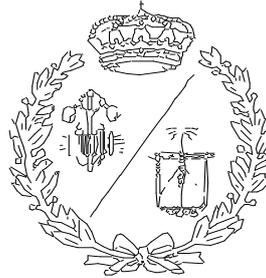


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

**DISEÑO CHASIS TUBULAR DE UN
VEHICULO PARA LA FORMULA STUDENT
EDICIÓN 2023.**

**Tubular chassis design of a vehicle for
Formula Student 2023 Edition.**

Para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Francisco Cagigas Quintana

Julio - 2023

RESUMEN

El presente trabajo de fin de grado tiene como objetivo principal el diseño y el análisis estructural del chasis tubular de un vehículo para la participación en la Fórmula Student. Actualmente, la Universidad de Cantabria no cuenta con equipo de fórmula Student preparado para la competición, aun así, este proyecto puede servir para futuros alumnos en la realización del monoplaza con reglamentación actualizada.

La Fórmula Student busca que sean los propios alumnos de ingeniería quienes conciben, diseñen, fabriquen y desarrollen el monoplaza, además de su futura participación en competiciones contra universidades de todo el mundo.

El primer paso es la realización del diseño, esta parte es fundamental a la hora de fabricar un monoplaza ya que para poder homologar el vehículo y que pueda participar en la competición debe cumplir la normativa descrita por los organizadores, además de esto, también se debe trabajar en la búsqueda de las mejores soluciones de seguridad, comodidad, prestaciones, manejabilidad consiguiendo un equilibrio entre ellas. Para ello se realiza un estudio de la normativa y de los modelos de chasis tubulares de los equipos punteros.

El primer diseño que se obtiene tras tener en cuenta la normativa es un boceto alámbrico mediante el software Autodesk Inventor que define la estructura principal del chasis tubular.

Posteriormente, se decide el diámetro y el material a utilizar en los perfiles de los tubos que formarán el chasis. También se decide el motor a utilizar y su ubicación teniendo en cuenta su tamaño y la forma de trabajo, simplemente se toma esta decisión para la instalación de los soportes motor en sus lugares correspondientes y para el dimensionamiento adecuado de la parte trasera del chasis.

Una vez obtenido el diseño final, se realizan los ensayos establecidos por normativa y algunos más como los análisis de flexión, torsión y el modal. Para ello se creará un modelo simplificado para su análisis estructural en el software Nastran-Patran en el cual se realizarán análisis estáticos y dinámicos para obtener tensiones y deformaciones en la estructura.

Posteriormente, se analizan y estudian los resultados obtenidos comprobando si cumplen con la normativa, si pueden afectar a la seguridad del piloto, si se pueden



realizar mejoras de diseño para finalmente conseguir el diseño más competitivo y seguro posible.

Finalmente, se establece el proceso de fabricación con pasos y presupuestos detallados y los planos necesarios para su fabricación.

ABSTRACT

The main objective of this final degree project is the design and structural analysis of the tubular chassis of a vehicle for participation in the Formula Student. Currently, the University of Cantabria does not have a Formula Student team ready for competition. Nevertheless, this project can serve future students in the construction of the single-seater with updated regulations.

The Formula Student seeks to have engineering students conceive, design, manufacture, and develop the single-seater, as well as participate in competitions against universities from around the world.

The first step is the design, which is crucial in the manufacturing of a single-seater. In order to homologate the vehicle and allow its participation in the competition, it must comply with the regulations described by the organizers. Additionally, it is necessary to work on finding the best solutions in terms of safety, comfort, performance, and maneuverability, achieving a balance between them. This involves studying the regulations and the tubular chassis models of leading teams.

The initial design, taking into account the regulations, is obtained as a wireframe sketch using Autodesk Inventor software, which defines the main structure of the tubular chassis.

Subsequently, the diameter and material to be used for the tube profiles that will form the chassis are decided. The choice of the engine and its location are also determined, considering its size and working method. This decision is made to install the motor supports in their corresponding positions and to properly size the rear part of the chassis.

Once the final design is obtained, the tests established by regulations are conducted, as well as additional analyses such as bending, torsion, and modal analysis. For this purpose, a simplified model will be created for structural analysis using Nastran-Patran software, performing static and dynamic analyses to obtain stresses and deformations in the structure.

Subsequently, the obtained results are analyzed and studied to verify compliance with the regulations, assess their impact on the pilot's safety, and identify possible design improvements. The ultimate goal is to achieve the most competitive and safe design possible.



Finally, the manufacturing process is established, including detailed steps, budgets, and the necessary blueprints for production.



ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTO I: MEMORIA (PÁG 4-57)

DOCUMENTO II: ANEXOS DE CÁLCULOS (PÁG 58-98)

DOCUMENTO III: PLANOS (PÁG 99-107)

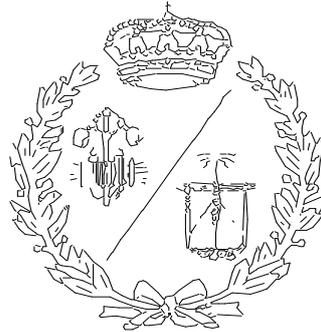
DOCUMENTO IV: PLIEGO DE CONDICIONES (PÁG 108-124)

DOCUMENTO V: PRESUPUESTO (PÁG 125-130)



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

DOCUMENTO I: MEMORIA

Autor: Francisco Cagigas Quintana

Julio - 2023

ÍNDICE MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVO	2
3. INTRODUCCIÓN A LA COMPETICIÓN	4
3.1. FÓRMULA STUDENT COMPETICIÓN	4
3.2. EVENTOS DE LA COMPETICIÓN	5
3.3. COMPETIDORES Y EVOLUCIÓN EN ESPAÑA	8
3.4. FÓRMULA STUDENT CANTABRIA	9
4. CHASIS	10
4.1. TIPOS DE CHASIS	12
4.1.1. CHASIS INDEPENDIENTE	12
4.1.2. CHASIS AUTOPORTANTE O MONOCASCO:	13
4.1.3. CHASIS TUBULAR	15
4.2. CHASIS FORMULA SAE	15
4.2.1. PARTES CHASIS TUBULAR SAE	16
5. PLANTEAMIENTO DE DISEÑO	18
5.1. REQUISITOS DE DISEÑO	18
5.2. REQUISITOS DEL MATERIAL	24
5.3 REQUISITOS ESTRUCTURALES	25
5.3.1. RIGIDEZ A FLEXIÓN	27
5.3.2. RIGIDEZ A TORSIÓN	27
6. ANÁLISIS DE SOLUCIONES	28
6.1. ELECCIÓN TIPO DE CHASIS	28
6.2. ELECCIÓN DEL MATERIAL	29
6.3. ELECCIÓN DEL MOTOR	32
7. OBTENCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL	34
7.1. DIMENSIONAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA NORMATIVA	35
7.2. DIMENSIONAMIENTO EN FUNCIÓN DEL MOTOR	37
7.3. DIMENSIONAMIENTO EN FUNCIÓN DE LAS CARGAS ACTUANTES	38
7.3.1. CHASIS	38
7.3.2. PILOTO	39
7.3.3. MOTOR	40
7.3.4. SUSPENSIONES	41
7.3.5. DEPÓSITO	41



7.3.6. BATERÍA	42
7.4. CONJUNTO DE MASAS FINAL	42
8. OBTENCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO FINAL	44
9. REFERENCIAS	48

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1 -PARRILLA DE EQUIPOS PARTICIPANTES EN EL AÑO 2019 (CIRCUITO DE MONTMELÓ) ..	4
ILUSTRACIÓN 2 -SCORING PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y DE COMBUSTIÓN	6
ILUSTRACIÓN 3 -MONOPLAZA REALIZANDO PRUEBA DINÁMICA.....	7
ILUSTRACIÓN 4 -EQUIPO "FSTUDENT CANTABRIA" 2018-2019.....	9
ILUSTRACIÓN 5 -EQUIPO UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID, "MAD FORMULA TEAM" 2023-2024..	9
ILUSTRACIÓN 6 -DISTRIBUCIÓN DE MATERIALES EN FUNCIÓN DE LA ZONA DEL VEHÍCULO	11
ILUSTRACIÓN 7 -JAULA DE SEGURIDAD	11
ILUSTRACIÓN 8 -VEHÍCULO CON CHASIS INDEPENDIENTE	12
ILUSTRACIÓN 9 -EJEMPLO CHASIS AUTOPORTANTE	13
ILUSTRACIÓN 10 -ENTALLAS DEFORMACIÓN PROGRAMADA	13
ILUSTRACIÓN 11 -CHASIS MONOCASCO DE FIBRA DE CARBONO	14
ILUSTRACIÓN 12 -CHASIS EN "X" HONDA S2000	14
ILUSTRACIÓN 13 -CHASIS TUBULAR	15
ILUSTRACIÓN 14 -CHASIS MONOCASCO DE FIBRA DE CARBONO	16
ILUSTRACIÓN 15 -CHASIS TUBULAR	16
ILUSTRACIÓN 16 -PARTES CHASIS TUBULAR FÓRMULA STUDENT	17
ILUSTRACIÓN 17 -TRIANGULACIÓN NODO A NODO	18
ILUSTRACIÓN 18 -REQUISITOS DE FRONT HOOP BRACING, MAIN HOOP BRACING AND STEERING WHEEL.	21
ILUSTRACIÓN 19 -REQUISITOS ESTRUCTURA DE IMPACTO LATERAL	21
ILUSTRACIÓN 20 -PLANTILLAS COCKPIT	22
ILUSTRACIÓN 21 -DISTANCIA ENTRE CASCO Y PUNTO SUPERIOR ARCOS	23
ILUSTRACIÓN 22 -PERCENTIL DE TAMAÑO 95% HUMANO.	24
ILUSTRACIÓN 23 -VEHÍCULO CON CHASIS TUBULAR.....	28
ILUSTRACIÓN 24 -CHASIS DE FIBRA DE CARBONO.	29
ILUSTRACIÓN 25 -MOTOR YZF-R6 EN CHASIS TUBULAR DE UN FORMULA STUDENT.	33
ILUSTRACIÓN 26 -DIMENSIONAMIENTO EN FUNCIÓN DEL PERCENTIL DEL 95%.	35
ILUSTRACIÓN 27 -DIMENSIONAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA MÍNIMA ENTRE EJES.	36
ILUSTRACIÓN 28 -DIMENSIONAMIENTO EN FUNCIÓN DE LAS PLANTILLAS DEL COCKPIT.	36



ILUSTRACIÓN 29 -DUMMIE Y MOTOR INSERTADO EN LA ESTRUCTURA ALÁMBRICA	37
ILUSTRACIÓN 30 -ENSAMBLAJE MOTOR Y CHASIS.	37
ILUSTRACIÓN 31 -DISTRIBUCIÓN POR COLORES DE LOS PERFILES TUBULARES UTILIZADOS	39
ILUSTRACIÓN 32 -MODELO GEOMÉTRICO 3D DEL MOTOR.	40
ILUSTRACIÓN 33 -MODELO FÍSICO REAL DEL MOTOR.	40
ILUSTRACIÓN 34 -SUSPENSIÓN DE DOBLE BRAZO.	41
ILUSTRACIÓN 35 -TRIANGULACIÓN DE BARRAS EN LA ZONA DELANTERA DEL CHASIS.....	43
ILUSTRACIÓN 36 -TRIANGULACIÓN DE BARRAS EN LA ZONA TRASERA DEL CHASIS.	43
ILUSTRACIÓN 37 -MODELO CHASIS 1.....	44
ILUSTRACIÓN 38 -MODELO CHASIS 2.....	45
ILUSTRACIÓN 39 -MODELO CHASIS 3.....	45
ILUSTRACIÓN 40 -ENSAMBLAJE MOTOR, PILOTO Y CHASIS.	46

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 -EQUIPOS ESPAÑOLES PARTICIPANTES.	8
TABLA 2 -REQUISITOS MÍNIMOS DE SECCIÓN.	25
TABLA 3 -PROPIEDADES ACEROS ELEGIDOS.	31
TABLA 4 -ALTERNATIVAS CHASIS.	38
TABLA 5 -CONJUNTO DE MASAS FINALES.	42
TABLA 6 -SECCIONES UTILIZADAS EN EL CHASIS PARA LOS ANÁLISIS.....	46
TABLA 7 -RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS.....	47



1. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de fin de grado se relata una pequeña parte de mi aprendizaje, desde el manejo de diferentes herramientas para un correcto diseño hasta la fabricación del propio chasis, la historia de la competición entre universidades y mi gran pasión por el mundo del motor.

Desde una temprana edad, mi admiración por la velocidad, la adrenalina y la ingeniería detrás de los coches ha sido constante en mi vida, siendo siempre un gran admirador de la disciplina, sin embargo, mi compromiso con este mundo del motorsport va más allá de ser un simple espectador y por ello he decidido transformar mi pasión en un desafío académico.

Actualmente en la Universidad de Cantabria no se cuenta con un equipo de Fórmula Student, esto me ha valido para la creación del chasis tubular y para la motivación de futuros alumnos a formar parte del equipo, por ello esta competición me ofrece oportunidades de crecimiento personal en cuanto al tema del motorsport y al trabajo en equipo.

Por otra parte, la elección y realización de este proyecto se basa en mis motivaciones iniciales que surgieron antes de mi entrada en el grado de Mecánica, y que están estrechamente relacionadas con mi pasión por el mundo del motor. Además, está en sintonía con mis aspiraciones futuras de realizar estudios de máster, así como mi experiencia previa en el sector automotriz y mi búsqueda de oportunidades laborales en el ámbito de la automoción de alto nivel.

Este proyecto se presenta como un complemento ideal para los conocimientos adquiridos en el grado y experiencia profesional previa, aportando un valor significativo a mis estudios.



2. OBJETIVO

El objetivo principal de este proyecto consiste en establecer las pautas de diseño, análisis y fabricación de un chasis tubular reglamentario para la participación en la Fórmula SAE o Fórmula Student. El equipo de la Universidad de Cantabria ya cuenta con un prototipo de chasis tubular, pero el modelo está basado en la normativa del año 2016, por lo que este proyecto puede servir a próximos alumnos para la fabricación del monoplaza más actualizado de acuerdo con la normativa actual.

Por un lado, se busca conseguir el mejor diseño posible, esto no significa diseñar un chasis que únicamente cumpla con la normativa, si no buscar las soluciones más innovadoras y eficientes que puedan dar consigo lugar a la creación de un chasis con elevado rendimiento. Para ello se realiza una investigación previa sobre la competición y los equipos más dominantes.

Además, se debe asegurar la integridad del piloto en caso de accidente, que tenga una ergonomía adecuada, y por supuesto también se debe trabajar en búsqueda de un peso adecuado el cual afecta directamente al rendimiento del monoplaza. También, la rigidez es muy importante de cara a la conducción del monoplaza ofreciendo al piloto un mejor manejo del monoplaza, por ello se deben tener en cuenta tanto la rigidez a flexión como la rigidez a torsión del chasis.

Por otro lado, la altura del centro de gravedad es también un aspecto muy relevante ya que una altura excesiva puede producir balanceos y aceleraciones laterales no deseados en entradas a curva.

Para conseguir el diseño final se ha trabajado con diferentes soluciones de chasis hasta obtener las soluciones deseadas que aseguren tanto la seguridad del piloto como un buen rendimiento del monoplaza y además se adapte al reglamento. También se razonan todos los costes del monoplaza, explicando materiales y procesos de fabricación empleados.

Para la comprobación del diseño se realizan pruebas en software de análisis de elementos finitos donde se le aplican al chasis una serie de casos de cargas estipulados por normativa a las que puede verse afectado en su uso, tras esto se analizan los resultados obtenidos llegando a las conclusiones correspondientes. A su vez, se deben conocer los diferentes tipos de aceros que se adaptan a la norma de la competición y escoger entre ellos en función de las características buscadas.



Por último, y como objetivo personal para la elección y realización de este proyecto me he basado en mis motivaciones previas al estudio del grado relacionados con el mundo del motor y en ideas futuras de estudios de máster, también en trabajos previos en el sector automotriz y como posible búsqueda de trabajos futuros relacionados con el mundo de la automoción de alto nivel. Por ello es un complemento ideal a mis conocimientos aprendidos y experiencia profesional que aporta gran valor a mi carrera profesional, además es también el camino previo hacía mis futuros estudios, ya que me ayudará a mejorar mis capacidades técnicas y a poder adquirir la experiencia previa de la Fórmula Student.

En resumen, los objetivos del proyecto se pueden dividir en dos, el objetivo principal y los objetivos secundarios que afectan directamente al principal.

El objetivo principal del proyecto es diseñar, analizar y fabricar un chasis tubular de acero para la participación de manera apta en la competición de Fórmula Student.

Por otro lado, dentro de este objetivo principal se desglosan multitud de pequeños objetivos y metas que hacen que el resultado final sea el deseado. Los objetivos son los siguientes:

1. Entender y comprender el reglamento de la Fórmula Student.
2. Aplicar dicho reglamento al diseño del chasis tubular.
3. Analizar diferentes propuestas de chasis y comprender cuales pueden funcionar mejor.
4. Conocer las cargas de funcionamiento futuro del chasis para un correcto diseño.
5. Diseñar la estructura del chasis utilizando software de modelado Autodesk Inventor.
6. Realizar simulaciones y análisis de elementos finitos para evaluar la resistencia del chasis en Nastran-Patran.
7. Seleccionar los materiales adecuados para la fabricación del chasis.
8. Definir los procesos de fabricación y ensamblaje del chasis.
9. Evaluar el rendimiento del chasis mediante pruebas físicas y compararlo con los requisitos establecidos.
10. Comprender los resultados obtenidos en los diferentes ensayos y sacar conclusiones.

3. INTRODUCCIÓN A LA COMPETICIÓN

3.1. FÓRMULA STUDENT COMPETICIÓN

La Fórmula Student o Fórmula SAE es una competición internacional de diseño de ingeniería organizada por primera vez por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) en 1979. El objetivo es desarrollar y proporcionar una plataforma para que los estudiantes de ingeniería experimenten, construyan y aprendan a crear desde cero un monoplaza apto para la participación en competiciones.

Esta competición busca promover todos los aspectos de la industria automotriz, incluyendo la investigación previa, el diseño, la construcción, las pruebas, el manejo, el desarrollo, la comercialización, la administración y las finanzas, dando así un valor añadido de aprendizaje a los alumnos participantes. Además, se busca la aplicación de los conocimientos adquiridos durante los estudios previos a una experiencia real, por ello este programa está pensando para alumnos de cualquier carrera en la cual los conocimientos aprendidos en ella se puedan aplicar a la fabricación del monoplaza y a la gestión del equipo (mecánica, eléctrica, aeroespacial, empresas, marketing...).



Ilustración 1 -Parrilla de equipos participantes en el año 2019 (Circuito de Montmeló)

Los alumnos 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 los más



innovadores y eficientes. Se justifican cada uno de los aspectos del diseño del coche, exponiendo su finalidad y motivación.

La financiación la deben conseguir también los propios alumnos, en búsqueda de patrocinadores (como en cualquier competición del Motorsport). Además de esto, lo alumnos se enfrentan a una serie de duros quizzes que les permiten poder clasificarse o no para las diferentes competiciones a lo largo de varios países, esto puede verse afectado además por los presupuestos de los equipos, ya que un presupuesto bajo puede no permitirte competir en todas las pruebas posibles.

Esta competición no solo hace hincapié en aspectos teóricos y prácticos, si no que tiene la misión de crear un espacio multicultural para jóvenes ingenieros para el intercambio y desarrollo de conocimientos y valores de respeto, cuidado de las personas, trabajo en equipo y esfuerzo, para poder alcanzar los más altos niveles de excelencia técnica y personal, tanto en el ámbito de la competición como en el humano.

Tras esto, llegan los eventos dinámicos, donde el vehículo debe mostrar su agilidad, su aceleración, su fiabilidad y su consumo a través de una serie de pruebas. Todas estas categorías dan puntos a los equipos, dejando patente que lo importante no es sólo ser el más rápido, sino también el que mejor aprovecha los recursos.

3.2. EVENTOS DE LA COMPETICIÓN

Como ya se ha mencionado no solo basta con la fabricación de un monoplaza que supere la normativa, si no que se deben de superar diferentes tipos de pruebas para una correcta evaluación del proyecto y del monoplaza.

Estas pruebas se dividen en estáticas y dinámicas, en las pruebas estáticas el equipo debe defender de manera argumentada el diseño del monoplaza ante jueces con gran experiencia en el mundo del motor, mientras que en las pruebas dinámicas es el coche el que habla completando diferentes circuitos en los que se mide su performance.

Cada una de las pruebas son evaluadas y tienen diferentes puntuaciones, para que nos podamos hacer una idea de la importancia que recibe cada prueba en la calificación, se representa a continuación el siguiente histograma:

Scoring para vehículos eléctricos y de combustión

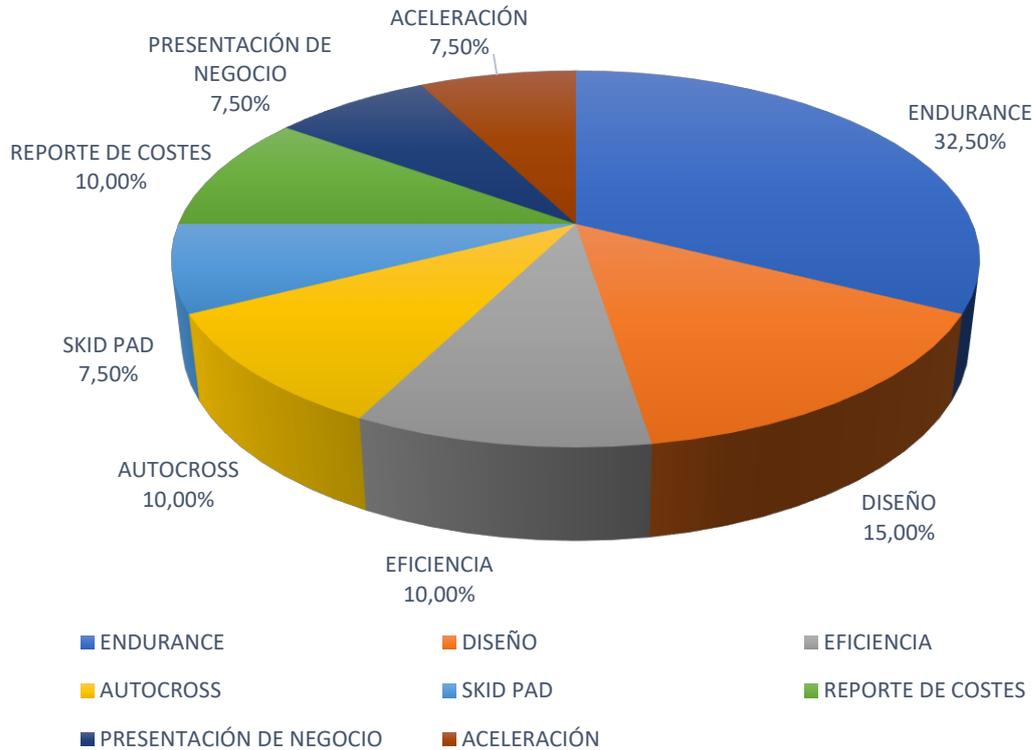


Ilustración 2 -Scoring para vehículos eléctricos y de combustión

Las pruebas estáticas se dividen en tres: el diseño del monoplaza, reporte de costes y el plan de negocio.

- Diseño ingenieril (Engineering Desing): el equipo que muestra la mejor aplicación de ingeniería para conseguir los objetivos de diseño será el que consiga la máxima puntuación.
- Reporte de costes y fabricación (Cost and Manufacturing Event): preparación y envío de un reporte de costes, que será expuesto antes los jueces para valorar los costes asociados al monoplaza presentado por el equipo.
- Plan de negocio (Business Plan Presentation): se evalúa la habilidad de desarrollar un caso de negocio comprensivo en el que tendrán que convencer a los ejecutivos de un corporativa que el diseño del equipo cumple con las demandas buscadas, y que económicamente generará beneficios.

Las pruebas dinámicas son aquellas donde se pone a prueba el monoplaza en diferentes situaciones como en pruebas de aceleración, de Autocross, de resistencia, eficiencia y “skid pad”.

- Aceleración (Acceleration): prueba de aceleración en línea recta de 75 metros.
- Skid pad: prueba cronometrada en la que se evalúa el comportamiento del coche durante los pasos por curva en un circuito con forma de 8.
- Autocross: prueba cronometrada en un circuito cuya extensión no supera los 1.5 km. Cada equipo podrá realizar cuatro vueltas (dos por cada piloto), siendo la mejor de estas cuatro vueltas la que determine la puntuación del equipo. Además, la posición determinará el orden de salida en la siguiente prueba. En este caso, cobran importancia varios aspectos, la maniobrabilidad, el comportamiento en curva y la capacidad de frenada y aceleración.
- Resistencia (Endurance): prueba de resistencia a lo largo de un circuito similar al de la prueba anterior, en el que cada equipo deberá completar 22 km para poder puntuar (mitad de vueltas por piloto, ya que se cambian en medio de la prueba). En este evento se busca desafiar la fiabilidad del prototipo, así como su eficiencia en cuanto a consumo de energía.
- Eficiencia (Efficiency): puntúa la capacidad del equipo para ser lo más rápido posible en la prueba de resistencia con la energía disponible.

Las categorías actuales son tres: combustión, eléctrico y “driverless”. Como es obvio, las dos primeras implican el tipo de propulsión, mientras que la tercera se distingue de las otras dos debido a la ausencia de piloto, ya que los equipos trabajan también en la conducción autónoma. Las más numerosas son las competiciones de combustión y eléctrica, aunque existe una tendencia futura hacia los monoplazas autónomos.



Ilustración 3 -Monoplaza realizando prueba dinámica



3.3. COMPETIDORES Y EVOLUCIÓN EN ESPAÑA

Actualmente se celebran competiciones en numerosos países como Alemania, España, Holanda, Bélgica, Brasil, Australia, etc. Todas ellas utilizan la misma normativa base original de la Fórmula SAE y llegan a albergar hasta 120 equipos y más de 2.000 estudiantes. Los resultados obtenidos por los participantes en las diferentes competiciones son recogidos y puntúan en el ranking mundial.

En 2010, y por primera vez en España, la SAE, con la colaboración de instituciones públicas e importantes empresas de automoción, organizó el primer evento de Formula Student España, brindando la oportunidad a los alumnos de diferentes universidades de mostrar el trabajo realizado durante el curso, en el famoso Circuito de Barcelona-Cataluña.

Gracias al esfuerzo de muchas personas e instituciones, Fórmula Student España ha ido creciendo cada año pasando de 11 equipos en 2010 a 100 en 2020 con equipos de 19 países diferentes. La lista de equipos preadmitidos españoles para disputar la temporada 2023-2024 es la siguiente:

Tabla 1 -Equipos españoles participantes.

Nombre equipo	Nombre Universidad
ISC FS Racing Team	ICAI Comillas Pontifical University
Formula Student Vitoria	University of the Basque Country (UPV/EHU)
Formula Student Bizkaia	University of the Basque Country (UPV/EHU)
Formula Gades	Universidad de Cádiz
EUSS Motorsport	Escola Universitaria Salesiana de Sarria
Nova Racing Team	EPSEVG – Universitat Politècnica de Catalunya
UFV Racing Team	Universidad Francisco de Vitoria
ARUS	Universidad de Sevilla
UVigo Motorsport	Universidad de Vigo
UCO Autosport	Universidad de Córdoba
Tecnun eRacing	Universidad de Navarra
Formula UEM	Universidad Europea

UPM Racing

Universidad Politécnica de Madrid

Dynamics UPC Manresa	UPC Manresa
UJI Motorsport FS Team	Universitat Jaume I
UTRON Racing Team	University of Vic
FSUPV Team	Universidad Politécnica de Valencia
FSULL-Dynamics	Universidad de La Laguna
Ü Motorsport	Universidad Rey Juan Carlos
MAD Formula Team	Universidad Carlos III de Madrid
Vall Racing Team	Universidad de Valladolid
Formula USAL	Universidad de Salamanca

3.4. FÓRMULA STUDENT CANTABRIA

En la actualidad la Universidad de Cantabria no cuenta con equipo de Fórmula Student, ha habido numerosos intentos de sacar un equipo y un monoplaza adelante pero ya sea por unas razones u otras el equipo no ha salido a flote. Esto se debe principalmente al poco alumnado motivado por el proyecto, ya que el equipo de Fórmula Student Cantabria ha contado con un máximo de 12-14 participantes cuando equipos punteros españoles como “MAD Fórmula Team” cuentan con 92 participantes provenientes de multitud de ingenierías.



Ilustración 4 -Equipo “FStudent Cantabria” 2018-2019



Ilustración 5 -Equipo Universidad Carlos III Madrid, "MAD Formula Team" 2023-2024



Con la falta de alumnado en el proyecto es inviable poder llegar a la fabricación y gestión del equipo y del monoplaza. Los equipos predecesores llegaron a la fabricación del chasis tubular el cual ha sido utilizado como simulador en diferentes exposiciones, pero nunca ha rodado en la vida real.

Por otro lado, nos encontramos en la provincia de Cantabria donde actualmente no existe una industria automotriz igual de desarrollada como pueden existir en las provincias de Madrid y Barcelona donde se encuentran la mayoría de los equipos españoles.

Con este proyecto se propone ofrecer a futuros alumnos de la Universidad de Cantabria interesados en la formación de un equipo de Fórmula Student, las bases de diseño y de fabricación del monoplaza reglamentario para la participación en la competencia actualizada.

4. CHASIS

El chasis es básicamente el esqueleto de un automóvil, la estructura interna que aporta rigidez, forma y seguridad al vehículo. También, es el encargado de conectar las cuatro ruedas y el sistema de dirección y de recibir todas las cargas y esfuerzos, tanto estáticos como dinámicos.

Este sirve como base para el montaje de todos los componentes del automóvil, ya que estos van sujetos al él mediante soldadura, mediante uniones atornillados, mediante sistemas de suspensión o cualquier tipo de unión válida.

Hay ciertos estándares de seguridad que debe cumplir un chasis:

- Una gran resistencia al uso que se le puede dar, ya que de lo contrario podría agrietarse.
- Tener la capacidad de resistir al trabajo que realiza sin perder la forma original.
- A la vez de resistente tiene que ser ligero para potenciar de alguna manera al vehículo y hacerlo veloz.



Ilustración 6 -Distribución de materiales en función de la zona del vehículo

Llevándolo a la competición se trata de un elemento esencial para mantener la seguridad de los pasajeros, esto se debe a su diseño en cuanto a materiales y perfiles, ya que se busca lograr una deformación programada en zonas de impacto, de esta manera liberar energía para cuando el impacto llegue a la zona del piloto esta sea la mínima posible. Se puede ver en la “ilustración 5” la distribución en un vehículo con chasis autoportante en función de los aceros utilizados. Siendo las puertas, el capo y la carrocería de aluminio y magnesio que son metales blandos para reducir el peso de la carrocería y absorber energía en caso de impacto, ya cuando nos acercamos a la zona del piloto se puede apreciar el uso de aceros de alta resistencia y aceros al boro para conseguir una protección mayor.

Sin embargo, en coches de competición esto se lleva a otro nivel, ya que la mayor parte de la carrocería de los vehículos está fabricada en fibra de carbono o diferentes tipos de fibras de vidrio por lo que la seguridad en el habitáculo del piloto se consigue mediante las conocidas jaulas de seguridad o mediante el denominado monocasco en competiciones tipo fórmula.

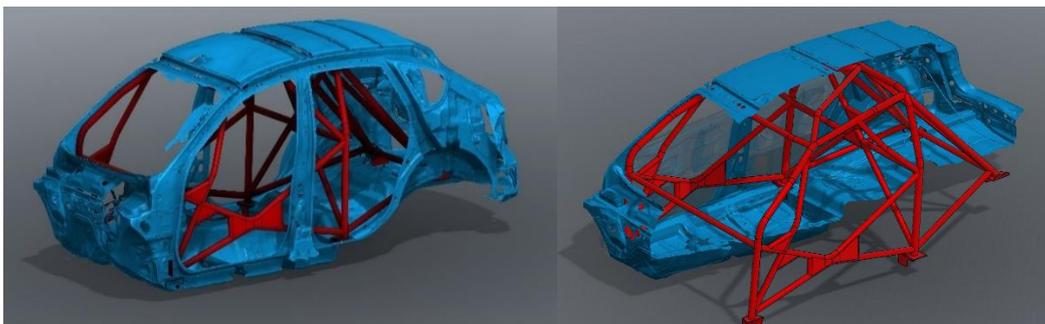


Ilustración 7 -Jaula de seguridad

4.1. TIPOS DE CHASIS

4.1.1. CHASIS INDEPENDIENTE

Este tipo de chasis es bastante antiguo (fabricación de los primeros vehículos), sin embargo, hoy en día sigue en uso en la fabricación de camiones, todo terreno y algún tipo de vehículo con carrocerías de fibra o similares.

Este sistema cuenta con un bastidor rígido formado por vigas longitudinales y transversales en el cual van incorporadas todas las piezas mecánicas del automóvil (motor, suspensión, dirección, transmisión, etc...), además de esto, también debe soportar encima la estructura de la carrocería.

Una vez el bastidor cuenta con todos los componentes del cual está formado, pasa a denominarse chasis. Generalmente se atornilla la carrocería al chasis, quedando perfectamente fijada. Resulta una geometría de chasis muy utilizada en los Estados Unidos en la fabricación de camionetas “pick-up” y en los famosos vehículos de competición denominados “hot rod”.

Este sistema ofrece:

- Gran versatilidad.
- Robustez deseada.
- Soporta grandes esfuerzos dinámicos y estáticos.



Ilustración 8 -Vehículo con chasis independiente

4.1.2. CHASIS AUTOPORTANTE O MONOCASCO:

Este tipo de chasis es el más utilizado por los fabricantes de automóviles hoy en día, integra la carrocería y el bastidor en el mismo elemento. Su característica principal es que es una estructura bastante rígida capaz de absorber impactos y disipar la energía generada durante estos, dicha rigidez proporciona al vehículo una gran estabilidad y seguridad en caso de accidente. Frente al chasis independiente presenta una mayor resistencia a torsión



Ilustración 9 -Ejemplo Chasis autoportante

Durante la fabricación de este tipo de chasis se estudian las zonas normalmente más afectadas en caso de accidentes para utilizar aceros de muy alta resistencia o de menos resistencia en dichas zonas. Además, este tipo de chasis cuentan con una tecnología denominada deformación programable la cual se basa en producir pequeñas entallas y concentración de tensiones en diferentes puntos de chasis para lograr una deformación programada y conseguir la disipación de energía deseada (*Ilustración 9*).

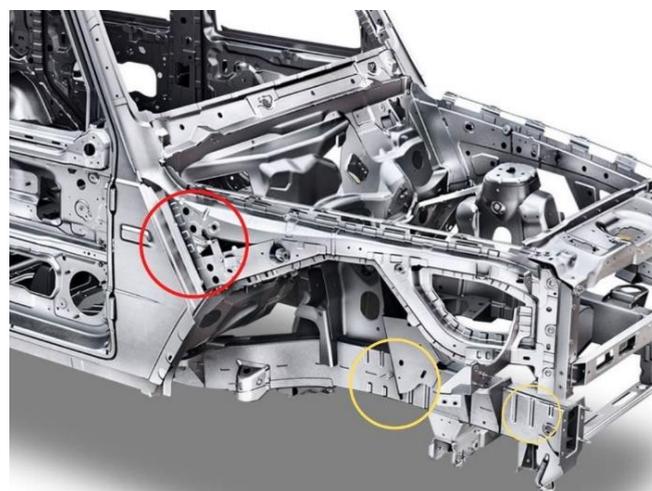


Ilustración 10 -Entallas deformación programada

Comparándolo con el chasis independiente este permite un menor consumo al ser más ligero, además de permitir un mayor espacio interior.

Este tipo de chasis suele estar fabricado de aceros de altas resistencias, sin embargo, marcas de automóviles punteras han desarrollado y comercializado chasis autoportantes fabricados en fibra de carbono. Este material aportara al chasis una mayor rigidez y una reducción elevada del peso. Su uso se destina a automóviles de competición o de muy alta gama.



Ilustración 11 -Chasis monocasco de fibra de carbono

Otros fabricantes se siguen decantando por materiales convencionales, pero varían la forma y composición de la estructura. Los fabricantes de Honda desarrollaron un chasis en "X", denominado así por la geometría que presenta (Ilustración 10). Este bastidor se estrecha por el centro proporcionando así un estructura más rígida y preparada para contrarrestar los puntos de torsión elevada, de esta manera también reparte los pesos equitativamente entre la parte trasera y la delantera.



Ilustración 12 -Chasis en "X" Honda S2000

4.1.3. CHASIS TUBULAR

El chasis tubular consiste en una estructura formada por una serie de tubos huecos soldados entre sí, distribuidos de tal manera que sea capaz de soportar las diferentes cargas estáticas y dinámicas a las que el vehículo se enfrentará en su uso, además de esto debe proporcionar seguridad al piloto en caso de accidente. Se suelen utilizar en vehículos dedicados a la competición off-road y asfalto.

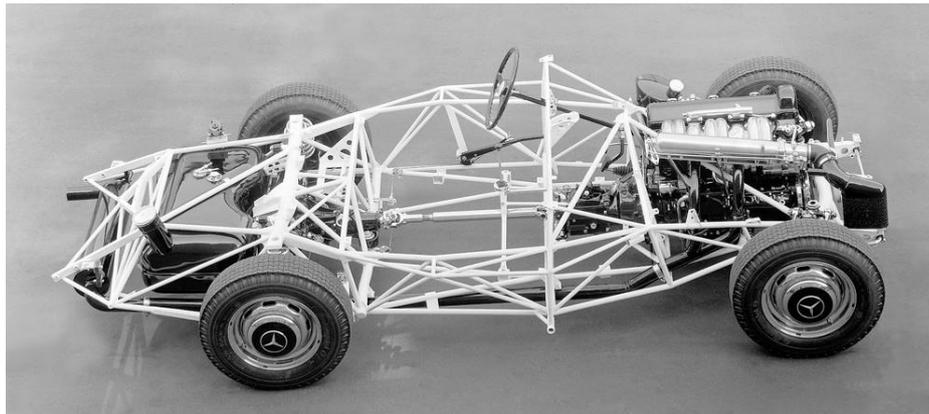


Ilustración 13 -Chasis tubular

Este tipo de estructura proporciona una alta rigidez con un peso relativamente bajo. Su mayor desventaja es la dificultad de fabricación, esto se debe a que los perfiles tubulares van unidos a través de uniones permanentes realizadas mediante soldadura, por lo que se requiere conocimiento y experiencia sobre estos procesos.

4.2. CHASIS FORMULA SAE

La fórmula SAE estipula por norma las diferentes maneras de fabricación de chasis válidas para la competición, el tipo de chasis válido puede ser tubular, monocasco de fibra o una opción mixta.

Como ya se ha comentado anteriormente el chasis tubular es aquella estructura formada por tubos huecos soldados, mientras que el monocasco consiste en una sola pieza, fabricada con un material compuesto, como puede ser la fibra de carbono.

Por otro lado, se han desarrollado opciones mixtas que utilizan parte de estructura tubular y parte monocasco consiguiendo una solución que te ofrece las propiedades de ambas estructuras en una.



Ilustración 14 -Chasis monocasco de fibra de carbono



Ilustración 15 -Chasis tubular

Cada tipo de chasis ofrece tanto una serie de ventajas como de desventajas en comparación de uno con el otro, esto se comenta más en detalle en la elección del tipo de chasis.

4.2.1. PARTES CHASIS TUBULAR SAE

Según normativa el chasis tubular debe contar con las siguientes partes:

- Chasis (chassis): conjunto estructural fabricado que soporta todos los sistemas funcionales del vehículo. Este conjunto puede ser una única estructura soldada, múltiples estructuras soldadas o una combinación de estructuras compuestas y soldadas.
- Cockpit: El volumen que acoge al conductor y que está definido por la parte superior del vehículo, el cierre del suelo, la parte interior de la carrocería, el mamparo delantero y el cortafuegos.
- Miembro del chasis (chassis member): una sola pieza representativa mínima de tubo continuo sin cortar o estructura equivalente.
- Refuerzos Principales de Barras Antivuelco (Roll Hoops Bracing): son los tubos de apoyo principales a la hora de sujetar y dar soporte al Arco Principal y el Arco Frontal.

- Soportes de Refuerzos Principales (Roll Hoops Bracing Supports): los tubos que conforman el conjunto de tubos secundarios que da soporte a elementos principales y sus respectivos refuerzos.
- Mamparo frontal (front bulkhead): estructura plana que define el plano delantero del chasis y proporciona protección para los pies del conductor (en vista frontal, cubre los pies del conductor).
- Soportes mamparo frontal (front bulkhead support): estructura que define el lateral del chasis desde el mamparo delantero hasta la parte superior de la estructura superior de impacto lateral y la parte inferior del aro delantero.
- Aro frontal (front hoop): barra antivuelco situada por encima de las piernas del conductor, cerca del volante.
- Atenuador de impactos (Impact Attenuator): dispositivo deformable de absorción de energía situado delante del mamparo frontal.
- Aro principal (Main Hoop): una barra antivuelco situada al lado o justo detrás del torso del piloto.
- Estructura de Protección Lateral (Side Impact Estructura): protección lateral del vehículo. Esta estructura va situada en una zona que se extiende desde el suelo, por encima del mismo, entre el Arco Frontal y el Arco Principal.

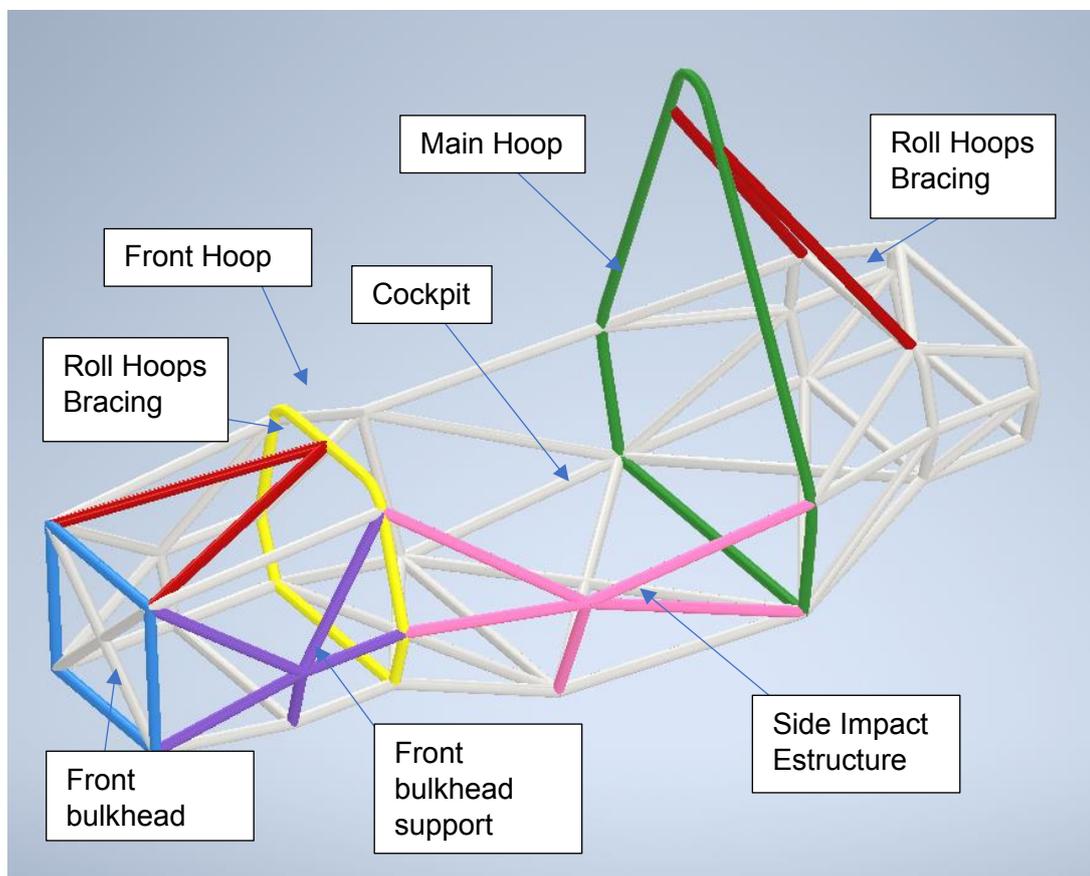


Ilustración 16 -Partes chasis tubular Fórmula Student

5. PLANTEAMIENTO DE DISEÑO

5.1. REQUISITOS DE DISEÑO

La normativa establece una serie de requisitos que debe cumplir el monoplaza referente a todas las partes que intervienen tanto en el proceso de creación y fabricación de este, como en procesos de gestión y marketing del equipo, en este caso, el proyecto se centra únicamente en aquellas que pueden afectar al diseño del chasis.

Anteriormente se ha podido observar como la normativa detalla las partes con las que debe contar el chasis tubular, además de esto, también indica la norma específica de diseño para cada una de ellas.

Configuración del vehículo

- El vehículo debe de ser diseñado y fabricado de acuerdo con las buenas prácticas de ingeniería.
- El vehículo debe ser de rueda abierta, asiento único y una cabina abierta para el piloto (una carrocería estilo formula) con cuatro ruedas que no estén en línea recta.
- La unión entre elementos o barras se debe realizar mediante triangulación nodo a nodo siempre que sea posible.

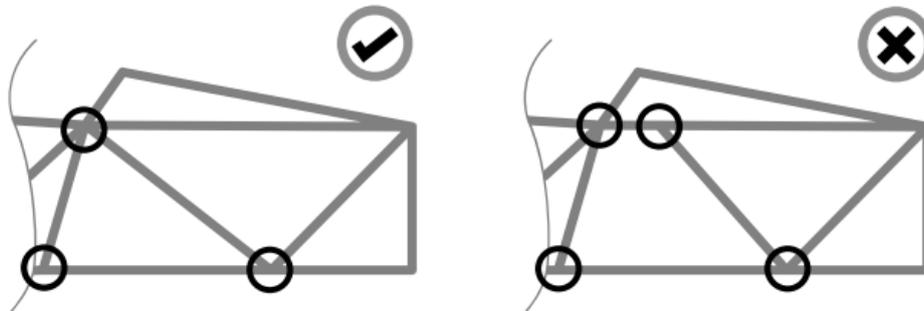


Ilustración 17 -Triangulación nodo a nodo

Distancia al suelo

- La distancia al suelo estática mínima de cualquier parte del vehículo, aparte de los neumáticos, incluido el conductor, debe ser de 30 mm.

Suspensión

- El vehículo debe estar equipado con sistemas de suspensión delantera y trasera plenamente operativos, incluidos amortiguadores, y un recorrido útil de las



ruedas de al menos 50 mm y un rebote mínimo de 25 mm con el conductor sentado.

- Todos los puntos de montaje de la suspensión deben ser visibles en la inspección técnica, ya sea mediante visión directa o retirando cualquier cubierta.

Dirección

- El volante no debe estar a más de 250 mm por detrás del aro delantero. Esta distancia se mide horizontalmente, en la línea central del vehículo, desde la superficie trasera del aro delantero hasta la superficie más adelantada del volante con la dirección en cualquier posición.

Distancia entre ejes

- El vehículo debe tener una distancia entre ejes de al menos 1.525 mm.

Estabilidad en pista y vuelco

- La vía menor del vehículo (delantera o trasera) no debe ser inferior al 75% de la vía mayor.
- La vía y el centro de gravedad del vehículo deben combinarse para proporcionar una estabilidad adecuada en caso de vuelco

Aros antivuelco

- Ambos aros deben estar firmemente integrados a la estructura primaria mediante triangulación nodo a nodo o métodos de unión equivalentes.
- El radio mínimo de cualquier curva, medido en la línea central del tubo, debe ser al menos tres veces el diámetro exterior del tubo. Las curvas deben ser suaves y continuas, sin indicios de ondulación o rotura de la pared. El momento de inercia mínimo de la zona debe mantenerse en todas las zonas, incluidas las curvas de los tubos fabricados.
- En un plano perpendicular al eje longitudinal del vehículo y a través de los puntos extremos inferiores del aro antivuelco, ninguna parte de la estructura primaria podrá quedar por debajo de 30 mm de los puntos extremos del aro antivuelco.

Arco principal

- El arco principal debe estar construido de una sola pieza de tubo de acero sin cortar, continuo y de sección cerrada.



- En la vista lateral, la parte del aro principal situada por encima de su punto de fijación superior a la estructura de impacto lateral deberá estar inclinada menos de 10° con respecto a la vertical.
- En vista lateral, cualquier curva en el 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.
- 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.

Arco delantero

- El aro delantero debe estar construido con una sección continua y cerrada.
- Si el aro delantero está hecho de más de una pieza, debe estar sostenido por una triangulación de nodo a nodo o una construcción equivalente.
- En vista lateral, ninguna parte del aro delantero puede estar inclinada más de 20° con respecto a la vertical.

Refuerzo arco principal y frontal

- El aro principal debe estar sostenido hacia delante o hacia atrás por tubos de refuerzo a cada lado del aro principal.
- En una 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.
- Los tirantes del aro principal deben fijarse al aro principal a una altura no inferior a 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° .
- Los tirantes del aro principal deben ser rectos.
- Los extremos inferiores de los tirantes del aro principal deberán apoyarse en el punto de fijación superior del aro principal a la estructura de impacto lateral y en el punto de fijación inferior del aro principal a la estructura de impacto lateral mediante una estructura triangulada de nodo a nodo o una estructura compuesta equivalente.

- Si algún elemento que se extienda fuera de la estructura principal está sujeto a los tirantes del aro principal, se requerirá un refuerzo adicional para evitar las cargas de flexión en una situación de vuelco.

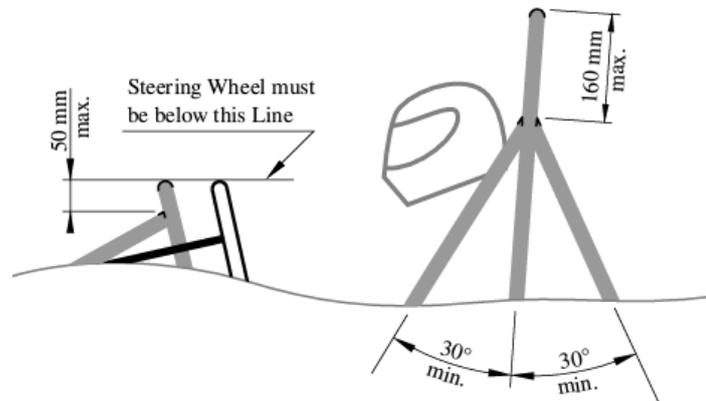


Ilustración 18 -Requisitos de front hoop bracing, main hoop bracing and steering wheel.

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 principal.
- El elemento inferior debe conectar la parte inferior del aro principal y la parte inferior del aro delantero.
- El travesaño diagonal debe triangular los travesaños superior e inferior entre los aros.

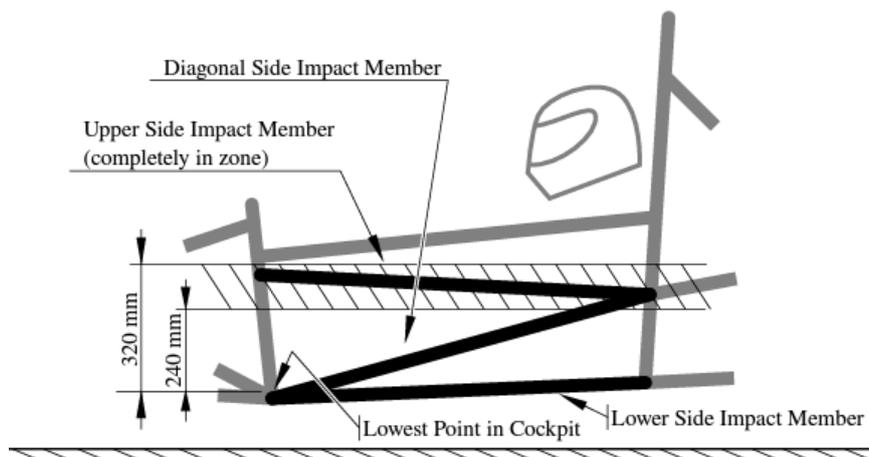


Ilustración 19 -Requisitos estructura de impacto lateral

Abertura del cockpit

- El habitáculo debe tener una sección transversal interna libre suficiente para que la plantilla mostrada a la derecha en la ilustración 17 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.
- El tamaño de la abertura de la cabina debe ser suficiente para que la plantilla mostrada a la izquierda de la ilustración 17 pase verticalmente desde la abertura de la cabina hasta debajo del elemento de impacto lateral superior cuando se mantiene horizontalmente. La plantilla puede moverse hacia delante y hacia atrás
- Los pedales ajustables deben estar en su posición más adelantada.
- Los pies y las piernas del conductor deben estar completamente contenidos dentro de la estructura primaria cuando el conductor esté sentado normalmente y los pies del conductor estén tocando 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.

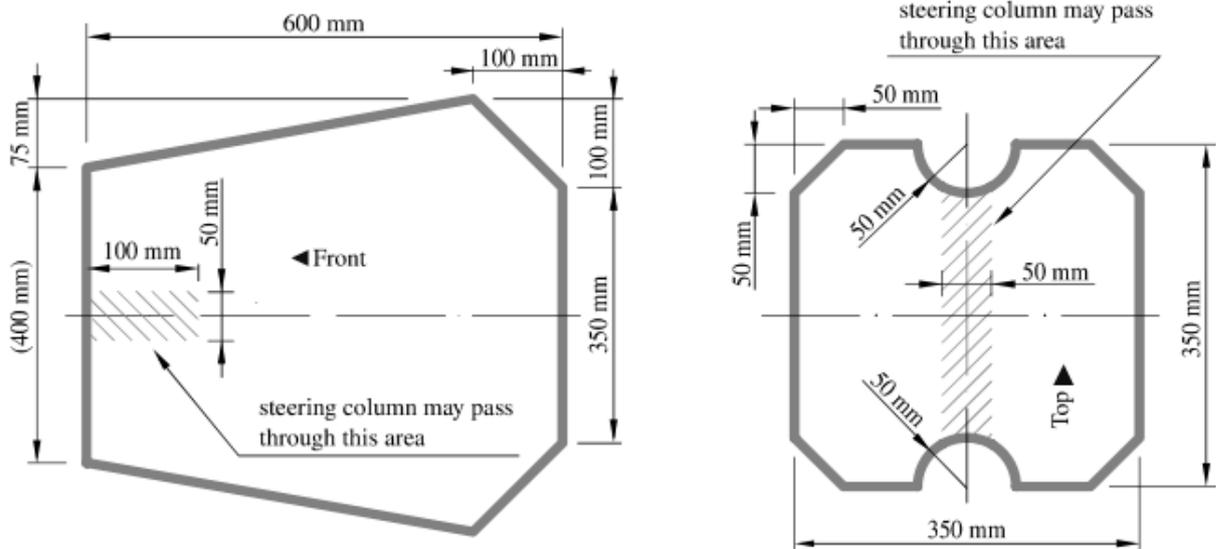


Ilustración 20 -Plantillas cockpit

Posición del casco

La cabeza y las manos del piloto no deben tocar el suelo, bajo ningún concepto, en caso de vuelco del vehículo. Para asegurar esto, la normativa obliga a cumplir, para un piloto dentro del percentil 95% del tamaño de los hombres, los siguientes requisitos:

- Debe haber un mínimo de 50 mm entre el casco y la línea que une los puntos más altos de los arcos principal y frontal.
- Debe haber un mínimo de 50 mm entre el casco y la línea que une el punto más alto del arco principal y el punto inferior del refuerzo del arco principal.
- Si los refuerzos del arco principal están diseñados hacia la parte frontal el casco no debe pasar el plano formado por el arco principal.

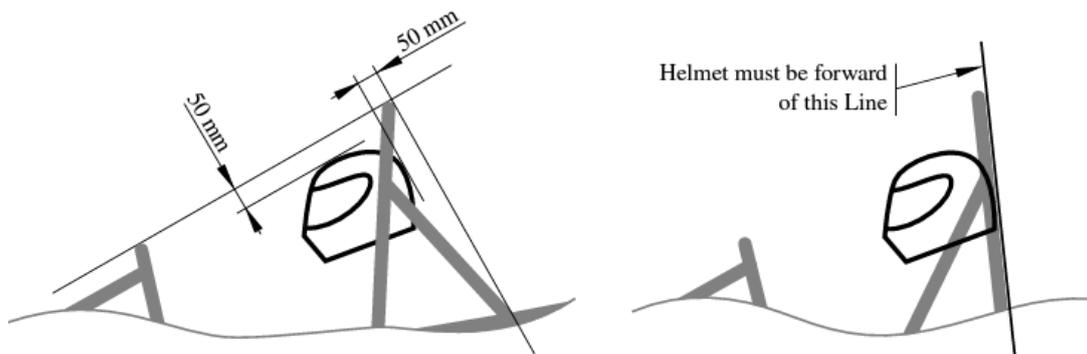


Ilustración 21 -Distancia entre casco y punto superior arcos

Representación piloto

El varón del percentil 95 está representado por 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). Los dos círculos de 200 mm están unidos por una línea recta de 490 mm. El círculo de 300 mm está conectado por una línea recta de 280 mm con el círculo superior de 200 mm.

- El asiento ajustado en la posición más retrasada
- Los pedales ajustados en la posición más adelantada
- El círculo inferior de 200mm 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 superior de 300 mm colocado a 25 mm del reposacabezas.

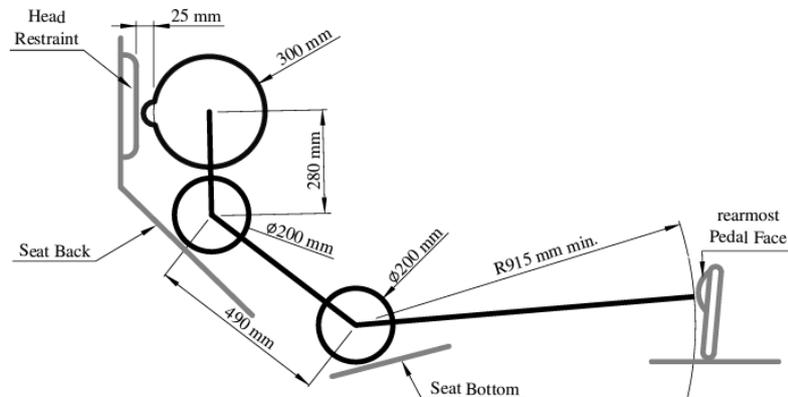


Ilustración 22 -Percentil de tamaño 95% humano.

Asiento del piloto

- En vista lateral, el punto más bajo del asiento del conductor no deberá sobrepasar la cara superior del elemento más bajo de la estructura de impacto lateral ni tener un tubo longitudinal (o tubos) que cumpla los requisitos de material de la estructura de impacto lateral, que pase por debajo del punto más bajo del asiento.

5.2. REQUISITOS DEL MATERIAL

La normativa contiene unos requisitos mínimos de materiales y tamaños de sección en función de la parte del chasis que corresponda:

- La tubería de acero debe estar hecha de acero al carbono sin alear con un contenido máximo de 0.3% de carbono, 1.7% manganeso y 0.6% de cualquier otro elemento. Todos los demás grados de acero se consideran materiales alternativos y requieren pruebas y documentación adicionales.
- Las propiedades del acero utilizadas para los cálculos deben ser:
 - Resistencia no soldada para cálculos continuos de material:
 - Módulo de Young (E) = 200 GPA
 - Límite elástico (Sy) = 305 MPa
 - Límite de rotura (Su) = 365 MPa
 - Resistencia soldada para material discontinuo como cálculos de juntas:
 - Límite elástico (Sy) = 180 MPa
 - Límite de rotura (Su) = 300 MPa

- Requisitos mínimos de sección:

Tabla 2 -Requisitos mínimos de sección.

APLICACIÓN	Espesor mínimo de pared (mm)	Área mínima de la sección transversal (mm²)	Mínimo momento de inercia (mm⁴)
-Arcos principal y frontal. -Barra anclaje de seguridad.	2	175	11320
-Estructura para protección frontal y lateral. -Refuerzos principales barras antivuelco. -Refuerzo para barra de anclaje de arnés de seguridad.	1.2	119	8509
-Resto de elementos soporte para la estructura de protección frontal, arco frontal y arco principal.	1.2	91	6695

5.3 REQUISITOS ESTRUCTURALES

La normativa no contiene unos requisitos estructurales de obligado cumplimiento si se cumple la normativa de materiales y dimensiones de las barras, se da por supuesto su validez. Aun así, se ha considerado conveniente incluir una serie de ensayos típicos en este tipo de chasis para asegurar el correcto comportamiento, ya que asegurar la seguridad del piloto en caso de accidente durante la competición es primordial.

Superficie frontal y soportes de la superficie frontal, y para el caso impacto trasero:

- Carga aplicada: $F_x = 120 \text{ kN}$, $F_y = 0 \text{ kN}$, $F_z = 0 \text{ kN}$.
- Punto de aplicación: En los puntos de unión entre el atenuador de impactos y la superficie frontal.



- Condiciones de contorno: desplazamiento fijo (x, y, z), pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados de los arcos frontal y principal, y los puntos de anclaje del cinturón de seguridad.
- Deformación máxima admisible: 25 mm
- El fallo no debe ocurrir en ninguna parte de la estructura

Impacto Lateral:

- Carga aplicada: $F_x=0$ kN, $F_y=7,0$ kN, $F_z=0$ kN. La fuerza se aplica en dirección al piloto.
- Punto de aplicación: Todos los miembros estructurales que estén entre el arco frontal y el principal en la zona de impacto lateral.
- Condiciones de contorno: desplazamiento fijo (x, y, z), pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados de los arcos frontal y principal.
- Deformación máxima admisible: 25 mm
- El fallo no debe ocurrir en ninguna parte de la estructura

Arco principal:

- Carga aplicada: $F_x = 6,0$ kN, $F_y = 5,0$ kN, $F_z = -9,0$ kN
- Punto de aplicación: Parte superior del arco principal.
- Condiciones de contorno: desplazamiento fijo (x, y, z), pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados de los arcos frontal y principal.
- Deformación máxima admisible: 25 mm
- El fallo no debe ocurrir en ninguna parte de la estructura

Arco frontal:

- Carga aplicada: $F_x = 6,0$ kN, $F_y = 5,0$ kN, $F_z = -9,0$ kN
- Punto de aplicación: Parte superior del arco frontal
- Condiciones de contorno: desplazamiento fijo (x, y, z), pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados de los arcos frontal y principal.
- Deformación máxima admisible: 25 mm
- El fallo no debe ocurrir en ninguna parte de la estructura

Anclaje del cinturón de seguridad de los hombros:

- Carga aplicada: 7 kN en cada punto de anclaje.
- Punto de aplicación: En los dos puntos de anclaje de forma simultánea.



- Condiciones de contorno: desplazamiento fijo (x, y, z), pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados de los arcos frontal y principal.
- Deformación máxima admisible: 25 mm
- El fallo no debe ocurrir en ninguna parte de la estructura

5.3.1. RIGIDEZ A FLEXIÓN

Cuando se habla de la rigidez de un chasis a flexión se refiere a la capacidad de este de resistir la deformación bajo cargas aplicadas en su plano longitudinal. Para este ensayo se tienen en cuenta todas las masas importantes que aparecen en la estructura y que producen momento flector longitudinal en el chasis. Cabe destacar que este análisis no es muy significativo, sin embargo, se tiene en cuenta ya que puede ser un factor a tener en cuenta durante el diseño.

5.3.2. RIGIDEZ A TORSIÓN

La rigidez torsional hace referencia a la medida de la capacidad del chasis para resistir la deformación torsional cuando se le aplica un par torsor, una mayor rigidez torsional proporciona una mayor estabilidad y respuesta precisa en las curvas, se mide en Nm de par por grado de deformación. La mayoría de los equipos punteros participantes en la competición obtienen valores de rigidez torsional que se encuentran sobre los 3000 Nm por grado, por lo que se toma este valor de referencia para la realización de los análisis.

Los mayores esfuerzos se producirán cuando la suspensión entre en un bache, o a tomar curvas a alta velocidad pasando por encima de los pianos, esto se debe principalmente a un desplazamiento momentáneo de una parte del chasis permaneciendo la otra fija.

Este valor es clave en el diseño de monoplazas, esto se debe básicamente a que afecta directamente a aspectos como la estabilidad y el manejo del vehículo, ya que con valores de rigidez torsional baja la estructura del vehículo pueden sufrir deformaciones que afectan al rendimiento. Este análisis, también ayuda a conseguir una mejor distribución de pesos en la estructura y con ello una optimización del peso del monoplaza.

6. ANÁLISIS DE SOLUCIONES

En el siguiente apartado se detallan la toma de decisiones sobre la elección del tipo del chasis, el material y el motor para utilizar en nuestro proyecto. Todas estas decisiones se toman en torno al reglamento de la competición y a posibles limitaciones en el proyecto.

6.1. ELECCIÓN TIPO DE CHASIS

La elección del tipo de chasis es una de las decisiones más importantes en el diseño de cualquier monoplaza, esto es debido a que es el componente encargado de soportar las cargas que se generan, garantizar la seguridad del piloto y la manejabilidad de este durante su funcionamiento.

Se toman las siguientes opciones ya que son las propuestas por la normativa, la primera un chasis tubular de acero y la segunda un chasis monocasco de fibra, la decisión se basa en diferentes factores técnicos y económicos. La normativa permite usar una alternativa híbrida entre los dos modelos.

En primer lugar, es importante destacar que los chasis tubulares de acero tienen una larga trayectoria en la industria automotriz y han demostrado ser una opción fiable y económica para vehículos deportivos y de competición. Estos se caracterizan por su alta resistencia y rigidez, lo que les permite soportar grandes cargas sin deformarse. Además de esto, su bajo costo, su diseño modular y la posibilidad de ser fabricados a medida, facilitan la adaptación a diferentes tipos de vehículos y necesidades, todo ello hace que esta opción sea la más utilizada por la mayoría de los equipos.



Ilustración 23 -Vehículo con chasis tubular

Por otro lado, los chasis tipo monocasco de fibra de carbono o compuestos alterativos, son una tecnología más reciente y que se ha popularizado principalmente en vehículos de alta gama y de competición. Estos chasis se caracterizan por su alta resistencia a la deformación y por su bajo peso, lo que permite mejorar la eficiencia del vehículo en términos de consumo de combustible y aceleración. Sin embargo, la fabricación de un chasis monocasco de fibra de carbono es mucho más compleja y costosa que la de un chasis tubular, lo que los hace que su uso sea más reducido.



Ilustración 24 -Chasis de fibra de carbono.

La elección de un chasis tubular de tubos de acero frente a un chasis monocasco de fibra de carbono se debe más bien a factores económicos y de diseño, fabricación y montaje del proyecto.

6.2. ELECCIÓN DEL MATERIAL

Para la elección del material se debe tener en cuenta únicamente los requisitos de la normativa en cuanto a proporciones de componentes que forman el acero, sin embargo, tendremos en cuenta más aspectos para su elección. Una de ellas la soldabilidad de los diferentes aceros escogidos, esto se debe principalmente a que la unión permanente entre estos tubos será realizada mediante soldadura.

Por otro lado, se tendrán en cuenta diferentes valores como la resistencia a tracción, el recio y la durabilidad del acero. La resistencia a tracción es fundamental para la seguridad y el rendimiento del monoplaza, el precio es un factor importante para la viabilidad económica del proyecto y la durabilidad es crucial para minimizar el



mantenimiento y prolongar la vida útil de la estructura del vehículo. También se tienen en cuenta otros valores como pueden ser el límite elástico del material o la resistencia a rotura, sin embargo, estos valores los estipula la normativa para realizar los ensayos, pero a la hora de fabricar el monoplaza también se deben tener en cuenta.

El primer aspecto para tener en cuenta es la proporción de diferentes compuestos que propone la normativa y los aceros más utilizados en fabricaciones de chasis tubulares, a raíz de esta se deducen los siguientes aceros compatibles:

-ACERO AISI 4130

El acero AISI 4130 es definido como un acero de baja aleación y alta resistencia compuesto de diferentes elementos de aleación. Ofrece buena resistencia, tenacidad, resistencia a la corrosión y maquinabilidad. Este tipo de acero es popular en la industria del automóvil y de la aviación debido a su relación resistencia-peso, lo que lo hace ideal para aplicaciones donde se requiere una gran resistencia estructural y una construcción ligera. Además, resulta ser muy maleable, puede encontrarse que son maleables incluso justo después de la producción, por lo que, se pueden cortar y dar forma fácilmente sin temor a perder fuerza, dureza y durabilidad. Al ser un acero bajo en carbono ofrece una buena soldabilidad y facilidad de mecanizado.

-ACERO SAE 1010

Es un acero de bajo carbono muy dúctil y maleable, se conforma bien en frío y tiene muy buena soldabilidad. Tiene una baja resistencia, lo que significa que es menos resistente que otros aceros seleccionados para la fabricación de chasis, pero es adecuado para aplicaciones en las que se requiere una buena capacidad de formación y conformado.

-ACERO S355

Este acero es un tipo de acero estructural de alta resistencia. Tiene una amplia gama de usos en los sectores de la construcción, metalurgia, maquinaria pesada e ingeniería del transporte, máquinas-herramienta, ingeniería energética y construcción de puentes.

Este acero es una muy buena alternativa para la fabricación del chasis debido a su alta resistencia y durabilidad.



Además, admite muy bien la soldadura mediante varios métodos. También, los chasis fabricados en este material tienen una buena resistencia a fatiga, lo que los hace adecuados para aplicaciones en las que se esperen ciclos de carga repetitivos.

-ACERO SAE 1017

Es un acero al carbono medio-bajo de baja aleación, que tiene buena propiedad de soldadura y maquinabilidad. Este tipo de acero es conocido por su alta resistencia y ductilidad, lo que le hace ideal para aplicaciones en que se requiera una gran resistencia y rigidez, por lo que se utiliza habitualmente en la fabricación de chasis tubulares y estructuras metálicas.

A continuación, se recoge una tabla con los valores característicos de los materiales elegidos.

Tabla 3 -Propiedades aceros elegidos.

	RESISTENCIA A TRACCIÓN (MPA)	LÍMITE ELÁSTICO (MPA)	TENSIÓN DE ROTURA (MPA)	RENTABILIDAD ECONÓMICA
S355	470-630	320-395	470-690	MEDIA
SAE 1010	350-400	190-330	320-420	ALTA
SAE 1017	420-460	220-390	450-450	ALTA
AISI 4130	600-620	410-480	550-760	BAJA

Estos valores dados dependen fundamentalmente de los tratamientos térmicos que puede recibir el acero y de la sección del material.

Todos los aceros anteriormente nombrados, cumplen con las condiciones de la normativa y además cumplen con las buenas capacidades de soldabilidad y maleabilidad, sin embargo, para la fabricación de perfiles más ligeros y resistentes destacan los aceros S355 y el AISI 4130 debido a sus mayores valores de resistencia a rotura y tracción.

Habitualmente el acero S355 es más barato que el AISI 4130, esto se debe a que es más utilizado en la fabricación de estructuras metálicas y con ello es ampliamente



disponible por multitud de proveedores y fabricantes, lo que da lugar a una mayor oferta. Por otro lado, el acero AISI 4130 es más caro debido a su contenido de aleación de cromo y molibdeno y su menor puesta en mercado.

Finalmente se toma de decisión de fabricar con acero S355 debido a que es uno de los aceros que tiene las mejores características mecánicas de los seleccionados y además resulta ser el más económico y disponible.

A la hora de acceder a diferentes catálogos de fabricantes de perfiles tubulares estructurales de acero S355 nos encontramos con la alternativa de escoger entre aceros laminados en frío o laminados en caliente, para elegir de manera correcta se debe conocer el comportamiento de ambos tipos de acero.

Los aceros laminados en frío son más resistentes y tienen mayor tolerancia dimensional, esto quiere decir que son más precisos en cuanto a la forma y medida esperadas. Además, este proceso de laminado en frío le da una mayor dureza y resistencia a tracción, por lo que son menos maleables.

Por otro lado, se encuentran los aceros laminados en caliente los cuales son mejor para procesos que se requiera una alta maleabilidad del acero, sin embargo, su tolerancia dimensional es inferior que la del acero laminado en frío.

Se toma la opción de aceros laminados en frío por el hecho que se busca una alta precisión y rigidez de la estructura y la maleabilidad del acero no es tampoco muy alta para la aplicación de nuestro proyecto.

6.3. ELECCIÓN DEL MOTOR

En la competición, como ya se ha comentado, existen tanto disciplinas de vehículos de motores de combustión interna como vehículos de motores eléctricos. La elección entre un motor de combustión y un motor eléctrico depende básicamente de los objetivos y requisitos específicos del proyecto.

Aunque los motores eléctricos tienen algunas ventajas, como ser más eficientes en términos de energía y tener un menor impacto ambiental, hay varias razones por las que se opta por un motor de combustión en lugar de uno eléctrico.

Las razones principales son la disponibilidad tanto de piezas como de información y el costo de los componentes. Los motores de combustión son más comunes y generalmente son menos costosos que los motores eléctricos, lo hace que esta opción sea más atractiva desde un punto de vista económico. Por otro lado, el hecho de disponer de multitud de información hace de esta opción más viable a nivel de adquisición de datos.

Sin embargo, el proyecto no se centra en el montaje del monoplace final por el hecho de que la universidad aun no dispone de un proyecto actual, por lo que se centra únicamente en la fabricación del chasis.

Esta elección de motor también se debe tener en cuenta para la realización de los análisis, ya que este es una de las masas suspendidas por el chasis más sustancial.

Finalmente se ha optado por un motor de combustión interna de una Yamaha R6-YZF típico en multitud de coches de la competición, esto se debe básicamente a la gran cantidad de información que está disponible en internet relacionada con medidas y modelos 3D del mismo, la cual de motores eléctricos puede ser más tediosa su búsqueda.

Además de esto, este motor cuenta con una cilindrada reglamentaria de 599cc, con una potencia máxima de 116 CV a 14.500 rpm, la cual es una potencia perfecta para conseguir un buen rendimiento y buenas aceleraciones y velocidades punta.

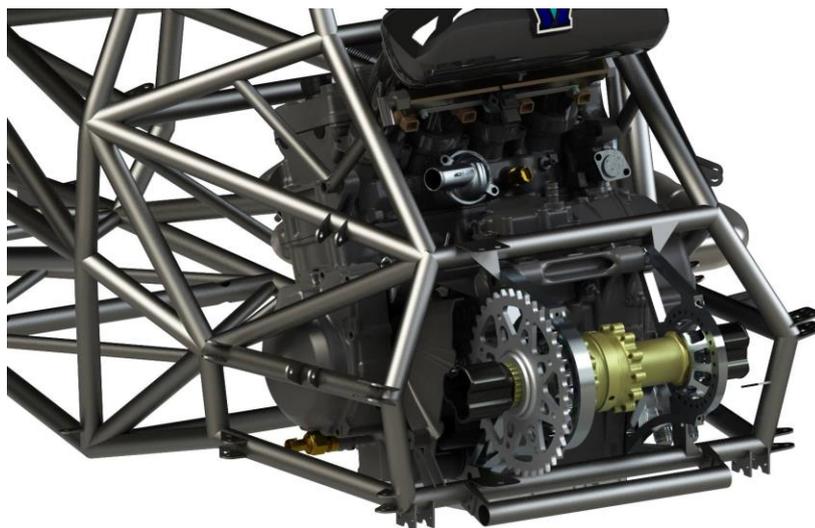


Ilustración 25 -Motor YZF-R6 en chasis tubular de un Formula Student.



7. OBTENCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL

La obtención del modelo alámbrico de partida del chasis se basa en una investigación previa de la competición. La primera fase de la investigación consiste en análisis detallado de las diferentes soluciones utilizadas en modelos existentes, posteriormente, se realiza una recopilación de datos de la normativa que afectan al diseño del chasis, con esto se pretende encontrar las mejores alternativas para el diseño de nuestro chasis que sean reglamentarias.

Se considera también la experiencia previa en el sector automotriz, lo que incluye estar al tanto de las tendencias y avances tecnológicos en la industria permitiéndome integrar las soluciones más innovadoras en el diseño del chasis.

Una vez que se cuenta con la información necesaria, se procede a la creación del modelo de partida en 3D utilizando el software de diseño asistido por computadora Autodesk Inventor. Se modela el chasis en forma de estructura alámbrica, a la que posteriormente se le asignan las correspondientes secciones de perfiles tubulares y se agregan los soportes necesarios. Para el dimensionamiento del chasis se tienen en cuenta factores clave que estipula la normativa como una serie de plantillas de tamaños mínimos correspondientes a diferentes zonas del monoplaça.

Es importante destacar que el modelo de partida en 3D es solo una base para el diseño del chasis y que se deben realizar análisis adicionales para asegurar que cumpla con los requisitos estipulados.

Por lo tanto, se realizan análisis de elementos finitos utilizando el software Nastran-Patran para evaluar la resistencia estructural del chasis y realizar posibles mejoras en el diseño. Se ajustan los parámetros del modelo y se comparan los resultados obtenidos con los valores requeridos por la normativa.

Finalmente, se ajusta el modelo 3D del chasis para garantizar que cumpla con los requisitos de diseño y reglamentarios de la competición.

7.1. DIMENSIONAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA NORMATIVA

Tener en cuenta la normativa a la hora de diseñar es crucial para cumplir con las reglas establecidas y también para garantizar la seguridad del piloto durante la competición.

Una de las primeras normas estipuladas es dimensionar el habitáculo en función del tamaño del 95% de los humanos, esta es una medida importante a considerar, ya que el monoplaza está diseñado para ser conducido por un humano y se debe garantizar la comodidad y la seguridad de este, por lo que es necesario entonces que el chasis tenga unas dimensiones adecuadas que se ajusten a su tamaño y forma corporal.

Por ello, se deben considerar las medidas corporales del 95% de los hombres en general, incluyendo la altura, el peso y la longitud de las extremidades. Estos datos permiten definir las dimensiones del chasis en términos de altura del asiento, posición de los pedales, espacio para las piernas y otras partes. Tener en cuenta esto durante la fabricación del chasis también puede mejorar el rendimiento del monoplaza en la competición.

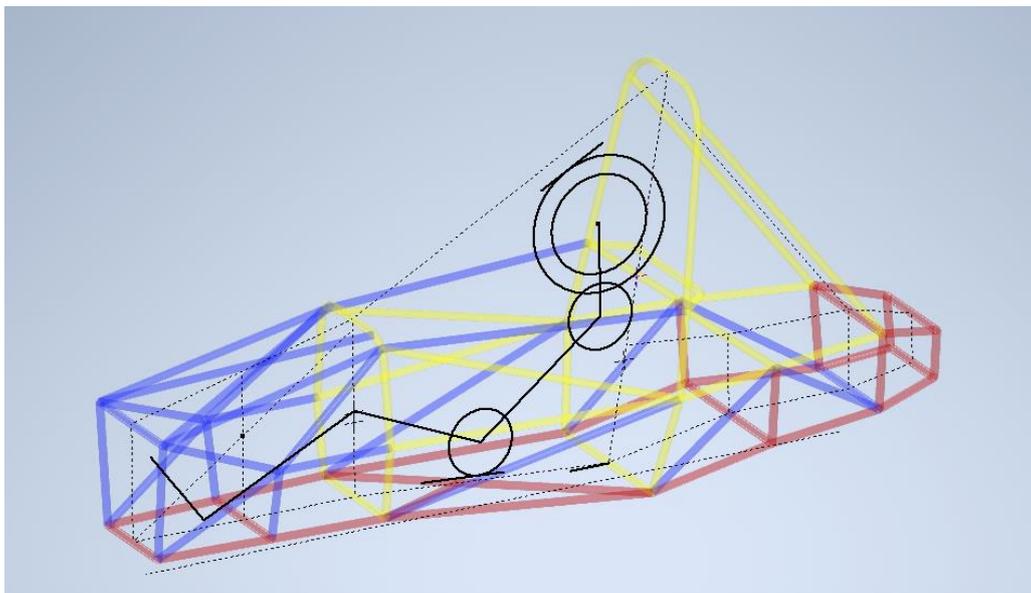


Ilustración 26 -Dimensionamiento en función del percentil del 95%.

Otro aspecto para tener en cuenta en la fabricación es la distancia mínima entre ejes, es importante diseñar teniendo en cuenta esta distancia, ya que esto afecta directamente la estabilidad y maniobrabilidad del monoplaza. Una distancia inadecuada entre ejes puede generar problemas de control del vehículo y disminuir el rendimiento

del monoplaza. Además, la normativa estipula una distancia mínima entre ejes, por lo que es necesario considerar este factor en el diseño del chasis.

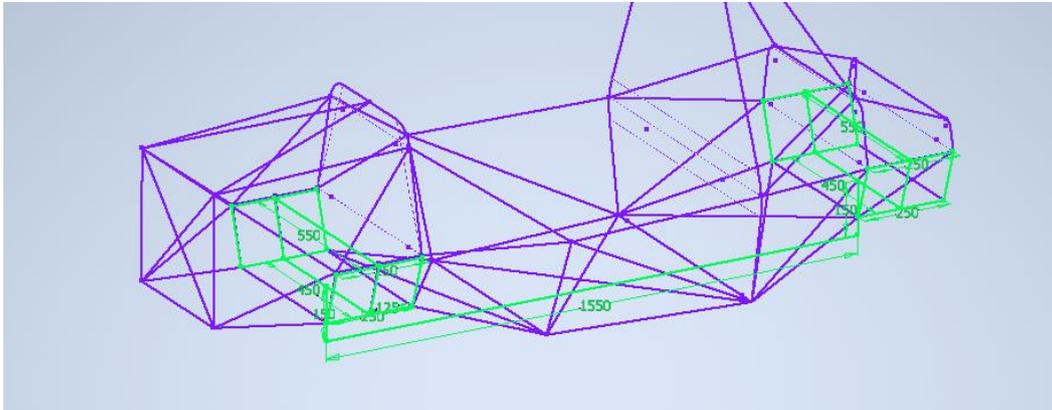


Ilustración 27 -Dimensionamiento en función de la distancia mínima entre ejes.

Por otro lado, la normativa exige unos volúmenes mínimos dados mediante plantillas para el habitáculo del piloto, estas se utilizan en el diseño del chasis para garantizar un ajuste adecuado del piloto al vehículo y con ello mejorar la comodidad del piloto y la seguridad en caso de accidente durante la competición.

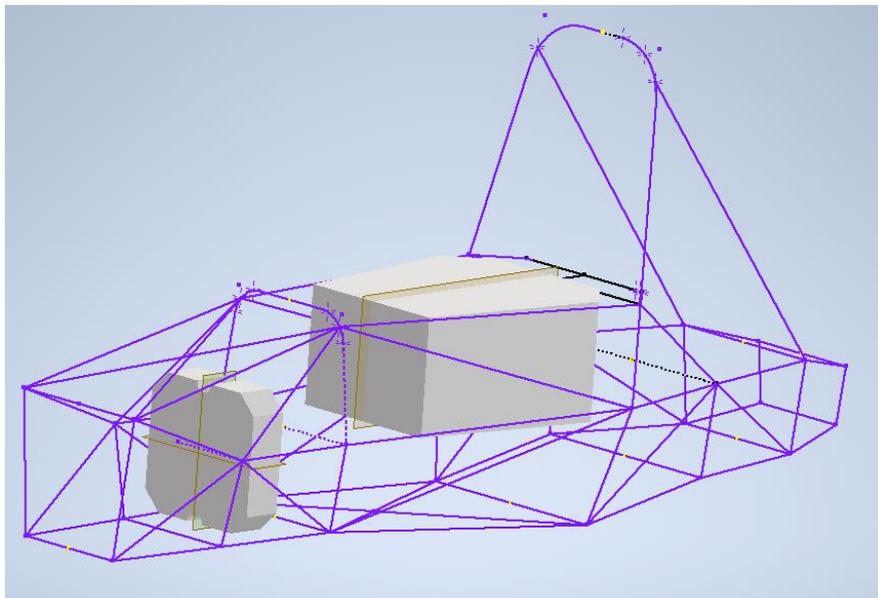


Ilustración 28 -Dimensionamiento en función de las plantillas del cockpit.

Para cada parte del chasis tubular existe una normativa específica nombrada anteriormente que se ha tenido en cuenta a la hora del diseño, sin embargo, se han nombrado las principales de las cuales parte el diseño.

7.2. DIMENSIONAMIENTO EN FUNCIÓN DEL MOTOR

Antes de diseñar un chasis tubular, es importante saber que motor se va a montar. Esto es especialmente crítico en el caso de vehículos de competición como el Fórmula Student, donde se busca el mejor rendimiento posible.

El motor influye en la ubicación y la disposición de los componentes en el chasis. Por ello, el tamaño, la forma, la ubicación y el peso pueden afectar a la posición del centro de gravedad del monoplaza y a la distribución de pesos sobre este.

Por otro lado, también afecta al comportamiento dinámico del vehículo. La potencia y el par del motor, junto con el tipo de transmisión utilizada, pueden influir en la velocidad máxima que puede alcanzar el vehículo. Si se quiere garantizar un buen comportamiento dinámico y un buen rendimiento en la competición, se debe tener en cuenta.

Por último, tenerlo en cuenta desde el inicio del diseño también permite optimizar el proceso de fabricación del chasis. Adaptando el diseño del chasis a las características del motor se puede conseguir reducir los costos y el tiempo de producción, así como mejorar la eficiencia y la calidad del proceso.

Por todo lo anterior, es necesario hacer una investigación previa y detallada del motor y considerar sus características y requisitos específicos desde el inicio del diseño del chasis.

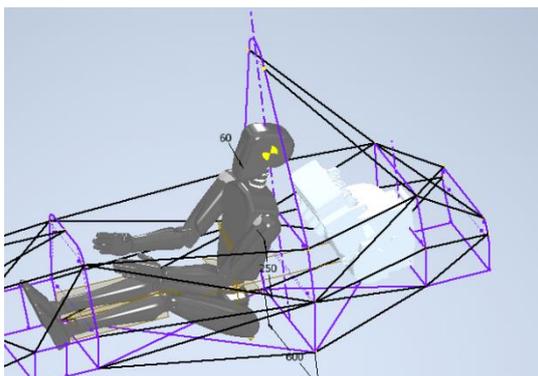


Ilustración 29 -Dummie y motor insertado en la estructura alámbrica

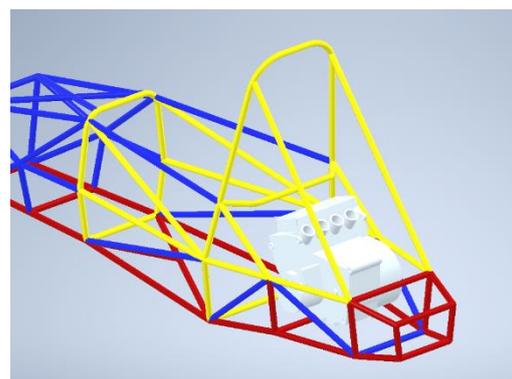


Ilustración 30 -Ensamblaje motor y chasis.

Es importante contar con un modelo 3D del motor, ya que esto nos permite obtener información detallada sobre su tamaño, forma y ubicación de los puntos de anclaje.



Además, el modelo 3D nos proporciona una visión clara de los componentes y estructuras internas del motor, lo que nos permite diseñar una estructura de chasis que se adapte perfectamente a las necesidades y requerimientos específicos de nuestro motor.

7.3. DIMENSIONAMIENTO EN FUNCIÓN DE LAS CARGAS ACTUANTES

Todo vehículo cuenta con una serie de masas suspendidas y no suspendidas, en nuestro caso nos centramos en la identificación de aquellas masas suspendidas, ya que son las que asientan sobre sobre nuestro chasis. Aquellas masas por identificar son el motor y su conjunto (transmisión, escape, admisión), asiento, depósito de gasolina, ocupante y todo aquello que el vehículo transporte. Conseguir reducir lo máximo posible las masas suspendidas del vehículo hacen que este trabaje de manera más ágil y dinámica, consiguiendo velocidades punta superiores, menos balanceos en curvas y ahorros de consumo, entre otros.

7.3.1. CHASIS

El peso del chasis, aunque no sea una masa suspendida para estos análisis, se debe tener muy en cuenta a la hora de diseñar, ya que tiene una influencia directa sobre el rendimiento y la maniobrabilidad del chasis. Un chasis ligero ofrece respuestas más directas en cuanto aceleraciones y cambios de dirección, además de un menor consumo de combustible.

Para la elección del peso del chasis hemos tomado varias opciones las cuales cumplen con la normativa de perfiles y se acercan al peso medio de los chasis tubulares utilizados en la competición (entre 25 y 32 kilogramos). Una vez tenemos las opciones, calculamos el peso de la estructura en función de la densidad del acero.

Tabla 4 -*Alternativas chasis.*

	TUB.AMA	TUB.AZU	TUB.ROJO	PESO (kg)
CHASIS 1	25,4x2,4	25,4x1,65	25x1,5	21.520
CHASIS 2	25,4x2,4	25x1,75	25x1,5	21.818
CHASIS 3	25,4x2,4	25x1,75	25,5x1,5	21.917
CHASIS 4	25,5x2,6	25x1,75	25,5x1,5	22.707
CHASIS 5	25,5x2,6	25,5x1,9	25,5x1,5	23.496

CHASIS 6	25,5x2,6	25,4x2	25,5x1,5	23.881
CHASIS 7	25,5x2,6	25,4x2	25,8x1,9	25.214
CHASIS 8	25,5x2,6	25,4x2	26,5x2,8	28.260
CHASIS 9	26x3,5	25,4x2	25,8x1,9	28.798
CHASIS 10	27x4	26,8x3,2	26,5x2,8	39.903

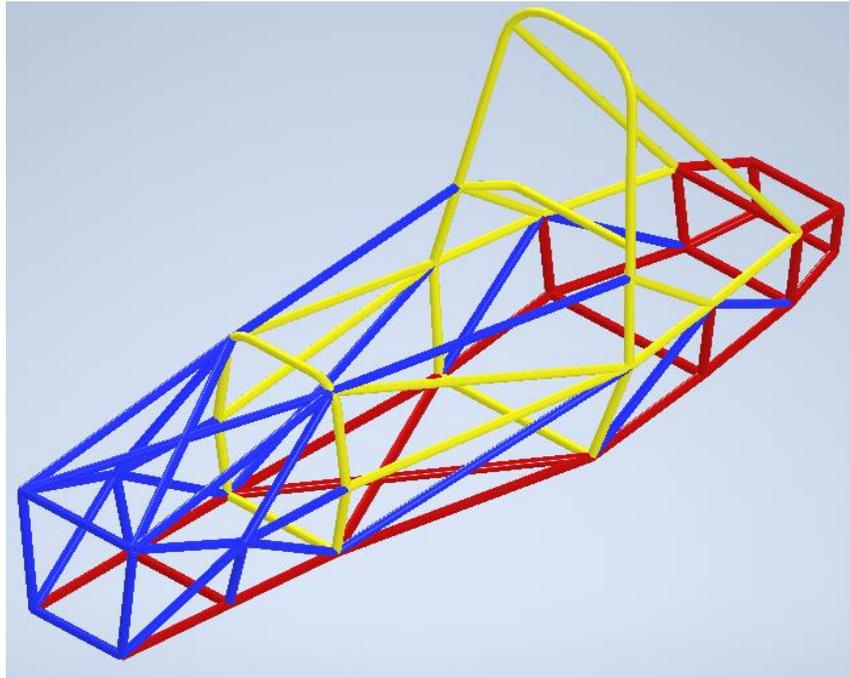


Ilustración 31 -Distribución por colores de los perfiles tubulares utilizados

7.3.2. PILOTO

El peso del piloto es una de las cargas más significativas en los vehículos de Fórmula Student, esto se debe a que el peso medio de un hombre mayor de 18 años en España es 77.5 kilogramos un peso relativamente elevado en comparación con las otras partes del monoplaza. Además, habrá que sumarle el equipamiento de protección del piloto el cual entre casco, mono y guantes ronda los 2-3 kilogramos.

7.3.3. MOTOR

La norma estipula que el motor de combustión utilizado para propulsar el vehículo debe ser de cuatro tiempos con una cilindrada no superior a 710 centímetros cúbicos por ciclo. Las cadenas cinemáticas híbridas, como las que utilizan motores eléctricos que funcionan con energía almacenada, están prohibidas.

En este apartado se analizan las masas correspondientes al sistema motor y su conjunto. Se ha optado por la elección de un motor de combustión de 600 de cilindrada de 4 tiempos, perteneciente a una Yamaha YZF-R6 del año 2006, formado por 4 cilindros refrigerado por líquido. Con un peso medio de bloque y sistemas auxiliares de unos 67 kilos.

Por otro lado, el sistema de admisión y escape de alta competición se consigue reducir el peso de estos componentes a entre 7 kilos.

Este irá situado detrás del piloto justo debajo del arco principal, donde se considera que afecta menos a la distribución de pesos sobre la estructura.

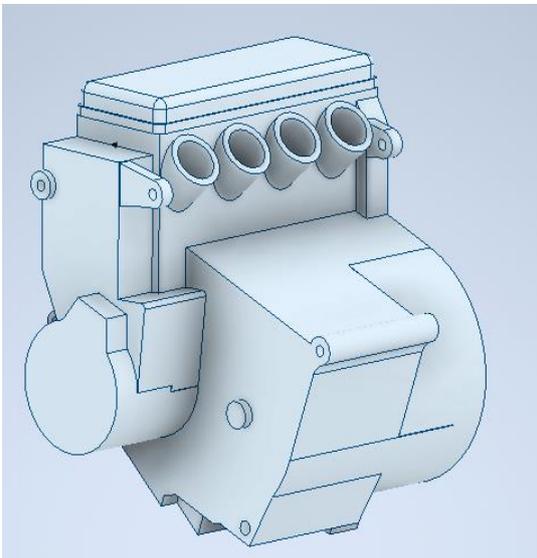


Ilustración 32 -Modelo geométrico 3D del motor.



Ilustración 33 -Modelo físico real del motor.

7.3.4. SUSPENSIONES

En cuanto al tipo de suspensiones utilizadas opta por una suspensión de doble brazo o trapecio, la más típica en competiciones tipo fórmula. Esta suspensión cuenta de diferentes partes como pueden ser: trapecio superior e inferior, barra actuadora, muelle, amortiguación, balancín y anclajes.



Ilustración 34 -Suspensión de doble brazo.

Existen dos geometrías posibles a realizar con este tipo de suspensión denominadas *push* o *pull*, sin embargo, solo varía la geometría, los componentes son los mismos, con lo que el peso aportado al monoplaza será igual.

Hemos tenido en cuenta a la hora de diseñar el chasis, el tipo de suspensiones ya que se busca la triangulación de barras en la zona de anclaje de estas al mismo.

Contando con elementos de alta competición fabricados en fibras de carbono y materiales ligeros y basándonos en monoplazas similares podemos alcanzar un peso mínimo del sistema de suspensión de unos 20 kilogramos.

7.3.5. DEPÓSITO

Para la elección de la capacidad del depósito de gasolina del monoplaza se debe conocer la máxima distancia que recorrerá en las pruebas de la competición para asegurar la llegada a meta del vehículo la cual es de 22 kilómetros. El consumo medio



del motor seleccionado es de 5.8 litros a los 100 kilómetros por lo que se ha utilizado un depósito con una capacidad de depósito de 8 litros, además se deben añadir la bomba de aforador en el depósito y el propio peso del depósito y el combustible.

Con el depósito lleno hasta arriba y teniendo en cuenta que la densidad de la gasolina es de 680 gramos por litro, tenemos un peso de gasolina de 5.44 kilogramos.

El depósito se puede adquirir a diferentes proveedores siendo el peso medio de este con bomba aforado incluido de 2 kilogramos.

7.3.6. BATERÍA

Un potente motor como el de la Yamaha YZF-R6 necesita una batería de gran potencia que sea capaz de proceder con el arranque eléctrico y mantener las prestaciones a altas revoluciones, por ello se cuenta con una batería de litio que se caracteriza por tener una carcasa de nylon resistente al calor, resistente al agua y la mejora de las conexiones del terminal. Este tipo de baterías pesa unos 8 kilogramos.

7.4. CONJUNTO DE MASAS FINAL

Tras analizar las masas más significativas se analizan en detalle el conjunto total de masas de nuestra estructura.

Tabla 5 -Conjunto de masas finales.

ELEMENTO	PESO (KG)
PILOTO Y EQUIPACIÓN	80
MOTOR	74
SUSPENSIONES	20
DEPOSITO	10
BATERIA	8
ASIEN TO Y CINTURÓN	5
PEDALERA Y BOMBAS	6
SISTEMA ELÉCTRICO	5
VOLANTE	2
CARENADO	8
RUEDAS Y NEUMÁTICOS	16

SISTEMA DE FRENADO	10
TORNILLERÍA	2
TRANSMISIÓN	16
OTROS	6

El peso medio de los monoplazas en la competición se encuentra entre 180 y 250 kilogramos sin contar el peso del piloto. El peso aproximado estimado del chasis diseñado es de 200 kilogramos, el cual es una estimación de peso mínimo para la realización de los cálculos.

Además de las cargas producidas por el propio peso de los componentes del chasis existen otro tipo de cargas que afectan al funcionamiento del vehículo como son las cargas gravitatorias, las cargas aerodinámicas, las cargas de impacto, las cargas debidas a aceleraciones o deceleraciones del monoplaza, sin embargo, la normativa estipula una serie de casos de carga a los cuales el chasis puede verse sometido durante su funcionamiento. No obstante, se deben analizar aquellas cargas sujetas al chasis durante su funcionamiento para conocer mejor el comportamiento de este.

Es importante tener en cuenta estas cargas a la hora de diseñar el chasis, ya que, si no se consideran adecuadamente, pueden provocar deformaciones o roturas en el chasis que afecten a la seguridad y la estabilidad. Además, un diseño adecuado del chasis puede permitir que el vehículo soporte mejor estas cargas, lo que puede aumentar su vida útil y mejorar su rendimiento. Por ello en el diseño de las diferentes partes de la estructura se utilizan diferentes triangulaciones de barra para conseguir un estructura rígida y segura.

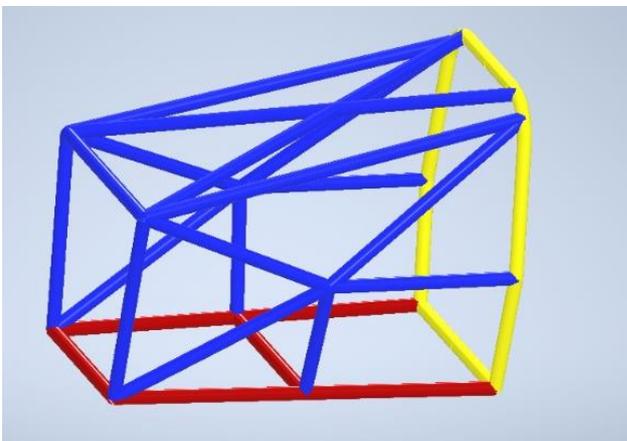


Ilustración 35 -Triangulación de barras en la zona delantera del chasis

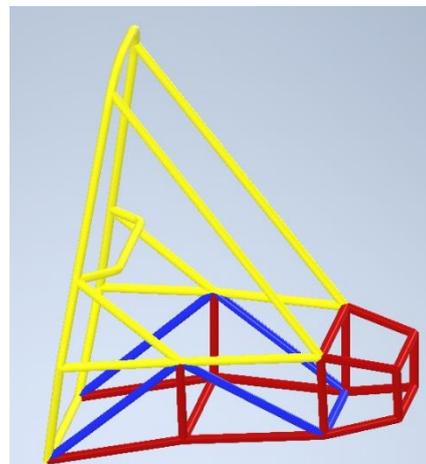


Ilustración 36 -Triangulación de barras en la zona trasera del chasis.

8. OBTENCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO FINAL

Para llegar a la solución final se ha pasado antes por diferentes modelos de chasis no válidos. Partiendo de los datos adquiridos sobre los diferentes modelos de chasis tubulares utilizados en la competición se parte de una primera estructura alámbrica. Esta resulta no ser apropiada para su uso, esto se debe principalmente al no cumplimiento de la normativa la cual establece unos valores de deformaciones y tensiones máximas admisibles para cada caso de carga establecido, estos valores se quedan muy lejos de los óptimos por lo que se le realizan una serie de mejoras aliviando las tensiones en aquellas zonas críticas, para intentar reducir estos valores máximos.



Ilustración 37 -Modelo chasis 1

Aun realizando las mejoras en los nodos críticos, el modelo sufre desplazamientos de más de 6 centímetros y tensiones máximas de 2000 MPa las cuales están muy por encima de lo soportado por el material y permitido por la normativa. Por ello, se decide realizar mejoras importantes en el diseño del chasis sustituyendo toda la zona de impacto lateral la cual sufre bastante en el modelo anterior, con la idea de reducir dichas tensiones y conseguir que el modelo se adapte a los valores requeridos.

En este modelo se consigue rebajar las tensiones máximas combinadas a la mitad del modelo anterior siendo las obtenidas de 1090 MPa y las deformaciones a 4 centímetros, por lo que conseguimos rebajarlas, pero no adaptarlas a la normativa.

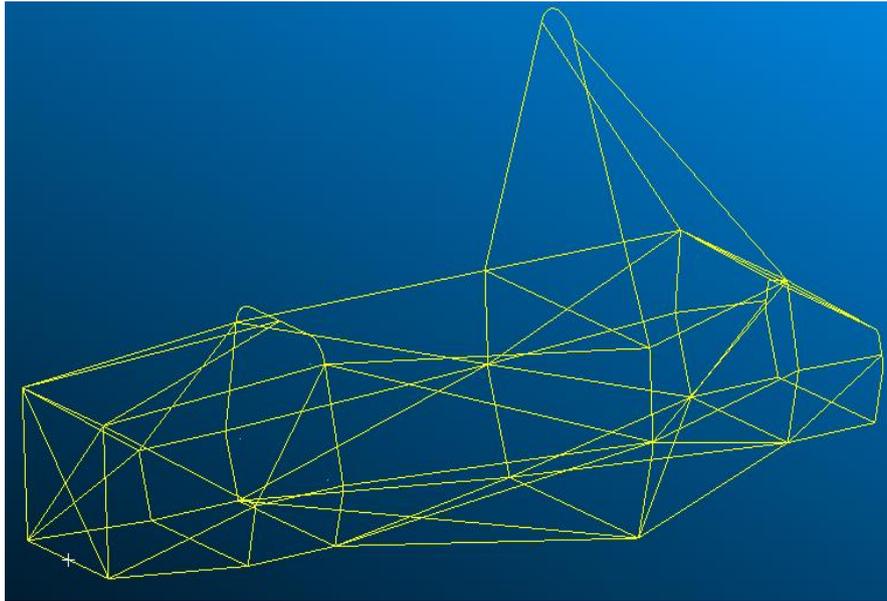


Ilustración 38 -Modelo chasis 2

Tras obtener multitud de modelos similares a este y no conseguir los valores requeridos, se decide comenzar de cero con el diseño del chasis teniendo en cuenta aquellas zonas que hemos visto previamente que son críticas y obviamente la normativa de diseño. Se consigue obtener un modelo de chasis válido.

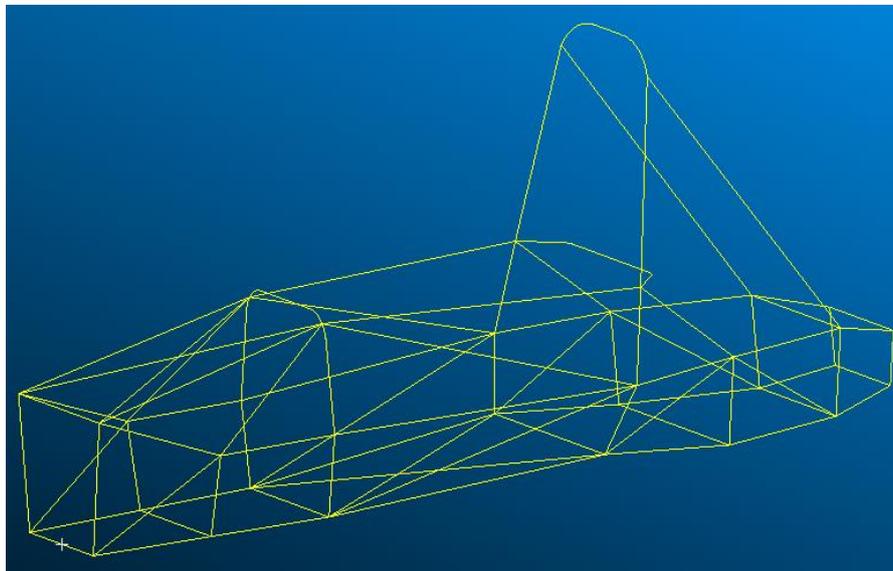


Ilustración 39 -Modelo chasis 3

Este resulta ser el modelo de chasis final ya que cumple con las especificaciones estipuladas por la normativa. Esto valores se desglosan posteriormente en los análisis estructurales detallados.

Finalmente se ha optado por la elección de un chasis tubular de acero fabricado con acero laminado en frío S355 el cual llevará montado un motor de combustión interna de una Yamaha R6. El peso aproximado del chasis utilizado para los cálculos es de 23.5 kilogramos, se dice que el aproximado ya que no se tiene en cuenta todos los soportes que lleva sujetos, además tampoco se tienen en cuenta las soldaduras.

Tabla 6 -Secciones utilizadas en el chasis para los análisis.

SECCIÓN(MM)	ESPESOR (MM)	ÁREA(MM²)	Ix=Iy (MM⁴)
25.5x2.6	2.6	395.34	116097
25.5x1.9	1.9	293.1	88452
25.5x1.5	1.5	233.3	71509.8

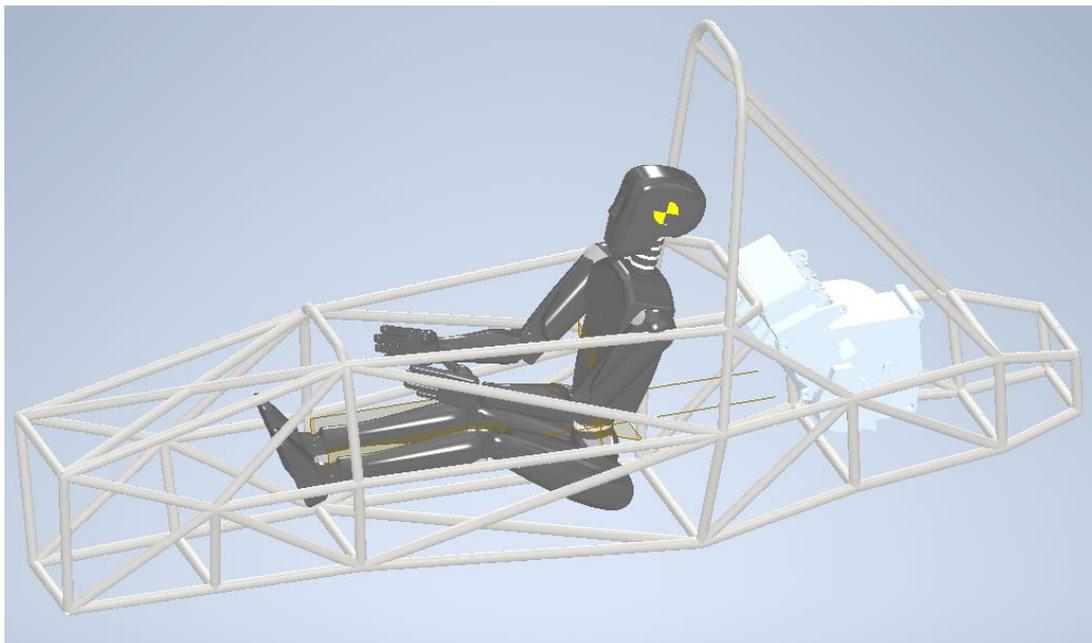


Ilustración 40 -Ensamblaje motor, piloto y chasis.

Tras realizar los análisis de elementos finitos se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 7 -Resultados obtenidos de los ensayos.

	TENSIÓN MÁXIMA (MPa)	DEFORMACIÓN MÁXIMA (MM)
IMPACTO FRONTAL	152	1.08
IMPACTO LATERAL	236	4.62
IMPACTO TRASERO	182	1.40
ARCO PRINCIPAL	82.8	0.427
ARCO FRONTAL	83.3	0.420
CINTURONES	78.5	1.06
FLEXIÓN	5.43	0.05

Tal y como muestra la tabla anterior, los análisis son válidos, esto es debido a que no se supera en ningún ensayo la deformación máxima de 25 mm en ningún punto del chasis, además, tampoco se produce el fallo en ningún punto de la estructura, es decir, no se superan ni la tensión a fluencia ni a rotura cuyos valores respectivamente son de 305 y 365 MPa.

En cuanto al análisis de torsión podemos observar que el valor obtenido de rigidez torsional es de 1930 Nm/º, el cual se considera apropiado para el peso de la estructura. Es adecuado porque se han excluido del análisis diferentes cuerpos o elementos que contribuyen a aumentar la rigidez del chasis y con ello aumentar dicho valor. Por lo tanto, el valor final de rigidez torsional mencionado será mayor que el obtenido. Estamos comprando este valor con la rigidez torsional de equipos líderes, que normalmente se sitúa alrededor de los 3000 Nm/º con pesos de chasis de 30 kilogramos hacia arriba.

9. REFERENCIAS

-Ilustración 1: Parrilla de equipos participantes en el año 2019 (Circuito de Montmeló).

<https://www.formulastudent.es/home/formula-student/>

-Ilustración 2: Monoplaza realizando prueba dinámica.

<http://www.upmracing.es/9837/formula-student-spain-2016>

-Ilustración 2: Equipo "FStudent Cantabria" 2018-2019.

<https://www.instagram.com/fscantabria/?hl=es>

-Ilustración 3: Equipo Universidad Carlos III Madrid, "MAD Formula Team" 2023-2024.

<https://www.linkedin.com/company/madformulateam/?originalSubdomain=es>

-Ilustración 5: Distribución de materiales en función de la zona del vehículo.

<https://www.autofacil.es/tecnica/materiales-fabricacion-carroceria/195648.html>

-Ilustración 6: Jaula de seguridad.

<https://cagekits.org/product/gr-subaru-rally-roll-cage-kit/>

-Ilustración 7: Vehículo con chasis independiente.

<http://ortizalvarosua12.blogspot.com/2012/10/tipo-de-carrocerias.html>

-Ilustración 8: Ejemplo chasis autoportante.

<https://www.autofacil.es/tecnica/tipo-carroceria-lleva-coche/196421.html>

-Ilustración 9: Entallas deformación programada.

<https://www.drivingyourdream.com/cursoautomocion/previous/10>

-Ilustración 10: Chasis monocasco de fibra de carbono.

<https://www.diariomotor.com/2015/10/29/gordon-murray-istream-carbon/>

-Ilustración 11: Chasis en "X" Honda S2000.

<http://clubhondaspirit.com/foro/topic/99296-refuerzos-de-chasis-asm/>

-Ilustración 12: Chasis tubular

<https://gloria-cedric.ru/es/engine-priors/chto-takoe-ramnaya-konstrukciya-avtomobilya-ramnye-vnedorozhnik/>

-Ilustración 13: Chasis monocasco de fibra de carbono.

<https://www.motor.es/formula-1/asi-hace-monocasco-f1-201953622.html>

-Ilustración 16, 17, 18, 19,20 y 21: Reglamento FSAE

<https://www.fsaenline.com/cdsweb/app/NewsItem.aspx?NewsItemID=548584c5-5c81-481c-85e6-fa8e048a3da6>



-Ilustración 22- Vehículo con chasis tubular.

<https://dautomotrizuft.weebly.com/chasis.html>

-Ilustración 23- Chasis de fibra de carbono.

<https://www.motoryracing.com/coches/noticias/chasis-automotriz-y-su-evolucion/>

-Ilustración 24- Motor YZF-R6 en chasis tubular de un Formula Student.

<https://www.facebook.com/fsbizkaia>

Ilustración 32: Motor Yamaha YZF-R6.

<https://properhome.do/motor-r6-yamaha-k.html>

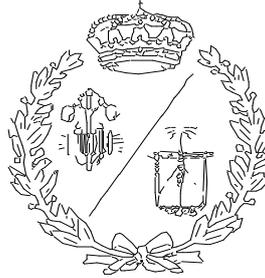
-Ilustración 33: Suspensión de doble brazo.

<http://noticias.espanol.autocosmos.com/2013/12/18/cuales-son-los-tipos-de-suspension-mas-comunes>



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

DOCUMENTO II: ANEXO DE CÁLCULOS

Autor: Francisco Cagigas Quintana

Julio - 2023

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. DESCRIPCIÓN MÉTODO Y MODELO DE TRABAJO	3
2.2. METODO DE ANALISIS DE ELEMENTOS FINITOS	3
2.3. ANALISIS POR ELEMENTOS VIGA	5
2.4. MODELO PARA CÁLCULOS DE ELEMENTOS FINITOS	6
3. ELECCIÓN PERFILES TUBULARES	9
4. CÁLCULO DE TENSIONES Y DEFORMACIONES EN EL CHASIS	12
4.1 ENSAYOS NORMA	12
4.3.1 IMPACTO FRONTAL	13
4.3.2 IMPACTO LATERAL	16
4.3.3 IMPACTO TRASERO	19
4.3.4 ENSAYO ARCO PRINCIPAL	21
4.3.5 ENSAYO ARCO FRONTAL	23
4.3.6 ENSAYO CINTURONES	25
4.3. ANÁLISIS A FLEXIÓN	27
4.4. ANÁLISIS A TORSIÓN	30
5. ANALISIS MODAL	32
5.1. INTRODUCCION	32
5.2 RESULTADOS	32
5.3 CONCLUSIÓN	35
8. REFERENCIAS	36

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1 -MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.....	3
ILUSTRACIÓN 2 -MALLADO DE MOTOR DE COMBUSTIÓN.	4
ILUSTRACIÓN 3 -MEJORA DE MALLADO.	6
ILUSTRACIÓN 4 -SEMILLAS DE MALLADO EN LOS RADIOS DE LA ESTRUCTURA.	7
ILUSTRACIÓN 5 -MALLADO FINAL DE LA ESTRUCTURA ALÁMBRICA.....	7
ILUSTRACIÓN 6 -CHASIS POR COLORES EN FUNCIÓN DEL PERFIL TUBULAR.	11
ILUSTRACIÓN 7 -SISTEMA DE COORDENADAS PARA LA APLICACIÓN DE CARGAS.	13
ILUSTRACIÓN 8 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE CARGA Y RESTRICCIONES EN EL ANÁLISIS PARA EL IMPACTO DELANTERO.....	14
ILUSTRACIÓN 9 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL ANÁLISIS DE IMPACTO DELANTERO.....	14
ILUSTRACIÓN 10 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS TENSIONES MÁXIMAS EN EL ANÁLISIS DE IMPACTO DELANTERO.....	15
ILUSTRACIÓN 11 -ESCALA REAL.	16
ILUSTRACIÓN 12 -ESCALA FICTICIA.	16
ILUSTRACIÓN 13 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE CARGA Y RESTRICCIONES EN EL ANÁLISIS PARA EL IMPACTO LATERAL.....	17
ILUSTRACIÓN 14 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL ANÁLISIS DE IMPACTO LATERAL.	17
ILUSTRACIÓN 15 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL ANÁLISIS DE IMPACTO LATERAL.	18
ILUSTRACIÓN 16 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS TENSIONES MÁXIMAS EN EL ANÁLISIS DE IMPACTO LATERAL.	18
ILUSTRACIÓN 17 -NUDO CRÍTICO EN EL CASO DE IMPACTO LATERAL.....	19
ILUSTRACIÓN 18 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE CARGA Y RESTRICCIONES EN EL ANÁLISIS PARA EL IMPACTO TRASERO.	20
ILUSTRACIÓN 19 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL ANÁLISIS DE IMPACTO TRASERO.	20

ILUSTRACIÓN 20 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS TENSIONES MÁXIMAS EN EL ANÁLISIS DE IMPACTO TRASERO.	21
ILUSTRACIÓN 21 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE CARGA Y RESTRICCIONES EN EL ANÁLISIS PARA EL ARCO PRINCIPAL.....	22
ILUSTRACIÓN 22 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL ANÁLISIS DEL ARCO PRINCIPAL.....	22
ILUSTRACIÓN 23 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS TENSIONES MÁXIMAS EN EL ANÁLISIS DEL ARCO PRINCIPAL.....	23
ILUSTRACIÓN 24 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE CARGA Y RESTRICCIONES EN EL ANÁLISIS PARA EL ARCO FRONTAL.	24
ILUSTRACIÓN 25 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL ANÁLISIS DEL ARCO FRONTAL.	24
ILUSTRACIÓN 26 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS TENSIONES MÁXIMAS EN EL ANÁLISIS DEL ARCO FRONTAL.	25
ILUSTRACIÓN 27 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL ANÁLISIS DE LOS ANCLAJES DEL CINTURÓN DE SEGURIDAD.	26
ILUSTRACIÓN 28 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS TENSIONES MÁXIMAS EN EL ANÁLISIS DE LOS ANCLAJES DEL CINTURÓN DE SEGURIDAD.	26
ILUSTRACIÓN 29 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE CARGA Y RESTRICCIONES EN EL ANÁLISIS DE FLEXIÓN. 28	
ILUSTRACIÓN 30 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN EL ANÁLISIS DE FLEXIÓN.. 29	
ILUSTRACIÓN 31 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA TENSIÓN MÁXIMA EN EL ANÁLISIS DE FLEXIÓN..... 29	
ILUSTRACIÓN 32 -REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE CARGA Y RESTRICCIONES EN EL ANÁLISIS DE TORSIÓN.	31
ILUSTRACIÓN 33- DEFORMACIONES DE TODOS LOS MODOS.	34



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 -PROPIEDADES SECCIONES TUBULARES CHASIS 5.	9
TABLA 2 -OPCIONES PERFILES TUBULARES.	10
TABLA 3 -ALTERNATIVAS CHASIS.	11
TABLA 4 -VALOR CARGA IMPACTO DELANTERO.	14
TABLA 5 -VALOR CARGA IMPACTO TRASERO.	20
TABLA 6 -VALOR CARGA ENSAYO ARCO PRINCIPAL.	22
TABLA 7 -VALOR CARGA ENSAYO ARCO FRONTAL.	24
TABLA 8 -MASAS REPRESENTATIVAS ENSAYO FLEXIÓN.	27
TABLA 9 -VALORES FUERZAS ENSAYO TORSIÓN.	30
TABLA 10 -VALOR RIGIDEZ TORSIONAL CHASIS.	31
TABLA 11 -VALORES DE LAS FRECUENCIAS DE VIBRACIÓN EN HERCIOS.	33



1. INTRODUCCIÓN

En el siguiente documento se recoge de manera detallada toda la información sobre los cálculos, análisis y simulaciones hechas sobre el chasis tubular diseñado para un monoplaza participante en la competición Fórmula Student que respaldan el diseño de chasis propuesto. Este documento abarca diferentes etapas, desde la obtención del modelo para los cálculos de elementos finitos hasta la fabricación del chasis tubular con el objetivo de proporcionar una visión más profunda sobre los cálculos y simulaciones realizadas.

En primer lugar, se presenta el método de elementos finitos mediante el cual se realizan todos los cálculos y simulaciones. Este método permite extraer conclusiones sólidas sobre el comportamiento de nuestra estructura tras diferentes casos de carga.

Los análisis se realizan mediante elementos viga, estos permiten modelar el comportamiento del chasis como una estructura unidimensional de barras, lo que simplifica la simulación y reduce el tiempo de cálculo. Además, permiten calcular las deformaciones y tensiones en el chasis bajo cargas estáticas, así como las frecuencias naturales y modos de vibración mediante análisis dinámicos. El análisis modal del chasis se realiza para identificar las frecuencias naturales y modos de vibración del sistema, lo que permite evaluar su comportamiento bajo cargas dinámicas y mejorar la seguridad del vehículo al prevenir la resonancia de la estructura con alguna parte o componente del monoplaza.

Si la normativa no especificase las condiciones ni las cargas para realizar los análisis en el chasis mediante elementos finitos, se debería hacer un análisis basado en un sistema multicuerpo del modelo. Un sistema multicuerpo es utilizado para simular el movimiento del chasis en respuesta a cargas dinámicas y evaluar las cargas actuantes en diferentes puntos permitiendo obtener una visión completa del comportamiento del vehículo y pudiendo también evaluar la distribución de cargas en el chasis.

El análisis de los diferentes modelos de chasis propuestos permite identificar las zonas críticas y realizar mejoras en el diseño, a partir de los resultados de estas pruebas, se realizan modificaciones en el diseño y se crean nuevos modelos, que son sometidos a nuevas pruebas hasta obtener el diseño óptimo. Esto se debe principalmente a los datos obtenidos los cuales no se adaptan a lo estipulado.



Finalmente, se pasa a la fabricación del chasis donde se comienza con el corte de los tubos proporcionados por el fabricante y su correcta preparación. Después, los tubos se curvan en la posición requerida para su posterior soldadura. Una vez completada la bancada para el ensamblaje de la estructura tubular, se procede a la soldadura de los tubos, ya finalmente se sueldan los anclajes del motor, la suspensión y la dirección.

Si queremos prologar la vida útil del chasis, debemos realizar los correspondientes tratamientos de superficies, como la imprimación, capas antióxidos y pintura en la estructura. Tras el secado de las superficies se procede con la instalación de los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos necesarios para completar el vehículo y ponerle a rodar.

2. DESCRIPCIÓN MÉTODO Y MODELO DE TRABAJO

2.2. METODO DE ANALISIS DE ELEMENTOS FINITOS

Para comprobar el correcto funcionamiento futuro de nuestro chasis antes de su fabricación se hace uso de un modelo de elementos finitos, este se debe básicamente a una reducción considerable del costo final del proyecto y una gran posibilidad de realizar multitud de pruebas y ensayos diferentes.

Antiguamente se fabricaban prototipos físicos que posteriormente eran testados tanto en análisis destructivos como no destructivos, lo que hacía que el proyecto fuese más longevo y caro. Por ello un modelo de elementos finitos te permite poner a prueba el modelo de chasis en los supuestos casos de trabajo futuros y conocer así su funcionamiento y en caso de no ser el deseado modificarlo.

Este método MEF permite obtener un modelo matemático del sistema real y más fácil y económico que realizando fabricación y test de prototipos. Gracias a los avances dados en diferentes disciplinas como pueden ser las matemáticas, física o informática han permitido desarrollar diferentes softwares capaces de resolver estos modelos propuestos de forma rápida y sencilla. Para realizar un correcto modelo de elementos finitos no solo basta con conocer el funcionamiento del software, sino que se deben tener otros conocimientos más amplios de cómo funciona el método matemático y también se debe estudiar la pieza para analizar en su estado de uso habitual, para así aproximar el modelo lo máximo posible a la realidad.

La idea principal del método es transformar un elemento continuo de la naturaleza en un modelo discreto aproximado.

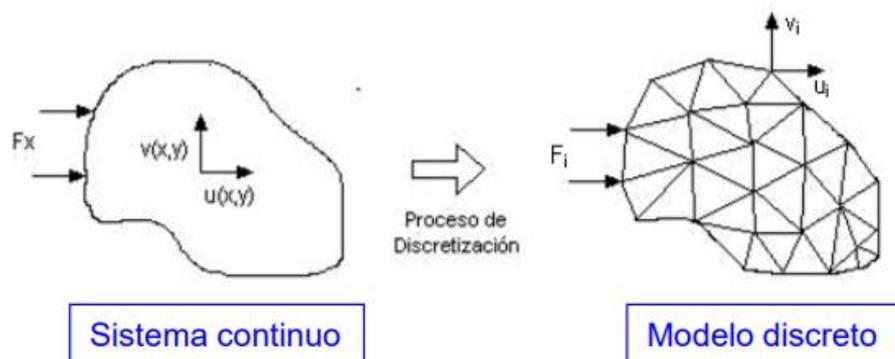


Ilustración 1 -Modelo de elementos finitos

Esto se conoce como discretización del modelo donde se divide en elementos finitos el dominio total del problema, esta división se realiza en elementos poligonales ya bien pueden ser triángulos como cuadrados como cualquier polígono regular que combinándose con otros iguales se adaptan a la malla de nuestro cuerpo. La forma de obtener estos elementos es mediante el mallado de la estructura.

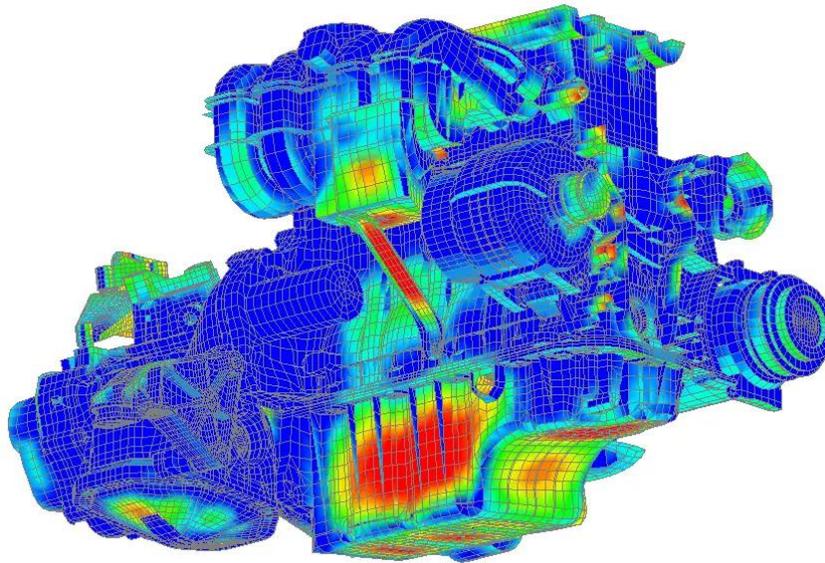


Ilustración 2 -Mallado de motor de combustión.

Es importante conseguir una buena calidad de malla en aquellas zonas de especial interés como son las zonas críticas y las zonas concretadoras de tensiones para que el software estudie en mayor detalle dichas zonas.

Se debe conocer el funcionamiento final del chasis para adaptar la malla lo más posible a la realidad y con ello conseguir resultados más exactos. Esto parece trivial pero el hecho de conseguir una malla buena en función de la estructura que se analice, parte de una amplia experiencia en elementos finitos y también de un conocimiento del funcionamiento futuro sabiendo esos posibles puntos donde puede sufrir más la pieza.

Es importante por ello conseguir una buena calidad de malla en aquellas zonas de especial interés como son las zonas críticas y las zonas concretadoras de tensiones para que el software estudie en mayor detalle dichas zonas.



Estos polígonos nombrados anteriormente representan una parte del dominio del problema y se definen por sus características geométricas y de materiales, son representados mediante ecuaciones que describen su comportamiento individual.

Los polígonos que forman la malla están conectados entre sí mediante los diferentes nodos del sistema, el método calcula las soluciones aproximadas en dichos nodos y posteriormente interpola por todo el dominio para obtener una solución de todo el modelo.

Finalmente, con el modelo mallado se le aplican las condiciones de contorno de los diferentes análisis a los que se le somete y posteriormente se analizan y se dibujan los resultados obtenidos, estos análisis nos puede proporcionar información del modelo acerca de su comportamiento estructural, térmico, eléctrico...

2.3. ANALISIS POR ELEMENTOS VIGA

El análisis mediante elementos viga es una técnica utilizada dentro del método de elementos finitos para estudiar el comportamiento de estructuras que se pueden aproximar a elementos lineales unidimensionales, como pueden ser en el caso de nuestra estructura alámbrica. Esta técnica simplifica la geometría del modelo permitiendo un análisis más eficiente y menos costoso computacionalmente hablando.

Este método se basa en descomponer la estructura del chasis en multitud de elementos viga que están conectados entre sí mediante nodos, cada elemento viga tiene sus propiedades específicas y es representado por una ecuación, la cual puede considerar la flexión, las cargas aplicadas de cortantes y torsión o diferentes condiciones aplicadas a nuestro modelo.

Al modelizar nuestra estructura mediante elementos viga, el software nos señala que debemos indicarle la sección transversal utilizada para el cálculo automático de valores como los momentos de inercia, áreas transversales, etc. Otro aspecto clave para tener en cuenta es la orientación del eje de la sección, sin embargo, en nuestro caso al ser una sección circular esto no influye.

Modelizar mediante elementos viga te permite reducir considerablemente el tiempo de computación para la resolución del problema y además este método permite modelizar comportamientos a flexión y torsión de manera eficiente aun ahorrando recursos

informáticos, por ello son útiles para analizar diseños de estructuras donde se necesita una evaluación rápida del comportamiento del modelo.

Finalmente, una estructura modelizada mediante elementos viga permite únicamente aplicar restricciones de 6 grados de libertad en los puntos de unión entre los diferentes elementos es decir en los nodos de unión. Esto permite poder aplicar fuerzas, momentos o cargas en dichos nodos y además de ello en diferentes puntos de la estructura y a lo largo de toda la longitud de los elementos que la forman.

2.4. MODELO PARA CÁLCULOS DE ELEMENTOS FINITOS

Para la obtención del modelo de elementos finitos el primer paso es la importación de la geometría obtenida en Autodesk Inventor al software Nastran-Patran, esto no resulta óptimo y la importación del modelo no se realiza correctamente, por lo que, debemos de replicar dicha geometría de chasis en el software de elementos finitos.

Posteriormente, se discretiza el modelo alámbrico mediante el mallado de las diferentes curvas que forman el chasis, es importante saber identificar si el mallado es correcto y se adapta a lo requerido por nuestro modelo para poder obtener unos resultados que sean precisos y lo más aproximados a la realidad posible.

Por otro lado, el conocimiento sobre el funcionamiento del modelo permite tomar decisiones a la hora de realizar este mallado haciéndole más fino en aquellas zonas que se ha observado en modelos previos que sufrían mayores concentraciones de tensión. También en zonas donde se producen arcos se ha mejorado la calidad de malla para adaptarla lo más posible a la forma del chasis.

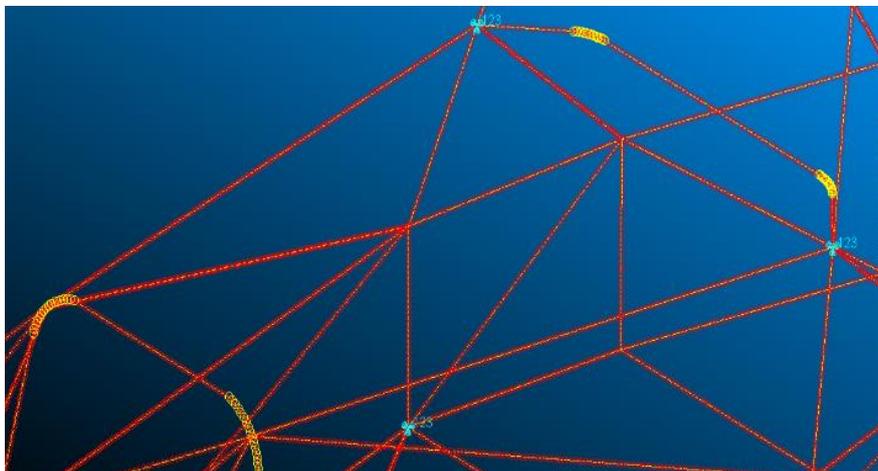


Ilustración 3 -Mejora de mallado.

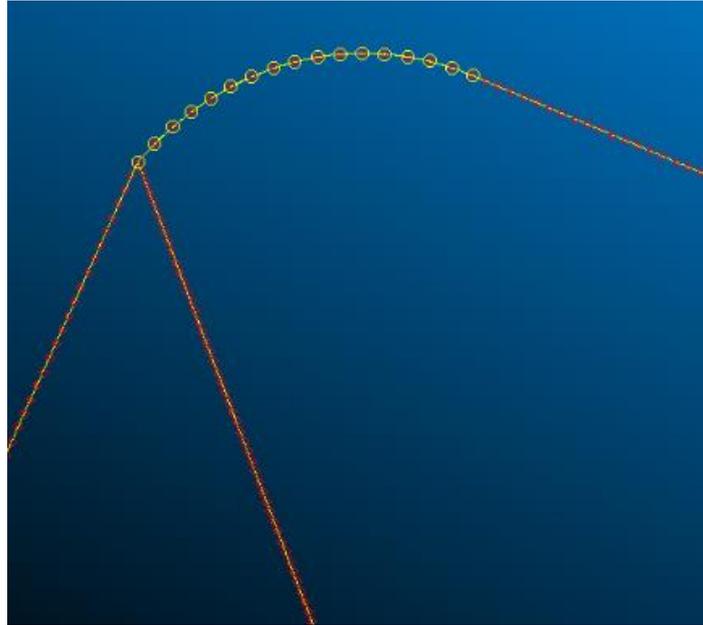


Ilustración 4 -Semillas de mallado en los radios de la estructura.

Tras tener en cuenta todos los aspectos anteriores se realiza la operación de mallado la cual da lugar a un modelo formado por 6292 nodos y 6199 elementos. Este número de nodos y elementos esta dado tras realizar la equivalencia del sistema, esta operación se realiza para reducir el número de nodos del sistema y con ello conseguir simplificar el modelo y mejorar la eficiencia computacional sin perder ningún tipo de información de este. Es importante saber cómo funciona la operación de equivalencia para no cometer errores y eliminar nodos importantes de la estructura.

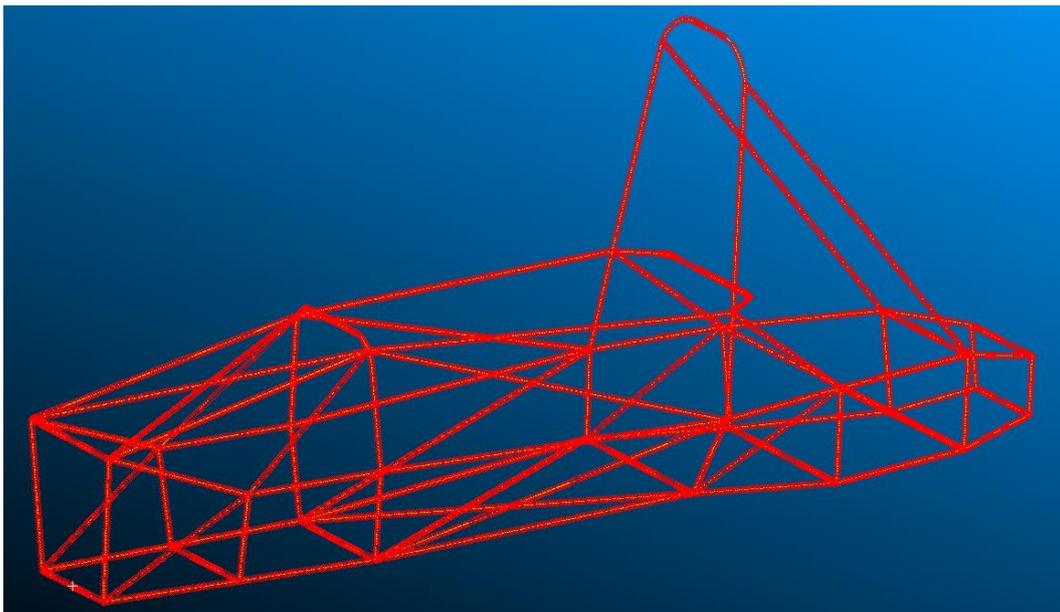


Ilustración 5 -Mallado final de la estructura alámbrica.



Una vez se cuenta con el modelo del chasis mallado correctamente se pasa a la aplicación de las condiciones de contorno de nuestro problema, en este caso una serie de cargas y de restricciones de movimiento estipuladas por norma que se aplican para los diferentes casos. Es importante conocer el funcionamiento del modelo que se estudia para no sobre restringir movimientos y conseguir con ello un comportamiento no relacionado con el del modelo.

El siguiente paso consiste en asignar el material del cual está formado la estructura, en nuestro caso será de acero y debemos introducir el módulo elástico y el coeficiente de Poisson, a parte de estos dos valores el software te permite introducir más valores como puede ser la densidad del material y demás.

Tras esto se crean las propiedades del modelo, en este apartado se toma la opción de modelar mediante elementos vigas, esta decisión parte desde el inicio de diseño, ya que se crea primeramente una estructura alámbrica a la que se la aplican los perfiles por ello en el software de elementos finitos se trata como un elemento 1D, esto simplifica mucho los cálculos a realizar en el análisis en comparación con un modelo de chasis con espesor de perfiles que se modela mediante una figura 3D. Con el modelo alámbrico ya disponible se aplican los correspondientes espesores y áreas de cada determinada parte de la estructura, ya que no toda la estructura tiene el mismo área y espesor.

Finalmente, se analizan los resultados obtenidos y posteriormente se dibujan en la pantalla principal del programa donde podemos hacernos una idea visual de cómo se va a comportar la estructura en cada caso de carga.



3. ELECCIÓN PERFILES TUBULARES

La elección de los perfiles tubulares es un aspecto clave en el diseño y construcción de chasis tubulares, ya que estos elementos tienen un papel fundamental en la resistencia de la estructura. La selección de un perfil adecuado depende de una serie de factores como puede ser la carga que debe soportar la estructura. Sin embargo, la normativa específica las secciones, momentos de inercia y espesores mínimos requeridos por los tubos en función de su posición en la estructura del chasis.

En este apartado se exploran los diferentes perfiles tubulares reglamentarios. Esto principalmente se realiza para modelizar diferentes opciones de chasis, con el objetivo de conseguir un peso adecuado de la estructura.

Para conseguir perfiles tubulares reglamentarios se sigue la norma y se obtienen los datos del mismo software de elementos finitos, comprobando así si los valores de área transversal mínima, momentos de inercia y espesores casan con los datos estipulados en el reglamento.

Al introducir los radios de la sección en propiedades de los elementos viga en Nastran-Patran, este nos devuelve de manera automática los siguientes datos de interés para nuestro cálculo:

Tabla 1 -Propiedades secciones tubulares Chasis 5.

SECCIÓN(MM)	ESPESOR (MM)	ÁREA(MM²)	I_x=I_y (MM⁴)
25.5x2.6	2.6	395.34	116097
25.5x1.9	1.9	293.1	88452
25.5x1.5	1.5	233.3	71509.8

De tal manera realizamos esta operación con diferentes perfiles tubulares para escoger aquellos que sean reglamentarios y con ellos conseguir una distribución de chasis en función de su peso.

Tabla 2 -Opciones perfiles tubulares.

APLICACIÓN	PERFIL CIRCULAR (mm)
<p><i>-Arcos principal y frontal.</i> <i>-Barra anclaje de seguridad.</i></p> 	<p>-25.4x2.4 -25x2.5 -25.5x2.6 -22x2 -20x2</p>
<p><i>-Estructura para protección frontal y lateral.</i> <i>-Refuerzos principales barras antivuelco.</i> <i>-Refuerzo para barra de anclaje de arnés de seguridad.</i></p> 	<p>-25.4x1.65 -25x1.75 -25.5x1.9 -25.4x2 -26.8x3.2</p>
<p><i>-Resto de elementos soporte para la estructura de protección frontal, arco frontal y arco principal.</i></p> 	<p>-25x1.5 -25.5x1.5 -25.4x1.2 -25.8x1.9 -26x1.6</p>

A través de la tabla anterior y combinando diferentes valores para las secciones del tubo, se consigue una distribución de modelos de chasis que van desde los 21 kilogramos hasta los 40 kilogramos. Teniendo en cuenta el peso medio de los chasis tubulares de los equipos participantes en la competición, se toma como primera opción para los cálculos resistentes un chasis con un peso aproximado de 23.5 kg, esto se debe a que el peso medio ronda entre los 26-30 kilogramos, el cual es dado con los soportes de todos los componentes sujetos al chasis. Se toma el chasis 5 ya que lo que se busca es conseguir con los perfiles dados un chasis lo más ligero, seguro y manejable posible.

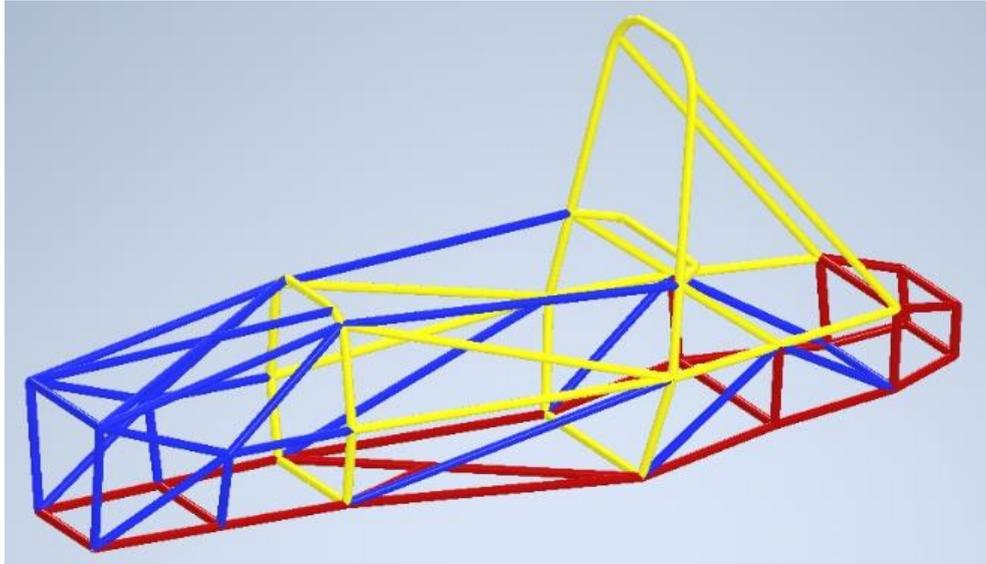


Ilustración 6 -Chasis por colores en función del perfil tubular.

Tabla 3 -Alternativas chasis.

	TUB.AMA	TUB.AZU	TUB.ROJO	PESO (kg)
CHASIS 1	25,4x2,4	25,4x1,65	25x1,5	21.520
CHASIS 2	25,4x2,4	25x1,75	25x1,5	21.818
CHASIS 3	25,4x2,4	25x1,75	25,5x1,5	21.917
CHASIS 4	25,5x2,6	25x1,75	25,5x1,5	22.707
CHASIS 5	25,5x2,6	25,5x1,9	25,5x1,5	23.496
CHASIS 6	25,5x2,6	25,4x2	25,5x1,5	23.881
CHASIS 7	25,5x2,6	25,4x2	25,8x1,9	25.214
CHASIS 8	25,5x2,6	25,4x2	26,5x2,8	28.260
CHASIS 9	26x3,5	25,4x2	25,8x1,9	28.798
CHASIS 10	27x4	26,8x3,2	26,5x2,8	39.903



4. CÁLCULO DE TENSIONES Y DEFORMACIONES EN EL CHASIS

Obtenida la geometría del chasis en el modelo de elementos finitos se puede pasar a realizar análisis de tensiones y deformaciones del chasis para conocer su funcionamiento antes de su fabricación.

Para asegurar un correcto funcionamiento de las diferentes partes del chasis, se realizan ensayos según los requisitos estructurales de no obligado cumplimiento comentados anteriormente. En estas pruebas se aplicarán fuerzas en cada componente de la estructura por separado, en el punto de aplicación y con las condiciones de contorno expresadas en la normativa.

La realización de estas simulaciones resulta ser muy útil y ventajosa para la creación y obtención de un modelo de chasis hecho y diseñado desde cero válido para la competición

4.1 ENSAYOS NORMA

Para garantizar que todos los ensayos se lleven a cabo de manera correcta, se establecen ciertos valores según la normativa para los límites elásticos, límites de rotura y módulos de Young que deben aplicarse a nuestro modelo de elementos finitos durante los análisis.

Por otro lado, de acuerdo con las regulaciones, ningún punto de la estructura debe experimentar fallos durante los ensayos, tampoco deben surgir en la estructura desplazamientos mayores de 25 milímetros.

Para llevar a cabo los cálculos, hemos seleccionado el chasis número 5 como opción. Como se ha comentado anteriormente, esto se debe a que esta alternativa de chasis alcanza un peso óptimo y adecuado de acuerdo con los chasis utilizados por equipos punteros de la competición.

En cuanto a la ubicación del centro de coordenadas para realizar los análisis, se encuentra de la siguiente manera:

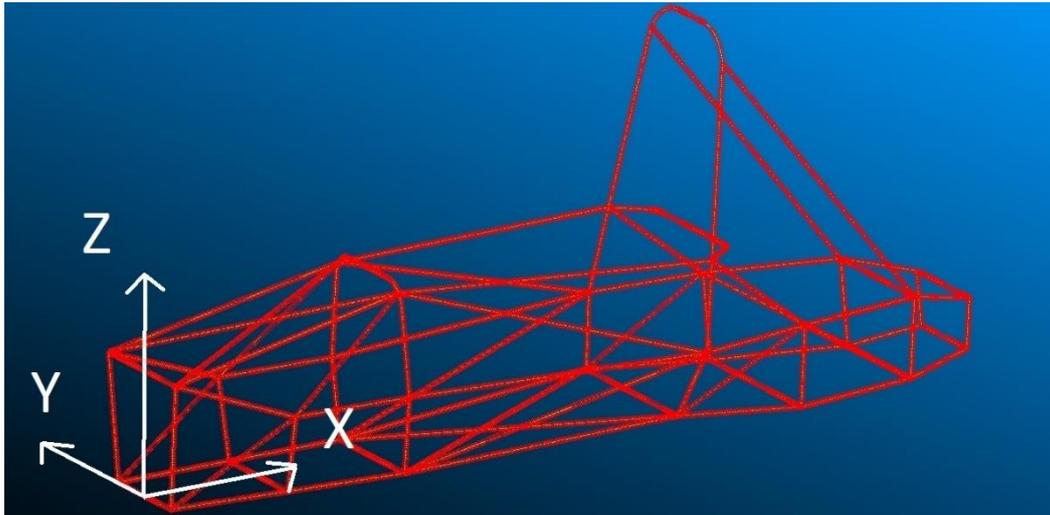


Ilustración 7 -Sistema de coordenadas para la aplicación de cargas.

4.3.1 IMPACTO FRONTAL

Este análisis es uno de los más típicos a la hora de diseño de vehículos, esto se debe a que este tipo de colisión frontal es una de las más comunes y peligrosas en accidentes de coche. El objetivo principal de este análisis es evaluar cómo se deforma la estructura, que fuerzas actúan sobre la zona del piloto y cómo se comportan los sistemas de retención del piloto. Se busca, además de superar la normativa, se busca un buen nivel de seguridad en la zona de piloto.

A la hora de realizar el ensayo la normativa indica que habrá que colocar una carga de valor $F(x) = 120i + 0j + 0k$ (KN), esta deberá ser ubicada en la zona de contacto entre el atenuador de impactos y el mamparo frontal de la estructura tubular. Las condiciones de contorno tienen el desplazamiento fijo (x, y, z), pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados de los arcos frontal y principal, y los puntos de anclaje del cinturón de seguridad.

Esta carga de 120 KN se aplica en todo el contorno delantero por lo que deberemos calcular la longitud del mamparo delantero para calcular la carga por unidad lineal.

Tabla 4 -Valor carga impacto delantero.

CARGA (N)	LONGITUD DE APLICACIÓN (MM)	CID (N/MM)
120000	$362,215+380+300+362,215=1404,43$	85,45

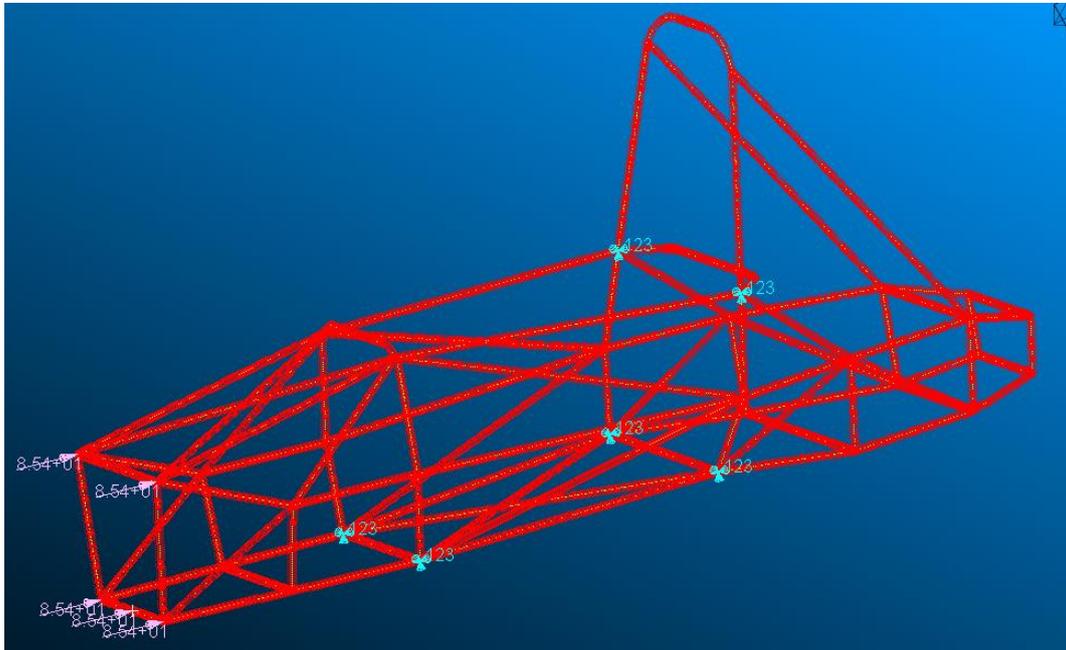


Ilustración 8 -Representación gráfica de carga y restricciones en el análisis para el impacto delantero.

Tras obtener la carga distribuida para la parte delantera se aplica dicha carga y las condiciones de contorno y se obtienen los siguientes resultados de desplazamiento y tensiones máximas:

Desplazamientos:

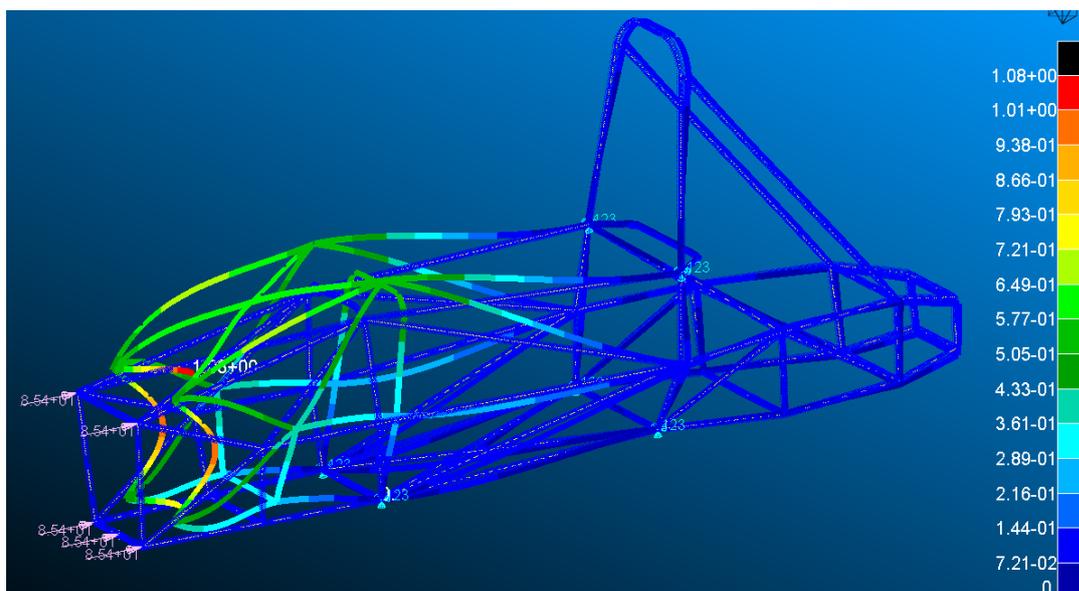


Ilustración 9 -Representación gráfica de los desplazamientos en el análisis de impacto delantero.

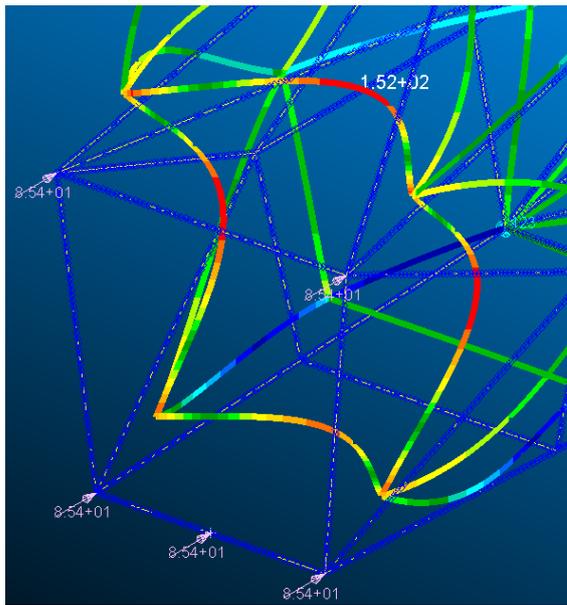


Ilustración 11 -Escala ficticia.

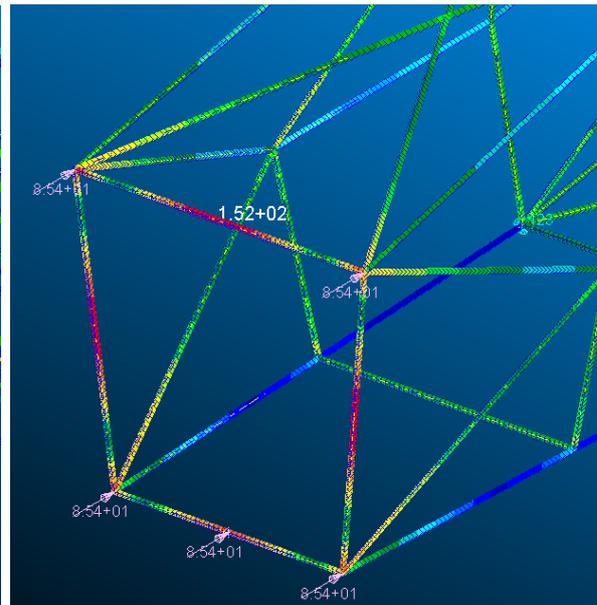


Ilustración 12 -Escala real.

4.3.2 IMPACTO LATERAL

El impacto lateral es una de las principales situaciones de impacto que se pueden dar durante la competición, por ello comprender también el comportamiento estructural en esta situación es esencial para garantizar la integridad tanto del piloto como del monoplaza.

El objetivo principal de este ensayo es ver como el chasis tubular responde ante cargas de impacto lateral y evaluar la capacidad de este de absorber la energía liberada durante dicho choque. También se estudian las deformaciones y tensiones dadas en la estructura.

A la hora de realizar el ensayo la normativa indica que habrá que colocar una carga de valor $F(x) = 0i + 7j + 0k$ (KN) , esta deberá ser ubicada en todos los miembros estructurales que estén entre el arco frontal y el principal en la zona de impacto lateral. Las condiciones de contorno tienen el desplazamiento fijo (x, y, z), pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados de los arcos frontal y principal, y los puntos de anclaje del cinturón de seguridad.

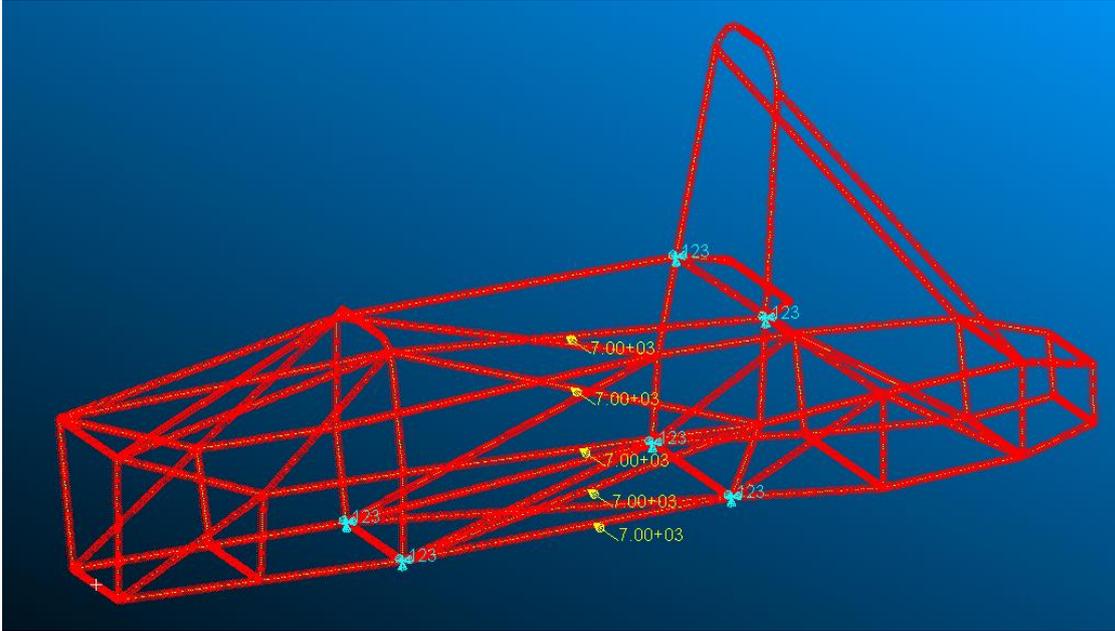


Ilustración 13 -Representación gráfica de carga y restricciones en el análisis para el impacto lateral.

En la realización de este análisis se ha supuesto el caso más desfavorable posible en cuanto al área de aplicación de la fuerza, en este caso en vez de ser repartida por toda el área de impacto lateral entre el arco principal y el frontal, la carga se ha impartido en el punto medio de cada barra perteneciente a la estructura de impacto lateral. Obteniendo los siguientes resultados:

Desplazamientos:

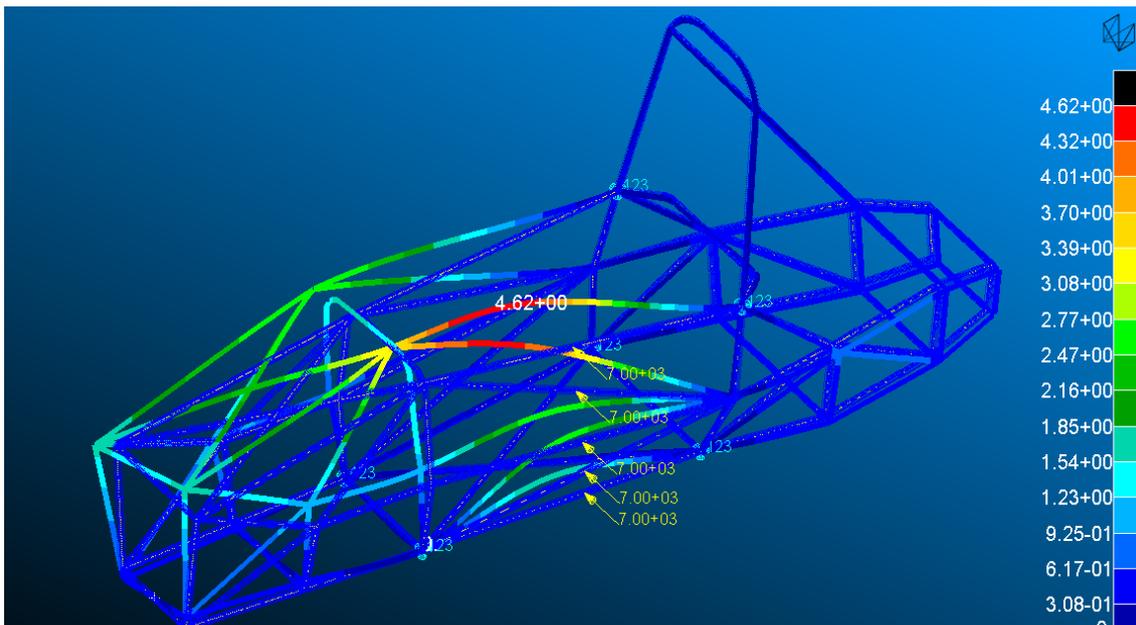


Ilustración 14 -Representación gráfica de los desplazamientos en el análisis de impacto lateral.

4.62 mm por lo que se queda bastante lejos de lo estipulado por norma que serían 25 milímetros al igual que en todos los análisis.

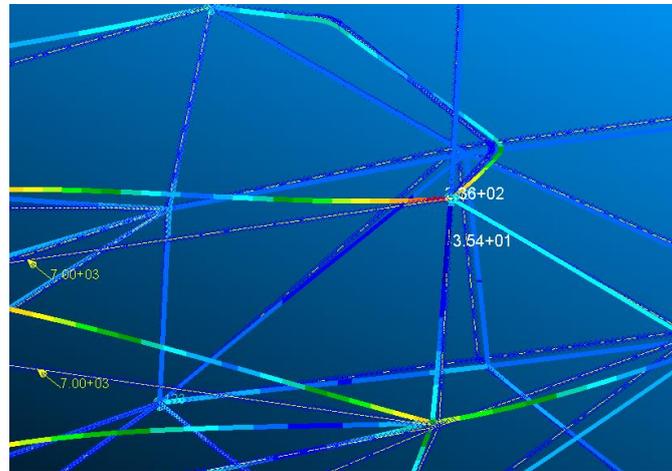


Ilustración 17 -Nudo crítico en el caso de impacto lateral.

En cuanto a fallo en la estructura, no se da en ningún punto siendo su valor máximo de 236 MPa, siendo nuestro límite del material a trabajar de 305 y 365 MPa tanto el límite elástico como el de rotura respectivamente. Por lo que el valor máximo obtenido se queda por debajo del requerido y el ensayo por lo tanto es considerado válido.

4.3.3 IMPACTO TRASERO

Al igual que con el impacto delantero el impacto trasero puede ser un caso habitual durante la competición. El objetivo principal de este ensayo es conocer cómo se comportará el chasis en caso de choque y como puede afectar este a la seguridad del piloto, ya bien sea por una desubicación del motor y por la no correcta absorción en la zona adecuada.

Los valores y condiciones de contorno para la realización del análisis son los mismos que para el caso delantero, sin embargo, el área de aplicación es menor por lo que se debe recalcular. Se aplica una carga de valor $F(x) = 120i + 0j + 0k (KN)$, esta debe ser ubicada en la zona del mamparo trasero de la estructura tubular. Las condiciones de contorno tienen el desplazamiento fijo (x, y, z), pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados de los arcos frontal y principal, y los puntos de anclaje del cinturón de seguridad.

Tabla 5 -Valor carga impacto trasero.

CARGA (N)	LONGITUD DE APLICACIÓN (MM)	CID (N/MM)
120000	300+151,323+151,323+260=862,646	139,11

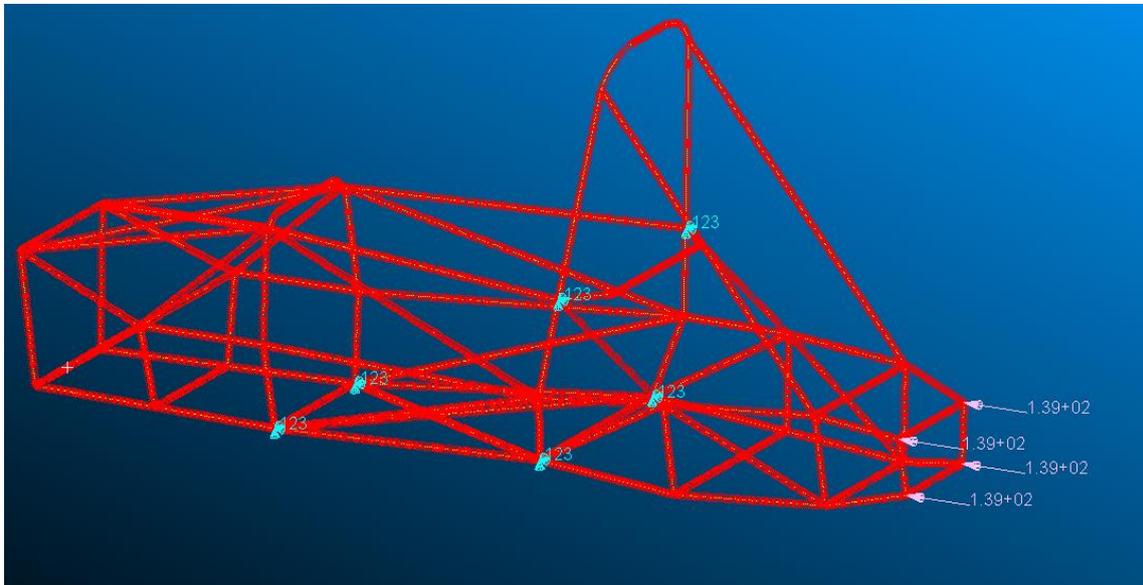


Ilustración 18 -Representación gráfica de carga y restricciones en el análisis para el impacto trasero.

Tras obtener la carga distribuida para la parte trasera se aplica dicha carga y las condiciones de contorno y se obtienen los siguientes resultados:

Desplazamiento:

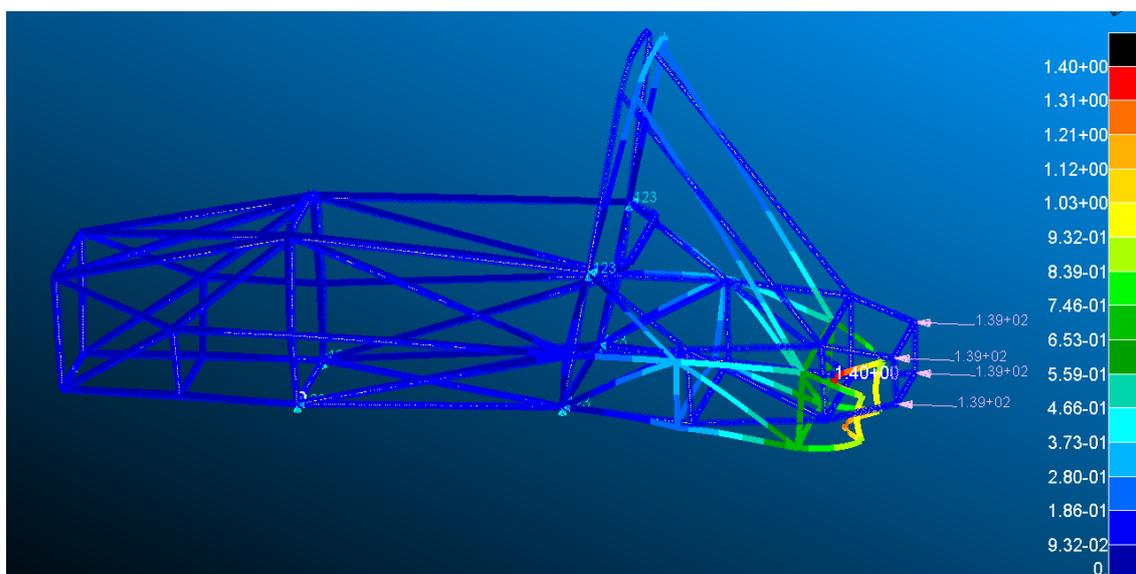


Ilustración 19 -Representación gráfica de los desplazamientos en el análisis de impacto trasero.

Tensiones:

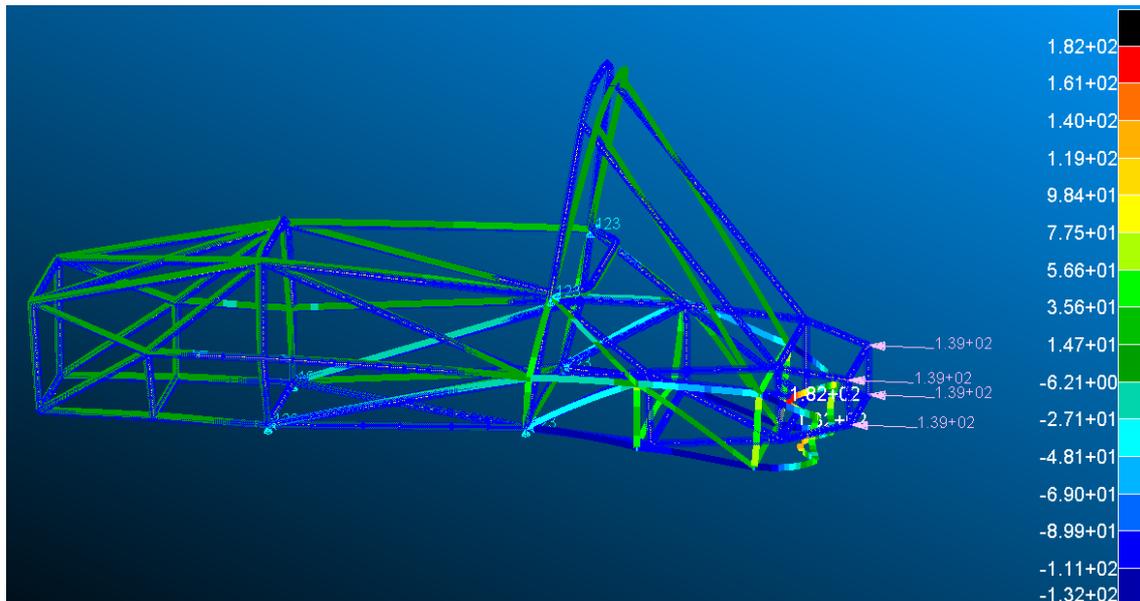


Ilustración 20-Representación gráfica de las tensiones máximas en el análisis de impacto trasero.

Analizando los resultados obtenidos, se observa que los valores de desplazamientos dados en la estructura son de 1.4 mm siendo este valor mucho menor que lo permitido de 25 milímetros. Por otra parte, el valor de tensión máxima combinada es de 182 MPa el cual también está por debajo de lo requerido, por lo tanto, el análisis se concluye como válido.

4.3.4 ENSAYO ARCO PRINCIPAL

El ensayo de arco principal es lo más parecido a un caso de vuelco del monoplaza. Este ensayo al igual que todos permiten verificar que el chasis cumple con los estándares de seguridad establecidos y garantizan una calidad y confiabilidad sobre la estructura diseñada.

Se aplica una carga de valor $F(x) = 6i + 5j + 9k$ (KN) , esta debe ser ubicada en la parte superior del arco principal. Las condiciones de contorno tienen el desplazamiento fijo (x, y, z), pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados de los arcos frontal y principal, y los puntos de anclaje del cinturón de seguridad.

Para la realización del cálculo resistente del arco principal se compone dicha fuerza y se obtiene un vector compuesto el cual es aplicado en la parte superior del arco.

Tabla 6 -Valor carga ensayo arco principal.

CARGA COMPUESTA (N)	LONGITUD DE APLICACIÓN (MM)	CID (N/MM)
11920	138,75	85,9

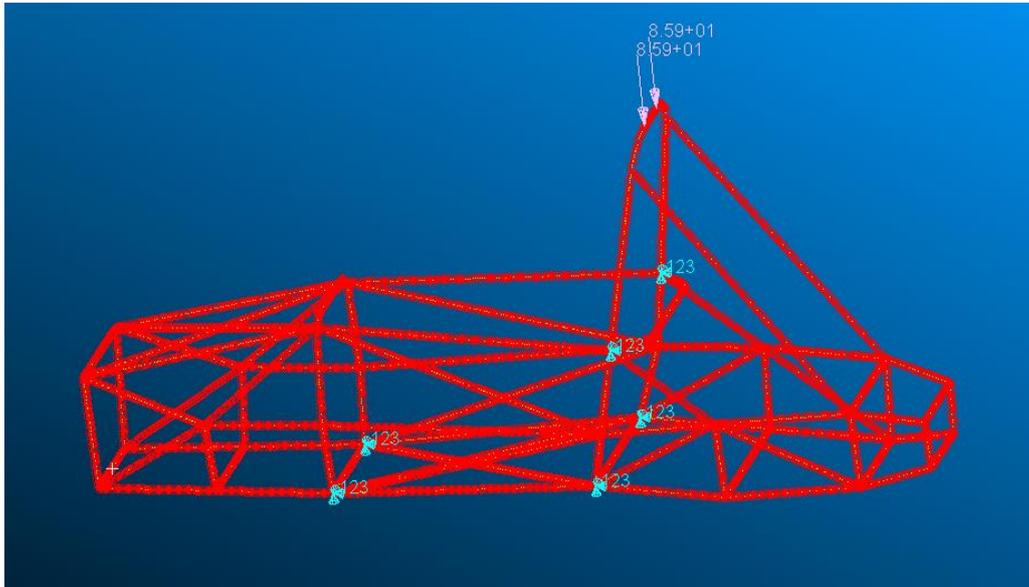


Ilustración 21 -Representación gráfica de carga y restricciones en el análisis para el arco principal.

Tras obtener la carga aplicada en el arco principal se realiza el cálculo y se obtienen los siguientes resultados:

Desplazamientos:

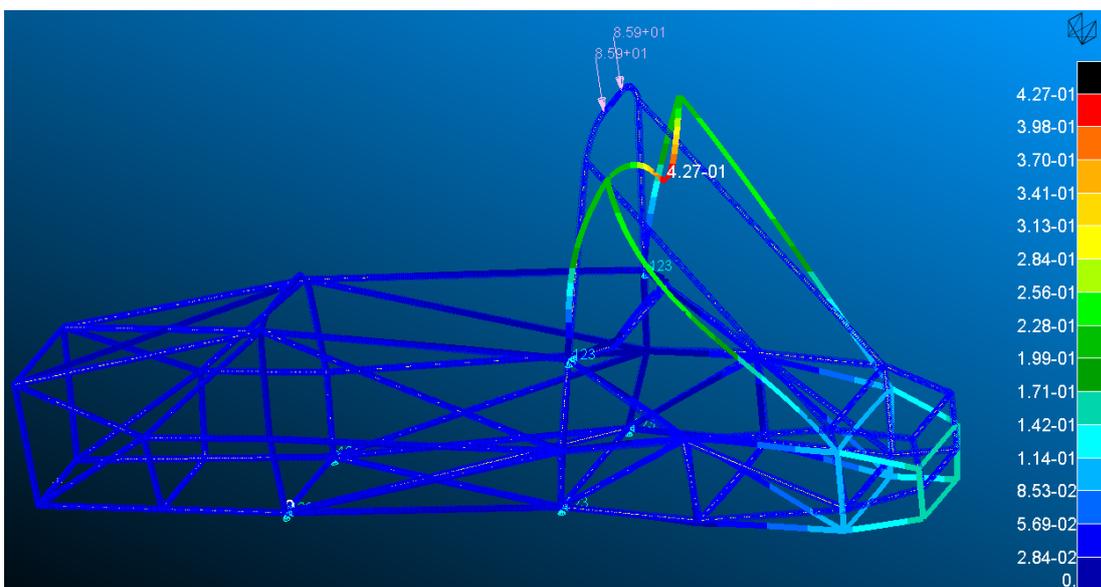


Ilustración 22 -Representación gráfica de los desplazamientos en el análisis del arco principal.

Tensiones:

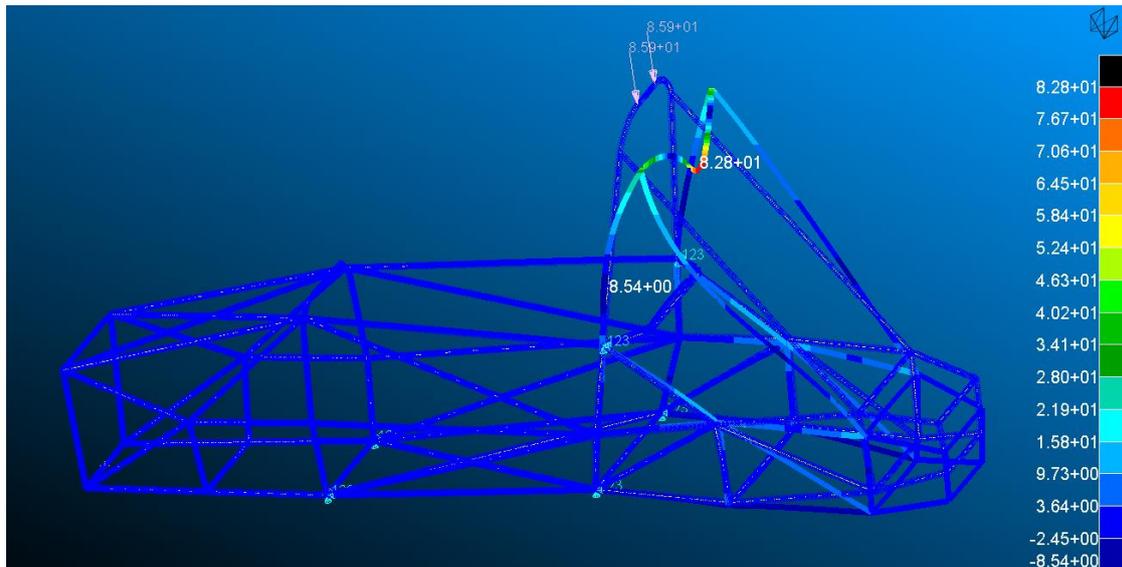


Ilustración 23 -Representación gráfica de las tensiones máximas en el análisis del arco principal.

Analizando los resultados obtenidos, se observa que los valores de desplazamientos dados en la estructura son de 0.427 mm siendo este valor mucho menor que lo permitido de 25 milímetros. Por otra parte, el valor de tensión máxima combinada es de 82.8 MPa el cual también está por debajo de lo requerido, por lo tanto, el análisis se concluye como válido.

4.3.5 ENSAYO ARCO FRONTAL

Este análisis tiene como objetivo conocer el comportamiento del arco frontal tras la aplicación de una cierta carga. Al igual que con en el análisis del arco principal, se busca simular un caso de vuelco ya que es de los pocos casos en los que estos arcos podrían sufrir estas cargas.

Cabe destacar que la probabilidad de vuelco en esta competición es baja, sin embargo, en las competiciones de motor los accidentes pueden ocurrir en cualquier momento.

Para este ensayo se aplica una carga de valor $F(x) = 6i + 5j + .9k$ (KN) , esta deberá ser ubicada en la parte superior del arco frontal. Las condiciones de contorno tienen el desplazamiento fijo (x, y, z), pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados de los arcos frontal y principal, y los puntos de anclaje del cinturón de seguridad.

Tabla 7 -Valor carga ensayo arco frontal.

CARGA COMPUESTA (N)	LONGITUD DE APLICACIÓN (MM)	CID (N/MM)
11920	215,13	55,5

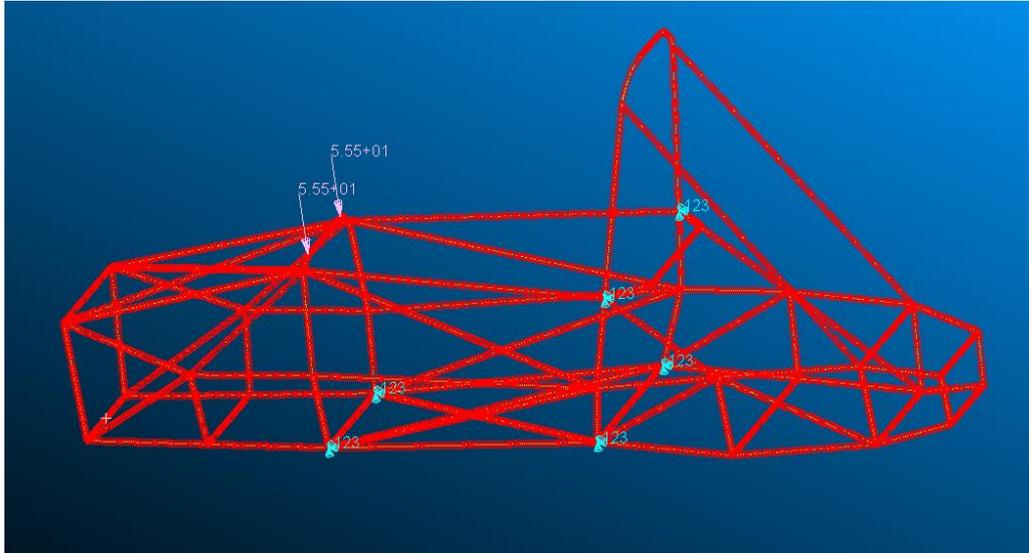


Ilustración 24 -Representación gráfica de carga y restricciones en el análisis para el arco frontal.

Tras obtener la carga aplicada en el arco principal se realiza el cálculo y se obtienen los siguientes resultados:

Desplazamientos:

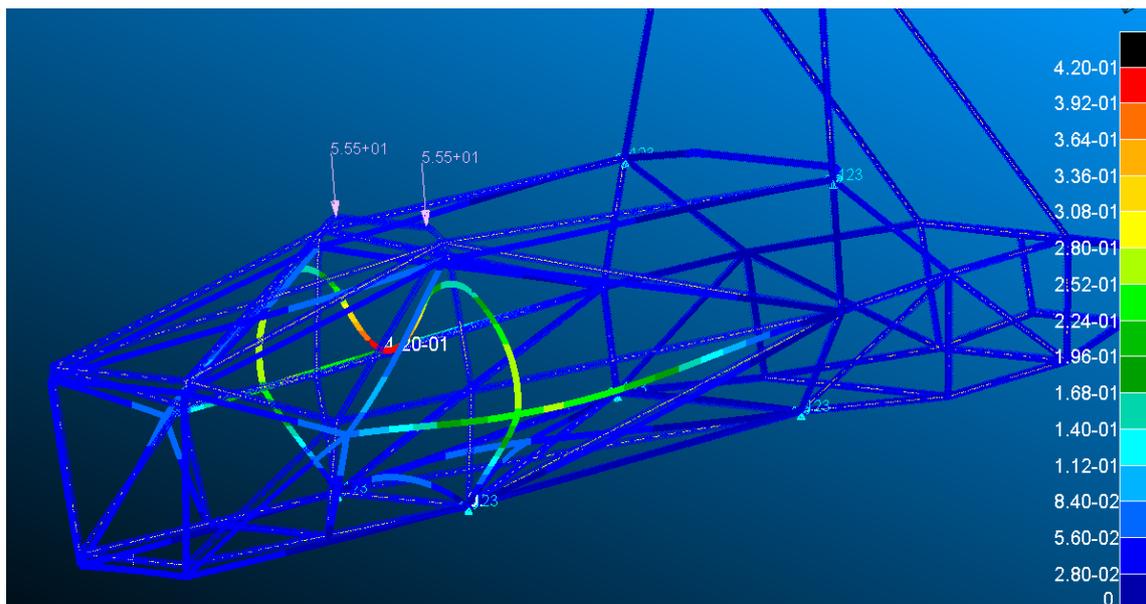


Ilustración 25 -Representación gráfica de los desplazamientos en el análisis del arco frontal.

Tensiones:

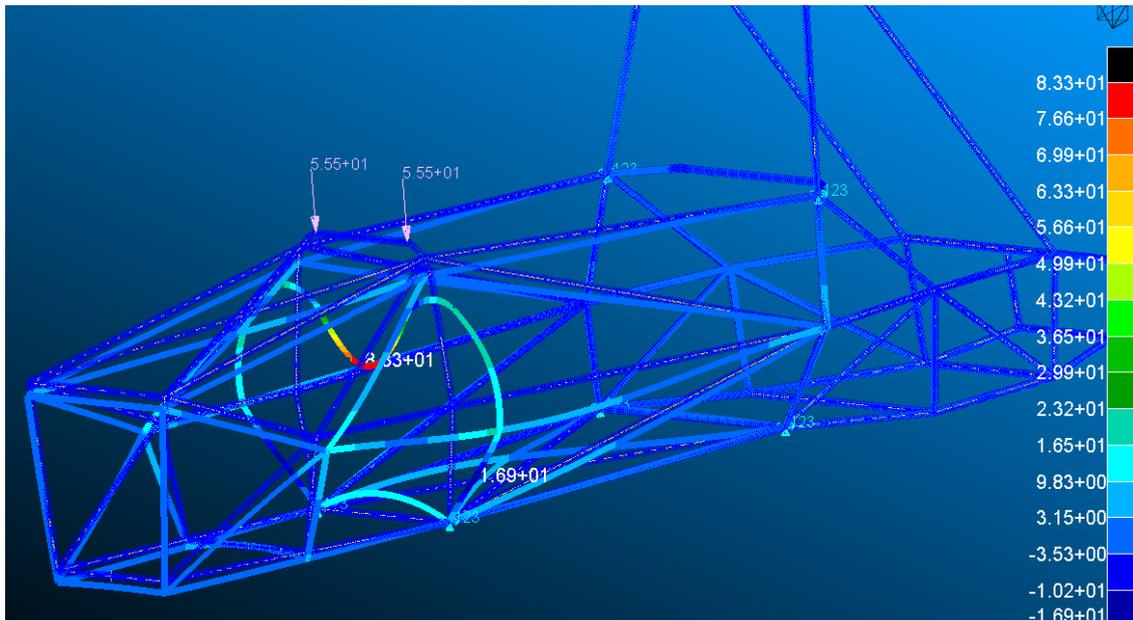


Ilustración 26 -Representación gráfica de las tensiones máximas en el análisis del arco frontal.

Analizando los resultados obtenidos mostrados por el software y comparándolo con lo establecido por el reglamento se deduce que el ensayo es válido, esto se debe a que los desplazamientos máximos dados en la estructura son de 0.42 milímetros lo cual es ínfimo en comparación con los 25 milímetros máximos de desplazamiento permitido.

Por otro lado, analizando las tensiones máximas combinadas dadas se observa que la máxima dada es de 83.3 MPa siendo este valor bastante menor que el estipulado por reglamento para realizar los análisis.

4.3.6 ENSAYO CINTURONES

Los cinturones de seguridad además de proteger al piloto en caso de accidente dotan a la estructura de mayor resistencia y rigidez. Por ello, este análisis permite identificar posibles zonas de mejora, tanto en términos de seguridad como de eficiencia estructural.

Se aplica una carga de valor 7 KN la cual debe ser ubicada en cada punto de anclaje del cinturón de seguridad de forma simultánea. Las condiciones de contorno tienen el desplazamiento fijo (x, y, z), pero no la rotación de los nodos inferiores de ambos lados de los arcos frontal y principal.

Desplazamientos:

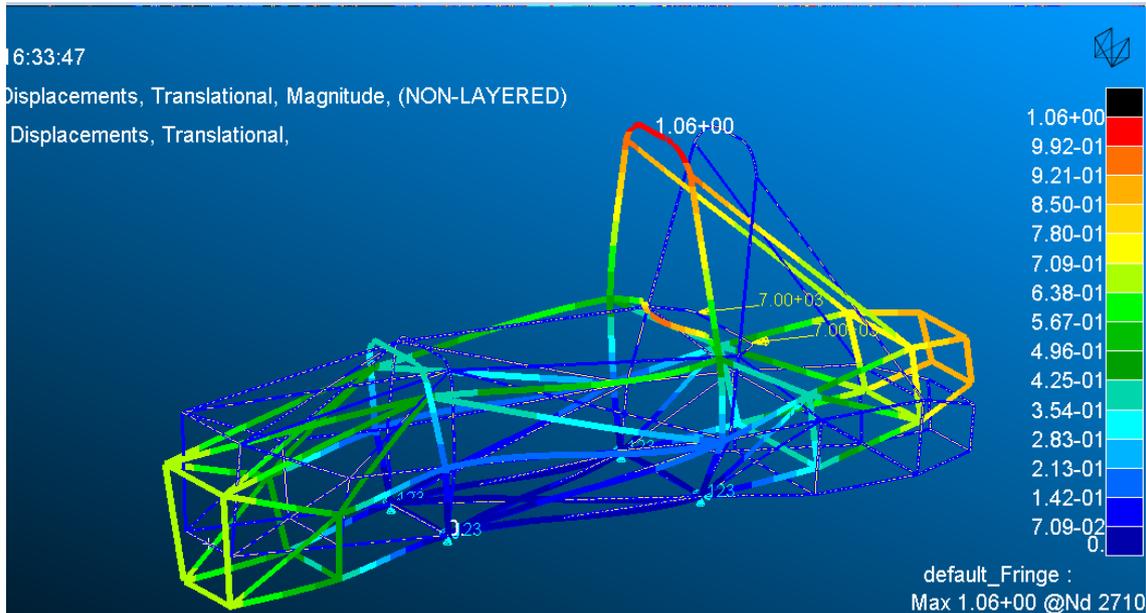


Ilustración 27 -Representación gráfica de los desplazamientos en el análisis de los anclajes del cinturón de seguridad.

Tensiones:

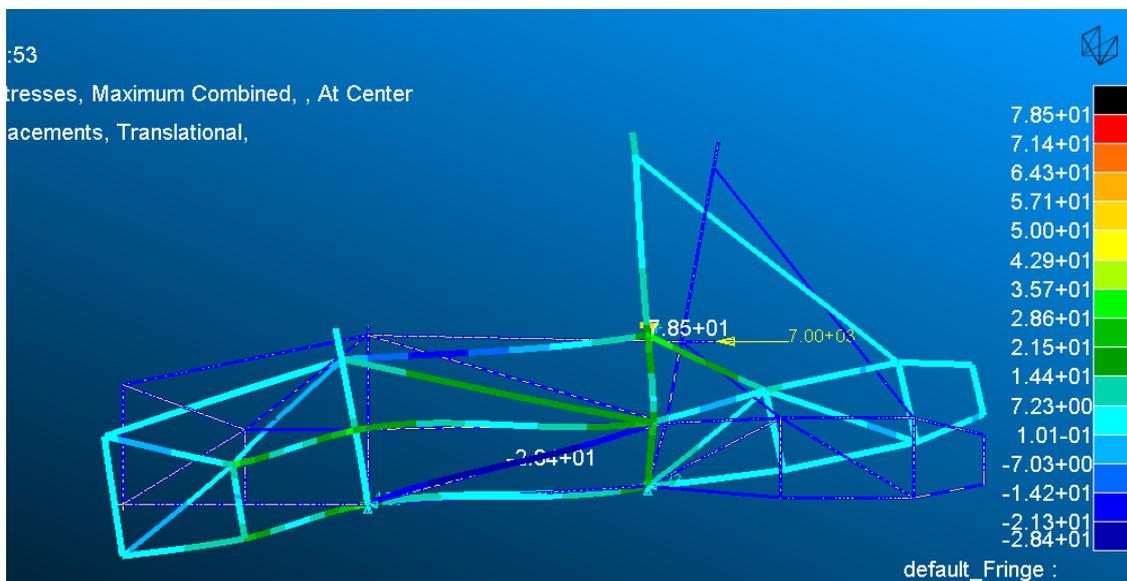


Ilustración 28 -Representación gráfica de las tensiones máximas en el análisis de los anclajes del cinturón de seguridad.

Tras realizar los correspondientes cálculos el software nos devuelve los resultados por los cuales damos por válido el ensayo de cinturones de seguridad. Esto se debe



primeramente al valor ínfimo de desplazamiento máximo de 1.06 milímetros y a su tensión máxima combinada de 78.5 MPa, ambos valores por debajo de lo requerido.

4.3. ANÁLISIS A FLEXIÓN

Se somete al chasis al peso de las masas descritas anteriormente, no es la mayor sollicitación a la que estará sometida el chasis, pero aun así es bueno tener una idea de los puntos más débiles del chasis para prestar especial atención en ellos a la hora del proceso de fabricación.

Se debe conocer dichas masas y los puntos de anclaje al chasis para conocer las fuerzas que se generan debido a estas.

Para el análisis fijaremos la estructura en los puntos de anclaje de la suspensión tanto delantera como trasera.

Posteriormente, debemos simular el comportamiento de las diferentes cargas sobre el chasis, la primera que se analiza es la producida por el motor en la estructura. Para simular el comportamiento del motor en la estructura en Patran se deben de seguir una serie de pasos.

Tabla 8 -Masas representativas ensayo flexión.

	Nº PUNTO DE ANCLAJE	PESO (KG)	FUERZA (N)	FUERZA POR PUNTO DE ANCLAJE (N)
<i>MOTOR</i>	6	74	725.94	121
<i>PILOTO</i>	6	80	784.8	130.8
<i>SUSPENSIONES</i>	16	20	196.2	12.3
<i>BATERIA</i>	2	8	78.48	39.24
<i>DEPOSITO</i>	3	10	98.1	32.7
<i>PEDALERA</i>	4	6	58.86	14.7

Por otro lado, es fundamental tener en cuenta las cargas inerciales que producen flexión en nuestro chasis, ya que estas actúan en el chasis produciendo posibles deformaciones

y tensiones excesivas. Estas fuerzas son esenciales para comprender cómo las fuerzas y momentos generados en aceleraciones y deceleraciones del vehículo afectan a la estructura.

Para la aplicación de las cargas inerciales se toma un valor de 1,9 G ($18,6 \text{ m/s}^2$), este valor es comúnmente utilizado como punto de referencia para estos análisis. Este valor es común en situaciones de manejo exigentes, como pueden ser aceleraciones rápidas, deceleraciones y curvas pronunciadas, por lo que el valor se adapta a las cargas reales que sufre en funcionamiento.

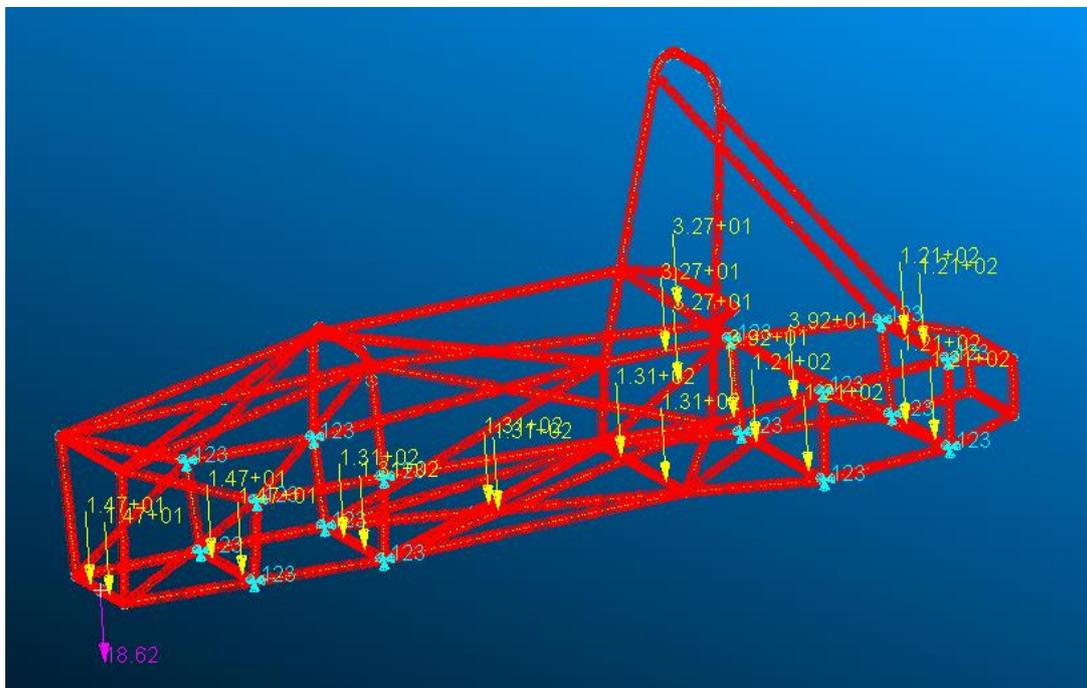


Ilustración 29 -Representación gráfica de carga y restricciones en el análisis de flexión.

Después de completar los análisis, se puede observar que los resultados obtenidos están significativamente por debajo de los límites establecidos. Este análisis no sale estipulado por normativa, sin embargo, utilizaremos los valores de referencia dados de máximos desplazamiento permitidos de 25 milímetros y que no aparezca fallo en ningún punto de la estructura.

Desplazamientos:

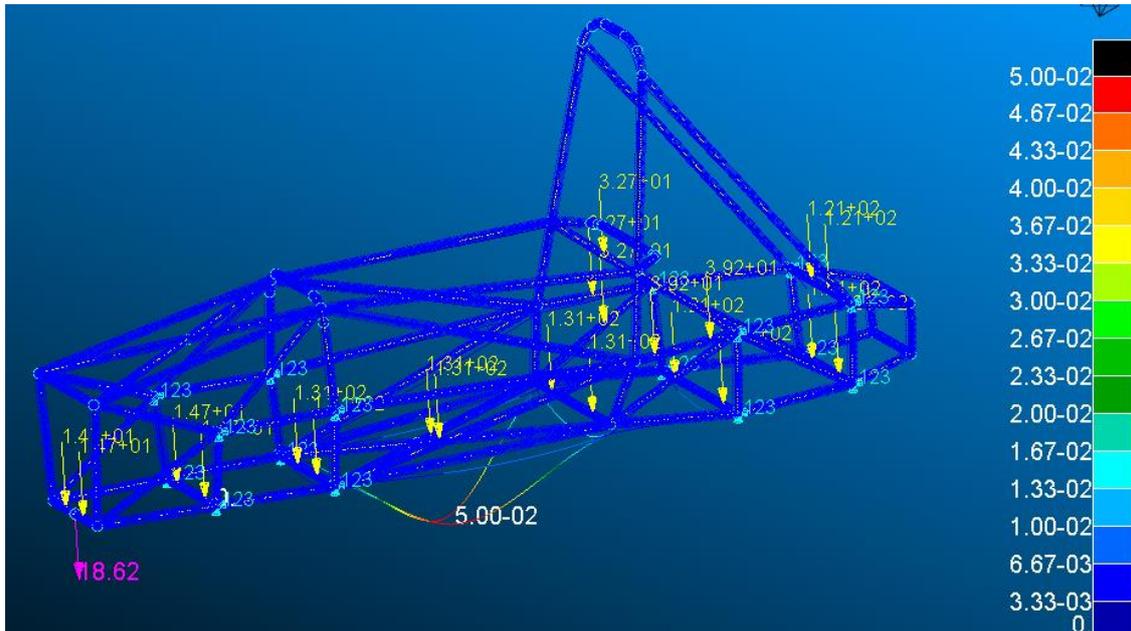


Ilustración 30 -Representación gráfica de los desplazamientos en el análisis de flexión.

Tensiones:

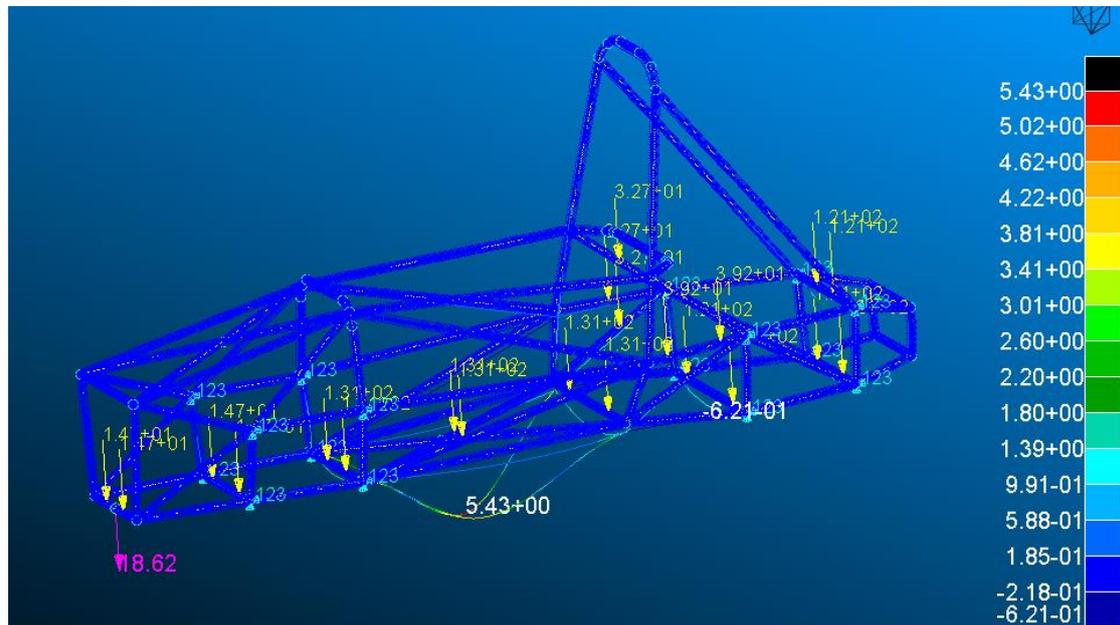


Ilustración 31 -Representación gráfica de la tensión máxima en el análisis de flexión.

Tal y como se ha comentado anteriormente los valores son ínfimos siendo el desplazamiento máximo de 0.05 milímetros y la tensión máxima combinada de 5.43 MPa.



4.4. ANÁLISIS A TORSIÓN

Como se ha comentado anteriormente este análisis es fundamental para garantizar una correcta estabilidad y manejo del monoplaza durante la competición, permite también poder realizar una distribución uniforme de las cargas y con ello ayudar a optimizar el peso del chasis. Por ello se considera una de las pruebas más representativas de cómo será el comportamiento futuro del chasis.

La idea principal es conseguir un chasis bastante rígido, esto se debe principalmente a que en un chasis rígido la transmisión de las masas pertenecientes al chasis es mínima y con ello se producen mejores pasos por curva reduciendo las inercias. Obtener un chasis rígido da lugar a un monoplaza incómodo, esto no se tiene en cuenta en la competición ya que se busca el monoplaza más eficiente sin tener en cuenta la comodidad.

Para la realización de este análisis se fija la suspensión trasera y se aplica un par de fuerzas equivalentes sobre los puntos de anclaje de la suspensión delantera. La suspensión delantera cuenta con 8 puntos de anclaje, estos son sometidos a una serie de pares torsor. Para la realización del análisis es necesario conocer las fuerzas que se deben aplicar en los puntos de anclaje de la suspensión delantera mediante la siguiente fórmula:

$$T = Fd$$

Donde T es el par torsor en Nm, d es la distancia de los puntos de anclaje al plano medio de la estructura y F es la fuerza que obtenemos para cada punto.

Tabla 9 -Valores fuerzas ensayo torsión.

PUNTO DE ANCLAJE	DISTANCIA (MM)	FUERZA(N)
1	167,5	-746,3
2	220	-568,2
3	185	-675,7
4	220	-568,2
5	220	568,2
6	185	675,7
7	220	568,2
8	167,5	746,3



5. ANALISIS MODAL

5.1. INTRODUCCION

Este análisis sirve de herramienta para conocer y comprender el comportamiento dinámico de nuestro chasis, durante este tipo de análisis se identifican las frecuencias naturales, los modos de vibración y las deformaciones asociadas a nuestra estructura.

Se debe realizar el análisis modal para conseguir un diseño correcto y óptimo y además una reducción elevada de vibraciones y fatiga durante su funcionamiento, si no se tienen en cuenta estos tipos de análisis pueden aparecer problemas por resonancia, este fenómeno aparece cuando surgen excitaciones vibratorias cercanas a las frecuencias naturales de nuestra estructura. Cuando este se da aumentan considerablemente las vibraciones en la estructura pudiendo ocasionar el fallo en esta.

Para realizar un correcto análisis modal de nuestro chasis debemos conocer a las frecuencias de excitación que puede estar sometido durante su funcionamiento y medirlas para poder compararlas con las obtenidas en Nastran-Patran y determinar si nuestra estructura tiene riesgo de resonancia.

A diferencia de los cálculos realizados anteriormente, en estos análisis no es necesario la aplicación de condiciones de contorno, únicamente se debe mantener el mallado, las propiedades de la sección y el material a utilizar. Cabe destacar que debe añadirse el valor de la densidad del acero con un valor de 7800 kg/m³. A la hora de proceder a analizar el modelo se analiza mediante otro tipo de solución llamada "Normal Modes".

Es importante tener en cuenta trabajar con las unidades del sistema internacional para que el valor de las frecuencias salga en hercios.

5.2 RESULTADOS

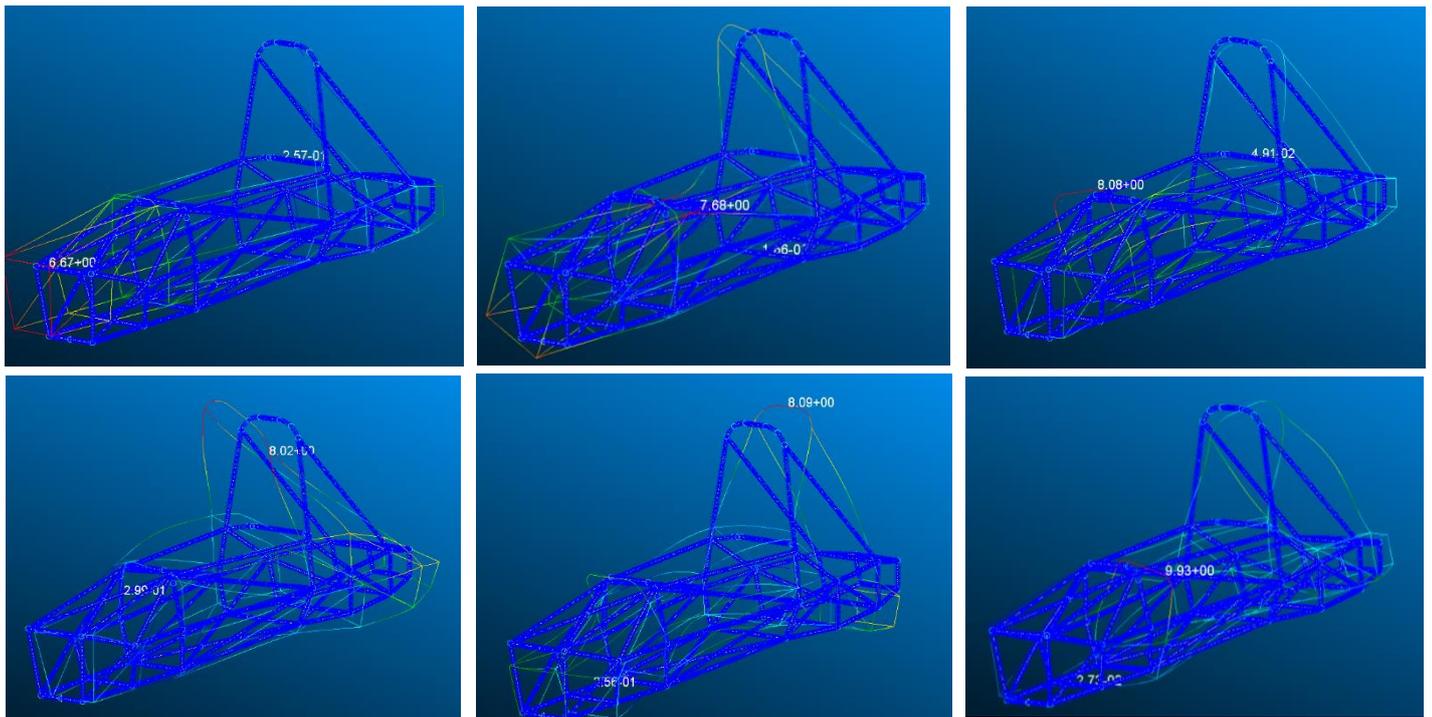
En este apartado se presentan los resultados obtenidos a través del análisis modal, revelando las frecuencias naturales del chasis, los modos de vibración predominantes y cualquier posible deformación o desplazamiento no admisible.

Estos resultados son fundamentales para tomar decisiones en cuanto a mejora y optimización del diseño del chasis, garantizando así un chasis robusto y seguro para nuestro vehículo.

Tabla 11 -Valores de las frecuencias de vibración en hercios.

MODO	FRECUENCIA DE VIBRACIÓN (Hz)
1	97.0103
2	126.657
3	142.207
4	163.005
5	173.829
6	198.898
7	201.535
8	209.502
9	226.815
10	230.465

A continuación, se muestran las deformaciones producidas en los nodos:



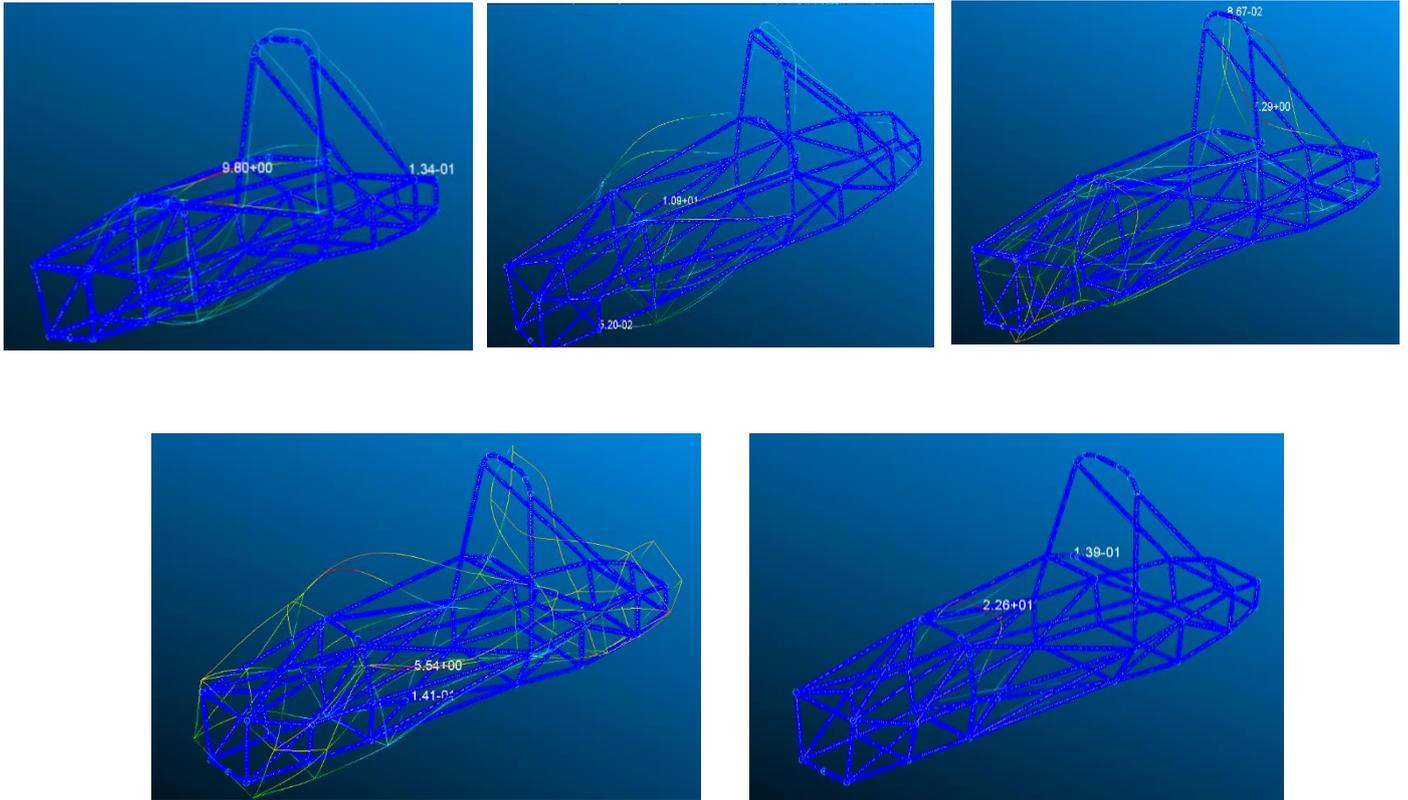


Ilustración 33- Deformaciones de todos los modos.

Una vez obtenidas las frecuencias naturales de nuestra estructura, debemos ahora analizar las diferentes excitaciones a la que está sometido el chasis y obtener las frecuencias de dichas excitaciones para comprobar si pueden producir resonancia en nuestra estructura.

Existe un componente que puede producir resonancia en nuestro sistema y que por ello se debe analizar, este es el motor de nuestro vehículo. Como ya se ha comentado el motor elegido es el motor perteneciente a una Yamaha YZF-R6 del 2006 el cual funciona en un rango de revoluciones por minuto de funcionamiento de 1200 RPM con el motor al ralentí y el embrague desacoplado hasta unas revoluciones de 12000 rpm, si se tiene en cuenta además que es un motor cuatro tiempos, este producirá 2 explosiones por ciclo lo que hace que se tenga que estudiar también los armónicos correspondientes con dichas revoluciones.

Tras lo anterior, se deduce que el rango de revoluciones por minuto de funcionamiento del motor se encuentra entre 1200-24000 RPM, para calcular la frecuencia de excitación que produce el motor debemos utilizar la siguiente fórmula:

$$f = \frac{n}{60}$$



Donde f es la frecuencia en hercios y n el número de revoluciones por minuto. Dado que el motor trabaja entre 1200-24000 RPM, podemos calcular la frecuencia mínima y la máxima.

$$f_{min} = 20 \text{ Hz}$$

$$f_{max} = 400 \text{ Hz}$$

5.3 CONCLUSIÓN

Como se puede observar nuestro chasis trabaja en un rango de frecuencias de 97 Hz a 230 Hz, si alguna de las frecuencias de excitación del motor coincide con las frecuencias de resonancia del chasis, es posible que se produzca una resonancia indeseada en el sistema. Es decir, si las frecuencias de excitación del motor se superponen con las frecuencias de resonancia del chasis, pueden ocurrir problemas de resonancia que requieren acciones para reducirles y evitar daños en el sistema.

Para evitar esto, es recomendable tomar medidas para amortiguar dichas vibraciones o ajustar las frecuencias de excitación del motor. Para ello se unirá el motor al chasis mediante elementos elásticos que reducen significativamente la transmisión de las vibraciones del motor al chasis.



8. REFERENCIAS

-Ilustración 1: Modelo de elementos finitos.

Apuntes asignatura de ingeniería Asistida por ordenador en diseño de máquinas.

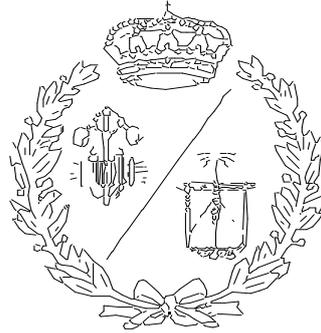
-Ilustración 2: Mallado de motor de combustión.

<https://grupocarman.com/blog/2014/10/30/mallado-por-elementos-finitos/>



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

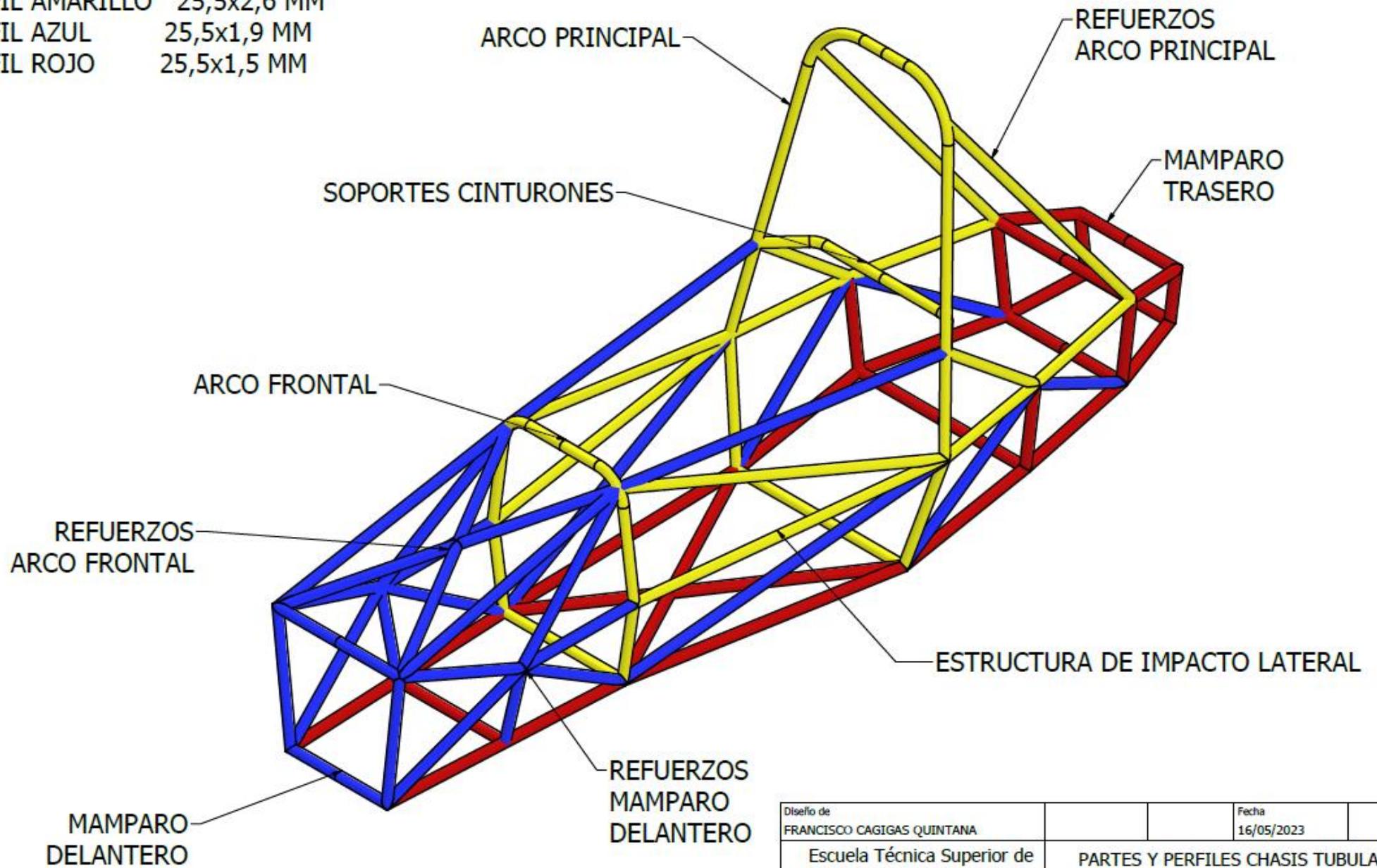
DOCUMENTO III: PLANOS

Autor: Francisco Cagigas Quintana

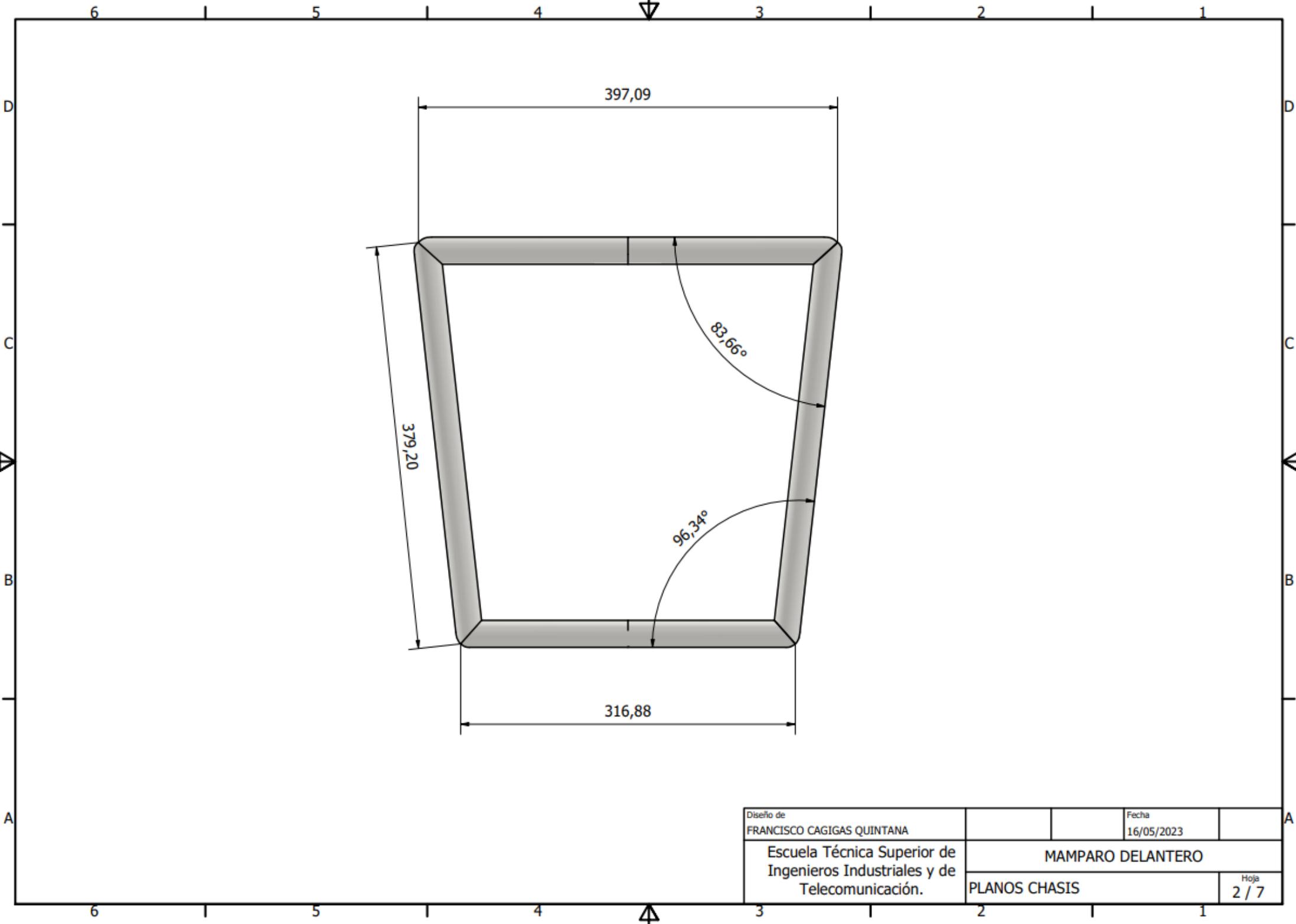
Julio - 2023

MEDIDAS PERFILES TUBULARES

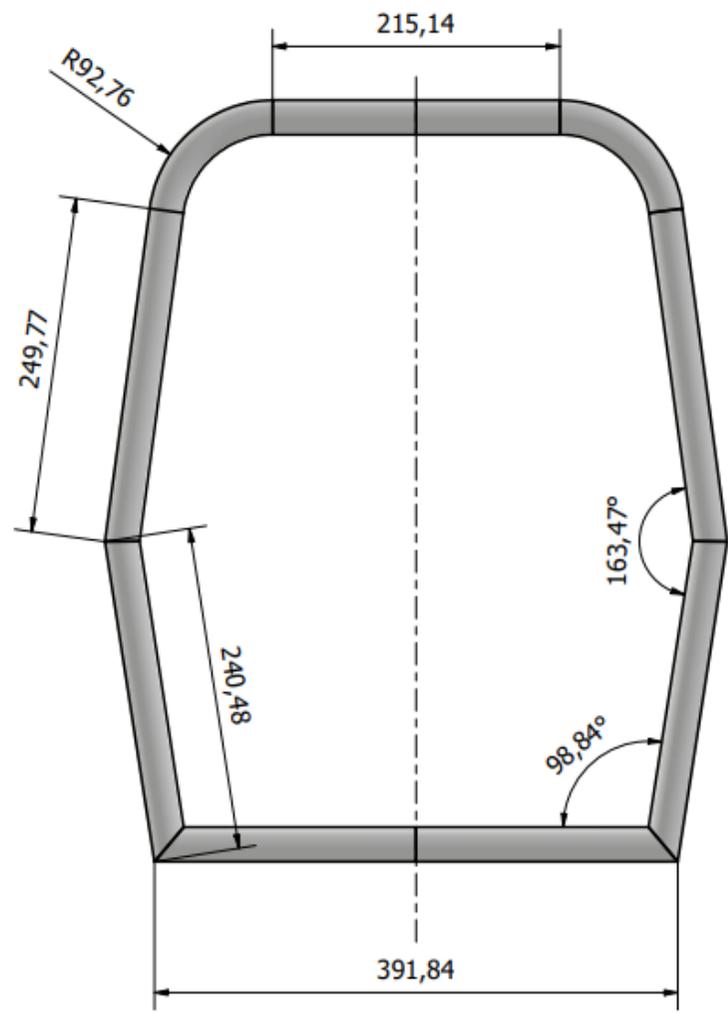
PERFIL AMARILLO 25,5x2,6 MM
PERFIL AZUL 25,5x1,9 MM
PERFIL ROJO 25,5x1,5 MM



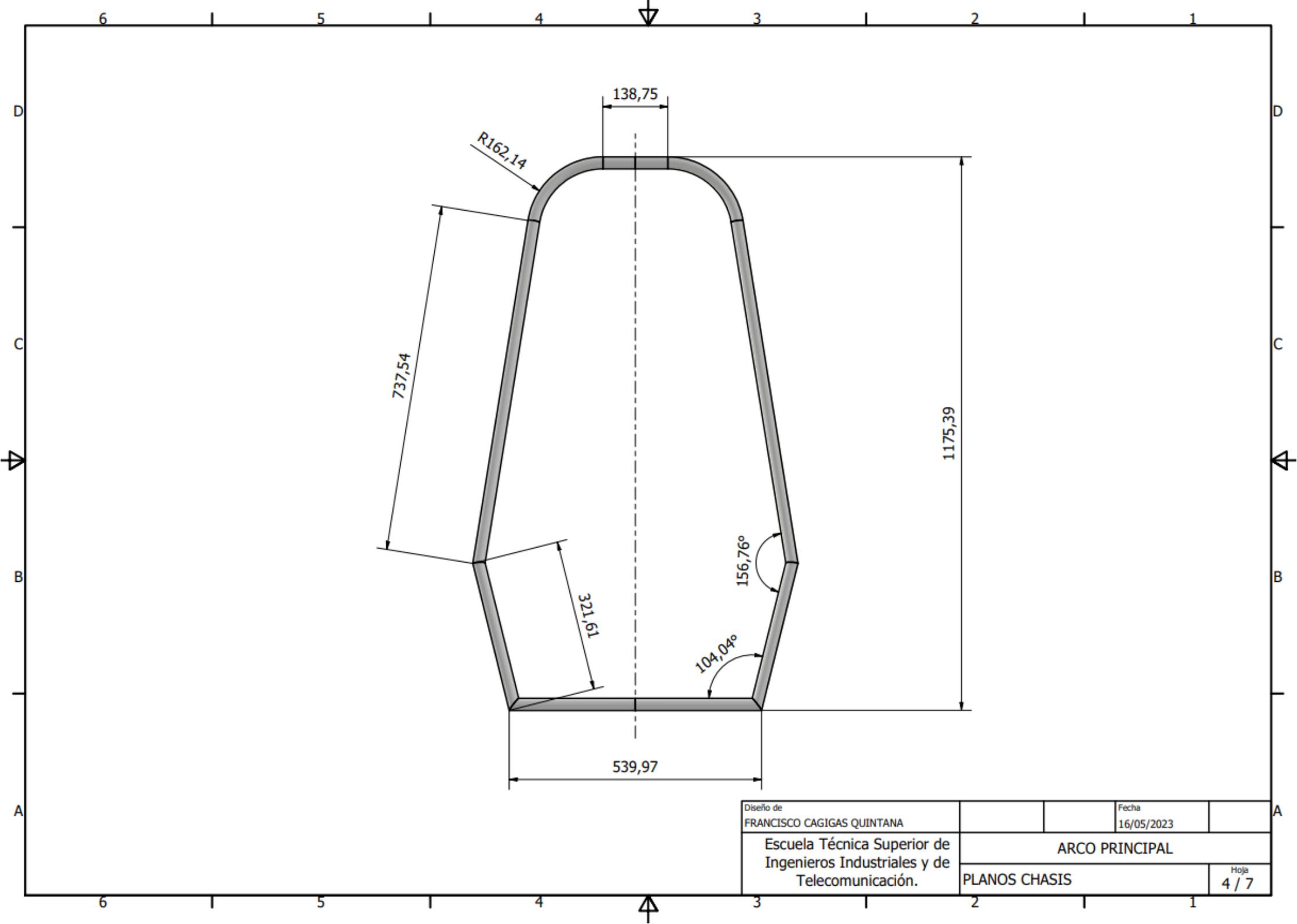
Diseño de FRANCISCO CAGIGAS QUINTANA	Fecha 16/05/2023
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.	PARTES Y PERFILES CHASIS TUBULAR
	PLANOS CHASIS
	Hoja 1 / 7



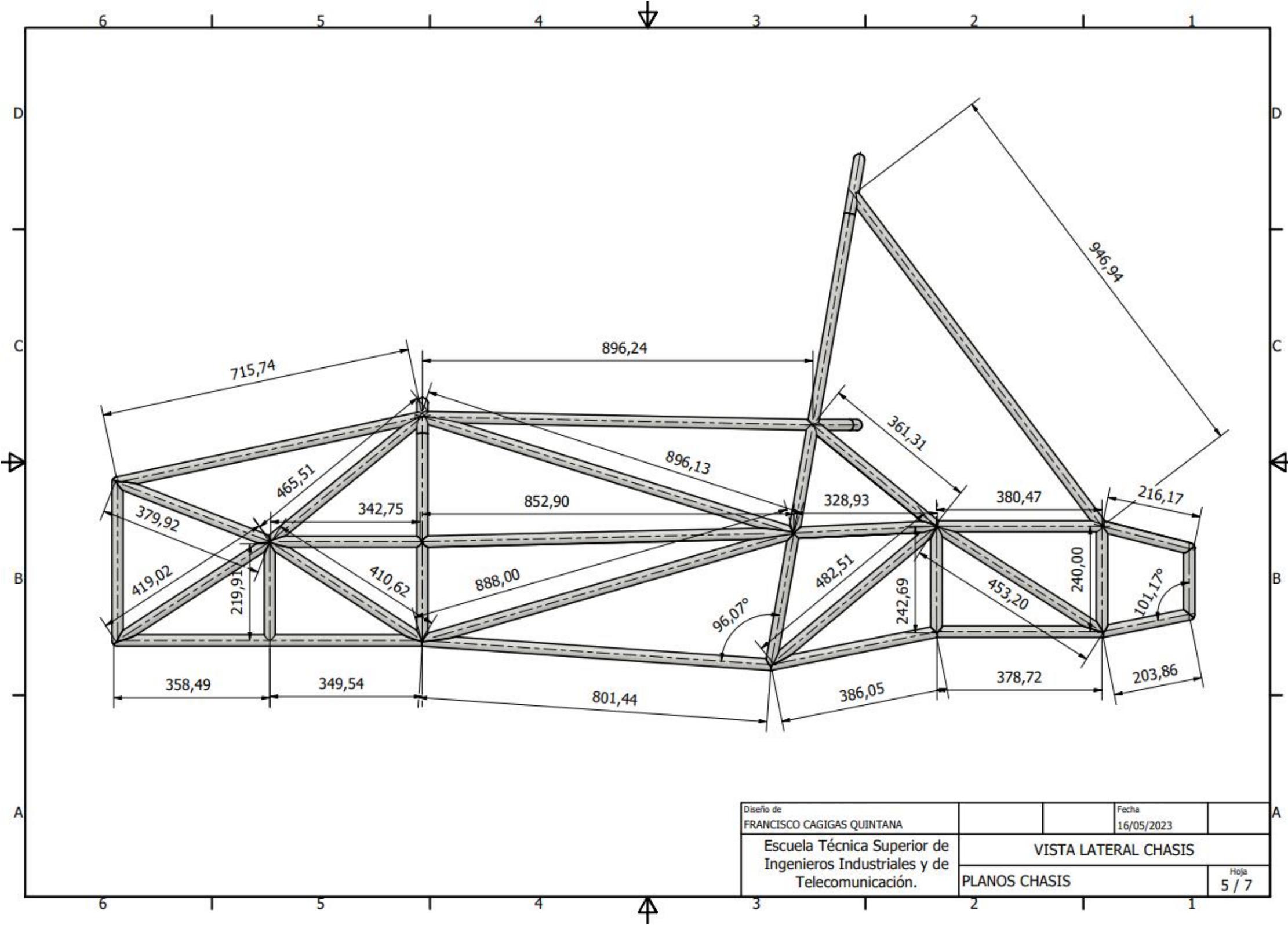
Diseño de FRANCISCO CAGIGAS QUINTANA		Fecha 16/05/2023	
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.	MAMPARO DELANTERO		
	PLANOS CHASIS		Hoja 2 / 7



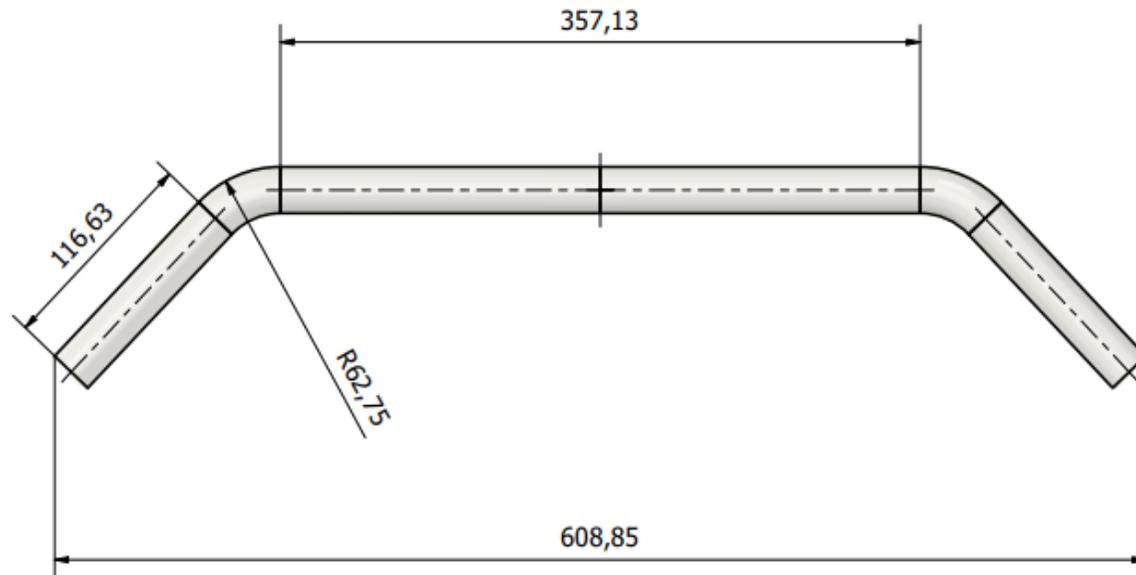
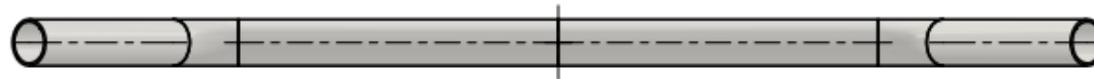
Diseño de FRANCISCO CAGIGAS QUINTANA		Fecha 16/05/2023	
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.	ARCO FRONTAL		
	PLANOS CHASIS		Hoja 3 / 7



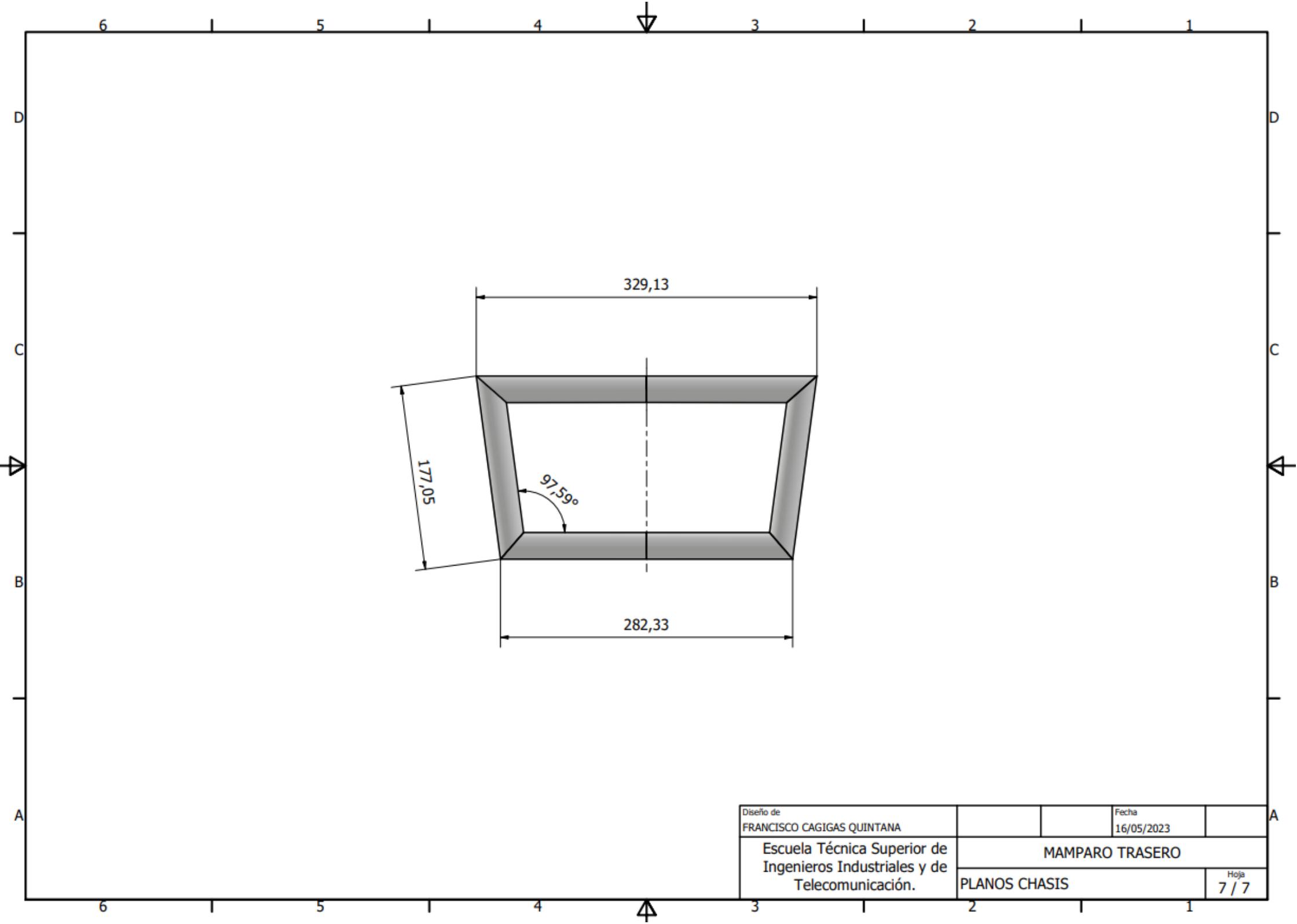
Diseño de FRANCISCO CAGIGAS QUINTANA		Fecha 16/05/2023	
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.	ARCO PRINCIPAL		
	PLANOS CHASIS		Hoja 4 / 7



Diseño de FRANCISCO CAGIGAS QUINTANA	Fecha 16/05/2023
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.	VISTA LATERAL CHASIS
PLANOS CHASIS	Hoja 5 / 7



Diseño de FRANCISCO CAGIGAS QUINTANA		Fecha 16/05/2023	
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.	SOPORTE CINTURONES SEGURIDAD		
	PLANOS CHASIS		Hoja 6 / 7



Diseño de FRANCISCO CAGIGAS QUINTANA		Fecha 16/05/2023	
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.	MAMPARO TRASERO		
	PLANOS CHASIS		Hoja 7 / 7



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

**DOCUMENTO IV: PLIEGO DE
CONDICIONES**

Autor: Francisco Cagigas Quintana

Julio - 2023

ÍNDICE PLIEGO DE CONDICIONES

1. OBJETIVO	1
2. DOCUMENTACIÓN DEL PROYECTO	1
3. ESPECIFICACIONES DE FABRICACIÓN	2
3.1. CORTE DE TUBOS	2
3.2. CURVADO DE TUBOS	4
3.3. SOLDADURA	6
3.3.1. INSPECCIÓN DE CALIDAD DE SOLDADURAS	8
3.6. TRATAMIENTO DE SUPERFICIES	10
4. PARTICIPANTES	11
4.1. LA PROPIEDAD	11
4.2. EL TÉCNICO	11
4.3. EL CONTRATISTA	11
4.4. PROVEEDOR DE MATERIALES	12
5. MATERIALES	12
5.1. PERFILES TUBULARES	12
5.2. MATERIALES DE TRABAJO	13
5.3. ENSAYOS DE CALIDAD DEL ACERO	13
6. ESPECIFICACIONES ECONÓMICAS	13
6.1. PRECIOS	13
6.2. GARANTÍA	13
7. REFERENCIAS	14



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1 -OFICIAL CORTANDO PERFILES TUBULARES CON AMOLADORA RADIAL.....	3
ILUSTRACIÓN 2 -BUCLES SOPORTE PARA CURVADO DE TUBOS.	4
ILUSTRACIÓN 3 -TUBOS FINALMENTE DOBLADOS.....	5
ILUSTRACIÓN 4 -EQUIPO DE SOLDADURA TIG	7



1. OBJETIVO

El presente documento tiene como objetivo establecer los requisitos y condiciones para el diseño, análisis y fabricación del chasis tubular de acero para la Fórmula Student, como ya se ha comentado el chasis es uno de los componentes más importantes del vehículo, por ello establecer una serie de pautas y criterios técnicos a seguir durante el proceso hacen que se logre fabricar un chasis con un diseño óptimo, la realización de análisis estructurales rigurosos y una fabricación precisa. Además de estos factores en el pliego de condiciones se establecen también condiciones económicas, administrativas, facultativas y legales.

Siguiendo este documento, se espera obtener un chasis tubular de acero que cumpla con los estándares de calidad y seguridad requeridos, así como que supere las expectativas en términos de rendimiento y durabilidad. Para ello, el equipo elegido para su fabricación deberá implementar las medidas necesarias para asegurar la fabricación del chasis de acuerdo con lo descrito en este documento.

2. DOCUMENTACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto sobre el diseño, análisis y fabricación del chasis tubular para la Fórmula Student está formado por los siguientes documentos:

- MEMORIA DESCRIPTIVA
- ANEXO DE CÁLCULOS
- PLANOS
- PLIEGO DE CONDICIONES
- PRESUPUESTO

Toda la información propuesta en los documentos anteriores debe ser necesaria para que el contratista sea capaz de fabricar el chasis de acuerdo con lo establecido.



3. ESPECIFICACIONES DE FABRICACIÓN

Tras superar las primeras fases de proceso como son el diseño en CAD del modelo propuesto y la selección de los perfiles y materiales utilizados para la fabricación, se comienza con este proceso. Para entender comprender mejor este apartado, la fabricación del chasis tubular de acero comienza con el corte de los tubos que forman la estructura mediante plantillas de madera o papel, posteriormente se preparan y se curvan con los ángulos correspondientes.

Una vez completada la estructura tubular se realiza el tratamiento de superficie, la pintura y la instalación de los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos necesarios para completar el vehículo.

Se designa un equipo de fabricación compuesto por expertos altamente capacitados y experimentados. Este equipo se encargará minuciosamente de ejecutar todos los diversos procesos de fabricación de manera eficiente, manteniendo altos estándares de calidad y precisión en cada etapa.

3.1. CORTE DE TUBOS

En la actualidad, gracias a un gran avance en la industria, se han desarrollado multitud de diferentes métodos de corte para perfiles tubulares. Todos ellos buscando siempre conseguir una gran precisión en los cortes a realizar.

Los más destacados para conseguir la mayor calidad de corte pueden ser el corte por plasma, por láser o por agua a alta presión. El corte por plasma basa su funcionamiento en la generación de un arco eléctrico de alta temperatura entre un electrodo y el perfil a cortar, el gas plasma se dirige a través de dicho arco hacia el material para fundirlo y realizar cortes precisos. Por otro lado, el corte láser utiliza un rayo láser concentrado el cual es capaz de fundir el acero de manera precisa. Por último, el corte por agua a presión mezcla agua y partículas abrasivas a alta presión capaces de cortar el material sin generar calor.

Por otro lado, existen máquinas como las sierras de disco o de cinta más vistas en talleres mecánicos las cuales son comúnmente utilizadas debido a su alta precisión y su menor precio en comparación con la anteriores. La más utilizada para proyectos de este tipo debido a su bajo coste, suele ser la amoladora radial.

Para este proceso se utilizará preferiblemente la amoladora radial, sin embargo, cualquier herramienta disponible por el taller de fabricación asignado que haya sido anteriormente descrita, es válida. En cuanto a la realización del corte se debe dejar un acabado de corte limpio y recto para su posterior transformación en forma de tubo de pez, por ello es importante que dichos extremos estén libres de rebabas, deformaciones o irregularidades. Un corte preciso y bien acabado facilitará la creación de la boca de tubo de pez con la calidad requerida.

El equipo de fabricación es el responsable de llevar a cabo todas las acciones u operaciones necesarias para lograr los acabados requerido en los tubos, esto implica tomar todas las medidas necesarias para garantizar la calidad y precisión en cada etapa de fabricación.

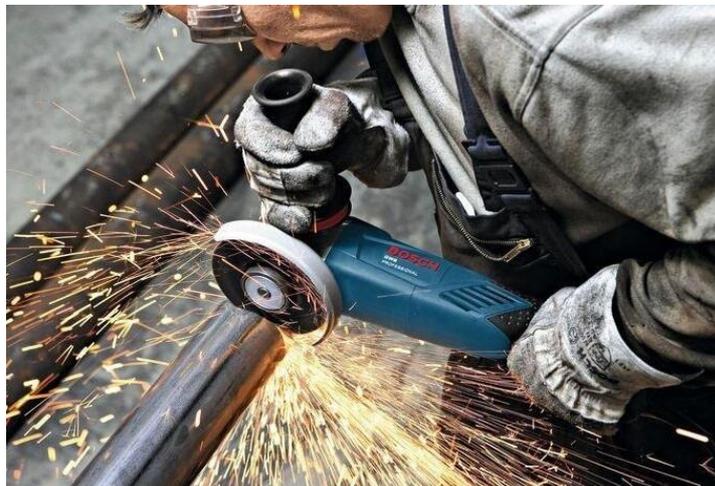


Ilustración 1 -Oficial cortando perfiles tubulares con amoladora radial.

Para las longitudes de corte de los perfiles el equipo de fabricación cuenta con los planos de la estructura donde se especifican las medidas necesarias para la correcta fabricación del chasis.

Se deberá preparar los cortes de boca de tubo de pez de tal manera que se ajusten el máximo posible entre sí en las uniones, de modo que se logre conseguir el máximo área de contacto. Esto queda a cargo del equipo de fabricación.

3.2. CURVADO DE TUBOS

Todos los tubos proporcionados por el fabricante, además de no suministrarse en las longitudes requeridas, tampoco se suministran con la curvatura requerida, por ello se debe hacer uso de una curvadora de tubos para realizar este proceso.

El curvado de tubos es un proceso de deformación plástica del acero en la que se busca conseguir los ángulos requeridos sin reducción de área en las zonas de doblado. Para realizar este proceso de manera correcta se debe conocer todos los posibles fallos que puedan aparecer, por ello se asigna un equipo cualificado para el proceso.

El equipo de fabricación está obligado a realizar el proceso de curvado de nuestros tubos mediante un proceso de curvado en frío, en este proceso el tubo se sujeta en una máquina formada por diferentes rodillos y matrices que van ejerciendo presión gradualmente sobre el tubo consiguiendo de esta manera los ángulos deseados. Cabe destacar que el encargado de la realización debe conocer la pérdida de longitud que se produce en cada curvado de tubos para el correcto corte la barra a doblar.

Por otro lado, el equipo de fabricación del chasis está obligado a seguir las siguientes recomendaciones en proceso de curvado de tubos:

-Utilización de bucles de soporte: Para radios de doblado pequeños o espesor de tubos grandes, se recomienda utilizar bucles de soporte para evitar aplastamientos o deformaciones. Un tubo de soporte es un tubo de menos diámetros que se coloca dentro del tubo principal durante el proceso.



Ilustración 2 -Bucles soporte para curvado de tubos.

- Realizar presión gradualmente: se debe aplicar presión constante y de forma gradual. Asegurarse se doblar lentamente y de manera uniforme, evitando movimientos bruscos.
- Comprobación periódica: se deben de realizar detenciones durante el proceso para verificar el ángulo y alineación del tubo, se ajusta según sea necesario para obtener el ángulo de doblado requerido.
- Evitar el aplastamiento: si se aplica demasiada presión o se dobla demasiado rápido, el tubo puede deformarse o aplastarse en lugar de doblarse, perdiendo con ello sus propiedades mecánicas.
- Realizar una inspección visual: Una vez se haya alcanzado el ángulo de curvatura deseado se debe inspeccionar cuidadosamente el tubo para comprobar su estado y calidad, buscando grietas, deformaciones o cualquier otro defecto. Si el tubo es defectuoso se sustituirá por otro e informar al propietario.



Ilustración 3 -Tubos finalmente doblados.



3.3. SOLDADURA

Como se ha mencionado durante el proyecto, la misión principal del chasis es proporcionar resistencia y rigidez, esto no es posible sin el correcto ensamblaje de las diferentes partes del chasis mediante soldadura el cual es un proceso que une permanentemente los elementos requeridos.

Gracias a un correcto proceso de soldadura entre tubos se consigue una transferencia de cargas a lo largo de la estructura que hacen que el chasis trabaje de manera eficiente. Por otro lado, una mala soldadura puede producir concentraciones de tensiones en la estructura que hacen que aumenten las posibilidades de fallo y reduzcan la vida útil del chasis, además de reducir la seguridad del piloto.

Para este proceso surgen multitud de métodos de soldadura:

-Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW): este método basa su funcionamiento en el uso de un electrodo revestido para la creación del arco eléctrico necesario para la soldadura. El electrodo está formado por el material de aportación o alma y el revestimiento, dicho electrodo se funde durante el proceso y derrama el revestimiento en la soldadura creando así una capa de escoria protectora frente agentes contaminantes. Resulta ser un proceso versátil, el cual requiere de habilidad y experiencia para lograr buenos resultados.

-Soldadura MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas): es un proceso de soldadura que se da gracias a la aparición de un arco eléctrico dado a través de un electrodo de alambre continuo suministrado en bobinas de varios metros de longitud. Gracias a un motor eléctrico se logra llevar el material de aporte o electrodo hasta la boquilla de soldadura donde se une con el gas de protección con el objetivo de mejorar la calidad de las soldaduras. Este proceso ofrece ventajas como una alta velocidad de deposición del metal y con ello una reducción del tiempo de trabajo y mejora de la eficiencia.

-Soldadura TIG (Tungsteno Inert Gas): es un proceso de soldadura que utiliza un electrodo de tungsteno no consumible para la generación del arco eléctrico. Durante la soldadura, se utiliza un gas inerte, como puede ser el argón, para proteger la zona de soldadura de posibles contaminantes. Esta soldadura es ampliamente utilizada en la industria debido a su alta calidad y precisión en la soldadura de metales, especialmente en aplicaciones que se requieren soldaduras limpias y estéticamente atractivas.

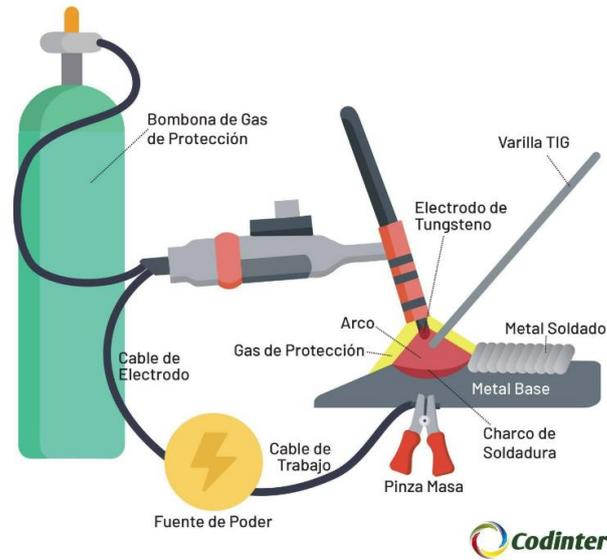


Ilustración 4 -Equipo de soldadura TIG

Se toma la decisión de realizar la soldadura del chasis mediante soldadura TIG esto se debe a varios factores. El primero es la calidad y la precisión que ofrece esta soldadura frente a las alternativas propuestas ya que esta permite obtener soldaduras limpias, sin apenas salpicaduras y porosidades lo que es crucial en la soldadura de chasis en vehículos de competición. Otro aspecto clave es el control del aporte térmico dado en la soldadura, esencial en nuestro chasis ya que trabajamos con diferentes perfiles tubulares de diferentes espesores y queremos conseguir los mismos resultados en todos los perfiles por lo que controlar el aporte térmico evita la posible aparición de deformaciones en las uniones, además, un bajo aporte de calor en el proceso minimiza el riesgo de dañar las propiedades mecánicas del material, por ello se soldará con el aporte térmico más bajo posible.

En cuanto al tipo de material de aportación se debe utilizar aquellos con especificaciones ER70S-2 estos alambres tienen una composición química adecuada y ofrecen buena ductilidad, resistencia mecánica y fluidez en la soldadura. Además, cumplen con creces los valores de límite a rotura y límite elástico estipulados por normativa en los cálculos de uniones soldadas, siendo la del material de aportación 500 MPa y 420 MPa y los estipulados de 300 MPa y 180 MPa respectivamente. Con estos valores se asegura que las soldaduras soporten los esfuerzos dados en el chasis durante su funcionamiento.

Como gas de protección se utilizará Argón puro con un flujo de 10 a 12 litros por minuto. Se debe seleccionar el diámetro y el tipo de electrodo adecuados para el grosor, por ello



tenemos un grosor máximo de 2.6 mm, por lo que se recomienda utilizar un electrodo de al menos 1.6 milímetros.

Se debe asegurar una correcta limpieza tanto de óxidos como de posibles contaminantes del chasis, este será necesario tanto para el proceso de soldadura como para el proceso de tratamiento de superficies. Este proceso se realizará mediante chorreado de arena, se utilizará una arena de chorreo de tamaño de grano de a 40-50 mesh. Este tipo de grano permite preparar la superficie para futuras capas superficiales, por lo que será necesario el chorreo completo de la estructura.

Por ello el fabricante está obligado a soldar con TIG y a seguir los procesos descritos ya que se busca conseguir los resultados requeridos de alta calidad y durabilidad. Para este proceso se debe contar con un equipo profesional o una empresa especializada en soldadura TIG familiarizados con aceros S355 y procesos de este tipo, que lleven a cabo el proceso de manera correcta.

3.3.1. INSPECCIÓN DE CALIDAD DE SOLDADURAS

La inspección de calidad de soldaduras es un proceso fundamental en la industria de la soldadura que sirve principalmente para garantizar la integridad estructural y la seguridad, en nuestro caso del chasis fabricado. Este proceso permite detectar defectos que podrían debilitar las uniones soldadas y con ello evitar posibles costosas reparaciones futuras. Es esencial para garantizar altos estándares de calidad durante el proceso.

Se emite una orden al taller asignado para la fabricación del chasis la realización de una unión soldada en forma de T, siguiendo todas las directrices, especificaciones y procedimientos previamente establecidos durante la fabricación del chasis. El propósito de esta soldadura es enviarla posteriormente a un laboratorio especializado con el fin de someterla a pruebas y análisis exhaustivos para evaluar sus propiedades mecánicas y comprobar que dicha unión soldada cumple con los límites y requisitos establecidos.

Existen varios métodos de inspección de calidad como pueden ser el visual, ensayos no destructivos y ensayos destructivos. Los ensayos no destructivos posibles para realizar son los siguientes:

-Ensayo de líquidos penetrantes: consiste en un tipo de ensayo no destructivo mediante el cual es posible detectar discontinuidades en las soldaduras, se realiza mediante la



aplicación de un líquido que penetra por capilaridad en dichas discontinuidades del material. Tras su aplicación se elimina el exceso y se utiliza otro líquido revelador que ayuda a poder observar aquellas zonas donde ha salido el material de las discontinuidades.

-Ensayo por partículas magnéticas: La inspección por partículas magnéticas resulta ser también un ensayo no destructivo útil para materiales ferromagnéticos. Este ensayo permite detectar irregularidades y discontinuidades en las superficies de las soldaduras, siendo prácticamente imposible detectar irregularidades a profundidades de más de 5-6 milímetros. Este método magnetiza la pieza para analizar y aplica sobre ella ciertas partículas magnéticas, estas se acumulan en las zonas de la pieza donde surgen surcos o discontinuidades y de esta forma se pueden observar visualmente donde estas estos defectos.

Por otro lado, para conocer las propiedades mecánicas de la unión se realizará el siguiente ensayo destructivo:

-Ensayo de tracción: este ensayo consiste en aplicar una fuerza axial de manera gradual hasta que se produce la fractura de la unión. Se mide la resistencia a tracción, el límite elástico, la elongación y la reducción de área, estos valores ofrecen información sobre la resistencia y la ductilidad del material.

El encargado de realizar los ensayos de calidad en las soldaduras está obligado a fotografiar todos los ensayos realizados en las soldaduras, indicando los posibles puntos de fallo para su posterior reparación y mostrando también los valores de las propiedades mecánicas dadas en el ensayo de tracción, junto con la gráfica de la probeta. También se realizarán medidas exhaustivas para comprobar la correcta alineación de las diferentes partes del chasis y las medidas plasmados en los planos del chasis.



3.6. TRATAMIENTO DE SUPERFICIES

Tras finalizar con los procesos de fabricación y soldadura de una estructura metálica de acero es conveniente realizar una serie de tratamientos de superficies para mejorar la resistencia a la corrosión y además brindar con ello una apariencia estética.

Los pasos obligados a realizar para el tratamiento de superficies de nuestra estructura son los siguientes:

-Limpieza de posibles óxidos y decapado: como se ha contado anteriormente en el proceso de soldadura, la estructura será sometida a un chorreo de arena con el grano estipulado anteriormente para conseguir una correcta adherencia de las capas posteriores.

-Limpieza: el proceso de limpieza trae consigo la acumulación de partículas y suciedad en la estructura, por ello se debe proceder con la limpieza de la estructura con ayuda de una pistola de aire comprimido y un paño limpio.

-Imprimación: se aplica una capa de imprimación diseñada específicamente para metal, esta actúa como capa protectora y mejora la adherencia de las capas de acabado posteriores. Para esta parte se utiliza una imprimación epoxi la cual ofrece una excelente protección contra la corrosión y mejora la durabilidad del recubrimiento final. No es necesario un lijado previo a la aplicación de acabado final ya que la rugosidad promedio de la imprimación epoxi está en un rango de 40 a 60 micrómetros, la cual es suficiente para la adhesión de la capa final.

-Acabado: aplicación de la capa de pintura siguiendo las especificaciones del fabricante. Se utilizarán pinturas de automóvil monocapa de color negro. Estas están diseñadas para proporcionar una cobertura completa y uniforme en una sola capa, sin embargo, se aplicarán las capas que sean necesarias para asegurar el correcto cubrimiento de la estructura.

Está obligado el taller de pintura asignado para el proceso de conseguir los acabados y estándares adecuados para obtener una protección ante óxidos y calidad adecuada para el proceso.



4. PARTICIPANTES

En este apartado se describen los participantes y las funciones que deben realizar estos en el proyecto de manera que se consiga diseñar y fabricar un chasis adaptado al reglamento de la competición y adaptado a los procesos de fabricación y demás.

4.1. LA PROPIEDAD

En nuestro caso la organización responsable del proyecto, esta representa la entidad que promueve y respalda el proyecto, como la universidad. La organización proporcionara el apoyo administrativo, financiero y logístico necesario junto con patrocinadores para llevar a cabo el proyecto de fabricación del chasis tubular. Además, se asigna un tutor de proyecto para brindar orientación y supervisión durante el proceso.

4.2. EL TÉCNICO

Este puede ser uno como en nuestro caso o varios, cuando se forma por varias personas este se compone de ingenieros y diseñadores, estos son los encargados de crear el diseño del chasis tubular de acuerdo con los requisitos establecidos. El equipo de diseño debe tener experiencia en la ingeniería mecánica, diseño estructural y conocimientos específicos sobre las regulaciones y normativas de la Fórmula Student, ya que la tarea principal consiste en desarrollar un diseño óptimo que cumpla con los estándares de rendimiento, seguridad y peso establecidos por la competición.

Dentro de este mismo apartado también se puede hacer diferencia del equipo de diseño al equipo de fabricación, sin embargo, en nuestro caso el técnico de diseño está formado por un único integrante que soy yo. Por lo que se derivan los procesos de fabricación a un equipo externo especializado en labores de corte, preparado y soldadura de tubos.

4.3. EL CONTRATISTA

Es el equipo o responsable de la fabricación y ensamblaje del chasis tubular de acero, este equipo se encargará de llevar a cabo los procesos de fabricación, soldadura y ensamblaje descritos en el proyecto. Los encargados de realizar esta tarea deben contar con amplia experiencia y conocimiento en la fabricación automotriz y con ello asegurar una alta calidad, precisión y eficiencia en la construcción de la estructura.



4.4. PROVEEDOR DE MATERIALES

Es la entidad responsable de suministrar los materiales necesarios para la fabricación del chasis tubular de acero. Este debe garantizar la calidad de estos, cumpliendo con las especificaciones técnicas y los estándares de resistencia requeridos.

5. MATERIALES

En este apartado del pliego de condiciones se establece los materiales que deben ser empleados en la fabricación del chasis tubular.

5.1. PERFILES TUBULARES

Los perfiles tubulares para utilizar deben ser de acero S355 debido a que es uno de los aceros que tiene buenas características mecánicas apropiadas para la fabricación de una estructura tubular y además resulta ser económico y ampliamente disponible. Las dimensiones se indican en los planos del chasis.

El acero S355 debe tener como porcentajes de composiciones máximas los siguientes elementos:

- ✓ Carbono (C): 0.3%
- ✓ Silicio (Si): 0.50%
- ✓ Manganeso (Mn): 1.6%
- ✓ Fósforo (P): 0.035%
- ✓ Azufre (S): 0.035%

Estas composiciones cumplen con la norma europea EN 10025-2 y con la normativa específica de la competición.

En cuanto a las propiedades mecánicas según la misma norma deben oscilar entre los siguientes valores:

- ✓ Resistencia a tracción: 470-630 MPa
- ✓ Límite elástico: 320-395 MPa
- ✓ Límite de rotura: 470-690 MPa

Las características del acero deben quedar documentadas para su posterior análisis y comparación.



5.2. MATERIALES DE TRABAJO

Para la fabricación del chasis se debe contar con una serie de herramientas y útiles, estos van desde la maquinaria básica como la radial, discos de corte, herramienta básica, productos de tratamiento de superficies como pinturas antióxido y demás. Estos se han nombrado anteriormente en el proceso de fabricación del chasis y son los talleres encargados para cada proceso de la adquisición de estos.

5.3. ENSAYOS DE CALIDAD DEL ACERO

Para comprobar la correcta composición química del acero suministrado por el fabricante se envía a realizar un análisis químico donde se comprueba si los porcentajes de elementos que forman el acero son los correctos y estipulados por el fabricante. Además, se implementan pruebas de ensayos destructivos con el objetivo de verificar las requeridas propiedades mecánicas del acero.

6. ESPECIFICACIONES ECONÓMICAS

6.1. PRECIOS

El presupuesto contiene una descripción detallada de los costos asociado a cada una de las tareas requeridas para la fabricación del chasis. El pago se efectuará una vez que se haya completado la fabricación y se haya verificado que el trabajo cumple con los requisitos establecidos.

6.2. GARANTÍA

En el contrato se especificará el tiempo de garantía acordado. Durante este período, el fabricante se compromete a hacerse cargo de cualquier trabajo relacionado con posibles defectos que puedan surgir durante la fabricación del chasis. Esto incluye tanto materiales necesarios como la mano de obra y el transporte del chasis a los talleres asignados de pintura.



7. REFERENCIAS

-Ilustración 1: Oficial cortando perfiles tubulares con amoladora radial.

<https://www.comercturro.com/blog/herramientas/como-elegir-una-amoladora.html>

-Ilustración 2: Bucles de soporte.

<https://huthbenders.com/es/blog/doblado-de-tubos-cuadrados-y-rectangulares/>

-Ilustración 3: Tubos finalmente doblados.

<https://www.facebook.com/photo/?fbid=326557230711578&set=a.326556980711603>

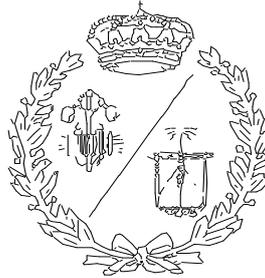
-Ilustración 4: Equipo de soldadura TIG.

<https://www.codinter.com/es/soldadura-tig-vs-mig-cual-usar-en-cada-caso/>



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

DOCUMENTO VI: PRESUPUESTO

Autor: Francisco Cagigas Quintana

Julio - 2023

ÍNDICE PRESUPUESTO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. PRESUPUESTO DE EJECUCION MATERIAL	1
2.1. COSTE DE MATERIAS PRIMAS	1
2.2. COSTE DE FABRICACIÓN Y MONTAJE	2
2.3. COSTE DE OFICINA TÉCNICA	2
3. RESUMEN DE COSTES	3
3.1. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL	3
3.2. GASTOS GENERALES	3
3.3. BENEFICIO INDUSTRIAL	4
3.4. RESUMEN PRESUPUESTO CONTRATA	4
4. IVA	4
5. PRESUPUESTO TOTAL	4

ÍNDICE TABLAS

TABLA 1 -COSTES MATERIAS PRIMAS.	1
TABLA 2 -COSTES DE MANO DE OBRA.	2
TABLA 3 -COSTES OFICINA TÉCNICA.	3
TABLA 4 -PREPUESTO TOTAL DE EJECUCIÓN MATERIAL.	3
TABLA 5 -PRESUPUESTO DE CONTRATA.	4
TABLA 6 -PRESUPUESTO TOTAL.	4

1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se expone el presupuesto total del proyecto el cual es una herramienta indispensable para el desarrollo y ejecución del proyecto. A través de una adecuada gestión de los recursos económicos y una planificación efectiva, se espera alcanzar los objetivos propuestos y contribuir con el avance en el diseño de chasis y vehículos de competición.

Es importante destacar que este presupuesto ha sido elaborado considerando los precios y costos vigentes en el momento de su creación. Sin embargo, es posible que existan variaciones debido a factores externos como cambio en los precios de los materiales, ajustes en los costos de mano de obra...

2. PRESUPUESTO DE EJECUCION MATERIAL

2.1. COSTE DE MATERIAS PRIMAS

En este apartado se analizan todas las materias primas necesarias para la fabricación del chasis, estas nombradas a continuación, son aquellas materias primas las cuales el taller de fabricación no cuenta con ellas.

Tabla 1 -Costes materias primas.

MATERIAL	CANTIDAD	UNIDADES	PRECIO UNITARIO (€)	SUBTOTAL (€)
PERFIL 25.5x1.9	1	15 m	91,48	91,48
PERFIL 25.5x1.5	1	11 m	54.89	54.89
PERFIL 25.5x2.6	1	14 m	109.77	109.77
IMPRIMACIÓN EPOXI	1	1 L	34.14	34.14
PINTURA MONOCAPA NEGRA L	2	1 L	60.50	121

Siendo el coste total de las materias primas de 411.28 euros.

2.2. COSTE DE FABRICACIÓN Y MONTAJE

En la siguiente tabla se desglosa el precio y las horas de cada proceso que interviene para la fabricación del chasis.

Se asume en los precios de mano de obra de fabricación del chasis todo componente y herramienta necesaria para su realización. Esto implica que los costes reflejados no abarcan solo el coste de mano de obra humano, sino también cualquier elemento adicional requerido para completar la fabricación del chasis.

Tabla 2 -Costes de mano de obra.

PROCESO	PRECIO HORA (€)	HORAS	SUBTOTAL (€)
TRANSPORTES	18	3	54
CORTE DE TUBOS	25	3	75
PREPARADO DE TUBOS	25	6	150
CURVADO DE TUBOS	25	4	100
SOLDADURA	32	18	576
TRATAMIENTO DE SUPERFICIES	30	6	180

Siendo el coste total de mano de obra de 1135 euros.

2.3. COSTE DE OFICINA TÉCNICA

En la siguiente tabla se reflejan los costes de oficina técnica, donde se realiza el cálculo, los diseños y la redacción del proyecto por parte del ingeniero técnico encargado.

Tabla 3 -Costes oficina técnica.

FASES	HORAS	PRECIO/HORA	PRECIO (€)	TOTAL
ESTUDIO NORMATIVA	8	35	280	
DISEÑO MODELO CHASIS INICAL	10	35	350	
DISEÑO MODELO CHASIS FINAL	8	35	280	
ESTUDIOS MEF CHASIS INICAL	10	35	350	
ESTUDIOS MEF CHASIS FINAL	9	35	315	
REDACCION PROYECTO	16	15	240	

Siendo el coste total de la oficina técnica de 1815 euros.

3. RESUMEN DE COSTES

3.1. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

Tabla 4 -Presupuesto total de ejecución material.

CONCEPTO	COSTE (€)
MATERIAS PRIMAS	411.28
MANO DE OBRA	1135
OFICINA TÉCNICA	1815

Siendo el presupuesto total de ejecución material de 3361.28 euros.

3.2. GASTOS GENERALES

Son un 13% del coste total de ejecución material, siendo 536.96 euros.

3.3. BENEFICIO INDUSTRIAL

Son un 8% del coste total de ejecución material, siendo 268.9 euros.

3.4. RESUMEN PRESUPUESTO CONTRATA

Tabla 5 -Presupuesto de contrata.

CONCEPTO	COSTE (€)
PRESUPUESTO TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL	3361.28
GASTOS GENERALES (13%)	536.96
BENEFICIO INDUSTRIAL (8%)	268.9

Siendo el presupuesto de contrata de 4167.14 euros.

4. IVA

El impuesto sobre el valor añadido en España es un 21% del presupuesto total de contrata siendo un total añadir de 875.1 euros.

5. PRESUPUESTO TOTAL

Tabla 6 -Presupuesto total.

CONCEPTO	COSTE (€)
PRESUPUESTO CONTRATA	4167.14
IVA (21%)	875.1

Siendo el presupuesto total del proyecto de 5042.3 euros.