

# **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

## **DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN CHASIS TUBULAR PARA UN PROTOTIPO DE FÓRMULA STUDENT**

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Carlos Calvo Martín de Bernardo

Tutora

Viana Lida Guadalupe Suárez



# **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN CHASIS TUBULAR  
PARA UN PROTOTIPO DE FÓRMULA STUDENT**

## **ÍNDICE GENERAL**

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Carlos Calvo Martín de Bernardo

Tutora

Viana Lida Guadalupe Suárez



# ÍNDICE GENERAL

<b>MEMORIA</b> .....	9
<b>1. HOJA DE IDENTIFICACIÓN</b> .....	14
<b>2. OBJETO</b> .....	15
2.1 Objetivo general .....	15
2.2 Objetivos específicos .....	15
<b>3. RESUMEN – ABSTRACT</b> .....	15
<b>4. ALCANCE</b> .....	16
<b>5. NORMAS Y REFERENCIAS</b> .....	17
5.1 Normativa .....	17
5.2 Bibliografía .....	17
5.3 Programas de cálculo y diseño .....	19
<b>6. ANTECEDENTES</b> .....	19
6.1 El chasis en un vehículo cotidiano .....	19
6.1.1 Historia y avances tecnológicos .....	19
6.1.2 Tipos de chasis .....	20
6.1.3 El chasis en la Formula SAE .....	23
<b>7. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS</b> .....	24
7.1 Partes esenciales del chasis de un Formula SAE .....	24
7.1.1 Main Hoop .....	25
7.1.2 Front Hoop .....	25
7.1.3 Roll Hoop Braces and Supports .....	25
7.1.4 Side Impact Structure .....	26
7.1.5 Front Bulkhead .....	26
7.1.6 Front Bulkhead Support .....	26
7.1.7 Shoulder Harness Bar .....	26
7.1.8 Rest of Frame Members .....	26
7.2 Impact Attenuator .....	27
<b>8. REQUISITOS DE DISEÑO</b> .....	27
8.1 Especificaciones del vehículo .....	28
8.2 Requisitos de material .....	30
8.3 Requisitos en las partes principales del chasis .....	31
8.3.1 Main and Front Roll Hoops .....	31

8.3.2 Main Hoop .....	32
8.3.3 Front Hoop .....	32
8.3.4 Main Hoop Bracing .....	33
8.3.5 Front Hoop Bracing .....	33
8.3.6 Front Bulkhead.....	34
8.3.7 Front Bulkhead Support .....	34
8.3.8 Impact Attenuator.....	35
8.3.9 Side Impact Structure.....	35
8.4 Cockpit .....	35
8.5 Equipamiento del piloto .....	37
8.5.1 Cinturón de la cadera .....	38
8.5.2 Arnés de hombros.....	38
8.5.3 Montura antideslizamiento.....	39
8.5.4 Protecciones del piloto.....	40
8.6 Triangulación de elementos .....	41
8.7 Tabla resumen de los requisitos que cumple la estructura .....	42
<b>9. PROPUESTAS REALIZADAS .....</b>	<b>43</b>
9.1 Anotaciones tomadas como punto de partida.....	44
9.2 Primer croquis.....	44
9.3 Primera estructura tubular .....	45
<b>10. RESULTADOS FINALES .....</b>	<b>47</b>
10.1 Estructura final del chasis .....	47
10.2 Simulación de unión de componentes al chasis .....	51
10.2.1 Suspensión.....	52
10.2.2 Unión del asiento a la estructura .....	53
10.2.3 Unión del atenuador de impacto.....	54
10.2.4 Soporte de la columna de dirección .....	55
10.2.5 Propiedades físicas del vehículo .....	55
<b>11. CONCLUSIÓN .....</b>	<b>57</b>
<b>ANEXO I: SIMULACIONES COMPUTACIONALES VERIFICACIÓN DE LA RESISTENCIA ESTRUCTURAL .....</b>	<b>64</b>
<b>1. REQUERIMIENTOS ESTRUCTURALES.....</b>	<b>68</b>
1.1 Análisis del aro principal y de los soportes .....	69
1.2 Análisis del aro frontal .....	70
1.3 Análisis de impacto lateral.....	71
1.4 Análisis de impacto frontal .....	73

1.5 Análisis del arnés de hombros .....	73
1.6 Análisis del arnés de la cadera y del antideslizamiento .....	75
1.7 Análisis de impacto diagonal en el frontal .....	76
<b>2. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>77</b>
2.1 Resultados del estudio del aro principal y sus soportes .....	78
2.2 Resultados del análisis del aro frontal .....	80
2.3 Resultados del análisis de impacto lateral .....	82
2.3.1 Círculo de impacto delantero .....	83
2.3.2 Círculo de impacto trasero .....	85
2.4 Resultados del análisis de impacto frontal .....	86
2.5 Resultados del análisis del arnés de hombros .....	87
2.6 Resultados del arnés de la cadera y del antideslizamiento .....	89
2.7 Resultados del análisis de impacto diagonal en el frontal .....	91
<b>3. CONCLUSIONES .....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO II: PRESUPUESTO DE FABRICACIÓN .....</b>	<b>95</b>
1. PRESUPUESTO DE PERFILERÍA .....	99
2. PRESUPUESTO DE SOLDADURA .....	99
<b>ANEXO III: MARCO DE LA COMPETICIÓN FORMULA STUDENT .....</b>	<b>103</b>
1. FORMULA STUDENT .....	107
1.1 Historia de la competición .....	107
1.2 Objetivo de la competición .....	108
1.3 Estructura de la competición .....	108
1.3.1 Pruebas estáticas .....	109
1.3.2 Pruebas dinámicas .....	110
1.4 Categorías .....	111
1.4.1 Clase 3 .....	111
1.4.2 Clase 2 .....	112
1.4.3 Clase 1 .....	112
<b>ANEXO IV: CATÁLOGOS Y OTROS DOCUMENTOS .....</b>	<b>114</b>
1. CATÁLOGO DE PERFILES TUBULARES DE ACERO AL CARBONO TUBASOL .....	118
2. CATÁLOGO DE ELECTRODOS CONARCO PARA SOLDADURA DE ACEROS AL CARBONO .....	119
3. MANUAL DE POSIBLE CONTROLADOR PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO .....	120
<b>PLANOS .....</b>	<b>122</b>





# **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN CHASIS TUBULAR  
PARA UN PROTOTIPO DE FÓRMULA STUDENT**

## **MEMORIA**

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Carlos Calvo Martín de Bernardo

Tutora

Viana Lida Guadalupe Suárez

*“La inteligencia es la capacidad de adaptarse al cambio”*

**Stephen William Hawking**

# ÍNDICE

\_Toc524030174

<b>1. HOJA DE IDENTIFICACIÓN</b> .....	14
<b>2. OBJETO</b> .....	15
<b>2.1 Objetivo general</b> .....	15
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	15
<b>3. RESUMEN – ABSTRACT</b> .....	15
<b>4. ALCANCE</b> .....	16
<b>5. NORMAS Y REFERENCIAS</b> .....	17
<b>5.1 Normativa</b> .....	17
<b>5.2 Bibliografía</b> .....	17
<b>5.3 Programas de cálculo y diseño</b> .....	19
<b>6. ANTECEDENTES</b> .....	19
<b>6.1 El chasis en un vehículo cotidiano</b> .....	19
<b>6.1.1 Historia y avances tecnológicos</b> .....	19
<b>6.1.2 Tipos de chasis</b> .....	20
<b>6.1.3 El chasis en la Formula SAE</b> .....	23
<b>7. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS</b> .....	24
<b>7.1 Partes esenciales del chasis de un Formula SAE</b> .....	24
<b>7.1.1 Main Hoop</b> .....	25
<b>7.1.2 Front Hoop</b> .....	25
<b>7.1.3 Roll Hoop Braces and Supports</b> .....	25
<b>7.1.4 Side Impact Structure</b> .....	26
<b>7.1.5 Front Bulkhead</b> .....	26
<b>7.1.6 Front Bulkhead Support</b> .....	26
<b>7.1.7 Shoulder Harness Bar</b> .....	26
<b>7.1.8 Rest of Frame Members</b> .....	26
<b>7.2 Impact Attenuator</b> .....	27
<b>8. REQUISITOS DE DISEÑO</b> .....	27
<b>8.1 Especificaciones del vehículo</b> .....	28
<b>8.2 Requisitos de material</b> .....	30
<b>8.3 Requisitos en las partes principales del chasis</b> .....	31
<b>8.3.1 Main and Front Roll Hoops</b> .....	31
<b>8.3.2 Main Hoop</b> .....	32
<b>8.3.3 Front Hoop</b> .....	32

8.3.4 Main Hoop Bracing .....	33
8.3.5 Front Hoop Bracing .....	33
8.3.6 Front Bulkhead.....	34
8.3.7 Front Bulkhead Support .....	34
8.3.8 Impact Attenuator .....	35
8.3.9 Side Impact Structure.....	35
8.4 Cockpit .....	35
8.5 Equipamiento del piloto .....	37
8.5.1 Cinturón de la cadera .....	38
8.5.2 Arnés de hombros.....	38
8.5.3 Montura antideslizamiento.....	39
8.5.4 Protecciones del piloto .....	40
8.6 Triangulación de elementos .....	41
8.7 Tabla resumen de los requisitos que cumple la estructura .....	42
9. PROPUESTAS REALIZADAS .....	43
9.1 Anotaciones tomadas como punto de partida.....	44
9.2 Primer croquis .....	44
9.3 Primera estructura tubular .....	45
10. RESULTADOS FINALES .....	47
10.1 Estructura final del chasis .....	47
10.2 Simulación de unión de componentes al chasis .....	51
10.2.1 Suspensión.....	52
10.2.2 Unión del asiento a la estructura .....	53
10.2.3 Unión del atenuador de impacto .....	54
10.2.4 Soporte de la columna de dirección .....	55
10.2.5 Propiedades físicas del vehículo .....	55
11. CONCLUSIÓN .....	57



## 1. HOJA DE IDENTIFICACIÓN

### Proyecto

“DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN CHASIS TUBULAR PARA UN  
PROTOTIPO DE FÓRMULA SAE”

### Peticionario

- **Cliente:** Universidad de La Laguna, Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología
- **Dirección:** Avda. Astrofísico Francisco Sánchez, La Laguna. S/C de Tenerife
- **Localidad:** San Cristóbal de La Laguna
- **C.P.:** 38200
- **Provincia:** Santa Cruz de Tenerife

### Proyectista

- **Nombre:** Carlos Calvo Martín de Bernardo
- **Dirección:** Calle Forja, Urbanización El Gramal, nº 11 A
- **Localidad:** San Cristóbal de La Laguna
- **C.P.:** 38108
- **Provincia:** Santa Cruz de Tenerife
- **Teléfono:** 646 202 504 / 922 561 764
- **Email:** carloscalvomb@gmail.com

## 2. OBJETO

El objeto del proyecto es la realización del diseño de un chasis tubular sujeto a la normativa de la Formula SAE (Society of Automotive Engineers) correspondiente a la temporada 2017-2018, el cual estará compuesto de una estructura de perfiles de acero al carbono unidos entre si mediante soldadura.

Para el diseño y el análisis de resistencia estructural del chasis, se utilizará el programa SolidWorks® 2018, verificando así que la estructura cumple con las exigencias impuestas por la normativa nombrada anteriormente.

Además del uso de la normativa, se comprueba que es posible la instalación de diferentes componentes de dimensiones estándar disponibles en el mercado para este tipo de vehículos.

### 2.1 Objetivo general

- Diseñar el chasis tubular de un monoplaza para proponer la base de un vehículo de la competición entre universidades "Fórmula SAE".

### 2.2 Objetivos específicos

- Analizar estructuralmente el chasis mediante software especializado utilizando la normativa de la Formula SAE.
- Ajustar el diseño de forma que sea práctico y a la vez ergonómico.
- Realizar un diseño que permita el fácil acoplamiento de los diferentes elementos del monoplaza.

## 3. RESUMEN – ABSTRACT

En este proyecto se realiza el diseño de una estructura tubular, destinada a servir de chasis para un monoplaza de Formula Student.

Inicialmente se desarrollarán los principios que expone la normativa para el diseño de una estructura de este tipo, siguiendo paso a paso los artículos que regulan el chasis.

Tras conocer y estudiar la normativa, se procederá al croquizado 3D de la estructura a través del software especializado SolidWorks®, el cual servirá de modelo para la verificación de la resistencia estructural del mismo.

Mediante el complemento de simulación que incluye el programa, se estudiarán diferentes casos de carga, como pueden ser un choque frontal o el vuelco del vehículo, para así comprobar si los perfiles expuestos en la normativa soportan los esfuerzos aplicados y poder obtener una estructura final reforzada en los puntos críticos de tensión.

In this project the design of a tubular structure is made, destined to serve as a chassis for a Formula Student single-seater.

Initially, the principles set forth in the regulations for the design of such a structure will be developed, following step by step the articles that regulate the chassis.

After knowing and studying the regulations, we will proceed to the 3D sketching of the structure through the specialized software SolidWorks®, which will serve as a model for the verification of its structural strength.

By means of the simulation complement included in the computer program, different load cases will be studied, such as a frontal crash or vehicle rollover, in order to check whether the profiles exposed in the regulations resist the applied efforts and obtain a final structure reinforced in the critical points of tension.

## 4. ALCANCE

El proyecto abarca el diseño y el análisis estructural de la estructura tubular del chasis, algo que se realizará a través del complemento computacional SolidWorks®. También se realizará un presupuesto aproximado del costo que conllevaría a la Universidad de La Laguna la fabricación de este.

En ningún caso, se diseñará o estudiará cualquier otro tipo de componente del vehículo, solamente se utilizarán para dar un ejemplo visual de su montaje y comprobar que se pueden instalar en la estructura principal.



## 5. NORMAS Y REFERENCIAS

### 5.1 Normativa

- Norma española UNE: 157001. Criterios generales para la elaboración de proyectos.
- Formula SAE International Rules 2017-2018, de 13 de septiembre de 2017.
- Formula Student Germany 2018.
- Norma española UNE 1-039-94. Dibujos técnicos. Acotación.
- Federación Internacional del Automóvil, FIA 8857-2001.

### 5.2 Bibliografía

- [1] «Carmesi Wordpress,» 2013. [En línea]. Disponible en: <https://carmesi.wordpress.com>.
- [2] «Motor Historia,» 2007. [En línea]. Disponible en: <http://motorhistoria.blogspot.com>.
- [3] «Fundación Universitaria Los Libertadores,» 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.ulibertadores.edu.co/>.
- [4] «EAF DEL AUTOMÓVIL,» 2013. [En línea]. Disponible en: <http://ortizalvarosua12.blogspot.com>.
- [5] «Loctite Teroson,» Henkel Ibérica, S.A, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.reparacion-vehiculos.es>.
- [6] «SoloStocks,» 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.solostocks.com>.
- [7] «Fuel Wasters,» 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.fuelwasters.com>.
- [8] «Research Gate,» 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net>.
- [9] SAE International, «Formula SAE Rules,» Warrendale P.A., 2017.

- [10] «Merlin Motorsport,» 2016. [En línea]. Disponible en:  
<https://www.merlinmotorsport.co.uk>.
- [11] D. A. I. L. César, «National Geographic España,» 2017. [En línea].  
Disponible en: <https://www.nationalgeographic.com.es>.
- [12] «Universitat Politècnica de València,» 2016. [En línea]. Disponible  
en: <https://riunet.upv.es>.
- [13] «RT,» 2018. [En línea]. Disponible en: <https://actualidad.rt.com>.
- [14] «Indeed,» 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.indeed.es>.
- [15] «Universidad de Valladolid,» 2016. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.uva.es>.
- [16] «EUSS MOTORSPORT,» 2017. [En línea]. Disponible en:  
<https://www.eussmotorsport.com>.
- [17] «FIRENZE RACE TEAM,» 2013. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.firenzerace.it>.
- [18] «Universidad Politécnica de Madrid,» 2014. [En línea]. Disponible en:  
<http://oa.upm.es>.
- [19] Tecacat, «Tuteorica,» 2018. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.tuteorica.com>.
- [20] «Grupo Hastinik,» 2018. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.grupohastinik.com>.
- [21] «FORMULA SAE,» 2018. [En línea]. Disponible en:  
<https://www.fsaeonline.com>.
- [22] «UPM RACING,» 2013. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.upmracing.es>.
- [23] «Red Tecnológica MID,» 2018. [En línea]. Disponible en:  
<https://sistemamid.com>.
- [24] «Unitek Industrie Electronik,» 2018. [En línea]. Disponible en:  
<https://www.unitek-industrie-elektronik.de>.

## 5.3 Programas de cálculo y diseño

- SolidWorks® 2018
- Microsoft Excel 2017
- Photoview 360°

## 6. ANTECEDENTES

### 6.1 El chasis en un vehículo cotidiano

#### 6.1.1 Historia y avances tecnológicos

El chasis es la estructura base de cualquier tipo de vehículo, ya sea automóvil o motocicleta. Este consiste en una estructura que puede asemejarse al esqueleto de un animal, el cual soporta todo el peso del vehículo, le da rigidez y une los diferentes componentes mecánicos como por ejemplo el propulsor y la suspensión.

Los vehículos que se fabricaban hace ya más de cien años, consistían en dos partes bien definidas que se unían entre sí, el chasis ya nombrado, y la carrocería. Estos eran de madera y su estructura principal fue tomada de las técnicas de construcción de los carruajes de caballos. A partir del año 1930 comenzaron a ser sustituidos por estructuras similares, pero de acero, material más resistente y rígido.



Figura 1: Carruaje de caballos. [1]

En la actualidad, la mayoría de los vehículos utilizan la técnica del monocasco, donde las diferentes partes que componen la estructura del vehículo se unen mediante puntos de soldadura y todos los elementos aportan mayor rigidez al conjunto.

### 6.1.2 Tipos de chasis

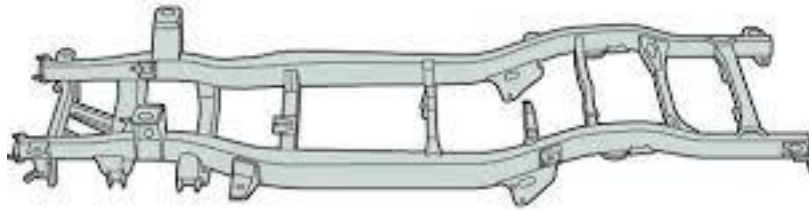
Existen básicamente tres tipos de chasis en el mundo del automóvil, el chasis independiente, el autoportante y el tubular.

El chasis independiente, fue el primer diseño utilizado en los vehículos hasta 1923, donde se lanzó al mercado el Lancia Lambda, primer vehículo con estructura monocasco.



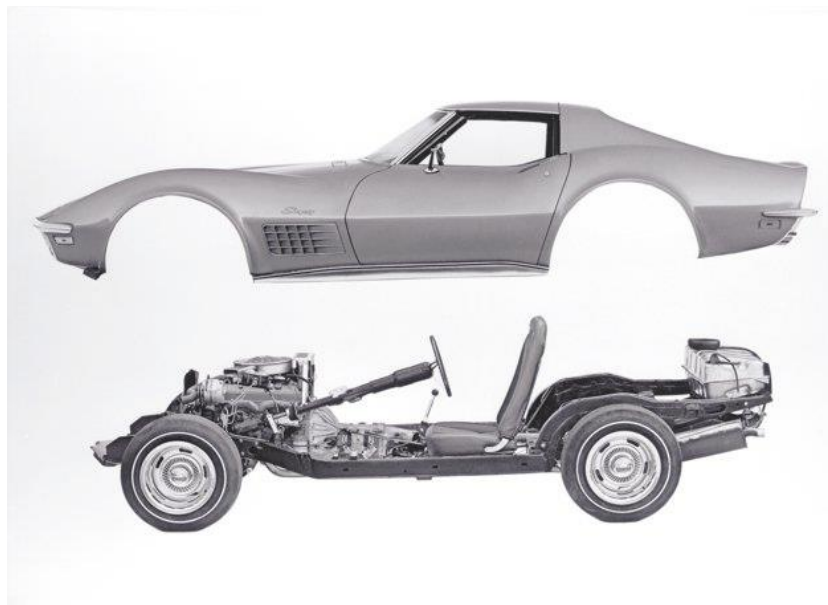
*Figura 2: Lancia Lambda. [2]*

Este tipo de chasis se basaba en una estructura muy parecida a la que utilizaban los antiguos coches de caballo y su diseño era básicamente bastidores de largueros en forma de escalera, aunque también se añadió a su diseño travesaños transversales y en forma de X.



*Figura 3: Chasis independiente de un vehículo común. [3]*

En Estados Unidos, la sustitución del chasis independiente por el monocasco necesitó de varias décadas más que en el resto del mundo, ya que existía entre las compañías de automóviles una cultura basada en lanzar al mercado un nuevo diseño de los vehículos anualmente, por ejemplo, la gama Mustang de Ford. Esto se dificultaba con la implementación de la nueva estructura, ya que con el independiente se podía mantener el mismo chasis y variar solo la carrocería, es decir, su diseño exterior, vendiéndolo como un modelo nuevo e innovador.



*Figura 4: Diseño nuevo de carrocería con mismo chasis. [4]*

A pesar de la generalización del chasis autoportante o monocasco, actualmente los vehículos todoterrenos, camiones, autobuses o limusinas continúan llevando este tipo de chasis, ya que en caso de impacto tienen

una reparación más fácil y es mucho más simple alargar su longitud en el caso de los vehículos largos.

Como comenté previamente, el primer vehículo en incorporar la técnica del chasis autoportante fue el Lancia Lambda de 1923, aunque los primeros vehículos en tener una gran serie con dicho diseño fueron el Chrysler Airflow y el Citroën Traction Avant.

Su diseño se basa en la unión de parte de la estructura de la carrocería a un bastidor mediante soldadura, para así conseguir que la carrocería aguante parte del peso del vehículo. Este es el motivo por el que se le denomina monocasco, ya que no existe la antigua diferenciación entre chasis y carrocería, sino que el vehículo se construye como una sola pieza que lo une todo.

Esto permite que aumente la seguridad de los ocupantes del vehículo, además de que es más fácil la instalación y la conexión entre sí de los diferentes componentes del automóvil.



*Figura 5: Estructura monocasco. [5]*

Finalmente, existe la estructura de chasis tubular, utilizada en algunos vehículos clásicos deportivos y en la competición estudiada en este TFG, la Formula Student. Además, es comúnmente utilizada en vehículos de ocio o deportivos como pueden ser los buggies o los quads [ver figura 6].





Figura 6: Estructura monocasco. [6]

Esta técnica está basada en la unión de finos tubos dispuestos entre sí de forma que aumenten la rigidez y la resistencia del vehículo, pero reduciendo considerablemente su peso.

La gran desventaja de este tipo de estructuras es la dificultad de fabricación, además de que la unión entre los diferentes tubos se suele realizar mediante soldadura, algo que aumenta de forma abundante el coste final de la construcción del vehículo.

En la mayoría de las ocasiones, se suele instalar un recubrimiento de láminas metálicas en los huecos entre tubos, para así aportar mayor rigidez al automóvil y aumentar la protección del piloto en caso de recibir un impacto.



Figura 7: Estructura tubular de un  
Vehículo de Formula SAE. [7]

### 6.1.3 El chasis en la Formula SAE

En la competición, existe una pequeña libertad de decisión a la hora de diseñar el chasis, pudiendo elegir materiales modernos pero costosos,

como la fibra de carbono, o materiales más baratos como el acero al carbono.

La elección del diseño suele venir relacionada con la experiencia, el apoyo económico y los objetivos de cada equipo o universidad. Las universidades con mayor presupuesto suelen optar por una estructura monocasco de fibra de carbono, la cual permite obtener un vehículo realmente ligero y resistente, con mejores prestaciones que el acero al carbono usado comúnmente por los equipos.

Las estructuras tubulares de acero al carbono suelen ofrecer también una buena respuesta ante los esfuerzos, aunque el aumento de peso en comparación con la estructura de fibra es considerable, además de que al ser generalmente estructuras reticulares soldadas es necesario que trabaje en ellas un experto soldador, dado que al ser puntos críticos en la estructura es muy fácil que un pequeño fallo conlleve un gran peligro para el piloto. Además, la deformación que permite es mucho menor que el monocasco de fibra, pero para un equipo como el de la Universidad de La Laguna que está comenzando en el mundo de la Formula SAE es el ideal, ya que su diseño y su estudio es mucho más sencillo.

En el ámbito de innovación en este tipo de chasis, algunos equipos han incluido perfiles cuadrados en determinadas secciones de la estructura, dado que son más fáciles de instalar en partes con forma cuadrada o rectangular, aunque en las zonas en las que es necesario curvar el perfil siempre se utilizan los tubulares ya que no pierden sus propiedades de sección o de inercia.

También existe la posibilidad de unir los perfiles mediante uniones atornilladas, algo que reduce aún más el gasto, pero la opción más común suele ser la soldadura.

## **7. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS**

### **7.1 Partes esenciales del chasis de un Formula SAE**

A la hora de diseñar el chasis de un vehículo dedicado a esta competición, es necesario conocer las diferentes partes de la estructura, predefinidas por la normativa empleada.



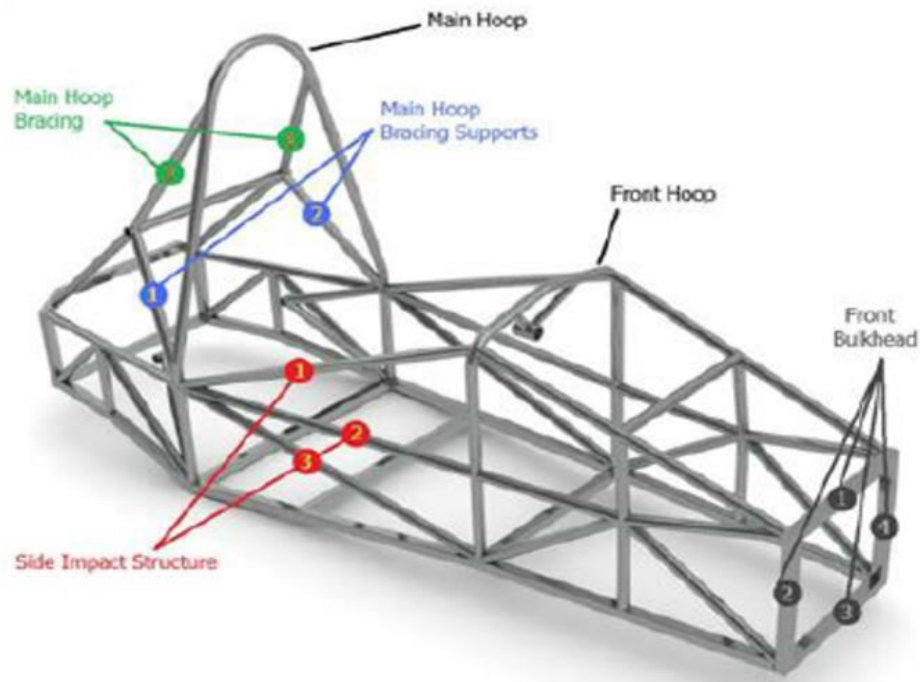


Figura 8: Disposición de las partes esenciales del chasis [8]

### 7.1.1 Main Hoop

El main hoop o arco principal, es la barra que se coloca sobre la cabeza del piloto para su protección en caso de vuelco del vehículo. Su extremo acaba en forma circular para evitar tener un punto crítico, ya que si acaba en una unión en esquina es poco deformable y en caso de impacto podría romperse de forma más sencilla.

### 7.1.2 Front Hoop

El front Hoop o arco delantero, tiene la función de proteger la parte superior del cuerpo del piloto, es decir, pecho, brazos y hombros. El conjunto de main hoop y roll hoop se conoce como roll hoops en el ámbito de la normativa vigente.

### 7.1.3 Roll Hoop Braces and Supports

Estos elementos se definen como los soportes anclados directamente a los aros delantero y principal, y a los propios perfiles que sirven para aliviar las tensiones de los soportes principales.

### **7.1.4 Side Impact Structure**

Se define como la estructura de tubos laterales que permite la protección del piloto en caso de impacto. Además, debe ser estudiada para que no permita que objetos extraños de gran tamaño puedan atravesarla, mejorando la seguridad del piloto.

### **7.1.5 Front Bulkhead**

Se conoce al front bulkhead como la parte delantera del vehículo, compuesta por una estructura cuadrada o rectangular donde irá apoyado el atenuador de tensiones. Esta debe ser resistente ya que en caso de impacto frontal es el primer elemento en recibirlo.

### **7.1.6 Front Bulkhead Support**

Son los perfiles que se encuentran uniendo el front bulkhead con el resto del chasis, estos deben ser incluso más resistentes al impacto que el propio bulkhead, ya que es la que imposibilita que toda la parte delantera dañe las piernas del piloto. Además, deben permitir que las tensiones se distribuyan de forma uniforme hacia el resto de la estructura.

### **7.1.7 Shoulder Harness Bar**

Es el tubo que se encuentra entre ambos lados del aro principal. Como su nombre indica, a él van unidos los enganches del arnés que sujeta los hombros del piloto.

### **7.1.8 Rest of Frame Members**

Se conoce como la parte deformable del chasis, y es la que mantiene todos los elementos principales de la estructura unidos, ayudando a aliviar las tensiones de los elementos principales.

## 7.2 Impact Attenuator

Es un elemento externo al chasis que se utiliza como su nombre indica para reducir las tensiones en caso de un impacto frontal, ya que se coloca delante del front bulkhead. Las medidas de este están normalizadas por la propia FSAE por lo que no es necesario estudiarlo. Además, está creado de un material muy deformable capaz de resistir gran cantidad de energía en muy poco tiempo, como pueden ser las fibras de vidrio, carbono o las espumas de poliuretano. El material estándar utilizado es el Dow Impaxx® 700.

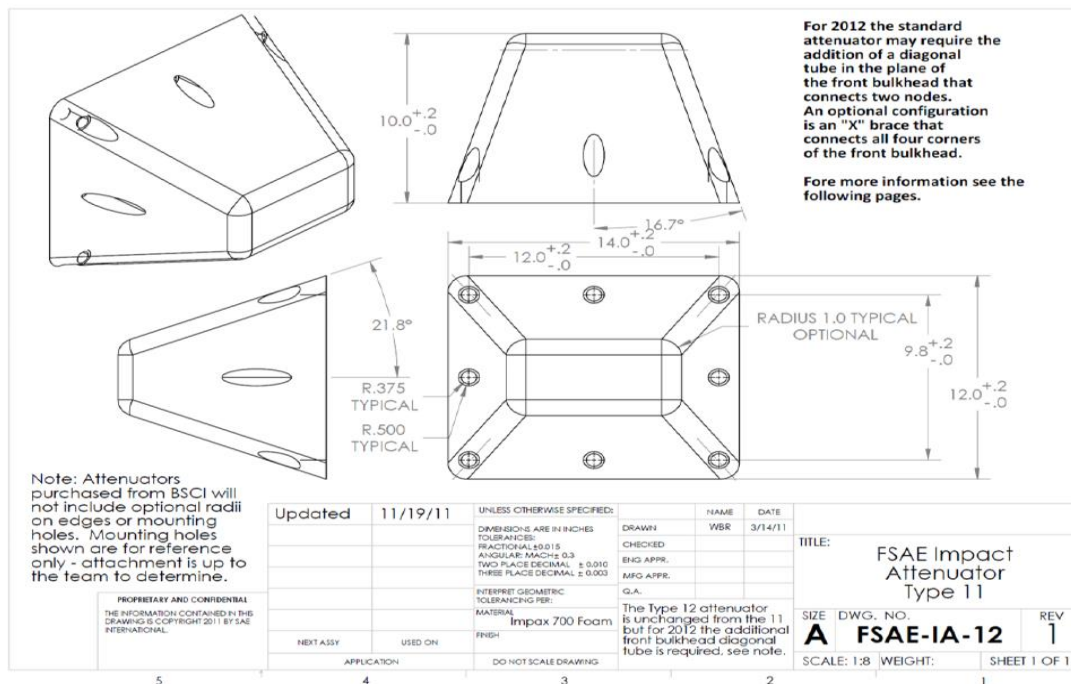


Figura 9: Impact Attenuator [9]

## 8. REQUISITOS DE DISEÑO

A través de la página web de la organización de la competición, se puede consultar una normativa propia extensa. Aunque la Formula SAE es internacional, existen diferentes traducciones de la normativa, que al no ser exactamente iguales suele ser aconsejable que por lo menos se compruebe en varias lo que se expone en cada una.

En este TFG, he decidido guiarme por la normativa estadounidense y por la normativa alemana (ambas de la temporada 2017-2018) las cuales están redactadas en inglés. Además, también se puede encontrar la traducción de la normativa en combinaciones del inglés junto con el portugués, el italiano o el japonés.

A continuación, se exponen los diferentes artículos que hacen referencia al diseño del chasis [1]. Hay que comentar que este tipo de requerimientos no son de obligado cumplimiento, pero si no se siguen será necesario que el chasis cumpla determinados casos de sobrecarga. Esto hará que aumente el peso de los perfiles ya que los propuestos por la normativa no resisten las tensiones.

Este tipo de chasis se conocen en la normativa como Alternative Frames, y la estructura presentada en el documento pertenece a este grupo.

## 8.1 Especificaciones del vehículo

- La distancia mínima entre ejes será de 1525 mm, medidos desde el centro de contacto con el suelo de los neumáticos delanteros hasta los traseros, con las ruedas dispuestas en posición paralela al vehículo [ver figura 10].
- La distancia entre ruedas del eje más pequeño del vehículo no será inferior al 75% de la distancia entre ruedas más grande.

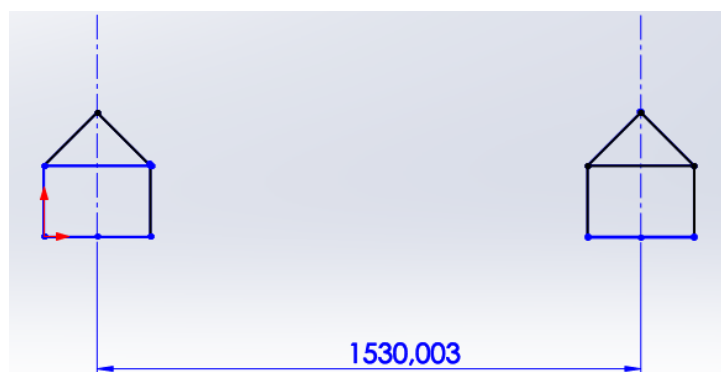


Figura 10: Distancia entre ejes  
[elaboración propia]

- El vehículo estará diseñado para el piloto más alto del equipo y además debe estar adaptado a las medidas de un hombre de dimensiones que representen al 95% de la población.
- Un círculo con un diámetro de 200 milímetros representará las caderas, otro círculo de las mismas dimensiones representará la parte de los hombros y ambos círculos estarán unidos por una línea recta de 490 milímetros [ver figura 11].
- Un círculo de 300 milímetros de diámetro representará la cabeza junto con el casco y este estará unido al círculo de los

hombros mediante una línea recta de 280 milímetros [ver figura 11].

- En la parte inferior del asiento se coloca un círculo de 200 milímetros, además la distancia entre el centro de dicho círculo y la cara que representa los pedales será como mínimo de 915 milímetros [ver figura 11].
- El círculo que representa a los hombros se apoyará en el asiento trasero y se colocará máximo a 25,4 milímetros de distancia de la cabeza [ver figura 11].

A continuación, se muestra una representación de lo explicado anteriormente, incluyendo la creación del piloto en el programa SolidWorks® 2018.

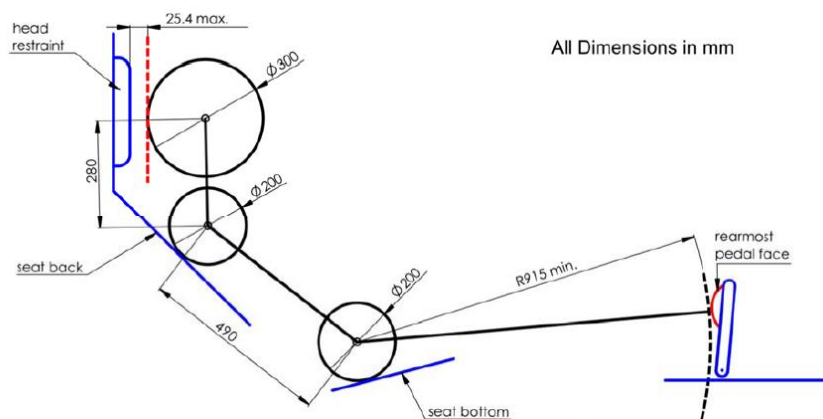


Figura 11: Posición del piloto [9]

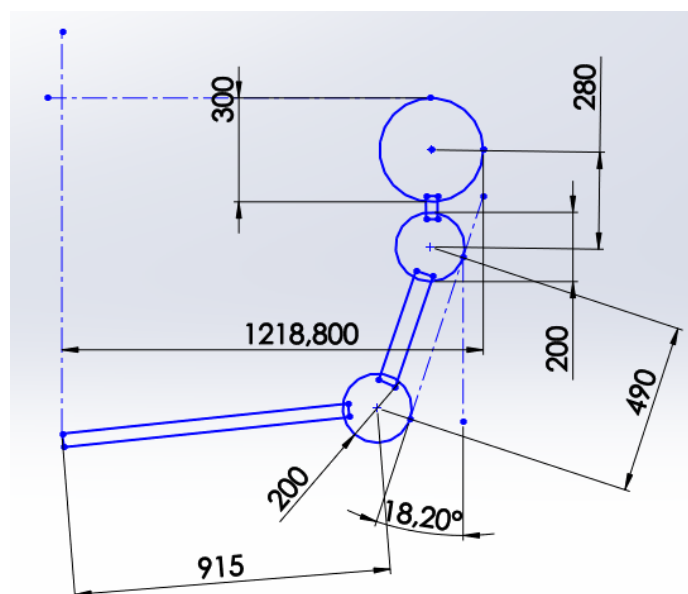


Figura 12: Posición del piloto [elaboración propia]

## 8.2 Requisitos de material

Para el diseño del chasis común en la Formula SAE, la normativa exige unas medidas mínimas para los perfiles en las partes principales de la estructura y en los elementos deformables.

A continuación, en la figura 13, se expone la tabla original incluida en la normativa, la cual está redactada para perfiles de acero templado o aleado con un mínimo de 0,1% de carbono.

ITEM or APPLICATION	OUTSIDE DIMENSION X WALL THICKNESS
Main & Front Hoops, Shoulder Harness Mounting Bar	Round 1.0 inch (25.4 mm) x 0.095 inch (2.4 mm) or Round 25.0 mm x 2.50 mm metric
Side Impact Structure, Front Bulkhead, Roll Hoop Bracing, Driver's Restraint Harness Attachment (except as noted above) EV: Accumulator Protection Structure	Round 1.0 inch (25.4 mm) x 0.065 inch (1.65 mm) or Round 25.0 mm x 1.75 mm metric or Round 25.4 mm x 1.60 mm metric or Square 1.00 inch x 1.00 inch x 0.047 inch or Square 25.0 mm x 25.0 mm x 1.20 mm metric
Front Bulkhead Support, Main Hoop Bracing Supports, Shoulder Harness Mounting Bar Bracing EV: Tractive System Components Protection	Round 1.0 inch (25.4 mm) x 0.047 inch (1.20 mm) or Round 25.0 mm x 1.5 mm metric or Round 26.0 mm x 1.2 mm metric
Bent Upper Side-Impact Member (T3.24.3a)	Round 1.375 inch (35.0mm) x 0.047 inch (1.20mm)

Figura 13: Tabla de perfiles [9]

En el caso de utilizar otro tipo de perfiles, los equipos tendrán que utilizar un mínimo de espesor de 2 milímetros en los aros y la barra del arnés de los hombros, y un mínimo de 1,2 milímetros de espesor en el resto de los elementos. Además, existen restricciones con la variación del material, en el caso de usar aluminio o magnesio el espesor mínimo será de 3 milímetros, y si la opción es usar titanio será de 1,2 milímetros. También se pueden utilizar materiales compuestos como la fibra de carbono, pero será necesario verificar la resistencia estructural para garantizar la integridad del chasis y por lo tanto la seguridad del piloto.

Si se utiliza cualquier otro tipo de material que no sea el acero templado o aleado, la FSAE también obliga a realizar probetas de material [ver figura 14], las cuales serán sometidas a diferentes ensayos de tensión y en ningún caso debe producirse el fallo en ellas, es decir, no superar la tensión límite admisible del material, dado que, si se supera, el material no podrá estudiarse de forma lineal.

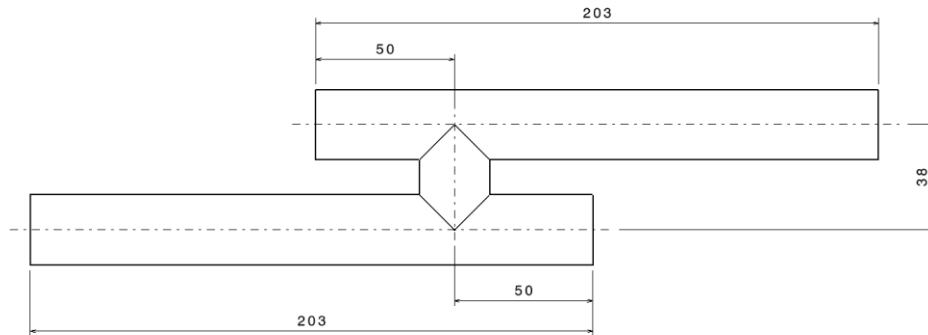


Figura 14: Probeta utilizada en los ensayos al material [9]

### 8.3 Requisitos en las partes principales del chasis

La normativa permite la creación de una estructura alternativo que no cumpla al 100% los requisitos de diseño, como puede ser el añadir estructuras de refuerzo o variar el material utilizado a otro más innovador como la fibra de carbono. Esto se conoce en la normativa como estructura de chasis alternativa, las cuales deben ser estudiadas a través de los diferentes casos de carga explicados en la normativa.

A continuación, se exponen los artículos y requisitos de la normativa que sí se cumplen y que han sido utilizados para el diseño principal de la estructura, a pesar de que posteriormente se hayan añadido diferentes refuerzos.

#### 8.3.1 Main and Front Roll Hoops

La altura final del arco frontal y del principal, además de la altura del piloto empleado por la normativa, están relacionadas entre sí [ver figura 11].

La exigencia en cuanto a medidas es que, en la posición normal del piloto, haya mínimo 50,8 milímetros de distancia entre el final del casco y una línea que una los puntos superiores del aro principal y del aro delantero. Además, la distancia entre el casco y la línea que une el punto superior del aro principal y la parte inferior del soporte de dicho aro deberá de ser también de mínimo 50,8 milímetros.

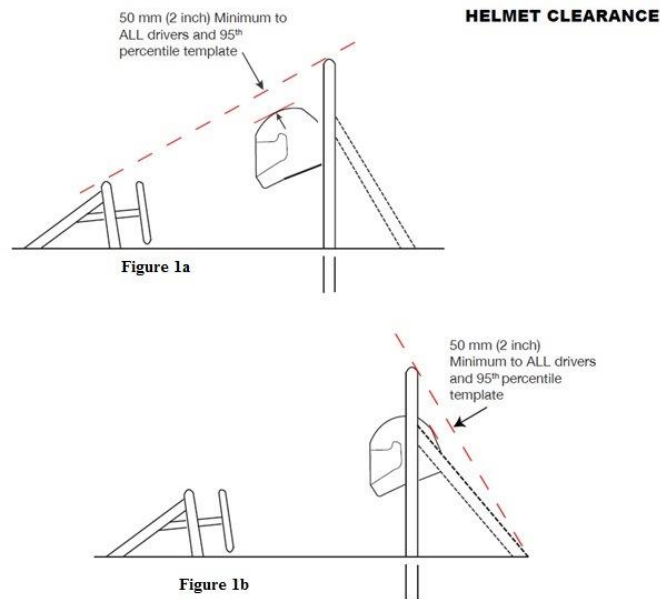


Figura 15: Restricciones entre los aros y el casco del piloto [9]

### 8.3.2 Main Hoop

El aro principal, debe estar fabricado de una sola pieza continua, es decir, la parte superior del aro al ser curva, deberá ser doblada previamente a la instalación. Además, tiene que comenzar en la parte inferior de un lado del chasis y continuar hasta la parte inferior del otro lado. Finalmente, desde una vista lateral, la parte que se encuentra por debajo de la barra superior de la estructura lateral de impacto debe tener una inclinación de  $10^{\circ}$  aproximadamente con la vertical, y la parte superior no puede llegar a esta inclinación, aunque lo más común es que sea totalmente vertical.

En cuanto al material, está totalmente prohibido utilizar aleaciones de aluminio, aleaciones de titanio o materiales compuestos para la fabricación del aro principal.

### 8.3.3 Front Hoop

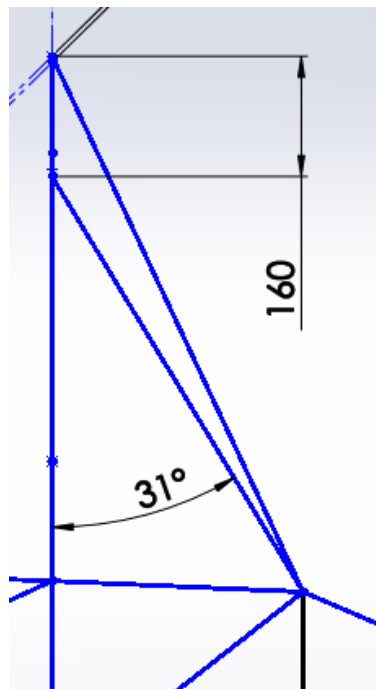
Las restricciones principales del aro frontal son parecidas a las del principal, debiendo extenderse desde el punto inferior de un lado hasta el punto inferior del otro, aunque al contrario que el principal, con la triangulación adecuada puede fabricarse en varias piezas soldadas entre sí. Además, el punto superior del aro no puede encontrarse por debajo del punto superior del volante ni a una distancia mayor a 250 milímetros



horizontalmente. Finalmente, el aro frontal no puede tener una inclinación mayor a  $20^\circ$  con la vertical.

### 8.3.4 Main Hoop Bracing

Deben ser mínimo uno a cada lado del chasis, ya sea por la parte delantera o trasera del aro principal. La parte superior de estos debe encontrarse lo más cerca posible del final del aro, pero nunca a menos de 16 centímetros. Además, la inclinación con la vertical tiene que ser como mínimo de 30 grados [ver figura 16].



*Figura 16: Inclinación y distancia entre la parte superior del aro y la parte superior del refuerzo [elaboración propia]*

Junto con los soportes del aro principal, es necesario incluir otros soportes para unirlos al resto del chasis. En el caso de colocar dos por cada lado, el delantero debe ir unido siempre al mismo nodo en el que acaba el perfil superior de la estructura lateral de impacto.

### 8.3.5 Front Hoop Bracing

Los refuerzos del aro frontal siguen los mismos requisitos principales que los del aro principal, por lo que debe existir como mínimo uno a cada

lado del chasis en la parte frontal. Estos deben proteger las piernas del piloto y tienen que colocarse lo más cerca posible del punto superior del aro frontal, pero nunca a menos de 50,8 milímetros.

Finalmente, aunque no es nuestro caso, si la inclinación del aro frontal con la vertical fuese superior a  $10^\circ$ , sería necesario incluir otro soporte adicional en la parte trasera [ver figura 17].

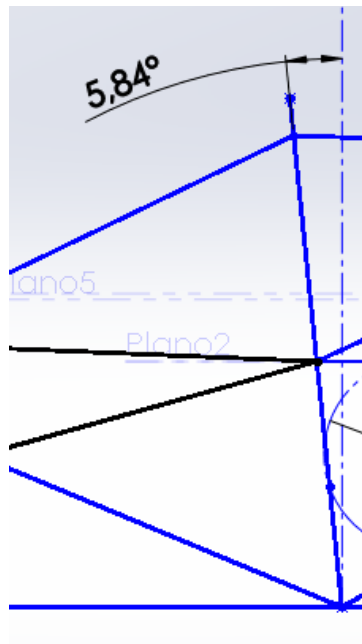


Figura 17: Inclinación entre el aro frontal y la parte superior del refuerzo [elaboración propia]

### 8.3.6 Front Bulkhead

La estructura frontal debe estar fabricada de tubos cerrados como los indicados en el apartado 8.2. Detrás no puede colocarse ningún elemento que pueda atravesarlo como por ejemplo baterías, depósitos hidráulicos, etc.

### 8.3.7 Front Bulkhead Support

La estructura que refuerza el frontal del chasis debe encontrarse integrada en el resto de la estructura de forma que permita una correcta distribución de tensiones. Además, tiene que estar formado por como mínimo tres perfiles en cada lado, uno inferior, otro superior y uno en diagonal uniendo estos dos.

### 8.3.8 Impact Attenuator

El atenuador de impacto debe unirse al chasis mediante una placa que evite la intrusión de objetos extraños para así proteger las piernas del piloto. Esta placa estará unida directamente a la parte frontal y tendrá un espesor de 1,5 milímetros. Dado que se va a unir mediante soldadura, la placa debe llegar hasta línea media de los perfiles que conforman la parte frontal.

### 8.3.9 Side Impact Structure

La estructura de impacto lateral está compuesta por como mínimo tres miembros tubulares en cada lado del chasis. El elemento inferior tendrá que conectar la parte inferior del aro principal y la parte inferior del aro frontal. El elemento superior debe encontrarse a una distancia del suelo entre 300 y 350 milímetros [ver figura 18]. Finalmente, el miembro intermedio unirá diagonalmente el superior y el inferior, con su parte baja en el lado del aro frontal y su parte alta en el lado del aro principal.

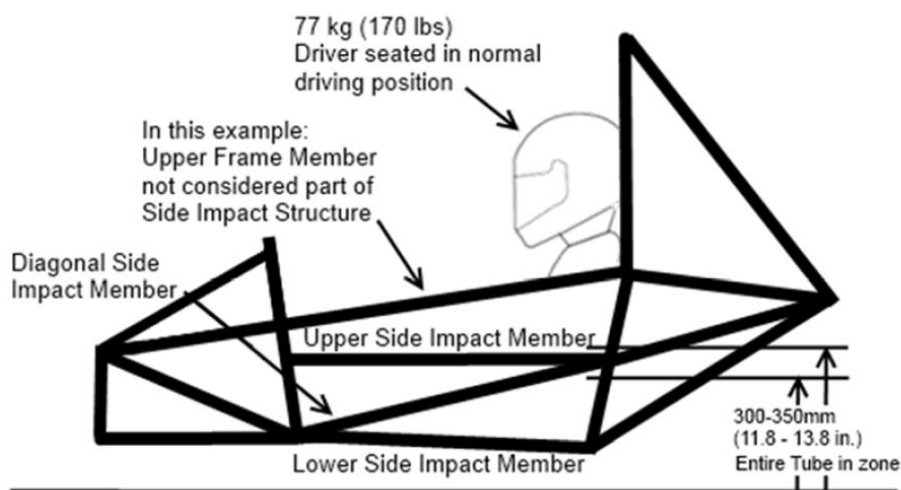


Figura 18: Disposición de la estructura de impacto lateral [6]

## 8.4 Cockpit

El espacio que necesita el piloto dentro de la estructura viene indicado por la normativa, de hecho, se comprueba mediante una plantilla por los comisarios [ver figura 19].

En la prueba se podrán extraer el volante, la caña de la dirección y el asiento. Esta deberá caber perfectamente en el espacio que existe entre los dos aros, de forma paralela al suelo y hasta una altura de 350 milímetros o la barra superior de la estructura de impacto lateral.

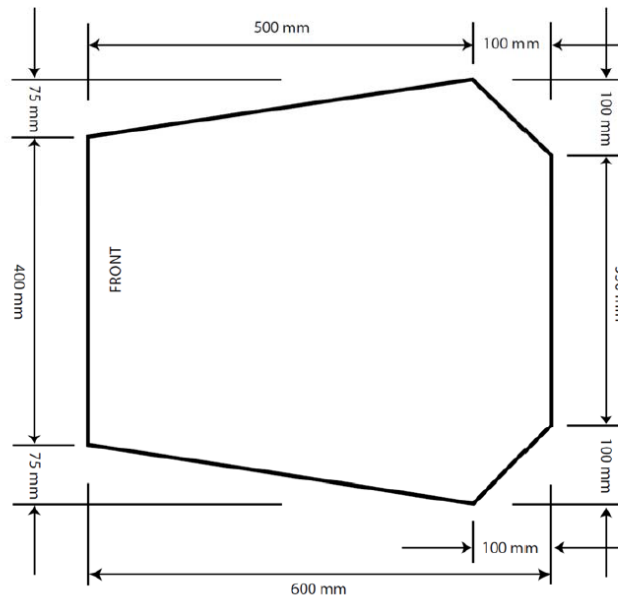


Figura 19: Plantilla utilizada para comprobar el espacio del cockpit [9]

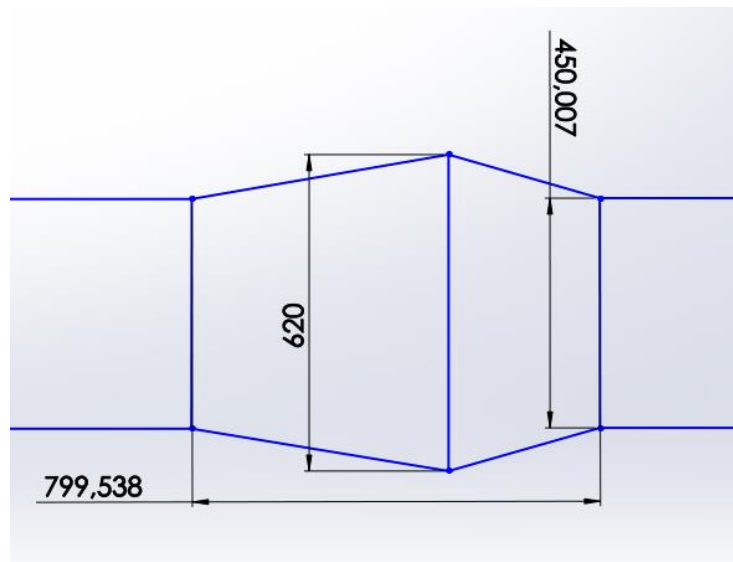


Figura 20: Diseño del cockpit [elaboración propia]

La estructura donde irán alojadas las piernas del piloto también necesita tener un mínimo de espacio normalizado. Este debe llegar hasta 100 milímetros antes de la cara trasera de los pedales. Además, el espacio

que queda internamente de 50 milímetros irá dedicado a la caña de la dirección.

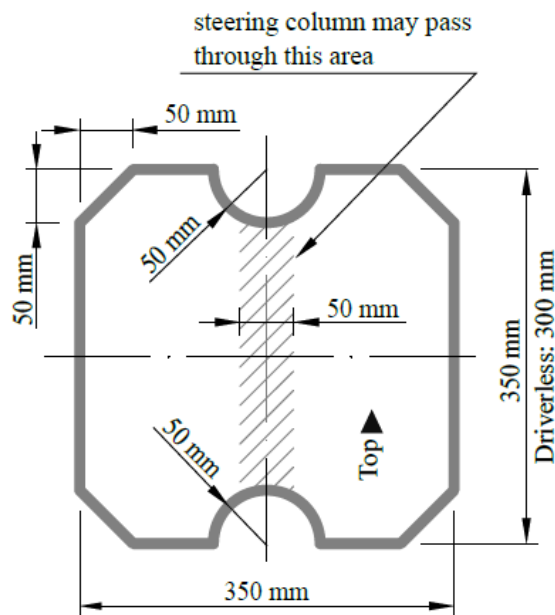


Figura 21: Plantilla utilizada para comprobar el espacio en las piernas del piloto [9]

Además, todos los vehículos deben tener una protección contra el fuego entre el piloto y los diferentes compartimentos de combustible, aceite, etc. Asimismo, llevan una protección por debajo del asiento, para evitar cualquier tipo de daño a la parte inferior del piloto. Finalmente, la estructura del chasis tendrá que permitir la accesibilidad por parte de los comisarios a todos los elementos mecánicos y electrónicos y una visibilidad adecuada para el piloto, exactamente de mínimo  $100^\circ$  a cada lado del piloto.

## 8.5 Equipamiento del piloto

La normativa permite la posibilidad de instalar diferentes tipos de cinturones, estos pueden ser de 5, 6 o 7 puntos de anclaje. Dado que este chasis estará diseñado para un piloto sentado en posición vertical (menos de  $30^\circ$  de inclinación con la vertical), el arnés utilizado será de 5 puntos únicamente.

### 8.5.1 Cinturón de la cadera

Como su nombre indica, es el cinturón que pasa alrededor del área pélvica del piloto. Este será de dos puntos de anclaje y deberán comenzar debajo del asiento traspasándolo mediante unas ranuras, nunca por los laterales. Dado que el piloto irá en una posición vertical, como se puede ver en la siguiente imagen el cinturón deberá colocarse entre 45° y 65° en la vista lateral del piloto.

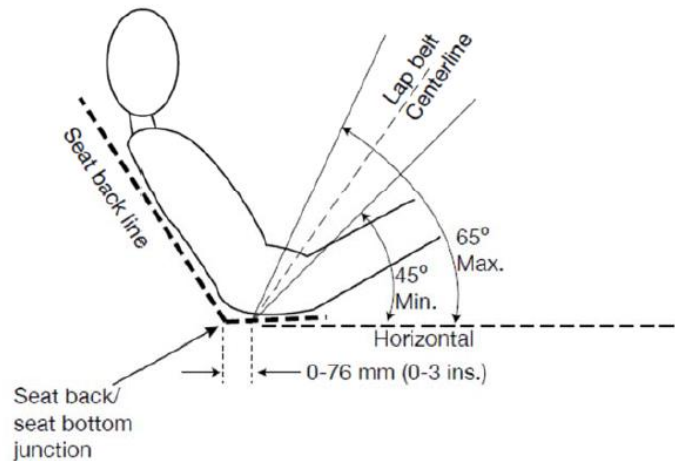


Figura 22: Posición del cinturón pélvico [9]

### 8.5.2 Arnés de hombros

El arnés de los hombros debe ir anclado a un perfil fabricado de una sola pieza y unido al aro principal. Tiene que estar formado por dos correas las cuales tendrán una separación entre sí de entre 178 milímetros y 229 milímetros [ver figura 23]. En el chasis diseñado la decisión ha sido de tomar la distancia media, 203 milímetros.

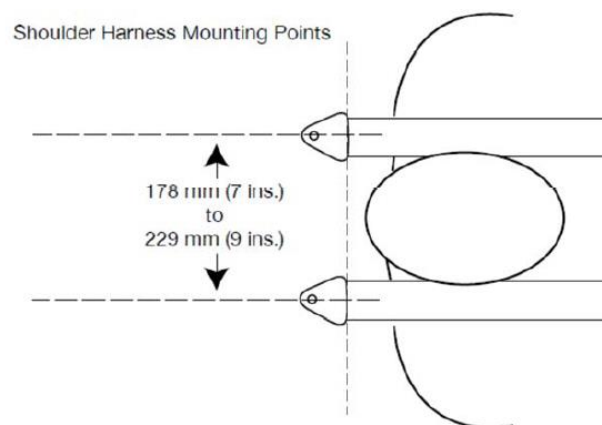


Figura 23: Puntos de anclaje del arnés de hombros [9]

Como se aprecia en la vista lateral de la figura 24, las correas deberán tener una inclinación de entre  $10^\circ$  sobre la horizontal y  $20^\circ$  grados por debajo de esta.

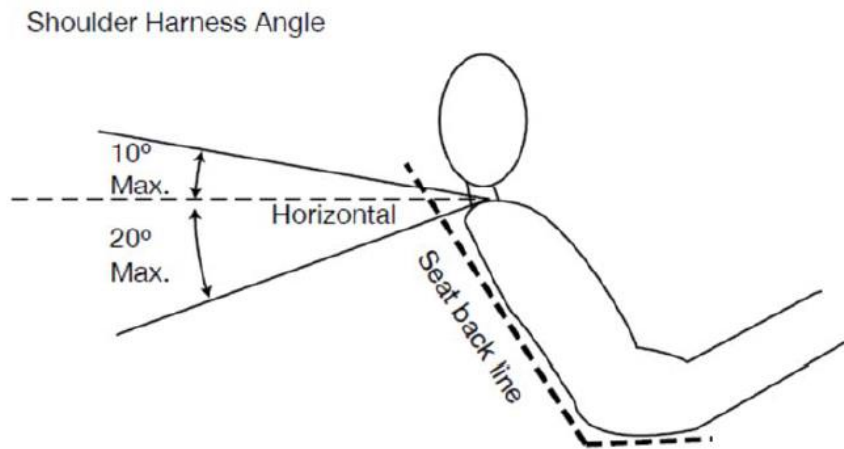


Figura 24: Ángulo del arnés de hombros [9]

### 8.5.3 Montura antideslizamiento

La montura antideslizamiento del arnés de 5 puntos debe ir montada con un ángulo igual o mayor a  $20^\circ$  sobre la línea que une la zona pélvica y el pecho. Este elemento evitará que el piloto se pueda deslizar hacia la zona de los pedales, manteniendo así la posición en el asiento.

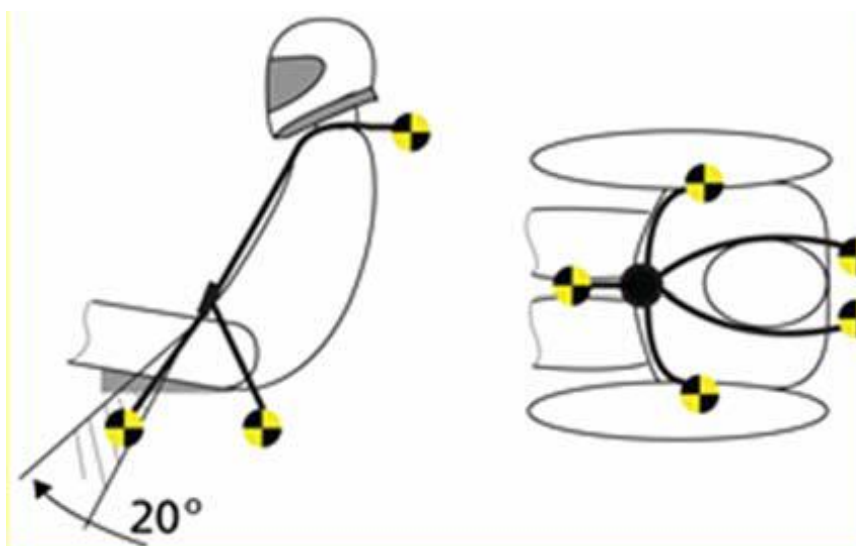


Figura 25: Ángulo de la montura antideslizamiento [9]

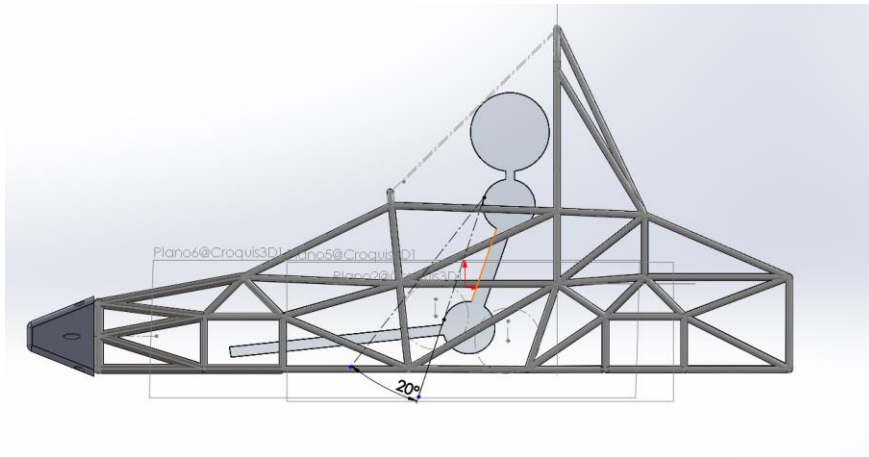


Figura 26: Ángulo de la montura antideslizamiento

[elaboración propia]

### 8.5.4 Protecciones del piloto

Para la protección del piloto, la cabeza del piloto debe tener su movimiento restringido, ya que en caso de accidente esto podría evitar un daño cervical grave. Además, cualquier zona del aro principal o sus refuerzos que pueda impactar con el casco del piloto deberá estar recubierta con un relleno especificado por la norma FIA 8857-2001 (Federación Internacional del Automóvil), con un mínimo de 12 milímetros de espesor.

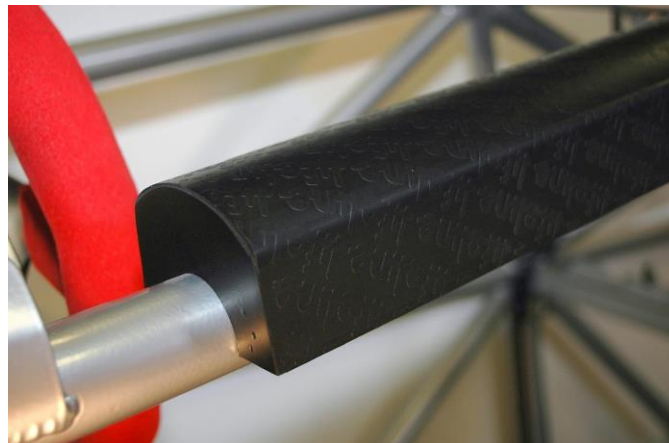


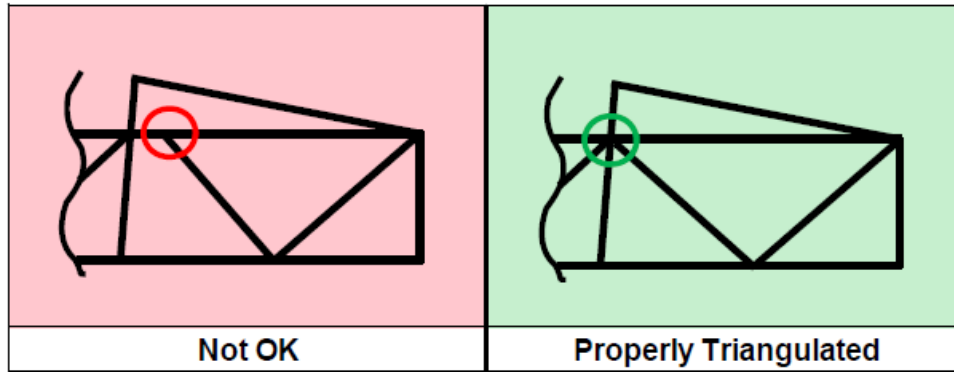
Figura 27: Material normalizado por la FIA [10]

Finalmente, la zona de las piernas del piloto tendrá que estar recubierta de un material sólido para evitar cualquier tipo de lesión con la suspensión, la dirección o cualquier componente del vehículo que pueda encontrarse en dicha zona.



## 8.6 Triangulación de elementos

Una de las bases del correcto funcionamiento de una estructura de chasis tubular es una buena triangulación de los elementos. Esta técnica está basada en la colocación de los perfiles de tal forma que vayan creando triángulos entre sí.



*Figura 28: Ejemplo de buena triangulación  
 de los elementos [9]*

Este tipo de diseño se utiliza tanto en ingeniería como en arquitectura, ya que el triángulo es la forma geométrica que mayor rigidez aporta en caso de unir varias barras entre sí. Un ejemplo claro lo podemos apreciar en la famosa Torre Eiffel de París diseñada por los ingenieros Maurice Koechlin y Émile Nouguier en el siglo XIX, donde su estructura reticular aporta una gran rigidez a la estructura.



*Figura 29: Estructura triangulada  
 de la Torre Eiffel [11]*

## 8.7 Tabla resumen de los requisitos que cumple la estructura

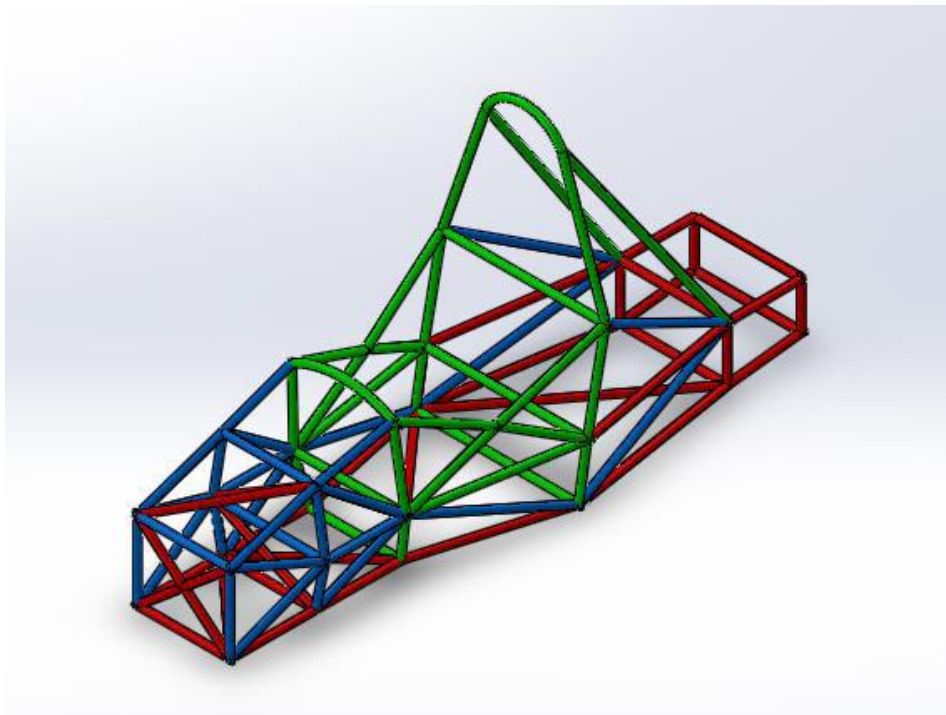
Zona de la estructura	Requisito cumplido
<b>Distancia entre ejes</b>	La distancia entre ejes será de 1530 mm, por lo que se supera el mínimo de 1525.
<b>Tamaño del piloto</b>	Se ha comprobado que con las medidas estándares el piloto cabe perfectamente en el cockpit.
<b>Material</b>	Se utiliza un acero al carbono, por lo que no es necesario realizar probetas. Además, se cumple el mínimo de espesor de los perfiles.
<b>Aros</b>	La distancia entre la cabeza del piloto y los aros supera los 50,8 mm.
<b>Aro principal</b>	Cumple las inclinaciones máximas y comienza en la parte más baja de la estructura.
<b>Aro frontal</b>	La inclinación sí es menor a 20°.
<b>Soportes del aro principal</b>	La inclinación es de 31°, por lo que supera los 30° de mínimo. Además, la distancia con el punto superior del aro se encuentra justo a 16 cm.
<b>Soportes del aro frontal</b>	No se encuentran a menos de 50,8 milímetros del punto superior.
<b>Estructura frontal</b>	Está fabricada de tubos cerrados.
<b>Soportes de la estructura frontal</b>	Está formado por 3 perfiles a cada lado.
<b>Atenuador de impacto</b>	El diseño se ajusta al plano expuesto en la normativa, además, se incluye la placa de 1,5 milímetros.
<b>Estructura lateral de impacto</b>	El miembro superior se encuentra entre los 300 y los 350 milímetros. Además, la estructura comienza en el aro frontal y acaba en el principal.

<b>Cockpit</b>	Se comprueba que mínimo hasta los 350 mm de altura se cumplen las medidas de la plantilla.
<b>Arnés de cadera, de hombros y antideslizamiento</b>	En las simulaciones se cumplen todos los requisitos de inclinaciones.
<b>Triangulación de la estructura</b>	Ningún elemento de la estructura ,excepto la barra del arnés por necesidad del diseño, termina en entre los nodos de otro elemento.

*Tabla 1: Requisitos de diseño cumplidos  
[elaboración propia]*

## 9. PROPUESTAS REALIZADAS

Una vez analizados los requisitos del diseño que impone la normativa, se procede al diseño del modelo gráfico siguiendo dicho reglamento. Además, es aconsejable a la hora de realizar un proyecto como este fijarse en lo que ya existe, es decir, en las estructuras utilizadas por los equipos ya participantes.



*Figura 30: Ejemplo de chasis diseñado por una alumna de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica de Valencia [12]*

## 9.1 Anotaciones tomadas como punto de partida

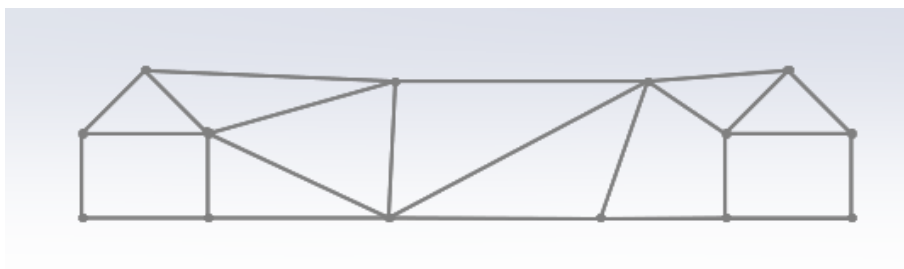
- Estará fabricado de acero al carbono, en concreto el material AISI 1020, el cual tiene un límite elástico de 351571000 N/m<sup>2</sup> y la posibilidad de la unión de los perfiles mediante diferentes métodos de soldadura.
- La distancia entre el eje delantero y el trasero será de unos 1530 milímetros aproximadamente.
- La estructura que soportará la suspensión deberá tener 200 milímetros de alto por 300 de ancho.

A partir de estos datos comencé el diseño del chasis, y son los únicos que se mantienen fijos durante todo el proceso de diseño.

## 9.2 Primer croquis

Utilizando la medida de la estructura de la suspensión y la distancia entre los ejes utilizada como punto de partida, realicé un primer croquis que permite aportar una base para el diseño, a partir del cual fui realizando la estructura a su alrededor. Este diseño inicial se puede apreciar en la figura 10, expuesta en el apartado 8.1.

Utilizando las restricciones referentes a la estructura de impacto lateral y el espacio necesario para el piloto dentro del cockpit, pude unir las estructuras de suspensión delantera y trasera, además de aportar volumen 3D teniendo el espacio entre los dos laterales del chasis. Las siguientes imágenes permiten ver la vista lateral y superior de la estructura primaria del chasis.



*Figura 31: Vista lateral de la estructura primaria [elaboración propia]*

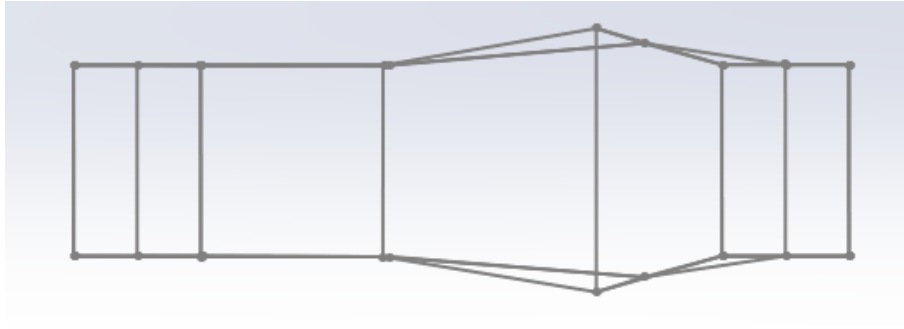


Figura 32: Vista superior de la estructura primaria [elaboración propia]

### 9.3 Primera estructura tubular

Siguiendo los requisitos de medidas y materiales expuestos por la normativa, continué diseñando el croquis 3D en SolidWorks® 2018, obteniendo una red de líneas como base del chasis, la cual se puede apreciar en la siguiente figura.

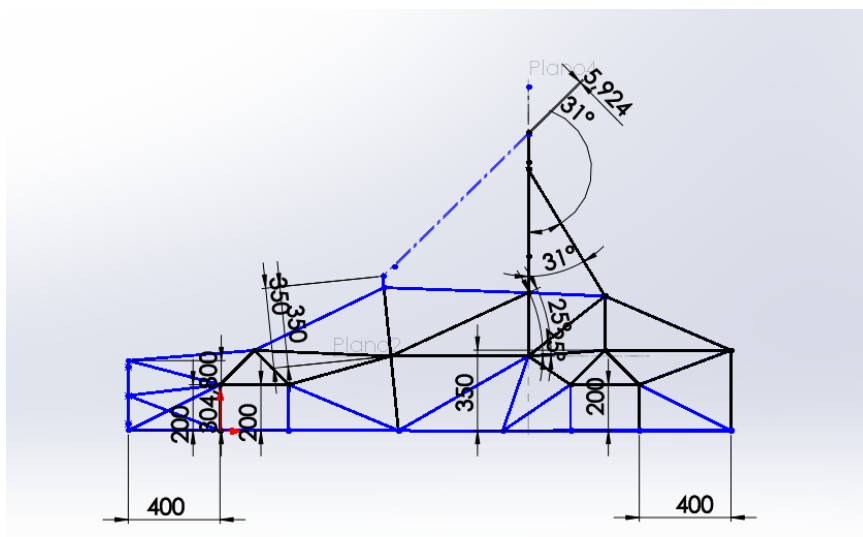
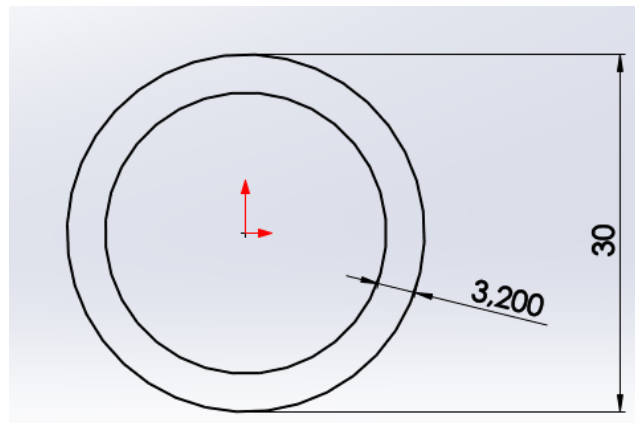


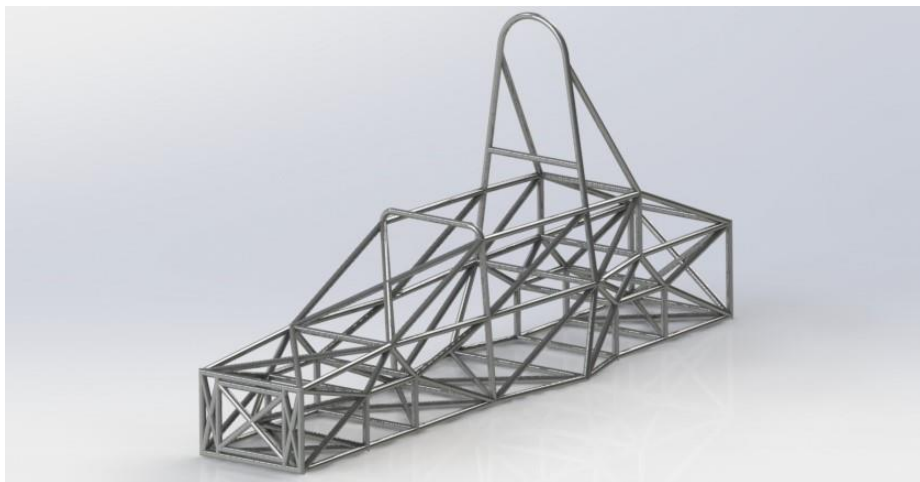
Figura 33: Vista lateral del croquis de la primera estructura tubular [elaboración propia]

A continuación, llevé a cabo la creación de los perfiles expuestos en la normativa. Esto se consigue de forma fácil en el programa gracias a la opción de creación de perfiles personalizados, donde se croquizan las medidas del perfil y el propio programa interpreta su disposición a la hora de sustituirlo en el croquis.



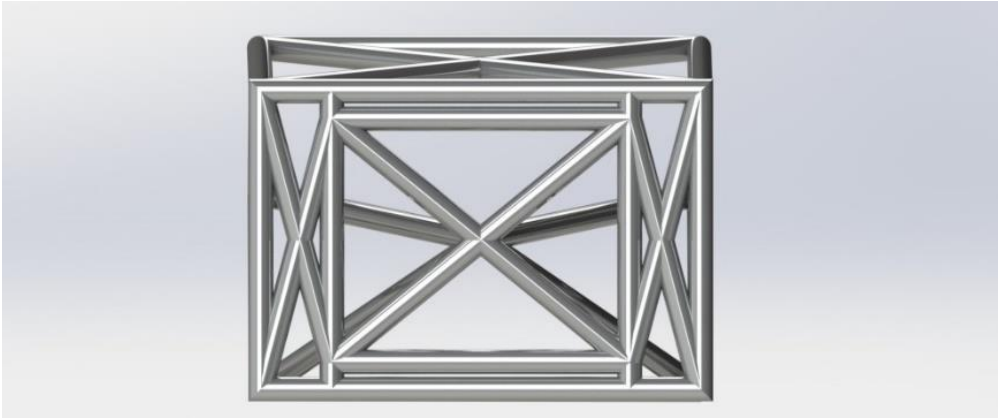
*Figura 34: Creación de perfil personalizado en SolidWorks® [elaboración propia]*

Tras la creación de los perfiles, mediante la opción de insertar piezas soldadas coloqué cada perfil uno por uno para obtener una primera estructura, la cual será analizada mediante la opción de simulación del programa [ver figura 35].



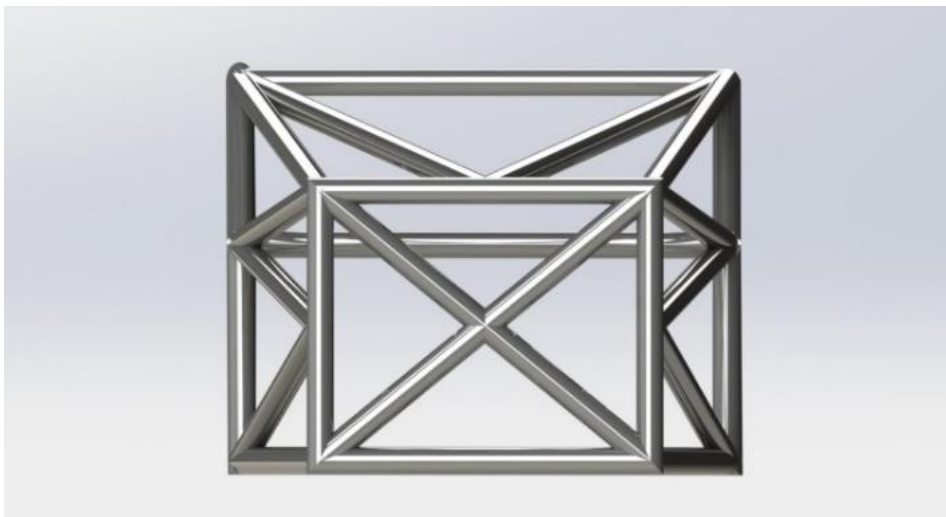
*Figura 35: Primera estructura de chasis [elaboración propia]*

Como se puede apreciar en la parte frontal del chasis [ver figura 36], existe una estructura de apoyo preparada para soldar la placa donde se instalará el atenuador de impacto. Esta solución la rechacé ya que es una estructura complicada de realizar, además de que está excesivamente sobredimensionada.



*Figura 36: Primera opción de morro  
[elaboración propia]*

La solución para el problema encontrado en la estructura anterior fue optar por un morro más estrecho, adaptado directamente a la medida del atenuador de impacto. Esto además facilita la posterior simulación del impacto frontal [ver figura 37].



*Figura 37: Morro adaptado  
[elaboración propia]*

## 10. RESULTADOS FINALES

### 10.1 Estructura final del chasis

Tras realizar diferentes estudios de tensiones, fue necesario añadirle un refuerzo al aro principal, algo que evitará una deformación peligrosa para la cabeza o el cuerpo del piloto en caso de tener un accidente.



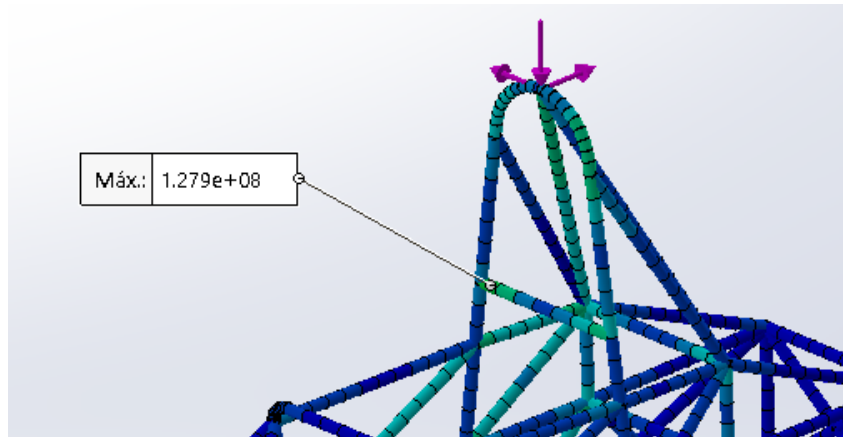


Figura 38: Ejemplo de análisis de tensiones  
[elaboración propia]

En la siguiente imagen se puede apreciar la estructura de refuerzo que se une con la parte superior del aro principal, los cuales a su vez se unen al punto de inicio de los refuerzos principales de dicho aro.

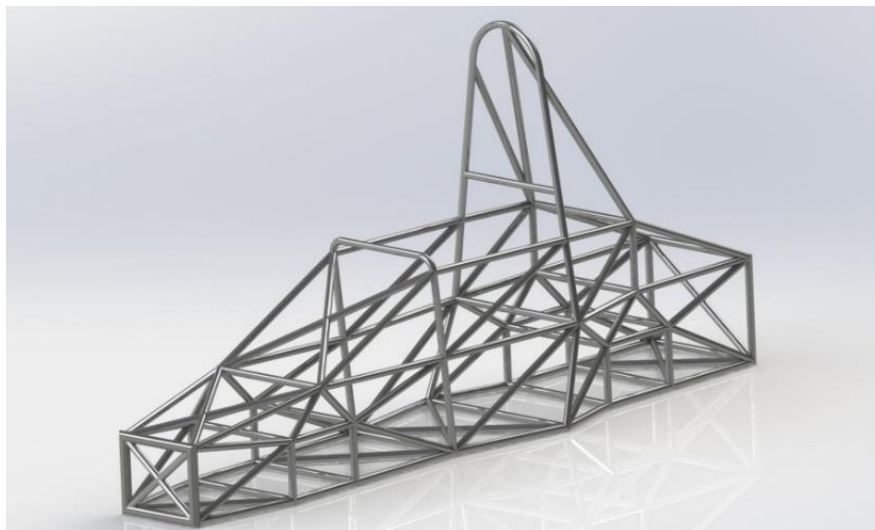
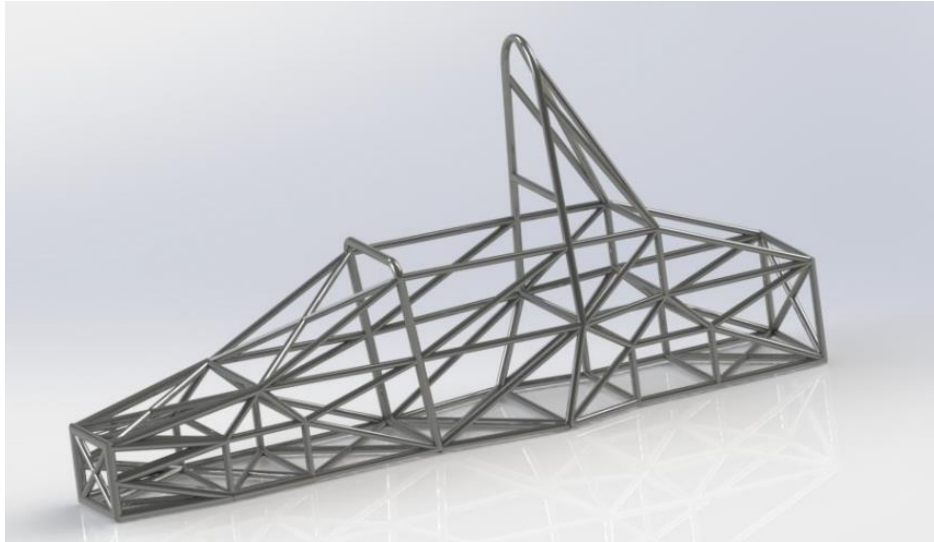


Figura 39: Aro principal reforzado  
[elaboración propia]

Finalmente, el chasis definitivo que se puede ver en la figura 40, ha sido obtenido mediante las simulaciones que se verán reflejadas en el anexo I, dedicado al estudio de los diferentes casos de carga. El criterio aplicado para obtener los perfiles que se utilizarán finalmente, es que ningún punto de la estructura podrá sobrepasar el 90 por ciento de la tensión límite elástica admisible, para así asegurar que en ningún caso la estructura pueda romperse y ocasionar lesiones al piloto.





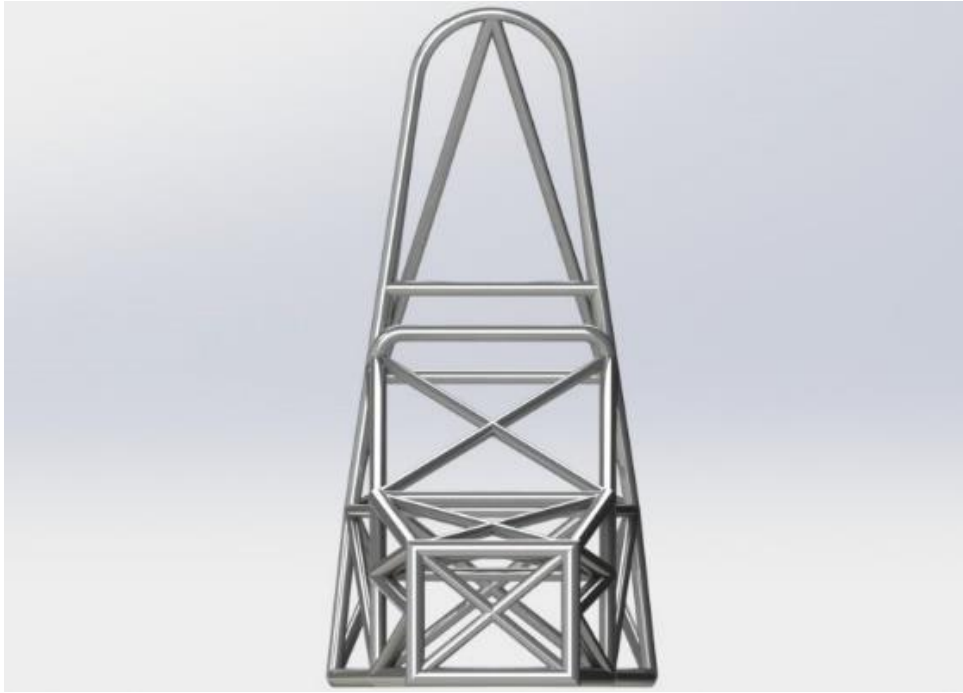
*Figura 40: Diseño final del chasis  
[elaboración propia]*

Cabe resaltar que la estructura tiene la parte trasera totalmente abierta para que se puedan manipular los diferentes elementos que irán dentro de la estructura del chasis. Estos irán en su mayor parte detrás del piloto, por lo que debe ser un espacio libre de perfiles.

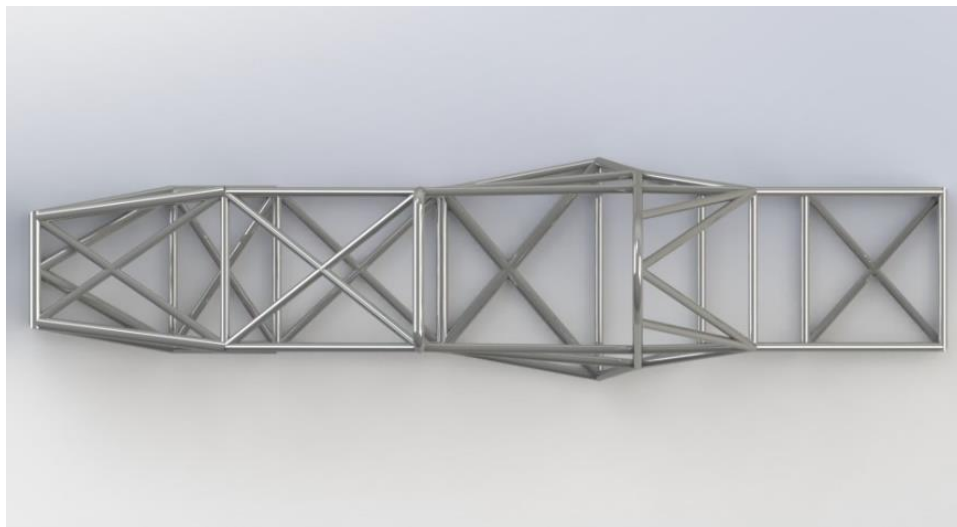


*Figura 41: Trasera del chasis  
[elaboración propia]*

A continuación, en las siguientes imágenes se puede ver el chasis desde diferentes vistas, donde se pueden apreciar todos los detalles de la estructura final.



*Figura 42: Vista delantera del chasis  
[elaboración propia]*



*Figura 43: Vista superior del chasis  
[elaboración propia]*

La estructura del chasis está compuesta por diferentes perfiles tubulares de acero al carbono, estos han sido obtenidos del catálogo online de Tubasol, del grupo Hastinik [11].

La siguiente tabla relaciona cada estructura con el perfil calculado en el programa SolidWorks® 2018 y el perfil obtenido finalmente del catálogo mencionado anteriormente.

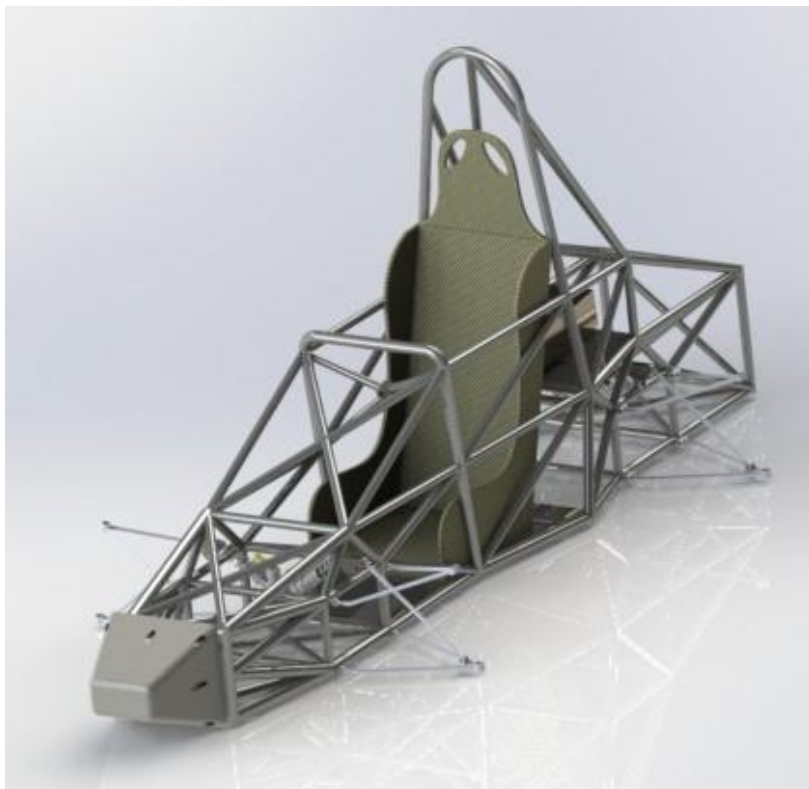
Posición	Perfiles Calculados	Perfiles Utilizados
Main Hoop Bracing Support	25x1,5	25x1,8
Front Bulkhead	36x6,5	38x7,1
Front Bulkhead Support	35x3	38x3,2
Front Hoop	33,6x4,2	33,7x4,5
Main Hoop	30x5,4	30x5,6
Side Impact Structure	25,4x2,4	26,9x2,6
Main Hoop Bracing	25,4x1,65	26,9x1,8
Front Hoop Bracing	25,4x1,65	26,9x1,8
Suspensiones	26x1,2	26,9x1,8
Parte Inferior de Susp. delantera	35x3	38x3,2
Arnés Superior	30x3,1	30x3,2
Refuerzos Delanteros	38x3	38x3,2
Refuerzos Inferiores	36x6,5	38x7,1
Restantes	25,4x2,4	26,9x2,6

Tabla 2: Perfiles utilizados en el chasis  
[elaboración propia]

## 10.2 Simulación de unión de componentes al chasis

Algo muy importante en un chasis es la posibilidad de una fácil instalación de los diferentes componentes del automóvil que deben ir unido a este. En este sentido, como ya comenté previamente he comprobado que la apertura de la parte trasera tiene un espacio suficiente para permitir la introducción de un posible motor, controlador, chapas protectoras, etc.

Otros componentes importantes son la suspensión y el asiento del piloto, dado que estos van directamente unidos mediante tornillos roscados y pasadores a la estructura principal [ver figura 46].

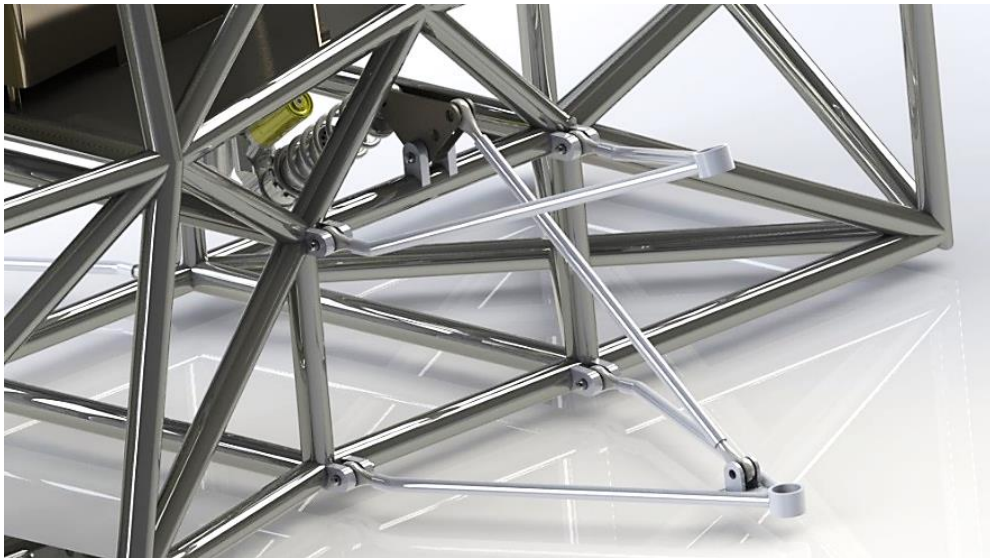


*Figura 44: Montaje de diversos elementos  
[elaboración propia]*

### **10.2.1 Suspensión**

Para la instalación de la suspensión he utilizado el modelo tridimensional realizado en SolidWorks® 2018 por Jesús Gómez Díaz, compañero recién titulado que dedicó su TFG al diseño y el cálculo de dicha pieza [ver figura 45].

El tipo de suspensión es el Push-rod, ampliamente utilizado en competiciones como la Fórmula 1 donde la barra central trabaja a compresión. Esta irá unida a la estructura a través de cinco soportes de acero al carbono soldados directamente al chasis. Estos enganches y la suspensión se unen mediante pasadores de 9 milímetros de diámetro, los cuales permitirán el giro de los componentes móviles sin que estos se puedan separar.



*Figura 45: Suspensión del equipo FSAE-ULL  
[elaboración propia]*



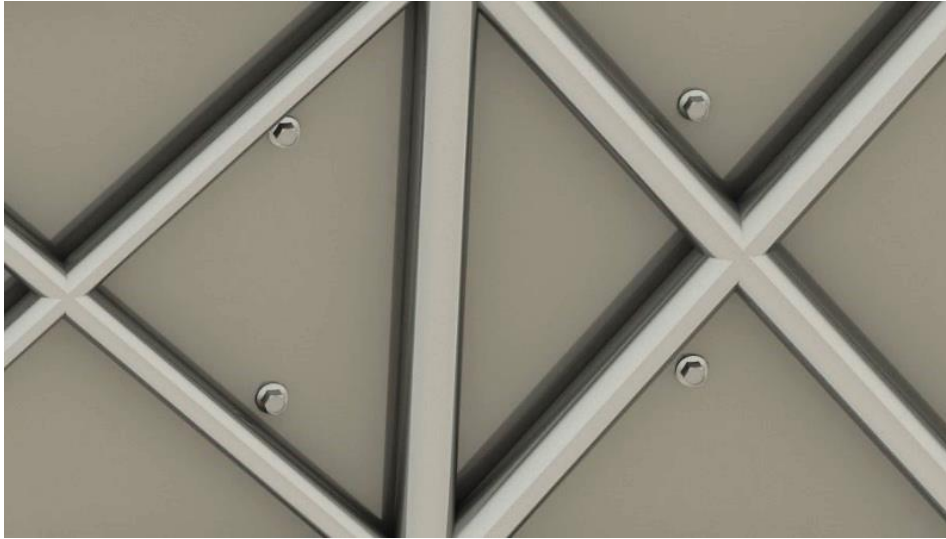
*Figura 46: Unión entre la suspensión y el chasis  
[elaboración propia]*

### **10.2.2 Unión del asiento a la estructura**

Para la representación de la instalación del asiento en la estructura, he creado una pieza de fibra de carbono, la cual va unida a través de tornillos de métrica 10 a la placa de protección de la zona inferior del chasis.

La placa es de acero al carbono, tendrá un espesor de 4 milímetros e irá unida mediante soldadura a los perfiles inferiores. Esta además de

servir como apoyo al asiento protege al piloto de cualquier tipo de objeto que pueda golpear al vehículo por la parte inferior.



*Figura 47: Tornillería del asiento  
[elaboración propia]*

### **10.2.3 Unión del atenuador de impacto**

Para la unión del atenuador de impacto a la estructura se utiliza un sistema similar. La placa de 1,5 milímetros de espesor irá soldada a los cuatro perfiles del frontal del chasis. A este, se une el atenuador de impacto mediante 8 tornillos de métrica 10.



*Figura 48: Atenuador de impacto y placa frontal  
[elaboración propia]*



El resto de los componentes añadidos como pueden ser el motor o el controlador irán de la misma forma conectados al chasis, instalando una placa soldada que sirva como superficie de apoyo y sujeción.

#### 10.2.4 Soporte de la columna de dirección

A pesar de que el soporte de la columna de dirección se puede tomar como parte de la estructura del chasis, esto no es del todo cierto. Dado que su función es mantener la caña de la dirección en su sitio, no es necesario su estudio como refuerzo de la estructura, por lo que la decisión es de instalarla posteriormente mediante soldadura. En la siguiente imagen se puede ver una representación de cómo iría unida al aro frontal.



*Figura 49: Soporte de la caña de dirección  
[elaboración propia]*

#### 10.2.5 Propiedades físicas del vehículo

El peso del chasis es un apartado muy importante para la conducción y el rendimiento del vehículo, por lo que conocer una aproximación de este parámetro es un dato necesario para el equipo. Además, permite aproximar el peso final del automóvil ya que el resto de los componentes no suelen ser diseñados, sino que se adquieren directamente a una empresa externa.

En este sentido, cabe destacar que se consigue una estructura algo pesada en comparación con la de equipos que participan actualmente en la competición. El motivo de esto ha sido la necesidad de sobredimensionar la estructura para cumplir los diferentes estudios de

tensión impuestos por la normativa para las estructuras de chasis alternativas. Los pesos que se ven representados en la siguiente tabla han sido obtenidos, el primero gracias al SolidWorks, ya que este permite visualizar las propiedades físicas de la pieza, y al segundo se le añaden el peso aproximado de los componentes que pueden ir instalados en él, como pueden ser un motor de 16 kg o el controlador del catálogo expuesto en el anexo IV, de 15 kg.

Peso del chasis (kg)	Peso aproximado del automóvil (kg)
112,5	350,5

Tabla 3: Pesos del vehículo  
[elaboración propia]

A pesar de este hándicap, el peso final del chasis no llega al 35% del peso total del vehículo. Dado que únicamente es una aproximación, el peso final del chasis y del vehículo puede llegar a aumentar en un pequeño porcentaje, ya que por ejemplo para la simulación del piloto realicé una figura con las medidas indicadas en la normativa, pero sustituyendo el material por agua, una solución bastante aproximada ya que una gran parte del ser humano está compuesto de esta.

La longitud del chasis es de aproximadamente 2,66 metros, por lo que el automóvil tendrá una longitud total de unos 3 metros. El ancho máximo de la estructura se encuentra en la zona del habitáculo del piloto, exactamente en los lados inferiores del aro principal, y es de aproximadamente 0,65 metros.

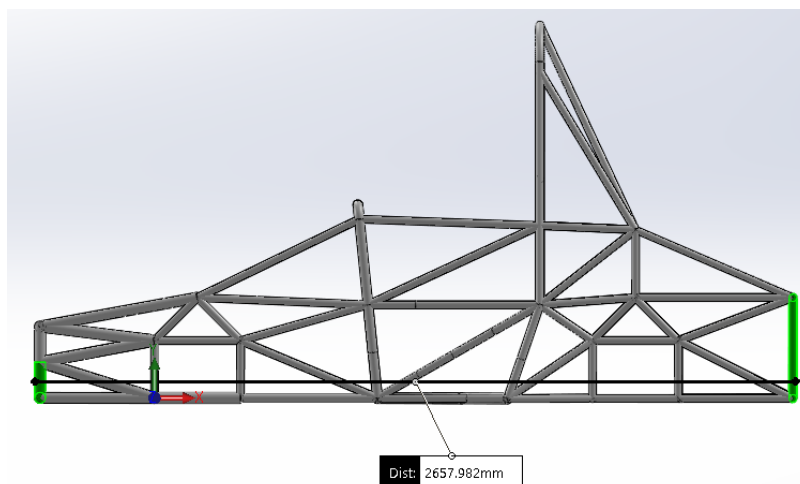


Figura 50: Longitud del chasis [elaboración propia]



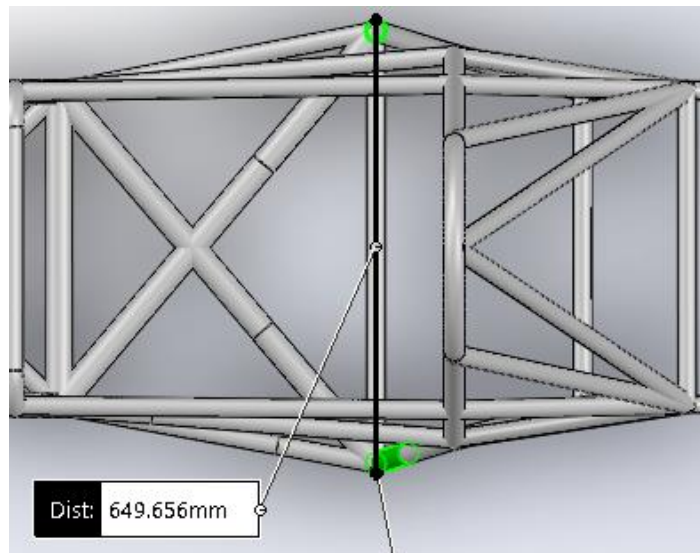


Figura 51: Ancho del chasis [elaboración propia]

Finalmente, en la siguiente imagen se puede apreciar la posición del centro de gravedad del vehículo, a falta de la colocación del motor y de las baterías, algo que reducirá la altura de este, hecho que mejorará las prestaciones en la conducción del vehículo.

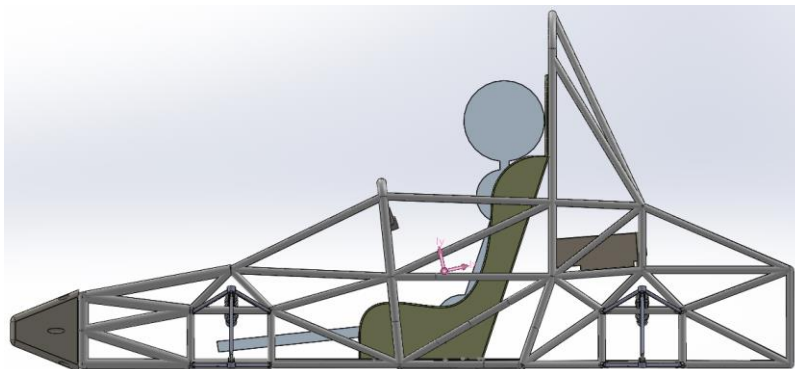


Figura 52: Aproximación del centro de gravedad del vehículo [elaboración propia]

## 11. CONCLUSIÓN

Este tipo de proyectos que incluyen el diseño y el estudio de una estructura, permiten conocer al ingeniero la dificultad de obtener un producto final estéticamente atractivo y estructuralmente fiable.

Cuando se realiza el estudio de un elemento tan principal como lo es el chasis del monoplaza, en caso de no existir una normativa específica como tiene la Formula Student, sería necesaria la colaboración de todo un equipo especializado para diseñar una configuración que esté adaptada a

los diferentes componentes que irán unidos a ella, como por ejemplo la suspensión del vehículo.

Además, se puede comprobar como la propia competición sobredimensiona los requerimientos para las estructuras innovadoras que se desvían de sus requisitos básicos, ya que los perfiles aconsejados en la normativa no soportan los esfuerzos requeridos posteriormente. Esto es algo razonable dada la necesidad de asegurar que el chasis resista cualquier tipo de impacto y sirva de protección para el piloto.

Dado que este proyecto es el primero en la Universidad de La Laguna destinado al diseño de un chasis de Formula SAE, en un futuro cabe la posibilidad de que pueda ser utilizado si la institución decidiese participar en dicha competición, por lo que espero que pueda servir de base para las siguientes generaciones de ingenieros de nuestra universidad.

This type of projects that include the design and study of a structure, allow the engineer to know the difficulty of getting an aesthetically attractive and structurally reliable final product.

When the study of an element as main as the chassis of the car is carried out, in case there is no specific regulation like the Formula Student has, it would be necessary the collaboration of a whole specialized team to design a configuration that is adapted to the different components that will be attached to it, such as the suspension of the vehicle.

In addition, it can be seen how the competition itself exceeds the requirements for innovative structures that deviate from their basic requirements, since the recommended profiles in the regulations do not support the efforts required later. This is reasonable given that it is necessary to ensure that the chassis resists any type of impact and serves as protection for the pilot.

Since this project is the first one at the University of La Laguna for the design of a Formula SAE chassis, it is possible in the future that it could be used if the institution decided to participate in the competition, so I hope it can serve as base for the following generations of engineers of our university.





**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**  
**SECCIÓN DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

---

## **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN CHASIS TUBULAR**  
**PARA UN PROTOTIPO DE FÓRMULA STUDENT**

### **ANEXOS**

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Carlos Calvo Martín de Bernardo

Tutora

Viana Lida Guadalupe Suárez



# ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO I: SIMULACIONES COMPUTACIONALES VERIFICACIÓN DE LA RESISTENCIA ESTRUCTURAL .....</b>	<b>64</b>
<b>ANEXO II: PRESUPUESTO DE FABRICACIÓN .....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXO III: MARCO DE LA COMPETICIÓN FORMULA STUDENT .....</b>	<b>103</b>
<b>ANEXO IV: CATÁLOGOS Y OTROS DOCUMENTOS .....</b>	<b>114</b>





**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**  
**SECCIÓN DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

---

## **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN CHASIS TUBULAR**  
**PARA UN PROTOTIPO DE FÓRMULA STUDENT**

### **ANEXO I**

### **SIMULACIONES COMPUTACIONALES**

### **VERIFICACIÓN DE LA RESISTENCIA**

### **ESTRUCTURAL**

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Carlos Calvo Martín de Bernardo

Tutora

Viana Lida Guadalupe Suárez





# ÍNDICE

<b>1. REQUERIMIENTOS ESTRUCTURALES</b> .....	68
<b>1.1 Análisis del aro principal y de los soportes</b> .....	69
<b>1.2 Análisis del aro frontal</b> .....	70
<b>1.3 Análisis de impacto lateral</b> .....	71
<b>1.4 Análisis de impacto frontal</b> .....	73
<b>1.5 Análisis del arnés de hombros</b> .....	73
<b>1.6 Análisis del arnés de la cadera y del antideslizamiento</b> .....	75
<b>1.7 Análisis de impacto diagonal en el frontal</b> .....	76
<b>2. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	77
<b>2.1 Resultados del estudio del aro principal y sus soportes</b> .....	78
<b>2.2 Resultados del análisis del aro frontal</b> .....	80
<b>2.3 Resultados del análisis de impacto lateral</b> .....	82
<b>2.3.1 Círculo de impacto delantero</b> .....	83
<b>2.3.2 Círculo de impacto trasero</b> .....	85
<b>2.4 Resultados del análisis de impacto frontal</b> .....	86
<b>2.5 Resultados del análisis del arnés de hombros</b> .....	87
<b>2.6 Resultados del arnés de la cadera y del antideslizamiento</b> .....	89
<b>2.7 Resultados del análisis de impacto diagonal en el frontal</b> .....	91
<b>3. CONCLUSIONES</b> .....	93



## 1. REQUERIMIENTOS ESTRUCTURALES

Para la simulación mediante software del vehículo, la normativa expone diferentes casos de carga y de condiciones de contorno los cuales deberá cumplir la estructura del chasis. Como añadido de seguridad, he decidido que la tensión máxima que alcance la estructura en cada uno de los estudios no pueda superar el 90% de la tensión límite admisible, algo que asegura que la estructura trabaje de forma elástica y lineal.

El módulo de simulación computacional del programa SolidWorks®, permite simular la estructura utilizando un elemento numérico de viga reduciendo el coste computacional que supondría un modelo de elementos sólidos. Se ha tenido en cuenta que el material trabaja de forma elástica, por lo que en caso de sobrepasar la tensión límite elástica la solución aportada por el software dejaría de ser válida.

La opción utilizada para cada estudio es la de análisis estático, donde se pueden simular los desplazamientos, las fuerzas de reacción, las tensiones y las deformaciones que se producen en cada nodo de la estructura. Los ejes definidos para el estudio están representados en la siguiente imagen.

- Longitudinal (X)
- Transverse (Y)
- Vertical (Z)

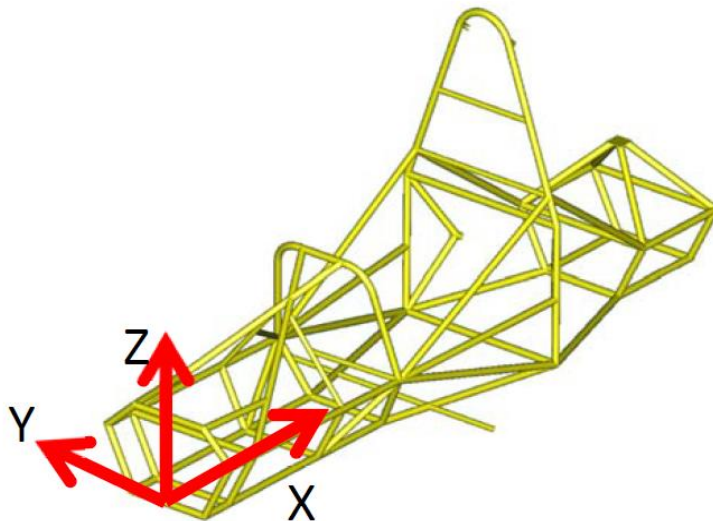


Figura 53: Representación de los ejes utilizados [9]

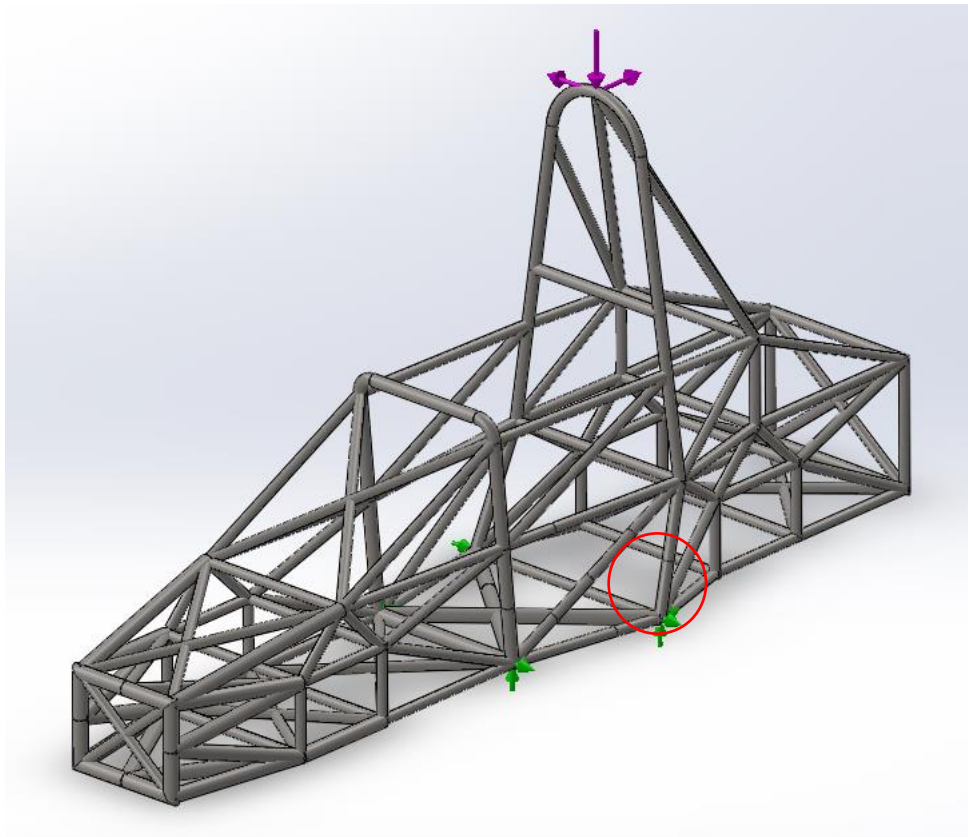
## 1.1 Análisis del aro principal y de los soportes

Para el análisis del aro principal, suele ser necesario la creación de un punto de aplicación justo en el lugar más alto de este, aunque al reforzarlo con otros dos perfiles que se unen a la parte superior, se forma un nodo en el punto especificado, por lo que se puede utilizar este como lugar de aplicación. En él actuarán unas cargas de:

- 6 kN en el eje X
- 5 kN en el eje Y
- -9kN en el eje Z

Estas fuerzas simulan una situación donde se produce el vuelco del vehículo.

La estructura deberá tener restringido el desplazamiento y mantener libre la rotación de los nodos inferiores de ambos lados del aro frontal y del aro principal.



*Figura 54: Aplicación de las condiciones de contorno y de las cargas del aro principal [elaboración propia]*

Las condiciones límite para el estudio de la estructura son una **deflexión máxima de 25 milímetros** y que no exista el fallo en la estructura, es decir, que en nuestro caso **no sobrepase el 90% de la tensión límite del acero utilizado**.

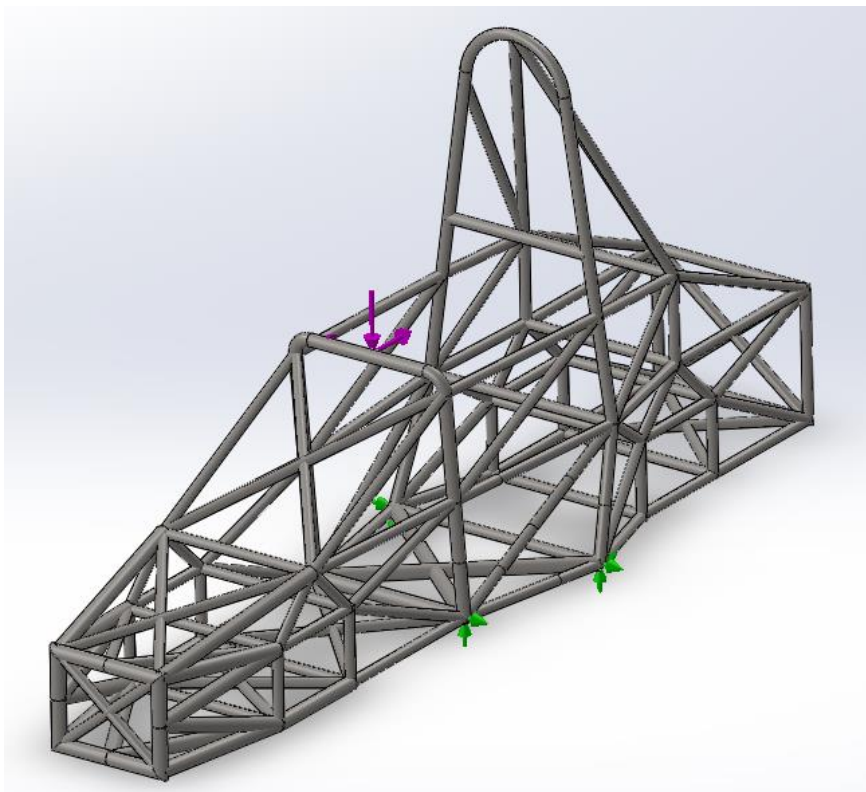
## 1.2 Análisis del aro frontal

Para el análisis del aro frontal, es necesario la creación de un punto de aplicación justo en el lugar más alto de este. En él actuarán unas cargas de:

- 6 kN en el eje X
- 5 kN en el eje Y
- -9kN en el eje Z

Estas fuerzas al igual que en el estudio del aro principal, simulan una situación donde se produce el vuelco del vehículo.

La estructura deberá tener restringido el desplazamiento y mantener libre la rotación de los nodos inferiores de ambos lados del aro frontal y del aro principal.



*Figura 55: Aplicación de las condiciones de contorno y de las cargas del aro frontal [elaboración propia]*

Las condiciones límite para el estudio de la estructura son las mismas que en el anterior, una **deflexión máxima de 25 milímetros** y que **no sobrepase el 90% de la tensión límite** del acero utilizado.

### 1.3 Análisis de impacto lateral

El análisis de la estructura lateral se realiza mediante la aplicación de una carga remota con transferencia directa.

- 7 kN en el eje Y

La carga debe estar distribuida entre los tres miembros de impacto lateral a través de un círculo de 127 milímetros de radio, por lo que a la hora de la simulación es necesario dividir los miembros donde cruce dicho círculo para la creación de los nodos.

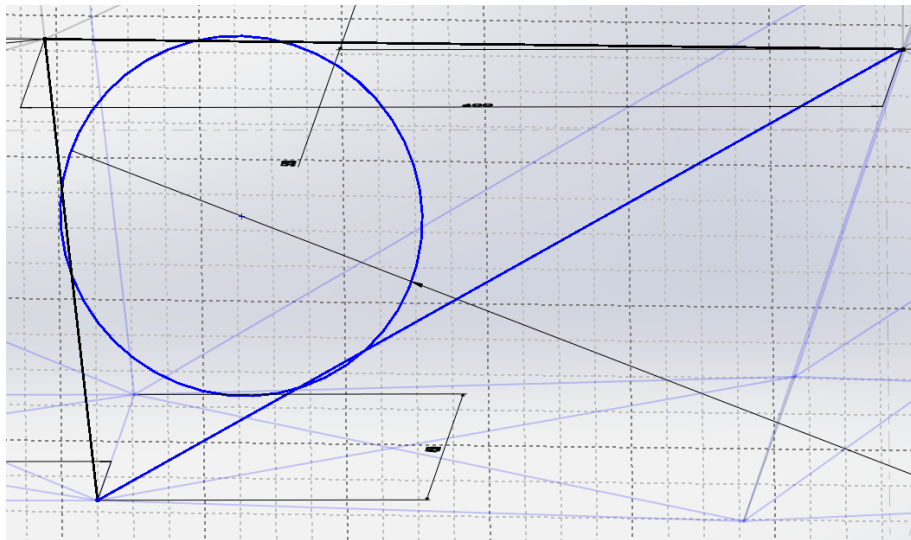


Figura 56: Creación del círculo de impacto [elaboración propia]

Dado que la zona de aplicación puede ser por delante de la barra diagonal o por detrás, se estudian los dos casos para conocer cuál es la situación más desfavorable [ver imágenes 57 y 58].

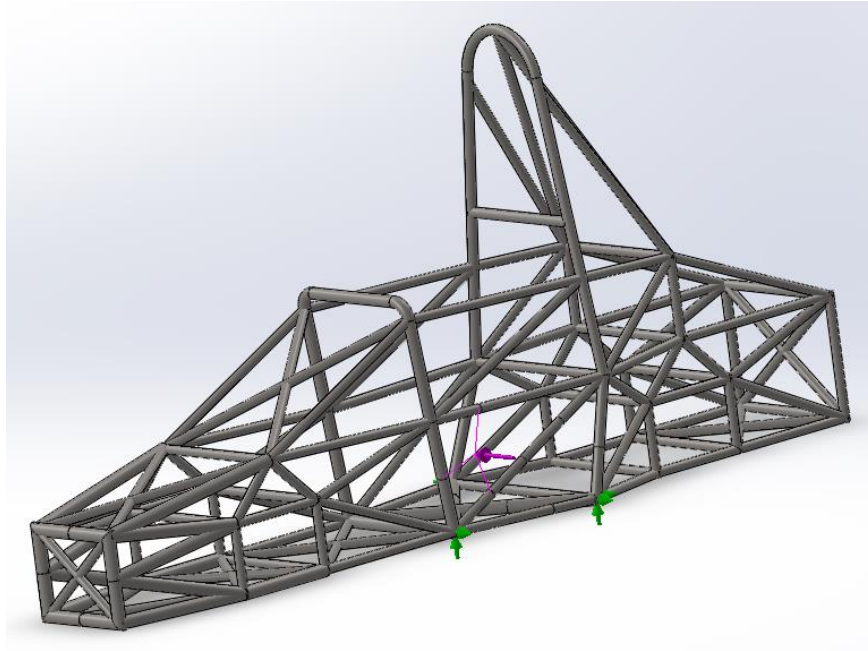


Figura 57: Caso de carga 1  
[elaboración propia]

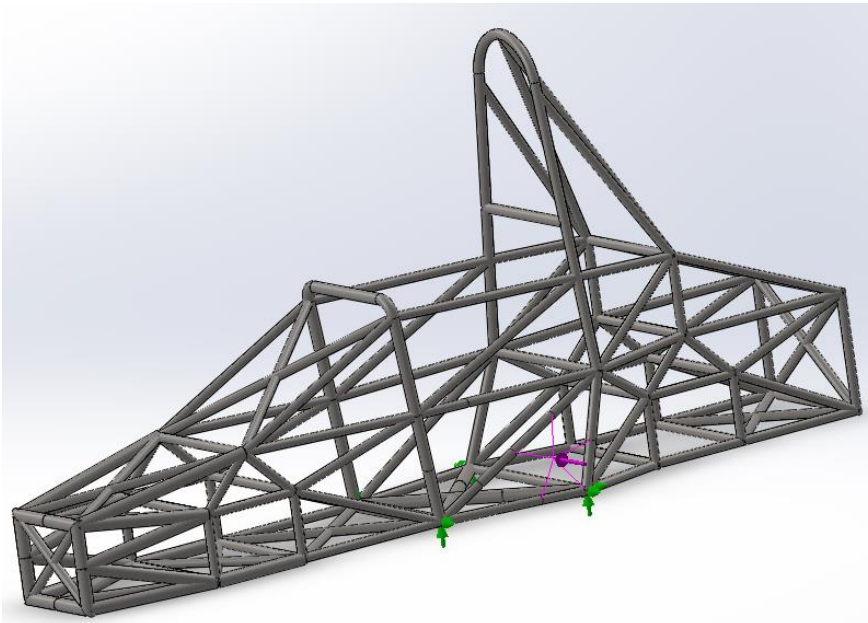


Figura 58: Caso de carga 2  
[elaboración propia]

La estructura deberá tener restringido el desplazamiento y mantener libre la rotación de los nodos inferiores de ambos lados del aro frontal y del aro principal. Además, la **deflexión máxima será de 25 milímetros** y en ningún caso puede haber fallo en la estructura.

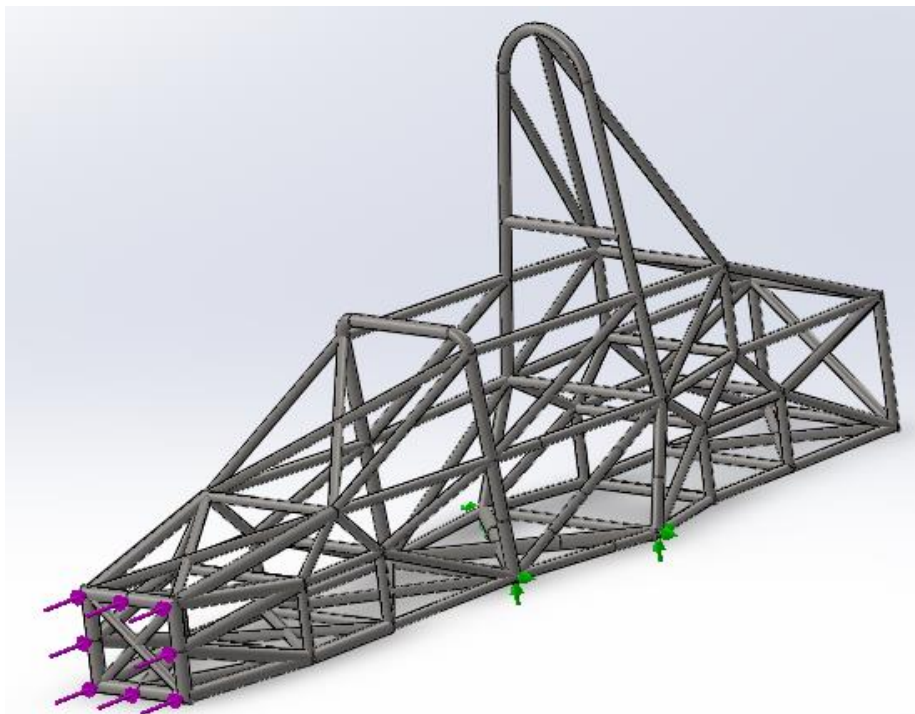


## 1.4 Análisis de impacto frontal

A la hora de simular un impacto frontal, la fuerza se dividirá entre los ocho puntos de unión entre la estructura frontal y el atenuador de impacto [ver figura 59].

- 120 kN en el eje X

Al igual que en los análisis anteriores las condiciones de contorno restringen los desplazamientos de los nodos inferiores del aro frontal y el aro principal. Además, el **desplazamiento máximo es de 25 milímetros** y no puede existir el fallo en la estructura.



*Figura 59: Aplicación de las condiciones de contorno  
y de las cargas del frontal  
[elaboración propia]*

## 1.5 Análisis del arnés de hombros

Para estudiar la carga que aplica el arnés de los hombros sobre la barra del arnés y el aro principal, deberá estudiarse el peor caso entre 10 grados sobre la horizontal y 20 grados bajo esta, ya que el arnés tiene una ligera libertad de giro. La división es de 10 en 10 grados de inclinación por lo que finalmente se obtienen 4 casos de carga.

- 7 kN en cada punto en la dirección contraria al eje X

Dado que el SolidWorks® no permite la aplicación de cargas angulares, mediante Excel calculé la carga que se debe aplicar en cada eje para simularla.

Inclinación	Carga eje X	Carga eje Y	Carga Total
-20°	6,58	-2,40	7
-10°	6,90	-1,22	7
0°	7,00	0,00	7
10°	6,90	1,22	7

Tabla 4: Cargas aplicadas en cada caso  
[elaboración propia]

Como se puede ver en la siguiente imagen, las condiciones de contorno son las mismas que en las simulaciones anteriores. **Tampoco puede existir una deflexión mayor a 25 milímetros** ni el fallo en la estructura.

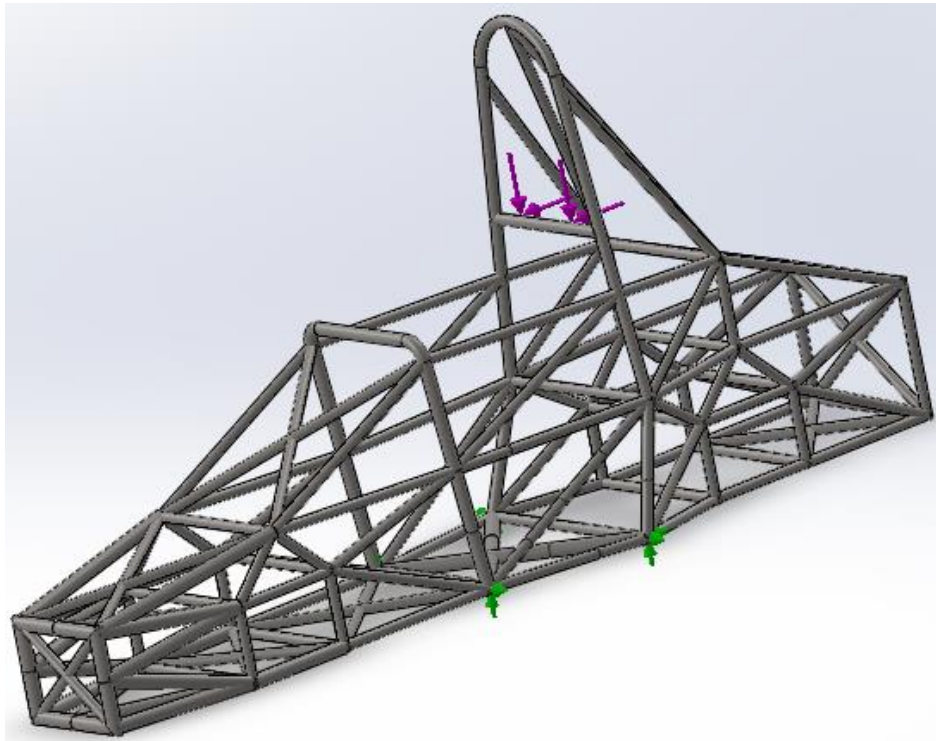


Figura 60: Aplicación de las condiciones de contorno  
y de las cargas del arnés de hombros  
[elaboración propia]

## 1.6 Análisis del arnés de la cadera y del antideslizamiento

La aplicación de la carga efectuada por el arnés inferior de la cadera y el central de antideslizamiento, se aplican directamente en los puntos de anclaje de estos. Dado que el de la cadera tiene algo de libertad en el giro ya que el piloto irá sentado en posición recta, habrá que estudiar el peor caso entre 45 y 65 grados sobre la horizontal. Además, el arnés antideslizante debe ir colocado a  $18,20^\circ$  sobre la línea del piloto, por lo que la carga se aplicará con una inclinación de  $58,24^\circ$  sobre la horizontal.

- 13 kN en ambos puntos del arnés de la cadera en la dirección contraria al eje X
- 6,5 kN en el punto del antideslizante en la misma dirección del eje X

Estos casos de carga se tienen que aplicar simultáneamente [ver figura 61], por lo que al variar de 5 en 5 grados el giro del arnés de la cadera obtenemos 5 resultados finales, de los cuales se tendrá que estudiar el caso más desfavorable.

Arnés	Inclinación	Carga eje X	Carga eje Y	Carga Total
<b>Cadera</b>	45°	9,192	9,192	13
<b>Cadera</b>	50°	8,356	9,959	13
<b>Cadera</b>	55°	7,456	10,649	13
<b>Cadera</b>	60°	6,500	11,258	13
<b>Cadera</b>	65°	5,494	11,782	13
<b>Antideslizamiento</b>	58,24°	3,421	5,527	6,5

Tabla 5: Cargas aplicadas en cada caso  
[elaboración propia]

Al igual que en los análisis anteriores, **la máxima deflexión permitida es de 25 milímetros**, no puede existir el fallo en la estructura y el desplazamiento de los nodos inferiores del aro principal y del frontal están restringidos.

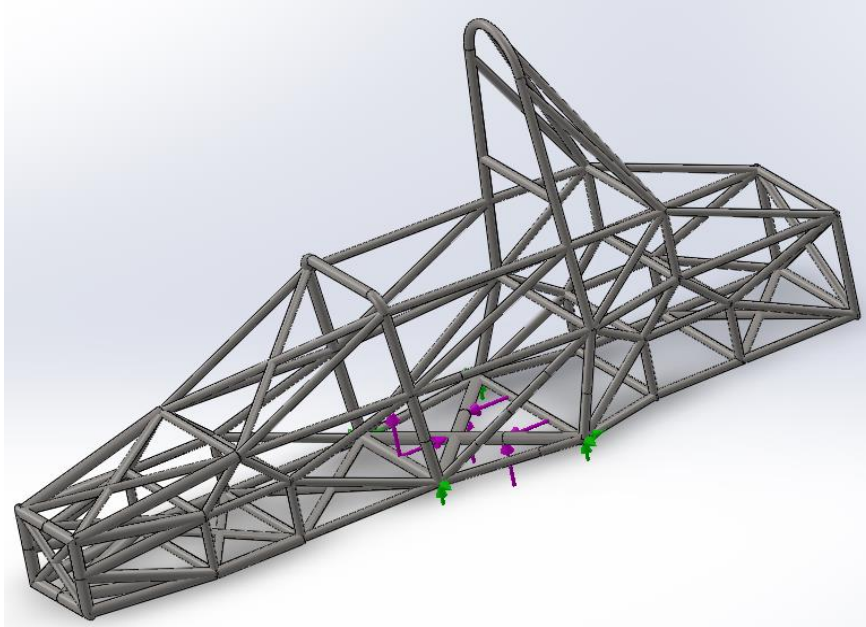


Figura 61: Aplicación de las condiciones de contorno y de las cargas del arnés de cadera y antideslizamiento  
[elaboración propia]

## 1.7 Análisis de impacto diagonal en el frontal

Para estudiar una situación donde el vehículo recibe un impacto en diagonal por la parte frontal, es necesario volver a utilizar la opción de carga remota. Para ello, es necesario crear un eje local de coordenadas en la parte central del frontal, donde se aplicará la carga remota. Esta se distribuirá directamente a los puntos de anclaje del atenuador de impacto, simulando así la descarga de tensión de dicho elemento hacia sus puntos de unión con la estructura frontal. Las cargas aplicadas serán de:

- 120 kN en el eje X
- 10,5 kN en el eje Y

Este es el único análisis donde las condiciones de contorno varían, ya que los desplazamientos también deben estar restringidos, pero en los nodos inferiores del aro principal y en los nodos donde se unen el tubo del arnés de los hombros y el aro principal.

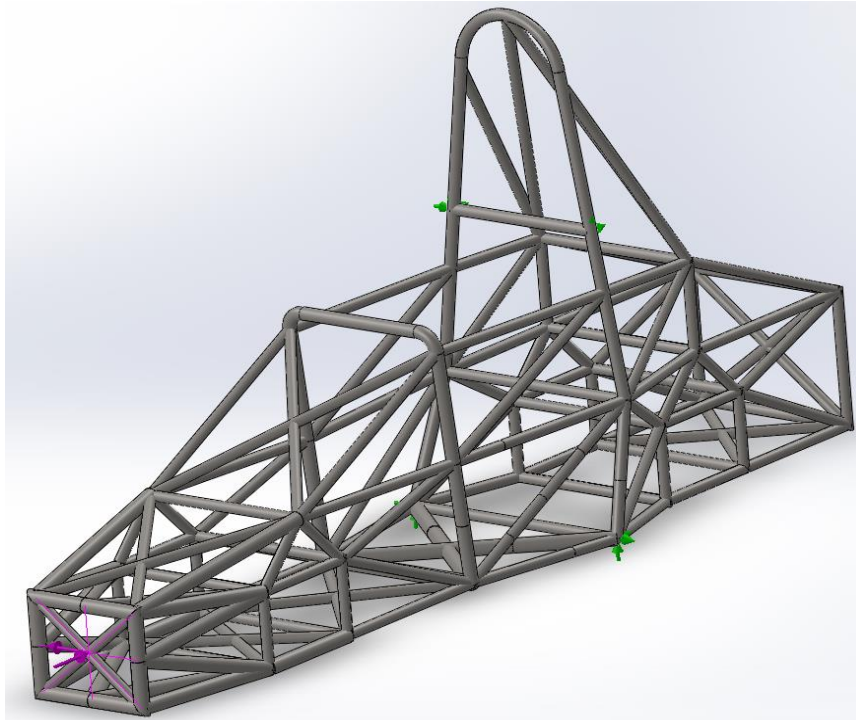


Figura 62: Aplicación de las condiciones de contorno y de las cargas del impacto diagonal  
[elaboración propia]

A pesar de que las condiciones de contorno varían, el estudio mantiene las mismas restricciones de tensión y de desplazamiento que los comentados anteriormente, por lo que **no se pueden superar los 25 milímetros de desplazamiento**.

## 2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al llevar a cabo las simulaciones impuestas por la normativa, se puede apreciar que las fuerzas aplicadas en los estudios están sobredimensionadas. Esto se produce porque el fragmento del reglamento que rige los casos de carga está dedicado a los chasis alternativos, los cuales no siguen los requisitos de diseño al cien por cien, la organización debe asegurarse de que cumplan unos requisitos mayores de seguridad. Por este motivo, los primeros análisis dieron resultados que sobrepasaban con creces la tensión límite admisible, aunque la mayoría sí cumplían el requisito del desplazamiento inferior a 25 milímetros.



Como se puede apreciar en la siguiente imagen, las zonas donde se supera el 90% de la tensión límite admisible ( $316413900 \text{ N/m}^2$ ) estarán coloreadas en rosado para que destaquen ante el resto y así poder estudiarlas de forma individual.

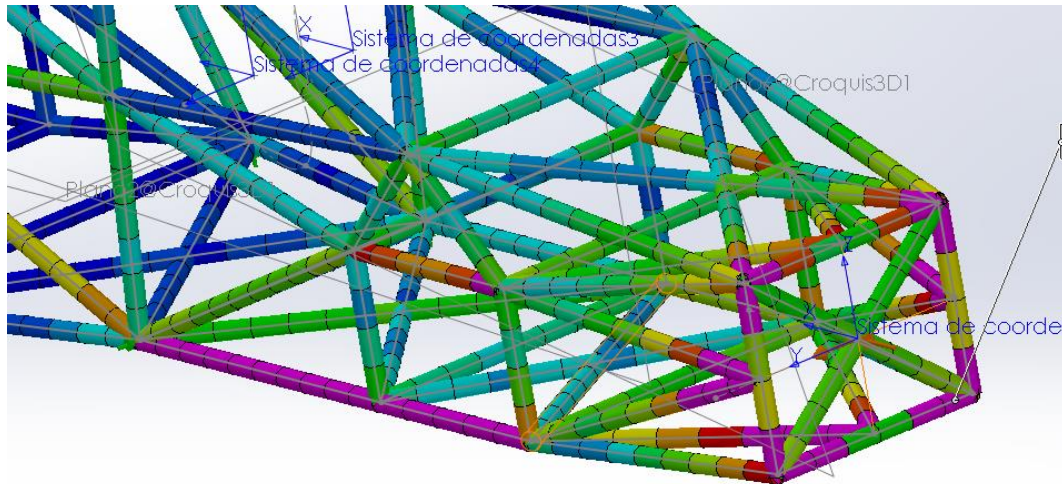


Figura 62: Ejemplo de sobrecarga de la estructura  
[elaboración propia]

La obtención de los resultados finales se ha conseguido a través del aumento del área de los perfiles afectados por tensiones axiales o de flexión altas, o mediante la implementación de refuerzos como en el caso del aro principal.

## 2.1 Resultados del estudio del aro principal y sus soportes

Tras aplicar las cargas impuestas por la normativa, fue necesario añadir dos refuerzos traseros además de los soportes del aro, ya que la tensión y la desviación en el eje Y sobrepasaban los límites expuestos anteriormente. Estos se pueden observar en la figura 42.

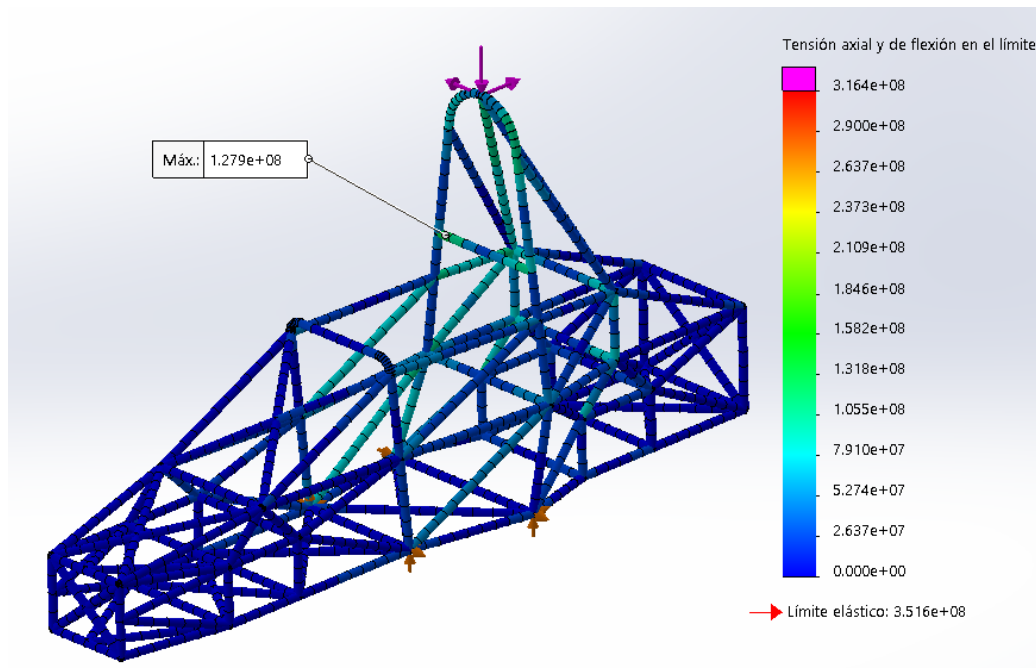


Figura 63: Resultado de tensión del estudio del aro principal [elaboración propia]

Como se puede apreciar en la imagen anterior, el punto de mayor tensión de la estructura se produce en la unión entre el aro principal y el perfil dedicado al enganche del arnés de los hombros. Además, se aprecia como la estructura lateral de impacto del lado derecho soporta mayores tensiones ya que la fuerza aplicada en el eje Y se encuentra en dicha dirección.

En la figura 64 que aparece a continuación, podemos ver los resultados de la deformación del vehículo en el vuelco. Antes de implementar los refuerzos que se unen al punto superior, esta sobrepasaba los 25 milímetros, por lo que no podía pasar esta prueba. Como era de esperar el mayor desplazamiento se produce en el punto de aplicación de las fuerzas.

Finalmente, con el añadido de los refuerzos y el aumento de perfil para soportar las tensiones, se consigue que la deformación sea totalmente mínima, de aproximadamente 3,7 milímetros, algo que se encuentra muy lejos del límite normalizado, además de que la tensión alcanzada sea de casi tres veces menor que la máxima permitida.

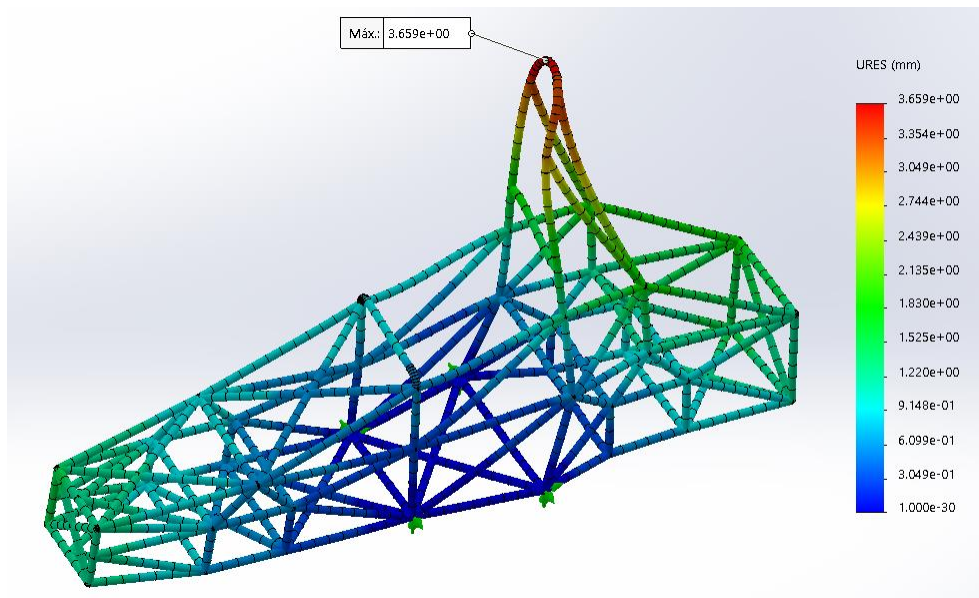


Figura 64: Resultado de deformación del estudio del aro principal  
[elaboración propia]

## 2.2 Resultados del análisis del aro frontal

El estudio del aro frontal simula una situación similar al del principal, pero suponiendo que el vehículo al volcar recibe el impacto en la zona del volante. Esta zona al igual que el aro principal es una de las más importantes del vehículo, ya que son las principales protecciones del piloto en un accidente tan peligroso como el que se simula. Además, también lo protegen de cualquier situación en la que pueda verse implicada la parte superior del vehículo.

Recientemente, se ha visto un claro ejemplo en la Fórmula 1 de la importancia que tienen los avances en cuanto a seguridad se refiere, donde un accidente entre los pilotos Nico Hülkenberg y Fernando Alonso, acabaron con el vehículo del segundo pasando por encima de un tercer vehículo, el del piloto Charles Leclerc. Gracias a las protecciones antivuelco y de impacto ninguno de los pilotos sufrió lesiones en un accidente que podía haber acabado en tragedia.





Figura 65: Accidente en la F1 [13]

En la siguiente imagen, se pueden ver las tensiones resultantes de las cargas aplicadas. Como se puede ver, la tensión mayor se encuentra en el punto de aplicación de la carga ya que al contrario que en el principal, no fue necesaria la implementación de unos refuerzos adicionales. Por este motivo también es normal que la tensión se encuentre mucho más cercana al límite, pero al tener un margen del 10% con la máxima elástica, es un resultado totalmente aceptable y seguro. Cabe destacar que para obtener estos resultados fue necesario el aumento de la sección del perfil utilizado por la normativa.

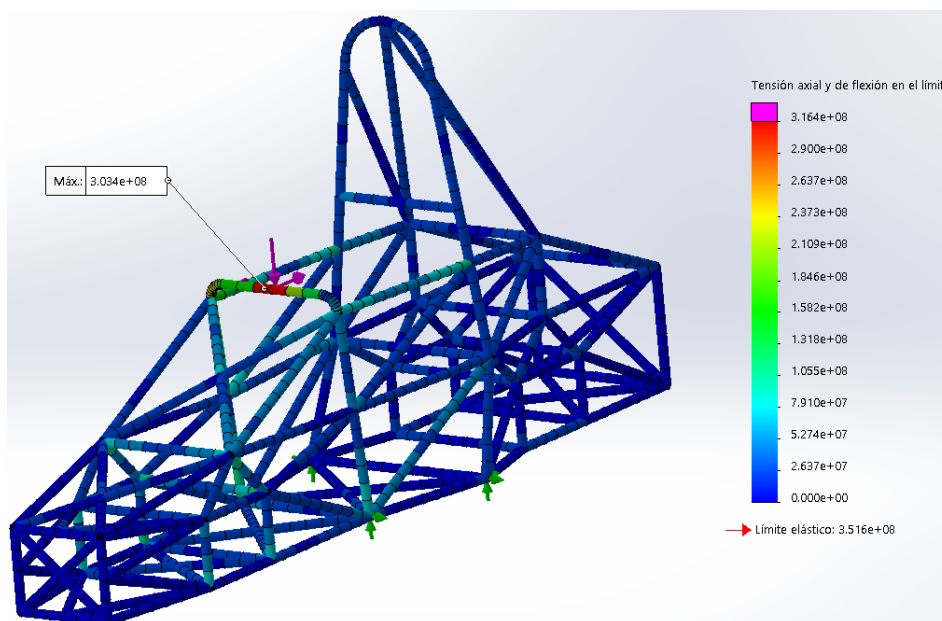


Figura 66: Resultado de tensión del estudio del aro frontal [elaboración propia]

En la imagen que podemos ver a continuación, se muestran los resultados de deformación de la estructura. Al igual que en el análisis anterior los resultados dan muy bajos, prácticamente de 3,5 milímetros como mucho, por lo que este análisis también sirve como resultado final.

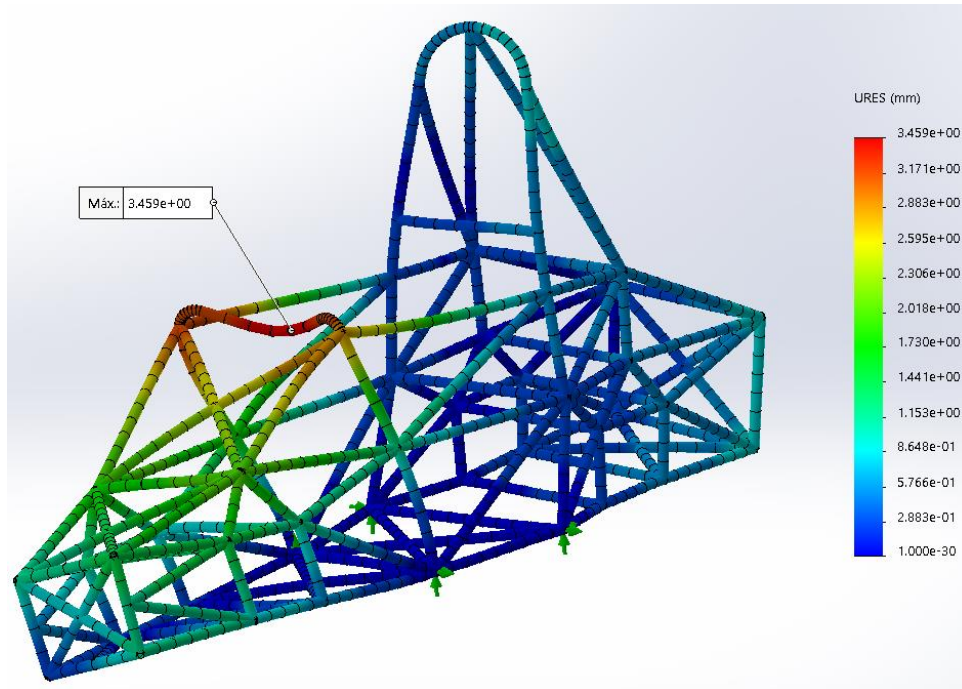


Figura 67: Resultado de deformación del estudio del aro frontal  
[elaboración propia]

## 2.3 Resultados del análisis de impacto lateral

Para el estudio del impacto lateral se necesitó realizar dos simulaciones, una en la parte delantera y otra en la parte trasera del perfil diagonal. Mediante el círculo de impacto, se dividió la viga en varios fragmentos donde fuese coincidente con este [ver figura 68].

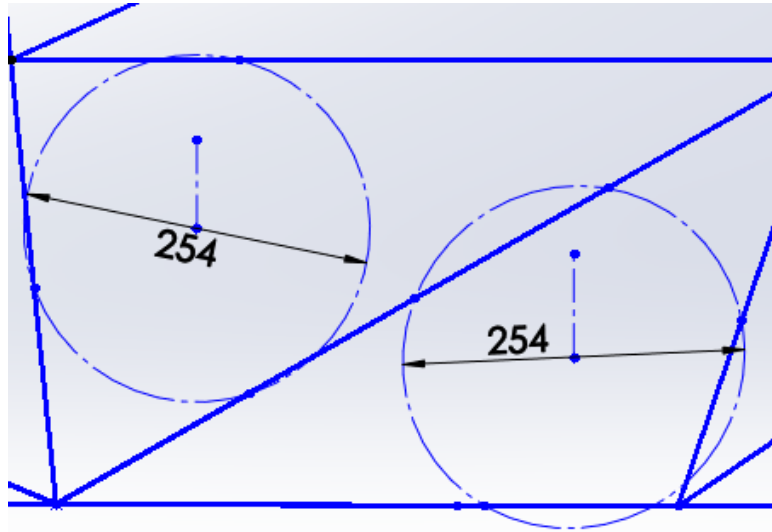


Figura 68: Círculos de impacto [elaboración propia]

Dado que la distancia entre los puntos donde corta el círculo es demasiado corta, fue necesaria la aproximación utilizando solo uno de los puntos que estuviesen cercanos, ya que la longitud en comparación con el espesor del tubo es demasiado corta para que el SolidWorks® lo pueda estudiar mediante la teoría de vigas.

### 2.3.1 Círculo de impacto delantero

Las fuerzas aplicadas en el círculo delantero dieron como resultado una tensión algo superior al 50% de la límite, algo que permite a la estructura trabajar perfectamente en caso de que algún elemento impacte en el lateral del vehículo. Como se puede apreciar, el punto donde se produce el mayor esfuerzo es cerca del nodo que une el aro frontal y la parte inferior de la estructura lateral.

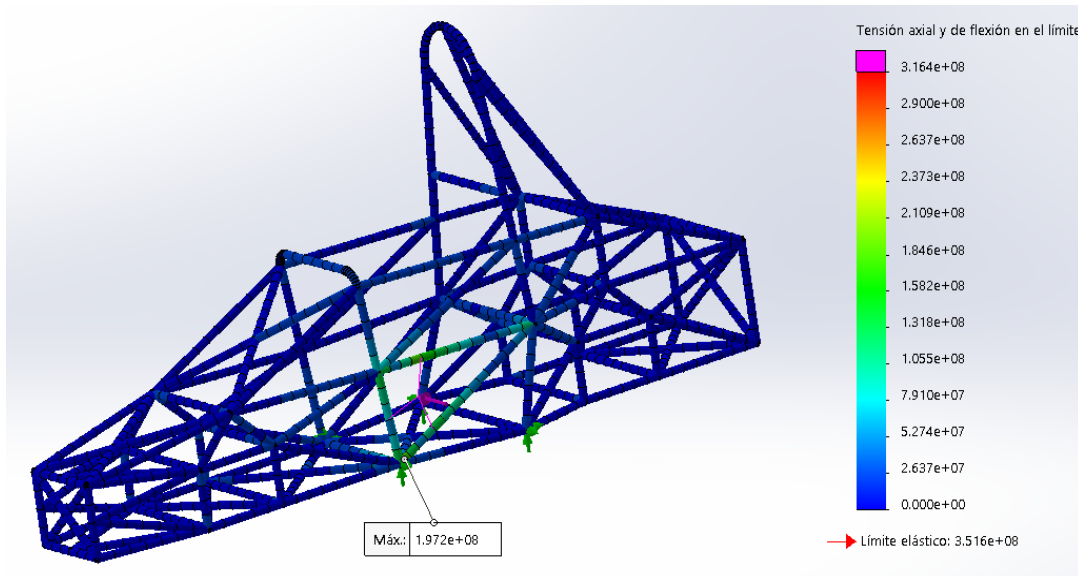


Figura 69: Resultado de tensión del estudio de impacto lateral 1 [elaboración propia]

A continuación, se refleja el resultado de la deformación producida en la estructura por las fuerzas aplicadas. Como era de esperar, el mayor desplazamiento se produce en la barra superior, ya que es el punto de aplicación de carga que más lejano se encuentra de un nodo. A pesar de esto, el resultado es prácticamente despreciable ya que ni siquiera llega a deformarse 2 milímetros.

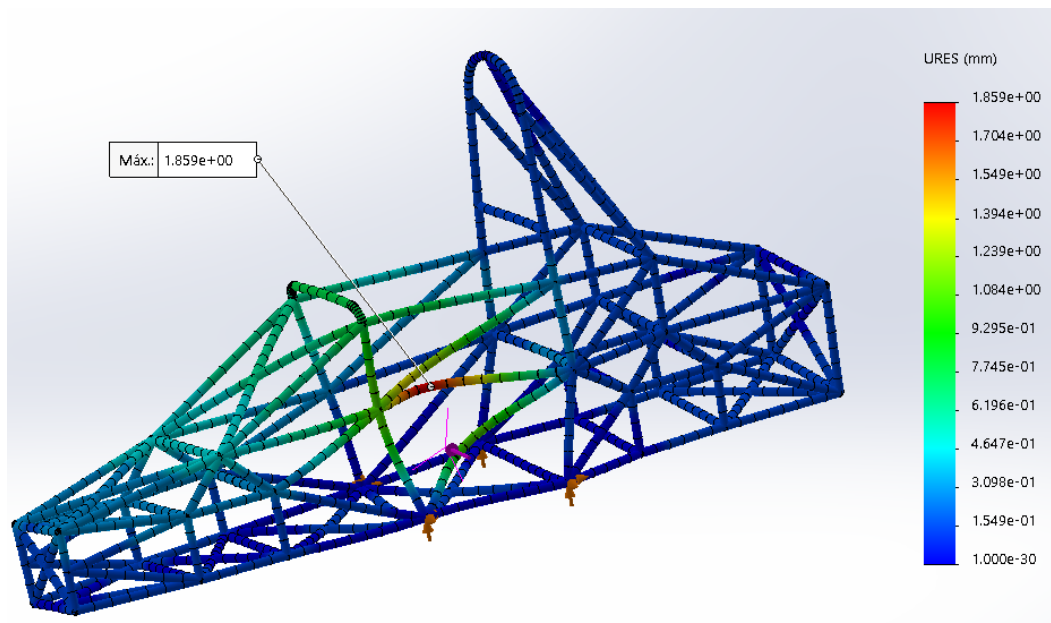


Figura 70: Resultado de deformación del estudio de impacto lateral 1 [elaboración propia]

### 2.3.2 Círculo de impacto trasero

Los resultados de tensión que se han obtenido en el círculo trasero son mayores, por lo que este es el caso más desfavorable de los dos, ya que las deformaciones son demasiado pequeñas para considerarlas más importantes a la hora de elegir el perfil utilizado.

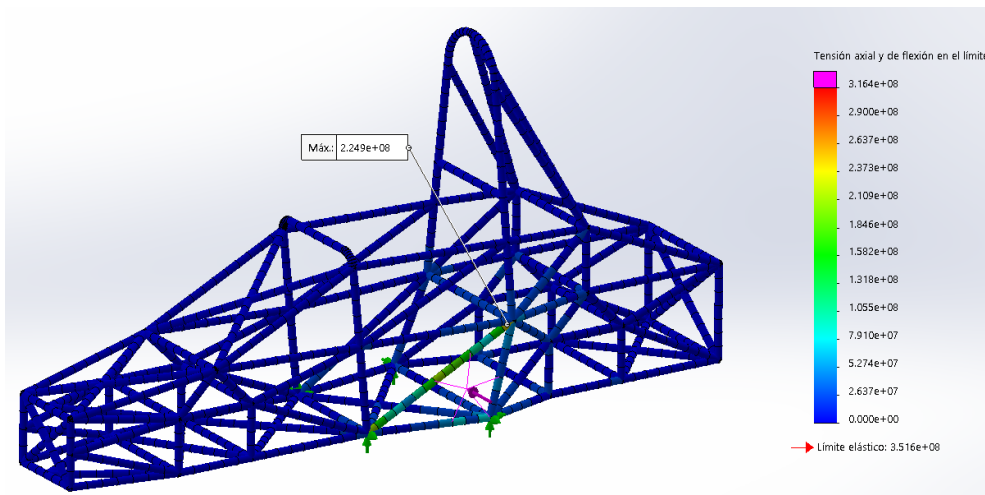


Figura 71: Resultado de tensión del estudio de impacto lateral 2 [elaboración propia]

A pesar de que las tensiones son mayores, las deformaciones obtenidas han sido ligeramente menores. Esto se puede deber simplemente a la cantidad de puntos de aplicación de la carga o a la posición de estos.

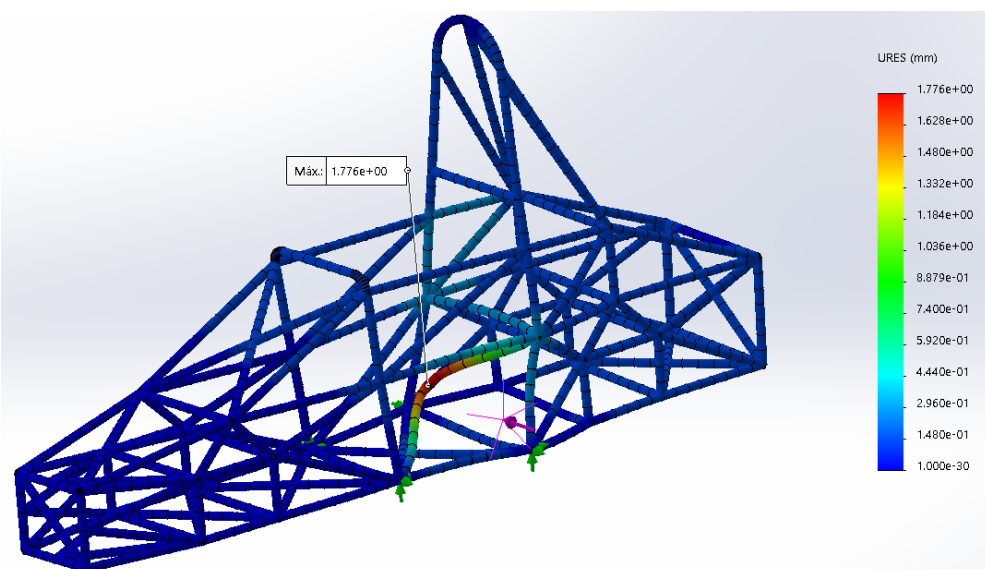


Figura 72: Resultado de deformación del estudio de impacto lateral 2 [elaboración propia]



## 2.4 Resultados del análisis de impacto frontal

Uno de los accidentes más comunes en las competiciones de automóviles es el impacto frontal, ya sea contra una de las protecciones del circuito o contra otro vehículo. Además, suelen ser impactos a gran velocidad que producen una reacción en la estructura de corta duración, pero de gran intensidad. Es por ello por lo que la fuerza aplicada en el estudio es tan grande, porque en caso de que ocurra un accidente de tal categoría lo primero que se vería afectado serían las piernas del piloto.

Como podemos ver en la siguiente imagen, la resultante no llega a la mitad de la máxima permitida. Además, se puede ver como el punto máximo de esfuerzo no se encuentra en la parte frontal del chasis, sino que aparece justo detrás de la suspensión delantera, por lo que se confirma la buena distribución de tensiones junto con la gran resistencia que aportan los perfiles puestos en el frontal, los cuales son de los que mayor sección tienen del chasis.

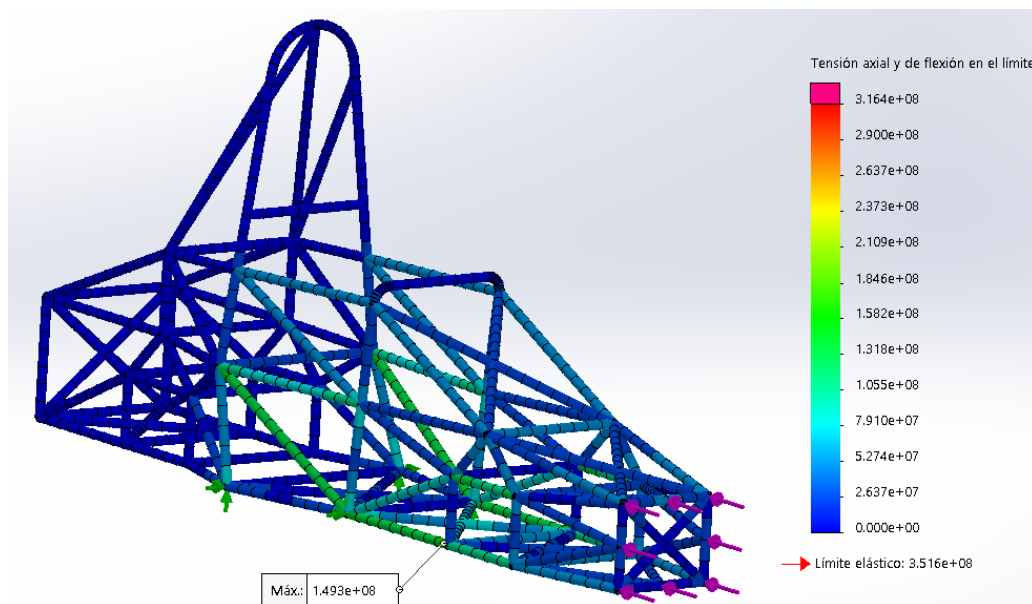


Figura 73: Resultado de tensión del estudio del impacto frontal  
[elaboración propia]

A pesar de ser un impacto muy fuerte que afecta a toda la estructura, los desplazamientos también se ven distribuidos por lo que el máximo no llega a 2 milímetros y medio. Al igual que en el caso de las tensiones, el mayor desplazamiento no se produce en el frontal sino en la parte alta del aro principal ya que es una de las zonas con más libertad de la estructura.

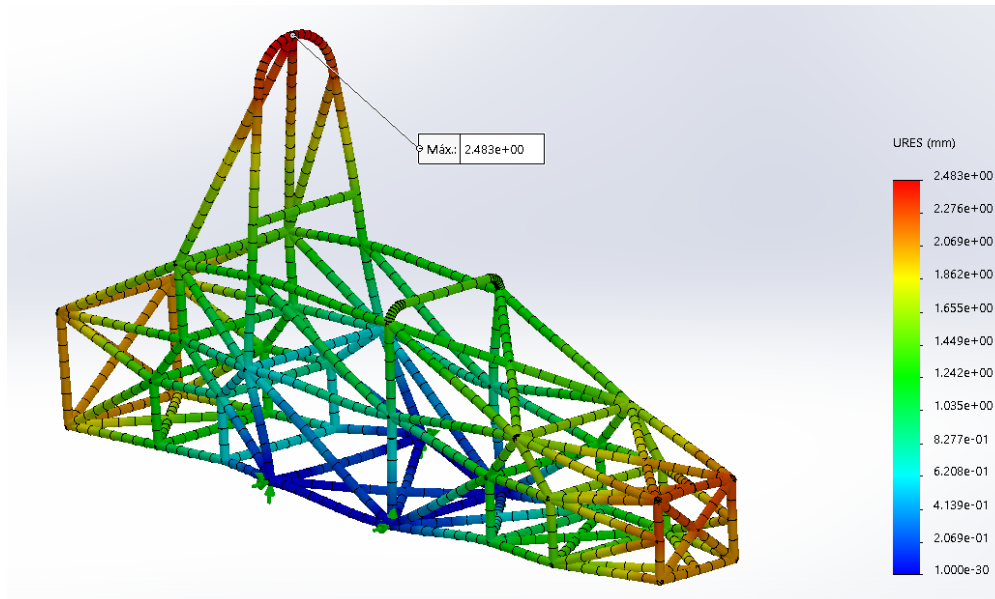


Figura 74: Resultado de deformación del estudio de impacto frontal [elaboración propia]

Ambos valores de tensión y de desplazamiento cumplen con creces las especificaciones de la normativa, por lo que la estructura garantiza el correcto funcionamiento ante un impacto frontal.

## 2.5 Resultados del análisis del arnés de hombros

Dado que la única variación entre las cuatro simulaciones realizadas para el arnés de los hombros es el ángulo de aplicación de la fuerza, solo se representarán gráficamente los del caso más desfavorable, el cual ha sido el de la inclinación de  $0^\circ$ , es decir, la carga totalmente aplicada en la dirección contraria al eje X. A pesar de solo mostrar este estudio, en la siguiente tabla se pueden ver los resultados obtenidos para cada inclinación.

Inclinación	Tensión máxima (N/m <sup>2</sup> )	Desplazamiento máximo (mm)
-20°	2,631*10 <sup>8</sup>	3,489
-10°	2,697*10 <sup>8</sup>	3,667
0°	2,717*10 <sup>8</sup>	3,744
10°	2,692*10 <sup>8</sup>	3,72

Tabla 6: Tensiones y desplazamientos obtenidos [elaboración propia]

Como podemos ver en la siguiente imagen, el lugar de mayor tensión de la estructura en este análisis se encuentra en los propios puntos de aplicación de la carga. Esto era de esperar ya que, al no encontrarse en ningún nodo sino en medio del perfil, la flexión es mucho mayor que en el otro caso. A pesar de esto, aumentando el área del elemento se ha conseguido un valor final razonable y seguro.

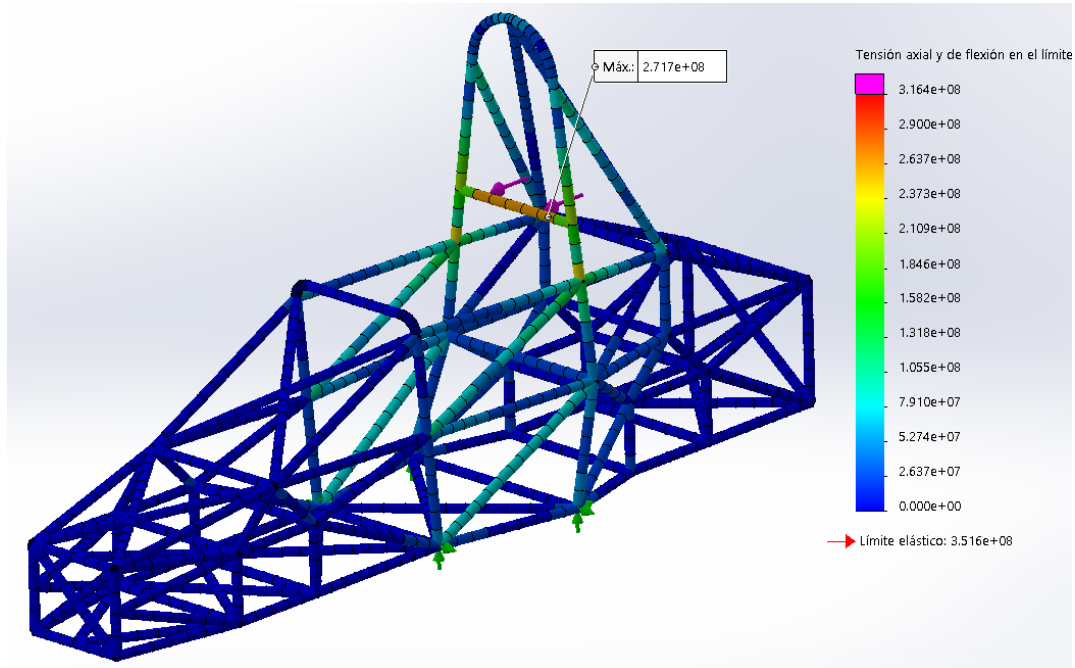


Figura 75: Resultado de tensión del estudio del arnés de hombros  
 [elaboración propia]

A pesar de la tensión resultante, la deformación de la barra no tiene un valor muy alto ya que el perfil utilizado tiene una sección suficiente para soportarla sin problemas.

Como se puede apreciar en la siguiente figura, el desplazamiento máximo aparece justo en el centro de la viga, algo común cuando se aplican cargas simétricas en un elemento restringido en ambos extremos. Este efecto se podría reducir incluyendo unos refuerzos directamente en los puntos de aplicación, aunque no es necesario ya que no sobrepasa la tensión límite ni el desplazamiento.



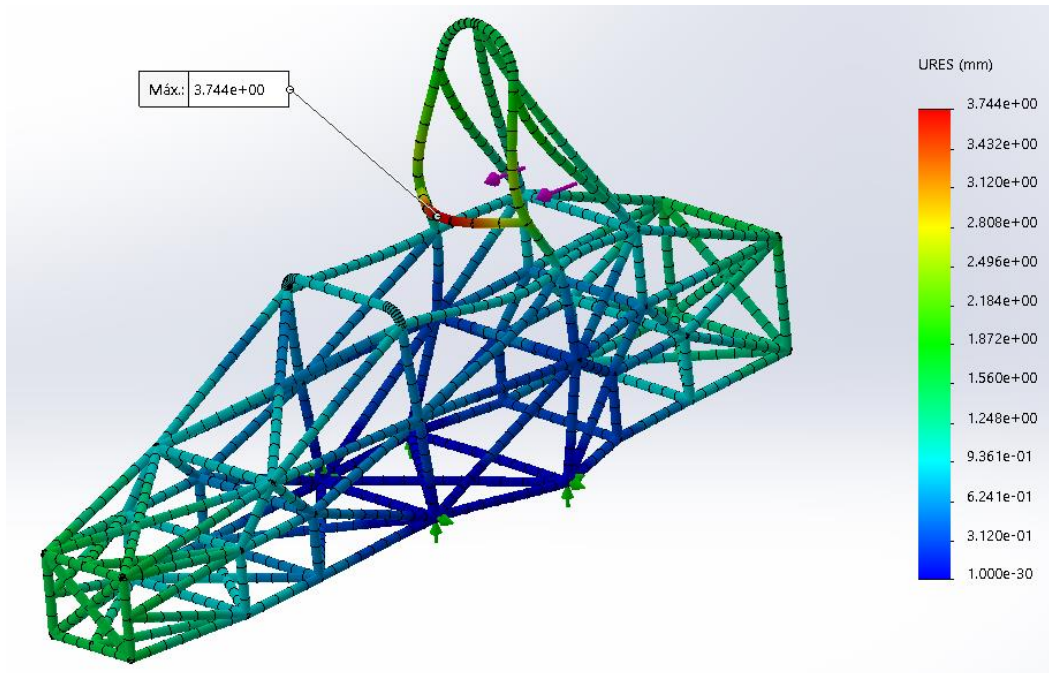


Figura 76: Resultado de deformación del estudio del arnés de hombros [elaboración propia]

## 2.6 Resultados del arnés de la cadera y del antideslizamiento

Al igual que en el estudio anterior, las variaciones entre una simulación y otra son escasas ya que los puntos de aplicación se mantienen, solo varía la inclinación de la fuerza aplicada en los anclajes del arnés de la cadera, por lo que únicamente se muestra gráficamente el resultado más desfavorable. También se pueden ver en la siguiente tabla todos los resultados obtenidos.

Inclinación antisubmarino	Inclinación arnés cadera	Tensión máxima (N/m <sup>2</sup> )	Desplazamiento máximo (mm)
58,24°	45°	2,203*10 <sup>8</sup>	1,669
58,24°	50°	2,325*10 <sup>8</sup>	1,797
58,24°	55°	2,434*10 <sup>8</sup>	1,912
58,24°	60°	2,530*10 <sup>8</sup>	2,014
58,24°	65°	2,612*10 <sup>8</sup>	2,103

Tabla 7: Tensiones y desplazamientos obtenidos [elaboración propia]

Como se puede ver en la tabla, cuanto mayor es el ángulo de aplicación de la carga, la tensión y el desplazamiento son mayores, por lo que a continuación se muestra el último caso.

En la imagen se puede ver como el punto con mayor tensión se encuentra justo donde se aplican las cargas del arnés de la cadera. Esto se debe al mismo motivo que en el anterior análisis, ya que tampoco existe ningún nodo ni refuerzo en dicho lugar. Para que la estructura soporte los esfuerzos el perfil que se ha utilizado es el mismo que en el frontal, ya que necesita una mayor área que el resto de la estructura.

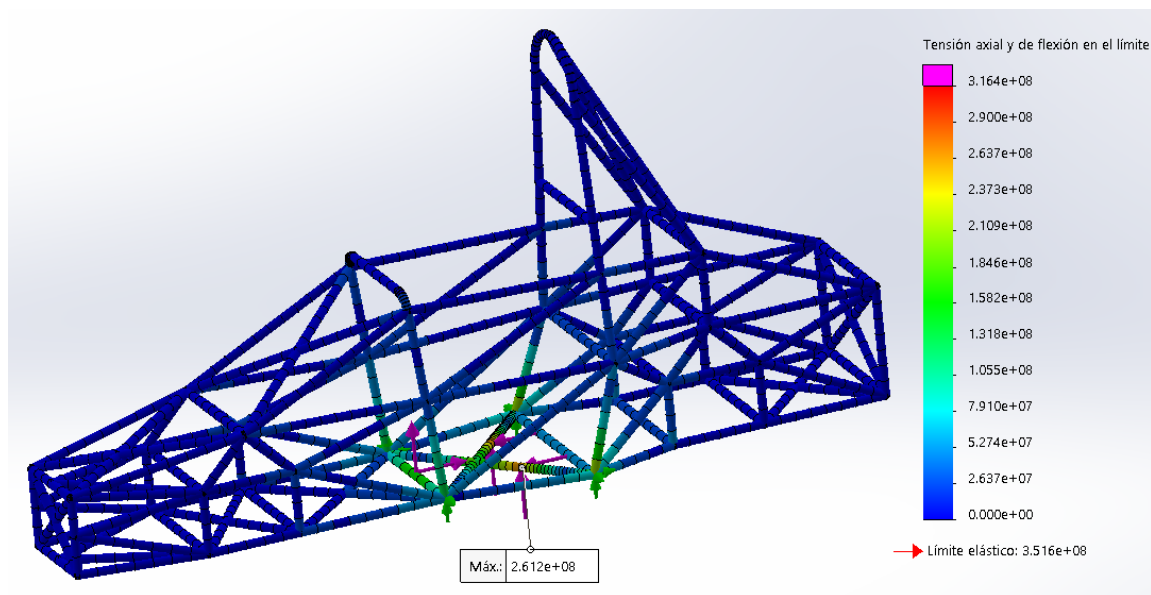


Figura 77: Resultado de tensión del estudio del arnés de la cadera y del antideslizamiento [elaboración propia]

Al igual que en el estudio anterior, el mayor desplazamiento se encuentra en el punto donde se aplican las cargas de mayor magnitud, las del arnés de la cadera. Aunque la tensión sea grande, como comentaba antes el perfil tiene una gran sección por lo que se mantiene prácticamente rígido ante las fuerzas aplicadas, quedando muy lejos del valor límite de los desplazamientos.

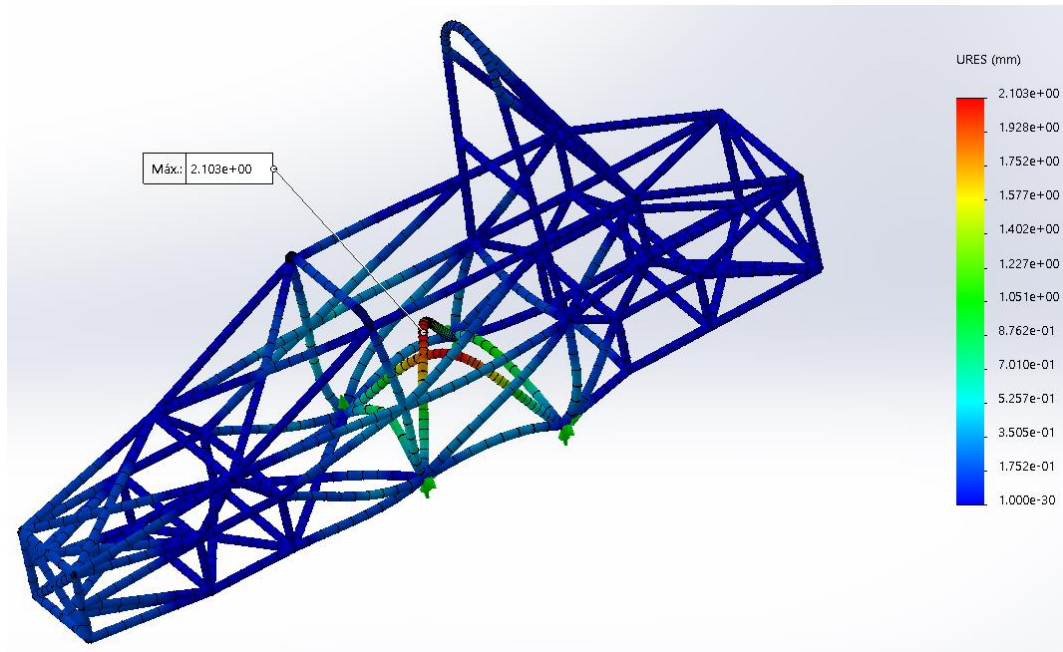


Figura 78: Resultado de deformación del estudio del arnés de la cadera y del antideslizamiento  
 [elaboración propia]

Al cumplir ambos requisitos de tensión y de desplazamiento, la estructura está preparada para soportar las tensiones que efectúa el arnés de la zona inferior del piloto.

## 2.7 Resultados del análisis de impacto diagonal en el frontal

Este suele ser el accidente más común cuando el vehículo se desvía de la trazada y acaba en las protecciones del circuito, ya que los pilotos tratan de evitar chocar frontalmente para evitar al máximo posible los daños severos en el monoplaza.

Al haber estudiado previamente el impacto totalmente frontal, este análisis también sirve para comprobar la validez de los perfiles obtenidos previamente.

Como se puede ver en la siguiente imagen, aunque se acerca a la tensión máxima admitida, la estructura soporta perfectamente la tensión, por lo que los perfiles utilizados previamente soportan las tensiones del chasis. Al ser un impacto diagonal, la fuerza que se encuentra en la dirección Y trata de deformar el chasis hacia un lado y hacia atrás, por lo que la tensión máxima se encuentra en un lateral.

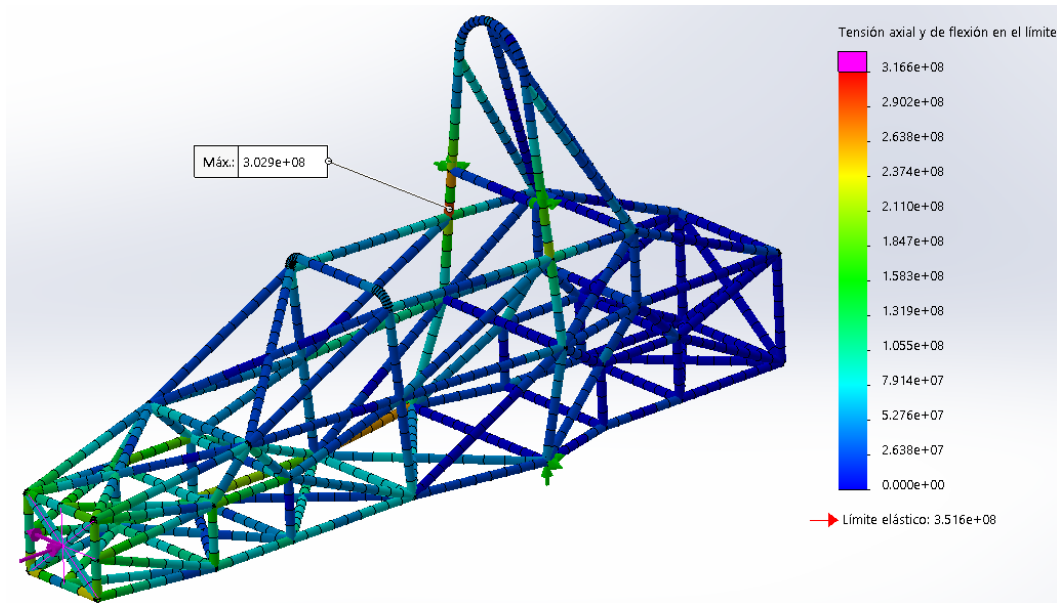


Figura 79: Resultado de tensión del estudio del impacto diagonal en el frontal [elaboración propia]

En la siguiente imagen se puede ver que el desplazamiento máximo se encuentra en la parte derecha de la estructura frontal, hacia donde se dirige la carga en el eje Y. Dado que ni siquiera llega a 3 milímetros y medio, el valor se encuentra muy lejos del límite permitido, por lo que este análisis confirma la resistencia del chasis ante un impacto en diagonal.

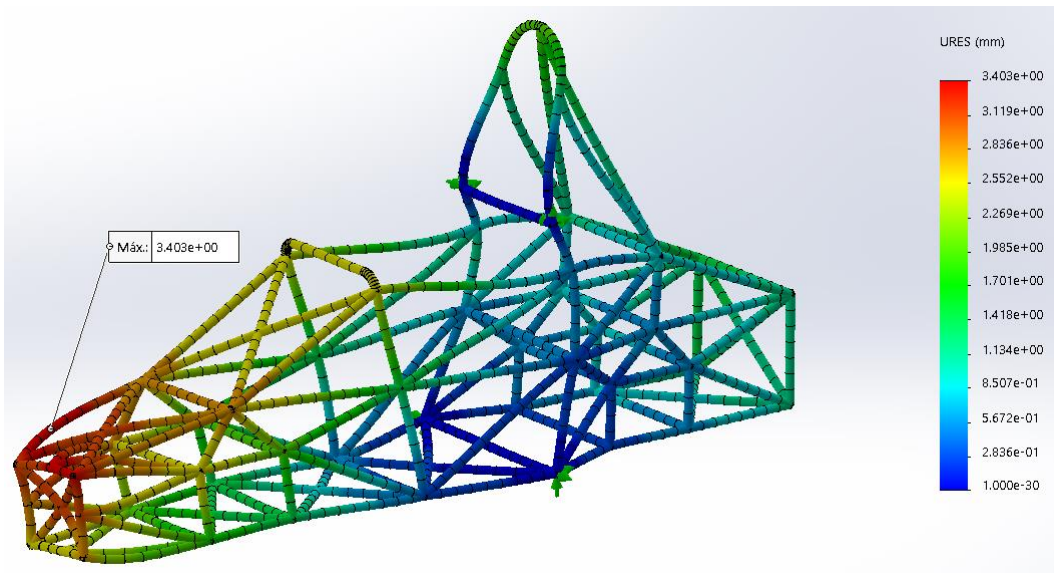


Figura 80: Resultado de deformación del estudio del impacto diagonal en el frontal [elaboración propia]

### 3. CONCLUSIONES

Los estudios realizados con el método de los elementos finitos confirman que la estructura soporta todos los esfuerzos requeridos por la normativa. La decisión final del equipo por lo tanto es utilizar el material AISI 1020 para la fabricación del chasis.

Dado que la seguridad del piloto es lo más importante en una competición de automóviles, este anexo es el más trascendental de todo el proyecto, ya que asegura que la estructura pueda soportar los posibles impactos a los que se vea sometido el monoplaza, protegiendo así al conductor que va en el interior.

Además de que la estructura deba soportar los impactos, en el habitáculo también debe existir unas medidas de seguridad. Por ello, se utilizan diferentes tipos de protecciones como pueden ser el mono ignífugo, las protecciones térmicas entre el conductor y los elementos que llegan a altas temperaturas y los recubrimientos de espuma sobre la estructura para evitar que puedan contactar directamente con la persona.





**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**  
**SECCIÓN DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

---

## **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN CHASIS TUBULAR**  
**PARA UN PROTOTIPO DE FÓRMULA STUDENT**

### **ANEXO II**

### **PRESUPUESTO DE FABRICACIÓN**

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Carlos Calvo Martín de Bernardo

Tutora

Viana Lida Guadalupe Suárez





# ÍNDICE

<b>ANEXO II: PRESUPUESTO DE FABRICACIÓN .....</b>	<b>95</b>
<b>1. PRESUPUESTO DE PERFILERÍA.....</b>	<b>99</b>
<b>2. PRESUPUESTO DE SOLDADURA.....</b>	<b>99</b>



## 1. PRESUPUESTO DE PERFILERÍA

Para la longitud total de material necesario por perfil, se añade aproximadamente un 10% por la posible pérdida de material a la hora de cortarlo y prepararlo para ser soldado.

Perfil	Cantidad de tubos	Longitud total (m)	Precio por metro de longitud	Precio total (€)
25x1,8	4	2,30	1,16	2,67
26,9x1,8	39	15,40	1,63	25,11
26,9x2,6	66	33	2,08	68,64
30x3,2	1	0,5	2,59	1,30
30x5,6	6	3,10	4,33	13,43
33,7x4,5	8	2	5,98	11,96
38x3,2	15	7,10	4,55	32,31
38x7,1	12	2,80	7,36	20,61
			TOTAL	176,03

*Tabla 8: Presupuesto material de acero al carbono  
[elaboración propia]*

## 2. PRESUPUESTO DE SOLDADURA

Dado que no es posible conocer con exactitud la longitud de cada cordón de soldadura y su profundidad, en la siguiente tabla aparece una aproximación de lo que costaría el material para la soldadura de la estructura.

Esta se llevará a cabo mediante electrodos preparados para la soldadura de los aceros al carbono. Dado que hay gran variedad de tubos, los diámetros del electrodo utilizado variará según el espesor de los

perfiles a soldar. Estos suelen tener una eficiencia de deposición de entre el 60 y el 70%, entre los cuales tomaremos el mejor caso.

Para el cálculo de la soldadura he supuesto que el cordón es plano, con un espesor medio de la soldadura de 3 milímetros. Además, la longitud de todos los electrodos será de 300 milímetros y tendrán una densidad de 0,8 gramos/cm<sup>3</sup>. El ancho del cordón depende del espesor de las piezas a soldar, pero como son todos menores a 10 milímetros tendrá que ser igual o superior a 3 milímetros, pero sin llegar a 4,5. Con todos estos datos, podemos obtener la cantidad de electrodos que se utilizarán por metro de soldadura.

Finalmente, se ha aproximado la longitud de la soldadura con el perímetro de cada uno de los perfiles, por lo que es el dato que más puede distender de la realidad.

Espesor del perfil (mm)	Diámetro del electrodo(mm)	Longitud de soldadura (m)	Cantidad de electrodos por metro de soldadura	Precio por electrodo	Precio total (€)
1,5-2	2	3,611	6,99	0,188	4,75
2-3	3	5,578	3,11	0,195	3,38
3-6	4	3,298	1,75	0,215	1,24
7-8	5	1,433	1,12	0,241	0,40
				TOTAL	9,77

*Tabla 9: Presupuesto material de soldadura  
[elaboración propia]*

Como podemos observar en la tabla anterior, el problema de la soldadura no es el coste del material, sino el sueldo del experto soldador que lleve a cabo dicho trabajo y el mantenimiento de la maquinaria. Además, el corte de las piezas también debe ser llevado a cabo por un experto, ya que en la estructura del chasis existen uniones de hasta ocho

tubos, y cuanto mejor esté preparado para el soldador más barato será el coste, ya que este es el proceso más caro.

El sueldo de un soldador en España de media es de 10,78 €/h [14], a lo que si le añades el precio del equipo de soldadura que es de unos 22 €/h, obtienes un gasto de casi 35 euros por cada hora de trabajo del soldador. Al ser una estructura tan complicada, este trabajo se puede alargar por varios días, en los cuales la jornada de trabajo es de 8 horas, algo que podría hacer llegar el coste del proyecto a los 1000 euros, todo ello solamente contando con la estructura principal, sin añadir los diferentes componentes mecánicos, electrónicos y de protección que deberá llevar el monoplaça totalmente montado.

En conclusión, lo realmente costoso de un proyecto como este no son los materiales de fabricación, sino el personal que debe estar a cargo de la creación de la estructura.





**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**  
**SECCIÓN DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

---

## **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN CHASIS TUBULAR  
PARA UN PROTOTIPO DE FÓRMULA STUDENT**

### **ANEXO III**

### **MARCO DE LA COMPETICIÓN**

### **FORMULA STUDENT**

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Carlos Calvo Martín de Bernardo

Tutora

Viana Lida Guadalupe Suárez





# ÍNDICE

<b>1. FORMULA STUDENT .....</b>	<b>107</b>
<b>1.1 Historia de la competición .....</b>	<b>107</b>
<b>1.2 Objetivo de la competición .....</b>	<b>108</b>
<b>1.3 Estructura de la competición .....</b>	<b>108</b>
<b>1.4 Categorías .....</b>	<b>111</b>



## 1. FORMULA STUDENT

La Formula SAE es una competición nacida en Estados Unidos en el año 1982, gracias a la Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE). El motivo por el que se creó fue aportarle a todos esos jóvenes ingenieros y estudiantes de ingeniería una competición donde poder participar sin ser expertos, además de ser un plus de entusiasmo e ilusión a la hora de estudiar, ya que en grados como el de Ingeniería Mecánica existen una gran cantidad de alumnos apasionados por el mundo del motor.

Al tener una normativa propia, esto también aporta un extra de trabajo y de sacrificio, pero siempre recompensado con el sentimiento de empezar a formar parte del mundo de la competición de automóviles.

### 1.1 Historia de la competición

El inicio de la competición data de varios años antes de 1982, ya que en la Universidad de Houston se celebró la primera SAE Mini-Indy, competición que basaba su reglamento en el de una competición ya existente, la Mini Baja, competición que posteriormente se uniría a la SAE, la cual finalmente acabaría abarcando diferentes tipos de competición.

Hasta 1990, el lugar de realización de la competición se alternaba entre Michigan y Texas, pero a partir de la década de los 90 esta competición fue incrementando su fama y se exportó a diferentes países de Latinoamérica y de Europa.

Actualmente, la competición tiene un ámbito totalmente internacional, llegando a albergar eventos en Japón y en Australia. Todos los países participantes utilizan la misma normativa base original, a pesar de que en algunos apartados difieren por la traducción de un idioma a otro. Los resultados de las competiciones son recogidos anualmente y puntúan en un ranking mundial, donde hoy en día la competición en cada país llega a albergar hasta 120 equipos y más de 2000 estudiantes.



suele ser el obtener el menor tiempo posible en cada una de las pruebas, ya sea de aceleración, de frenado o de conducción.

La puntuación máxima que se puede obtener en la competición es de 1000 puntos, siendo el equipo ganador el que más consiga al sumar la puntuación individual de cada prueba.

Cabe destacar que en caso de que el vehículo no supere la inspección técnica y de seguridad, el equipo no podrá participar en la competición, por lo que es importante seguir al pie de la letra la normativa SAE.

### 1.3.1 Pruebas estáticas

Los eventos estáticos ponen a prueba las habilidades del equipo fuera de la pista y están compuestos por tres pruebas básicas, las cuales suman un total de 325 puntos. La primera es la presentación del monoplaza y de la idea de negocio ante un jurado, por así decirlo se trata de vender el coche al jurado (Business Plan). La segunda consiste en un estudio detallado de todos los costes de fabricación y el presupuesto del proyecto a la hora de lanzar el producto al mercado (Cost Report). La última es la más puntuada y consiste en la valoración del diseño entregado por el equipo, en esta el jurado puede preguntar al equipo cualquier cosa que crea para entender el diseño (Design).

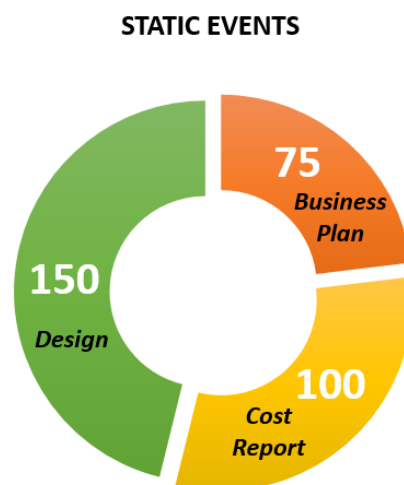


Figura 82: Puntuación de las pruebas estáticas [16]

Dentro de la prueba de diseño, existen diferentes comprobaciones como son las de ruido en el caso de motores de combustión, de frenado, de inclinación para comprobar que no vuelca y que no existe pérdida de

líquidos y de lluvia en el caso de vehículos eléctricos para comprobar el correcto aislamiento de sus componentes. Con el paso de cada prueba, los comisarios van poniendo pegatinas en el caso de que hayan sido superadas. Si no se obtienen todas las pegatinas el vehículo no podrá pasar a las pruebas dinámicas.

### 1.3.2 Pruebas dinámicas

Para valorar las prestaciones dinámicas del vehículo la competición tiene 4 pruebas diferentes que suman un total de 575 puntos, aunque durante las pruebas también se valora la eficiencia del vehículo o el consumo de combustible (Eficiency) la cual aporta otros 100 puntos. La primera es simple y consiste en recorrer 75 metros en el menor tiempo posible partiendo desde el reposo, es decir, una prueba de aceleración (Acceleration). A continuación, se pasa a una prueba de conducción, en la cual se valora el tiempo, comportamiento y maniobrabilidad del vehículo durante una vuelta al circuito sin que haya más vehículos dentro del recorrido (Autocross). La tercera prueba es la de resistencia y consiste en completar 22 kilómetros en el circuito, pero con el añadido de dificultad de compartir pista con el resto de los equipos (Endurance). Finalmente, la última prueba sirve para evaluar la habilidad del monoplaza y del piloto para coger las curvas (Skid-Pad).

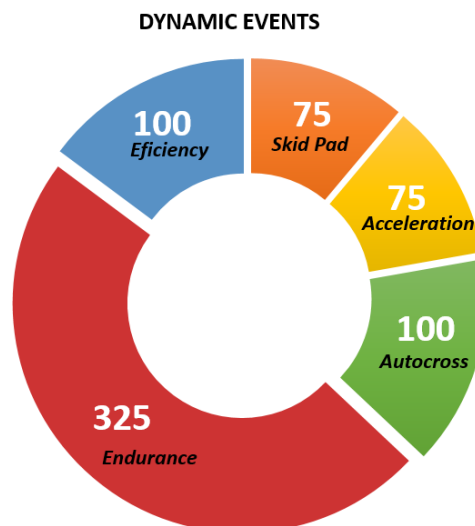


Figura 83: Puntuación de las pruebas dinámicas [16]

La prueba de Autocross se realiza en un circuito de rectas cortas, curvas con radio constante y una velocidad máxima de entre 40 y 48 kilómetros por hora. El recorrido está señalizado mediante conos y en caso de que se derribe alguno el equipo tendrá penalización de tiempo.



Figura 84: Circuito de Autocross [17]

Para la prueba de Skid-Pad se utiliza un circuito específico, el cual está formado por dos círculos de 15,25 metros de diámetro con un carril de 3 metros de ancho cada uno, unidos en forma de ocho. Por cada cono que se derribe, el equipo tendrá una penalización de 0,25 segundos.

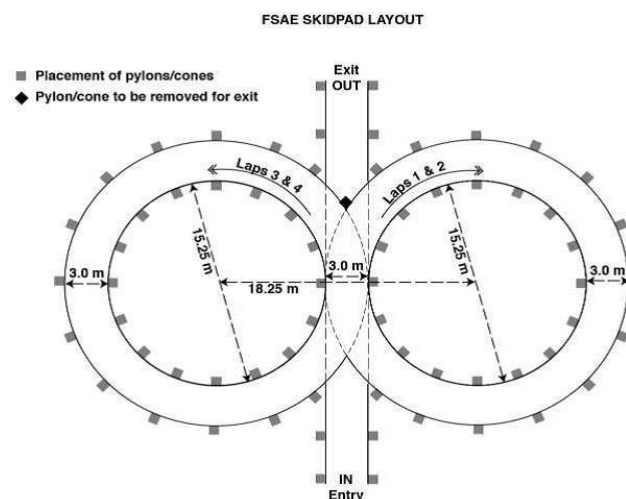


Figura 85: Esquema del circuito de Skid-Pad [18]

## 1.4 Categorías

### 1.4.1 Clase 3

Esta es la clase dedicada a los equipos nuevos, en la cual únicamente participan vehículos que están en fase de diseño para validar el modelo final. Comúnmente no está permitida la participación en esta clase durante dos años consecutivos, ya que así obligan a los equipos a

trabajar en el automóvil para encontrar patrocinadores y conseguir plasmarlo físicamente.

En esta clase las universidades solo pueden presentarse a las pruebas de diseño, presentación y coste, es decir, las que no necesitan de la muestra física del vehículo.

### **1.4.2 Clase 2**

Esta categoría está dedicada a los equipos que tras pasar por la clase 3 han conseguido la fabricación del vehículo completo o como mínimo dispongan de un chasis completo. Al igual que en la clase 3, solo está permitido participar un año en esta y se puntúan las mismas pruebas.

### **1.4.3 Clase 1**

Esta es la categoría por excelencia dado que en ella participan los vehículos ya totalmente montados y preparados para correr en un circuito. Un mismo automóvil solo puede participar en ella durante los 12 meses siguientes, por lo que los equipos deben trabajar año tras año en la mejora y la innovación de los coches. El único componente que no está permitido reutilizar de antiguos monoplazas es el chasis.

Dentro de la clase 1 existe una categoría inferior denominada series 200 y la cual permite la participación de vehículos con hasta dos años de antigüedad.

En esta clase los equipos participan en absolutamente todas las pruebas, tanto estáticas como dinámicas, por lo que es importante haber aprovechado las clases 1 y 2 para mejorar lo máximo posible el vehículo y así poder ser competitivos.







**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**  
**SECCIÓN DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

---

**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN CHASIS TUBULAR  
PARA UN PROTOTIPO DE FÓRMULA STUDENT**

**ANEXO IV**  
**CATÁLOGOS Y OTROS**  
**DOCUMENTOS**

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Carlos Calvo Martín de Bernardo

Tutora

Viana Lida Guadalupe Suárez



# ÍNDICE

<b>1. CATÁLOGO DE PERFILES TUBULARES DE ACERO AL CARBONO TUBASOL .....</b>	<b>118</b>
<b>2. CATÁLOGO DE ELECTRODOS CONARCO PARA SOLDADURA DE ACEROS AL CARBONO.....</b>	<b>119</b>
<b>3. MANUAL DE POSIBLE CONTROLADOR PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO .....</b>	<b>120</b>



# 1. CATÁLOGO DE PERFILES TUBULARES DE ACERO AL CARBONO TUBASOL

**TUBOS SOLDADOS EN 10217-1 (DIN 2458/DIN 1626) Y TUBOS SIN SOLDADURA EN 10216-1 (DIN 2448/DIN 1629)  
Extremos lisos o ranurados. Material P235TR1 (St37.0)**

Utilización: Conducción agua, gas, vapor, sólidos - Construcción naval - Estructuras -Pilotaje - Postes, señalización - Chimeneas

Díametro exterior d mm	Espesor s mm	Peso Kg/m	Momento inercia I cm <sup>4</sup>	Módulo resistente W cm <sup>3</sup>	Radio de giro i cm	Díametro exterior d mm	Espesor s mm	Peso Kg/m	Momento inercia I cm <sup>4</sup>	Módulo resistente W cm <sup>3</sup>	Radio de giro i cm
17,2" (3,8")	1,8*	0,688	0,262	0,304	0,548	30	2	1,39	1,73	1,16	0,992
	2	0,754	0,281	0,326	0,542		2,3*	1,59	1,93	1,29	0,983
	2,3	0,850	0,306	0,356	0,533		2,6	1,77	2,12	1,41	0,973
	2,6	0,942	0,328	0,381	0,524		2,9	1,96	2,29	1,53	0,964
	2,9	1,03	0,347	0,403	0,516		3,2	2,14	2,45	1,64	0,954
	3,2	1,11	0,363	0,422	0,508		3,6	2,37	2,65	1,77	0,942
	3,6	1,21	0,381	0,442	0,497		4	2,59	2,83	1,88	0,930
	4	1,31	0,394	0,459	0,488		4,5	2,83	3,02	2,01	0,915
20	2*	0,890	0,464	0,464	0,640	5	3,08	3,19	2,13	0,901	
	2,3	1,01	0,509	0,509	0,631	5,4	3,28	3,31	2,21	0,890	
	2,6	1,12	0,550	0,550	0,622	5,6	3,37	3,36	2,24	0,885	
	2,9	1,22	0,586	0,586	0,613	6,3	3,70	3,53	2,35	0,867	
	3,2	1,33	0,617	0,617	0,605	7,1	4,03	3,67	2,45	0,848	
	3,6	1,46	0,654	0,654	0,594	33,7 (1")	1,8	1,43	2,30	1,37	1,13
	4	1,58	0,684	0,684	0,583		2	1,57	2,51	1,49	1,12
	4,5	1,71	0,714	0,714	0,571		2,3	1,79	2,81	1,67	1,11
1,8	0,874	0,529	0,496	0,692	2,6*		2,01	3,09	1,84	1,10	
2*	0,962	0,571	0,536	0,686	2,9		2,2	3,36	1,99	1,09	
2,3	1,09	0,629	0,590	0,677	3,2		2,42	3,60	2,14	1,08	
2,6	1,21	0,681	0,639	0,667	3,6		2,69	3,91	2,32	1,07	
2,9	1,33	0,727	0,683	0,659	4		2,95	4,19	2,49	1,06	
21,3 (1/2")	3,2	1,44	0,768	0,722	0,650	4,5	3,23	4,50	2,67	1,04	
	3,6	1,59	0,816	0,767	0,639	5	3,54	4,78	2,84	1,03	
	4	1,72	0,857	0,804	0,628	5,4	3,76	4,98	2,96	1,02	
	4,5	1,87	0,898	0,843	0,615	5,6	3,87	5,07	3,01	1,01	
	5	2,01	0,930	0,874	0,603	6,3	4,27	5,36	3,18	0,994	
	5,4	2,12	0,951	0,893	0,594	7,1	4,67	5,62	3,34	0,973	
	1,8	1,03	0,888	0,710	0,823	8	5,05	5,85	3,47	0,952	
	2*	1,13	0,963	0,770	0,816	38	2,3	2,04	4,13	2,17	1,26
2,3	1,29	1,07	0,854	0,807	2,6*		2,29	4,55	2,40	1,25	
2,6	1,44	1,16	0,930	0,797	2,9		2,53	4,96	2,61	1,25	
2,9	1,58	1,25	1,00	0,788	3,2		2,77	5,34	2,81	1,24	
3,2	1,72	1,33	1,06	0,779	3,6		3,08	5,82	3,06	1,22	
3,6	1,90	1,42	1,14	0,767	4		3,38	6,26	3,29	1,21	
4	2,07	1,51	1,21	0,756	4,5		3,71	6,76	3,56	1,20	
4,5	2,28	1,60	1,28	0,742	5		4,07	7,22	3,80	1,18	
25	5	2,47	1,67	1,34	0,729	5,4	4,34	7,55	3,97	1,17	
	5,4	2,61	1,72	1,37	0,719	5,6	4,47	7,70	4,05	1,16	
	5,6	2,68	1,74	1,39	0,714	5	4,67	7,92	4,17	1,15	
	1,8	1,12	1,12	0,835	0,890	6,3	4,95	8,19	4,31	1,14	
	2	1,24	1,22	0,907	0,883	7,1	5,43	8,66	4,56	1,12	
	2,3*	1,41	1,36	1,01	0,874	8	5,91	9,09	4,78	1,10	
	2,6	1,57	1,48	1,10	0,864	8,8	6,33	9,39	4,94	1,08	
	2,9	1,73	1,60	1,19	0,855	42,4 (1 1/4")	2	2,01	5,19	2,45	1,43
3,2	1,89	1,70	1,27	0,846	2,3		2,29	5,84	2,76	1,42	
3,6	2,09	1,83	1,36	0,834	2,6*		2,57	6,46	3,05	1,41	
4	2,28	1,94	1,45	0,822	2,9		2,84	7,06	3,33	1,40	
4,5	2,48	2,07	1,54	0,808	3,2		3,11	7,62	3,59	1,39	
5	2,70	2,17	1,61	0,794	3,6		3,47	8,33	3,83	1,38	
5,4	2,86	2,24	1,67	0,784	4		3,81	8,99	4,24	1,36	
5,6	2,94	2,27	1,69	0,779	4,5		4,19	9,76	4,60	1,35	
6,3	3,21	2,36	1,76	0,762	5	4,61	10,5	4,93	1,33		
					5,4	4,92	11,0	5,17	1,32		
					5,6	5,07	11,2	5,29	1,32		
					6,3	5,62	12,0	5,66	1,30		
					7,1	6,19	12,8	6,02	1,27		
					8	6,76	13,5	6,36	1,25		
					8,8	7,27	14,0	6,61	1,23		
					10	7,99	14,6	6,90	1,20		

\* Material en stock para tubos sin soldadura

## 2. CATÁLOGO DE ELECTRODOS CONARCO PARA SOLDADURA DE ACEROS AL CARBONO

NOMBRE Y CLASIFICACION	CARACTERISTICAS Y APLICACIONES	ANÁLISIS TÍPICO DE METAL DEPOSITADO	PROPIEDADES FÍSICAS DE METAL DEPOSITADO VALORES TÍPICOS	CARACT. OPERATIVAS	POSICION DE SOLDADURA
<b>➡ SOLDADURA DE ACEROS AL CARBONO Y DE BAJA ALEACION</b>					
<b>CONARCO 10</b> AWS A5.1 E6010 (celulósico)	Electrodo de buena penetración en toda posición para uso universal. Soldadura de cañerías (VD), cascos de barcos, chapa estructural de acero al carbono de baja y media resistencia, calderas, recipientes a presión, estructuras de puentes y edificios.	C: 0,13 % Mn: 0,50 % Si: 0,20 %	Rt> 530 N/mm <sup>2</sup> Lf> 460 N/mm <sup>2</sup> Al> 25 % ChV(-29°C)>40J	=(+)	
<b>CONARCO 11</b> AWS A5.1 E6011 (celulósico)	Apto para soldar en toda posición, incluso en VD, usando CA, indicado para la soldadura en tubos de acero, negros o galvanizados, con o sin costura, en calderas, condensadores, intercambiadores de calor y otros recipientes a presión.	C: 0,08 % Mn: 0,40 % Si: 0,15 %	Rt> 500 N/mm <sup>2</sup> Lf> 430 N/mm <sup>2</sup> Al> 22 % ChV(-29°C)>40J	=(+) para CA OCV> 60 V	
<b>CONARCO 10 A1</b> AWS A5.5 E7010-A1 (celulósico)	Buena penetración en toda posición, utilizado en las pasadas "calientes" en gasoductos y relleno del bisel para los grados API 5L X42 a 5L X60, soldadura de aceros al C-Mn-Mo. Construcciones metálicas, placas de fuego de calderas y piezas a alta temperatura.	C: 0,09 % Mn: 0,30 % Si: 0,16 % Mo: 0,50 %	Rt> 500 N/mm <sup>2</sup> Lf> 430 N/mm <sup>2</sup> Al> 22 % ChV(20°C)>70J	=(+)(-)	
<b>PIPEWELD 6010</b> AWS A5.1 E6010	Celulósico, pasada de raíz en todos los grados API 5L, VD CC (+).	C: 0,09 % Mn: 0,30 % Si: 0,10 %	Rt> 495 N/mm <sup>2</sup> Lf> 380 N/mm <sup>2</sup> Al> 26 % ChV(-29°C)>40J	=(+)	
<b>PIPEWELD 7010</b> AWS A5.5 E7010-G	Toda posición, API 5L X52, X56, en VD y SC, CC (+)	C: 0,10 % Mn: 0,40 % Si: 0,10 % Mo: 0,30 % Ni: 0,40 %	Rt> 550 N/mm <sup>2</sup> Lf> 460 N/mm <sup>2</sup> Al> 23 % ChV(-20°C)> 70J	=(+)	
<b>PIPEWELD 8010</b> AWS A5.5 E8010-G	Toda posición, API 5L-X60-X65-X70, pasada caliente y relleno / terminación. CC (+).	C: 0,07 % Mn: 0,60 % Si: 0,13 % Mo: 0,30 % Ni: 0,70 %	Rt> 650 N/mm <sup>2</sup> Lf> 570 N/mm <sup>2</sup> Al> 25 % ChV(-20°C)> 80J	=(+)	

## 3. MANUAL DE POSIBLE CONTROLADOR PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

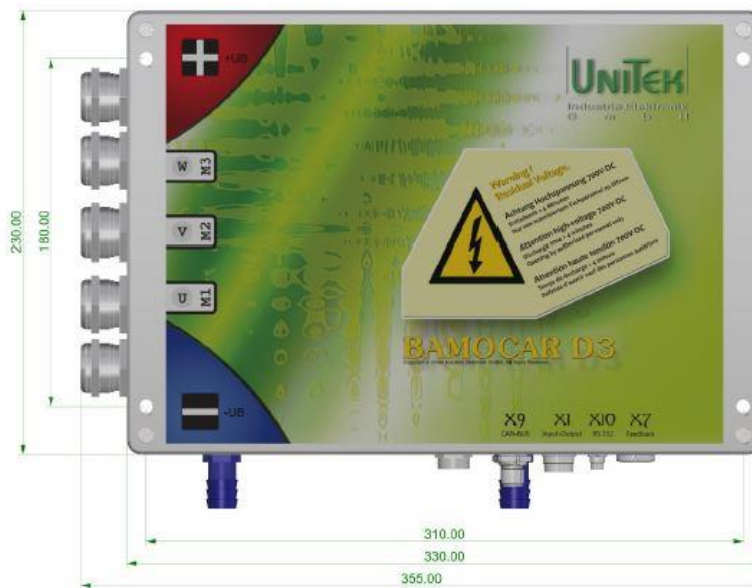
### Mechanical installation



Dimensions BAMOCAR

#### 3.2 Dimensions BAMOCAR

Standard version (connectors partly equipped)



#### Liquid cooling

Connection:  
 Hose connection: metal ¼-13  
 Input temperature: < 50 °C  
 Flow rate: max. 12l/min  
 Pressure: max. 1.3 bar

#### Power connection

PG-cable glands M25x1.5 with shield spring  
 Recommended cable gland  
 Lapp- SKINTOP- MS-x  
 Pflitsch- blueglobe TRI







**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**  
**SECCIÓN DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

---

# **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN CHASIS TUBULAR  
PARA UN PROTOTIPO DE FÓRMULA STUDENT**

## **PLANOS**

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Carlos Calvo Martín de Bernardo

Tutora

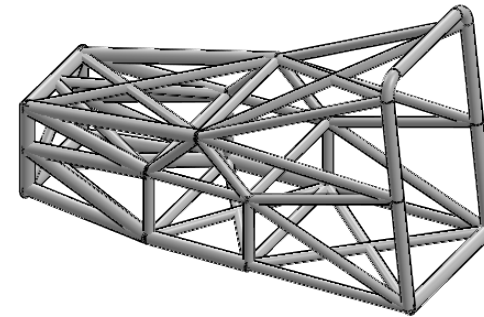
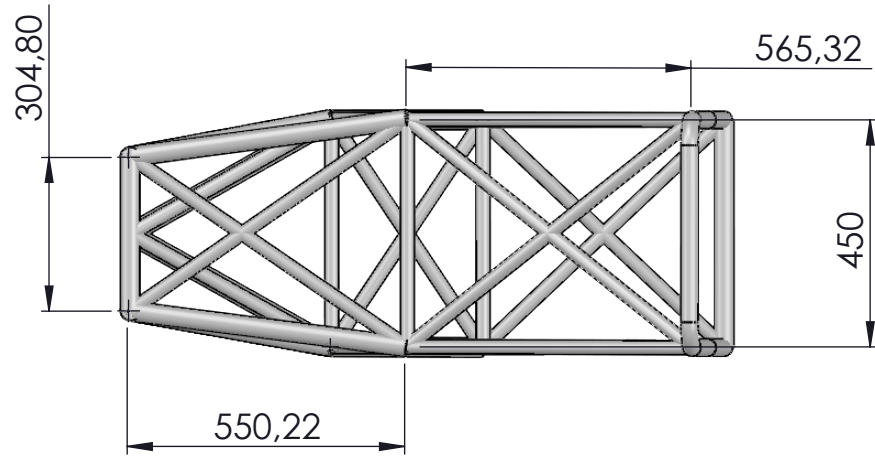
Viana Lida Guadalupe Suárez



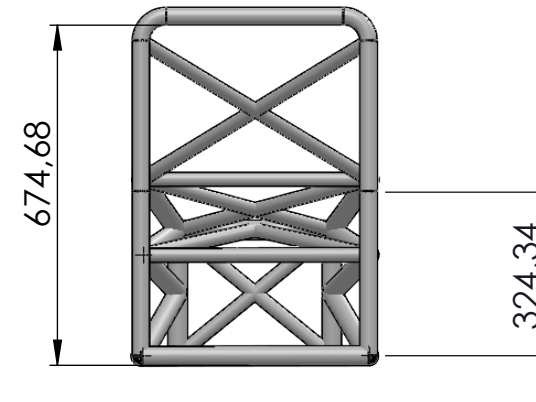
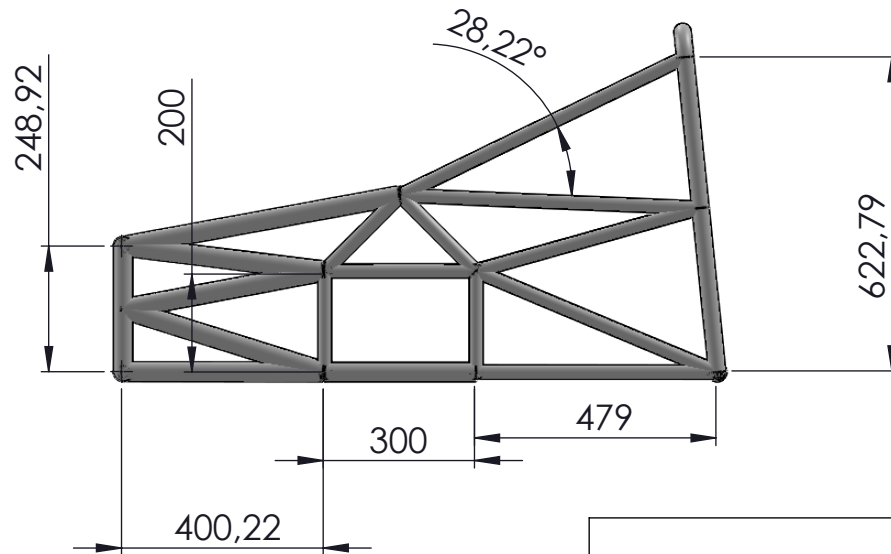
# ÍNDICE

<b>1. FRONTAL.....</b>	<b>126</b>
<b>2. COCKPIT.....</b>	<b>127</b>
<b>3. TRASERA.....</b>	<b>128</b>



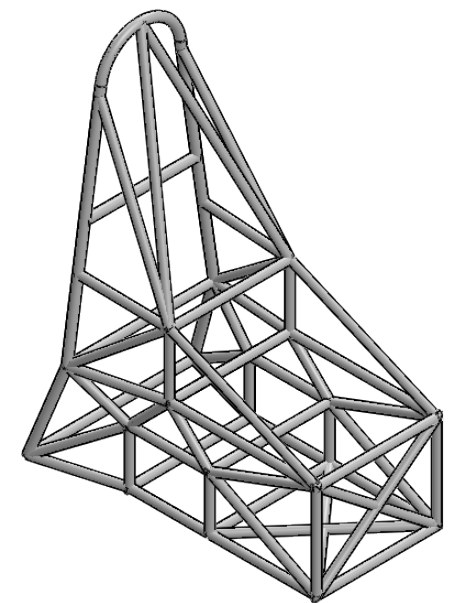
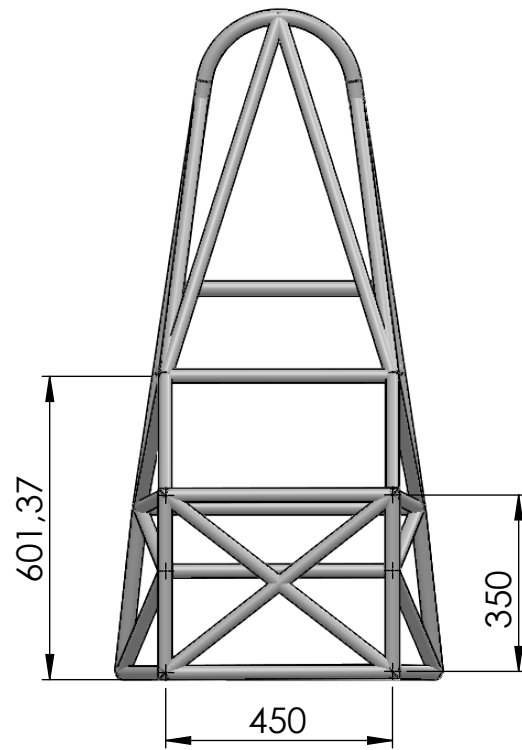
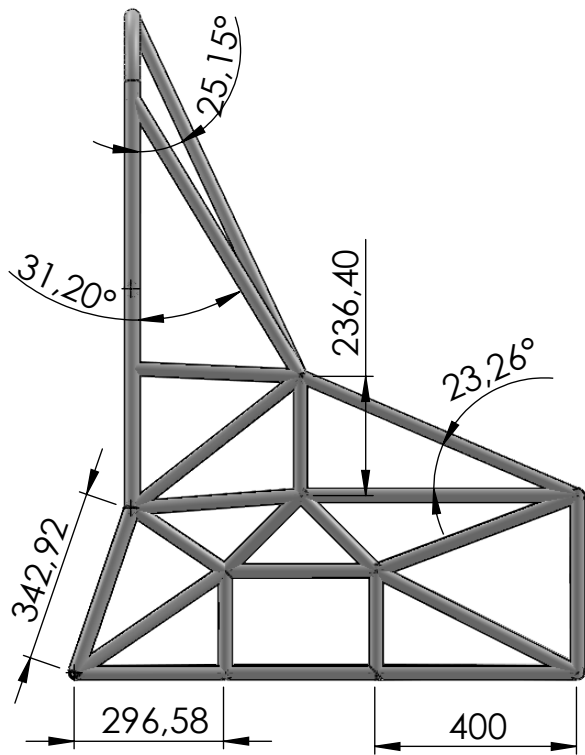


ESCALA  
1:20

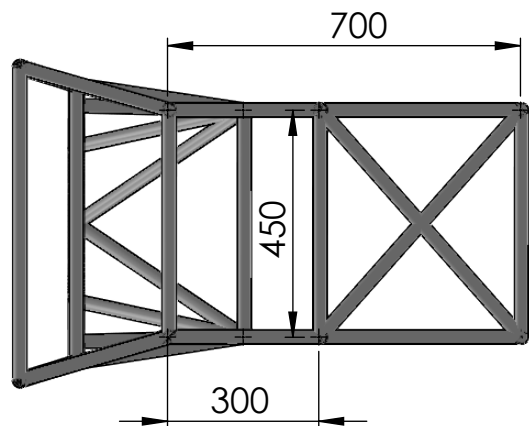


Medidas en milímetros

TFG				
01/09/2018	Autor	 <b>Universidad de La Laguna</b>	ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGIA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna	
Nombre	CARLOS			
Apellidos	CALVO MARTÍN DE BERNARDO			
Id. s. normas	UNE-EN-DIN			
ESCALA: 1:15	FRONTAL			Nº de Plano : 1

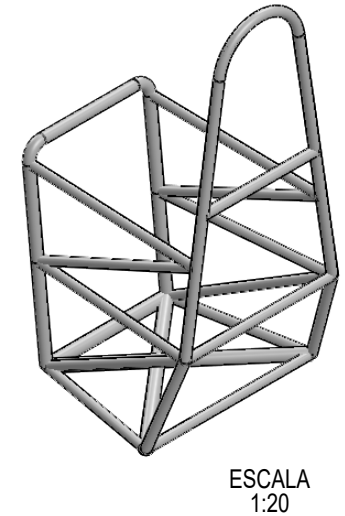
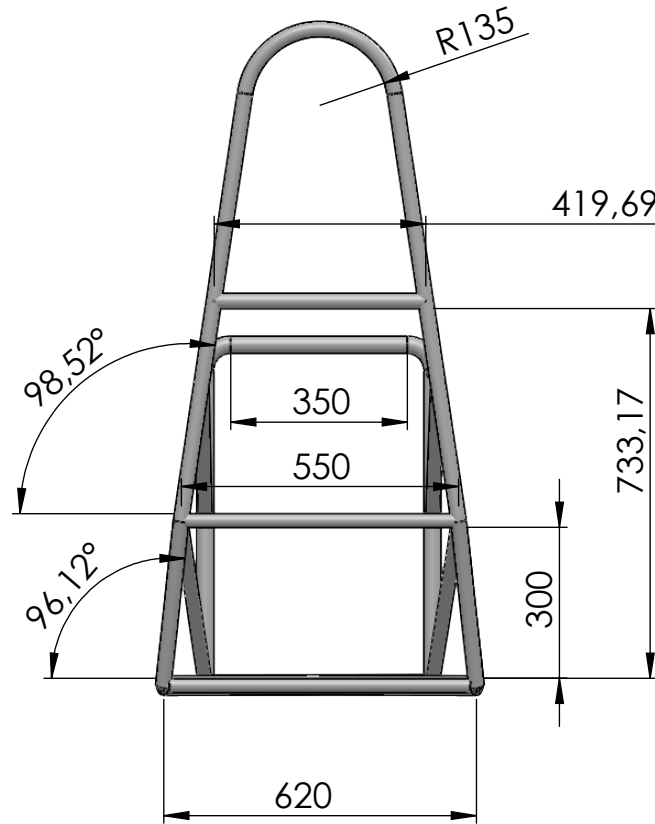
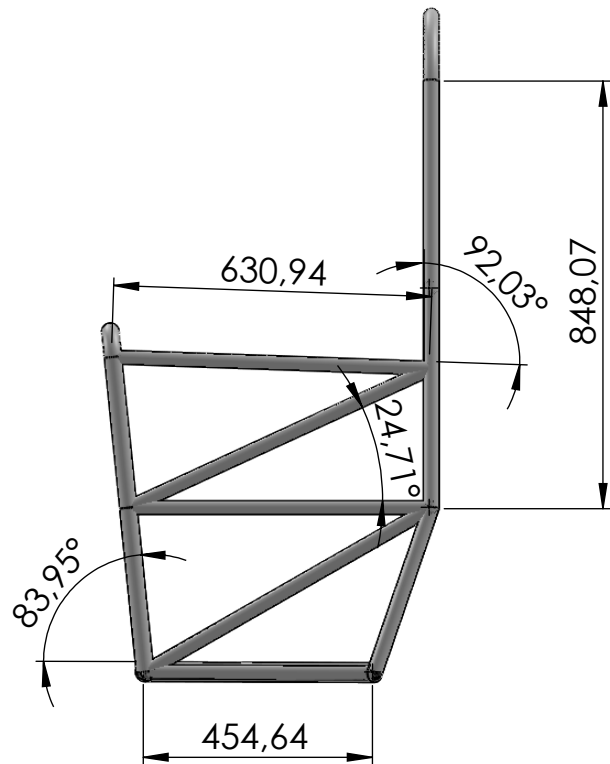


ESCALA  
1:20

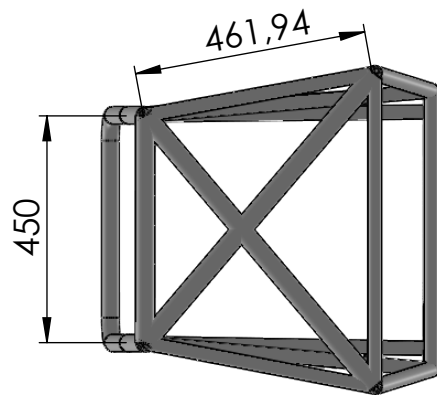


Medidas en milímetros

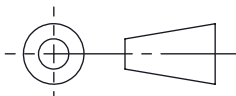
TFG				
01/09/2018	Autor	 <b>Universidad de La Laguna</b>	ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGIA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna	
Nombre	CARLOS			
Apellidos	CALVO MARTÍN DE BERNARDO			
Id. s. normas	UNE-EN-DIN			
ESCALA: 1:15	TRASERA			Nº de Plano : 3



ESCALA  
1:20



Medidas en milímetros

TFG				
01/09/2018	Autor	 <b>Universidad de La Laguna</b>	ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGIA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna	
Nombre	CARLOS			
Apellidos	CALVO MARTÍN DE BERNARDO			
Id. s. normas	UNE-EN-DIN			
ESCALA: 1:15	COCKPIT			Nº de Plano : 2