

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



"DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN CHASIS
TUBULAR PARA LA COMPETICIÓN
FORMULA STUDENT"

TRABAJO FIN DE GRADO

Diciembre -2024

AUTOR: Carlos Sánchez de la Nieta Gil

DIRECTOR/ES: David Abellán López

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO	17
1.1.	Introducción	18
1.2.	Objetivo	19
2.	COMPETICIÓN FORMULA STUDENT	21
2.1.	Origen	22
2.2.	Pruebas de la competición.....	25
2.2.1.	Pruebas Estáticas	29
2.2.1.1.	Business Plan Presentation (75 puntos)	29
2.2.1.2.	Cost and Manufacturing (100 puntos).....	29
2.2.1.3.	Engeneering Desing (150 puntos)	29
2.2.2.	Pruebas Dinámicas.....	30
2.2.2.1.	Skid Pad (75 puntos).....	30
2.2.2.2.	Acceleration (75 puntos).....	30
2.2.2.3.	Autocross (100 puntos).....	31
2.2.2.4.	Endurance (325 puntos).....	32
2.3.	Departamentos	33
3.	CHASIS	38
3.1.	Definición	39
3.2.	Tipos de chasis	42
3.2.1.	Chasis independiente	42
3.2.2.	Chasis autoportante o monocasco	44
3.2.3.	Chasis tubular	45
3.3.	Tipos de chasis Formula Student	46

3.3.1.	Partes del chasis tubular	47
3.3.1.1.	Estructura	48
3.3.1.2.	Atenuador de impactos	48
3.3.1.3.	Ergonomía	49
4.	NORMATIVA	53
4.1.	Partes del chasis.	54
4.2.	Requisitos Generales.....	55
4.3.	Sección y material de los tubos	57
4.4.	Requerimientos de aro principal y aro frontal.....	58
4.5.	Arriostramiento del aro principal y aro secundario	59
4.6.	Características de estructuras de impacto	61
4.7.	Cockpit.....	62
4.8.	Percentil 95.....	63
5.	DISEÑO	66
5.1.	Definiciones.....	67
5.1.1.	Rigidez a Flexión	67
5.1.2.	Rigidez a torsión.....	67
5.2.	Dimensionamiento del chasis	68
5.2.1.	Dimensiones de los tubos	69
5.2.1.1.	Sección mínima según normativa.....	69
5.2.2.	Elección del material.....	71
5.2.3.	Dimensionamiento modelo alámbrico	73
5.2.3.1.	Ergonomía del piloto	75
5.2.3.2.	Aro principal y frontal	77
5.2.3.3.	Arriostramiento aro frontal y principal.....	78
5.2.3.4.	Estructuras de impacto	80

5.3.	Estimación peso total	80
5.3.1.	Peso del chasis.....	81
5.3.2.	Motor	82
5.3.3.	Ruedas, neumáticos y suspensión.	82
5.3.4.	Piloto y equipación.....	83
5.3.5.	Resto de componentes.	83

6. ANÁLISIS 85

6.1.	Metodología.....	86
6.1.1.	Análisis de elementos finitos	86
6.1.1.1.	Discretización.....	86
6.1.1.2.	Formulación matemática	88
6.1.1.3.	Condiciones de contorno.	89
6.2.	Análisis.....	89
6.2.1.	Aplicación	89
6.3.	Tipos de análisis.....	91
6.3.1.	Ensayo del arco principal.....	91
6.3.2.	Ensayo del arco Frontal	93
6.3.3.	Análisis de impacto.....	96
6.3.3.1.	Impacto frontal.....	96
6.3.3.2.	Impacto lateral	98
6.3.3.3.	Impacto trasero	100
6.3.4.	Análisis a torsión	102
6.3.5.	Aceleración	105
6.3.6.	Frenada en curva	107

7. PRESUPUESTO 111

7.1.	Perfilería	112
------	------------------	-----

7.2.	Soldadura	112
7.2.1.	Material.....	112
7.2.2.	Mano de obra.....	113
ANEXO: PLANOS		116





Agradecimientos

Este trabajo fin de grado lo dedico principalmente a mis padres José Carlos y María Elisa, que me han apoyado incondicionalmente en los momentos más difíciles de todas las etapas de mi vida. Gracias a este apoyo he podido llegar a donde estoy y por ello tengo mi agradecimiento eterno hacia vosotros.

A la persona que me ha acompañado durante todo lo que llevo de vida, mi hermana Elisa, que me ha guiado con sus experiencias y aprendizajes a afrontar los nuevos desafíos que ha planteado la vida.

A toda mi familia, tanto a los que siguen con nosotros como a los que no, porque me han mostrado apoyo pese a que las circunstancias no fueran bien. Vosotros me habéis demostrado el valor tan importante que tiene la familia.

A mi abuela Lucía, que me ha visto crecer y ha podido ver la evolución de mi trayectoria profesional. Me alegro de que estés aquí conmigo apoyándome siempre y haber podido compartir este hito contigo.

A mi novia Jimena, con la que he podido compartir mi desarrollo como persona y que me ha servido como referente en todos los aspectos de mi vida. Gracias por todos los momentos buenos que he compartido contigo, por todo tu apoyo y por ayudarme a ser quien soy a día de hoy.

A mis amigos más cercanos, a los que considero parte de mi familia, por todos los buenos momentos que hemos pasado, por estar siempre a mi lado. Se que puedo contar con vosotros para cualquier cosa, y por ello me alegro de haberme cruzado con cada uno de vosotros.

Por último, dedicarlo a David Abellán por tutorizar este TFG haciendo un gran trabajo como profesional.

Índice de ilustraciones

- **Ilustración 1.** Monoplaza de Formula SAE de la University of Texas at Arlington, 1986.

https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%B3rmula_Student

- **Ilustración 2.** Año de inauguración de la competición en los distintos países.

<https://www.formulastudent.de/world/competitions/>

- **Ilustración 3.** Parrilla de la competición FSS 2024

<https://www.formulastudent.es/>

- **Ilustración 4.** Prueba realizada en la inspección técnica para verificar consistencia del vehículo.

<https://www.nhms.com/images/20220505-Selected-9955-lg.jpg>

- **Ilustración 5.** Desglose de las puntuaciones de las pruebas.
Elaboración propia.

- **Ilustración 6.** Geometría de un circuito de Skid Pad Formula Student.

<https://www.arusteam.com/formula-student>

- **Ilustración 7.** Prueba acceleration en una competición Formula Student.

https://ipparisracingteam.binets.fr/assets/img/Presentation_brochure.pdf

- **Ilustración 8.** Prueba de Autocross en una competición Formula Student.

<https://www.pmw-magazine.com/news/race-series-news/mclaren-to-support-formula-student-teams.html>

- **Ilustración 9. Prueba Endurance en FSG 2022.**

https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=h6EUF7LJP74&ab_channel=FormulaStudentTV

- **Ilustración 10.** Organigrama base de un equipo de Formula Student en la modalidad de Combustión.

Elaboración propia.

- **Ilustración 11.** Materiales usuales de los elementos más importantes de un chasis.

<https://buscadorde talleres.com/blog/por-que-al-tener-un-impacto-el-coche-se-deforma-mas-ahora/>

- **Ilustración 12.** Estudio experimental de choque frontal de un vehículo.

<https://www.nitro.pe/seguridad/seguridad-en-tu-vehiculo-que-es-la-carroceria-de-deformacion-programada.html>

- **Ilustración 13.** Conjunto de carrocería y chasis independiente

<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn69.html>

- **Ilustración 14.** Lancia Lambda (1923-1931)

https://es.wikipedia.org/wiki/Lancia_Lambda

- **Ilustración 15.** Chasis tubular para Lancia 037.

<https://www.kitsdefibra.com/carroceria-de-fibra-lancia-037-para-chasis-tubular.html>

- **Ilustración 16.** Chasis tubular para competición Formula Student.

<https://www.redalyc.org/journal/5055/505555586009/html/>

- **Ilustración 17.** Monocasco Mythen del equipo AMZ, Universidad de Zúrich.

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20274/4/UPS-CT009132.pdf>

- **Ilustración 18.** Chasis tubular.

Elaboración propia.

-Ilustración 19. Plano de un atenuador de impactos para FSAE.

<https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/note-attenuators-10072-0-218-r375-typical-r500-typical-120-2-0-140-3670-0-2012-standard-at-q99372589>

-Ilustración 20. Explosionado de un conjunto volante de fibra de carbono para FSAE.

- Ilustración 21. Pedalera de la Escuela Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa.

- Ilustración 22. Creación de un asiento con poliuretano bicomponente.

- Ilustración 23. Firewall de fibra de carbono con capa de aluminio en la parte posterior.

- Ilustración 24. Partes del chasis tubular según normativa.

<https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>

- Ilustración 25. Forma correcta de realizar triangulación en el chasis.

<https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>

- Ilustración 26. *Triangulación del Puente de Forth y la Torre Eiffage.*

-Ilustración 27. Secciones mínimas para los tubos del chasis.

<https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>

-Ilustración 28. Representación graficas de las cotas mínimas y máximas para los aros.

<https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>

-Ilustración 29. Requisitos para estructura de impacto lateral (vista lateral).

<https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>

-Ilustración 30. Requisitos para estructura de impacto lateral (vista frontal).

<https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>

-Ilustración 31. Plantilla de apertura mínima del cockpit (izquierda) y plantilla de la sección mínima interna (derecha).

<https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>

-Ilustración 32. Distancia mínima del casco con respecto al chasis.

<https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>

-Ilustración 33. Dimensiones del percentil 95 según normativa.

<https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>

-Ilustración 34. Dimensiones principales de un tubo.

<https://www.calculartodo.com/geometria/volumen-superficie-tubo.php>

-Ilustración 35. Estructura alámbrica del chasis.

Elaboración propia.

-Ilustración 36. Comprobación cotas casco-chasis.

Elaboración propia.

-Ilustración 37. Comprobación plantilla interior cockpit.

Elaboración propia.

-Ilustración 38. Comprobación plantilla apertura del cockpit.

Elaboración propia.

-Ilustración 39. Comprobación ángulo aro principal y frontal.

Elaboración propia.

-Ilustración 40. Comprobación ángulo estructura de apoyo posición de estas.

Elaboración propia.

-Ilustración 41. Comprobación cotas estructura de impacto lateral.

Elaboración propia.

-Ilustración 42. Diferenciación de secciones en función de colores para el chasis.

Elaboración propia.

-Ilustración 43. Modelo 3D del motor de una CBR 600 RR.

Elaboración propia.

-Ilustración 44. Diseño de suspensión para el equipo Illici Racing Team.

-Ilustración 45. Discretización de un elemento continuo mediante diferentes geometrías.

<https://femexpert.es/teoria-mef/>

-Ilustración 46. Elemento tipo viga.

<https://femexpert.es/teoria-mef/>

-Ilustración 47. Elemento tipo shell.

<https://femexpert.es/teoria-mef/>

-Ilustración 48. Elemento tipo solid.

<https://femexpert.es/teoria-mef/>

-Ilustración 49. Modelo final del chasis.

Elaboración propia.

-Ilustración 50. Definición de direcciones para fuerzas.

Elaboración propia.

-Ilustración 51. Deformación análisis del arco principal.

Elaboración propia.

-Ilustración 52. Tensión análisis arco principal.

Elaboración propia.

-Ilustración 53. Deformación análisis arco frontal.

Elaboración propia.

-Ilustración 54. Tensión análisis arco frontal.

Elaboración propia.

-Ilustración 55. Deformación análisis impacto frontal.

Elaboración propia.

-Ilustración 56. Tensión análisis impacto frontal.

Elaboración propia.

-Ilustración 57. Deformación análisis impacto lateral.

Elaboración propia.

-Ilustración 58. Tensión análisis impacto lateral.

Elaboración propia.

-Ilustración 59. Deformación análisis impacto trasero.

Elaboración propia.

-Ilustración 60. Tensión análisis impacto trasero

Elaboración propia.

-Ilustración 61. Deformación en la dirección vertical análisis torsión.

Elaboración propia.

-Ilustración 62. Tensión análisis torsión.

Elaboración propia.

-Ilustración 63. Deformación análisis de aceleración.

Elaboración propia.

-Ilustración 64. Tensión análisis de aceleración.

Elaboración propia.

-Ilustración 65. Deformación análisis frenada en curva.

Elaboración propia.

-Ilustración 66. Tensión análisis frenada en curva.

Elaboración propia.



Índice de tablas

- **Tabla 1.** Peso en la puntuación total de cada prueba.

Elaboración propia.

-**Tabla 2.** Porcentaje de cada componente en el material según el grado.

Elaboración propia.

-**Tabla 3.** Propiedades mecánicas de material según el grado.

Elaboración propia.

-**Tabla 4.** Leyenda colores de tubos de la ilustración 42.

Elaboración propia.

-**Tabla 5.** Estimación de peso desglosado del vehículo.

Elaboración propia.

-**Tabla 6.** Condiciones de carga análisis de torsión

Elaboración propia.

-**Tabla 7.** Condición de carga análisis de aceleración.

Elaboración propia.

-**Tabla 8.** Condición de carga análisis de frenada en curva.

Elaboración propia.

-**Tabla 9.** Presupuesto de perfilería.

Elaboración propia.

-**Tabla 10.** Presupuesto consumible soldadura.

Elaboración propia.

-Tabla 11. Presupuesto mano de obra soldadura.
Elaboración propia.



1

**INTRODUCCIÓN Y
OBJETIVO**

1.1. Introducción

Este año 2024 hemos fundado un equipo de Formula Student en la Universidad Miguel Hernandez de Elche (UMH). Este proyecto se ha creado con dos principales objetivos: en primer lugar, crear un entorno de aprendizaje donde las futuras generaciones puedan poner en práctica todos los conocimientos que han ido aprendiendo durante su periodo en la universidad; en segundo lugar, se busca poder demostrar su valía con un proyecto real y en una competición donde estudiantes de todas las universidades pongan a prueba sus aptitudes y las apliquen a una situación práctica como es crear un coche de competición.

Para conseguir dichos objetivos, empezamos con un proceso de recopilación de información durante los primeros meses en los que conseguimos establecer las bases del equipo: el enfoque futuro del equipo, tipología de monoplace que se quiere desarrollar, estructura departamental y financiación necesaria. Para todo ello hemos dado a conocer esta propuesta tanto a la universidad como a diferentes entornos relacionados con este mundo para conseguir los apoyos necesarios para su creación. Además, hemos hecho captaciones para poder contar con más personal, ya que la creación del monoplace requiere de una gran carga de trabajo. Normalmente un equipo suele tener asignadas de 30 a 50 personas en cada vehículo que se desarrolla. En un principio contamos únicamente con 10 personas, pero en la actualidad disponemos de aproximadamente 40, lo que nos ha permitido distribuir el personal en los correspondientes departamentos.

Con este documento se pretende proporcionar información base para la creación de las futuras versiones del chasis de este equipo. A su vez, servirá como fuente de información para formar a los integrantes del departamento de chasis tanto de esta universidad como de cualquier otra del mundo. Este proyecto se centra en la creación de un monoplace de competición, por lo que está enfocado a estudiantes de ingeniería, pero

puesto que también se centra en aspectos económicos, de marketing y de organización, entre otros, se pretende generar un entorno de aprendizaje interdisciplinar. Por ello, un amplio abanico de estudiantes de diversos campos puede poner en práctica los conceptos aprendidos sin centrarse únicamente en la ingeniería.

1.2. Objetivo

El objetivo principal de este trabajo fin de grado es diseñar un chasis tubular para un monoplaza, el cual participará en la competición Formula Student. Este se creará en base a requisitos que determina la normativa vigente y las necesidades del chasis. Estas son medidas para garantizar la seguridad del piloto en pista. El fin fundamental de este diseño y análisis es crear un chasis que sea capaz de resistir con una buena dinámica vehicular todas las pruebas que se realizan en la competición, las cuales se describirán a continuación.

Tras cumplir con todo lo descrito en la normativa, los objetivos principales son:

- Hacer un chasis lo más ligero posible optimizando las secciones y eliminando aquellas que no se requieran por normativa y no aporten prestaciones al chasis.
- Adquirir una rigidez torsional lo más cercana a los 3000 Nm/° posible ya que es la que poseen los equipos más competitivos de la competición y determina el comportamiento del vehículo.
- Adaptar las secciones de los tubos según las necesidades de cada parte del monoplaza sin sacrificar los mínimos descritos por normativa.

- Conseguir una buena relación resistencia-peso y garantizar tanto la seguridad del piloto como la seguridad de todos los componentes del resto de sistemas que están involucrados en la creación del monoplaza de competición.
- Reducir lo máximo posible el presupuesto del chasis.

Además de todo ello, se pretende hacer una geometría coherente y que permita una fabricación en la que se tendrá que elegir un material adecuado que permita la soldadura.

Este documento también busca claridad y coherencia para así servir de guía a las distintas generaciones de este equipo.



2

**COMPETICIÓN
FORMULA STUDENT**

2.1. Origen

Formula Student (en adelante FS) o Formula SAE es la competición educativa de ingeniería más consolidada en Europa que fue organizada por primera vez por un docente de la Universidad de Houston. Esta fue celebrada en la Universidad de Texas en Austin, 1981 donde participaron 6 equipos formados por unos 40 alumnos. Desde entonces, es una de las competiciones más reconocidas en las universidades del mundo del motor [1].



Ilustración 1. Monoplaza de Formula SAE de la University of Texas at Arlington, 1986.

Actualmente se celebran competiciones en numerosos países de todo el mundo, entre ellos España (FSS) que, desde el año 2010, cuenta con su propia competición promovida por la STA (Sociedad de Técnicos de Automoción). En la ilustración 2, se puede observar cómo se han ido abriendo las puertas de esta competición en los distintos países del mundo:

country	competition	since
 United States	Formula SAE® Michigan	1981
 United Kingdom	Formula Student United Kingdom	1998
 Australia	Formula SAE® Australasia	2000
 Japan	Student Formula Japan	2003
 Thailand	TSAE Student Formula	2004
 Brazil	Fórmula SAE® Brasil	2005
 Italy	Formula SAE® Italy	2005
 Germany	Formula Student Germany	2006
 Austria	Formula Student Austria	2009
 China	Formula Student China	2011
 South Korea	KSAE Formula	2012
 Spain	Formula Student Spain	2012
 Czech Republic	Formula Student Czech Republic	2013
 Hungary	Formula Student East	2016
 Croatia	Formula Student Alpe Adria	2017
 India	Formula Bharat - India	2017
 Netherlands	Formula Student Netherlands	2017
 Russia	Formula Student Russia	2019
 Switzerland	Formula Student Switzerland	2020
 Poland	Formula Student Poland	2023
 Portugal	Formula Student Portugal	2023
 Romania	Formula Student Romania	2023
 France	Formula Student France	2024
 Romania	Formula Student Balkans	2024

Ilustración 2. Año de inauguración de la competición en los distintos países.

El fin de esta competición desde su raíz es poder ofrecer una plataforma en la que los futuros ingenieros puedan aplicar y demostrar las habilidades técnicas que han ido aprendiendo durante toda su carrera mediante el diseño construcción y conducción de vehículos de competición. Además, a lo largo de todas sus ediciones, se ha consolidado como punto de encuentro esencial para el talento emergente correspondiente al sector de la ingeniería automotriz, atrayendo hasta 120 equipos y más de 2000 estudiantes.[2]



Ilustración 3. Parrilla de la competición FSS 2024

Esta es una experiencia real y muy cercana al mundo laboral a la que se pueden enfrentar los estudiantes durante su paso por la universidad ya que, en un plazo inferior a 12 meses, cada equipo de FS debe gestionarse, buscar personal, conseguir financiación, gestionar relaciones con sponsors y proveedores además de diseñar, fabricar y ensamblar un prototipo para poder competir con él. Por ello, no solo acoge carreras técnicas como ingeniería sino también carreras de la rama de Economía, Publicidad y Periodismo las cuales pueden aplicar sus conocimientos en la rama “Estática del equipo”.

Los alumnos del departamento estático deben crear un plan de negocios atractivo para posibles inversores que será juzgado durante la competición. En él se razonan todos los costes del coche, explicando materiales y procesos de fabricación empleados, premiando a aquellos que demuestren ser los más innovadores y eficientes. Es necesario justificar cada uno de los aspectos del diseño del coche, exponiendo su finalidad y motivación. De no ser justificados, serán excluidos de obtener puntuación. Además, los alumnos también se encargarán de la

financiación, consiguiendo relaciones con sponsors y formando acuerdos con empresas.

Este punto es un pilar esencial ya que es lo que alimenta el funcionamiento del equipo y te abre puertas a otras competiciones según el presupuesto.

2.2. Pruebas de la competición

Como ya he comentado, esta competición no solo consiste en diseñar un monoplaza que cumpla con la normativa del país, sino que deberá superar una serie de pruebas tanto para probar su durabilidad, resistencia, optimización y funcionamiento en pista, como para concluir que todos sus sistemas han sido previamente estudiados y tienen un fin en el comportamiento del vehículo.

Estas pruebas se dividen en dinámicas y estáticas. En las dinámicas, se evalúa el comportamiento del vehículo completando diferentes circuitos con sus propios objetivos, mientras que en las estáticas el equipo tiene que defender de manera argumentada el diseño del monoplaza ante unos jueces que han sido elegidos por su experiencia en el mundo del motor.

Cada prueba es evaluada y tiene una puntuación llegando hasta un máximo de 1000 puntos para la modalidad de combustión. En la siguiente tabla se muestra la puntuación de cada una de ellas:

Pruebas Estáticas	
Business Plan Presentation	7,5%
Cost and Manufacturing	10%
Engeneering Desing	15%
Pruebas Dinámicas	
Skid Pad	7,5%
Acceleration	7,5%
Autocross	10%
Endurance	32,5%
Efficency	10%

Tabla 1. Peso en la puntuación total de cada prueba.

En la Tabla 1, se puede ver que la prueba que más pesa de todas es la de Endurance, la cual a su vez va asociada con la prueba de Efficency por lo que ambas suman un total de 325 puntos. En caso de conseguir pasar satisfactoriamente esta prueba, el equipo conseguiría puntuar un 42,5 % del total. Esto refleja que es la prueba más difícil pero también la más esencial y donde los equipos deben centrar mucho esfuerzo para poder conseguir una buena puntuación global en la competición.[3]

Antes de hacer las pruebas en pista, los equipos deben realizar unas pruebas para asistir a dicha competición, las cuales son diferentes en cada país. En estas, se reúne todo el equipo combinando todos sus conocimientos para poder resolver todas las preguntas. Es una prueba de acceso a la competición por lo que no computará ningún punto válido para la clasificación.

Una vez pasan estas pruebas y llegan a la competición, proceden al registro físico tanto del equipo como del piloto que participará en las pruebas dinámicas organizado por la competición, por lo que ya serán aptos para participar en dicho país.

Todos los años los organizadores de la competición crean un documento llamado Handbook, el cual explica detalladamente todas las etapas que tendrá el encuentro detallando horarios y lugares para poder guiar a los participantes.

Posterior al registro, los equipos se instalarán en el recinto de la competición poniendo sus herramientas y monoplaza en el lugar designado por la competición. Tras tener todo preparado, se procede a realizar las comprobaciones por los “Scrutis”, que son los técnicos responsables de comprobar que todas las partes del coche cumplen con lo descrito en la normativa vigente de la competición. Para ello se dividen en áreas siendo cada una para un departamento en específico. Estas comprobaciones son muy importantes para asegurar que todos los equipos estén en las mismas condiciones para enfrentarse a las pruebas dinámicas. Si algún equipo no cumple alguna de estas deberá modificar esa parte en su espacio asignado y volver más tarde.



Ilustración 4. Prueba realizada en la inspección técnica para verificar integridad del vehículo.

Una vez haya cumplido con todos los requisitos dispuestos en la normativa, el monoplaza podrá empezar a realizar las pruebas dinámicas.

Normalmente, la organización suele habilitar un espacio en el cual los participantes podrán comprobar la dinámica de su vehículo y así poder hacer modificaciones en consecuencia para obtener los mejores resultados en las distintas pruebas.

Por otro lado, también disponen del denominado “Welding area”, la cual es la única zona donde se podrá hacer el corte de piezas, soldaduras y demás operaciones que generen calor ya que esto puede ser peligroso. Si algún miembro de un equipo realiza alguna de estas operaciones fuera del sitio asignado, el equipo entero será sancionado y, dependiendo de la acción, se acumulará dando lugar a la expulsión inmediata si la organización del evento lo ve conveniente. Esto es tan estricto porque no solo conlleva a un riesgo del propio equipo, sino también al resto de concursantes de la competición.

A continuación, se procederá a explicar qué se hace en cada una de las pruebas y cuál es la puntuación correspondiente a cada una de ellas.



Figura 6. Desglose de las puntuaciones de las pruebas.

2.2.1. Pruebas Estáticas

Estas se dividen en tres: Business Plan Presentation, Cost and Manufacturing y Engineering Desing, acumulando un total de 325 puntos.

2.2.1.1. Business Plan Presentation (75 puntos)

Se evalúa la habilidad de desarrollar un caso de negocio que cumpla con las demandas buscadas y justificar que este proyecto económicamente generará beneficios lo cual será analizado por altos ejecutivos de empresas cuyo trabajo se centra en este ámbito.

2.2.1.2. Cost and Manufacturing (100 puntos)

En este se justificará todos los costes asociados al monoplaza adjuntando los planos de cada uno de los elementos expuesto ante unos jueces los cuales analizarán el trabajo realizado.

2.2.1.3. Engeneering Desing (150 puntos)

Aquí se explica cómo se ha aplicado la ingeniería al monoplaza para conseguir los objetivos de diseño y es donde se justifican todos los elementos del vehículo.

2.2.2. Pruebas Dinámicas

2.2.2.1. Skid Pad (75 puntos)

El fin de esta prueba es poder medir el agarre lateral del vehículo con radio de curva constante y en una superficie lisa. Para ello se disponen conos formando una silueta que se asemeja a la del número ocho manteniendo el mismo radio en los dos círculos. En esta prueba se realiza una vuelta y también se puntúa en función del tiempo y se penaliza en función del número de conos derribados durante este tiempo.



Ilustración 6. Geometría de un circuito de Skid Pad Formula Student.

2.2.2.2. Acceleration (75 puntos)

Esta es una prueba en la que se mide la aceleración en una recta de 75 metros en la que los monoplazas muestran la potencia que son capaces de desarrollar. Los técnicos de pista dan la salida al piloto y el tiempo se mide mediante unos sensores láser ubicados al principio y al final del tramo. Cabe mencionar que cada monoplaza competirá en tiempo con los de su categoría (Por ejemplo: Combustión).



Ilustración 7. Prueba acceleration en una competición Formula Student.

2.2.2.3. Autocross (100 puntos)

Como se ha mencionado anteriormente, esta es la que más peso tiene de todas. En esta, se quiere evaluar el comportamiento dinámico del vehículo en su conjunto en la que el piloto deberá demostrar, en un sprint de una vuelta, la optimización de su vehículo.

Previa a la prueba, ciertas personas de cada equipo podrán pasear por el circuito para poder ver las curvas y así plantear una estrategia para los pilotos. Los dos pilotos tendrán dos oportunidades cada uno para hacer una vuelta en este circuito, cuya forma es definida por la organización del país en el que se compite (distancia no mayor a 1,5 km).

Tras la realización de estas cuatro vueltas se escogerá el mejor tiempo para puntuar y servirá para determinar la posición de salida en la siguiente prueba (Endurance). Este circuito es ajustado por lo que el piloto deberá combinar la aceleración, el frenado y el paso por curva de la manera más eficiente para conseguir el mejor tiempo posible.



Ilustración 8. Pueba de Autocross en una competición Formula Student.

2.2.2.4. **Endurance (325 puntos)**

Esta es la prueba de resistencia en la que cada equipo demostrará tanto la durabilidad, como la eficiencia de su coche en un recorrido de 22 kilómetros en un circuito similar al de Auto Cross.

Cada piloto recorrerá la mitad de la distancia total y tendrán que hacer una parada obligatoria en boxes para el cambio de piloto en la mitad del trayecto. En esta parada, el motor del vehículo deberá detenerse y arrancar por sus propios medios y no están permitidos ni repostajes ni reparaciones. El vehículo debe continuar en las mismas condiciones en las que ha parado.

Cada monoplaza sale con respecto al siguiente con una cierta distancia y, si debido a que la velocidad del piloto que va delante es considerablemente menor, el equipo de staff sacará bandera para que se sitúe en el carril de adelantamiento permitiendo que el que va detrás pueda adelantar. Esta medida se toma para conseguir una carrera fluida

y evitar que un piloto no saque su máximo rendimiento debido al resto de equipos.

Si algún automóvil se quedara tirado en medio de la pista, se alertará al resto de pilotos mediante banderas amarillas para que se reduzca la velocidad o en caso extremo parar el coche para evitar así un accidente en cadena. Mientras está la bandera activa, el equipo de Staff se encargará de guiar al piloto mediante instrucciones para solucionar el problema. Este equipo de Staff no podrá en ningún momento tocar el monoplaza por normativa ya que el vehículo debe ser autosuficiente.



Ilustración 9. Prueba de Endurance en FSG 2022.

2.3. Departamentos

Las estructuras de los equipos pueden ser muy diversas y dependerán de cada equipo. Sin embargo, al tratarse del mismo objetivo para todos los equipos, la estructura base es la misma solo que cambiando nombres o dividiendo departamentos debido a una alta carga de trabajo. Este factor también dependerá tanto de la cantidad de personas que se vean implicadas en el equipo, como de la cantidad de

monoplazas que el equipo tenga como objetivo construir. Un mismo equipo podrá tener hasta 3 vehículos para competición, uno por categoría (combustión, eléctrico y driverless). Esto suele darse en equipos veteranos que poseen buenos patrocinios ya que cada coche requiere de un presupuesto considerable. En este documento se muestra la estructura seguida por el equipo, la cual es la estructura típica de equipo con un vehículo de combustión. Todos los equipos con este enfoque de competición cumplen con una estructura básica que consta de:

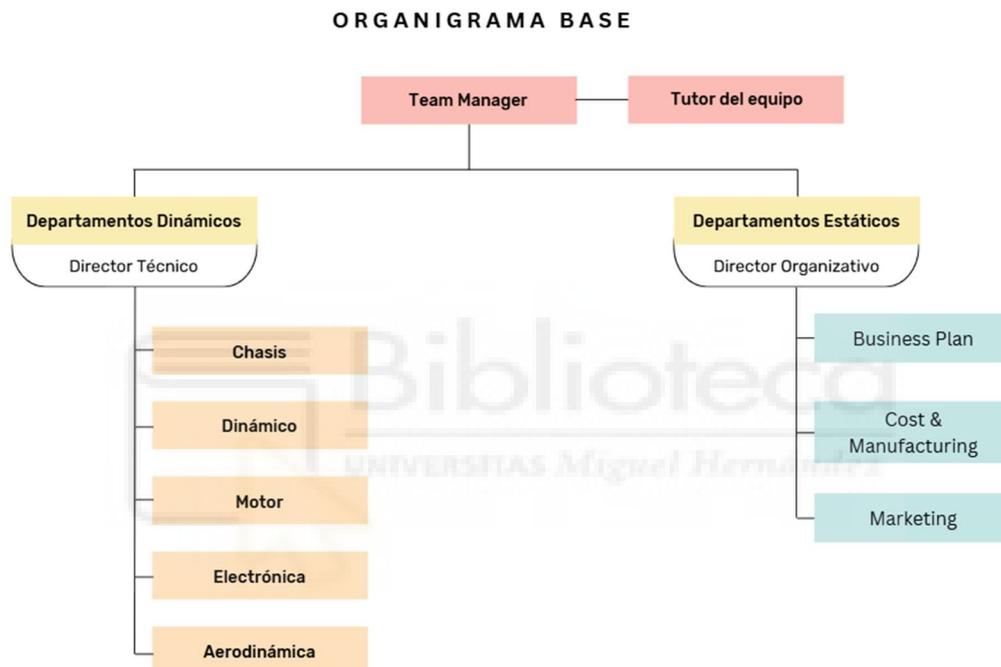


Ilustración 10. Organigrama base de un equipo de Formula Student en la modalidad de Combustión.

Team Manager: Es el estudiante encargado de representar al equipo en las competiciones. Se encarga de coordinar todas las partes del equipo para que funcionen en armonía entre sí y de fomentar una buena comunicación interdepartamental evitando retrabajos y aumentando el espíritu del equipo.[4]

Tutor del equipo: Esta es una parte fundamental del equipo ya que se

trata de una persona que normalmente trabaja dentro de la universidad y es el encargado de gestionar toda la parte administrativa. Además, es el representante del equipo de cara a patrocinadores y la universidad (la cara visible de la organización).

Después de estos puestos nos encontramos con dos ramas dentro del organigrama. Por un lado, la “Rama Estática” y por otro, la “Rama Dinámica”.

Departamentos Dinámicos: Estos en conjunto son los encargados de realizar el diseño, fabricación y ensamblaje del monoplaza, lo cual constituye un trabajo imprescindible dentro del equipo.

Director Técnico: Este rol es el encargado de coordinar a los departamentos dinámicos y hacer de nexo entre ellos. Este es un trabajo importante para evitar hacer versiones que puedan ser desechadas en un futuro por el cambio de diseño. Este perfil en la mayoría de los casos es un estudiante de ingeniería que tenga conocimientos previos sobre automoción ya que debe saber acerca de todos los departamentos para ser crítico tanto con el diseño como con la fabricación.

-Departamento de Chasis: Este departamento tiene como fin conseguir fabricar un chasis que sea ligero, resistente y seguro para el piloto. Este será el punto de inicio para el desarrollo del resto de departamentos que conforman el equipo. El chasis deberá cumplir con los requerimientos de rigidez y peso además de optimizar el espacio donde se introducirán los elementos de los otros sistemas (motor, suspensión, electrónica, etc.). En este se realizan análisis de elementos finitos simulando condiciones desfavorables como son los impactos, torsión, frenada y frenada en curva, entre otros.

-Departamento Dinámico: En este departamento se incluyen los subsistemas de dirección, sistema de frenado y suspensión. Su objetivo

será, como su nombre indica, conseguir un buen comportamiento dinámico en pista del monoplaza para afrontar de forma óptima curvas, estabilidad en frenada y agilidad en maniobras. Para conseguir esto se trabaja en el diseño de la geometría de la suspensión, la calibración del sistema de frenado y el diseño de la dirección para conseguir buena adherencia y estabilidad.

-Departamento de Motor: Su objetivo es diseñar y analizar o adaptar todos los elementos relacionados con la transmisión, el sistema de refrigeración, sistema de admisión y mapas de motor. La programación de la ECU es importante para optimizar el rendimiento según las diferentes condiciones de la pista y las pruebas dinámicas de Formula Student.

-Departamento de Electrónica: Se centra en la implementación de sistemas electrónicos para el control y monitoreo de los sistemas del monoplaza. En este se incluye el diseño de la centralita electrónica (ECU), los sistemas de adquisición de datos (DAQ) que sirven para evaluar rendimientos en tiempo real y diseño de instrumentación y sensores para extraer datos de las condiciones del coche.

-Departamento de Aerodinámica: Su fin es dotar al coche de un buen comportamiento aerodinámico mediante el diseño y análisis de alerones, difusores y carenados reduciendo así la resistencia con el aire y aumentando la carga aerodinámica. Para ello se utilizan programas de simulación dinámica de fluidos (CFD) para analizar el flujo del aire y ajustar los componentes, lo cual es clave para el rendimiento en curvas y la estabilidad cuando el vehículo adquiera altas velocidades.

Departamentos Estáticos: Estos son los encargados de realizar las labores relacionadas con marketing, redes sociales, plan de negocio, sponsors y organización de eventos entre otros. Las funciones de estos departamentos van a depender del enfoque que tome la directiva acerca

de modos de financiación, publicidad y peso que tomarán las redes sociales. Una estructura base de estos departamentos es:

Director Organizativo: Al igual que el Director Técnico, es el encargado de coordinar y dirigir todos los departamentos referidos a lo anteriormente comentado.

-Departamento de Business Plan: Los integrantes de este equipo se encargan de plantear la estructura global de la “empresa”. Menciono empresa ya que cumple con todos los elementos que debe tener una empresa sin ánimo de lucro en lo referido a la organización. El equipo debe tener una misión, una visión y un objetivo general y estratégico para tener claro las decisiones que se tomarán en base a todo esto mencionado.

-Departamento de Cost & Manufacturing: Este tendrá como objetivo principal documentar todos los costes de los elementos del vehículo y elaborar todos los planos correspondientes a estos. Es una tarea que se desarrollará en conjunto con los departamentos dinámicos ya que serán la fuente de información de este departamento. Por ello es recomendable que en cada departamento dinámico haya un encargado de proporcionar esta información para agilizar el flujo de información y así evitar errores.

-Departamento de Marketing: Llevará el trabajo relacionado con el contacto con sponsors para obtener información y se encargará de establecer y llevar a cabo los beneficios que estos obtendrán al financiar el equipo. Además, se apoyarán en las redes sociales, que serán una herramienta esencial para dar publicidad a las empresas implicadas con el equipo.

3

CHASIS



3.1. Definición

El chasis es uno de los sistemas más importantes en cualquier vehículo ya que es la base o “esqueleto” donde se ensamblan el resto de los sistemas del vehículo. El resto de los componentes que constituyen un coche (motor, transmisión, suspensión, sistema de frenos y sistema de refrigeración), están montadas y fijadas en esta base. Este tendrá que ser capaz de soportar todo el peso del vehículo lo que incluye el transporte de los pasajeros y el resto de los componentes los cuales inducen unas fuerzas al conducir, ya sea por aceleración, frenado o por la aceleración provocada al tomar una curva. Resumiendo, el chasis es lo que da forma y soporte al vehículo siendo esencial para la seguridad y estabilidad del automóvil.[5]

“El diseño no es solo cómo se ve y se siente, sino cómo funciona.”
– Steve Jobs.



Ilustración 11. Materiales usuales de los elementos más importantes de un chasis

El chasis debe cumplir ciertos estándares:

- Sus materiales deben tener la capacidad de trabajar en la zona elástica sin llegar a la plástica para evitar deformaciones permanentes durante el uso en circulación del vehículo.
- Debe tener resistencia y ser capaz de soportar los esfuerzos que se plantean durante la conducción.
- Además de resistente, deberá de ser optimizado en cuanto a geometría y materiales en función del fin que va a tener el chasis para disminuir el consumo y conseguir una mayor potencia.
- Tener la capacidad de absorber y distribuir las fuerzas al absorber los impactos y las vibraciones producidas por el contacto con el suelo (baches o terreno irregular).
- Proteger elementos críticos del resto de sistemas que componen el vehículo para aumentar la fiabilidad y durabilidad.

Una de las funciones más importantes que se requiere de un chasis es la seguridad de los pasajeros. Para ello se definen los perfiles y materiales en función de la ubicación consiguiendo una deformación programada en la zona de impacto, liberando así energía y reduciendo lo máximo posible la que llega al habitáculo de los pasajeros. Como podemos observar en la ilustración 11, las zonas propensas a colisión poseen materiales “blandos” como pueden ser el aluminio o magnesio para que mediante la deformación absorban la mayor cantidad de energía posible. Estas partes son las denominadas zonas de deformación programada o “crumple zones” y son:

- Frontal del chasis.
- Zonas laterales: estructura que rodea las puertas.
- Parte trasera del chasis.



Ilustración 12. Estudio experimental de choque frontal de un vehículo.

Como podemos ver en la ilustración 12, tras el diseño se realizan una serie de ensayos donde se simulan escenarios para probar el chasis en caso de colisión. Estos escenarios son: impacto frontal, impacto lateral e impacto trasero.

En coches de competición, esta estructura es completamente diferente ya que normalmente se hace con materiales con muy buena relación resistencia/peso como pueden ser la resina epoxy reforzada con fibra de carbono (la más común y costosa) o la reforzada con fibra de vidrio (coste menor). Para la parte del habitáculo donde irá posicionado el piloto se diseñan las llamadas “jaulas de seguridad” las cuales suelen ser estructuras tubulares aportando seguridad al conductor y evitando la deformación del techo en caso de vuelco.

Entre los fenómenos más significativos en el análisis de un chasis está la torsión la cual se produce cuando son aplicadas fuerzas que generan un momento alrededor del eje longitudinal del vehículo. Esto es causado por la distribución desigual de las fuerzas aplicadas, lo que provoca que el chasis se deforme, especialmente durante situaciones como pueden ser tomar curvas a alta velocidad o en eventos post-colisión. Trabajar con un chasis de alta torsión sacrifica el comportamiento del vehículo, por lo que este factor debe estudiarse en profundidad.

3.2. Tipos de chasis

3.2.1. Chasis independiente

Este es de los tipos más antiguos de la industria automotriz ya que el diseño proviene de los carruajes tirados por caballos. Este se popularizó rápidamente convirtiéndose en estándar a finales del siglo XIX y fue promovido por fabricantes como Ford y General Motors en el siglo XX. Pese a que en la época del 1930 empezaron a surgir más opciones, el chasis independiente se mantuvo hasta la actualidad en camiones, todoterrenos, transporte militar y en general, en vehículos de carga, debido a su alta resistencia y durabilidad.

Su estructura se basa en dos partes: un marco sólido y robusto el cual es montado, y el bastidor sobre el que se monta el chasis. Ambos funcionan como elementos separados.



Ilustración 13. Conjunto de carrocería y chasis independiente.

Entre sus características positivas podemos diferenciar:

- **Resistencia y durabilidad:** Su estructura es capaz de soportar cargas pesadas, impactos y condiciones extremas.
- **Fácil reparación y modificación:** Debido a que la carrocería y el bastidor están separados.
- **Menor transmisión de vibraciones:** Esta es una estructura estable que permite adaptarse a las irregularidades del terreno.

Y las desventajas:

- **Peso elevado:** Puesto que se trata de una estructura robusta aumenta el peso y por lo tanto el consumo del vehículo.
- **Alto costo de fabricación:** Por los materiales empleados y el proceso de ensamblaje.

- **Limitación en el espacio interior:** La estructura en sí ocupa espacio extra por lo que la capacidad interior es reducida.

3.2.2. Chasis autoportante o monocasco

El monocasco fue desarrollado a partir de 1920 y no fue hasta el 1922 cuando Lancia introdujo el primer automóvil monocasco llamado Lancia Lambda. Sin embargo, su uso masivo no llegó hasta después de la Segunda Guerra Mundial, en la época de los años 60 cuando se convirtió en el estándar de vehículos de pasajeros por sus ventajas [6].



Ilustración 14. Lancia Lambda (1923-1931)

Hoy en día es uno de los chasis más utilizados el cual está formado únicamente por una pieza la cual combina tanto la carrocería como el bastidor. Los materiales de este pueden variar en función de su uso, para coches cotidianos se suelen utilizar acero de alta o baja resistencia dependiendo de la ubicación en el vehículo consiguiendo el fenómeno anteriormente definido llamado deformación programada. Para coches de competición, puesto que tienen un mayor presupuesto y se centran en la optimización de los materiales y del peso, se utiliza fibra de carbono o

kevlar lo cual proporciona una muy buena resistencia sin sacrificar el peso.

Entre sus ventajas podemos destacar:

- **Peso bajo:** con esto conseguimos un menor consumo de combustible.
- **Mayor seguridad:** Debido a la deformación programada de ciertas zonas se consigue absorber los impactos y proteger a los pasajeros.
- **Mejor aprovechamiento del espacio interior.**

Como desventajas posee:

- **Menor resistencia:** No es tan robusto como el chasis independiente.
- **Dificultad en reparación:** Puede requerir el remplazo completo.
- **Dificultad en modificaciones.**

3.2.3. Chasis tubular

Este tipo de chasis es el que más se asemeja a la definición de chasis como “esqueleto” ya que está formado por tubos huecos los cuales se sueldan entre sí para dar forma al chasis. La distribución de este debe soportar todas las cargas a las que se someterá el vehículo en su uso además de contener la suficiente rigidez para proteger al piloto en caso de accidente. Este tipo de chasis surgió en la década de 1930 para competiciones automovilísticas por su buena relación rigidez peso.

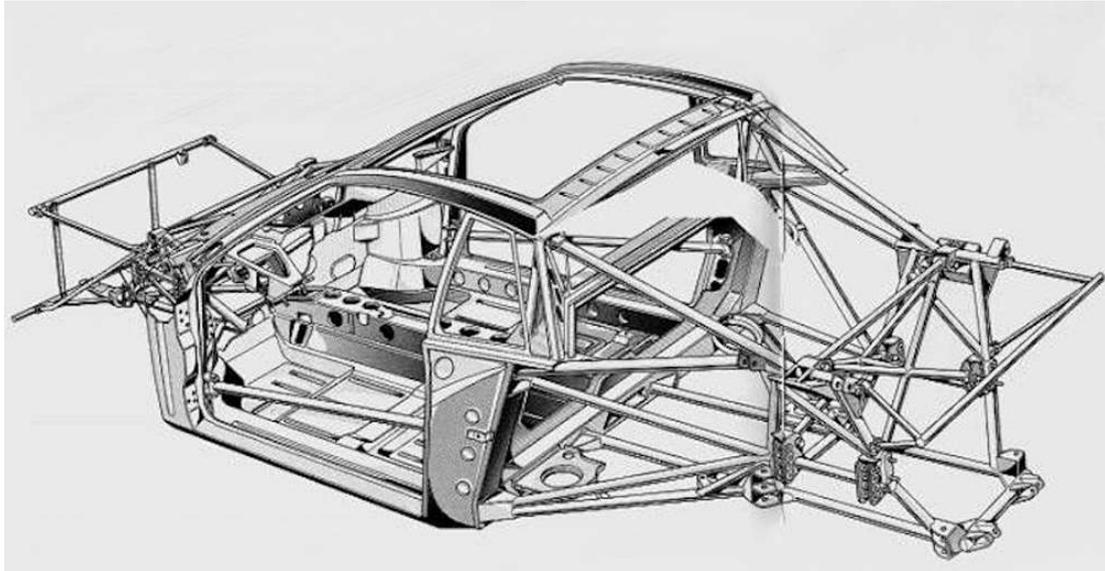


Ilustración 15. Chasis tubular para Lancia 037.

Además, es muy útil para hacer prototipos debido a que el diseño de tubos permite hacer estructuras específicas según las necesidades de este. Por otro lado, si necesita cambios durante el desarrollo es relativamente sencillo de modificar y ajustar las secciones. Permite también hacer estructuras de cualquier forma tridimensional permitiendo libertad creativa en prototipos experimentales.

3.3. Tipos de chasis Formula Student

Dentro de esta competición los chasis más usuales son de tipo monocasco y tubular. La elección del tipo dependerá tanto de la experiencia del equipo como del presupuesto que destinarán a la construcción de este. Para los equipos que están empezando en este mundo se recomienda empezar con un chasis tubular debido a su facilidad de diseño y modificación.

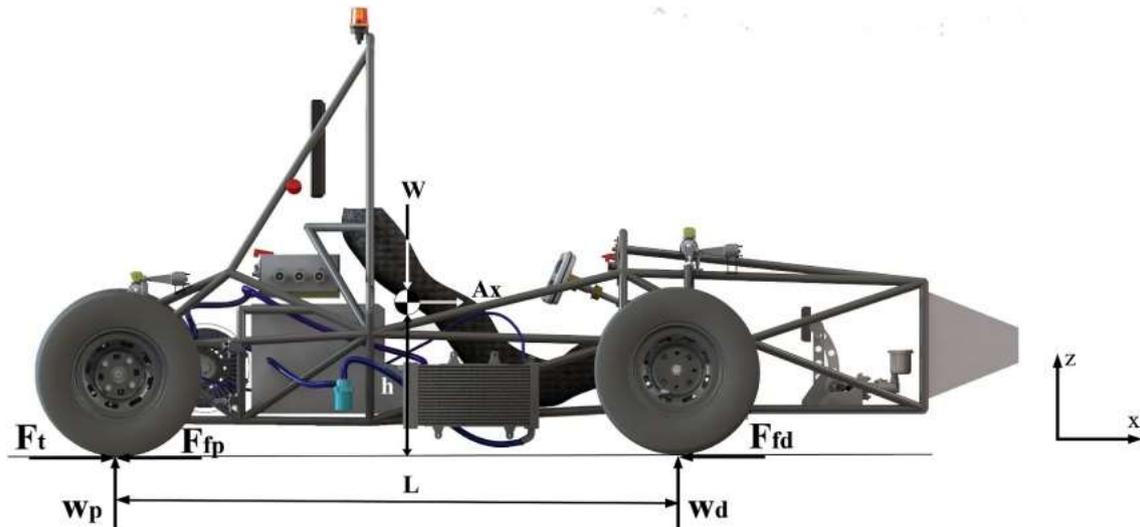


Ilustración 16. Chasis tubular para la competición Formula Student.

Sin embargo, para equipos ya experimentados en este terreno la mejor opción es monocasco ya que ofrece un peso reducido y alta resistencia en comparación con el tubular al estar hecho de resina epoxy reforzada con fibra de carbono o kevlar.

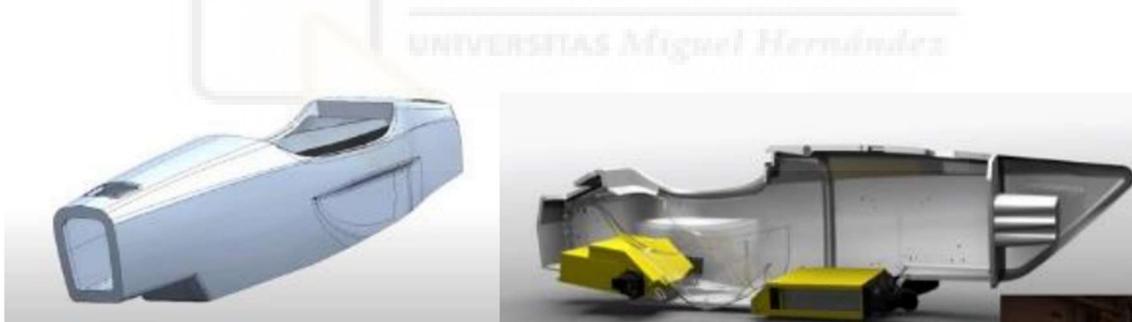


Ilustración 17. Monocasco Mythen del equipo AMZ, Universidad de Zúrich.

3.3.1. Partes del chasis tubular

Puesto que en el presente documento se diseña y analiza un chasis tubular para la competición Formula Student se procederá a explicar cuáles son los subsistemas que corresponden a este.

El conjunto chasis se divide en: Atenuador de impactos, Estructura tubular, Ergonomía y Cockpit.

3.3.1.1. Estructura

Esta parte se refiere a la estructura tubular o “esqueleto” la cual se describe en este documento y es la parte fundamental del diseño ya que actúa como base para el resto de los subsistemas del departamento. Proporciona el soporte al resto de los componentes del vehículo y es el encargado de proteger tanto al piloto como a los componentes. La integridad del vehículo depende fundamentalmente de este por lo que debe ser diseñado y estudiado en profundidad.

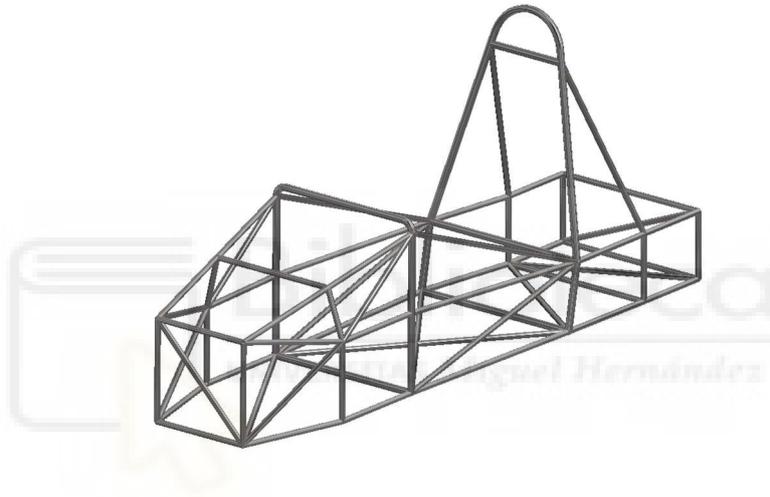


Ilustración 18. Chasis tubular.

3.3.1.2. Atenuador de impactos

Este es una estructura necesaria en todos los chasis de Formula Student la cual posee una deformación programada y sirve para absorber energía en caso de impacto frontal.

Esta estructura según normativa deberá cumplir una serie de requisitos físicos para poder ser utilizado en competición. Normalmente los equipos suelen comprar esta pieza a una empresa especializada la

cual ha hecho un estudio y cumple con la normativa vigente de Formula Student. Sin embargo, algunos equipos hacen el diseño y análisis de esta.

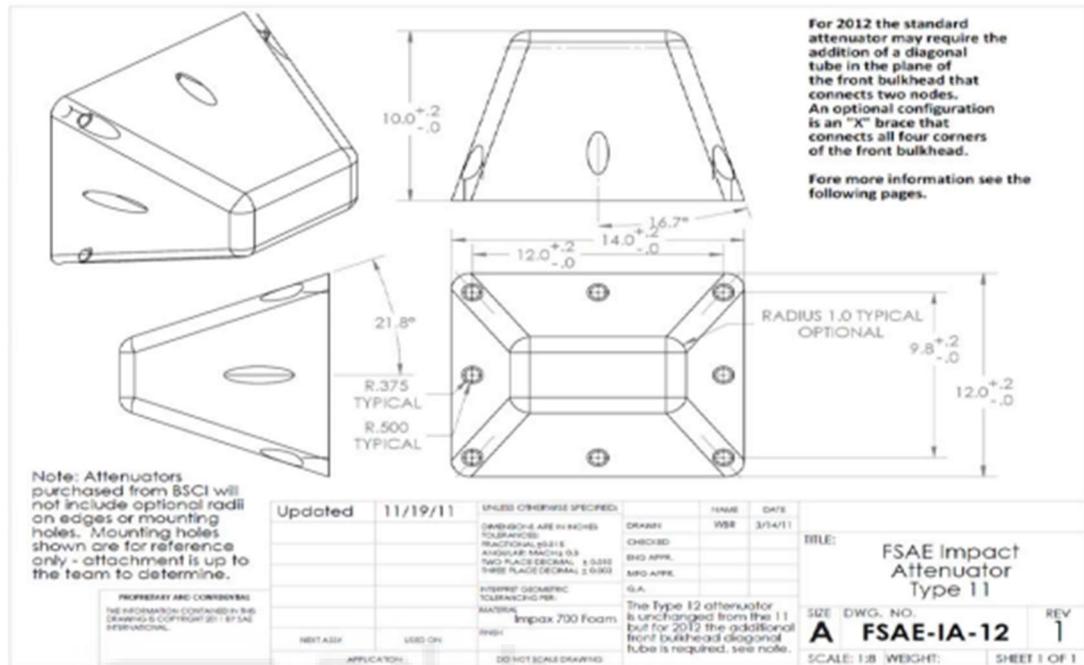


Ilustración 19. Plano de un atenuador de impactos para FSAE

3.3.1.3. Ergonomía

La ergonomía del chasis se refiere a los componentes principales del chasis que interactúan directamente con el piloto. Estos son:

Volante

Es el punto principal de control del vehículo y debe ser diseñado para proporcionar un control preciso del monoplaza. Debe llevar integrado botones o interruptores que permitan al piloto gestionar funciones adicionales como ajustar el mapa motor, ajustar el balance de freno, hablar por radio con el equipo técnico, ajustar la posición de los alerones o encender diferentes sistemas secundarios, entre otros.

Un aspecto muy importante que debe de incorporar el volante es la desconexión rápida, o comúnmente llamado "Quick-release" el cual se

encarga de unir el volante con la columna de dirección. Este sistema, como su nombre indica, permite la rápida desconexión del volante en caso de emergencia.

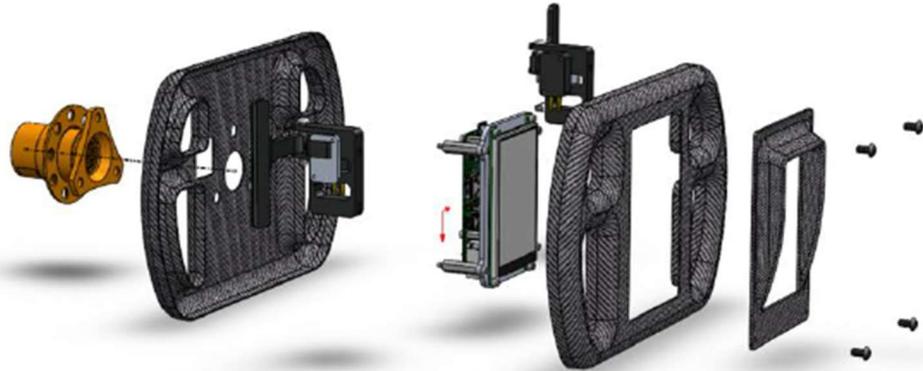
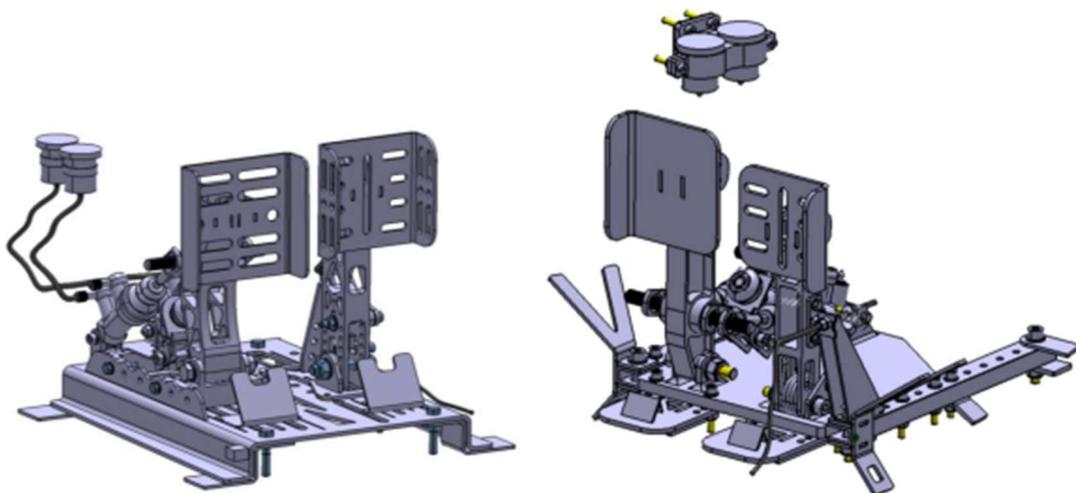


Ilustración 20. Explosión de un conjunto volante de fibra de carbono para FSAE.

Pedalera

Este es el subsistema de chasis que se encarga de hacer posible la conexión de mando entre el piloto y los sistemas de frenado y motor. Posee dos pedales, uno para el sistema de frenada y el otro para el sistema de admisión ya que el cambio de marchas se hace mediante levas en el volante. Es un sistema muy importante ya que permite al piloto controlar el vehículo en pista.



Asiento

El asiento no tiene un diseño y análisis previo, sino que se modela creando un prototipo físico. Esto se hace para asegurarse de que ese asiento se ciñe perfectamente a las dimensiones de cada piloto, por ello se construye una estructura la cual simula el espacio del “cockpit”. Para crear el asiento se acomoda una bolsa grande de plástico sobre la estructura y se rellena de poliuretano bicomponente. Este, cuando es aplicado, se expande, adaptándose a la superficie del piloto. Con esto se consigue una muy buena adaptación al conductor. Económicamente, esto tiene un coste bajo por lo que presenta una solución idónea.



Ilustración 22. Creación de un asiento con poliuretano bicomponente.

Firewall

Este componente es el encargado de proteger al piloto de las altas temperaturas que puede alcanzar el motor. Puesto que el motor se sitúa en la parte trasera del vehículo, esta protección se deberá situar en la parte posterior del respaldo del asiento. Suele estar fabricado con aluminio reforzado con kevlar o resina epoxy reforzada con fibra de carbono en la parte interior, y presenta protección térmica sin sacrificar el peso del vehículo.



Ilustración 23. Firewall de fibra de carbono con capa de aluminio en la parte posterior.



4

NORMATIVA

UNIVERSITAS Miguel Hernández

4.1. Partes del chasis.

La norma establece las partes en las que se divide el chasis según las propiedades que tiene. Las partes son:

- Aro principal (main hoop).
- Aro frontal (front hoop).
- Abrazaderas y soportes de los aros (roll hoop braces and supports).
- Estructuras de impacto.
- Atenuador de impacto frontal (front bulkhead).
- Sistema de soporte atenuador de impacto frontal (front bulkhead support system).
- El resto de las barras que componen el chasis.

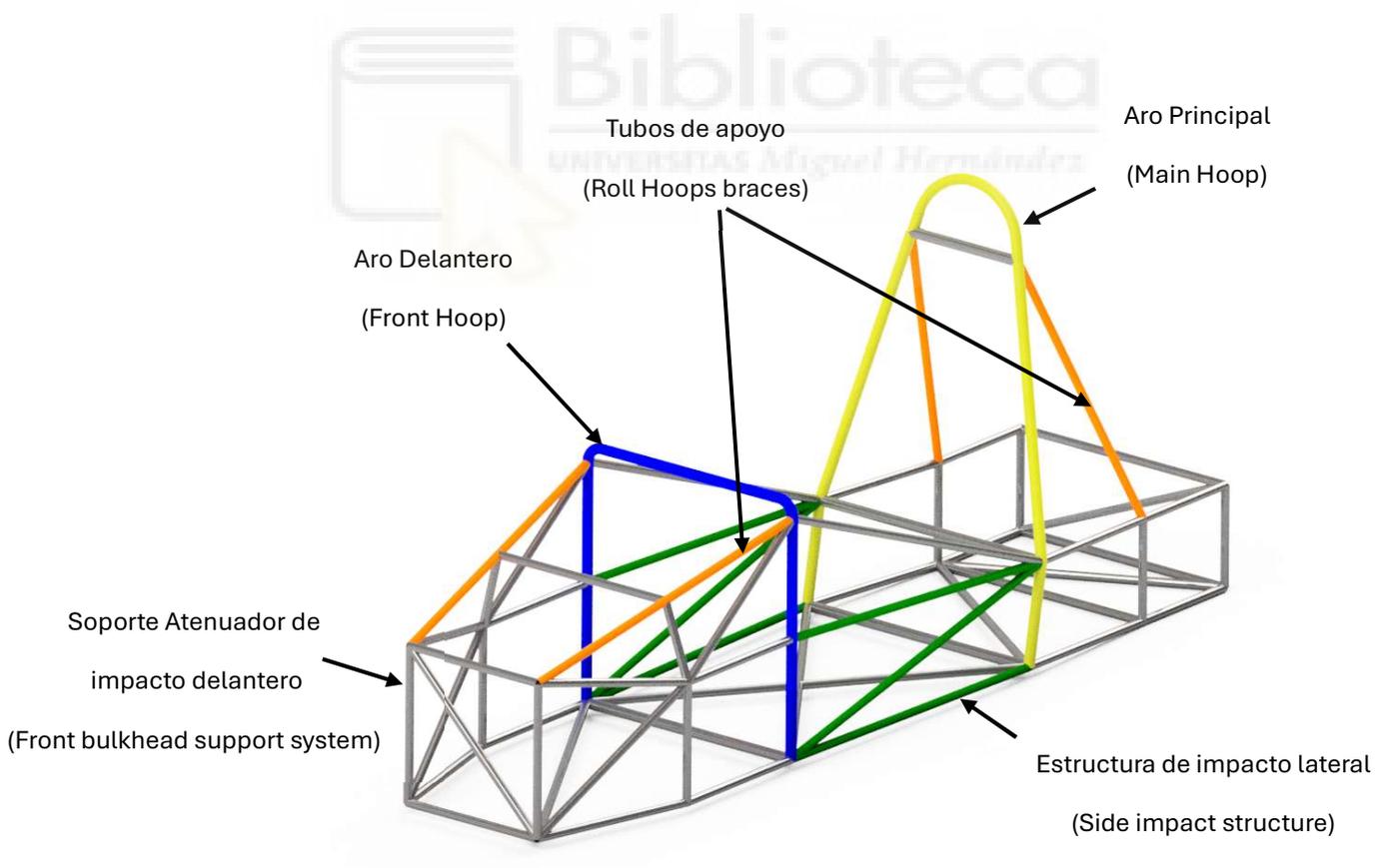


Ilustración 24. Partes del chasis tubular según normativa.

4.2. Requisitos Generales

Esta información ha sido extraída a través de la web de la organización de la competición. Cada país tiene su normativa propia, sin embargo, suelen recomendar guiarse por la de FSG (Alemania) ya que es la más estricta. Por ello en este documento se hará el diseño y análisis basándose en la de la temporada 2024-2025, la cual está redactada en inglés [6].

A continuación, se expondrán todos los artículos de la normativa que afectan a la creación de un chasis tubular:

- La distancia mínima entre ejes o batalla será de 1525 mm (es la distancia comprendida desde el centro de contacto de la rueda delantera con el suelo al centro del contacto de la rueda trasera con el suelo).
- El ancho de vía (distancia entre ruedas del mismo eje) del vehículo más pequeña no ha de ser en ningún caso inferior al 75% del ancho de vía mayor.
- La distancia mínima entre cualquier parte del vehículo, que no sean los neumáticos, incluido el conductor, deberá de ser de 30 mm. En caso de instalar un sistema de suspensión activa, la distancia se mide en la posición ajustable más baja.
- El cockpit del vehículo deberá ser abierto y contendrá un asiento único. El monoplaza tendrá cuatro ruedas las cuales no podrán estar alineadas.

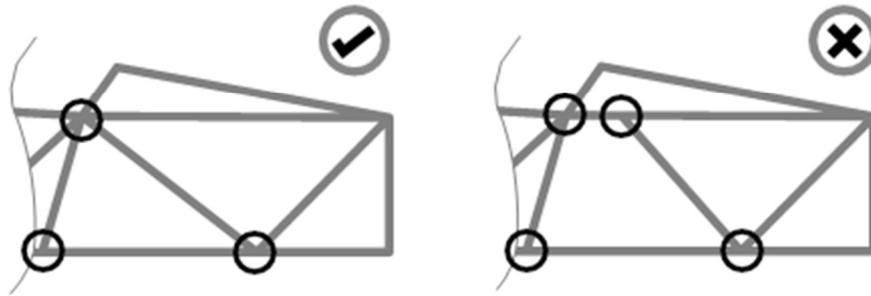


Ilustración 25. Forma correcta de realizar triangulación en el chasis.

La disposición de las uniones entre tubos deberá ser mediante triangulación nodo-nodo como se puede ver en la ilustración 25.

Este diseño es utilizado tanto en ingeniería como en arquitectura ya que el triángulo es la forma geométrica que mayor rigidez aporta en la unión de elementos tipo viga. Varios ejemplos claros de esto son la Torre Eiffel, diseñada por los ingenieros Maurice Koechlin y Émile Nougier en el siglo XIX, o el puente de Forth, diseñado por John Fowler y Benjamin Baker, donde la estructura reticular aporta una gran rigidez.

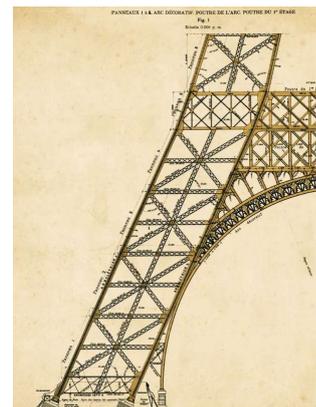


Ilustración 26. Triangulación del Puente de Forth y la Torre Eiffel.

4.3. Sección y material de los tubos

T3.2.1 Define las secciones mínimas que se podrán tener en las distintas partes del monoplaza.

Item or application	Minimum wall thickness	Minimum cross sectional area	Minimum area moment of inertia
Main and front hoops, shoulder harness mounting bar	2.0 mm	173 mm ²	11 320 mm ⁴
Impact structures, front bulkhead, roll hoop bracing, driver's restraint harness attachment (except as noted above)	1.2 mm	119 mm ²	8509 mm ⁴
Front bulkhead support, main hoop bracing supports	1.2 mm	91 mm ²	6695 mm ⁴

Ilustración 27. Secciones mínimas para los tubos del chasis.

T.3.2.2 Los tubos de acero deben fabricarse con acero al carbono sin alear con un contenido máximo de 0,3% de carbono, 1,7% de manganeso y 0,6% de cualquier otro elemento. Todos los demás tipos de acero se consideran materiales alternativos y requieren ensayos y documentación adicionales.

T3.2.5 Cualquier tubo con un espesor de pared inferior a 1,2 mm o un momento de inercia de área mínima inferior a 6.695 mm⁴ se considerará no estructural y no se tendrá en cuenta a la hora de evaluar el cumplimiento de cualquier norma relativa a la estructura del vehículo.

T3.2.6 Si un miembro de la estructura primaria (excepto los *roll hoops*) es un tubo doblado o está hecho de varios tubos, un tubo suplementario deberá sostenerlo. Este tubo de soporte deberá:

- Tener su punto de fijación en la posición a lo largo del tubo curvado donde más se desvíe de una línea recta que une ambos extremos.

- Tener las mismas dimensiones que el tubo o tubos de apoyo.
- Terminar en un nudo de la estructura primaria.
- Estar inclinado no más de 30° del plano del tubo(s) apoyado.

T3.3.1 Podrán utilizarse materiales alternativos para todas las partes de la estructura primaria y el TSAC con las siguientes excepciones:

- El aro principal y el arriostamiento del aro principal deben ser de acero
- El aro delantero debe ser de metal
- Todas las estructuras soldadas de la estructura principal deben ser de acero.
- Sin embargo, el aro delantero puede ser una estructura soldada de aluminio.

4.4. Requerimientos de aro principal y aro frontal

T3.7.1 Los dos *roll hoops* deben estar integrados de forma segura a la estructura primaria mediante triangulación de nodo a nodo o métodos de unión equivalentes.

T3.7.5 Las placas de montaje soldadas a los aros deben ser de acero de al menos 2 mm de grosor o de aluminio de 3 mm de grosor, dependiendo del material del aro.

T3.8.1 El aro principal debe estar construido de una sola pieza de tubo de acero de sección cerrada, continua y sin cortar.

T3.8.2 En la vista lateral, la parte del aro principal que está por encima de su punto de fijación superior a la estructura de impacto lateral debe estar inclinada menos de 10° con respecto a la vertical.

T3.8.3 En la vista lateral, cualquier curvatura del aro principal por encima de su punto de fijación superior a la estructura primaria debe arriostrarse a un nodo de la estructura de soporte del arriostramiento del aro principal con tubos que cumplan los requisitos del arriostramiento del aro principal.

T3.8.4 En la vista lateral, cualquier parte inferior al punto de fijación superior a la estructura de impacto lateral debe estar inclinada hacia delante o no más de 10° hacia atrás.

T3.9.1 El aro delantero debe estar construido con una sección continua y cerrada.

T3.9.2 Si el aro delantero está hecho de más de una pieza, debe estar soportado por triangulación de nodo a nodo o una construcción equivalente.

T3.9.3 En vista lateral, ninguna parte del aro delantero puede inclinarse más de 20° de la vertical.

T3.9.5 El aro delantero requiere seis puntos de fijación, dos a cada lado conectados a las estructuras de soporte del mamparo delantero y dos conectados al arriostramiento del aro delantero, por lo que debe mostrar una equivalencia a 180 kN.

4.5. Arriostramiento del aro principal y aro secundario

T3.10.1 El aro principal debe apoyarse en la parte delantera o trasera mediante tubos de refuerzo a cada lado del aro principal.

T3.10.2 En la vista lateral, el aro principal y los tirantes del aro principal no deben estar en el mismo lado de una línea vertical coincidente con la parte superior del aro principal.

T3.10.3 Los tirantes del aro principal deben fijarse al aro principal a no menos de 160 mm por debajo de la superficie superior del aro principal. El ángulo incluido formado por el aro principal y los tirantes del aro principal debe ser de al menos 30°.

T3.10.4 Los tirantes del aro principal deben estar rectos.

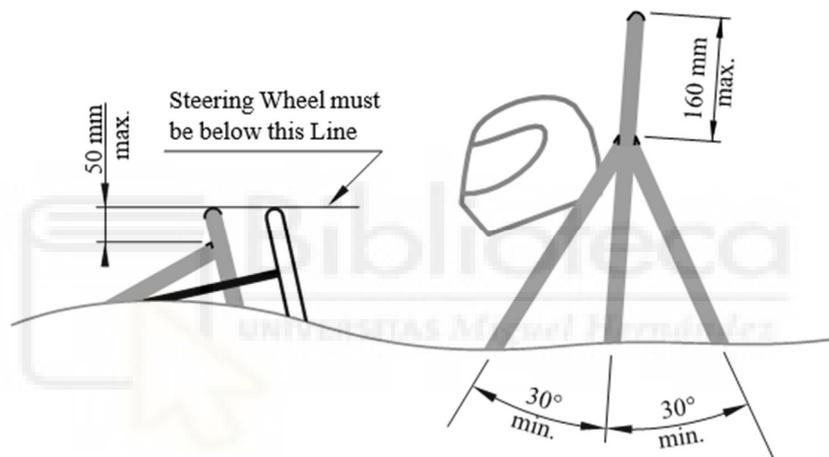


Ilustración 28. Representación graficas de las cotas mínimas y máximas para los aros.

T3.11.1 El refuerzo del aro delantero se fija a cada lado del aro delantero, así como la estructura por delante de los pies del conductor. Un mínimo de dos tubos sin dobleces deben ser rectos en una línea en vista lateral del bastidor y deben tener una distancia mínima de 100 mm entre sí en el aro delantero.

T3.11.2 La estructura de refuerzo del aro delantero debe fijarse a no menos de 50 mm por debajo de la superficie superior del aro delantero, véase la ilustración 21.

T3.11.3 Si el aro delantero está inclinado más de 10° hacia atrás, se requieren tirantes adicionales que se extiendan hacia atrás.

4.6. Características de estructuras de impacto

T3.14.1 Para la estructura de impacto lateral:

- El elemento superior debe conectar el aro principal y el aro delantero.
- El elemento superior debe estar a una altura comprendida entre 240 mm y 320 mm por encima del punto más bajo del interior del chasis entre el aro delantero y el aro principal.
- El elemento inferior debe conectar la parte inferior del aro principal y la parte inferior del aro delantero.
- El elemento diagonal debe triangular los elementos superior e inferior entre los aros antivuelco de nodo a nodo.
- El elemento superior no debe estar a más de 320 mm por encima del punto interior más bajo del chasis entre el aro delantero y el principal

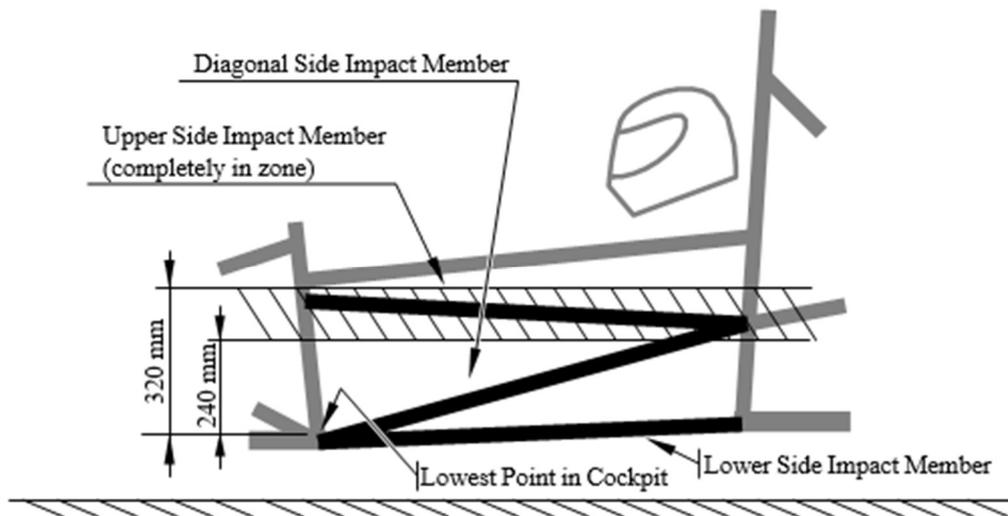


Ilustración 29. Requisitos para estructura de impacto lateral (vista lateral).

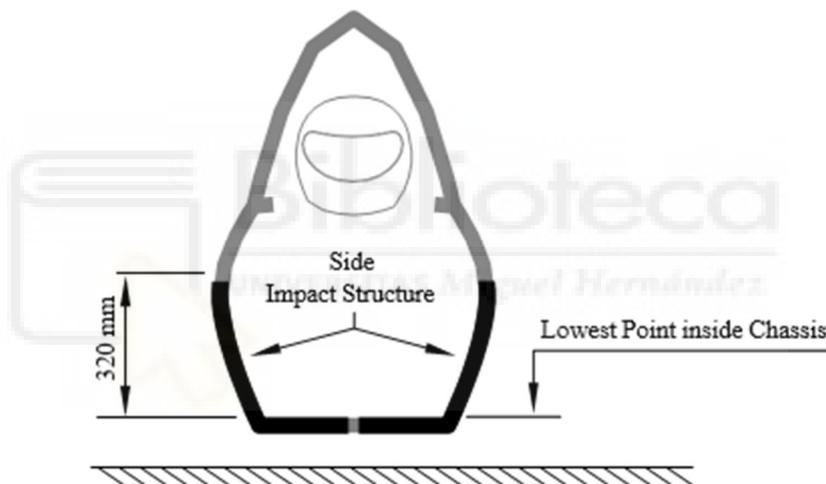


Ilustración 30. Requisitos para estructura de impacto lateral (vista frontal).

4.7. Cockpit

T 4.1.1 El tamaño de la abertura de la cabina debe ser suficiente para que la plantilla mostrada a la izquierda de la ilustración 24 pase verticalmente desde la abertura de la cabina hasta debajo del elemento de impacto lateral superior cuando se mantiene horizontalmente. La plantilla puede desplazarse hacia delante y hacia atrás.

T 4.2.1 El habitáculo debe tener una sección transversal interna libre suficiente para que la plantilla mostrada a la derecha en la figura 10 pase desde la abertura del habitáculo hasta un punto situado 100 mm hacia atrás de la cara del pedal más trasero en posición inoperativa. La plantilla puede moverse hacia arriba y hacia abajo. Los pedales ajustables deben estar en su posición más adelantada.

T 4.2.3 Los pies y las piernas del conductor deben estar completamente contenidos dentro de la estructura primaria cuando el conductor está sentado normalmente y sus pies tocan los pedales. En las vistas lateral y frontal, ninguna parte de los pies o las piernas del conductor debe sobresalir por encima o por fuera de esta estructura.

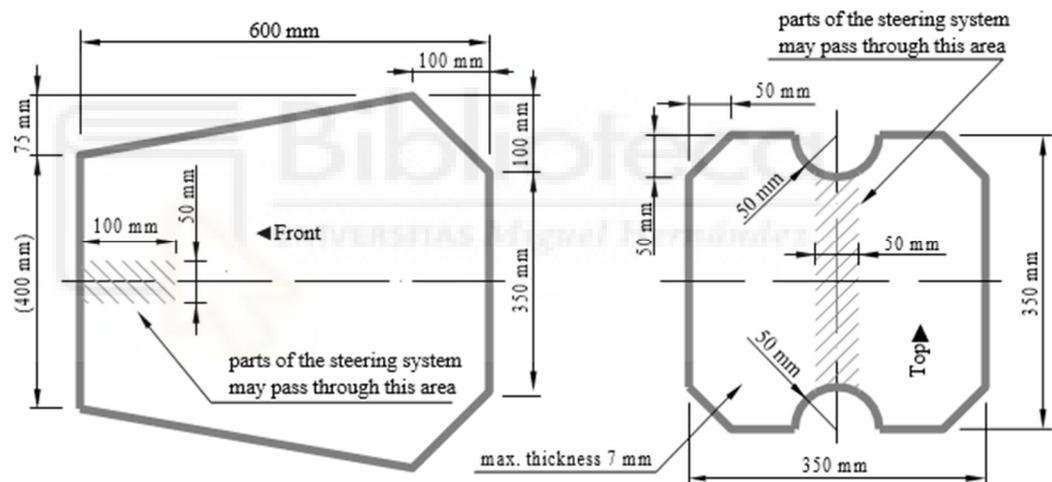


Ilustración 31. Plantilla de apertura mínima del cockpit (izquierda) y plantilla de la sección mínima interna (derecha).

4.8. Percentil 95

T 4.3.1 Cuando esté sentado normalmente y sujeto por el sistema de retención del conductor, el casco de un hombre del percentil 95 y de todos los conductores del equipo deberá, véase la figura 11:

- Estar a una distancia mínima de 50 mm de la línea recta trazada desde la parte superior del aro principal hasta la parte superior del aro delantero.
- Estar a una distancia mínima de 50 mm de la línea recta trazada desde la parte superior del aro principal hasta el extremo inferior del refuerzo del aro principal si el refuerzo se extiende hacia atrás.
- No estar más atrás que la superficie trasera del aro principal si el esfuerzo del aro principal se extiende hacia delante.

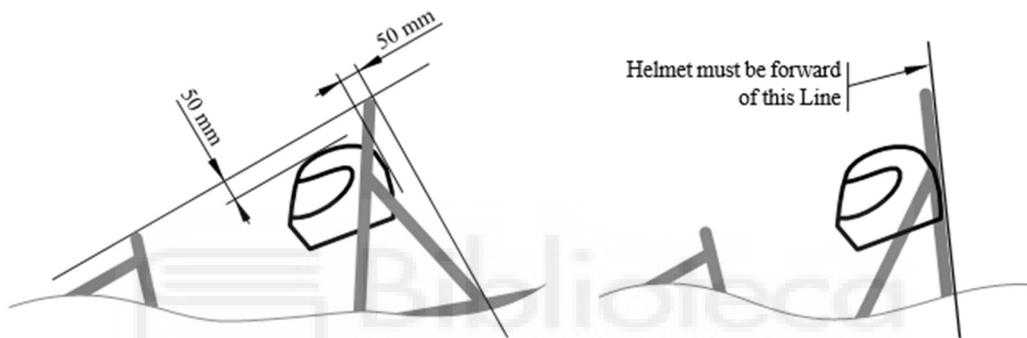


Ilustración 32. Distancia mínima del casco con respecto al chasis.

T 4.3.2 El varón del percentil 95 se representa mediante una figura bidimensional formada por dos círculos de 200 mm de diámetro (uno que representa las caderas y las nalgas y otro la región de los hombros) y un círculo de 300 mm (que representa la cabeza con casco).

T 4.3.3 Los dos círculos de 200 mm están unidos por una recta de 490 mm. El círculo de 300 mm está unido por una recta de 280 mm con el círculo superior de 200 mm.

T 4.3.4 La figura debe colocarse en el vehículo de la siguiente manera, véase la ilustración 26:

- El asiento ajustado en la posición más retrasada.

- Los pedales ajustados en la posición más adelantada.
- El círculo inferior de 200 mm colocado en la parte inferior del asiento. La distancia entre el centro del círculo y la cara de accionamiento más retrasada de los pedales debe ser de 915 mm como mínimo.
- El círculo central situado en el respaldo del asiento.
- El círculo superior de 300 mm colocado a 25 mm del reposacabezas.

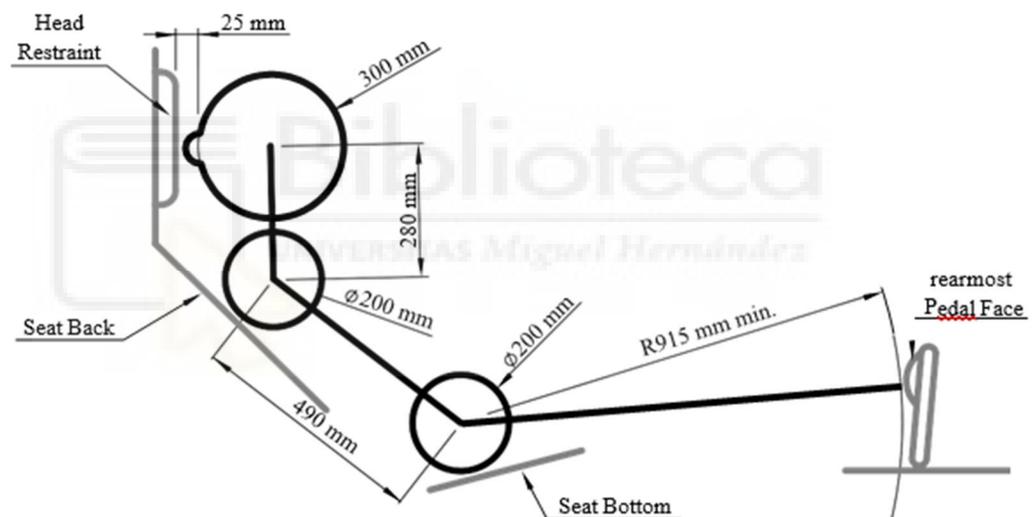


Ilustración 33. Dimensiones del percentil 95 según normativa.

5

DISEÑO

Biblioteca
UNIVERSITAS Miguel Hernández

5.1. Definiciones

5.1.1. Rigidez a Flexión

Referida a un vehículo, es la capacidad que tiene este para resistir las deformaciones debidas a las fuerzas que actúan en el plano longitudinal de la estructura como pueden ser las generadas por las irregularidades del terreno, el peso de los componentes y del piloto o los movimientos de aceleración y frenado.

Factores que influyen:

- **Estructura del chasis.**
- **Distribución de las cargas.**
- **Suspensión.**

5.1.2. Rigidez a torsión

Se define como la capacidad que posee el vehículo para resistir deformaciones provocadas por una fuerza de torsión (par de fuerzas opuestas) que giran el vehículo en torno a su eje longitudinal. Esta puede ser producida por fuerzas aplicadas en las ruedas durante el giro, por diferencias en la distribución de peso o por fuerzas entre el eje delantero y trasero. Una mayor rigidez torsional proporciona una mayor estabilidad y respuesta en curva, la cual se mide en Nm por cada grado de deformación. Los equipos más punteros de la competición llegan a conseguir 3000 Nm/°. Este es un valor muy importante ya que afecta directamente a la dinámica vehicular. Un valor bajo de este factor

provocará grandes deformaciones lo que generará un peor rendimiento del vehículo.

Factores que influyen:

- **Materiales del chasis.**
- **Tipo de carrocería.**
- **Conexiones y soldaduras.**

5.2. Dimensionamiento del chasis

El objetivo de este punto es conseguir un modelo alámbrico de partida del chasis. Por un lado, se ha basado en la normativa la cual deberá cumplirse en todos los aspectos de la estructura para poder competir en Formula Student y por otro, se ha basado en una investigación previa de diferentes fuentes de información que refleja distintas formas de enfocar este diseño. Con todo ello, se han definido todas las cotas para posteriormente analizar dicho diseño y ver su comportamiento ante diferentes situaciones.

Con toda esta información en cuenta se procedió a la creación del modelo en el software de diseño 3D asistido por ordenador Autodesk Inventor donde se ha modelado la estructura alámbrica con las cotas establecidas anteriormente. Con esta estructura terminada, se ha creado el modelo final mediante un módulo de este programa el cual permite definir la sección de cada línea.

Una vez establecido el diseño inicial, ha sido analizado en diferentes condiciones de carga las cuales serán definidas posteriormente para determinar si el chasis es válido para competir. Este análisis se ha

realizado mediante el software Ansys, el cual hace cálculos mediante elementos finitos y permite ver puntos de mejora en el chasis.

5.2.1. Dimensiones de los tubos

Elegir la sección de tubos idónea es un aspecto muy importante en el diseño ya que de este dependerá el peso final del chasis y por lo tanto del vehículo. El objetivo es conseguir el menor peso posible lo que permitirá un menor consumo, pero sobre todo permitirá un mejor desarrollo del monoplaza en pista. Para conseguir optimizar al máximo este aspecto se tomarán distintas secciones de tubos dependiendo de la parte del chasis donde se sitúen.

Los aspectos más importantes para definirla son:

- **Sección mínima según normativa.**
- **Catálogo de proveedores.**
- **Necesidades de la parte del chasis donde se aplica.**

5.2.1.1. Sección mínima según normativa

Como he mencionado en el apartado de Normativa se define la sección y el espesor mínimos que deberá tener cada parte de la estructura para poder pasar las pruebas técnicas. Las secciones mínimas son las descritas en el apartado **T3.2.1** de la normativa.

Para poder comprobar que nuestra sección cumpla con la normativa se calculará la sección transversal de cada tubo del que disponemos y para ello usaremos la siguiente fórmula la cual corresponde a la sección transversal de un tubo:

$$A_{\text{sección}} = \frac{\pi}{4} * (D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{int}}^2) \quad : \quad D_{\text{ext}} = D_{\text{int}} + e_{\text{min}} * 2$$

Resultado: $A_{\text{sección}} = \frac{\pi}{4} * (D_{\text{ext}}^2 - (D_{\text{ext}} - 2 * e)^2)$

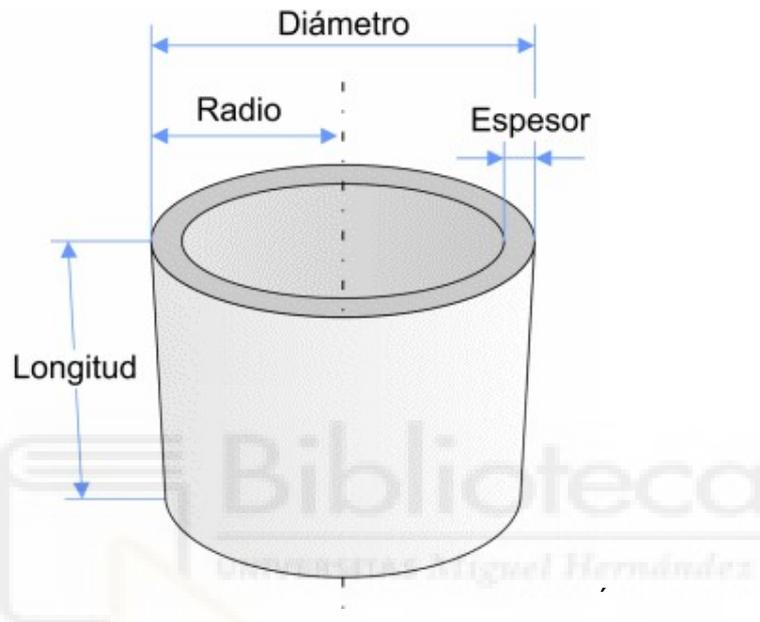


Ilustración 28. Dimensiones principales de un tubo.

Puesto que se trata de un proyecto que se va a llevar a cabo deberemos tener en cuenta qué secciones hay en el mercado y cuál es la óptima para cada parte del chasis. Tomaremos como referencia el tubo más pequeño del que dispone el proveedor del material y a partir de ahí iremos cogiendo secciones mayores hasta que encontremos una que se adapte a los requisitos de la competición y a los análisis que se ejecuten. En este caso, las dimensiones de tubo más pequeñas de la que dispone nuestro proveedor son de 21,3x2 mm con una sección de 121,27 mm² el cual cumple dos de los requisitos, pero no con el más restrictivo. Por ello, deberemos elegir la siguiente sección de la que disponga el proveedor, que en nuestro caso es de 26,9x2,5 mm la cual posee 188,5 mm². Por último, por requisitos del análisis se añadirá una tercera sección de

33,7x2,6 la cual posee una sección transversal de 254 mm^2 que cumple con todos los mínimos establecidos en la normativa.

En conclusión, usaremos tres tipos de tubos dependiendo de la parte del chasis: para las partes de apoyo que no tengan solicitaciones considerables se usará la sección de 21,3x2 mm, para aquellas que estén sometidas a una tensión moderada se empleará los tubos de 26,9x2.5 mm y para el resto, que soportarán los mayores esfuerzos, se usará tubos de 33,7x2.6 mm. Se usan 3 tipos de tubos para poder optimizar las partes del chasis consiguiendo una buena relación resistencia/peso y resistencia a torsión/peso.

Secciones utilizadas: 33,7x2,6 mm , 26,9x2,5 mm y 21,3x2 mm.

5.2.2. Elección del material

Para este apartado debemos tener en cuenta también lo descrito en la normativa y la soldabilidad del material que elijamos ya que la unión entre los tubos se hará mediante soldadura. En cuanto a los aspectos mecánicos deberemos tener en consideración:

- **Resistencia a tracción:** importante para el rendimiento y la seguridad del vehículo.
- **Precio:** Debe ser viable para el equipo el proyecto.
- **Límite elástico:** La aprobación del modelo dependerá de la tensión máxima que soporta el material antes de llegar a la zona plástica, por lo que es un dato de referencia para el análisis.
- **Composición del acero:** Este factor es el que caracteriza el comportamiento del material.

Como se describe en el artículo **T3.2.2** la normativa exige una serie de condiciones que deberemos tener en cuenta a la hora de elegir el material son:

1. **%Carbono < 0.3%**
2. **%Manganeso < 1.7%**
3. **%Otro elemento < 0.6%**

Teniendo en cuenta estos aspectos y revisando el catálogo del proveedor que se dispone, se ha elegido el acero EN 10216-2 el cual cumple con todos los requisitos citados anteriormente. Este posee la siguiente composición:

Grado	Máx %C	Máx %Mn	Máx %S	Máx %P
P235GH	0,16%	0,6%	0,015%	0,025%
P265GH	0,20%	1,2%	0,015%	0,025%

Tabla 2. Porcentaje de cada componente en el material según el grado.

Como se puede ver estas especificaciones cumplen todas las premisas impuestas por la norma. A continuación, se mostrarán las propiedades físicas de este:

Grado	Resistencia a Tracción	Límite elástico	Densidad
P235GH	360-480 MPa	235 MPa	7,85 kg/m ³
P265GH	410-530 MPa	265 MPa	7,85 kg/m ³

Tabla 3. *Propiedades mecánicas de material según el grado.*

Su límite elástico permite que el material soporte cargas moderadas antes de deformarse plásticamente, lo cual debe evitarse ya que produce deformaciones permanentes. Además, posee una buena ductilidad, que es la capacidad que tiene el material antes de llegar a la rotura, lo que en caso de colisión permite absorber energía de impacto sin una fractura brusca.

Debido a su contenido en carbono se encuentra dentro de los aceros al bajo carbono lo cual significa que posee una buena soldabilidad. Esta es una propiedad muy importante ya que todas las uniones se realizarán mediante soldadura. Al tener fósforo y azufre en valores pequeños permiten minimizar la fragilidad en el material. Por último, el manganeso mejora la resistencia de este sin llegar a comprometer la soldabilidad.

El grado elegido es el P265GH. Este material es una buena opción para la estructura tubular del chasis ya que cumple tanto con los requisitos impuestos por la normativa como con las necesidades que tiene la fabricación y la aplicación del chasis.

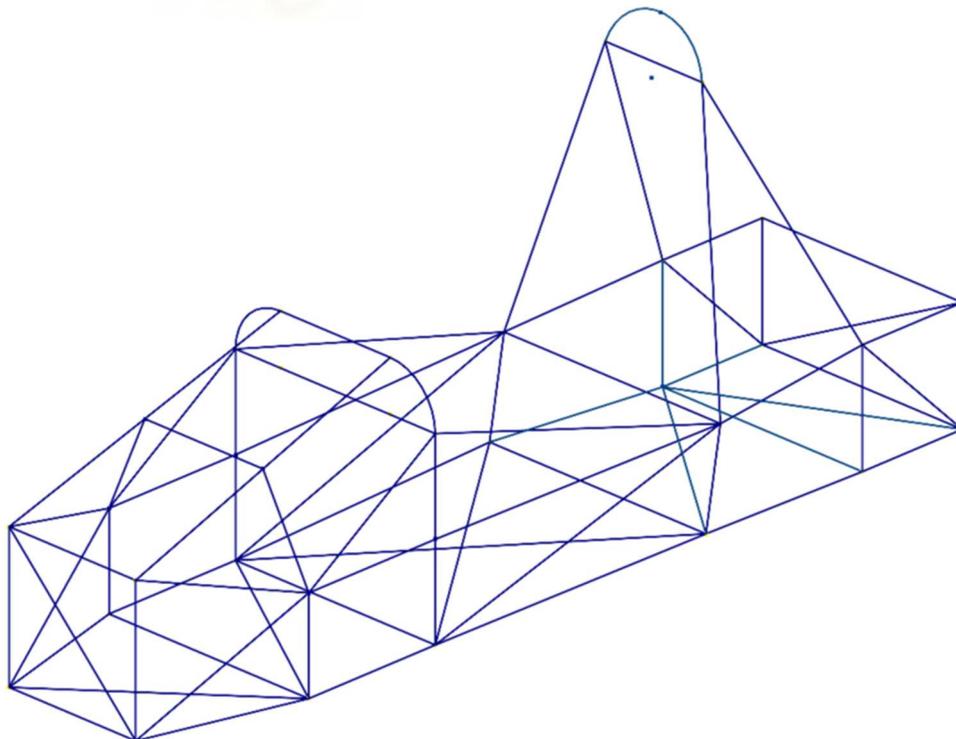
5.2.3. Dimensionamiento modelo alámbrico

Una vez definido esto se procede a establecer las cotas del modelo alámbrico en el programa de diseño Autodesk Inventor. Para definir estas medidas, además de basarse en las restricciones que ofrece la norma, se ha tenido en cuenta las necesidades del resto de departamentos que componen la rama dinámica del equipo.

Todas las medidas necesarias por reglamento son expuestas en la normativa las cuales han sido consideradas para determinar las. Primero de todo se ha determinado, junto al resto de departamentos, cual va a ser la configuración básica del vehículo donde se incluye la batalla y el ancho de vía. La batalla es el dato que más afecta al chasis ya que determinará la longitud de este. Se ha definido definido en 1600 mm siendo 1525 mm el mínimo para dejar un cierto margen para la fabricación o para ajustes futuros.

Otro aspecto importante a tener en cuenta en el dimensionamiento es el piloto, ya que el habitáculo debe ser suficientemente espacioso como para alojar a este. La norma fija como requisito que se tome como referencia el percentil 95 el cual posee unas medidas antropométricas de una persona igual o mayor al 95% de la población.

Estas medidas sirven como referencia para definir la altura del mainhoop, espacio del cockpit, posicionamiento de pedales y distancia entre aros principales entre otros.



5.2.3.1. Ergonomía del piloto

Para comprobar que el chasis se adecue perfectamente al percentil 95, se ha dibujado la silueta que aparece en la normativa dimensionándola y así poder apreciar su forma comparándola de forma visual con la estructura como vemos en la Ilustración 36. Pese a que la norma dicte que las distancias deben de ser como mínimo de 50 mm se ha dejado cierto margen (10 mm) para evitar problemas en la fabricación.

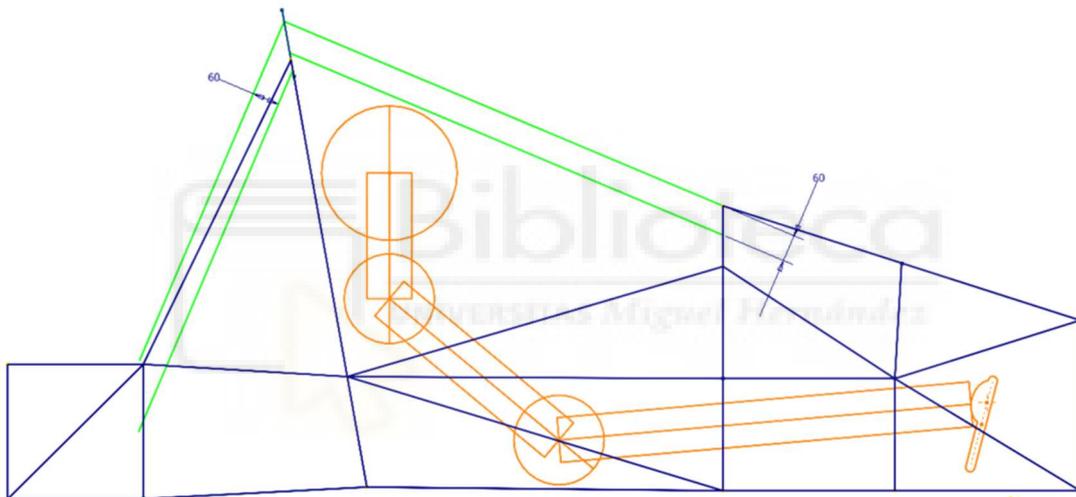


Ilustración 36. Comprobación cotas casco-chasis.

En la ilustración 36 se puede apreciar cómo, incluso dejando 10 mm de margen, las cotas cumplen con la distancia reflejada en la normativa.

Otro aspecto importante es el espacio mínimo, tanto en la entrada del piloto como la parte del cockpit donde se alojarán las piernas del conductor para garantizar la comodidad y evitar posibles riesgos durante la conducción. Para ello, la norma define dos plantillas definidas en la ilustración 31 las cuales describen unas cotas mínimas del cockpit, una para cada parte. Para asegurar que dicho chasis cumpla con estas se han

creado unos volúmenes extruyendo dichas plantillas para, de forma visual, confirmar el cumplimiento de dicho artículo.

Plantilla 1: Esta plantilla determina el espacio mínimo que debe tener la parte del cockpit donde van alojadas las piernas del piloto.

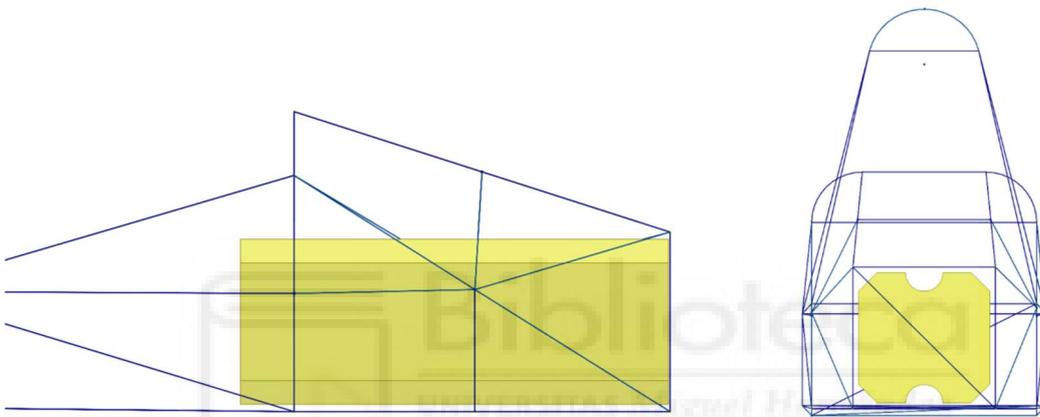


Ilustración 37. Comprobación plantilla interior cockpit.

Como se puede ver en la ilustración 37, la zona crítica donde se ajusta más estas distancias es en la parte frontal del vehículo la cual tiene una sección cuadrada de 380x380 mm que se va haciendo mayor conforme se va acercando a la parte donde se sienta el piloto.

Es suficiente ya que la plantilla tiene una sección cuadrada de 350x350 mm con chaflanes en cada una de sus esquinas de 50 mm quedando un margen de 15 mm a cada lado del cuadrado. Puesto que los pedales se situarán a una distancia menor que esta la sección crítica será mayor.

Plantilla 2: Cuantifica el espacio mínimo que se dotará al piloto para entrar al cockpit del monoplaza.

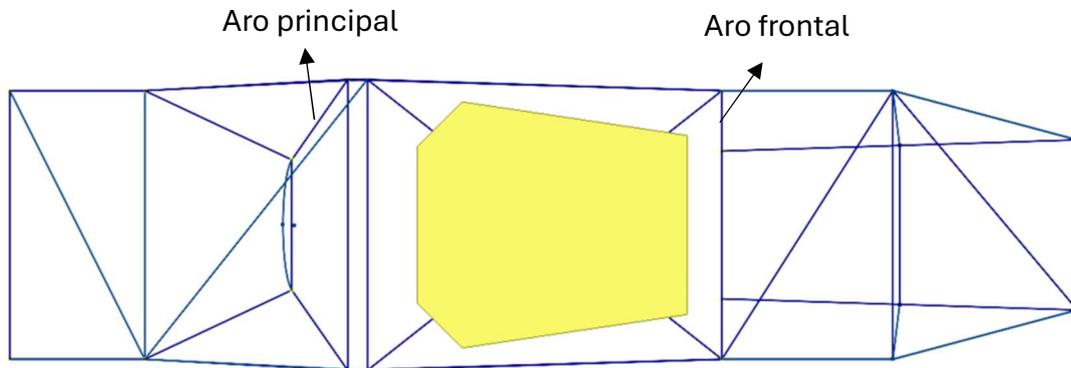


Ilustración 38. Comprobación plantilla apertura del cockpit.

En la ilustración 38, se ve que la plantilla entraría con suficiente margen en todos los lados de la plantilla para cumplir con la inspección de la competición.

5.2.3.2. Aro principal y frontal

La normativa describe una serie de puntos que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar estos tubos. El aspecto fundamental que se debe considerar es que, el aro principal y frontal debe constar de un solo tubo doblado con un espesor mínimo de 2 mm lo cual se cumple en el diseño.

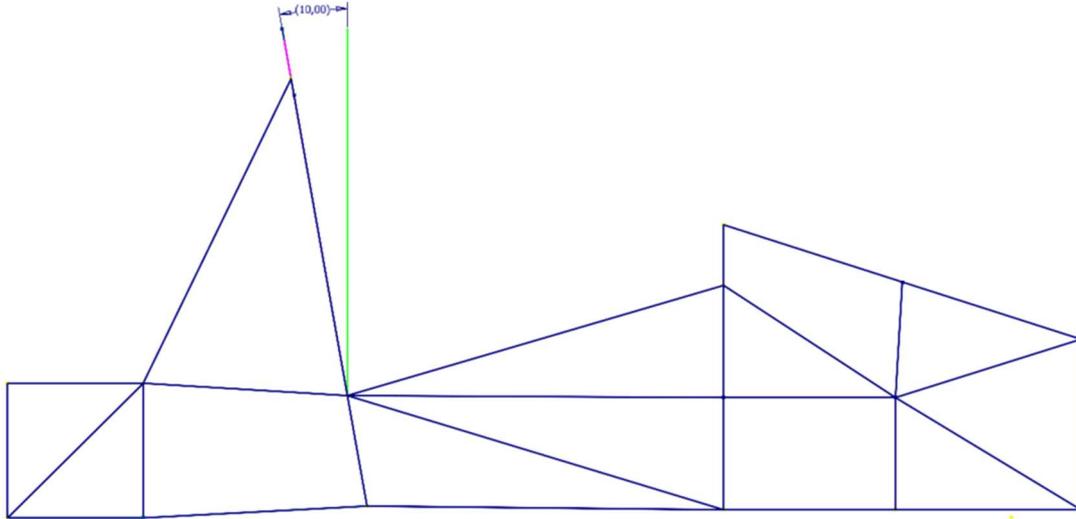


Ilustración 39. Comprobación ángulo aro principal y frontal.

Una parte de la normativa que se refiere a los aros principal y frontal determina el grado de inclinación de cada uno de ellos. Como se citó en los artículos **T3.8.4** y **T3.9.3**, el ángulo máximo que puede tener el aro principal es de 10° y de 20° el aro frontal con respecto a la vertical. En la ilustración 39, se ve cómo se cumplen ambas premisas ya que el principal tiene 10° y el frontal no tiene ningún tipo de inclinación en el modelo alámbrico.

5.2.3.3. Arriostramiento aro frontal y principal

El arriostramiento de los aros es referido a los tubos de refuerzo que conectan la parte superior de estos con otra parte del chasis. En la ilustración 28, se describen las premisas para dimensionar dicha parte, por ello se ha considerado para diseñar el chasis que, en una vista lateral, el plano definido por una línea vertical coincidente con la parte superior del aro principal, corte con los brazos de soporte de dicho aro. Por otro lado, debe cumplir que los brazos del aro frontal tengan una distancia mínima entre ellos de 100 mm y que todos ellos, tanto del aro principal

como del frontal, deben ser rectos. Para comprobar las dimensiones descritas por la norma han sido creados bocetos para poder verse de forma visual:

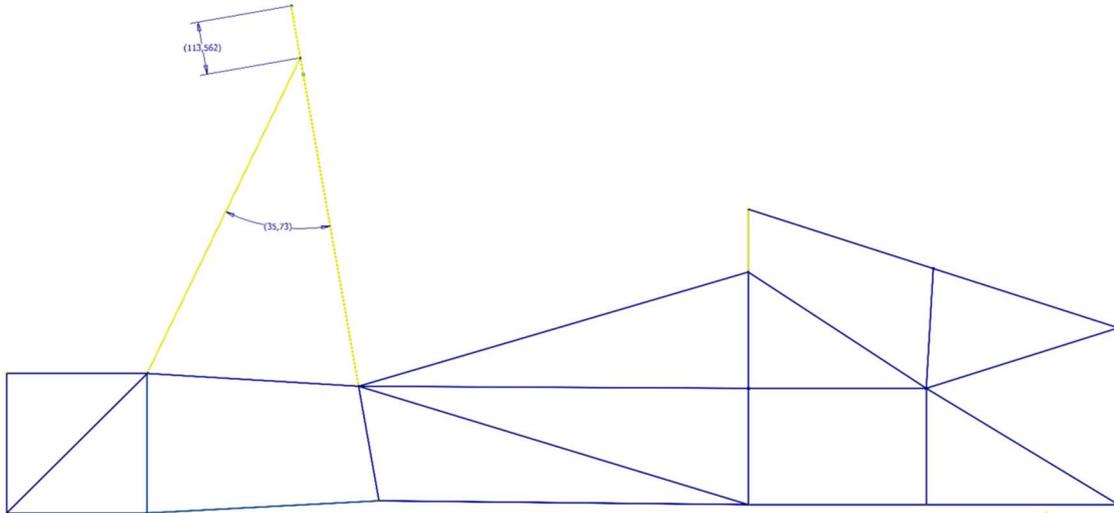


Ilustración 40. Comprobación ángulo estructura de apoyo posición de estas.

Para el aro principal se cumplen todas las cotas siendo 113.562 mm la distancia del apoyo a la parte superior del aro (máximo 160 mm) y $35,73^\circ$ el ángulo entre los brazos de apoyo y el aro (mínimo 30°).

La condición que se impone en el aro frontal es que estos brazos deben posicionarse a 50 mm como máximo de la parte superior de este lo que se cumple ya que van montados sobre el aro frontal. Además, el espacio mínimo entre los brazos de apoyo delanteros debe ser de 100 mm lo que se cumple.

5.2.3.4. Estructuras de impacto

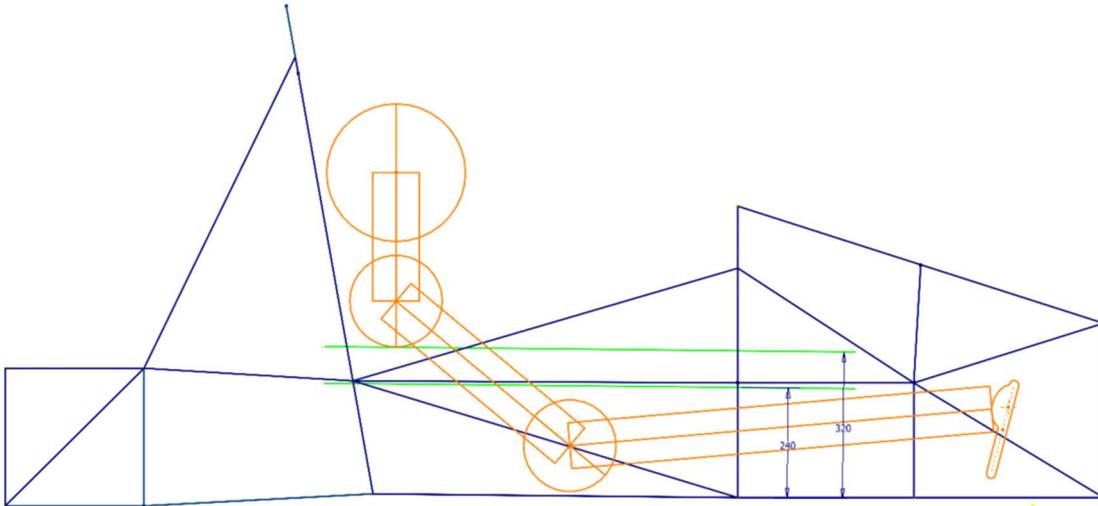


Ilustración 41. Comprobación cotas estructura de impacto lateral.

Según la ilustración 29, el tubo superior de la estructura de impacto lateral deberá estar entre 240 mm y 320 mm por lo que, si se quiere implementar un cierto ángulo en esta, deberá estar comprendido entre estos límites como es el caso. Además, la triangulación de los tubos de esta estructura debe tener una disposición específica la cual se puede ver en la ilustración 35.

5.3. Estimación peso total

Para este apartado, ha sido necesario recopilar información de los distintos departamentos del equipo y suposiciones de algunos componentes en base a otros equipos ya que todavía no han sido diseñados por los correspondientes departamentos. Este pretende estimar, de forma aproximada, el peso que tendrá el vehículo final con el fin de conocer las cargas a considerar en el análisis.

5.3.1. Peso del chasis

Como se ha comentado anteriormente en el apartado *Dimensiones de los tubos* las secciones que utilizaremos serán de 33,7x2,6, 26.9x2.5 mm y 21.3x2 mm. Estas secciones se distribuirán por el chasis como se muestra en la ilustración 42 acorde con las especificaciones de la normativa.

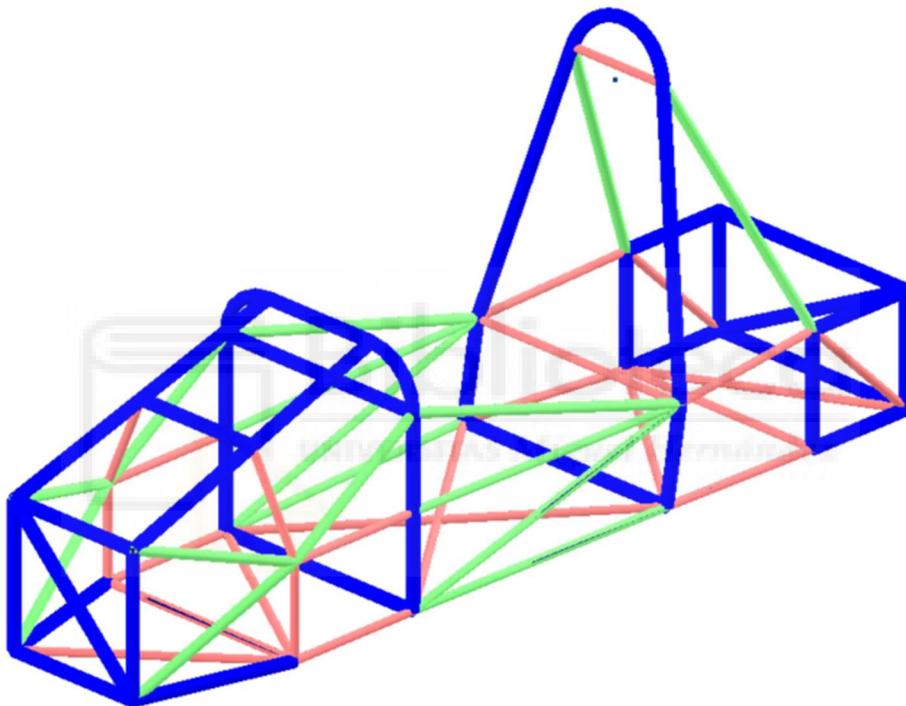


Ilustración 42. Diferenciación de secciones en función de colores para el chasis.

	Sección (mm)			Peso (kg)
	Tubo Azul	Tubo Verde	Tubo Rosa	
Disposición	33,7*2,6	26,9x2,5	21,3x2	53,5

Tabla 4. Leyenda colores de tubos de la ilustración 42.

5.3.2. Motor

Tras hacer un estudio el departamento de motor de los diferentes motores que se ajustan a la normativa de la competición se ha decantado por el de la CBR 600 RR el cual, junto a la transmisión, tiene un peso aproximado de 70 kg. Por otro lado, el depósito que tendrán en cuenta es uno que alberga 8 litros de gasolina por lo que suponiendo una densidad de gasolina de $720 \frac{kg}{m^3}$ pesa 5,76 kg. El total de este departamento es de 76 kg.

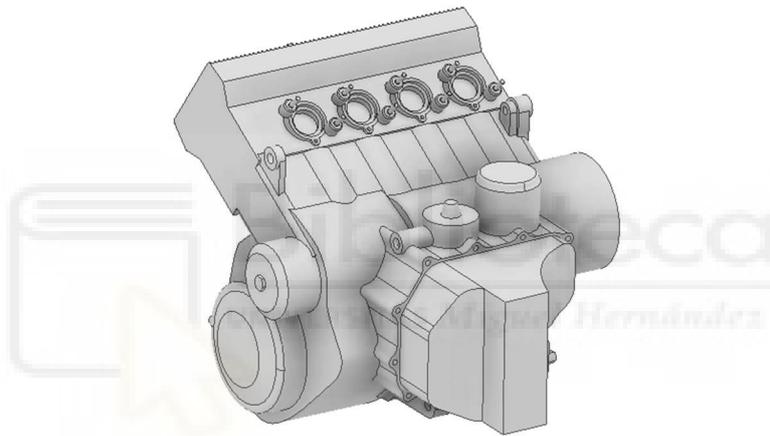


Ilustración 43. Modelo 3D del motor de una CBR 600 RR.

5.3.3. Ruedas, neumáticos y suspensión.

La suspensión se ha definido de doble horquilla o doble brazo oscilante la cual consiste en dos trapecios superpuestos que unirán la mangueta de la rueda al chasis. Al trapecio inferior irá conectado el conjunto muelle-amortiguador que, a su vez, por el otro extremo, irá anclado al chasis. El peso de los neumáticos ha sido extraído de la página oficial de Hoosier el cual es de 5 kg por neumático dando un total de 20 kg. El conjunto de la suspensión ha estimado el departamento dinámico

que tendrá un peso de aproximadamente 25 kg. Por lo que el total de este conjunto es de 45 kg.

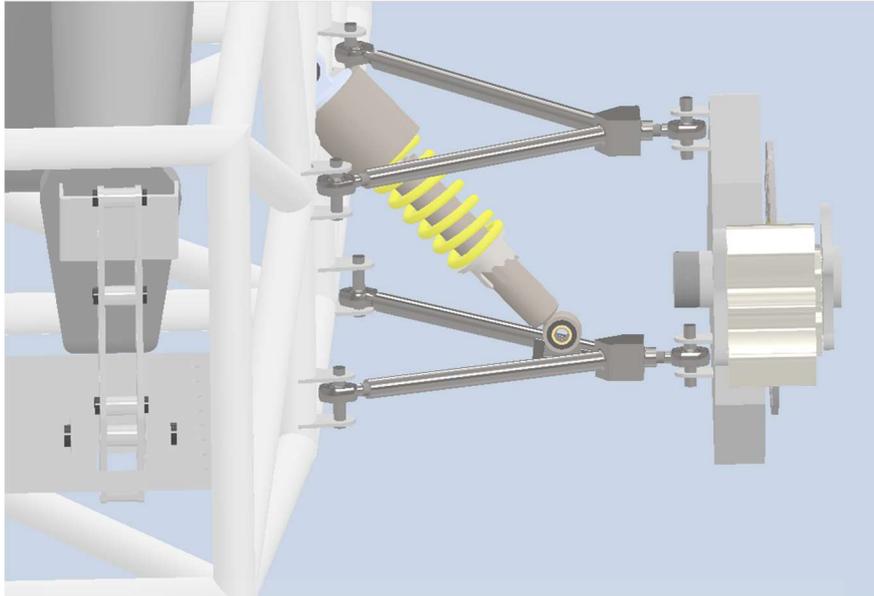


Ilustración 44. Diseño de suspensión para el equipo Illici Racing Team.

5.3.4. Piloto y equipación.

Según estudios de modelos morfológicos hechos específicos para un piloto se estimará que este tiene un peso entre 75 kg y 77.5 kg. Con la equipación del piloto: guantes, mono y casco, que suele rondar entre los 2-3 kg, se estima un peso total de 80 kg.

5.3.5. Resto de componentes.

El resto de los pesos se han extraído de una recopilación de estimaciones de otros equipos de Formula Student lo cual es un valor suficientemente acertado como para hacernos una idea del peso total del vehículo que tendrá cuando sea construido.

Parte	Peso (Kg)
Chasis	53,5
Motor y transmisión	70
Batería	8
Asiento y cinturón	5
Pedalera, volante y bombas	8
Carenado	8
Sistema eléctrico	5
Ruedas, neumáticos y suspensión	45
Depósito lleno	8
Sistema de frenado	10
Tornillería	2
Piloto y equipamiento	80
Otros	4
TOTAL	306,5

Tabla 5. Estimación de peso desglosado del vehículo.



6

ANÁLISIS

Biblioteca
UNIVERSITAS Miguel Hernández

6.1. Metodología

6.1.1. Análisis de elementos finitos

Previo al análisis por computadora, los análisis de nuevos diseños se hacían mediante prototipos (modelos físicos) para conseguir simular el comportamiento del diseño en condiciones reales. Estos podían ser a escala reducida o a tamaño real dependiendo de las dimensiones del diseño y posteriormente se realizaban una serie de ensayos tanto destructivos como no destructivos para poder analizar el modelo. Esta es una práctica que, para poder llevarla a cabo, requería de un alto presupuesto ya que era necesaria la fabricación de los componentes con sus respectivas modificaciones.

Gracias al desarrollo del análisis por computadora (CAE), esto ya no es necesario y el análisis del modelo se puede simular sin llegar a construir un prototipo real. Esto no elimina por completo la necesidad de prototipos, pero sí evita hacer muchas de las modificaciones necesarias desde el modelo inicial al modelo final ya que permite simular el comportamiento de este.

6.1.1.1. Discretización

Este consiste en dividir una geometría continua en líneas o geometrías imaginarias mediante una malla de elementos finitos, cada uno asociado a unas funciones de interpolación las cuales aproximan las variables del sistema.

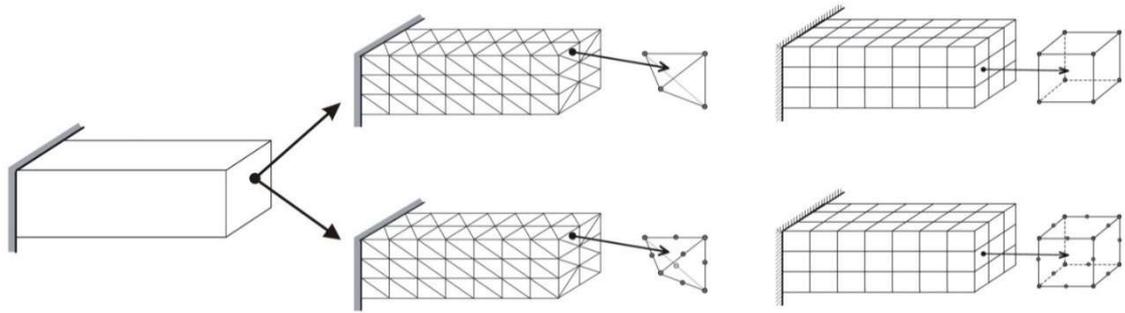


Ilustración 45. Discretización de un elemento continuo mediante diferentes geometrías.

Los nodos, son los puntos de unión entre los elementos finitos donde se calculan los desplazamientos u otros parámetros, son las incógnitas del problema. Estos pueden tener diferentes formas según la geometría del modelo a analizar.

Tipos de elementos:

Tipo viga (Beam): Estos son elementos unidimensionales (se descartan 2 dimensiones) los cuales están definidos por únicamente dos nodos y en algunos casos un tercero que representa la orientación. Son los más utilizados para vigas o estructuras similares y los que menos recursos computacionales requieren al tener un menor número de nodos por elemento.

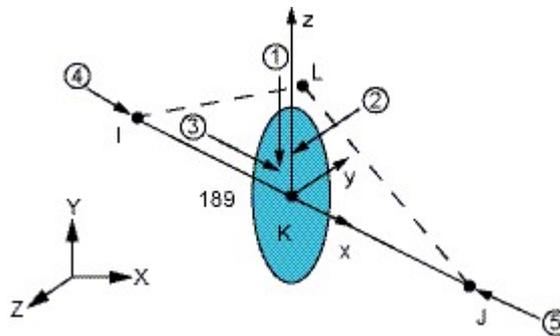


Ilustración 46. Elemento tipo viga.

Tipo Shell: Son elementos bidimensionales (se descarta 1 dimensión) y suelen estar definidos por 3 a 8 nodos. Son comúnmente utilizados para chapas, membranas o cualquier modelo que tenga una geometría similar en la cual se descarta la dimensión del espesor.

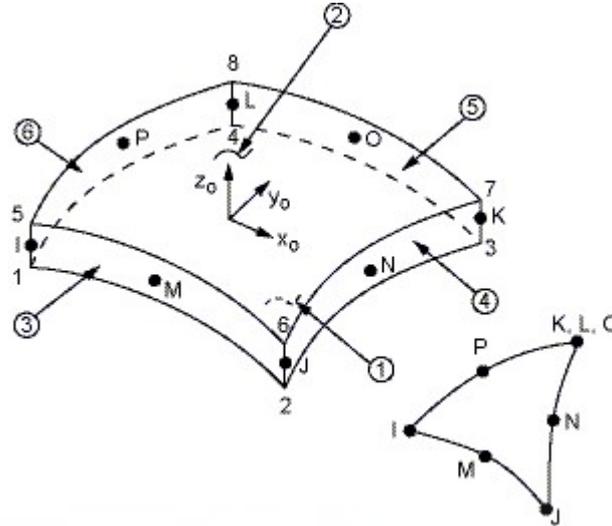


Ilustración 47. Elemento tipo shell.

Tipo Solid: estos son aquellos que se definen en las tres dimensiones por lo que no se descarta ninguna de ellas. Dependiendo de su definición matemática tendrá entre 6 y 20 nodos. Son los más precisos pero los que más recursos computacionales requiere. Por ello, se suele utilizar solo para geometrías complejas que requieran de mayor precisión.

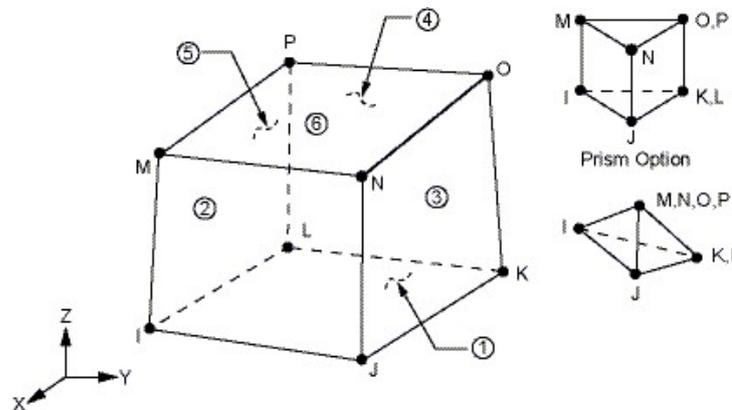


Ilustración 48. Elemento tipo solid.

6.1.1.2. Formulación matemática

En este paso, después de tener la malla definida, se plantean una serie de ecuaciones diferenciales que se transformarán en un sistema de ecuaciones algebraicas y se resolverán numéricamente a cada nodo.

6.1.1.3. Condiciones de contorno.

Aquí se definen las restricciones y cargas desfavorables las cuales simularán un caso real de estudio. Es importante el estudio estas condiciones de contorno ya que serán las que determinen la correspondencia de los resultados del análisis con una situación real.

6.2. Análisis

Es importante determinar con claridad cuáles son las simulaciones que se van a realizar en función de la aplicación que tendrá el prototipo. Esto optimizará el modelo en función de los requisitos de la aplicación que se le dé evitando así sobredimensionamientos.

Tras simular todos los casos estudiados se deben analizar los datos resultantes mediante los parámetros convenientes. Estos resultados suelen ser visuales lo que nos permiten identificar partes donde se produce el fallo.

6.2.1. Aplicación

Para analizar la estructura primero deberemos definir la geometría en el programa Ansys. Para ello hay que exportar el modelo alámbrico de Autodesk Inventor en formato .stp (STEP) y se importa en el programa de análisis. Una vez cargado, se definen las secciones de los tubos (en este caso de 33.7X2.7, 26.9x2.5 mm y 21.3x2 mm) y las características del

material. Después se deberá definir en el modelo de análisis el modelo correspondiente adaptando el mallado según la geometría, ajustándola en las partes críticas para obtener una buena calidad de resultados. Como es el caso la malla será definida mediante elementos tipo viga para modelar el comportamiento del chasis como una estructura de barras unidimensional. Se establecerá una densidad de malla de 25 mm/m la cual determinará el número total de nodos de la estructura. Como se ha comentado anteriormente esto nos permitirá reducir considerablemente la capacidad computacional requerida sin sacrificar en exceso la calidad de los resultados y reduciendo así el tiempo de simulación.



Ilustración 49. Modelo final del chasis.

Con todo ello, calcularemos las deformaciones y tensiones que se producen en la estructura bajo cargas estáticas que se definirán tanto en módulo como en posición a continuación en función del tipo de análisis que se simule.

Los análisis que se ejecutarán serán aquellos recomendados por normativa y los que se ha considerado necesarios para evaluar las prestaciones del chasis. Un aspecto importante que se contempla en la normativa y se va a tener en cuenta para analizar, es que ninguna

estructura puede experimentar fallos en los ensayos que supongan desplazamientos mayores a los 25 mm.

Todas las fuerzas aplicadas en las diferentes simulaciones serán mayoradas en base a los siguientes vectores unitarios:

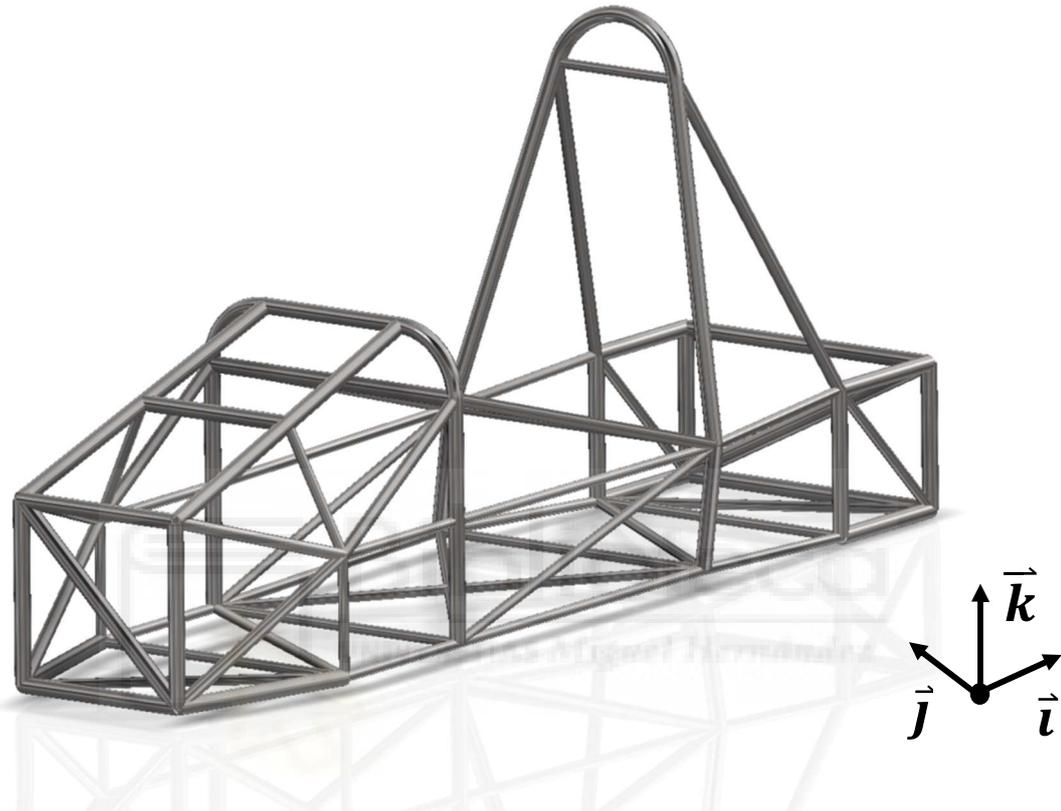


Ilustración 50. Definición de direcciones para fuerzas.

6.3. Tipos de análisis

6.3.1. Ensayo del arco principal

Este pretende simular un caso de vuelco del vehículo en el que se aplicarán una serie de fuerzas en la parte superior del arco principal (Main Hoop). Con este se medirá si realmente el chasis cumple con la seguridad y fiabilidad del chasis en un caso desfavorable como es el vuelco.

Para ello aplicaremos una carga, recomendada por normativa, de valor $F(x) = 6i + 5j + 9k$ (KN) la cual será ubicada en la parte superior del arco. Esta fuerza es elevada ya que posee un módulo de 11,91 KN por lo que es suficientemente restrictiva como para simular el vuelco del monoplaza.

Las condiciones de contorno se establecerán en los nodos inferiores del chasis y serán desplazamiento fijo en las tres dimensiones y rotación libre.

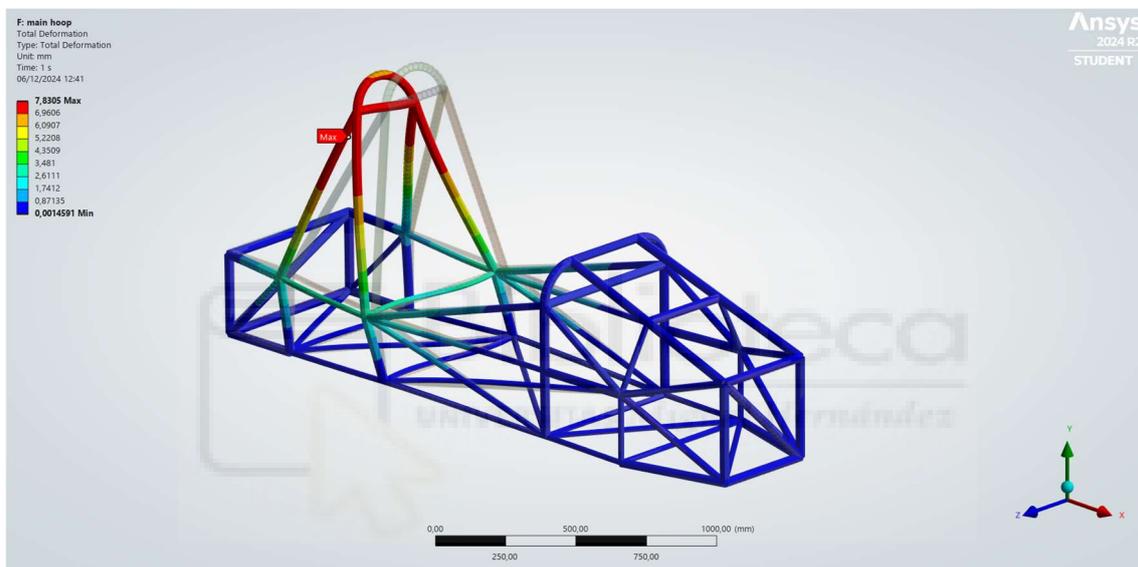


Ilustración 51. Deformación análisis del arco principal.

En la ilustración 51 ha sido utilizada una escala que mayor el desplazamiento 18 veces el real. Se ha considerado esta para poder apreciarse visualmente.

En dicha ilustración se observa cómo, la deformación máxima es producida en la estructura de arriostramiento del main hoop, posee un valor de 7,83 mm. Este valor entra dentro del límite de la normativa (25 mm) por lo que cumple con la carga aplicada.

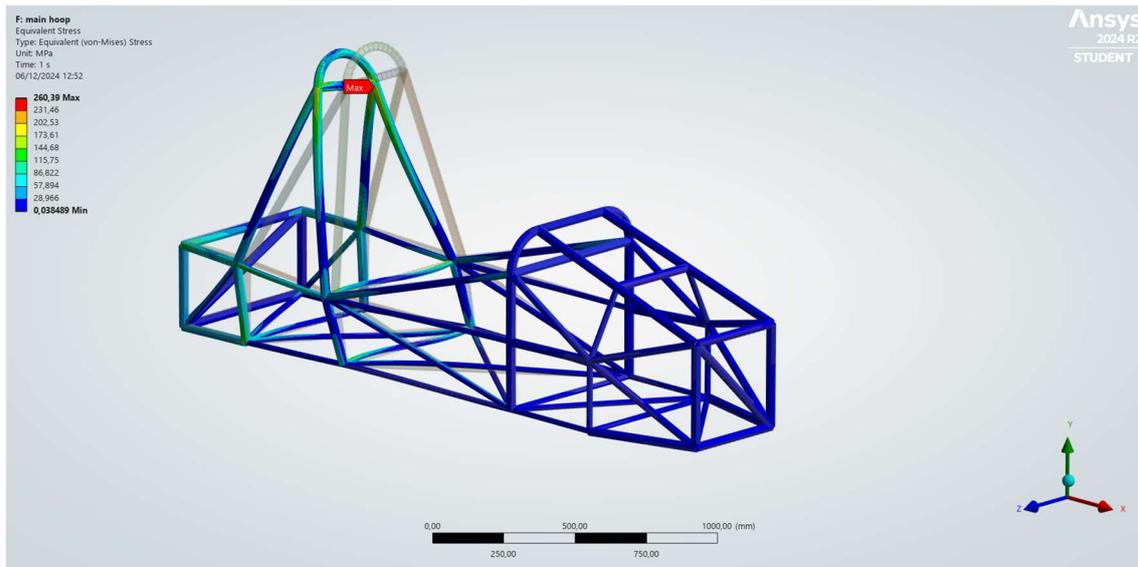


Ilustración 52. Tensión análisis arco principal.

Las tensiones en esta simulación son mayores en comparación con las obtenidas en la del front hoop como se puede ver en la ilustración 52. Esto se debe a tener una mayor distancia el punto superior con respecto al suelo por lo que, aplicando la misma fuerza, genera mayor momento. Sin embargo, la mayor tensión que se obtiene es de 260 MPa por lo que sigue dentro de la zona elástica y no produce deformaciones permanentes (límite elástico: 265 MPa).

Ha sido necesario reforzar dicha estructura en ciertas partes para poder soportar los esfuerzos aplicados. Se ha reforzado el tubo del main hoop y los correspondientes a la estructura de arriostramiento de dicho arco. Además, para distribuir las tensiones en la parte trasera donde apoyan los trapecios de la suspensión, se ha dispuesto un tubo de la menor sección en la diagonal de dicho rectángulo.

6.3.2. Ensayo del arco Frontal

Aquí se pretenderá analizar el caso de vuelco al igual que en el análisis anterior por lo que se supondrán tanto las mismas fuerzas como las mismas condiciones de contorno, pero aplicadas a este arco.

Se aplicará una fuerza $F(x) = 6i + 5j + 9k$ (KN) en la parte superior del aro y como condiciones de contorno desplazamiento fijo en las 3 dimensiones, pero rotación libre en los nodos inferiores del aro.

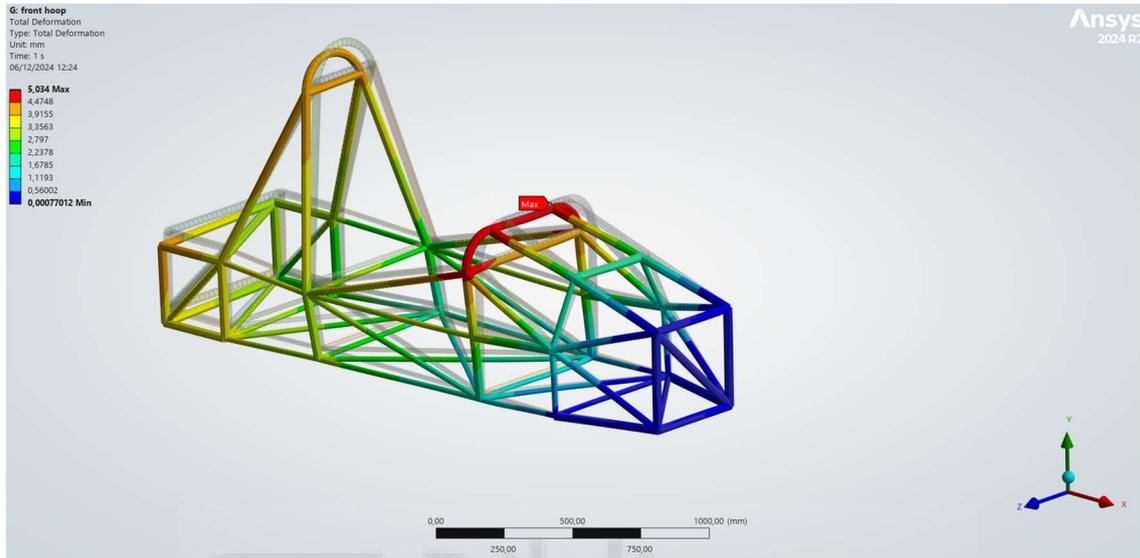


Ilustración 53. Deformación análisis arco frontal.

La escala utilizada en la ilustración 53 es de 18 veces mayor a la real. Se utiliza esta para poder apreciar con mayor detalle la dirección de la deformación de forma visual.

Tras hacer la simulación se puede ver en la ilustración 53 que el desplazamiento máximo que sufre la estructura es de 5 mm en la parte superior del front hoop (donde se aplica la fuerza). Es un desplazamiento bajo en comparación con la fuerza aplicada y entra dentro del límite marcado por la normativa de 25 mm.

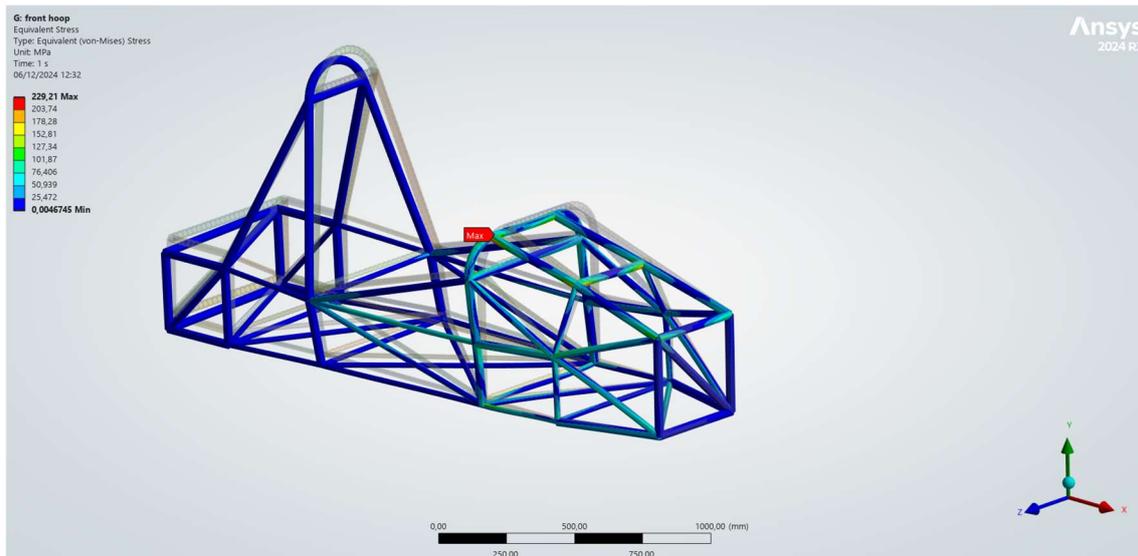


Ilustración 54. Tensión análisis arco frontal.

En la ilustración 54, se aprecia como estas tensiones se distribuyen en los tubos que componen esta parte con una tensión máxima donde se aplica la fuerza de 229,21 MPa. Esta tensión es inferior al límite elástico (265 MPa) por lo que cumpliría.

Para llegar a esta versión de la estructura del front hoop ha sido necesario reforzar en las partes críticas y rebajar las secciones de los tubos que soportaban una tensión baja. Además, se ha hecho uso de la triangulación para distribuir de manera más uniforme dichas tensiones.

Las zonas reforzadas han sido la propia estructura del front hoop, tubo superior del rectángulo donde apoya la suspensión y el tubo perpendicular central de los brazos del front hoop.

6.3.3. Análisis de impacto.

El análisis de impacto es un aspecto crítico en la validación de un chasis ya que este garantiza la seguridad del piloto e integridad estructural del coche en caso de colisión. Estos análisis no solo se ciñen a los requerimientos reglamentarios de la competición, sino que sirven para mejorar el desempeño y la confianza del monoplaza sobre la pista durante las pruebas.

Se realizarán tres tipos de impacto: impacto frontal, impacto lateral e impacto trasero. Esta es una de las situaciones más peligrosas donde la energía que se absorbe es muy elevada por lo que el chasis deberá poder disiparla para minimizar en la medida de lo posible las fuerzas transmitidas al habitáculo donde se encuentra el piloto. Para ello existe un componente fundamental en la parte frontal de la estructura denominada atenuador de impactos la cual actúa deformándose en tal caso absorbiendo parte de la energía que llega al chasis. Esto es lo mencionado anteriormente como deformación programada, lo cual en este tipo de vehículos se encuentra en una parte independiente la cual es anclada al chasis.

6.3.3.1. Impacto frontal

Esta es una de las situaciones más comunes dentro de los impactos en las competiciones ya que se puede deber a un descontrol del vehículo que termine en un choque directo con algún obstáculo en pista.

En este se simulará un choque de 10 g, que es considerable teniendo en cuenta que en esta zona se situará el atenuador de impactos el cual liberará parte de la energía de impacto. Para calcular la carga que se debe aplicar en la parte frontal del chasis se empleará la segunda ley de Newton:

$$F = m * a$$

Donde F es la fuerza aplicada en N, m es la masa del vehículo en kg y a la aceleración en m/s^2 .

$$F_{\text{impacto frontal}} = 306,5 \text{ kg} * 10 * 9,81 \frac{m}{s^2} = 30.067 \text{ N}$$

Esta carga será aplicada en las 5 barras que conforman el morro de la estructura.

Las condiciones de contorno se aplicarán en los nodos del marco trasero del chasis y serán de desplazamiento fijo en las 3 direcciones y rotación libre.

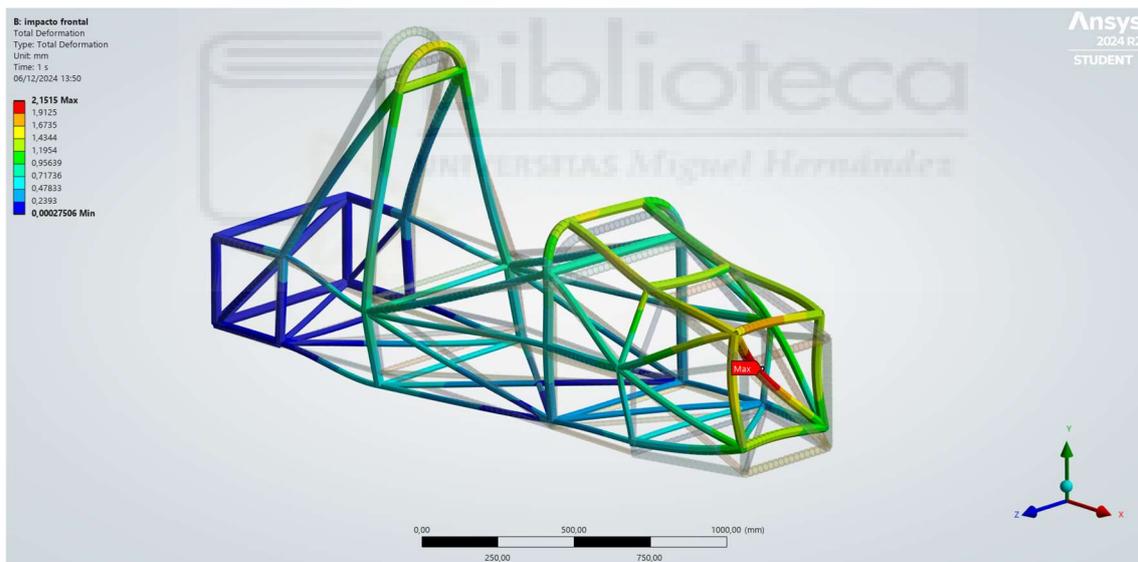


Ilustración 55. Deformación análisis impacto frontal.

La escala utilizada en la representación de la ilustración 55 representa una deformación mayorada 72 veces con respecto a la real.

La mayor deformación que presenta el chasis en esta simulación es de 2,15 mm como se aprecia en la ilustración 55. Esta deformación es considerablemente baja y cumple con el límite establecido de 25 mm.

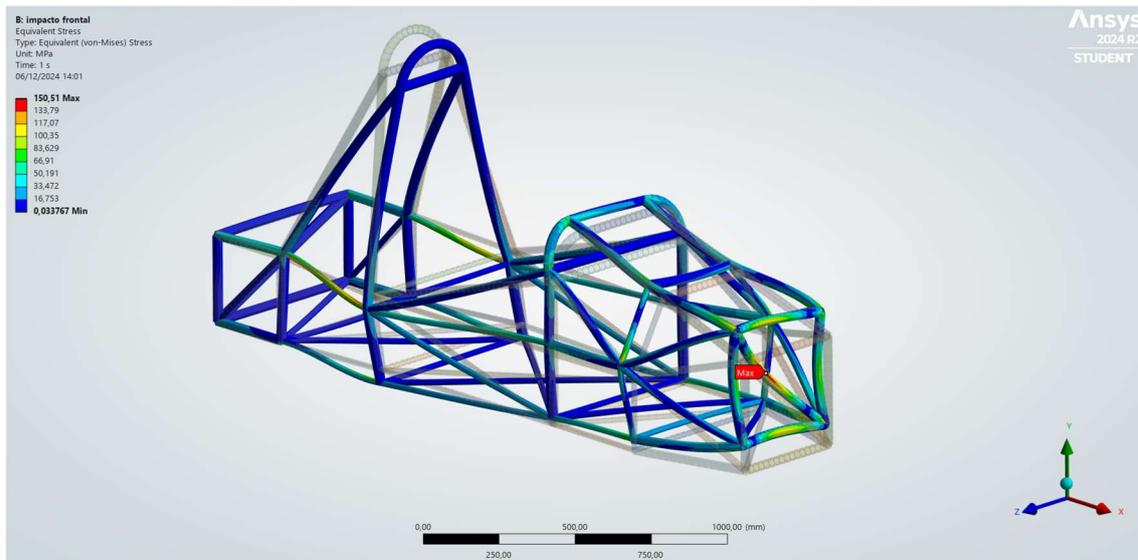


Ilustración 56. Tensión análisis impacto frontal.

La zona más afectada se encuentra en los tubos donde es aplicada la fuerza con una tensión máxima, en el tubo diagonal del morro, de 150,51 MPa. Esta representa un 56 % del límite elástico por lo que cumple y todos los tubos se mantienen en la zona elástica.

Para poder cumplir con este análisis, ha sido necesario aumentar la sección de los tubos que conforman el rectángulo del morro y mejorar la triangulación del suelo en la parte posterior del chasis añadiendo tubos donde apoya el motor.

6.3.3.2. Impacto lateral

El impacto lateral es igualmente importante ya que se puede producir durante las pruebas cuando los monoplazas son expuestos a colisiones con otros vehículos u objetos como las barreras.

Se simulará un impacto perpendicular al plano longitudinal del vehículo con una magnitud de 5 g en la estructura de impacto lateral. Para ello se supondrá una fuerza de:

$$F_{\text{impacto lateral}} = 306,5 \text{ kg} * 5 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 15.033 \text{ N}$$

Esta será aplicada en los 4 tubos que conforman la estructura de impacto lateral.

Las condiciones de contorno para esta simulación serán de desplazamiento fijo en los tres ejes y rotación libre para los nodos de la estructura de impacto lateral opuesta.

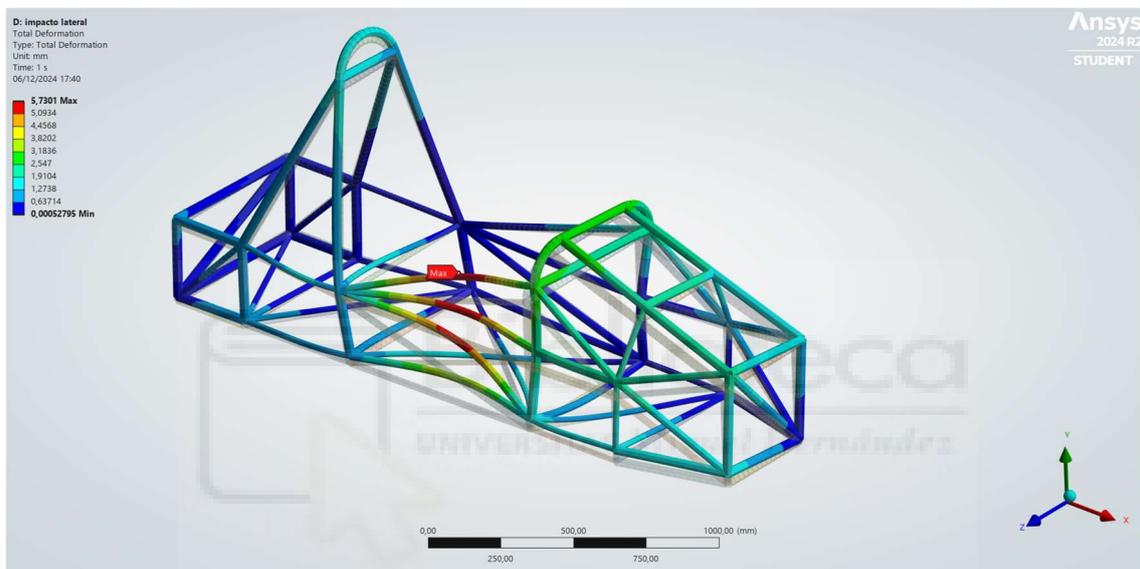


Ilustración 57. Deformación análisis impacto lateral.

La escala utilizada en la representación de la ilustración 57 representa una deformación mayorada 24 veces con respecto a la real.

En esa ilustración podemos ver como la deformación máxima se encuentra dentro del límite con un valor de 5,73 mm.

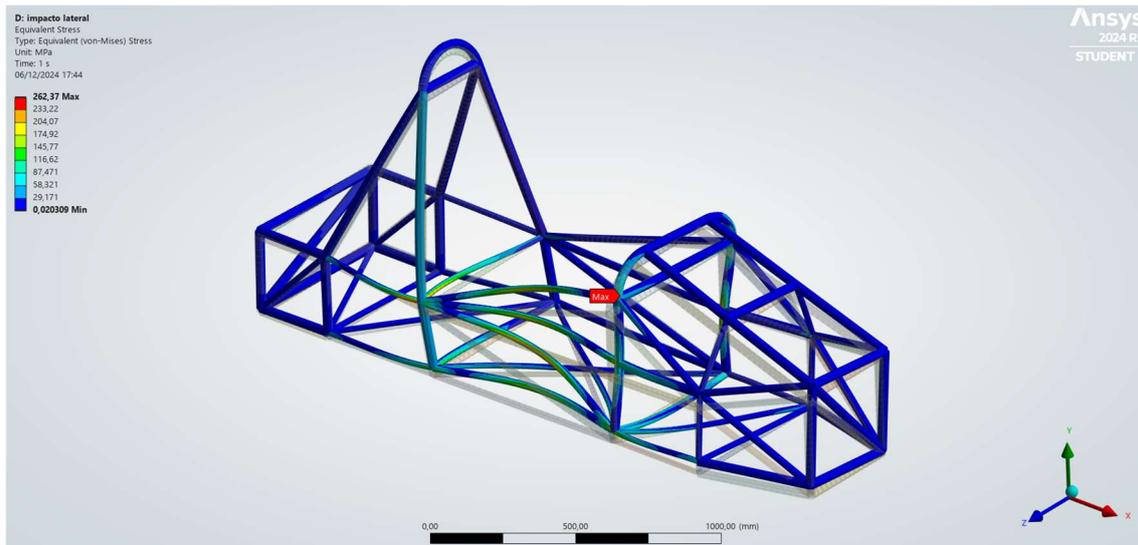


Ilustración 58. Tensión análisis impacto lateral.

En la ilustración 58 se observa que la tensión máxima generada es de 262,27 MPa, ubicada en el aro frontal, la cual se encuentra por debajo del límite elástico del material.

Para esta simulación ha sido necesario reforzar los tubos que componen esta estructura.

6.3.3.3. Impacto trasero

El impacto trasero es un caso que también se puede dar en las competiciones el cual podría ser causado por el choque de otro vehículo o en caso de descontrol del vehículo.

Puesto que se produce por el alcance de otro vehículo, la velocidad relativa entre los vehículos es menor y por ello se considerará 5 g. La fuerza resultante se aplicará en el marco posterior del chasis.

$$F_{\text{impacto trasero}} = 306,5 \text{ kg} * 5 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 15.033 \text{ N}$$

Las condiciones de contorno que se aplicarán en esta simulación serán de desplazamiento fijo en los vértices que componen la parte delantera del chasis dejando la rotación de estos libre.



Ilustración 59. Deformación análisis impacto trasero.

La escala utilizada para la representación de la deformación en la ilustración 59 es de 94:1 para la correcta visualización de esta.

La deformación máxima que se aprecia en la simulación es de 1,47 mm lo cual es un valor bajo y se encuentra dentro de los límites establecidos.

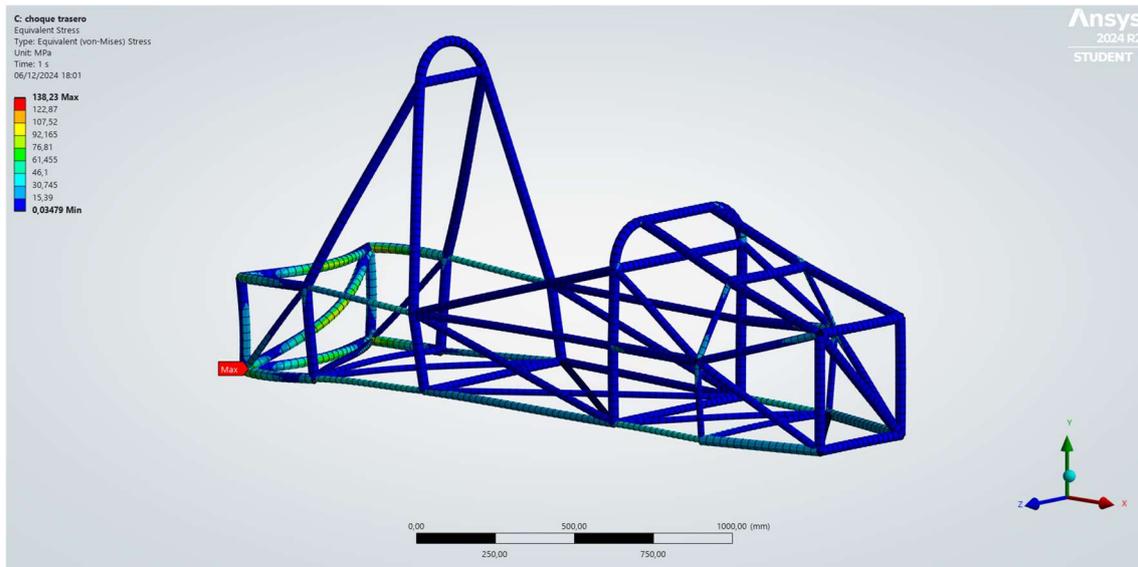


Ilustración 60. Tensión análisis impacto trasero

En la figura 60 se ve que la tensión máxima a la que está sometida la estructura es de 138,23 MPa lo cual indica que se encuentra lejos de la zona plástica y por lo tanto cumple.

Para llegar a esta solución ha sido necesario reforzar con tubos de mayor sección la zona donde se aplica la fuerza y añadir triangulación en el suelo de la zona delantera.

6.3.4. Análisis a torsión

Como se ha comentado con anterioridad, este es un análisis fundamental en el dimensionamiento de un chasis ya que es el que evalúa cómo el chasis responde ante fuerzas torsionales como pueden ser las producidas por el sistema de suspensión o la interacción con el asfalto entre otros.

El resultado de este nos cuantificará la confiabilidad que podemos esperar de este en circuito durante las diferentes pruebas que debe pasar el vehículo. Conseguir un chasis con buena resistencia a torsión

significaría que tendrá un comportamiento predecible y controlado minimizando así la deformación por el efecto de las cargas.

Los equipos más punteros en esta competición rondan los 3000 Nm / ° lo cual es una medida que determina la rigidez torsional del vehículo, cuanto mayor sea este parámetro mejor será el comportamiento del vehículo en pista.

Este análisis se hará fijando la suspensión trasera y aplicando un par de fuerzas equivalentes sobre la suspensión delantera por lo que se producirá un par torsor. Para calcular las fuerzas que se deben aplicar en la suspensión usaremos la siguiente fórmula:

$$T = F * d$$

Donde T es el par torsor expresado en Nm, F es la fuerza aplicada y d es la distancia del punto de aplicación de la fuerza con respecto al plano medio de la estructura.

Puesto que se pretende conseguir un momento torsor de 3000 Nm (arbitrario) y hay un total de 8 puntos, habrá que dividir este entre 8 y en función de la distancia al plano vertical longitudinal se hallará la fuerza que se debe aplicar en cada punto.

Puesto que todas las distancias son iguales (están alineados con dicho plano), el cálculo se simplifica. El momento por nodo será de 375 Nm.

Ubicación	Distancia (d)	Fuerza (F)
Puntos de anclaje delantero izquierda	300 mm	1250 N
Puntos de anclaje delantero derecha	300 mm	-1250 N

Tabla 6. Condiciones de carga análisis de torsión

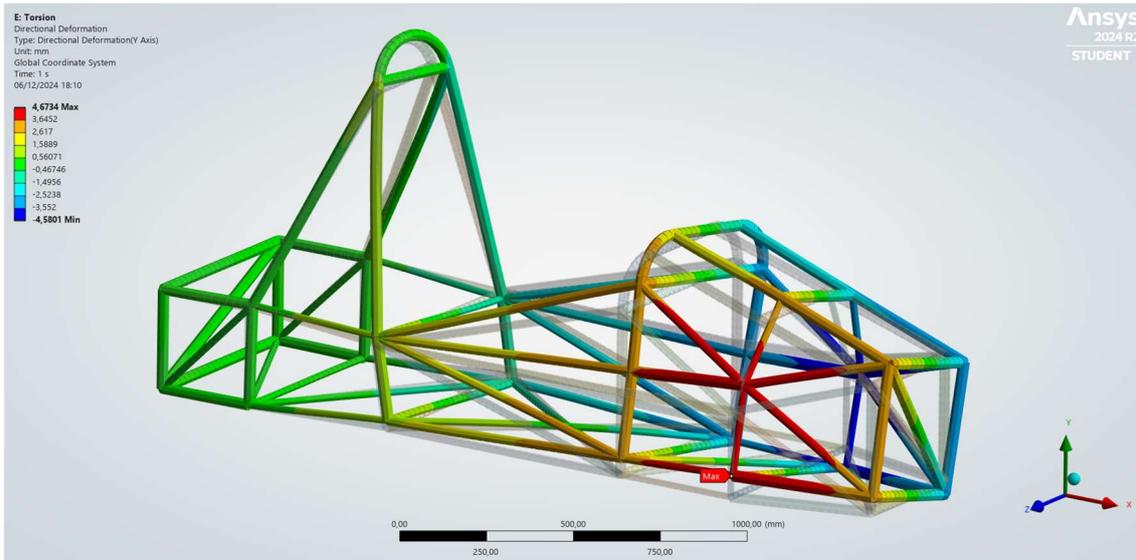


Ilustración 61. Deformación en la dirección vertical análisis torsión.

Para poder hallar el ángulo que usaremos para calcular la rigidez torsional se analizará el mayor de los desplazamientos verticales y la distancia del plano medio a este. Como se puede observar en la ilustración 61, el mayor desplazamiento vertical se encuentra en el anclaje inferior derecho de la suspensión con un valor de 4,67 mm. Para calcular el ángulo se hará con la siguiente ecuación:

$$\tan \theta = \frac{4,67}{300} \rightarrow \theta = 0,89^\circ$$

$$Rigidez = \frac{3000 \text{ Nm}}{0,89^\circ} = 3370 \frac{\text{Nm}}{\circ}$$

Esta es una rigidez torsional alta y competitiva comparándola con el resto de los equipos de Formula student.

Para esta simulación no ha sido necesario modificar ninguna sección del chasis. Esta versión final de este ha sido producto de las modificaciones realizadas por el resto de las simulaciones que se estudian.

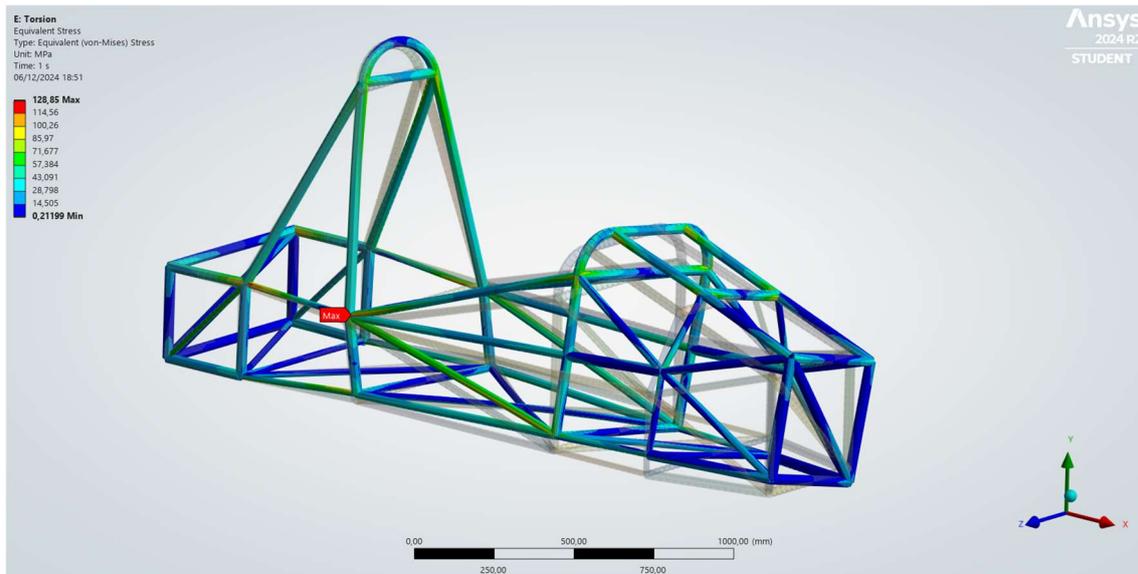


Ilustración 62. Tensión análisis torsión.

La tensión máxima que presenta la estructura representa un 48 % del límite elástico por lo que cumple.

6.3.5. Aceleración

El análisis de esta simulación es fundamental ya que corresponde a una situación usual en la práctica. Cuando el vehículo inicia la marcha, se producen fuerzas de inercia las cuales provocan una transferencia de pesos desde el eje trasero generando reacciones en los neumáticos.

Para este análisis se supondrá una aceleración de 1 g que es la máxima a la que podrá llegar, en condiciones favorables, el vehículo. Esta aceleración se transformará en una fuerza distribuida por todo el vehículo.

Para este análisis se tendrán en cuenta las masas del motor y del piloto situando las fuerzas correspondientes donde irán ubicadas. Para el cálculo de la fuerza que debe ser aplicada por aceleración y por gravedad se utilizará la masa total del vehículo (306,5 kg).

	Dirección i	Dirección j	Dirección k
Piloto	784 N	0 N	-784 N
Motor	686 N	0 N	-686 N
Aceleración	2940 N	0 N	0 N
Gravedad	0 N	0 N	-3000 N

Tabla 7. Condición de carga análisis de aceleración.

En la tabla 7 se detallan las condiciones de carga tenidas en cuenta para la realización de la simulación.

Las condiciones de contorno serán de desplazamiento fijo en la dirección i y j dejando libre la dirección k en los puntos de anclaje de la suspensión delantera. Además, se podrá la barra trasera inferior del vehículo fija en todas las direcciones restringiendo también la rotación.



Ilustración 63. Deformación análisis de aceleración.

La escala de la deformación en la ilustración 63 se ha establecido en 62:1 para poder apreciar las deformaciones.

Como se aprecia en la figura 63 la deformación máxima que presenta la estructura es de 1,31 mm lo cual entra dentro del límite de 25 mm.

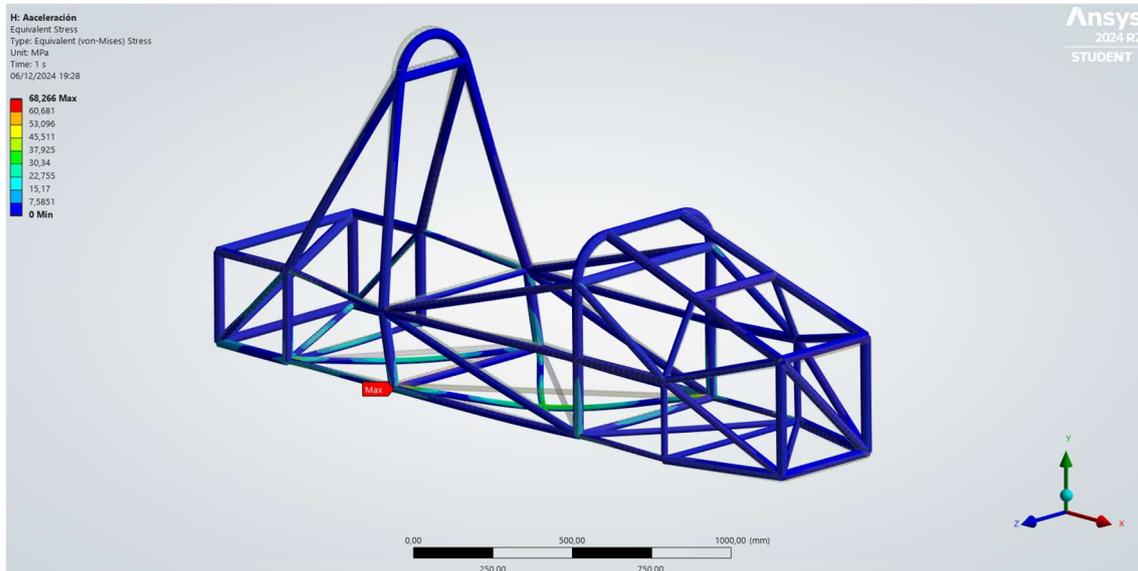


Ilustración 64. Tensión análisis de aceleración.

En la ilustración 64 se puede ver como la tensión máxima se encuentra en el nodo inferior del aro principal con un valor de 68,27 MPa correspondiendo a un 26 % del límite elástico.

6.3.6. Frenada en curva

Este análisis es el más desfavorable ya que combina la deceleración que produce una frenada con la aceleración que se produce hacia el lateral del vehículo por la entrada en curva.

Al frenar, las ruedas dejan de girar y las fuerzas son transmitidas a la estructura a través de las barras de suspensión. Sin embargo, el movimiento de giro de estas permanece libre por las articulaciones de los trapecios de la suspensión.

Para la simulación se considerará una frenada de 100 a 0 km/h en un tramo de 25 m. La aceleración resultante se calcula mediante la fórmula:

$$a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 * (x_1 - x_2)}$$

Donde v_2 es la velocidad final en m/s, v_1 es la velocidad inicial en m/s, x_1 es la posición inicial en m y x_2 es la posición final en m.

Aplicando la fórmula da una aceleración de 15,43 m/s².

Se considerará para la simulación el peso del piloto y del motor además del peso total del vehículo al igual que en el análisis de aceleración. Para la frenada se considerarán 2 g tanto en la frenada como en la curva.

	Dirección i	Dirección j	Dirección k
Piloto	784 N	0 N	-784 N
Motor	686 N	0 N	-686 N
Aceleración	6013 N	6013 N	0 N
Gravedad	0 N	0 N	-3000 N

Tabla 8. Condición de carga análisis de frenada en curva.

Se establecerá como condiciones de contorno desplazamiento y rotación fijos en los anclajes de la suspensión delantera y desplazamiento fijo en la dirección j y k en los anclajes de la suspensión trasera.

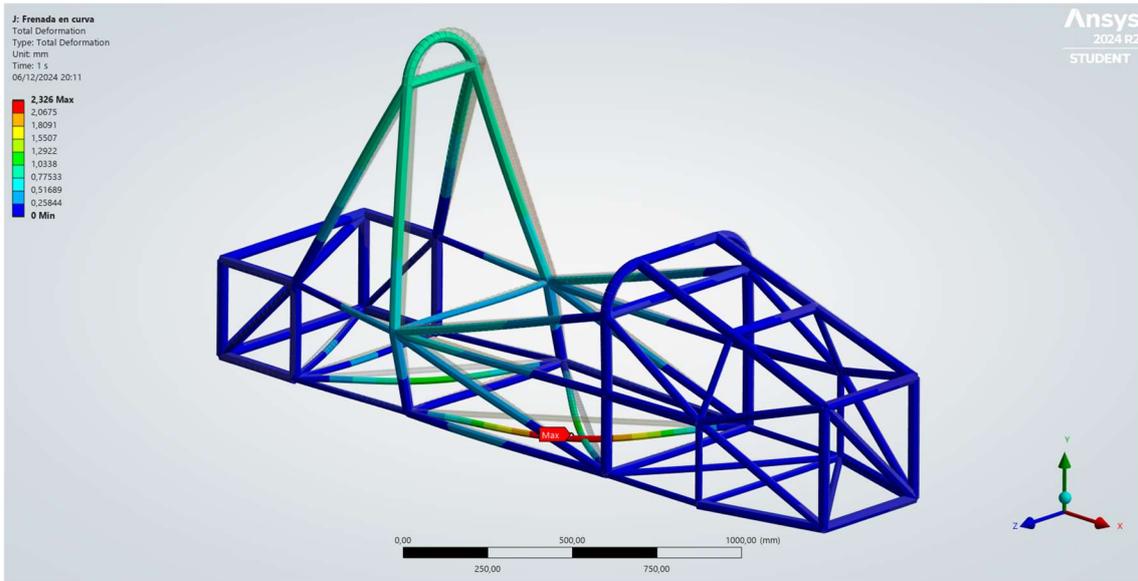


Ilustración 65. Deformación análisis frenada en curva.

La deformación máxima que sufre la estructura es de 2,32 mm por lo que cumple con el límite de 25 mm establecido. La ilustración 65 es representada con una escala 40:1.

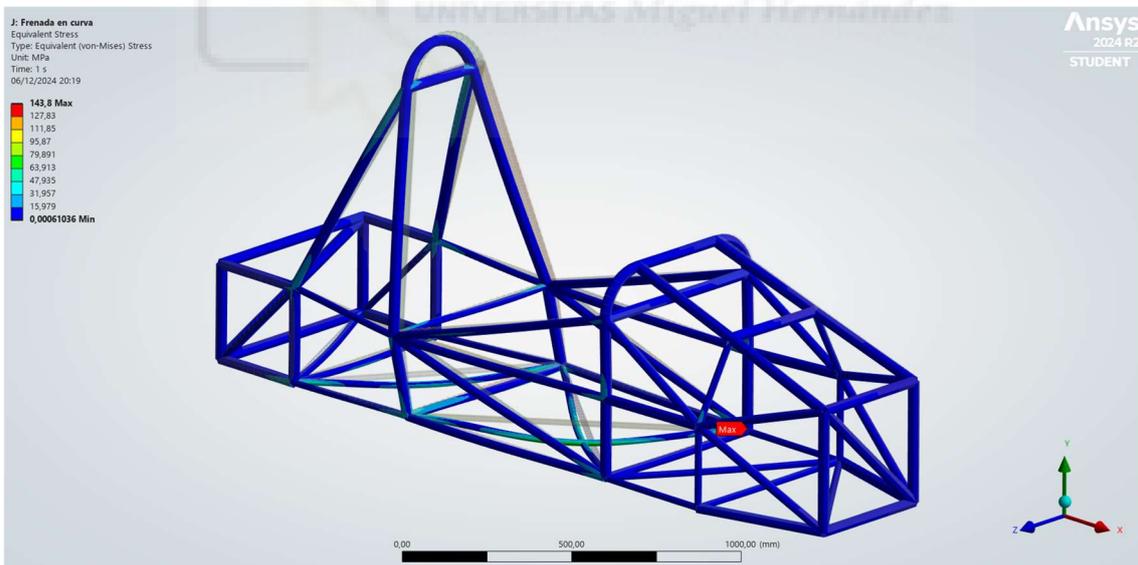


Ilustración 66. Tensión análisis frenada en curva.

La tensión máxima que sufre la estructura en esta simulación es de 143,8 MPa lo cual es inferior al límite elástico (265 MPa).

Tanto para el análisis de aceleración como de frenada en curva, no ha sido necesario hacer ninguna modificación en la estructura ya que con las restricciones del resto de simulaciones cumple perfectamente con los límites establecidos.



7 PRESUPUESTO

UNIVERSITAS Miguel Hernández

7.1. Perfilera

Para el cálculo de presupuesto de los perfiles se ha obtenido un precio por metro lineal de cada tipo de perfil en función del precio de mercado tras comparar varios proveedores de tubos. A las longitudes se añadirá un 15% para calcular el presupuesto de cada tipo de perfil para cubrir las pérdidas de material debida a la optimización de las barras y posibles fallos en la fabricación.

Perfil	Precio por metro lineal	Longitud	Precio total
26,9x2,5	4,38 €/ml	11,03 m	55,56 €
21,3x2	3,52 €/ml	12,30 m	49,79 €
33,7x2,5	5,27 €/ml	12,30 m	74,54 €
TOTAL		35,63 m	179,89 €

Tabla 9. Presupuesto de perfilera

7.2. Soldadura

7.2.1. Material

Se estimará una garganta de 3 mm y un precio de consumible de 8 €/kg. El volumen de consumible necesario será calculado por metro de cordón de soldadura. Posteriormente este se multiplicará por la densidad y por el precio para obtener el precio por metro lineal. Este se multiplicará por los metros totales aplicando un margen de un 10%.

$$A_{sección} = \frac{1}{2} * 3 * 3 = 4.5 \text{ mm}^2$$

$$Volumen = \text{Área} * \text{Longitud} = 4.5 \text{ mm}^2 * 1000 \text{ mm} = 4500 \text{ mm}^3 = 4.5 \text{ cm}^3$$

$$\frac{\text{Peso}}{\text{metro lineal}} = 4.5 \text{ cm}^3 * 7.85 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 35.33 \text{ g}$$

Supongo una eficiencia de peso del 90 %:

$$\frac{\text{Peso neto}}{\text{metro lineal}} = \frac{35.33}{0.9} = 39.26 \text{ g}$$

$$\frac{\text{Coste}}{\text{m}} = 0.03926 \text{ kg} * 8 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 0.32 \frac{\text{€}}{\text{m}}$$

Perfil	Nº de tubos	Perímetro/tubo	Longitud total	Precio total
26,9x2,5	16	0,34 m	5,41 m	1,73 €
21,3x2	24	0,27 m	6,42 m	2,05 €
33,7x2,5	34	0,42 m	14,39 m	4,61 €
TOTAL				8,39 €

Tabla 10. Presupuesto consumible soldadura.

Esto representa un valor bajo en comparación con el coste total, pero es necesario contemplarlo.

7.2.2. Mano de obra

Para la mano de obra se estimarán 4 minutos por cordón de soldadura y un coste de soldador de 19 €/h. Para obtener dicho valor se multiplicarán los 4 minutos por cordón por 2 cordones que necesita cada barra y a esto se multiplicará por el número total de barras para obtener el tiempo total de soldadura que es necesario.

$$\text{Tiempo de soldadura} = 4 \frac{\text{min}}{\text{cordón}} * 2 \frac{\text{cordones}}{\text{tubo}} * 74 \text{ tubos} = 592 \text{ min}$$

$$\text{Coste} = 19 \frac{\text{€}}{\text{h}} * 9.9 \text{ h} = 188.1 \text{ €}$$

Desglose:

Tipo	Coste
Perfilería	179,89 €
Hilo soldadura	8,39 €
Mano de obra soldadura	181,10 €
TOTAL	369,38 €

Tabla 11. Presupuesto mano de obra soldadura.



Bibliografía

[1] Anónimo. “Origen Formula SAE”

URL: https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%B3rmula_Student

[Fecha de consulta: 12/11/2024]

[2] Anónimo. “Formula Student 2025” URL:

<https://www.imeche.org/events/formula-student>

[Fecha de consulta: 15/11/2024]

[3] Anónimo. “Pruebas de la competición y puntuación”

URL: <https://www.global-formula-racing.com/en/formula-student/>

[Fecha de consulta: 17/11/2024]

[4] Anónimo. “Descripción de los departamentos”

URL: <https://soymotor.com/coches/articulos/formula-uc3m-y-las-claves-del-exito-956003>

[Fecha de consulta: 20/11/2024]

[5] DEREK SEWARD “Race car design”. Editorial Red Globe Press. 2014

[6] Anónimo. “Lancia Lambda”

URL: https://es.wikipedia.org/wiki/Lancia_Lambda

[Fecha de consulta: 20/11/2024]

[7] Anónimo. “Formula Student Germany (FSG) rules”

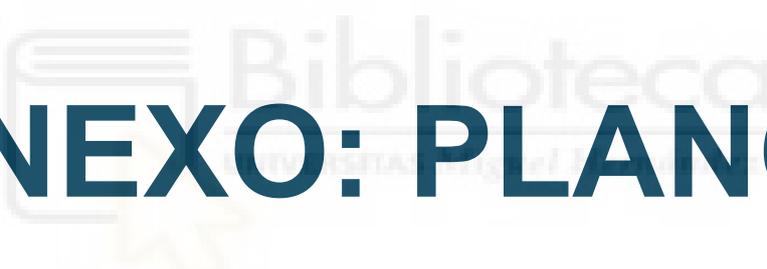
URL: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>

[Fecha de consulta: 20/11/2024]

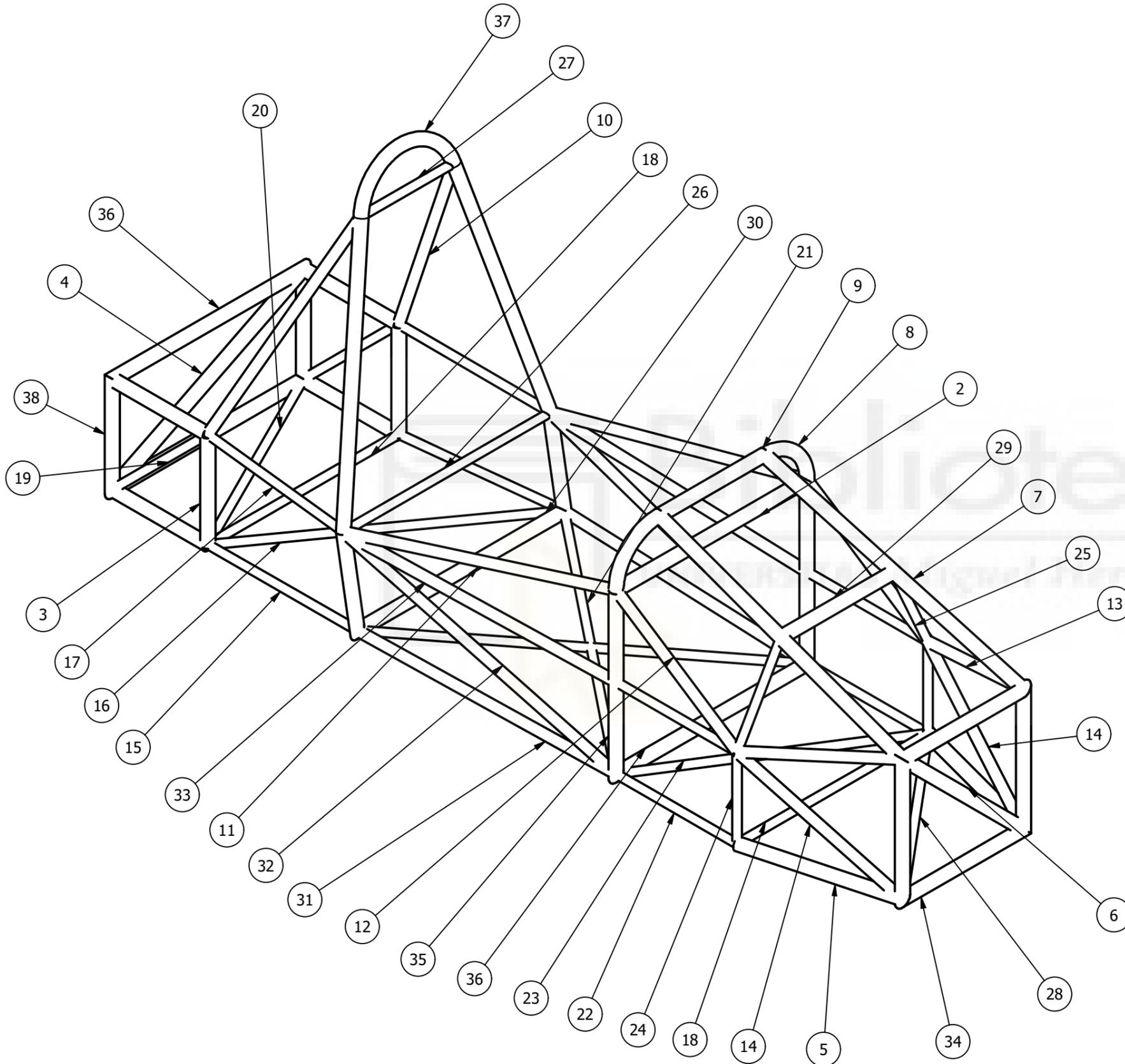
[8] Anónimo. “Análisis de elementos finitos”

URL: <https://femexpert.es/teoria-mef/>

[Fecha de consulta: 29/11/2024]



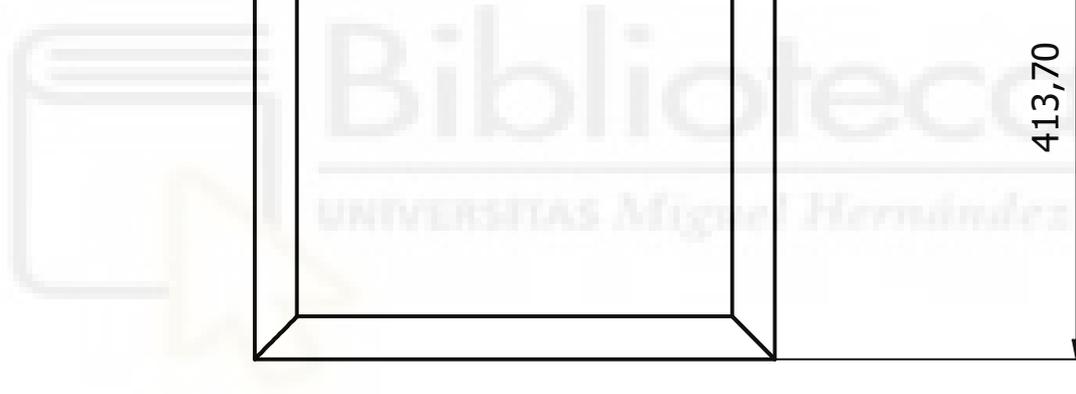
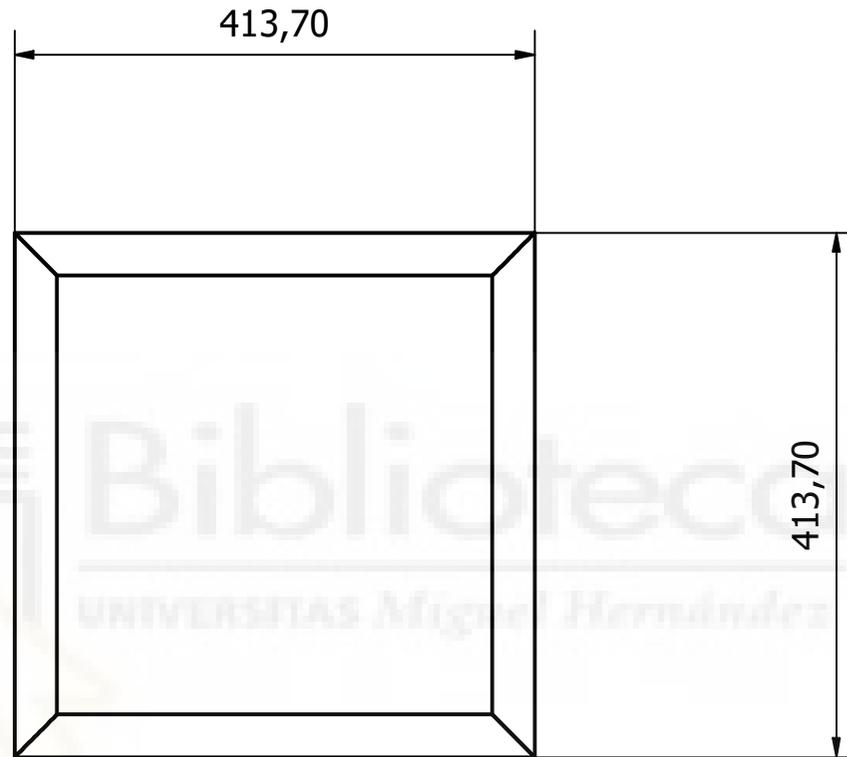
ANEXO: PLANOS

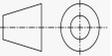


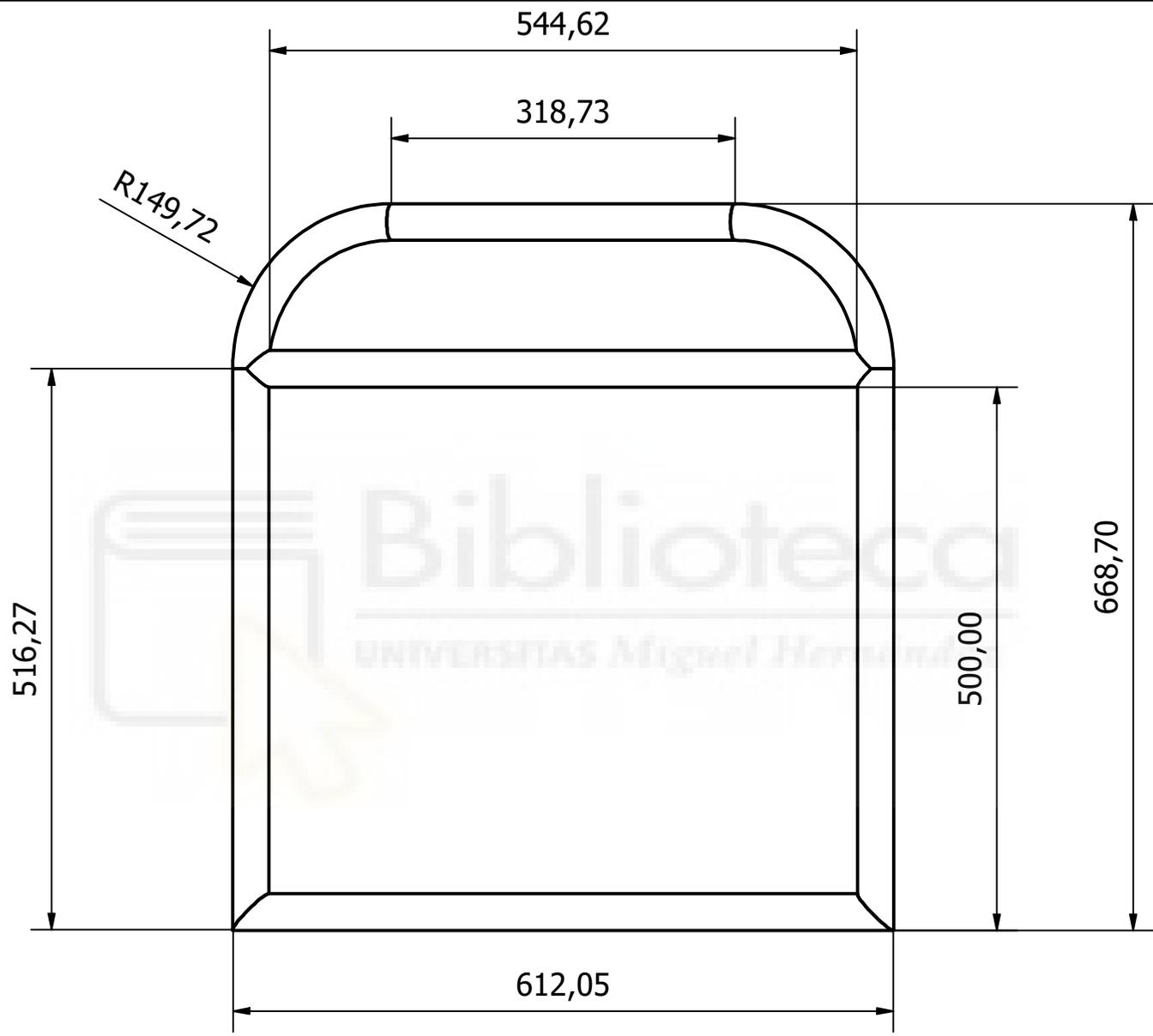
LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
2	600,000 mm	ISO 10799-2 - 33.7x2.5 - 600
3	1800,000 mm	ISO 10799-2 - 33.7x2.5 - 300
4	670,820 mm	ISO 10799-2 - 33.7x2.5 - 670,82
5	848,999 mm	ISO 10799-2 - 33.7x2.5 - 424,5
6	537,401 mm	ISO 10799-2 - 33.7x2.5 - 537,4
7	1661,024 mm	ISO 10799-2 - 33.7x2.5 - 830,51
8	424,115 mm	ISO 10799-2 - 33.7x2.5 - 212,06
9	330,000 mm	ISO 10799-2 - 33.7x2.5 - 330
10	1537,445 mm	ISO 10799-2 - 26.9x2.5 - 768,72
11	1735,158 mm	ISO 10799-2 - 26.9x2.5 - 867,58
12	909,725 mm	ISO 10799-2 - 26.9x2.5 - 454,86
13	887,919 mm	ISO 10799-2 - 26.9x2.5 - 443,96
14	985,292 mm	ISO 10799-2 - 26.9x2.5 - 492,65
15	992,195 mm	ISO 10799-2 - 21.3x2.0 - 496,1
16	797,567 mm	ISO 10799-2 - 21.3x2.0 - 797,57
17	905,764 mm	ISO 10799-2 - 21.3x2.0 - 452,88
18	1200,000 mm	ISO 10799-2 - 21.3x2.0 - 600
19	848,528 mm	ISO 10799-2 - 21.3x2.0 - 424,26
20	670,820 mm	ISO 10799-2 - 21.3x2.0 - 670,82
21	2012,095 mm	ISO 10799-2 - 21.3x2.0 - 1006,05
22	1520,000 mm	ISO 10799-2 - 21.3x2.0 - 380
23	710,211 mm	ISO 10799-2 - 21.3x2.0 - 710,21
24	500,000 mm	ISO 10799-2 - 21.3x2.0 - 250
25	571,095 mm	ISO 10799-2 - 21.3x2.0 - 285,55
26	623,684 mm	ISO 10799-2 - 21.3x2.0 - 623,68
27	264,899 mm	ISO 10799-2 - 21.3x2.0 - 264,9
28	638,905 mm	ISO 10799-2 - 21.3x2.0 - 638,91
29	355,000 mm	ISO 10799-2 - 33.7x2.5 - 355
30	683,700 mm	ISO 10799-2 - 33.7x2.5 - 683,7
31	1577,506 mm	ISO 10799-2 - 26.9x2.5 - 788,75
32	1740,267 mm	ISO 10799-2 - 26.9x2.5 - 870,13
33	1664,227 mm	ISO 10799-2 - 26.9x2.5 - 832,11
34	1654,800 mm	ISO 10799-2 - 33.7x2.5 - 413,7
35	1033,700 mm	ISO 10799-2 - 33.7x2.5 - 516,85
36	1901,100 mm	ISO 10799-2 - 33.7x2.5 - 633,7
37	2409,213 mm	ISO 10799-2 - 33.7x2.5 - 2409,21
38	667,400 mm	ISO 10799-2 - 33.7x2.5 - 333,7

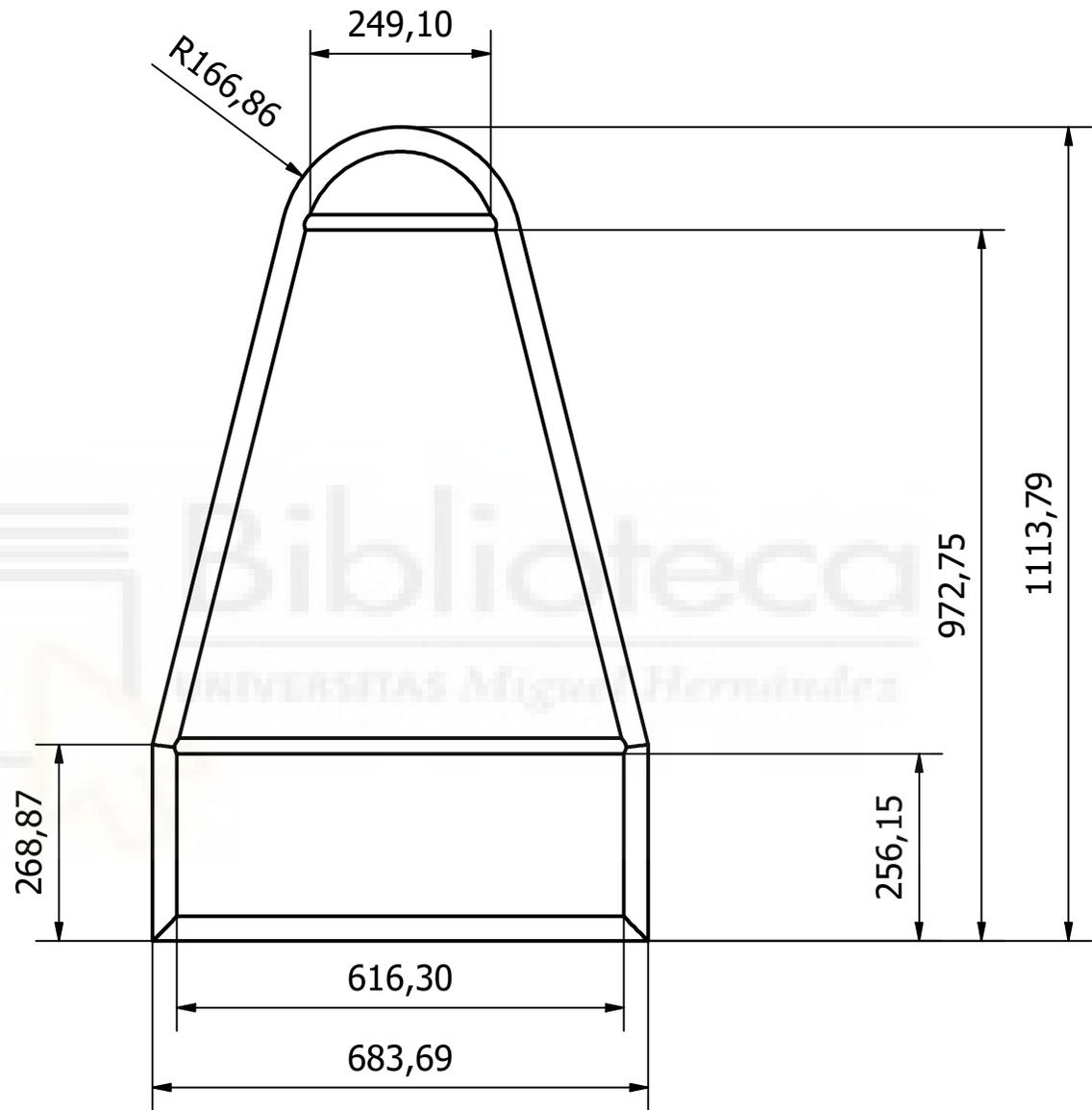
DISEÑADO POR: Carlos Sánchez de la Nieta Gil	ESCALA: 1:10	FECHA: 07/12/2024		
UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE		CONJUNTO: PARTES CHASIS		TAMAÑO HOJA: A3
				HOJA: 1/6

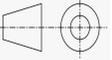


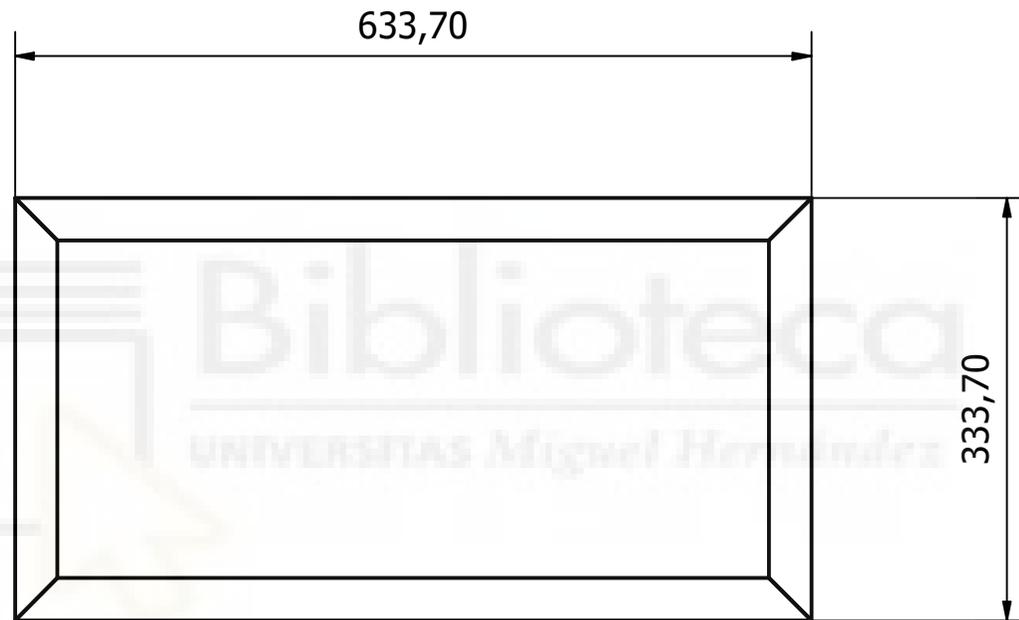
DISEÑADO POR: Carlos Sánchez de la Nieta Gil	ESCALA: 1:6	FECHA: 07/12/2024		
UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE	PARTE: MAMPARO DELANTERO	MATERIAL: P265GH		
	CONJUNTO: PLANOS CHASIS	HOJA: 2/6		

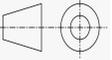


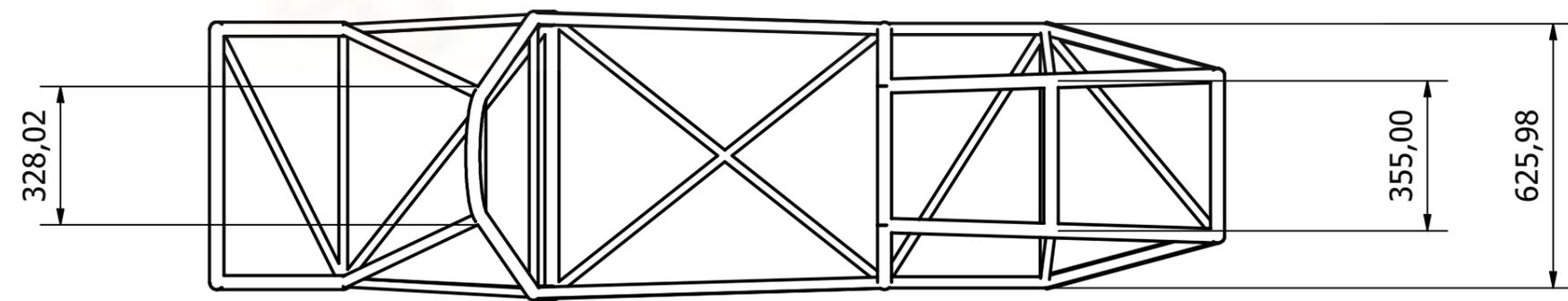
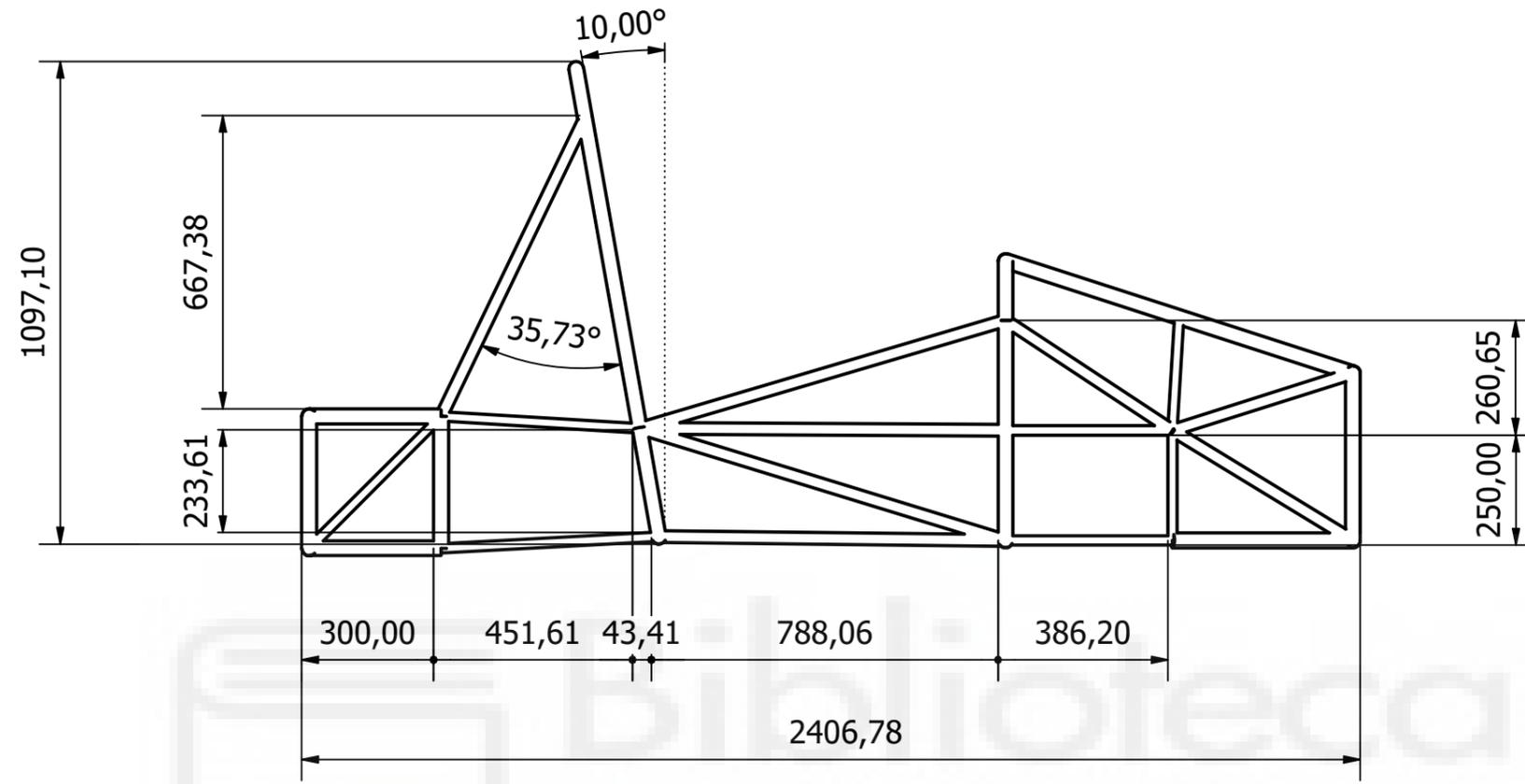
DISEÑADO POR: Carlos Sánchez de la Nieta Gil	ESCALA: 1:6	FECHA: 07/12/2024		
UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE	PARTE: FRONT HOOP	MATERIAL: P265GH		
	CONJUNTO: PLANOS CHASIS	HOJA: 2/5		



DISEÑADO POR: Carlos Sánchez de la Nieta Gil	ESCALA: 1:10	FECHA: 07/12/2024		
UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE	PARTE: MAIN HOOP		MATERIAL: P265GH	
	CONJUNTO: PLANOS CHASIS		HOJA: 4/6	



DISEÑADO POR: Carlos Sánchez de la Nieta Gil	ESCALA: 1:6	FECHA: 07/12/2024		
UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE	PARTE: MAMPARO TRASERO	MATERIAL: P265GH		
	CONJUNTO: PLANOS CHASIS	HOJA: 5/6		



Biblioteca
UNIVERSITAS Miguel Hernández

DISEÑADO POR: Carlos Sánchez de la Nieta Gil	ESCALA: 1:15	FECHA: 07/12/2024		
UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE	PARTE: CHASIS		MATERIAL: P265GH	
	CONJUNTO: PLANOS CHASIS		HOJA: 6/6	