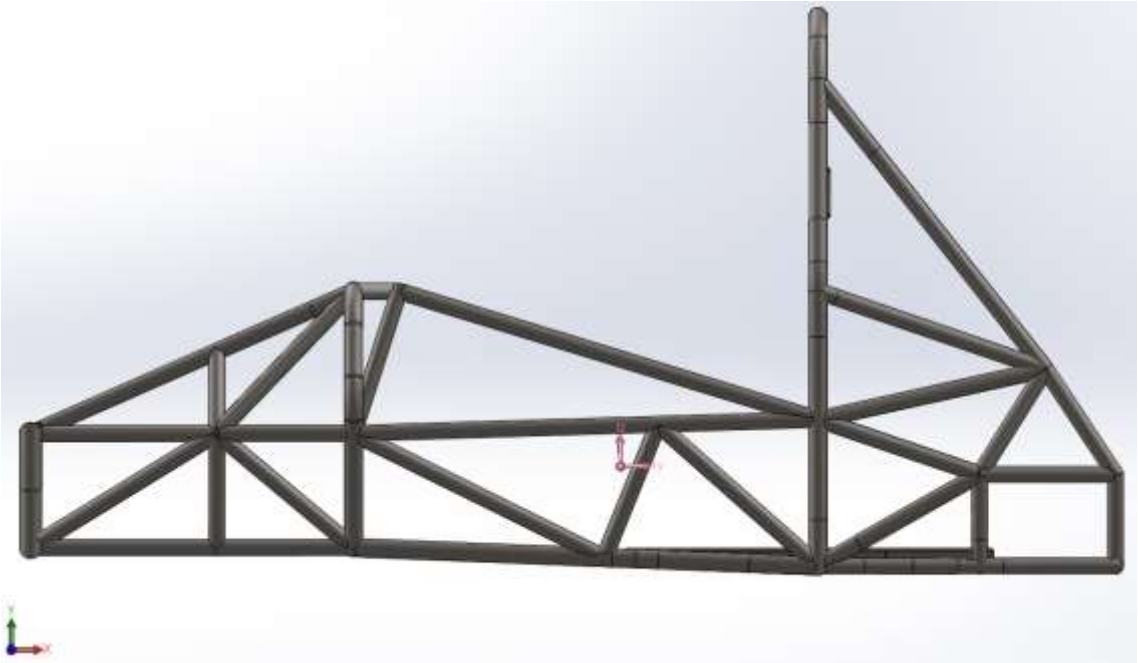


Ilustración 44. Posición del centro de gravedad. Fuente: propia

Comparando ambos chasis, la variación ha sido como se muestra:

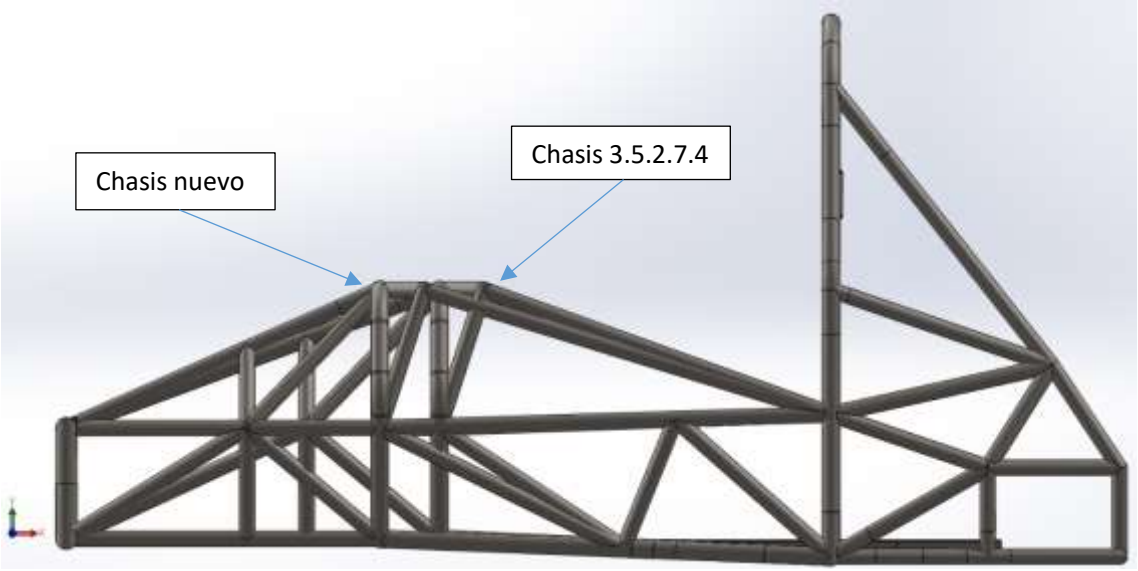


Ilustración 45. Comparación chasis. Fuente: propia

Por último, es interesante observar cómo queda el centro de gravedad de todo el conjunto. Éste se ubica muy cercano al del piloto y, sorprendentemente, a la misma distancia entre ambos ejes. Estas distancias son:

Tabla 12. Distancias del centro de gravedad a los ejes. Fuente: propia

	Distancia (mm)
Eje delantero – CG	827
CG – Eje trasero	837
Diferencia	10

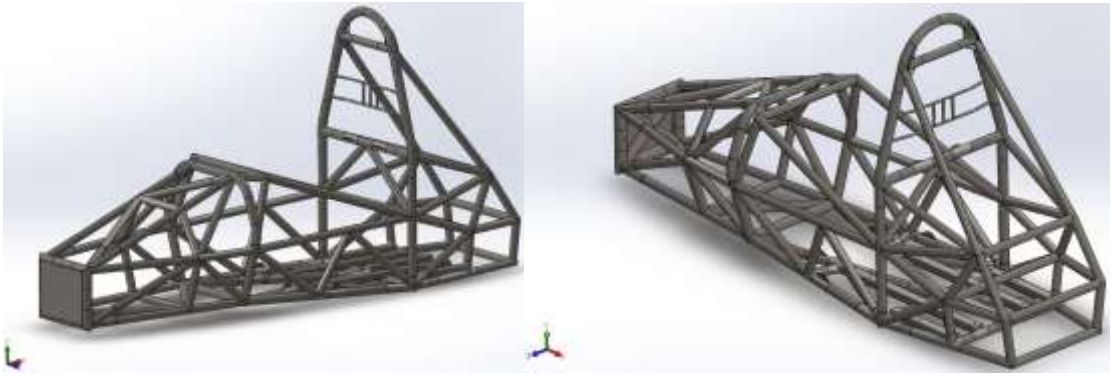
2.7. Conclusiones

Tras los diferentes estudios realizados se concluye este TFM que el chasis es acero AISI-1020 con los siguientes elementos:

Tabla 13. Elementos finales. Fuente: propia

Tipo sección	Dimensiones (mm)	Longitud (mm) / unidades (unid)	Empleo
Circular hueca	48x2	1107.44	Mamparo frontal
	40x3	650	Barra anclajes cinturones de hombros
	40x2	9009.42 (2055.64 Aro frontal + 3316.26 Aro principal + 3637.52 Base habitáculo)	Aro principal, aro frontal y base habitáculo
	35x2	31549.42	Resto de componentes
	10x2	1375.74	Reposacabezas
Rectangular	50x30x2.6	2786.41	Cama caja de baterías
Chapa	Espesor = 5mm	6 unid (anclajes cinturones) + 2 unid (rigidizadores)	Rigidizadores aro principal y anclajes cinturones regazo, antisubmarino y hombros
Chapa	Espesor = 2mm	2 unid	Rigidizadores aro principal
Chapa	Espesor = 1.5mm	1 unid	Mamparo frontal

Su modelo se muestra a continuación:



Algunos parámetros de interés de este chasis son:

- Masa: 83.41 kg
- Longitud: 2410mm
- Altura máxima: 1240mm
- Anchura máxima: 690mm
- Diferencia de distancias entre CG y ejes: 10mm

Además, también se concluye que, si se desea ser más competitivo desde el punto de vista del chasis, es necesario emplear otro material como la fibra de carbono, ya que su peso disminuye drásticamente, tal y como se mostró en la tabla 13.

2.8. Bibliografía

- Luque, P., Álvarez, D., Vera, C., 2013. Ingeniería del automóvil, Sistemas y comportamiento dinámico. Paraninfo.

- Normativa de la competición de la Fórmula SAE que puede ser encontrado en la siguiente URL: https://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx

- Normativa de la competición de la Fórmula Student Germany que puede ser encontrado en la siguiente URL: https://www.formulastudent.de/fsg/rules/

- Base de datos de materiales que puede ser encontrado en la siguiente URL: http://www.matweb.com/

- Gómez Díaz, J., 2018, TFG Estudio y propuestas de mejora de la suspensión de un vehículo Formula Student, Repositorio Institucional ULL

- Catálogo General de Tubasol que puede ser encontrado en la siguiente URL: http://www.grupohastinik.com/en/productos-tubasol/

2.9. Resumen

En este *Trabajo de Fin de Máster* se diseña un chasis siguiendo los requerimientos de la competición Formula Student. Además, se emplea un método novedoso en este tipo de estructuras mediante la combinación de tres tipos de elementos, para conseguir una mejor representación de las uniones sin repercutir significativamente en los recursos computacionales empleados.

Por otro lado, se compara cada una de las soluciones obtenidas y se establecen líneas de actuación para mejorar el diseño.

2.10. Abstract

This Final Master Project designs a chassis following requirements of the Formula Student competition. In addition, a new method is used in this type of structures by the combination of three different elements, to achieve a better representation of junctions without influencing significantly on computational resources used.

On the other hand, each of the solutions obtained is compared and lines of action are established to improve the design.

3. Anexos

Tabla de contenidos

3. Anexos 58
3.1. Anexo I - Formula Student 62
3.2. Anexo II - Normativa 73
3.3. Anexo III – Cálculo de la relación de Ackermann 76
3.4. Anexo IV – Estado del arte de los monoplazas 80
3.4.1. Estado del arte de los vehículos del año 2017. 81
3.4.2. Estado del arte de vehículos cuyo chasis es similar al seleccionado 91
3.5. Anexo V - Cuadro de verificaciones 93
3.5.1. T1 DEFINICIONES 93
3.5.2. T2 REQUISITOS GENERALES DE DISEÑO 93
3.5.3. T3 DISEÑO GENERAL DE CHASIS 95
3.5.4. T4 COCKPIT 107
3.5.5. T5 SISTEMA DE RESTRICCION DE CONTROLADOR 112
3.5.6. T10 CINTURONES 116
3.6. Anexo VI – Cálculo de secciones de tubos mínimas 119
3.7. Anexo VII – Diseño 125
3.7.1. Estudio de la caja de baterías 125
3.7.2. Estudio del chasis 130
3.7.2.1. Caso base 131
3.7.2.1.1. Aro principal 131
3.7.2.1.2. Aro frontal 133
3.7.2.1.3. Impacto lateral 134
3.7.2.1.4. Impacto frontal 136
3.7.2.1.5. Anclajes cinturón de hombros 137
3.7.2.1.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino 139
3.7.2.1.7. Impacto frontolateral 140
3.7.2.1.8. Anclajes caja de baterías 142
3.7.2.1.9. Reposacabezas 143
3.7.2.1.10. Conclusiones y resumen de resultados 144
3.7.2.2. Primera Iteración 146
3.7.2.2.1. Aro principal 146
3.7.2.2.2. Aro frontal 148
3.7.2.2.3. Impacto lateral 149
3.7.2.2.4. Impacto frontal 151

3.7.2.2.5. Anclajes cinturón de hombros....152
3.7.2.2.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino....153
3.7.2.2.7. Impacto frontolateral....155
3.7.2.2.8. Anclajes caja de baterías....156
3.7.2.2.9. Reposacabezas....158
3.7.2.2.10. Conclusiones y resumen de resultados....159
3.7.2.3. Segunda Iteración....161
3.7.2.3.1. Aro principal....161
3.7.2.3.2. Aro frontal....163
3.7.2.3.3. Impacto lateral....164
3.7.2.3.4. Impacto frontal....166
3.7.2.3.5. Anclajes cinturón de hombros....167
3.7.2.3.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino....169
3.7.2.3.7. Impacto frontolateral....170
3.7.2.3.8. Anclajes caja de baterías....172
3.7.2.3.9. Reposacabezas....173
3.7.2.3.10. Conclusiones y resumen de resultados....174
3.7.2.4. Tercera Iteración....176
3.7.2.4.1. Aro principal....176
3.7.2.4.2. Aro frontal....178
3.7.2.4.3. Impacto lateral....179
3.7.2.4.4. Impacto frontal....180
3.7.2.4.5. Anclajes cinturón de hombros....181
3.7.2.4.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino....182
3.7.2.4.7. Impacto frontolateral....183
3.7.2.4.8. Anclajes caja de baterías....184
3.7.2.4.9. Reposacabezas....185
3.7.2.4.10. Conclusiones y resumen de resultados....186
3.7.2.5. Cuarta Iteración....187
3.7.2.5.1. Aro principal....187
3.7.2.5.2. Aro frontal....188
3.7.2.5.3. Impacto lateral....189
3.7.2.5.4. Impacto frontal....190
3.7.2.5.5. Anclajes cinturón de hombros....191
3.7.2.5.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino....192
3.7.2.5.7. Impacto frontolateral....193

3.7.2.5.8. Anclajes caja de baterías 194
3.7.2.5.9. Reposacabezas 195
3.7.2.5.10. Conclusiones y resumen de resultados 196
3.7.2.6. Comparación resultados 198
3.7.2.7. Mejoras realizadas en el modelo de la cuarta iteración 200
3.7.2.7.1. Modificación frontal 200
3.7.2.7.2. Modificación lateral 210
3.7.2.7.3. Combinación de ambas modificaciones 225
3.7.2.7.4. Modificación extra 239
3.7.2.8. Cuarta Iteración (con sólidos) 260
3.7.2.8.1. Aro principal 260
3.7.2.8.2. Aro frontal 263
3.7.2.8.3. Impacto lateral 266
3.7.2.8.4. Impacto frontal 277
3.7.2.8.5. Anclajes cinturón de hombros 280
3.7.2.8.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino 284
3.7.2.8.7. Impacto frontolateral 287
3.7.2.8.8. Anclajes caja de baterías 291
3.7.2.8.9. Reposacabezas 294
3.7.2.8.10. Conclusión de la iteración 297
3.7.2.9. Quinta iteración (con sólidos) 298
3.7.2.9.1. Aro principal 298
3.7.2.9.2. Impacto frontal 299
3.7.2.9.3. Anclajes cinturón de hombros 300
3.7.2.9.4. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino 301
3.7.2.9.5. Impacto frontolateral 302
3.7.2.9.6. Anclajes caja de baterías 302
3.7.2.10. Conclusión final 303
3.7.2.11. Otras simulaciones útiles 305
3.7.2.11.1. Levantamiento del vehículo 305
3.7.2.11.2. Vehículo levantado con apoyo al suelo 307
3.7.2.11.3. Efecto de las suspensiones 309
3.7.2.12. Comparación con otros materiales 312
3.7.2.13. Corrección de fallo 314

3.1. Anexo I - Formula Student

La Formula Student, FS, se trata de una competición de monoplazas entre diferentes universidades del mundo en la cual son sus propios estudiantes los que diseña, fabrican y desarrollan el vehículo. Es puesta en funcionamiento por la *Institution of Mechanical Engineers* y se trata de una competición similar a la Formula SAE de Estados Unidos, surgida en allí en 1998 y actualmente se encuentra a lo largo de los diferentes países alrededor del mundo. La importancia que tiene es que promueve la excelencia en el ámbito de la ingeniería, fomentando el trabajo autónomo y en equipo, obligando a adquirir responsabilidades diferentes a las del ámbito académico.

La organización y el funcionamiento de un equipo de FS se asemejan a una empresa, en la cual se distribuyen en diferentes departamentos. Además, existe un director de equipo, siendo su máximo representante. Debajo de él, quedan los demás integrantes, ordenándose en un departamento.

En esta competición no existe una competitividad directa entre los monoplazas ya que lo que se busca es que el vehículo ganador sea el más completo en una serie de ambientes que sería imposible realizarlos si todos monoplazas corriesen a la vez. Por tanto, estas pruebas son de carácter individual y cronometradas. Esto último es lo que permite averiguar el equipo ganador.

Las competiciones se realizan en cada país del mundo en el que existe dicha una asociación organizadora. Estas competiciones están abierta a otros equipos procedentes del extranjero. La única condición para participar es realizar la inscripción y estar al corriente de los pagos con el comité organizador, independientemente de si se cumple o no con la normativa vigente. Obviamente, si no se cumple con la normativa reguladora que el comité presenta como acotación a los monoplazas, el equipo queda descalificado. Por lo que acudir a una cita de estas incumpliendo la normativa, es totalmente absurdo, ya que es un desperdicio de recursos.

Además, debido a las innovaciones tecnológicas existentes en los últimos años, es posible competir mediante un monoplaza eléctrico, EV, (pero no híbrido) y en modalidad sin conductor, o autónomo, DV, aparte de un monoplaza de combustión, CV. De esta forma, se abre completamente hacia una realidad que actualmente se aprecia en la calle, en donde conviven vehículos de combustibles fósiles con vehículos eléctricos y con vehículos autónomos, aunque sean muy escasos todavía.

Como se mencionó anteriormente, la competición consiste en una serie de pruebas que los equipos han de realizar de forma individual. Éstas se clasifican en dos tipos: Estáticas y dinámicas.

- Estáticas: Se tratan de pruebas de verificación y de explicación, es decir, consiste en verificar aquellos aspectos claves de la normativa vigente que comprometen la seguridad y la integridad tanto del piloto como del monoplaza, y de presentar el

diseño, el negocio, costes, etc. ya que como se dijo anteriormente, el funcionamiento de un equipo de FS es simular a una empresa. Estas son las primeras pruebas que se realizan y son de carácter obligatorias, siendo la más importante, la inspección técnica. Esto es, si no se supera, el coche queda descalificado y no puede competir en las siguientes pruebas.
Estas pruebas, se explican brevemente a continuación:

- Inspección técnica: No se trata exactamente de una prueba ni tampoco es completamente estático, pero se suele establecer en este bloque debido a que el vehículo no está realizando pruebas cronometradas, aunque exista una prueba que requiera movimiento del vehículo.

  Aquí, se revisa que el vehículo cumpla con los límites marcados por la normativa de la competición. Para ello, los oficiales tienen una hoja de inspección en la cual marcan si cumple o no con la normativa. Aun con esto, poseen libertad para verificar otros aspectos de la normativa no recogidos en la hoja de verificación.

  En el caso de no superar la inspección técnica, se permite realizar modificaciones al vehículo, para que así la supere. Pero una vez se supere, no se puede modificar ningún componente salvo aquellos aspectos que considere la norma. Por otro lado, en el caso de accidente, la inspección técnica queda invalidada por lo que una vez reparado, se deberá someter a una nueva inspección.

  Dicho esto, la inspección técnica se divide en diferentes partes para permitir una inspección completa del vehículo. A continuación, se recoge una breve explicación de cada una de ellas.

  - Preinspección: se comprueba los elementos de seguridad del piloto (casco, equipamiento, etc.), extintores, neumáticos, etc. Se trata de aspectos muy básicos y de seguridad.

  - Inspección del acumulador: consiste en la inspección de todo el sistema de acumulación de energía eléctrica, incluyendo el cargador o las herramientas empleadas para trabajar con el acumulador. Únicamente se aplica a los vehículos eléctricos.

  - Inspección eléctrica: se mide la resistencia de aislamiento entre el sistema de tracción y la tierra del sistema de baja tensión. Además, también se comprobará el funcionamiento del dispositivo de monitoreo de aislamiento, conectando una resistencia en el punto de medición del sistema de tracción. A esto hay que añadirle que

también se comprobarán los elementos y herramientas que se utilizan y están en contacto con la parte eléctrica. Únicamente se aplica a los vehículos eléctricos.

- Inspección mecánica: en esta fase se revisa los componentes mecánicos del monoplaza y, para ello, es necesario entregar la documentación que se precise.

- Inspección sin conductor: se verifica que los sensores empleados están acordes con la normativa, así como los elementos y herramientas que se emplearían.

- Prueba de inclinación: se le somete al vehículo una inclinación de 60º por medio de una mesa inclinable. Esta mesa se inclina hasta los 60º y permite determinar si existen perdidas de fluidos o fallos en las suspensiones, ya que se obliga a que, para superar la prueba, no existan perdidas de fluidos ni la separación de alguna de las ruedas de la mesa.

- Pesaje del vehículo: esta parte de la inspección no se trata de una prueba como tal, sino de un aspecto imprescindible para determinar si han existido modificaciones durante el evento. Para ello, se determina el peso del vehículo montándolo en una báscula.

- Prueba de ruidos: consiste en verificar que no se supera el límite de ruido marcado por normativa. Únicamente se emplea para monoplazas de combustión.

- Prueba de lluvia: se comprueba que no hay penetración del agua en los componentes eléctricos. Para ello, se rocía el vehículo con agua en forma de spray mientras el sistema de tracción está activo. Es imprescindible haber superado la inspección eléctrica antes de realizar ésta.

- Prueba de frenado: consiste en bloquear las cuatro ruedas del monoplaza sin calar el motor. En el caso de vehículos eléctricos, este bloqueo debe ser puramente mecánico, por lo que se debe desconcertar la electrónica que detecta el pedal de freno. Además, se debe verificar que la luz de freno se ilumina adecuadamente.

- Prueba de sistema de frenado de emergencia: se comprueba el funcionamiento del sistema de frenado de los vehículos autónomos. Para ello, se le hace frenar de manera fortuita tras haberlo

acelerado. Es similar a la prueba de frenado anterior, pero no es necesario bloquear las cuatro ruedas.

- Inspecciones de post-evento: Tras cada evento (o prueba) se puede realizar una inspección de manera aleatoria, para terminar de verificar que los monoplazas que han participado, cumplen con la normativa y que no han sufrido ninguna alteración no contemplada.

A medida que se van pasando las pruebas, se recibe una pegatina, las cuales deben estar dispuestas en el morro del monoplaza.

Ilustración 46. Pegatinas vehículo de combustión. Fuente: www.SCAA.com

Ilustración 47. Pegatinas vehículo eléctrico. Fuente: MIT motorsports - Formula SAE Team

- Diseño de ingeniería:

Esta prueba persigue evaluar el proceso de ingeniería del estudiante y el esfuerzo que se realizó en el diseño de un vehículo, cumpliendo con el propósito de la competición. Aquí, no se busca evaluar aquellos componentes y sistemas patentados que se incorporan en el diseño del vehículo como elementos terminados, sino que sólo se evalúan en función de la selección del equipo y la aplicación de esa unidad.

Para esta parte, es necesario presentar dos documentos (tres en el caso de ser DV). Estos se explican a continuación:

- Informe de diseño de ingeniería: documento que debe contener una breve descripción del vehículo en general indicándose los objetivos de diseño del equipo.

- Hoja de especificaciones de diseño: se indica las especificaciones de diseño que se han empleado para el diseño y que se tienen que cumplir en la fabricación del vehículo.

- Informe de diseño autónomo: debe contener una descripción del sistema autónomo junto con los objetivos de diseño del equipo.

Los jueces evaluarán el esfuerzo de ingeniería en función de los documentos entregados por el equipo, las respuestas a las preguntas y una inspección del vehículo. Además, inspeccionan el vehículo para determinar si los conceptos de diseño son adecuados y apropiados para la aplicación (en relación con los objetivos establecidos en las reglas). En caso de no poderse explicar de forma adecuada la ingeniería y la construcción del vehículo, se puede descontar puntos.

En la siguiente tabla se muestra las puntuaciones máximas que se pueden alcanzar, así como las diferentes categorías que se evalúan, para la normativa a la que hace referencia.

Tabla 14. Categorías y puntuaciones para diseño de ingeniería para la normativa de FS Germany

	Categoría	Puntos	Total
CV/EV/DV	Concepto general de vehículo	25	150
	Rendimiento del vehículo	35	
	Ingeniería Mecánica / Estructural	25	
	Tren motriz	35	
	LV-Electrics / Electronic	10	
	Interfaz del controlador / [DV] Actuadores del sistema autónomo	15	
	Informe de Diseño de Ingeniería	5	
DV	Desarrollo de hardware	10	150
	Desarrollo de software	10	
	Planificación	20	
	Localización y Mapeo	20	
	Interpretación de datos del sensor	20	
	Seguridad Seguridad	10	
	Redes de vehículos / Procesamiento de datos	15	
	Validación, Simulación y Pruebas	15	
	Informe de Diseño Autónomo	15	
	Visualización de datos / Uso de herramientas	15	

- Análisis de costes y fabricación:

Su objetivo es evaluar la comprensión del equipo de los procesos de fabricación y los costos asociados con la construcción del prototipo. Esto incluye el intercambio de decisiones entre contenido y costo o entre hacer o comprar y comprender las diferencias entre prototipo y producción en masa.
Aquí es muy importante realizar una lista de materiales, en la cual se detalla cada uno de los materiales que forma el vehículo, así como los sistemas en

los que están divididos y sus ensamblajes. Además, en otro documento, se ha de preparar otra lista de materiales que abarque, ahora sí, los procesos de fabricación, las herramientas empleadas, material, etc., siendo está de mayor profundidad que la lista de materiales anterior. De forma similar, se debe presentar los costes que suponen la fabricación, materiales, etc., incluso de la mano de obra.

Todos estos documentos serán evaluados y calificados por categorías, recogidas, a continuación:

Tabla 15. Categorías y puntuaciones para análisis de coste y fabricación para la normativa de FS Germany

Categoría	Puntos
Formato y exactitud de los documentos	5
Conocimiento de documentos y vehículos.	5
Contenido y exhaustividad de la lista de materiales	20
Realismo del CBOM	20
Discusión Parte 2 "Entendimiento de costos"	50
Total	100

Además, existe una penalización si hay algún elemento olvidado en las listas de materiales. Estas penalizaciones se recogen en la siguiente tabla:

Elemento olvidado	Puntos
Ensamblaje	-5
Parte	-3
Proceso/Material	-1

- Presentación del plan de negocio:

El objetivo es evaluar la capacidad del equipo para desarrollar y ofrecer un modelo de negocios integral que demuestre que su producto, su vehículo, podría ser una oportunidad de negocio gratificante. Se desarrolla mediante una presentación de no más de 10min ante unos jueces que serán tratados como si fuesen los inversores potenciales para el modelo de negocio. Obviamente, el plan de negocios debe estar relacionado con el prototipo específico inscrito en la competición. La evaluación de este evento se realiza atendiendo a nueve categorías:

Tabla 16. Categorías y puntuaciones para la presentación del plan de negocio para la normativa de FS Germany

Categoría	Puntos
Resumen ejecutivo	10
Novedad	10

Contenido	20
Finanzas	10
Tema de buceo profundo	10
Demostración y estructura	15
Entrega	10
Preguntas	10
Impresión general	5
Total	100

- Dinámicas: Se trata de pruebas en las que el vehículo está en movimiento. Aquí, se cronometra el paso del monoplaza y se clasifica en función del tiempo empleado para completarla basándose en un sistema de puntos. Todas estas pruebas están marcadas con conos, tanto el interior como el exterior. Estas pruebas son:

    - Skidpad: consiste en realizar un trazado similar a un "8", de ahí que también se le conozco como "el ocho", en donde se entra por un lado de la unión de ambos círculos y se sale por el otro lado de dicha unión. Esto se puede apreciar en la siguiente figura.

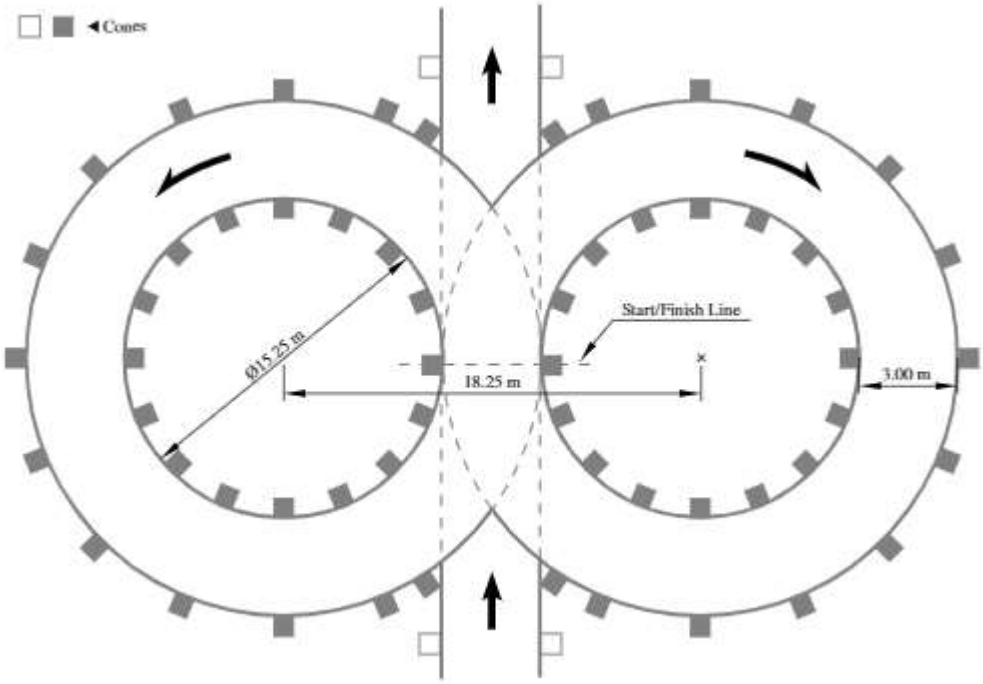


Ilustración 48. Plano prueba skidpad. Fuente: Normativa

El procedimiento es el siguiente, tal y como se detalla en la normativa y reflejado en la figura anterior:

El vehículo entrará perpendicular a la figura de ocho y tomará una vuelta completa en el círculo de la derecha para establecer el giro. La próxima vuelta estará en el círculo derecho y se cronometrará. Inmediatamente después de la segunda vuelta, el vehículo ingresará al círculo izquierdo para la tercera vuelta. La cuarta vuelta estará en el círculo izquierdo y se cronometrará. Inmediatamente después de terminar la cuarta vuelta, el vehículo saldrá de la pista perpendicular a la figura de ocho y se moverá en la misma dirección en la que ingresó.

- Autocross: consiste en un trazado inferior a 1,5 km que varía en cada una de las ediciones manteniendo algunas características, las cuales son:

  - Rectas: no más de 80 m.
  - Giros constantes: hasta 50 m de diámetro.
  - Giros de horquilla: mínimo de 9 m de diámetro exterior (del giro)
  - Slaloms: Conos en línea recta con un espacio de 7,5 a 12 m.
  - Otros: chicanes, giros múltiples, giros de radio decrecientes, etc.
  - El ancho mínimo de la pista es de 3 m.

  La siguiente imagen muestra un ejemplo de un trazado de autocross. Se puede apreciar el inicio y el final de éste.

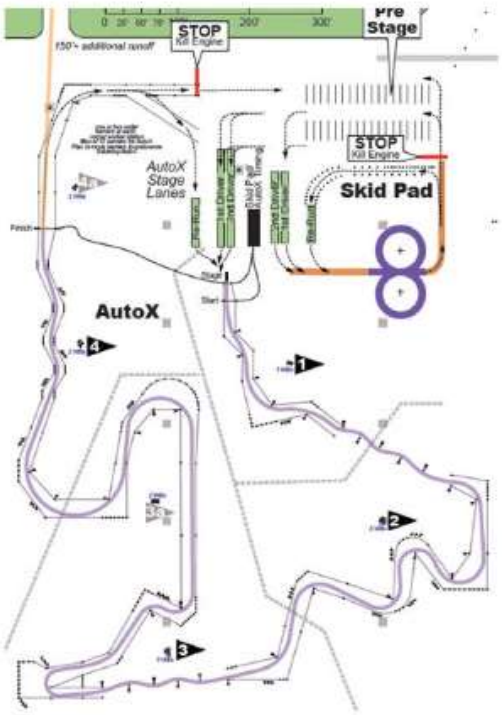


Ilustración 49. Plano ejemplo prueba autocross. Fuente: https://slideplayer.com/slide/12158243/

- Aceleración: se trata de un trazado recto de 75m en el que el vehículo parte desde el reposo. En esta prueba, se mantiene el acelerador pisado durante todo el tiempo hasta cruzar la línea de meta, en el cual se disminuye la velocidad para devolver el coche hacia el punto de partida.

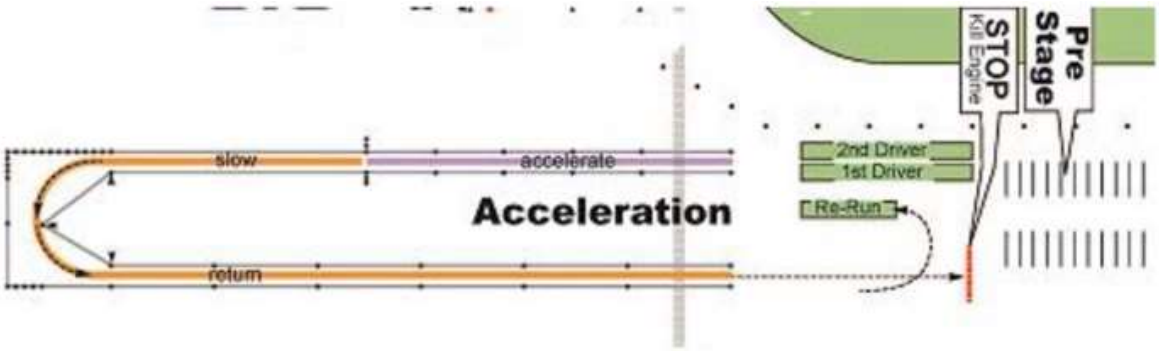


Ilustración 50. Plano prueba aceleración. Fuente: https://slideplayer.com/slide/12158243/

- Endurance (Resistencia): al igual que en la prueba de autocross, se trata de un trazado, aproximadamente de 1km, cuya distribución varía cada año, pero manteniendo algunas características básicas, las cuales son:

  - Rectas: no más de 80 m.
  - Giros constantes: hasta 50 m de diámetro.
  - Giros de horquilla: mínimo de 9 m de diámetro exterior (del giro)
  - Slaloms: Conos en línea recta con un espacio de 7,5 a 12 m.
  - Otros: chicanes, giros múltiples, giros de radio decrecientes, etc.
  - El ancho mínimo de la pista es de 3 m.

  Un ejemplo de este circuito queda reflejado en la siguiente figura:

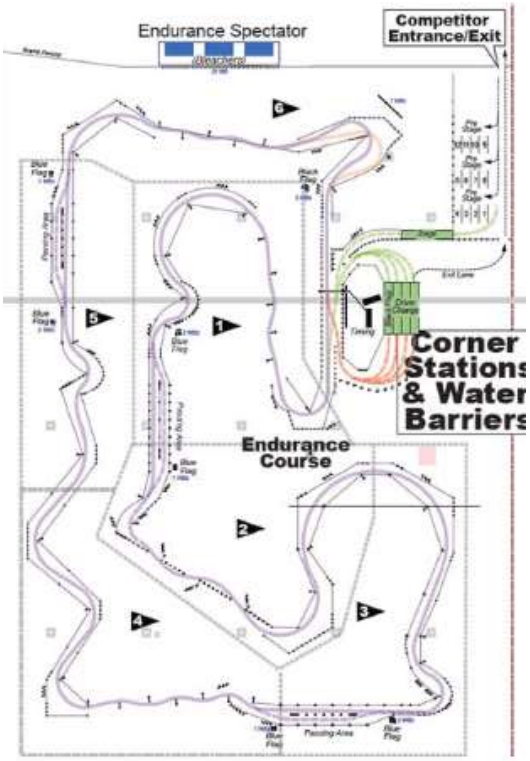


Ilustración 51. Plano ejemplo prueba endurance. Fuente: https://slideplayer.com/slide/12158243/

Para completar la prueba, es necesario completar 22km o, dicho de otro modo, 22 vueltas. Para ello, es necesario que la realicen 2 pilotos (11km cada uno), por lo que el cambio de piloto se realiza a mitad de la prueba. Este hecho se realiza a mitad de la prueba, una vez que el primer piloto complete sus 11vueltas.

Debido a las características de la prueba y su longitud, se permite que varios vehículos estén en el circuito en el mismo momento. Por ello, existen zonas para realizar un adelantamiento seguro. Además, se permite el cambio de neumáticos en mitad de la prueba, en el cambio de pilotos, o cuando las condiciones meteorológicas lo requieran.

Como añadido a esta prueba, se considera un factor no tenido en cuenta en pruebas anteriores, la eficiencia, la cual aporta puntos a los ya conseguidos tras la parte cronometrada.

Atendiendo a los criterios descritos, cada equipo recibirá unos puntos según la prueba que disputen. Ganará aquel equipo que mayor número de puntos consiga. En la siguiente tabla, se presenta un resumen de cada una de las pruebas, así como de sus puntuaciones.

Tabla 17. Resumen pruebas y puntuaciones para la normativa de FS Germany

	Puntos	
	CV / EV	DV
Pruebas estáticas		
Presentación del plan de negocio	75	75
Análisis de costes y fabricación	100	100
Diseño de ingeniería	150	300
Pruebas dinámicas		
Skidpad	75	75
Aceleración	75	75
Autocross	100	100
Endurance	325	-
Eficiencia	100	75
Trackdrive	-	200
Total	1000	1000

Además, la competición se clasifica en dos grupos, denominado clases, que tienen una serie de características comunes. El competir dentro de una de estas clases viene determinado por la fase del proyecto en la que se encuentre el equipo. Es decir:

- Clase 1: se refiere a aquellos monoplazas que están listos para correr, es decir, están completamente diseñados y montados para realizar las pruebas dinámicas.

- Clase 2: se refiere a aquellos monoplazas que no están preparados para correr, es decir, que están en fase de diseño (planos), montaje o que, aun estando completamente montados, tienen problemas y no se les puede poner en funcionamiento. Esta clase únicamente puede competir en las pruebas estáticas.

Es necesario destacar que no todas las competiciones admiten todas estas clases. Por ejemplo, FS Germany obliga a que todos sus competidores tengan sus monoplazas preparados para correr. En cambio, FS UK permite que los competidores pueden ir según la fase del proyecto. Dicho de otra forma, FS Germany solo permite participar si el monoplaza está en clase 1 mientras que FS UK permite cualquiera de las clases nombradas anteriormente.

3.2. Anexo II - Normativa

La Fomula Student proviene de la Formula SAE. Por tanto, la normativa que utiliza, suele ser una adaptación de ésta a la que se le añaden ciertos matices y otras disposiciones, para que cumpla los estándares europeos. Esto es lo que ocurre con las normativas desarrolladas por Alemania (FS Germany) y por el Reino Unido (FS UK). Además, cada organizador organizador europeo, dispone de su propia normativa donde existen algunas limitaciones que no están contempladas en otras.

Ahora bien, no es muy común que ocurra esto. Muchos eventos utilizan la normativa de otro evento para organizar el suyo. Es decir, se basan en la normativa de otro. Esto es lo que ocurre en España (FS Spain), que emplea la normativa de FS Germany como marco normativo para los monoplazas que vayan a competir en su evento.

Una de las ventajas de que exista una misma normativa, es que permite que los equipos participen en varios eventos en el mismo año, si no coinciden en el calendario, fomentando el intercambio de ideas y opiniones, incluso aprender nuevas soluciones y técnicas, y mejorando la capacidad de innovar y actuar ante situaciones imprevisibles.

Durante el desarrollo de este TFM, se han empleado 4 normativas diferentes:

- Normativa Formula SAE 17-18
- Normativa Formula SAE 18-19
- Normativa Formula Student Germany 17-18
- Normativa Formula Student Germany 18-19

La existencia de que estas normativas estén duplicadas, se debe a que cada año sufre ligeras modificaciones, pero todas estas tienen una estructura en común, que se explica a continuación, aunque el orden puede no ser el mismo. Por seguir un orden, y dado que este TFM se ha centrado más en la normativa alemana, los apartados que a continuación se presentan, corresponden a ésta:

- Regulaciones administrativas: en esta parte se expone una visión general de la competición. Se explica el procedimiento de ésta y las características básicas no técnicas del monoplaza en cuanto a su elegibilidad para la competición, así como las normas de conducta y los requerimientos para equipos y participantes. Además, presenta un apartado dedicado exclusivamente a la documentación y una serie de reglas generales, donde se señalan aspectos como la realización de pruebas y el trabajo seguro o materiales ilegales y alcohol.

- Requerimientos técnicos generales: aquí se presentan los aspectos técnicos del monoplaza que tienen un carácter general. Es decir, aquellos elementos comunes para los 3 tipos de monoplazas. Consta de varias partes:

    - Requerimientos generales de diseño
    - Diseño general de chasis

- Habitáculo del piloto
- Sistemas de restricciones del piloto
- Sistema de frenado
- Tren de potencia
- Aerodinámica
- Sistemas de gas comprimido y líquidos de alta presión
- Cinturones
- Componentes eléctricos
- Identificación del vehículo
- Equipamientos del vehículo y piloto

A su vez, en cada una de estas partes existe una gran cantidad de apartados, permitiendo definir con mayor exactitud el vehículo.

- Vehículos con motor de combustión interna: este apartado detalla aspectos técnicos para aquellos vehículos propulsados con un motor de combustión interna. Ejemplos aquí tratados son por ejemplo el sistema de combustible o el sistema eléctrico que existe en el vehículo.

- Vehículos eléctricos: aquí se establece los aspectos técnicos que se refieren a los vehículos propulsados por un eléctrico. Se pueden encontrar apartados como el acumulador de energía, sistemas de almacenaje o cargadores.

- Vehículos sin conductor: es el otro tipo de monoplaza posible. Como requerimientos específicos para ellos se presenta los sensores o el sistema autónomo.

- Inspecciones técnicas: se explica las comprobaciones y pruebas a las que se le someterá el vehículo y que debe superar, antes de empezar a competir con él.

- Eventos estáticos: consiste en pruebas en las que no se utilizan el vehículo, pero si se emplea información de él como planos, datos de fabricación, costes, etc.

- Eventos dinámicos: aquí, se describe de pruebas en las que se emplea el monoplaza, así como las características de los diferentes trazados.

Realizando una comparación entre las normativas, se puede ver que existen diferencias menores y poco destacables en los diferentes apartados, por lo general. Esto no quita que existan diferencias sustanciales en cuanto al contenido. Dicho esto, la normativa de FSAE añade un apartado no incluido en la otra normativa, denominado marco de referencia alternativo (Alternative Framework o AF). En este apartado se describe las condiciones de contorno que se deben establecer en los programas de simulación si no se sigue las pautas marcadas por la normativa de FSAE. Es decir, al comienzo de la normativa, establece que se

pude optar por diseñar como la normativa establece o, por aventurarse por un diseño alternativo, significando realizar las simulaciones pertinentes. Además, no reconoce la categoría de vehículo sin conductor dentro de la normativa de Formula SAE.

3.3. Anexo III – Cálculo de la relación de Ackermann

De manera breve, la relación de Ackermann se trata de un fundamento teórico en la cual se considera que ambas ruedas delanteras presentan junto con las traseras, un punto en el cual el vehículo gira, denominado centro instantáneo de rotación, O. Esto se debe a que existe un ángulo de deriva en ambas ruedas delanteras que obliga a que el ángulo de giro de cada una de ellas sea diferente. En las siguientes imágenes se puede visualizar este hecho.

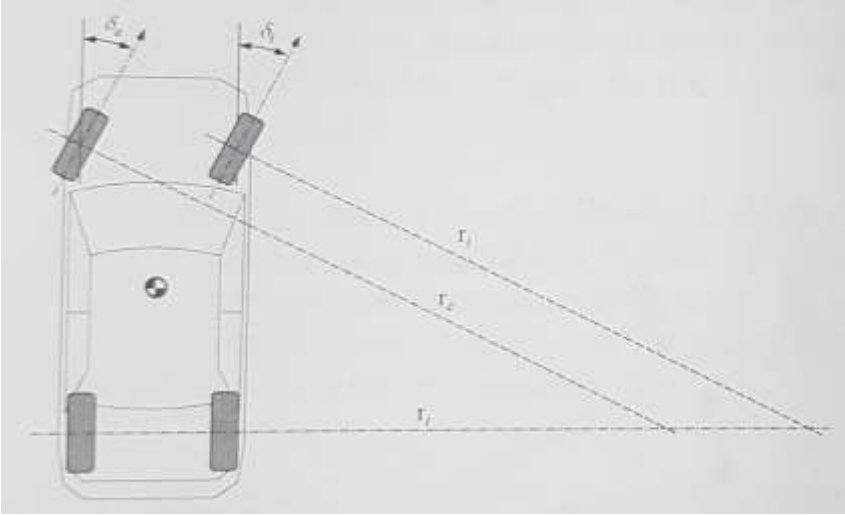


Ilustración 52. Dirección paralela. Fuente: Ingeniería del automóvil, Paraninfo

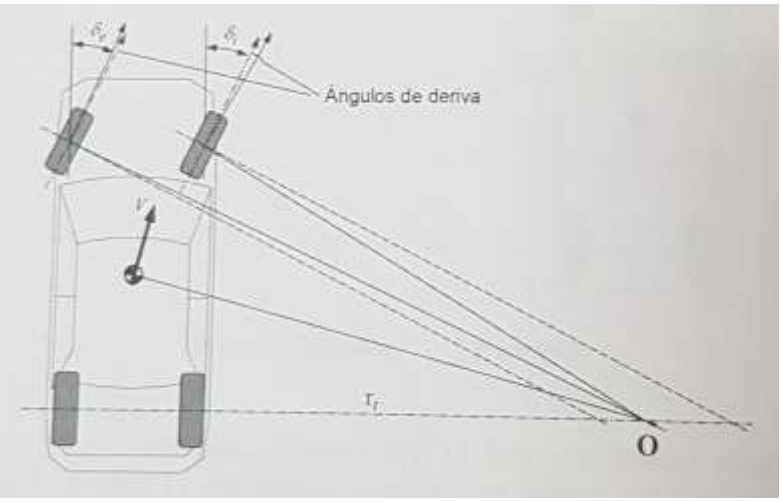


Ilustración 53. Dirección paralela con deriva en ambas ruedas delanteras. Fuente: Ingeniería del automóvil, Paraninfo

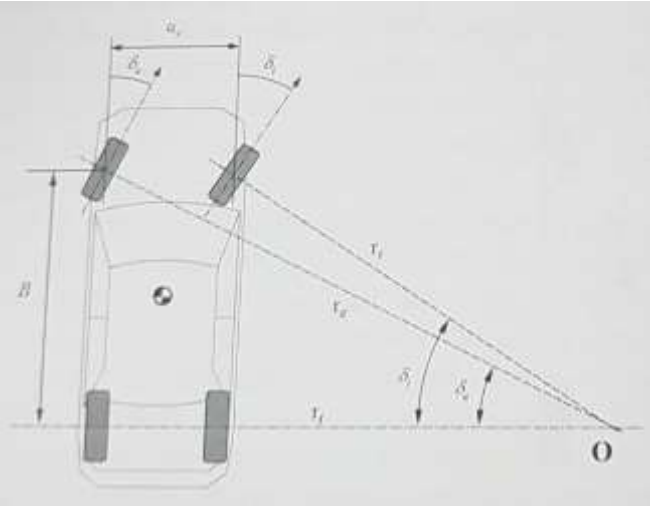


Ilustración 54. Geometría básica de la dirección. Fuente: Ingeniería del automóvil, Paraninfo

Se supone un vehículo que toma una curva de izquierda. Considerando que las ruedas delanteras y traseras están alineadas, es decir, que el ancho de los ejes es igual, como muestra la siguiente ilustración:

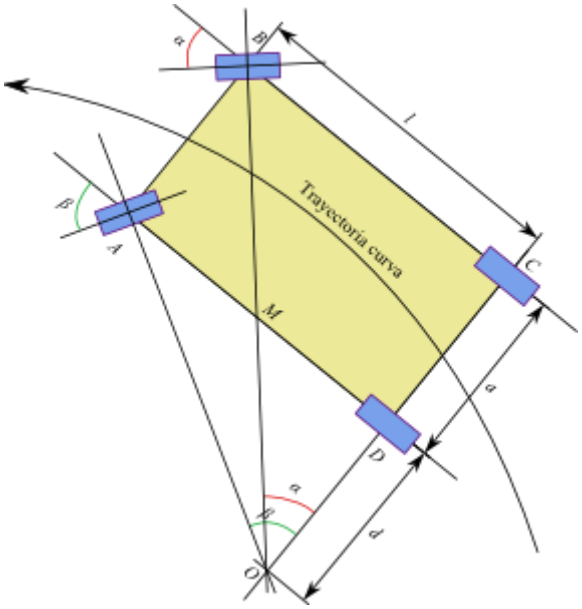


Ilustración 55. Geometría básica de la dirección. Fuente: Google Images

Donde:

- α: ángulo rueda delantera exterior
- β: ángulo rueda delantera interior
- l: distancia entre ejes
- a: ancho de ejes
- d: Radio de giro rueda interior

Se observa en la imagen que se describen dos triángulos:

$$\measuredangle\, OBC:\ \ tg\,(\alpha) = \frac{l}{d+a} \rightarrow \frac{1}{tg\,(\alpha)} = \frac{d+a}{l} = \frac{d}{l} + \frac{a}{l} \qquad Ec: 1.1$$

$$\measuredangle\, OAD:\ \ tg\,(\beta) = \frac{l}{d} \rightarrow \frac{1}{tg\,(\beta)} = \frac{d}{l} \qquad Ec: 1.2$$

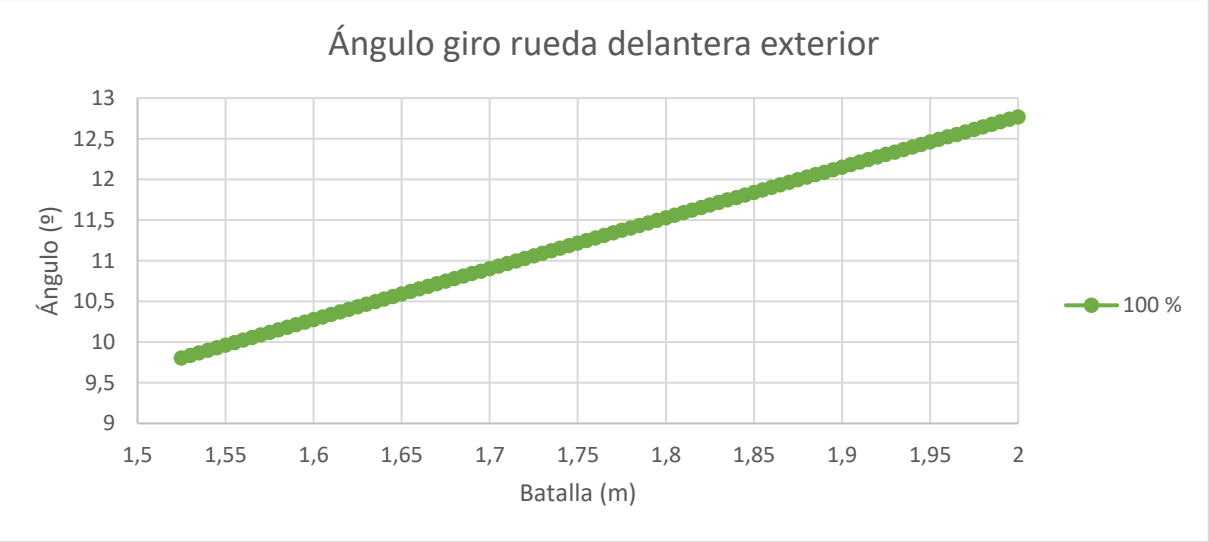
Si se restan los triángulos, se tiene lo que se denomina relación de Ackermann:

$$\frac{1}{tg\,(\alpha)} - \frac{1}{tg\,(\beta)} = \frac{a}{l} \qquad Ec: 1.3$$

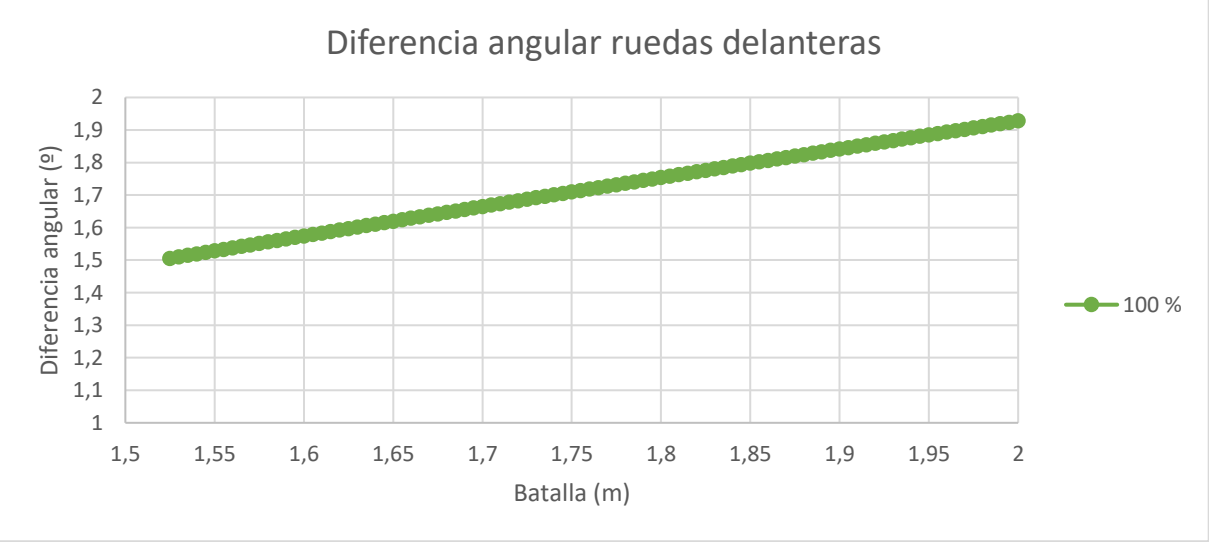
Además, mediante las ecuaciones anteriores, se puede determinar el ángulo de giro de cada una de las ruedas delanteras y, por tanto, la diferencia que existe entre cada una de ellas.

En las siguientes gráficas, se exponen las variaciones de los ángulos de cada rueda para un ancho de eje de 1200mm y un radio de giro de rueda interior de 7,625m, que corresponde con el radio de la prueba de Skidpad.

Gráfica 1. Efecto del ángulo de giro respecto a la batalla. Fuente: propia



Gráfica 2. Efecto del ángulo de giro respecto a la batalla. Fuente: propia



Gráfica 3. Efecto de la diferencia angular respecto a la batalla. Fuente: propia

Estas gráficas muestran que es ventajoso una menor batalla para el comportamiento del vehículo en los giros, según el fundamento de Ackermann.

3.4. Anexo IV – Estado del arte de los monoplazas

En este anexo se presenta una tabla con las características de los diferentes equipos que han competido en el año 2017. Luego, se expone otra tabla que se corresponde con monoplazas que siguen una línea similar usando como referencia en el chasis.

3.4.1. Estado del arte de los vehículos del año 2017.

Tabla 18. Análisis equipos competidores en Barcelona 2017

Equipo	Construcción del casco	Material	Tamaño (Largo/ancho/alto)	Wheelbase / track (FR/Rr)	Suspensión	Peso con 68kg (Fr/Rr)	Goma (Fr/Rr)	Llanta (Fr/Rr)
BARCELONA	Compuesto CFRP / aluminio sandwich monocasco	Panal de aluminio/ preimpregnado CFRP	2922mm / 1451mm / 1183mm	1540mm / 1200mm / 1150mm	Double unequal length A-Arm. Varilla de empuje.	131kg / 152kg	18x7,5 R10 Hoosier R25B	7x10 ET35 Laminated carbon fiber rim
BAYREUTH	Monocromo CFRP completo con Frente de aluminio y aro principal de acero	Preimpregnado híbrido CFRP & C / AFRP, panla de alumnio, espuma estructural Rohacell y adhesivo epoxi.	2920mm / 1388mm / 1195mm	1530mm / 1180mm / 1180mm	Doble longitud desigual A-Arm. Frontal: Barra de tracción / Trasera: Muelle y amortiguador accionados por empujador.	126kg / 137kg	18.0 x 7.5 - R10 Hoosier R25B	8.0 x 10, 35.0 mm offset, 2 pc CFRP rim con aluminio en el eje.
BRAUNSCHWEIG	Todo monocromo	CFRP con aluminio de panal.	2946mm / 1388mm / 1195mm	1530mm / 1164mm / 1138mm	Doble longitud desigual A-Arm. Accionado con varilla de empuje resorte amortiguador.	145kg / 145kg	Continental 205 / 470 R13	7x13, 22 mm Offset, 1 Pc Al Rim

AMBERG	Compuesto CFRP / aluminio sandwich monocasco	Panal de aluminio/ preimpregnado CFRP	2922mm / 1451mm / 1183mm	1530mm / 1200mm / 1180mm	Doble longitud desigual A-Brazo, pulsador accionado unidad amortiguadora ZF / Sachs, barra antivuelco tipo U	82kg / 122kg	Hoosier 18.0x7.5-10 R25B	7.0x10, 21.4 mm offset, CFRP-Al rim
AUGSBURG	Monocasco compuesto de una sola pieza con estructuras antivuelco	Fibra de carbono con panal tubo de acero S355 de 25 mm de diámetro	2888mm / 1425mm / 1030mm	1535mm / 1250mm / 1200mm	Brazos dobles desiguales, varilla de empuje, horizontal damper ("apagador")	132kg / 178kg	continental c16 slick (205/470R13)	7Jx13 magnesium oz rim
BREMEN	Monocasco de CFRP con estructura de sandich de espuma	UD, Biax, sarga, malla de cobre, espuma rohacell	3172mm / 1320mm / 1190mm	1730mm / 1140mm / 1130mm	Doble longitud desigual A-Brazo. Varilla de empuje resorte y amortiguador orientados horizontalmente	143kg / 175kg	18.0x6.0-10 / 18.0x7.5-10 Hossier R25B	5.75x10 / 7.75x10, 30mm offset. self-designed inner Al rim
DARMSTADT	Monocasco	Una pieza de CFRP con alumino en panal	3100mm / 1400mm / 1100mm	1585mm / 1220mm / 1170mm	Doble brazo	134kg / 134kg	Pirelli 185/40 R13	Aluminiun-CFRP Hybrid / Aluminiun-CFRP Hybrid

DELFT	Monocasco de CFRP con alumino de panal	TeXtreme 100gsm weave, DeltaTech M46J + STS UD prepregs impregn. with MTC510, Plascore Al5052 core	2867mm / 1442mm / 1190mm	1530mm / 1200mm / 1200mm	Brazos de doble longitud desigual, barra de tracción (frente) y barra de empuje (trasera) que actúa sobre SDS vertical	110kg / 115kg	225x368-R10, Vredestein Slick Compound Front and Rear	214mm, self-made 2-piece CFRP rim Front and Rear
DIEPHOLZ	Espacio tubular	25CrMo4	3100mm / 1510mm / 1226mm	1590mm / 1300mm / 1200mm	Doble horquilla, varilla de empuje, tirador de varilla	145kg / 205kg	18.0x6.5-10 Hoosier R25B / 19.5x6.5-10 Hoosier WET	10.0x6.5 CFK Rim
DRESDEN	Monocasco de CFRP	CFRP con alumino de panal	3035mm / 1405mm / 1153mm	1550mm / 1200mm / 1150mm	Brazo de doble longitud desigual , varilla de empuje	136kg / 136kg	205/ 470 R13 Continental	7x13, 30mm offset, Mg rim
FREIBERG	Monocasco con parte posterior fundida	hojas de magnesio (AZ31) / aluminio (5754) y núcleo de panal de aluminio	2978mm / 1405mm / 1194mm	1530mm / 1200mm / 1160mm	Brazo de doble longitud desigual. Coilovers orientados con palanca de empuje. Barra estabilizadora en forma de U.	139kg / 144kg	205x34 R13, Continental C17	7x13, 34mm offset, 2pc - CFRP shell, Mg-center
GÖTEBORG	Monocasco CFRP de una sola pieza con núcleo alumino	CFRP preimpregnado y paneles sándwich Al	2891mm / 1465mm / 1183mm	1530mm / 1250mm / 1200mm	Doble longitud desigual A-Brazo.	115kg / 141kg	Hoosier R25B 18x10x6	10x6 CFRP Custom made rims, +4.7mm

	en panal y aro frontal integrado	Honeycomb (1/2 y 1 pulgada)			Resorte accionado y el amortiguador.			offset / 10x6 CFRP Custom made rims, +4.7mm offset
GÖTTINGEN	Espacio tubular	S235 +C , S355 +N ; 26x2, 26x1.2, 28x2	2780mm / 1393mm / 1244mm	1555mm / 1190mm / 1140mm	doble brazo, longitud desigual, varilla de empuje, resorte y amortiguador horizontalmente	125kg / 127kg	205/470 R13, Continental C16 / 205/470 R13, Continental C16	7x13, 30mm offset, 1pc Al Rim / 7x13, 30mm offset, 1pc Al Rim
HAMBURG	Estructura monocasco con preimpregnado y material de nido de abeja de aluminio	IMS65 UD Fibres	2925mm / 1415mm / 1140mm	1530mm / 1150mm / 1200mm	Doble longitud desigual A-Brazo. Amortiguador y resorte de aire accionados por varillas	141kg / 142kg	Continental C17	13
HANNOVER	Monocasco de CFRP y panal de aluminio	K200K 1200 CP004 42 (CFRP Prepreg), PAMGXR1-6.1-1/8-15-N-5056 (Aluminium Honeycomb)	2939mm / 1432mm / 1088mm	1555mm / 1220mm / 1180mm	Doble longitud desigual A-Brazo. Amortiguador de muelle de aire orientado horizontalmente con varilla de empuje	149kg / 155kg	Continental C17 205/470 R13	7J x 13 offset, 46mm offset, 3pc, Al Rim

INGOLSTADT	Construcción sándwich monocasco con barras de rodillo tubulares de acero	Panel sándwich Rohacell	2868mm / 1456mm / 1196mm	1550mm / 1378mm / 1335mm	Brazo A doble, actuador de varilla de empuje, muelle amortiguador	135kg / 140kg	205/470 R13 Continental	7 x13, 30mm offset, 1pc Mg
KAISERSLAUTERN	Monocasco de una sola pieza, tubular barras de rodillo de acero	Fibra de carbono y preimpregnado unidireccional, núcleo de sándwich de panal de aluminio	2784mm / 1360mm / 1087mm	1530mm / 1150mm / 1100mm	Doble longitud desigual A-Brazo. Jalar el resorte y el amortiguador orientados horizontalmente de la palanca de tracción	123kg / 139kg	18.0x6.0-10 Hoosier R25B / 18.0x6.0-10 Hoosier R25B	7x10, 00mm offset, CFRP shell+AL center
KARLSRUHE	CFRP sandwich monocasco	Fibras HT y HM, capas unidireccionales, sarga de kevlar	2917mm / 1566mm / 1200mm	1530mm / 1220mm / 1150mm	Doble longitud desigual A-Brazo. Tire del amortiguador de varillas.	105kg / 105kg	Hoosier 18.0x7.5-10 R25B	Selfmade carbon rims
KÖLN	Monocasco	Fibra de carbono	2937mm / 1372mm / 1190mm	1530mm / 1200mm / 1200mm	Doble longitud desigual A-Brazo. Varilla y amortiguador orientados horizontalmente con	130kg / 140kg	Avon 7.0/16.0-10	7.0 x 10’’ OZ Magnesium Center Lock

					accionamiento manual			
LANDSHUT	Espacio tubular	tubos de acero con diferente tamaño y grosor	2850mm / 1410mm / 1081mm	1600mm / 1200mm / 1200mm	Doble longitud desigual A-Brazo. Jalar el resorte y el amortiguador orientados horizontalmente, accionados por varilla ajustable	146kg / 219kg	20.5x7.0 R13, Hoosier R25B / 21.0x6.5 R13, Hoosier WET	OZ Superleggera 7x13, ET 22, 1 pc Al-Rim
LISBOA	Monocasco con acero principal aro delantero de aluminio.	Prepreg CFRP, panal de aluminio	3140mm / 1475mm / 1195mm	1530mm / 1200mm / 1200mm	Doble longitud desigual A-Brazo.	129kg / 139kg	Hoosier R25B R10	8.0x10, 2 pc CFRP rim + aluminium center
MÜLHEIM A. D. RUHR	Tubular	S355J2H	2602mm / 1619mm / 1183mm	1655mm / 1409mm / 1423mm	Doble longitud desigual A-Brazo. Varilla orientada verticalmente con resorte y amortiguador.	154kg / 174kg	20.5x7.0 R13, Hoosier R25B / 20.5x7.0 R13, Hoosier R25B	MONO 7x13 ET11 AL Rim / MONO 7x13 ET11 AL Rim

MÜNCHEN	Monocasco de CFRP con aliminio de panal	fibra de carbono con plastico reforzada	2933mm / 1417mm / 1186mm	1550mm / 1200mm / 1200mm	Doble longitud desigual A-Brazo. Frente: barra de tracción activada. Parte posterior: varilla accionada	140kg / 140kg	18x6.0-10 R25B Hoosier / 18x6.0-10 R25B Hoosier	6,0 x 10, 1pc: CFRP Shells / 6,0 x 10, 1pc: CFRP Shells
MÜNCHEN	Monocasco con Tubular "Front & Main Hoop"	CFRP estructura de sandwich y panal de aluminio	2887mm / 1395mm / 1147mm	1540mm / 1150mm / 1128mm	Brazo A de doble longitud desigual, resorte accionado con tirador y amortiguadores	129kg / 134kg	18.0x7.5-10 Hoosier R25B / x7.5-10 Hoosier R25B	7.5x10, 2pc CFRP/ Aluminium hybrid rim / 7.5x10, 2pc CFRP/ Aluminium hybrid rim
NEW DELHI	Parte delantera y trasera tubular	Acero ASTM A179 grado B. Tubo redondo diámetro externo de 25.4 mm	2850mm / 1450mm / 1114mm	1550mm / 1260mm / 1200mm	Doble longitud desigual A-Brazo. Resorte y amortiguador orientados verticalmente accionados por varilla	111kg / 167kg	Continental 205/470 R13 for both front and Rear.	7x13, 22mm offset Al Rim for both front and Rear
OSNABRÜCK	Monocasco de dos piezas CFRP	CFRP con material de núcleo	2848mm / 1436mm / 1136mm	1535mm / 1190mm / 1150mm	CFRP con material central Doble longitud desigual A-Brazo. Varilla orientada horizontalmente y	130kg / 143kg	18x6-10, Hoosier R25B	7.0x10, 2pc carbon fibre wheel

					amortiguador orientado hacia la derecha.			
PATRAS	5 piezas de panel de aluminio monocasco enlazado y remachado de aluminio	Piel de aluminio 5052 con núcleo de nido de abeja de aluminio, núcleo de 23 mm / piel de 0.8 mm en los lados	2762mm / 1405mm / 1195mm	1580mm / 1165mm / 1095mm	Brazos A dobles de fibra de carbono de longitud desigual con amortiguador Ohlins TTX25 de acción directa conectado	114kg / 164kg	18.0x7.5-10, Hoosier R25B / 18.0x7.5-10, Hoosier R25B	7x10
SANKT AUGUSTIN	Monocasco	CFK Prepreg con núcleo Rohacell	2918mm / 1416mm / 1156mm	1530mm / 1240mm / 1220mm	Brazo doble oscilante accionado varilla de empuje	133kg / 145kg	18x6- R10 hoosier R25B	18x6- R10 hoosier R25B
STUTTGART	monocasco con aro delantero integrado	HM/ HT Fibra de carbono/ aluminio de panal	2908mm / 1442mm / 1128mm	1550mm / 1220mm / 1220mm	Brazo A doble, sistema de resorte-amortiguador accionado por varilla, resorte horizontal y	133kg / 126kg	dry: Hoosier 18.0x7.5 R10 wet: Continental 205/470 R13	7x10,38mm offs,2-pcs. Al star,CFK bed

					amortiguador, independiente			
STUTTGART	Monocasco de fibra de carbono	Aluminio de panal	3000mm / 1400mm / 1200mm	1540mm / 1160mm / 1160mm	Doble longitud desigual A-Brazo. Sistema monospring accionado por varillas con amortiguación adicional del rodillo.	120kg / 125kg	18 x 7.5 - 10, Hoosier R25B / 18 x 7.5 - 10, Hoosier R25B	8.0 wide 2 pc Hybrid (Al, CFRP) / 8.0 wide 2 pc Hybrid (Al, CFRP)
THESSALONIKI	Monocasco	Aluminio de panal (Al-6082-T6 1mm skins, Al-3003 core 6,4mmx20mm)	3052mm / 1320mm / 1173mm	1575mm / 1180mm / 1150mm	Suspensión de varilla de brazo oscilante doble independiente	136kg / 232kg	20.5 x 7.0-13 Hoosier / 20.5 x 7.0-13 Hoosier	7 in. , 22 mm offset, forged aluminum / 7 in. , 22 mm offset, forged aluminum
TRONDHEIM	CFRP monocasco	Construcción de sándwich CFRP, AlHC y Rohacell	2907mm / 1400mm / 1180mm	1530mm / 1200mm / 1180mm	Construcción de sándwich CFRP, AlHC y Rohacell Longitud doble desigual de un brazo. Vástago de empuje orientado horizontalmente orientado al	122kg / 121kg	205/470 R13 Continental C17 front and rear	7.0x13”, 2pc Al/CFRP rim front and rear.

					resorte y al amortiguador.			
WIEN	CFRP monocasco	CFRP en estructura sándwich con panal de aluminio y núcleo rohacell de diferente espesor	2860mm / 1402mm / 1167mm	1575mm / 1200mm / 1160mm	Doble longitud desigual A-Brazo, resorte y amortiguador orientado horizontalmente accionado con varilla de tracción	95kg / 133kg	6.0/18.0-10 Hoosier	7.0x10, 25mm offset, one piece CFRP rim
ZÜRICH	CFRP monocasco	prepreg de CFRP de alto módulo (sarga y UD) con núcleo de panal de aluminio	2932mm / 1422mm / 1156mm	1530mm / 1220mm / 1220mm	brazos dobles A, accionados hidráulicamente, modo desacoplado	118kg / 120kg	205/470 R13 - Continental C17 (Fr and Rr)	7''x13'', 24.6 mm offset, CFRP rim (Fr and Rr)
ZWICKAU	CFRP monocasco	Fibra de carbono monocasco con material de núcleo de panal de aluminio	2876mm / 1376mm / 1179mm	1530mm / 1200mm / 1140mm	Doble longitud desigual A-Brazo. Varilla y amortiguador orientados horizontalmente con accionamiento manual	67kg / 68kg	Continental C17 205x35 R13	7x13, 30mm offset, 3pc carbon/AL rim / 7x13, 30mm offset, 3pc carbon/AL rim

3.4.2. Estado del arte de vehículos cuyo chasis es similar al seleccionado

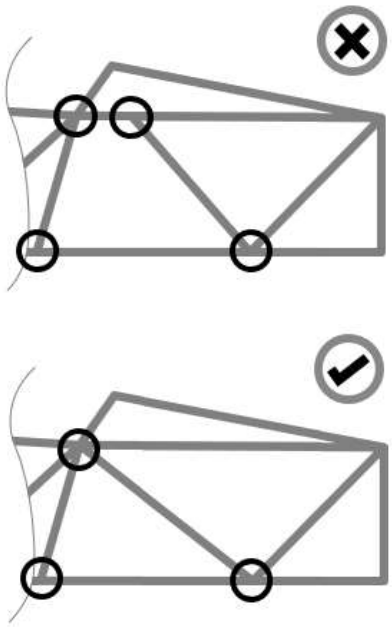
Tabla 19. Análisis equipos competidores categoría eléctrico en Barcelona 2017

Equipo	Construcción del casco	Material	Tamaño (Largo/ancho/alto)	Wheelbase / track (FR/Rr)	Suspensión	Peso con 68kg (Fr/Rr)	Goma (Fr/Rr)	Llanta (Fr/Rr)
DIEPHOLZ	Espacio tubular	25CrMo4	3100mm / 1510mm / 1226mm	1590mm / 1300mm / 1200mm	Doble horquilla, varilla de empuje, tirador de varilla	145kg / 205kg	18.0x6.5-10 Hoosier R25B / 19.5x6.5-10 Hoosier WET	10.0x6.5 CFK Rim
GÖTTINGEN	Espacio tubular	S235 +C , S355 +N ; 26x2, 26x1.2, 28x2	2780mm / 1393mm / 1244mm	1555mm / 1190mm / 1140mm	doble brazo, longitud desigual, varilla de empuje, resorte y amortiguador horizontalmente	125kg / 127kg	205/470 R13, Continental C16 / 205/470 R13, Continental C16	7x13, 30mm offset, 1pc Al Rim / 7x13, 30mm offset, 1pc Al Rim
LANDSHUT	Espacio tubular	tubos de acero con diferente tamaño y grosor	2850mm / 1410mm / 1081mm	1600mm / 1200mm / 1200mm	Doble longitud desigual A-Brazo. Jalar el resorte y el amortiguador orientados horizontalmente, accionados por varilla ajustable	146kg / 219kg	20.5x7.0 R13, Hoosier R25B / 21.0x6.5 R13, Hoosier WET	OZ Superleggera 7x13, ET 22, 1 pc Al-Rim

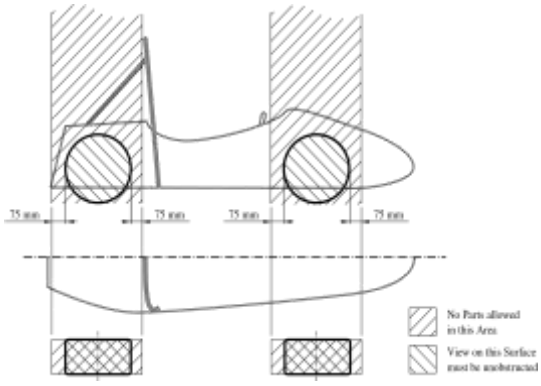
PATRAS	5 piezas de panel de Al monocasco enlazado y remachado de Al	Piel de Al 5052 con núcleo de nido de abeja de Al, núcleo de 23 mm / piel de 0.8 mm en los lados	2762mm / 1405mm / 1195mm	1580mm / 1165mm / 1095mm	Brazos A dobles de fibra de carbono de longitud desigual con amortiguador Ohlins TTX25 de acción directa conectado	114kg / 164kg	18.0x7.5-10, Hoosier R25B / 18.0x7.5-10, Hoosier R25B	7x10
MÜLHEIM A. D. RUHR	Tubular	S355J2H	2602mm / 1619mm / 1183mm	1655mm / 1409mm / 1423mm	Doble longitud desigual A-Brazo. Varilla orientada verticalmente con resorte y amortiguador.	154kg / 174kg	20.5x7.0 R13, Hoosier R25B / 20.5x7.0 R13, Hoosier R25B	MONO 7x13 ET11 AL Rim / MONO 7x13 ET11 AL Rim
NEW DELHI	Parte delantera y trasera tubular	Acero ASTM A179 grado B. Tubo redondo diámetro externo de 25.4 mm	2850mm / 1450mm / 1114mm	1550mm / 1260mm / 1200mm	Doble longitud desigual A-Brazo. Resorte y amortiguador orientados verticalmente accionados por varilla	111kg / 167kg	Continental 205/470 R13 for both front and Rear.	7x13, 22mm offset Al Rim for both front and Rear

3.5. Anexo V - Cuadro de verificaciones

Requerimiento técnico	Revisión

T REQUISITOS TÉCNICOS GENERALES		
3.5.1. T1 DEFINICIONES		
T1.1 Definiciones de chasis		
T1.1.10 Triangulación de nodo a nodo: una disposición de elementos del chasis proyectada en un plano, donde una carga coplanar aplicada en cualquier dirección, en cualquier nodo, produce solo fuerzas de tracción o compresión en los elementos del chasis.		

3.5.2. T2 REQUISITOS GENERALES DE DISEÑO	
T2.1 Configuración del vehículo	
T2.1.1 El vehículo debe estar diseñado y fabricado de acuerdo con las buenas prácticas de ingeniería.	
T2.1.2 El vehículo debe ser abierto, con asiento único y cabina abierta (estilo fórmula) con cuatro ruedas que no estén en línea recta.	

T2.1.3 Los vehículos open-wheels deben cumplir con lo siguiente: • El conjunto de rueda / neumático no debe estar obstaculizado cuando se ve desde un lado. • Ninguna parte del vehículo puede entrar en una zona definida por dos líneas que se extienden verticalmente desde las posiciones 75 mm al frente y 75 mm detrás del diámetro exterior de los neumáticos delanteros y traseros en la vista lateral del vehículo, con la dirección en línea recta. Esta zona se extiende lateralmente desde el plano exterior de la rueda / neumático al plano interior del conjunto de rueda / neumático.		
## T2.2 Carrocería		
T2.2.1 No debe haber aberturas a través de la carrocería en el habitáculo del piloto que no sean las requeridas para la apertura de la cabina. Se permiten aberturas mínimas alrededor de la suspensión delantera y los componentes del sistema de dirección.		
T2.2.2 Las estructuras de chasis cerradas y las estructuras entre el chasis y el suelo deben tener dos orificios de ventilación de, al menos, 25 mm de diámetro en la parte más baja de la estructura para evitar la acumulación de líquidos. Se requieren orificios adicionales cuando existen múltiples partes más bajas locales en la estructura.		
T2.2.3 Todos los bordes de la carrocería que puedan entrar en contacto con un peatón deben tener un radio mínimo de 1 mm. La carrocería delante de las ruedas delanteras debe tener un radio de al menos 38 mm que se extienda al		

menos 45 ° respecto a la dirección hacia adelante, a lo largo de la parte superior, los lados y la parte inferior de todos los bordes afectados.	
T2.7 Distancia entre ejes	
T2.7.1 El vehículo debe tener una distancia entre ejes de, al menos, 1525mm.	
T2.8 Estabilidad de seguimiento y vuelco	
T2.8.1 El ancho de eje más pequeño del vehículo (delantera o trasera) no debe ser inferior al 75% del ancho más grande.	
T2.8.2 El ancho de eje y el centro de gravedad del vehículo deben combinarse para proporcionar una estabilidad de vuelco adecuada.	

3.5.3. T3 DISEÑO GENERAL DE CHASIS	
T3.1 Requisitos generales	
T3.1.1 Entre otros requisitos, la estructura del vehículo debe incluir:	
• Dos aros de rodillo que están apoyados	
• Un mamparo frontal con sistema de soporte y IA.	
• Estructuras de impacto lateral.	
T3.2 Requisitos mínimos de material	
T3.2.1	

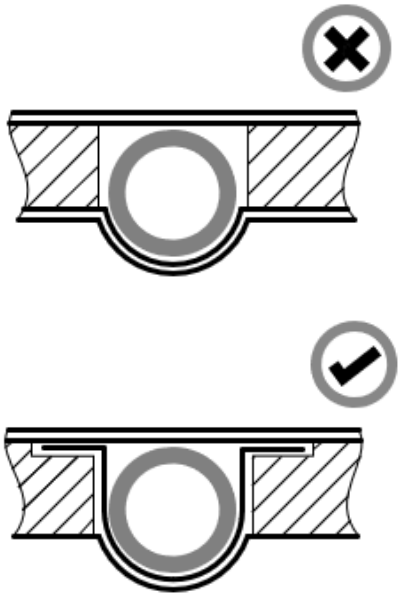
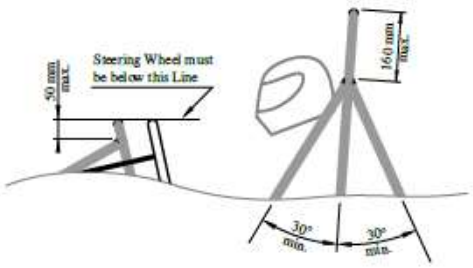
Item or application	Minimum wall thickness	Minimum cross sectional area	Minimum area moment of inertia
Main and front hoops, shoulder harness mounting bar	2.0 mm	175 mm^2	11 320 mm^4
Side impact structure, front bulkhead, roll hoop bracing, driver's restraint harness attachment (except as noted above)	1.2 mm	119 mm^2	8509 mm^4
Front bulkhead support, main hoop bracing supports	1.2 mm	91 mm^2	6695 mm^4

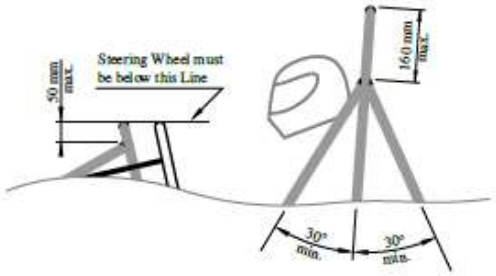
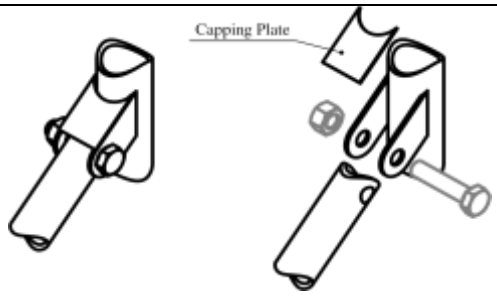
T3.2.2 La tubería de acero debe estar hecha de acero al carbono sin aleación con un contenido máximo de 0.3% de carbono, 1.7% de manganeso y 0.6% de cualquier otro elemento. Todos los demás grados de acero se consideran materiales alternativos y requieren pruebas y documentación adicionales (ver T3.3).	
T3.2.3 A excepción de los orificios de inspección, ver T3.7.6, cualquier orificio perforado en cualquier tubo que sea miembro de la estructura primaria debe mostrar una prueba de equivalencia en el SES.	

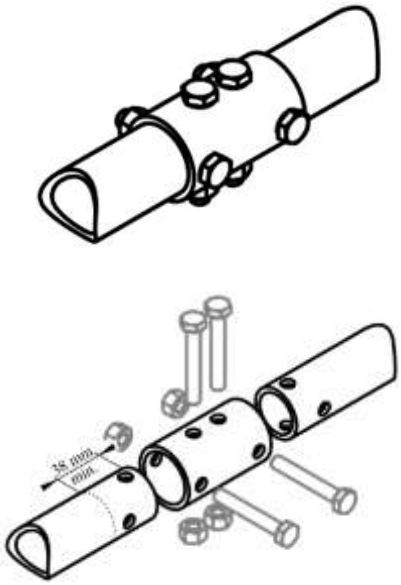
T3.2.4 Las propiedades del acero utilizadas para los cálculos en el SES deben ser:	
Resistencia no soldada para cálculos de material continuo:	
• Módulo de Young (E) = 200GPa	
• Fuerza de rendimiento (Sy) = 305MPa	
• Fuerza máxima (Su) = 365MPa	
• Resistencia soldada para materiales discontinuos, como cálculos de juntas:	
• Fuerza de rendimiento (Sy) = 180MPa	
• Fuerza máxima (Su) = 300MPa	
T3.2.5 Cualquier tubo con un grosor de pared inferior a 1,2 mm o un área de inercia mínima de 6695 mm4 se considera no estructural y se ignorará cuando se evalúe el cumplimiento de cualquier regla con respecto a la estructura del vehículo.	
T3.2.6 Si un miembro de la estructura primaria (a excepción de los aros principales) es un tubo doblado o está hecho de múltiples tubos, un tubo adicional debe soportarlo. Este tubo de soporte debe:	
• Tener su punto de unión en la posición a lo largo del tubo de curvatura donde se desvía más lejos de una línea recta que conecta ambos extremos.	
• Ser de la misma dimensión que el (los) tubo (s) soportado (s).	
• Terminar en un nodo del chasis.	
• Estar en ángulo a no más de 30 ° del plano del (de los) tubo (s) soportado (s).	
T3.2.7 Cualquier forma de costura soldada no debe alterarse mecánicamente de ninguna manera.	
## T3.3 Materiales alternativos	
T3.3.1 Se pueden usar materiales alternativos para todas las partes de la estructura primaria y el contenedor del acumulador del sistema de tracción con las siguientes excepciones:	
• El aro principal y sus refuerzos deben ser de acero.	
• El aro frontal debe ser de metal.	
• Cualquier estructura soldada de la estructura primaria debe ser de acero.	
• Sin embargo, el aro frontal puede ser una estructura soldada de aluminio	

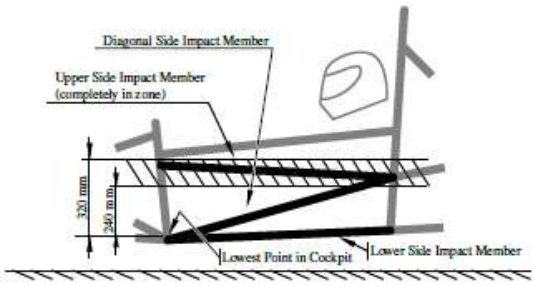
T3.3.2 Si se utilizan otros materiales que no sean tubos de acero en la estructura primaria o en el contenedor acumulador del sistema de tracción, se requieren pruebas físicas para mostrar la equivalencia a las propiedades mínimas del material para el acero en T3.2.	
T3.3.3 Si se usa acero aleado como se define en T3.2.2, el equipo debe incluir pruebas y documentación en el SES para mostrar la equivalencia estructural. Esto puede incluir, pero no se limita a:	
• Recibos y hojas de datos de los materiales de tubería utilizados.	
• Documentación sobre procesos de soldadura y materiales de relleno.	
• Documentación sobre tratamientos térmicos.	
• Pruebas que muestran la resistencia y elongación adecuadas a la rotura en la condición soldada	
T3.4 Estructuras compuestas	
T3.4.1 Si se utilizan materiales compuestos en la estructura primaria o en el contenedor del acumulador del sistema de tracción, la Rigidez a la Flexión (EI) de esa estructura debe calcularse con las herramientas y fórmulas en el SES. La geometría real y la curvatura del panel se pueden tener en cuenta para el soporte de refuerzo del aro principal, el refuerzo del aro frontal, la estructura de soporte del mamparo frontal y la barra de arnés del hombro. Para todas las demás áreas, la IE debe calcularse como la IE de un panel plano sobre su eje neutral. Este panel debe tener la misma composición que la estructura utilizada en el chasis.	
T3.4.2 Si se utilizan materiales compuestos en la estructura primaria o en el contenedor del acumulador del sistema de tracción, el SES debe incluir:	
• Tipo (s) de material	
• Pesas de tela	
• Tipo de resina	
• Orientación de la fibra.	
• Número de capas	
• Material del núcleo	
• Técnica de colocación.	
• Prueba de flexión de 3 puntos y datos de prueba de corte	
T3.4.3 Para cualquier laminado en la estructura primaria o el contenedor del acumulador TS, el contenido máximo de peso de las fibras paralelas, en relación con el peso de todas las fibras en el laminado, es del 50%.	

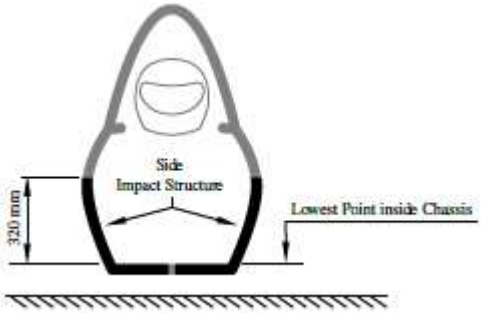
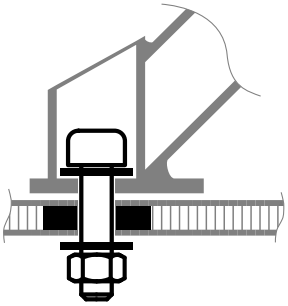
Todas las fibras colocadas dentro de la orientación +/- 10 ° cuentan como paralelas en este caso.	
T3.7 Roll Hoops	
T3.7.1 Ambos aros deben integrarse de forma segura a la estructura primaria mediante triangulación de nodo a nodo o métodos de unión equivalentes.	
T3.7.2 El radio mínimo de cualquier curva, medido en la línea central del tubo, debe ser al menos tres veces el diámetro exterior del tubo. Las curvas deben ser suaves y continuas, sin evidencia de rizado o falla de la pared.	
T3.7.3 Los aros deben extenderse desde el miembro del chasis más bajo en un lado del chasis, hacia arriba, hacia abajo y hacia arriba, hacia el miembro del chasis más bajo en el otro lado.	
T3.7.4 Los aros unidos a una estructura primaria de materiales compuestos deben unirse mecánicamente en la parte superior e inferior de ambos lados de la estructura y en ubicaciones intermedias, si es necesario, para mostrar la equivalencia.	
T3.7.5 Las placas de montaje soldadas a los aros deben ser de al menos 2 mm de acero grueso o 3 mm de espesor de aluminio, dependiendo del material del aro del rollo.	
T3.7.6 Ambos aros de rodillo deben tener un orificio de 4.5 mm en una ubicación recta no crítica y su superficie en este punto debe estar libre de obstáculos por lo menos 180 °.	
T3.8 Aro principal	
T3.8.1 El aro principal debe estar construido de una sola pieza de tubo de acero de sección cerrada, continua y sin cortes.	
T3.8.2 En vista lateral, la parte del aro principal que está por encima de su punto de fijación superior a la estructura de impacto lateral debe estar inclinada a menos de 10° de la vertical.	
T3.8.3 En la vista lateral, cualquier curva en el aro principal por encima de su punto de fijación superior a la estructura primaria debe sujetarse a un nodo de la estructura de soporte de refuerzo del aro principal con un tubo que cumpla con los requisitos del refuerzo del aro principal.	
T3.8.4 En la vista lateral, cualquier parte inferior al punto de fijación superior a la estructura de impacto lateral debe estar inclinada hacia adelante no más de 10° hacia atrás.	
T3.9 Aro Frontal	
T3.9.1 El aro frontal debe estar construido de una sección continua y cerrada.	
T3.9.2 Si el aro frontal está hecho de más de una pieza, debe estar soportado por una triangulación de nodo a nodo o una construcción equivalente.	

T3.9.3 En la vista lateral, ninguna parte del aro frontal puede inclinarse más de 20° con respecto a la vertical.		
T3.9.4 Si el bastidor delantero es una construcción soldada hecha de múltiples perfiles de aluminio, la resistencia elástica equivalente se debe considerar en la condición de soldado a menos que el equipo demuestre y demuestre que ha sido adecuadamente tratada con calor y envejecida artificialmente. El equipo debe proporcionar documentación suficiente que demuestre que se realizó el proceso de tratamiento térmico adecuado.		
T3.9.5 Es aceptable laminar completamente el aro frontal al monocasco. Completamente laminado significa que el aro debe encapsularse con laminado alrededor de toda su circunferencia		
La equivalencia a al menos cuatro montajes compatibles con T3.16.1 debe mostrarse en el SES.		
T3.10 Brazos del aro principal		
T3.10.1 El aro principal debe apoyarse en la parte delantera o trasera sujetando los tubos a cada lado del aro principal.		
T3.10.2 En vista lateral, el aro principal y los tirantes del aro principal no deben apoyarse en el mismo lado de una línea vertical coincidente con la parte superior del aro principal.		
T3.10.3 Los brazos del aro principal deben estar unidas al aro principal a una altura inferior a 160 mm por debajo de la superficie más alta del aro principal. El ángulo incluido formado por el aro principal y los tirantes del aro principal debe ser de al menos 30°.		
T3.10.4 Los tirantes principales del aro deben ser rectos.		

T3.10.5 Los extremos inferiores de los tirantes del aro principal deben apoyarse de nuevo en el punto de sujeción superior del aro principal a la estructura de impacto lateral y al punto de sujeción inferior del aro principal a la estructura de impacto lateral por un nodo a Estructura triangulada del nodo o estructura compuesta equivalente.	
T3.10.6 Si cualquier elemento que se extienda fuera de la estructura primaria se adjunta a los refuerzos del bastidor principal, se requieren arriostramientos adicionales para evitar la flexión de cargas en una situación de vuelco.	
T3.11 Refuerzo de aro frontal	
T3.11.1 El refuerzo del aro frontal consiste en dos tubos simples y rectos (uno a cada lado del aro delantero) que se conecta al aro delantero y la estructura hacia adelante de los pies del conductor (por ejemplo, el mamparo frontal).	
T3.11.2 La estructura de arriostramiento del aro frontal debe estar unida a no menos de 50 mm por debajo de la superficie más alta del aro delantero. 	
T3.11.3 Si el aro delantero está inclinado más de 10 ° hacia atrás, se requieren llaves adicionales que se extiendan hacia atrás.	
T3.12 Refuerzo de aro de rodillo mecánicamente conectado	
T3.12.1 Cualquier junta no soldada en cualquiera de los extremos de una abrazadera debe ser una junta de doble orejeta	
T3.12.2 Si se usan sujetadores roscados, se consideran sujetadores críticos y deben cumplir con T10.1.	
T3.12.3 Los extremos de varilla esféricos están prohibidos.	
T3.12.4 Las juntas dobles deben incluir un dispositivo de tapado 	
T3.12.5 En una unión de doble orejeta, cada lengüeta debe tener un grosor de al menos 4,5 mm y el pasador o perno debe estar	
Grado métrico de 10mm 8.8 mínimo. Los orificios de fijación en las orejetas y en los refuerzos adjuntos deben encajar perfectamente con el pasador o el perno.	

T3.12.6 Para juntas con mangas, el manguito debe tener una longitud mínima de 38 mm a cada lado de la junta y debe ajustarse alrededor de los tubos de la base. El grosor de la pared del manguito debe ser al menos el de los tubos de arriostramiento. Los pernos deben ser de 6 mm de grado métrico 8.8 mínimo. Los orificios en los manguitos y tubos deben quedar ajustados con los pernos.		
## T3.13 Mamparo Delantero		
T3.13.1 Cualquier material alternativo utilizado para el mamparo frontal debe tener una resistencia al corte perimetral equivalente a una placa de acero de 1,5 mm de espesor.		
T3.13.2 Si el mamparo delantero es parte de una estructura compuesta y está modelado como una forma de "L", el EI del mamparo delantero sobre los ejes vertical y lateral debe ser equivalente a un tubo de acero que cumpla con los requisitos para el mamparo delantero. La longitud de la sección perpendicular al mamparo puede ser de un máximo de 25 mm medido desde la cara posterior del mamparo.		
## T3.14 Soporte de mamparo delantero		
T3.14.1 El mamparo frontal debe apoyarse de regreso al aro frontal por un mínimo de tres tubos en cada lado; un miembro superior, un miembro inferior y arriostramiento diagonal para proporcionar triangulación.		
• El miembro de soporte superior debe estar unido al mamparo delantero un máximo de 50 mm por debajo de la superficie más alta del mamparo delantero, y debe estar unido al aro frontal un máximo de 50 mm por debajo del miembro de impacto lateral superior. Si el punto de unión del miembro superior es superior a 100 mm por encima del miembro de impacto del lado superior, se requiere un refuerzo triangulado nodo a nodo para transferir la carga al aro principal.		
• El miembro de soporte inferior debe estar unido a la base del mamparo frontal y a la base del aro frontal.		
• El refuerzo diagonal debe triangular los miembros de soporte superior e inferior nodo a nodo.		

T3.14.2 Si el soporte del mamparo delantero es parte de una estructura compuesta, debe tener un EI equivalente a la suma del EI de los seis tubos de acero de referencia que reemplaza.		
T3.14.3 El EI del lado vertical de la estructura de soporte del mamparo frontal debe ser equivalente al menos al EI de un tubo de acero de referencia que reemplaza.		
T3.14.4 La resistencia al corte perimetral del laminado monocasco en la estructura de soporte del tabique frontal debe ser de al menos 4kN.		
## T3.15 Estructura de impacto lateral		
T3.15.1 La estructura de impacto lateral debe constar de al menos tres tubos de acero, ver T3.2, a cada lado de la cabina.		
• El miembro superior debe conectar el aro principal y el aro delantero. Debe estar a una altura entre 240 mm y 320 mm por encima del punto interior más bajo del chasis entre el aro delantero y el principal.		
• El miembro inferior debe conectar la parte inferior del aro principal y la parte inferior del aro delantero.		
• El miembro diagonal debe triangular el miembro superior e inferior entre los aros nodo a nodo.		
T3.15.2 Si la estructura de impacto lateral es parte de una estructura compuesta, se requiere lo siguiente:		

• La región que está longitudinalmente hacia delante del aro principal y detrás del aro delantero, y vertical desde la superficie inferior del chasis hasta 320 mm por encima del punto interior más bajo del chasis entre el aro delantero y el principal, debe tener un EI igual al acero de tres líneas de base (Tubos que reemplaza).		
• La estructura de impacto lateral vertical debe tener una EI equivalente a dos tubos de acero de línea de base, y la mitad del piso horizontal debe tener una EI equivalente a un tubo de acero de línea de base.		
• La estructura de impacto lateral vertical debe tener una energía absorbida equivalente a dos tubos de acero de línea de base.		
• La resistencia al corte del perímetro debe ser de al menos 7.5kN.		
## T3.16 Accesorios de estructura primaria empernados		
T3.16.1 Si dos partes de la estructura primaria están atornilladas entre sí, cada punto de unión entre las dos partes debe poder transportar una carga de 30kN en cualquier dirección.		
T3.16.2 Los datos obtenidos de la prueba de resistencia al corte del perímetro del laminado deben usarse para demostrar que se proporciona un área de corte adecuada.		
T3.16.3 Cada punto de conexión requiere un mínimo de dos pernos 8.8 de 8 mm de grado métrico y placas de refuerzo de acero con un grosor mínimo de 2 mm.		
T3.16.4 Para la fijación del refuerzo del aro delantero, del refuerzo del aro principal y del soporte del refuerzo del aro principal a la estructura primaria, el uso de un perno de 8.8 métricas de 10 mm es suficiente, si el perno está en la línea central del tubo.		
T3.16.5 Cuando se usan uniones atornilladas dentro de la estructura primaria, no se permite el aplastamiento del material del núcleo laminado.		

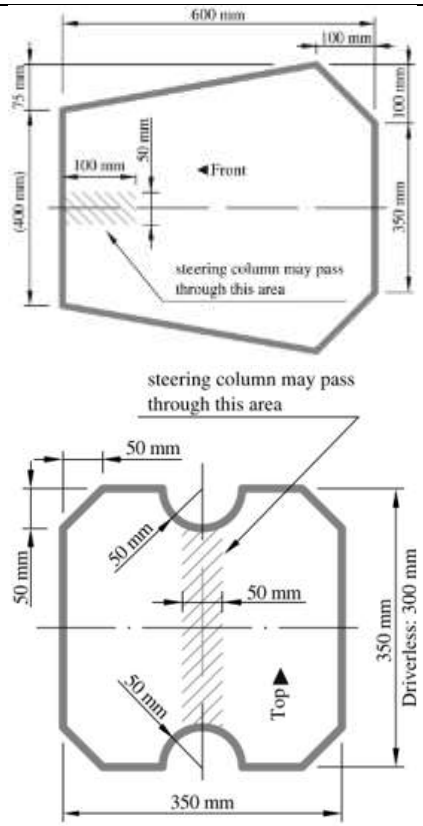
T3.17 Atenuador de Impacto (IA)	
T3.17.1 Cada vehículo debe estar equipado con un IA.	
T3.17.2 La IA debe ser:	
• Instalado delante del mamparo frontal.	
• Al menos 100 mm de altura y 200 mm de ancho para una distancia mínima de 200 mm hacia delante del mamparo frontal.	
• Incapaz de penetrar en el mamparo frontal en caso de impacto.	
• Fijado de forma segura y directa a la AIP.	
• No forma parte de la carrocería no estructural.	
• Diseñado con una sección frontal cerrada.	
• No puede ser más ancho o más alto que el AIP.	
T3.17.3 En todos los vehículos, debe integrarse un AIP de acero sólido de 1.5 mm o de aluminio sólido de 4.0 mm en el IA.	
• Si el IA y AIP (conjunto de IA) están atornillados al mamparo delantero, debe ser del mismo tamaño que las dimensiones exteriores del mamparo frontal.	
• Si está soldado al mamparo frontal, debe extenderse al menos hasta la línea central del tubo del mamparo frontal en todas las direcciones.	
• El AIP no debe extenderse más allá de los bordes exteriores del mamparo frontal.	
T3.17.4 Se permiten diseños de AIP alternativos si se demuestra la equivalencia a T3.17.3, ya sea mediante pruebas físicas como en T3.19.2 o una prueba de flexión de 3 puntos y una prueba de corte perimetral como en T3.5. Estas pruebas deben al menos demostrar que:	
• El AIP no falla bajo una carga de flexión estática de 120 kN distribuida uniformemente sobre 150 mm de longitud.	
• La resistencia al corte del perímetro es suficiente, de modo que cada accesorio pueda soportar una fuerza mínima de 20kN en cualquier dirección.	
T3.17.5 Si el ensamblaje de IA no es integral con el chasis, es decir, está soldado, un mínimo de ocho pernos de 8.8 métricos de grado 8.8 deben sujetar el ensamblaje de IA al mamparo frontal. El IA se puede unir al AIP mediante un mínimo de cuatro pernos de 8.8 métricos de grado 8,8. Los pernos se consideran sujetadores críticos y deben cumplir con T10.	
T3.17.6 La fijación del conjunto IA debe estar diseñada para proporcionar un camino de carga adecuado para cargas transversales y verticales en caso de impactos fuera del centro y fuera del eje. Los atenuadores de espuma	

segmentados deben tener los segmentos unidos entre sí para evitar deslizamientos o paralelogramos.	
T3.17.7 La unión del ensamble IA a una estructura monocasco requiere una "Hoja de cálculo de equivalencia estructural" aprobada por T3.6 que muestre una equivalencia de un mínimo de ocho tornillos de 8 mm de grado métrico 8.8.	
T3.17.8 Si un equipo utiliza el FSAE IA "estándar", y el borde exterior del mamparo delantero se extiende más allá del ensamble de IA en más de 25 mm en cualquier lado, una abrazadera diagonal o X hecha de tubería de acero de 25 mm x 1,5 mm, o un equivalente aprobado por T3.2, debe incluirse en el mamparo frontal.	
T3.17.9 Si se usa el IA estándar, pero no cumple con los límites de distancia de borde de T3.17.8 y no incluye un refuerzo diagonal, se deben realizar pruebas físicas para demostrar que el AIP no se desvía permanentemente más de 25 mm.	
## T3.18 Requisito de datos del atenuador de impacto	
T3.18.1 Todos los equipos deben enviar un informe de datos de IA utilizando la plantilla de Datos de Atenuador de Impacto (DIA) proporcionada en el sitio web de la competición.	
## T3.19 Requisitos de la prueba del atenuador de impacto	
T3.19.1 El ensamblaje de IA, cuando se monta en la parte delantera de un vehículo con una masa total de 300 kg y tiene un impacto en una barrera de impacto sólida y sin rendimiento con una velocidad de impacto de 7 m / s, debe cumplir los siguientes requisitos:	
• Desacelere el vehículo a una velocidad que no exceda de 20 g de promedio y 40 g de pico.	
• La energía absorbida en este evento debe cumplir o exceder 7350J.	
• Los equipos que utilizan el IA estándar no están obligados a enviar datos de prueba con su informe IAD, pero se deben incluir todos los demás requisitos.	
T3.19.2 Durante la prueba IA:	
• El IA debe estar unido al AIP utilizando el método de sujeción del vehículo previsto.	
• El ensamblaje de IA debe estar unido a una sección estructuralmente representativa del chasis previsto.	
• Debe haber al menos un espacio libre de 50 mm hacia atrás desde el AIP hasta el dispositivo de prueba.	
• Ninguna parte del AIP puede desviarse permanentemente más de 25 mm más allá de la posición del AIP antes de la prueba.	

T3.19.3 Los equipos que usan IAs (típicamente narices estructurales) unidas directamente al mamparo frontal, que abrevian el camino de carga a través de la mayor parte del AIP, deben realizar una prueba adicional. Esta prueba debe demostrar que el AIP puede soportar una carga de 120kN (300 kg multiplicado por 40 g), donde el aplicador de carga coincide con las dimensiones mínimas de IA.	
T3.19.4 Los vehículos con dispositivos aerodinámicos y / o sensores de percepción del entorno frente a la IA no deben exceder la desaceleración máxima de T3.19.1 para la combinación de su ensamblaje de IA y los objetos no aplastables. Cualquiera de los siguientes tres métodos puede usarse para probar que el diseño no excede los 120kN:	
• Pruebas físicas del ensamblaje de IA, incluidos los objetos no aplastables adjuntos frente al AIP.	
• Combinando la fuerza máxima de las pruebas físicas del ensamble IA con la carga de falla para el montaje de los objetos no aplastables, calculados a partir del corte del sujetador y / o el pandeo del enlace.	
• Combinando la carga máxima “estándar” IA de 95kN con la carga de falla para el montaje de los objetos no aplastables, calculados a partir de la cizalla del sujetador y / o la deformación del eslabón.	
T3.19.5 Las pruebas dinámicas (trineo, péndulo, torre de caída, etc.) de la IA solo se pueden realizar en una instalación de pruebas dedicada. Esta instalación puede ser parte de la universidad, pero debe ser supervisada por personal profesional. Los equipos no pueden diseñar sus propios aparatos de prueba dinámicos.	
T3.19.6 Al usar datos de aceleración de la prueba dinámica, la desaceleración promedio debe calcularse en base a los datos sin filtrar ni procesar. Si hay picos por encima del límite de 40 g en los datos, se puede aplicar un filtro Butterworth (−3dB a 100Hz) de 100Hz, 3er orden, paso bajo.	
## T3.20 Objetos no aplastables	
T3.20.1 Todos los objetos no aplastables (por ejemplo, baterías, cilindros maestros, depósitos hidráulicos) deben estar hacia atrás del plano más posterior del mamparo delantero y al menos 25 mm por detrás del AIP, excepto los sensores de percepción del entorno, los dispositivos aerodinámicos y sus montajes.	

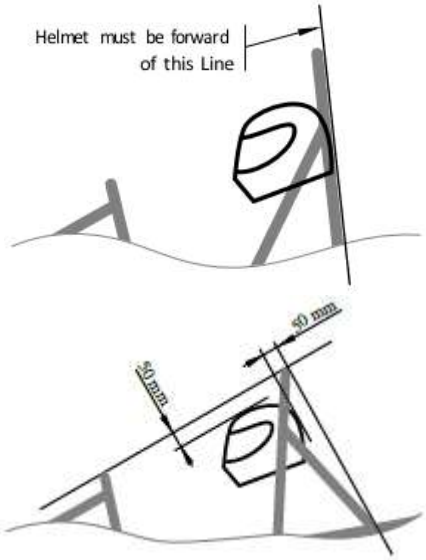
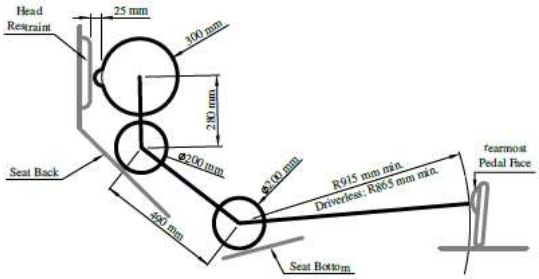
3.5.4. T4 COCKPIT

T4.1 Apertura de la cabina

T4.1.1 El tamaño de la abertura de la cabina debe ser suficiente para que la plantilla pase verticalmente desde la abertura debajo de la parte superior de la estructura de impacto lateral cuando se mantiene horizontal. La plantilla puede moverse hacia adelante y hacia atrás.		
T4.1.2 Si la estructura de impacto lateral no está hecha de tubos, la plantilla debe pasar hasta que esté 320 mm por encima del punto interior más bajo del chasis entre el aro delantero y el principal.		
T4.1.3 El volante, el asiento y todo el acolchado se pueden quitar para que quepa la plantilla. Cualquier otra pieza solo se puede quitar si está integrada con el volante.		

T4.2 Corte transversal interno

T4.2.1 La carlinga debe proporcionar una sección transversal interna libre suficiente para que la plantilla pase de la abertura de la carlinga a un punto 100 mm por detrás de la cara del pedal trasero en una posición inoperante. La plantilla se puede mover hacia arriba y hacia abajo. Los pedales ajustables deben estar en su posición más adelantada.	
T4.2.2 El volante y cualquier almohadilla que pueda quitarse sin el uso de herramientas mientras el conductor está sentado puede retirarse para que quepa la plantilla.	
T4.2.3 Los pies y las piernas del conductor deben estar completamente dentro de la estructura primaria cuando el conductor está sentado normalmente y los	

pies del conductor están tocando los pedales. En las vistas lateral y frontal, cualquier parte de los pies o piernas del conductor no debe extenderse por encima o por fuera de esta estructura.		
T4.3 95 percentil masculino		
T4.3.1 Cuando está sentado normalmente y restringido por el sistema de retención del conductor, el casco de un percentil 95 y el de todos los conductores del equipo deben: • Estar a un mínimo de 50mm de distancia de la línea recta dibujada desde la parte superior del aro principal hasta la parte superior del aro delantero. • Estar a un mínimo de 50mm de distancia de la línea recta dibujada desde la parte superior del aro principal hasta el extremo inferior del refuerzo del aro principal si el refuerzo se extiende hacia atrás. • No debe estar más atrás que la superficie trasera del aro principal si el refuerzo del aro principal se extiende hacia adelante.		
T4.3.2 El percentil 95 masculino está representado por una figura bidimensional que consta de dos círculos de 200mm de diámetro (uno que representa las caderas y las nalgas y el otro que representa la región del hombro) y un círculo de 300mm (que representa la cabeza con casco).		

T4.3.3 Los dos círculos de 200mm están conectados por una línea recta que mide 490mm. El círculo de 300mm está conectado por una línea recta que mide 280 mm con el círculo superior de 200mm.		
T4.3.4 La figura debe colocarse en el vehículo de la siguiente manera, ver figura 13: • El asiento ajustado a la posición más trasera. • Los pedales ajustados a la posición frontal. • El círculo inferior de 200mm colocado en la parte inferior del asiento. La distancia entre el centro del círculo y la cara de actuación más posterior de los pedales debe ser de 915mm como mínimo.		
T4.4 tubos laterales		
T4.4.1 Si hay algún miembro del chasis junto al conductor a la altura del cuello de cualquiera de los conductores en el equipo, se debe colocar un tubo metálico o una pieza de metal en el chasis para evitar que los hombros del conductor pasen por debajo de ese miembro del chasis.		
T4.5 Acoplamiento del arnés del conductor no soldado		
T4.5.1 Cualquier accesorio del arnés a un monocasco debe usar un perno de 8.8 métrico de 8.8 mm o dos pernos de 8.8 de 8.8 métrico de 8 mm (o pernos de una norma equivalente) y placas de soporte de acero con un grosor mínimo de 2 mm.		
T4.5.2 Si la conexión del arnés del conductor no está soldada a una estructura de acero, se debe probar que las conexiones para los cinturones de hombro y regazo pueden soportar una carga de 13 kN y los puntos de fijación de las bandas antisubmarinas pueden soportar una carga de 6.5kN.		
T4.5.3 Si los cinturones de seguridad y los cinturones antisubmarinos están conectados con una separación de menos de 100 mm, estos deben soportar una carga total de 19.5kN.		

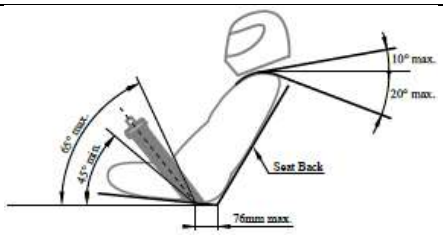
T4.5.4 La resistencia de los accesorios del cinturón de seguridad y del cinturón de hombro debe comprobarse mediante pruebas físicas en las que la carga requerida se aplique a un punto de conexión representativo con la bandeja y los soportes de fijación como en el chasis. Se deben cumplir los siguientes requisitos:	
• Los bordes del dispositivo de prueba que soporta la muestra deben estar a un mínimo de 125 mm del punto de aplicación de carga.	
• El ancho de la muestra de prueba del arnés para hombros no debe ser más ancho que la altura del panel del arnés para hombros utilizada para mostrar la equivalencia de la barra de montaje del arnés para hombros.	
• Los diseños con accesorios cerca de un borde libre pueden no ser compatibles con el borde libre durante la prueba.	
• Las cargas del arnés se deben probar en el peor de los casos para el rango de los ángulos especificados para el arnés del conductor.	
## T4.6 Asiento del conductor	
T4.6.1 En la vista lateral, el punto más bajo del asiento del conductor no debe extenderse por debajo de la cara superior del miembro de la estructura de impacto lateral más bajo, o tener un tubo (o tubos) longitudinal que cumpla con los requisitos de material para la estructura de impacto lateral (T3.2), pasando por debajo del punto más bajo del asiento.	
T4.6.2 Se debe proporcionar un aislamiento térmico adecuado para garantizar que el conductor no pueda entrar en contacto con ninguna parte del vehículo con una temperatura en la superficie superior a 60 ° C. El aislamiento puede ser externo a la cabina del piloto o incorporado con el asiento o firewall del conductor. El diseño debe abordar los tres tipos de transferencia de calor con los siguientes requisitos mínimos entre la fuente de calor y la parte que el conductor podría contactar:	
(a) Aislamiento de conducción por:	
(i) No hay contacto directo, o	
(ii) un material de aislamiento de conducción resistente al calor con un espesor mínimo de 8 mm.	
(b) Aislamiento por convección con un espacio de aire mínimo de 25 mm.	
(c) Aislamiento de radiación por:	
(i) Una pantalla térmica de metal sólido con un espesor mínimo de 0,4 mm o	
(ii) lámina o cinta reflectante cuando se combina con T4.6.2.a.ii.	
## T4.7 Cierre de piso	

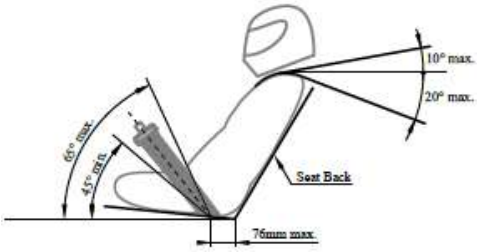
T4.7.1 Todos los vehículos deben tener un cierre de piso hecho de uno o más paneles, que separan al conductor del suelo.	
T4.7.2 La liquidación debe extenderse desde el mamparo frontal al firewall.	
T4.7.3 Los paneles deben estar hechos de un material sólido, no frágil.	
T4.7.4 Si se usan paneles múltiples, los espacios entre paneles no pueden exceder los 3 mm.	
T4.8 Cortafuegos	
T4.8.1 Un cortafuegos debe separar el compartimiento del conductor de todos los componentes del sistema de suministro de combustible, el aceite del motor, los sistemas de refrigeración por líquido, la batería de bajo voltaje y cualquier componente TS, consulte EV1.1.1.	
T4.8.2 El cortafuegos debe cubrir cualquier línea de visión entre las partes mencionadas en T4.8.1 y cualquier parte del conductor más alto debajo de un avión a 100 mm por encima de la parte inferior del casco.	
T4.8.3 El cortafuegos debe ser una superficie no permeable hecha de un material rígido y resistente al fuego, ver T1.2.1, que debe estar rígidamente montado en la estructura del vehículo.	
T4.8.4 Cualquier cortafuegos debe sellar completamente contra el paso de fluidos, especialmente a los lados y el piso de la cabina.	
T4.8.5 Los pases para el cableado, cables, etc. están permitidos si se utilizan ojales para sellar el paso.	
T4.8.6 Se pueden usar varios paneles para formar un cortafuegos, pero deben superponerse al menos 5 mm y sellarse en las juntas. Cualquier material de sellado no debe ser vital para la integridad estructural del cortafuegos.	
T4.8.7 [SOLO EV] El firewall del sistema de tracción entre el controlador y los componentes del sistema de tracción debe estar compuesto por dos capas:	
• Una capa, orientada hacia el lado del sistema de tracción, debe estar hecha de aluminio con un grosor de al menos 0,5 mm. Esta parte del firewall del sistema de tracción debe estar conectada a tierra de acuerdo con EV3.1.	
• La segunda capa, orientada hacia el conductor, debe estar hecha de un material aislante eléctrico e ignífugo, ver T1.2.1. La segunda capa no debe estar hecha de CFRP.	
• El grosor de la segunda capa debe ser suficiente para evitar que penetre en esta capa con un destornillador de 4 mm de ancho y 250 N de fuerza.	
• Una muestra del firewall del sistema de tracción debe presentarse en la inspección técnica.	

T4.8.8 [SOLO EV] Las piezas conductoras (excepto el chasis) no pueden sobresalir a través del firewall o deben estar aisladas adecuadamente en el lado del conductor.	
T4.8.9 [SOLO EV] Las partes TS fuera del sobre, ver EV4.4.3, no necesitan un firewall.	
T4.9 Accesibilidad de Controles	
T4.9.1 Todos los controles del vehículo deben operarse desde el interior de la cabina sin ninguna parte del conductor, por ejemplo. Manos, brazos o codos, al estar fuera de los planos verticales tangentes a la superficie más externa de la estructura de impacto lateral.	
T4.10 Visibilidad del conductor	
T4.10.1 El conductor debe tener una visibilidad adecuada hacia el frente y los lados del vehículo. Sentado en una posición de conducción normal, el conductor debe tener un campo de visión mínimo de 200 ° (un mínimo de 100 ° a cada lado). La visibilidad requerida se puede obtener si el conductor gira la cabeza y / o utiliza espejos.	
T4.10.2 Si se requiere que los espejos cumplan con la T4.10.1, deben permanecer en su lugar y ajustarse para permitir la visibilidad requerida en todos los eventos dinámicos.	
T4.11 Egreso del conductor	
T4.11.1 Todos los conductores deben poder salir hacia el costado del vehículo en menos de 5 segundos con el conductor en posición totalmente sentada, las manos en la posición de conducción en el volante conectado (en todas las posiciones de dirección posibles) y usar la Equipo del conductor como en T13.3. El tiempo de egreso se detendrá cuando el conductor tenga ambos pies en el suelo.	

3.5.5. T5 SISTEMA DE RESTRICCION DE CONTROLADOR	
T5.1 Definiciones	
T5.1.1 Sistema de 6 puntos: consta de un cinturón de regazo de dos piezas (ancho mínimo de 50 mm), dos tirantes (ancho mínimo de 75 mm) y dos correas para piernas o antisubmarinos (ancho mínimo de 50 mm).	
T5.1.2 Sistema de 7 puntos: igual que el sistema de 6 puntos, excepto que tiene tres correas antisubmarinas.	
T5.1.3 Posición de conducción vertical: posición con un respaldo del asiento inclinado a 30 ° o menos de la vertical, según se mide a lo largo de la línea que une los dos círculos de 200 mm de la plantilla masculina del percentil 95, según lo definido en T4.3 y posicionado según T4.3.4.	

T5.1.4 Posición de conducción reclinada: posición con un respaldo del asiento inclinado a más de 30 ° de la vertical, medida a lo largo de la línea que une los dos círculos de 200 mm de la plantilla masculina del percentil 95, según lo definido en T4.3 y posicionado por T4.3.4	
## T5.2 Cinturones - General	
T5.2.1 Todos los conductores deben usar un arnés de restricción de 6 puntos o 7 puntos que cumpla con las siguientes especificaciones:	
• Todos los sistemas de retención del conductor deben cumplir con la Especificación SFI 16.1, la Especificación SFI 16.5, la especificación FIA 8853/98 o la especificación FIA 8853/2016.	
• Los cinturones deben llevar las etiquetas fechadas apropiadas.	
• El material de todas las correas debe estar en perfecto estado.	
• Debe haber un solo cierre rápido tipo pestillo de metal a metal para todas las correas.	
• Todos los cinturones de regazo deben incorporar un ajustador de bloqueo de inclinación ("ajuste rápido"). Se recomienda un ajustador de bloqueo de inclinación en cada porción del cinturón de regazo. Se recomiendan cinturones de regazo con ajustadores de "pull-up" en lugar de ajustadores de "pull-down".	
• Los vehículos con una “posición de conducción reclinada” deben tener cinturones antisubmarinos con ajustadores de bloqueo de inclinación (“ajustadores rápidos”) o tener dos juegos de cinturones antisubmarinos instalados.	
• El arnés del hombro debe ser del "tipo sobre el hombro". Solo se permiten correas de hombro separadas (es decir, no se permiten correas de hombro tipo “Y”). Se permite la configuración de tipo "H".	
• Las correas del arnés para hombros deben pasar a través de los tres ajustadores de barra de acuerdo con las instrucciones del fabricante.	
• Cuando el conductor utiliza un dispositivo HANS, se permiten arneses de hombro de 50 mm de ancho certificados por la FIA.	
T5.2.2 Los arneses de especificaciones de SFI deben reemplazarse después del 31 de diciembre del segundo año posterior a la fecha de fabricación, como lo indica la etiqueta. Los arneses de especificaciones de la FIA deben reemplazarse después del 31 de diciembre del año marcado en la etiqueta.	
T5.2.3 El sistema de retención debe llevarse ajustado en todo momento.	
## T5.3 Instalación de correa, correa y arnés - General	
T5.3.1 El cinturón de seguridad, el arnés para hombros y la (s) correa (s) antisubmarina (s) deben estar firmemente montados en la estructura primaria.	

Esta estructura y cualquier guía o soporte para las correas deben cumplir con los requisitos mínimos de T3.2.	
T5.3.2 La pestaña o el soporte al que se adjunta el arnés debe tener:	
• Un área de sección transversal mínima de 60 mm2 de acero a cortar o fallar en tensión en cualquier punto de la pestaña, y	
• Un espesor mínimo de 1,6 mm.	
• Cuando los cinturones de seguridad y los cinturones antisubmarinos usan el mismo punto de sujeción, se debe cortar un área de sección transversal mínima de 90 mm2 de acero si falla la tensión en cualquier punto de la pestaña.	
• Donde los soportes se sujetan al chasis, se deben usar dos sujetadores de 6 mm de grado 8.8 de grado métrico o más fuertes.	
T5.3.3 Los arneses, correas y correas no deben pasar a través de un firewall, es decir, todos los puntos de conexión del arnés deben estar en el lado del conductor de cualquier firewall.	
T5.3.4 La conexión del sistema de retención del conductor a una estructura monocasco requiere un SES aprobado por T3.6.	
T5.4 Montaje del cinturón de regazo	
T5.4.1 El cinturón de regazo debe pasar alrededor del área pélvica debajo de las espinas ilíacas superiores anteriores (los huesos de la cadera).	
T5.4.2 Los cinturones de seguridad no deben colocarse sobre los lados del asiento. Los cinturones de seguridad deben pasar por el asiento en la parte inferior de los lados del asiento para maximizar la envoltura de la superficie pélvica y continuar en línea recta hasta el punto de anclaje.	
T5.4.3 Cuando las correas o el arnés pasan a través de un agujero en el asiento, el asiento debe estar enrollado o con ojales para evitar el roce de las correas.	
T5.4.4 En una vista lateral, el cinturón de regazo debe poder girar libremente mediante el uso de un perno de hombro o un accesorio de perno de ojo.	
T5.4.5 Con una "posición de conducción vertical", en vista lateral, el cinturón de regazo debe estar en un ángulo de entre 45 ° y 65 ° con respecto a la horizontal.	
T5.4.6 Con una "posición de conducción reclinada", en vista lateral, el cinturón de regazo debe estar entre un ángulo de 60 ° y 80 ° con respecto a la horizontal.	
T5.4.7 La línea central del cinturón de regazo en la parte inferior del asiento debe estar entre 0 mm y 76 mm por delante del respaldo del 	

asiento a la unión inferior del asiento.		
T5.5 Arnés De Hombro		
T5.5.1 El arnés para hombros debe montarse detrás del conductor en una estructura que cumpla con los requisitos de la estructura primaria. Sin embargo, no puede montarse en el refuerzo del aro principal o en la estructura de la operadora sin un refuerzo adicional para evitar que las cargas se transfieran al refuerzo del aro principal.		
T5.5.2 Si el arnés está montado en un tubo que no está recto, las uniones entre este tubo y la estructura en la que está montado deben reforzarse, en vista lateral, mediante tubos de triangulación para evitar la rotación torsional del tubo de montaje del arnés. Se requieren cálculos de apoyo. Método de análisis: use la carga de 7 kN por accesorio y el rango de ángulos en T5.5.5, calcule que las tensiones de triangulación de la barra del arnés del hombro doblado son menores que las del rendimiento de soldadura T3.2.4 para flexión y corte combinados y no falla en el pandeo de la columna. Si el equipo decide no realizar el análisis de fuerza, se aplicará T3.2.6.		
T5.5.3 La resistencia de cualquier tubo de refuerzo de la barra del arnés para hombros debe probarse en la pestaña correspondiente de la presentación de SES del equipo.		
T5.5.4 Los puntos de montaje del arnés para hombros deben estar separados entre 180 mm y 230 mm.		
T5.5.5 Desde los hombros del conductor hacia atrás hasta el punto de montaje o la guía estructural, el arnés para hombros debe estar entre 10 ° sobre la horizontal y 20 ° sobre la horizontal.		
T5.6 Montaje de cinturón anti-submarino		
T5.6.1 Las correas antisubmarinas de un arnés de 6 puntos deben montarse en una de las siguientes configuraciones:		
• Con las correas bajando verticalmente desde la ingle, o inclinadas hasta 20 ° hacia atrás. Los puntos de anclaje deben estar separados aproximadamente 100 mm.		
• Con los puntos de anclaje en la estructura primaria en o cerca de los anclajes del cinturón de regazo, el conductor sentado en los cinturones antisubmarinos y los cinturones que suben alrededor de la ingle hasta la hebilla de liberación.		

T5.7 Reposacabezas	
T5.7.1 Se debe colocar un reposacabezas en el vehículo para limitar el movimiento hacia atrás de la cabeza del conductor.	
T5.7.2 El reposacabezas debe:	
• Sea vertical o casi vertical en la vista lateral.	
• Estar acolchado con un material absorbente de energía con un grosor mínimo de 40 mm que cumpla con el estándar SFI 45.2, o que esté incluido en la lista técnica de la FIA n ° 17 como material tipo B para automóviles monoplazas.	
• Tener una anchura y altura mínima de 150mm.	
• Ubicarse de manera que para cada conductor:	
- La restricción no está a más de 25 mm de la parte posterior del casco del conductor, con el conductor en su posición de conducción normal.	
- El punto de contacto de la parte posterior del casco del conductor en el reposacabezas no es inferior a 50 mm desde cualquier borde del reposacabezas.	
T5.7.3 El reposacabezas, su acoplamiento y su montaje deben soportar una fuerza de 890N aplicada hacia atrás en cualquier punto de su superficie.	
T5.8 Roll Bar Padding	
T5.8.1 Cualquier parte de la barra antivuelco, el refuerzo de la barra antivuelco o el chasis con el que podría estar en contacto el casco del conductor debe cubrirse con un grosor mínimo de 12 mm de acolchado que cumpla con la especificación SFI 45.1 o FIA 8857-2001.	
T5.9 Protección de la pierna del conductor	
T5.9.1 Todos los componentes móviles de la suspensión y la dirección y otros bordes afilados dentro de la cabina entre el aro delantero y un plano vertical de 100 mm hacia atrás de los pedales, deben estar protegidos con material sólido.	
T5.9.2 Las cubiertas sobre la suspensión y los componentes de la dirección deben ser removibles para permitir la inspección de los puntos de montaje.	

3.5.6. T10 CINTURONES	
T10.1 Cinturones críticos	
T10.1.1 Los cinturones críticos se definen como pernos, tuercas y otros sujetadores utilizados en la estructura primaria, la dirección, el frenado, el arnés	

del conductor, los sistemas de suspensión y aquellos específicamente designados como sujetadores críticos en la regla respectiva.	
T10.1.2 Todos los cinturones críticos roscados deben cumplir o superar el grado métrico 8.8 o equivalente.	
T10.1.3 Todos los cinturones críticos roscados deben ser del tipo de pernos hexagonales (ISO 4017, ISO 4014) o tornillos de cabeza hueca (ISO 4762, DIN 7984, ISO 7379) incluyendo sus versiones de rosca de paso fino. Se permiten sujetadores alternativos si el equipo puede mostrar equivalencia.	
T10.1.4 Los pernos pueden acortarse en longitud siempre que se cumpla con T10.2.3.	
T10.1.5 Cualquier unión atornillada en la estructura primaria que use lengüetas o soportes, debe tener una relación de distancia de borde "e / D" de 1.5 o mayor. "D" es igual al diámetro del orificio y "e" es igual a la distancia desde la línea central del orificio hasta el borde libre más cercano de la pestaña o el soporte. No se requiere que ninguna pestaña que adjunte miembros de suspensión a la estructura primaria cumpla con esta regla.	
## T10.2 Cinturones de seguridad	
T10.2.1 Todos los cinturones críticos deben protegerse contra aflojamientos involuntarios mediante el uso de mecanismos de bloqueo positivos.	
T10.2.2 Los siguientes métodos son aceptados como mecanismos de bloqueo positivo:	
• Instalación correcta del cableado de seguridad.	
• Pasadores de chaveta.	
• Tuercas de seguridad de nylon (ISO 7040, ISO 10512, EN 1663 o equivalentes) para ubicaciones de baja temperatura (80 ° C o menos).	
• Tuercas de bloqueo de torsión predominantes (DIN 980, ISO 7042 o equivalentes, y tuercas de chorro o tuercas K).	
• Placas de bloqueo.	
• Limpiadores de lengüetas.	
• Cualquier mecanismo de bloqueo basado en pretensado o un adhesivo no se considera un mecanismo de bloqueo positivo.	
T10.2.3 Un mínimo de dos roscas completas deben sobresalir desde cualquier contratuerca.	
T10.2.4 Todos los extremos de varilla esféricos y los rodamientos esféricos en la dirección o la suspensión deben estar en doble cizallamiento o capturados por tener una cabeza de tornillo / perno o arandela con un diámetro exterior mayor que el diámetro interior del alojamiento del rodamiento esférico.	

T10.2.5 Los extremos de las barras de acoplamiento ajustables deben estar restringidos con una contratuerca para evitar que se aflojen.	

3.6. Anexo VI – Cálculo de secciones de tubos mínimas

En este anexo se exponen los cálculos de las dimensiones mínimas de los tubos para que cumplan con la normativa.

Las limitaciones a las que están marcadas, se presentan a continuación:

Tabla 20. Dimensiones mínimas según elemento. Fuente: Normativa FS-Germany

Item or application	Minimum wall thickness	Minimum cross sectional area	Minimum area moment of inertia
Main and front hoops, shoulder harness mounting bar	2.0 mm	175 mm^2	11 320 mm^4
Side impact structure, front bulkhead, roll hoop bracing, driver's restraint harness attachment (except as noted above)	1.2 mm	119 mm^2	8509 mm^4
Front bulkhead support, main hoop bracing supports	1.2 mm	91 mm^2	6695 mm^4

Como se puede ver, se tratan de tubos huecos por lo que las expresiones que las definen, son:

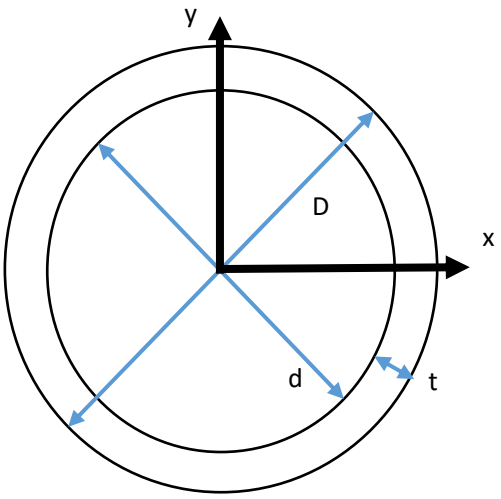


Ilustración 56. Croquis dimensiones sección circular. Fuente: propia

$$Sección\ transversal:$$

$$A_c = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \quad Ec: 4.1$$

$$Momento\ de\ inercia\ de\ la\ seccion\ transversal:$$

$$Ix = Iy = I = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4) \qquad Ec: 4.2$$

$$Espesor: \quad t = \frac{D - d}{2} \qquad Ec: 4.3$$

Para conocer mejor que diámetros comerciales son posibles empelar, se combinó el catálogo de un fabricante, en este caso Tubasol, en el cual se determina la sección transversal y el momento de inercia de dicha sección para posteriormente,

clasificar si validez con la ayuda de una hoja Excel. Un ejemplo de esta hoja se muestra a continuación:

										Condiciones		
		Di (in)	Di (mm)	ri (mm)	e (mm)	re (mm)	De (mm)	I (mm4)	Area (mm2)	A	B	C
	16		15	7,5	0,5	8	16	731,9420009	24,34734307	NO	NO	NO
			14,4	7,2	0,80	8	16	1106,323163	38,20176667	NO	NO	NO
			14	7	1,00	8	16	1331,249887	47,1238898	NO	NO	NO
			13,6	6,8	1,20	8	16	1537,701533	55,79468553	NO	NO	NO
			13	6,5	1,50	8	16	1815,006068	68,32964022	NO	NO	NO
			12,4	6,2	1,80	8	16	2056,460162	80,29910823	NO	NO	NO
			12	6	2,00	8	16	2199,114858	87,9645943	NO	NO	NO
			11	5,5	2,5	8	16	2498,30247	106,0287521	NO	NO	NO

Ilustración 57. Extracto tabla Excel. Fuente: propia

El orden de las condiciones corresponde con el orden de la tabla de las limitaciones de la normativa.

Aun así, se estudia como varía las dimensiones de los tubos para las condiciones dadas para establecer un diámetro del cual empezar a iterar.

Calculando primero el diámetro exterior mínimo para cumplir el requerimiento de inercia, se tiene:

$$Condición\ 1:\ I = \frac{\pi}{64}(D^4 - (D - 2t)^4) \rightarrow$$

$$\rightarrow I = \frac{\pi}{64}(D^4 - (\mathrm{D}^4 - 8 \cdot \mathrm{D}^3 \cdot \mathrm{t} + 24 \cdot \mathrm{D}^2 \cdot \mathrm{t}^2 - 32 \cdot \mathrm{D} \cdot \mathrm{t}^3 + 16 \cdot \mathrm{t}^4)) \rightarrow$$

$$\rightarrow I = \frac{\pi}{64}(D^4 - \mathrm{D}^4 + 8 \cdot \mathrm{D}^3 \cdot \mathrm{t} - 24 \cdot \mathrm{D}^2 \cdot \mathrm{t}^2 + 32 \cdot \mathrm{D} \cdot \mathrm{t}^3 - 16 \cdot \mathrm{t}^4) \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{I \cdot 64}{\pi} = 8 \cdot \mathrm{D}^3 \cdot \mathrm{t} - 24 \cdot \mathrm{D}^2 \cdot \mathrm{t}^2 + 32 \cdot \mathrm{D} \cdot \mathrm{t}^3 - 16 \cdot \mathrm{t}^4 \rightarrow$$

$$\boxed{\rightarrow 8 \cdot \mathrm{D}^3 \cdot \mathrm{t} - 24 \cdot \mathrm{D}^2 \cdot \mathrm{t}^2 + 32 \cdot \mathrm{D} \cdot \mathrm{t}^3 - 16 \cdot \mathrm{t}^4 - \frac{I \cdot 64}{\pi} = 0 \qquad Ec: 4.4}$$

Para el caso del área de la sección transversal, se tiene:

$$Condición\ 2:\quad A_c = \frac{\pi}{4}(D^2 - (D - 2t)^2) \rightarrow$$

$$\rightarrow A_c = \frac{\pi}{4}(D^2 - (\mathrm{D}^2 - 2 \cdot \mathrm{D} \cdot 2 \cdot \mathrm{t} + 4 \cdot \mathrm{t}^2)) \rightarrow$$

$$\rightarrow A_c = \frac{\pi}{4}(D^2 - \mathrm{D}^2 + 4 \cdot \mathrm{D} \cdot \mathrm{t} - 4 \cdot \mathrm{t}^2) \rightarrow$$

$$\rightarrow A_c = \frac{\pi}{4}(4 \cdot \mathrm{D} \cdot \mathrm{t} - 4 \cdot \mathrm{t}^2) \rightarrow$$

$$\rightarrow A_c = \pi\,(\mathrm{D} \cdot \mathrm{t} - \mathrm{t}^2) \rightarrow$$

$$\boxed{\rightarrow\ \mathrm{D} = \frac{\frac{A_c}{\pi} + \mathrm{t}^2}{\mathrm{t}} \qquad Ec: 4.5}$$

Sustituyendo el espesor, t, el área de la sección transversal, Ac, y la inercia de dicha sección, I, se tiene la siguiente tabla:

Tabla 21. Dimensiones mínimas según condición para cada tipo. Fuente: propia

Tipo de artículo	Requerimientos mínimos			Condición 1		Condición 2	
	t (mm)	Ac (mm^2)	I (mm^4)	D (mm)	d (mm)	D (mm)	d (mm)
1	2	175	11320	26.28	22.28	29.85	25.85
2	1.2	119	8509	27.42	25.02	32.77	30.37
3	1.2	91	6695	25.4	22	25.34	22.94

Para simplificar la cantidad de tubos que hay que analizar y añadir en el modelo 3D, se decide que es mejor tomar un mismo tubo, pero con diferente espesor según su aplicación. El diámetro exterior seleccionado es de 28mm con un espesor 2,5mm para el tipo 1 y espesor 1,5mm para los tipos 2 y 3. Al agrupar estos últimos, se consigue simplificar más el proceso.

Aunque no lo parezca, estos tubos cumplen con los requerimientos:

Tabla 22. Dimensiones mínimas de comienzo. Fuente: propia

Tipo de artículo	D (mm)	d (mm)	t (mm)	Ac (mm^2)	I (mm^4)
1	28	23	2.5	200,28	16435,19
2 y 3	28	25	1.5	124,88	10997,1

Posteriormente, para las iteraciones, se seleccionan perfiles cuya inercia sea superior al del perfil seleccionado anteriormente, e intentando que la masa por metro de perfil sea lo menor posible, así como su área. De esta forma, se consigue una estructura más rígida y más ligera.

Así, se muestra las secciones posibles para, por ejemplo, la primera iteración.

- Tipo 1

Tabla 23. Dimensiones válidas para tipo 1. Fuente: propia

	D_comercial_	Di_(mm)	e_(mm)	De_(mm)	I_(mm4)	Area_(mm2)	Masa_(kg)
88	30	26.000	2.000	30	17,329.025	175.929	1.381
102	32	28.000	2.000	32	21,299.998	188.496	1.480
76	28	23.000	2.500	28	16,435.193	200.277	1.572
116	35	31.000	2.000	35	28,328.526	207.345	1.628
89	30	25.000	2.500	30	20,586.022	215.984	1.695

- Tipo 2 y 3

Tabla 24. Dimensiones válidas para tipo 2 y 3. Fuente: propia

	D_comercial_	Di_(mm)	e_(mm)	De_(mm)	I_(mm4)	Area_(mm2)	Masa_(kg)
73	28	25.000	1.500	28	10,997.096	124.878	0.980
113	35	32.600	1.200	35	18,219.577	127.423	1.000
86	30	27.000	1.500	30	13,673.733	134.303	1.054
127	38	35.600	1.200	38	23,509.649	138.733	1.089
100	32	29.000	1.500	32	16,753.279	143.728	1.128

Para simplificar el proceso de selección de las dimensiones, se realizó un script en Python que lee el Excel creado (convertido en CSV). A continuación, se presenta dicho Script:

```
Uso_datos='Normativa' #'Normativa' o 'SolidWorks'


#Condiciones mínimas Normativa

I_min_A=11320 #mm4

I_min_BC=8509 #mm4

A_min_A=175 #mm2

A_min_BC=119 #mm2


#Datos perfiles SolidWorks

D_A=28 #mm

D_BC=28 #mm

e_A=2.5 #mm

e_BC=1.5 #mm


import pandas as pd

import numpy as np

import os


pd.options.display.max_columns=1000

pd.options.display.float_format='{:,.3f}'.format


DATA_FOLDER='data/'
```

```
#print(os.getcwd())
LIST_DATA=os.listdir(DATA_FOLDER)
#print(LIST_DATA)

CSV_LIST = [file for file in LIST_DATA if file =='Calculo seccion tubos.csv']
#print(CSV_LIST)

df = pd.read_csv(DATA_FOLDER + CSV_LIST[0])
df.columns=df.columns.str.replace(' ', '_')
print("Shape:  ", df.shape, '\n\n\n')
print(df.head(5))

porcent_null_before=(df.isnull().sum() / df.shape[0])*100
porcent_null_before

df_Solid_A=df[(df['De_(mm)'] == D_A) & (df['e_(mm)'] == e_A)]
df_Solid_A_filtered=df_Solid_A.filter(items=['I_(mm4)','Area_(mm2)'])
df_Solid_A_filtered=df_Solid_A_filtered.to_numpy()
df_Solid_A_filtered=df_Solid_A_filtered[0]
I_A_Solid=df_Solid_A_filtered[0]
A_A_Solid=df_Solid_A_filtered[1]

df_Solid_BC=df[(df['De_(mm)'] == D_BC) & (df['e_(mm)'] == e_BC)]
df_Solid_BC_filtered=df_Solid_BC.filter(items=['I_(mm4)','Area_(mm2)'])
df_Solid_BC_filtered=df_Solid_BC_filtered.to_numpy()
df_Solid_BC_filtered=df_Solid_BC_filtered[0]

I_BC_Solid=df_Solid_BC_filtered[0]
A_BC_Solid=df_Solid_BC_filtered[1]
```

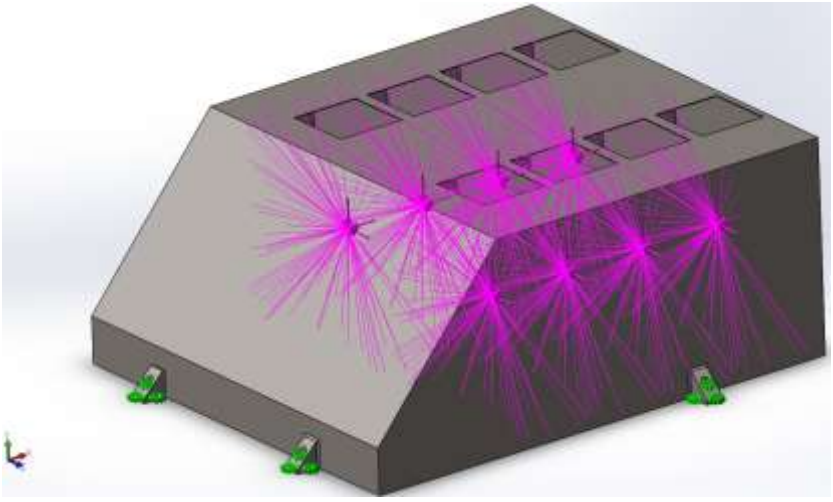
```
if Uso_datos == 'Normativa':
    I_A=I_min_A
    I_BC=I_min_BC
    A_A=A_min_A
    A_BC=A_min_BC

elif Uso_datos== 'SolidWorks':
    I_A=I_A_Solid
    I_BC=I_BC_Solid
    A_A=A_A_Solid
    A_BC=A_BC_Solid

else:
    print("Uso de datos inválido")

df_filtered_A=df[(df['I_(mm4)'] >= I_A) & (df['Area_(mm2)'] >= A_A) & (df['A'] == 'SI')]
df_filtered_A=df_filtered_A.drop(columns=['ri_(mm)','re_(mm)','A','B','C','Validez','Longitud_(mm)','Volumen_(m3)','Densidad_(kg/m3)'])
df_filtered_A=df_filtered_A.sort_values('Masa_(kg)')
print("Shape:  ",df_filtered_A.shape, '\n\n\n')
print(df_filtered_A.head(5))

df_filtered_BC=df[(df['I_(mm4)'] >= I_BC) & (df['Area_(mm2)'] >= A_BC) & (df['B'] == 'SI') & (df['C'] == 'SI')]
df_filtered_BC=df_filtered_BC.drop(columns=['ri_(mm)','re_(mm)','A','B','C','Validez','Longitud_(mm)','Volumen_(m3)','Densidad_(kg/m3)'])
df_filtered_BC=df_filtered_BC.sort_values('Masa_(kg)')
print("Shape:  ",df_filtered_BC.shape, '\n\n\n')
print(df_filtered_BC.head(5))
```

3.7. Anexo VII – Diseño

En este anexo, se presentan los resultados de las simulaciones que se han realizado, así como sus comentarios. Se divide en dos partes, el estudio de la caja de baterías y el estudio del chasis. Éste último, refleja los diferentes conceptos de chasis que se han empleado con el objetivo de reducir tensiones.

3.7.1. Estudio de la caja de baterías

Aplicando las condiciones de contorno nombrados en el apartado “modelado y condiciones de contorno” de este Trabajo Final de Master, se considera el caso de un impacto frontal en el cual la caja de baterías es acelerada hacia el piloto con los valores indicados en la normativa. La siguiente imagen muestra este supuesto:



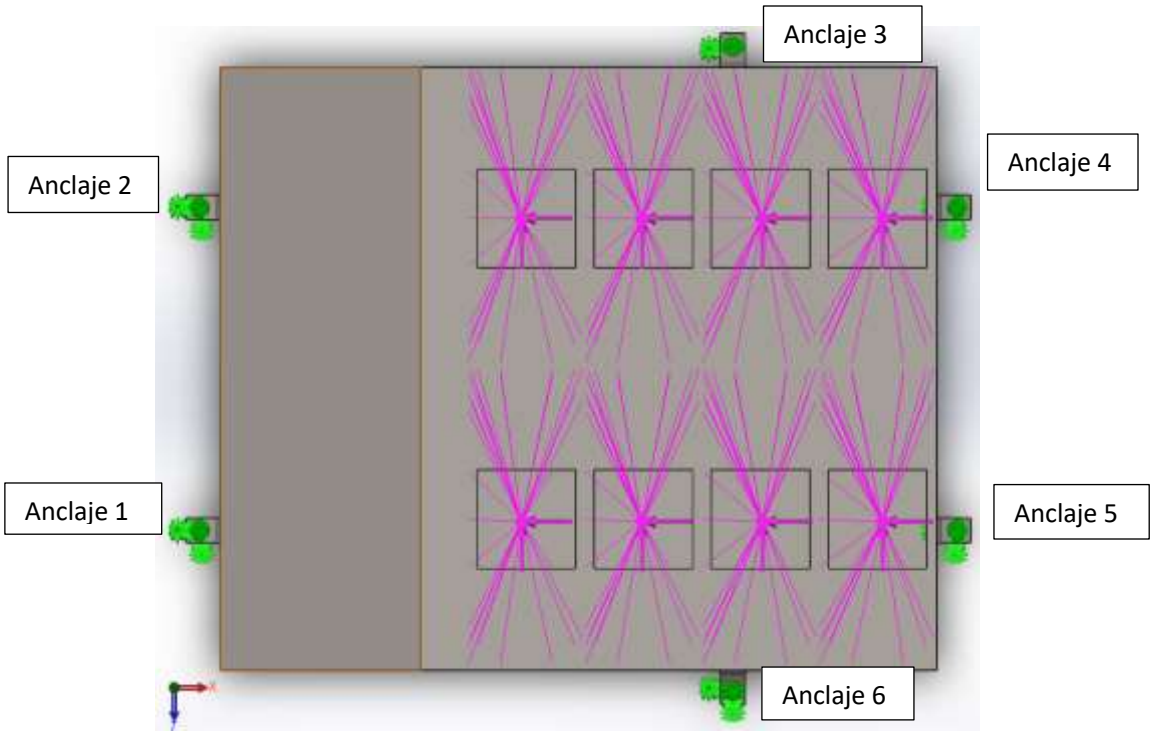


Ilustración 58. Condiciones de contorno del acumulador y denominación anclajes. Fuente: propia

Sabiendo que la masa de la pila de batería y el número de pilas por celda, se puede saber la masa de cada una de las celdas que conforman la caja. El valor de cada fuerza viene dado por esta masa multiplicada por la aceleración. Esto es:

- Masa de pila de batería: 0.170 kg
- Numero de pilas por celda: 27
- Masa celda de baterías: 4.59 kg

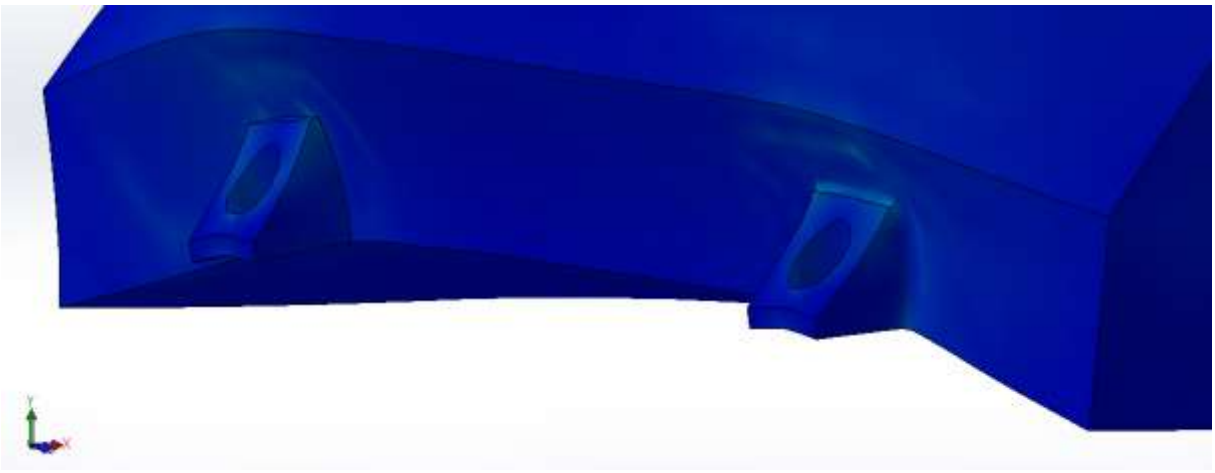
Tabla 25. Fuerzas aplicadas. Fuente: propia

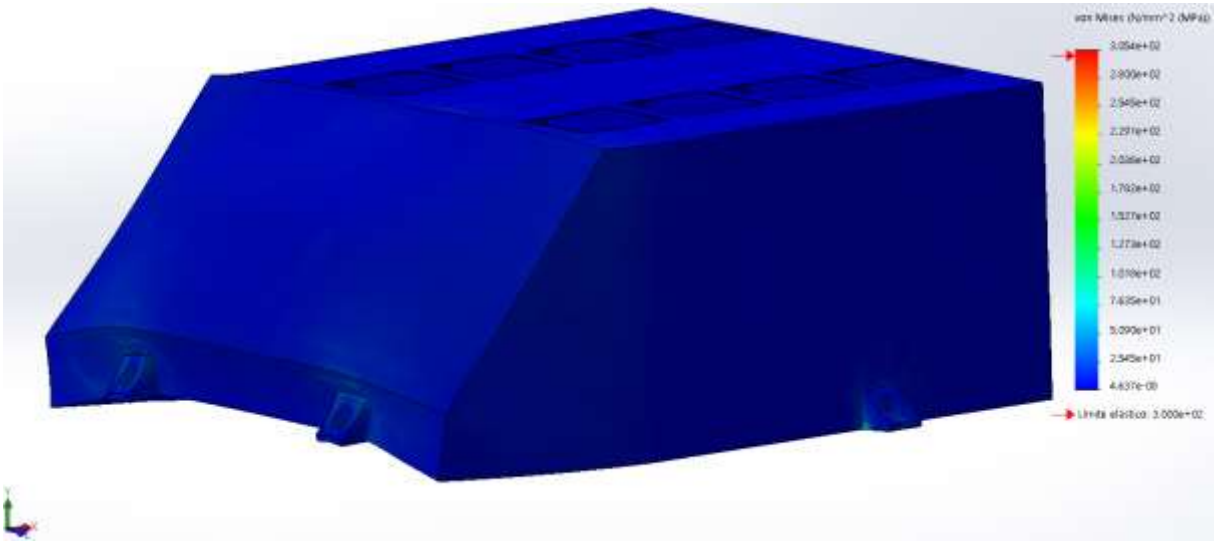
	Eje x	Eje y	Eje z
Aceleración (m/s^2)	40g	20g	40g
Fuerza (N)	-1801.12	-900.56	-1801.12

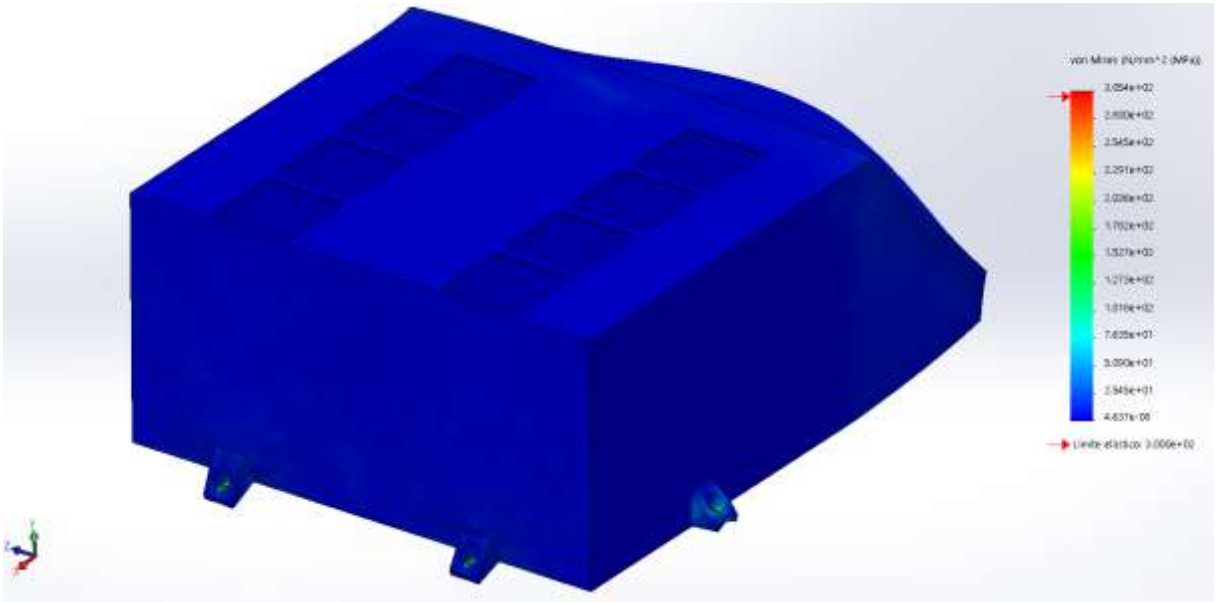
Nota: 1g =9.81m/s^2

Los resultados de las simulaciones que se obtienen son, considerando un material acero 1010 estirado en frio con un límite elástico de 300MPa (su 90% es 274.5MPa), aproximadamente:

- Tensiones




von Mises (N/mm^2 (MPa))
3.054e+02
2.800e+02
2.545e+02
2.291e+02
2.036e+02
1.782e+02
1.527e+02
1.273e+02
1.018e+02
7.635e+01
5.090e+01
2.545e+01
4.637e-08
Límite elástico: 3.000e+02



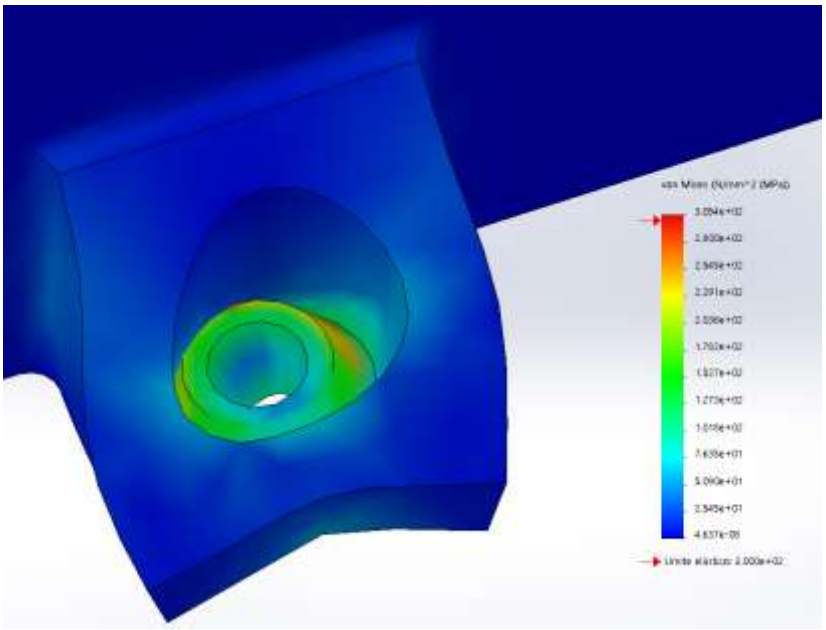


Ilustración 59. Tensiones acumulador frontal (1), detalle anclajes frontales (2), Tensiones acumulador trasero (3), Detalle tensión anclaje más desfavorable (4). Fuente: propia

- Desplazamientos

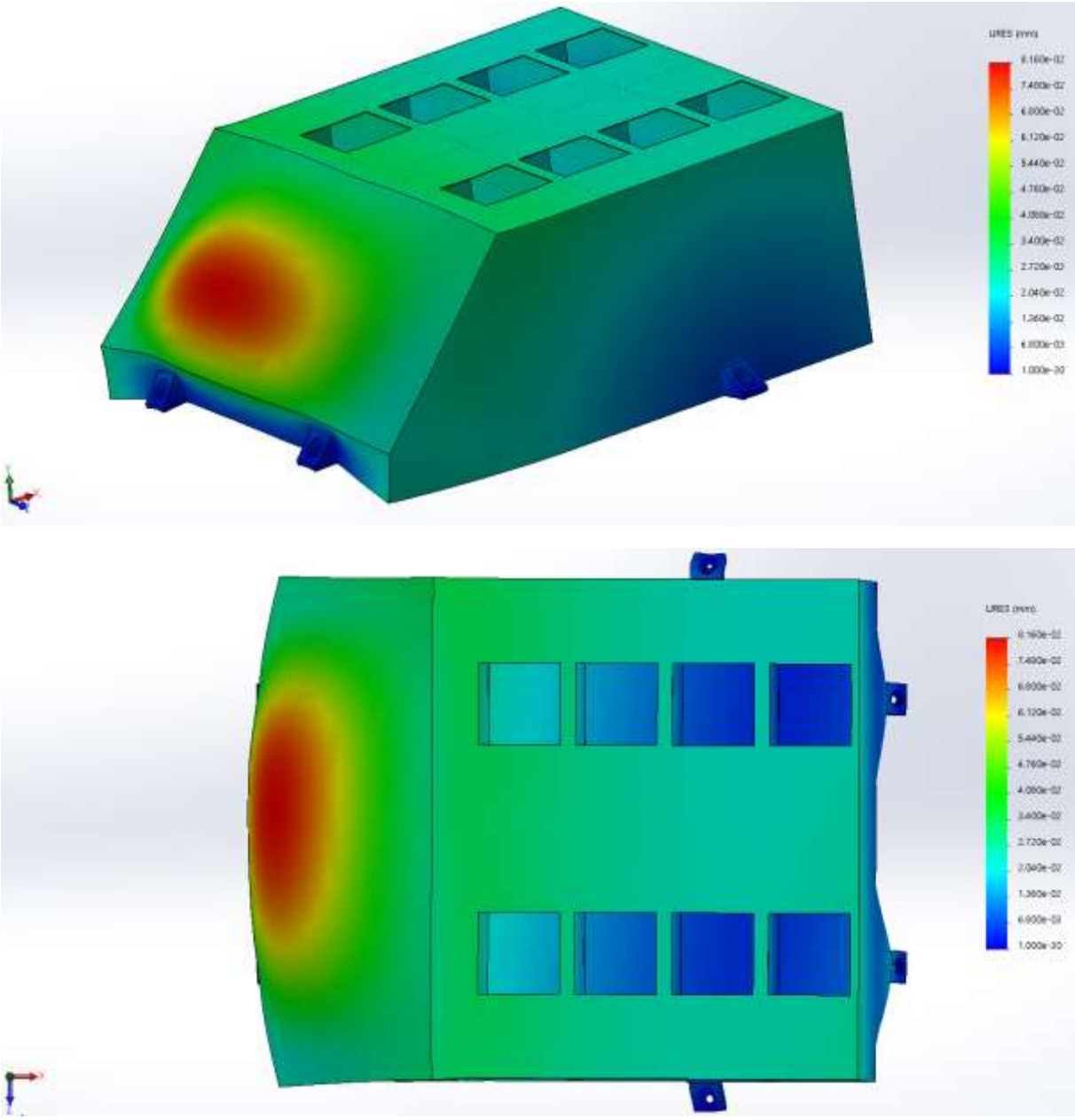
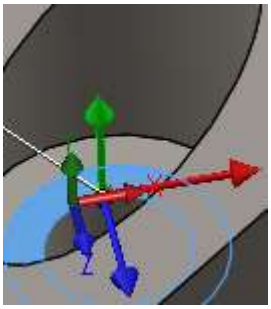


Ilustración 60. Desplazamientos resultantes del acumulador. Fuente: propia

- Reacciones

Tabla 26. Fuerzas resultantes y de aplicación al chasis. Fuente: propia

Anclajes	Fuerzas de reacción (N)				Fuerzas aplicadas al chasis (N)		
	Eje x	Eje y	Eje z		Eje x	Eje y	Eje z
1	1281	1093.6	936.13		-1281	-1093.6	-936.13
2	1341.3	1399.4	61.938		-1341.3	-1399.4	-61.938
3	2449.2	7835.8	5402		-2449.2	-7835.8	-5402
4	2258.1	-2331.7	1611.9		-2258.1	+2331.7	-1611.9
5	2963.7	-2210.9	1542.5		-2963.7	+2210.9	-1542.5
6	4115.6	1418.2	4854.4		-4115.6	-1418.2	-4854.4

- Conclusiones:

  Se observa que se está prácticamente trabajado en el límite elástico lo cual, para un caso fortuito como puede ser un impacto a 40g, se trata de un valor más que satisfactorio, ya que se pude valorara la posibilidad de emplear un material con características superiores a éste para estar trabajando debajo del límite elástico.

  Es llamativo el efecto que provoca estas cargas en la caja de baterías

3.7.2. Estudio del chasis

Este estudio consiste en un conjunto de simulaciones que terminan desembocando en la solución final. Todas estas simulaciones surgen a partir del chasis mostrado al final del apartado “modelado y condiciones de contorno”. Dado que es un proceso iterativo, se empieza presentando las soluciones para el caso de partida y, posteriormente, se modifica aquellos aspectos que superen el límite elástico. Como se comentó anteriormente, se comienza empleando una simplificación del chasis para, posteriormente, emplear el modelo con las uniones de elementos sólidos.

3.7.2.1. Caso base

En esta simulación, las dimensiones de los perfiles de los tubos empleados para este caso son:

Tabla 27. Dimensiones perfiles. Fuente: propia

Perfil		Uso
Circular hueco	28x2.5	Aro principal, aro frontal y anclaje cinturones hombros
	28x1.5	Otros elementos
	10x2	Reposacabezas
Cuadrado	50x30x2.5	Cama caja baterías
L	25x25x4	Soporte

3.7.2.1.1. Aro principal

- Tensiones

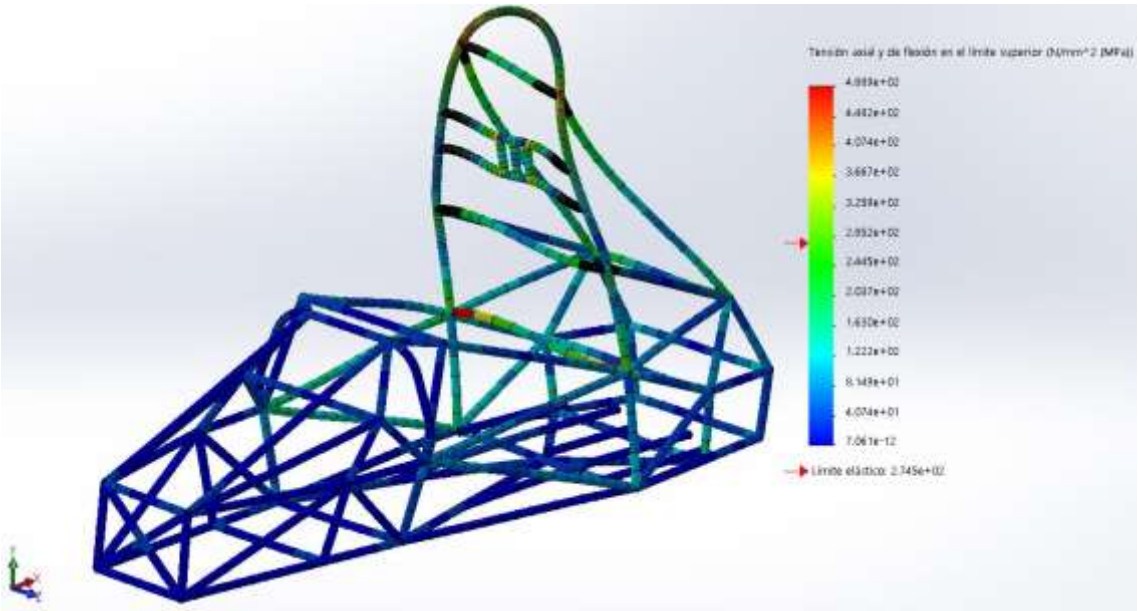


Ilustración 61. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

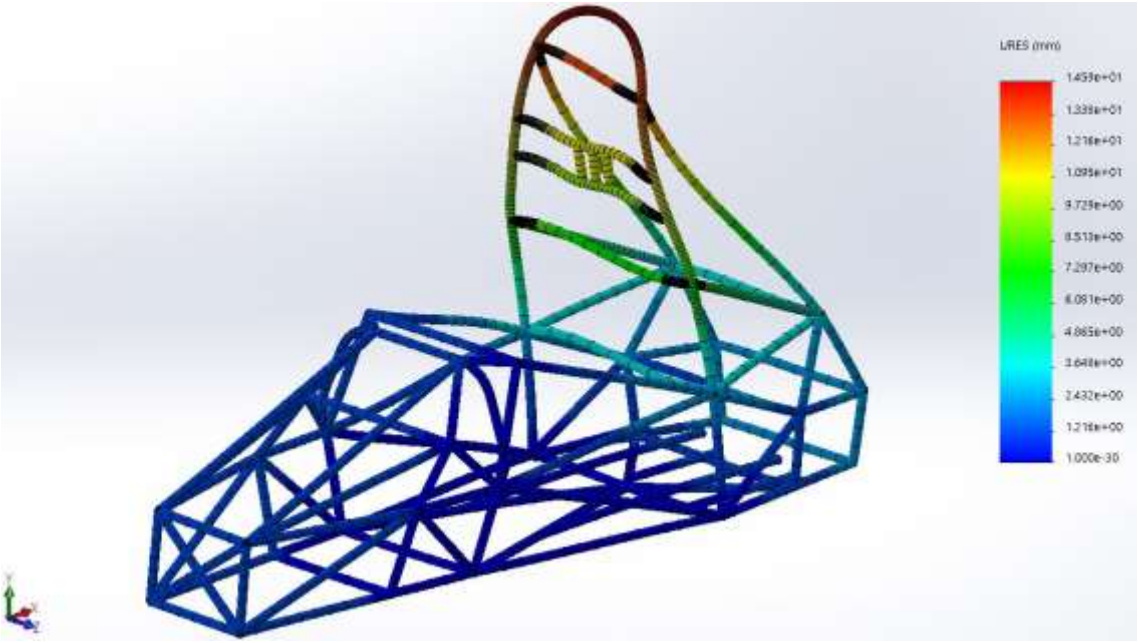


Ilustración 62. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 28. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro principal	Vigas	488.9	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	14.59	mm	25mm

3.7.2.1.2. Aro frontal

- Tensiones

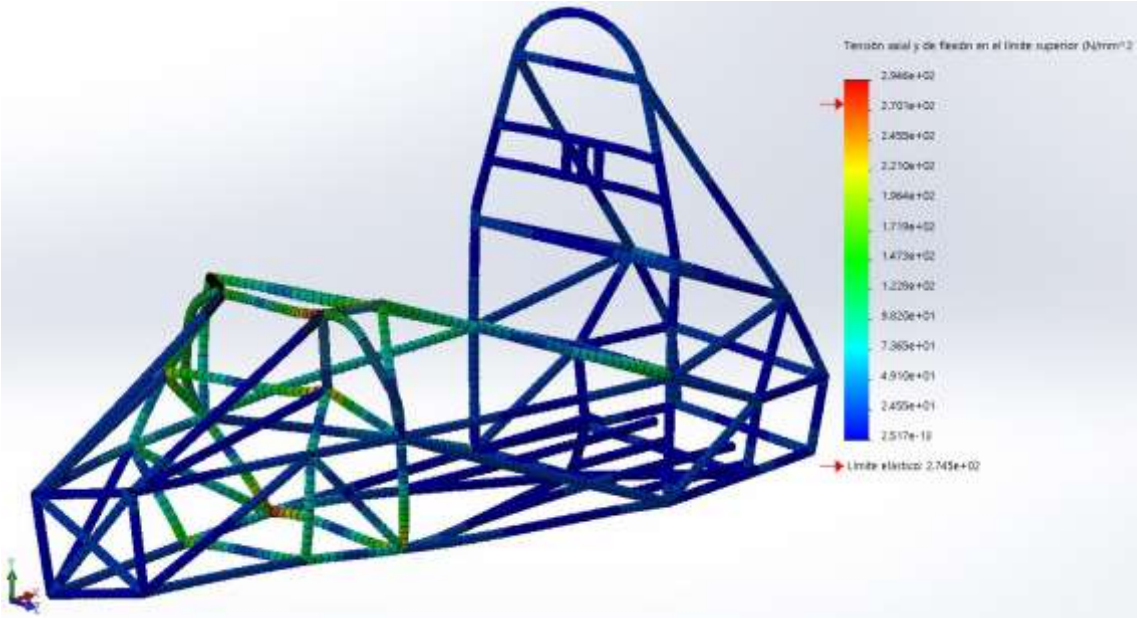


Ilustración 63. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

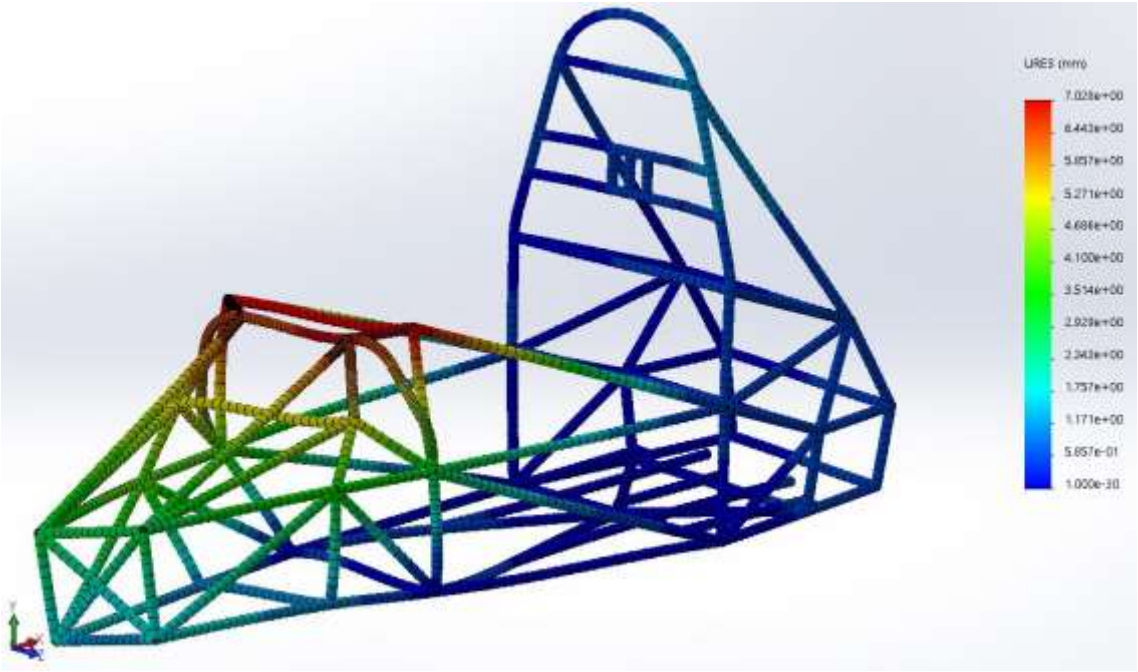


Ilustración 64. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 29. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro frontal	Vigas	294.6	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	7.03	mm	25mm

3.7.2.1.3. Impacto lateral

- Tensiones

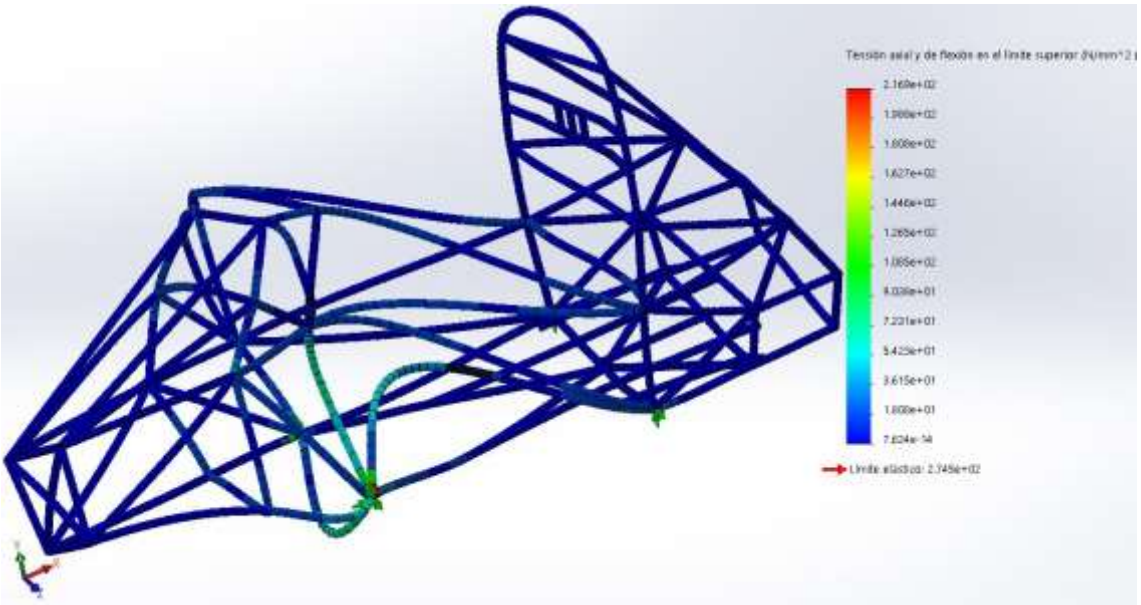


Ilustración 65. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

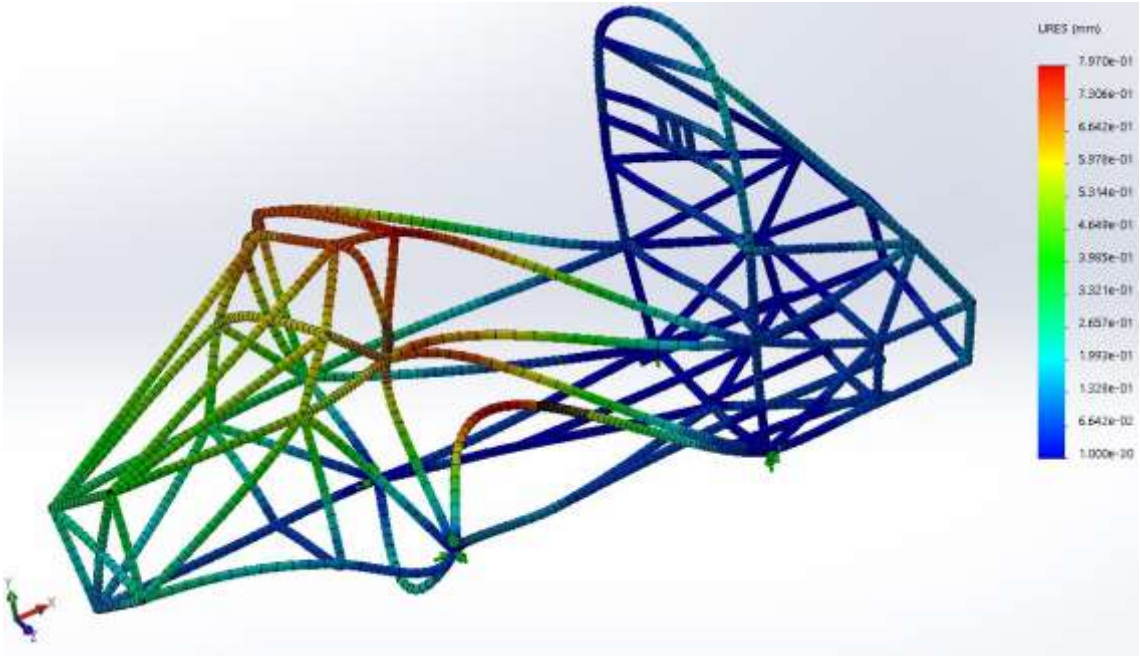


Ilustración 66. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 30. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto lateral	Vigas	216.9	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.78	mm	25mm

3.7.2.1.4. Impacto frontal

- Tensiones

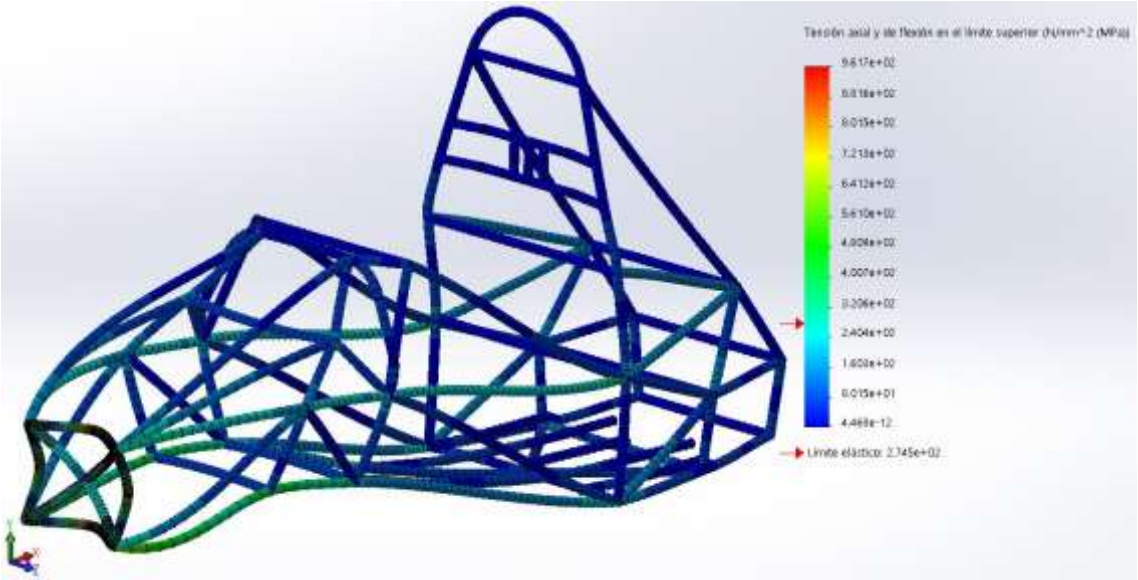


Ilustración 67. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

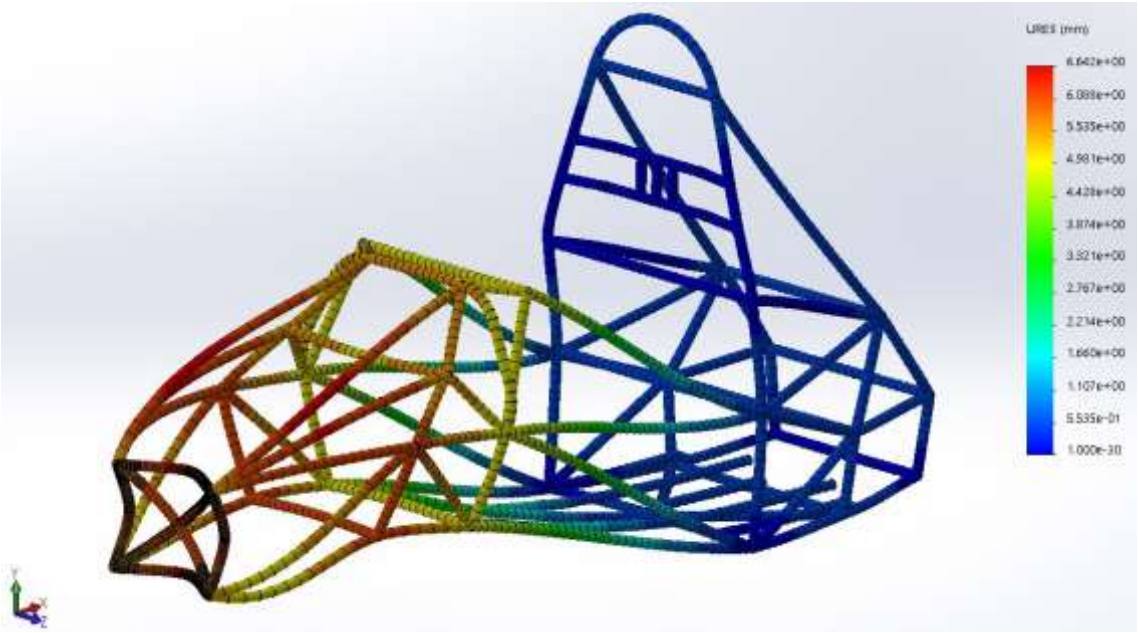


Ilustración 68. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 31. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto frontal	Vigas	961.7	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	6.64	mm	25mm

3.7.2.1.5. Anclajes cinturón de hombros

- Tensiones

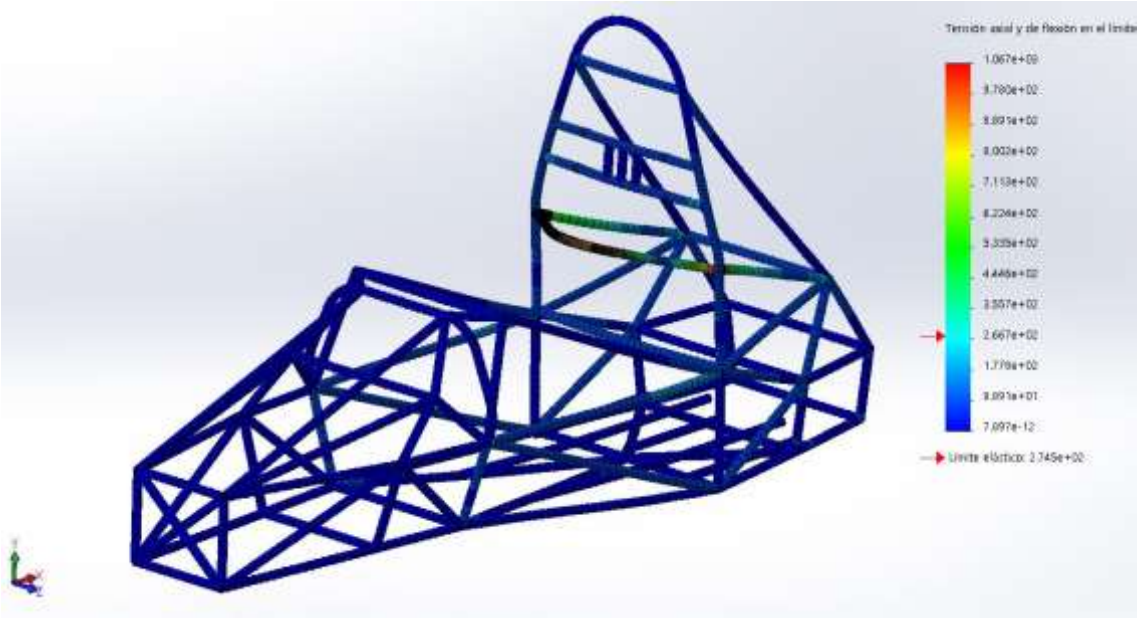


Ilustración 69. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

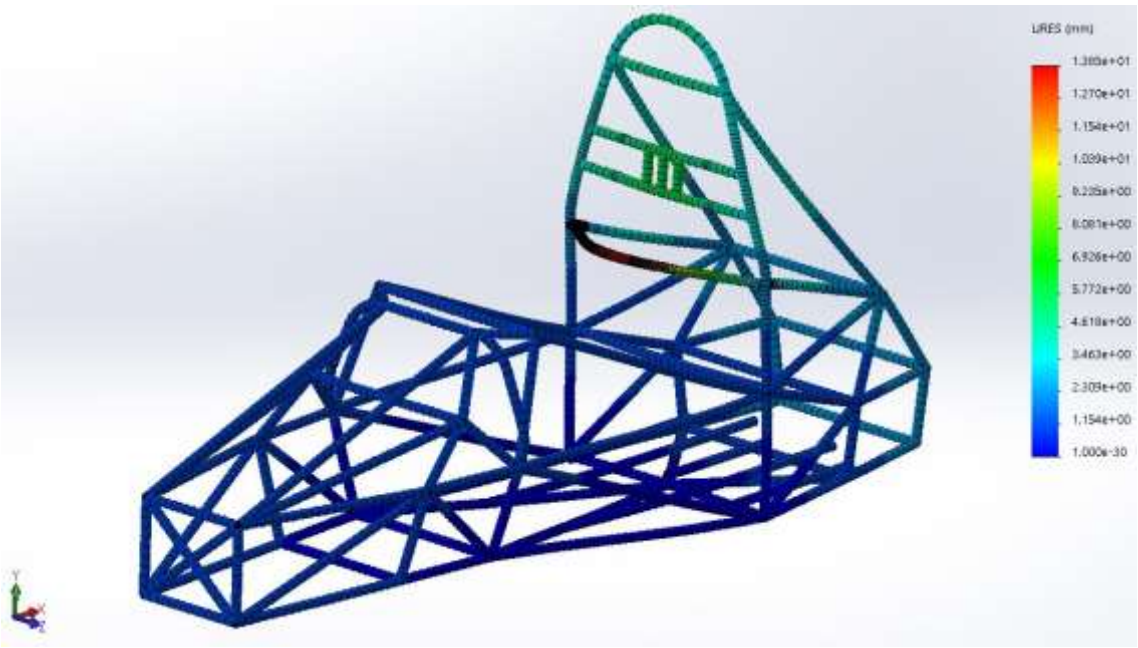


Ilustración 70. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 32. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto lateral	Vigas	1067	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	13.85	mm	25mm

3.7.2.1.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino

- Tensiones

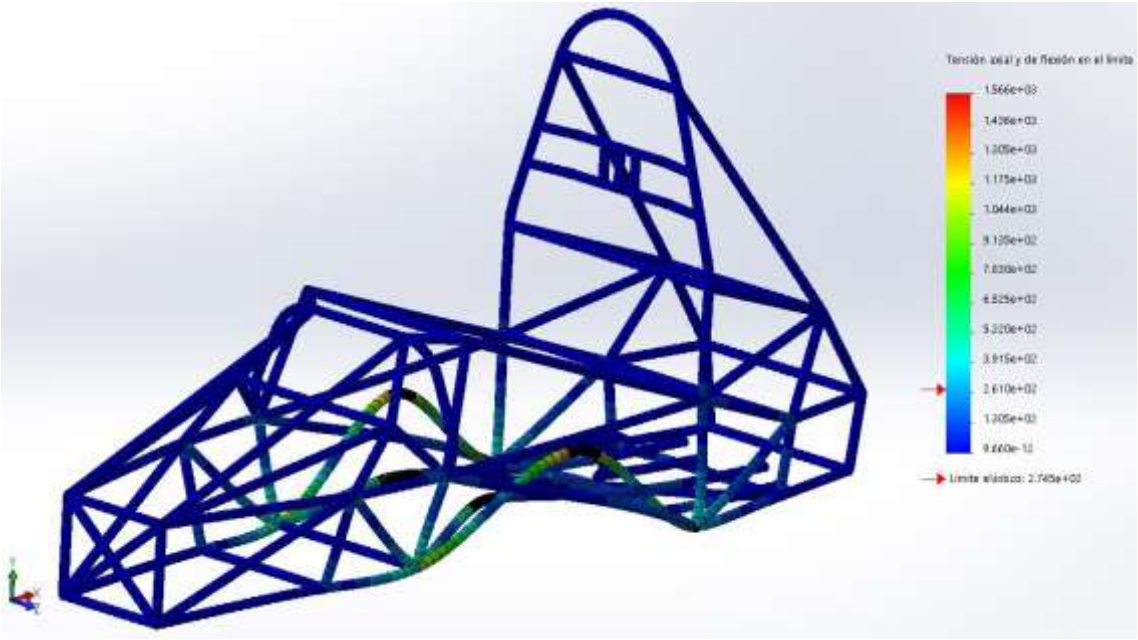


Ilustración 71. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

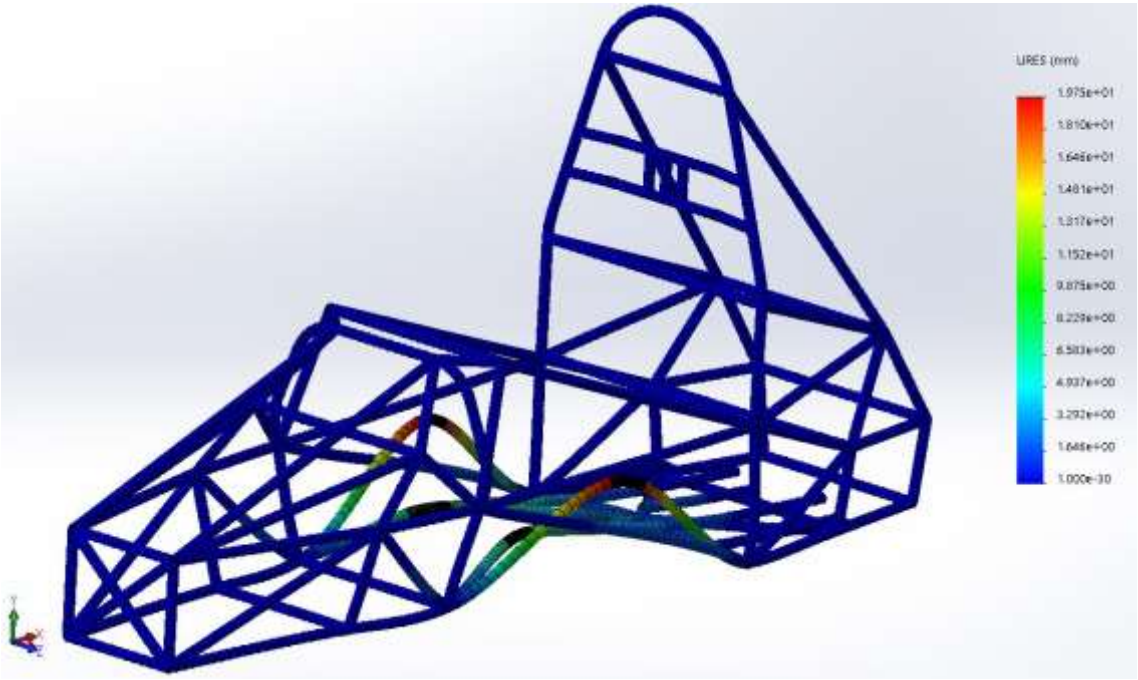


Ilustración 72. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 33. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	1566	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	19.75	mm	25mm

3.7.2.1.7. Impacto frontolateral

- Tensiones

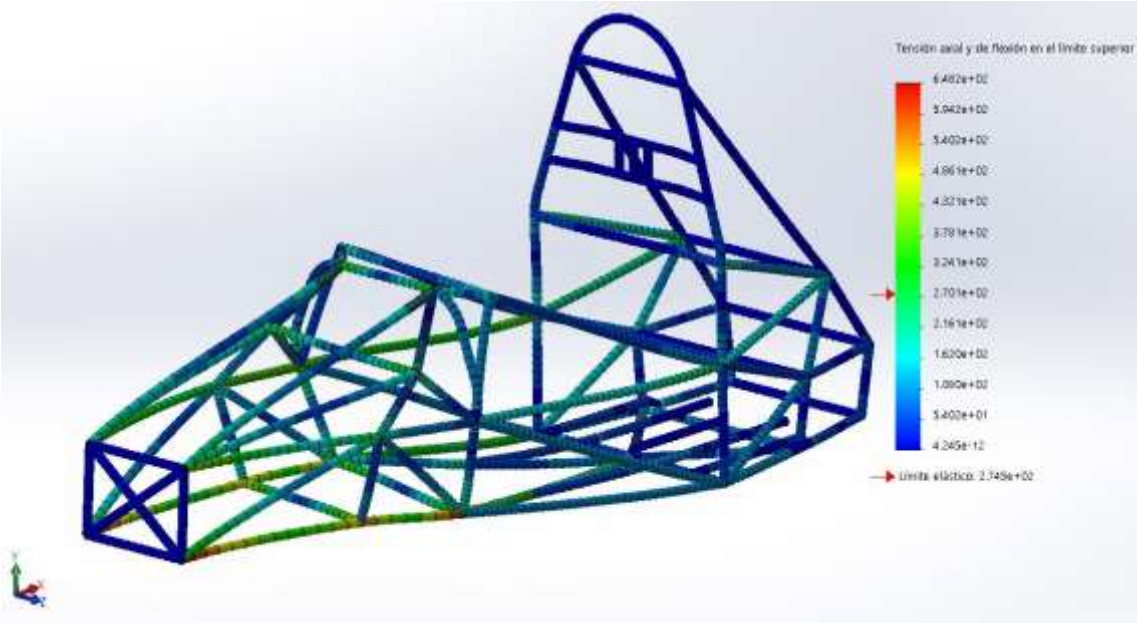


Ilustración 73. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

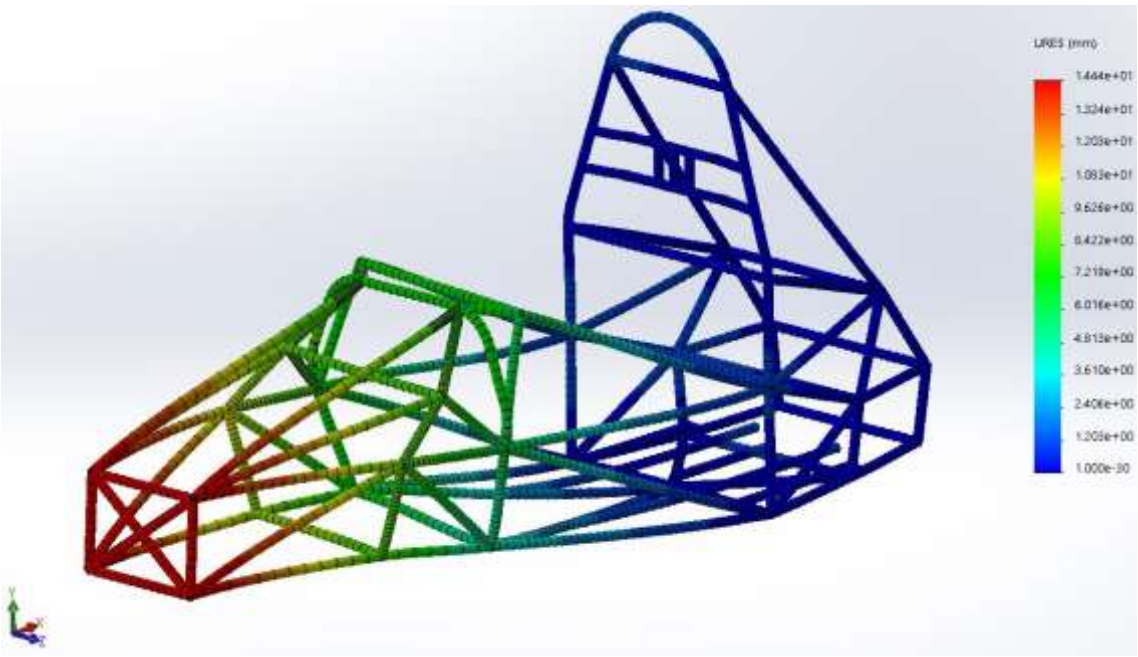


Ilustración 74. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 34. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto frontolateral	Vigas	648.2	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	14.44	mm	25mm

3.7.2.1.8. Anclajes caja de baterías

- Tensiones

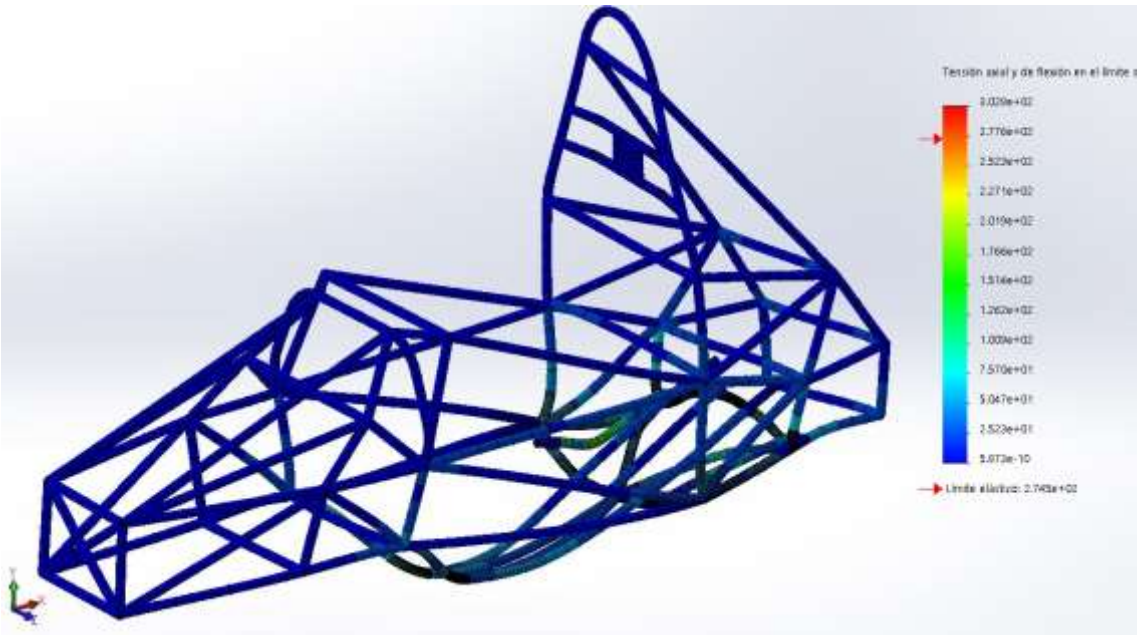


Ilustración 75. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

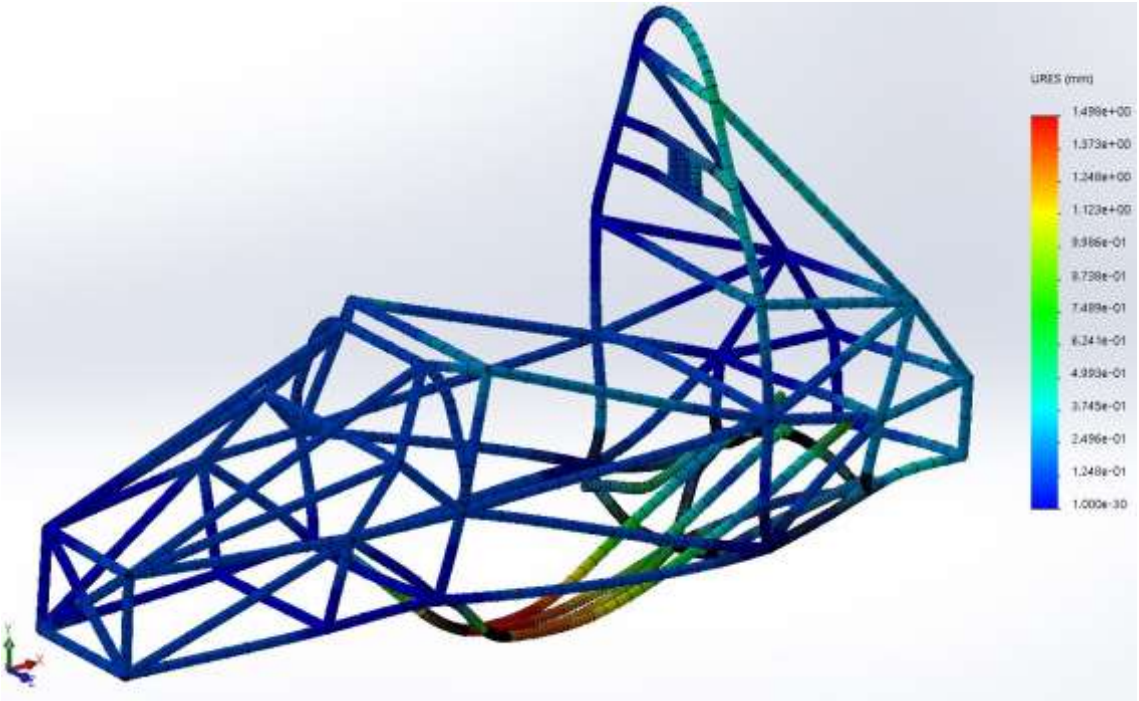


Ilustración 76. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 35. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes caja de baterias	Vigas	302.8	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.5	mm	25mm

3.7.2.1.9. Reposacabezas

- Tensiones

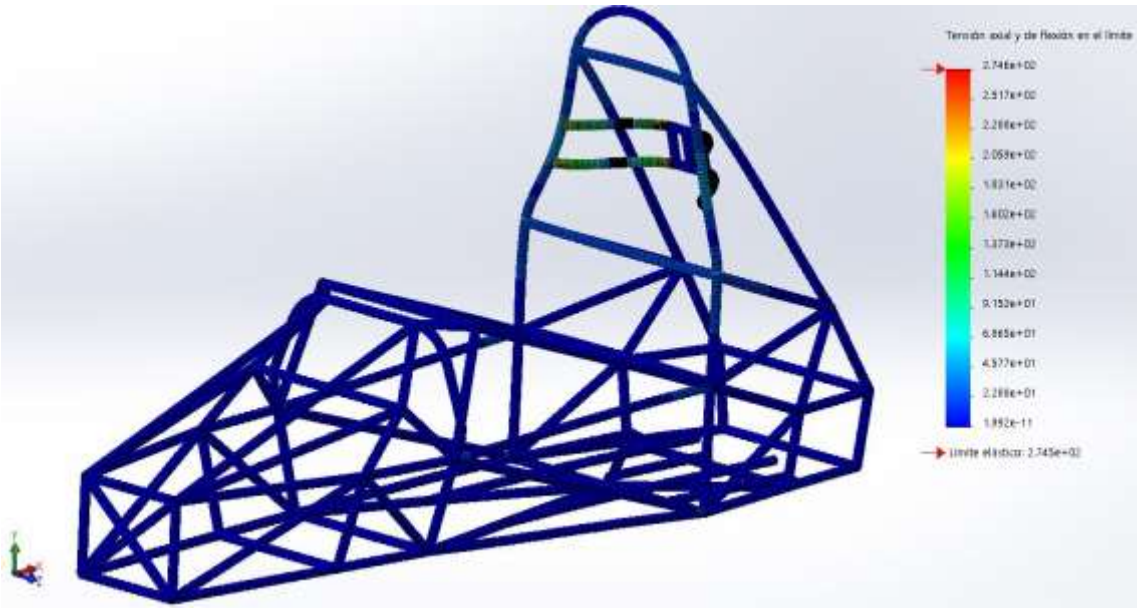


Ilustración 77. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

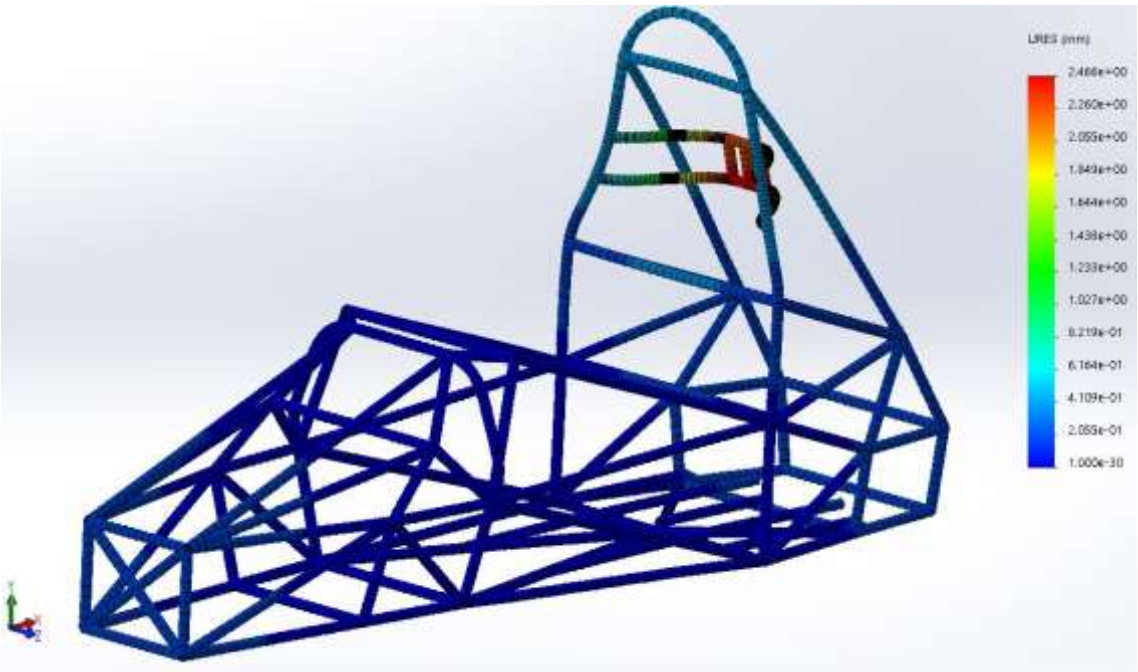


Ilustración 78. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 36. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Reposacabezas	Vigas	274.6	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	2.47	mm	25mm

3.7.2.1.10. Conclusiones y resumen de resultados

Tabla 37. Tabla resumen iteración. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos	¿Supera?	Acción
	Elemento	Valor	Unid.			
Aro principal	Vigas	488.9	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Desplazamiento	14.59	mm	25mm	NO	
Aro frontal	Vigas	294.6	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Desplazamiento	7.03	mm	25mm	NO	
Impacto lateral	Vigas	216.9	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	0.78	mm	25mm	NO	

Impacto frontal	Vigas	961.7	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Desplazamiento	6.64	mm	25mm	NO	
Anclajes cinturón de hombros	Vigas	1067	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Desplazamiento	13.85	mm	25mm	NO	
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	1566	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Desplazamiento	19.75	mm	25mm	NO	
Impacto frontolateral	Vigas	648.2	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Desplazamiento	14.44	mm	25mm	NO	
Anclajes caja de baterías	Vigas	302.8	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Desplazamiento	1.5	mm	25mm	NO	
Reposacabezas	Vigas	274.6	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	2.47	mm	25mm	NO	

- Aro principal: Aumentar perfil y sección; y cambiar perfil L por uno circular similar a elementos no críticos
- Aro frontal: Aumentar perfil y sección -> utilizar el mismo que el aro principal
- Impacto frontal: Aumentar perfil y sección -> mucho mayor que el aro principal
- Anclajes cinturón hombros: Aumentar perfil y sección -> mismo diámetro que aros principales pero mayor sección
- Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino: Aumentar perfil y sección -> mismo diámetro que aros principales pero mayor sección
- Impacto frontolateral: Aumentar perfil y sección de conectores mamparo con aro frontal -> mismo diámetro que aros principales pero mayor sección
- Anclajes caja de baterías: Aumentar perfil y sección de los soportes de la cama de la caja -> posiblemente se solucione al modificar algún elemento mencionado antes.

3.7.2.2. Primera Iteración

En esta simulación, las dimensiones de los perfiles de los tubos empleados para este caso son:

Tabla 38. Dimensiones perfiles. Fuente: propia

Perfil		Uso
Circular hueco	32x4	Mamparo frontal
	30x2	Aro principal, aro frontal y anclaje cinturones hombros
	28x1.5	Otros elementos
	10x2	Reposacabezas
Cuadrado	50x30x2.5	Cama caja baterías

3.7.2.2.1. Aro principal

- Tensiones

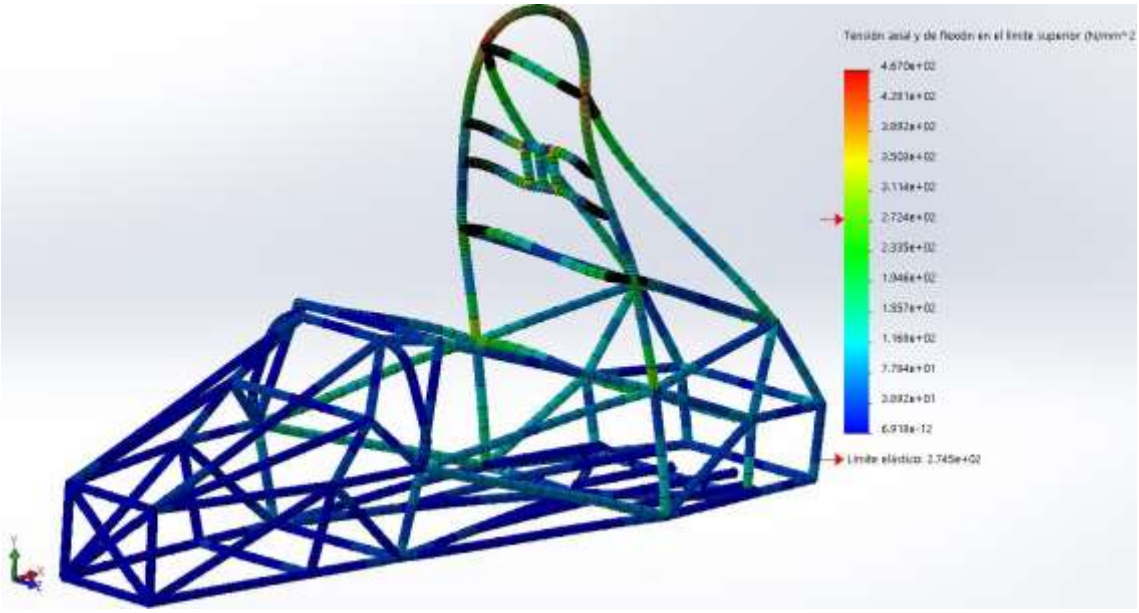


Ilustración 79. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

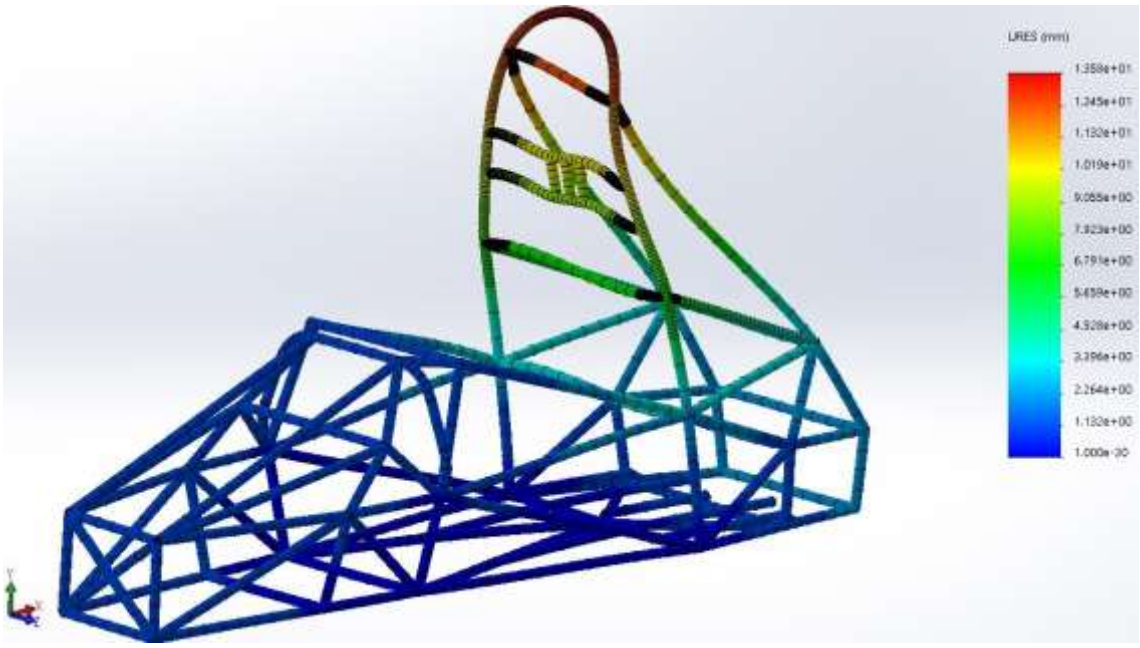


Ilustración 80. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 39. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro principal	Vigas	467	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	13.58	mm	25mm

3.7.2.2.2. Aro frontal

- Tensiones

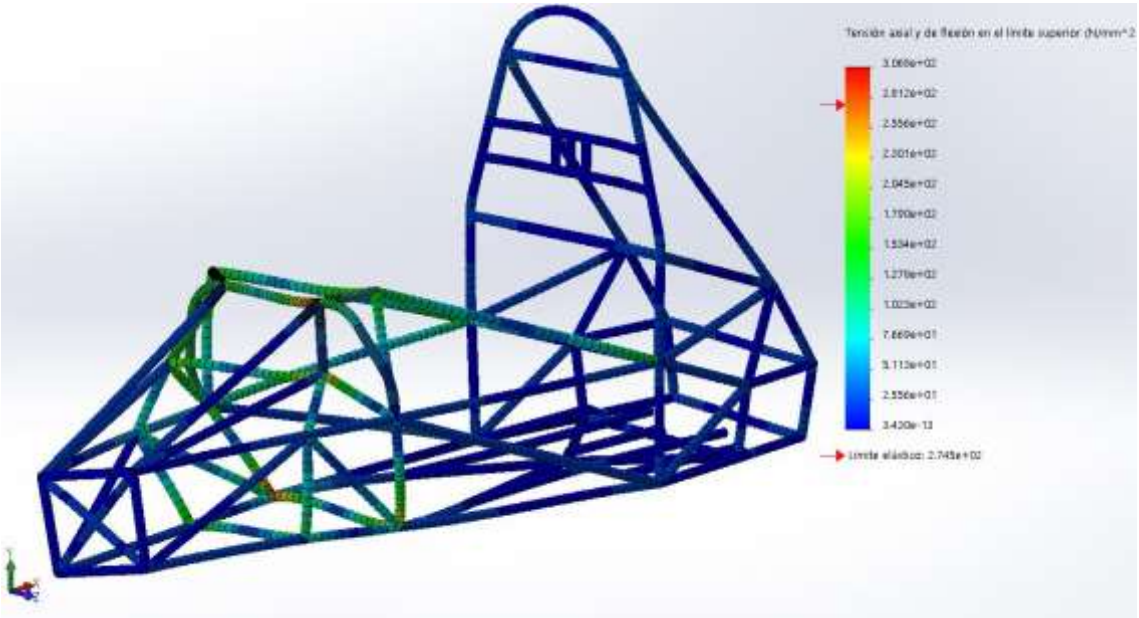


Ilustración 81. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

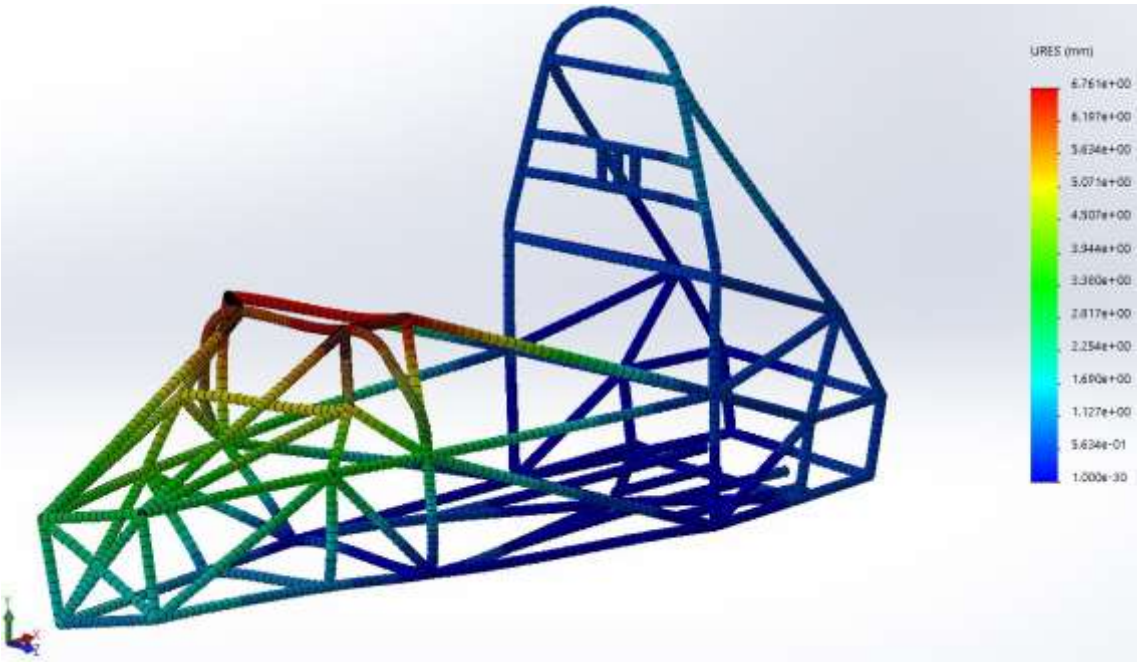


Ilustración 82. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 40. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro frontal	Vigas	306.8	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	6.76	mm	25mm

3.7.2.2.3. Impacto lateral

- Tensiones

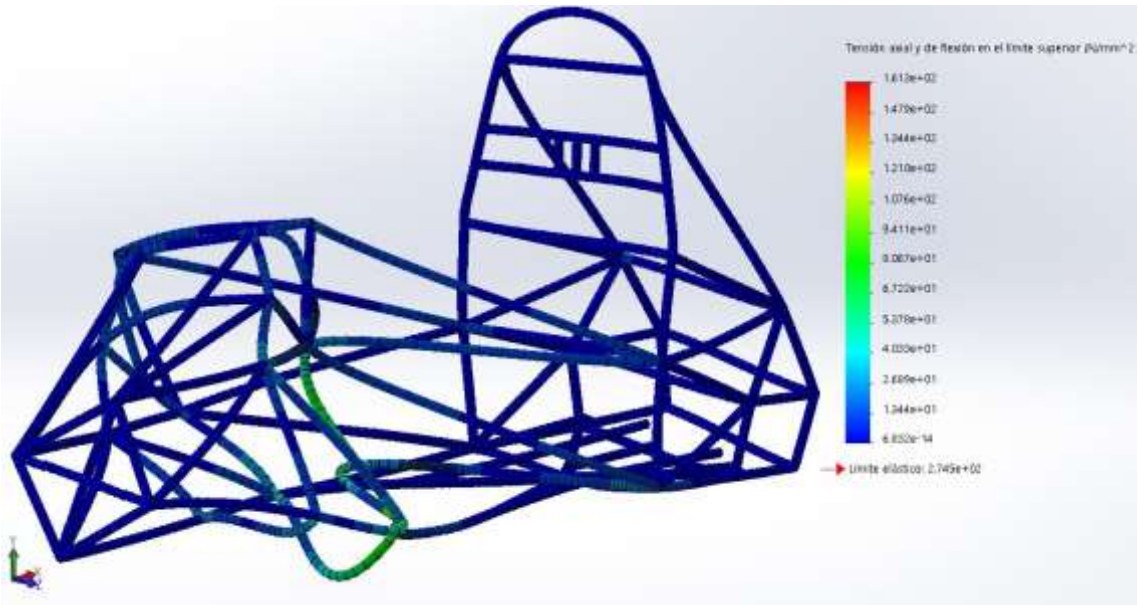


Ilustración 83. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

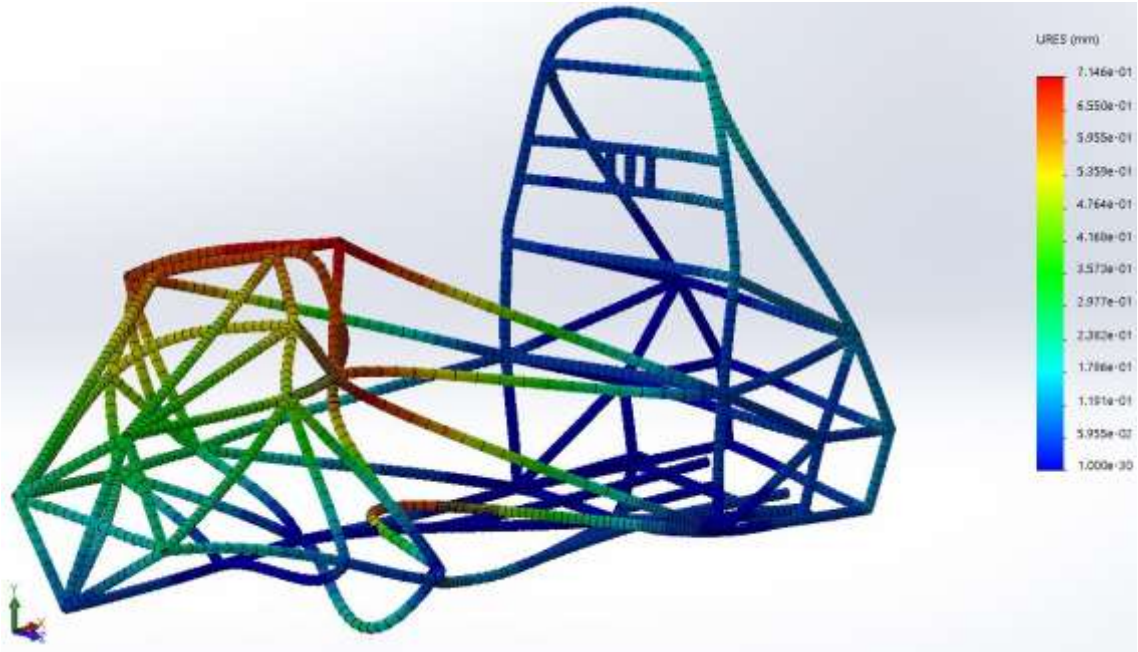


Ilustración 84. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 41. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto lateral	Vigas	161.3	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.71	mm	25mm

3.7.2.2.4. Impacto frontal

- Tensiones

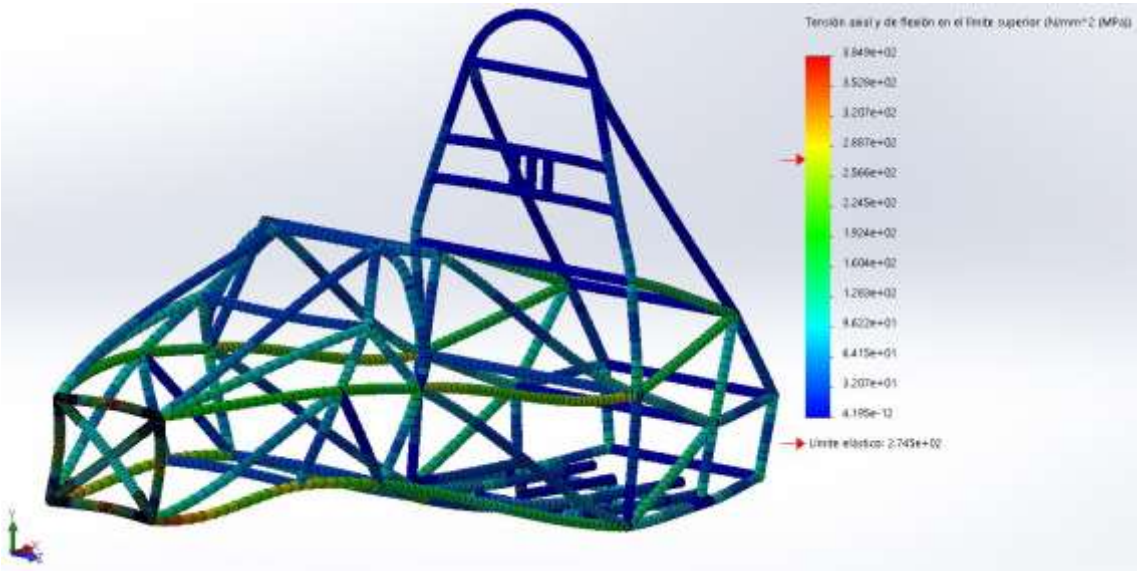


Ilustración 85. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

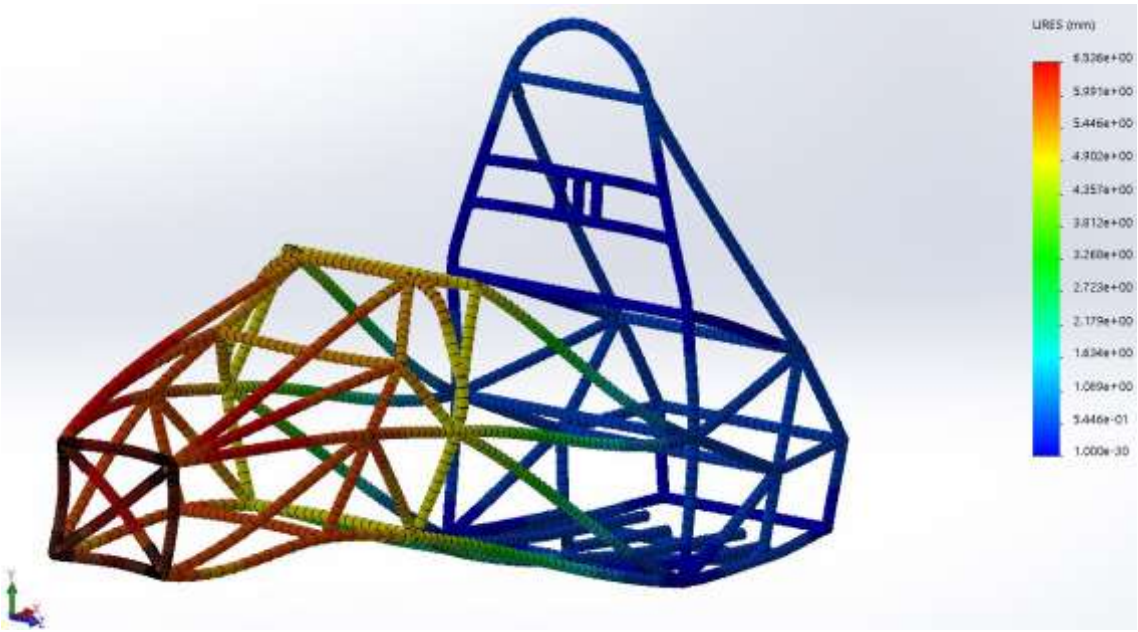


Ilustración 86. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 42. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto frontal	Vigas	384.9	MPa	274.5 MPa

	Desplazamiento	6.54	mm	25mm

3.7.2.2.5. Anclajes cinturón de hombros

- Tensiones

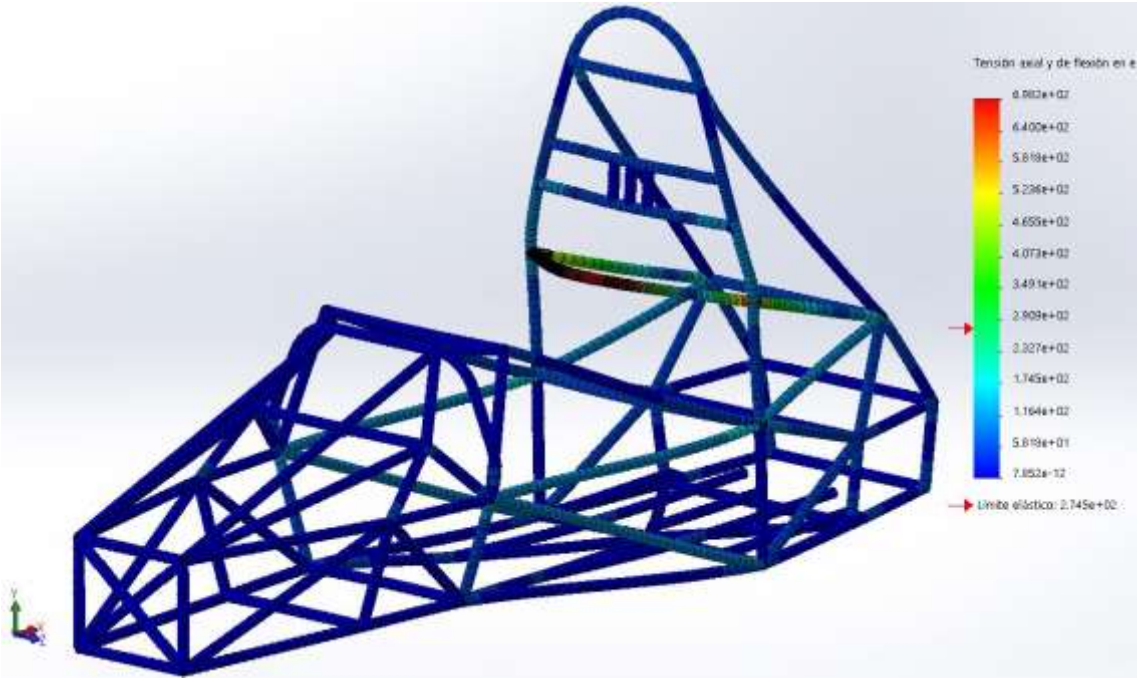


Ilustración 87. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

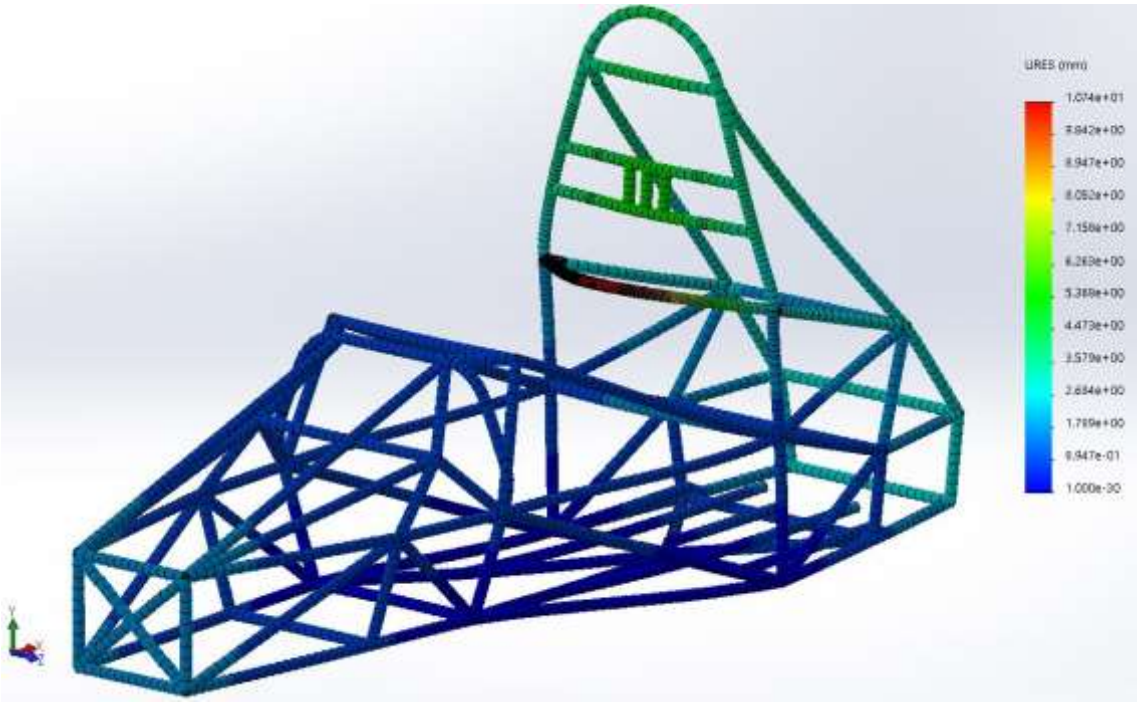


Ilustración 88. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 43. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturón de hombros	Vigas	698.2	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	10.74	mm	25mm

3.7.2.2.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino

- Tensiones

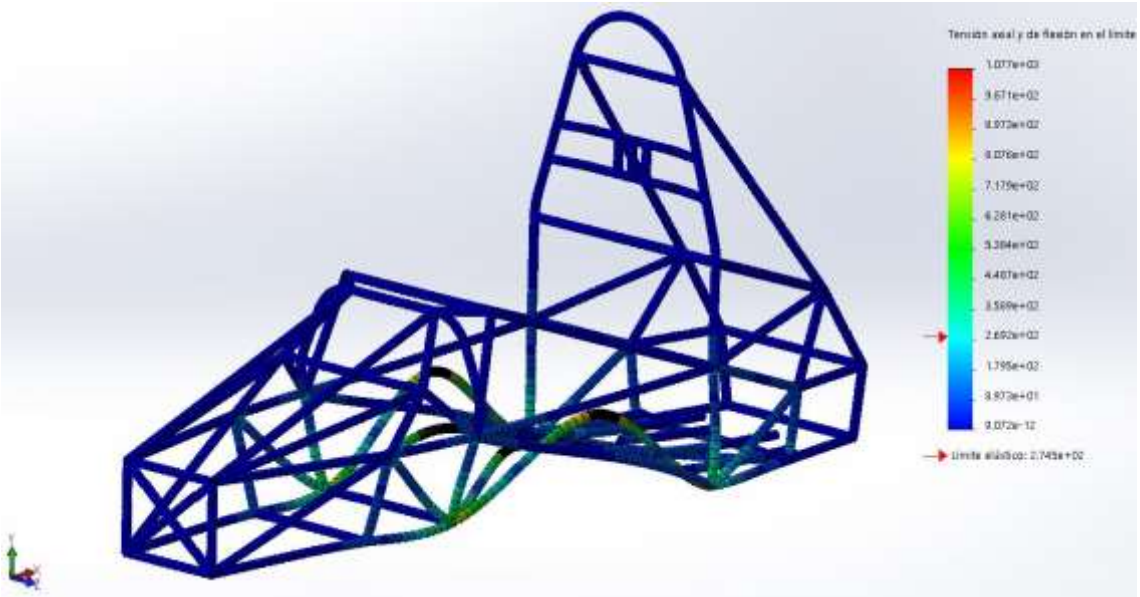


Ilustración 89. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

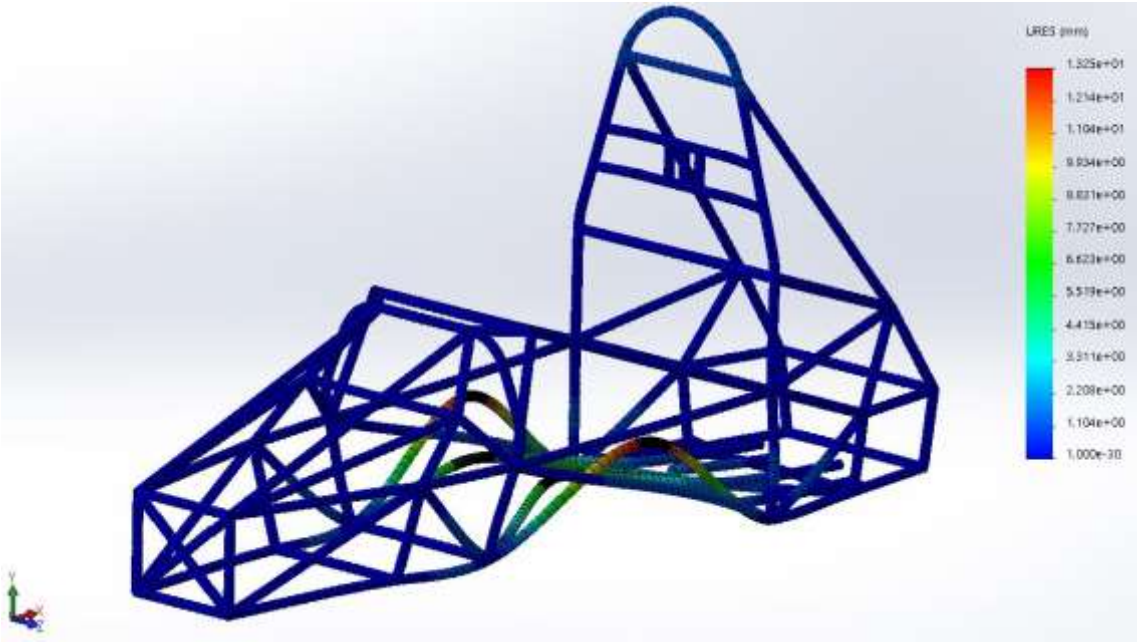


Ilustración 90. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 44. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	1077	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	13.25	mm	25mm

3.7.2.2.7. Impacto frontolateral

- Tensiones

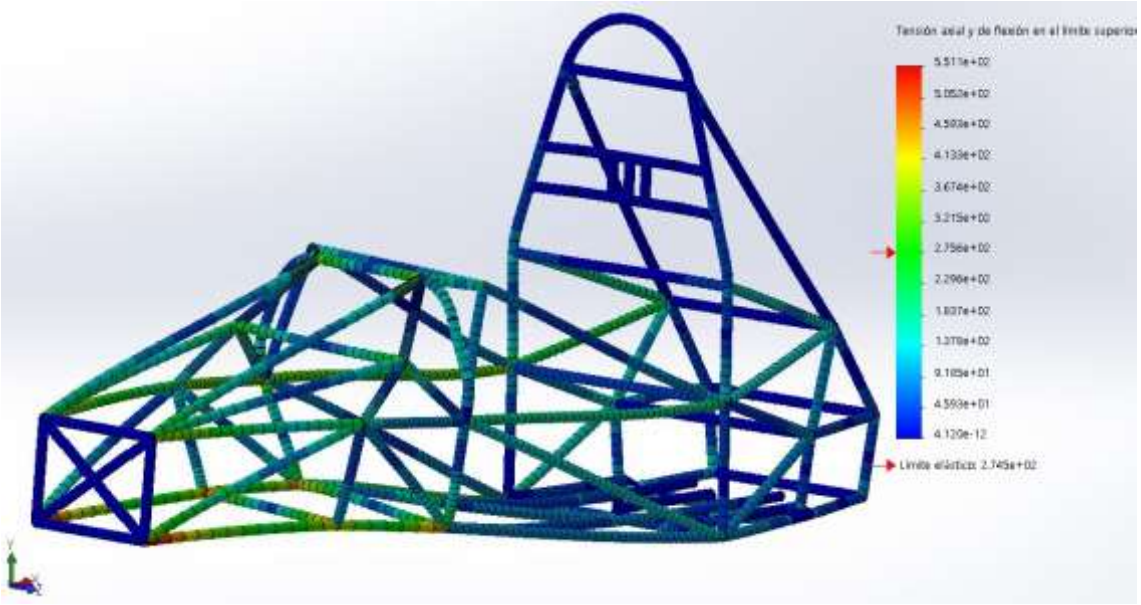


Ilustración 91. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

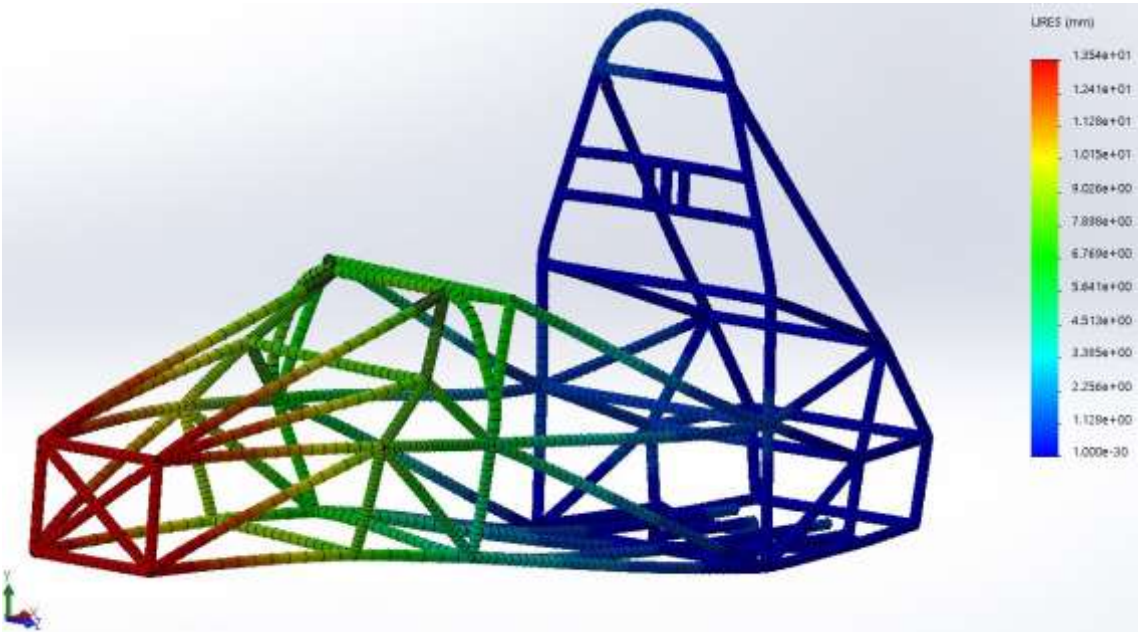


Ilustración 92. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 45. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto frontolateral	Vigas	551.1	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	13.54	mm	25mm

3.7.2.2.8. Anclajes caja de baterías

- Tensiones

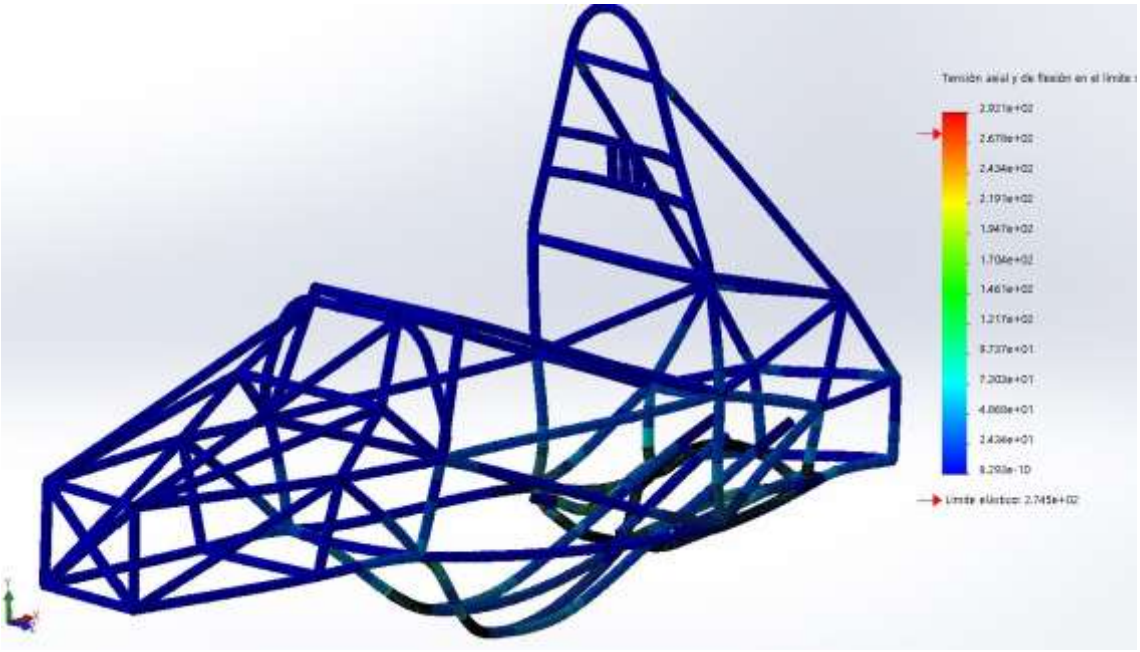


Ilustración 93. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

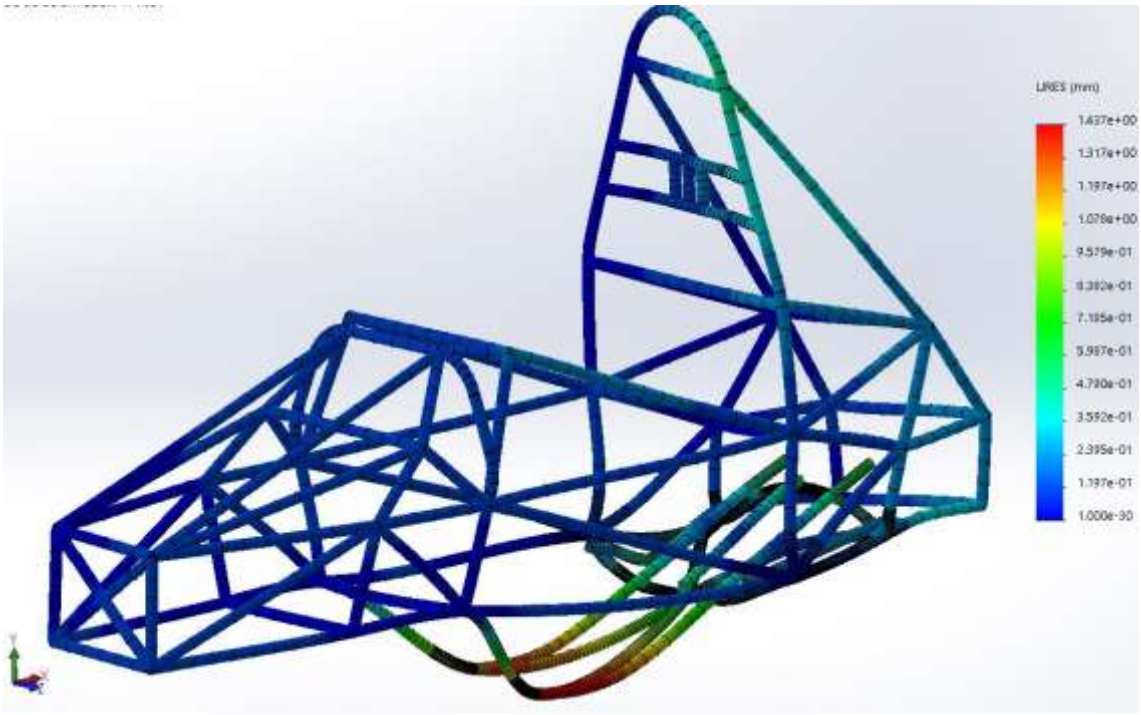


Ilustración 94. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 46. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes caja de baterias	Vigas	292.1	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	14.37	mm	25mm

3.7.2.2.9. Reposacabezas

- Tensiones

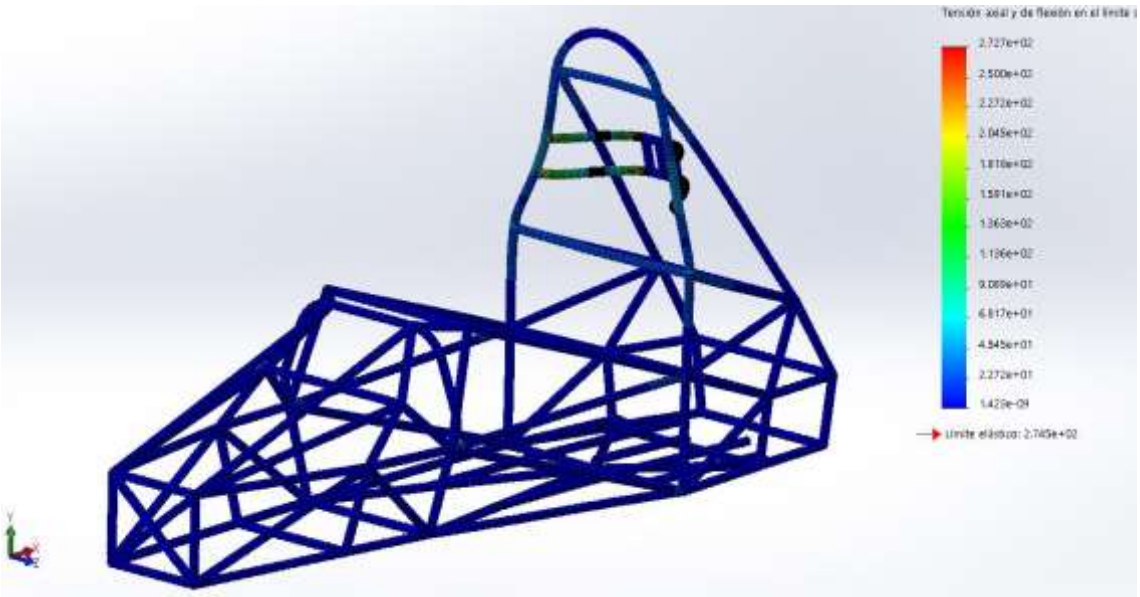


Ilustración 95. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

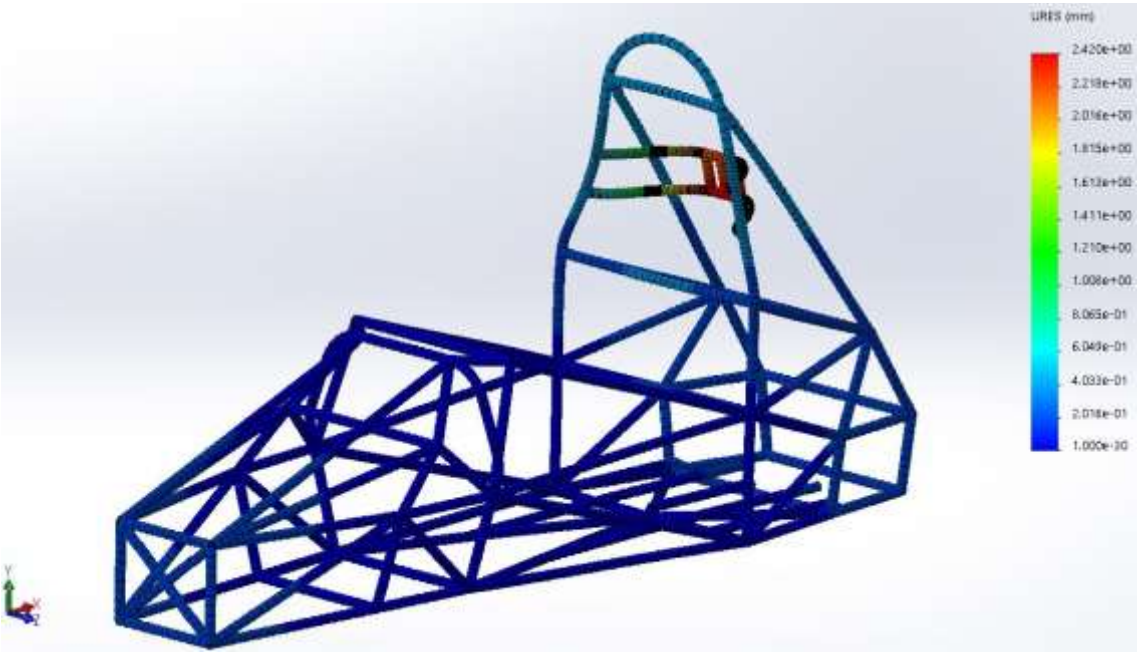


Ilustración 96. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 47. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Reposacabezas	Vigas	272.7	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	2.42	mm	25mm

3.7.2.2.10. Conclusiones y resumen de resultados

Tabla 48. Tabla resumen iteración

Estudio	Resultados			Valores máximos	¿Supera?	Acción
	Elemento	Valor	Unid.			
Aro principal	Vigas	467	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Desplazamiento	13.58	mm	25mm	NO	
Aro frontal	Vigas	306.8	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Desplazamiento	6.76	mm	25mm	NO	
Impacto lateral	Vigas	161.3	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	0.71	mm	25mm	NO	
Impacto frontal	Vigas	384.9	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Desplazamiento	6.54	mm	25mm	NO	
Anclajes cinturón de hombros	Vigas	698.2	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Desplazamiento	10.74	mm	25mm	NO	
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	1077	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Desplazamiento	13.25	mm	25mm	NO	
Impacto frontolateral	Vigas	551.1	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Desplazamiento	13.54	mm	25mm	NO	
Anclajes caja de baterías	Vigas	292.1	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Desplazamiento	14.37	mm	25mm	NO	
Reposacabezas	Vigas	272.7	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	2.42	mm	25mm	NO	

Aro principal: Aumentar perfil y sección

Aro frontal: Aumentar perfil y sección -> utilizar el mismo que el aro principal

Impacto frontal: Aumentar perfil y sección -> mucho mayor que el aro principal

Anclajes cinturón hombros: Aumentar perfil y sección -> mismo diámetro que aros principales pero mayor sección

Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino: Aumentar perfil y sección -> mismo diámetro que aros principales pero mayor sección

Impacto frontolateral: Aumentar perfil y sección de conectores mamparo con aro frontal -> mismo diámetro que aros principales pero mayor sección

Anclajes caja de baterías: Aumentar perfil y sección de los soportes de la cama de la caja -> posiblemente se solucione al modificar algún elemento mencionado antes.

3.7.2.3. Segunda Iteración

En esta simulación, las dimensiones de los perfiles de los tubos empleados para este caso son:

Tabla 49. Dimensiones perfiles. Fuente: propia

Perfil		Uso
Circular hueco	38x2.5	Mamparo frontal
	38x2	Aro principal, aro frontal y anclaje cinturones hombros
	35x2	Otros elementos
	10x2	Reposacabezas
Cuadrado	50x30x2.5	Cama caja baterías

3.7.2.3.1. Aro principal

- Tensiones

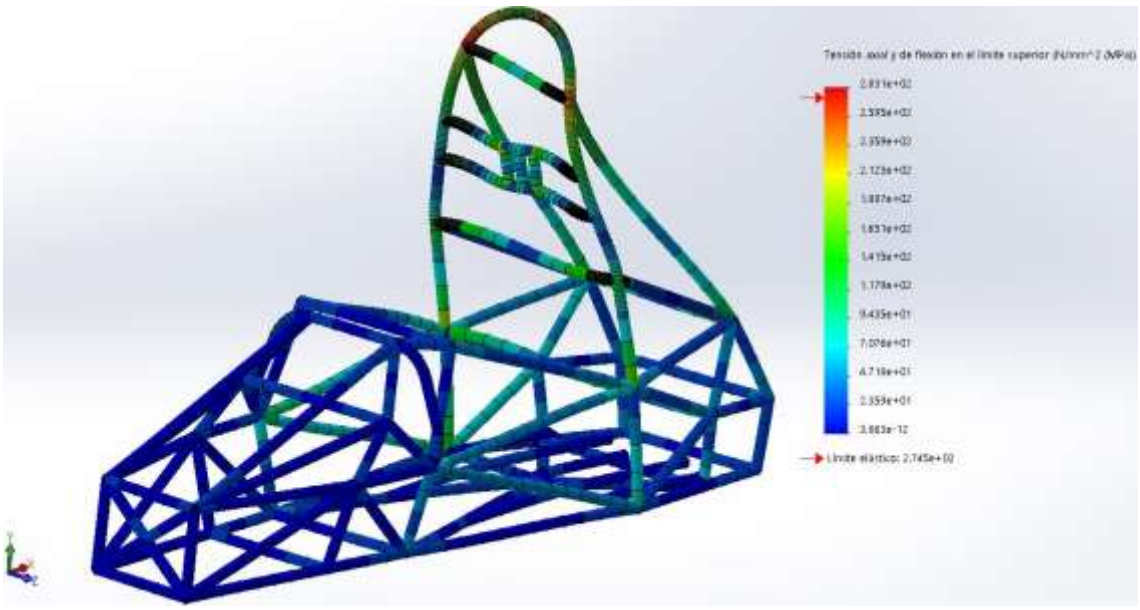


Ilustración 97. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

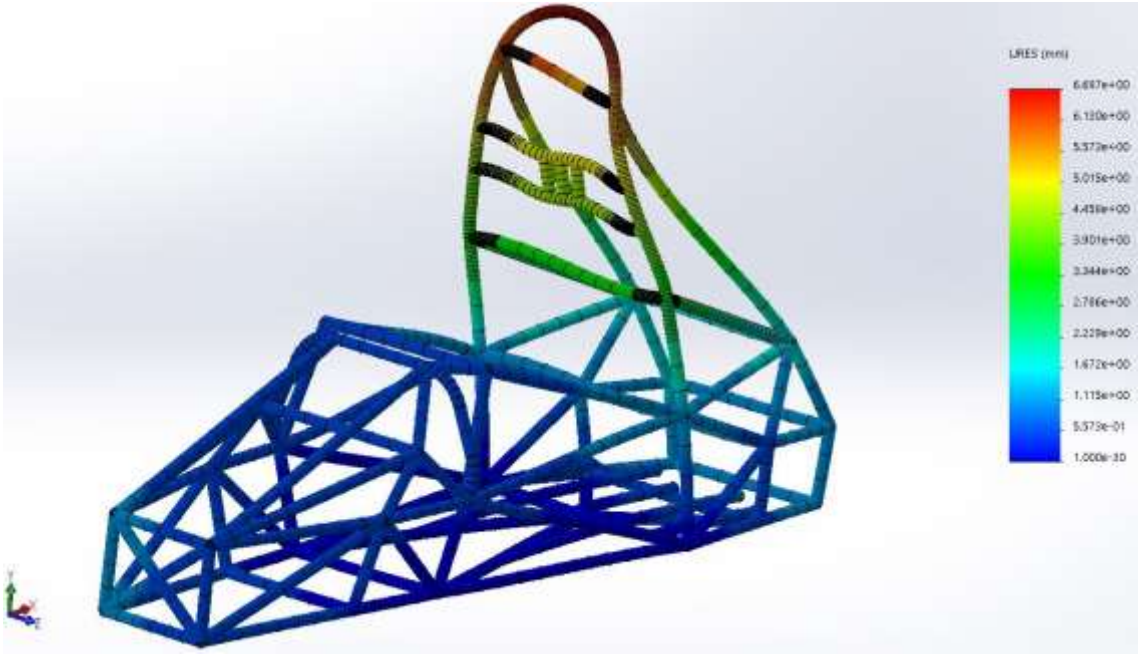


Ilustración 98. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 50. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro principal	Vigas	283.1	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	6.69	mm	25mm

3.7.2.3.2. Aro frontal

- Tensiones

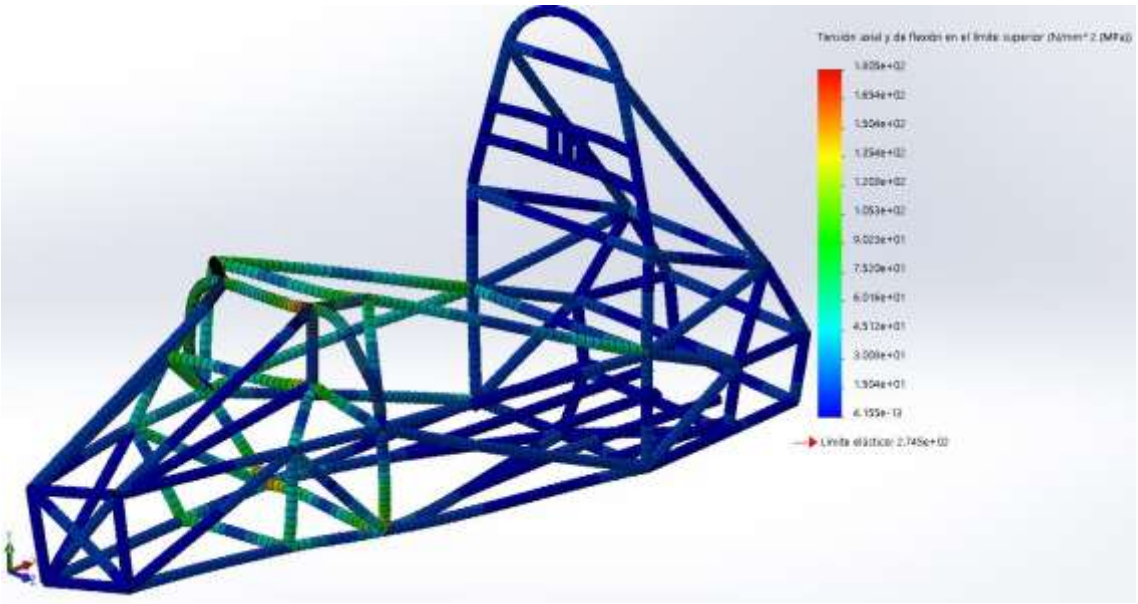


Ilustración 99. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

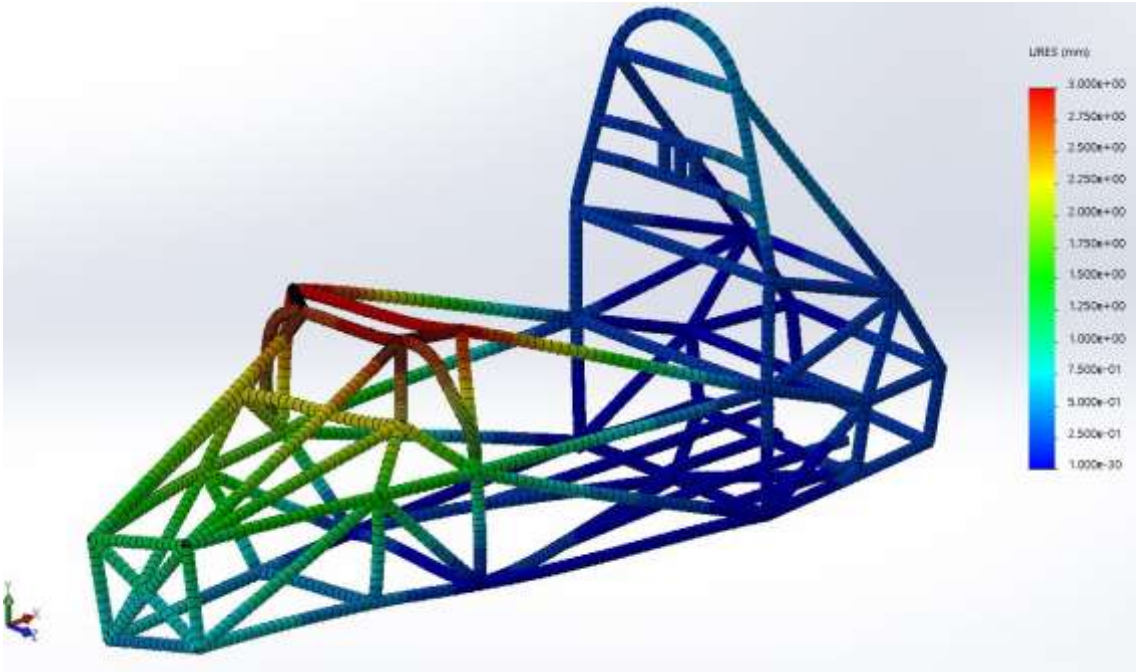


Ilustración 100. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 51. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro frontal	Vigas	180.5	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	3	mm	25mm

3.7.2.3.3. Impacto lateral

- Tensiones

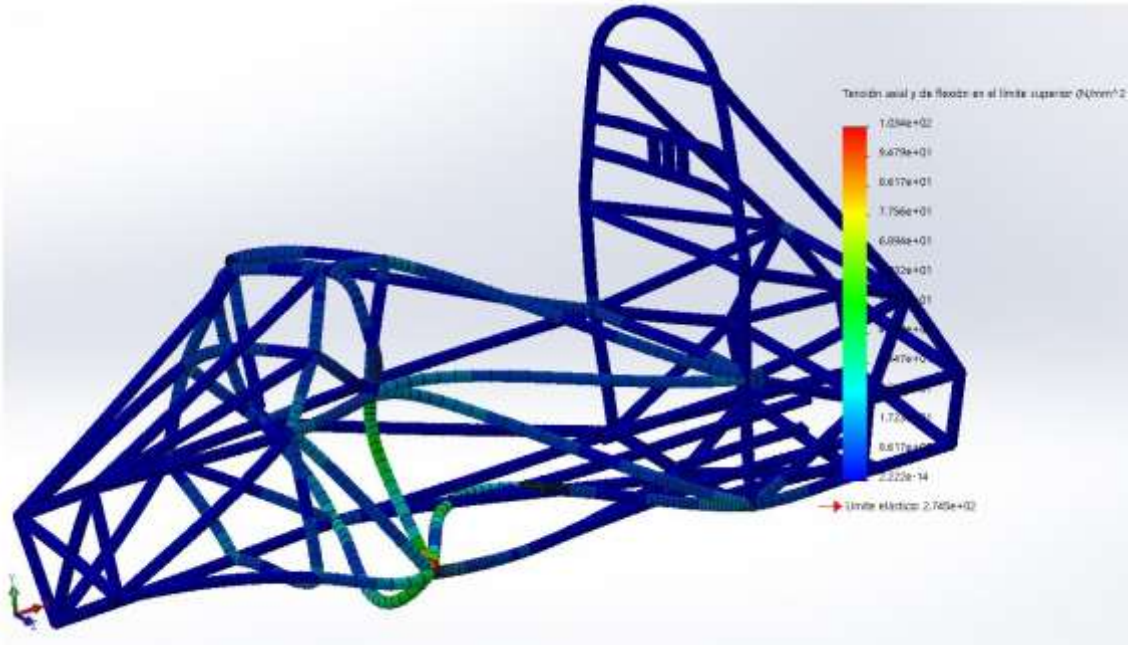


Ilustración 101. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

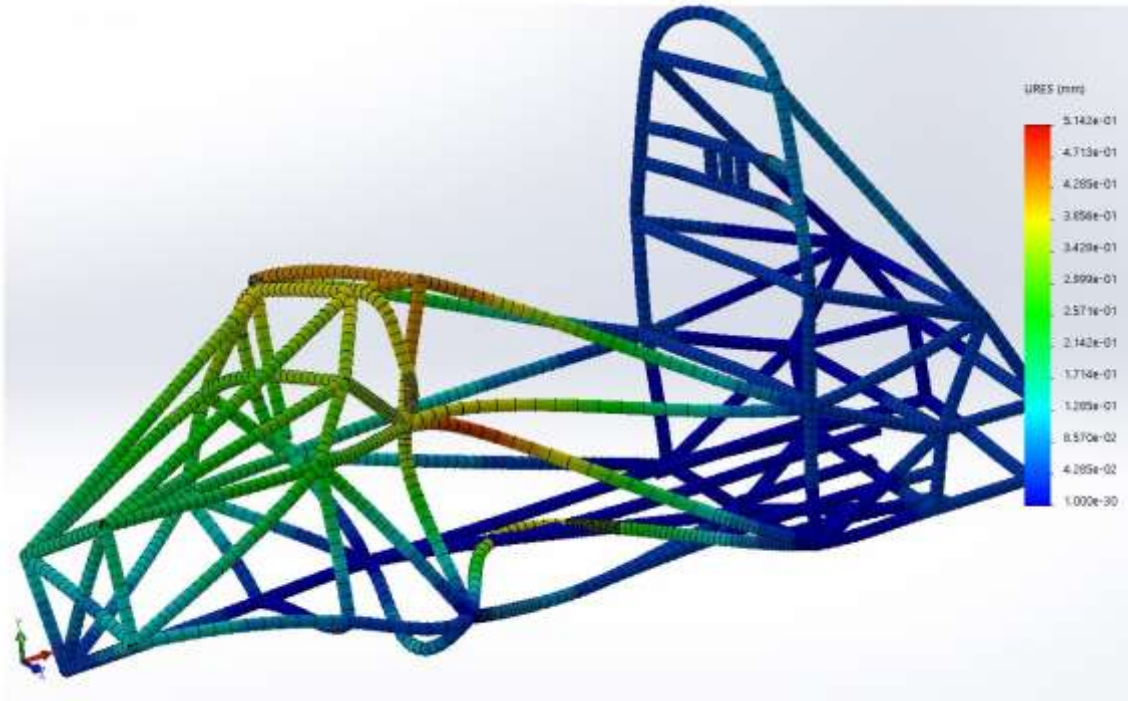


Ilustración 102. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 52. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto lateral	Vigas	103.4	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.514	mm	25mm

3.7.2.3.4. Impacto frontal

- Tensiones

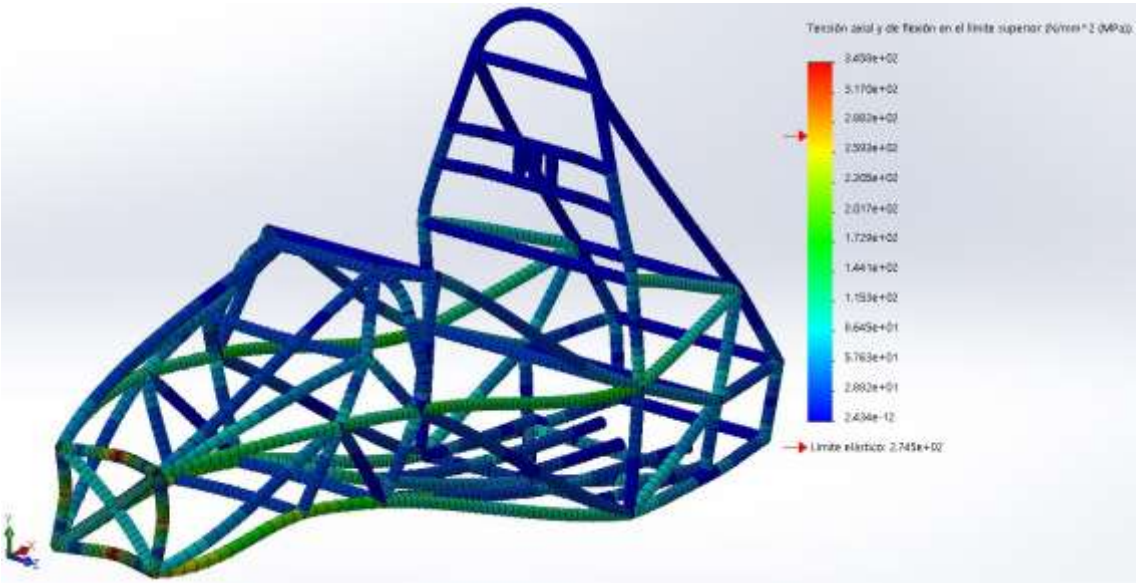


Ilustración 103. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

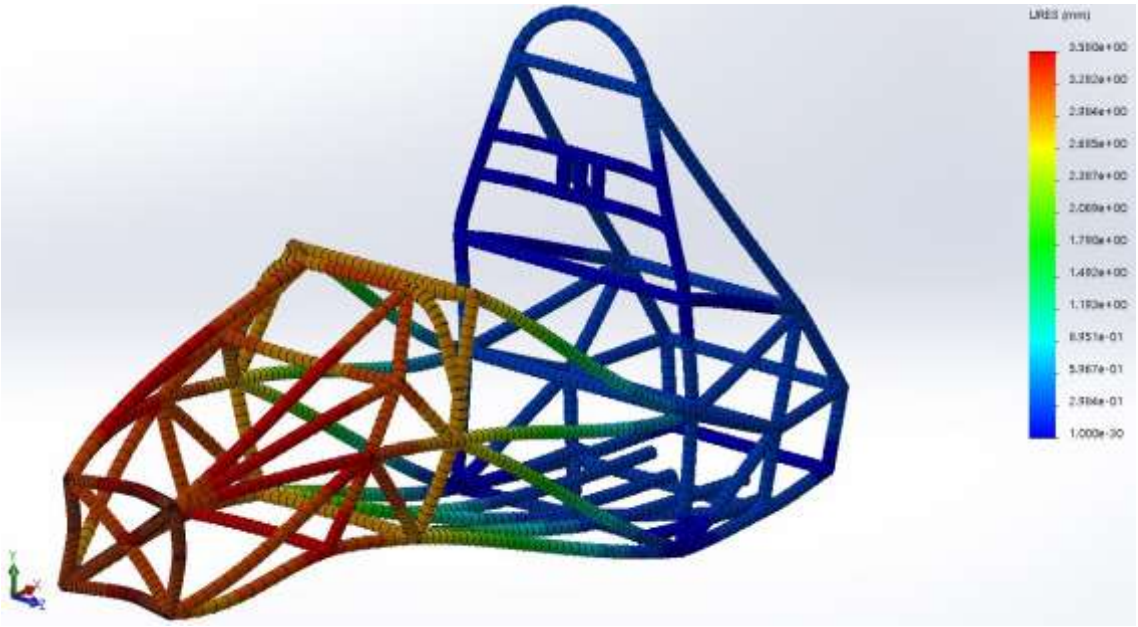


Ilustración 104. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 53. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto fronteral	Vigas	345.8	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	3.58	mm	25mm

3.7.2.3.5. Anclajes cinturón de hombros

- Tensiones

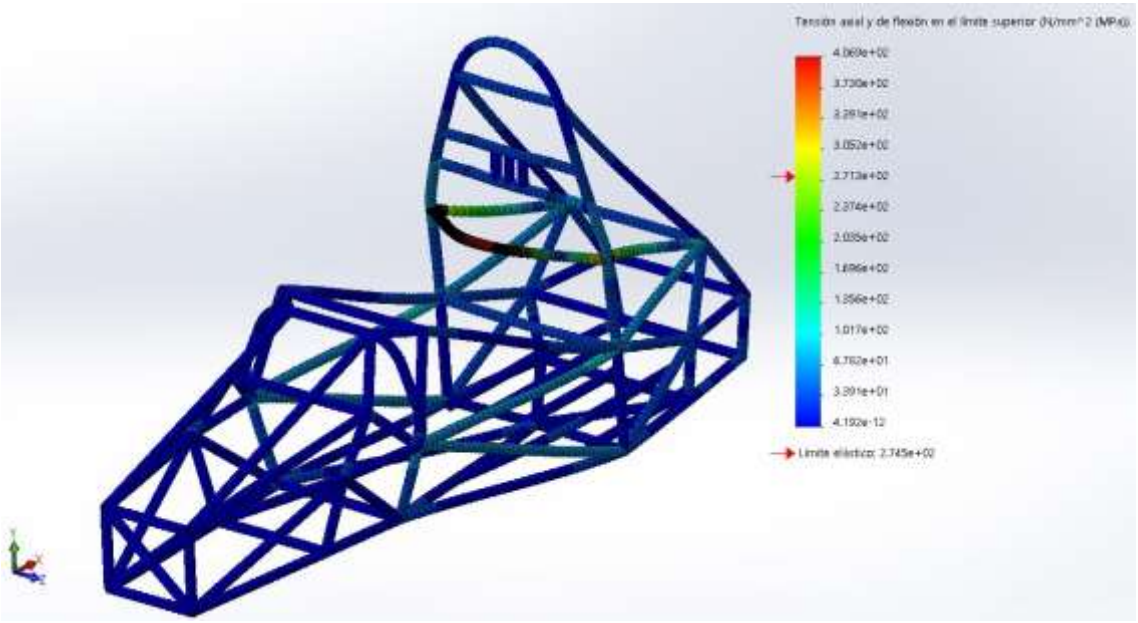


Ilustración 105. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

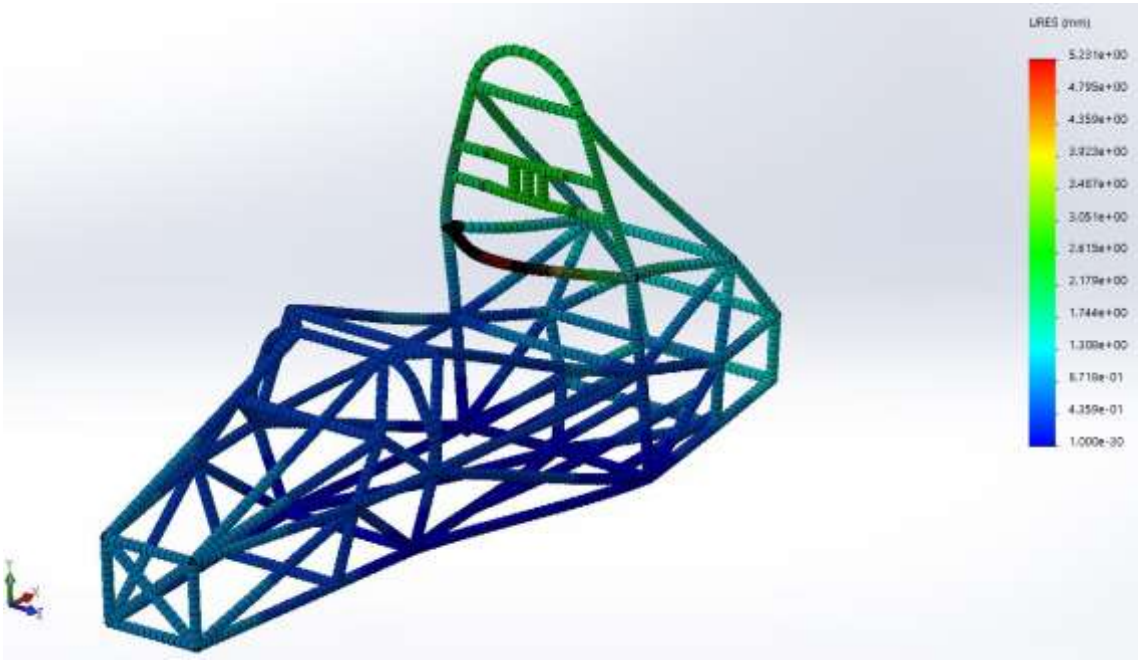


Ilustración 106. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 54. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturón de hombros	Vigas	406.9	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	5.23	mm	25mm

3.7.2.3.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino

- Tensiones

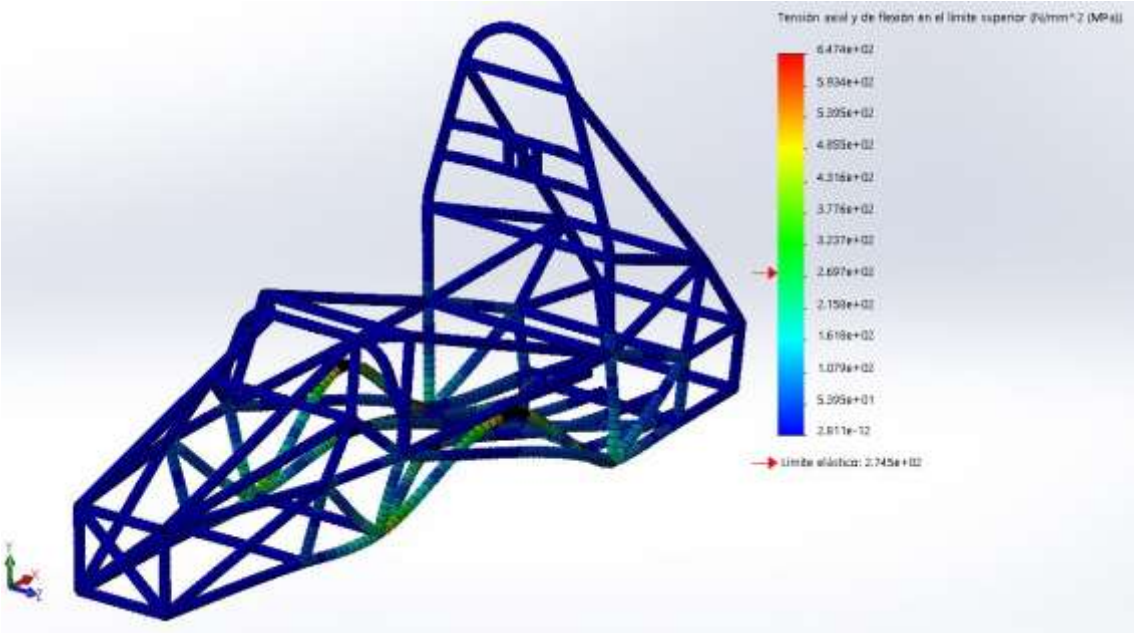


Ilustración 107. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

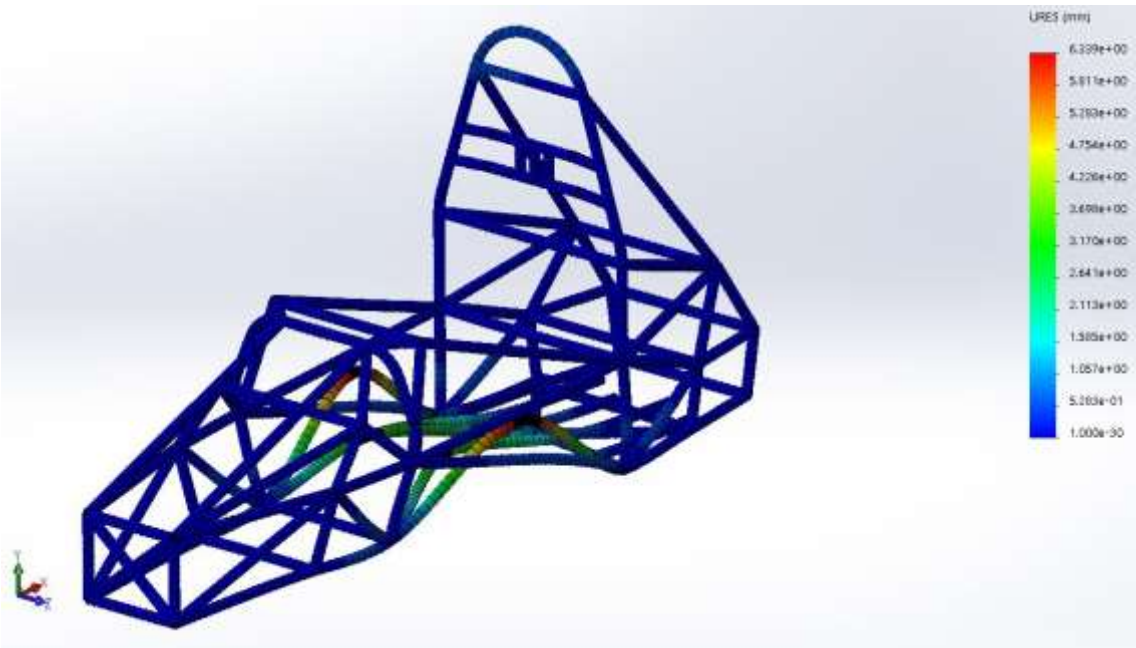


Ilustración 108. Deslazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 55. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	647.4	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	6.34	mm	25mm

3.7.2.3.7. Impacto frontolateral

- Tensiones

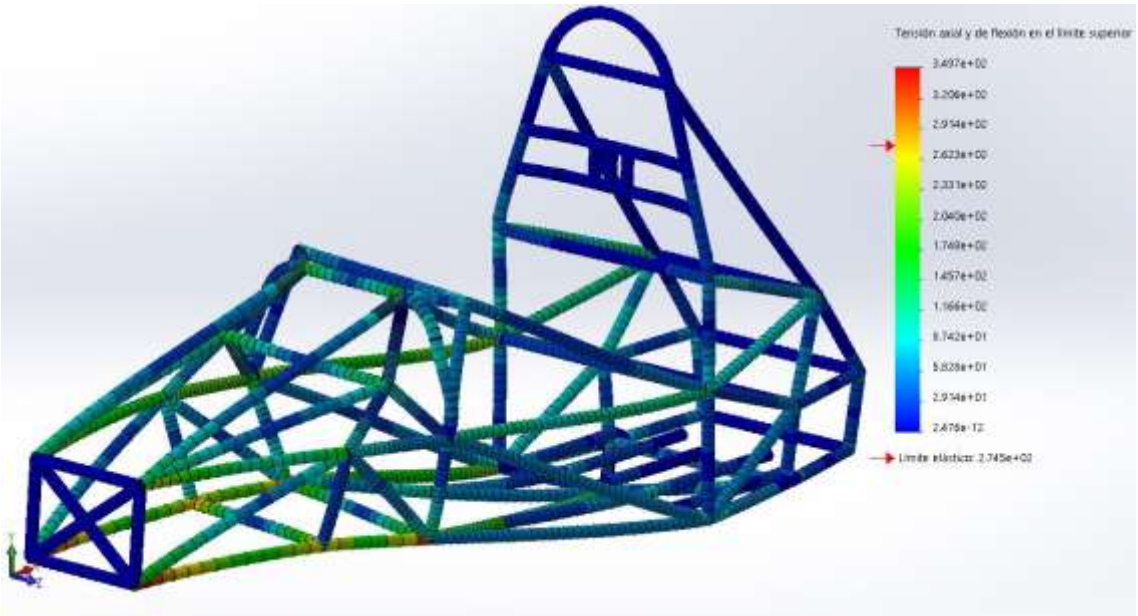


Ilustración 109. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

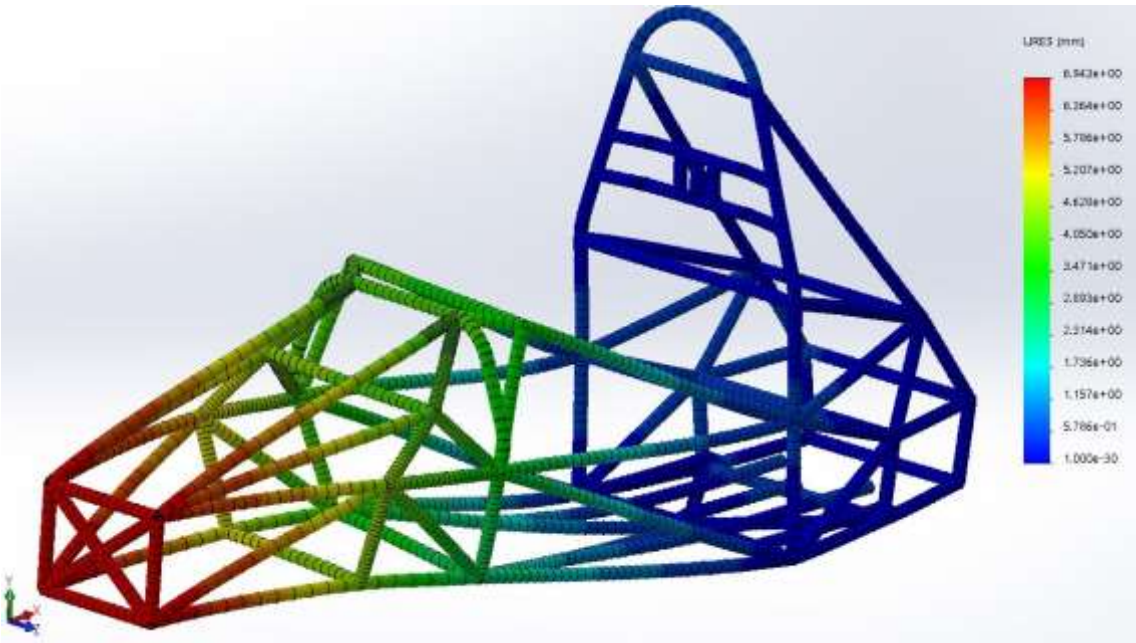


Ilustración 110. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 56. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto frontlateral	Vigas	349.7	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	6.94	mm	25mm

3.7.2.3.8. Anclajes caja de baterías

- Tensiones

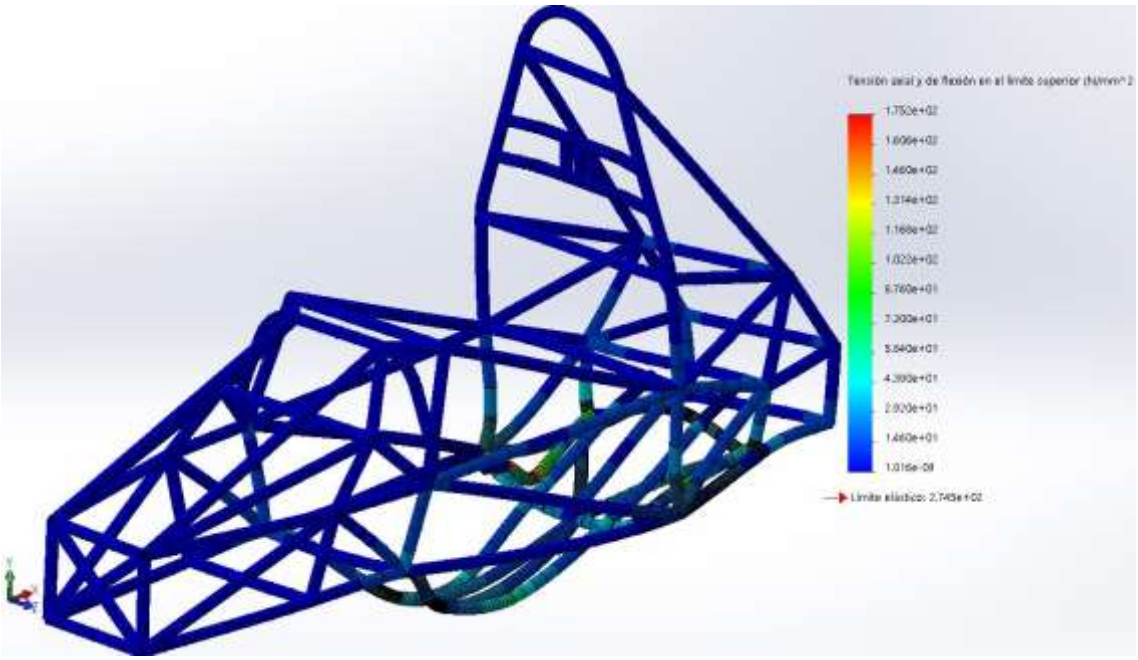


Ilustración 111. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

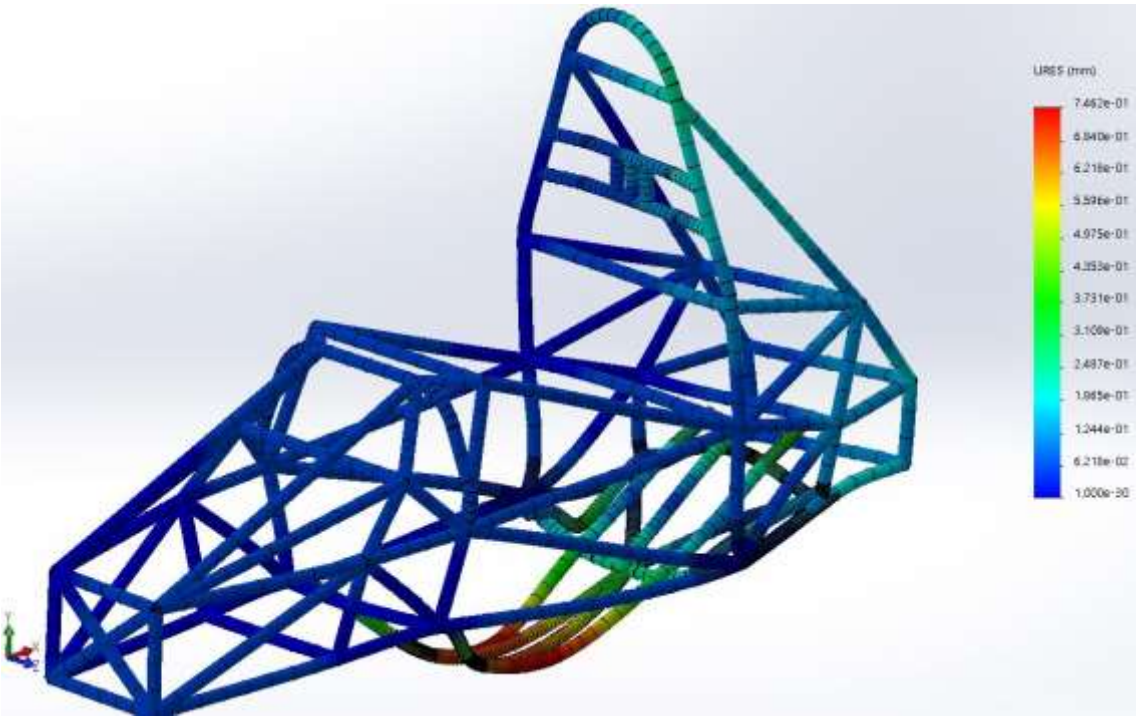


Ilustración 112. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 57. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes caja de baterias	Vigas	175.2	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.75	mm	25mm

3.7.2.3.9. Reposacabezas

- Tensiones

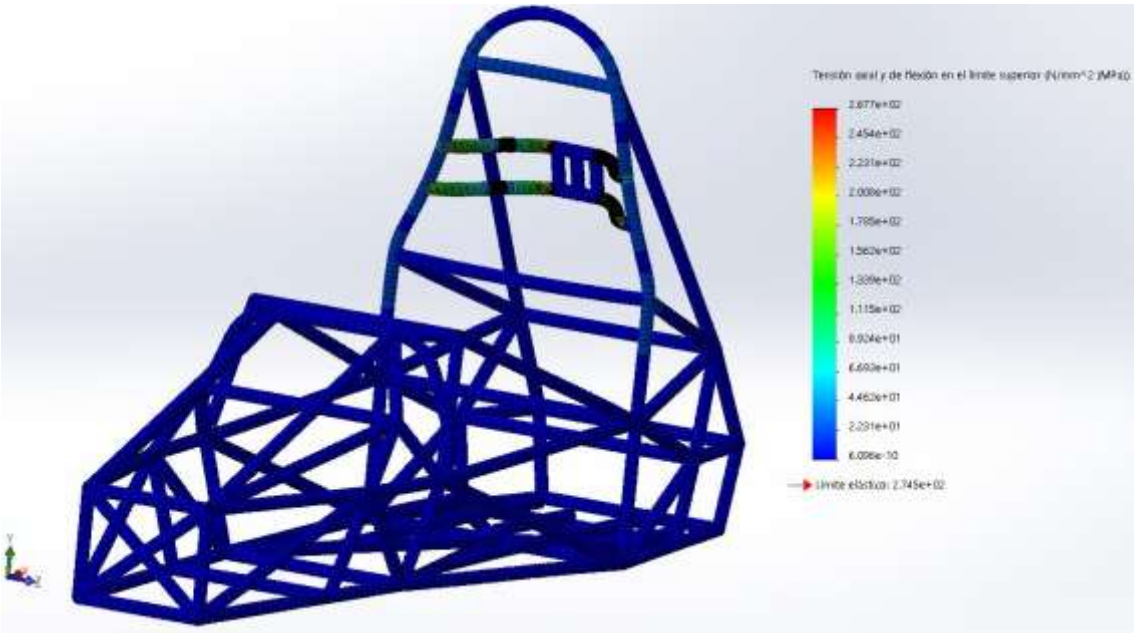


Ilustración 113. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

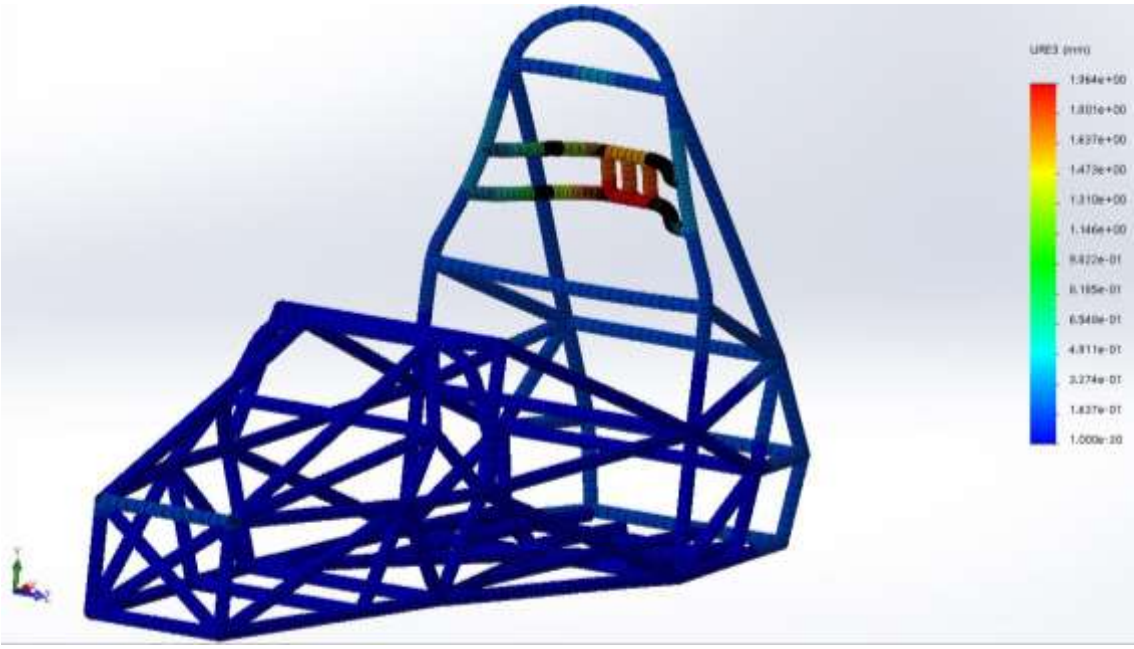


Ilustración 114. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 58. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Reposacabezas	Vigas	267.7	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.96	mm	25mm

3.7.2.3.10. Conclusiones y resumen de resultados

Tabla 59. Tabla resumen iteración. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos	¿Supera?	Acción
	Elemento	Valor	Unid.			
Aro principal	Vigas	283.1	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Desplazamiento	6.69	mm	25mm	NO	
Aro frontal	Vigas	180.5	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	3	mm	25mm	NO	
Impacto lateral	Vigas	103.4	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	0.514	mm	25mm	NO	
	Vigas	345.8	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular

Impacto frontal	Desplazamiento	3.58	mm	25mm	NO	
Anclajes cinturón de hombros	Vigas	406.9	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Desplazamiento	5.23	mm	25mm	NO	
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	647.4	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Desplazamiento	6.34	mm	25mm	NO	
Impacto frontolateral	Vigas	349.7	MPa	274.5 MPa	SI	Recalcular
	Desplazamiento	6.94	mm	25mm	NO	
Anclajes caja de baterías	Vigas	175.2	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	0.75	mm	25mm	NO	
Reposacabezas	Vigas	267.7	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	1.96	mm	25mm	NO	

Aro principal: Aumentar perfil y sección

Impacto frontal: Aumentar perfil y sección

Anclajes cinturón hombros: Aumentar perfil y sección -> mismo diámetro que aros principales pero mayor sección

Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino: Aumentar perfil y sección -> mismo diámetro que aros principales pero mayor sección

Impacto frontolateral: Aumentar perfil y sección de conectores mamparo con aro frontal -> mismo diámetro que aros principales pero mayor sección

3.7.2.4. Tercera Iteración

En esta simulación, las dimensiones de los perfiles de los tubos empleados para este caso son:

Tabla 60. Dimensiones perfiles. Fuente: propia

Perfil		Uso
Circular hueco	48x2	Mamparo frontal
	40x3	Anclaje cinturones hombros
	40x2	Aro principal, aro frontal y anclaje cinturones hombros y antisubmarino y regazo
	35x2	Otros elementos
	10x2	Reposacabezas
Cuadrado	50x30x2.5	Cama caja baterías

Dado que la segunda iteración mostraba que las tensiones de los anclajes de los cinturones de hombros, antisubmariono y regazo sufrían una reducción poco significativa con respecto al aumento del perfil, se ha tenido que diseñar elementos que los restrinjan.

3.7.2.4.1. Aro principal

- Tensiones

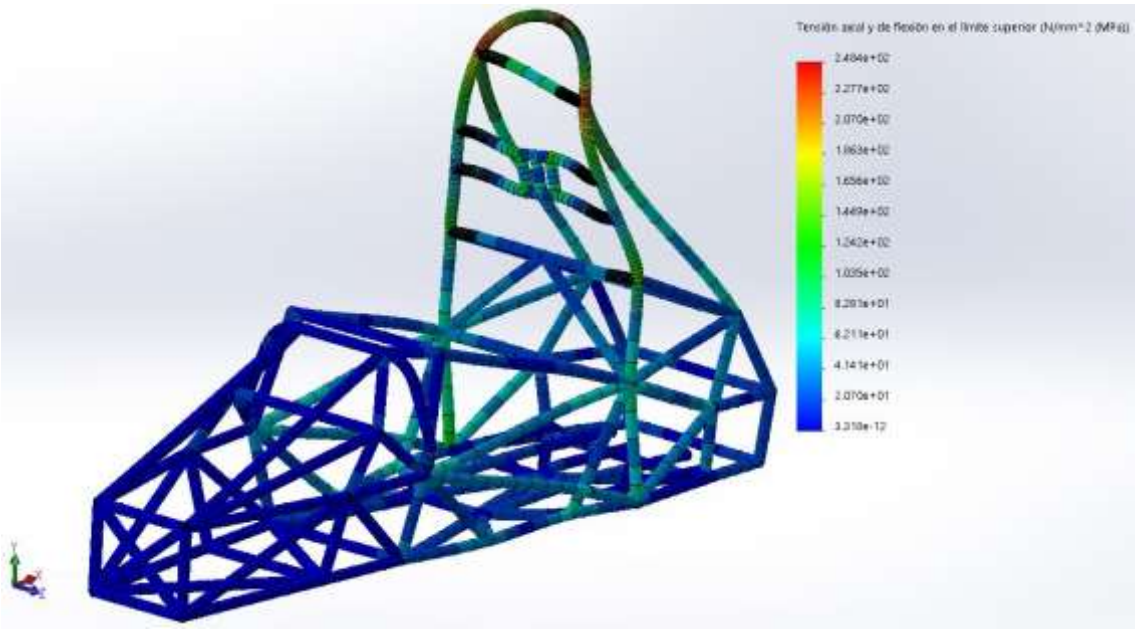


Ilustración 115. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

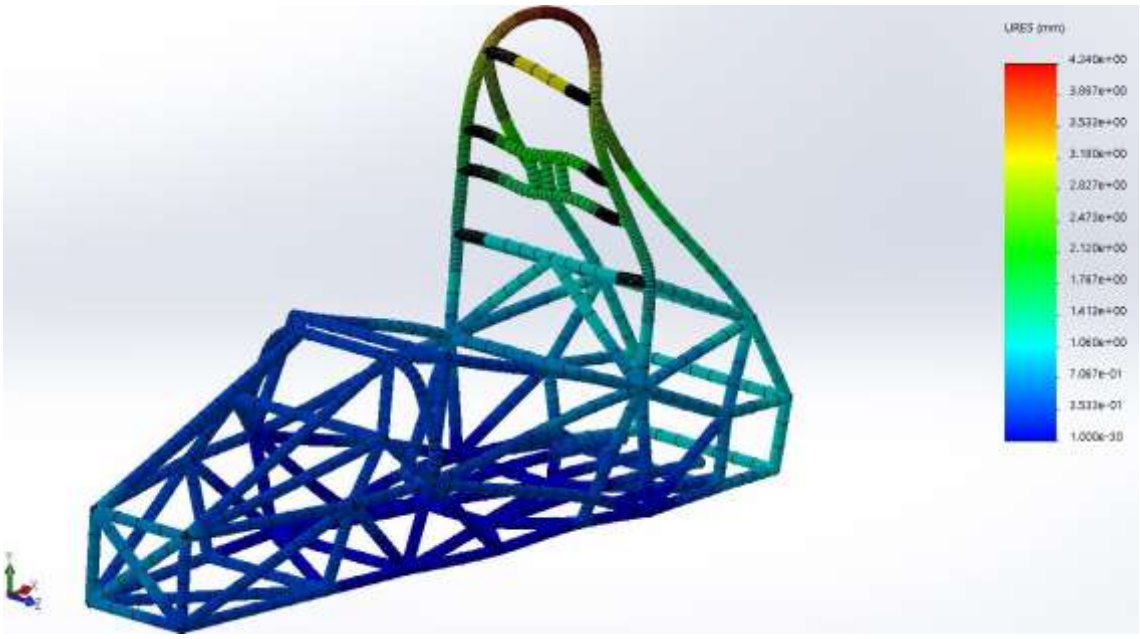


Ilustración 116. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 61. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro principal	Vigas	248.4	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	4.24	mm	25mm

3.7.2.4.2. Aro frontal

- Tensiones

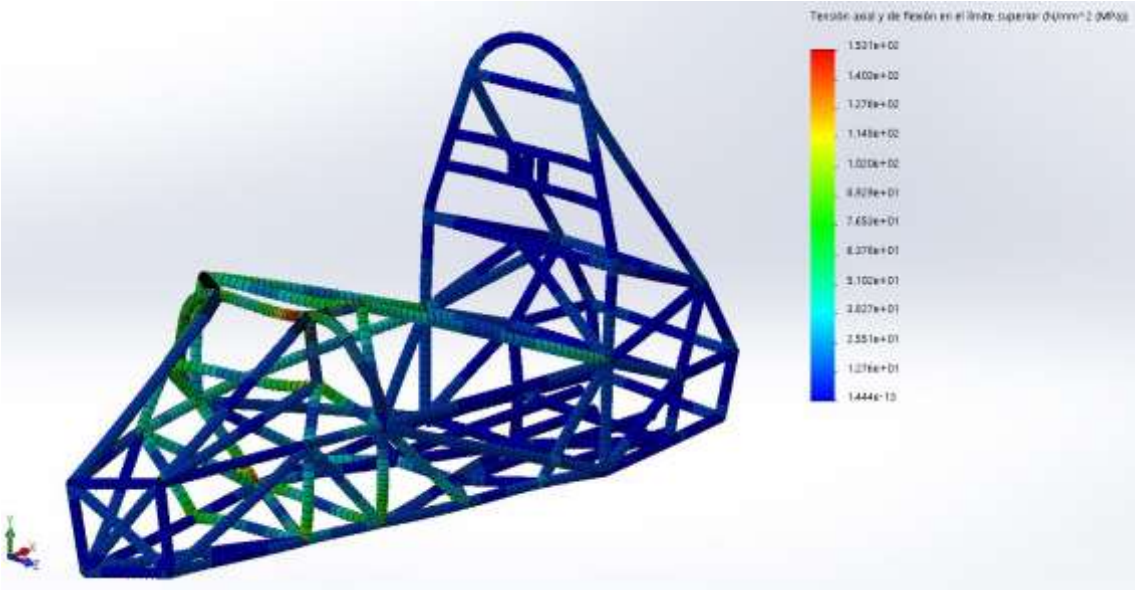


Ilustración 117. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

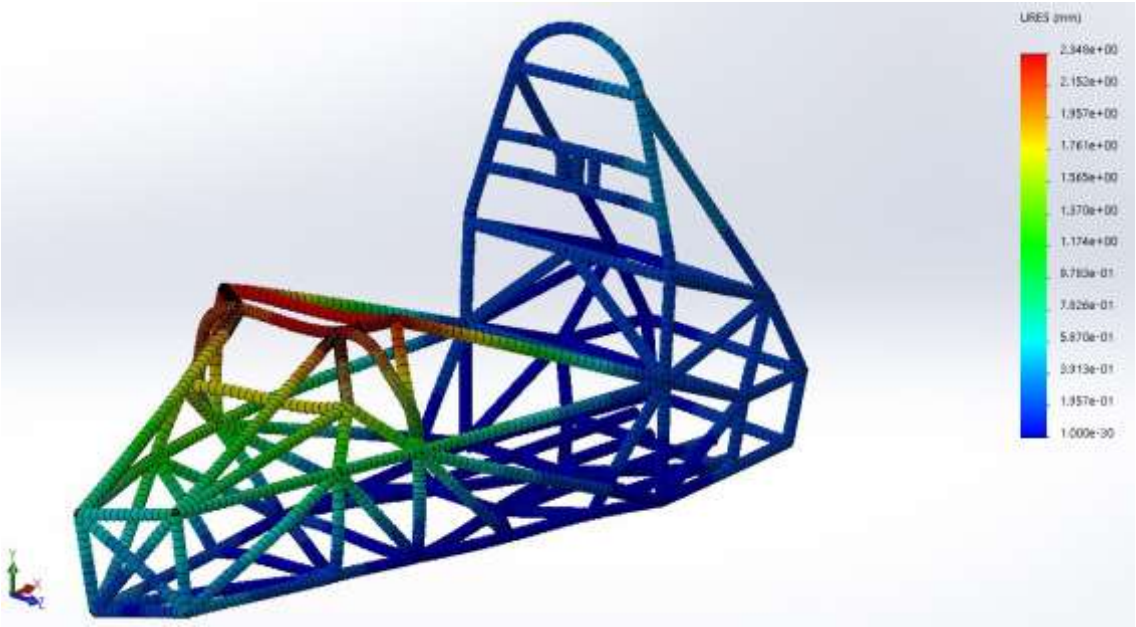


Ilustración 118. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 62. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro frontal	Vigas	1.531	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	2.35	mm	25mm

3.7.2.4.3. Impacto lateral

- Tensiones

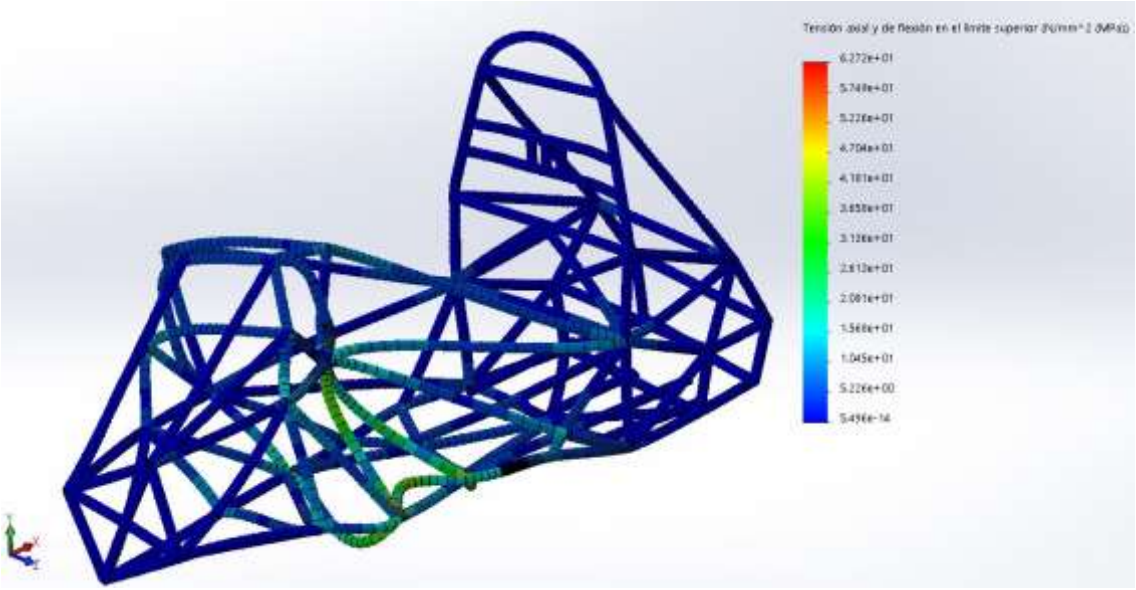


Ilustración 119. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

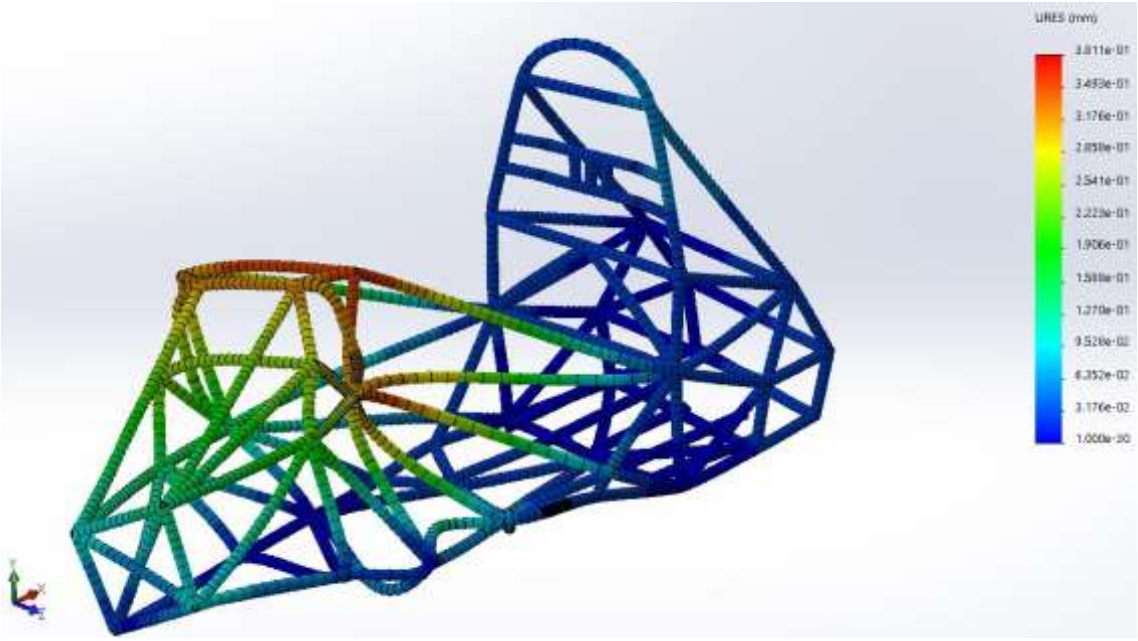


Ilustración 120. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 63. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto lateral	Vigas	62.72	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.38	mm	25mm

3.7.2.4.4. Impacto frontal

- Tensiones

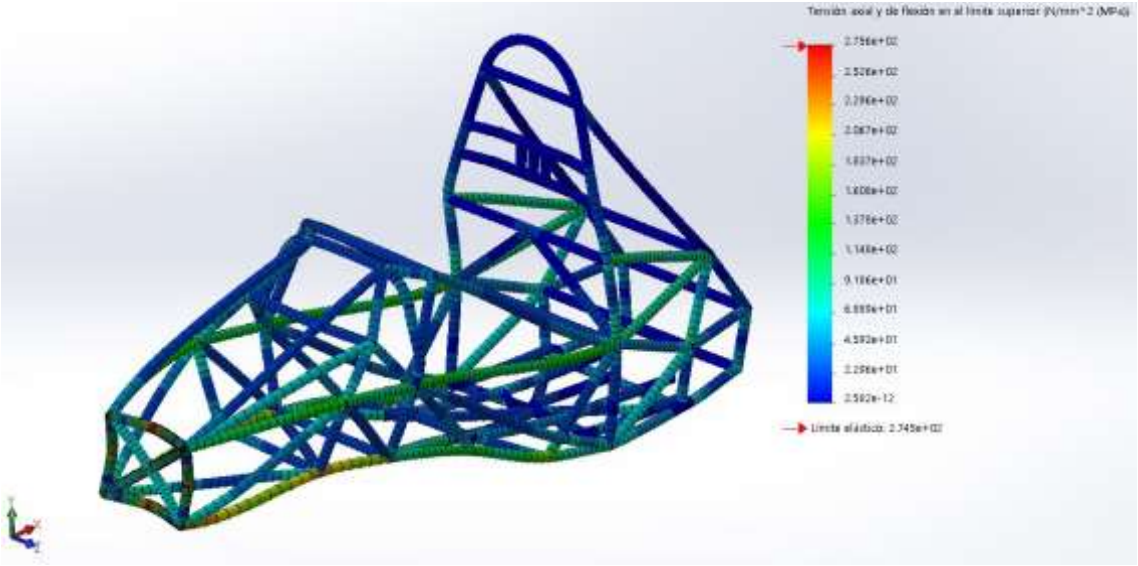


Ilustración 121. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

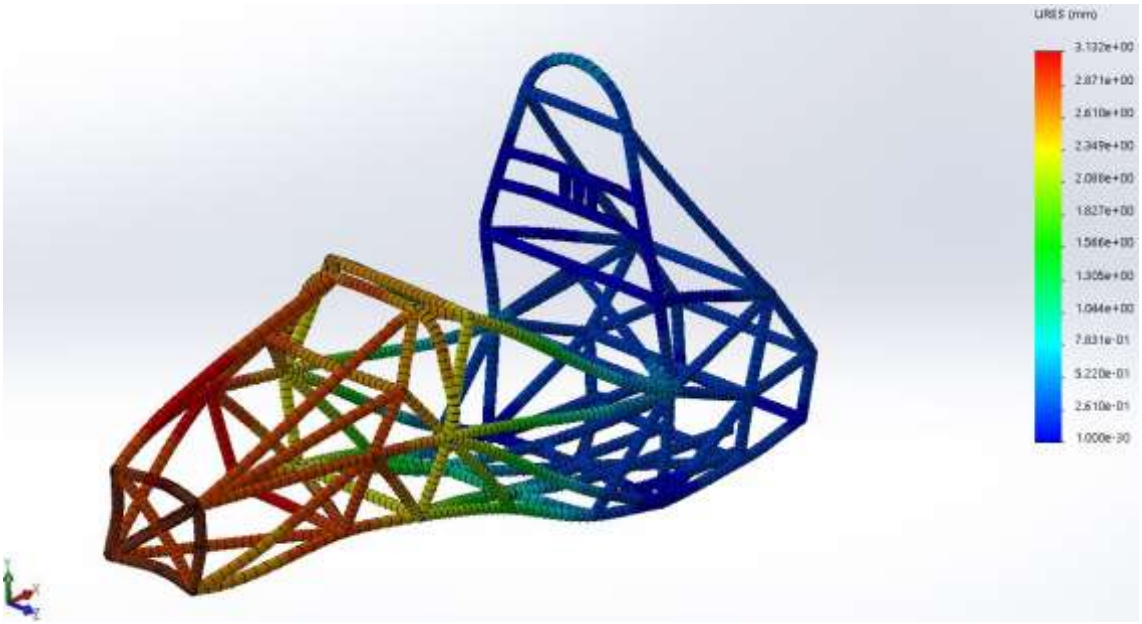


Ilustración 122. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto fronteral	Vigas	275.6	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	3.13	mm	25mm

3.7.2.4.5. Anclajes cinturón de hombros

- Tensiones

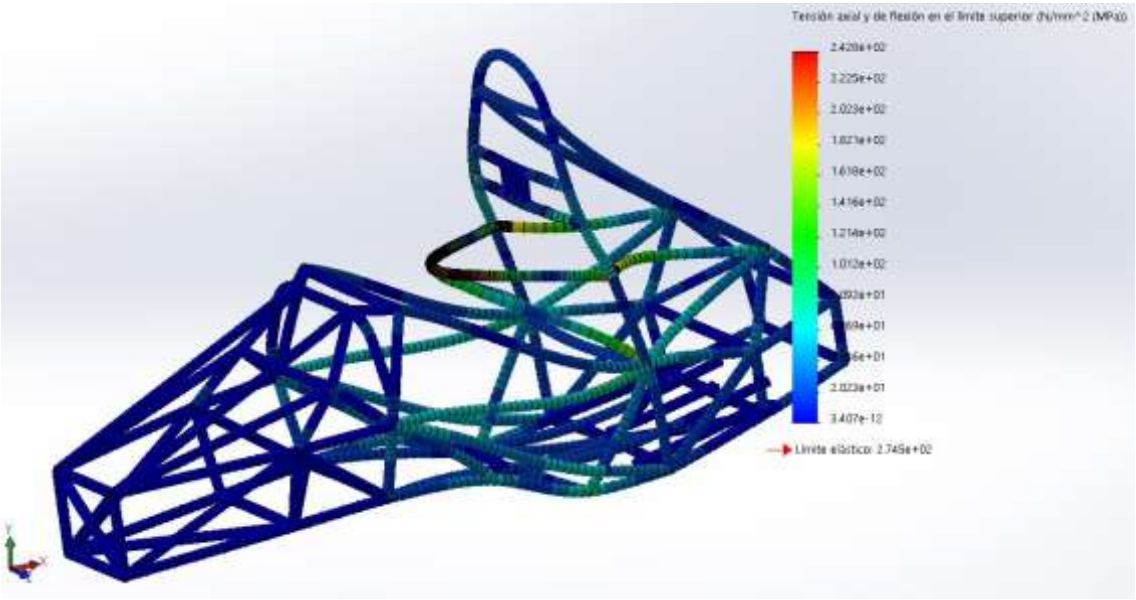


Ilustración 123. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

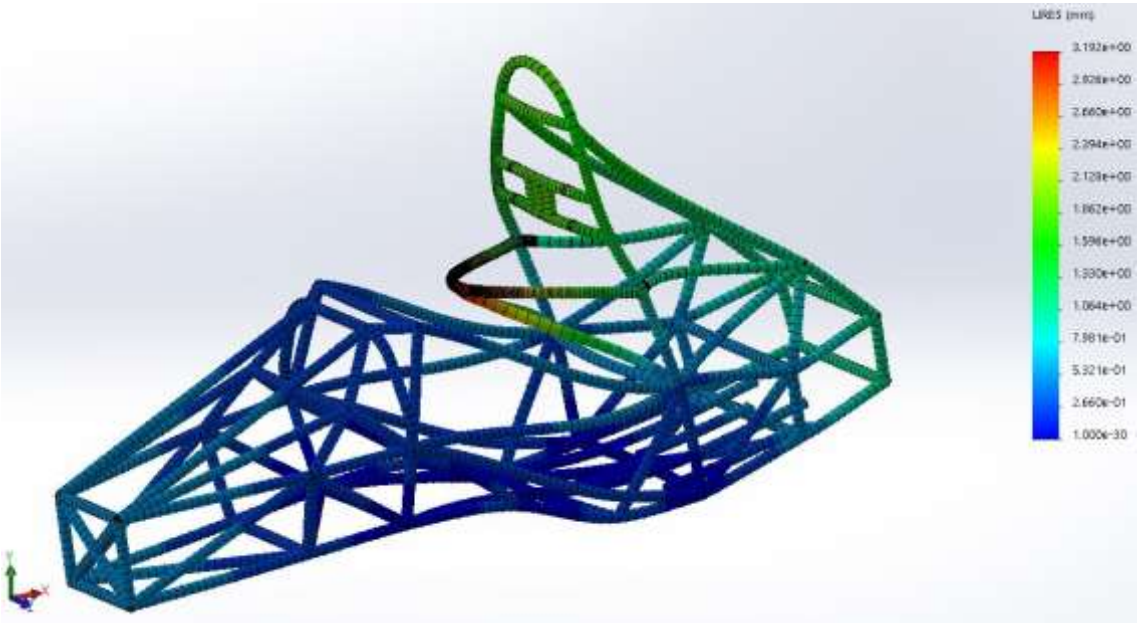


Ilustración 124. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 64. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturón de hombros	Vigas	242.8	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	3.19	mm	25mm

3.7.2.4.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino

- Tensiones

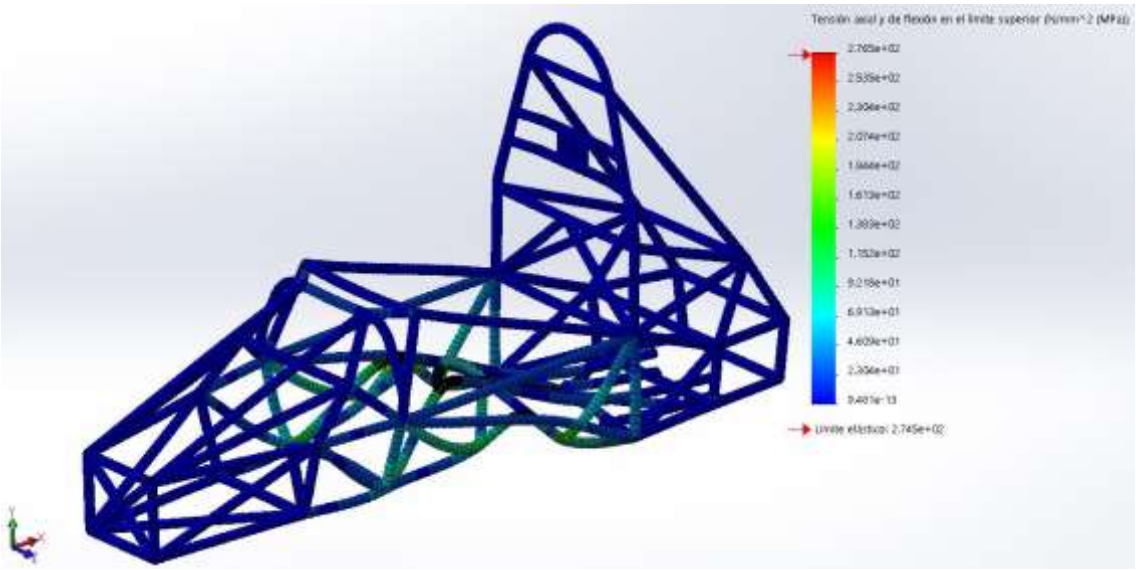


Ilustración 125. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

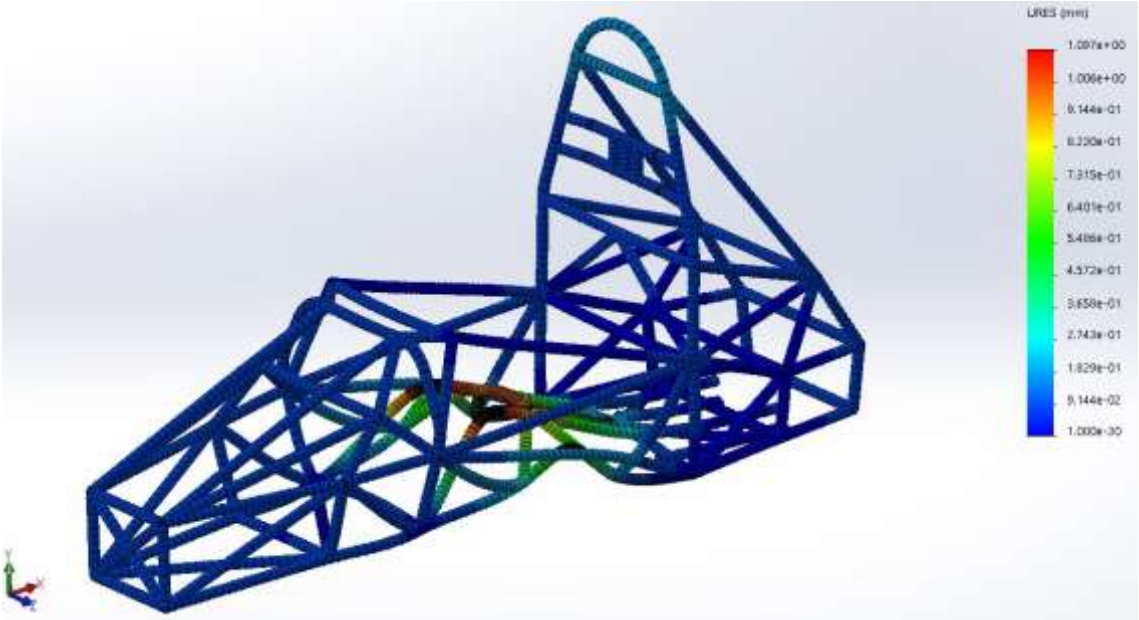


Ilustración 126. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 65. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	276.5	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.1	mm	25mm

3.7.2.4.7. Impacto frontolateral

- Tensiones

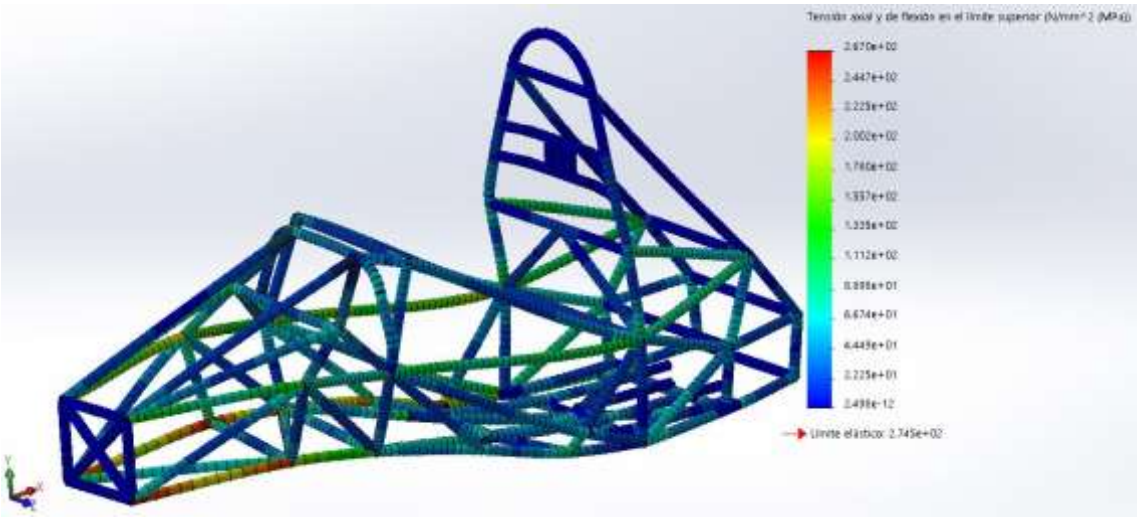


Ilustración 127. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

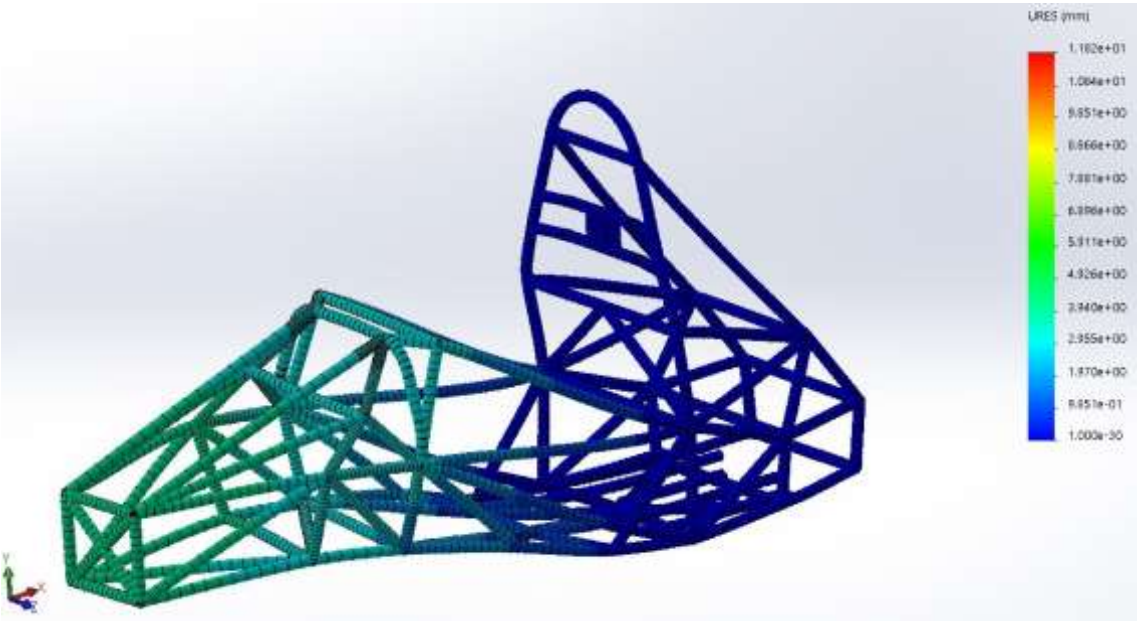


Ilustración 128. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 66. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto frontolateral	Vigas	267	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	11.82	mm	25mm

3.7.2.4.8. Anclajes caja de baterías

- Tensiones

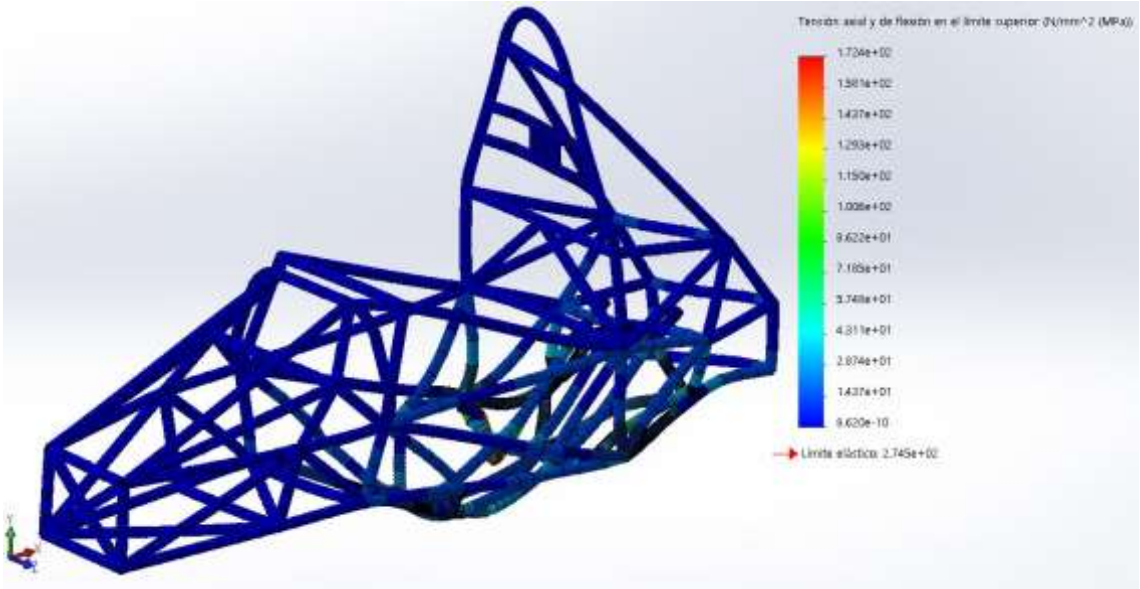


Ilustración 129. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

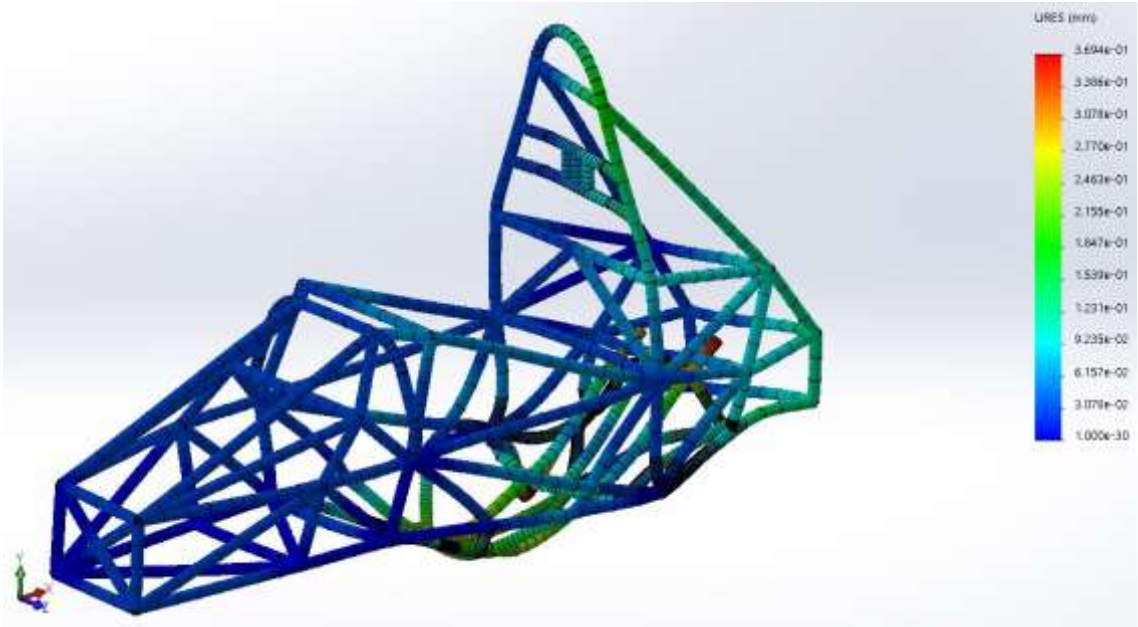


Ilustración 130. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 67. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes caja de baterias	Vigas	172.4	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.37	mm	25mm

3.7.2.4.9. Reposacabezas

- Tensiones

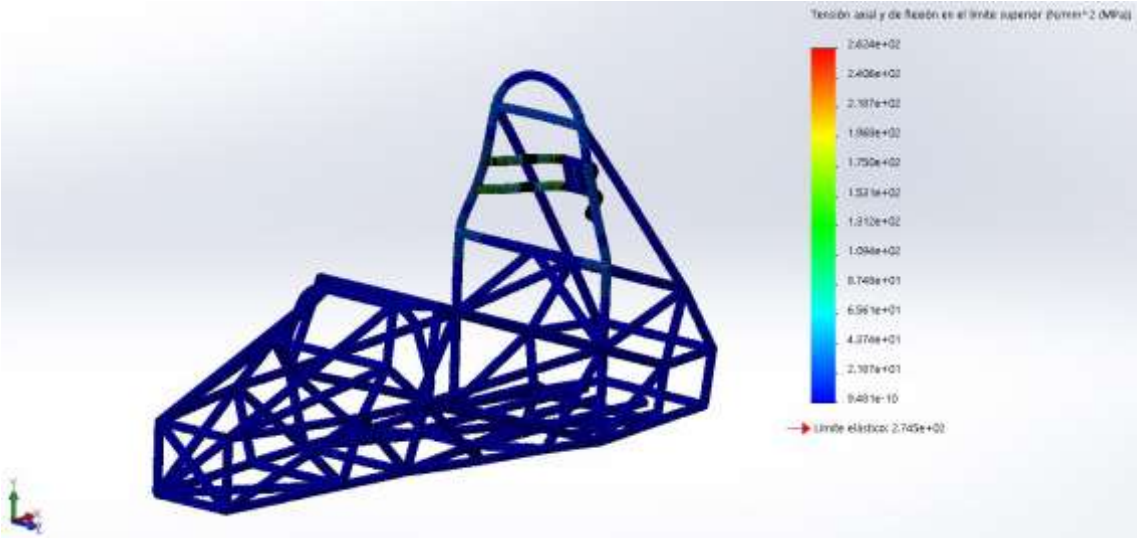


Ilustración 131. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

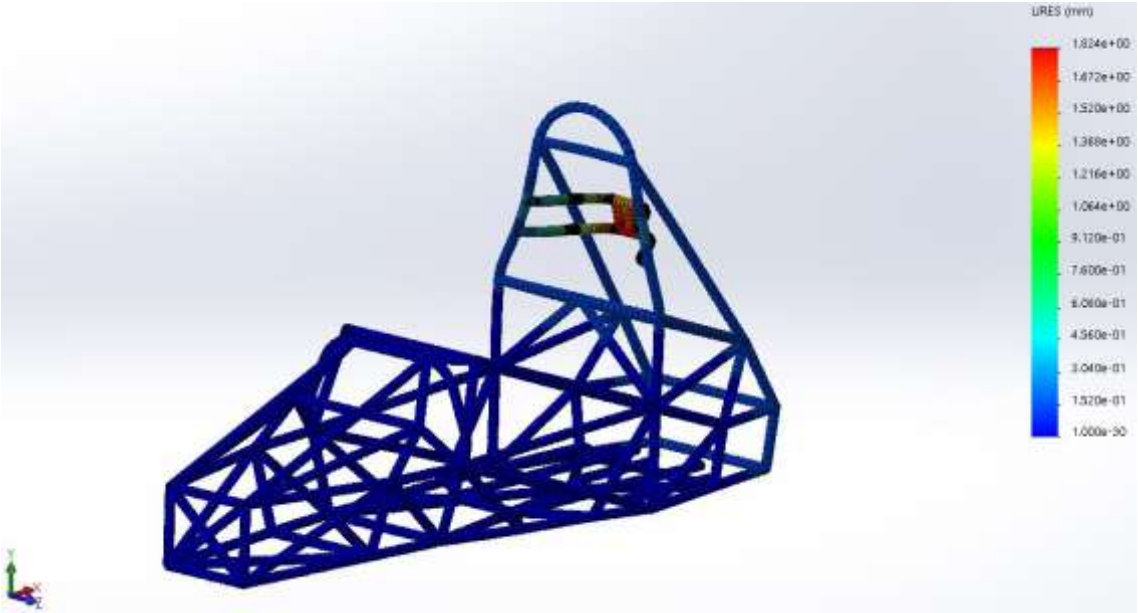


Ilustración 132. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 68. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Reposacabezas	Vigas	262.4	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.82	mm	25mm

3.7.2.4.10. Conclusiones y resumen de resultados

Estudio	Resultados			Valores máximos	¿Supera?	Acción
	Elemento	Valor	Unid.			
Aro principal	Vigas	248.4	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	4.24	mm	25mm	NO	
Aro frontal	Vigas	1.531	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	2.35	mm	25mm	NO	
Impacto lateral	Vigas	62.72	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	0.38	mm	25mm	NO	
Impacto frontal	Vigas	275.6	MPa	274.5 MPa	SI	--------
	Desplazamiento	3.13	mm	25mm	NO	
Anclajes cinturón de hombros	Vigas	242.8	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	3.19	mm	25mm	NO	
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	276.5	MPa	274.5 MPa	SI	--------
	Desplazamiento	1.1	mm	25mm	NO	
Impacto frontolateral	Vigas	267	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	11.82	mm	25mm	NO	
Anclajes caja de baterías	Vigas	172.4	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	0.37	mm	25mm	NO	
Reposacabezas	Vigas	262.4	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	1.82	mm	25mm	NO	

Aunque se supere el límite elástico establecido (274.5MPa) para los estudios del impacto frontal y del anclaje de los cinturones del regazo y antisubmarino, no se va a continuar con otra iteración ya que este límite elástico es un límite inferior al que establecen las propiedades mecánicas del material AISI1010, y la tensión máxima que se obtienen en estos estudios es muy cercano al límite establecido.

3.7.2.5. Cuarta Iteración

En esta simulación, las dimensiones de los perfiles de los tubos empleados para este caso son:

Tabla 69. Dimensiones perfiles. Fuente: propia

Perfil		Uso
Circular hueco	48x2	Mamparo frontal
	40x3	Anclaje cinturones hombros
	40x2	Aro principal, aro frontal y anclaje cinturones hombros y antisubmarino y regazo
	35x2	Otros elementos
	10x2	Reposacabezas
Cuadrado	50x30x2.5	Cama caja baterías

Debido a que en la iteración 3 no se aseguraba que se cumpliese el requerimiento de triangulación nodo a nodo en la zona del Cockpit, se procede a modificar la triangulación del impacto lateral y de la zona inferior del chasis, en concreto, de los anclajes de los cinturones.

3.7.2.5.1. Aro principal

- Tensiones

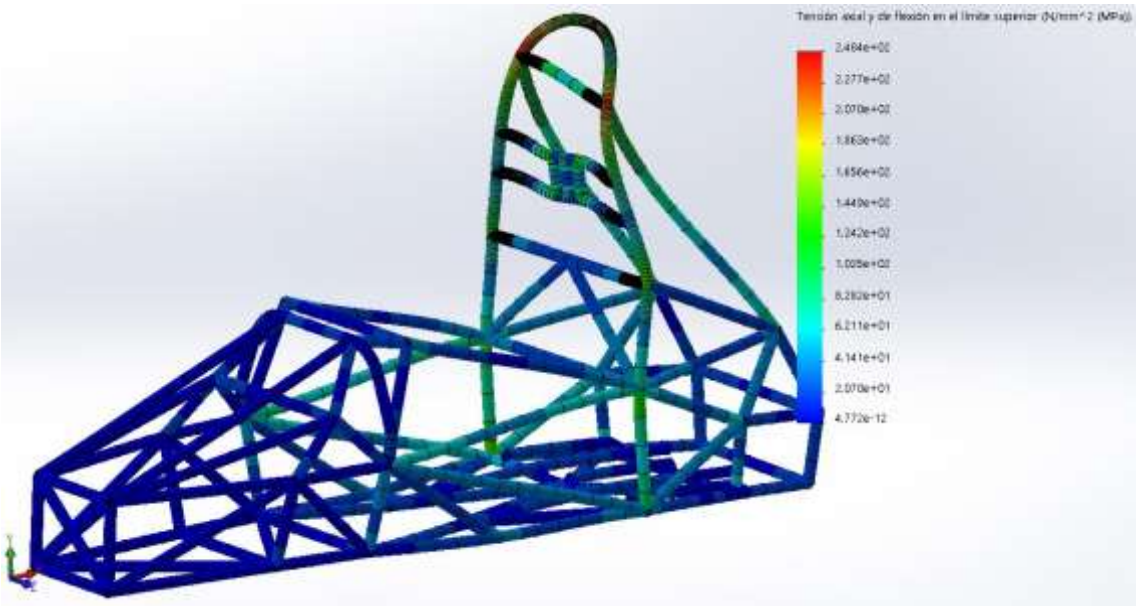


Ilustración 133. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

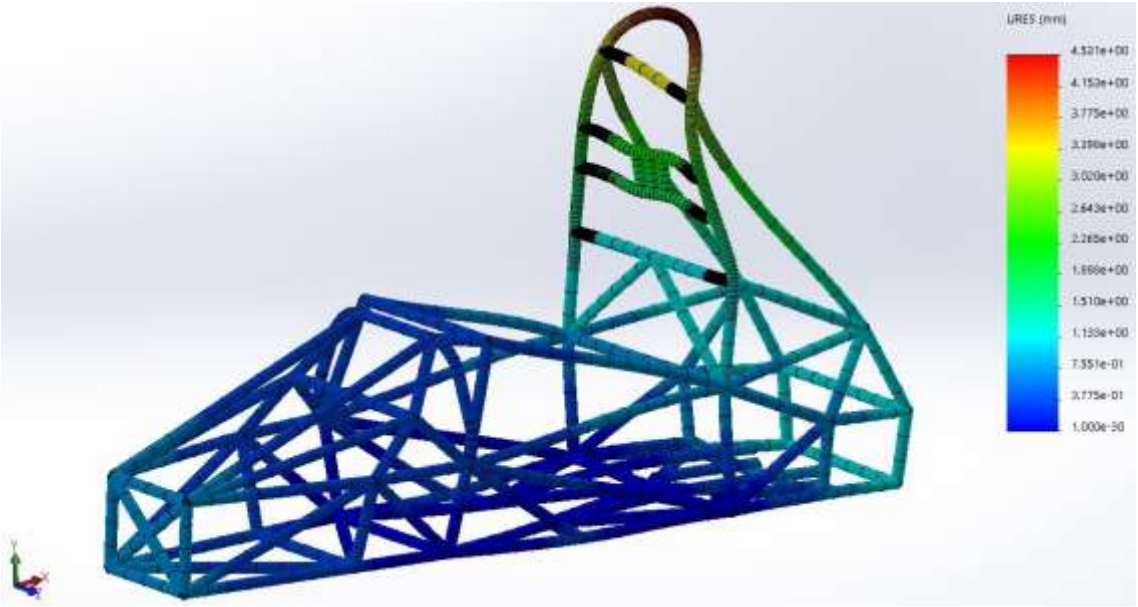


Ilustración 134. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 70. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro principal	Vigas	248.4	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	4.53	mm	25mm

3.7.2.5.2. Aro frontal

- Tensiones

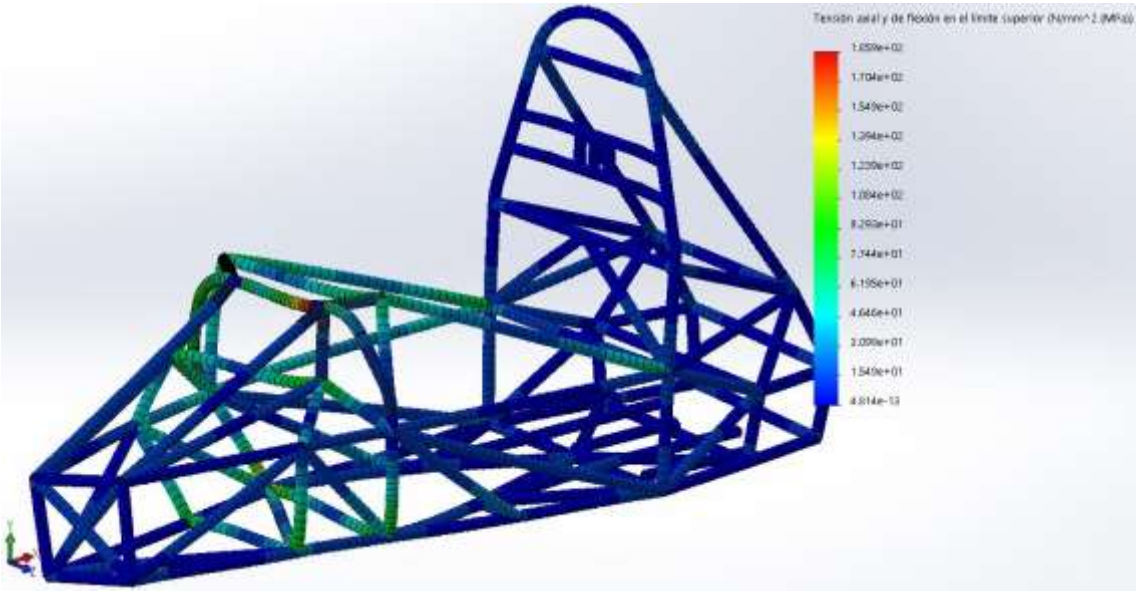


Ilustración 135. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

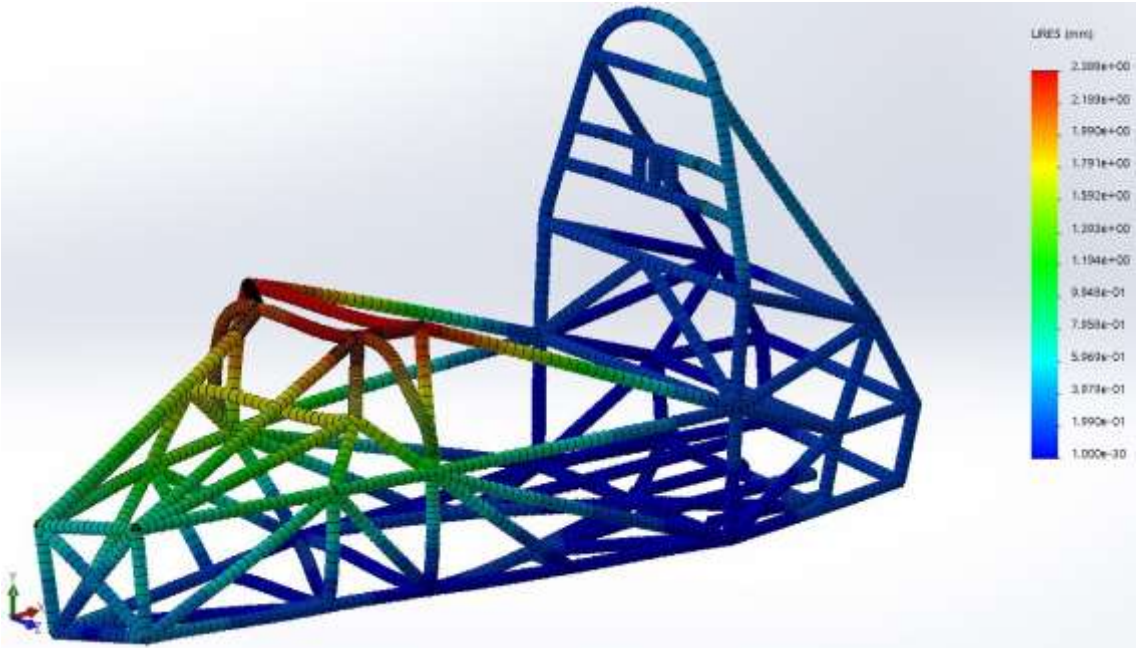


Ilustración 136. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro frontal	Vigas	185.9	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	2.39	mm	25mm

3.7.2.5.3. Impacto lateral

- Tensiones

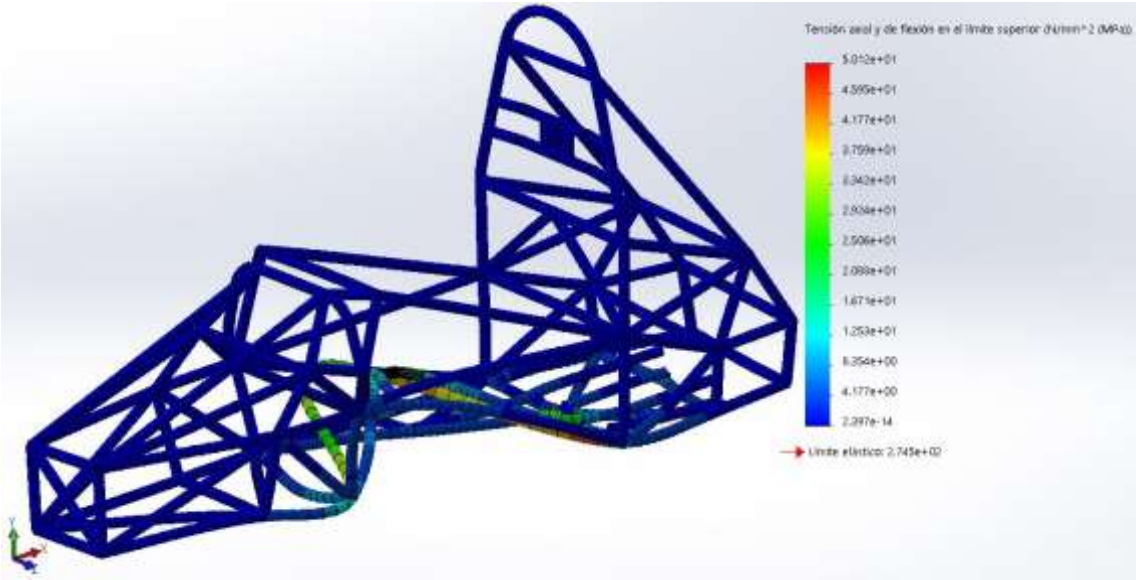


Ilustración 137. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

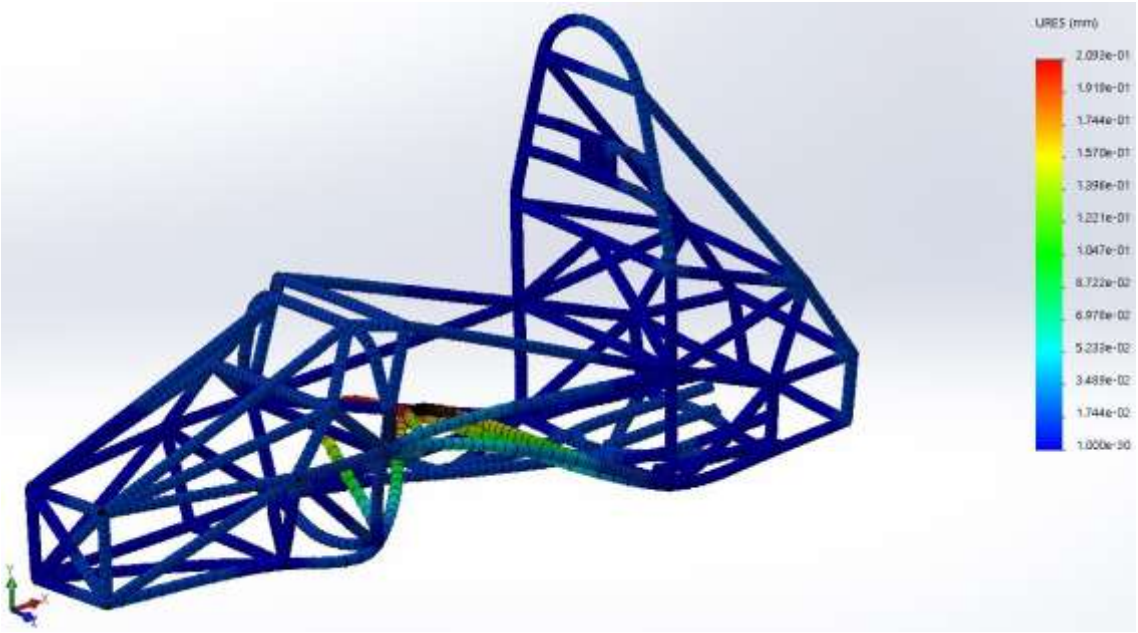


Ilustración 138. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 71. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto lateral	Vigas	50.1	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.21	mm	25mm

3.7.2.5.4. Impacto frontal

- Tensiones

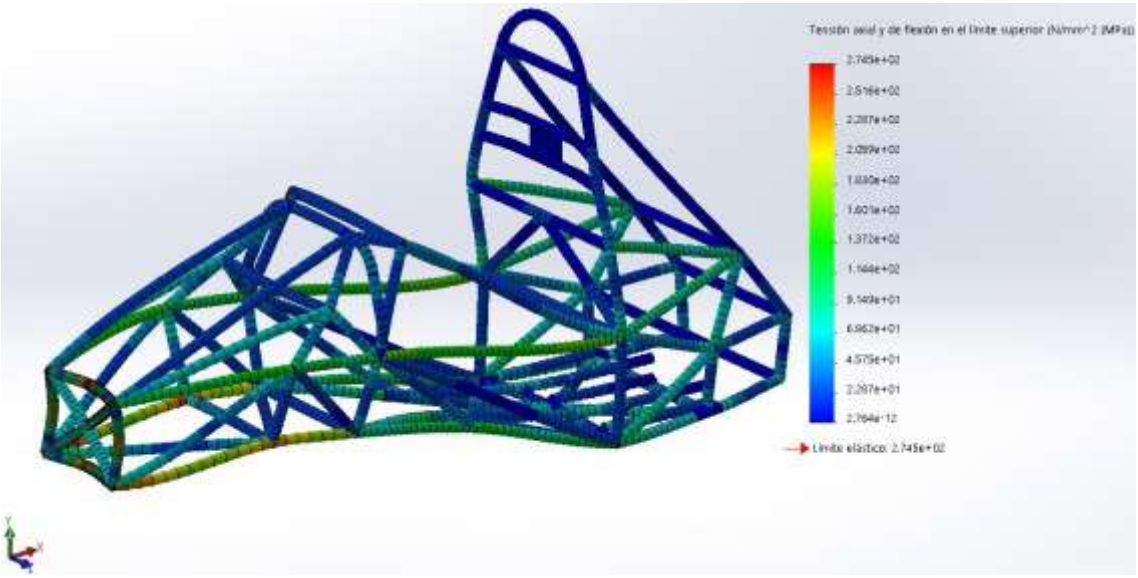


Ilustración 139. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

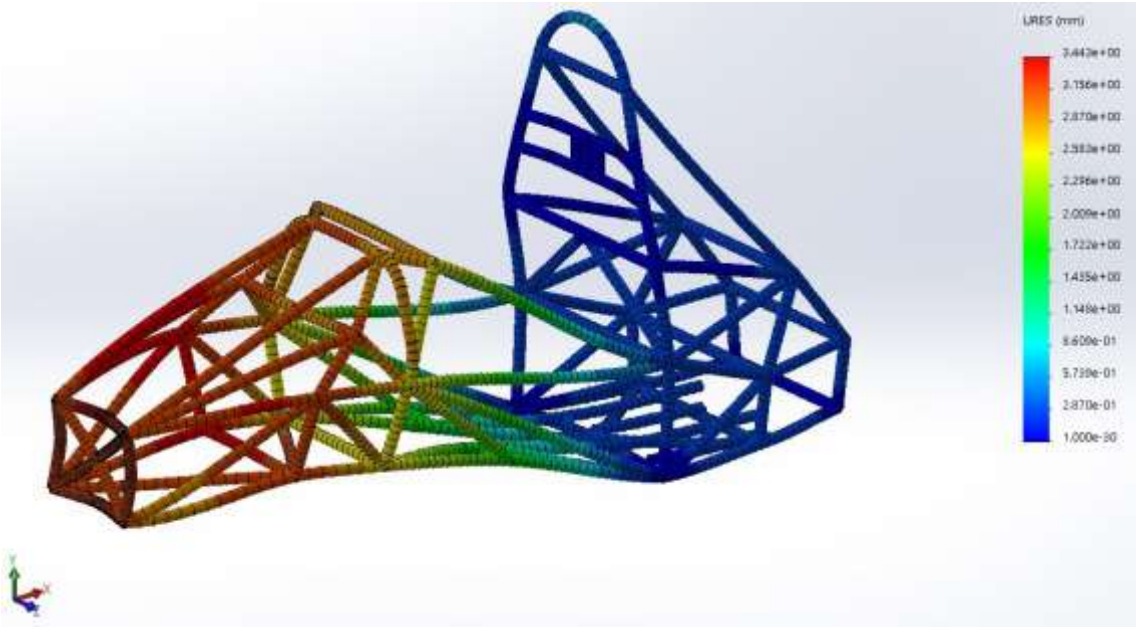


Ilustración 140. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 72. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto fronteral	Vigas	274.5	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	3.44	mm	25mm

3.7.2.5.5. Anclajes cinturón de hombros

- Tensiones

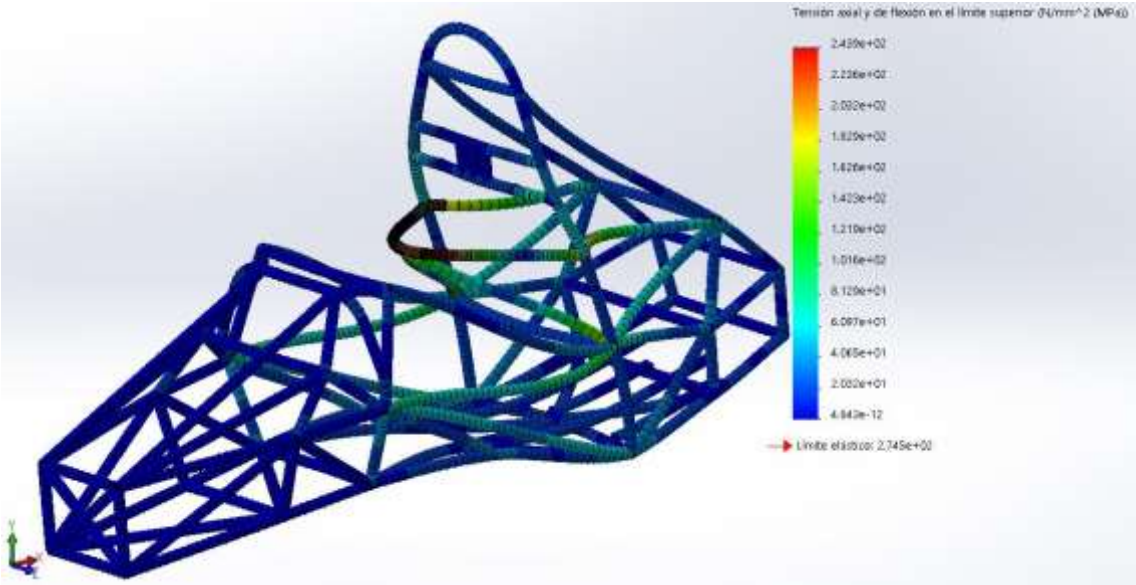


Ilustración 141. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

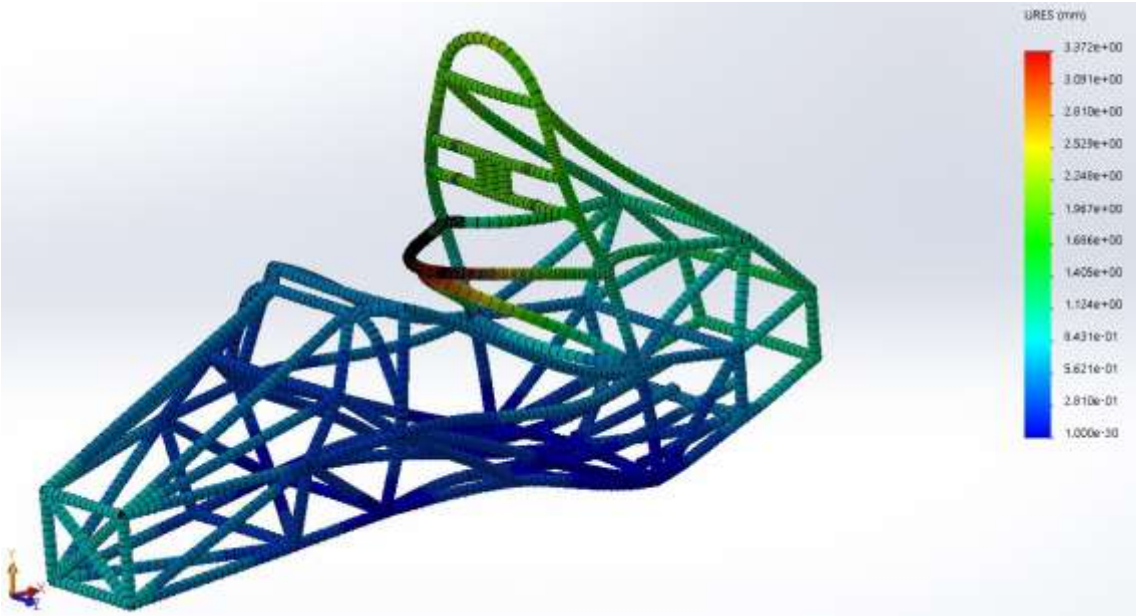


Ilustración 142. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 73. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturones de hombros	Vigas	243.9	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	3.37	mm	25mm

3.7.2.5.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino

- Tensiones

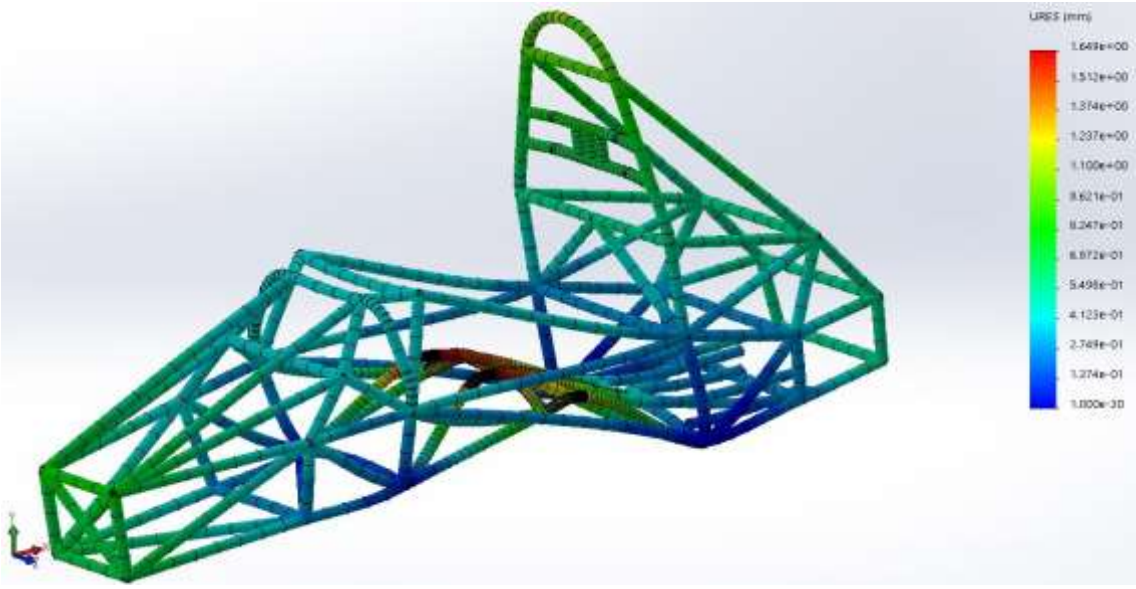


Ilustración 143. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

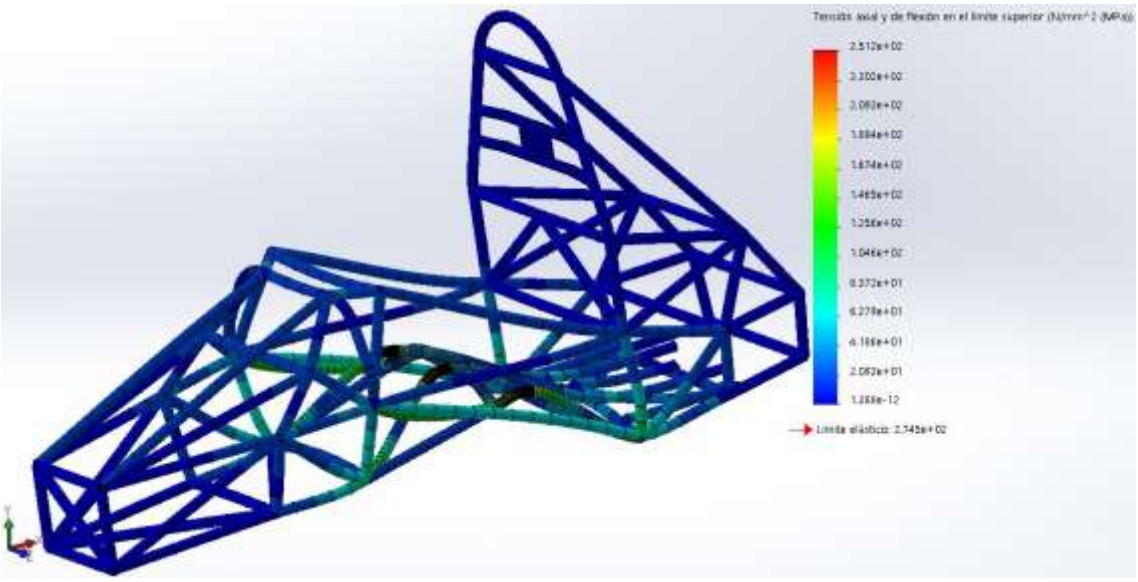


Ilustración 144. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 74. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	251.2	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.6	mm	25mm

3.7.2.5.7. Impacto frontolateral

- Tensiones

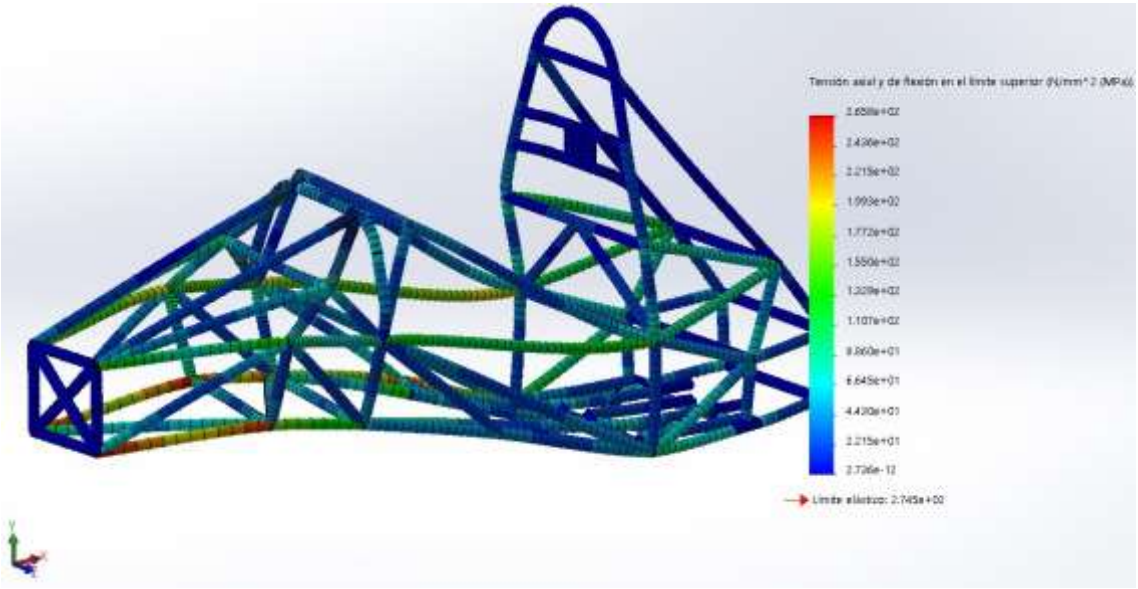


Ilustración 145. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

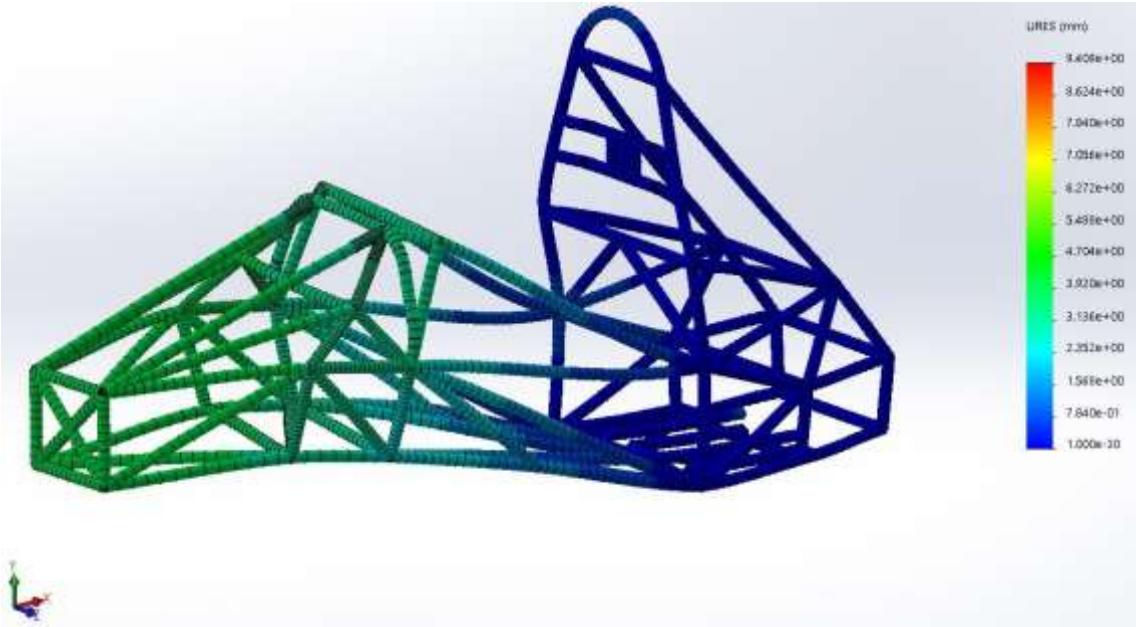


Ilustración 146. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 75. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto frontolateral	Vigas	265.8	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	9.41	mm	25mm

3.7.2.5.8. Anclajes caja de baterías

- Tensiones

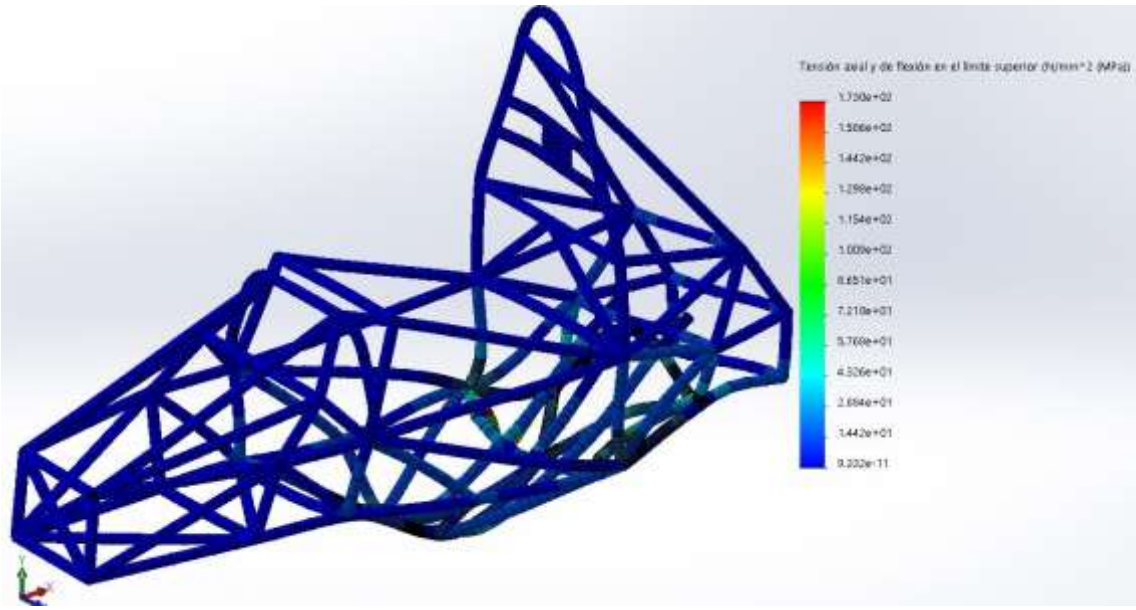


Ilustración 147. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

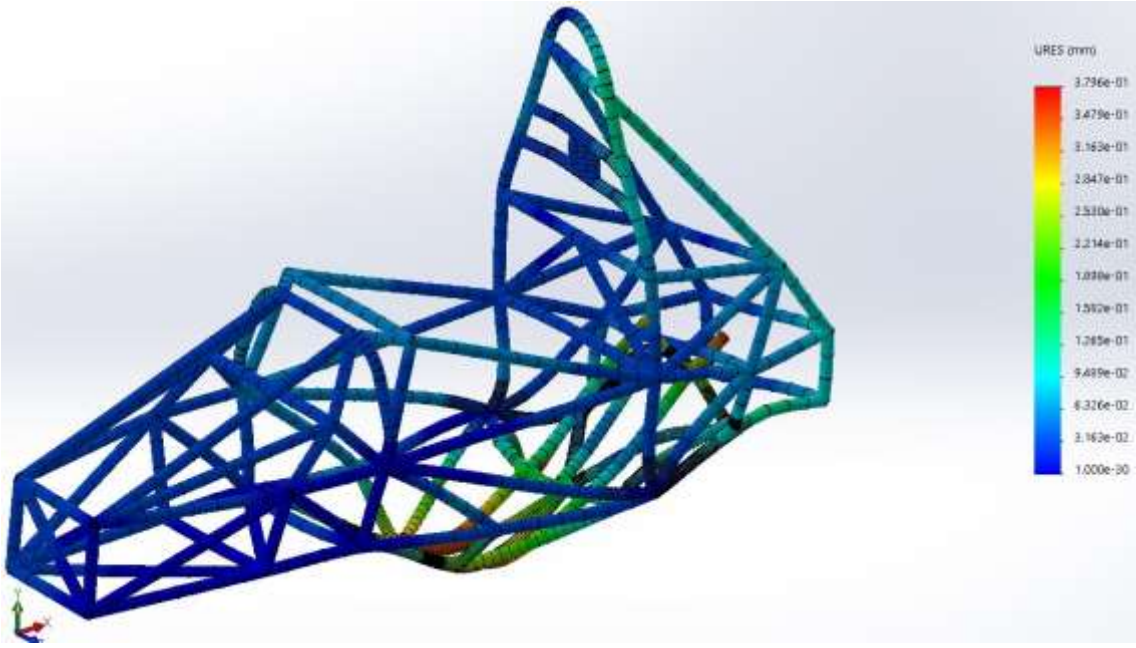


Ilustración 148. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes caja de baterias	Vigas	173	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.38	mm	25mm

3.7.2.5.9. Reposacabezas

- Tensiones

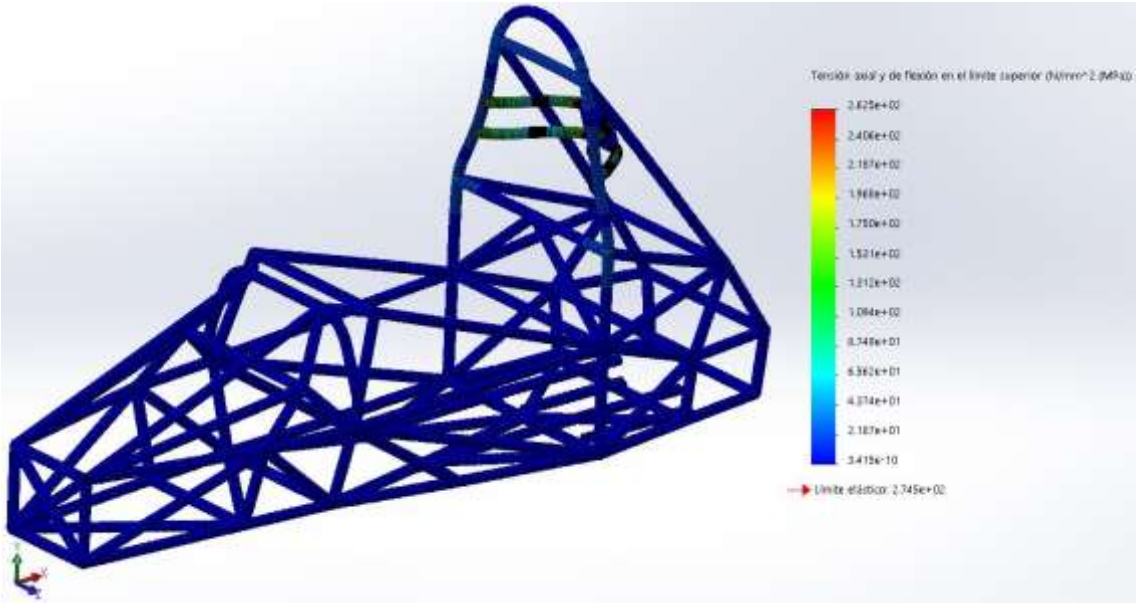


Ilustración 149. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

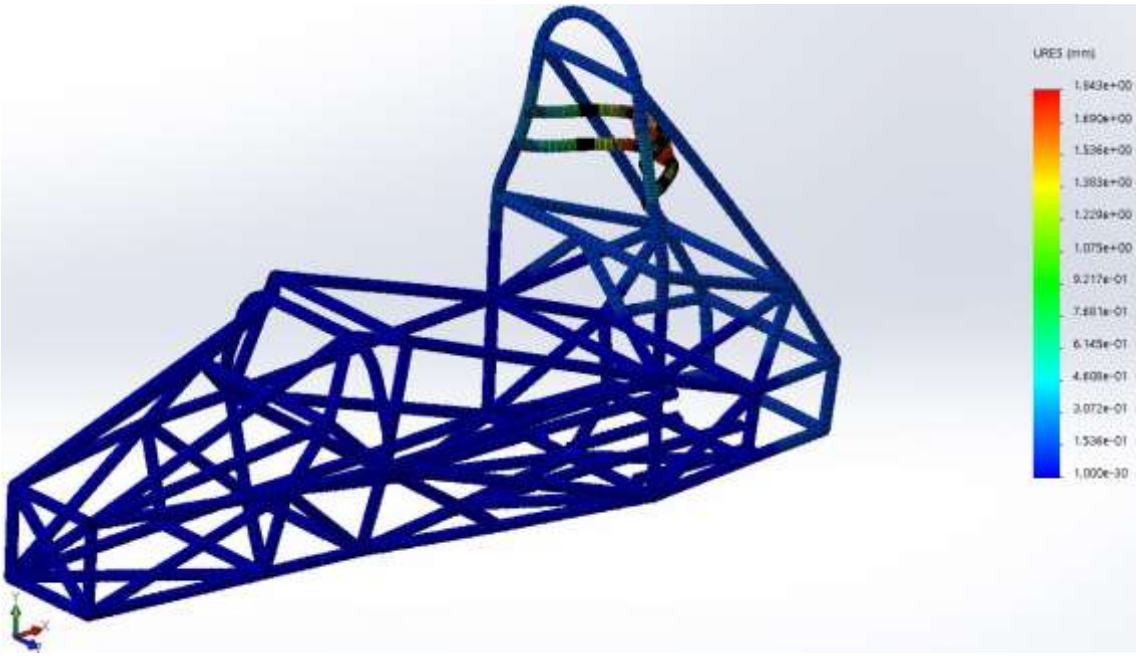


Ilustración 150. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 76. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Reposacabezas	Vigas	262.5	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.84	mm	25mm

3.7.2.5.10. Conclusiones y resumen de resultados

Tabla 77. Tabla resumen iteración. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos	¿Supera?	Acción
	Elemento	Valor	Unid.			
Aro principal	Vigas	248.4	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	4.53	mm	25mm	NO	
Aro frontal	Vigas	185.9	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	2.39	mm	25mm	NO	
Impacto lateral	Vigas	50.1	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	0.21	mm	25mm	NO	
Impacto frontal	Vigas	274.5	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	3.44	mm	25mm	NO	
Anclajes cinturón de hombros	Vigas	243.9	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	3.37	mm	25mm	NO	

Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	251.2	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	1.6	mm	25mm	NO	
Impacto frontolateral	Vigas	265.8	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	9.41	mm	25mm	NO	
Anclajes caja de baterías	Vigas	173	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	0.38	mm	25mm	NO	
Reposacabezas	Vigas	262.5	MPa	274.5 MPa	NO	--------
	Desplazamiento	1.84	mm	25mm	NO	

En este caso, se puede comprobar que todas las tensiones resultantes son iguales o inferiores a la tensión límite establecida de 274.5MPa. Además, se asegura que existe una triangulación nodo a nodo en toda la estructura.

3.7.2.6. Comparación resultados

En la siguiente tabla, se muestran resumen de los resultados que se han obtenido en estas iteraciones:

Tabla 78. Tabla resumen de las cuatro iteraciones realizadas. Fuente: propia

Estudio	Resumen resultado iteraciones						
	Elemento	Iteración 0	Iteración 1	Iteración 2	Iteración 3	Iteración 4	Unid.
Aro principal	Vigas	488.9	467	283.1	248.4	248.4	MPa
	Desplaz.	14.59	13.58	6.69	4.24	4.53	mm
Aro frontal	Vigas	294.6	306.8	180.5	1.531	185.9	MPa
	Desplaz.	7.03	6.76	3	2.35	2.39	mm
Impacto lateral	Vigas	216.9	161.3	103.4	62.72	50.1	MPa
	Desplaz.	0.78	0.71	0.514	0.38	0.21	mm
Impacto frontal	Vigas	961.7	384.9	345.8	275.6	274.5	MPa
	Desplaz.	6.64	6.54	3.58	3.13	3.44	mm
Anclajes hombros	Vigas	1067	698.2	406.9	242.8	243.9	MPa
	Desplaz.	13.85	10.74	5.23	3.19	3.37	mm
Anclajes regazo y antisub	Vigas	1566	1077	647.4	276.5	251.2	MPa
	Desplaz.	19.75	13.25	6.34	1.1	1.6	mm
Impacto frontolateral	Vigas	648.2	551.1	349.7	267	265.8	MPa
	Desplaz.	14.44	13.54	6.94	11.82	9.41	mm
Anclajes caja de baterías	Vigas	302.8	292.1	175.2	172.4	173	MPa
	Desplaz.	1.5	1.44	0.75	0.37	0.38	mm
Reposacabezas	Vigas	274.6	272.7	267.7	262.4	262.5	MPa
	Desplaz.	2.47	2.42	1.96	1.82	1.84	mm

El chasis resultante que se muestra en las siguientes imágenes, se corresponde tras la cuarta iteración:

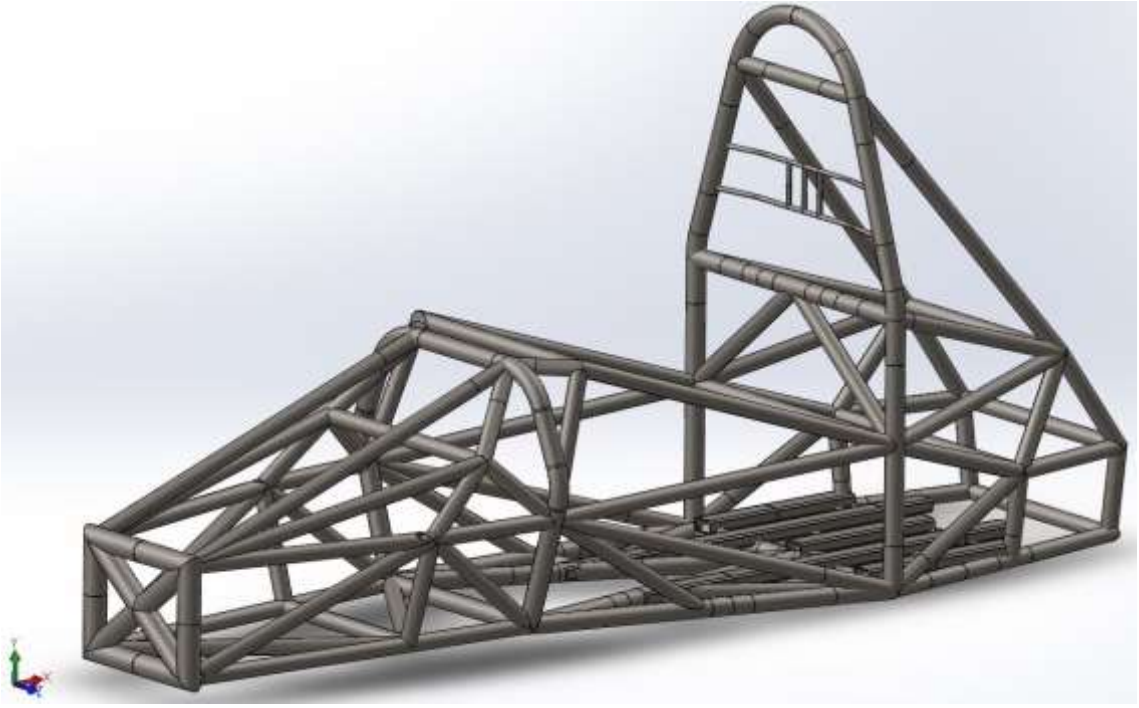


Ilustración 151. Vista. Fuente: propia

Esta estructura posee las siguientes características:

- Masa: 87.97 kg
- Longitud: 2410mm
- Altura máxima: 1240mm
- Anchura máxima: 690mm
- Posición CG:

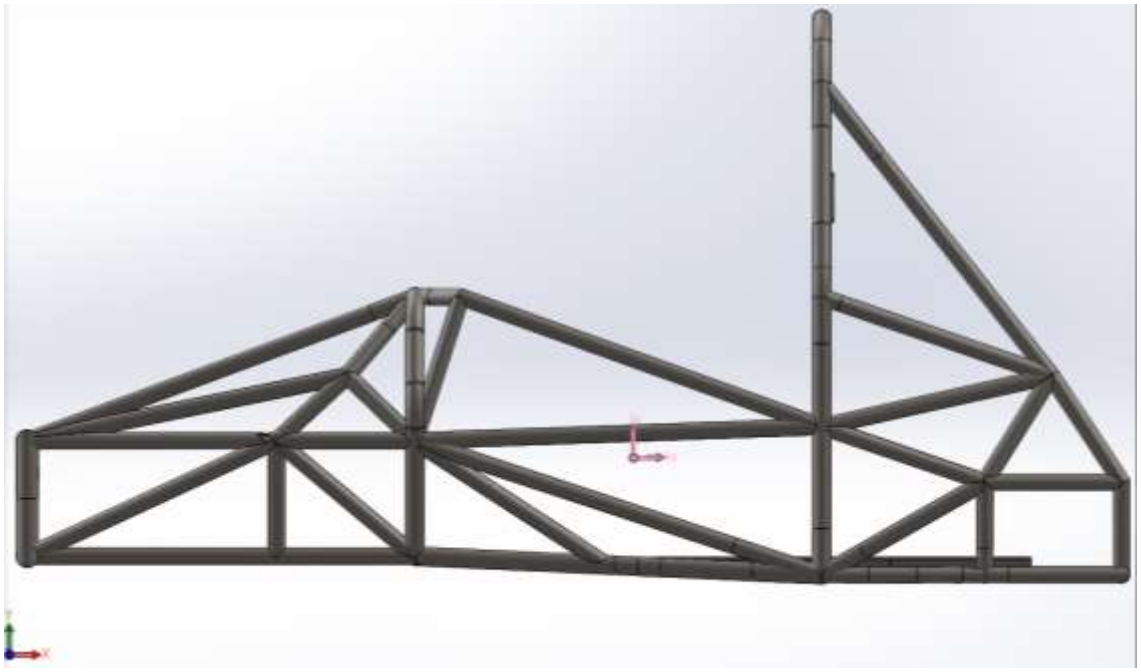


Ilustración 152. Vista lateral con la ubicación del CG. Fuente: propia

Se puede comprobar que el centro de gravedad del chasis está prácticamente centrado con respecto a la ubicación de las ruedas.

3.7.2.7. Mejoras realizadas en el modelo de la cuarta iteración

Observando estas imágenes, se puede deducir que existe una deficiencia de seguridad en los laterales del piloto, lo cual puede hacer que penetre algún objeto al interior del cockpit en el caso de un impacto lateral. Además, el frontal del vehículo consiste en una estructura tubular bastante difícil de fabricar, ya que requiere de elementos con ángulos de corte muy difíciles y luego de un soldador con conocimiento. Por tanto, ante estos casos, se decide redefinir el frontal y el lateral del habitáculo.

Para una mejor compresión del efecto que producen estas modificaciones sobre el caso anterior, se realizan por separado.

3.7.2.7.1. Modificación frontal

Esta modificación permite obtener una estructura algo más liviana, pero lo más importante, es que permite una mejora en cuanto a la soldabilidad de los elementos. En la siguiente imagen, se puede comprobar este cambio.

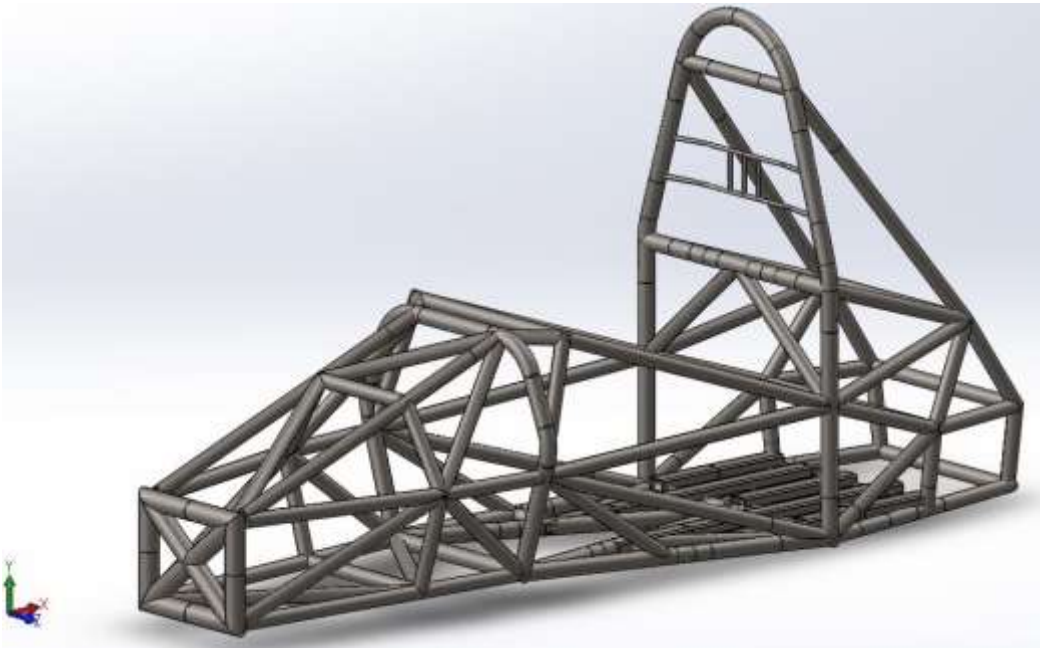


Ilustración 153. Chasis con modificación en el frontal. Fuente: propia

A continuación, se muestran los resultados obtenidos

3.7.2.7.1.1. Aro principal

- Tensiones

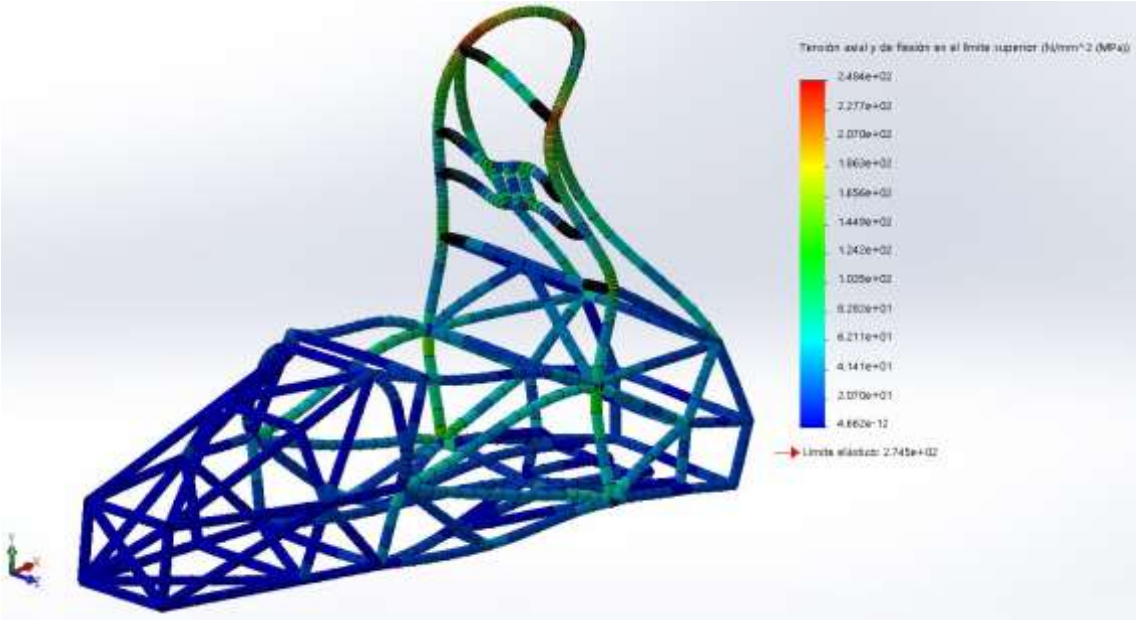


Ilustración 154. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

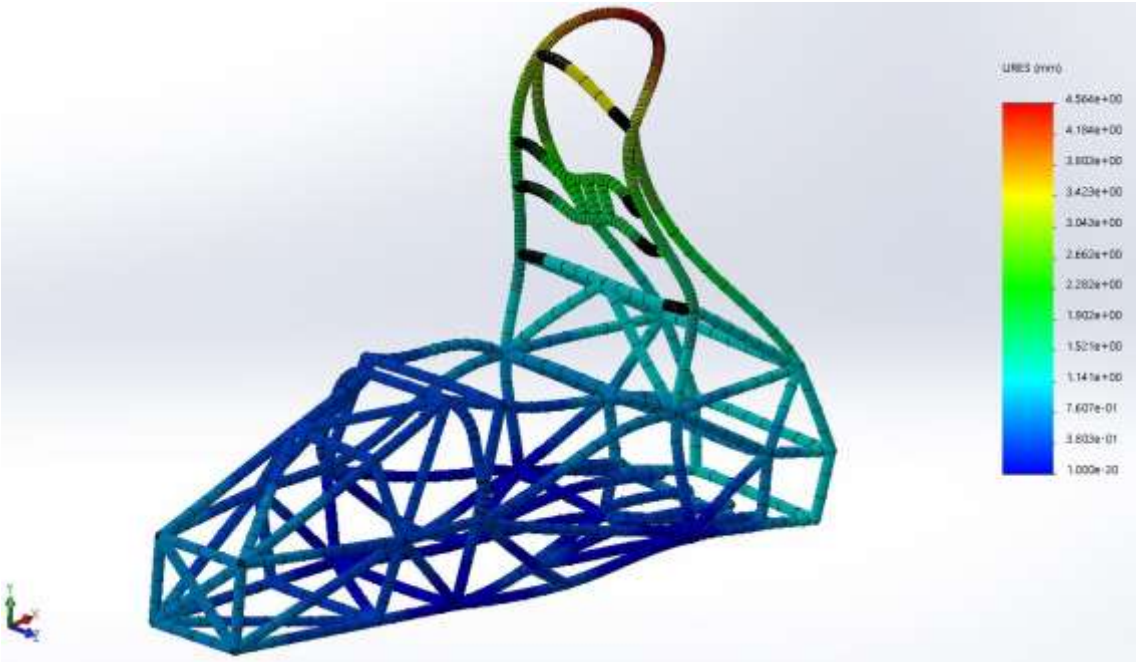


Ilustración 155. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 79. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro principal	Vigas	248.4	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	4.56	mm	25mm

3.7.2.7.1.2. Aro frontal

- Tensiones

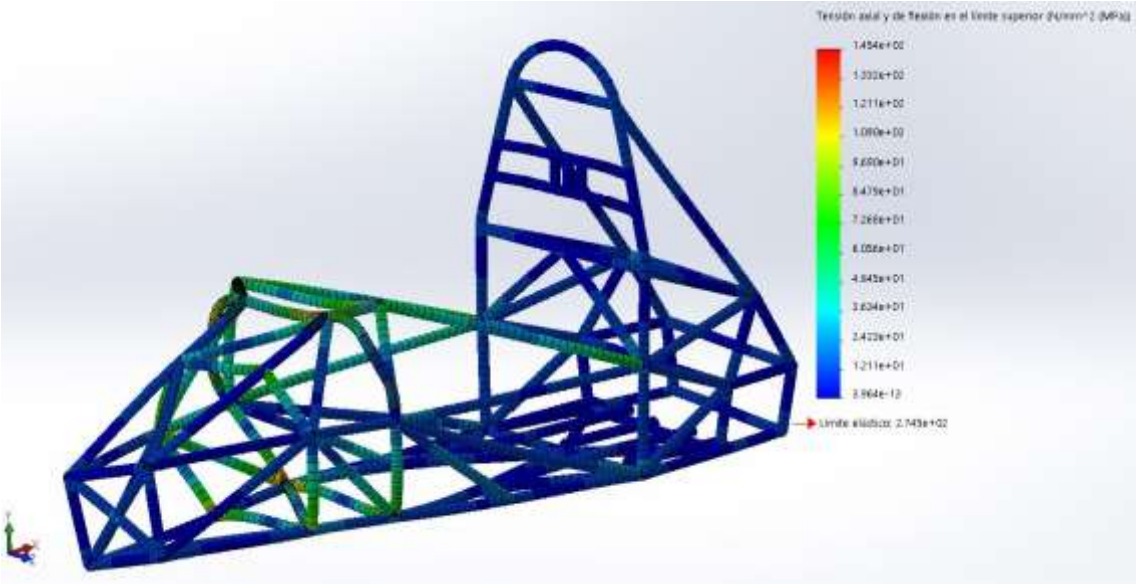


Ilustración 156. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

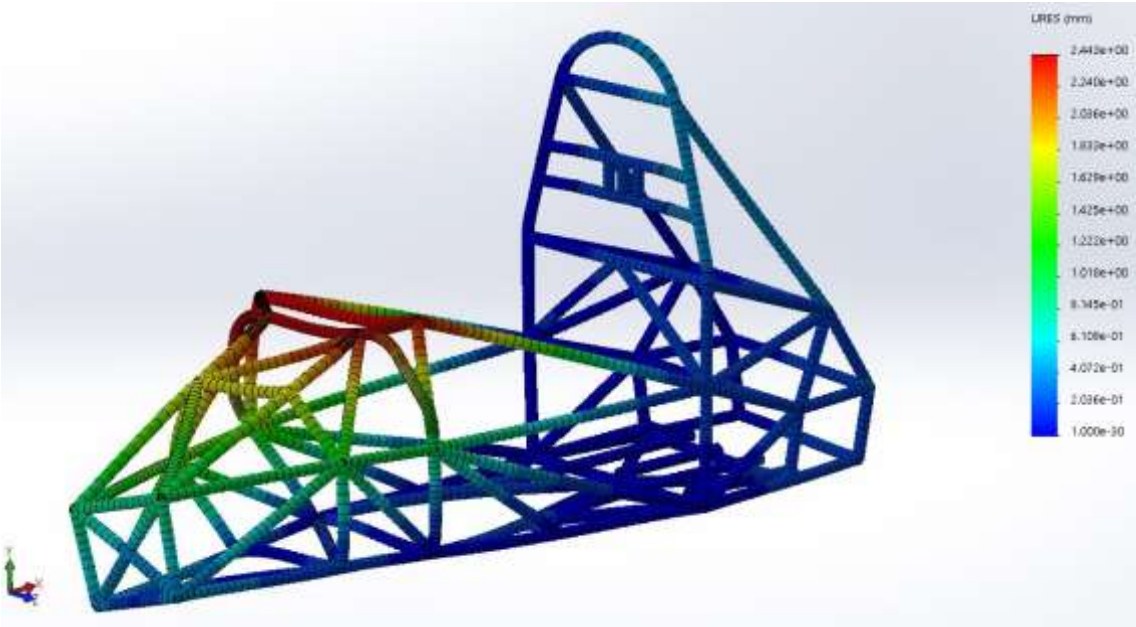


Ilustración 157. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 80. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro frontal	Vigas	145.4	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	2.443	mm	25mm

3.7.2.7.1.3. Impacto lateral

- Tensiones

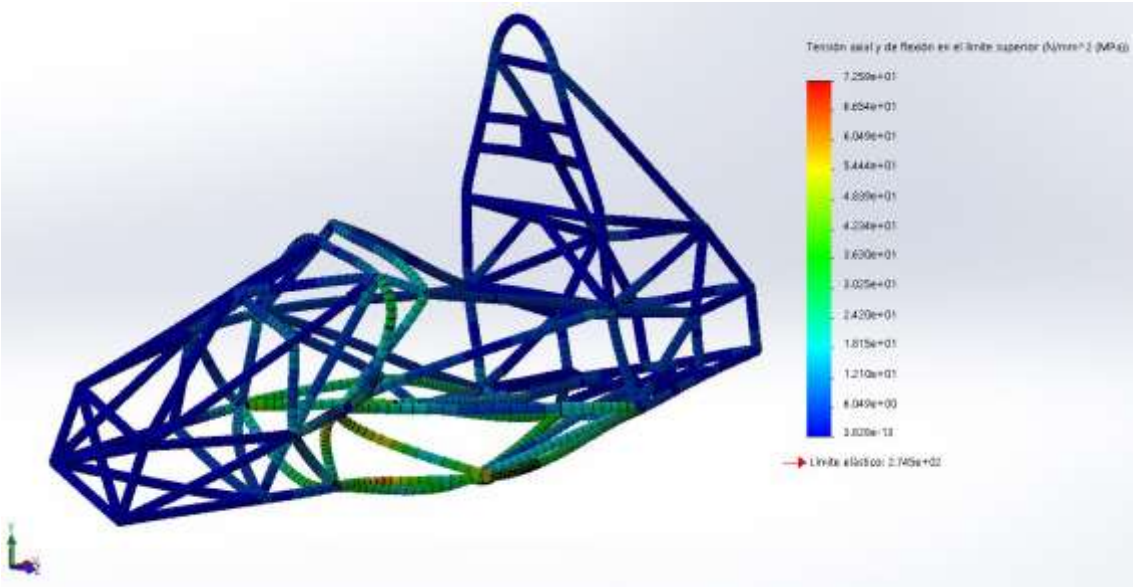


Ilustración 158. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

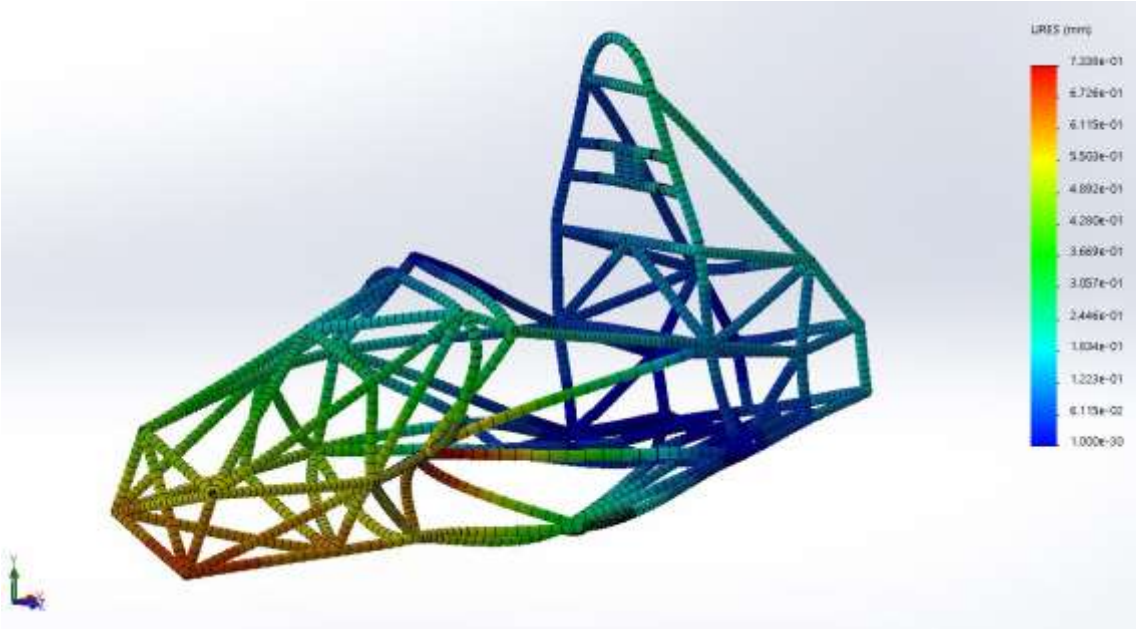


Ilustración 159. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 81. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto lateral	Vigas	72.59	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.734	mm	25mm

3.7.2.7.1.4. Impacto frontal

- Tensiones

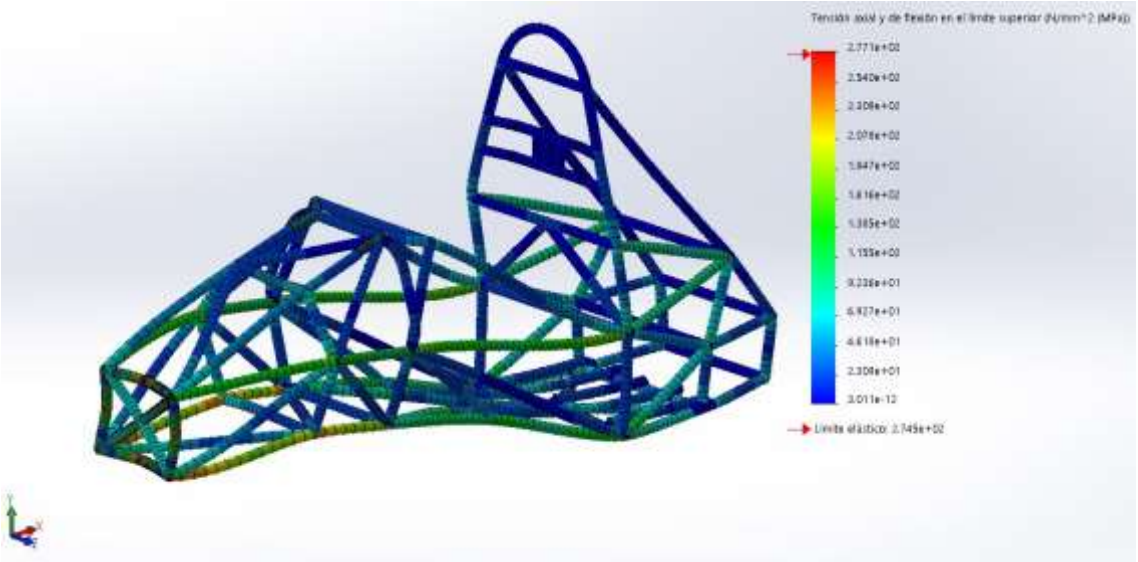


Ilustración 160. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

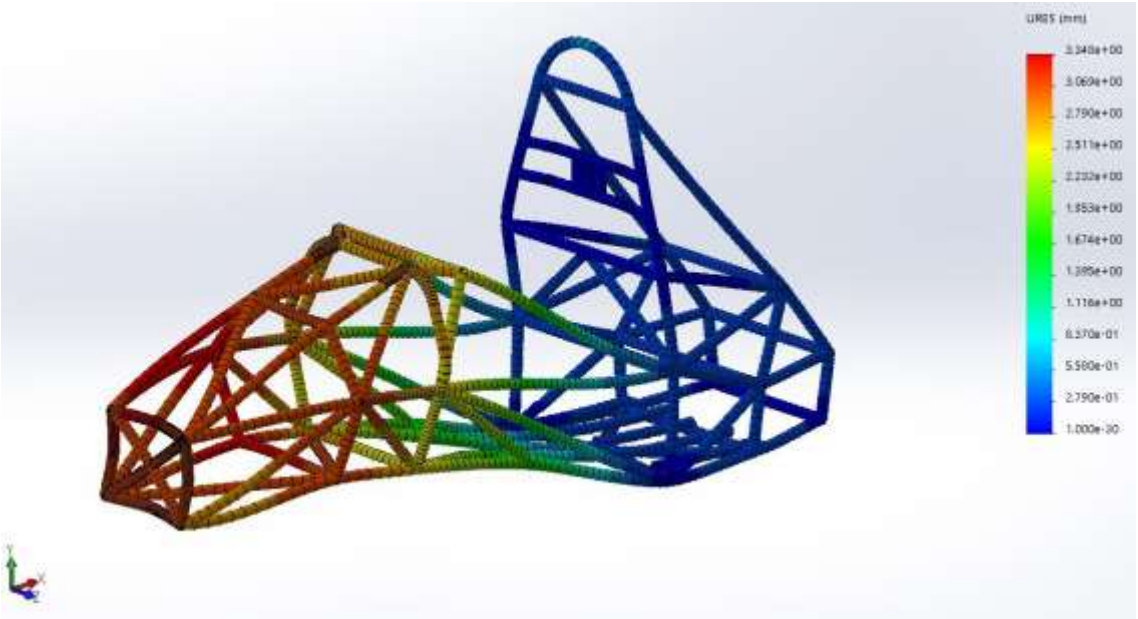


Ilustración 161. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 82. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto frontal	Vigas	277.1	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	3.35	mm	25mm

3.7.2.7.1.5. Anclajes cinturón de hombros

- Tensiones

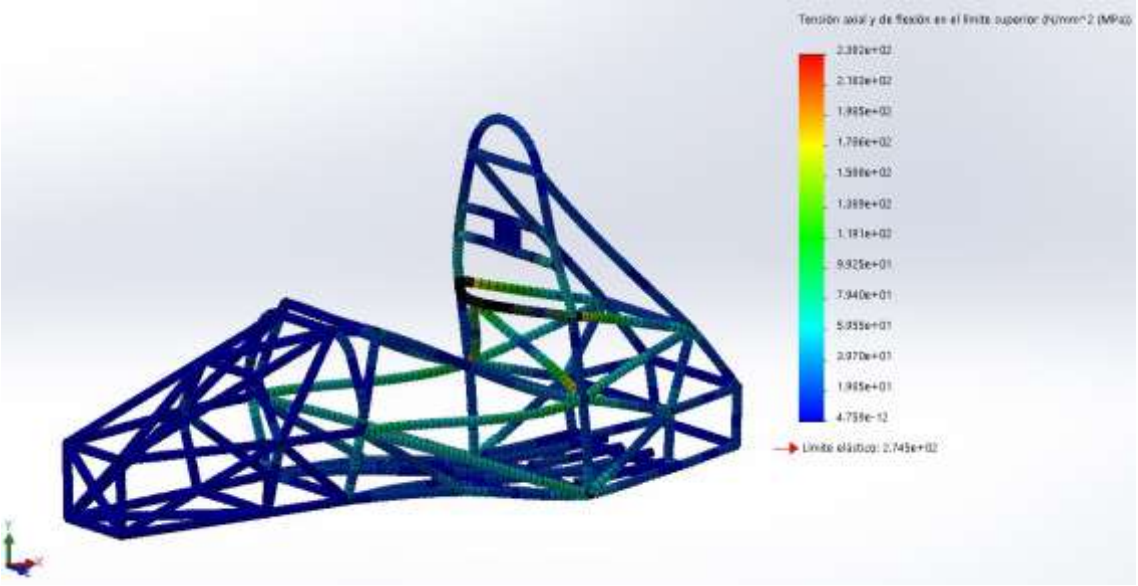


Ilustración 162. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

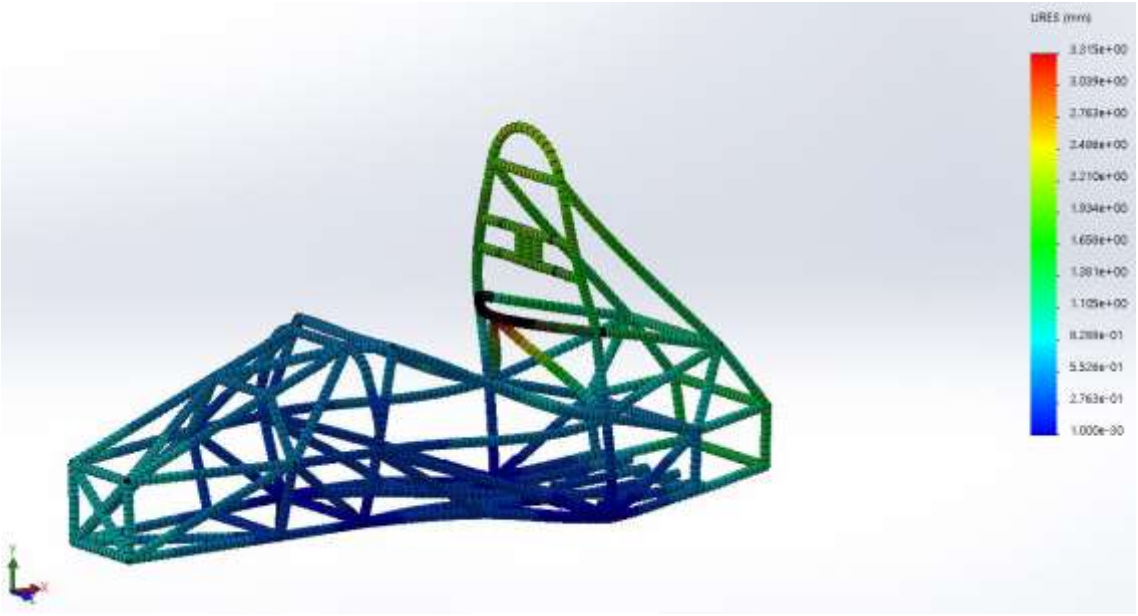


Ilustración 163. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 83. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturón de hombros	Vigas	238.2	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	3.32	mm	25mm

3.7.2.7.1.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino

- Tensiones

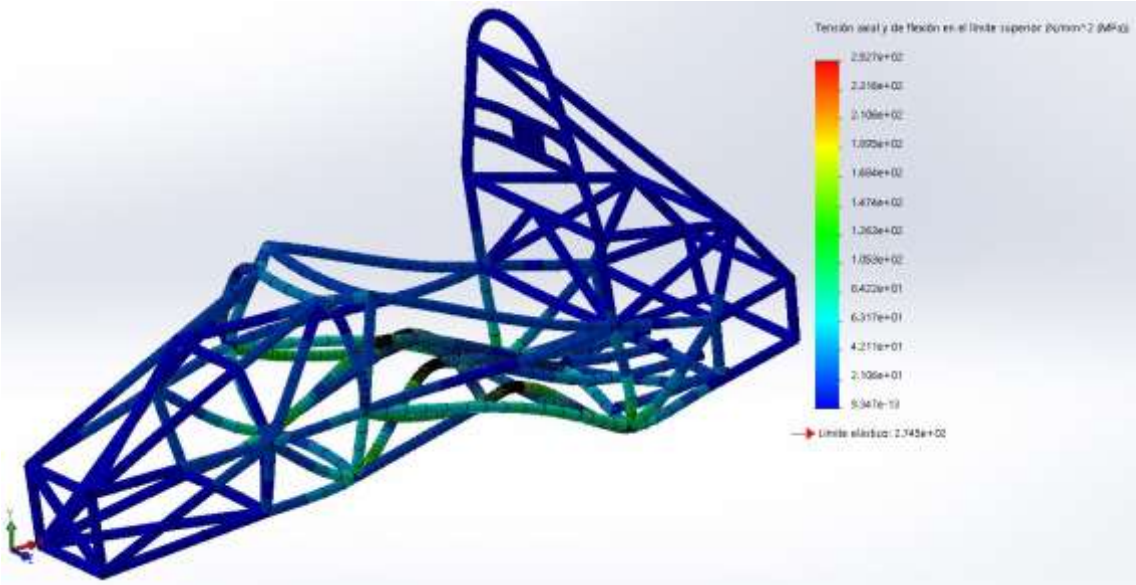


Ilustración 164. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

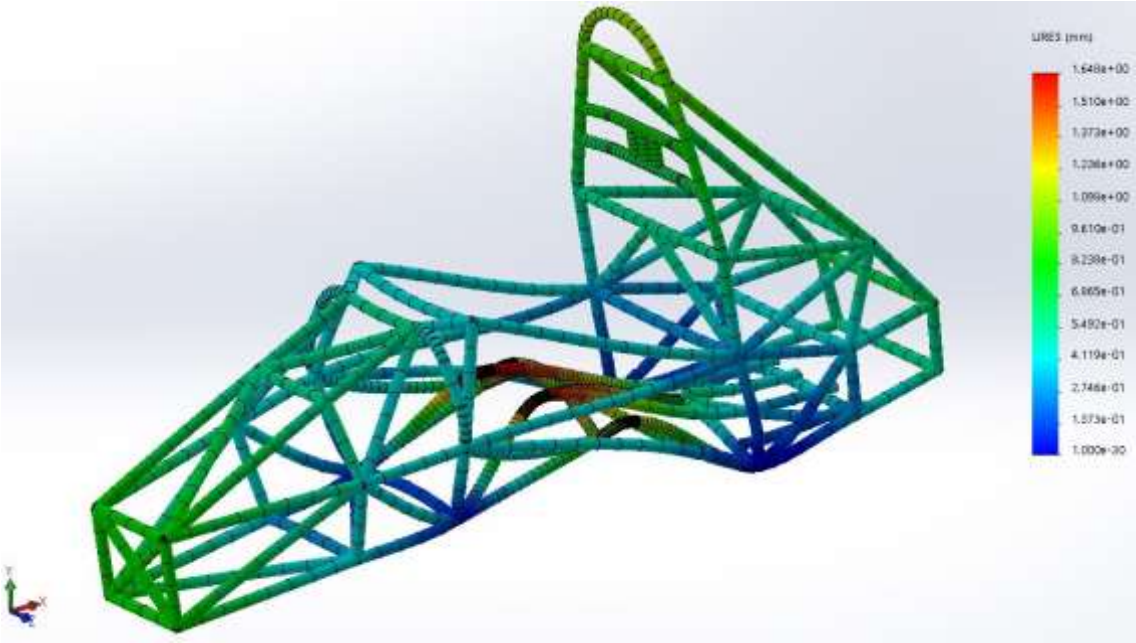


Ilustración 165. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 84. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	252.7	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.65	mm	25mm

3.7.2.7.1.7. Impacto frontolateral

- Tensiones

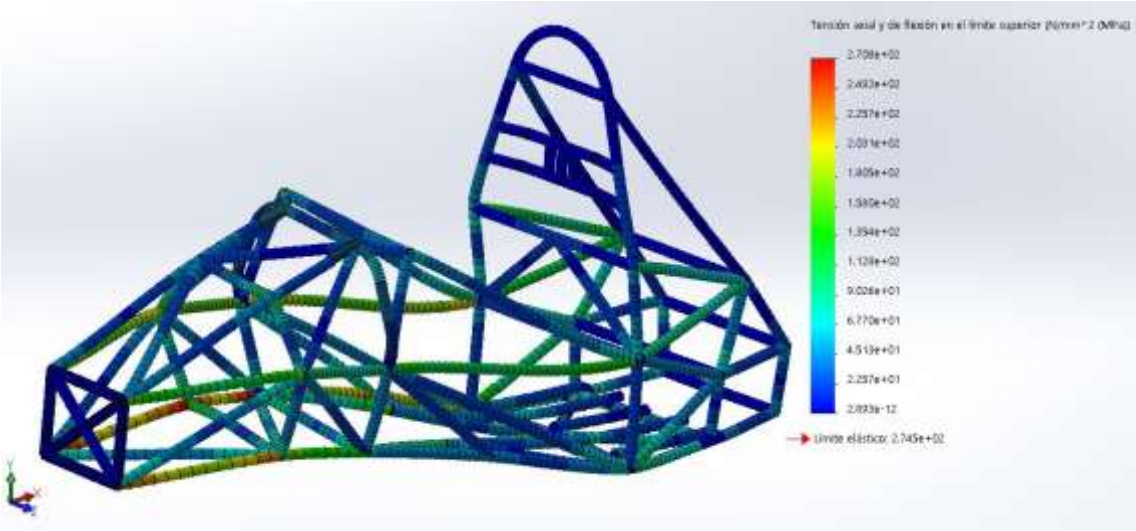


Ilustración 166. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

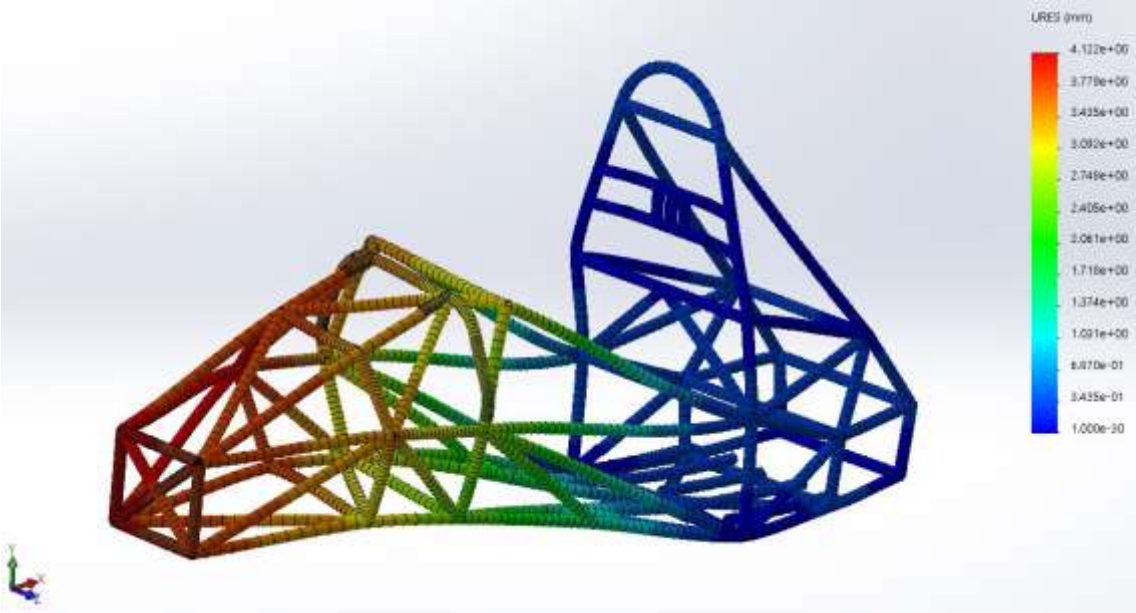


Ilustración 167. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 85. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto frontolateral	Vigas	270.8	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	4.12	mm	25mm

3.7.2.7.1.8. Anclajes caja de baterías

- Tensiones

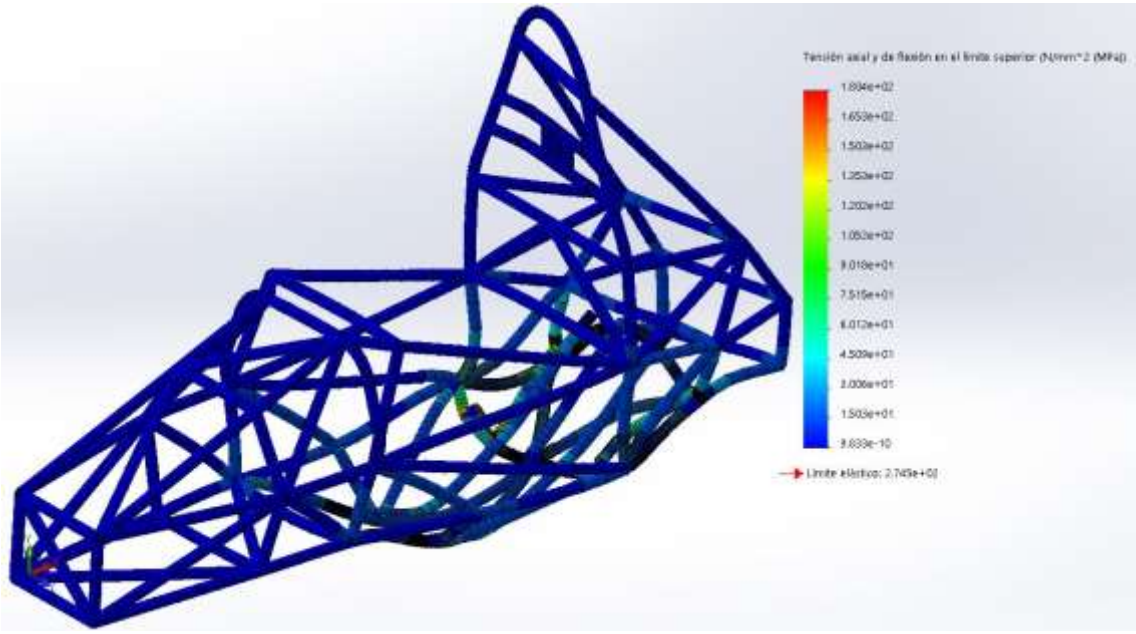


Ilustración 168. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

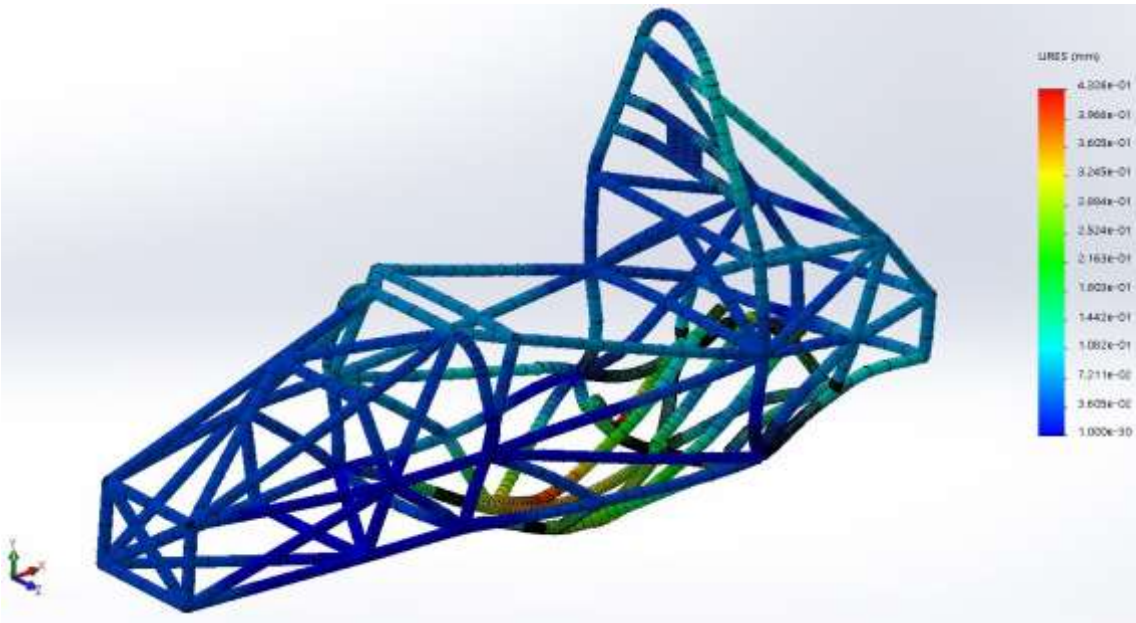


Ilustración 169. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 86. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes caja de baterías	Vigas	180.4	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.433	mm	25mm

3.7.2.7.1.9. Reposacabezas

- Tensiones

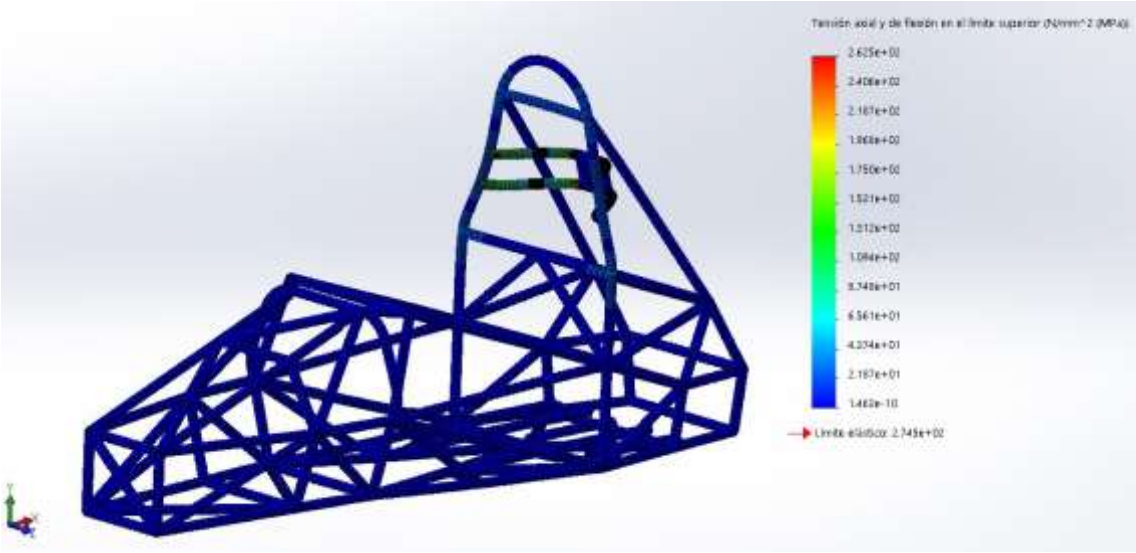


Ilustración 170. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

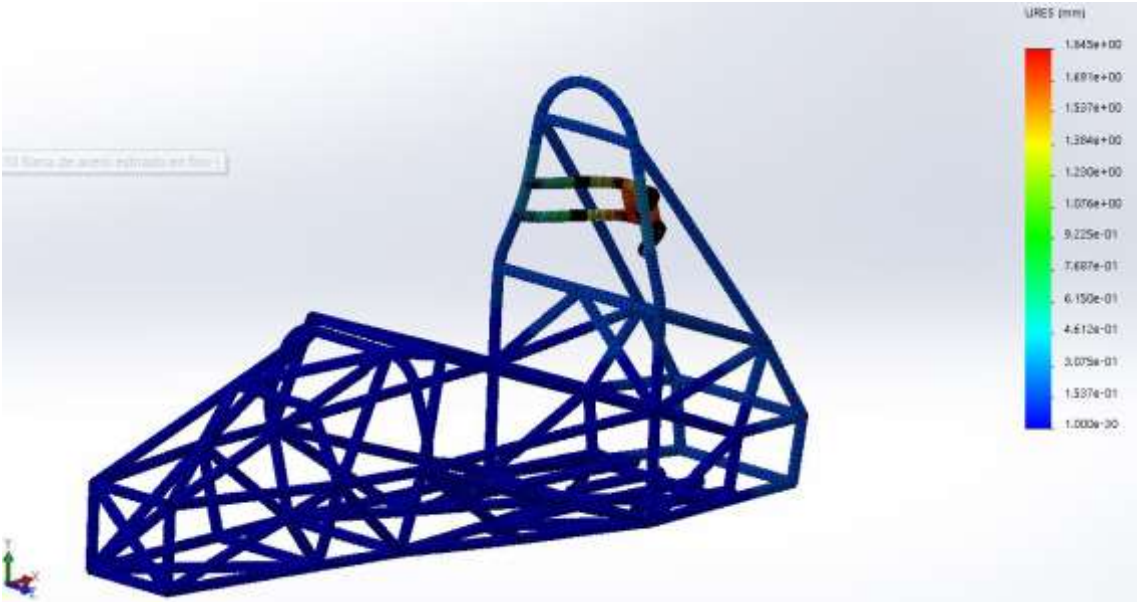


Ilustración 171. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 87. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Reposacabezas	Vigas	262.5	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.845	mm	25mm

3.7.2.7.1.10. Comparación resultados

Tabla 88. Tabla resumen modificación. Fuente: propia

Estudio	Comparación resultados			
	Elemento	Iteración 4	Modificación frontal	Unid.
Aro principal	Vigas	248.4	248.4	MPa
	Desplaz.	4.53	4.56	mm
Aro frontal	Vigas	185.9	145.4	MPa
	Desplaz.	2.39	2.44	mm
Impacto lateral	Vigas	50.1	72.59	MPa
	Desplaz.	0.21	0.734	mm
Impacto frontal	Vigas	274.5	277.1	MPa
	Desplaz.	3.44	3.35	mm
Anclajes cinturón de hombros	Vigas	243.9	238.2	MPa
	Desplaz.	3.37	3.32	mm
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	251.2	252.7	MPa
	Desplaz.	1.6	1.65	mm
Impacto frontolateral	Vigas	265.8	270.8	MPa
	Desplaz.	9.41	4.12	mm
Anclajes caja de baterías	Vigas	173	180.4	MPa
	Desplaz.	0.38	0.433	mm
Reposacabezas	Vigas	262.5	262.5	MPa
	Desplaz.	1.84	1.84	mm

Se puede observar que la modificación apenas ha supuesto una variación significativa de los resultados. Por lo tanto, esta solución es una solución válida para conseguir el objetivo de reducir el peso del vehículo y mejorar su soldabilidad.

3.7.2.7.2. Modificación lateral

Esta modificación busca mejorar la seguridad del piloto ante impactos laterales. Como se puede ver en la imagen, se ha conseguido mediante una rigidización de los elementos de la estructura de impacto lateral superior e inferior.

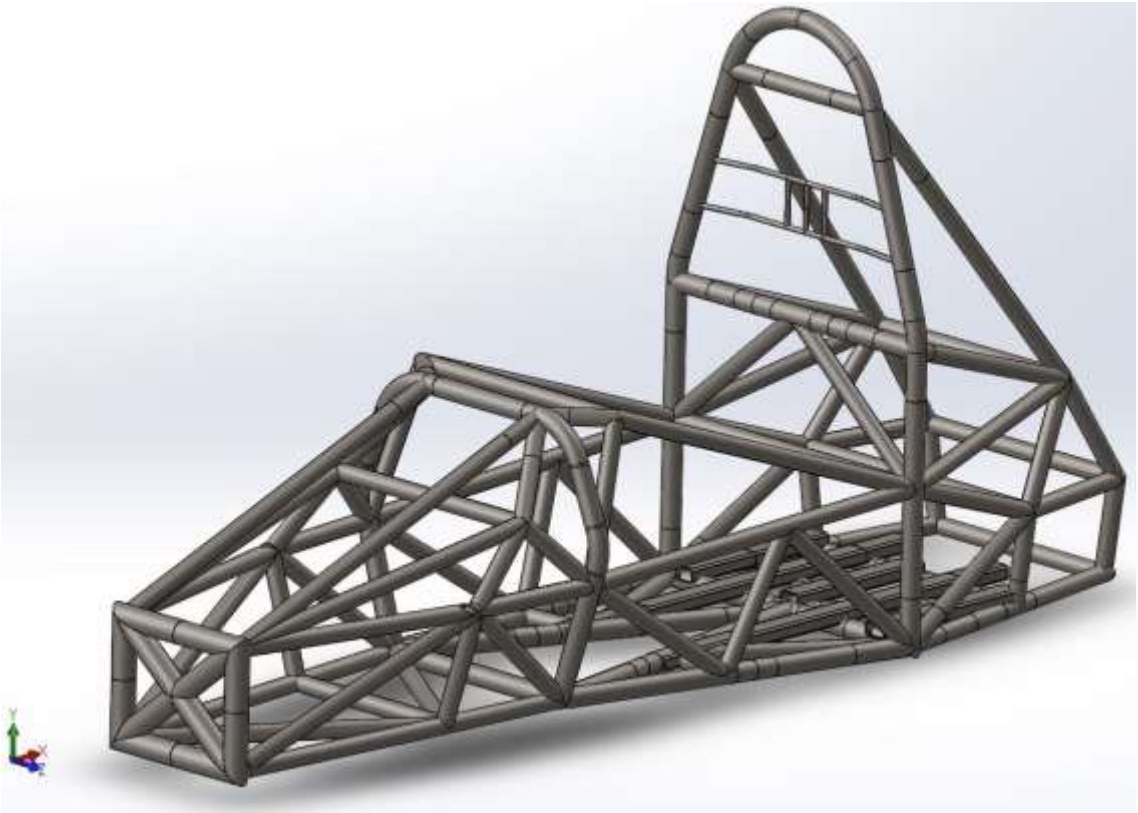


Ilustración 172. Vista chasis modificado. Fuente: propia

Para calcular la modificación lateral, la simulación se realizó atendiendo al siguiente modelo:

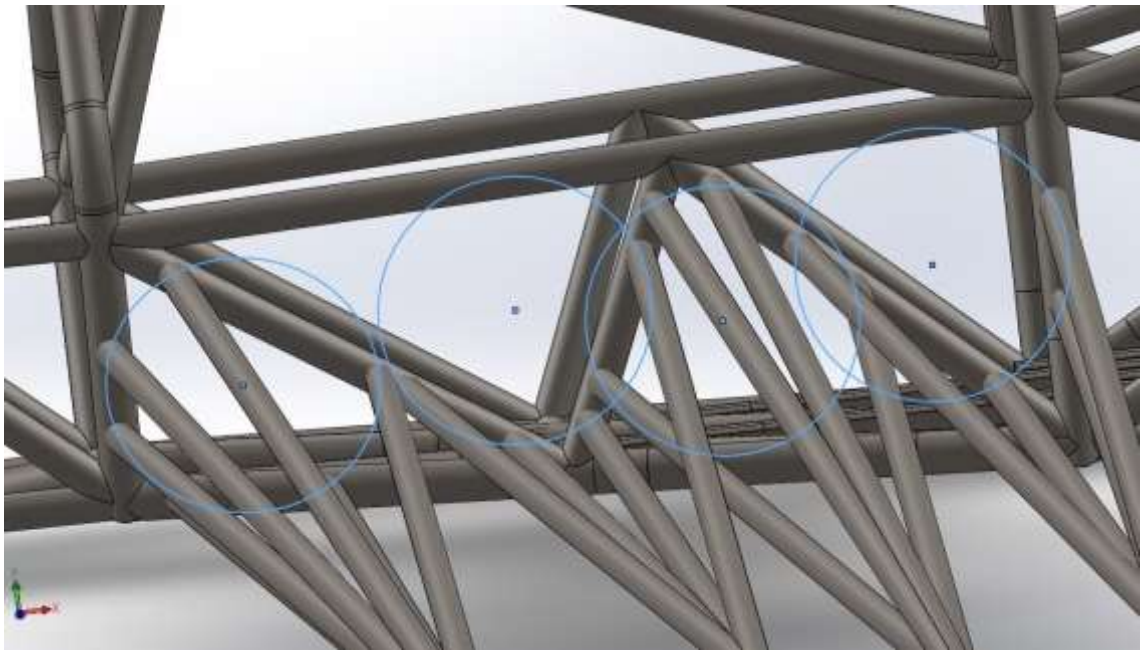


Ilustración 173. Detalle estudios de impacto lateral. Fuente: propia

A continuación, se muestran los resultados obtenidos

3.7.2.7.2.1. Aro principal

- Tensiones

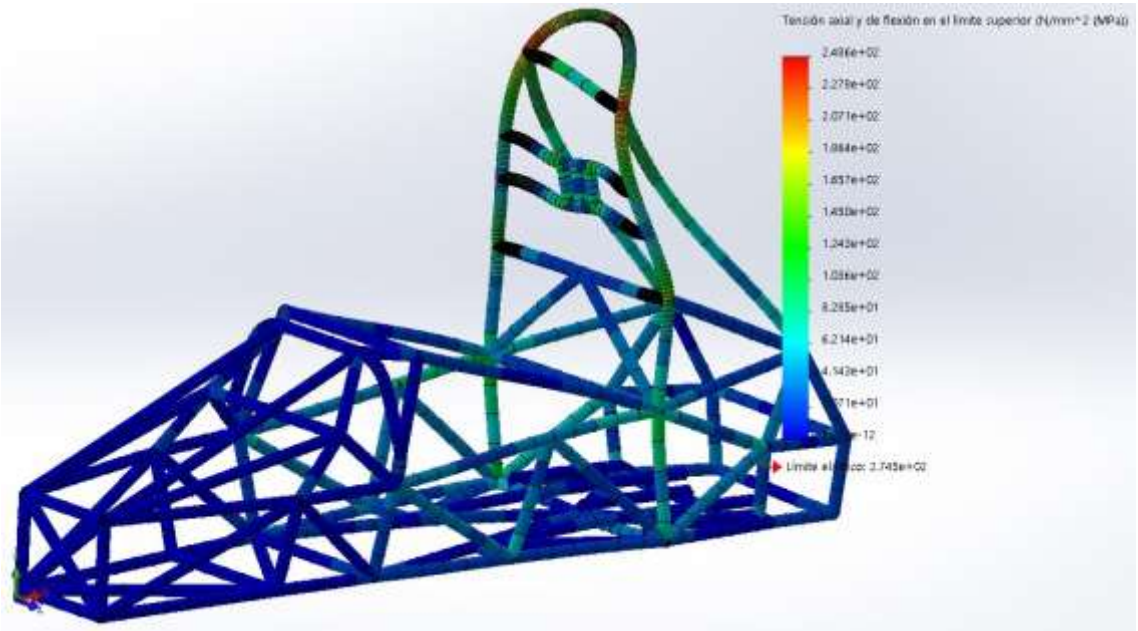


Ilustración 174. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

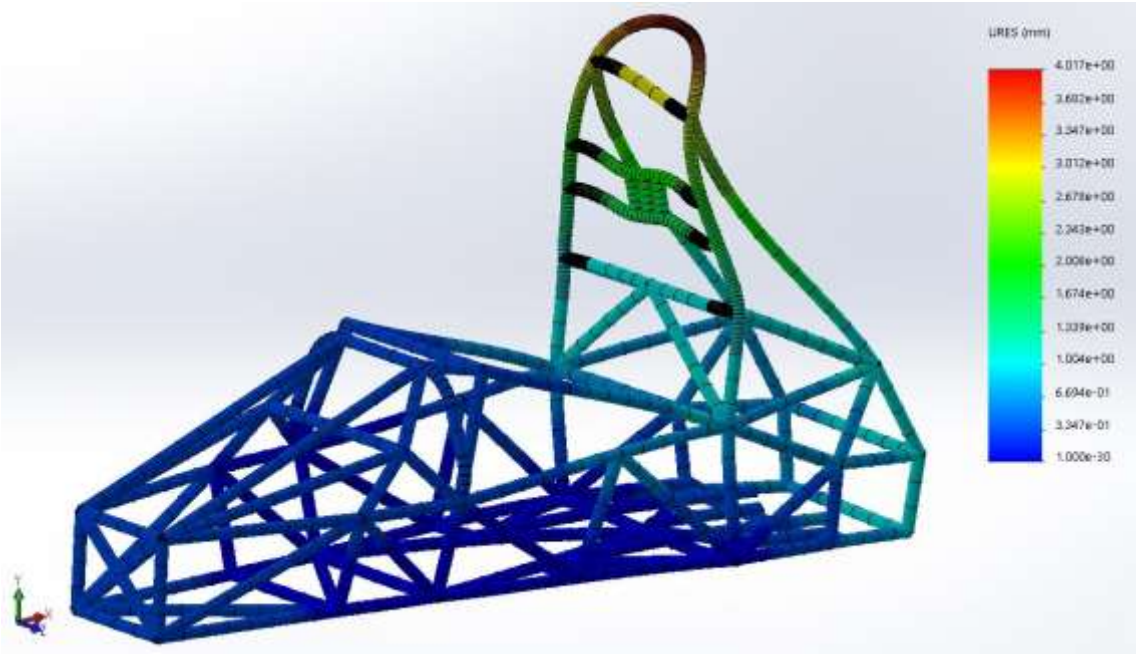


Ilustración 175. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 89. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro principal	Vigas	248.6	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	4.02	mm	25mm

3.7.2.7.2.2. Aro frontal

- Tensiones

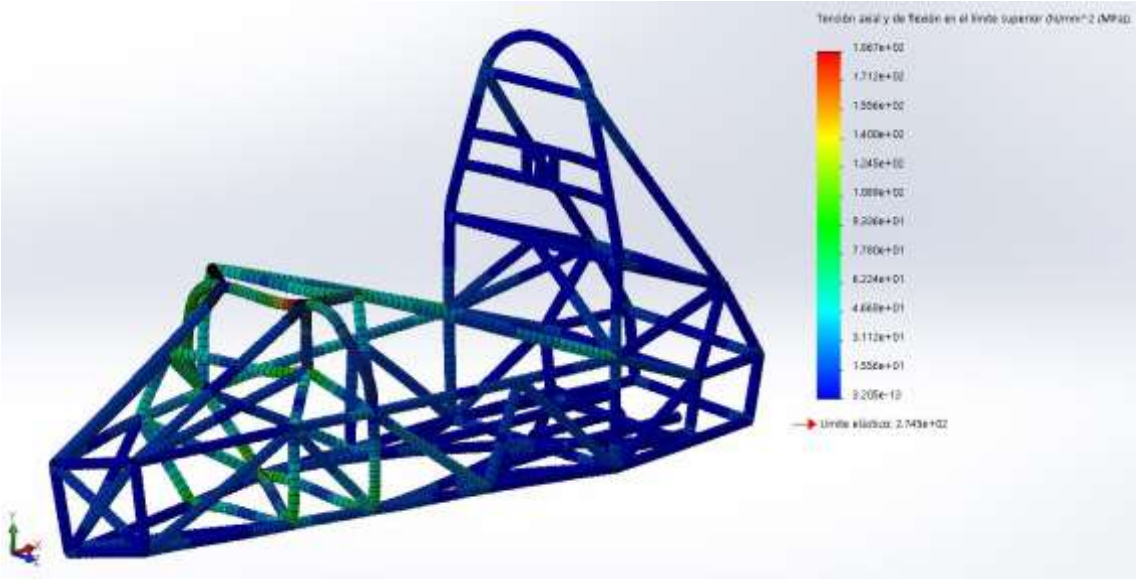


Ilustración 176. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

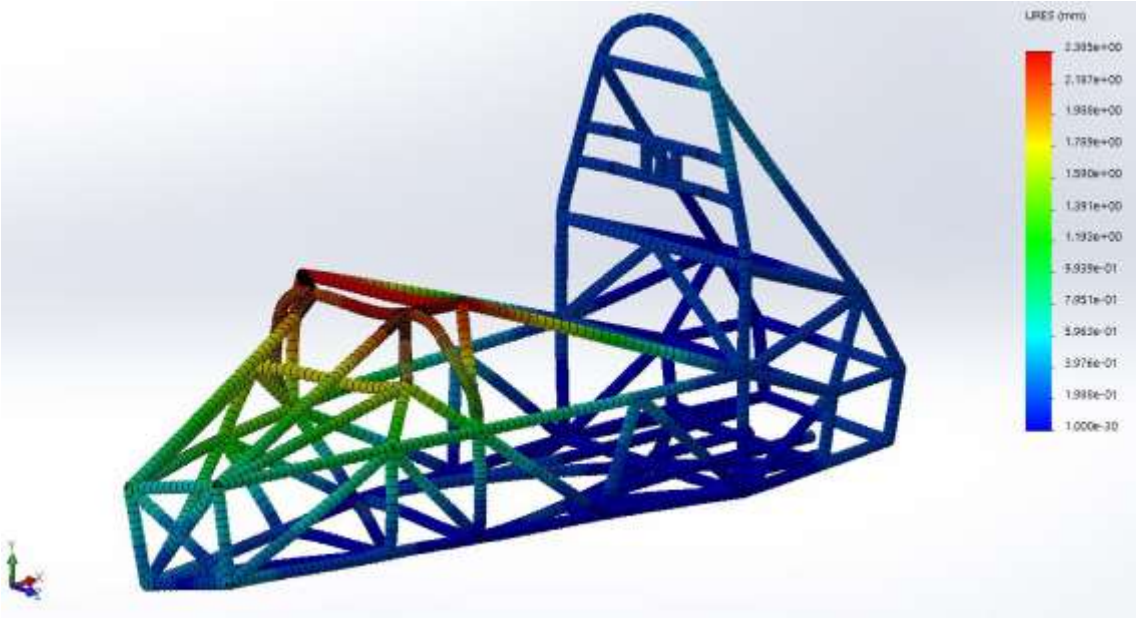


Ilustración 177. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 90. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro frontal	Vigas	186.7	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	2.39	mm	25mm

3.7.2.7.2.3. Impacto lateral

- Tensiones

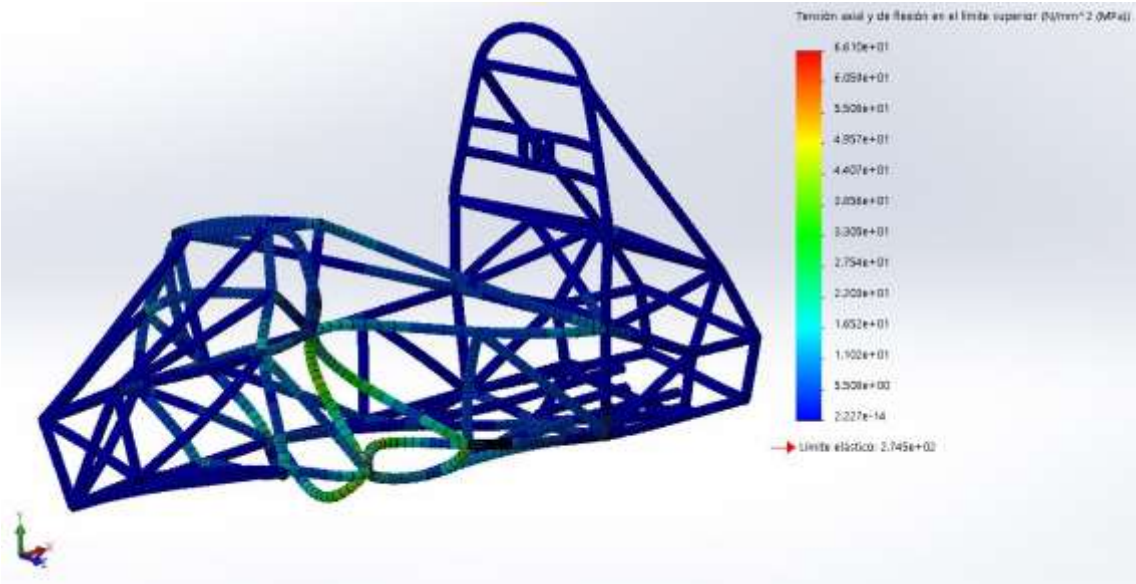


Ilustración 178. Tensiones resultantes zona 1. Fuente: propia

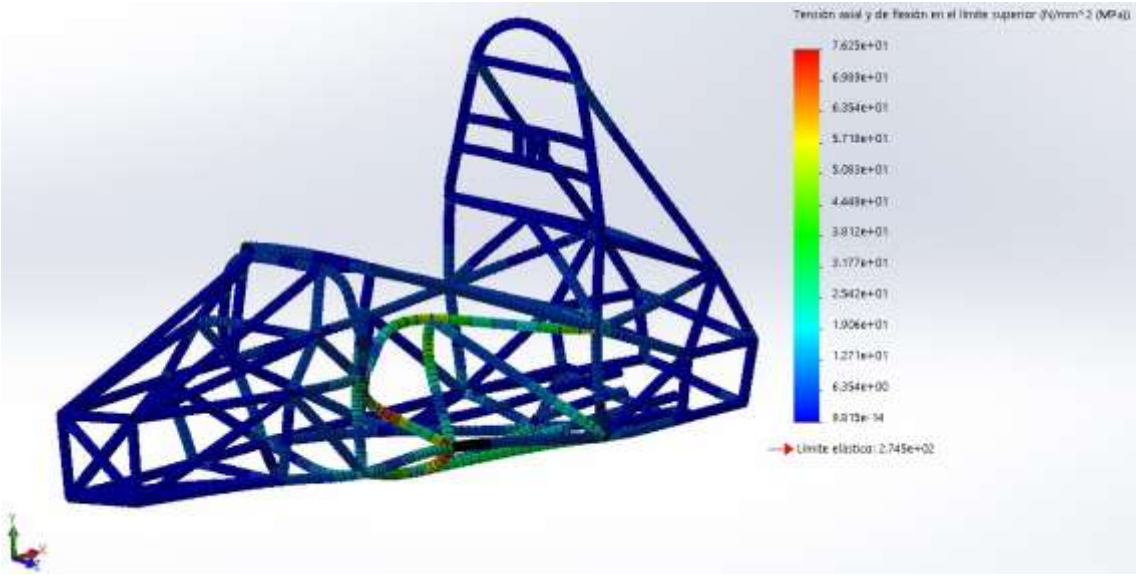


Ilustración 179. Tensiones resultantes zona 2. Fuente: propia

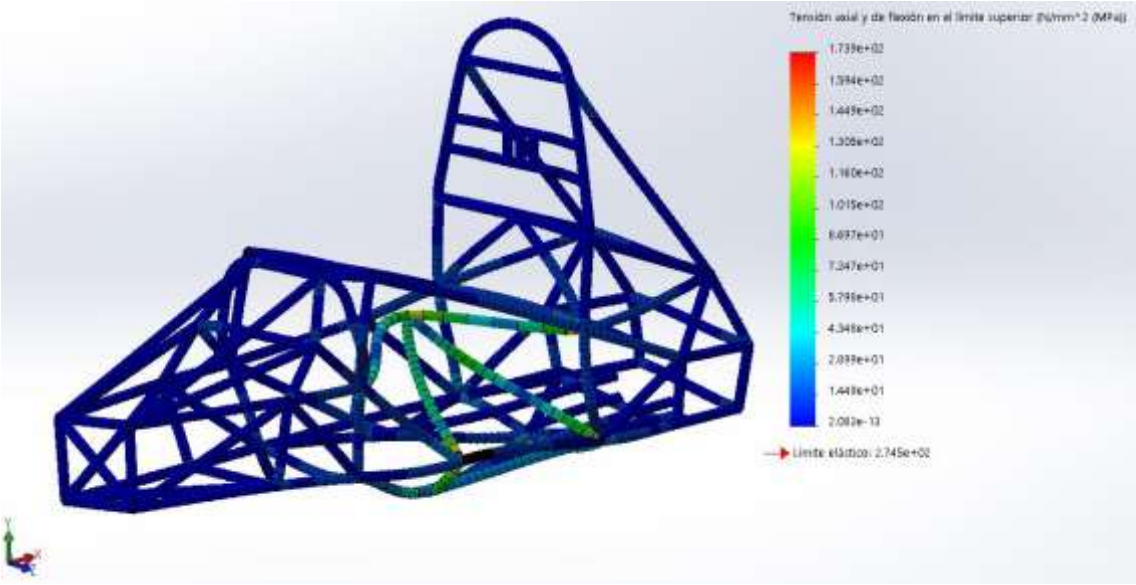


Ilustración 180. Tensiones resultantes zona 3. Fuente: propia

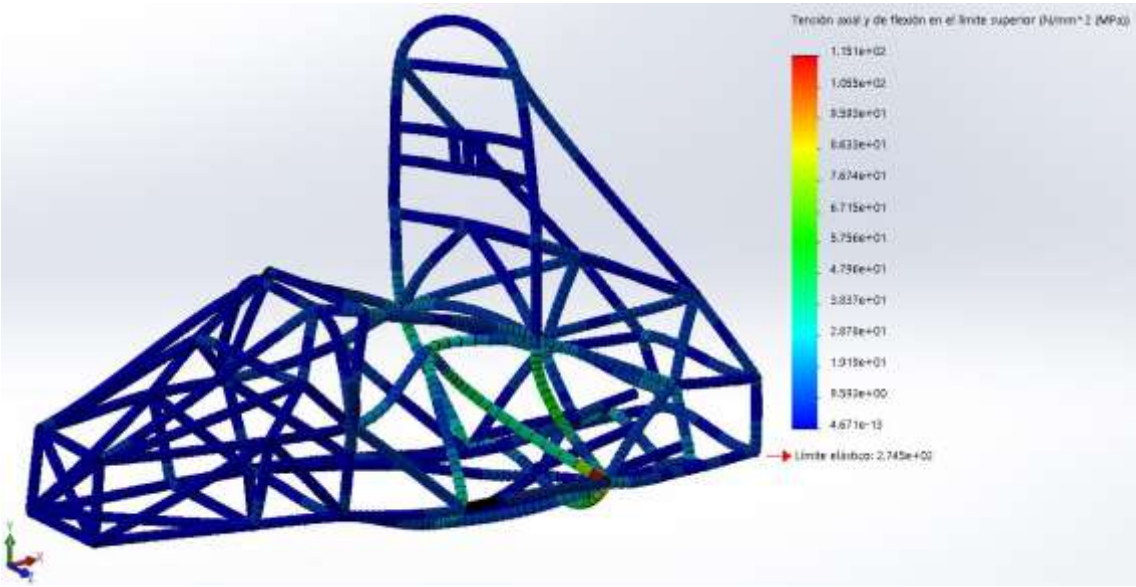


Ilustración 181. Tensiones resultantes zona 4. Fuente: propia

- Desplazamientos

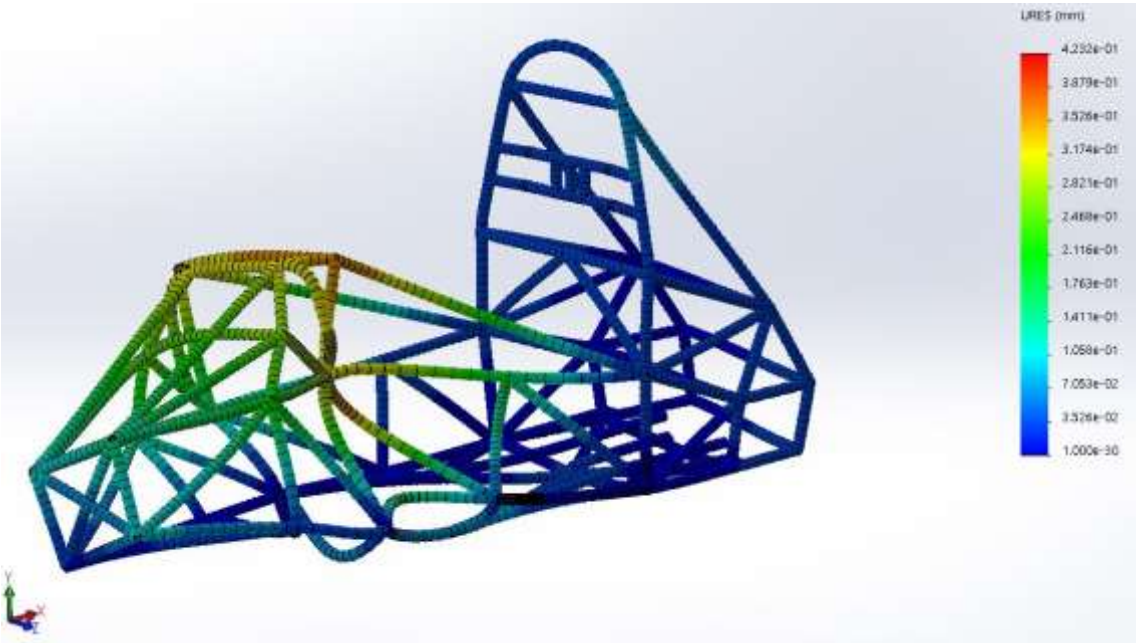


Ilustración 182. Tensiones resultantes zona 1. Fuente: propia

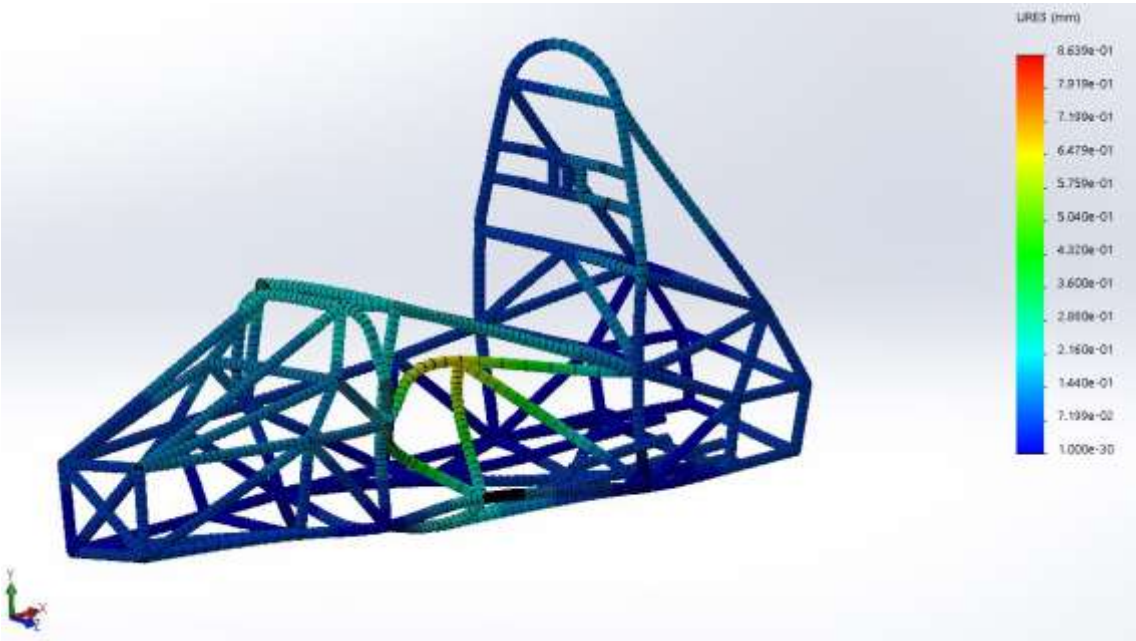


Ilustración 183. Tensiones resultantes zona 2. Fuente: propia

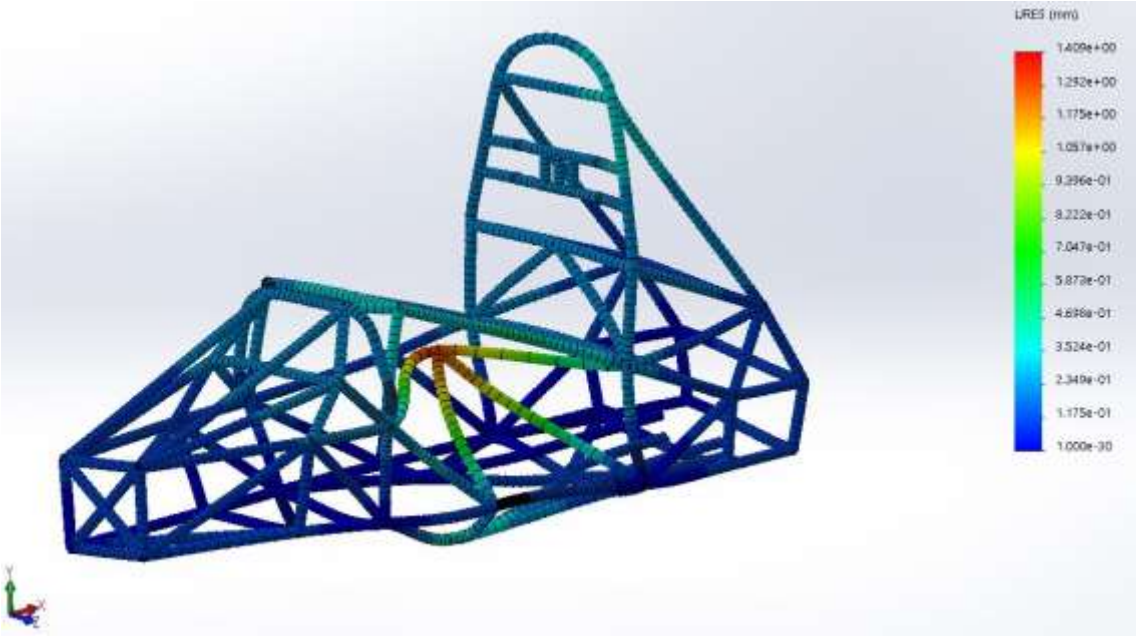


Ilustración 184. Tensiones resultantes zona 3. Fuente: propia

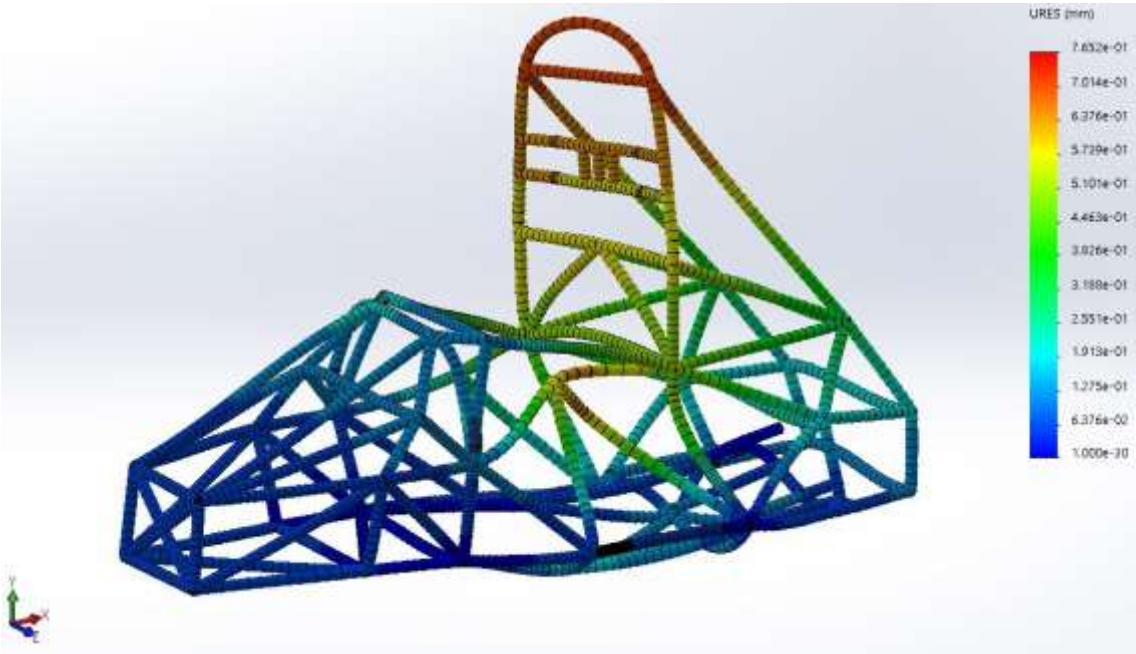


Ilustración 185. Tensiones resultantes zona 4. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 91. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto lateral 1	Vigas	66.1	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.42	mm	25mm
Impacto lateral 2	Vigas	76.25	MPa	274.5 MPa

	Desplazamiento	0.864	mm	25mm
Impacto lateral 3	Vigas	173.9	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.41	mm	25mm
Impacto lateral 4	Vigas	115.1	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.76	mm	25mm

3.7.2.7.2.4. Impacto frontal

- Tensiones

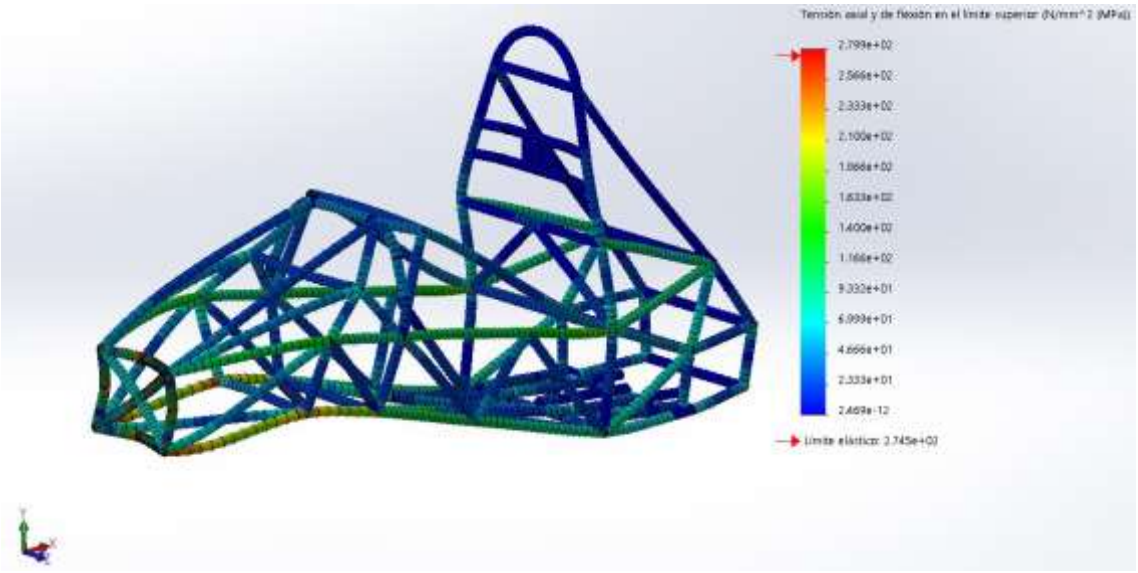


Ilustración 186. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

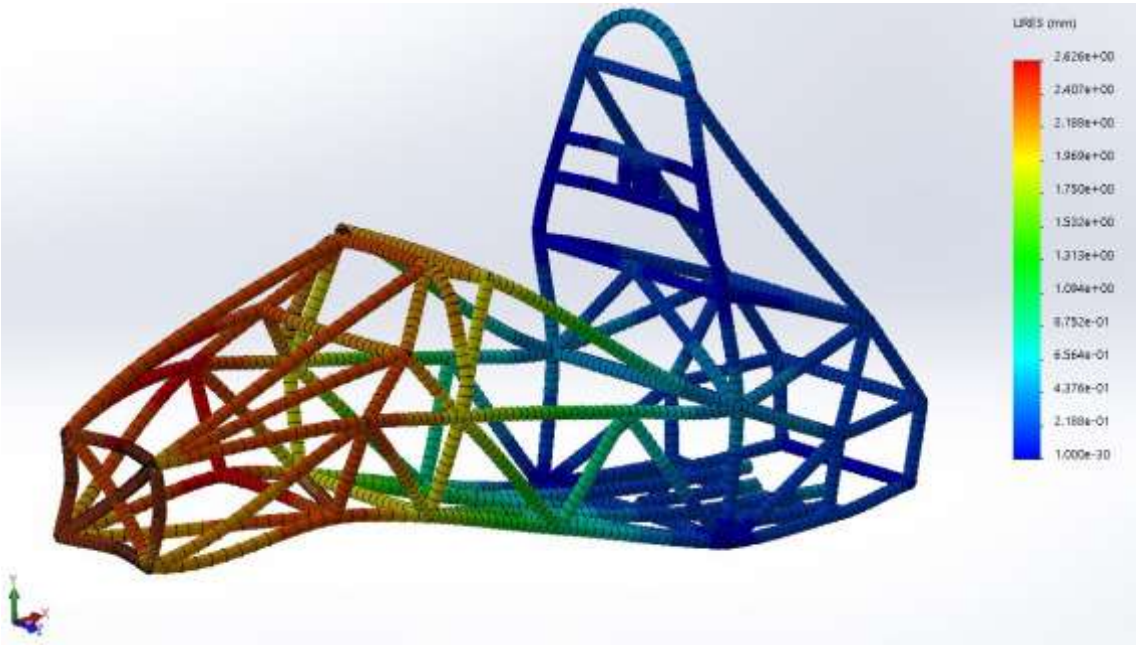


Ilustración 187. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 92. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto frontal	Vigas	279.9	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	2.63	mm	25mm

3.7.2.7.2.5. Anclajes cinturón de hombros

- Tensiones

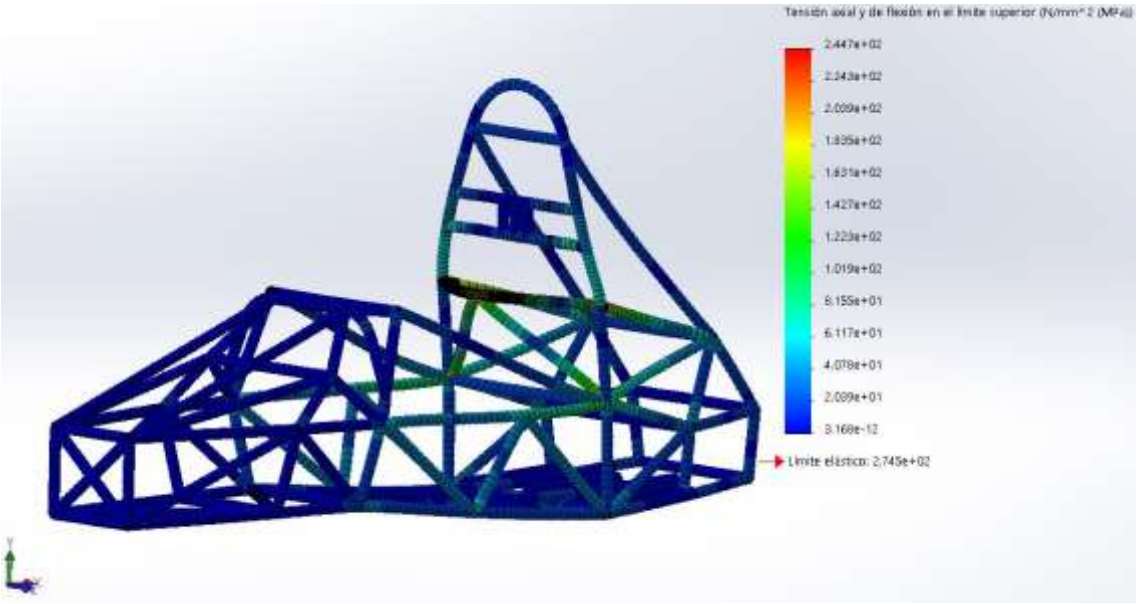


Ilustración 188. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

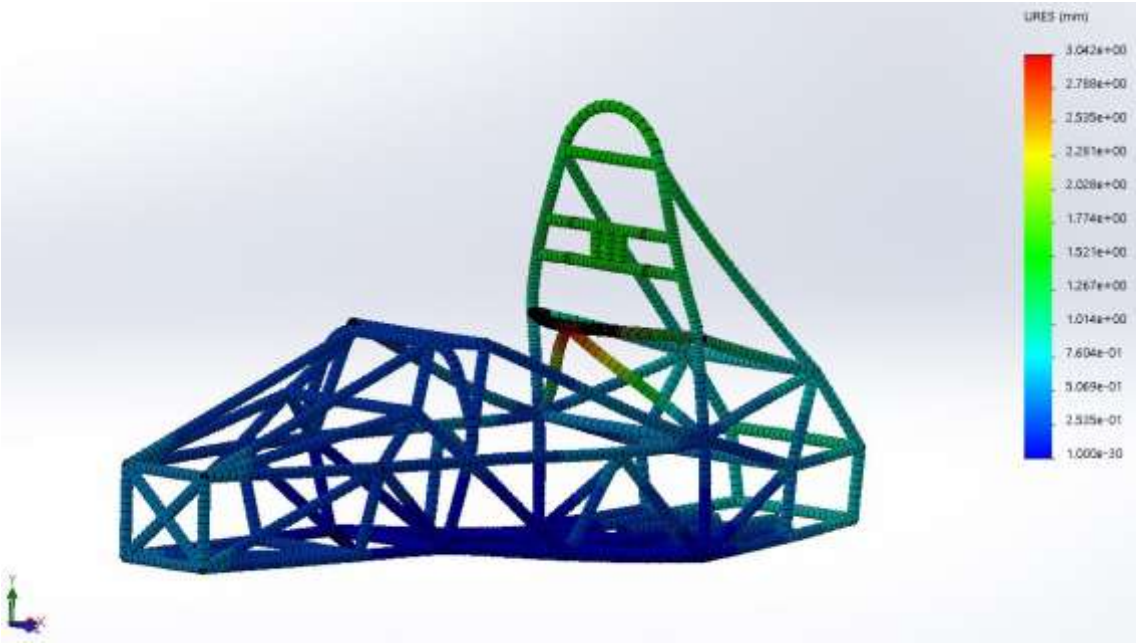


Ilustración 189. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 93. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturón de hombros	Vigas	244.7	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	3.04	mm	25mm

3.7.2.7.2.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino

- Tensiones

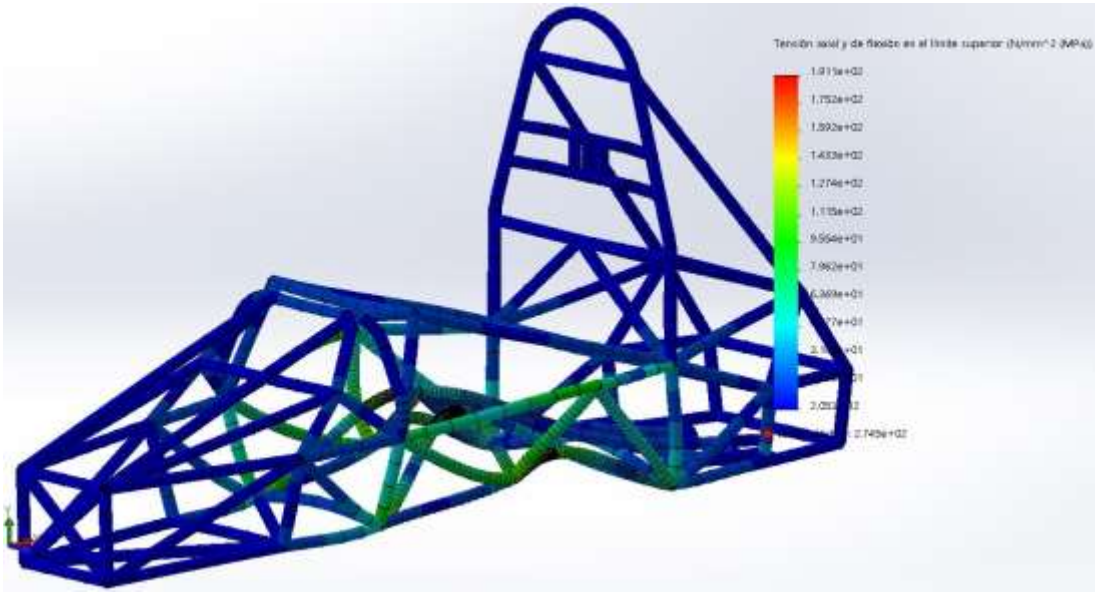


Ilustración 190. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

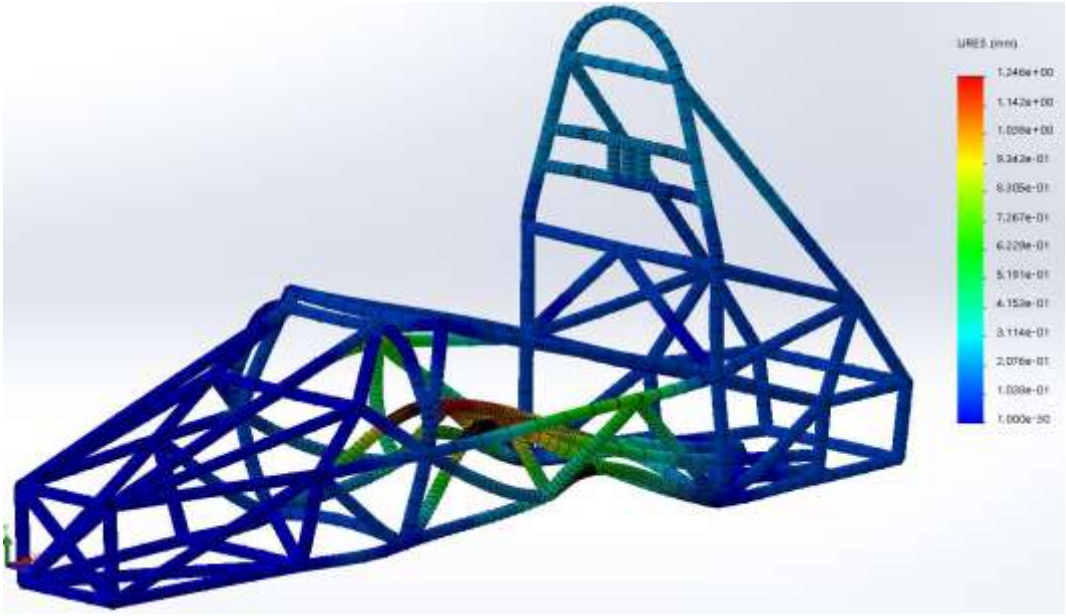


Ilustración 191. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 94. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	191.1	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.25	mm	25mm

3.7.2.7.2.7. Impacto frontolateral

- Tensiones

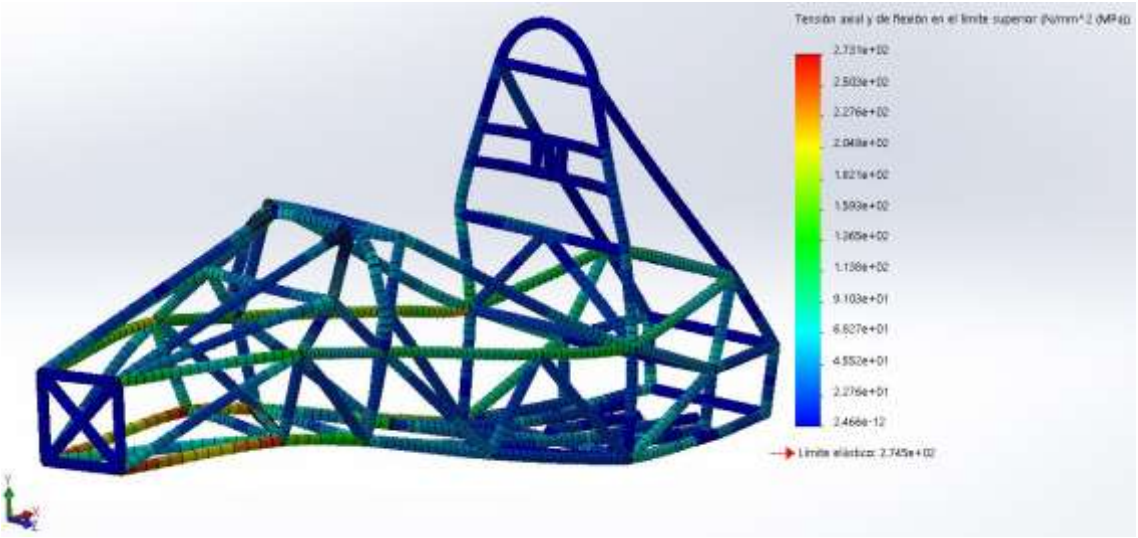


Ilustración 192. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

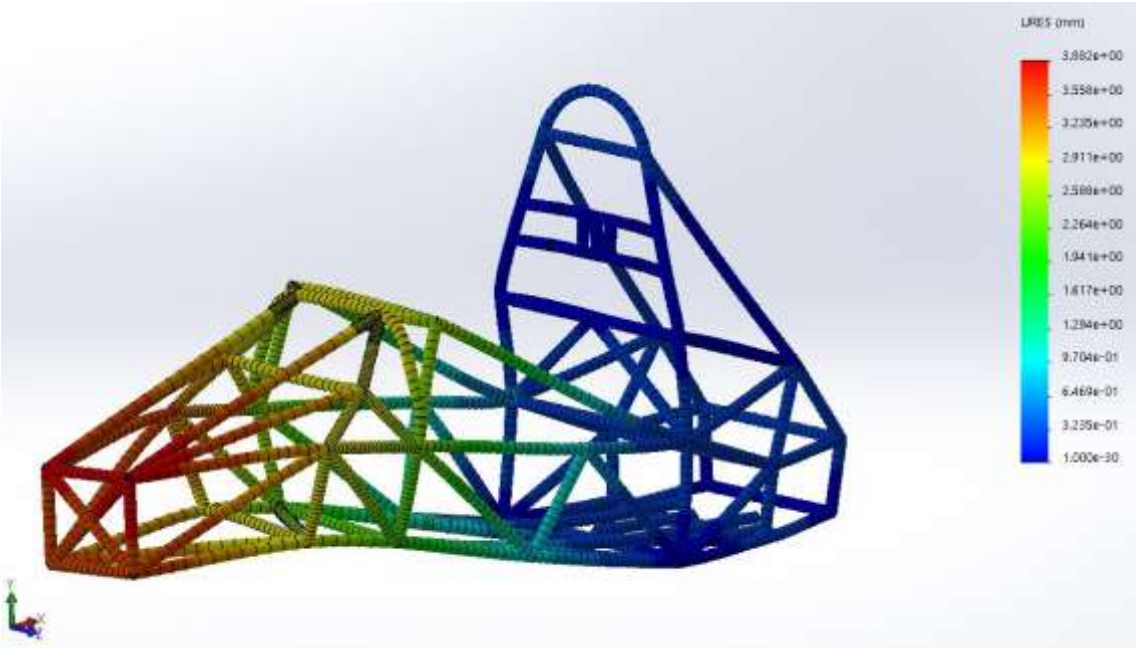


Ilustración 193. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 95. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto frontolateral	Vigas	273.1	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	3.88	mm	25mm

3.7.2.7.2.8. Anclajes caja de baterías

- Tensiones

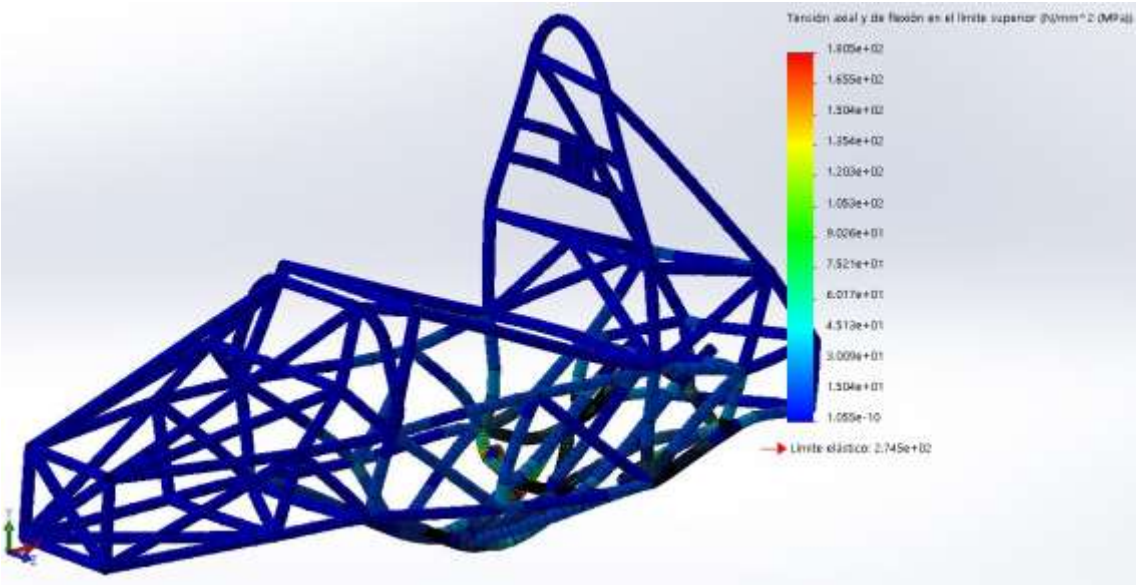


Ilustración 194. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

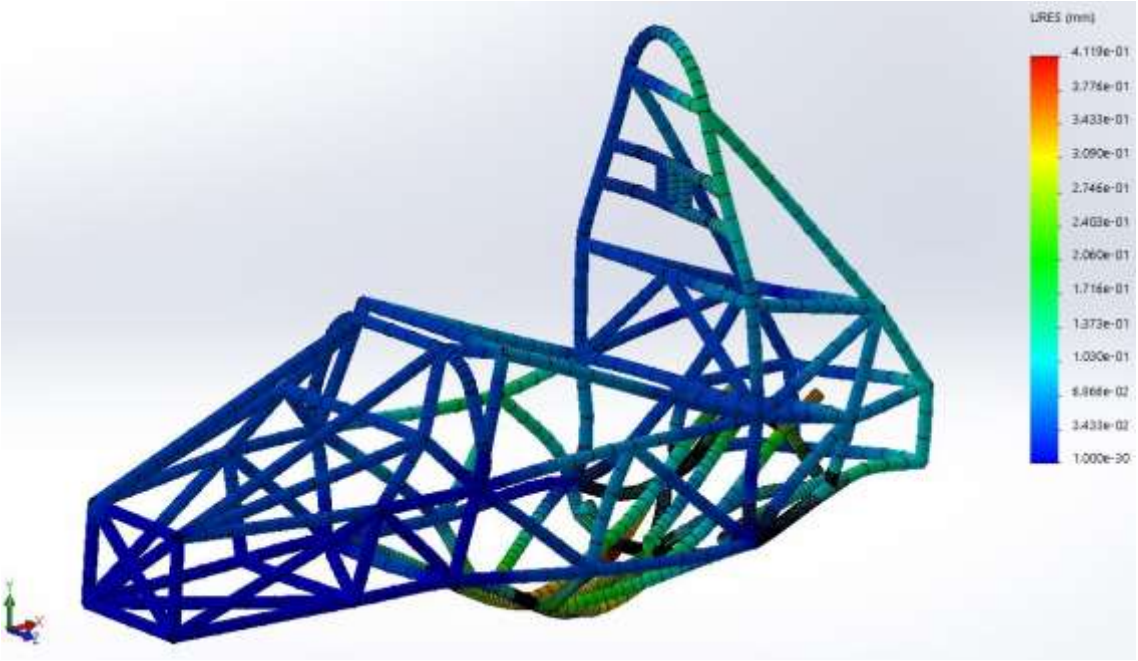


Ilustración 195. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 96. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes caja de baterías	Vigas	180.5	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.41	mm	25mm

3.7.2.7.2.9. Reposacabezas

- Tensiones

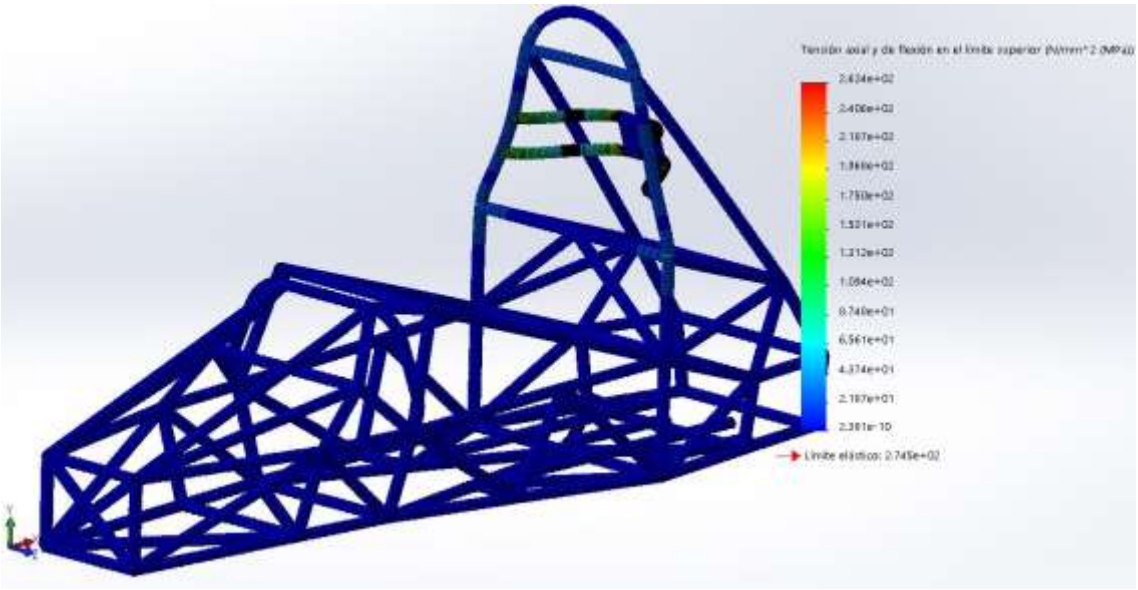


Ilustración 196. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

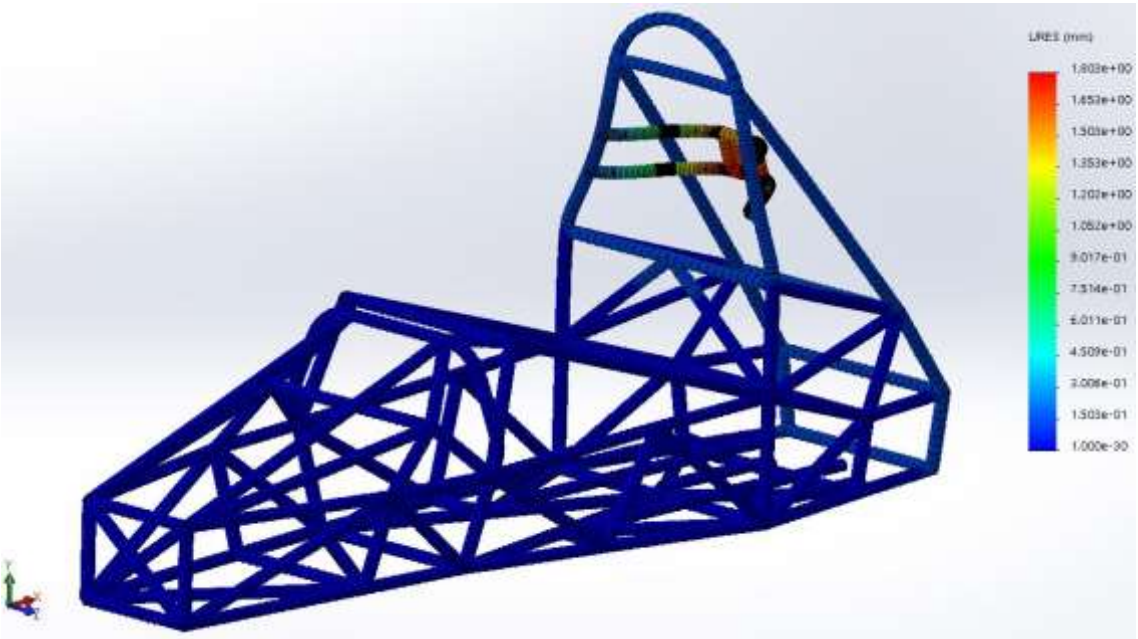


Ilustración 197. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 97. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Reposacabezas	Vigas	262.4	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.8	mm	25mm

3.7.2.7.2.10. Comparación resultados

Tabla 98. Tabla resumen iteración. Fuente: propia

Estudio	Comparación resultados			
	Elemento	Iteración 4	Modificación lateral	Unid.
Aro principal	Vigas	248.4	248.6	MPa
	Desplaz.	4.53	4.02	mm
Aro frontal	Vigas	185.9	186.7	MPa
	Desplaz.	2.39	2.39	mm
Impacto lateral 1	Vigas	50.1	66.1	MPa
	Desplaz.	0.21	0.42	mm
Impacto lateral 2	Vigas	50.1	76.25	MPa
	Desplaz.	0.21	0.86	mm
Impacto lateral 3	Vigas	50.1	173.9	MPa
	Desplaz.	0.21	1.41	mm
Impacto lateral 4	Vigas	50.1	115.1	MPa
	Desplaz.	0.21	0.76	mm
Impacto frontal	Vigas	274.5	279.9	MPa
	Desplaz.	3.44	2.63	mm
Anclajes cinturón de hombros	Vigas	243.9	244.7	MPa
	Desplaz.	3.37	3.04	mm
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	251.2	191.1	MPa
	Desplaz.	1.6	1.25	mm
Impacto frontolateral	Vigas	265.8	273.1	MPa
	Desplaz.	9.41	3.88	mm
Anclajes caja de baterías	Vigas	173	180.5	MPa
	Desplaz.	0.38	0.41	mm
Reposacabezas	Vigas	262.5	262.4	MPa
	Desplaz.	1.84	1.8	mm

Se puede observar que la modificación apenas ha supuesto una variación significativa de los resultados, salvo en el impacto lateral, el cual difiere al someterse a varias pruebas. Por lo tanto, esta solución es una solución válida para conseguir el objetivo de mejorar la seguridad del piloto.

3.7.2.7.3. Combinación de ambas modificaciones

Combinando ambas modificaciones, el resultado que se debería obtener no debería ser muy diferente. Para comprobar esto, se realizan las correspondientes simulaciones. En la siguiente imagen, se muestra el chasis con estas modificaciones:

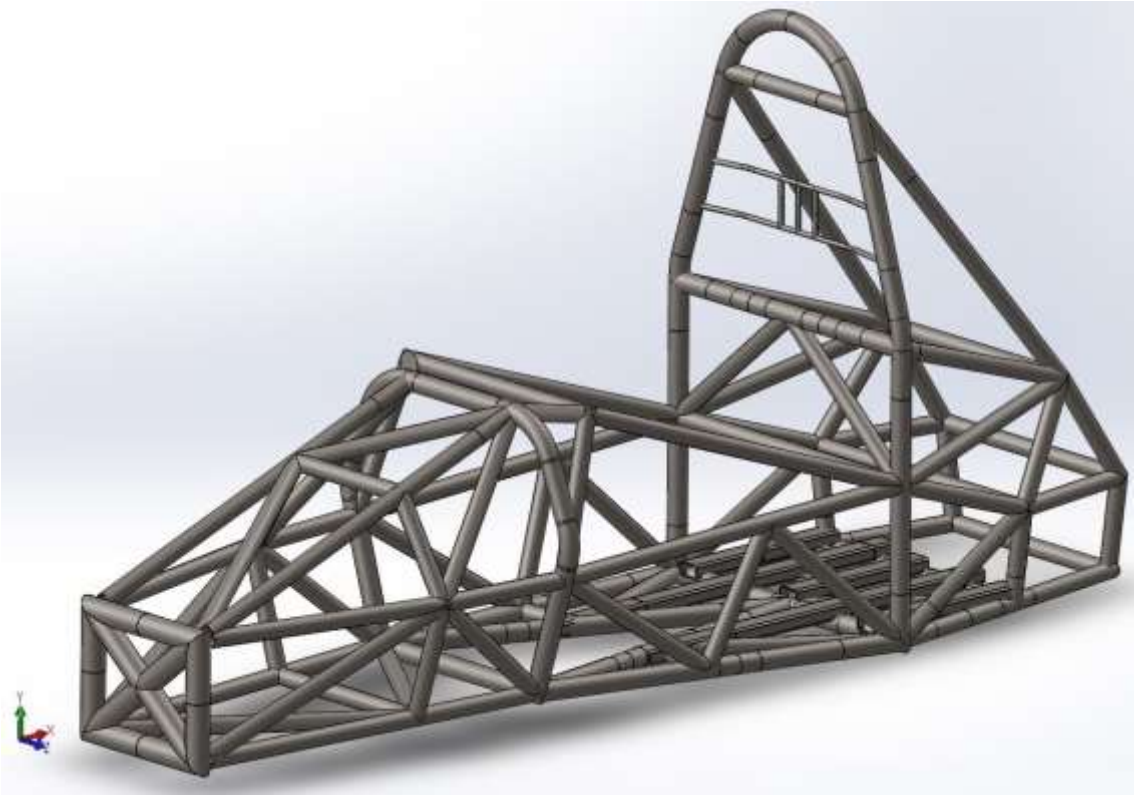


Ilustración 198. Vista del chasis modificación. Fuente: propia

Para calcular la modificación lateral, la simulación se realizó atendiendo al siguiente modelo:

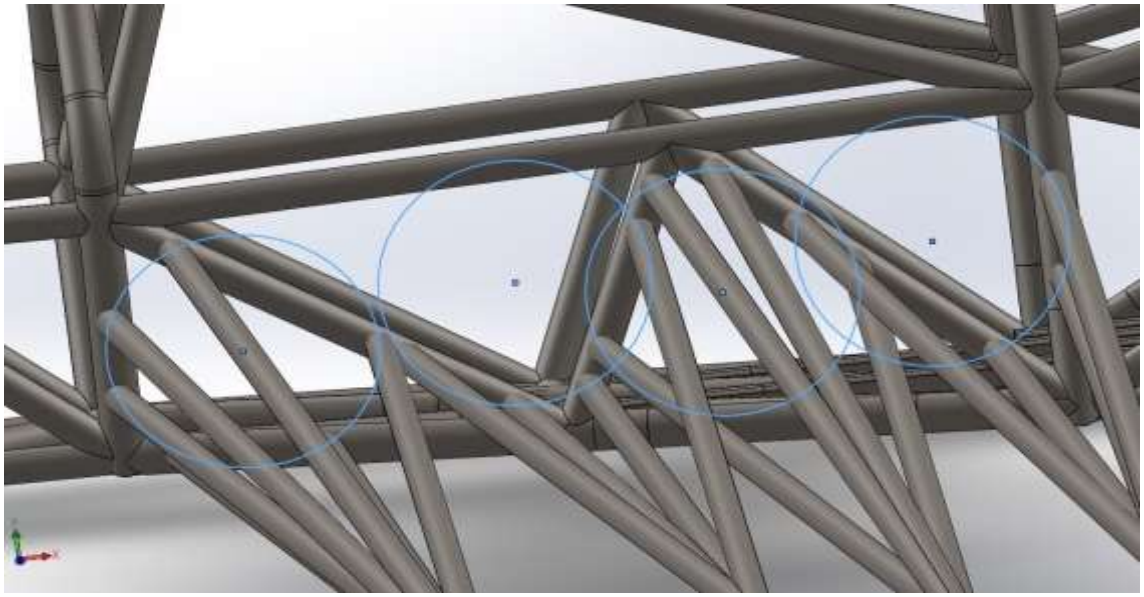


Ilustración 199. Detalle de estudios de impacto lateral. Fuente: propia

A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

3.7.2.7.3.1. Aro principal

- Tensiones

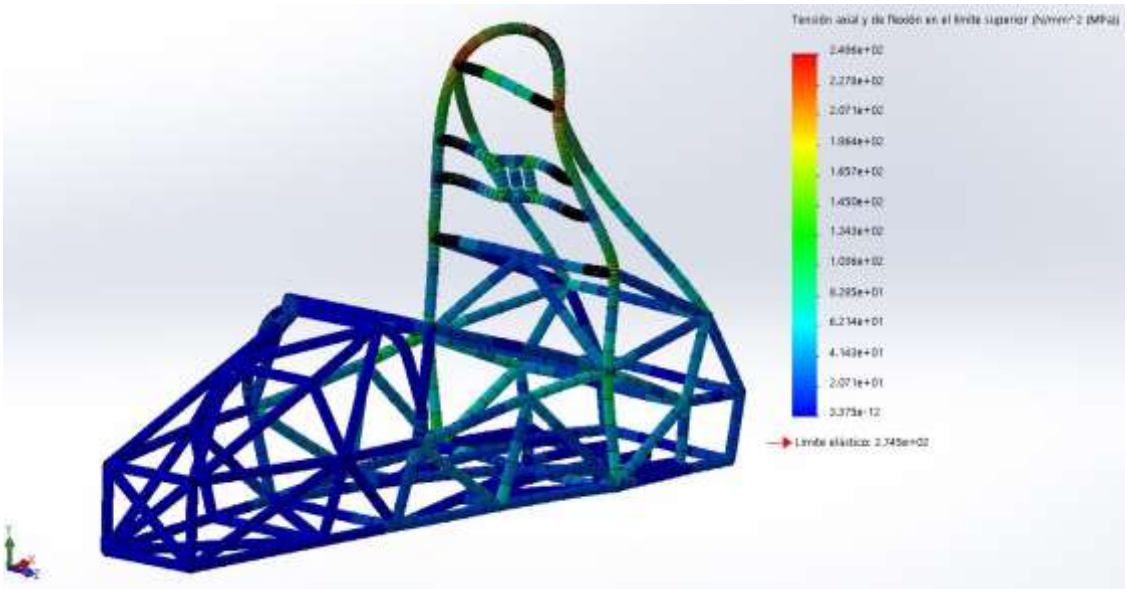


Ilustración 200. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

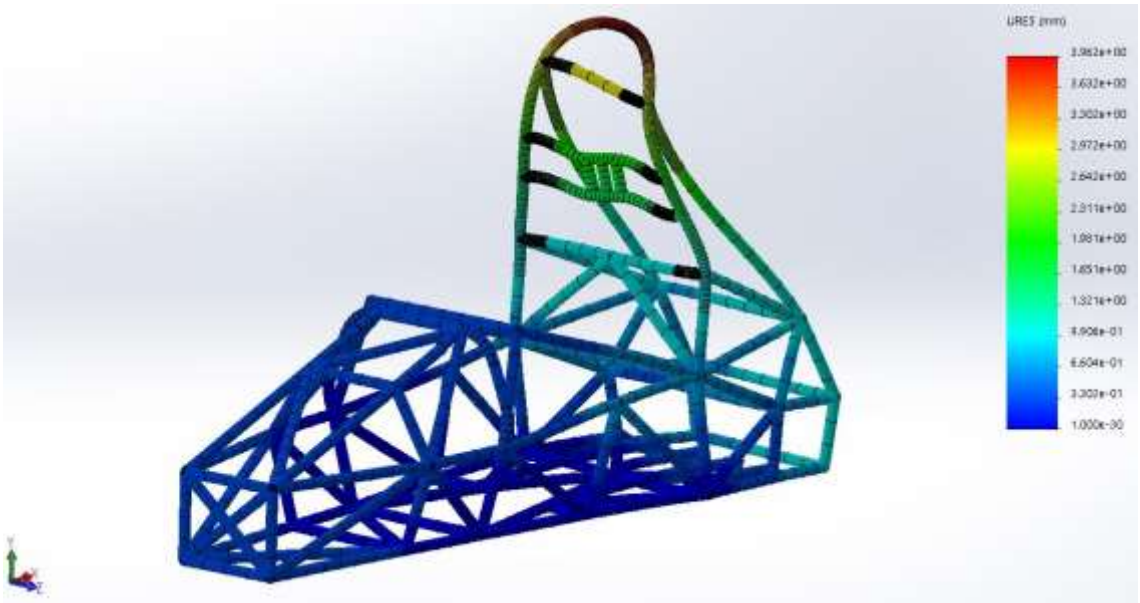


Ilustración 201. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 99. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro principal	Vigas	248.6	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	3.96	mm	25mm

3.7.2.7.3.2. Aro frontal

- Tensiones

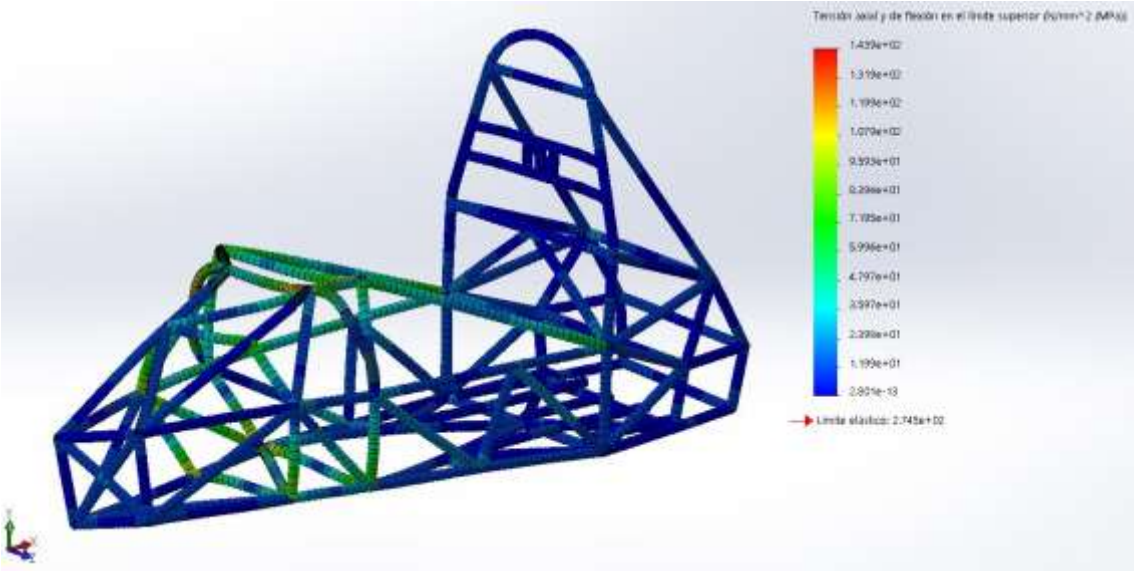


Ilustración 202. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

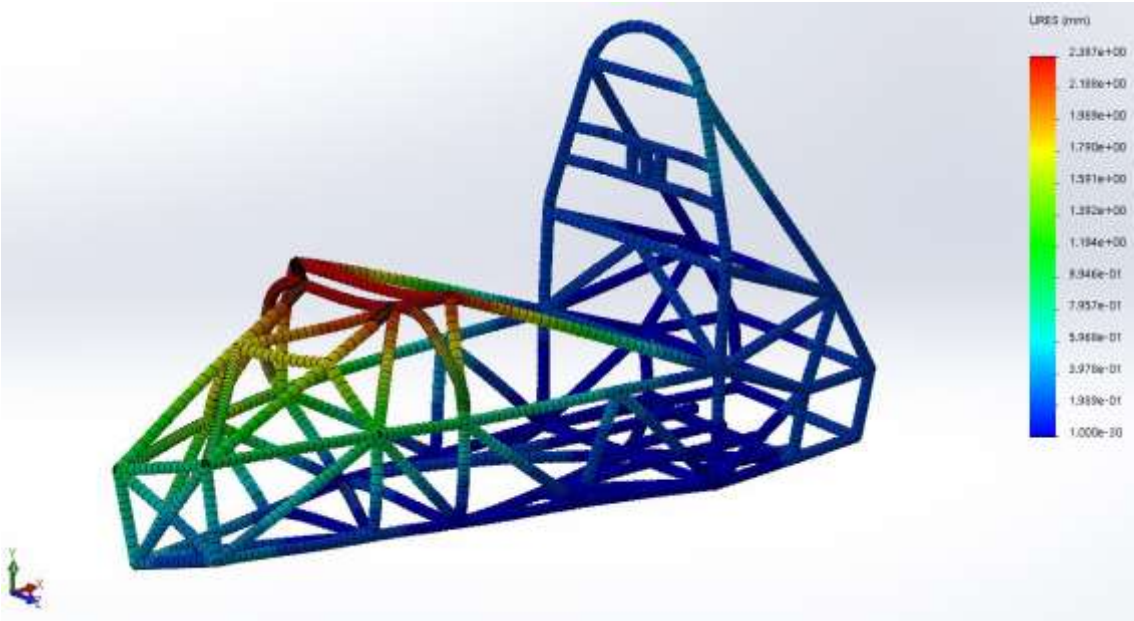


Ilustración 203. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 100. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro frontal	Vigas	143.9	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	2.39	mm	25mm

3.7.2.7.3.3. Impacto lateral

- Tensiones

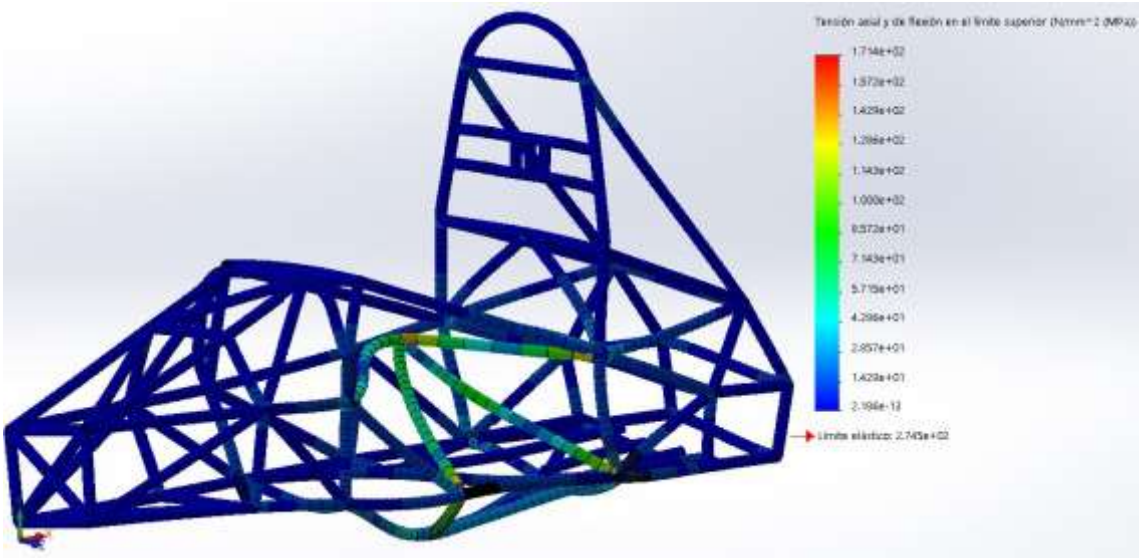


Ilustración 204. Tensiones resultantes zona 1. Fuente: propia

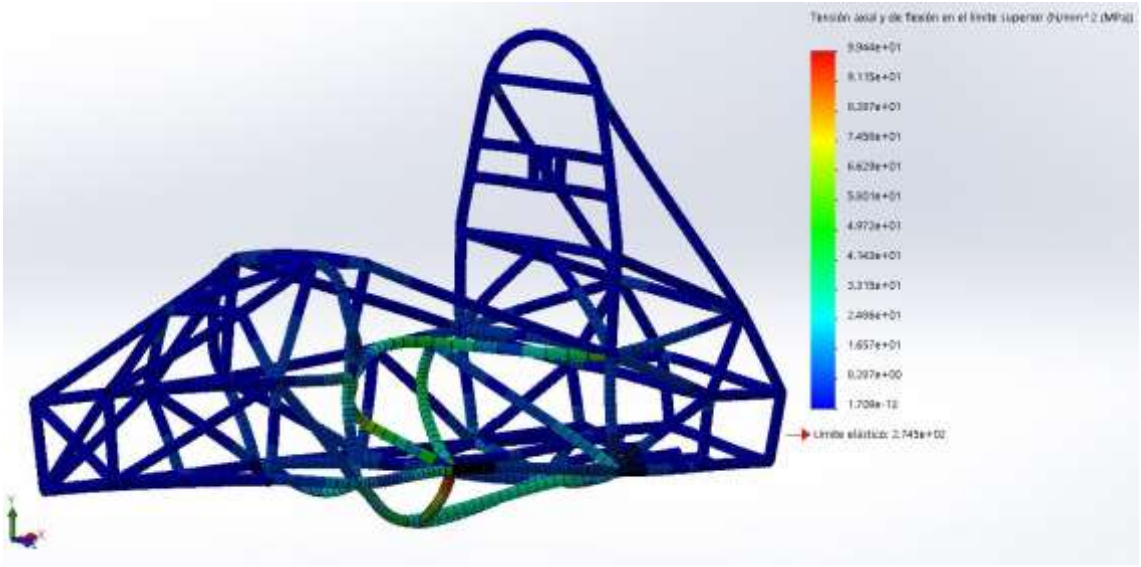


Ilustración 205. Tensiones resultantes zona 2. Fuente: propia

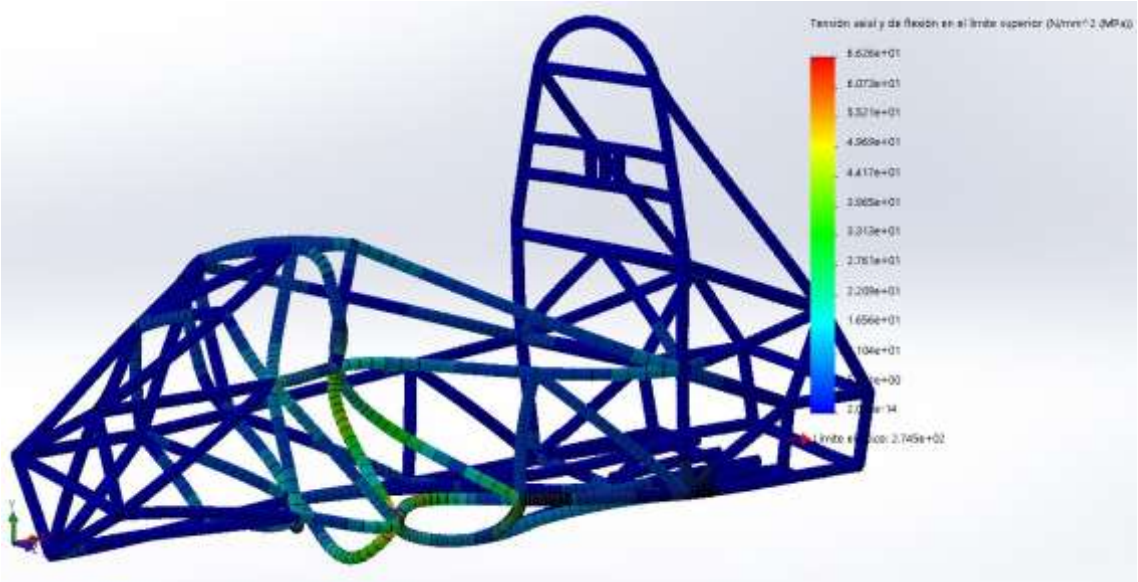


Ilustración 206. Tensiones resultantes zona 3. Fuente: propia

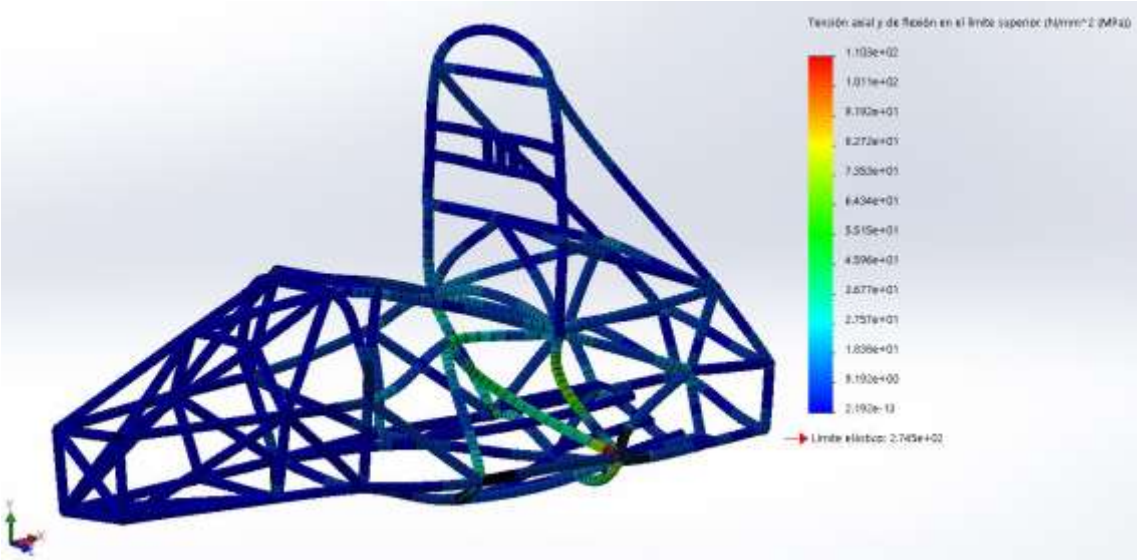


Ilustración 207. Tensiones resultantes zona 4. Fuente: propia

- Desplazamientos

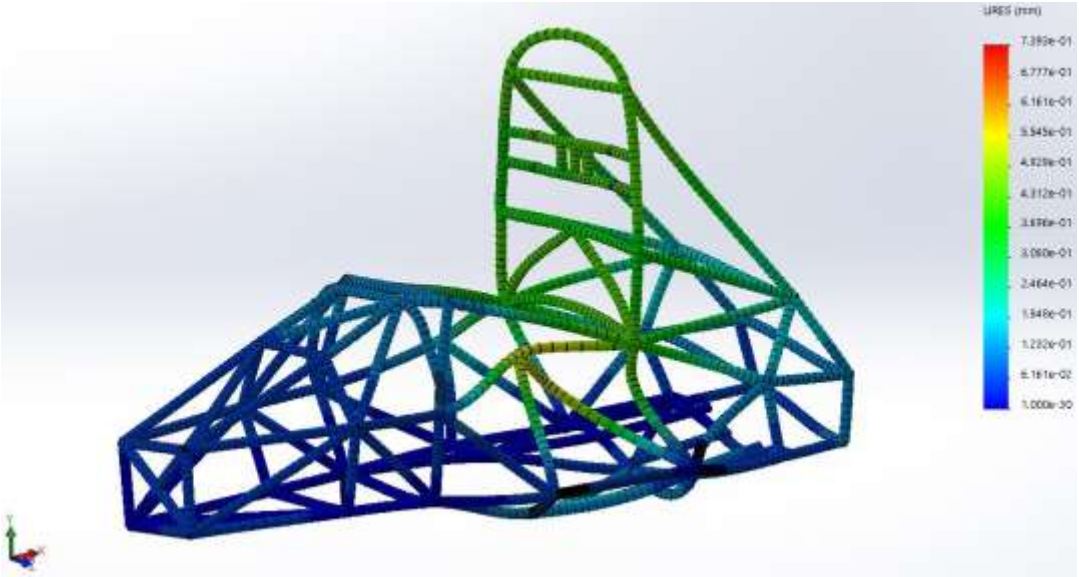


Ilustración 208. Desplazamientos resultantes zona 1. Fuente: propia

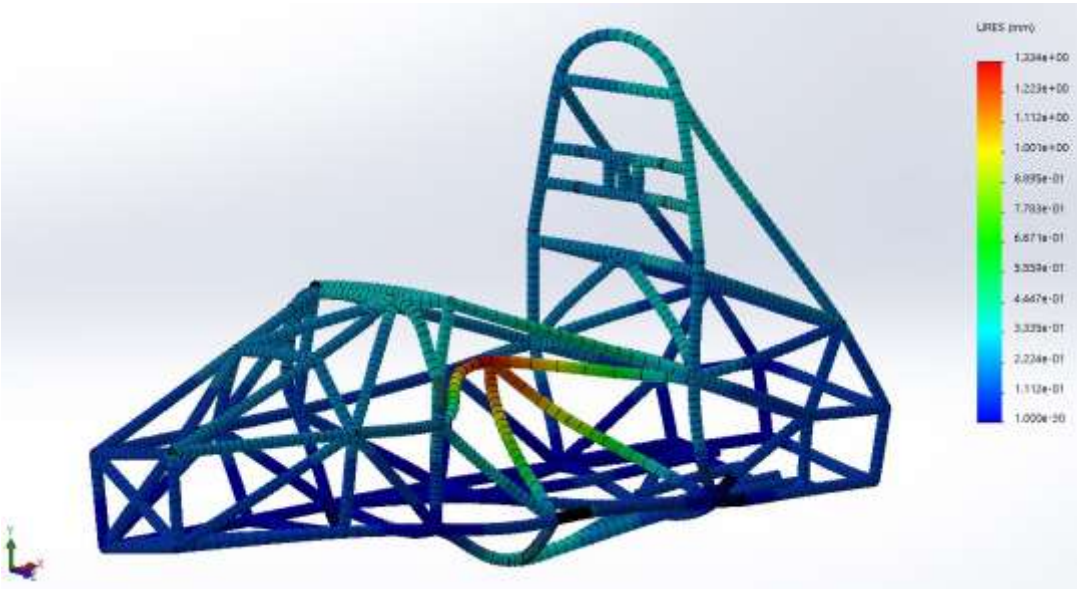


Ilustración 209. Desplazamientos resultantes zona 2. Fuente: propia

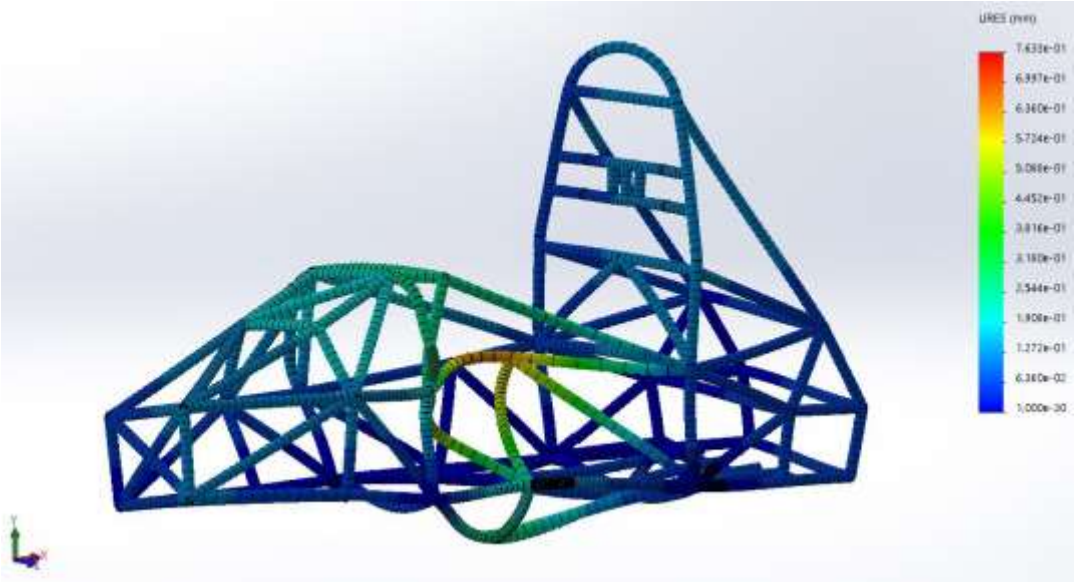


Ilustración 210. Desplazamientos resultantes zona 3. Fuente: propia

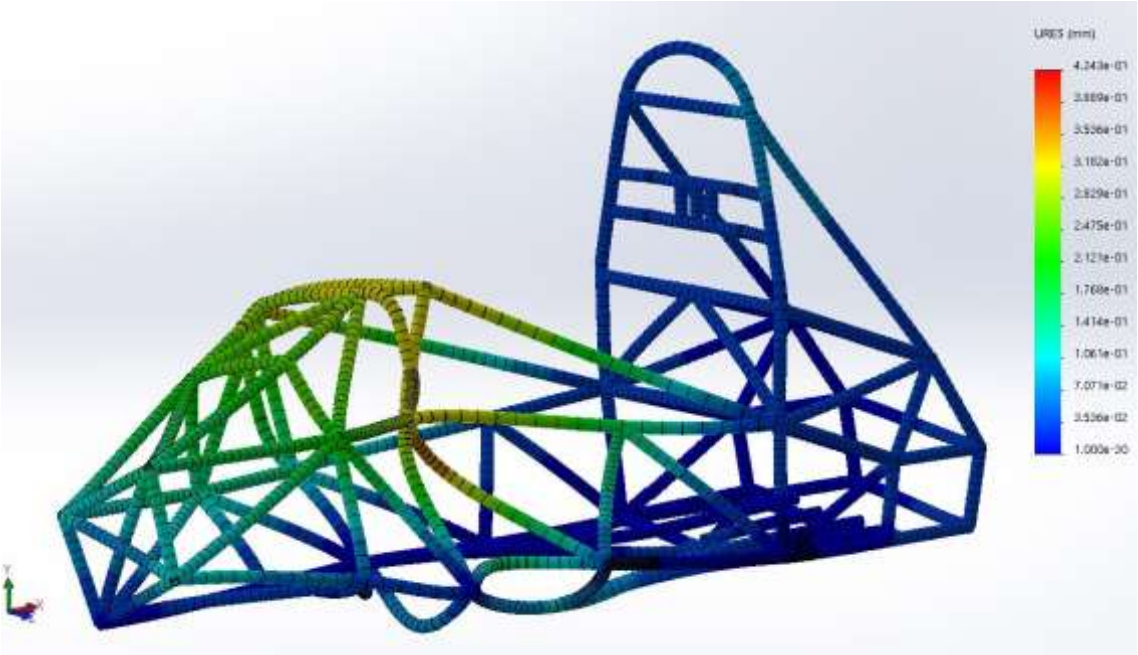


Ilustración 211. Tensiones resultantes zona 4. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 101. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto lateral 1	Vigas	66.26	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.42	mm	25mm
Impacto lateral 2	Vigas	99.44	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.76	mm	25mm

Impacto lateral 3	Vigas	171.4	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.33	mm	25mm
Impacto lateral 4	Vigas	110.3	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.74	mm	25mm

3.7.2.7.3.4. Impacto frontal

- Tensiones

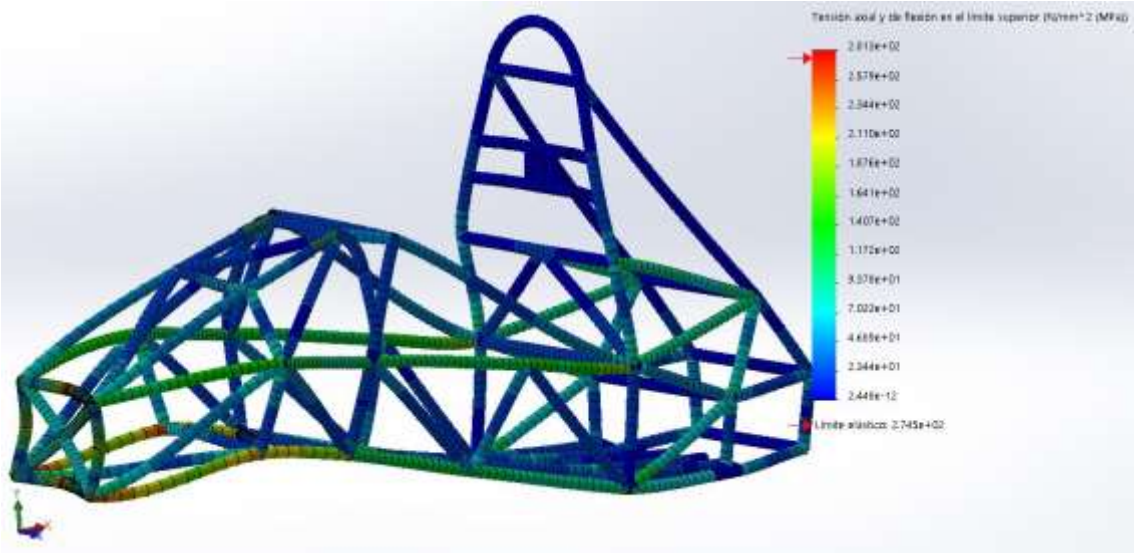


Ilustración 212. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

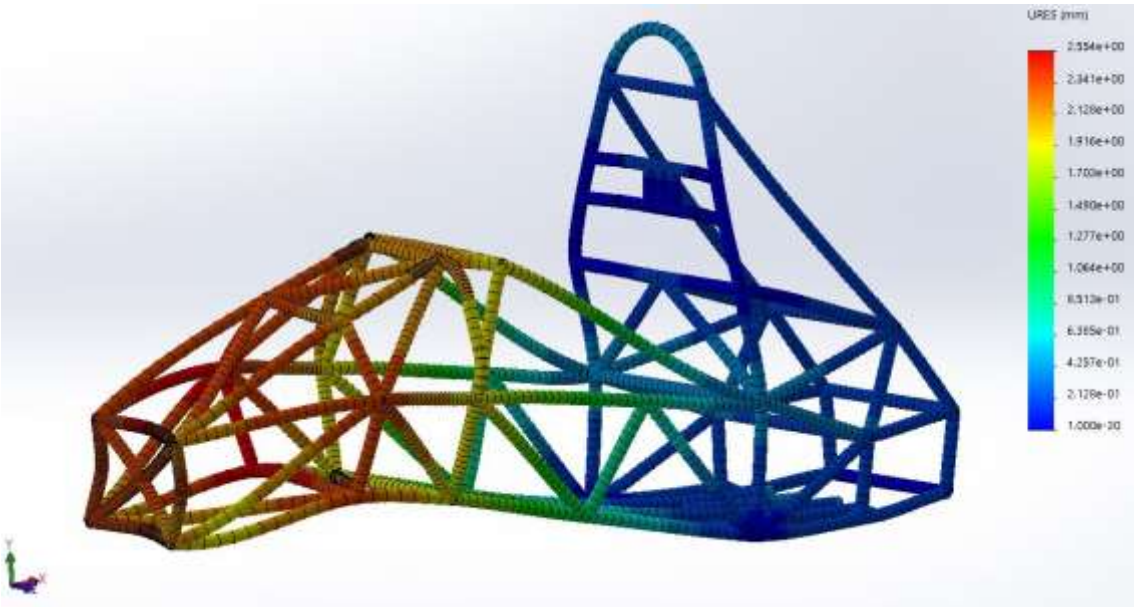


Ilustración 213. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 102. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto frontal	Vigas	281.3	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	2.55	mm	25mm

3.7.2.7.3.5. Anclajes cinturón de hombros

- Tensiones

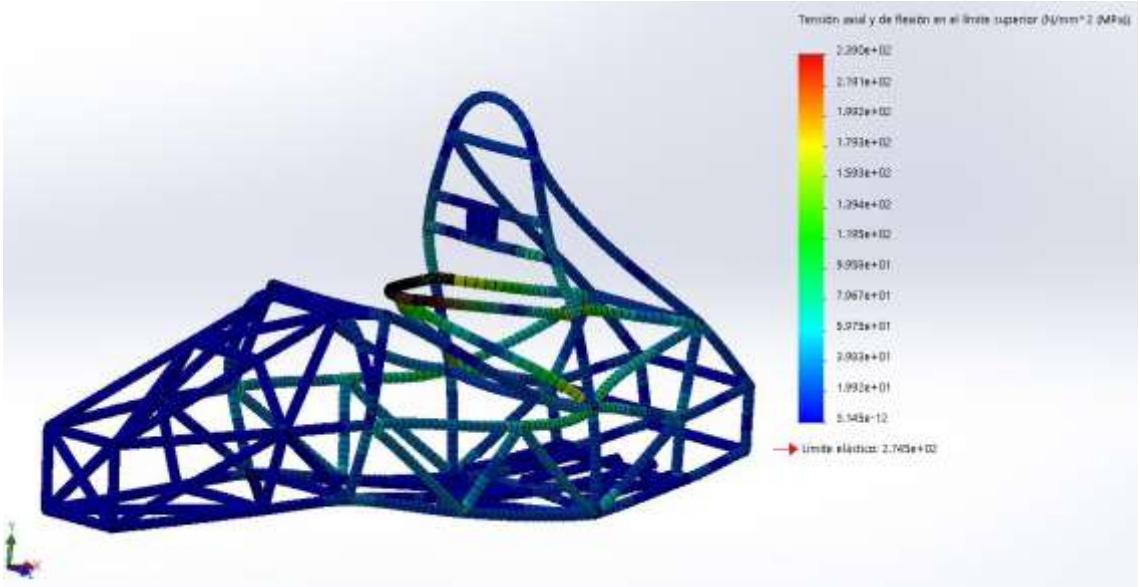


Ilustración 214. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

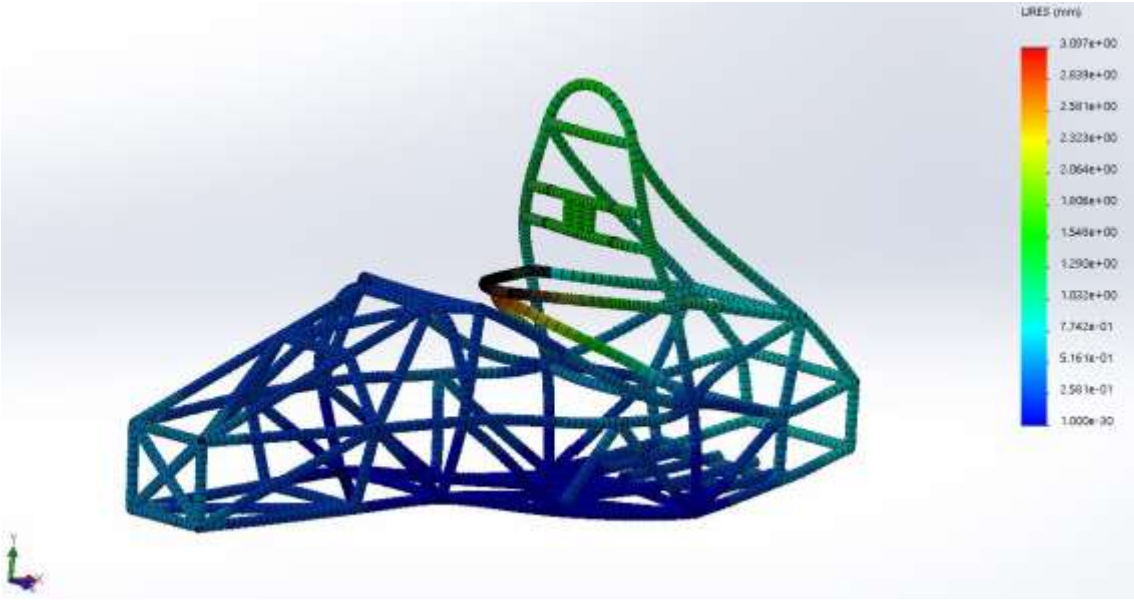


Ilustración 215. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 103. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturón de hombros	Vigas	239.0	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	3.1	mm	25mm

3.7.2.7.3.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino

- Tensiones

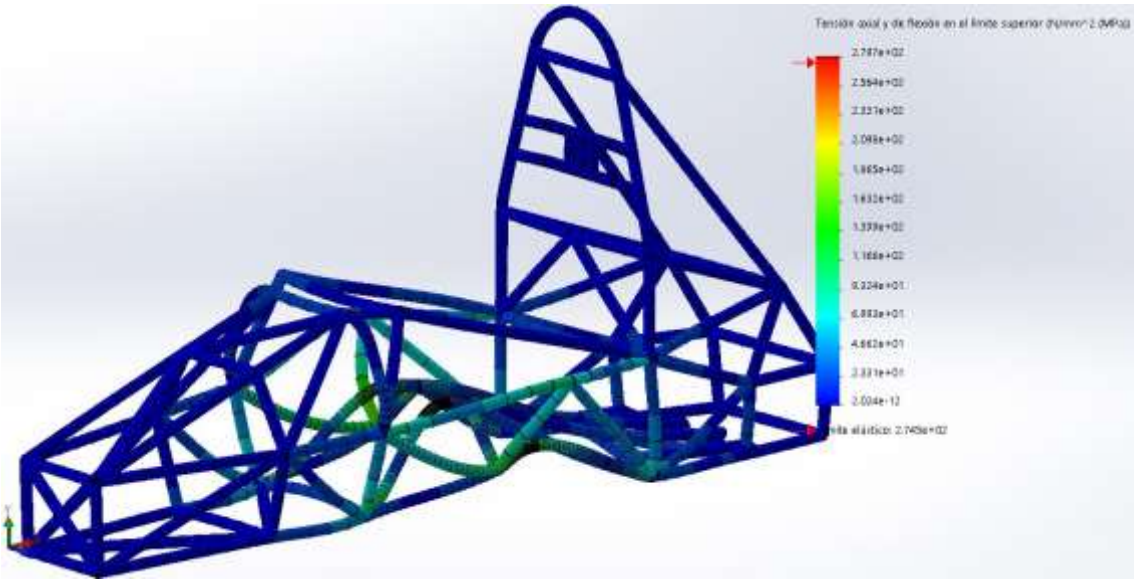


Ilustración 216. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

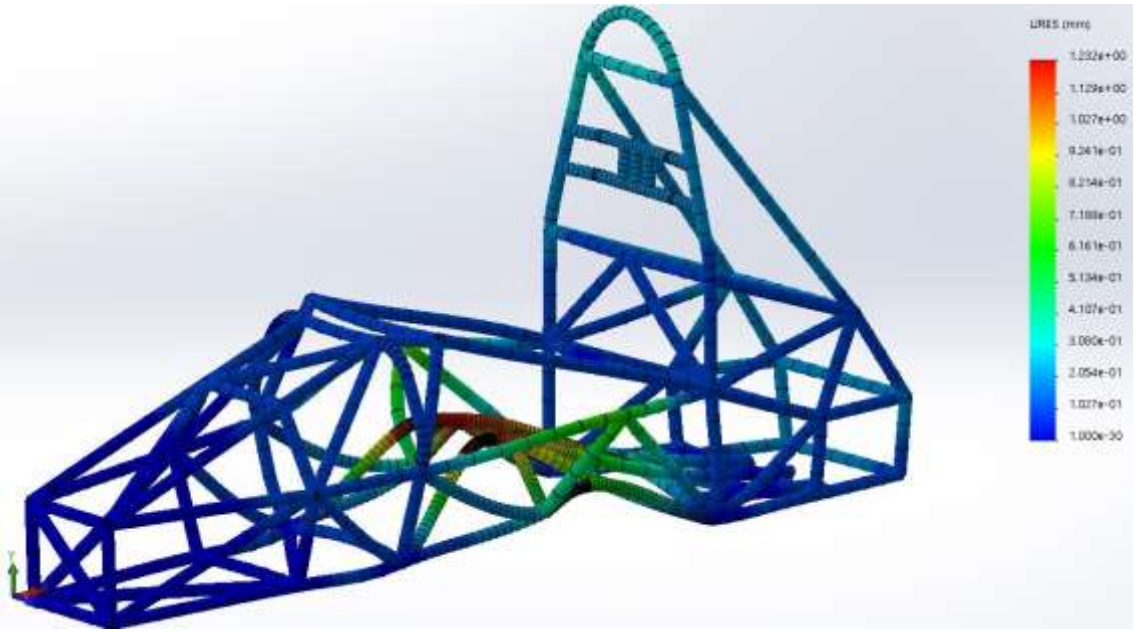


Ilustración 217. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 104. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	279.7	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.23	mm	25mm

3.7.2.7.3.7. Impacto frontolateral

- Tensiones

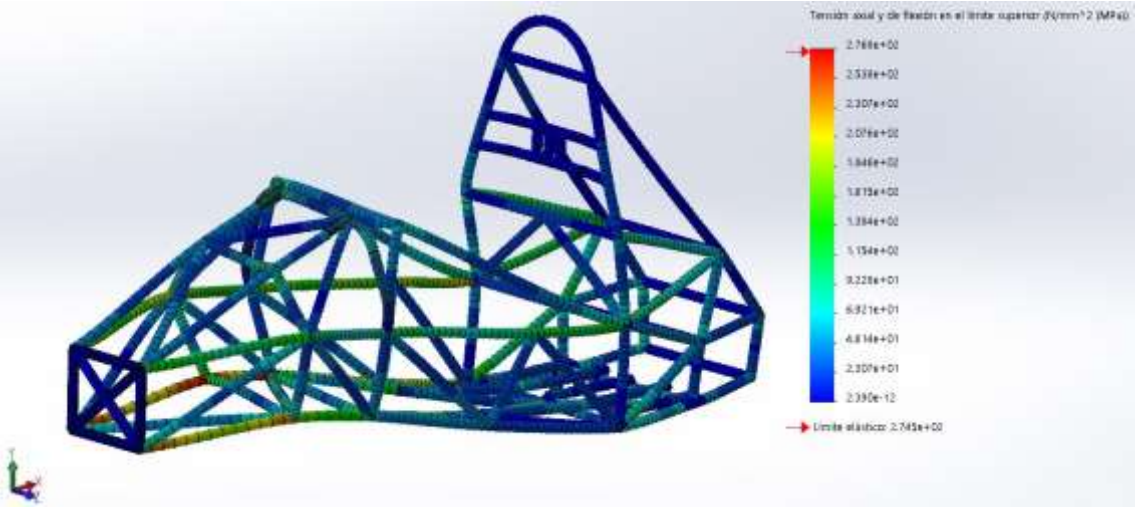


Ilustración 218. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

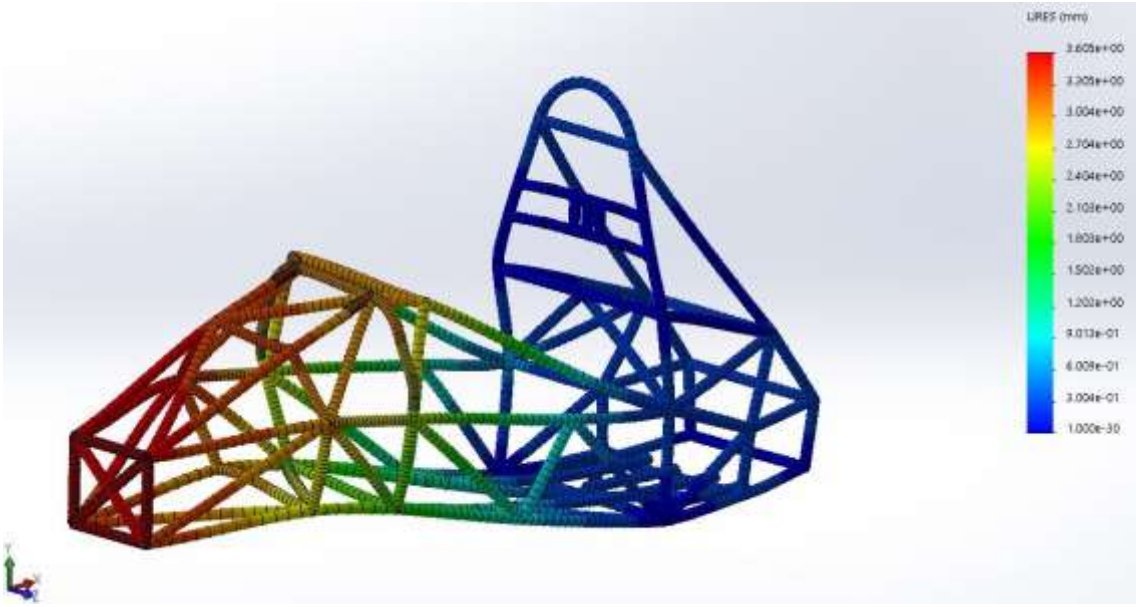


Ilustración 219. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 105. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto frontolateral	Vigas	276.8	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	3.6	mm	25mm

3.7.2.7.3.8. Anclajes caja de baterías

- Tensiones

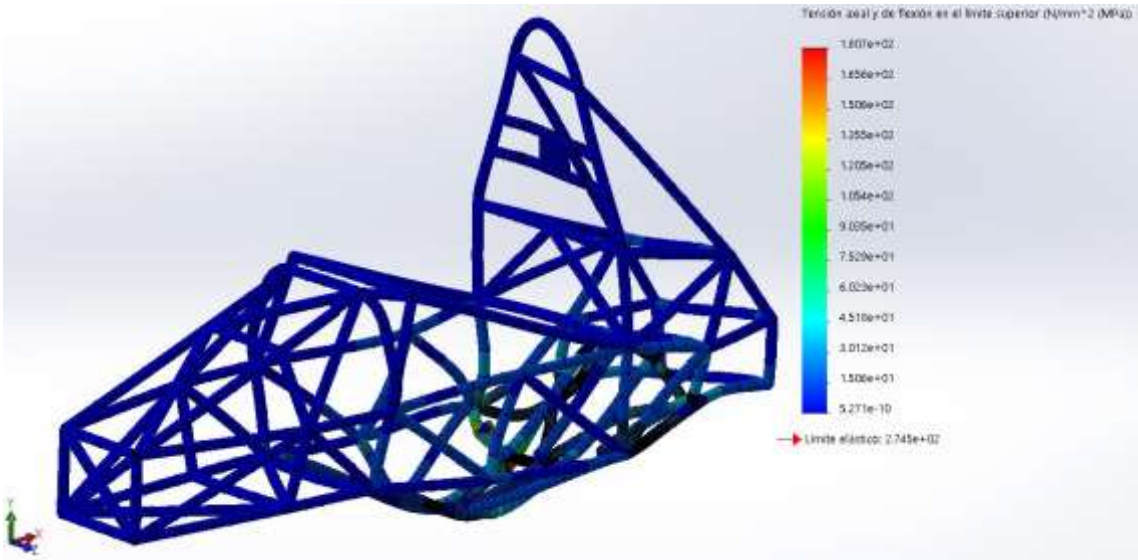


Ilustración 220. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

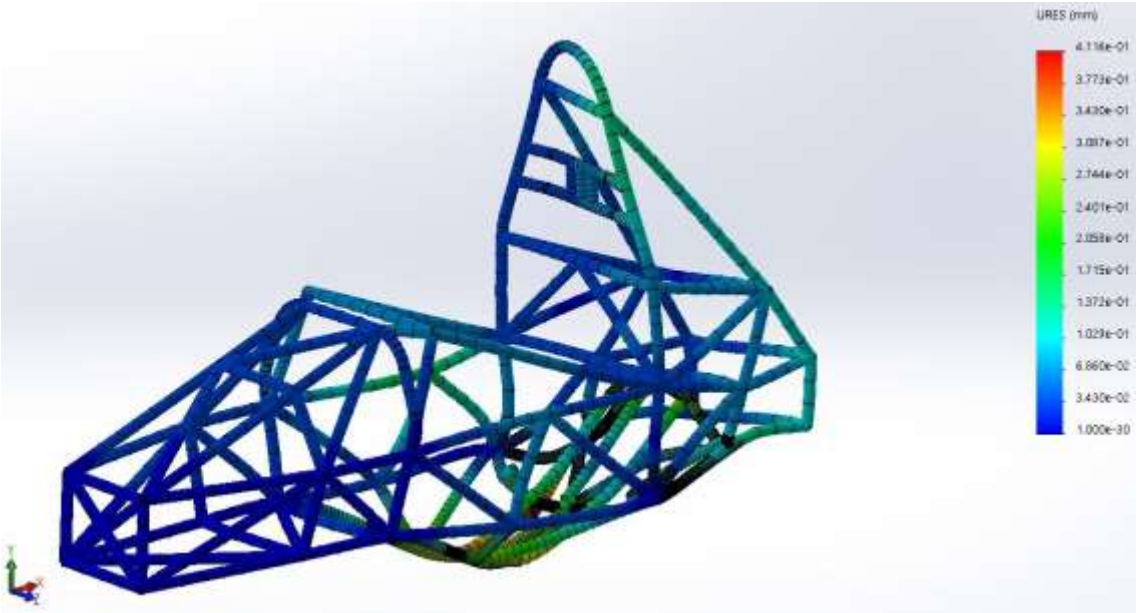


Ilustración 221. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 106. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes caja de baterías	Vigas	180.7	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.41	mm	25mm

3.7.2.7.3.9. Reposacabezas

- Tensiones

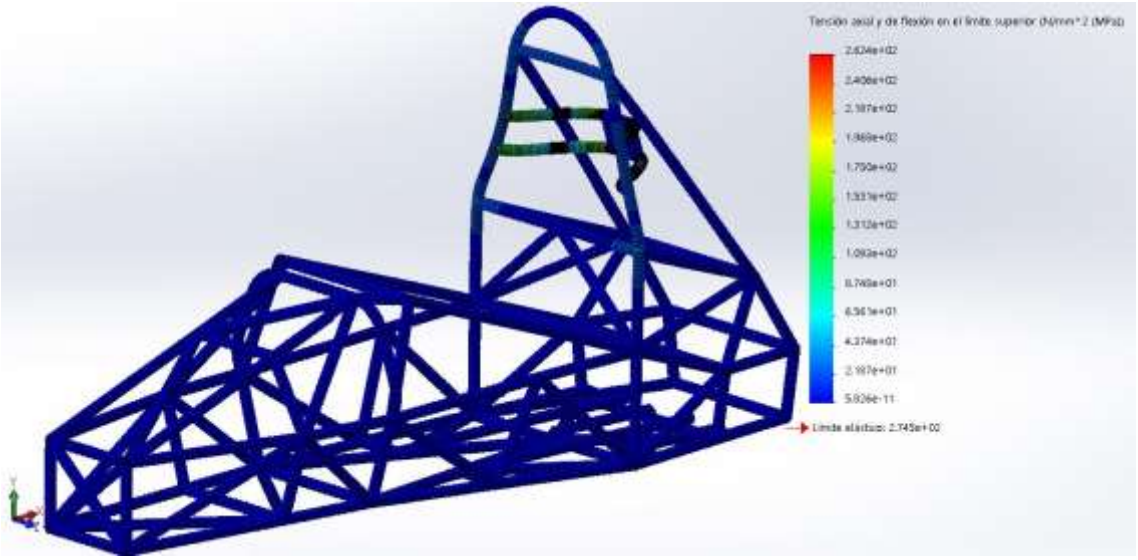


Ilustración 222. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

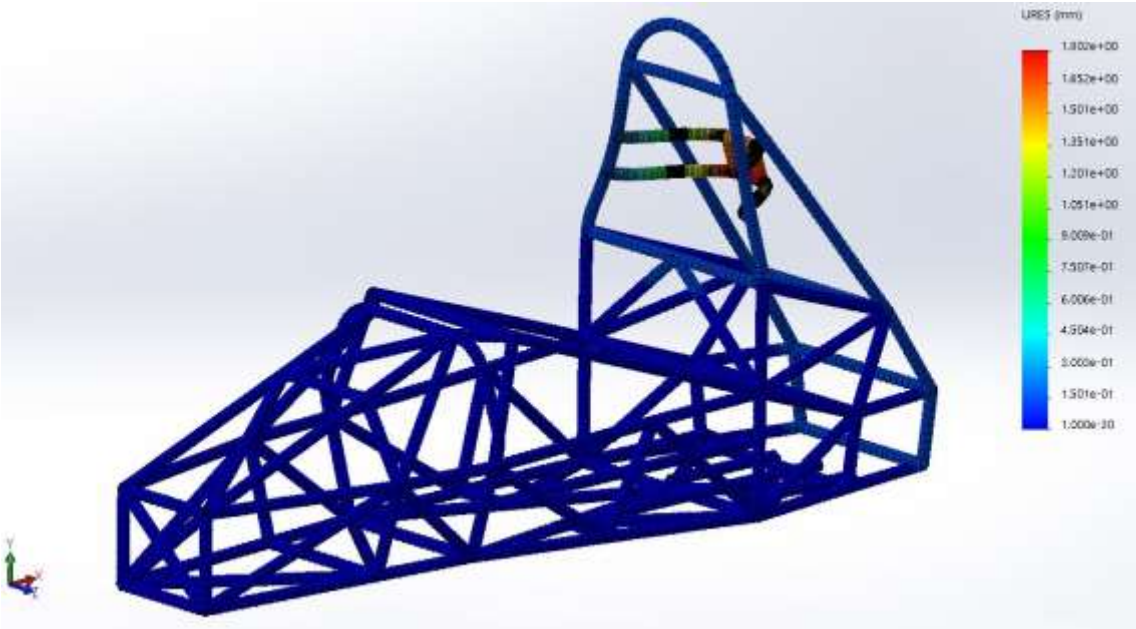


Ilustración 223. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 107. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Reposacabezas	Vigas	262.4	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.8	mm	25mm

3.7.2.7.3.10. Comparación resultados

Tabla 108. Tabla resumen modificación. Fuente: propia

Estudio	Comparación resultados			
	Elemento	Iteración 4	Ambas modificaciones	Unid.
Aro principal	Vigas	248.4	248.6	MPa
	Desplaz.	4.53	3.9	mm
Aro frontal	Vigas	185.9	143.9	MPa
	Desplaz.	2.39	2.4	mm
Impacto lateral 1	Vigas	50.1	66.26	MPa
	Desplaz.	0.21	0.42	mm
Impacto lateral 2	Vigas	50.1	99.44	MPa
	Desplaz.	0.21	0.76	mm
Impacto lateral 3	Vigas	50.1	171.4	MPa
	Desplaz.	0.21	1.33	mm
Impacto lateral 4	Vigas	50.1	110.3	MPa
	Desplaz.	0.21	0.74	mm
Impacto frontal	Vigas	274.5	281.3	MPa
	Desplaz.	3.44	2.55	mm

Anclajes cinturón de hombros	Vigas	243.9	239.0	MPa
	Desplaz.	3.37	3.1	mm
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	251.2	279.7	MPa
	Desplaz.	1.6	1.23	mm
Impacto frontolateral	Vigas	265.8	276.8	MPa
	Desplaz.	9.41	3.6	mm
Anclajes caja de baterías	Vigas	173	180.7	MPa
	Desplaz.	0.38	0.41	mm
Reposacabezas	Vigas	262.5	262.4	MPa
	Desplaz.	1.84	1.8	mm

Como se puede ver, apenas hay una variación significativa en las simulaciones, salvo en el impacto lateral, el cual difiere al someterse a varias pruebas. Este conjunto de modificaciones hace que se cumplan ambos objetivos:

- Mejorar la protección del piloto
- Reducir el peso y mejorar la soldabilidad de la estructura frontal

3.7.2.7.4. Modificación extra

Esta modificación surge ante la necesidad de dar más espacio a la caja de baterías ya que un cambio en el diseño, ha obligado a que posea una mayor altura. La siguiente imagen muestra este cambio, donde se puede apreciar que la barra situada en el triángulo del aro principal ha sido eliminada:

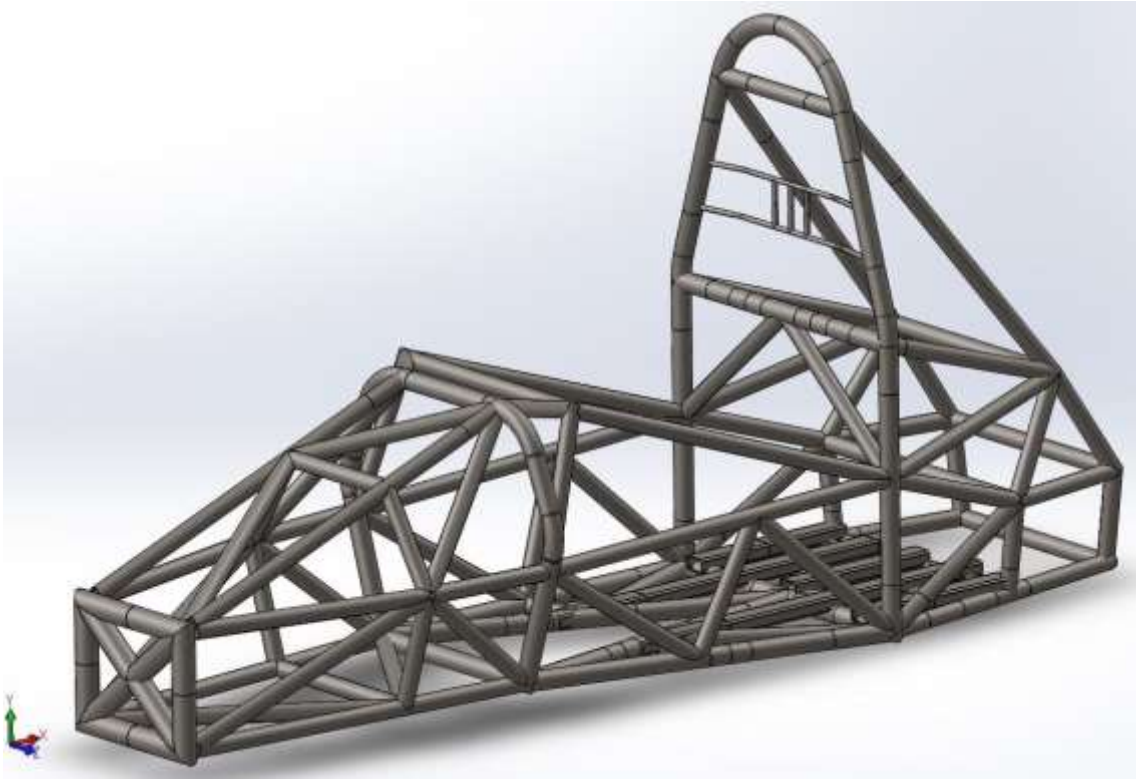


Ilustración 224. Vista del chasis modificado. Fuente: propia

Para calcular la modificación lateral, la simulación se realizó atendiendo a los siguientes modelos:

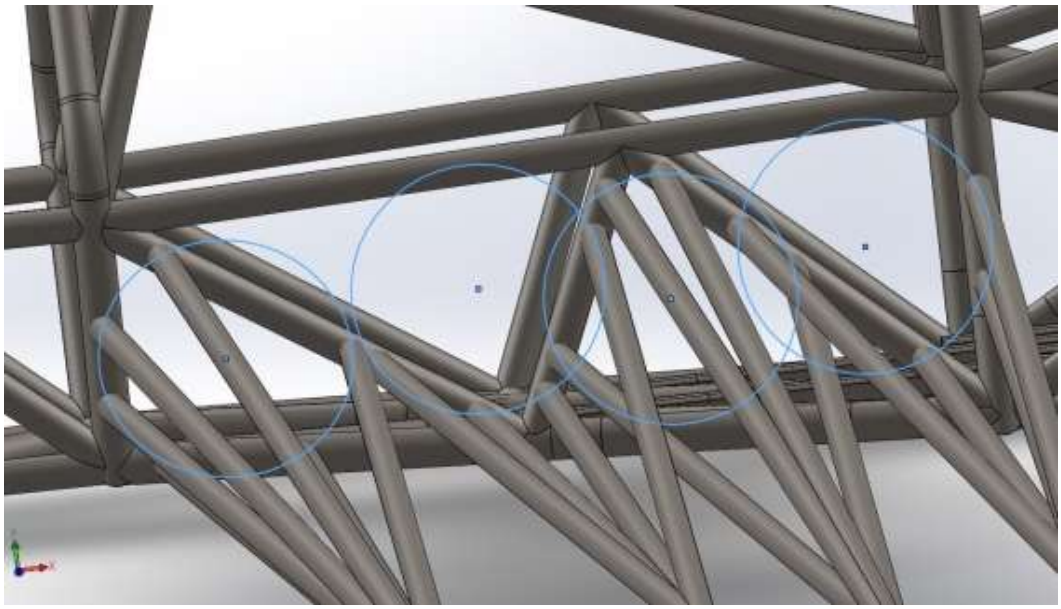


Ilustración 225. Detalle de estudios de impacto lateral. Fuente: propia

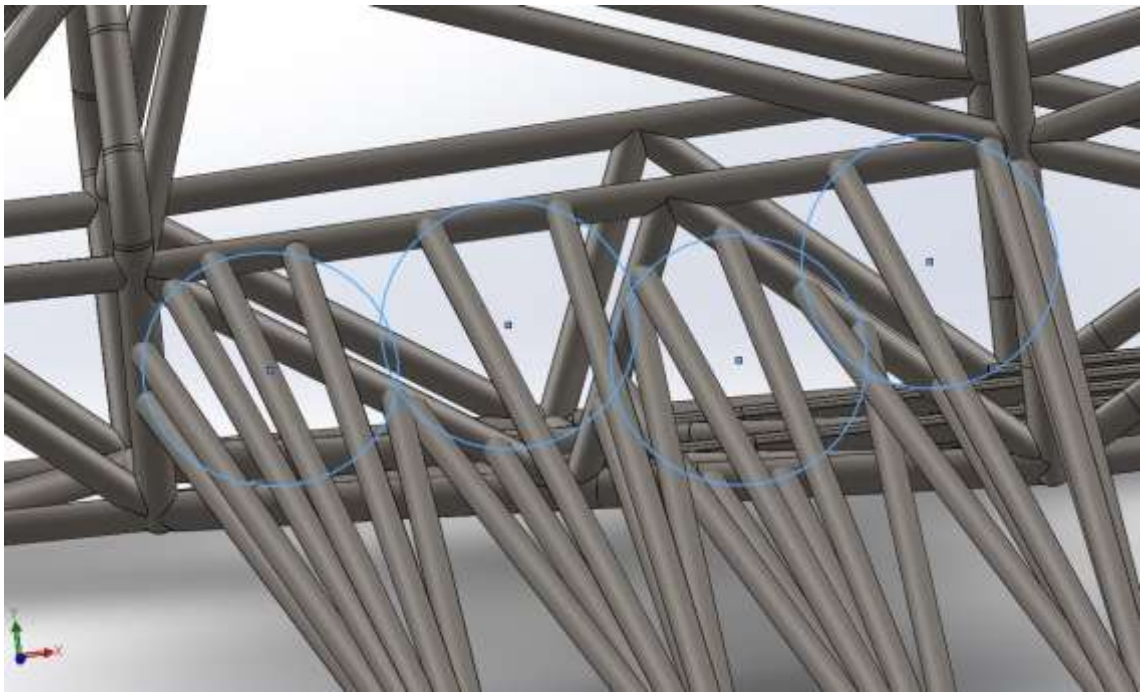


Ilustración 226. Detalle estudios de impacto lateral. Fuente: propia

A continuación, se presentan las simulaciones realizadas para la verificar el cumplimiento de la normativa tras este cambio.

3.7.2.7.4.1. Aro principal

- Tensiones

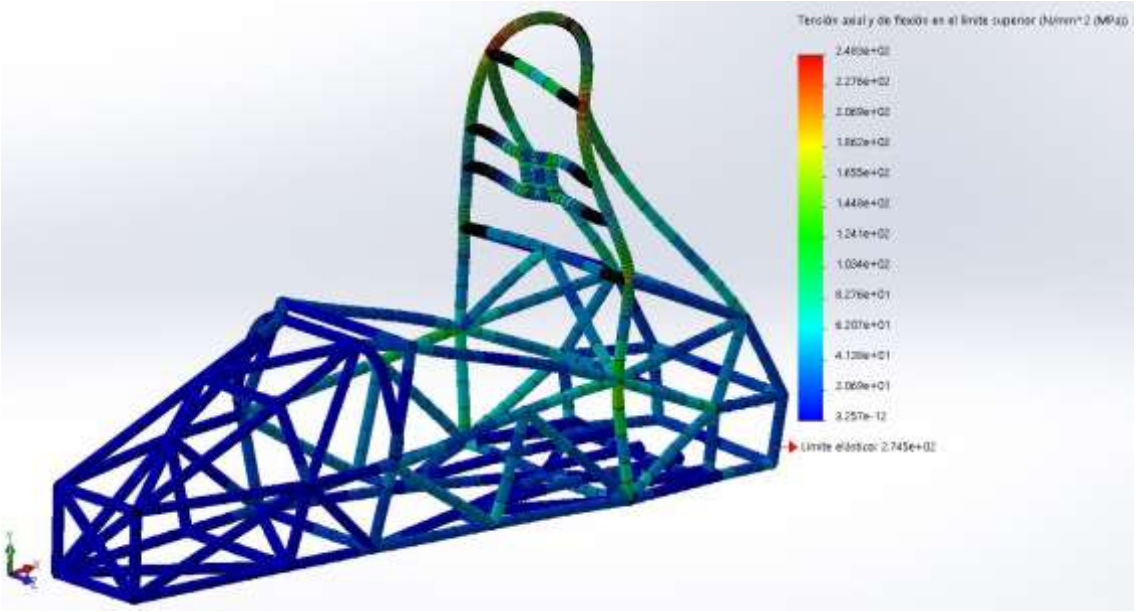


Ilustración 227. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

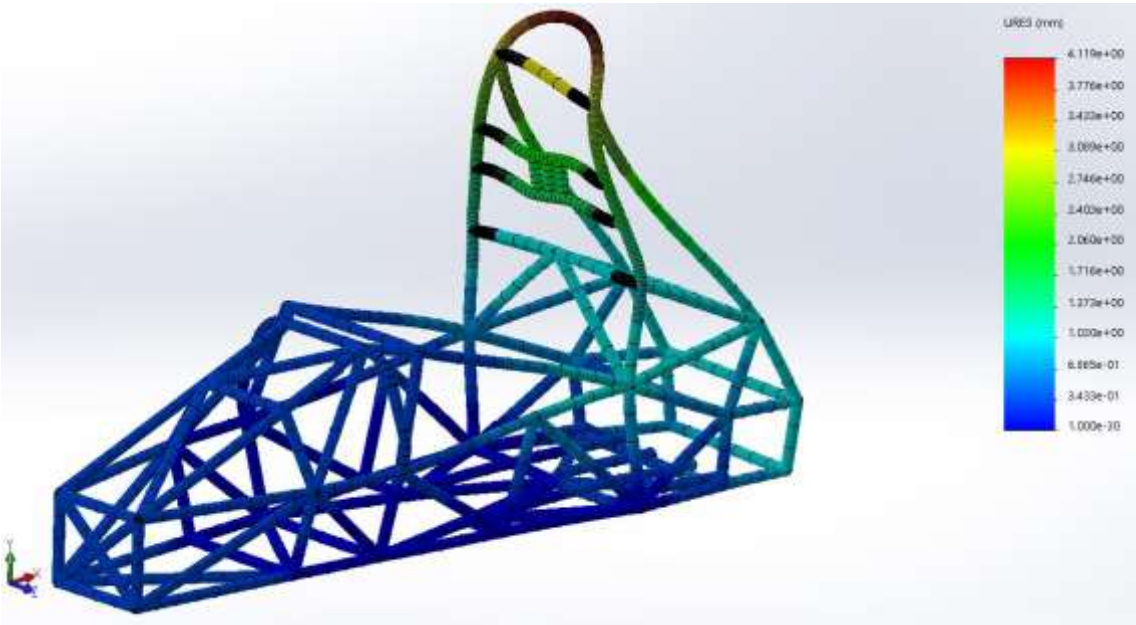


Ilustración 228. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 109. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro principal	Vigas	248.3	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	4.1	mm	25mm

3.7.2.7.4.2. Aro frontal

- Tensiones

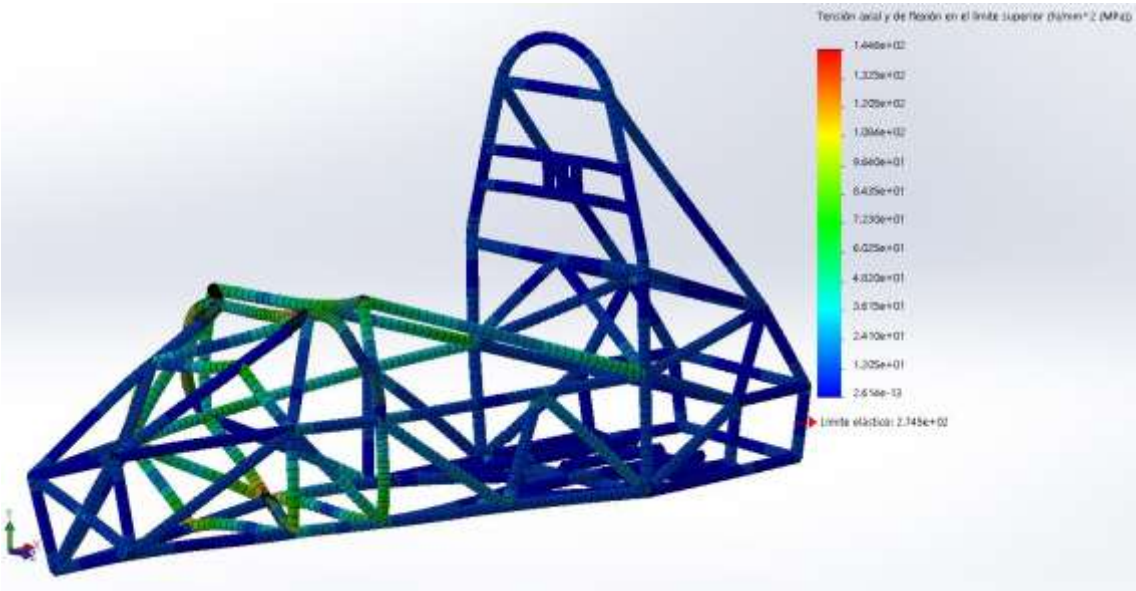


Ilustración 229. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

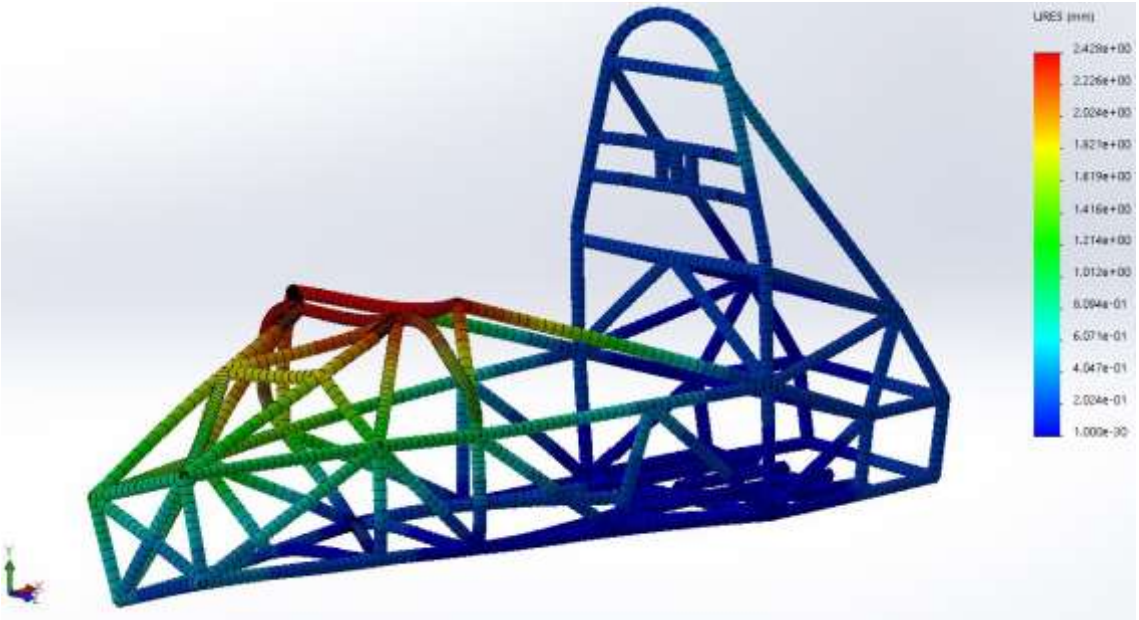


Ilustración 230. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 110. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro frontal	Vigas	144.6	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	2.43	mm	25mm

3.7.2.7.4.3. Impacto lateral

- Tensiones

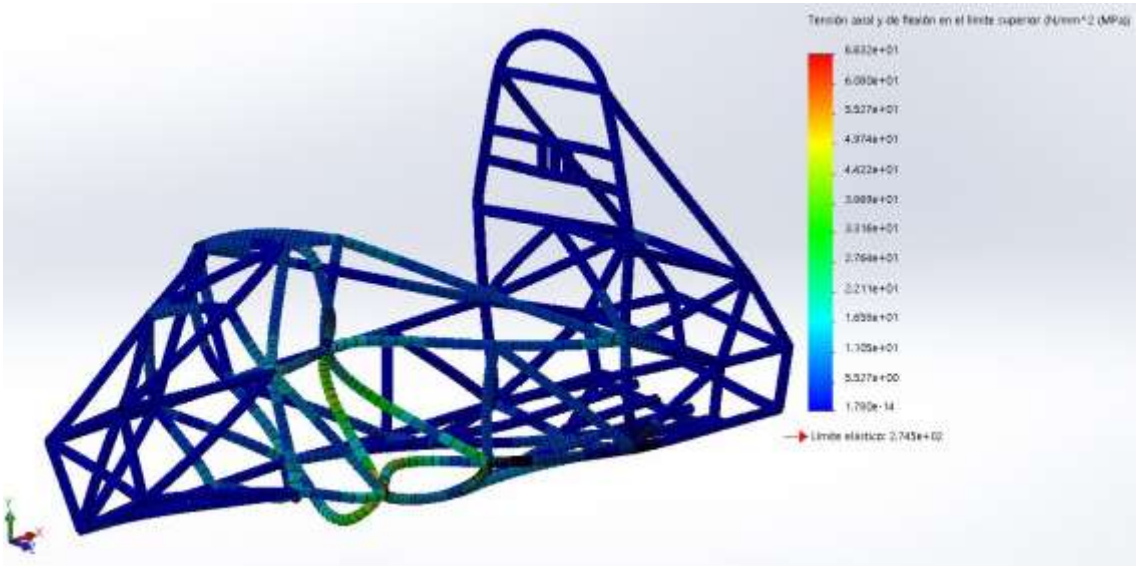


Ilustración 231. Tensiones resultantes zona 1A. Fuente: propia

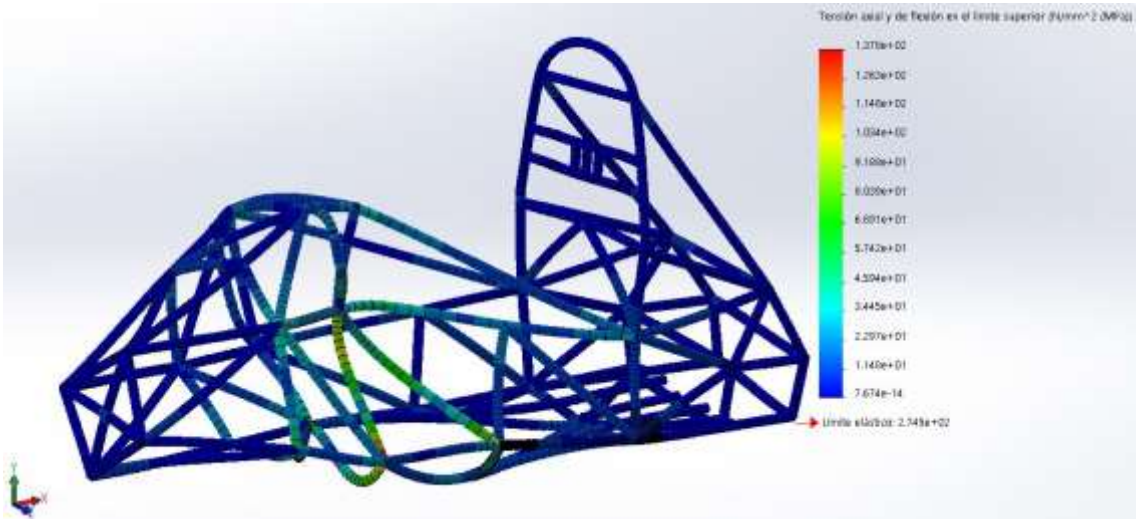


Ilustración 232. Tensiones resultantes zona 1B. Fuente: propia

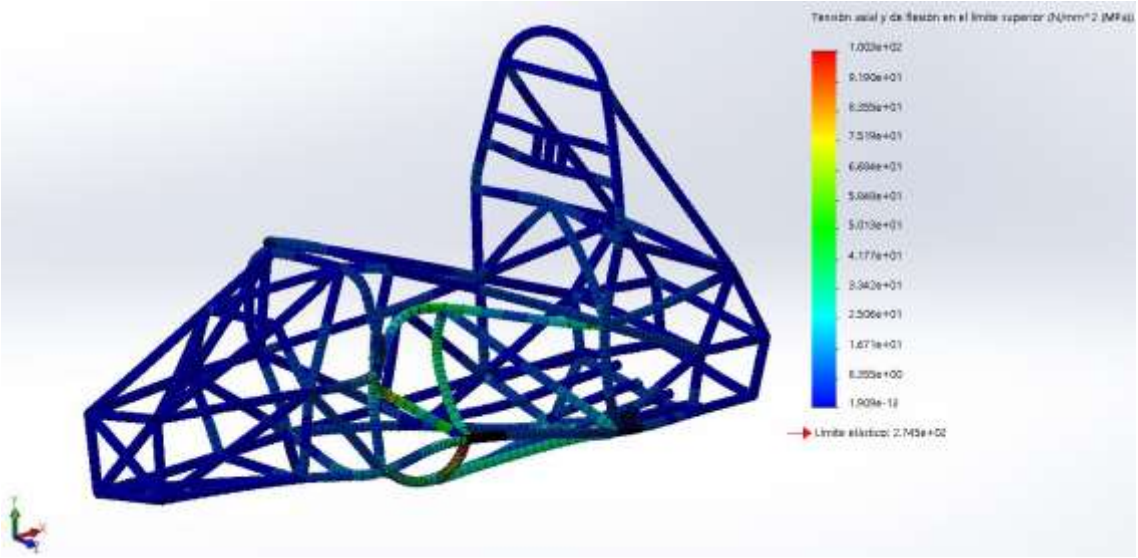


Ilustración 233. Tensiones resultantes zona 2A. Fuente: propia

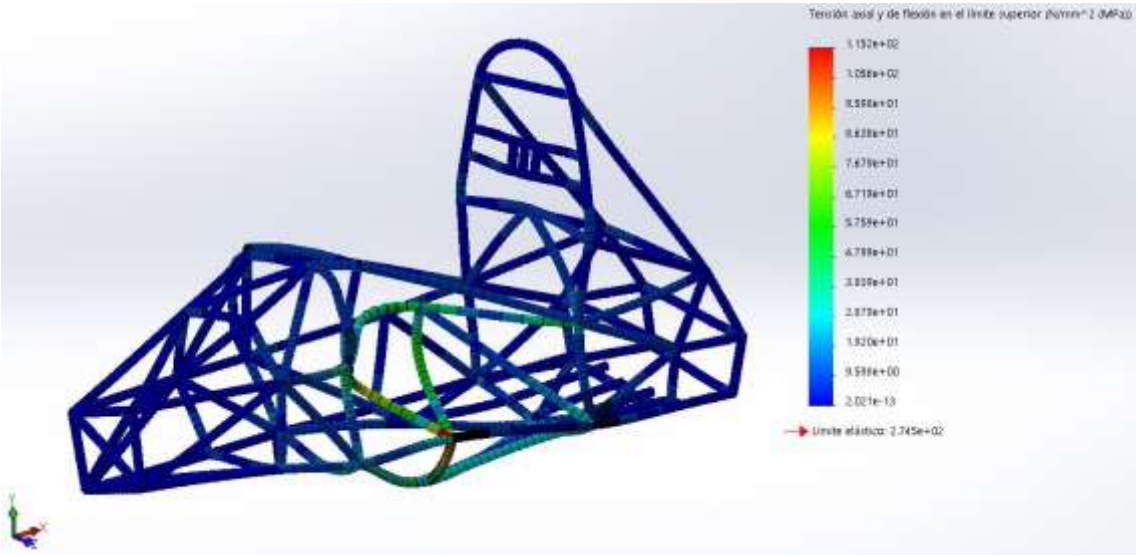


Ilustración 234. Tensiones resultantes zona 2B. Fuente: propia

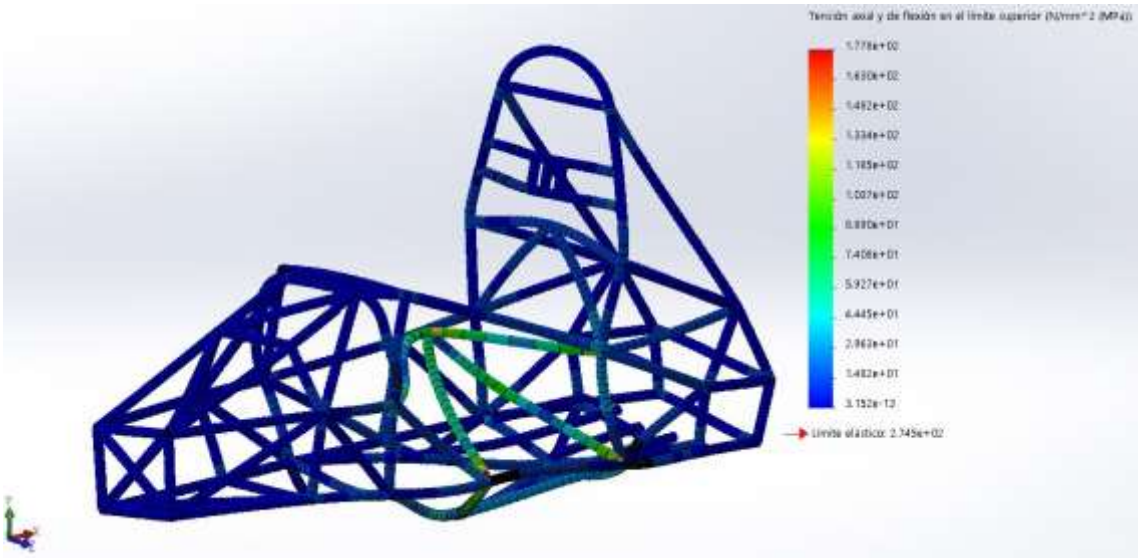


Ilustración 235. Tensiones resultantes zona 3A. Fuente: propia

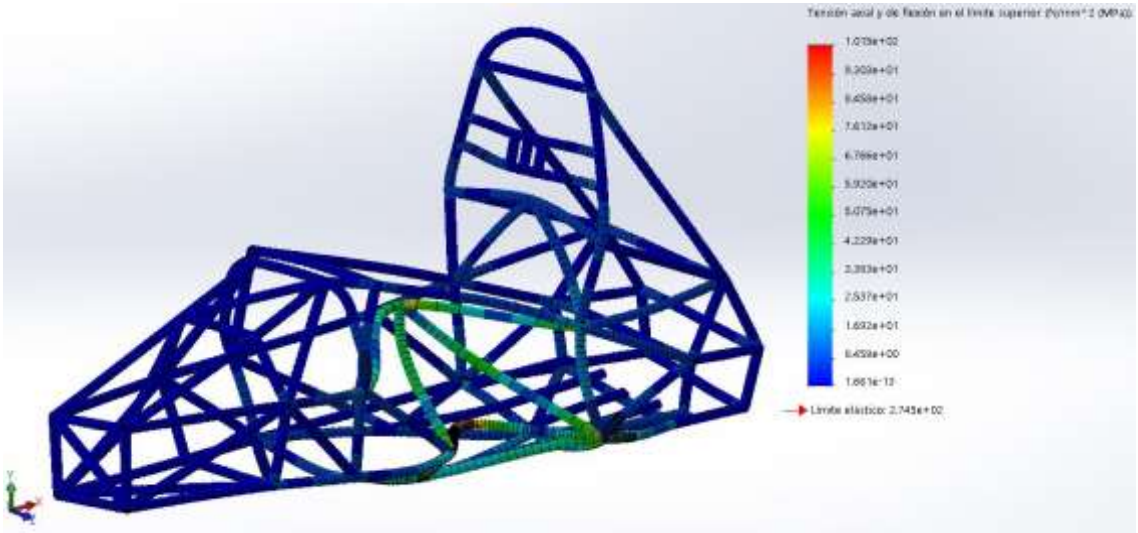


Ilustración 236. Tensiones resultantes zona 3B. Fuente: propia

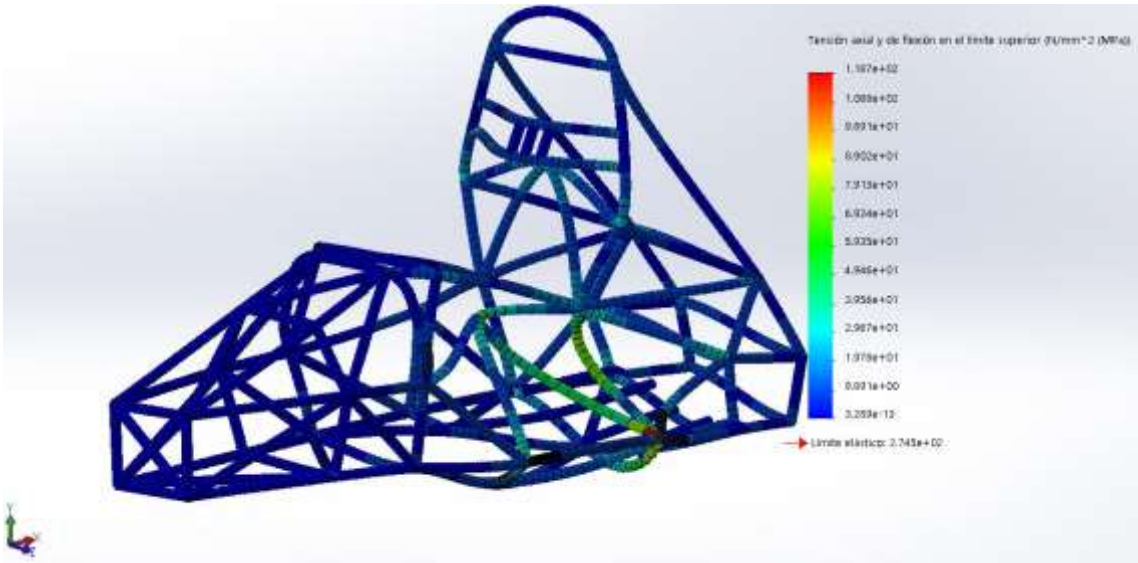


Ilustración 237. Tensiones resultantes zona 4A. Fuente: propia

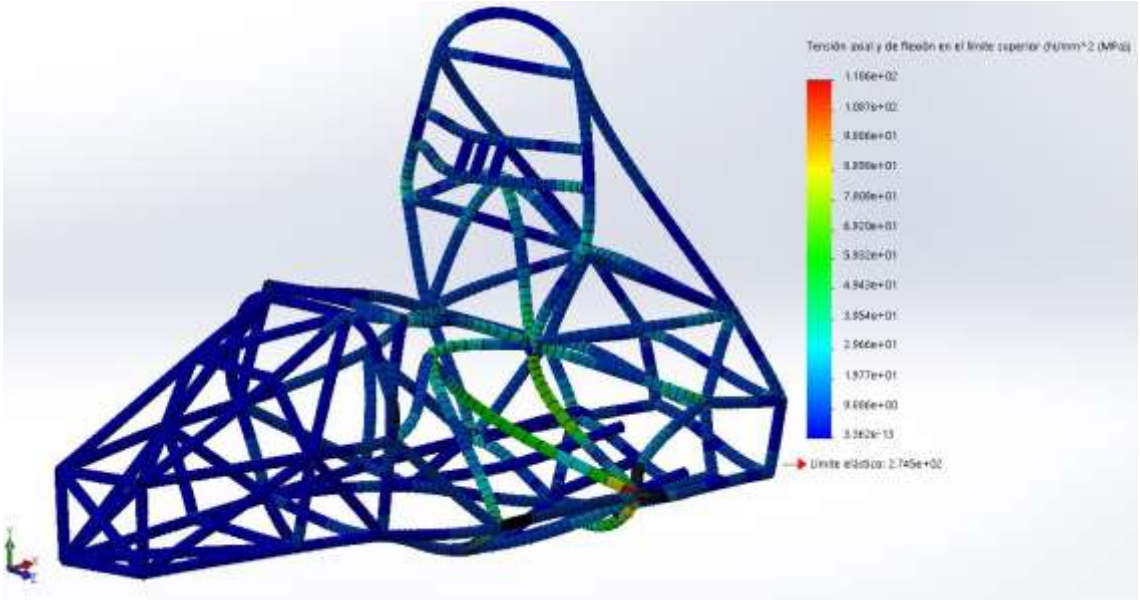


Ilustración 238. Tensiones resultantes zona 4B. Fuente: propia

- Desplazamientos

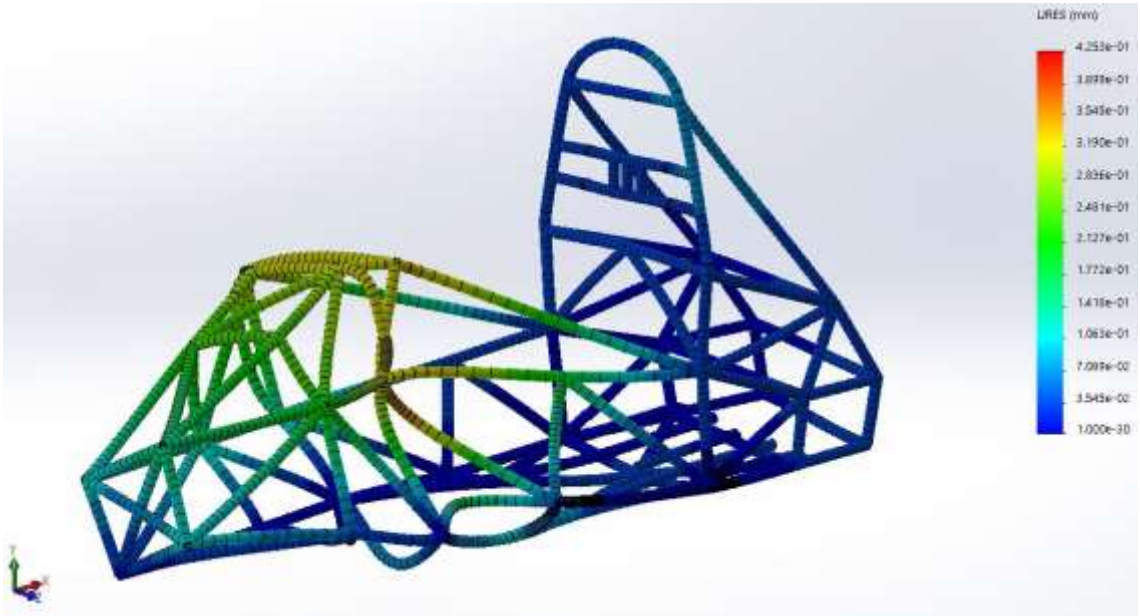


Ilustración 239. Desplazamientos resultantes zona 1A. Fuente: propia

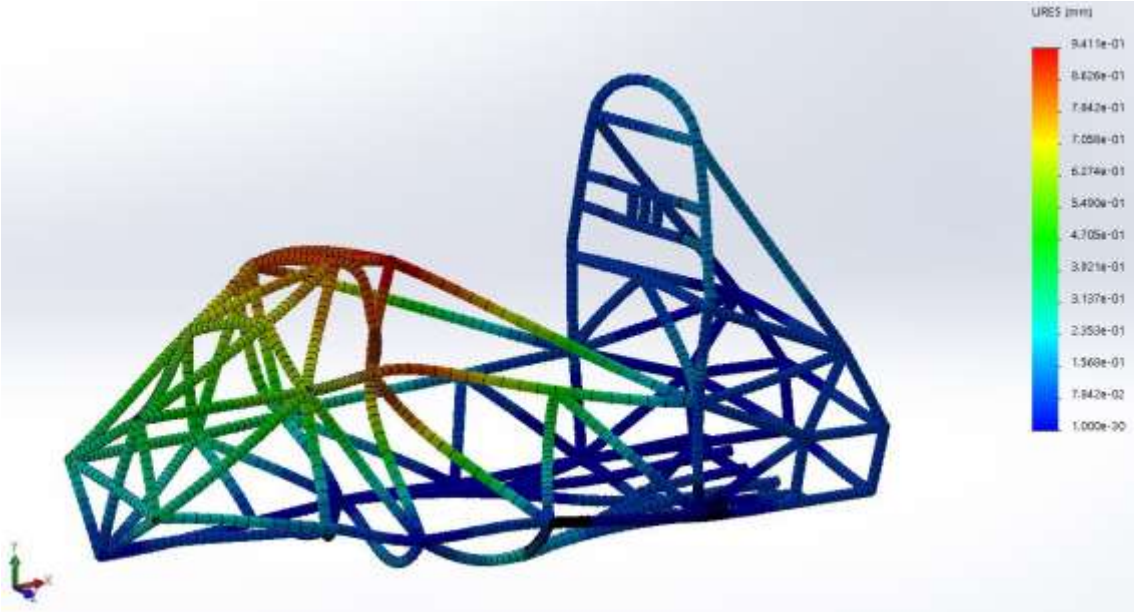


Ilustración 240. Desplazamientos resultantes zona 1B. Fuente: propia

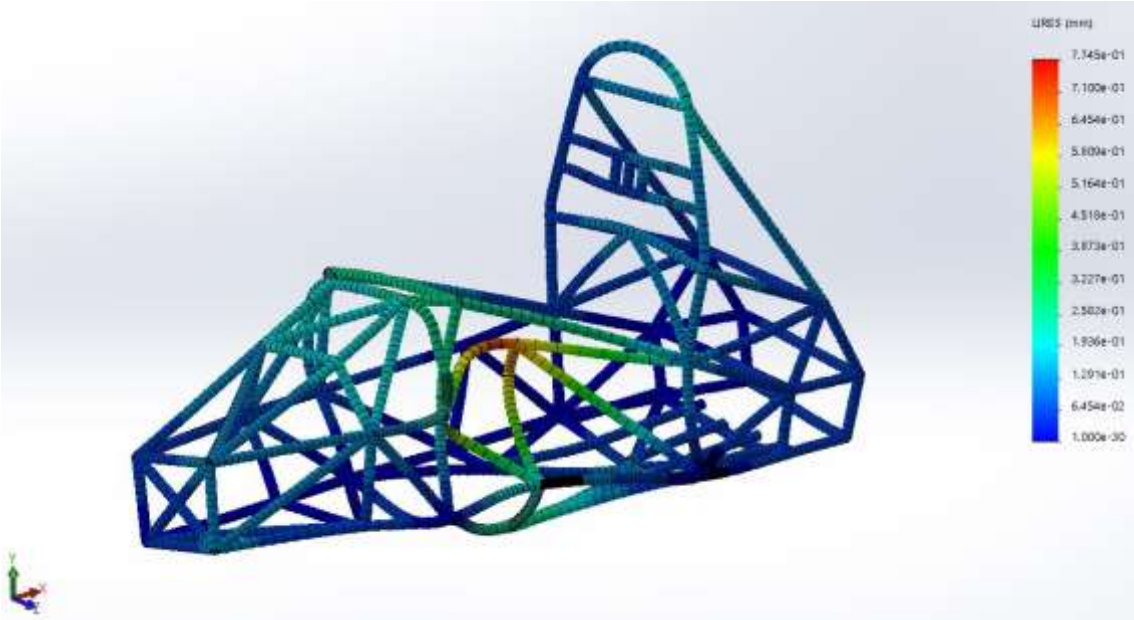


Ilustración 241. Desplazamientos resultantes zona 2A. Fuente: propia

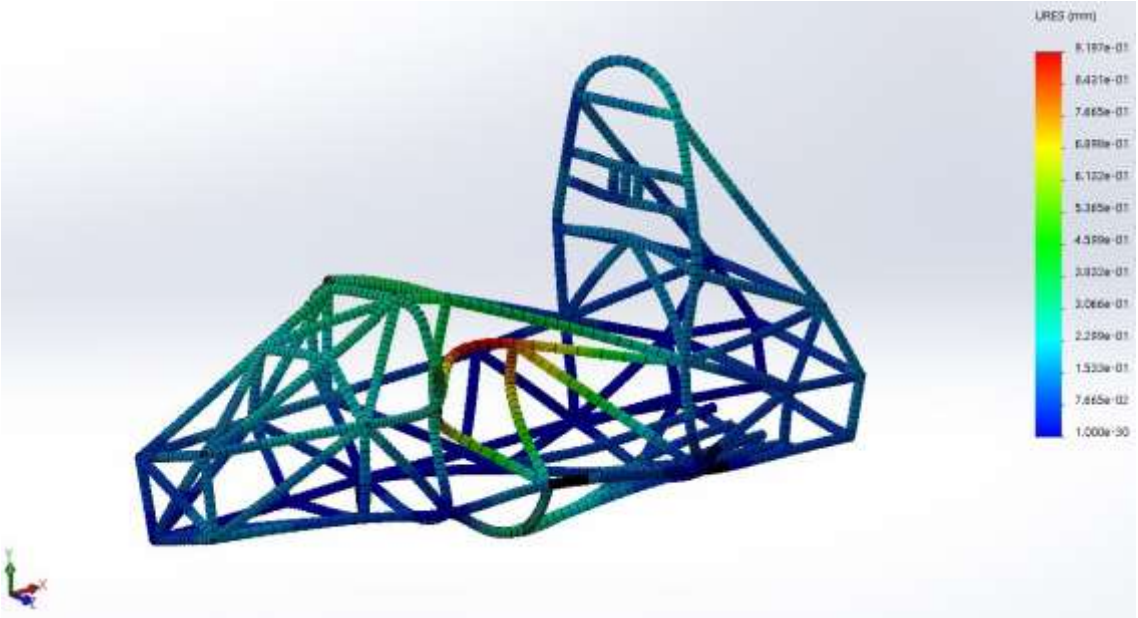


Ilustración 242. Desplazamientos resultantes zona 2B. Fuente: propia

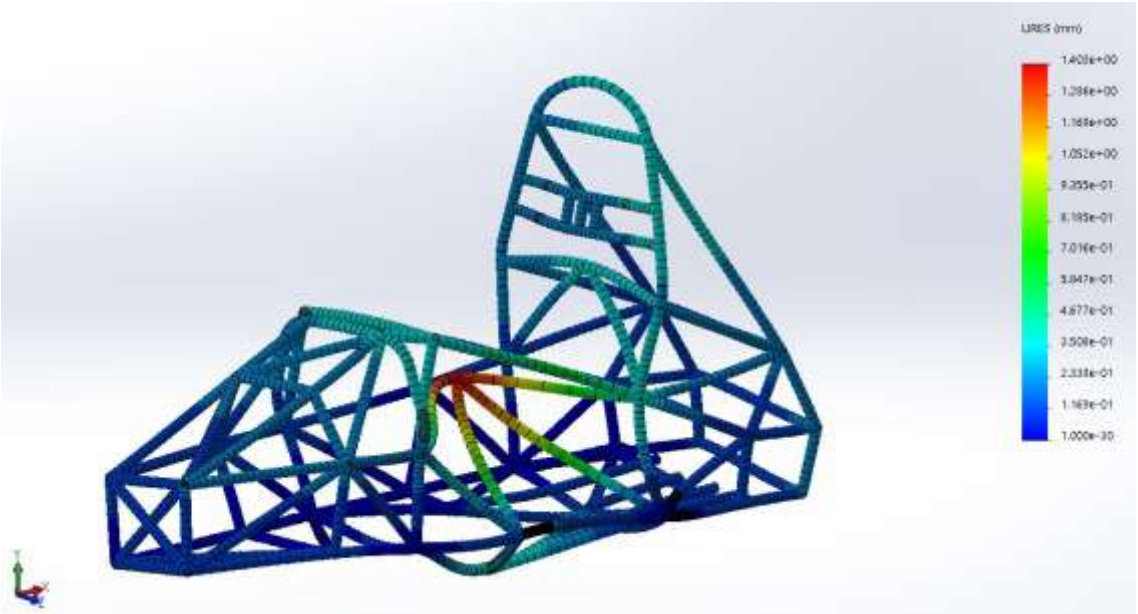


Ilustración 243. Desplazamientos resultantes zona 3A. Fuente: propia

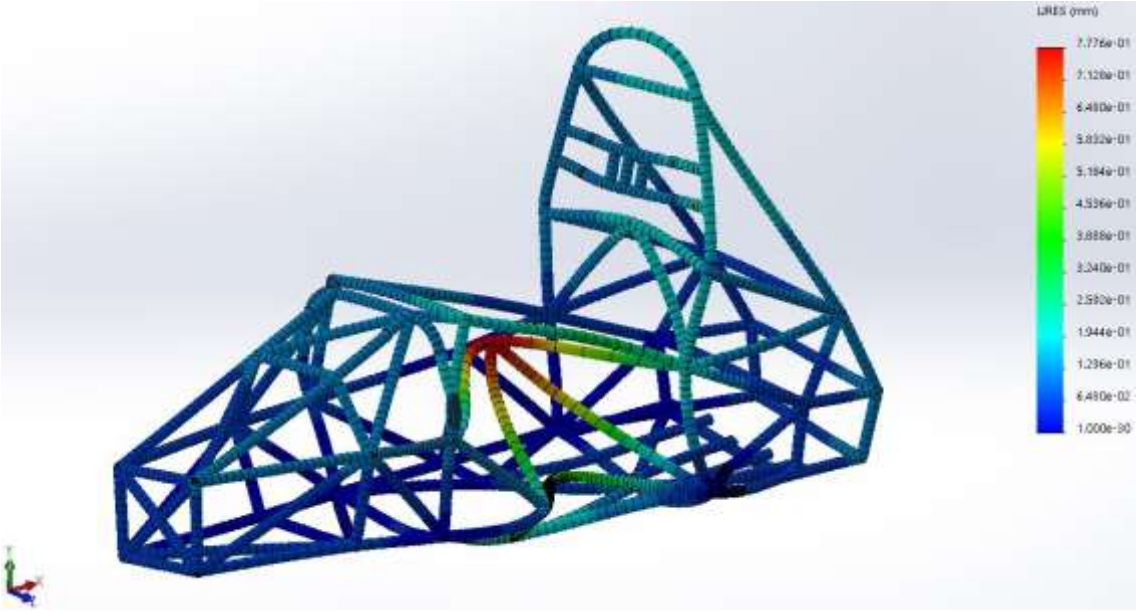


Ilustración 244. Desplazamientos resultantes zona 3B. Fuente: propia

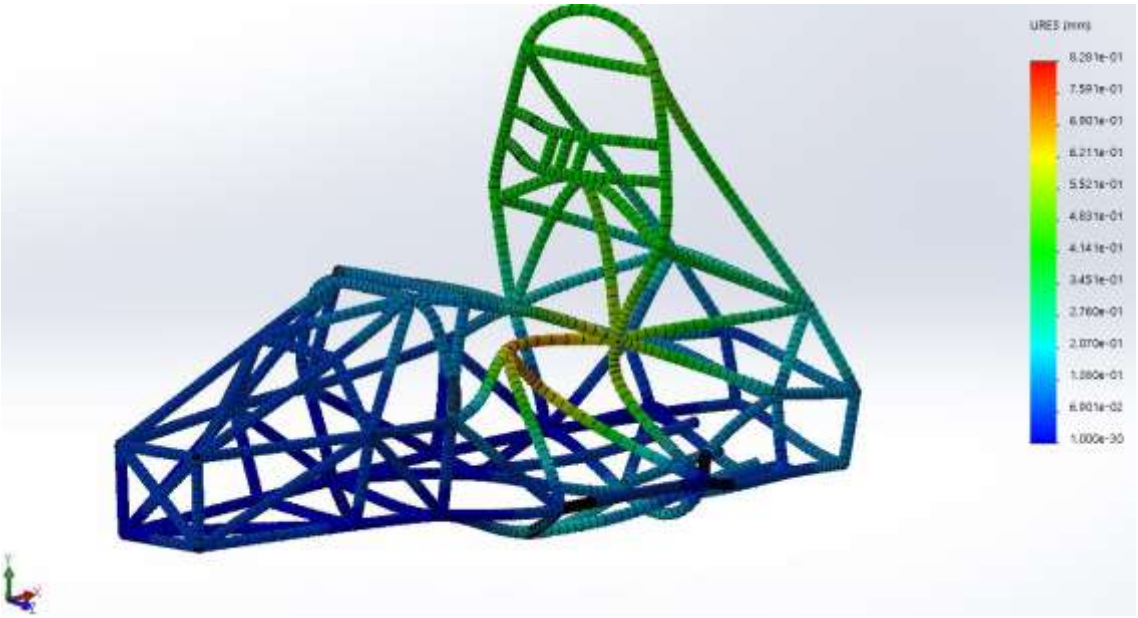


Ilustración 245. Desplazamientos resultantes zona 4A. Fuente: propia

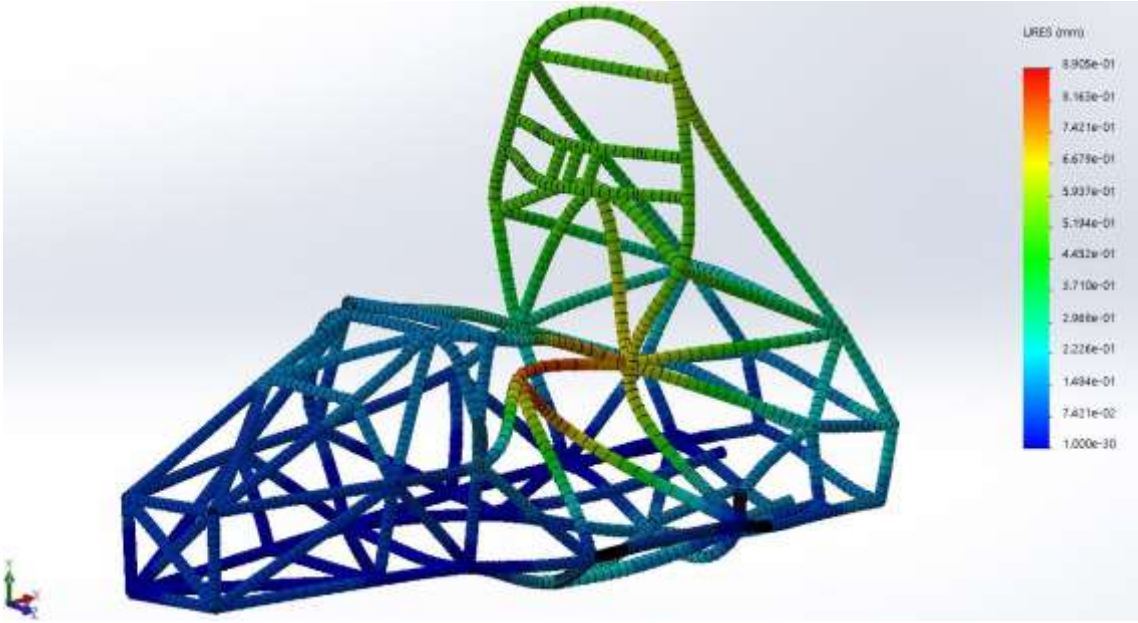


Ilustración 246. Desplazamientos resultantes zona 4B. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 111. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto lateral 1	Vigas	66.32	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.43	mm	25mm
	Vigas	137.8	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.94	mm	25mm
Impacto lateral 2	Vigas	100.3	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.77	mm	25mm
	Vigas	115.2	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.92	mm	25mm
Impacto lateral 3	Vigas	177.8	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.4	mm	25mm
	Vigas	101.5	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.78	mm	25mm
Impacto lateral 4	Vigas	118.7	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.83	mm	25mm
	Vigas	118.6	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.89	mm	25mm

3.7.2.7.4.4. Impacto frontal

- Tensiones

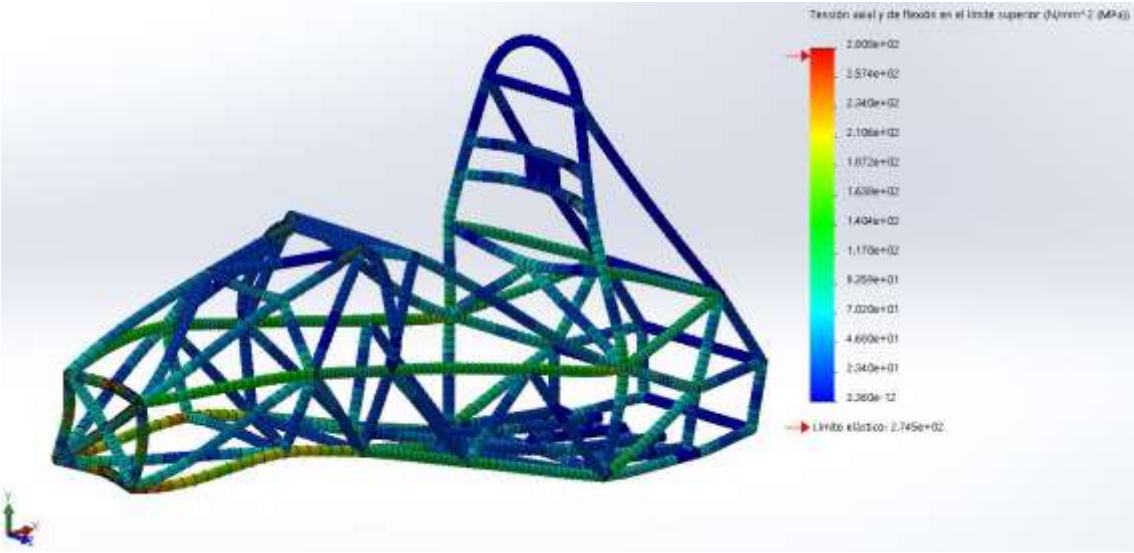


Ilustración 247. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

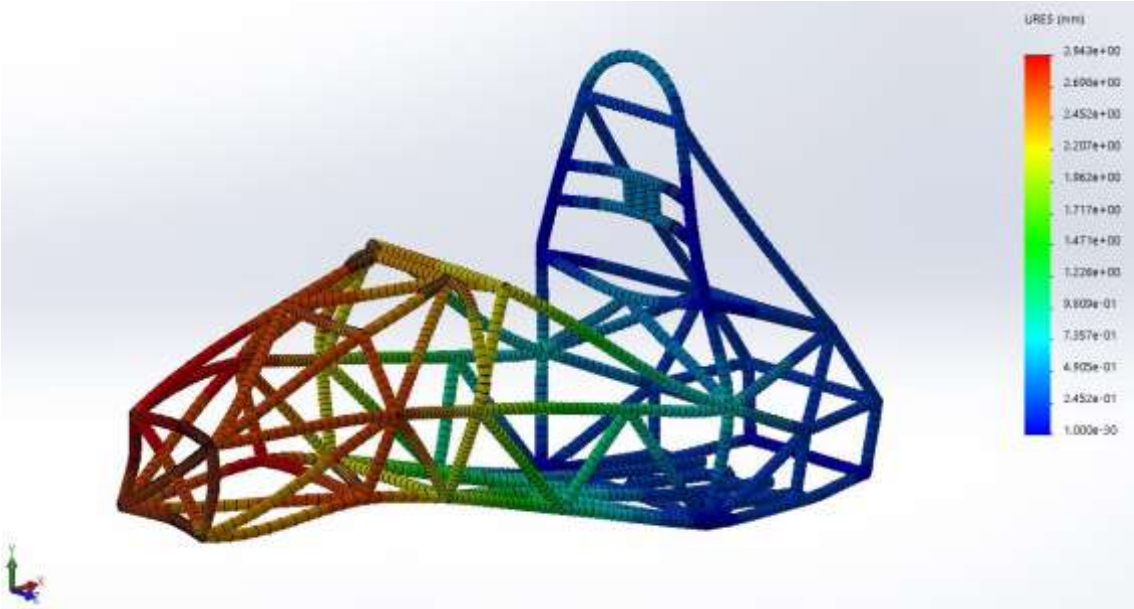


Ilustración 248. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 112. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto lateral	Vigas	280.8	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	2.9	mm	25mm

3.7.2.7.4.5. Anclajes cinturón de hombros

- Tensiones

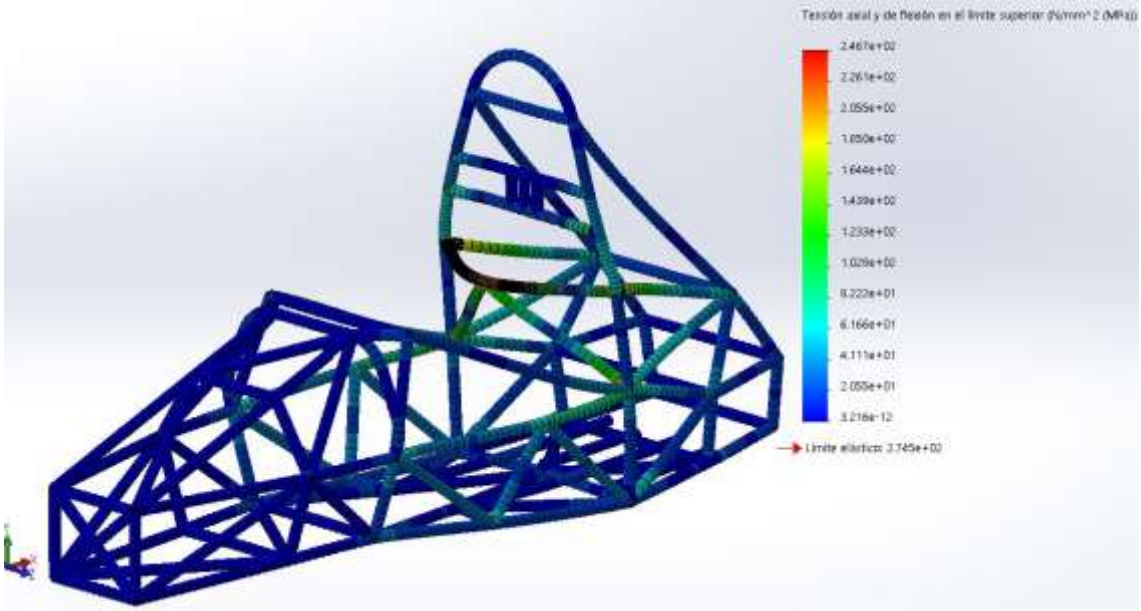


Ilustración 249. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

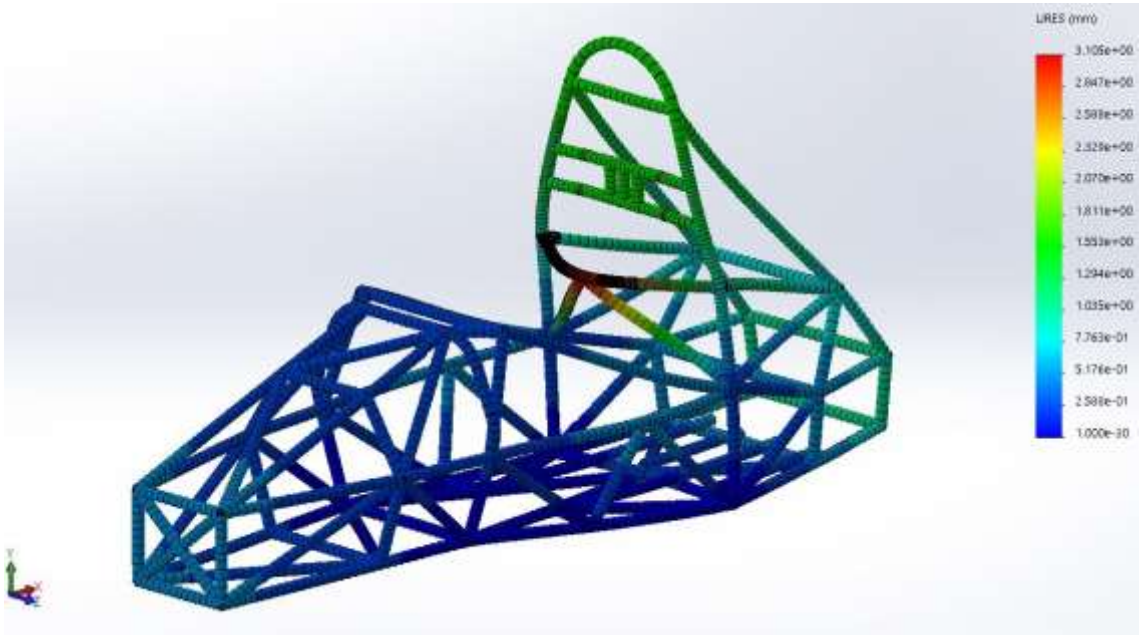


Ilustración 250. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 113. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturón hombros	Vigas	246.7	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	3.1	mm	25mm

3.7.2.7.4.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino

- Tensiones

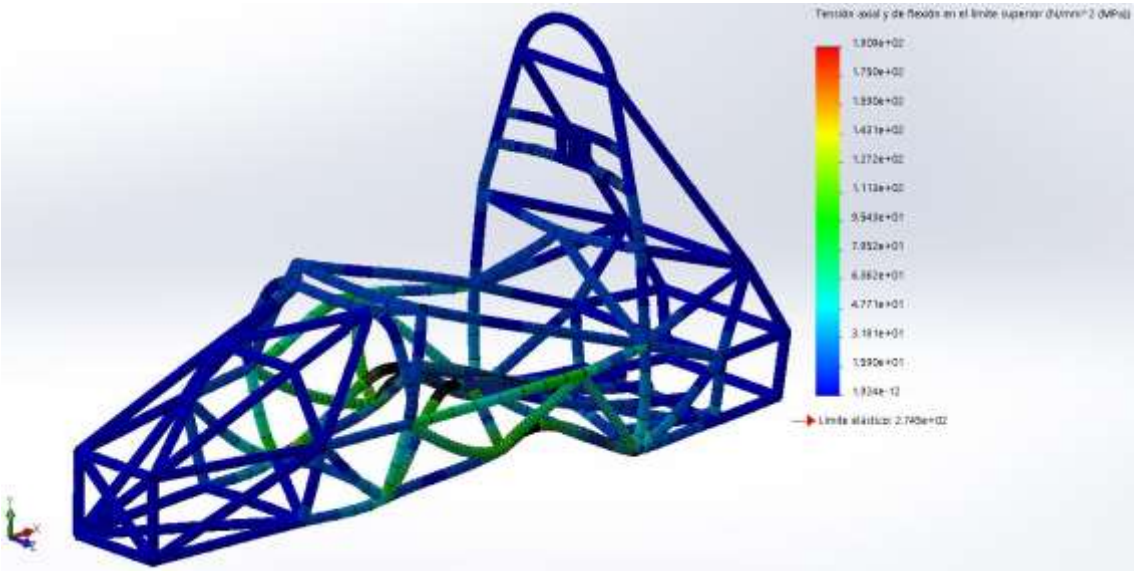


Ilustración 251. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

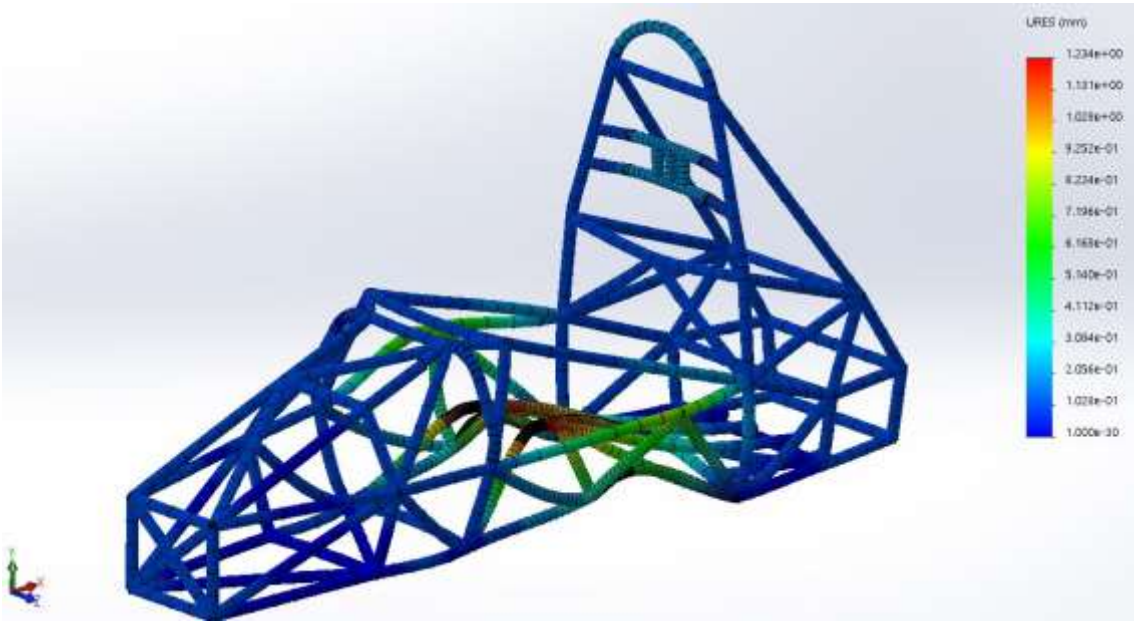


Ilustración 252. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 114. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	190.9	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.2	mm	25mm

3.7.2.7.4.7. Impacto frontolateral

- Tensiones

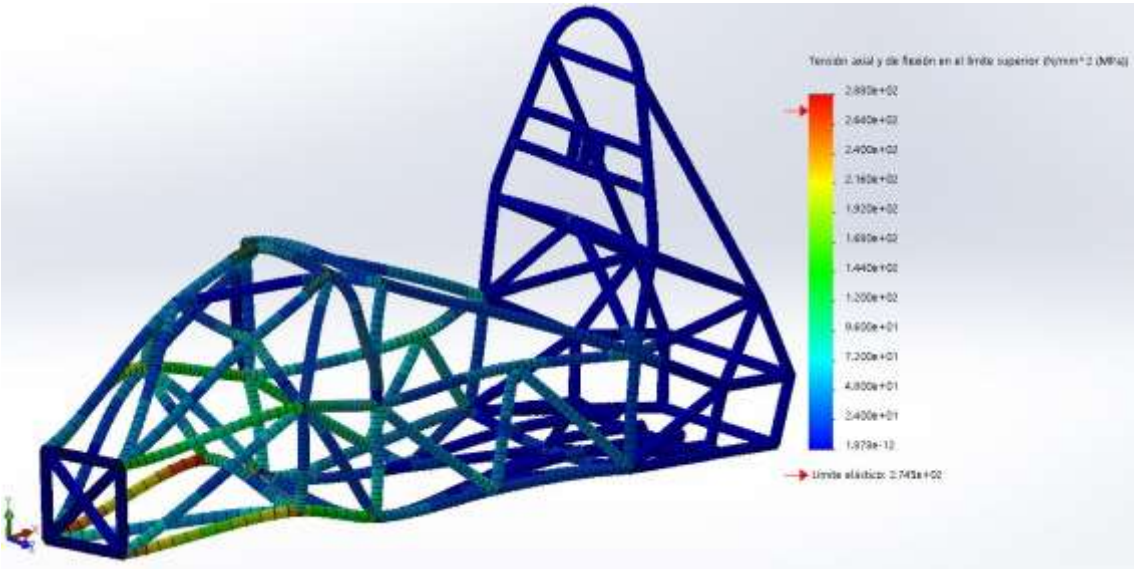


Ilustración 253. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

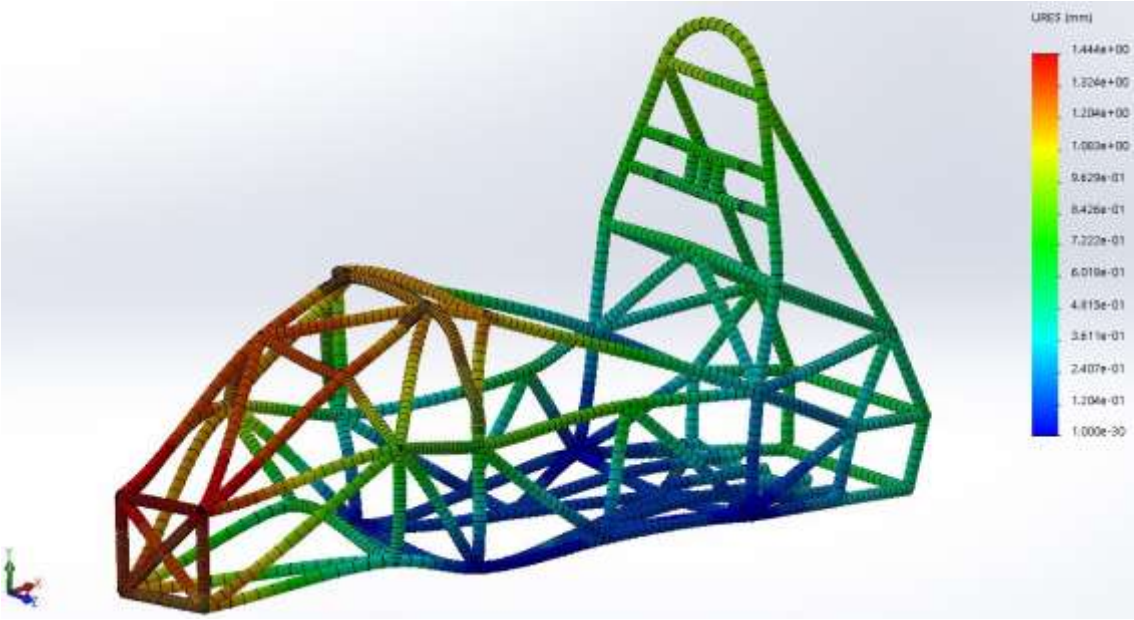


Ilustración 254. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 115. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto frontolateral	Vigas	288.0	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.44	mm	25mm

3.7.2.7.4.8. Anclajes caja de baterías

- Tensiones

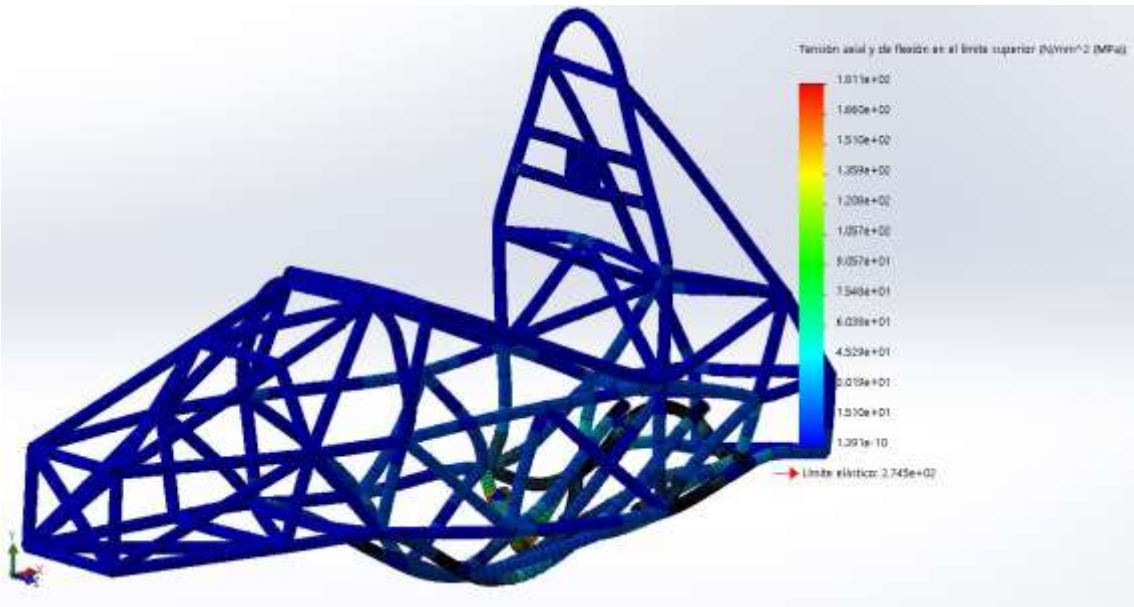


Ilustración 255. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

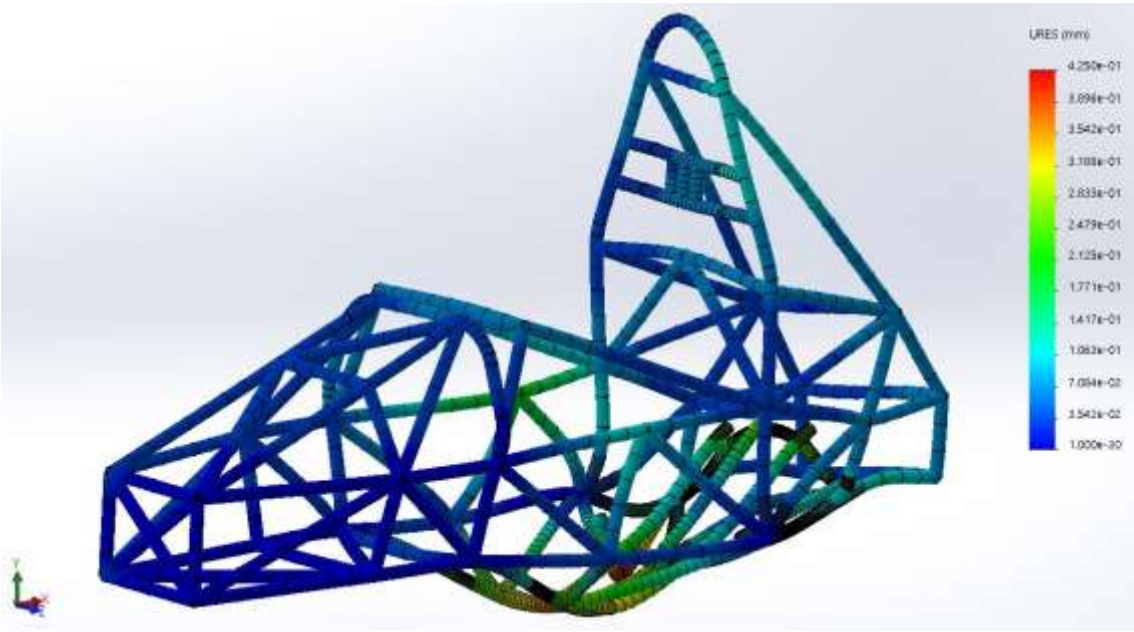


Ilustración 256. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 116. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes caja de baterías	Vigas	181.1	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.42	mm	25mm

3.7.2.7.4.9. Reposacabezas

- Tensiones

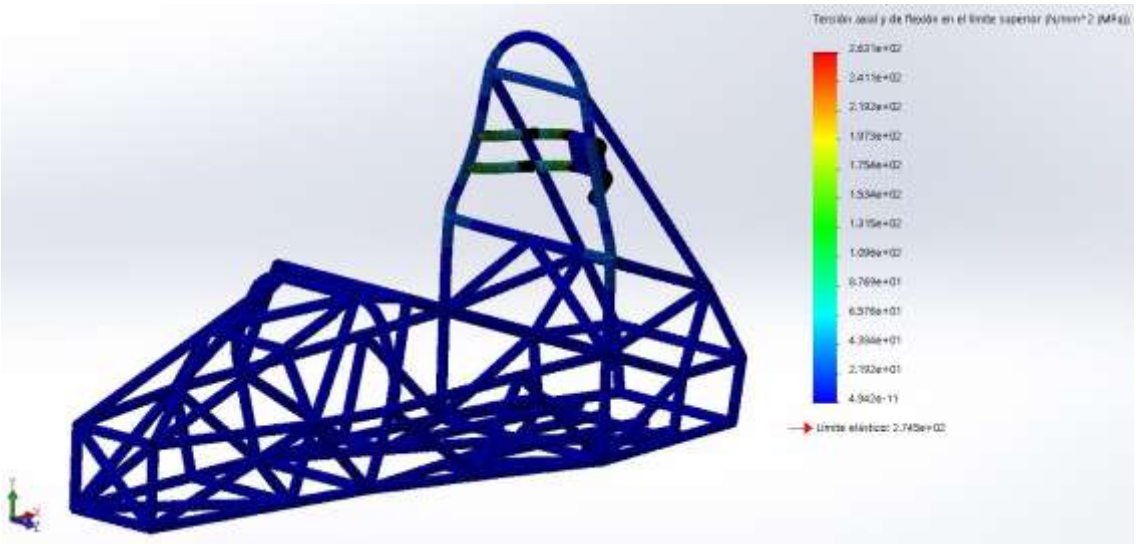


Ilustración 257. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

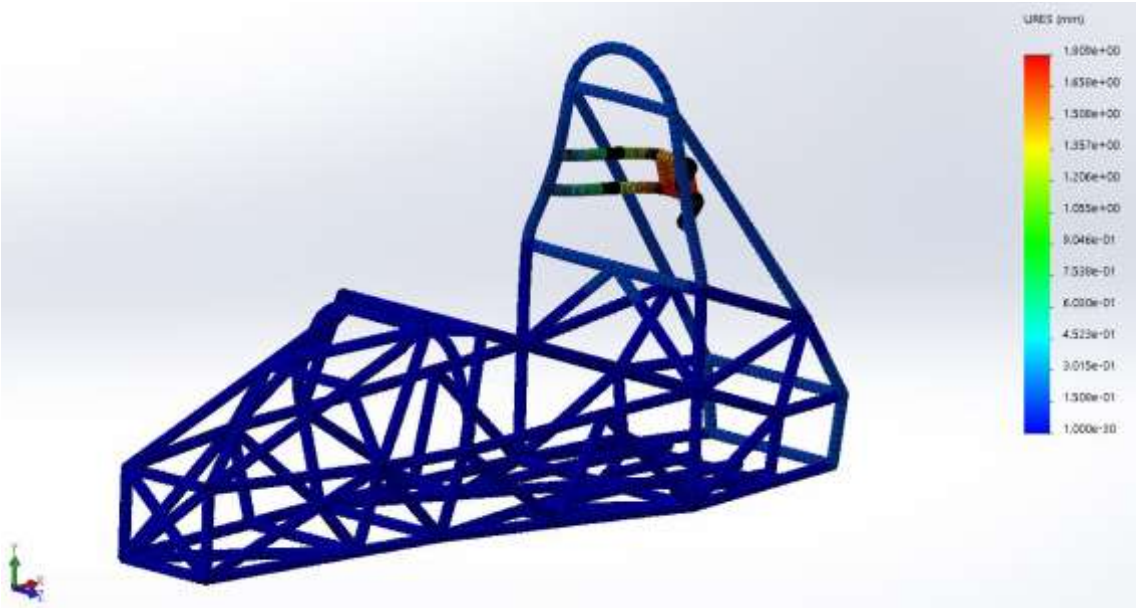


Ilustración 258. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 117. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Reposacabezas	Vigas	263.1	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.81	mm	25mm

3.7.2.7.4.10. Comparación resultados

Tabla 118. Tabla resumen modificación. Fuente: propia

Estudio	Comparación resultados			
	Elemento	Iteración 4	Modificación extra	Unid.
Aro principal	Vigas	248.4	248.3	MPa
	Desplaz.	4.53	4.1	mm
Aro frontal	Vigas	185.9	144.6	MPa
	Desplaz.	2.39	2.43	mm
Impacto lateral 1	Vigas	50.1	66.32	MPa
	Desplaz.	0.21	0.43	mm
	Vigas	50.1	137.8	MPa
	Desplaz.	0.21	0.94	mm
Impacto lateral 2	Vigas	50.1	100.3	MPa
	Desplaz.	0.21	0.77	mm
	Vigas	50.1	115.2	MPa
	Desplaz.	0.21	0.92	mm
Impacto lateral 3	Vigas	50.1	177.8	MPa
	Desplaz.	0.21	1.4	mm
	Vigas	50.1	101.5	MPa
	Desplaz.	0.21	0.78	mm
Impacto lateral 4	Vigas	50.1	118.7	MPa
	Desplaz.	0.21	0.83	mm
	Vigas	50.1	118.6	MPa
	Desplaz.	0.21	0.89	mm
Impacto frontal	Vigas	274.5	280.8	MPa
	Desplaz.	3.44	2.9	mm
Anclajes cinturón de hombros	Vigas	243.9	246.7	MPa
	Desplaz.	3.37	3.1	mm
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	251.2	190.9	MPa
	Desplaz.	1.6	1.2	mm
Impacto frontolateral	Vigas	265.8	288.0	MPa
	Desplaz.	9.41	1.44	mm
Anclajes caja de baterías	Vigas	173	181.1	MPa
	Desplaz.	0.38	0.42	mm
Reposacabezas	Vigas	262.5	263.1	MPa
	Desplaz.	1.84	1.81	mm

Se puede comprobar que apenas existe diferencias entre ambos modelos en cuanto a tensiones obtenidas, salvo en el impacto lateral el cual varia ya que su condición de contorno ha variado. Aun así, estas últimas simulaciones muestran una mejoría en cuanto a los desplazamientos en algunas pruebas, lo cual hace que este modelo sea el mejor de los obtenidos anteriormente. Por tanto, este será el modelo final del chasis del vehículo siguiendo la teoría de vigas. En la siguiente imagen, se vuelve a mostrar este modelo.

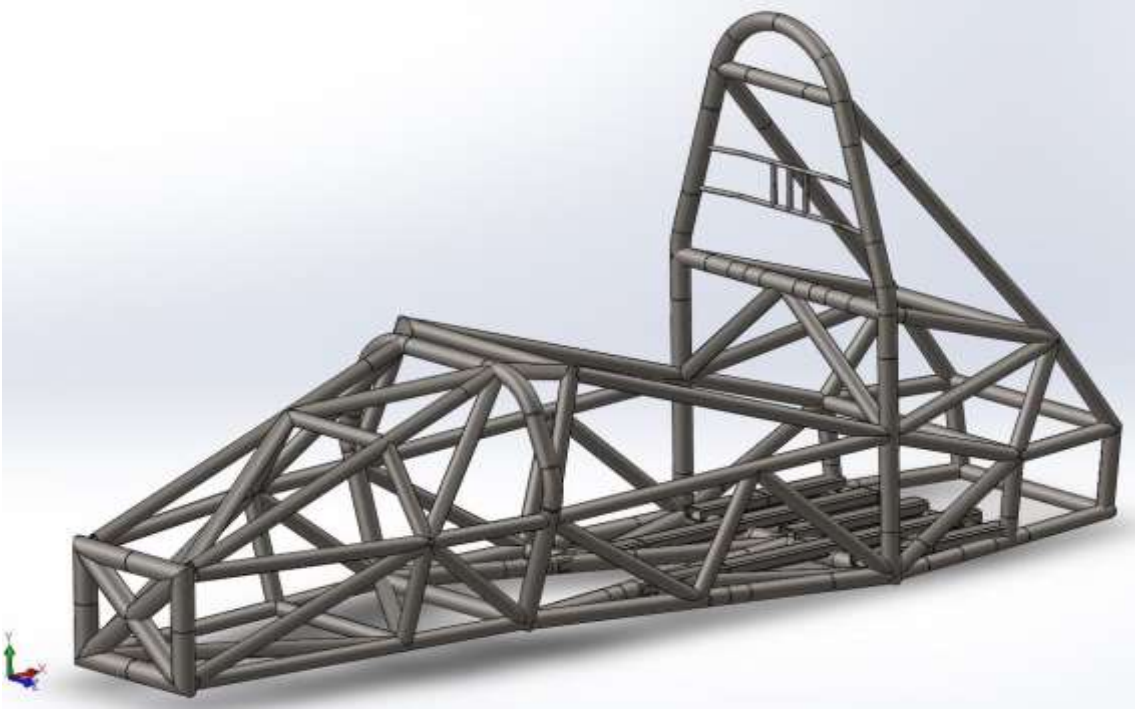


Ilustración 259. Vista chasis con modificaciones. Fuente: propia

Esta estructura posee las siguientes características:

- Masa: 83.41 kg
- Longitud: 2410mm
- Altura máxima: 1240mm
- Anchura máxima: 690mm
- Posición CG:

Ilustración 260. Vista lateral con ubicación del CG. Fuente: propia

Se puede comprobar que el centro de gravedad del chasis está prácticamente centrado con respecto a la ubicación de las ruedas.

Tras esto, el siguiente paso es ahora realizar el estudio de algunas uniones que puedan existir concentraciones de tensiones que, por la teoría de viga, no es posible observar. El chasis de partida en este caso, es la solución del de teoría de vigas.

3.7.2.8. Cuarta Iteración (con sólidos)

En esta iteración se emplea el mismo chasis que resulta de la cuarta iteración con las modificaciones realizadas, a la que se le modelan algunas uniones como sólidos para estudiarlas detalladamente.

3.7.2.8.1. Aro principal

- Tensiones
  - Sólidos

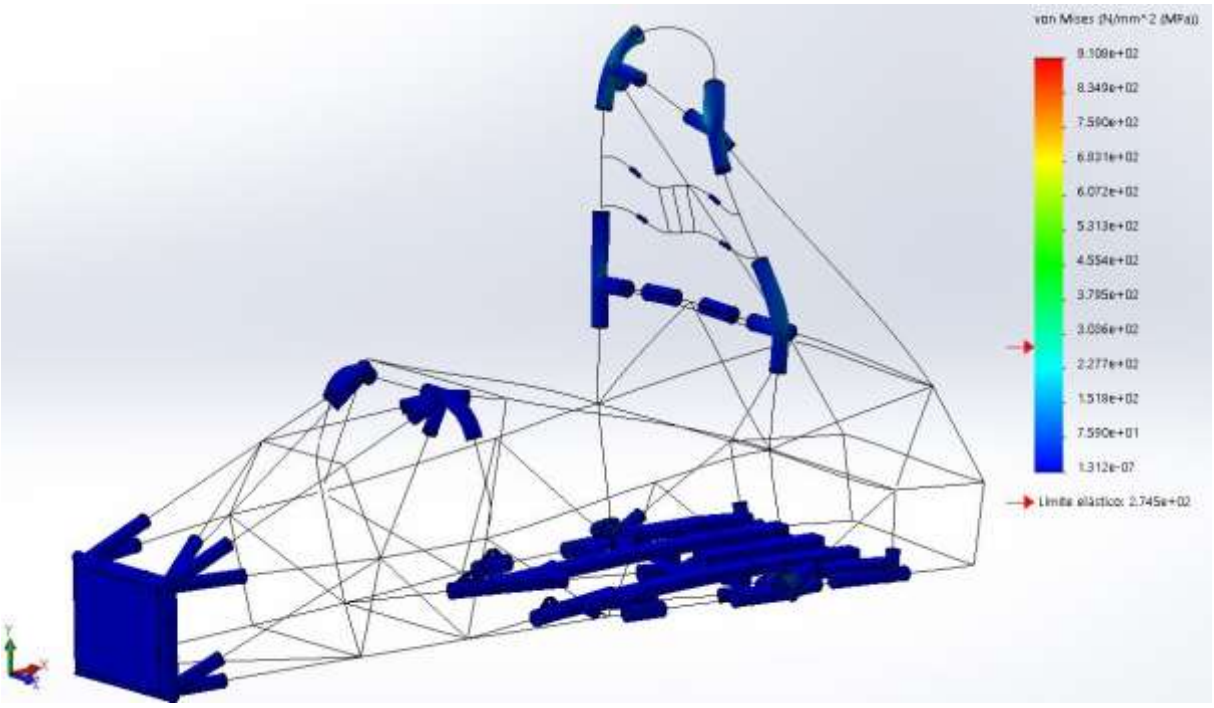


Ilustración 261. Tensiones resultantes sólidos. Fuente: propia

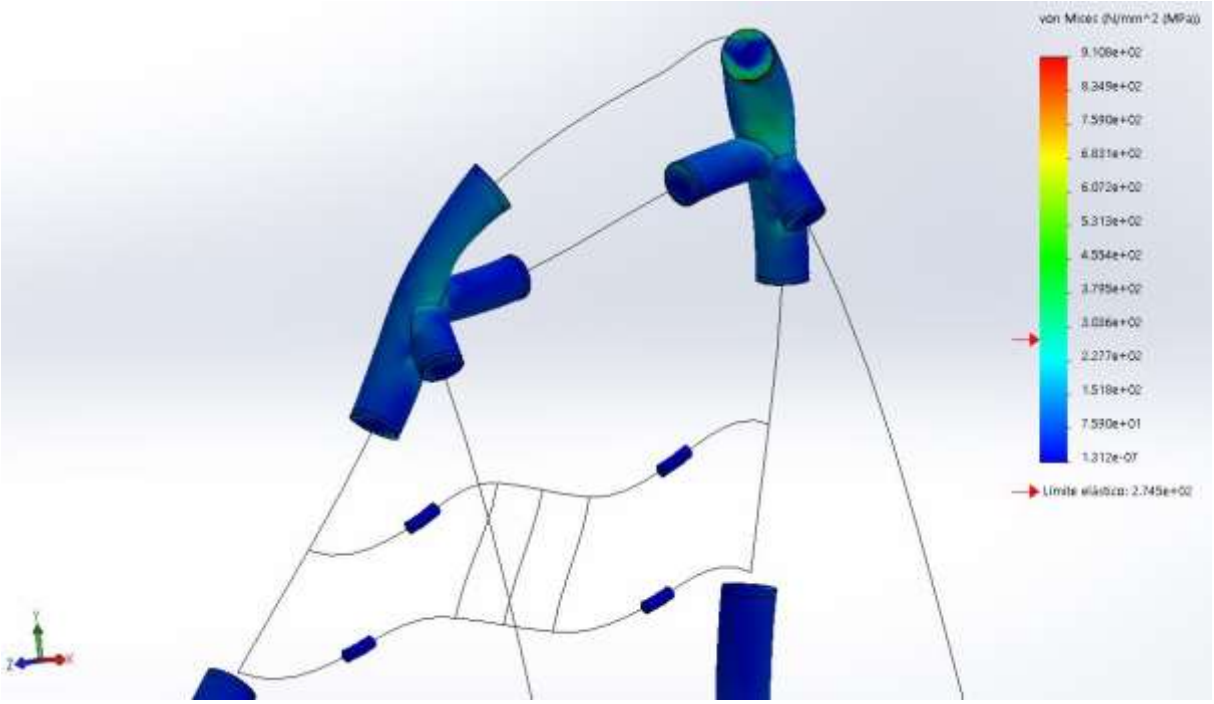


Ilustración 262. Detalle tensiones resultantes sólidos. Fuente: propia

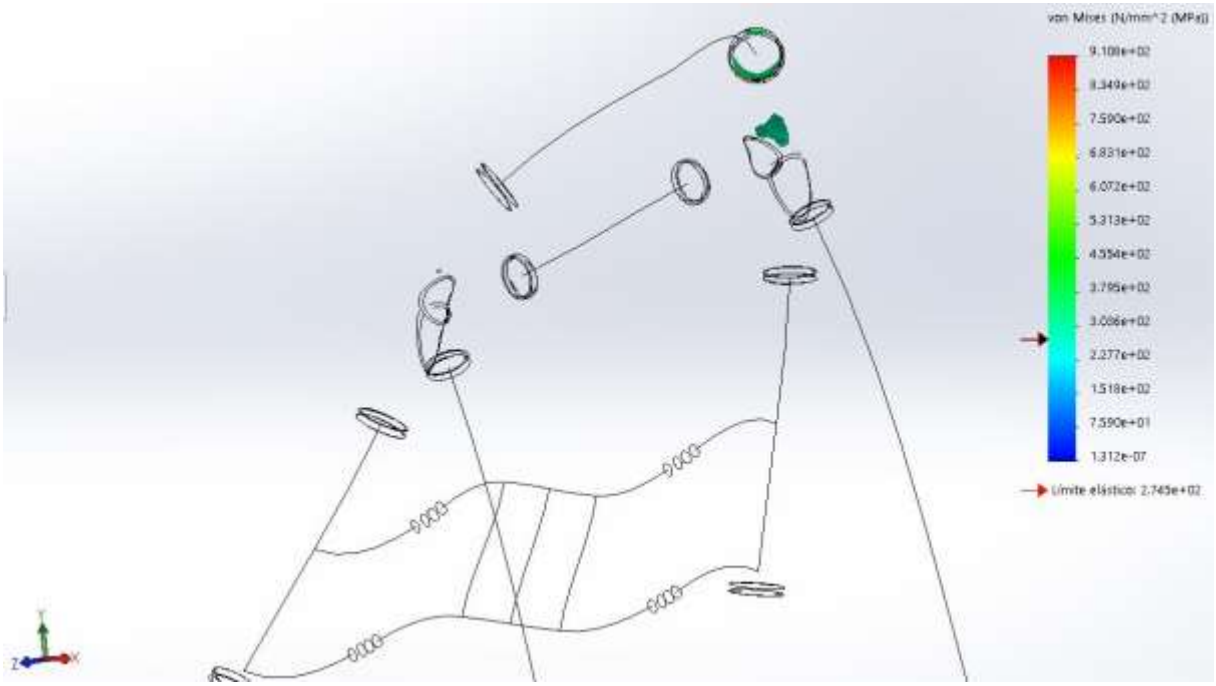


Ilustración 263. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes. Fuente: propia

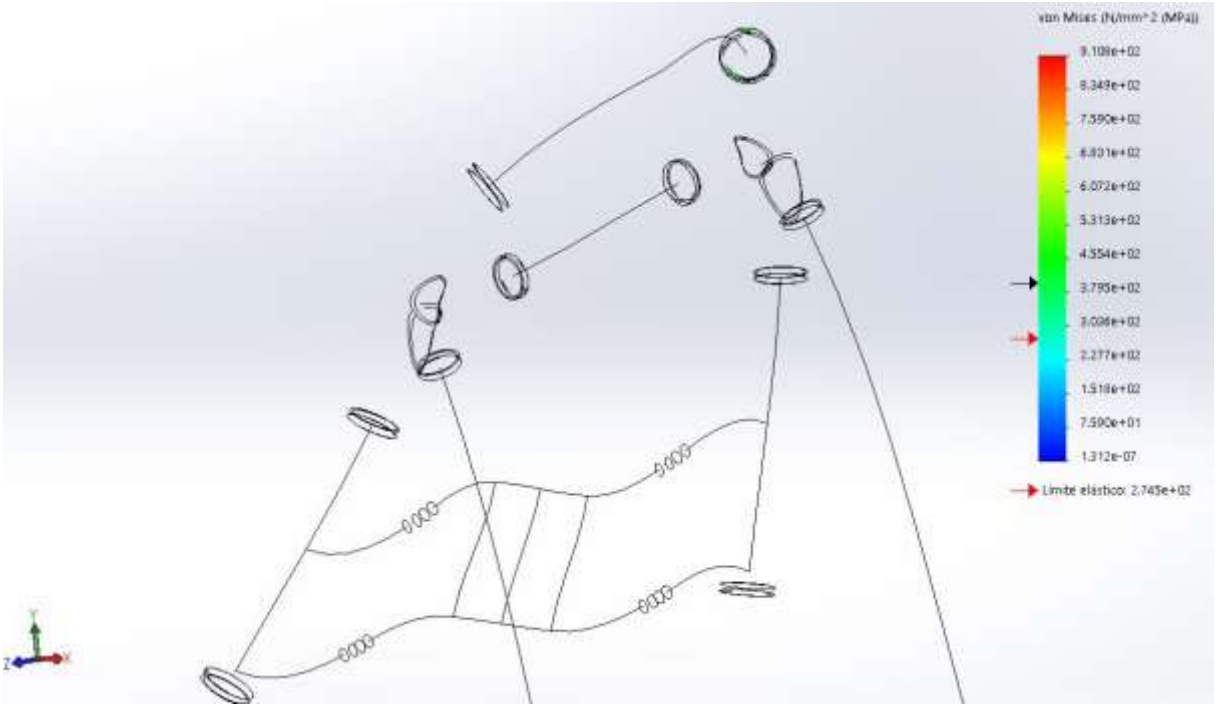


Ilustración 264. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes. Fuente: propia

- Vigas

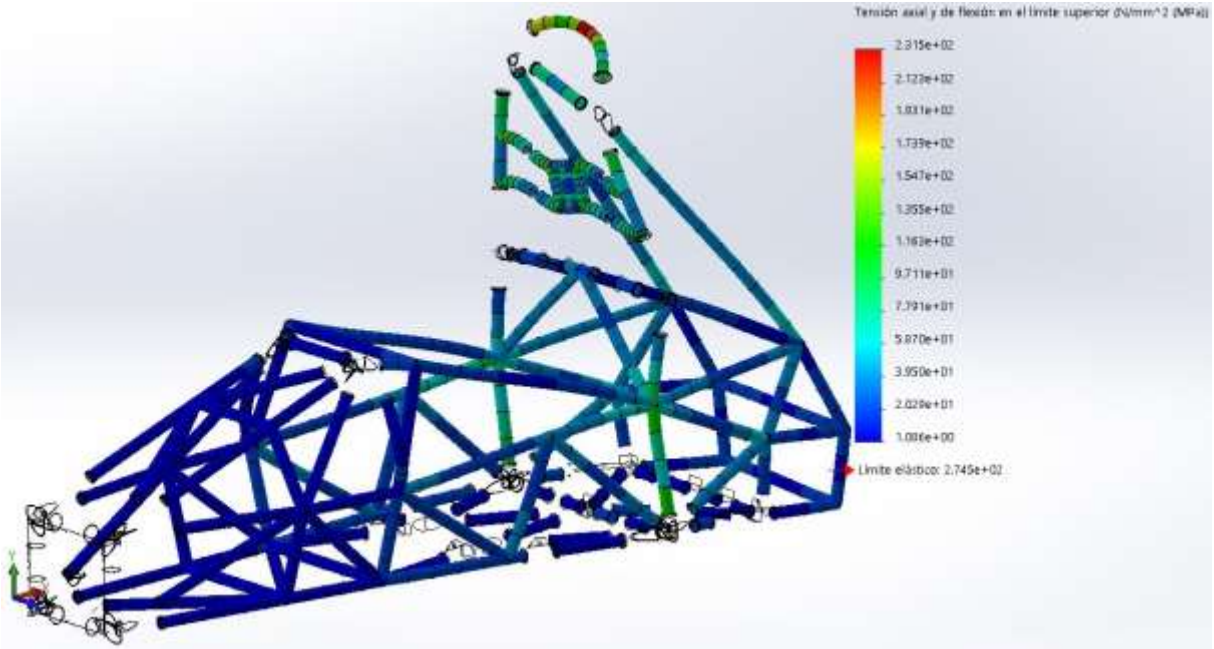


Ilustración 265. Tensiones resultantes vigas. Fuente: propia

- Desplazamientos

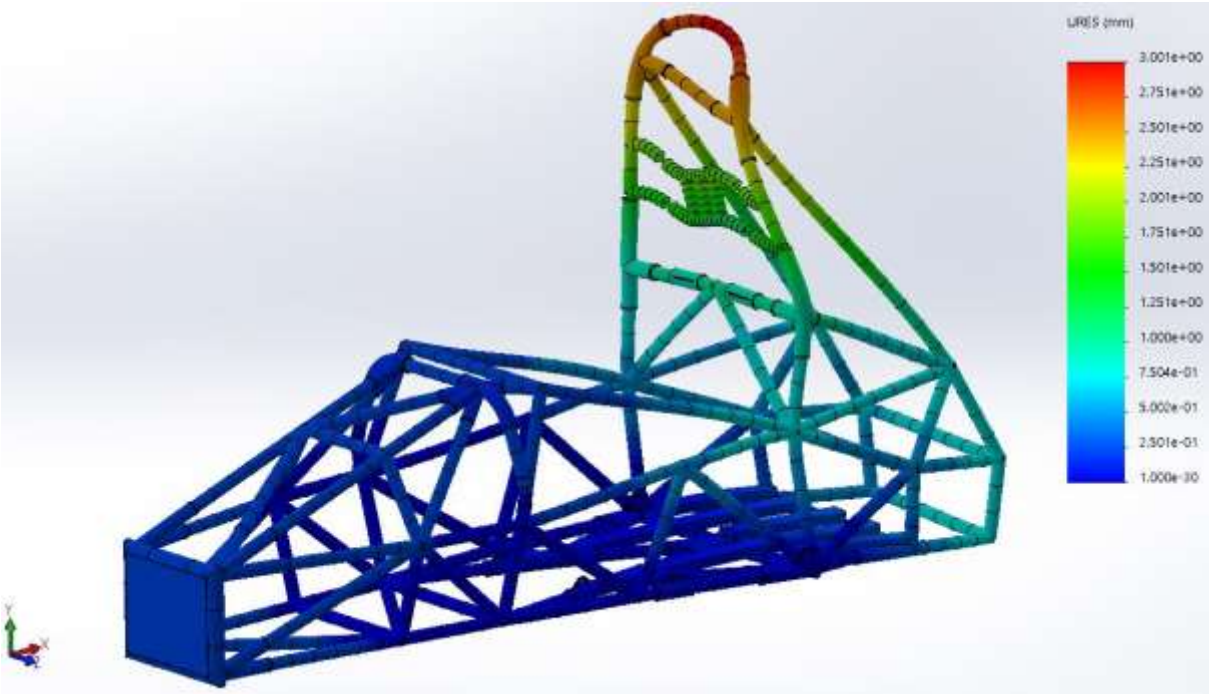


Ilustración 266. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 119. Tabla resumen. Fuente: propia

La siguiente tabla resume los resultados obtenidos en este estudio:

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro principal	Solidos	600	MPa	274.5 MPa
	Vigas	231.5	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	3	mm	25mm

Se puede comprobar que se supera el límite elástico en una región muy concreta. Por lo tanto, habrá que disponer de rigidizadores.

3.7.2.8.2. Aro frontal

- Tensiones
  - Sólidos

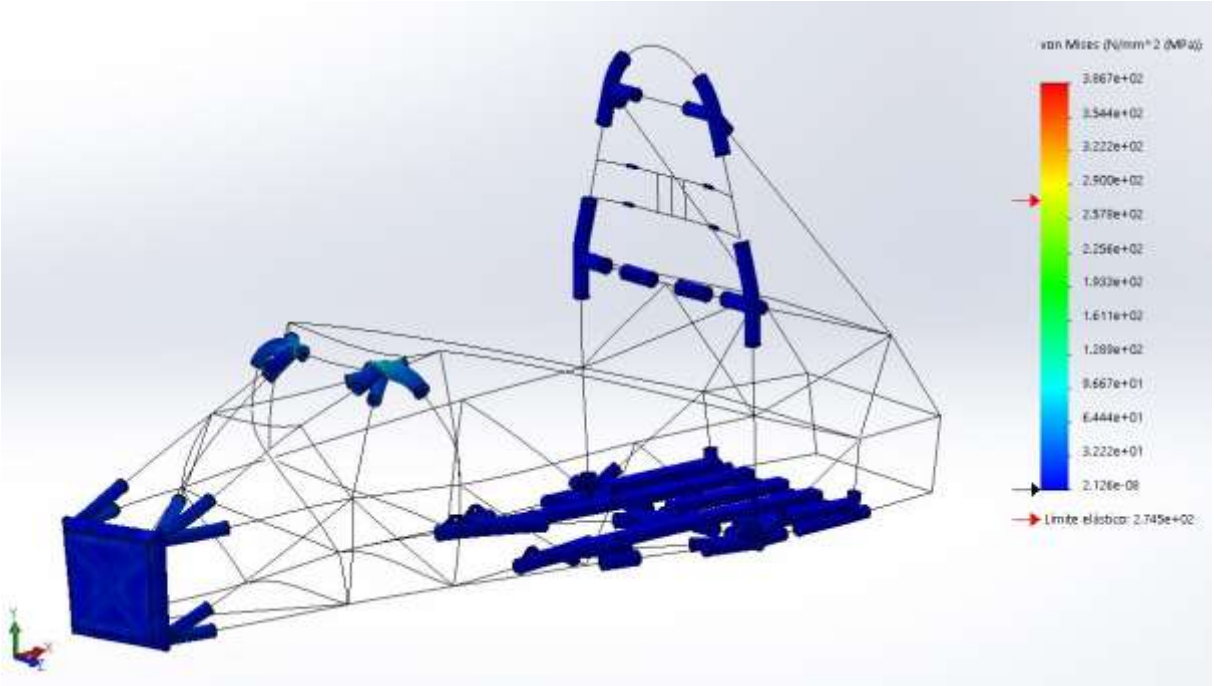


Ilustración 267. Tensiones resultantes sólidos. Fuente: propia

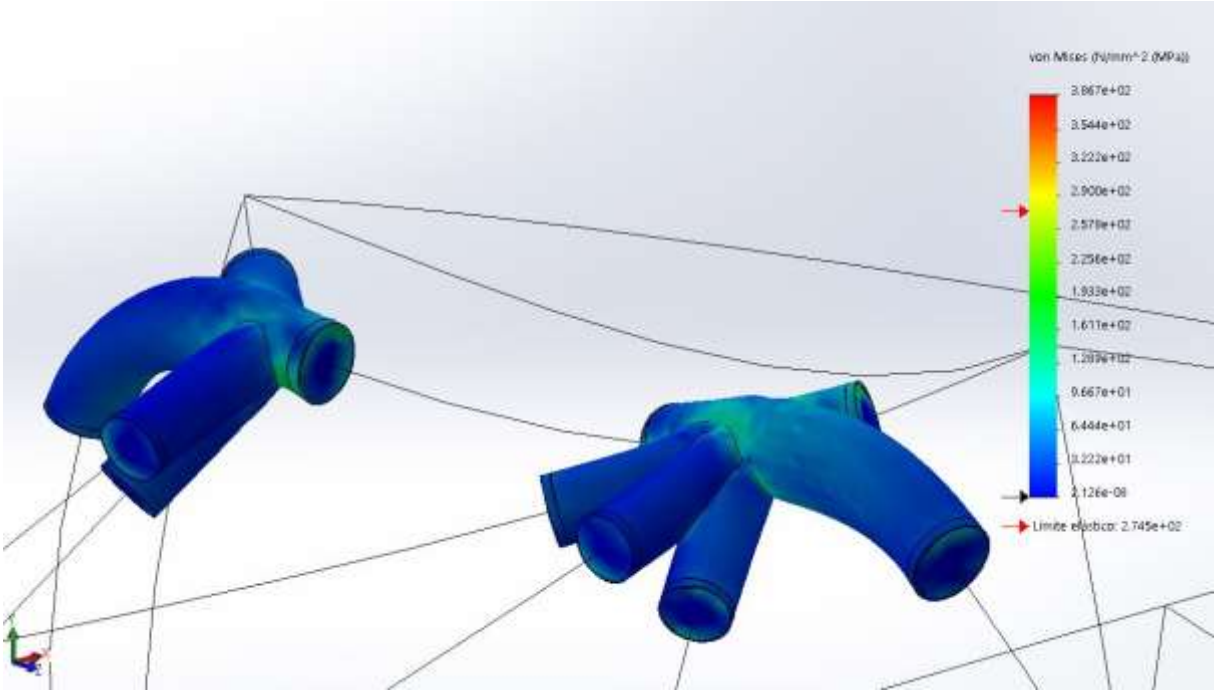


Ilustración 268. Detalle tensiones resultantes sólidos. Fuente: propia

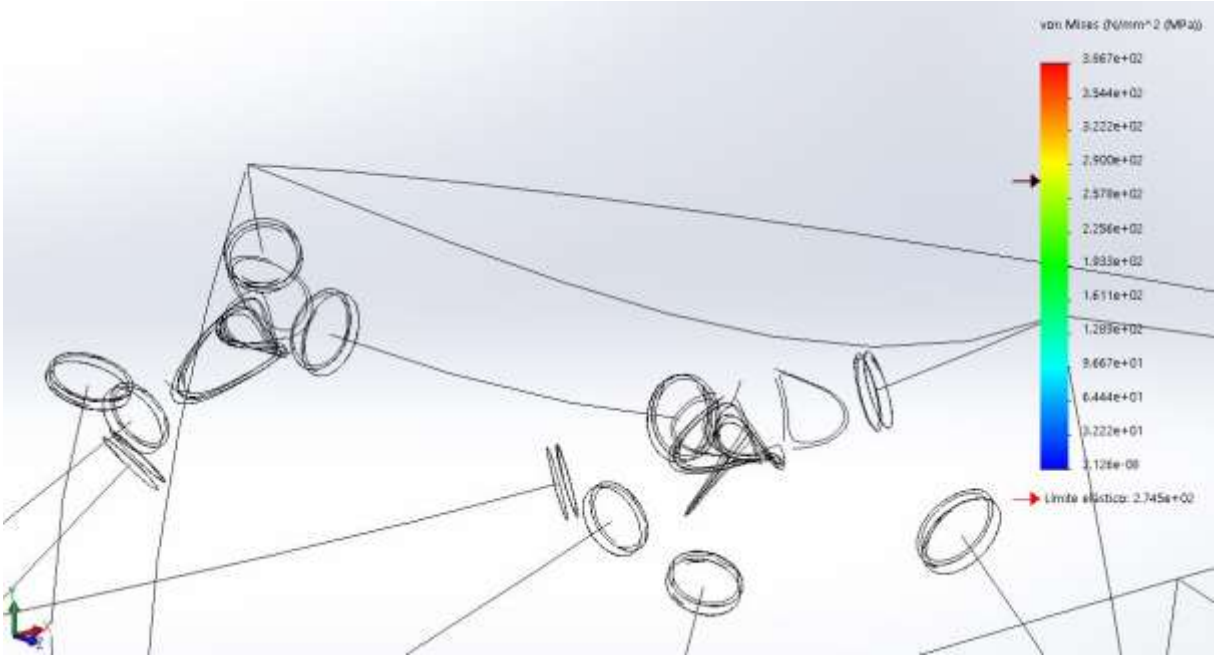


Ilustración 269. Detalle Tensiones isosuperficiales resultantes. Fuente: propia

- Vigas

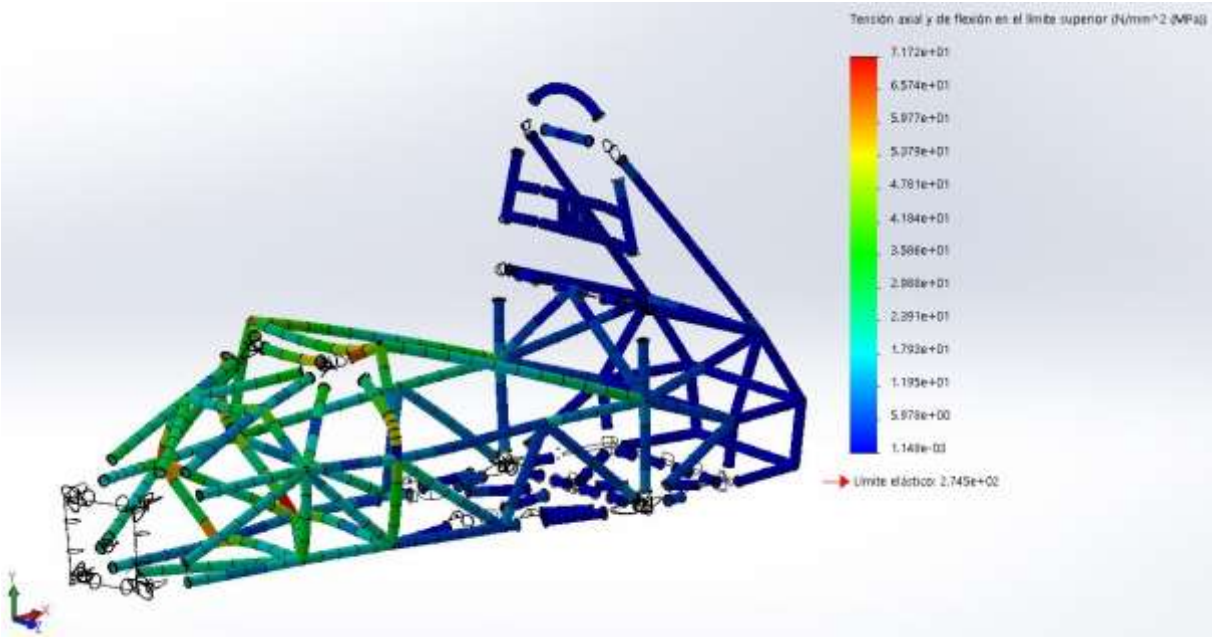


Ilustración 270. Tensiones resultantes vigas. Fuente: propia

- Desplazamientos

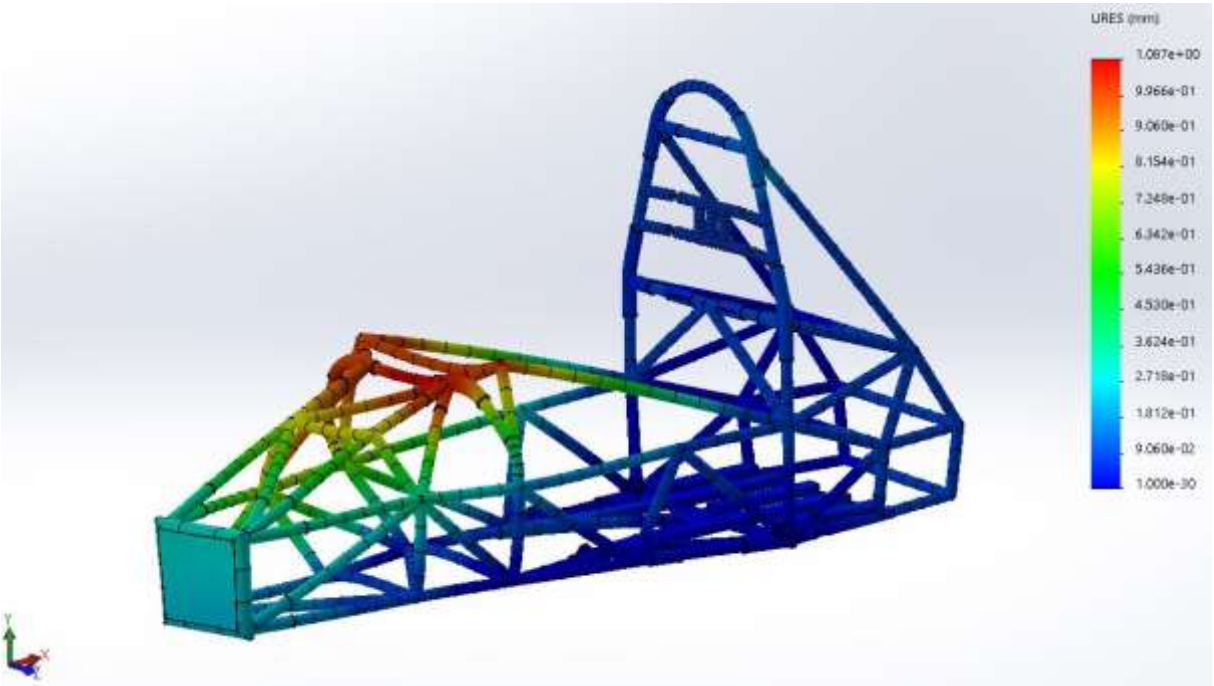


Ilustración 271. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

La siguiente tabla recoge las soluciones a esta simulación:

Tabla 120. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro frontal	Solidos	225	MPa	274.5 MPa
	Vigas	71.72	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.08	mm	25mm

Se puede ver que está dentro de los requerimientos indicados en la normativa.

3.7.2.8.3. Impacto lateral

- Tensiones
  - Sólidos
    - Zona Imparto A

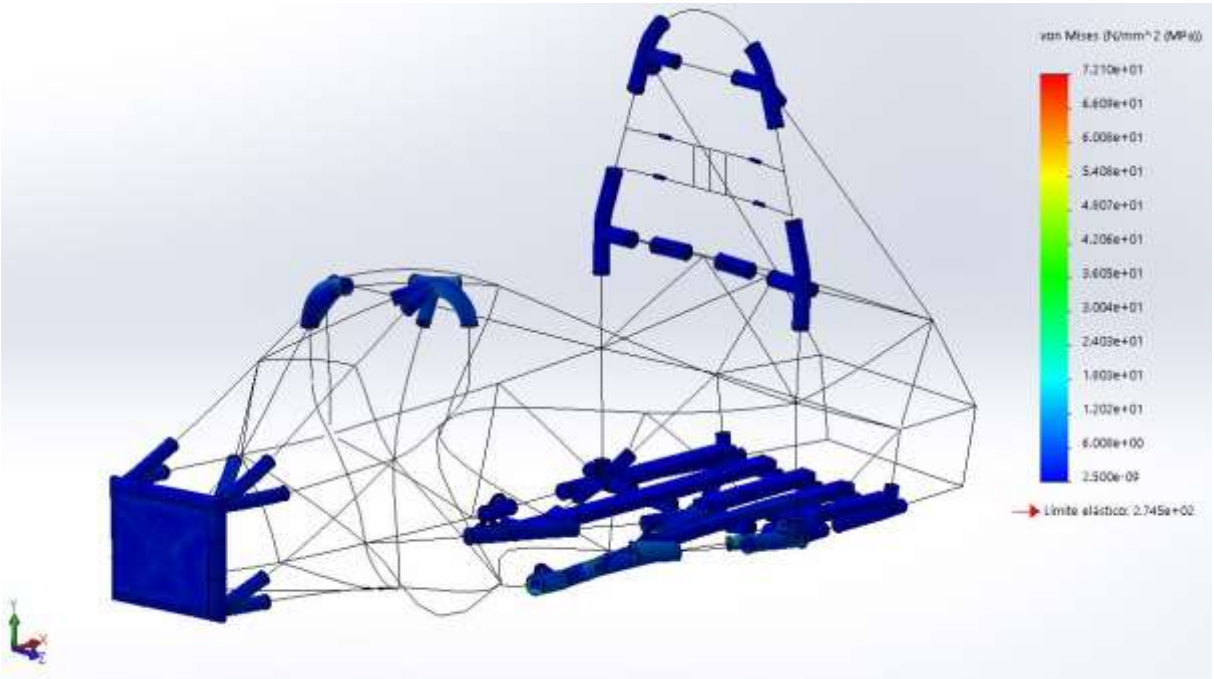


Ilustración 272. Tensiones resultantes sólidos zona A. Fuente: propia

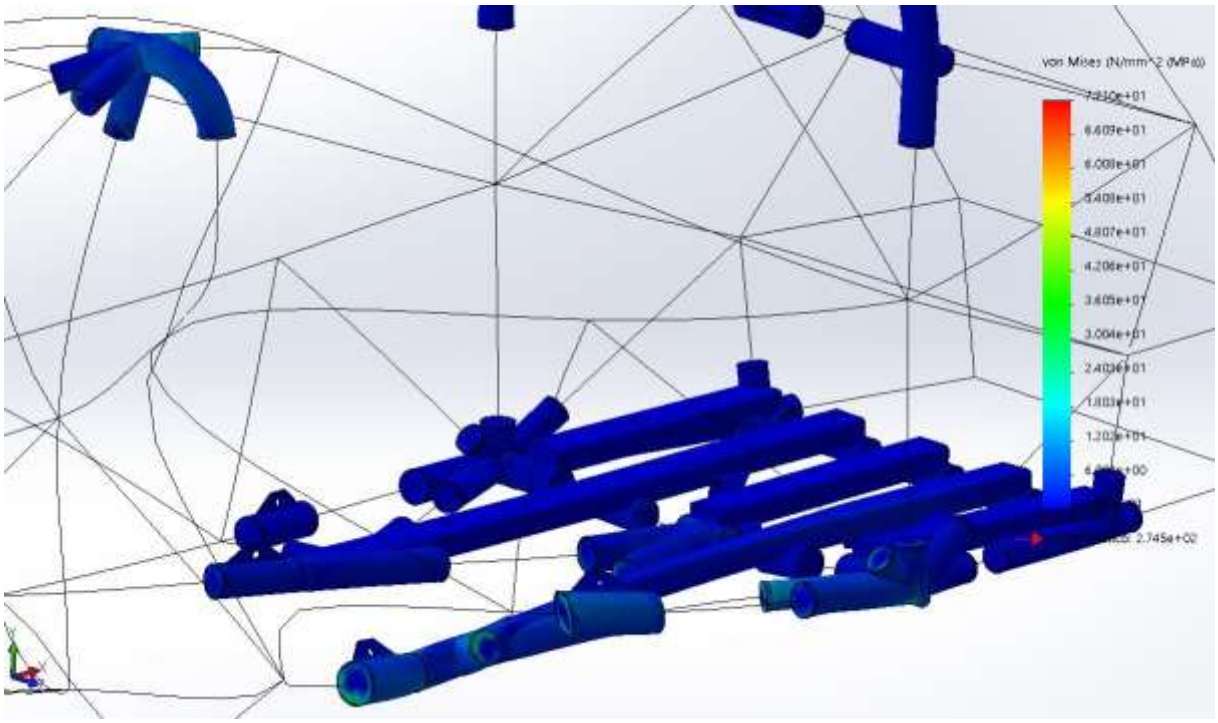


Ilustración 273. Detalle tensiones resultantes zona A. Fuente: propia

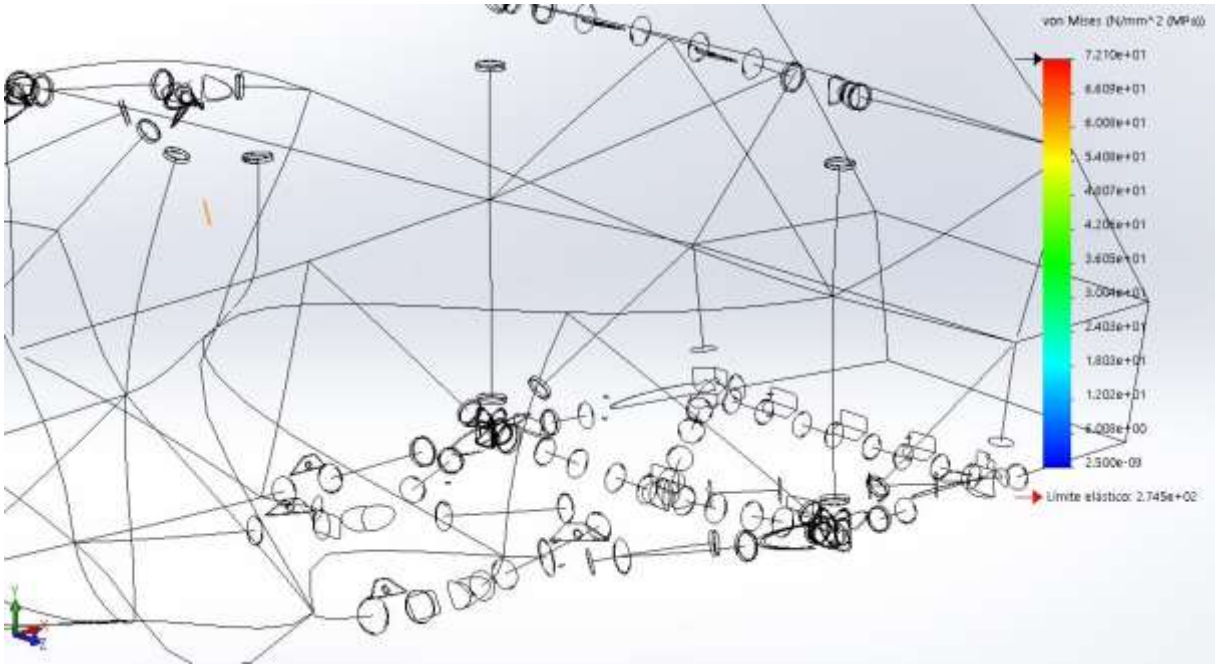


Ilustración 274. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes zona A. Fuente: propia

- Zona Impacto B

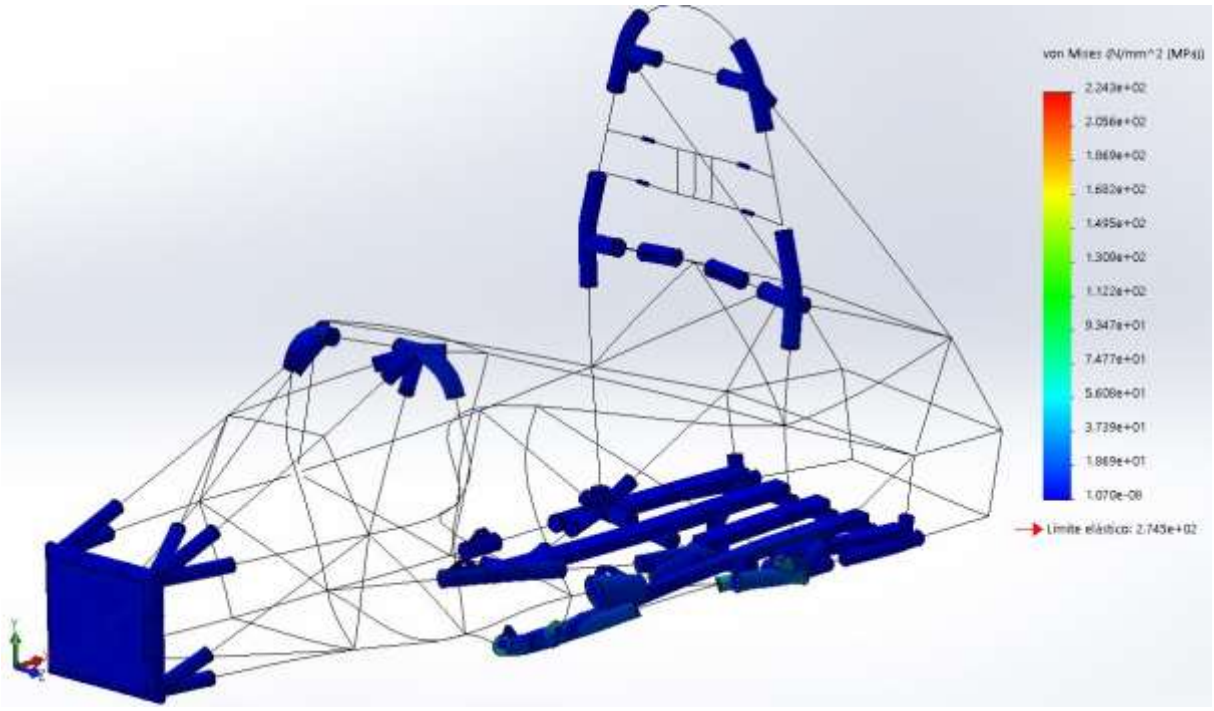


Ilustración 275. Tensiones resultantes sólidos zona B. Fuente: propia

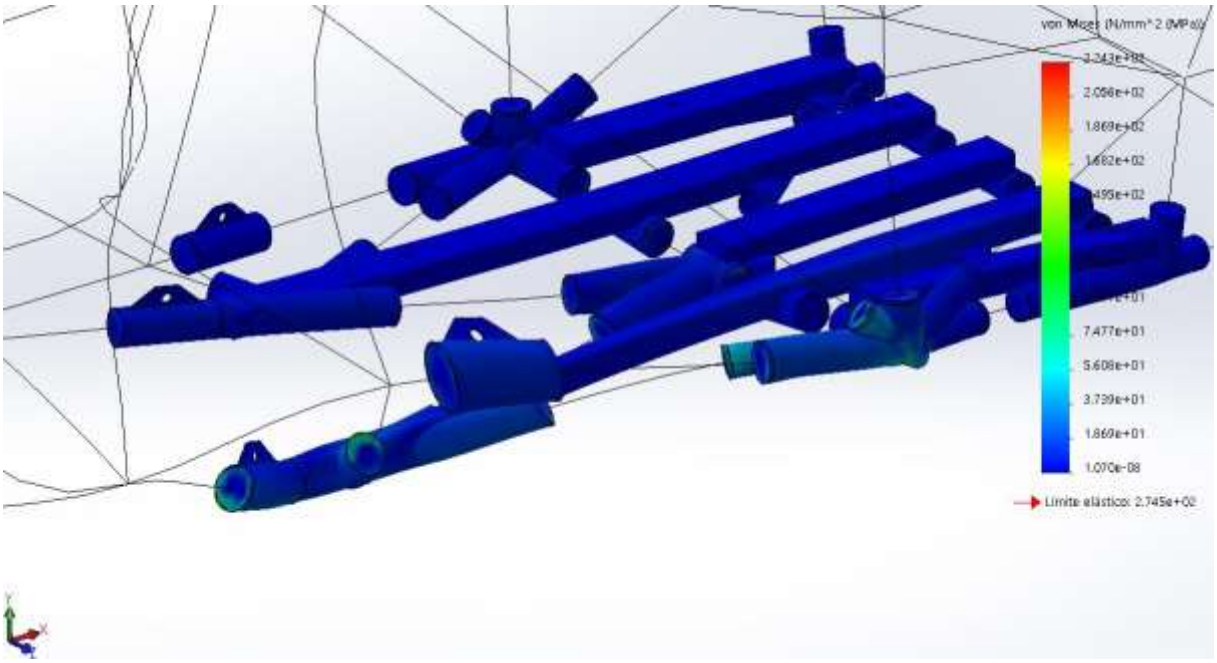


Ilustración 276. Detalle tensiones resultantes zona B. Fuente: propia

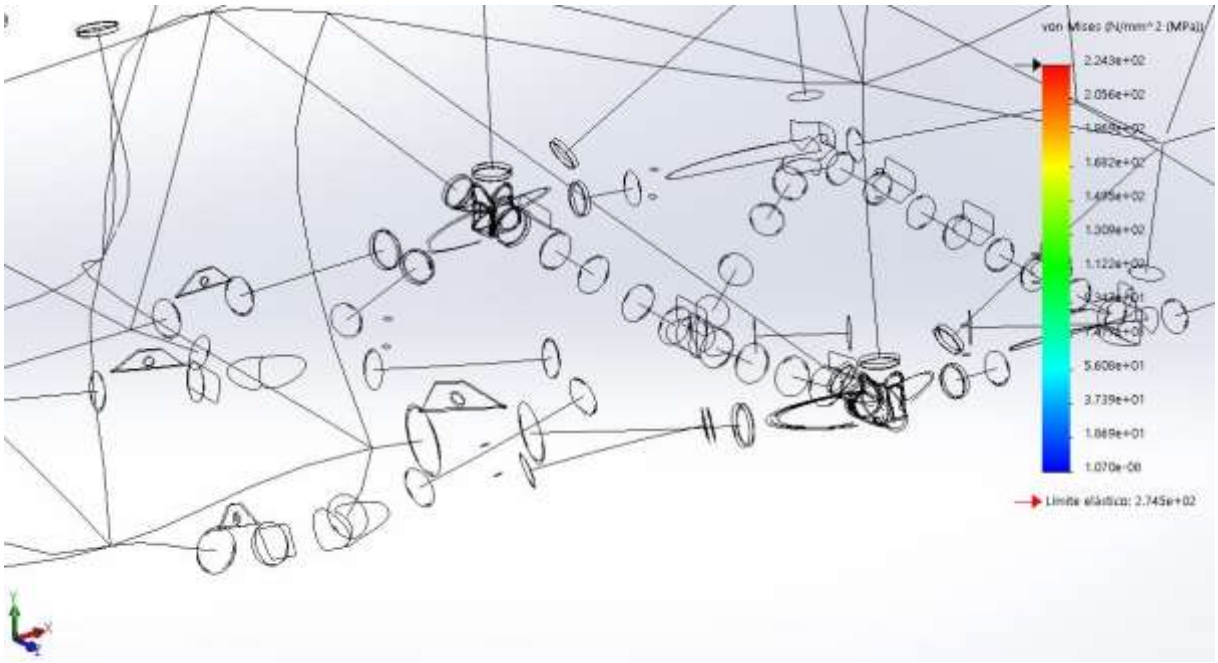


Ilustración 277. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes zona B. Fuente: propia

- Zona Impacto C

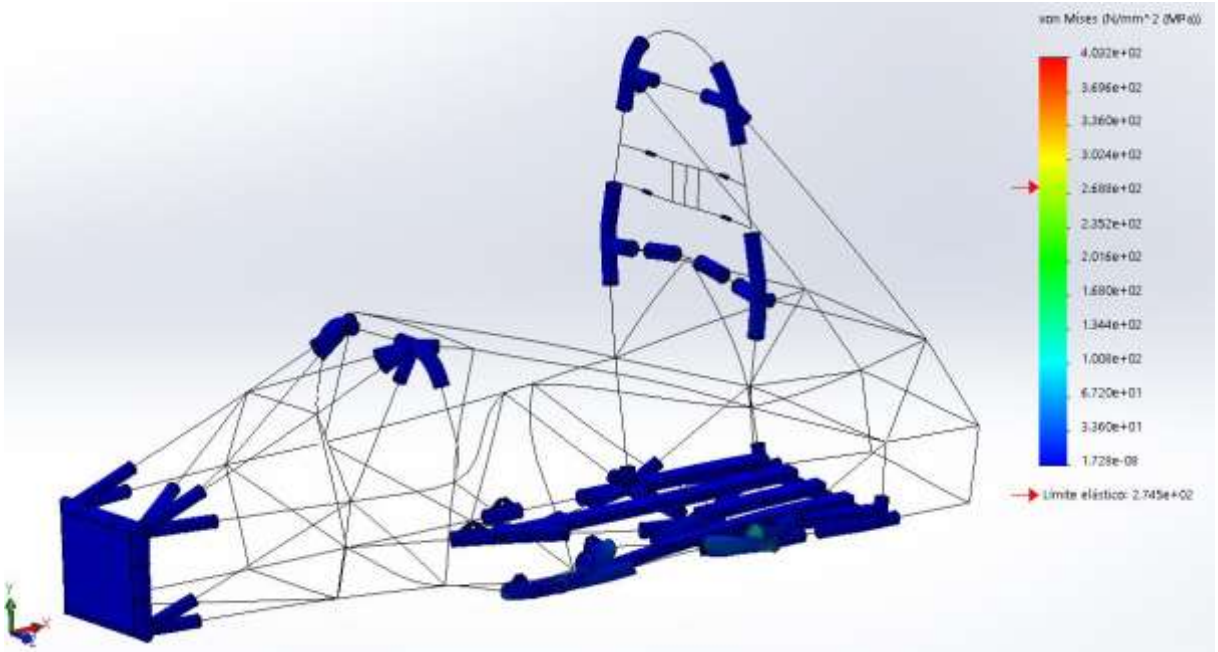


Ilustración 278. Tensiones resultantes sólidos zona C. Fuente: propia

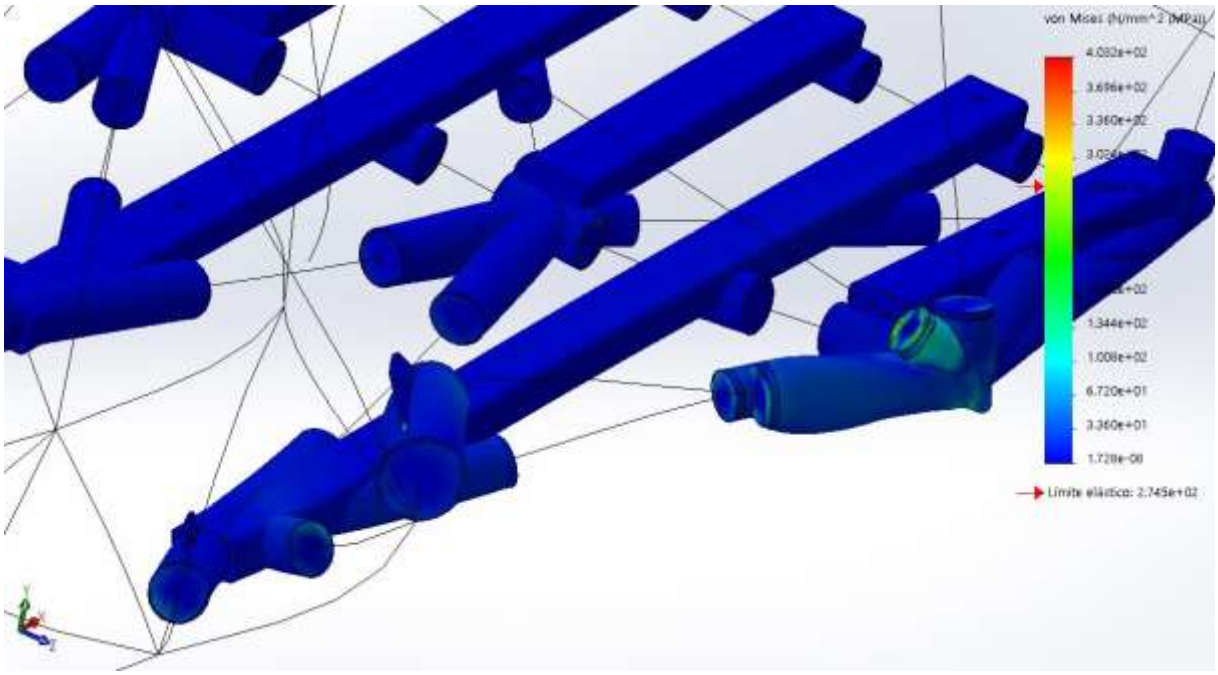


Ilustración 279. Detalle tensiones resultantes zona C. Fuente: propia

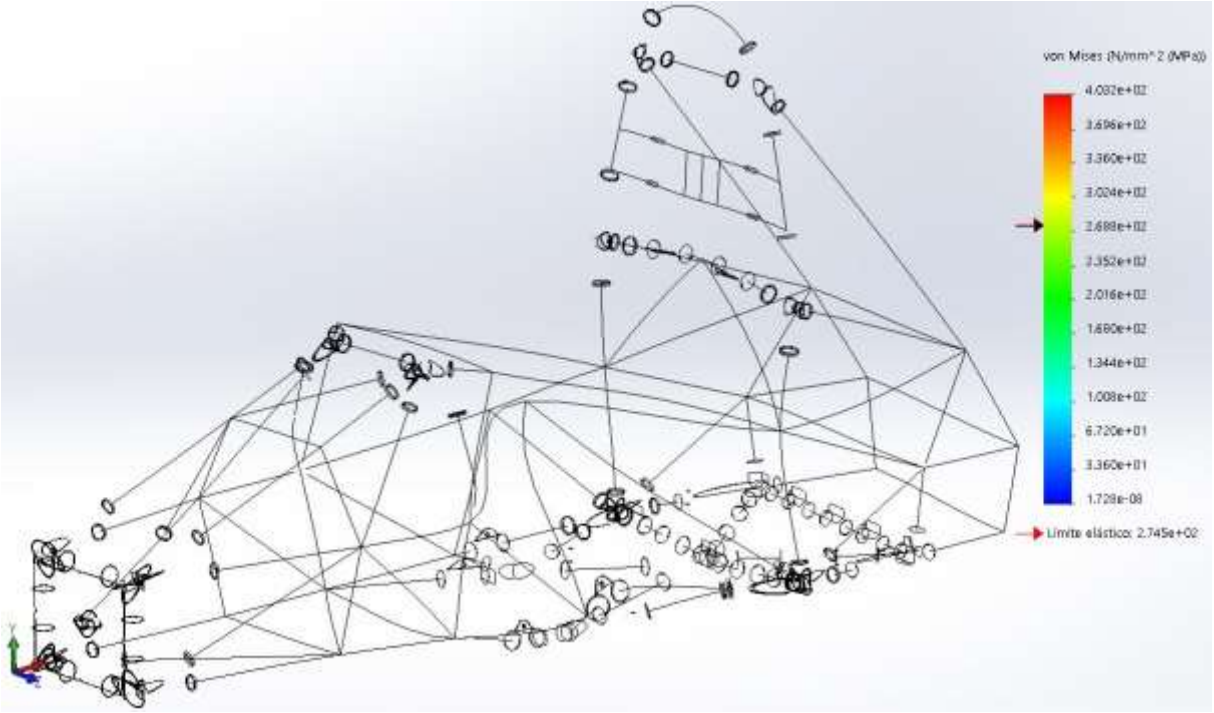


Ilustración 280. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes zona C. Fuente: propia

- Zona Impacto D

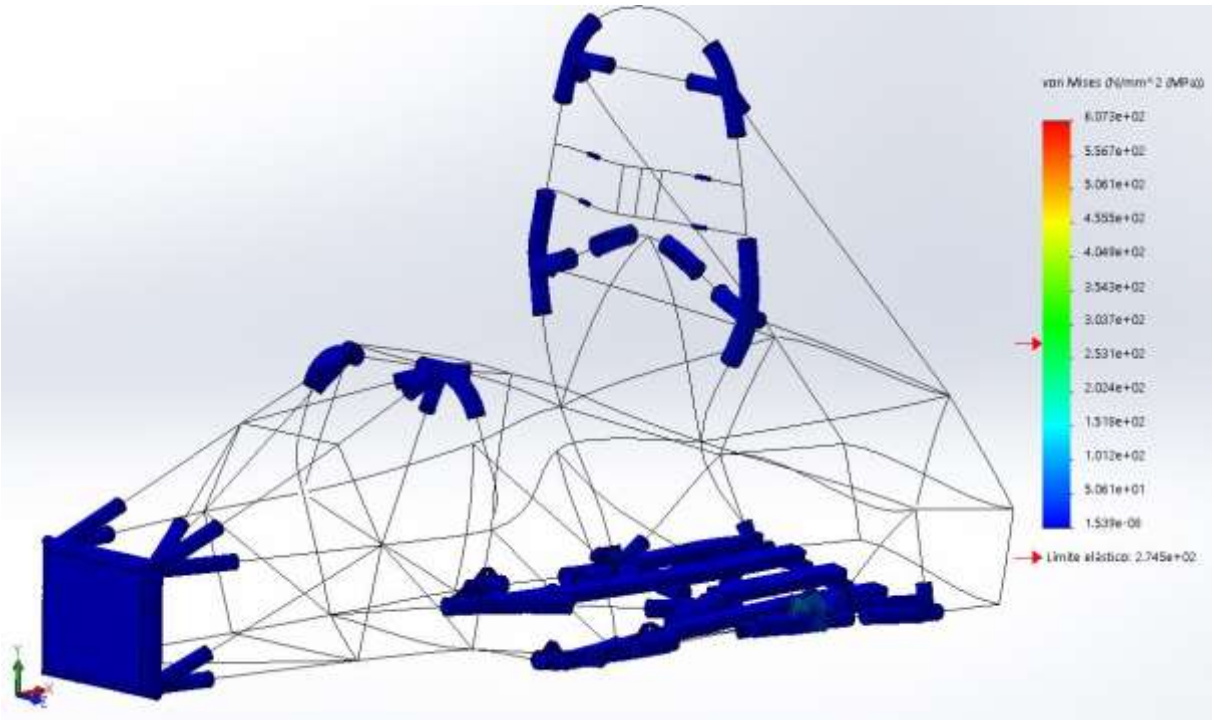


Ilustración 281. Tensiones resultantes sólidos zona D. Fuente: propia

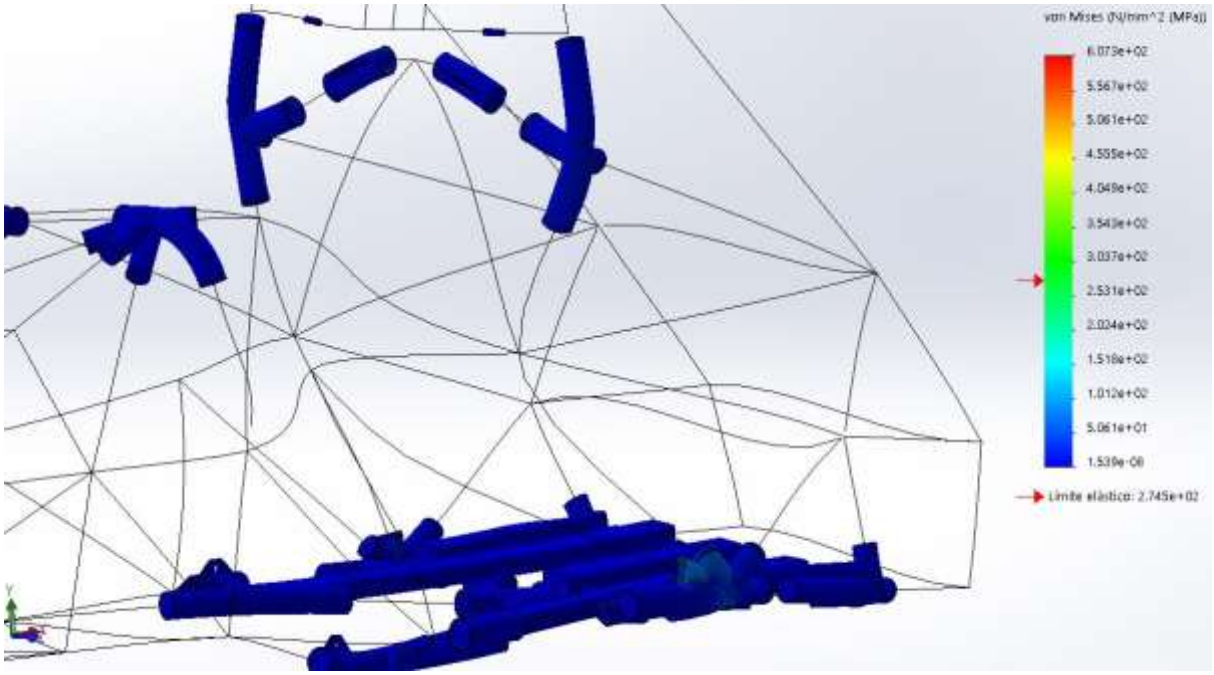


Ilustración 282. Detalle tensiones resultantes zona D. Fuente: propia

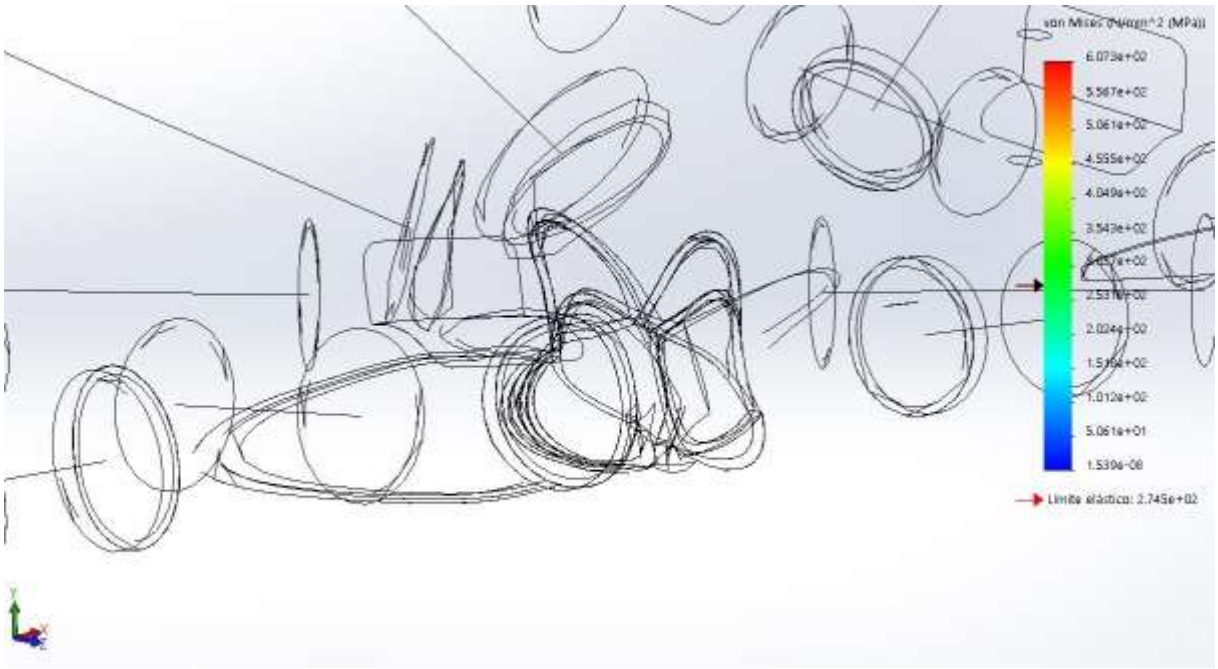


Ilustración 283. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes zona D. Fuente: propia

- Vigas
  - Zona Impacto A

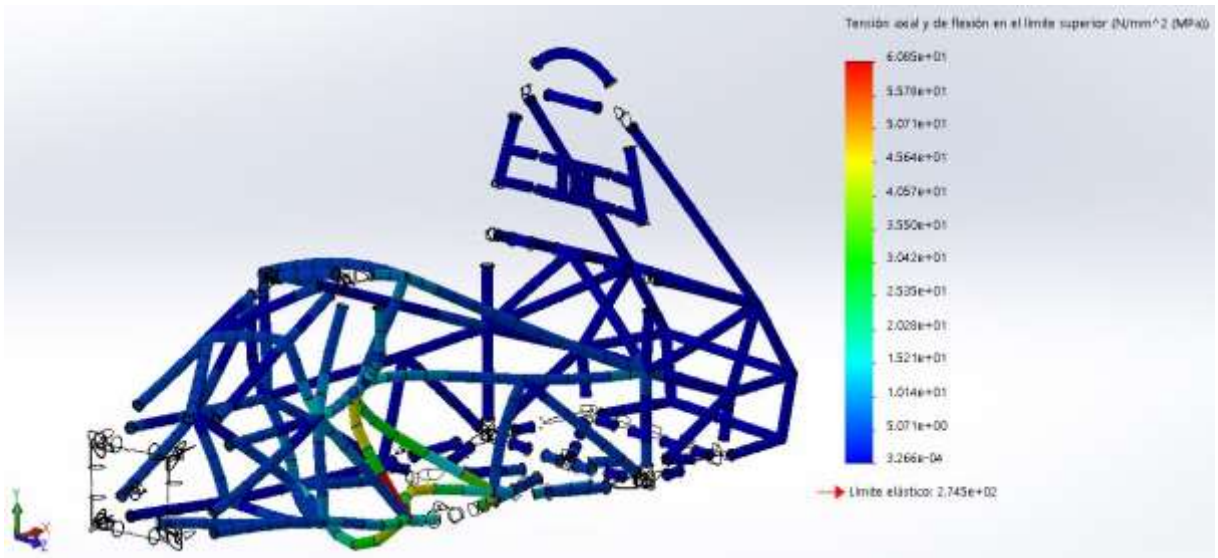


Ilustración 284. Tensiones resultantes zona A. Fuente: propia

- Zona Impacto B

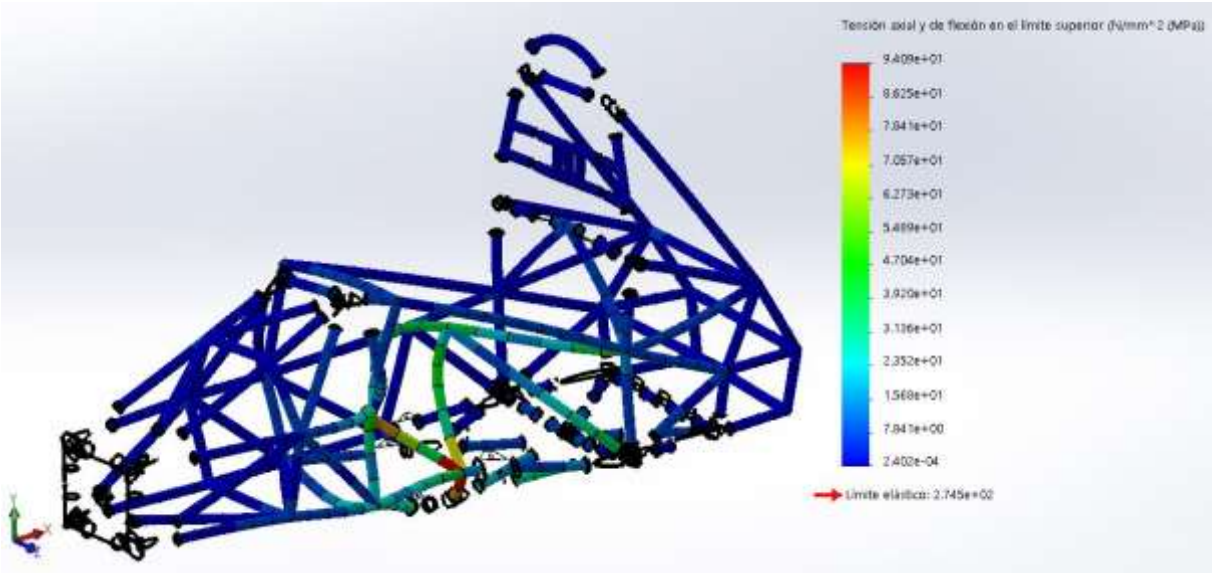


Ilustración 285. Tensiones resultantes zona B. Fuente: propia

- Zona Impacto C

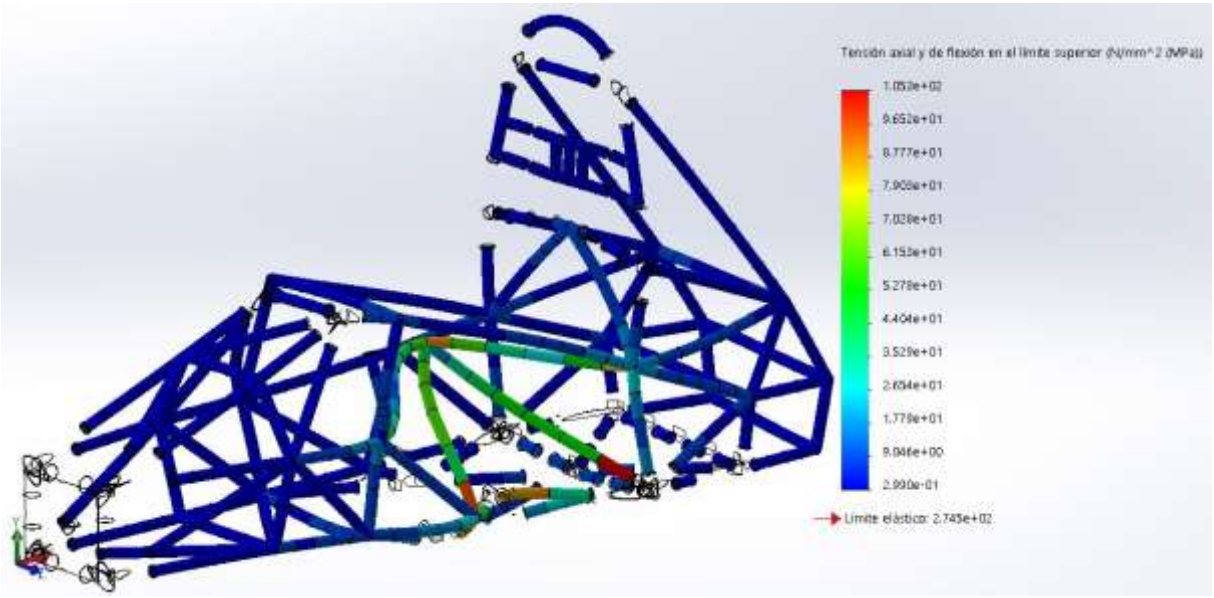


Ilustración 286. Tensiones resultantes zona C. Fuente: propia

- Zona Impacto D

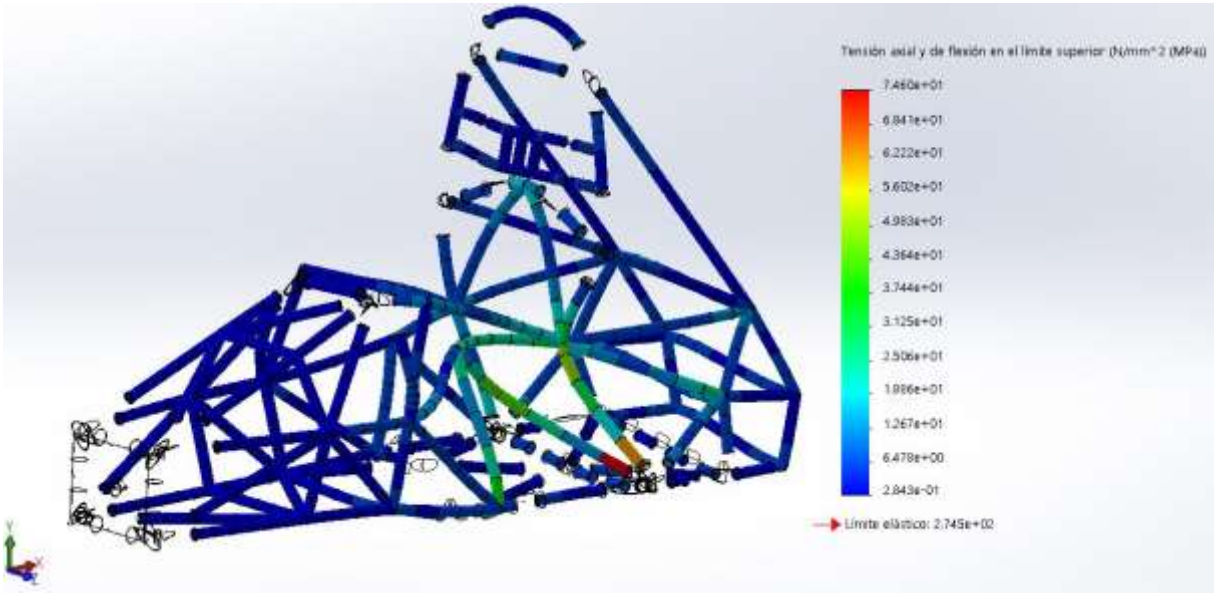


Ilustración 287. Tensiones resultantes zona D. Fuente: propia

- Desplazamientos
  - Zona Impacto A

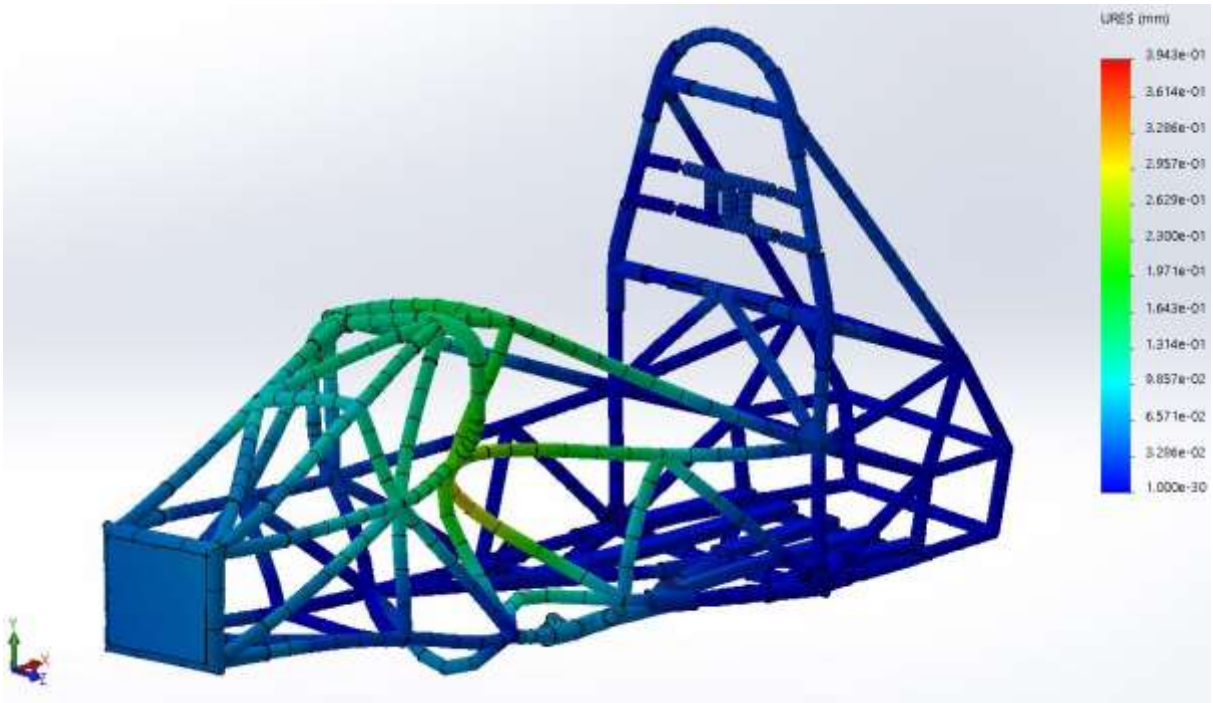


Ilustración 288. Tensiones resultantes zona A. Fuente: propia

- Zona Impacto B

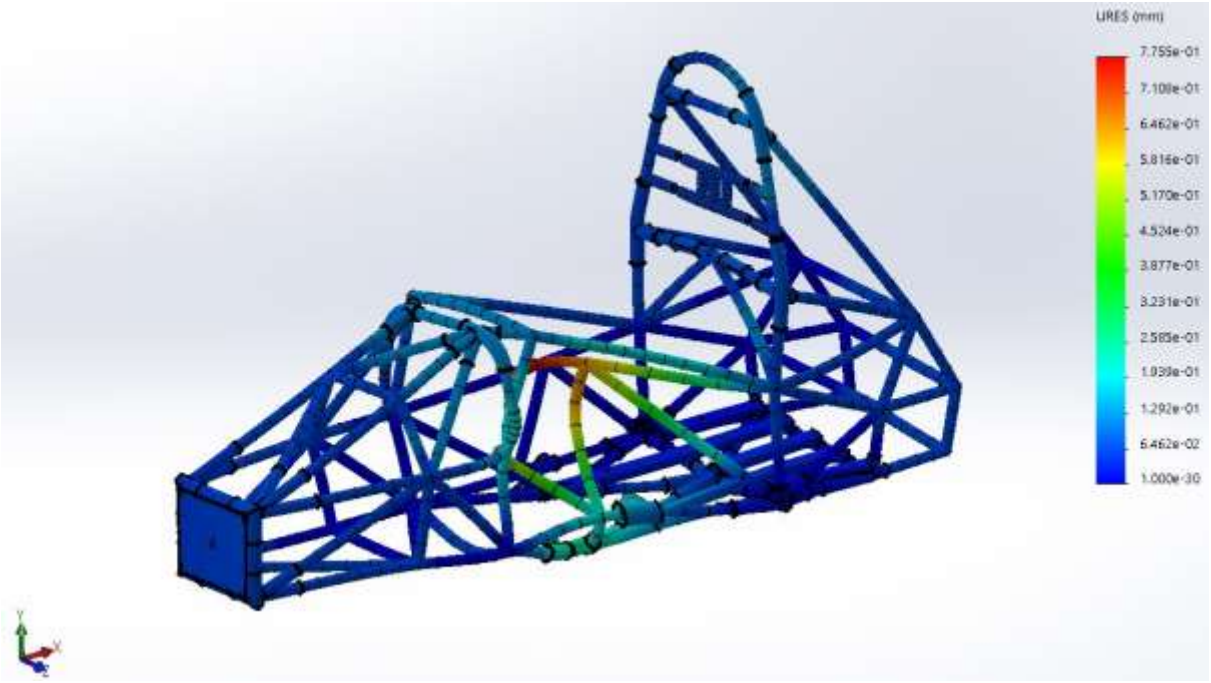


Ilustración 289. Tensiones resultantes zona B. Fuente: propia

- Zona Impacto C

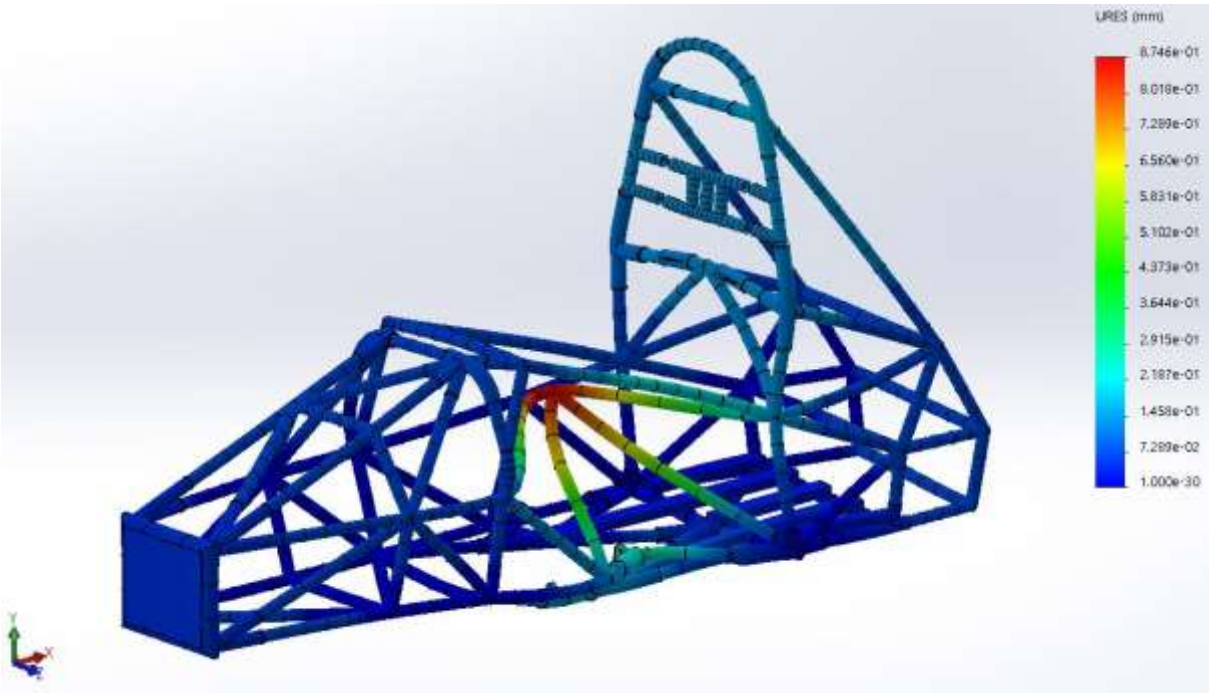


Ilustración 290. Tensiones resultantes zona C. Fuente: propia

- Zona Impacto D

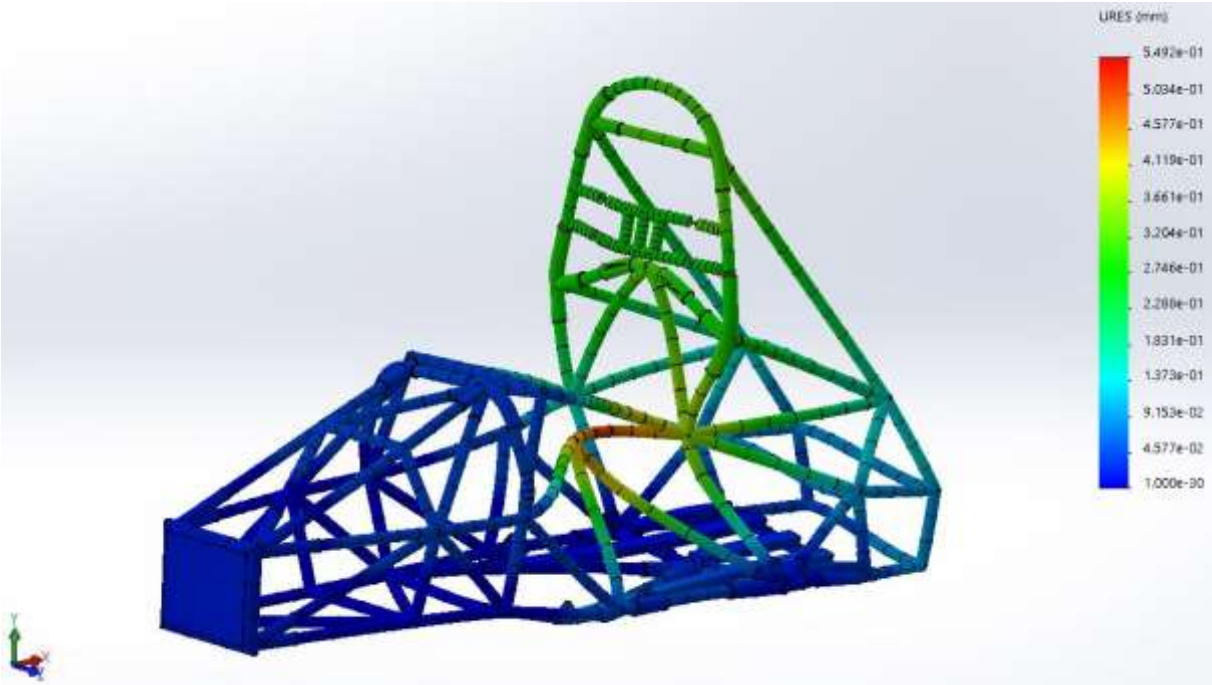


Ilustración 291. Tensiones resultantes zona D. Fuente: propia

- Conclusiones

En la siguiente tabla se recogen los resultados de las simulaciones:

Tabla 121. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto lateral Zona A	Solidos	72.1	MPa	274.5 MPa
	Vigas	60.85	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.39	mm	25mm
Impacto lateral Zona B	Solidos	224.3	MPa	274.5 MPa
	Vigas	94.1	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.775	mm	25mm
Impacto lateral Zona C	Solidos	274.5	MPa	274.5 MPa
	Vigas	105.3	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.87	mm	25mm
Impacto lateral Zona D	Solidos	274.5	MPa	274.5 MPa
	Vigas	74.6	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.55	mm	25mm

Se puede observar que hay algunas zonas de impacto en las que se supera el límite elástico, pero tras realizar un estudio de isosuperficies, no se ha detectado esas zonas. Ante esto, se asume que se está por debajo del límite elástico

3.7.2.8.4. Impacto frontal

- Tensiones
  - Sólidos

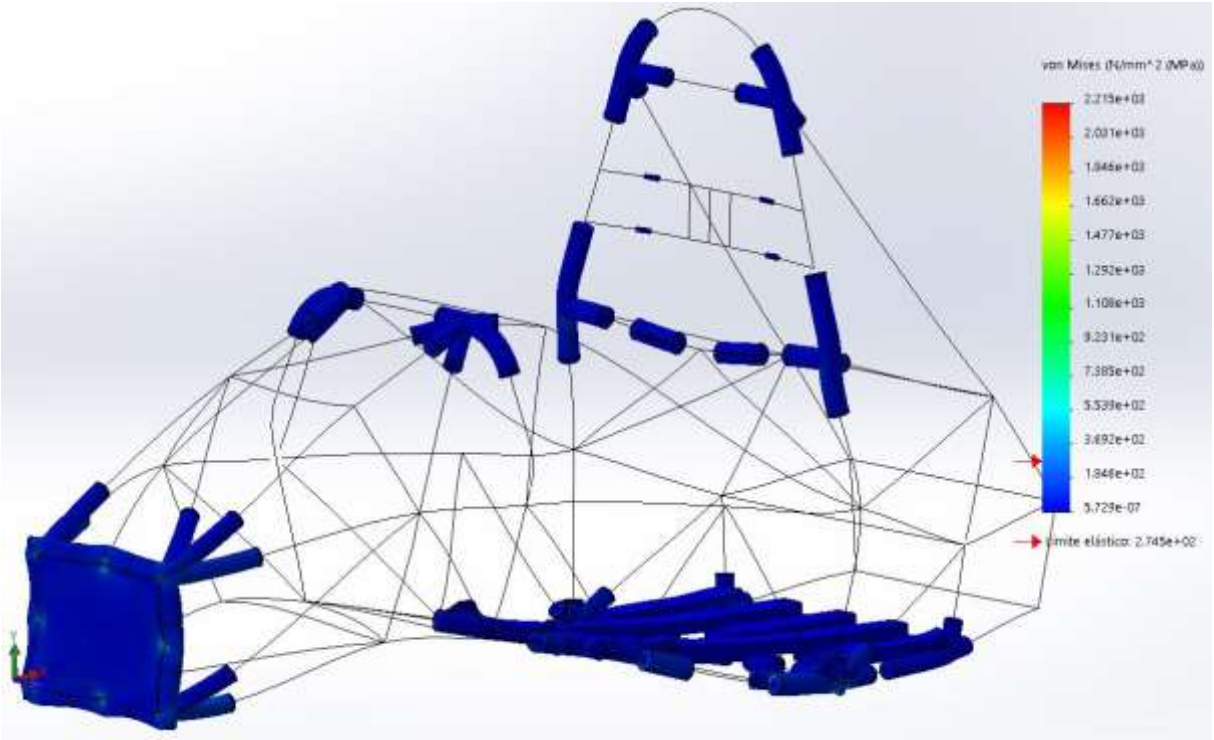


Ilustración 292. Tensiones resultantes sólidos. Fuente: propia

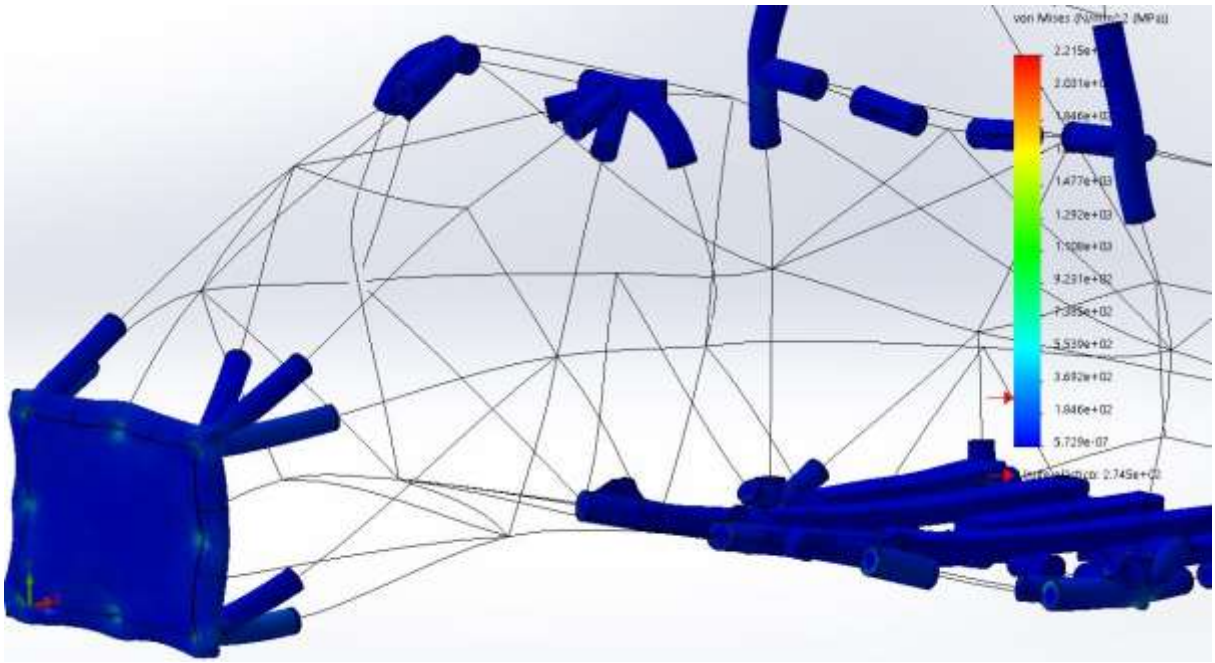


Ilustración 293. Detalle tensiones resultantes sólidos. Fuente: propia

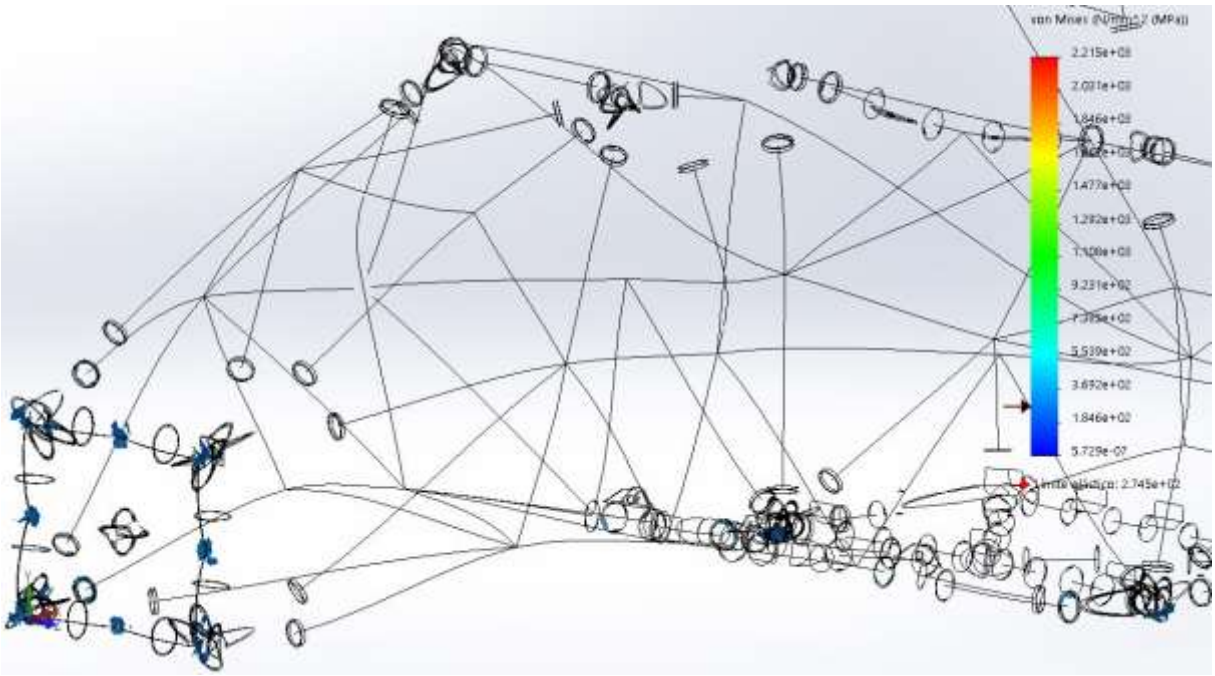


Ilustración 294. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes. Fuente: propia

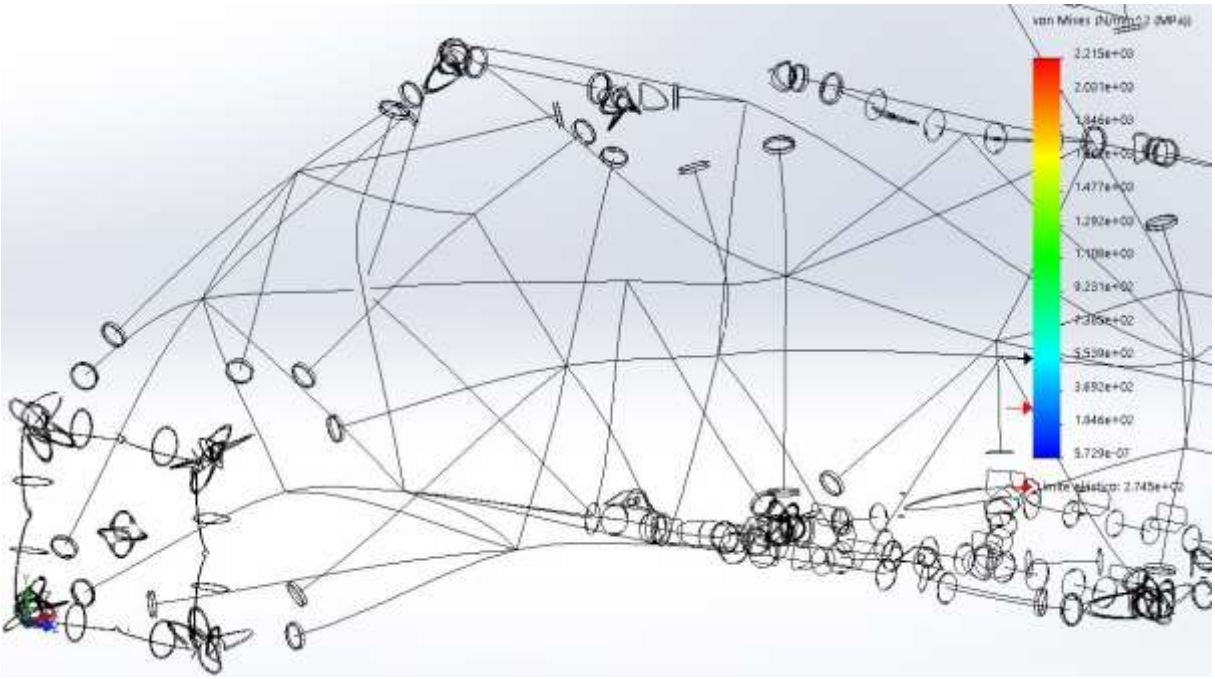


Ilustración 295. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes. Fuente: propia

- Vigas

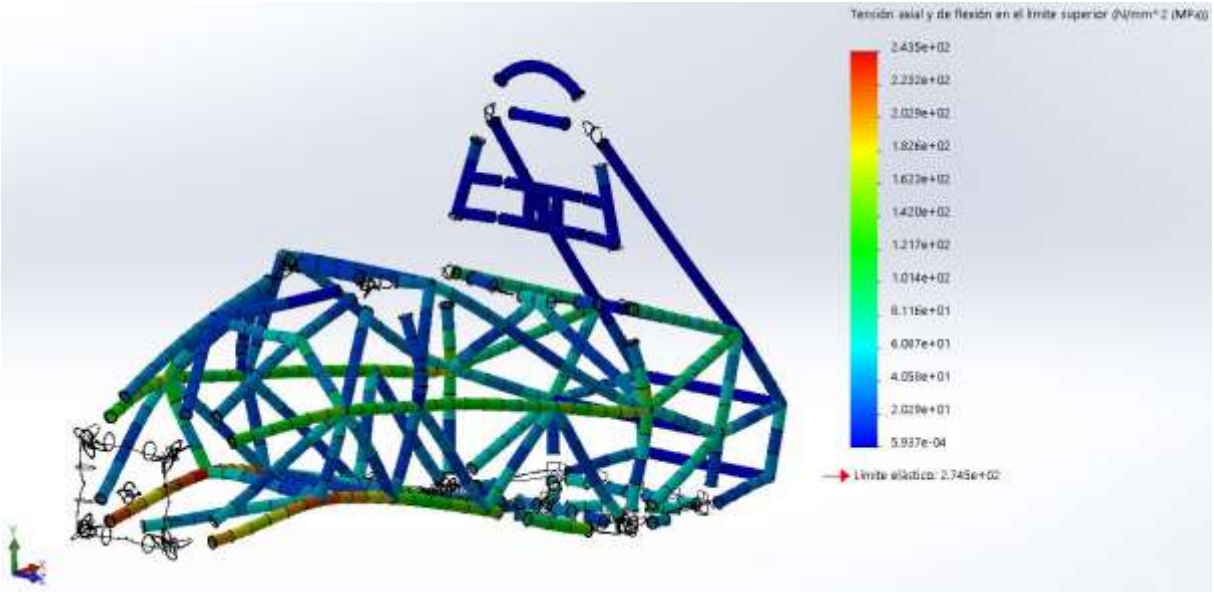


Ilustración 296. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

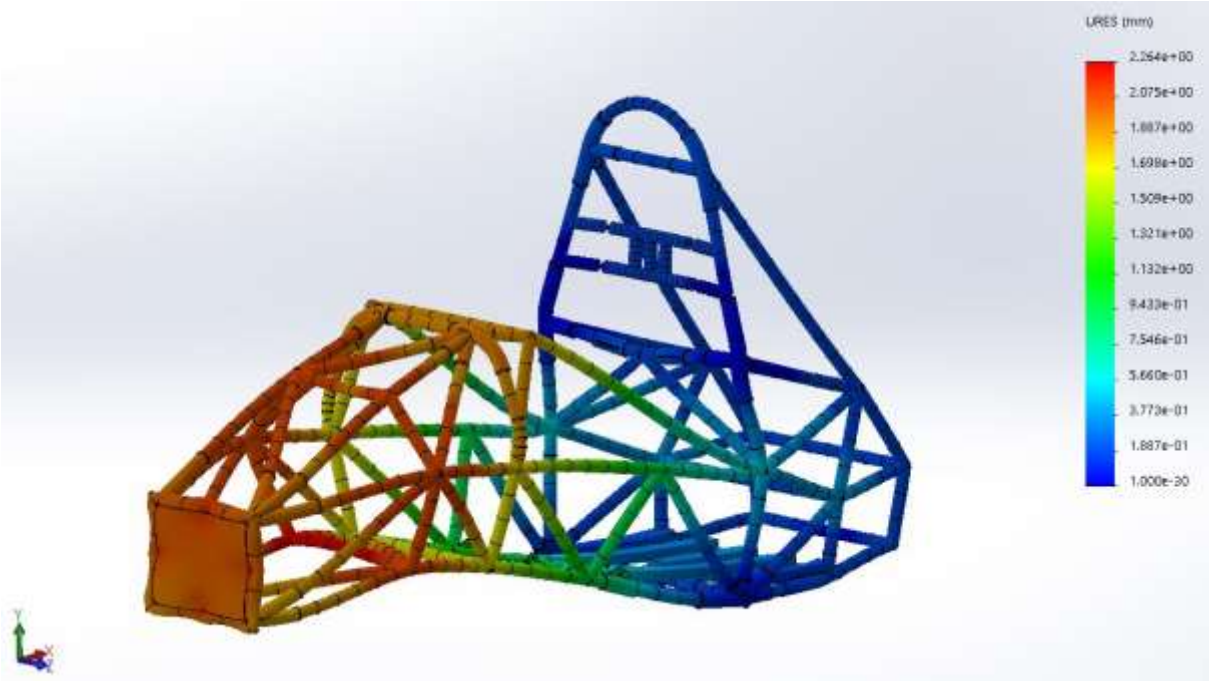


Ilustración 297. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 122. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto frontal	Solidos	500	MPa	274.5 MPa
	Vigas	243.5	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	2.26	mm	25mm

Se observa que se supera el límite elástico, existiendo concentración de tensiones en los puntos de los tornillos de anclaje del atenuador de impactos y en la unión del aro principal con la base del chasis.

3.7.2.8.5. Anclajes cinturón de hombros

- Tensiones
  - Sólidos

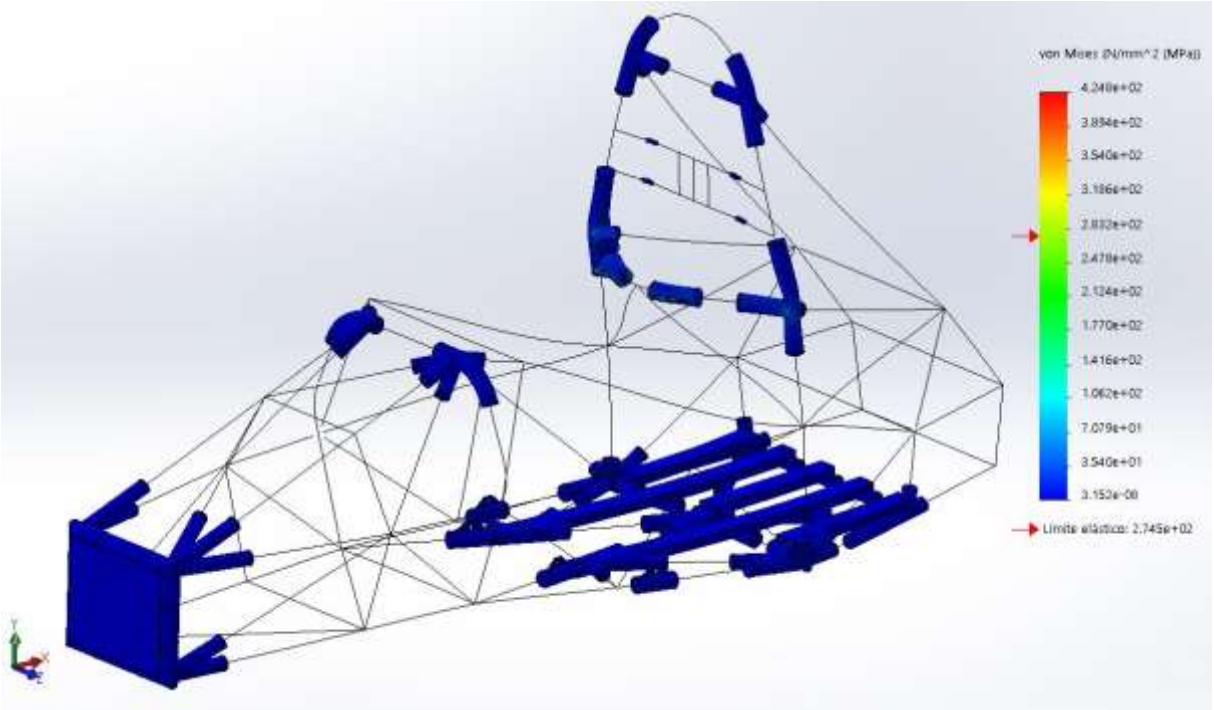


Ilustración 298. Tensiones resultantes sólidos. Fuente: propia

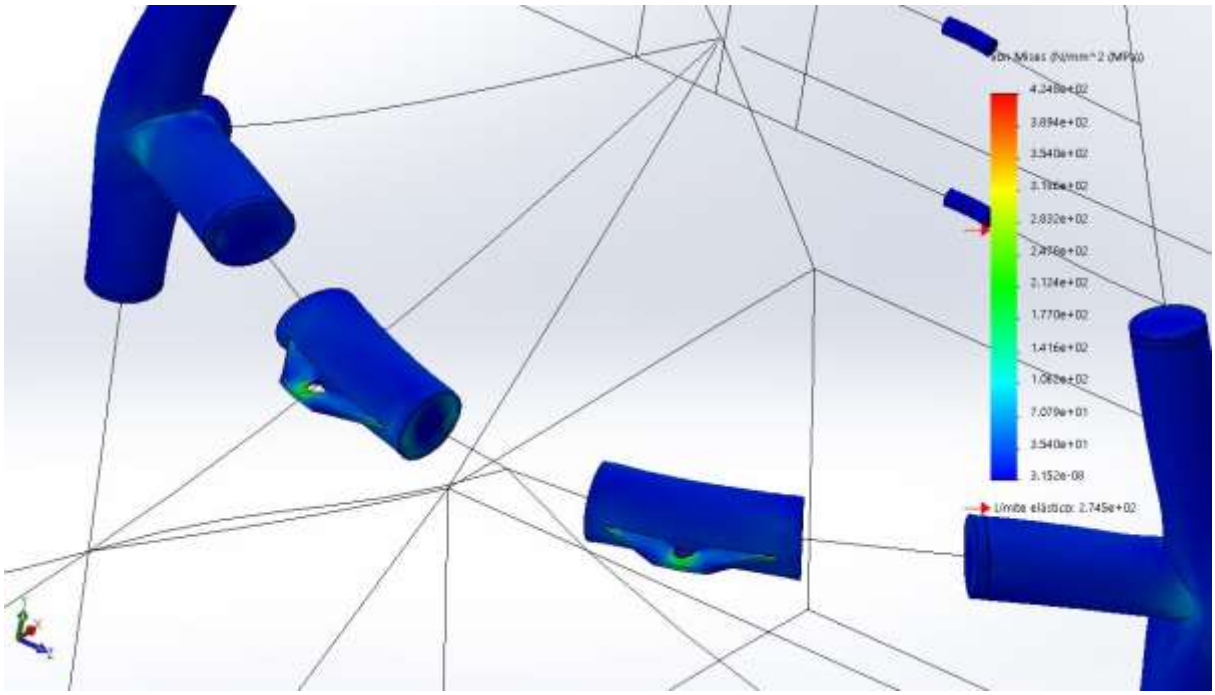


Ilustración 299. Detalle tensiones resultantes sólidos. Fuente: propia

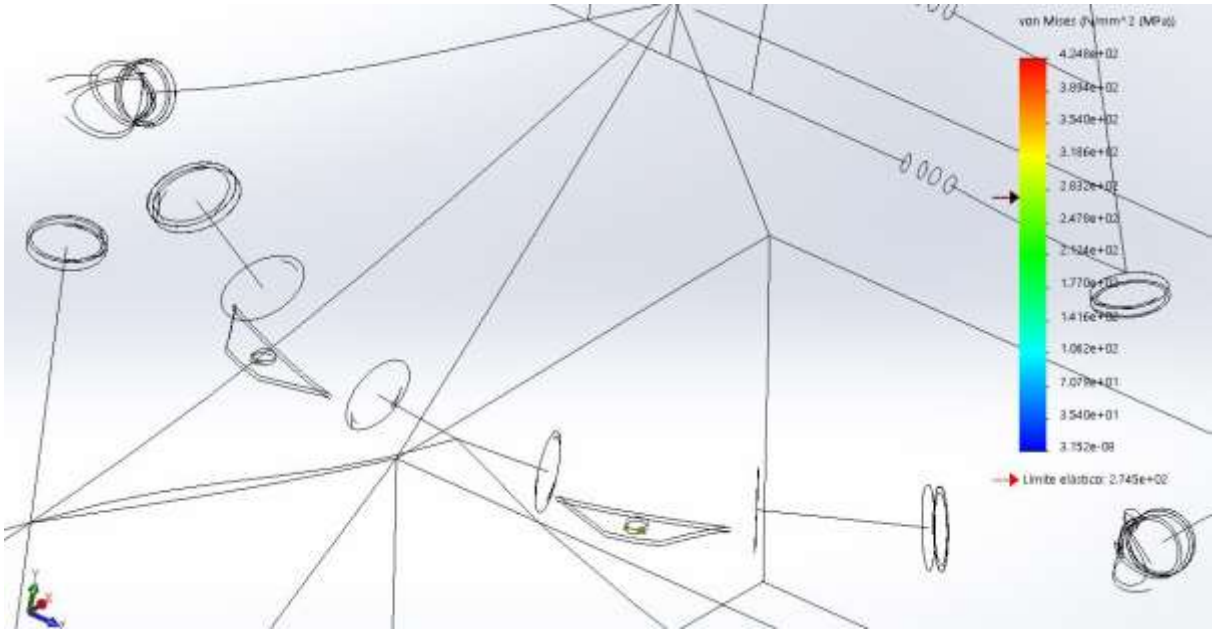


Ilustración 300. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes. Fuente: propia

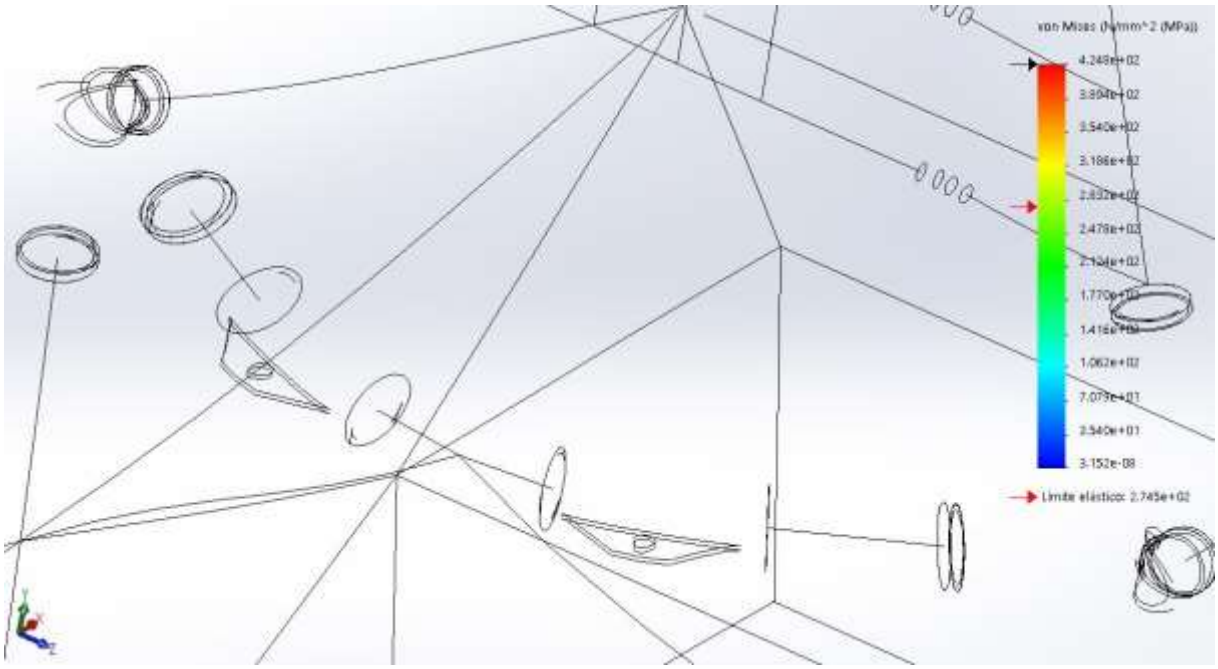


Ilustración 301. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes. Fuente: propia

- Vigas

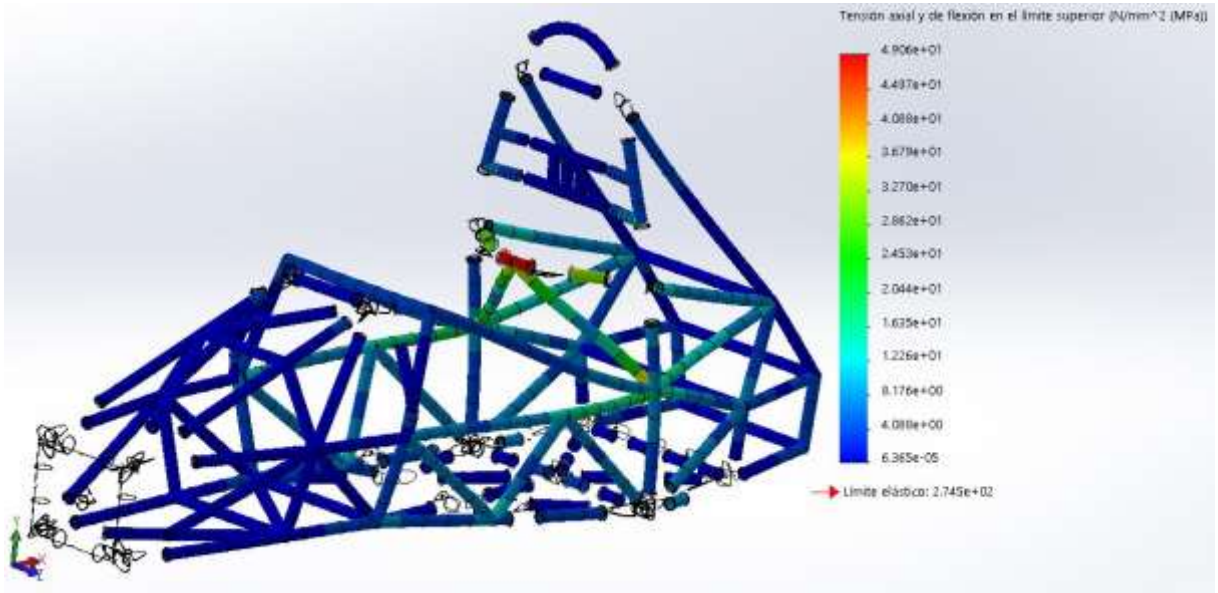


Ilustración 302. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

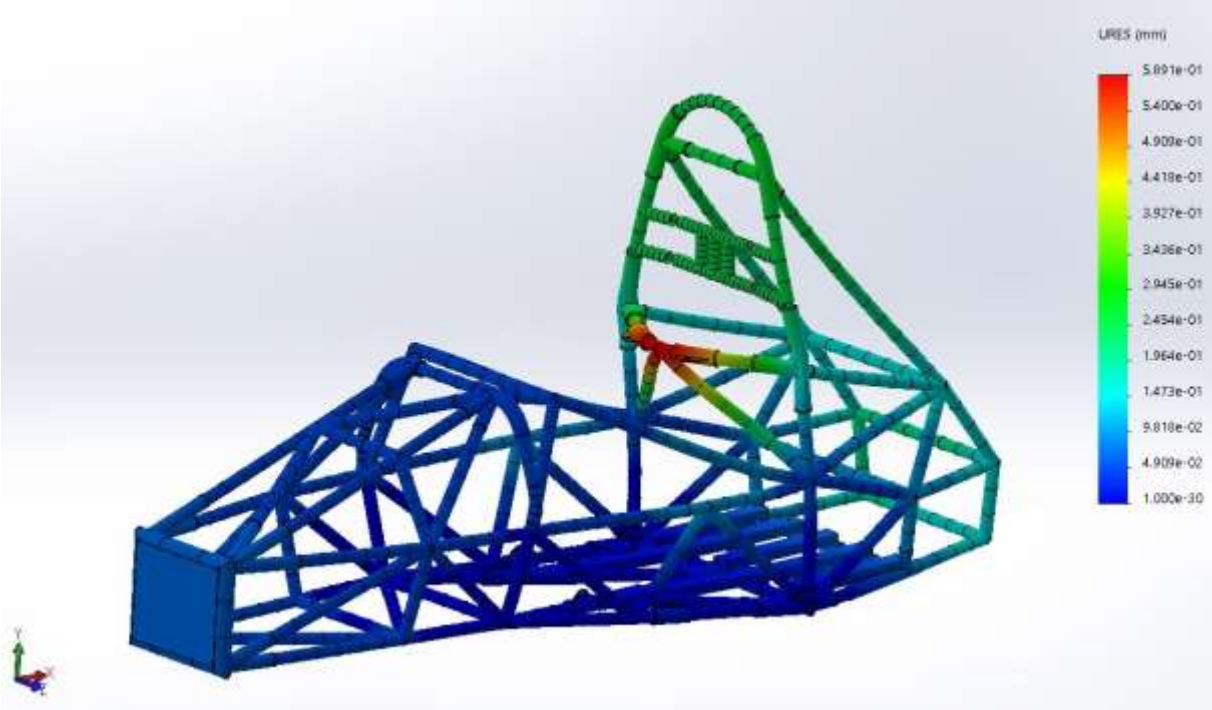


Ilustración 303. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 123. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturones de hombros	Solidos	450	MPa	274.5 MPa
	Vigas	49.1	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.59	mm	25mm

Se observa que se supera el límite elástico, por lo que se plantea modificar el espesor de las chapas y aumentarlas a un espesor de 5mm (aquí a 2.5mm)

3.7.2.8.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino

- Tensiones
  - Sólidos

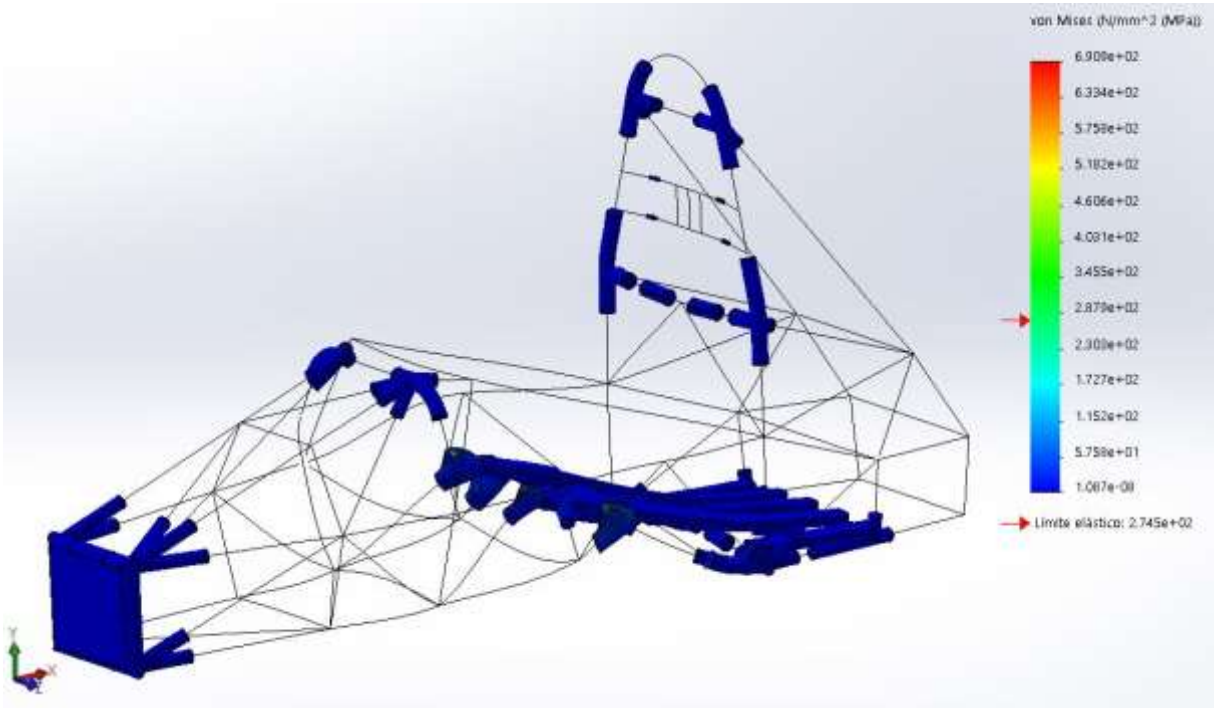


Ilustración 304. Tensiones resultantes sólidos. Fuente: propia

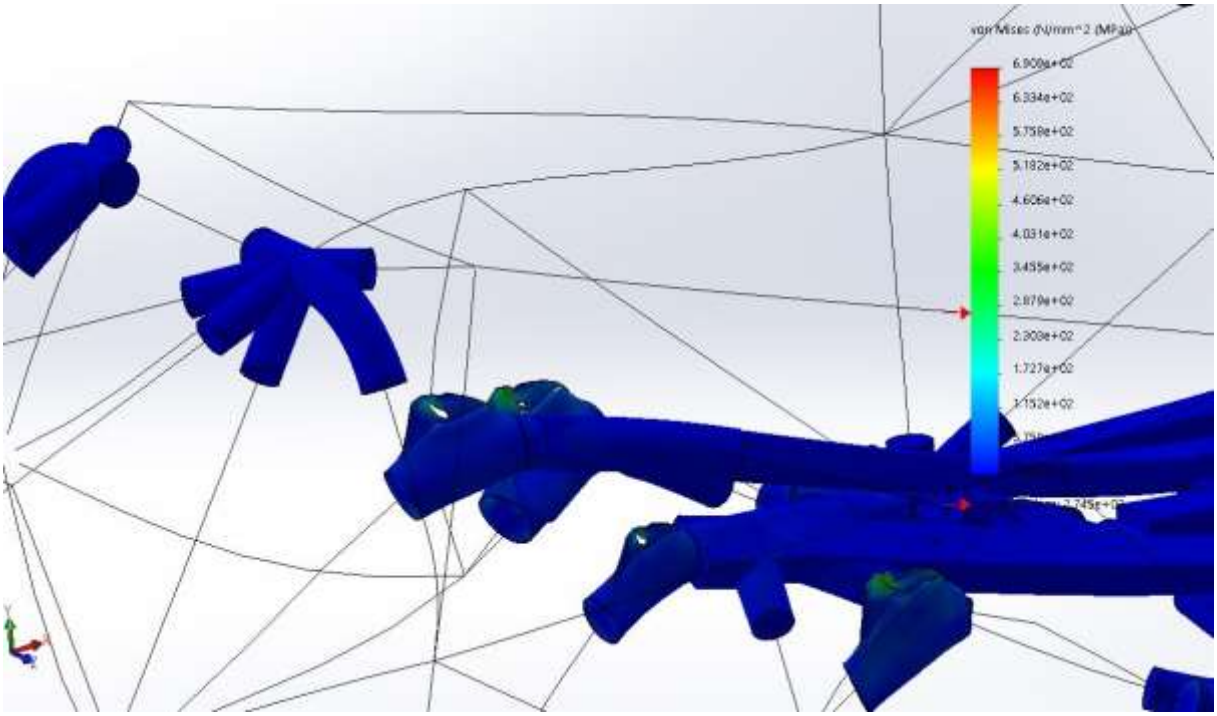


Ilustración 305. Detalle tensiones resultantes sólidos. Fuente: propia

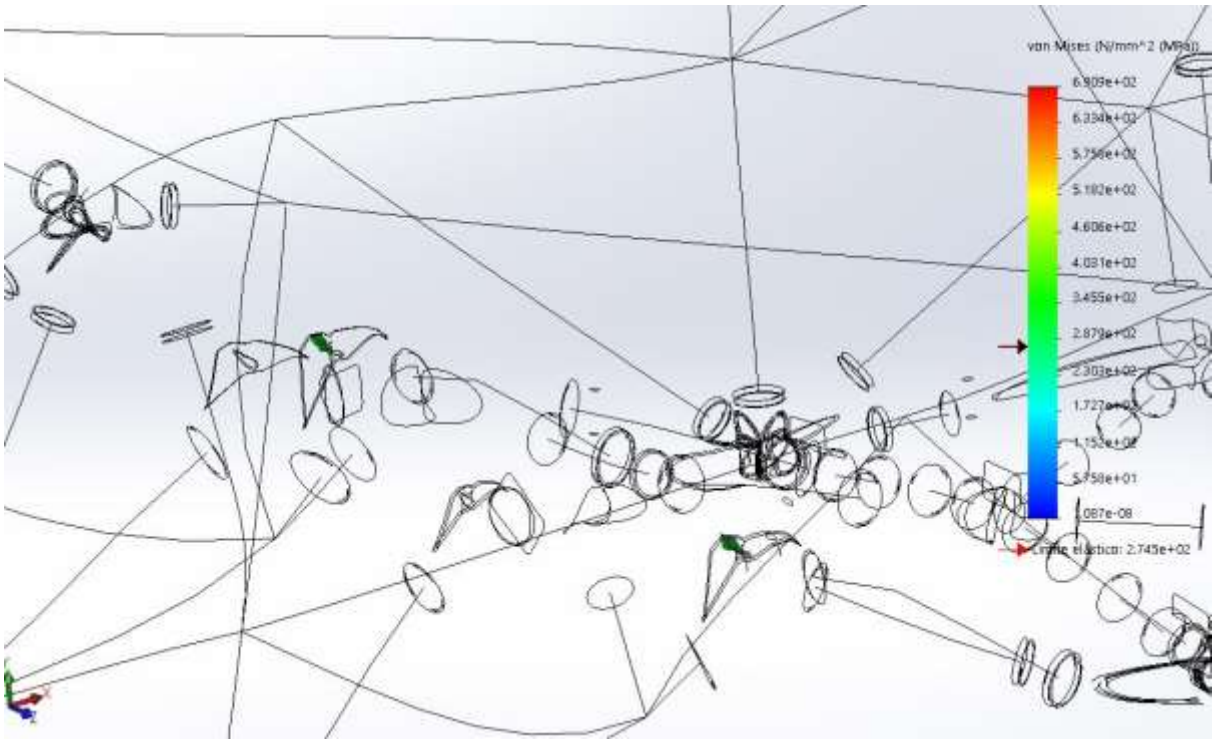


Ilustración 306. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes. Fuente: propia

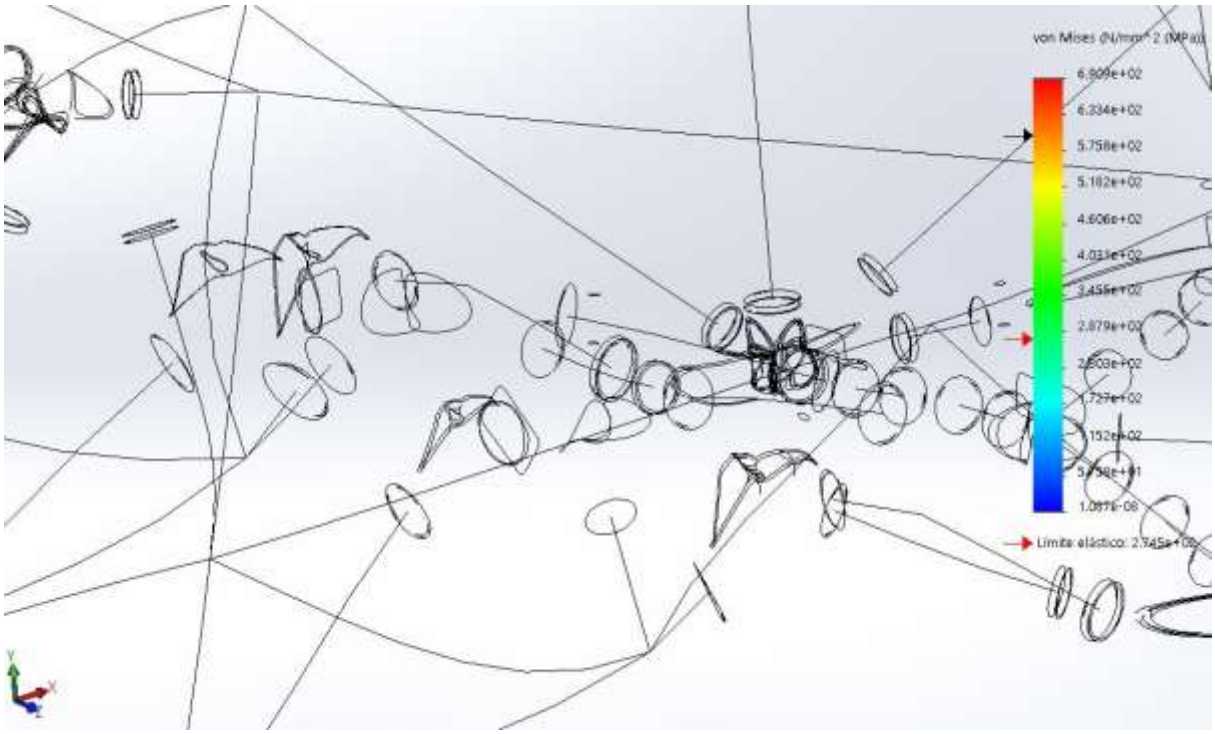


Ilustración 307. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes. Fuente: propia

- Vigas

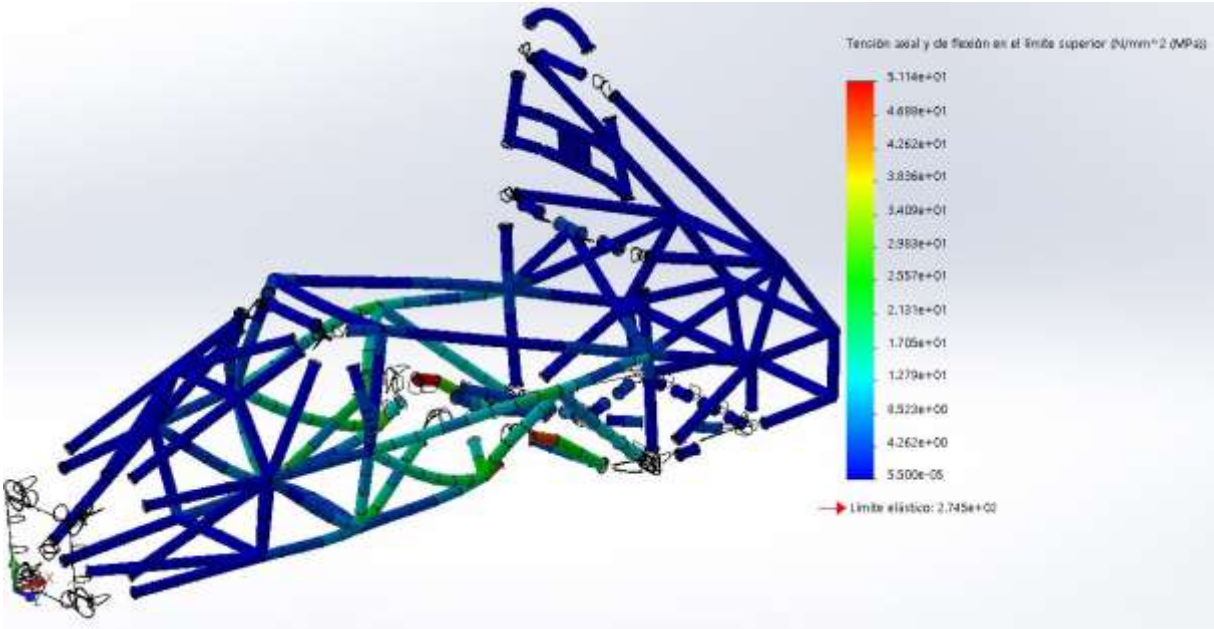


Ilustración 308. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

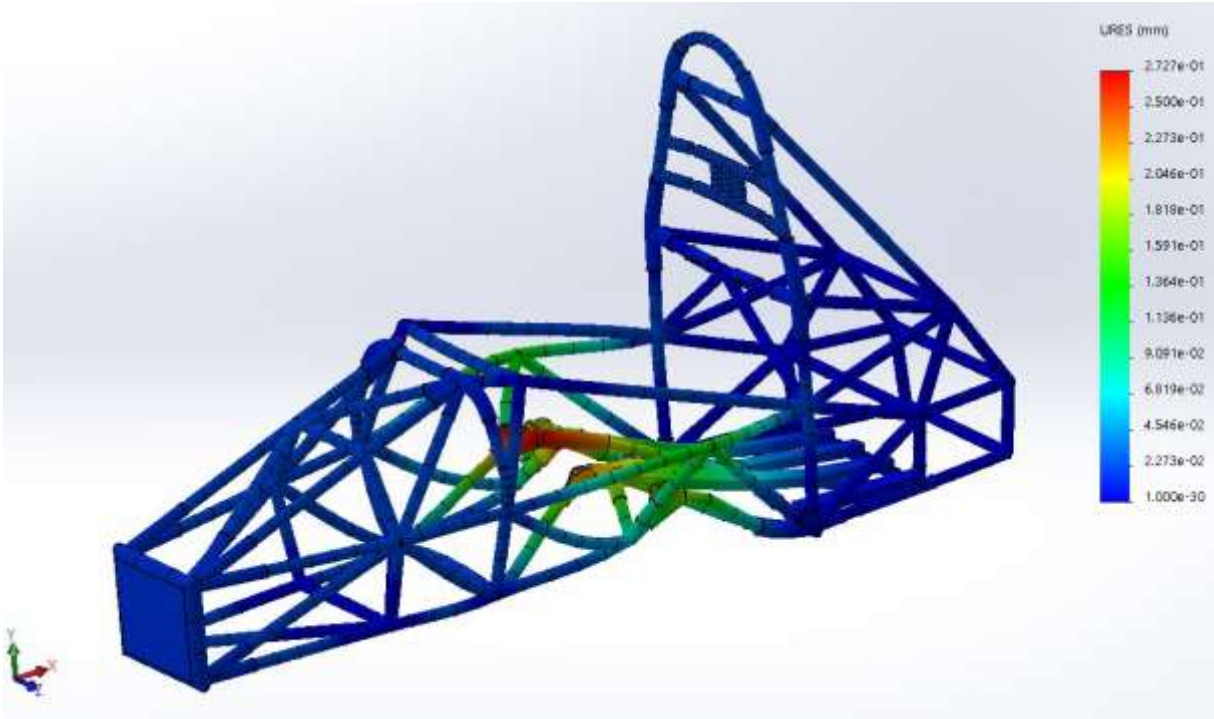


Ilustración 309. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 124. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Solidos	600	MPa	274.5 MPa
	Vigas	51.1	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.27	mm	25mm

Se observa que se supera el límite elástico. Por lo tanto, se realizará un aumento del espesor de las chapas a 5mm, igual que en el estudio anterior.

3.7.2.8.7. Impacto frontolateral

- Tensiones
  - Sólidos

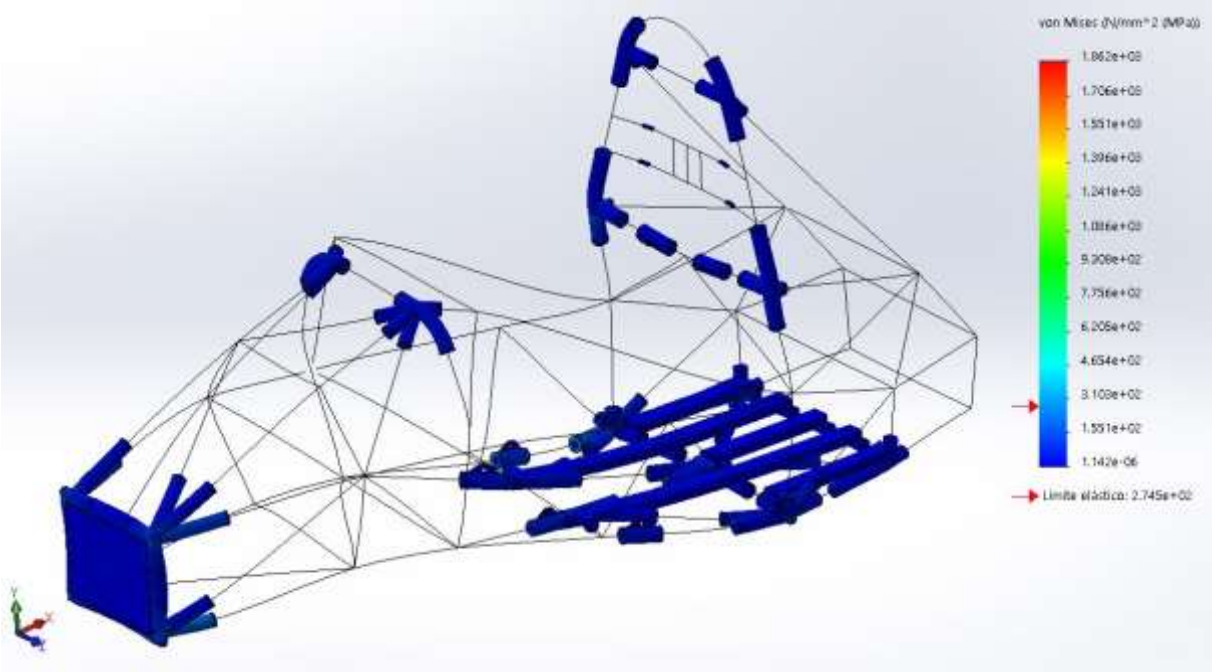


Ilustración 310. Tensiones resultantes sólidos. Fuente: propia

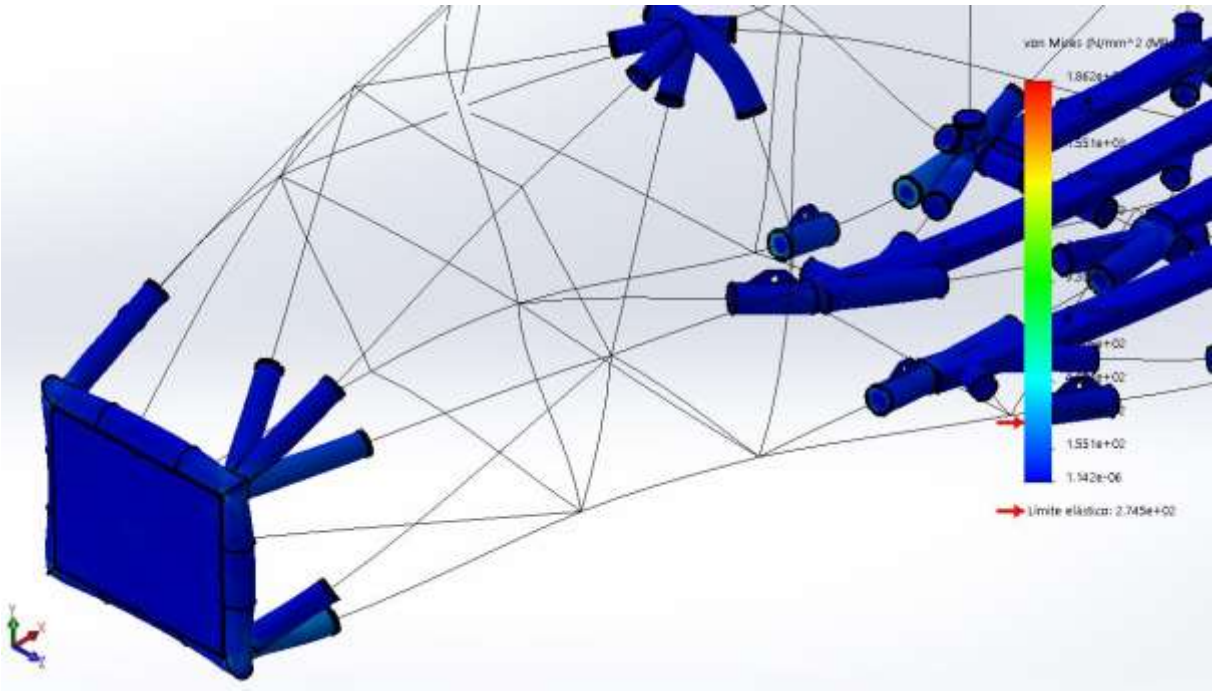


Ilustración 311. Detalle tensiones resultantes sólidos. Fuente: propia

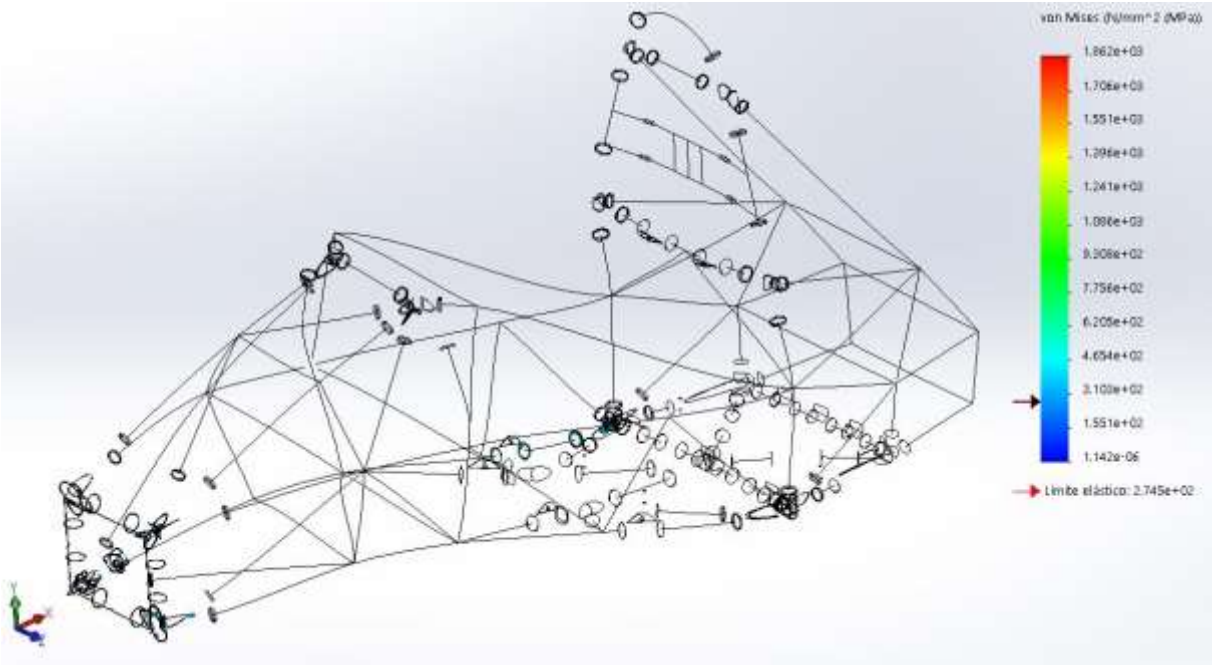


Ilustración 312. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes. Fuente: propia

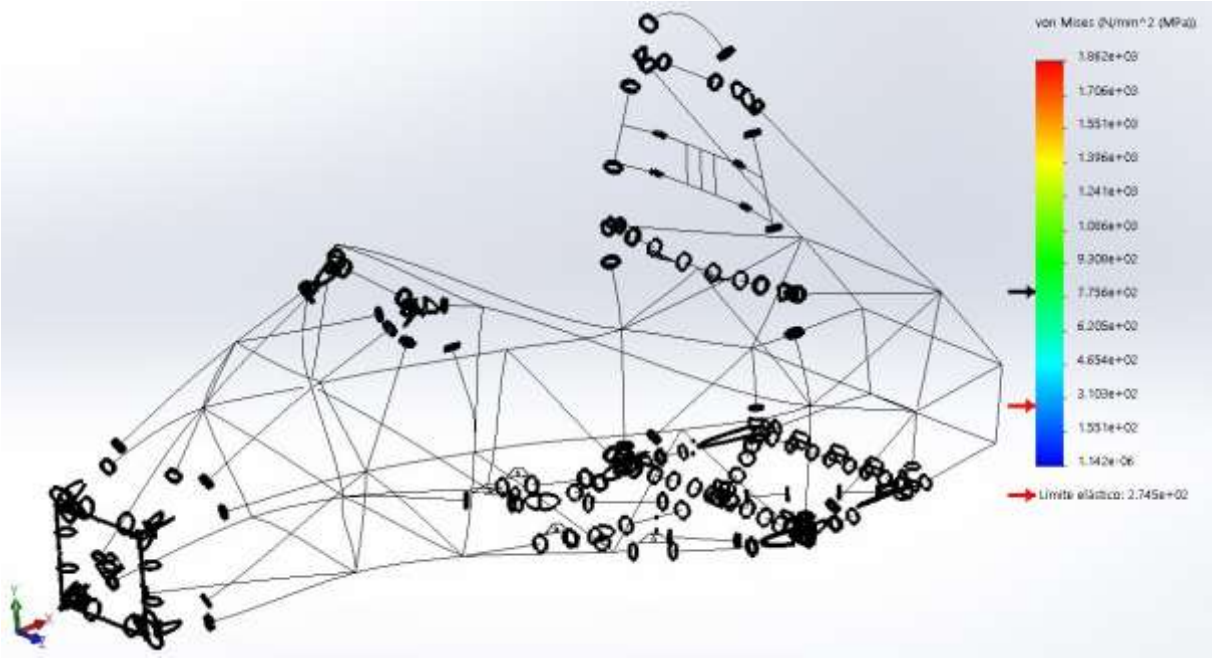


Ilustración 313. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes. Fuente: propia

- Vigas

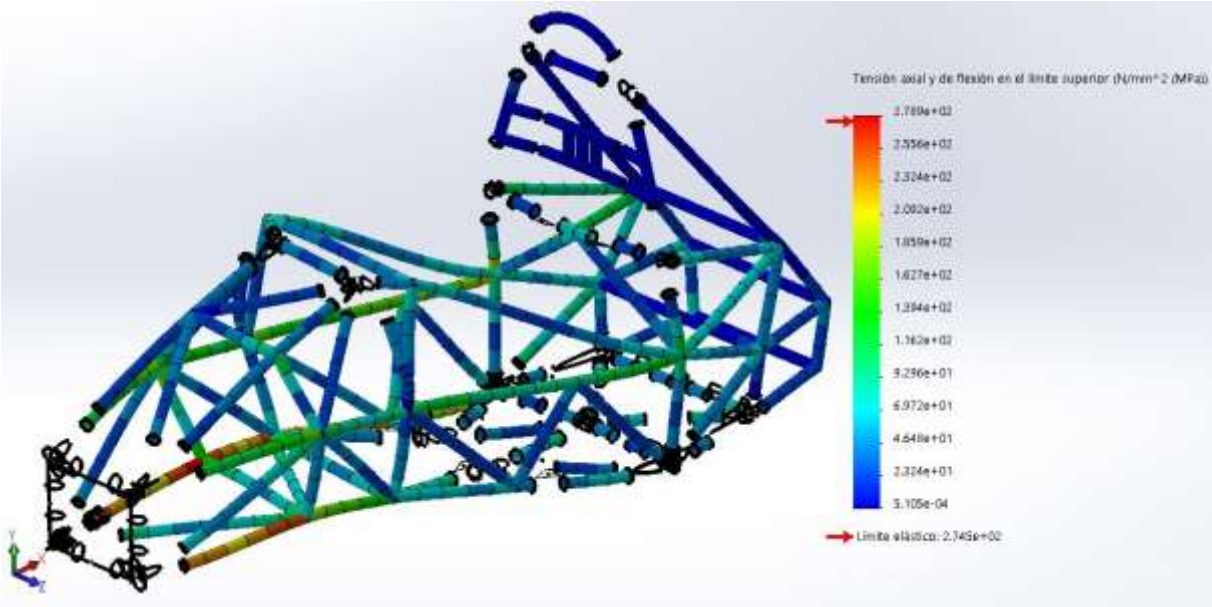


Ilustración 314. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

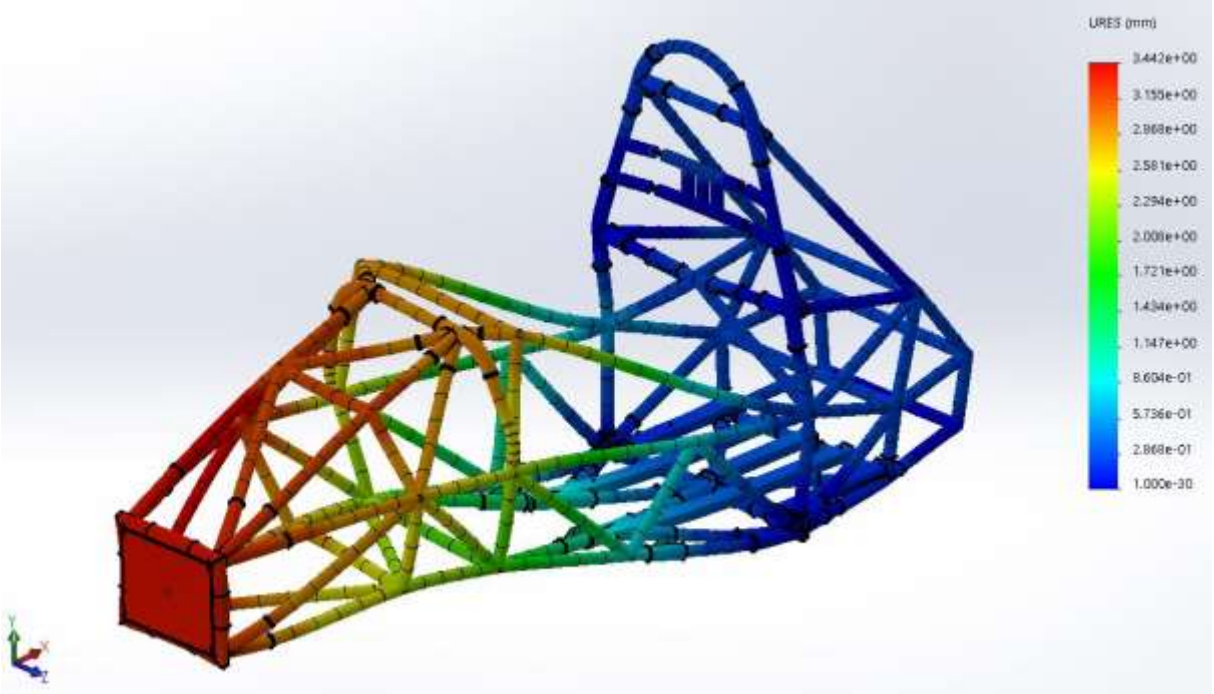


Ilustración 315. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 125. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto frontolateral	Solidos	800	MPa	274.5 MPa
	Vigas	278.9	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	3.4	mm	25mm

Se puede observar que se supera el límite elástico en los sólidos, pero dado los resultados, se deberá realizar un estudio con la modificación de la unión entre el aro principal y la base del chasis.

3.7.2.8.8. Anclajes caja de baterías

- Tensiones
  - Sólidos

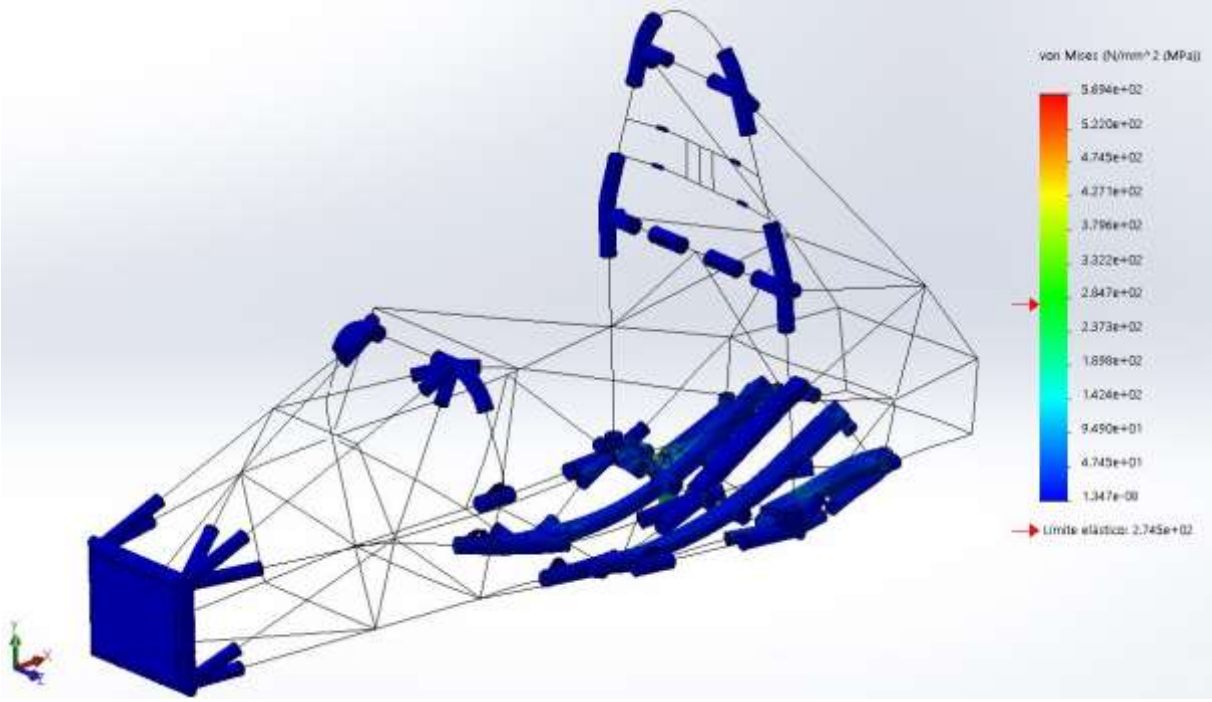


Ilustración 316. Tensiones resultantes sólidos. Fuente: propia

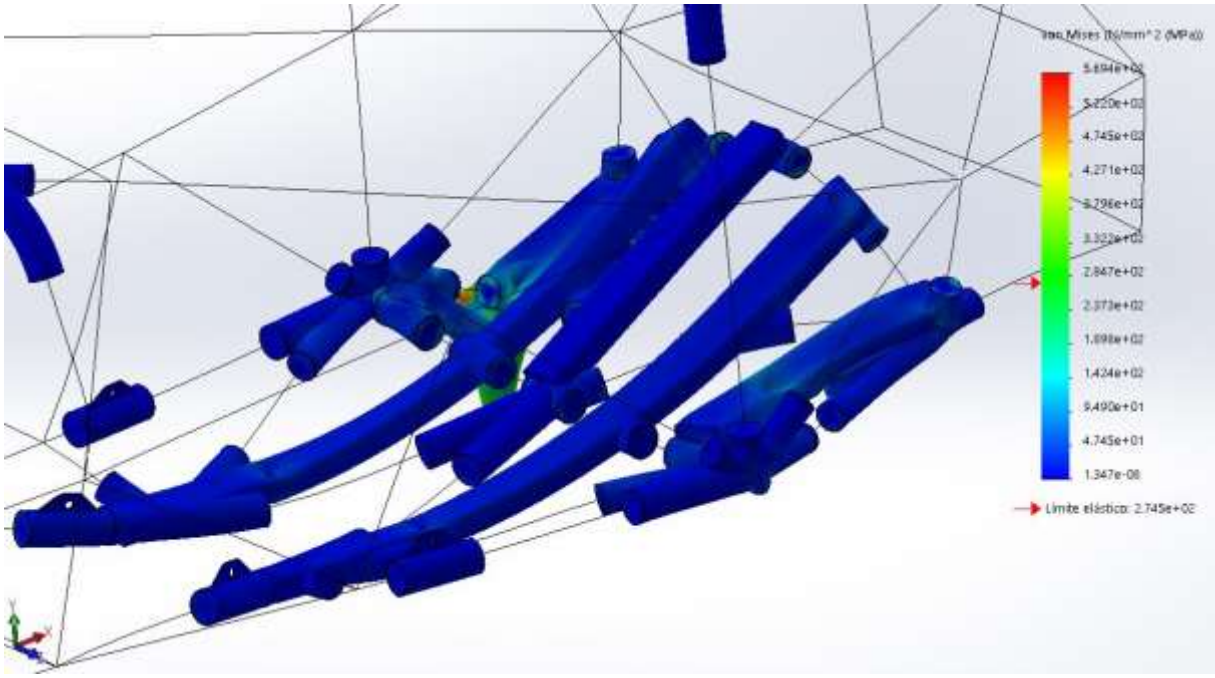


Ilustración 317. Detalle tensiones resultantes sólidos. Fuente: propia

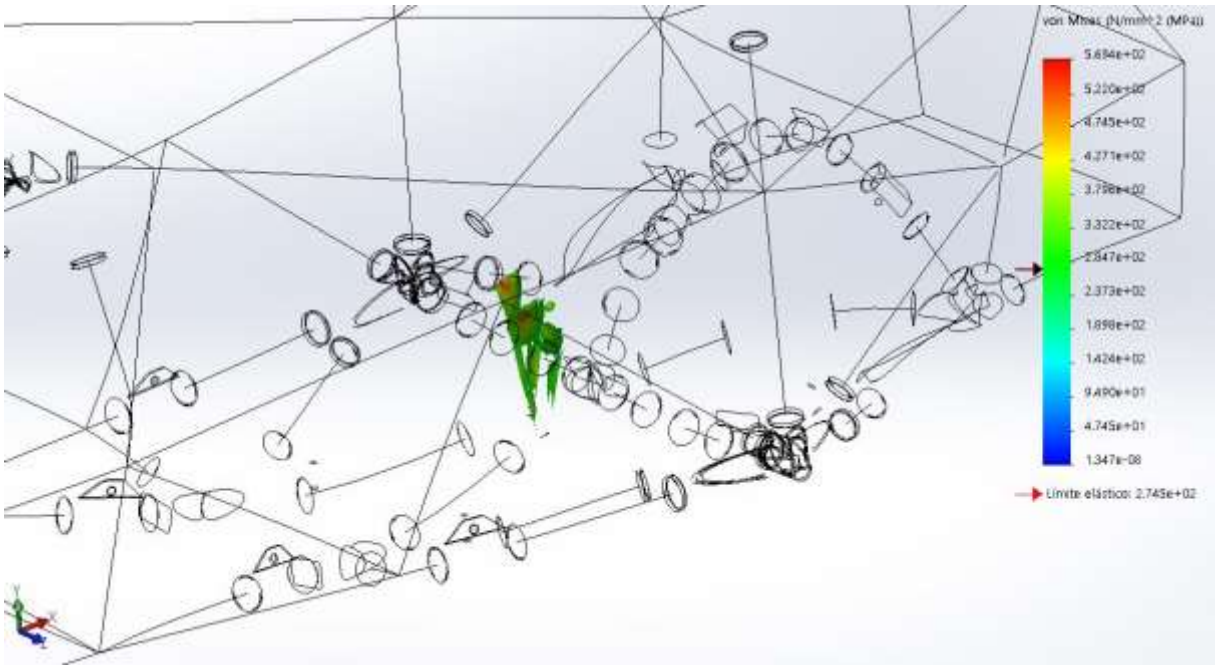


Ilustración 318. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes. Fuente: propia

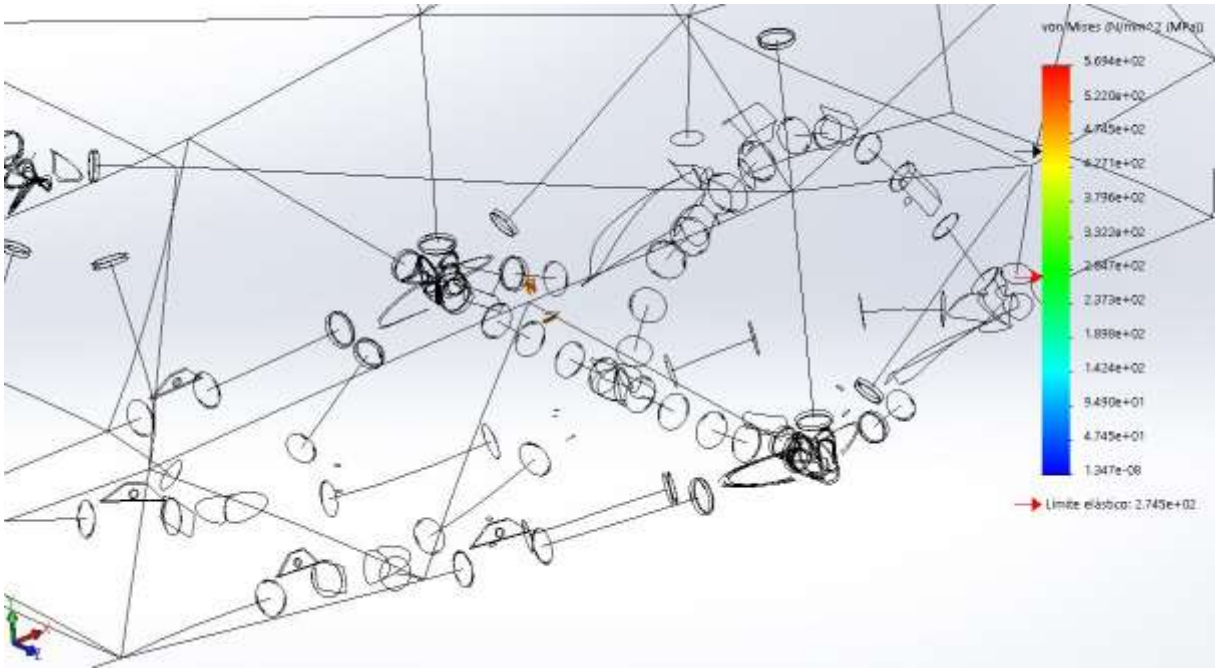


Ilustración 319. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes. Fuente: propia

- Vigas

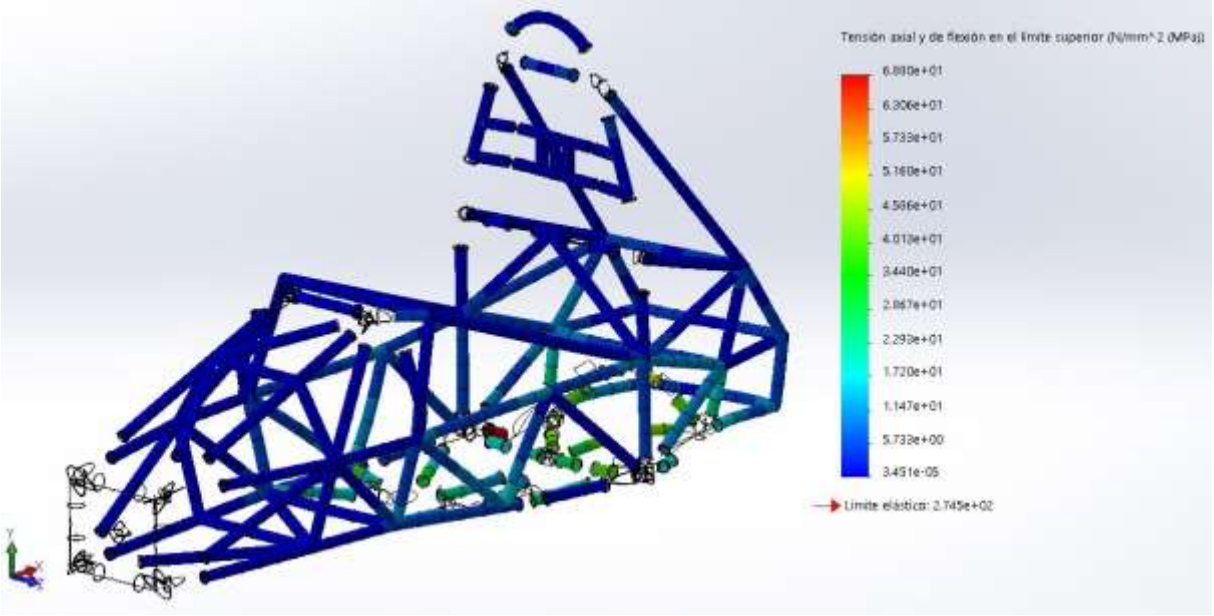


Ilustración 320. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

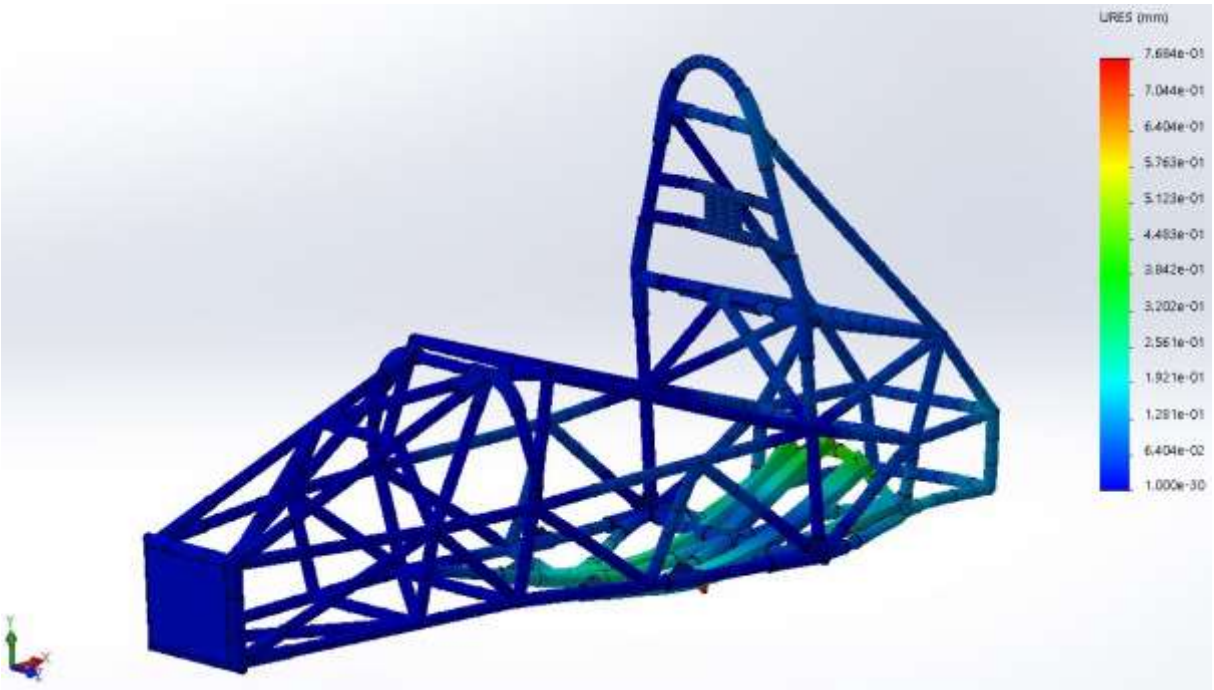


Ilustración 321. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 126. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes caja de baterías	Solidos	450	MPa	274.5 MPa
	Vigas	68.8	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.76	mm	25mm

Se observa que se supera el límite elástico en el sólido. Esto se debe principalmente al modelado la cama de la caja ya que se realizó como superficies. Se plantea realizar el estudio mediante sólidos para que los contactos entre caras queden bien recogidos.

3.7.2.8.9. Reposacabezas

- Tensiones
  - Sólidos

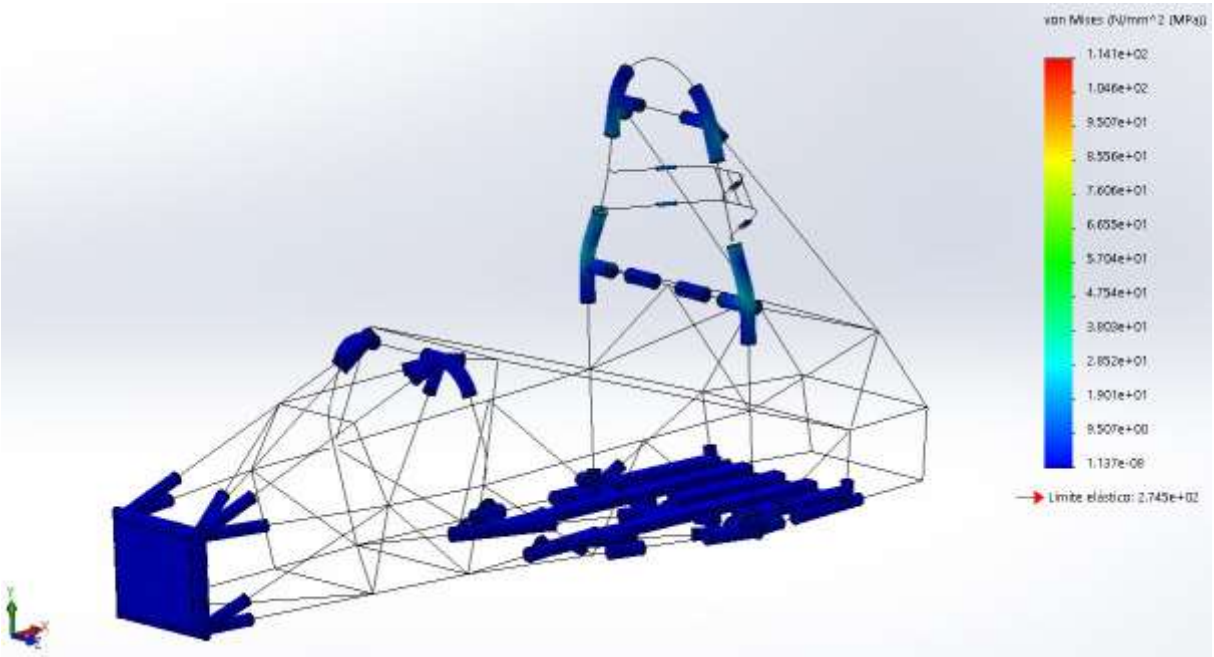


Ilustración 322. Tensiones resultantes sólidos. Fuente: propia

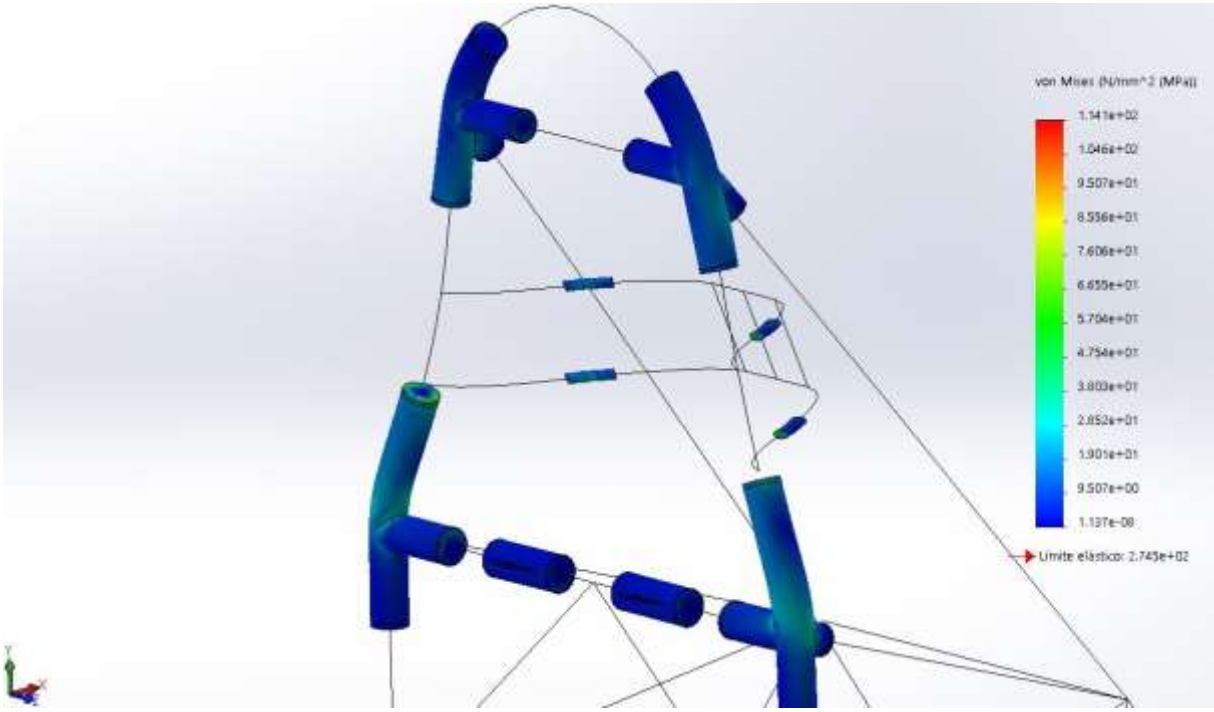


Ilustración 323. Detalle tensiones resultantes sólidos. Fuente: propia

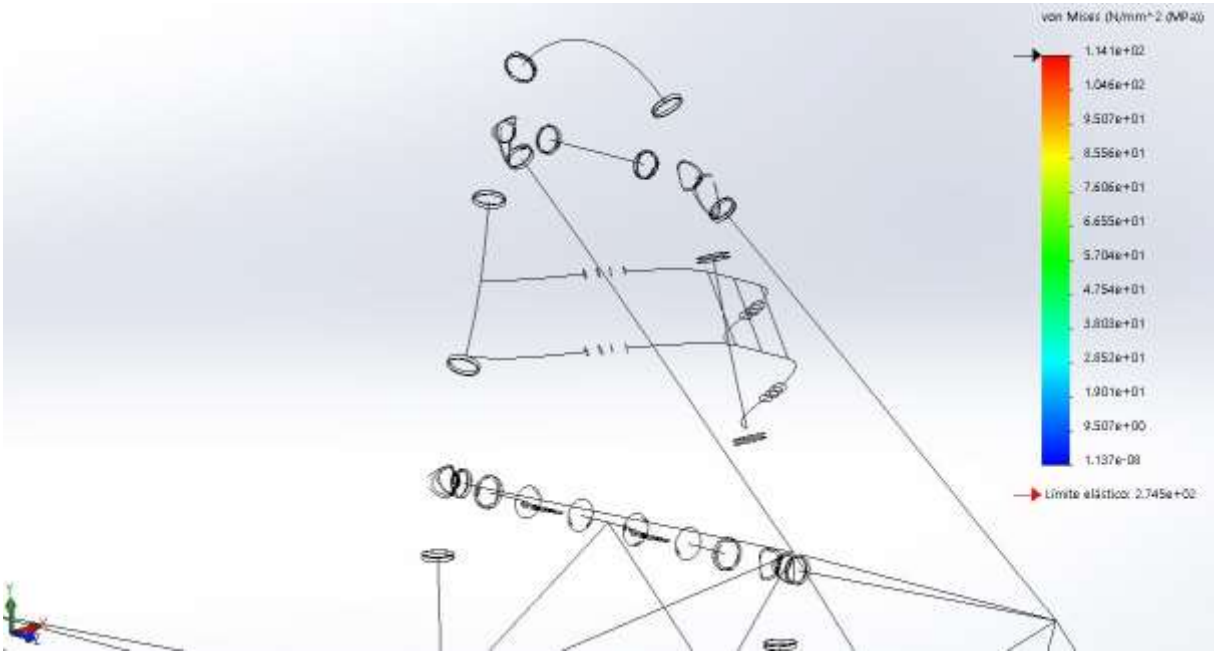


Ilustración 324. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes. Fuente: propia

- Vigas

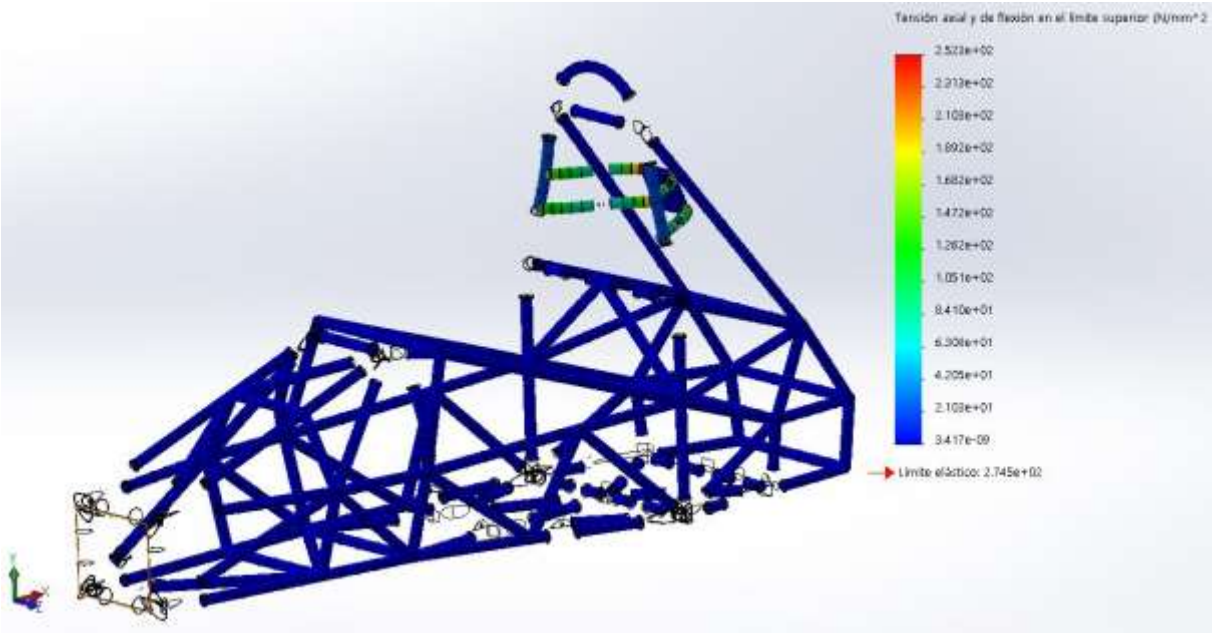


Ilustración 325. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

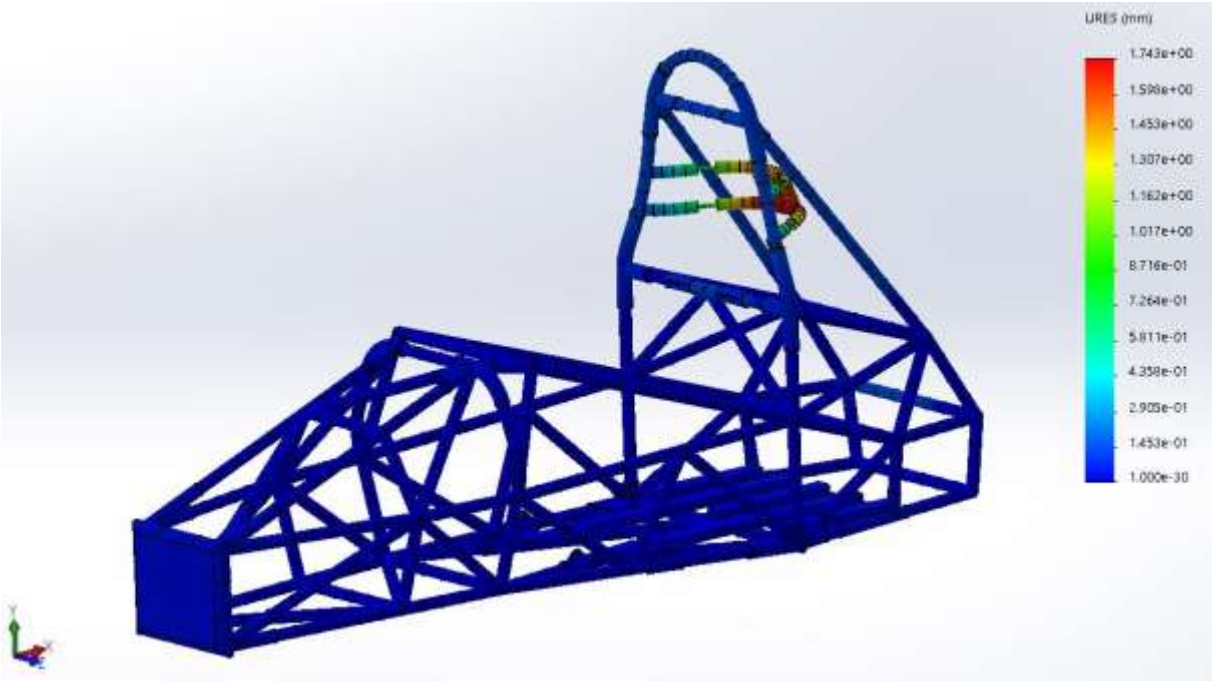


Ilustración 326. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 127. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Reposacabezas	Solidos	114.1	MPa	274.5 MPa
	Vigas	252.3	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.7	mm	25mm

3.7.2.8.10. Conclusión de la iteración

Tras realizar esta iteración, se concluye que es necesario repetir los estudios del aro frontal, el de los anclajes de los hombros y el de los anclajes de antisubmarino y regazo; dejándose planteado la realización de las modificaciones necesarias y los estudios de la unión entre el aro principal con la base del chasis.

3.7.2.9. Quinta iteración (con sólidos)

En esta iteración se introducen rigidizadores para impedir los movimientos que provocan las concentraciones de tensiones o cambios de espesores de elementos sólidos. Únicamente se simulan aquellos estudios que anteriormente superaban el límite elástico.

3.7.2.9.1. Aro principal

- Tensiones
  - Sólidos

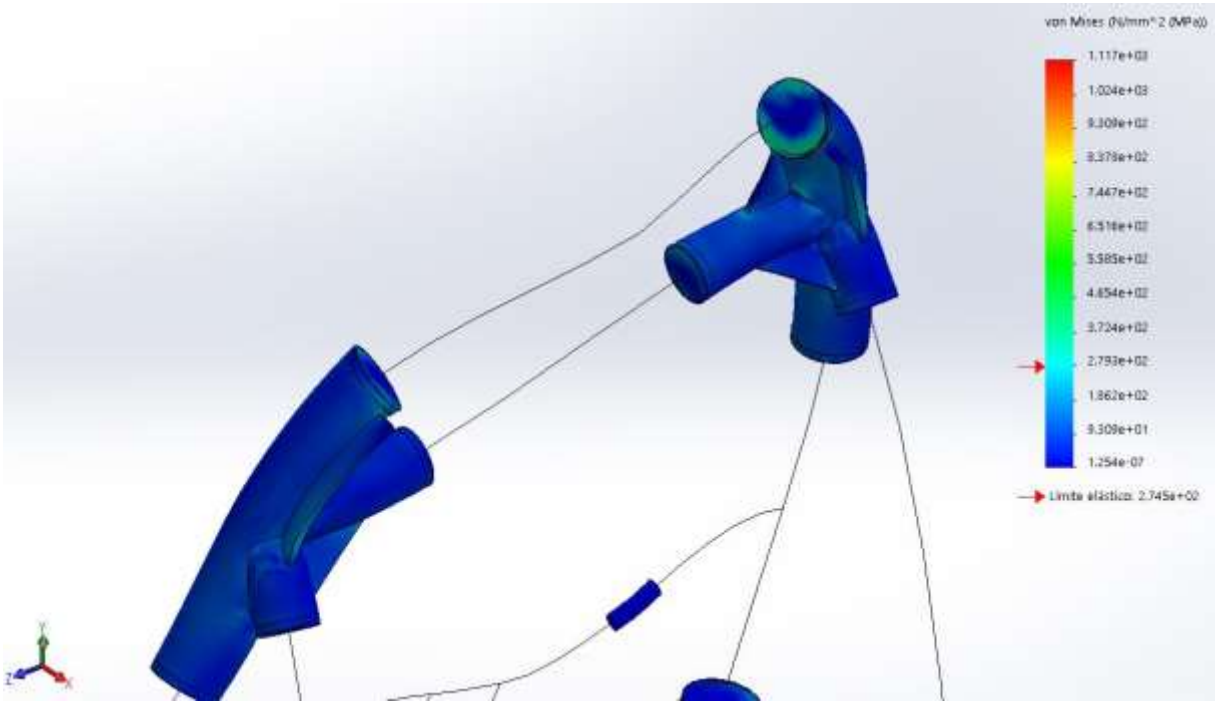


Ilustración 327. Detalle tensiones resultantes sólidos. Fuente: propia

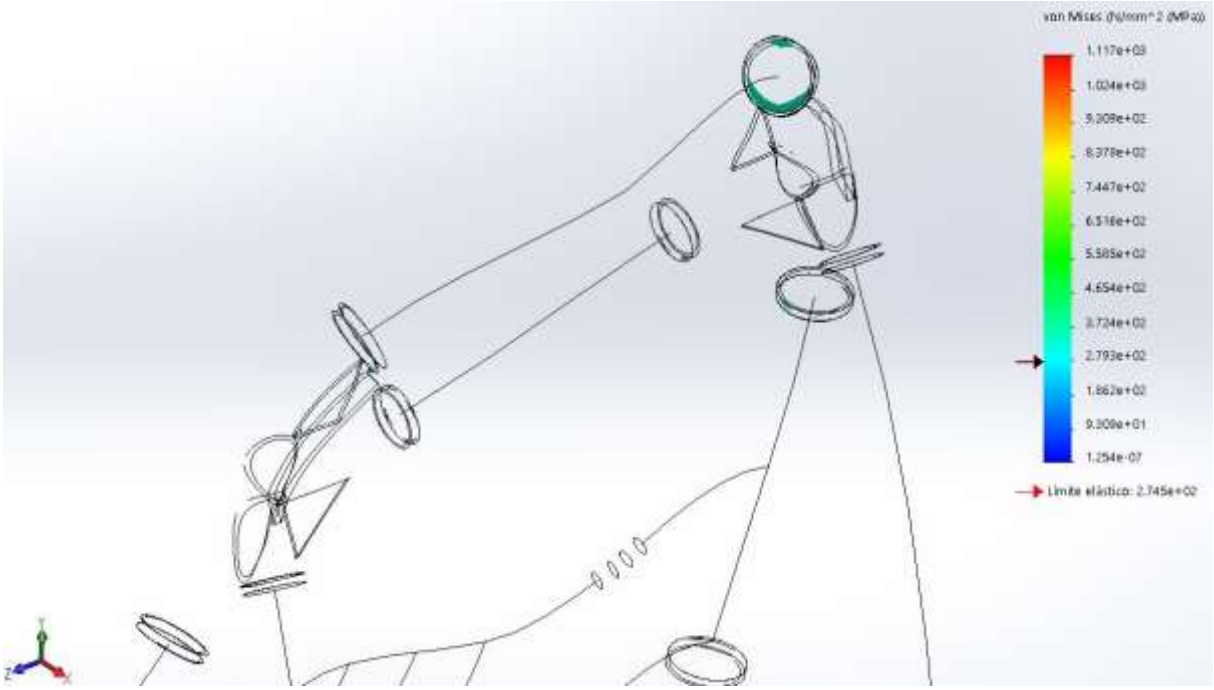


Ilustración 328. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes. Fuente: propia

Tal y como muestran las imágenes, se puede observar la reducción considerable de concentración de tensiones con la implementación de rigidizadores. De los tres elementos rigidizadores implementados, el más importante es el elemento curvo que recorre una parte del aro principal y terminando en el soporte del aro principal.

Los espesores de los rigidizadores son:

- Rigidizadores principales: 5mm
- Rigidizadores secundarios: 2mm

3.7.2.9.2. Impacto frontal

Este estudio se ha omitido ya que los resultados que se obtenidos anteriormente, señalan que habría que realizar una modificacion de la unión que une el aro principal con la base del chasis.

3.7.2.9.3. Anclajes cinturón de hombros

- Tensiones
  - Sólidos

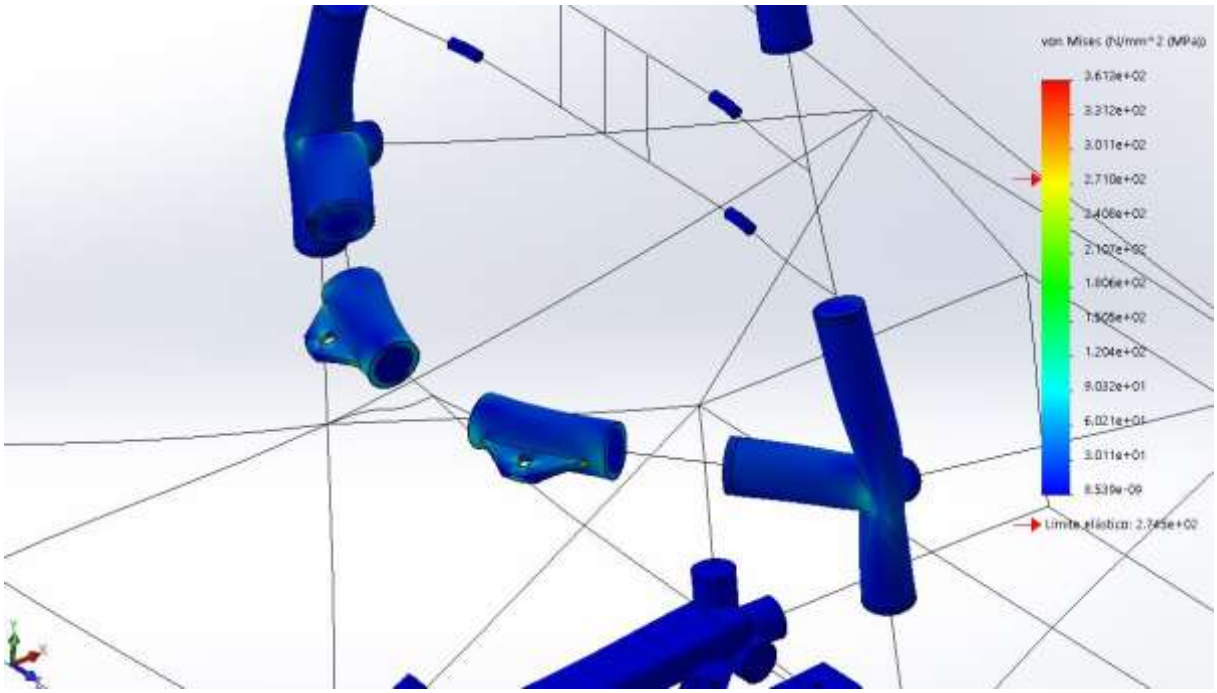


Ilustración 329. Detalle tensiones resultantes sólidos. Fuente: propia

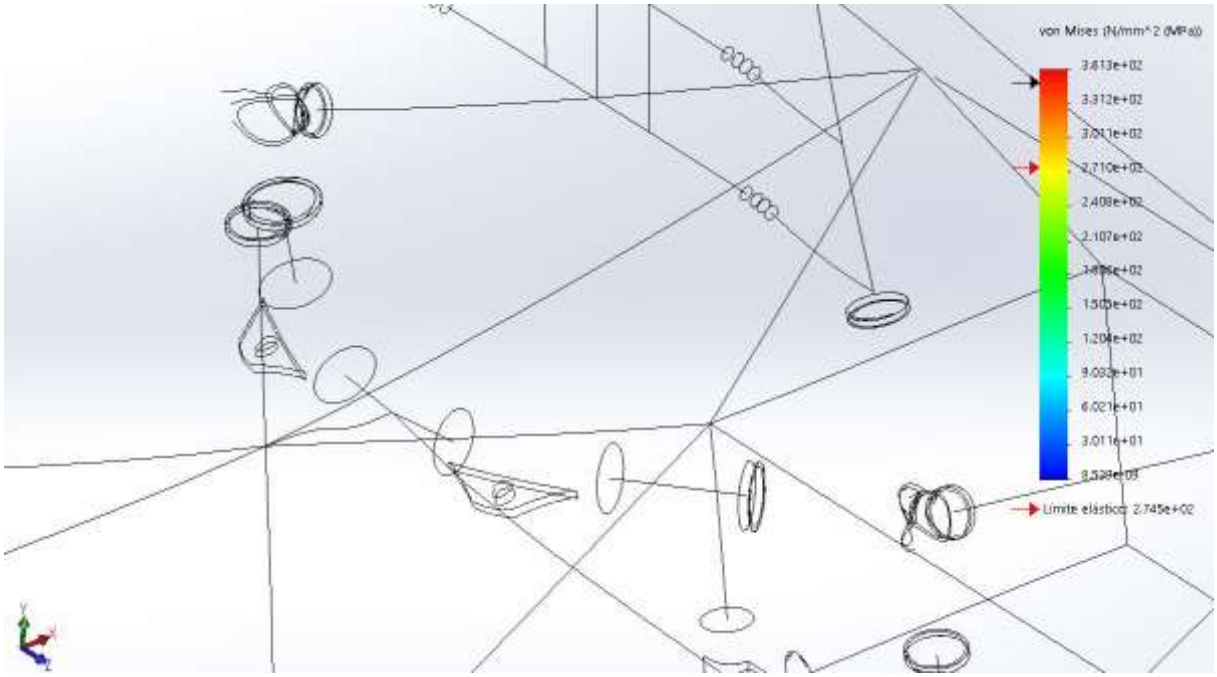


Ilustración 330. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes. Fuente: propia

El aumento del espesor de las chapas hasta los 5mm permite reducir las tensiones. Se puede comprobar que, si nos acercamos una tensión de 350MPa, correspondiente con el límite elástico de un AISI1020, no se observa concentración de tensiones.

3.7.2.9.4. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino

- Tensiones
  - Sólidos

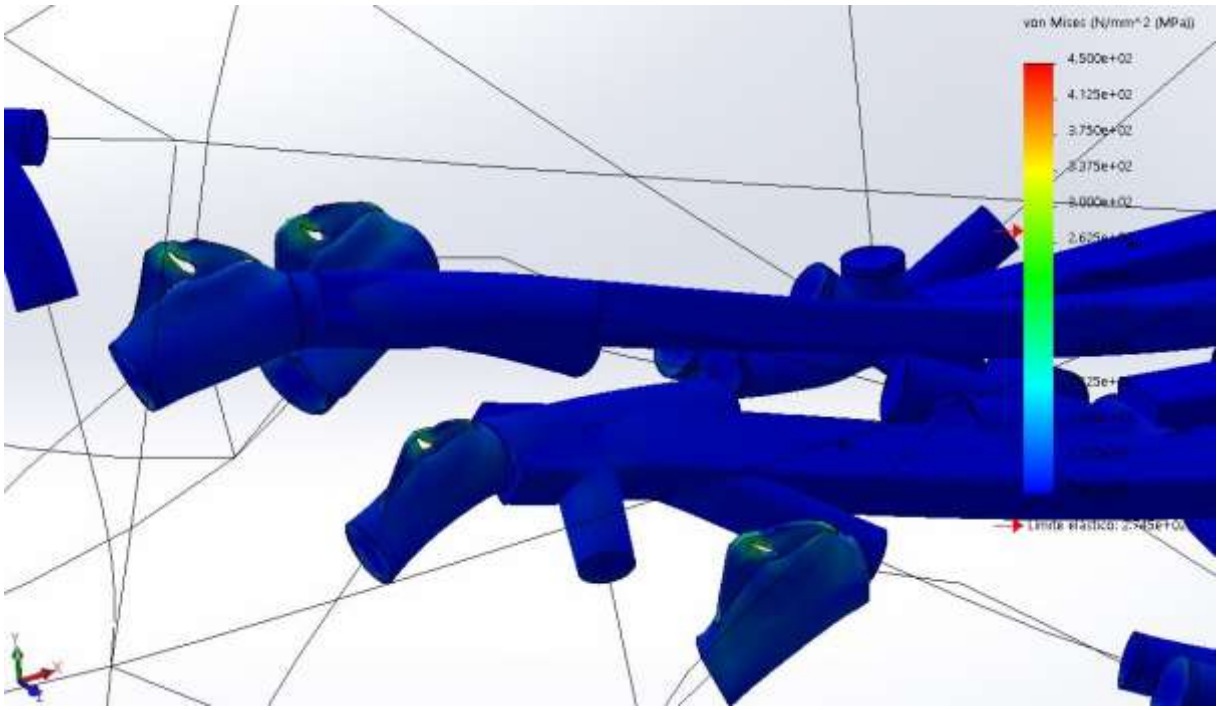


Ilustración 331. Detalle tensiones resultantes sólidos. Fuente: propia

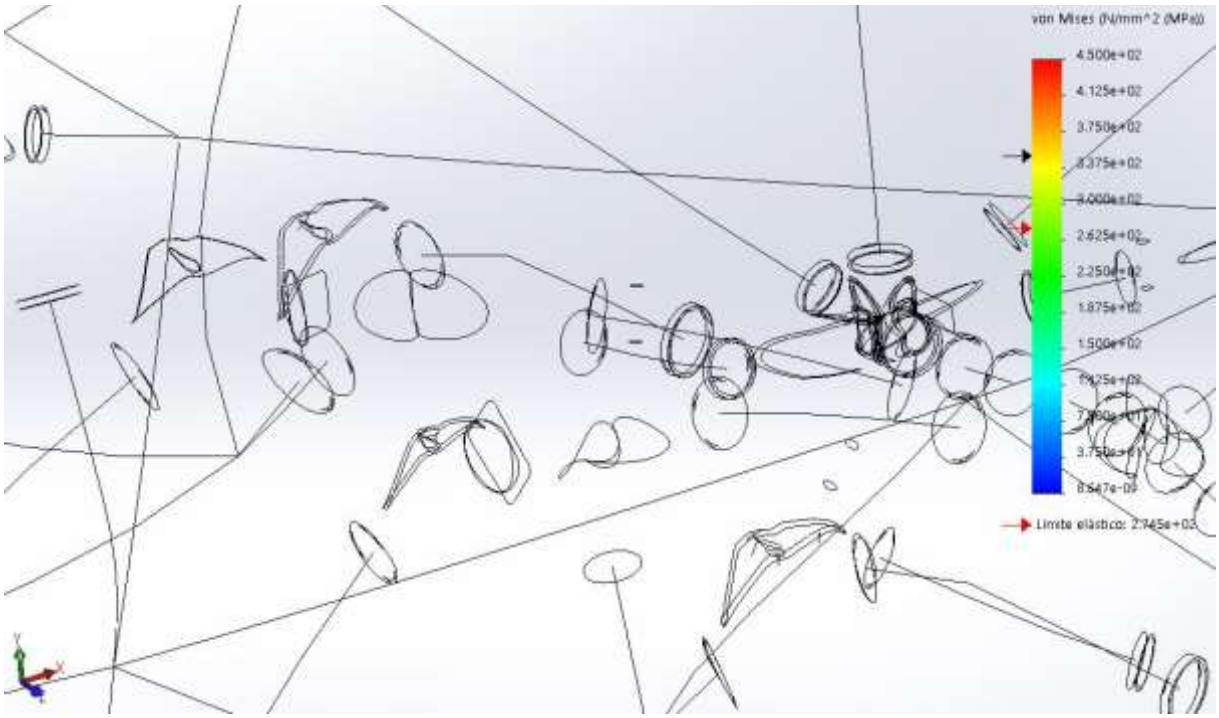


Ilustración 332. Detalle tensiones isosuperficiales resultantes. Fuente: propia

Igual que en el caso anterior, si se aumenta el espesor hasta los 5mm, se consigue reducir también las tensiones. De igual manera, a 350MPa, no queda rastro de que se superen las tensiones.

3.7.2.9.5. Impacto frontolateral

Al igual que el estudio de impacto frontal, se ha omitido debido a que los resultados mostrados anteriormente para este estudio, señalan que la unión del aro principal con la base del chasis debe modificarse, para reducir las tensiones en esos puntos.

3.7.2.9.6. Anclajes caja de baterías

Este estudio se ha omitido debido a las características del modelo. Se plantea la posibilidad de realizar el estudio con sólidos.

3.7.2.10. Conclusión final

Tras la realización de estos estudios, se concluye que el chasis cumple con los requerimientos de la normativa, a falta de modificar la unión entre el aro principal y la base del chasis, que queda planteado.

El material empleado debe aumentarse a un AISI 1020, material con mayor resistencia que el AISI1010.

- Masa: 83.41 kg
- Longitud: 2410mm
- Altura máxima: 1240mm
- Anchura máxima: 690mm

Los perfiles empleados y su cantidad se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 128. Dimensiones perfiles finales. Fuente: propia

Tipo sección	Dimensiones (mm)	Longitud (mm) / unidades (unid)	Empleo
Circular hueca	48x2	1107.44	Mamparo frontal
	40x3	650	Barra anclajes cinturones de hombros
	40x2	5371.9 (2055.64 Aro frontal + 3316.26 Aro principal)	Aro principal y aro frontal
	35x2	31549.42	Resto de componentes
	10x2	1375.74	Reposacabezas
Rectangular	50x30x2.6	2786.41	Cama caja de baterías
Chapa	Espesor = 5mm	6 unid (anclajes cinturones) + 2 unid (rigidizadores)	Rigidizadores aro principal y anclajes cinturones regazo, antisubmarino y hombros
Chapa	Espesor = 2mm	2 unid	Rigidizadores aro principal
Chapa	Espesor = 1.5mm	1 unid	Mamparo frontal

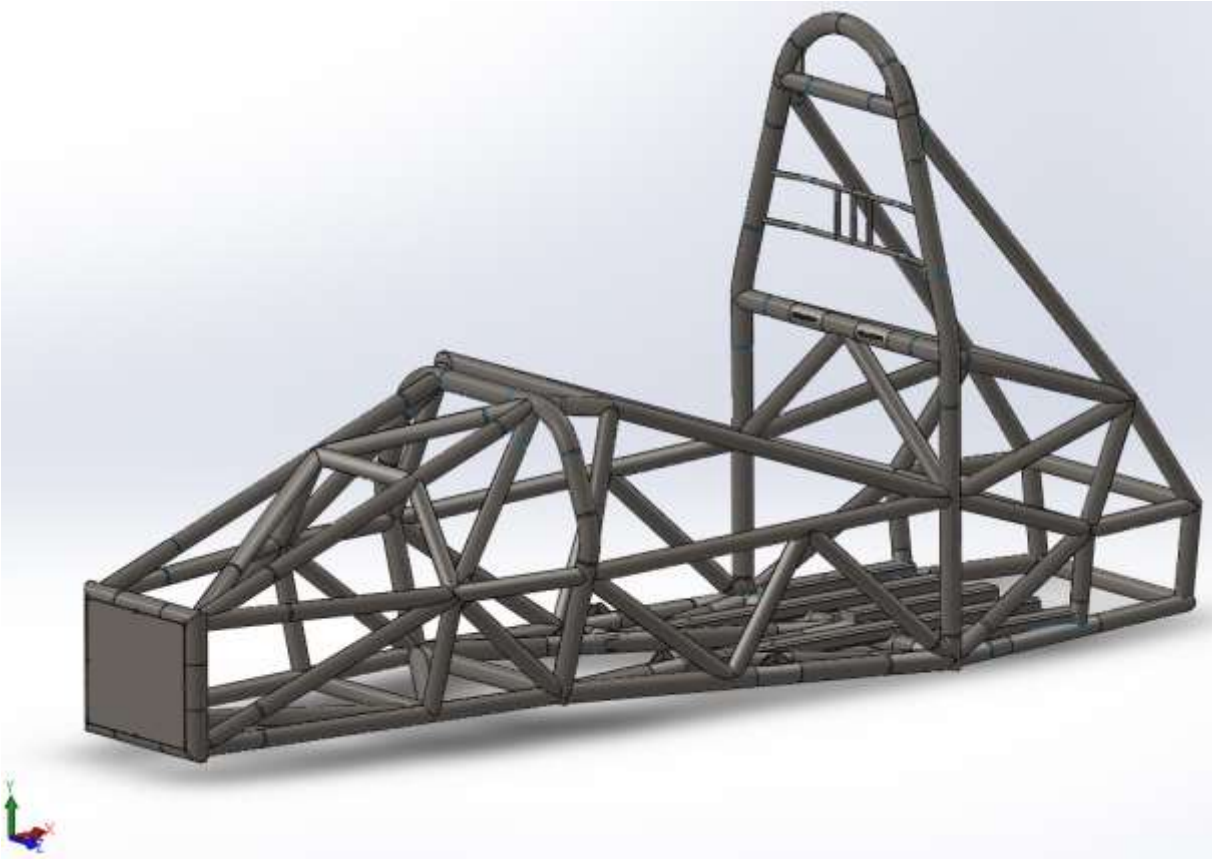


Ilustración 333. Vista delantera. Fuente: propia

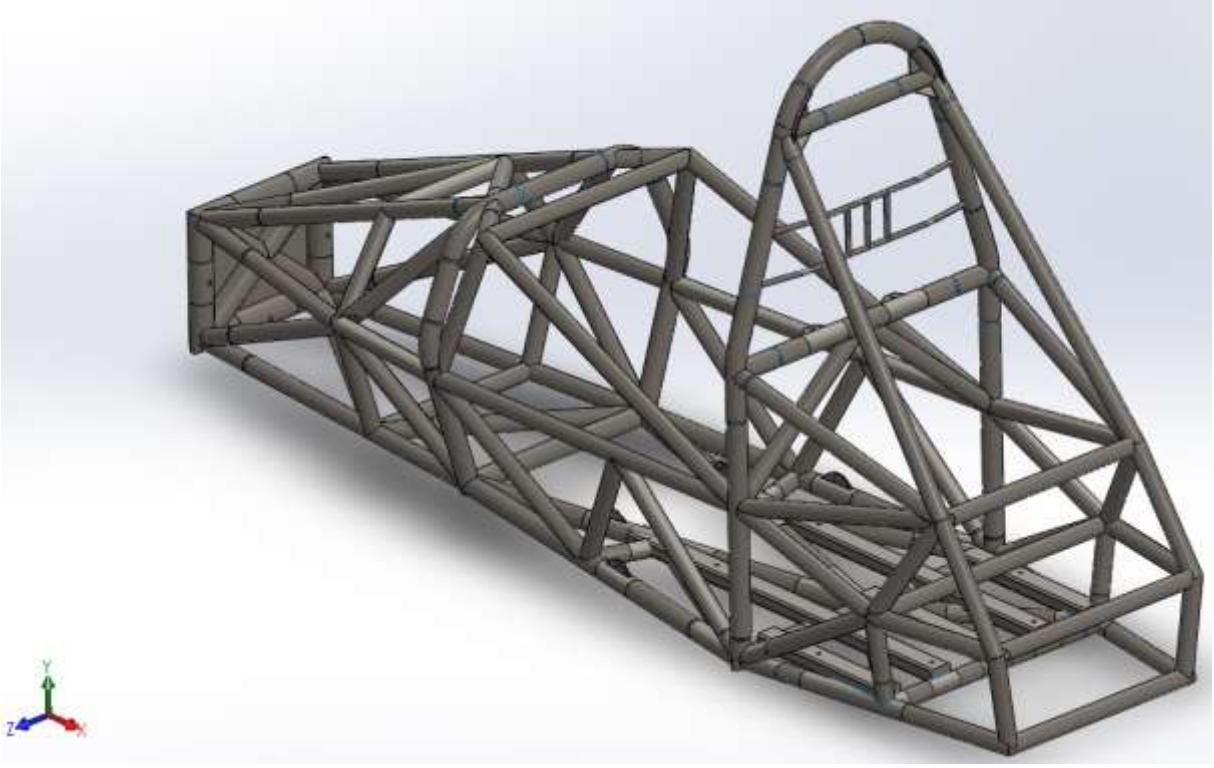


Ilustración 334. Vista trasera. Fuente: propia

3.7.2.11. Otras simulaciones útiles

Estas simulaciones se tratas de simulaciones no expuestas en la normativa pero que son necesarias para cuando el vehículo esté en servicio. Todas estas simulaciones se realizan empleando el modelo en elementos estructurales.

3.7.2.11.1. Levantamiento del vehículo

Esta simulación consiste en el levantamiento del vehículo para apoyarlo en unas bases posteriormente. Aquí se quiere estudiar que no existe ningún problema en el momento en el que está totalmente levantado.

Para ello, se realiza la siguiente condición de contorno:

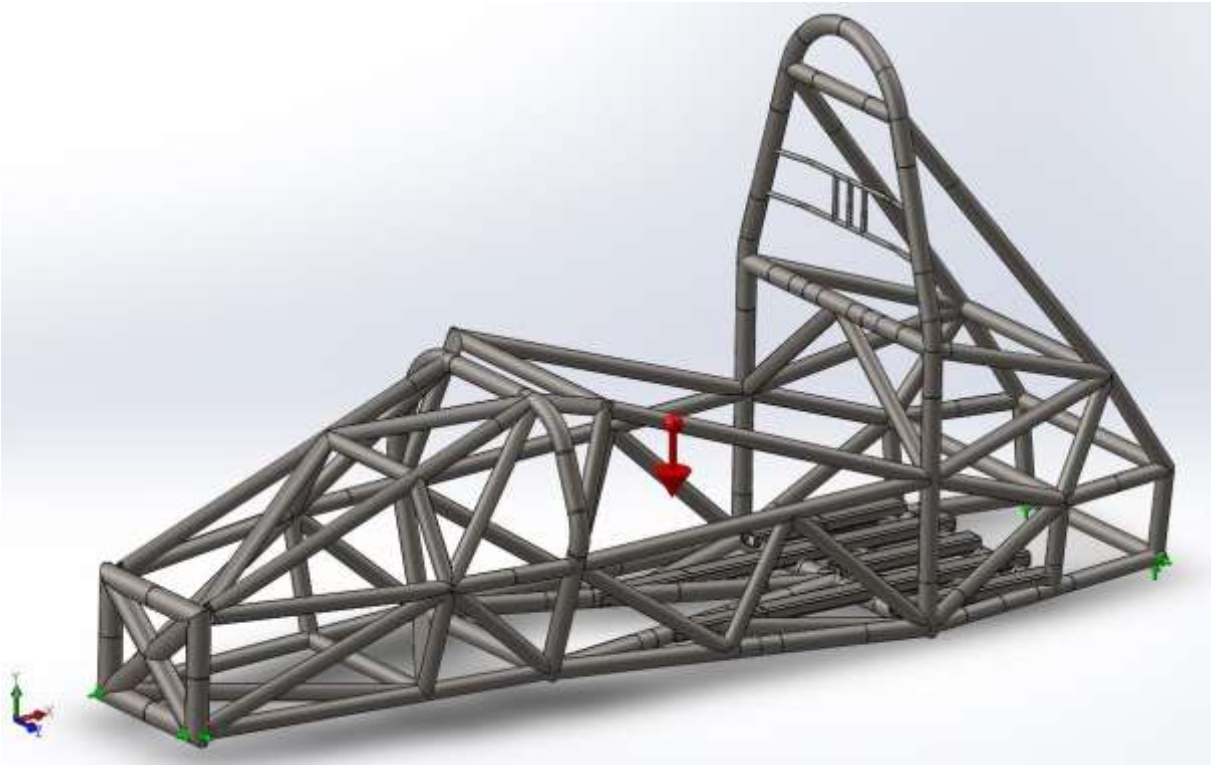


Ilustración 335. Condición de contorno. Fuente: propia

Se puede ver que se ha restringido los cuatro vértices inferiores, los que componen la parte delantera y la parte trasera de la base del chasis. Esta restricción permite el giro de las barras, por lo que únicamente se impiden los desplazamientos de estos puntos. Como carga, se ha aplicado una gravedad, que se sitúa en el centro de masas del chasis, pero que su valor se ha determinado suponiendo un peso total del vehículo, tal y como se muestra a continuación:

Sabiendo que el chasis pesa aproximadamente 85kg, y que se supone que el vehículo pesará unos 400kg en total (valor obviamente sobredimensionado), utilizando la segunda ley de Newton,

$$F = m \cdot a \rightarrow a = g \rightarrow F = m \cdot g \qquad Ec.\ 5.1$$

Se tiene que:

$$F_T = m_T \cdot g \rightarrow m_T = b \cdot m \rightarrow F_T = b \cdot m \cdot g \qquad Ec.\ 5.2$$

Donde:

- m_T es la masa total del monoplaza
- m es la masa del chasis
- b es la relación entre ambas masas
- g es la gravedad, aproximadamente $10 m/s^2$
- F_T es la fuerza puntual que se produce por la acción de la gravedad en el centro de masas del chasis.

Sustituyendo,

$$m_T = b \cdot m \rightarrow 400 = b \cdot 85 \rightarrow b = \frac{400}{85} = 4{,}7 \approx 5 \qquad Ec.\ 5.3$$

$$F_T = 5 \cdot m \cdot 10 \rightarrow F_T = m \cdot 50 \qquad Ec.\ 5.4$$

Es decir, que la carga de la gravedad que se introduciría en la simulación es de $50 m/s^2$

Tras simular el estudio, los resultados obtenidos son:

- Vigas

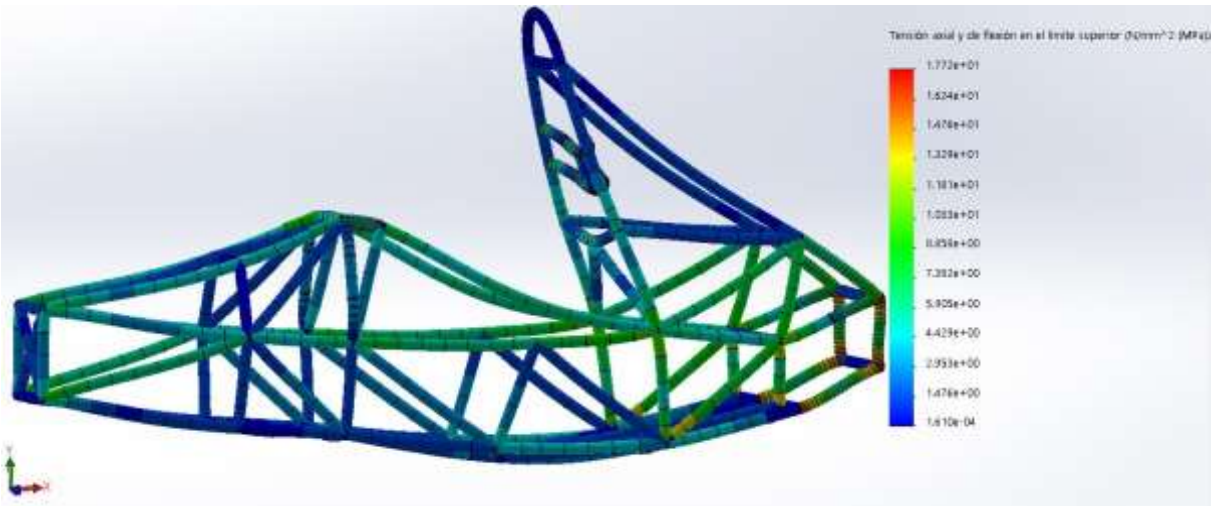


Ilustración 336. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

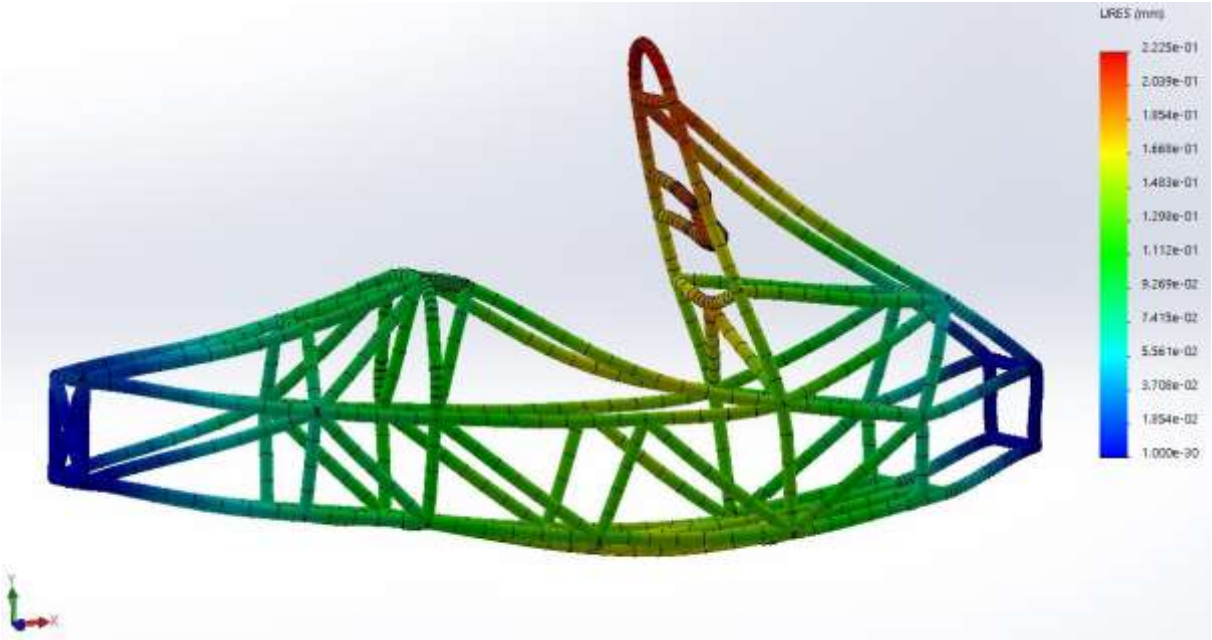


Ilustración 337. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusión

Se puede comprobar que los resultados mostrados se encuentran muy por debajo de los requerimientos de la normativa, por lo que no es necesario realizar ninguna otra acción.

3.7.2.11.2. Vehículo levantado con apoyo al suelo

Esta simulación supone que el chasis del monoplaza se encuentra apoyado en unas bases situadas en los aros principales. Para ello, y conociendo la segunda ley de Newton, la condición de contorno de esta simulación se realiza fijando los mismos vértices de la simulación anterior, los cuatro extremos de la base del chasis, y asignando unas cargas en los vértices donde irían dichas bases. Suponiendo una carga total del vehículo de 400kg (4000N), se le asigna a cada nodo una carga de 1000N. Esto se puede ver en la siguiente imagen:

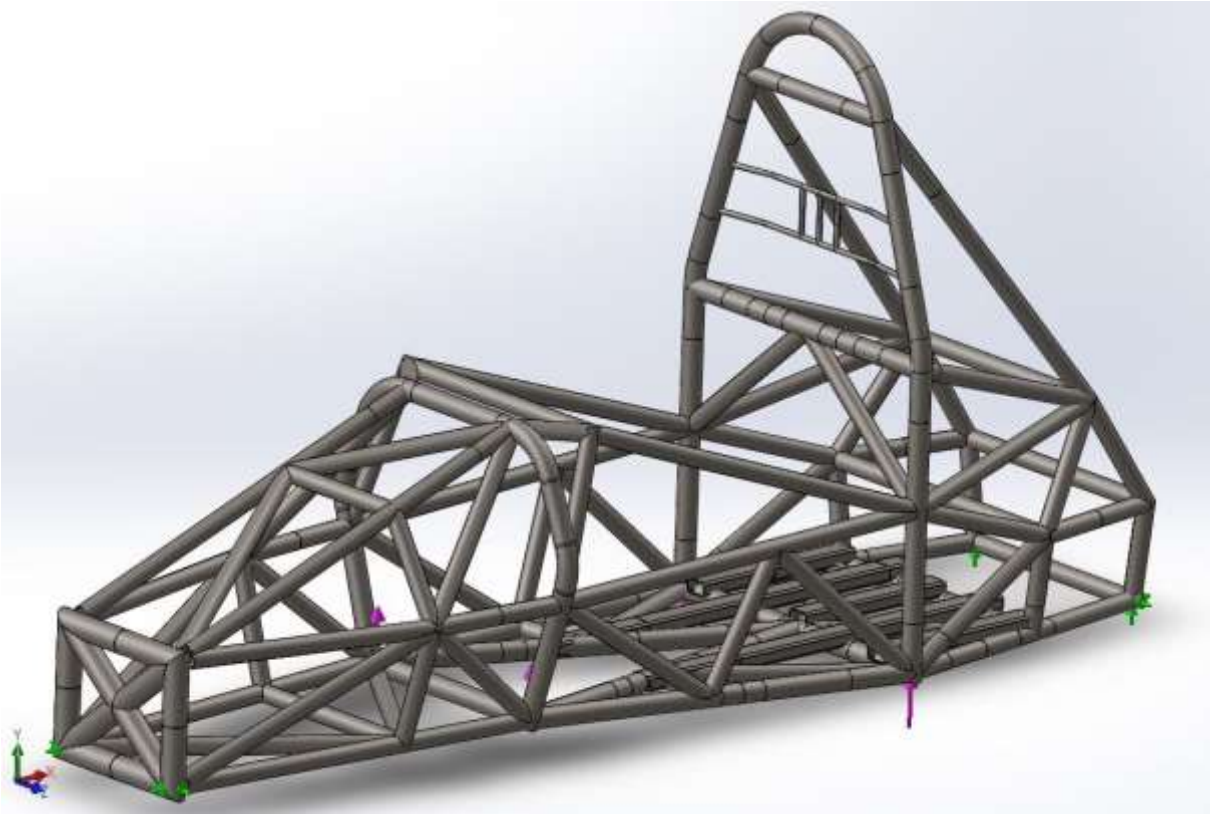


Ilustración 338. Condición de contorno. Fuente: propia

Tras realizar la simulación siguiendo esta hipótesis, se consiguen los siguientes resultados:

- Vigas

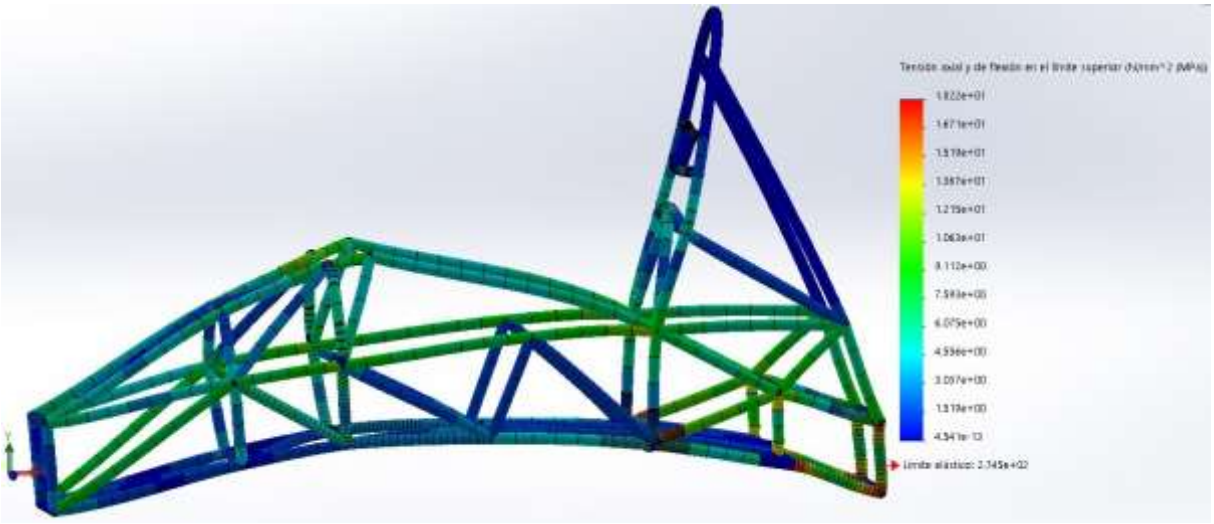


Ilustración 339. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

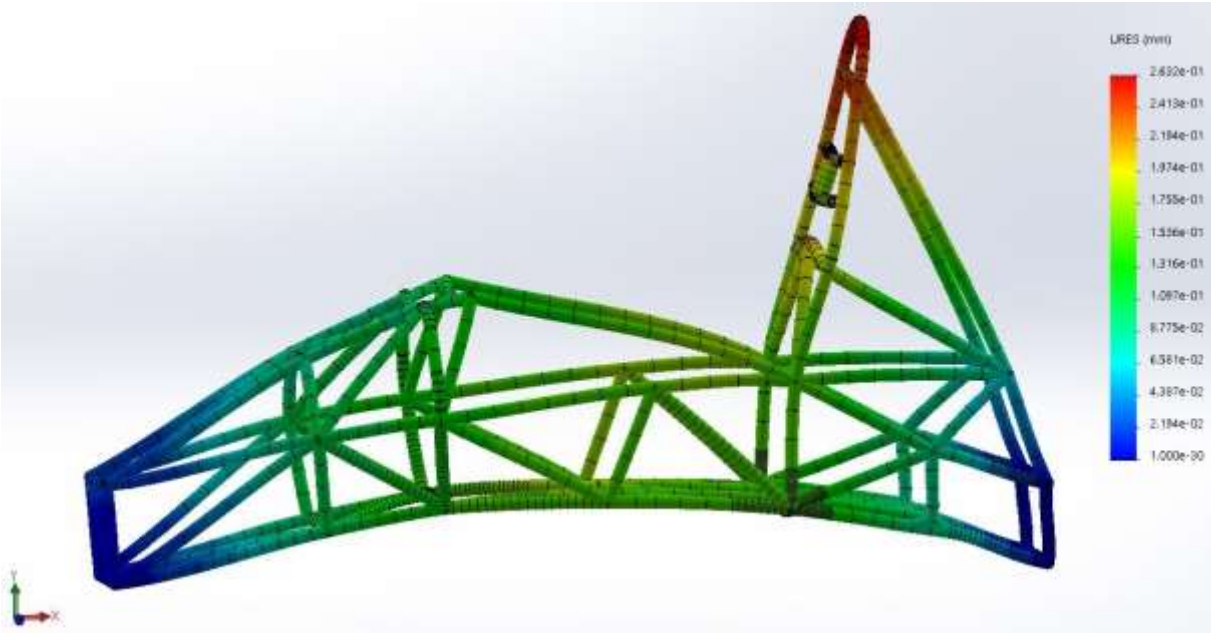


Ilustración 340. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusión

De forma igual a la simulación anterior, se puede observar que las tensiones y los desplazamientos resultantes están muy alejados a los requerimientos de la normativa, por lo que no es necesario realizar otra acción en esta hipótesis.

3.7.2.11.3. Efecto de las suspensiones

En este estudio se busca analizar el efecto de la suspensión en el chasis, conociendo la tercera ley de Newton. Además, se emplea ley de Hook, muy similar en su forma matemática a la segunda ley de Newton.

$$Ley\ de\ Hook: F = -k \cdot x \qquad Ec.\ 5.5$$

Donde:

- F es la fuerza del muelle
- k es la constante de elasticidad del muelle
- x es la distancia total que ha recorrido un extremo del muelle, estando el otro fijo.

Tomando los valores obtenidos del Trabajo de Fin de Grado de Jesús Gómez, se puede calcular esta fuerza. Los valores empleados son algo superior a los reflejados en dicho TFG.

$$F = -\frac{20kN}{m} \cdot 100mm = -2kN \quad Ec.\ 5.6$$

Esta es la fuerza que se produce en cada uno de los muelles y que se transmite al vehículo, tal y como refleja la primera ley de Newton.

En cuanto a las condiciones de contorno empleado ha sido la siguiente:

- Se restringe las translaciones, pero no las rotaciones, de los aros principal y frontal, es decir, los nodos que los unen a la base del chasis.
- Se aplica una carga en el centro de la barra que une los anclajes del triángulo de suspensión superior. Además, dado que la suspensión estará con una inclinación, es necesario considerar que esta fuerza total, estará repartido tanto en horizontal como en vertical (ejes Z e Y). Se suponen una inclinación de 67.5º con respecto a la horizontal, por lo que:

$$Fz = 2kN \cdot \cos(67.5^o) = 88.45N \quad Ec.\ 5.7$$

$$Fy = 2kN \cdot \sin(67.5^o) = 1998.04N \quad Ec.\ 5.8$$

Obviamente, la carga en la dirección Z apunta hacia el interior del vehículo, mientras que la carga en la dirección Y apunta hacia arriba.

En la siguiente imagen, se puede observar las condiciones de contorno anteriormente mencionado.

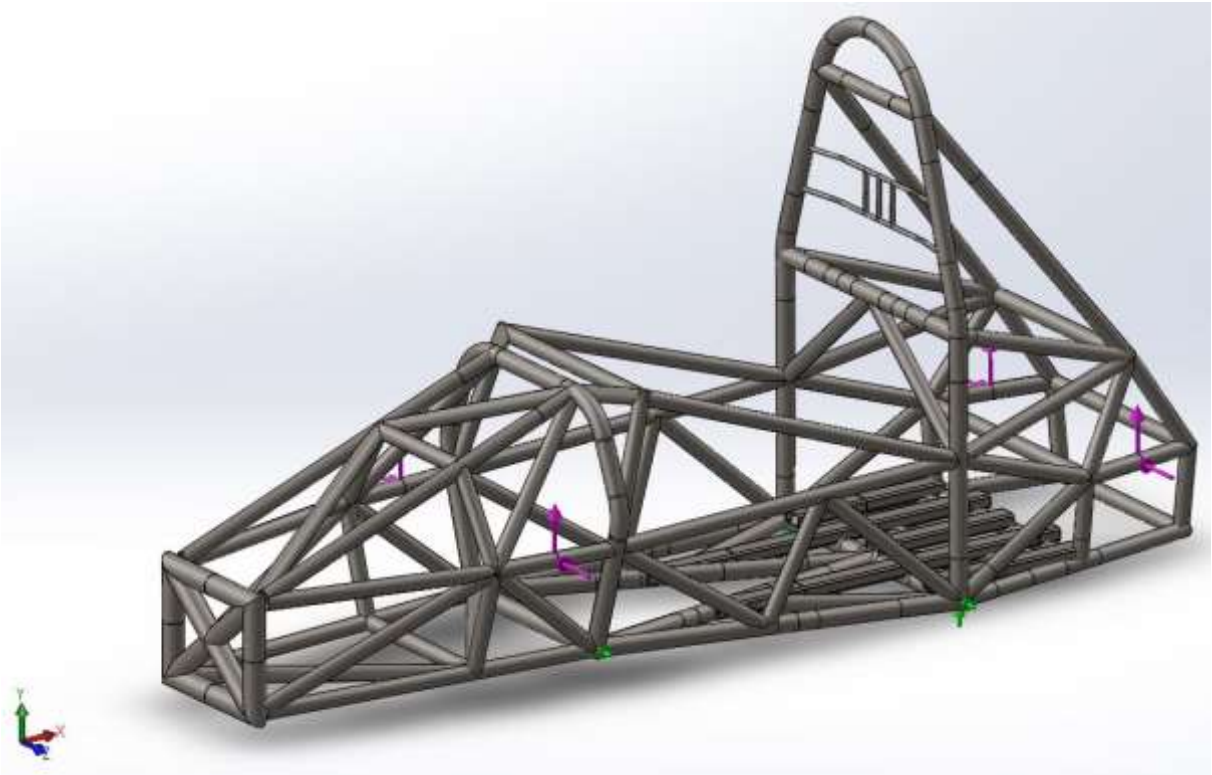


Ilustración 341. Condición de contorno. Fuente: propia

Tras realizar la simulación siguiendo esta hipótesis, se consiguen los siguientes resultados:

- Vigas

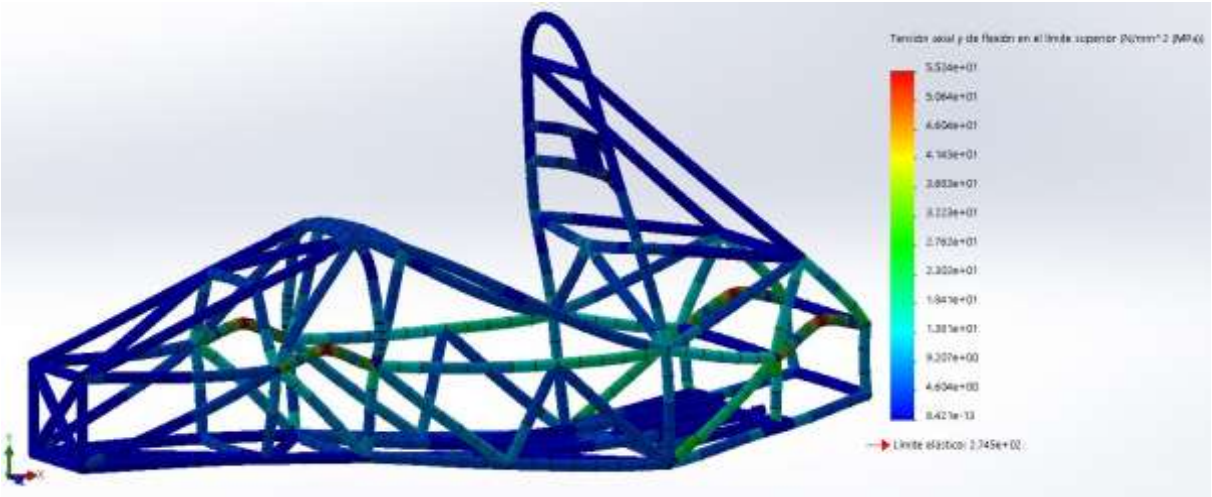


Ilustración 342. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

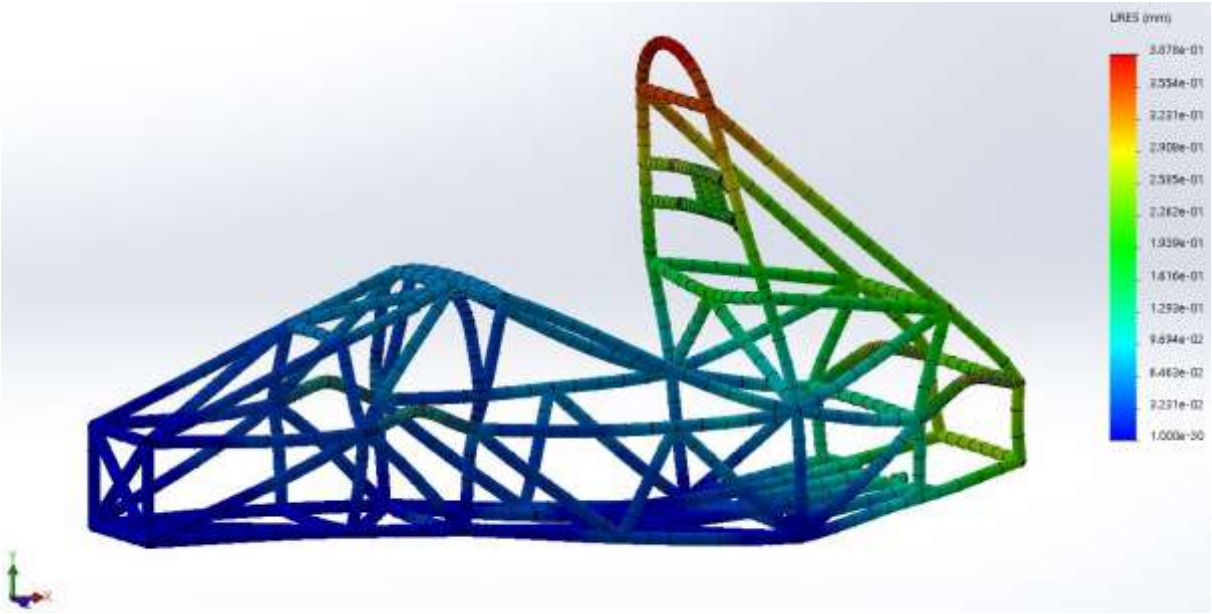


Ilustración 343. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusión

Se puede observar que las tenciones obtenidas se encuentran muy por debajo de las condiciones marcadas por la normativa, así como el desplazamiento. Por lo tanto, no es necesario realizar ninguna otra acción para esta hipótesis.

3.7.2.12. Comparación con otros materiales

Con esta comparación, se busca ver el efecto de los diferentes materiales en el peso del vehículo. No se modifica las dimensiones de los perfiles. Únicamente se supone que no hay ningún impedimento, ni económico, ni logístico u otro que indicase su inviabilidad en la realidad. Los materiales empleados son:

- Acero aleado: Suponemos que el material empleado es un acero aleado 4130 con las siguientes propiedades mecánicas:

Tabla 129. Propiedades mecánicas Acero Aleado 4130

Propiedades	Valor	Unidades
Densidad	7850	kg/m3
Tensión máxima de rotura	670	MPa
Limite elástico	435	MPa
Modulo elástico	205	GPa
Coeficiente de poisson	0.29	-

Obviamente, al ser un acero, su densidad es muy similar al AISI-1020, pero la importancia de este material es que, dada su resistencia, permite emplearse perfiles mucho menos a los del AISI-1020, consiguiéndose una reducción importante de peso. Esto último no se ha realizado dado que requeriría otro análisis de dimensionado.

- Aluminio: Suponemos el empleo de una aleación de aluminio 5454-H34 con las siguientes propiedades mecánicas:

Tabla 130. Propiedades mecánicas Aluminio 5454-H34

Propiedades	Valor	Unidades
Densidad	2690	kg/m3
Tensión máxima de rotura	303	MPa
Limite elástico	241	MPa
Modulo elástico	70.3	GPa
Coeficiente de poisson	0.33	-

No se está considerando que los aros principales deban ser de acero, por lo que la masa obtenida no es del todo realista, pero si una buena aproximación a la real.

- Fibra de carbono: Suponemos que se va a emplear perfiles fabricados con el material procedente de Hexcel AS4C (3000 filamentos) con las siguientes propiedades mecánicas.

Tabla 131. Propiedades mecánicas Fibra de Carbono Hexcel AS4C (3000 filamentos)

Propiedades	Valor	Unidades
Densidad	1780	kg/m3
Tensión máxima de rotura	4654	MPa
Limite elástico	-	MPa
Modulo elástico	231GPa	GPa
Coeficiente de poisson	-	-

No se está considerando que los aros principales deban ser de acero, por lo que la masa obtenida no es del todo realista, pero si una buena aproximación a la real.

- PVC: Si se decidiese realizar un prototipo a escala real del chasis, se elegiría este material debido, principalmente a su facilidad de ensamblaje y obtención, además de su economía. Sus propiedades mecánicas se resumen a continuación:

Tabla 132. Propiedades mecánicas PVC

Propiedades	Valor	Unidades
Densidad	1650	kg/m3
Tensión máxima de rotura	50.3	MPa
Limite elástico	23.8	MPa
Modulo elástico	7.03	GPa
Coeficiente de poisson	-	-

No se está considerando que los aros principales deban ser de acero, por lo que la masa obtenida no es del todo realista, pero si una buena aproximación a la real.

Los resultados obtenidos, se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 133. Peso del vehículo modificando el material y sin variar las secciones de los perfiles

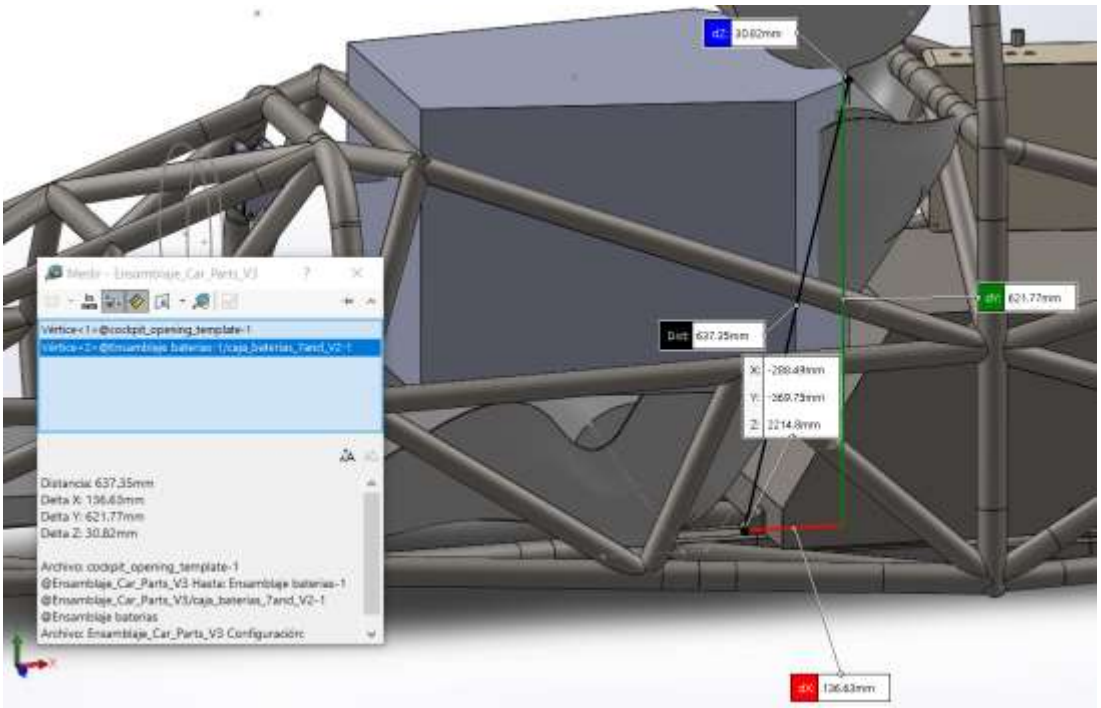
	Acero AISI-1020	Acero aleado 4130	Aleación Aluminio 5445-H34	Fibra de carbono Hexcel AS4C (3000 filamentos)	PVC
Peso chasis (kg)	83.41	83.41	28.51	19.81	13.78

Como se muestra en la tabla, el material del chasis es muy importante ya que se permite una reducción considerable de peso y aumentándose la resistencia mecánica. Ahora bien, para ello es necesario disponer de la tecnología adecuada, así como de los recursos.

Un aspecto relevante de esta tabla es que muestra claramente la reducción de peso debido a la incorporación de fibra de carbono en el vehículo, por lo que sería interesante dar este salto lo antes posible ya que lo convertiría más competitivo.

3.7.2.13. Corrección de fallo

Tras una revisión completa del chasis, se descubre que existe una vulneración de la normativa, en el que se impide que el área de abertura del cockpit sea la adecuada y, por tanto, la plantilla atraviese de forma adecuada. En la siguiente imagen se aprecia el error:



Midiendo la distancia necesaria, se observa que es necesario abrir el habitáculo unos 13cm. Esta abertura, se realiza de forma longitudinal, sin afectar a las dimensiones totales del chasis, pero si a la distancia entre ejes y a la posición de la gravedad.

Tras este cambio, es necesario verificar que no existen cambios significativos con los cálculos del mismo modelo, pero con el habitáculo menor. Esto es, tomar el chasis del punto 3.5.2.7.4 para compararlo con este nuevo. El resultado de las simulaciones de este nuevo chasis se presenta a continuación:

3.7.2.13.1.1. Aro principal

- Tensiones

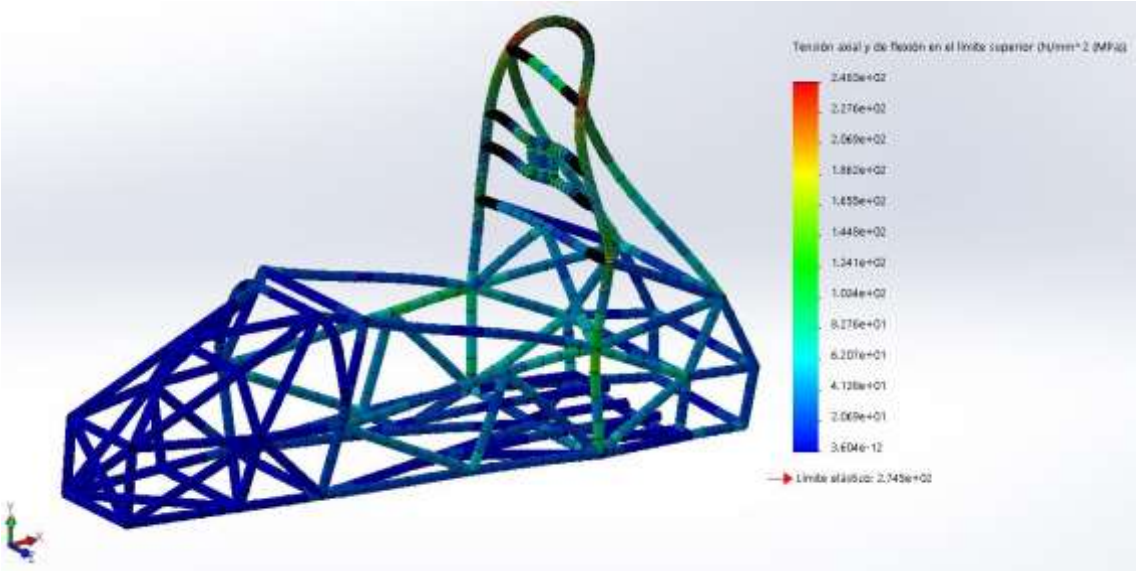


Ilustración 344. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

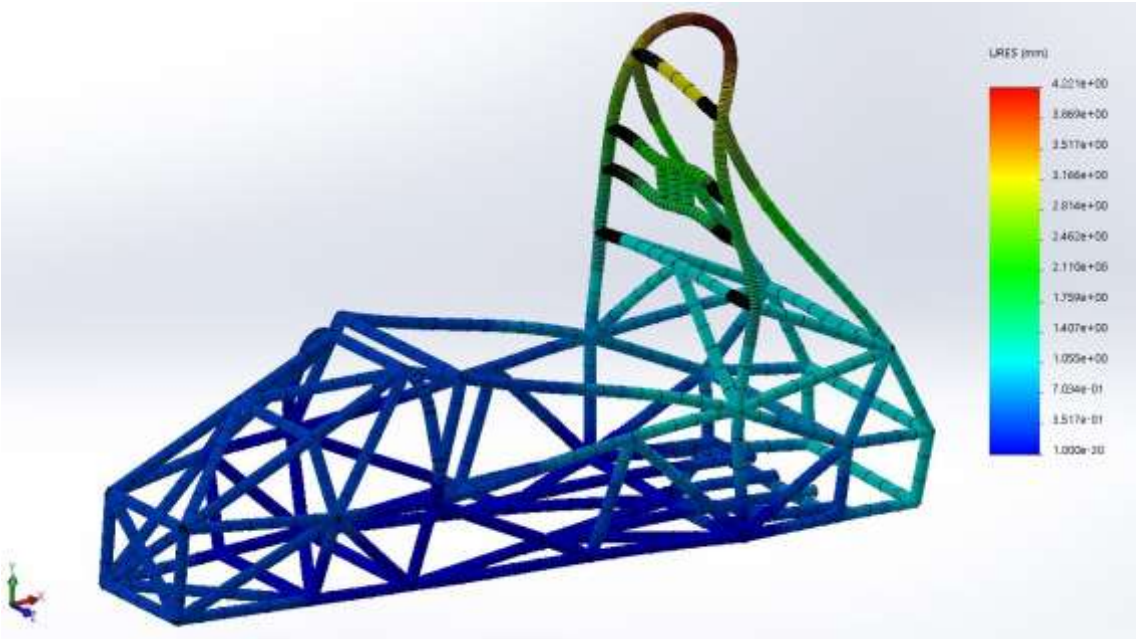


Ilustración 345. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 134. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro principal	Vigas	248.3	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	4.22	mm	25mm

3.7.2.13.1.2. Aro frontal

- Tensiones

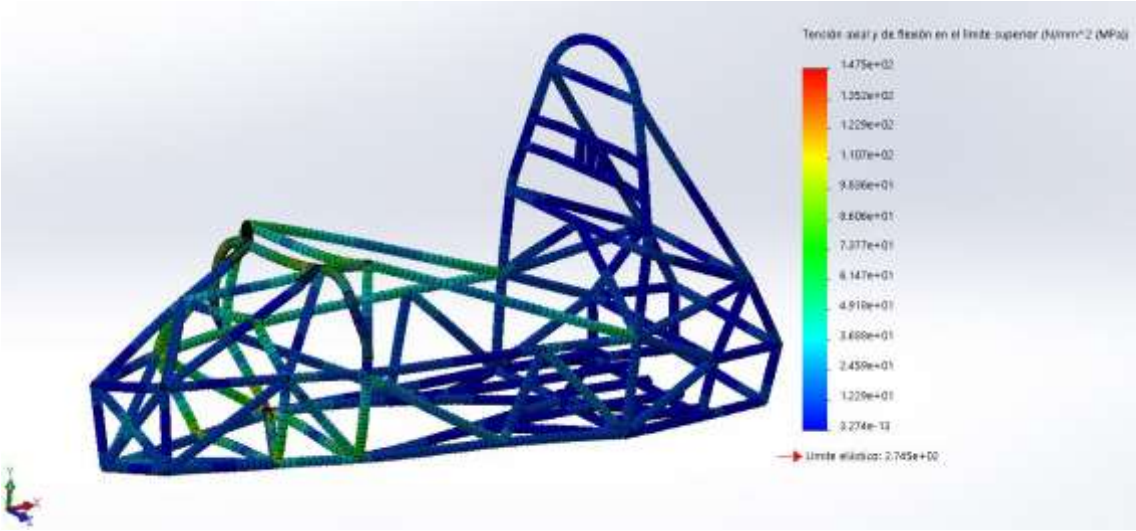


Ilustración 346. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

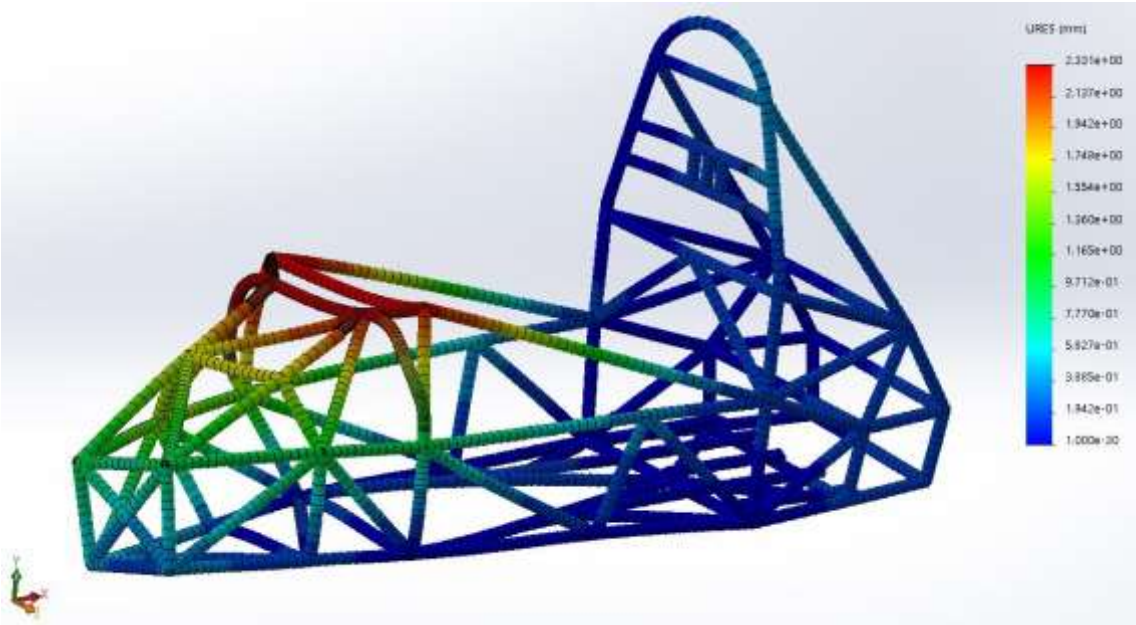


Ilustración 347. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 135. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Aro frontal	Vigas	147.5	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	2.33	mm	25mm

3.7.2.13.1.3. Impacto lateral

- Tensiones

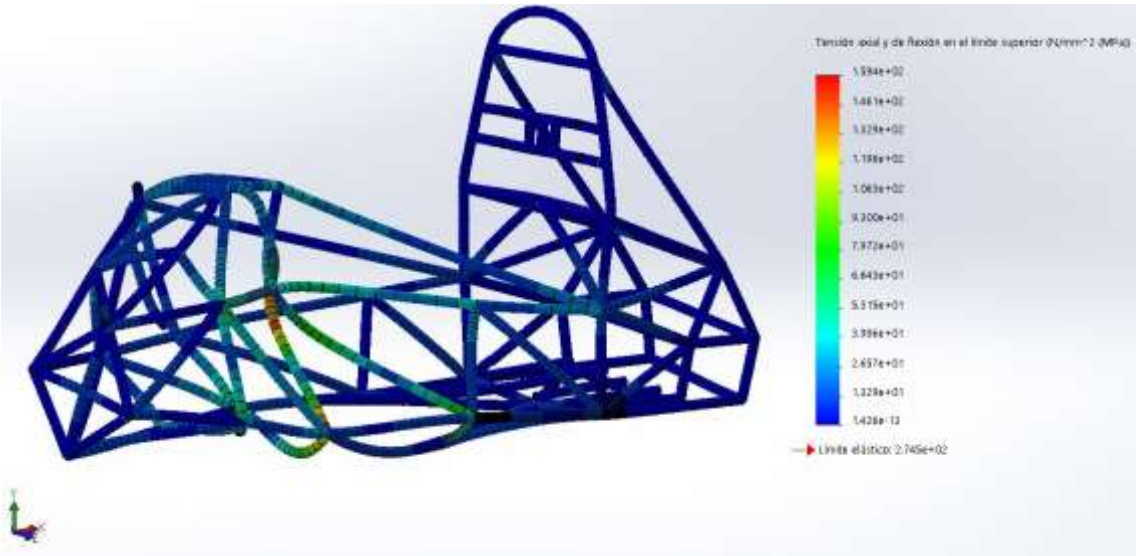


Ilustración 348. Tensiones resultantes zona 1A. Fuente: propia

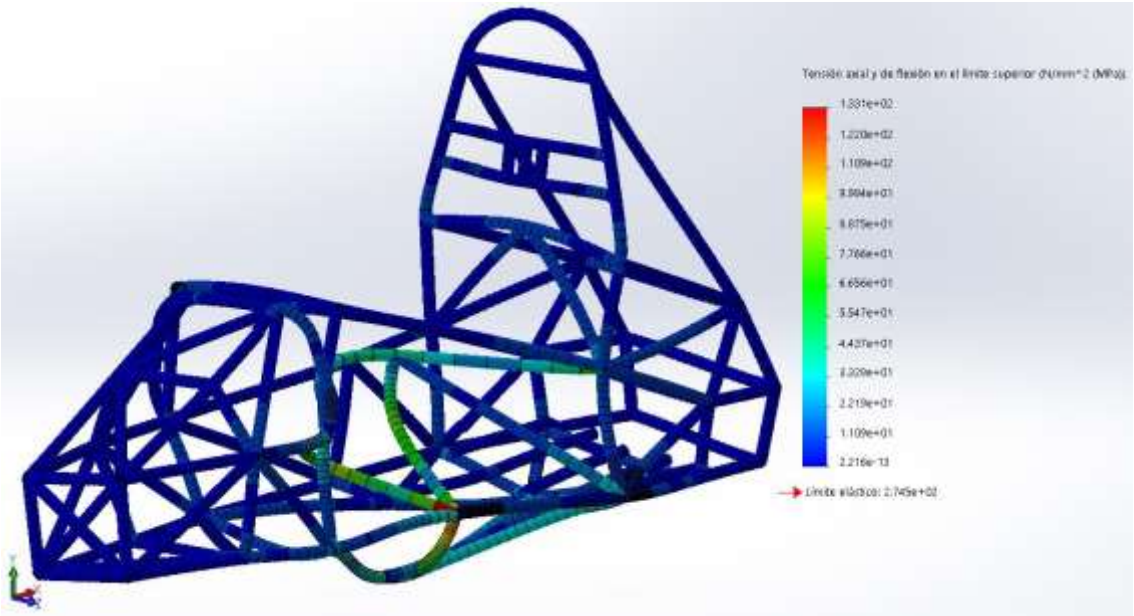


Ilustración 349. Tensiones resultantes zona 1B. Fuente: propia

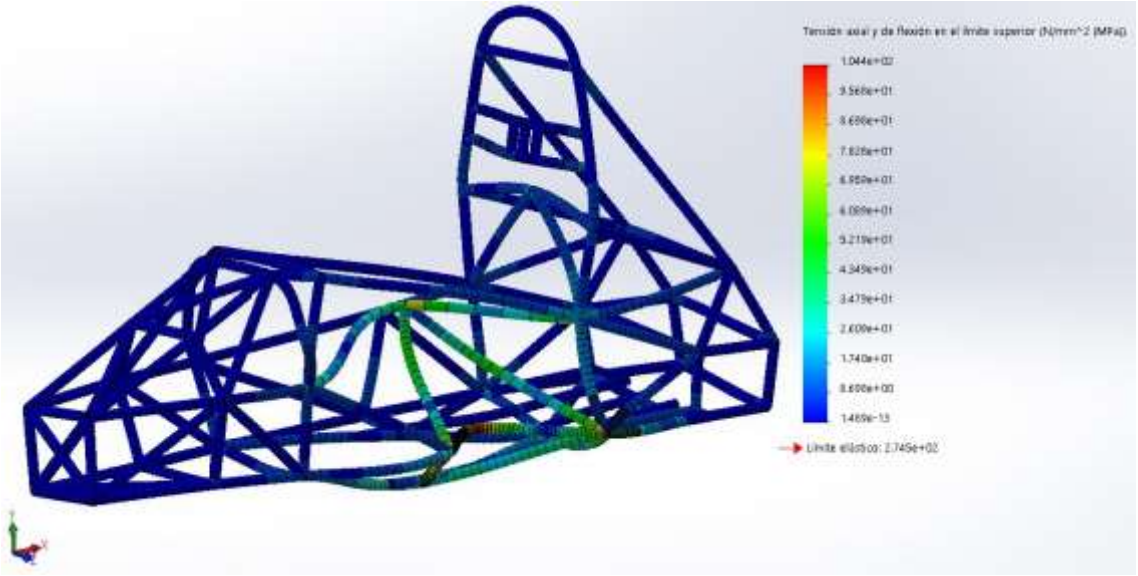


Ilustración 350. Tensiones resultantes zona 2A. Fuente: propia

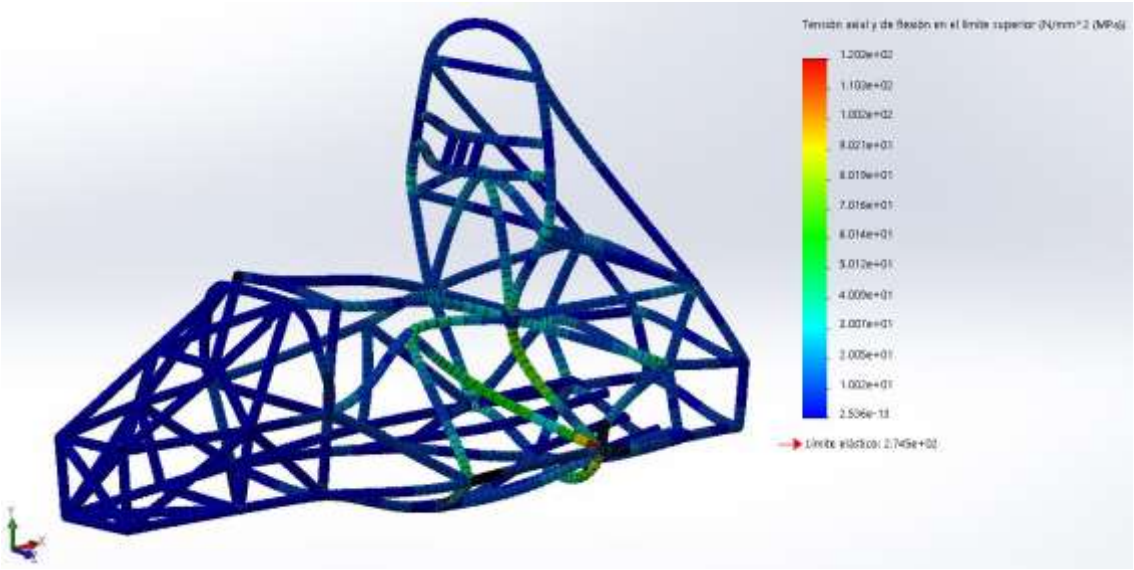


Ilustración 351. Tensiones resultantes zona 2B. Fuente: propia

- Desplazamientos

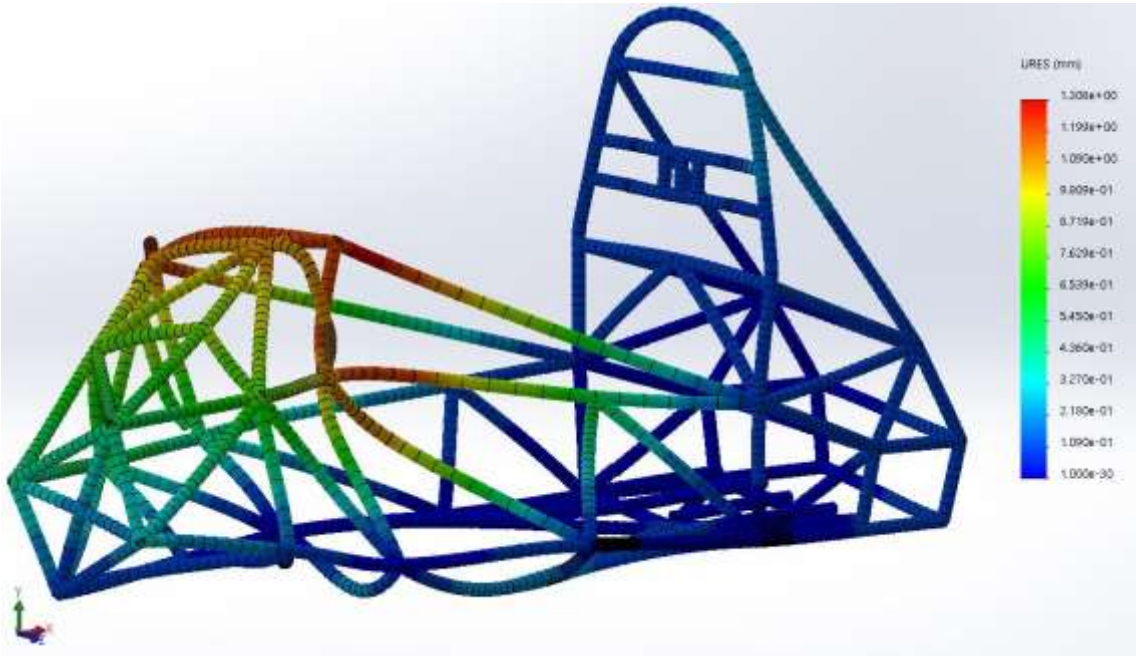


Ilustración 352. Desplazamientos resultantes zona 3A. Fuente: propia

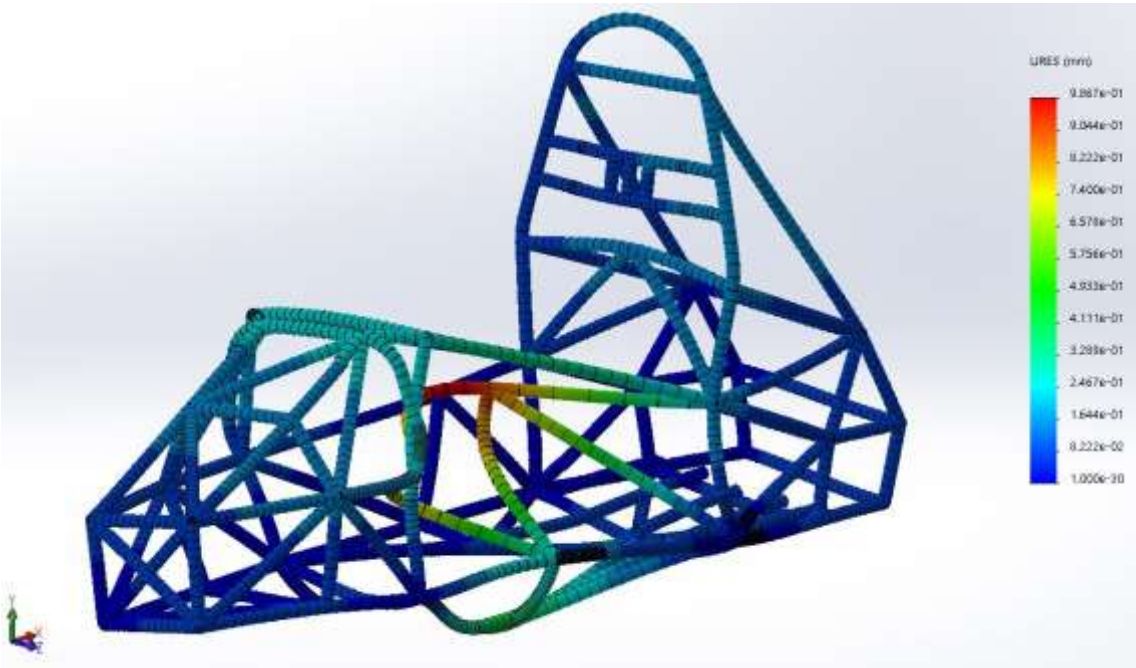


Ilustración 353. Desplazamientos resultantes zona 3B. Fuente: propia

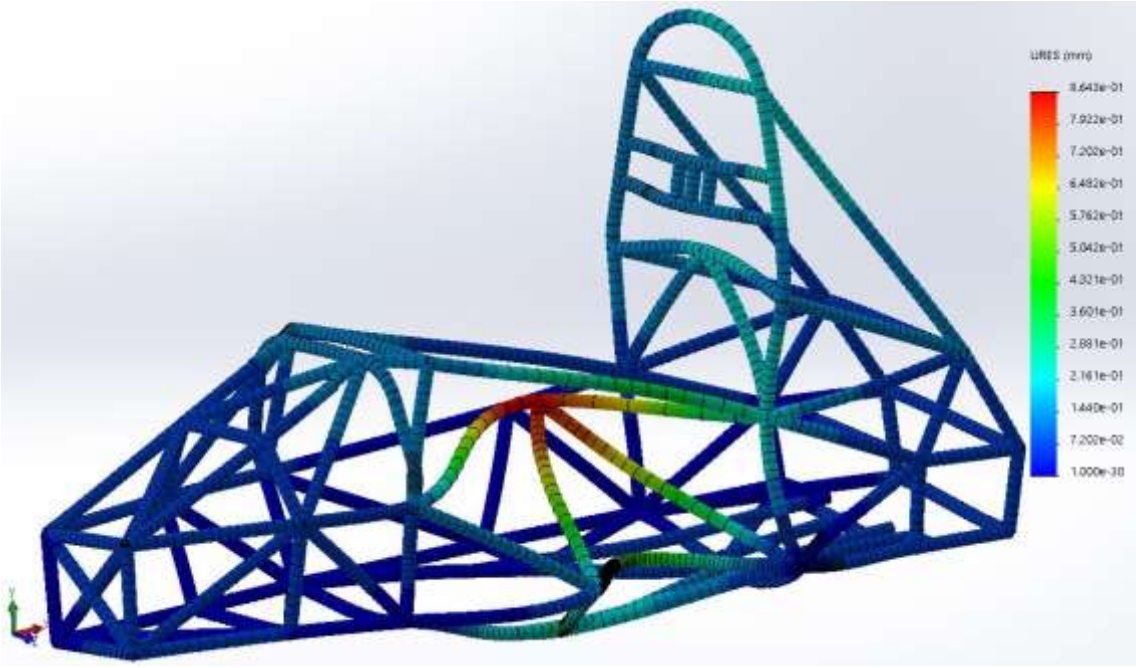


Ilustración 354. Desplazamientos resultantes zona 4A. Fuente: propia

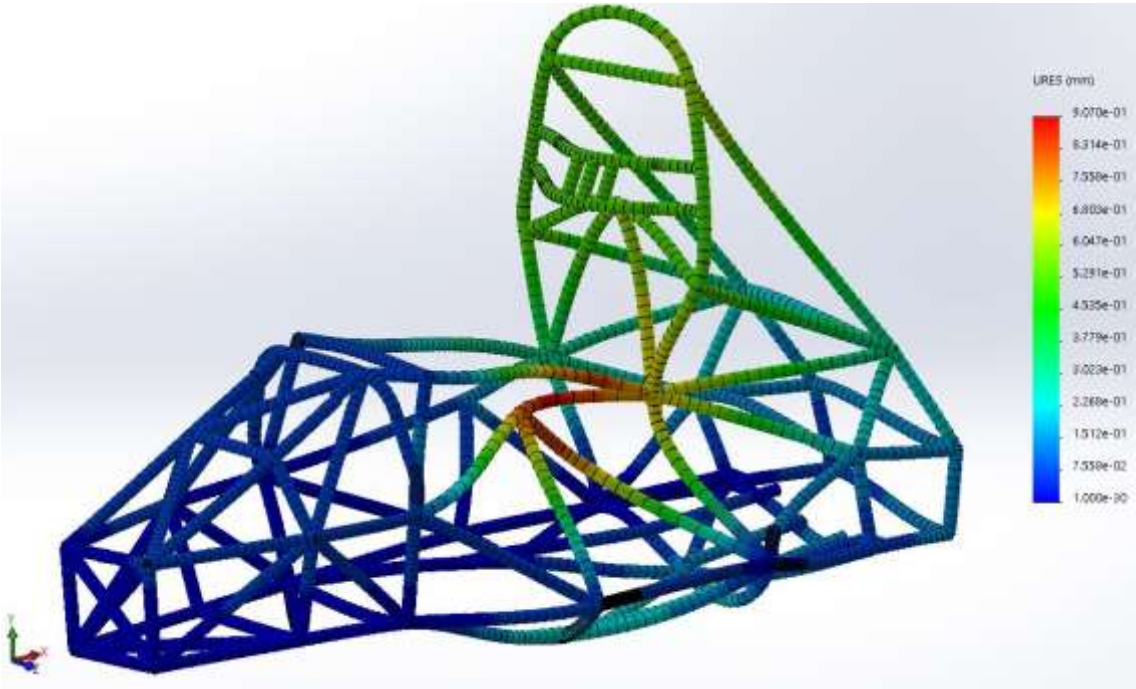


Ilustración 355. Desplazamientos resultantes zona 4B. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 136. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto lateral 1	Vigas	159.4	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.3	mm	25mm
Impacto lateral 2	Vigas	133.1	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.98	mm	25mm
Impacto lateral 3	Vigas	104.4	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.86	mm	25mm
Impacto lateral 4	Vigas	120.3	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.9	mm	25mm

3.7.2.13.1.4. Impacto frontal

- Tensiones

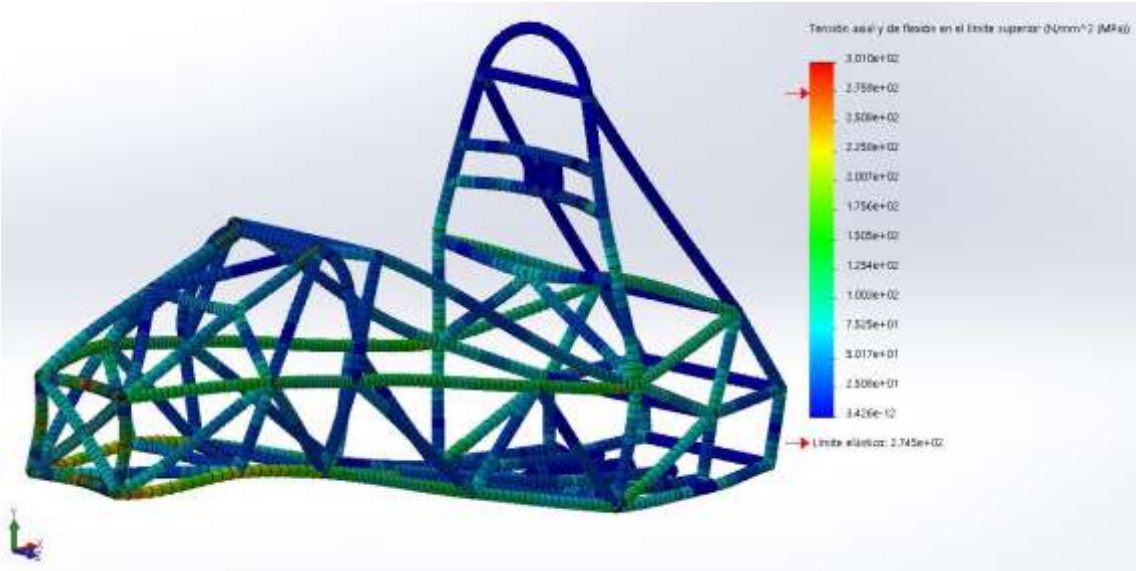


Ilustración 356. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

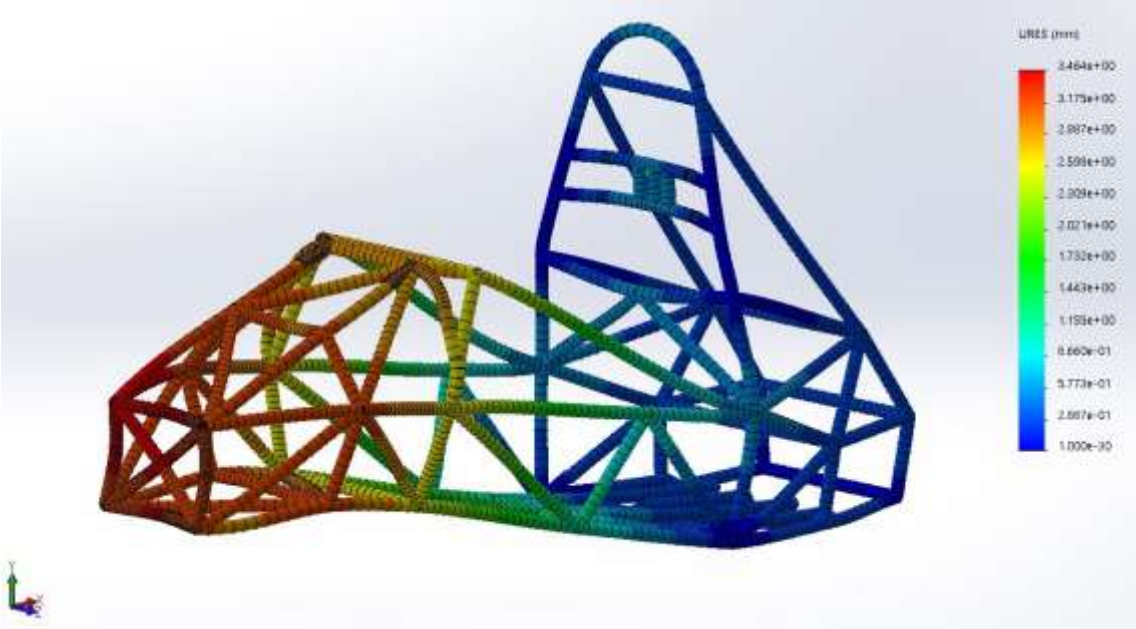


Ilustración 357. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 137. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto lateral	Vigas	301	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	3.46	mm	25mm

3.7.2.13.1.5. Anclajes cinturón de hombros

- Tensiones

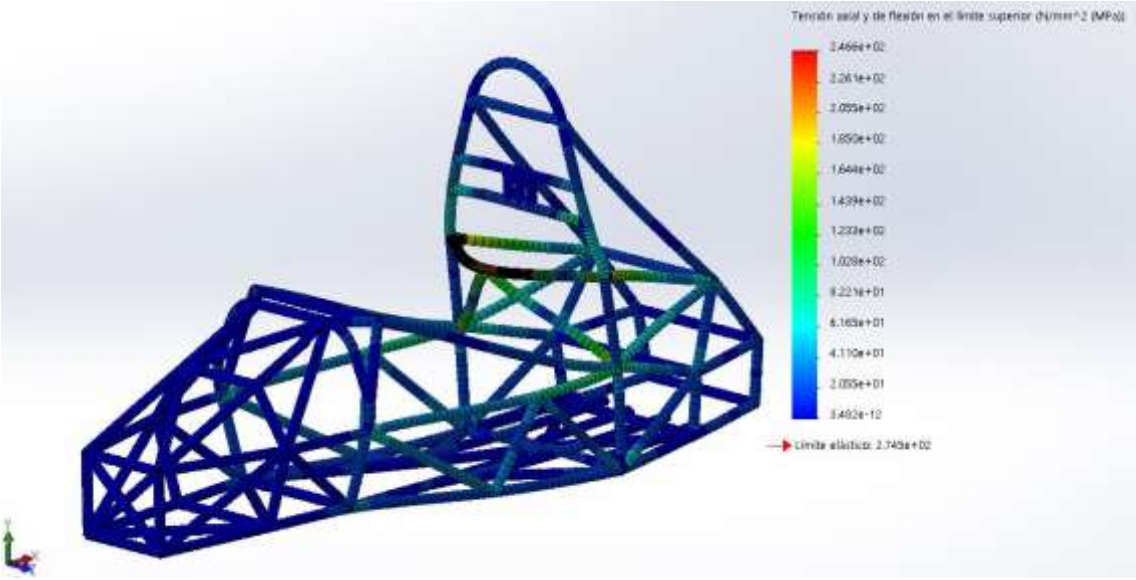


Ilustración 358. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

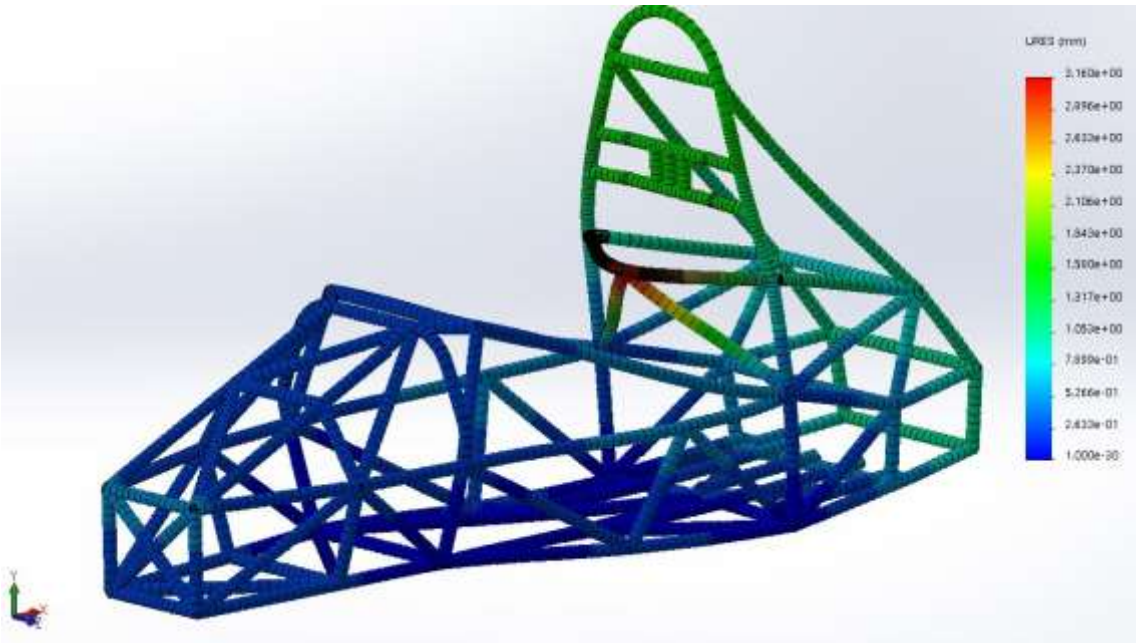


Ilustración 359. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 138. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturón hombros	Vigas	246.7	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	3.1	mm	25mm

3.7.2.13.1.6. Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino

- Tensiones

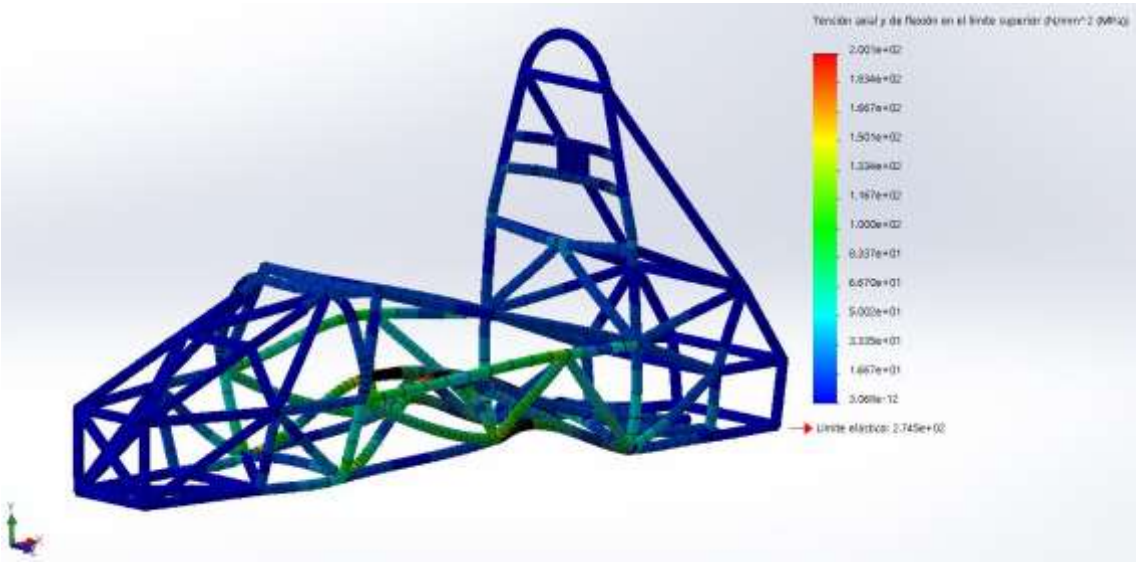


Ilustración 360. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

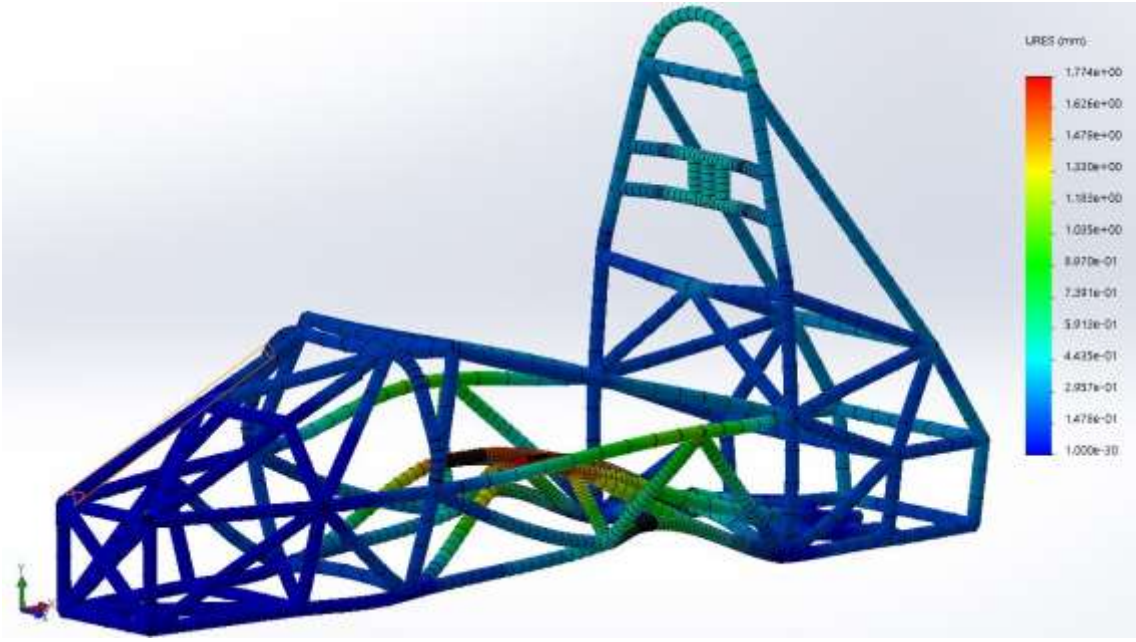


Ilustración 361. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 139. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	200.1	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.77	mm	25mm

3.7.2.13.1.7. Impacto frontolateral

- Tensiones

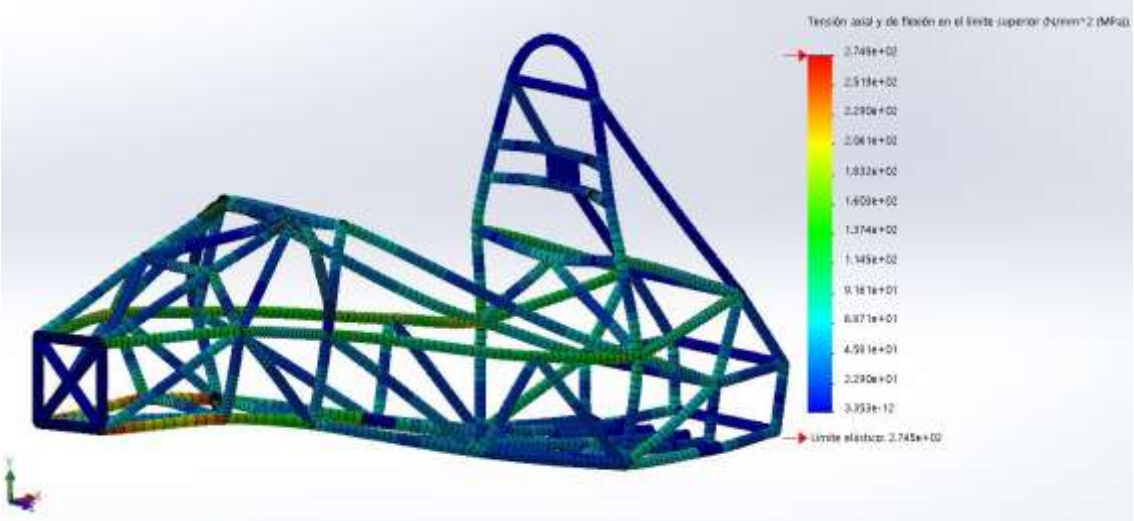


Ilustración 362. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

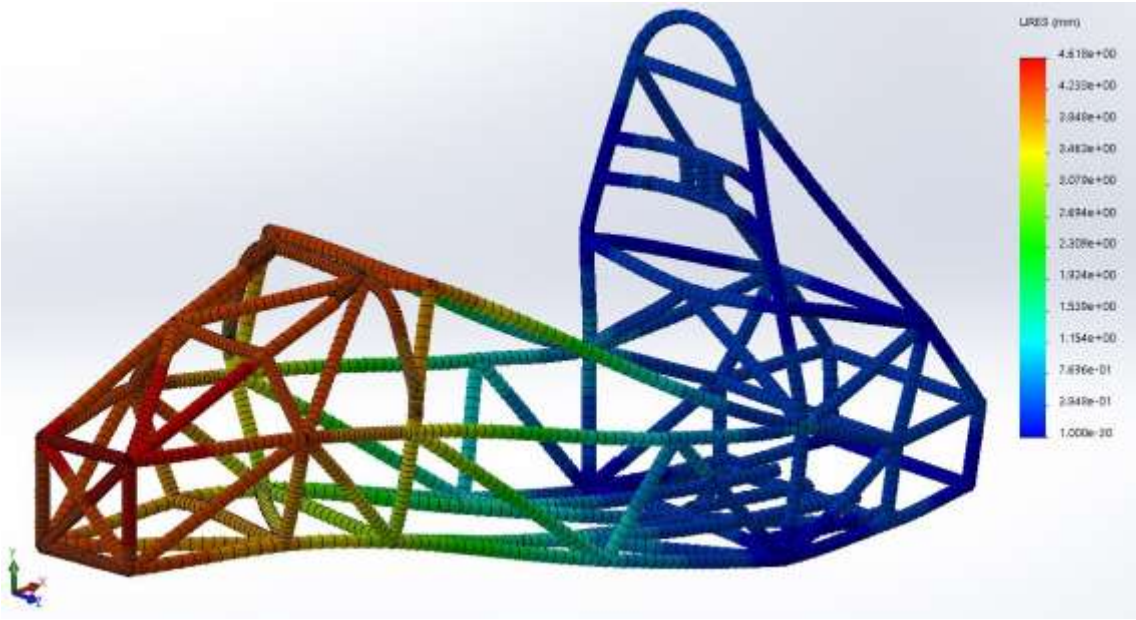


Ilustración 363. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 140. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Impacto frontolateral	Vigas	274.8	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	4.6	mm	25mm

3.7.2.13.1.8. Anclajes caja de baterías

- Tensiones

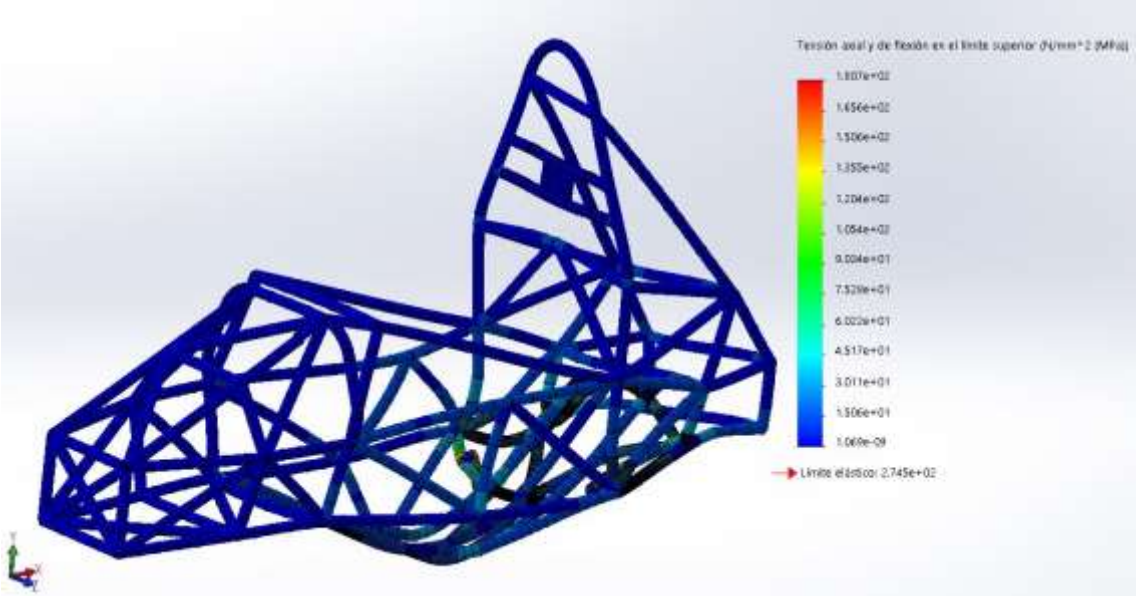


Ilustración 364. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

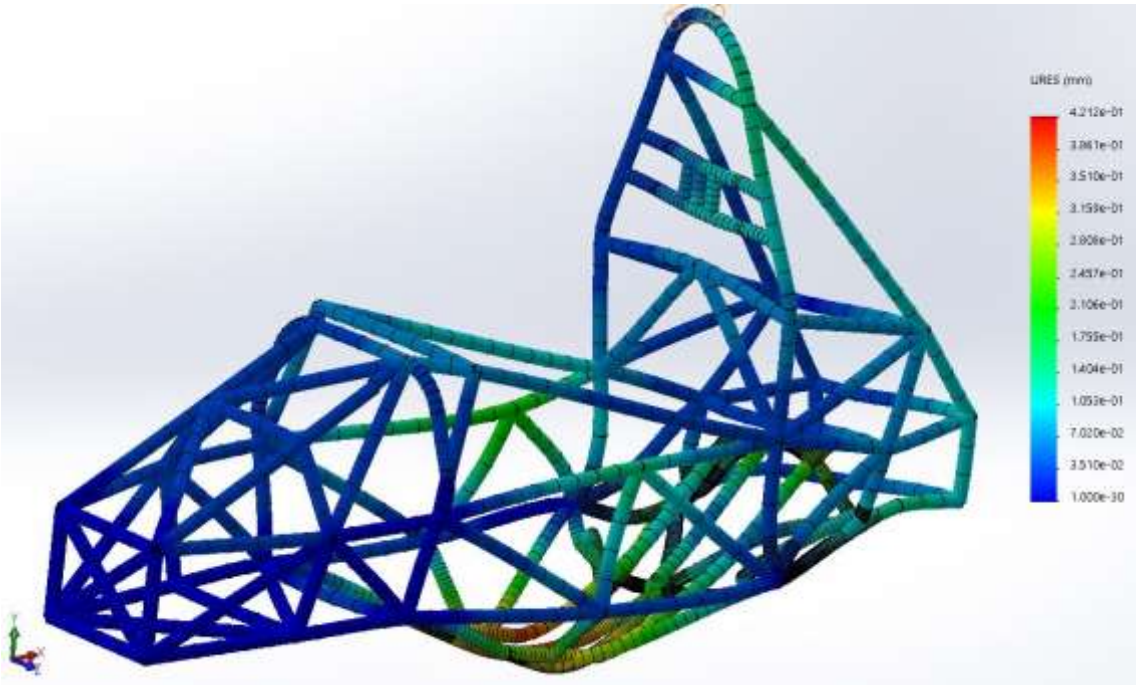


Ilustración 365. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 141. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Anclajes caja de baterías	Vigas	180.7	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	0.42	mm	25mm

3.7.2.13.1.9. Reposacabezas

- Tensiones

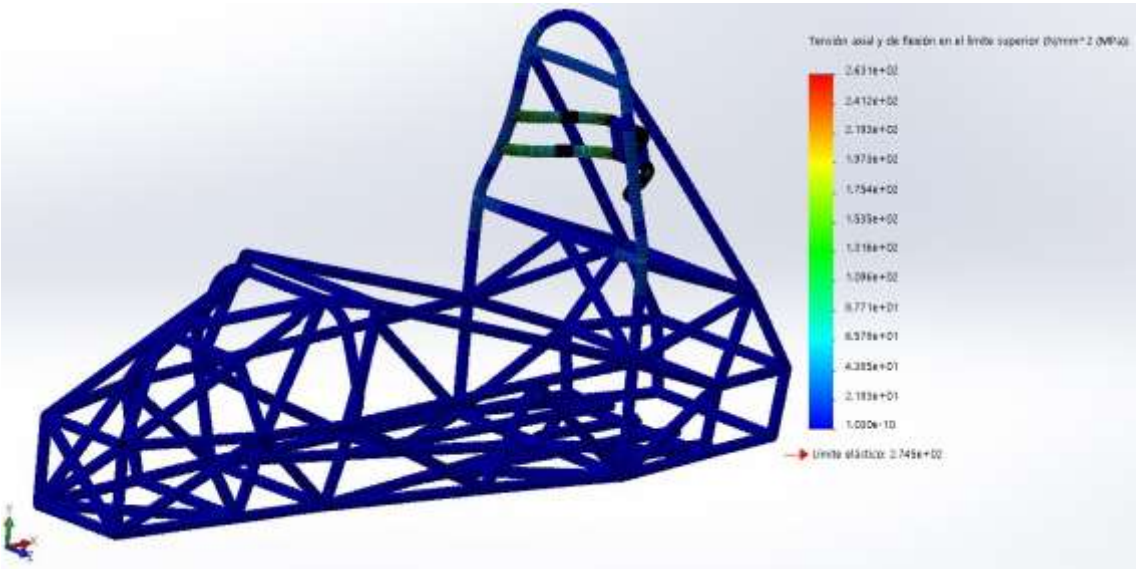


Ilustración 366. Tensiones resultantes. Fuente: propia

- Desplazamientos

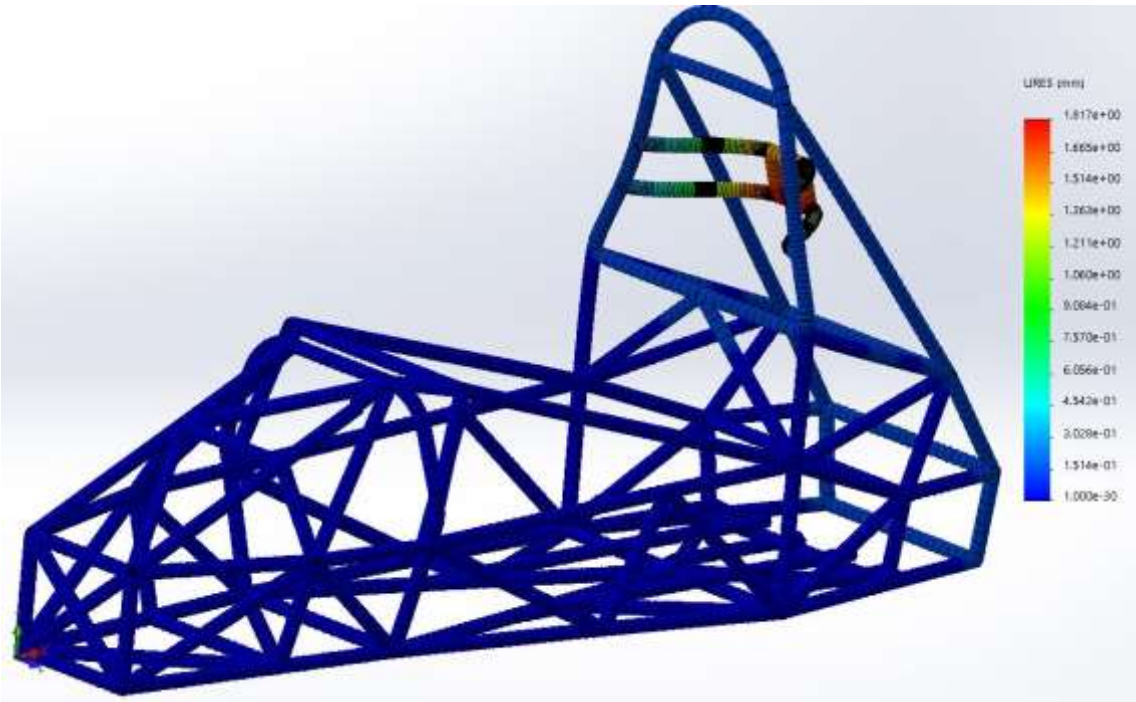


Ilustración 367. Desplazamientos resultantes. Fuente: propia

- Conclusiones

Tabla 142. Tabla resumen. Fuente: propia

Estudio	Resultados			Valores máximos
	Elemento	Valor	Unid.	
Reposacabezas	Vigas	263.1	MPa	274.5 MPa
	Desplazamiento	1.81	mm	25mm

3.7.2.13.1.10. Comparación resultados

Tabla 143. Tabla resumen modificación. Fuente: propia

Estudio	Comparación resultados			
	Elemento	Chasis 3.5.2.7.4	Corrección	Unid.
Aro principal	Vigas	248.3	243.8	MPa
	Desplaz.	4.1	4.1	mm
Aro frontal	Vigas	144.6	147.5	MPa
	Desplaz.	2.43	2.33	mm
Impacto lateral 1	Vigas	137.8	159.4	MPa
	Desplaz.	0.94	1.3	mm
Impacto lateral 2	Vigas	115.2	133.1	MPa
	Desplaz.	0.92	0.98	mm
Impacto lateral 3	Vigas	101.5	104.4	MPa
	Desplaz.	0.78	0.86	mm
Impacto lateral 4	Vigas	118.6	120.3	MPa

	Desplaz.	0.89	0.9	mm
Impacto frontal	Vigas	280.8	301	MPa
	Desplaz.	2.9	3.46	mm
Anclajes cinturón de hombros	Vigas	246.7	246.7	MPa
	Desplaz.	3.1	3.1	mm
Anclajes cinturones de regazo y antisubmarino	Vigas	190.9	200.1	MPa
	Desplaz.	1.2	1.77	mm
Impacto frontolateral	Vigas	288.0	274.8	MPa
	Desplaz.	1.44	4.6	mm
Anclajes caja de baterías	Vigas	181.1	180.7	MPa
	Desplaz.	0.42	0.42	mm
Reposacabezas	Vigas	263.1	263.1	MPa
	Desplaz.	1.81	1.81	mm

Como se puede ver en la tabla anterior, el efecto de hacer el cockpit mayor sin alterar las dimensiones totales del chasis apenas se aprecia, por lo que no hace falta realizar un estudio de las uniones más detallado.

Por tanto, este chasis tiene las siguientes características muy similares al chasis 3.5.2.7.4, pero en cuanto a su centro de gravedad y su distancia de ejes, varia significativamente.

La nueva distancia entre ejes se queda en 1665 mm, antes 1530mm. En cuanto al centro de gravedad, éste queda como muestra la imagen.

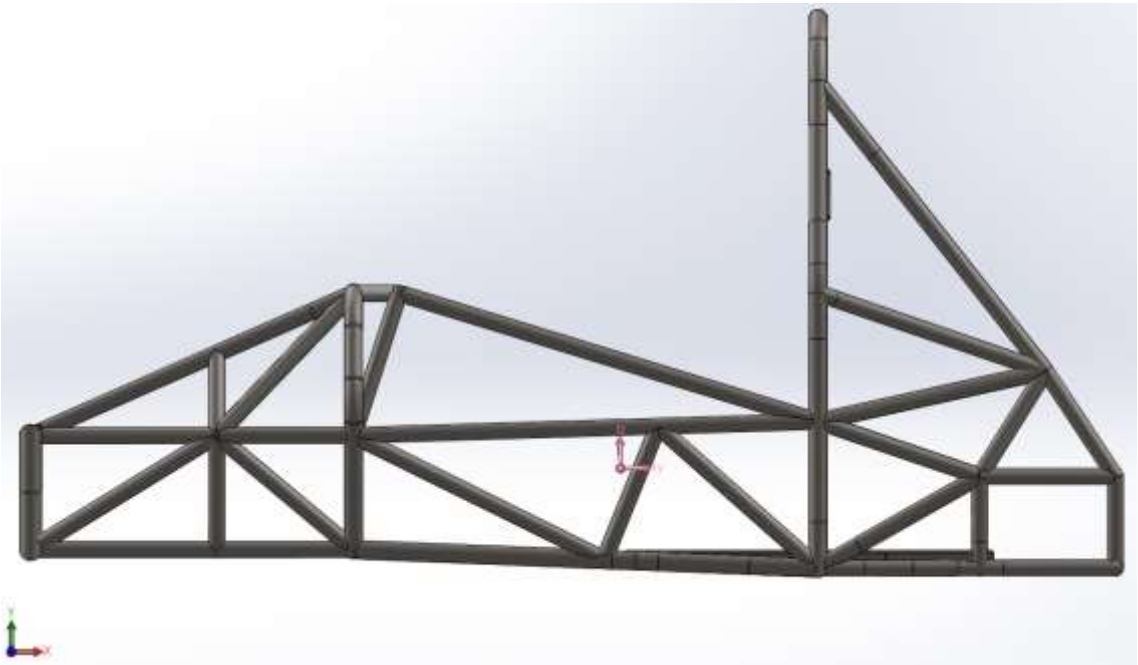


Ilustración 368. Posición del centro de gravedad. Fuente: propia

Comparando ambos chasis, la variación ha sido como se muestra:

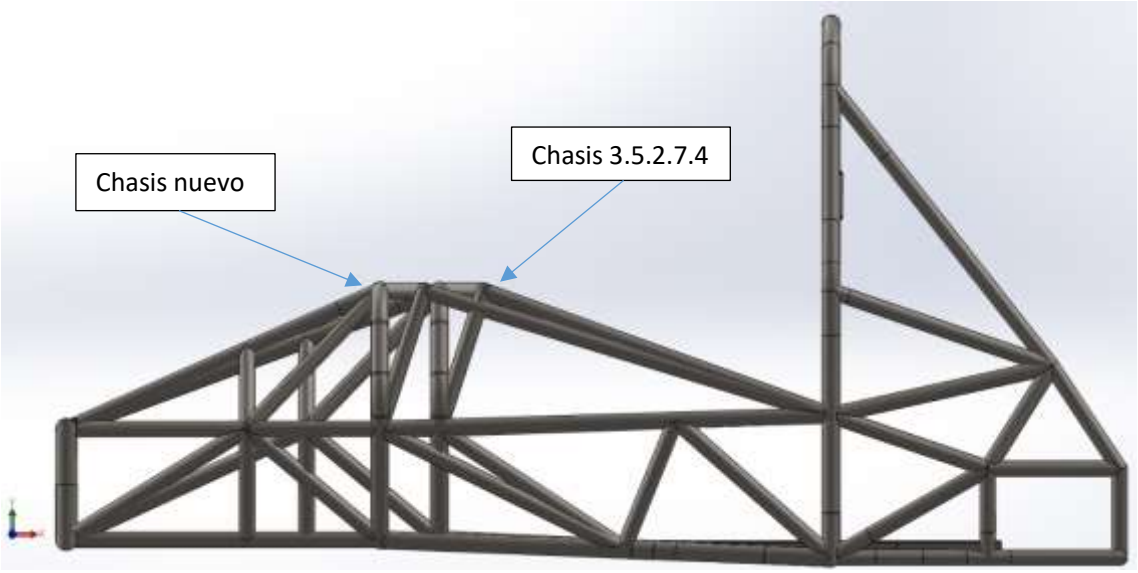


Ilustración 369. Comparación chasis. Fuente: propia

Por último, es interesante observar cómo queda el centro de gravedad de todo el conjunto. Éste se ubica muy cercano al del piloto y, sorprendentemente, a la misma distancia entre ambos ejes. Estas distancias son:

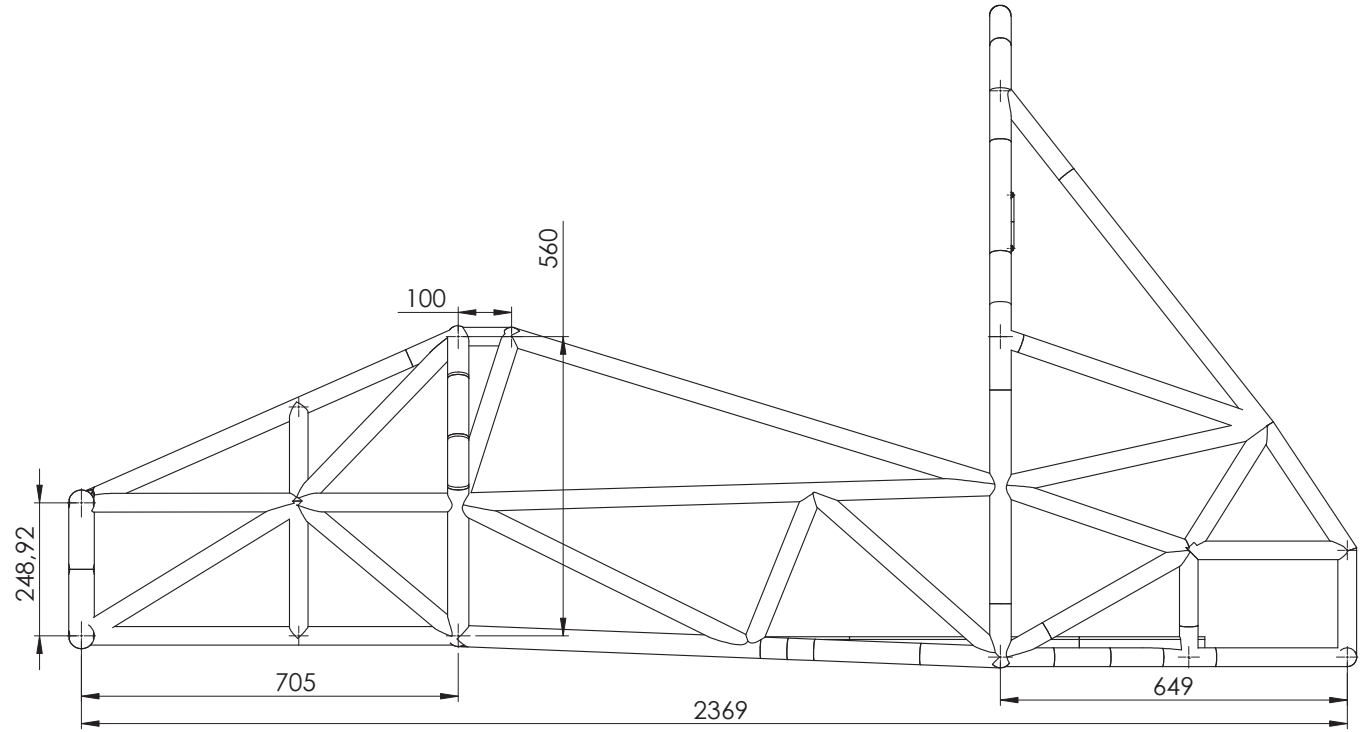
Tabla 144. Distancias del centro de gravedad a los ejes. Fuente: propia

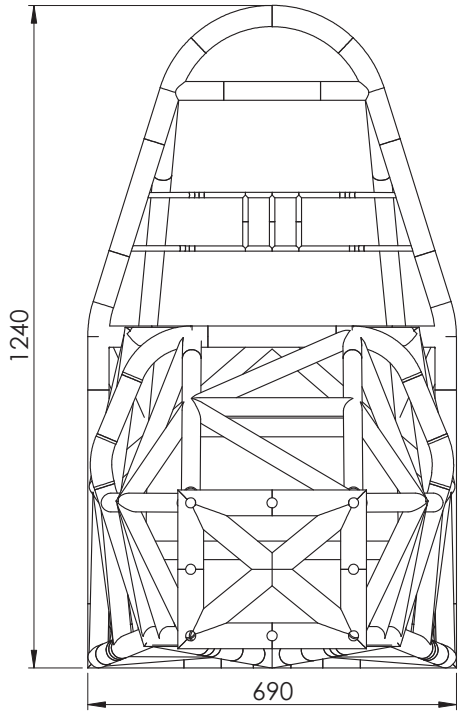
	Distancia (mm)
Eje delantero – CG	827
CG – Eje trasero	837
Diferencia	10

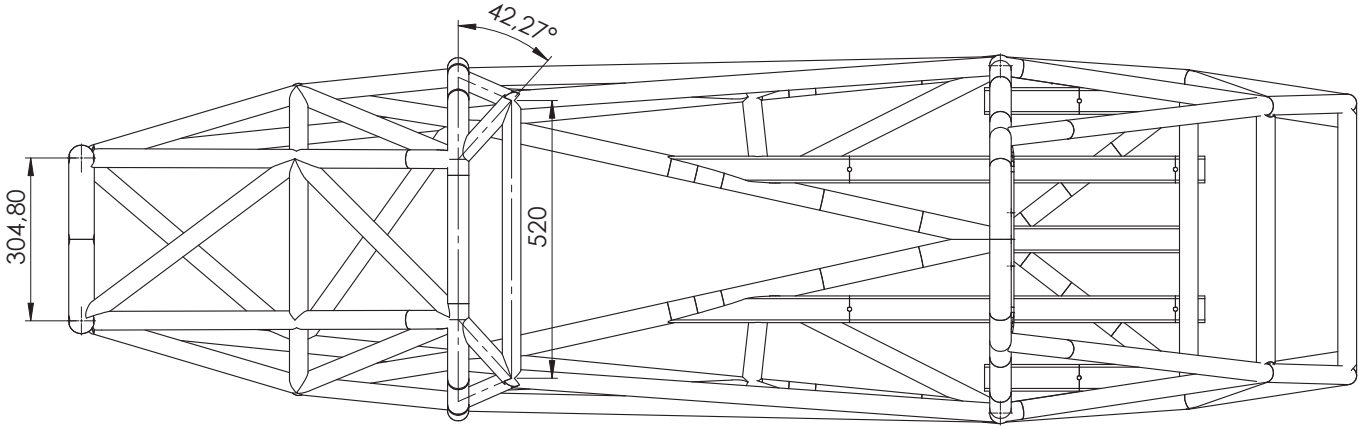
4. Planos

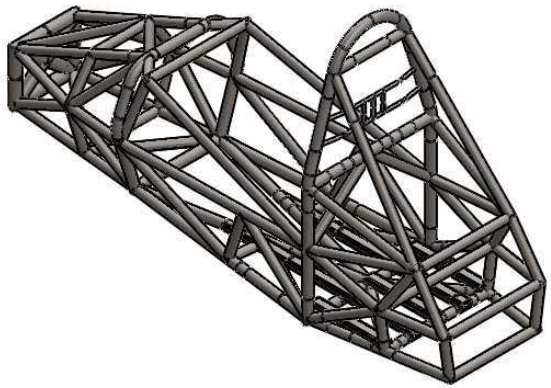
Tabla de Contenidos

4. PLANOS 330
4.1. Plano 1 – Vistas chasis 332
4.2. Plano 2 – Aro frontal 333
4.3. Plano 3 – Zona frontal 334
4.4. Plano 4 – Zona trasera 335
4.5. Plano 5 – Placa anti-intrusión 336
4.5. Plano 6 – Orejeta de anclajes cinturones 337
4.7. Plano 6.1 – Detalle parte interior habitáculo 338
4.8. Plano 7 – Estructura del mamparo frontal 339
4.9. Plano 8 – Lateral habitáculo 340
4.10. Plano 9 – Aro principal 341
4.11. Plano 9.1 – Detalle soportes reposacabezas del aro principal 342
4.12. Plano 10 – Cama del acumulador 343
4.13. Plano 11 – Rigidizadores aro principal 344





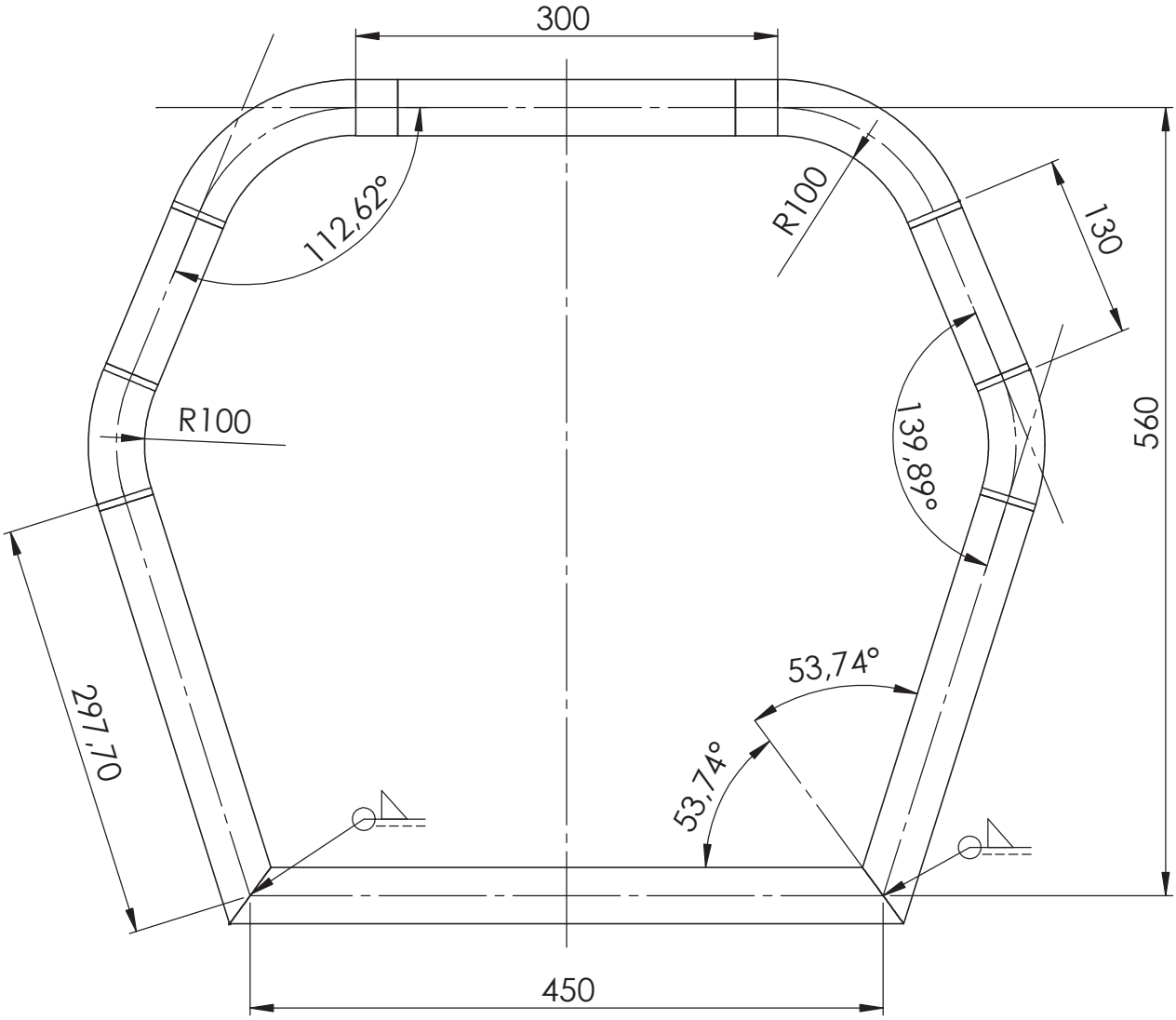


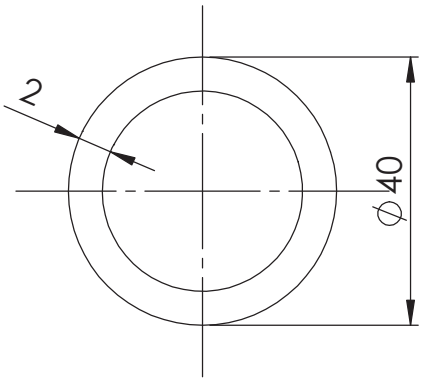


Diseño de un chasis para un monoplaza eléctrico de Formula Student

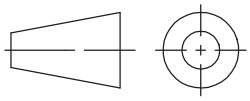
Fecha	**01/06/2019**	Autor	ULL Universidad de La Laguna	**E.D.E.P.** Máster en Ingeniería Industrial Especialidad Electromecánica Universidad de La Laguna
Dibujado (Nombre)	José Juan			
Dibujado (Apellidos)	Macías Solá			
Id. s. normas	UNE-EN-ISO			
Escala: 1:10	**Vistas chasis**			**Nº plano: 1** **Nomb. Arch.**

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



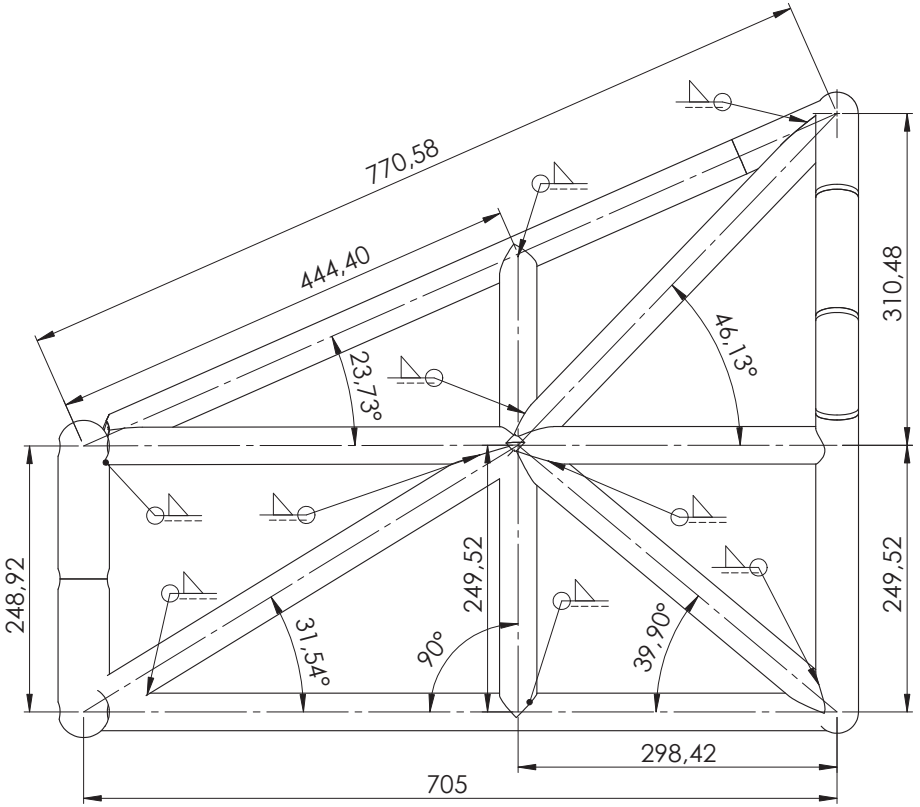


Perfil

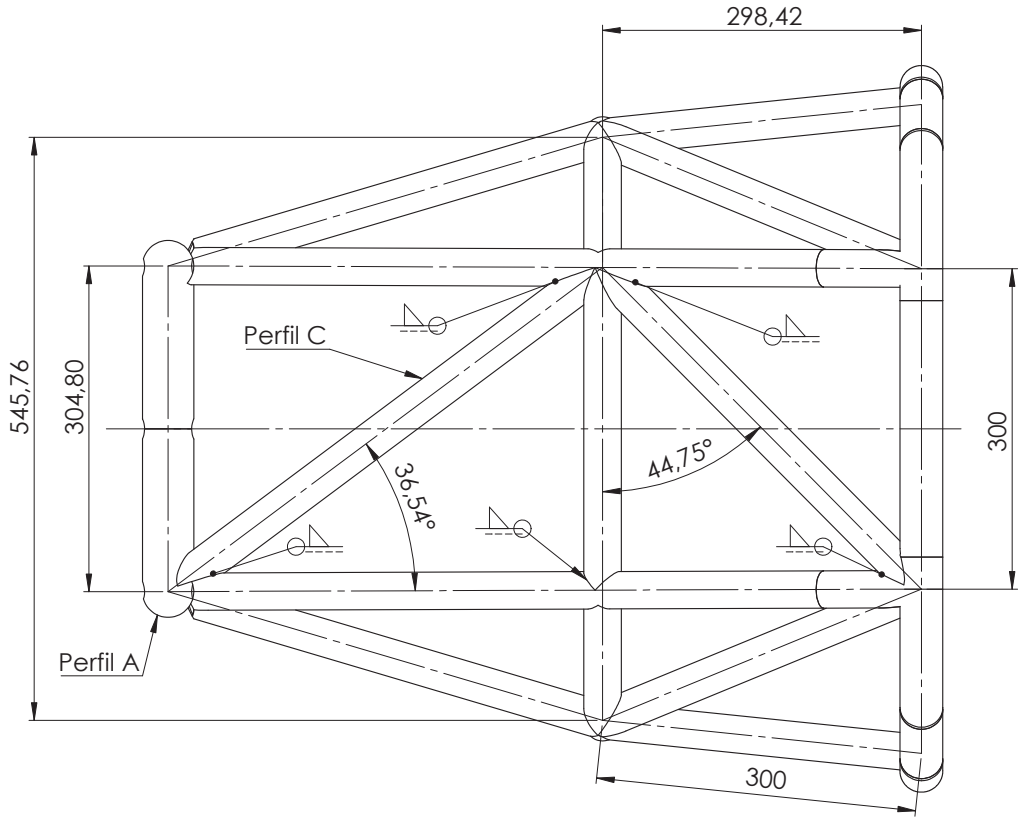


Diseño de un chasis para un monoplaza eléctrico de Formula Student				
Fecha	**01/06/2019**	Autor	ULL Universidad de La Laguna	**E.D.E.P.** Máster en Ingeniería Industrial Especialidad Electromecánica Universidad de La Laguna
Dibujado (Nombre)	José Juan			
Dibujado (Apellidos)	Macías Solá			
Id. s. normas	UNE-EN-ISO			
Escala: 1:5	**Aro frontal**			**Nº plano: 2** **Nomb. Arch.**

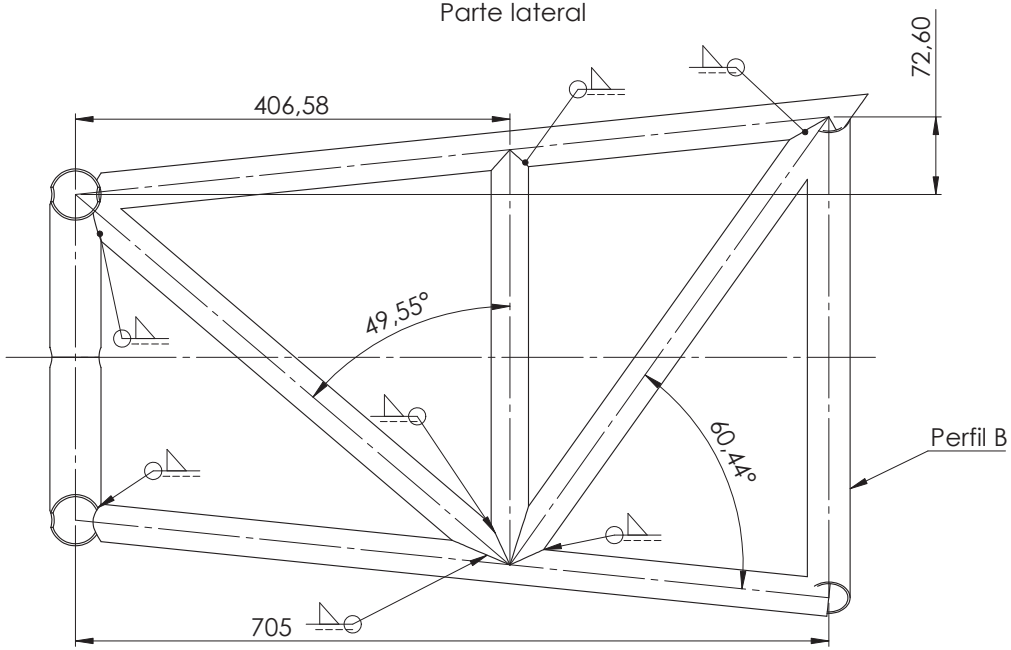
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



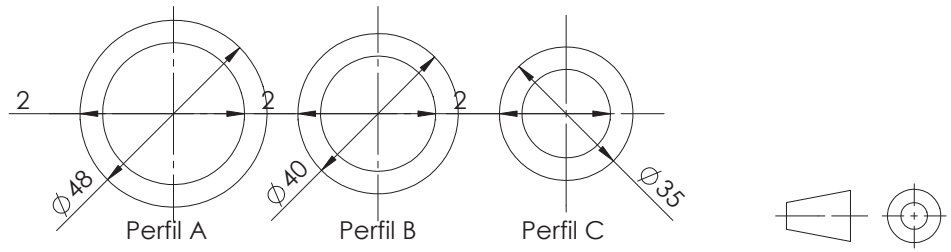
Parte lateral



Parte superior



Parte inferior



Diseño de un chasis para un monoplaza eléctrico de Formula Student

Fecha	**01/06/2019**	Autor	
Dibujado (Nombre)	José Juan		
Dibujado (Apellidos)	Macías Solá		
Id. s. normas	UNE-EN-ISO		

ULL Universidad de La Laguna

E.D.E.P.
Máster en Ingeniería Industrial
Especialidad Electromecánica
Universidad de La Laguna

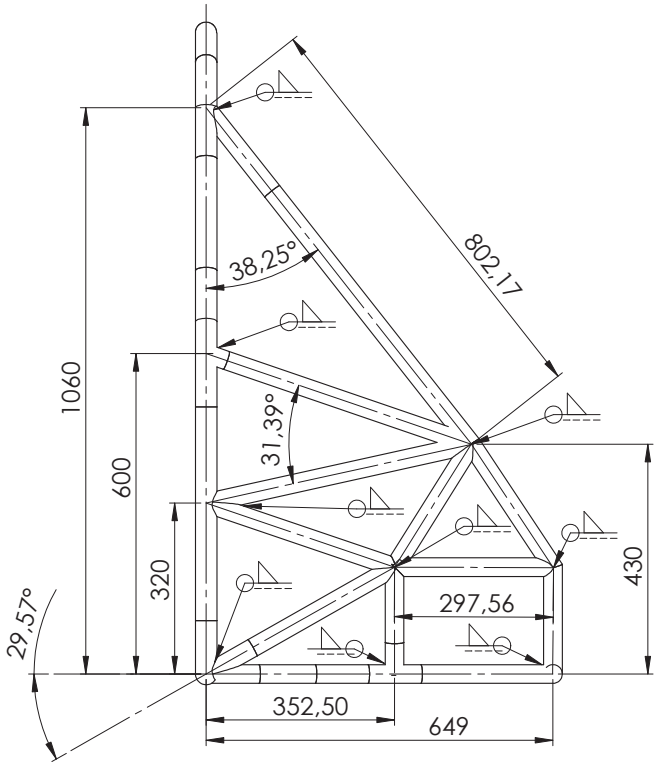
Escala: 1:5

Zona frontal

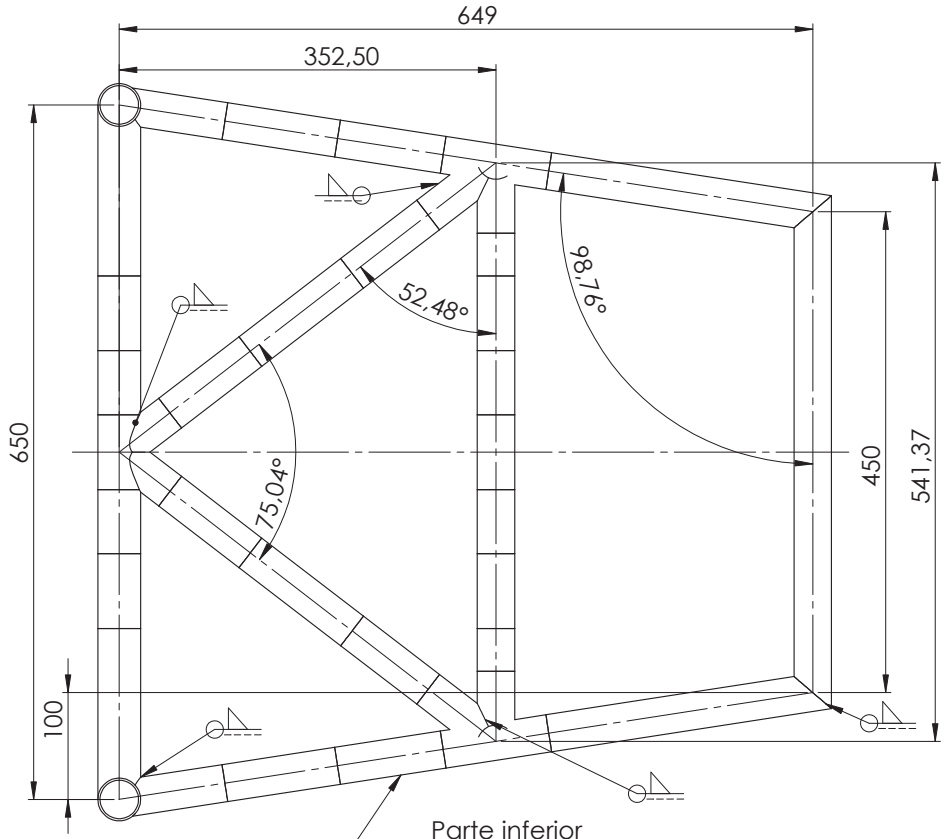
Nº plano: 3

Nomb. Arch.

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



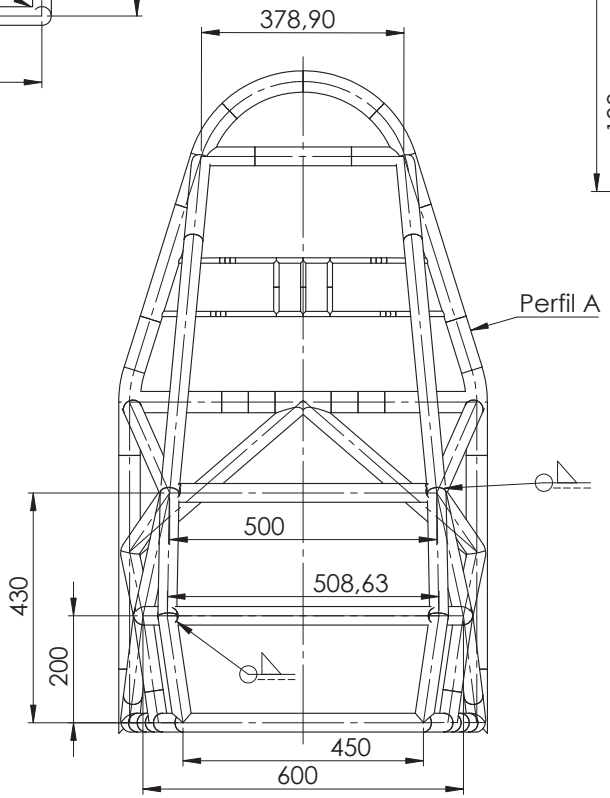
Parte lateral



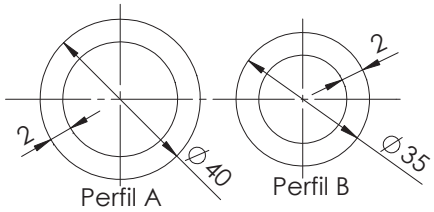
Parte inferior

Escala 1:5

Perfil B

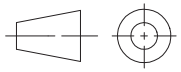


Parte atrás



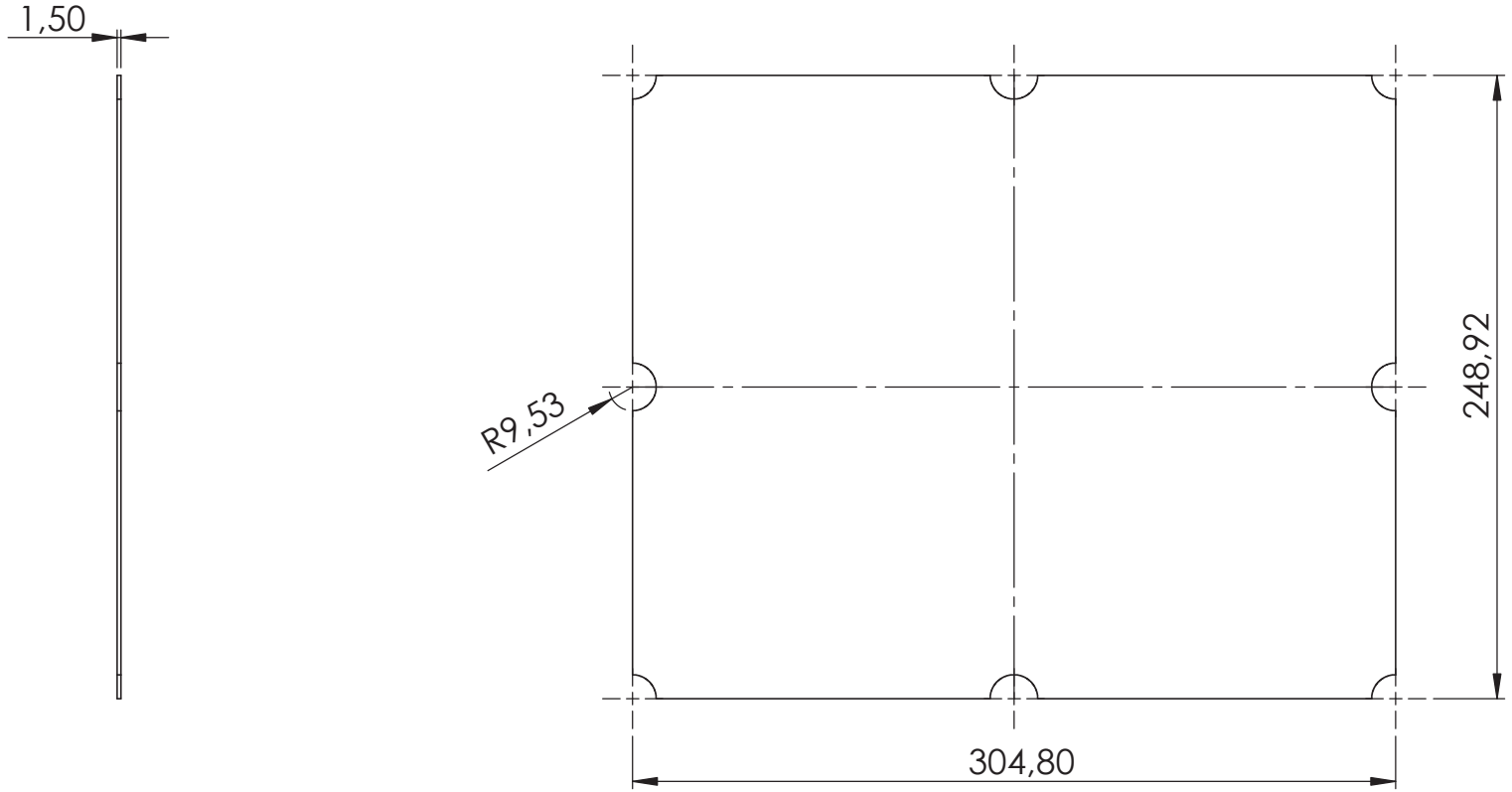
Perfil A

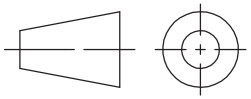
Perfil B



Diseño de un chasis para un monoplaza eléctrico de Formula Student			
Fecha	01/06/2019	Autor	ULL Universidad de La Laguna
Dibujado (Nombre)	José Juan		E.D.E.P. Máster en Ingeniería Industrial Especialidad Electromecánica
Dibujado (Apellidos)	Macías Solá		Universidad de La Laguna
Id. s. normas	UNE-EN-ISO		
Escala: 1:10	Zona trasera		Nº plano: 4
			Nomb. Arch.

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



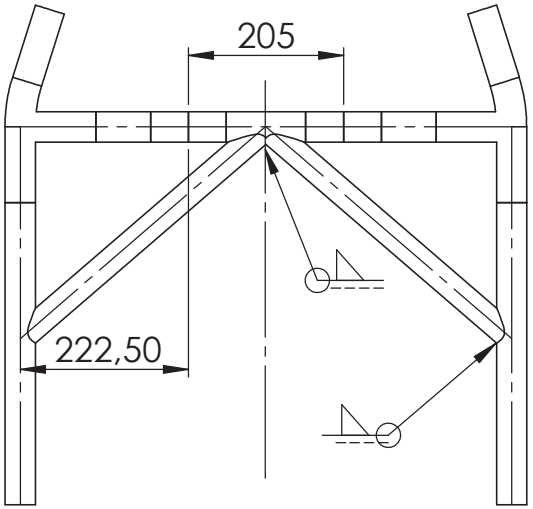


Diseño de un chasis para un monoplaza eléctrico de Formula Student

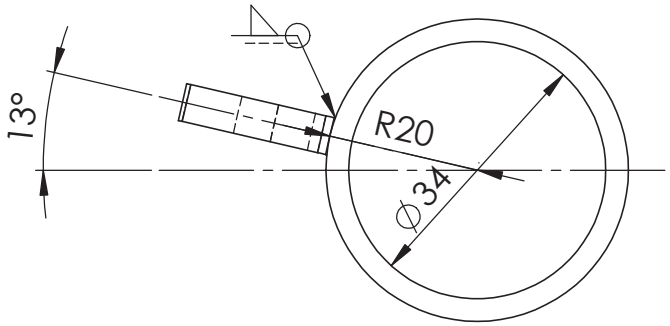
Fecha	**01/06/2019**	Autor	ULL Universidad de La Laguna	**E.D.E.P.**
Dibujado (Nombre)	José Juan			Máster en Ingeniería Industrial Especialidad Electromecánica
Dibujado (Apellidos)	Macías Solá			Universidad de La Laguna
Id. s. normas	UNE-EN-ISO			

Escala: 1:3	**Placa anti-intrusión**	**Nº plano: 5** **Nomb. Arch.**

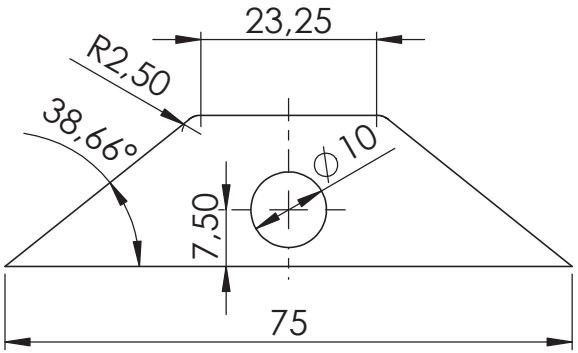
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

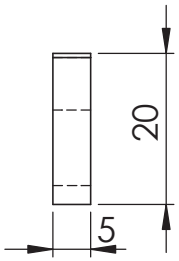


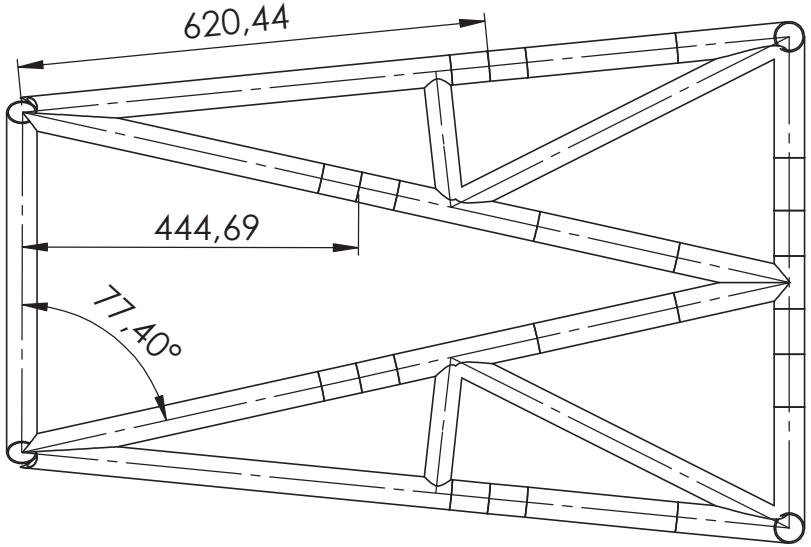
Posición agujeros orejetas hombros
Escala 1:10



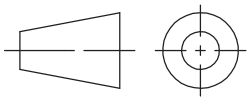
Inclinación orejetas hombros





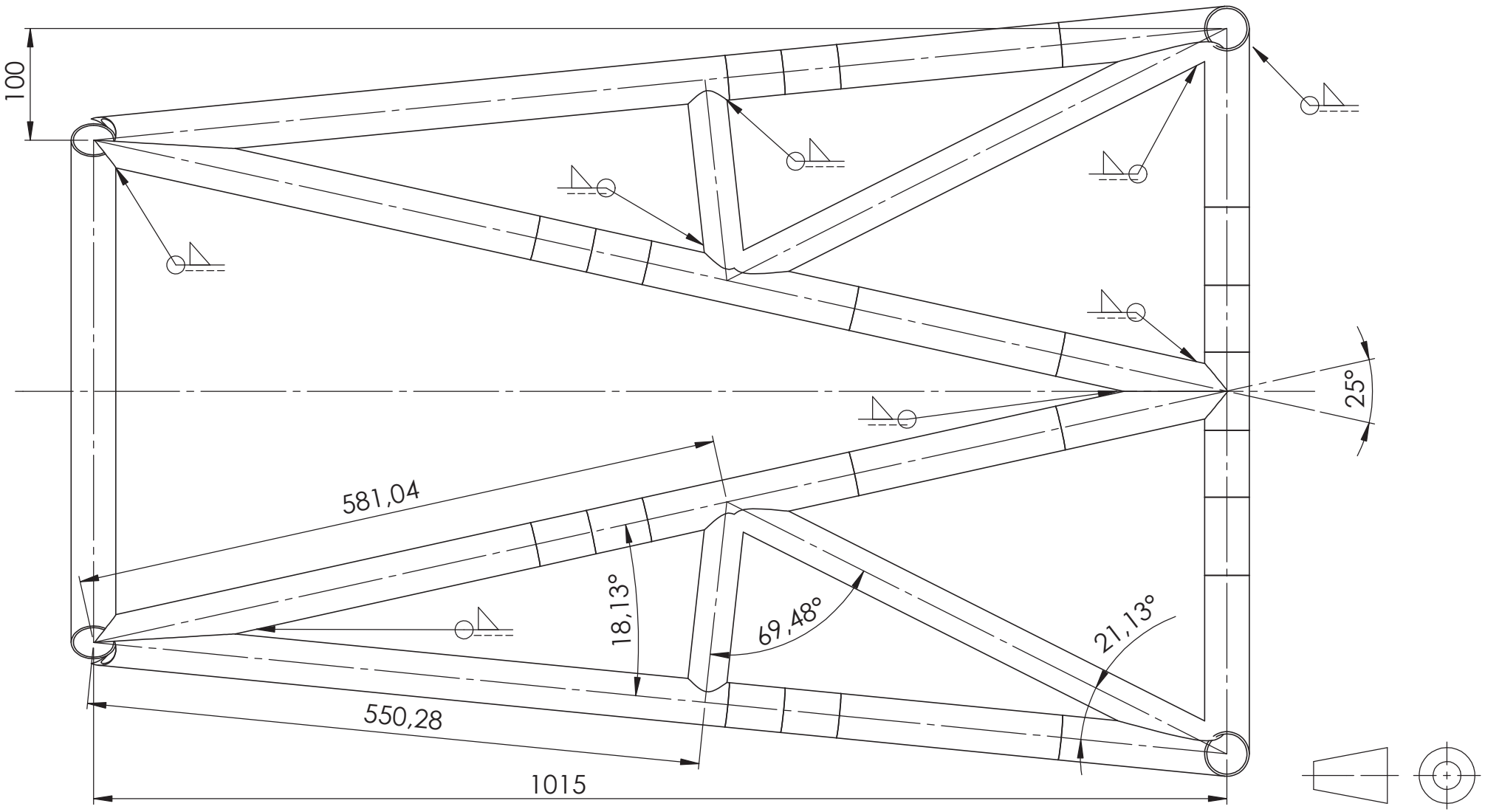


Posición agujeros orejetas regazo y antisubmarino
Escala 1:10



Diseño de un chasis para un monoplaza eléctrico de Formula Student				
Fecha	**01/06/2019**	Autor	ULL Universidad de La Laguna	**E.D.E.P.** Máster en Ingeniería Industrial Especialidad Electromecánica Universidad de La Laguna
Dibujado (Nombre)	José Juan			
Dibujado (Apellidos)	Macías Solá			
Id. s. normas	UNE-EN-ISO			
Escala: 1:1	**Orejeta de anclajes cinturones**			**Nº plano: 6** **Nomb. Arch.**

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

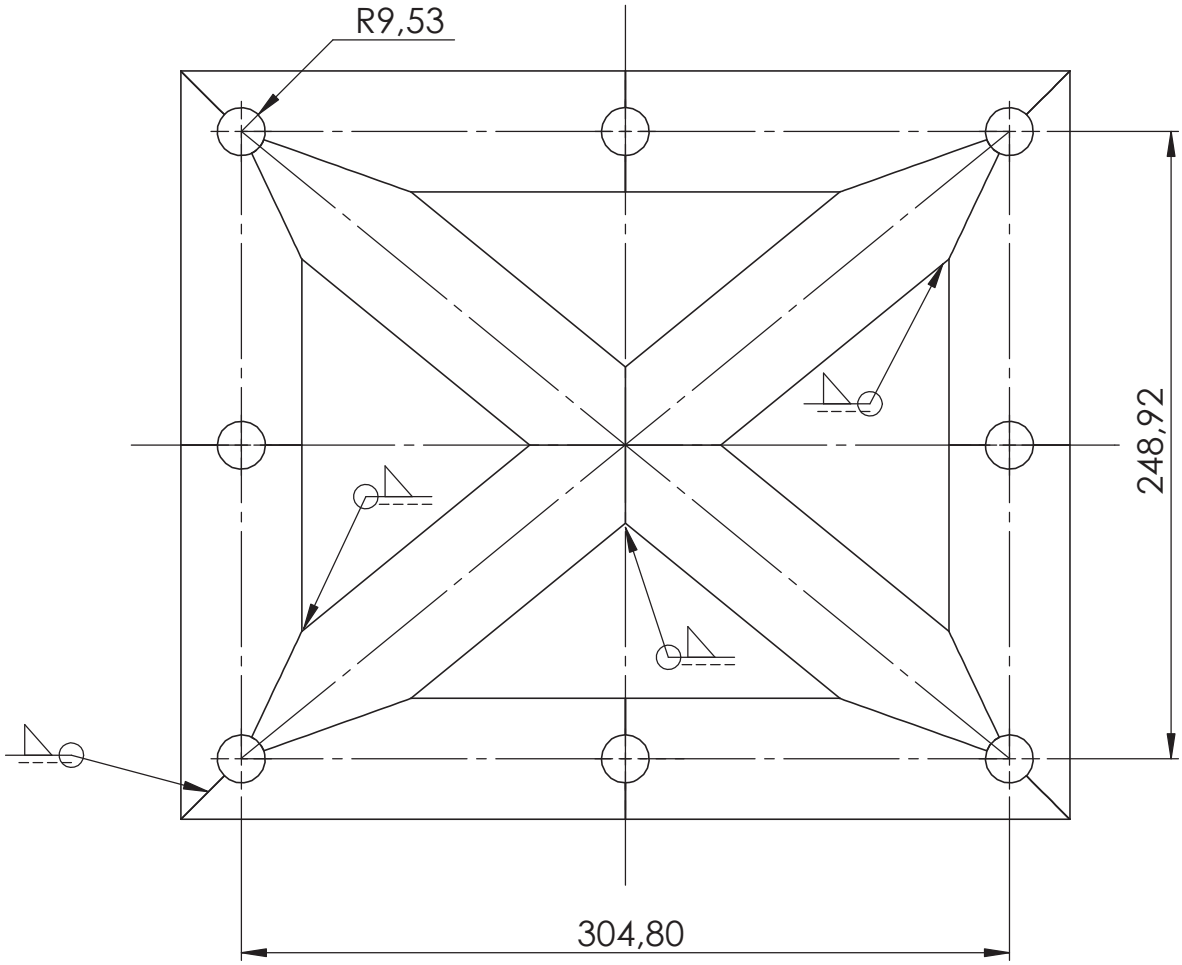


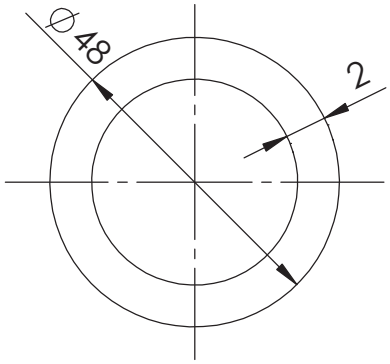
Diseño de un chasis para un monoplaza eléctrico de Formula Student

Fecha	**01/06/2019**	Autor	ULL Universidad de La Laguna	**E.D.E.P.**
Dibujado (Nombre)	José Juan			Máster en Ingeniería Industrial Especialidad Electromecánica
Dibujado (Apellidos)	Macías Solá			Universidad de La Laguna
Id. s. normas	UNE-EN-ISO			

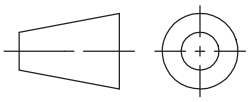
Escala: 1:5	**Detalle parte inferior habitáculo**	**Nº plano: 6.1** Nomb. Arch.

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



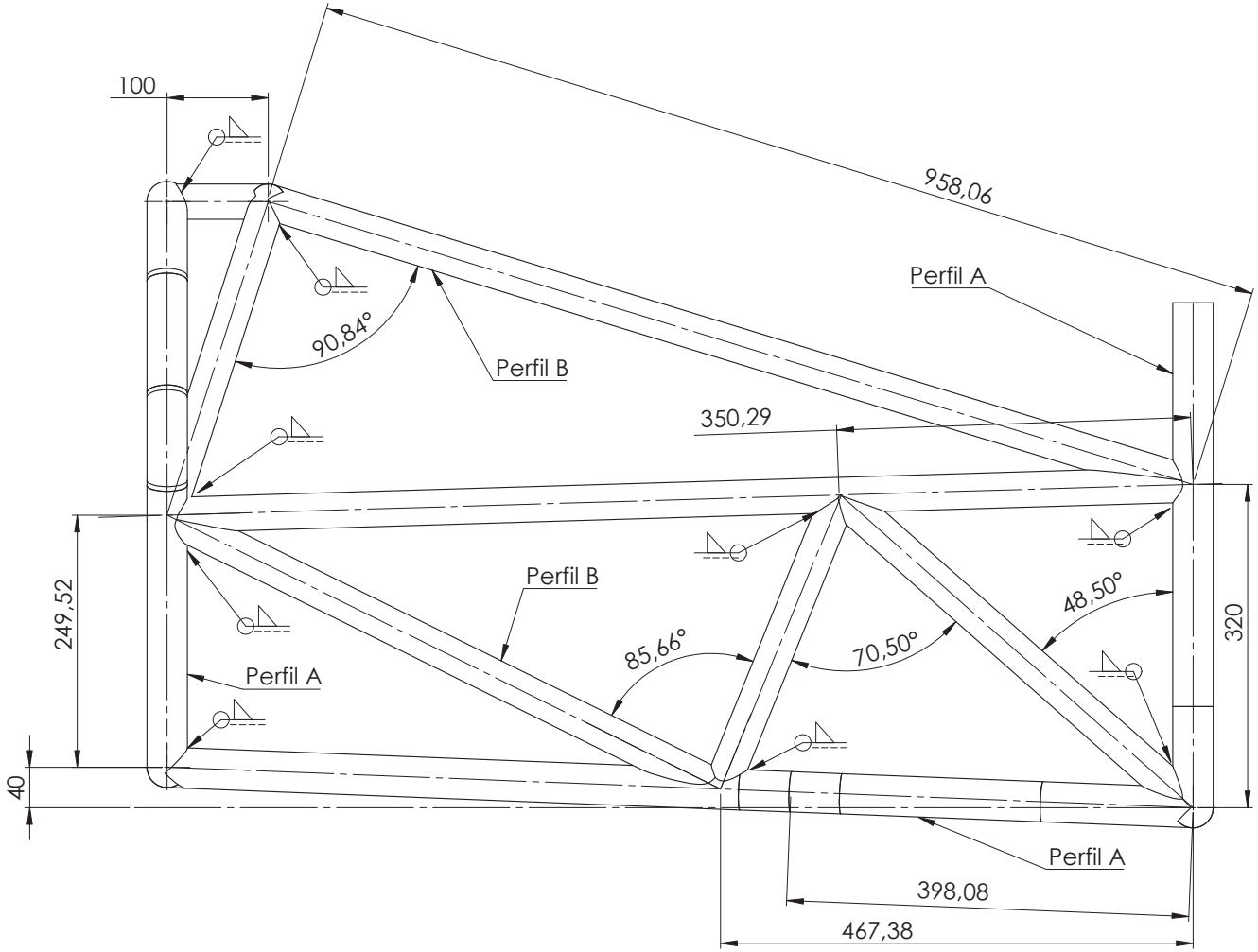


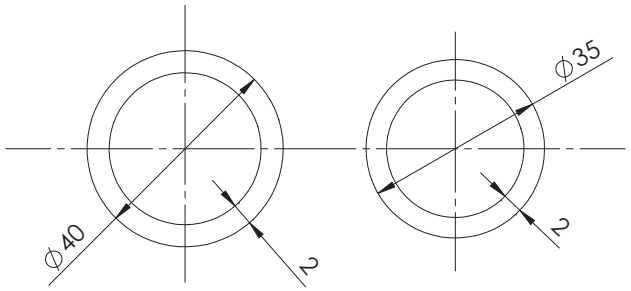
Perfil



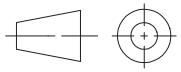
Diseño de un chasis para un mono plaza eléctrico de Formula Student				
Fecha	**01/06/2019**	Autor	ULL Universidad de La Laguna	**E.D.E.P** Máster en Ingeniería Industrial Especialidad Electromecánica Universidad de La Laguna
Dibujado (Nombre)	José Juan			
Dibujado (Apellidos)	Macías Solá			
Id. s. normas	UNE-EN-ISO			
Escala: 1:3	**Estructura del mamparo frontal**			**Nº plano: 7** **Nomb. Arch.**

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



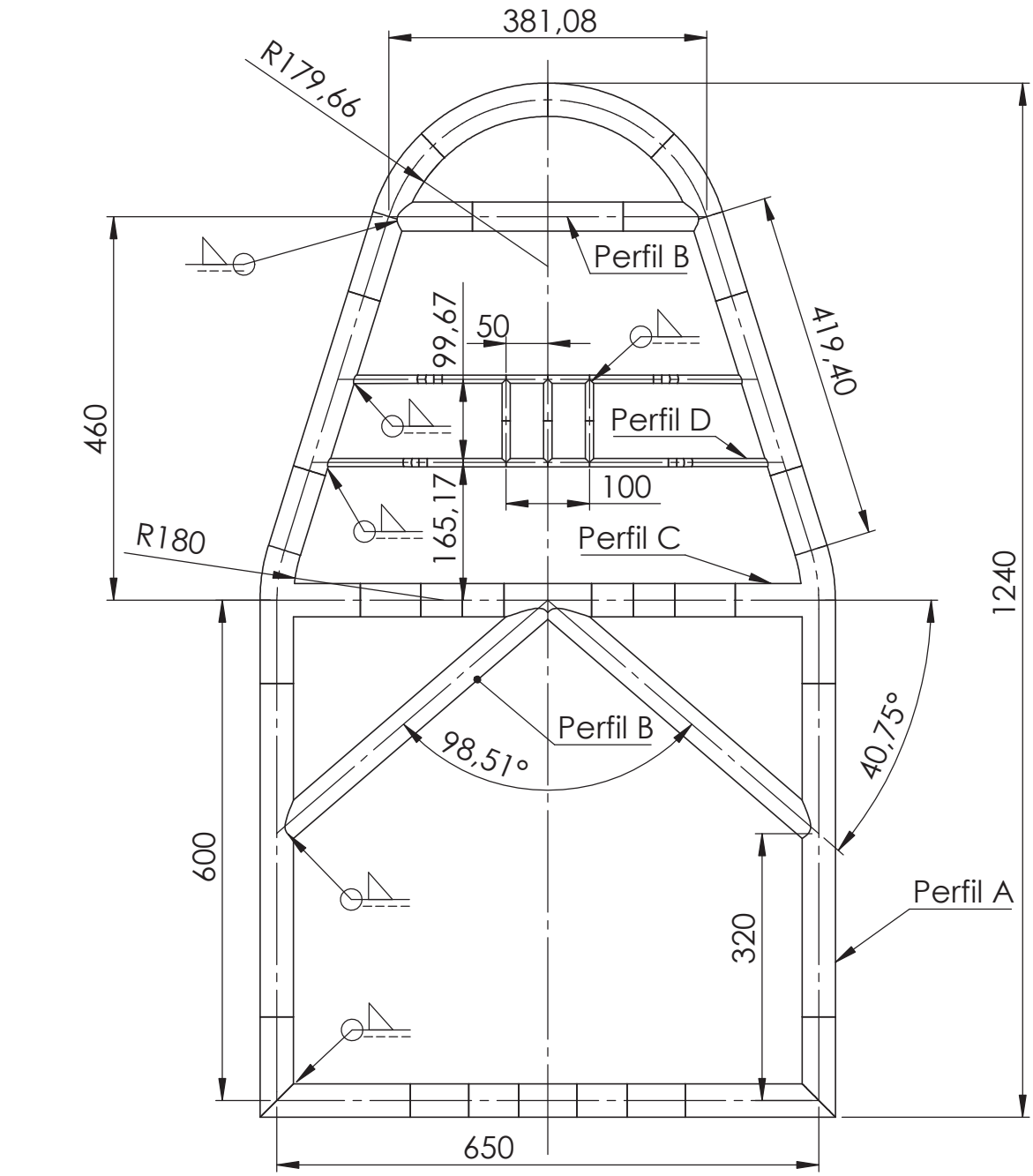


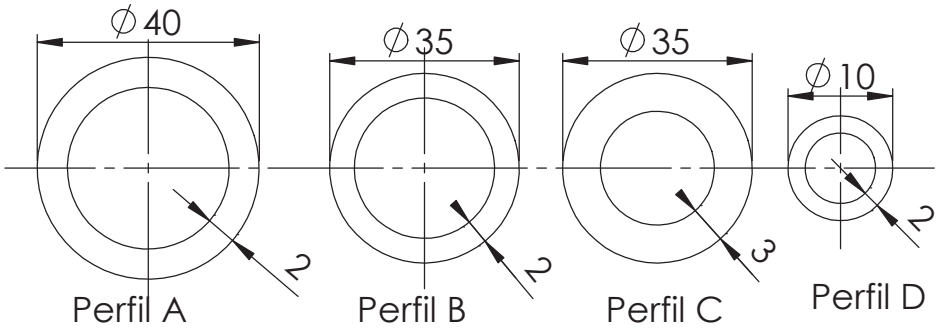
Perfil A Perfil B

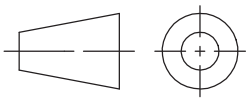


Diseño de un chasis para un monoplaza eléctrico de Formula Student				
Fecha	**01/06/2019**	Autor	ULL Universidad de La Laguna	**E.D.E.P.** Máster en Ingeniería Industrial Especialidad Electromecánica Universidad de La Laguna
Dibujado (Nombre)	José Juan			
Dibujado (Apellidos)	Macías Solá			
Id. s. normas	UNE-EN-ISO			
Escala: 1:5	**Lateral habitáculo**			**Nº plano: 8** **Nomb. Arch.**

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

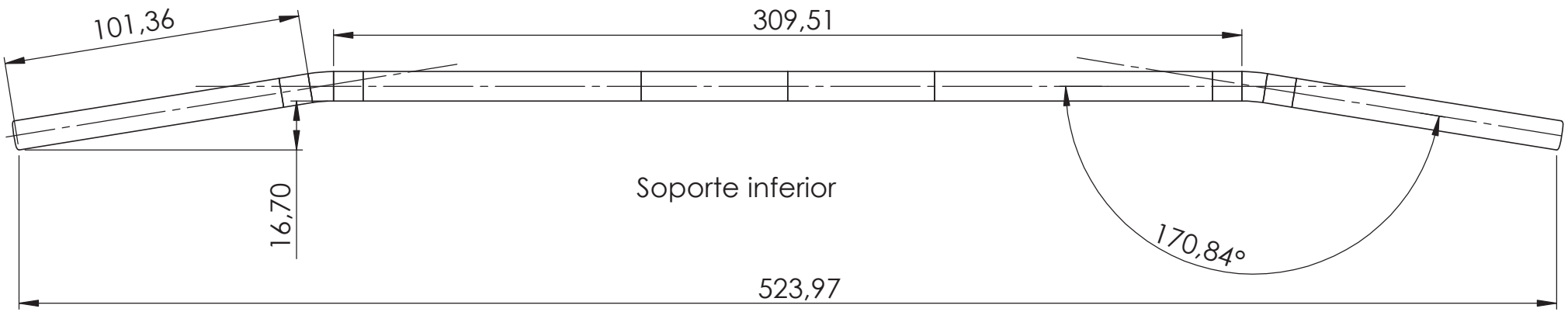


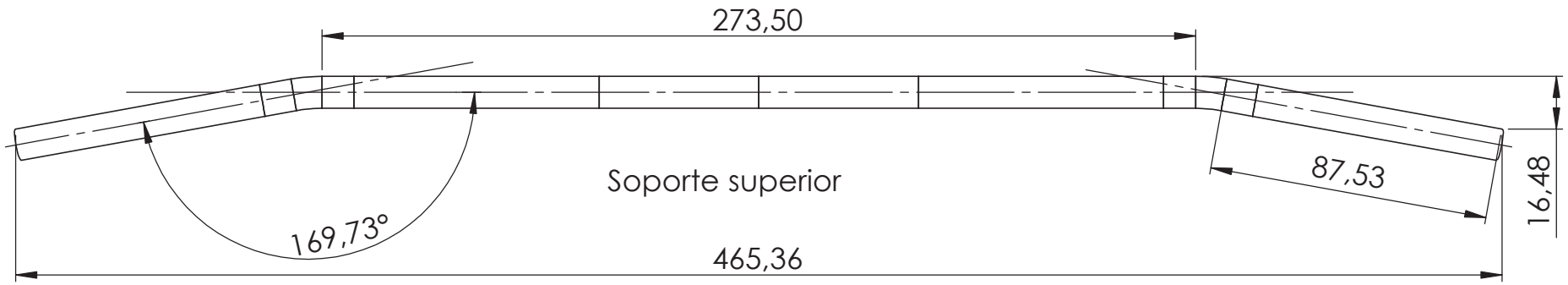


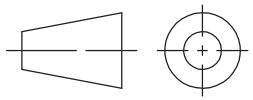


Diseño de un chasis para un monoplaza eléctrico de Formula Student				
Fecha	**01/06/2019**	Autor	ULL Universidad de La Laguna	**E.D.E.P.** Máster en Ingeniería Industrial Especialidad Electromecánica Universidad de La Laguna
Dibujado (Nombre)	José Juan			
Dibujado (Apellidos)	Macías Solá			
Id. s. normas	UNE-EN-ISO			
Escala: 1:8	**Aro principal**			**Nº plano: 9** **Nomb. Arch.**

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

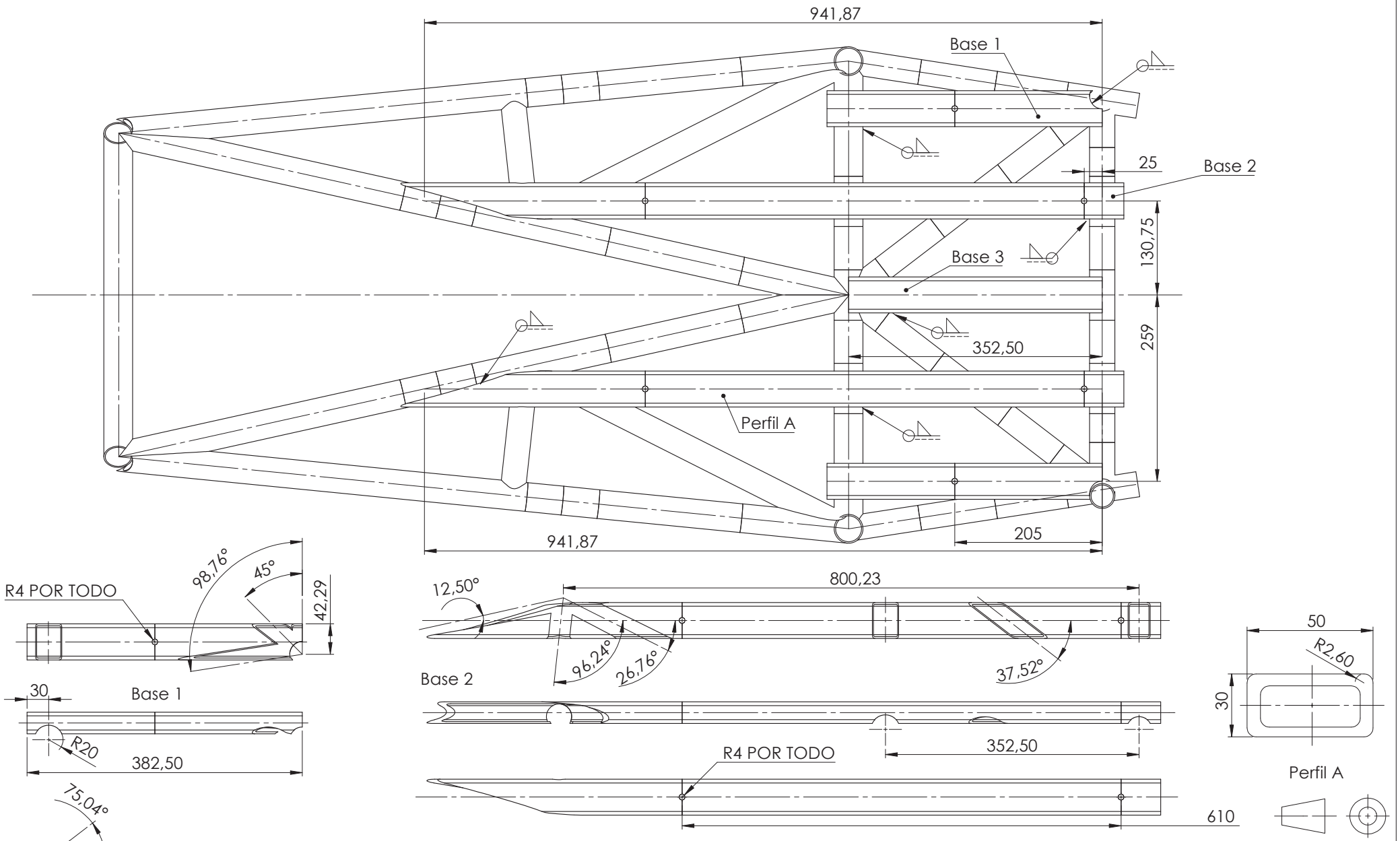






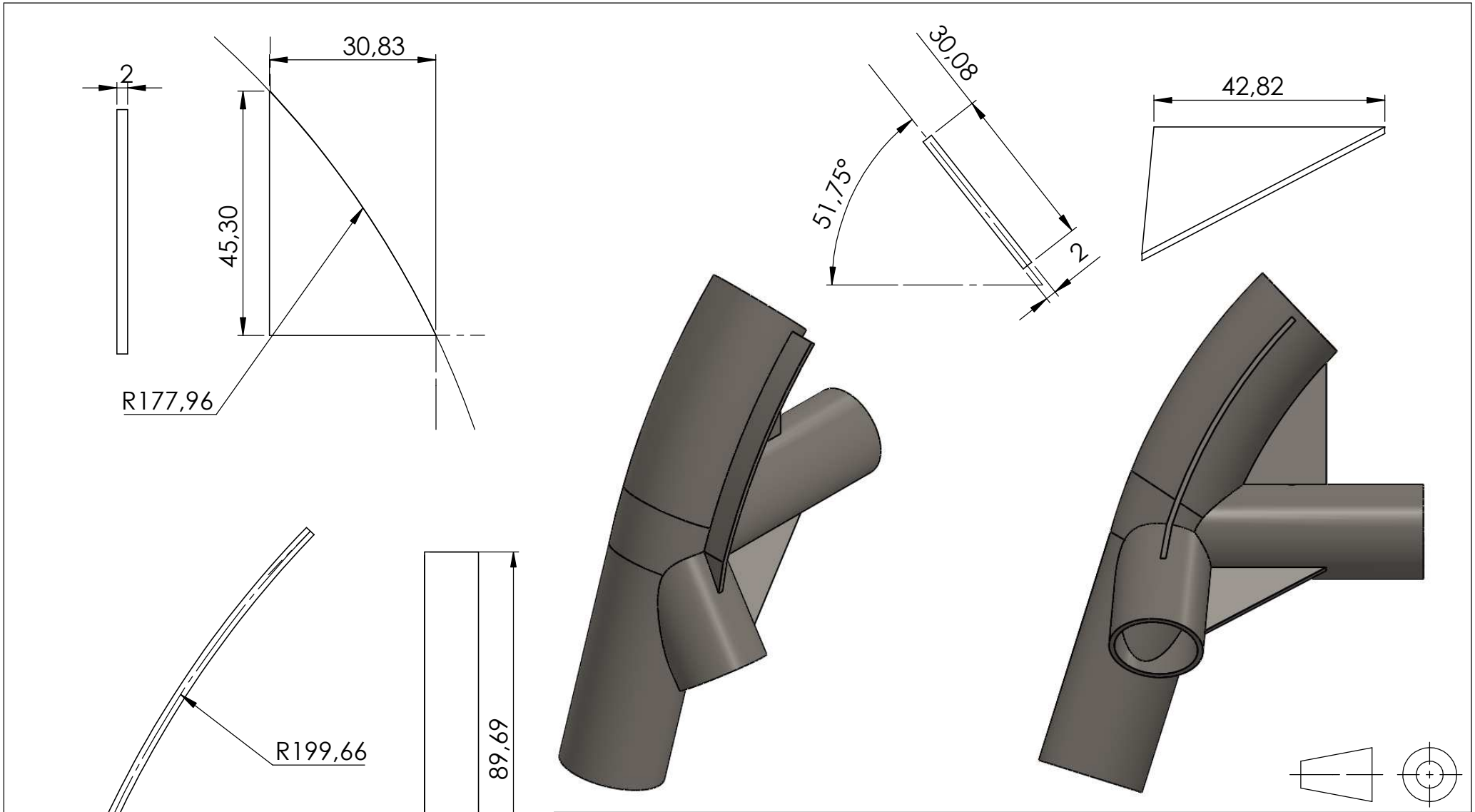
Diseño de un chasis para un monoplaza eléctrico de Formula Student				
Fecha	**01/06/2019**	Autor	ULL Universidad de La Laguna	**E.D.E.P.** Máster en Ingeniería Industrial Especialidad Electromecánica Universidad de La Laguna
Dibujado (Nombre)	José Juan			
Dibujado (Apellidos)	Macías Solá			
Id. s. normas	UNE-EN-ISO			
Escala: 1:2	**Detalle soportes reposacabezas del aro principal**			**Nº plano: 9.1** **Nomb. Arch.**

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



Diseño de un chasis para un monoplaza eléctrico de Formula Student				
Fecha	**01/06/2019**	Autor	ULL Universidad de La Laguna	**E.D.E.P.** Máster en Ingeniería Industrial Especialidad Electromecánica Universidad de La Laguna
Dibujado (Nombre)	José Juan			
Dibujado (Apellidos)	Macías Solá			
Id. s. normas	UNE-EN-ISO			
Escala: 1:5	**Cama del acumulador**			**Nº plano: 10** **Nomb. Arch.**

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



Diseño de un chasis para un monoplaza eléctrico de Formula Student

Fecha	**01/06/2019**	Autor	ULL Universidad de La Laguna	**E.D.E.P.** Máster en Ingeniería Industrial Especialidad Electromecánica Universidad de La Laguna
Dibujado (Nombre)	José Juan			
Dibujado (Apellidos)	Macías Solá			
Id. s. normas	UNE-EN-ISO			
Escala: 1:1	**Rigidizadores aro principal**			**Nº plano: 11** **Nomb. Arch.**

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.