



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

Diseño de un arco de seguridad interior contra vuelco

MEMORIA PRESENTADA POR:

Diego Giménez de los Galanes Bernat

TUTOR/A:

*Néstor Montañés Muñoz
Jorge Gabriel Segura Alcaraz*

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Convocatoria de defensa: Julio de dos mil veintiuno

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCUELA POLITÈCNICA SUPERIOR DE ALCOY



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

CAMPUS D'ALCOY

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

“DISEÑO DE UN ARCO DE SEGURIDAD INTERIOR CONTRA VUELCO”

Autor:

DIEGO GIMÉNEZ DE LOS GALANES BERNAT

Dirigido por:

Néstor Montañés Muñoz

Jorge Gabriel Segura Alcaraz

Julio, 2021

Resumen

Resumen

DISEÑO DE UN ARCO DE SEGURIDAD INTERIOR CONTRA VUELCO

El objetivo del trabajo consiste en realizar el diseño, cálculo y estudio de costes de fabricación de una jaula de seguridad interior para un vehículo de acuerdo a la normativa aplicable, con el objeto de poder participar en etapas de rallies de regularidad y tandas en circuitos.

Por ello se realizará un análisis de las diferentes normativas aplicables para encontrar aquella que se adecúe mejor al uso deseado. Una vez conocida la normativa, se procederá con el diseño de la jaula de manera que cumpla los requisitos exigidos.

Diseñada la estructura de acuerdo a la normativa, se realizará un posterior cálculo con un software CAE, considerando diferentes materiales y geometrías para poder generar un estudio comparativo atendiendo a los requisitos exigidos en la norma.

Por último, seleccionada la geometría definitiva y el material a emplear, se realizará un presupuesto de la estructura y sus costes de fabricación e instalación.

Summary

Summary

DESIGN OF A ROLLOVER PROTECTION STRUCTURE (ROPS)

The target of the work is to carry out the design, calculation and study of the manufacturing costs of an interior safety cage for a vehicle in accordance with the applicable regulations, in order to be able to participate in regularity rally stages and track days.

Therefore, an analysis of the different applicable regulations will be carried out to find the one that suits the best to the desired use. Once the regulations are known, the cage will be designed so that it meets the requirements.

With the structure designed in accordance with the regulations, a subsequent structural calculation will be carried out with CAE software, considering different materials and geometries in order to generate a comparative study according to the normative requirements.

Finally, once the final geometry and material have been selected, a budget will be estimated for the structure and its manufacturing and installation costs.

Resum

Resum

DISENY D'UN ARC DE SEGURETAT INTERIOR ANTIBOLCADA

L'objectiu del treball consisteix en el disseny, càlcul i estudi dels costos de fabricació d'una estructura de seguretat interior per a un vehicle d'acord amb la normativa aplicable, amb l'objectiu de poder participar en etapes de ralis de regularitat i tandes en circuits.

Per això es realitzarà una anàlisi de les diferents normatives aplicables per a trobar aquella que s'adeqüe millor a l'ús desitjat. Una vegada coneguda la normativa, es procedirà amb el disseny de la gàbia de manera que complisca els requisits exigits.

Dissenyada l'estructura d'acord amb la normativa, es realitzarà un posterior càlcul estructural amb un programa CAE, considerant diversos materials i geometries per a poder generar un estudi comparatiu d'acord con els requisits exigits en la norma.

Finalment, seleccionada la geometria definitiva i el material a emprar es realitzarà un pressupost de l'estructura i els seus costos de fabricació e instal·lació

Resum

Tabla de contenido

Resumen	3
Summary	4
Resum.....	5
I. Introducción.....	9
I.1. Evolución del campeonato del mundo de ralis.....	9
Comienzos	9
Evolución hasta la actualidad.....	11
I.2. Creación de los primeros campeonatos internacionales.....	13
Campeonato de Europa de Rally	14
Campeonato Mundial de Rally	15
Elementos de seguridad en la actualidad	17
I.3. Diferentes categorías en las competiciones de ralis en la actualidad.....	23
Ralis actuales.....	23
Ralis de regularidad.....	25
Históricos.....	27
Rallysprint.....	28
Subidas de montaña.....	28
Raid	30
II. Objetivo del trabajo.....	32
III. Normativa aplicable.....	34
III.1. Normativa aplicable para la competición.....	34
III.2. Normativa aplicable para la circulación por la vía pública.....	35
III.3. Tabla comparativa normativas.....	36
IV. Diseño de la estructura.....	39
IV.1. Medición del habitáculo.....	39
IV.2. Diseño inicial de la estructura.....	40

Resum

IV.3.	Selección del material deseado.....	45
IV.4.	Introducción de las cargas.....	48
IV.5.	Simulación.....	49
IV.6.	Resultados	50
IV.7.	Primer diseño modificado.....	51
IV.8.	Segundo diseño modificado.	54
IV.9.	Tercer diseño modificado.....	57
IV.10.	Optimización del diseño.....	66
IV.11.	Diseño opcional regularidad.	74
IV.12.	Resultados	83
V.	Selección del proceso de fabricación y cálculo del presupuesto.....	84
V.1.	Proceso de fabricación de la estructura.....	84
	Selección de la soldadura.	85
	Proceso de fabricación.	86
	Montaje de la estructura.	87
V.2.	Cálculo del presupuesto.....	88
	Cálculo del coste y peso de la materia prima.....	89
	Cálculo del coste de la soldadura.....	91
	Cálculo del coste de mecanizado	94
	Elementos adicionales.....	96
V.3.	Coste final.....	97
VI.	Conclusión.....	99
	Apéndices.....	101
	Anexo I.....	101
	Listado de ilustraciones.....	101
	Anexo II	104
	Listado de tablas.....	104

Resum

Anexo III.....	105
Búsqueda de materiales en CES-Edupack.....	105
Anexo IV.....	110
Planos de las diferentes estructuras diseñadas con la denominación de los elementos empleada en el cálculo del presupuesto.	110
.....	114
Anexo V.....	116
Bibliografía.....	116

I. Introducción

I.1. Evolución del campeonato del mundo de ralis.

Primero se comenzará realizando un análisis de la evolución histórica de los ralis centrándose en los aspectos más importantes de cada época para, de esta manera, poder apreciar diferentes líneas evolutivas y puntos de inflexión con respecto a la tecnología empleada en estos campeonatos, especialmente en el ámbito de la seguridad para los ocupantes y espectadores.

Comienzos

A finales del siglo XIX comenzaron a surgir diferentes competiciones en carreteras abiertas al público que consistían, por norma general, en realizar el trayecto entre dos grandes ciudades en el menor tiempo posible. La primera carrera de este estilo de la que se tiene constancia es la *París-Rouen*, en el año 1894, con la victoria de un vehículo de la firma Peugeot.

Ya en el siglo XX, surgió una carrera de resistencia en Italia que marcaría las líneas de evolución del deporte. Se trataba de la *Targa-Florio*, que consistía en realizar tres vueltas a un circuito cerrado sumando un total de 446 kilómetros. En 1911, cambiaron el recorrido de la prueba, denominándose también *Giro di Sicilia*, y se comenzó a realizar fuera del circuito en carreteras abiertas al tráfico. Esta prueba tenía una duración de aproximadamente mil kilómetros que debían recorrerse de manera ininterrumpida, estando a la altura de competiciones de resistencia a nivel internacional junto con las *24 Heures du Mans* hasta el año 1974, donde se canceló a causa de la peligrosidad de la carrera.

Introducción

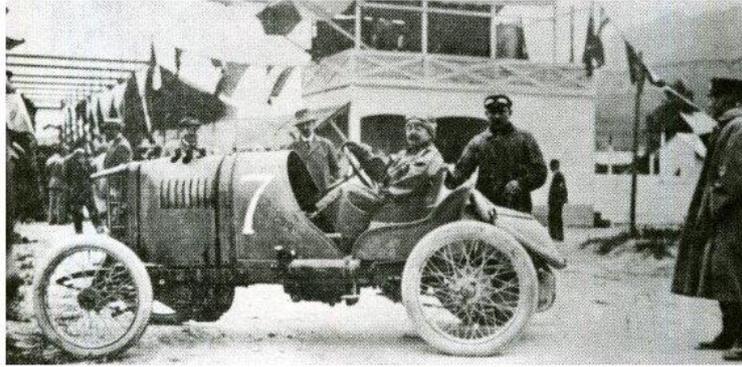


Ilustración 1: Imagen de un vehículo en el año 1910 preparado para disputar la Targa-Florio

Por otra parte, a comienzos del siglo XX, surgió un tipo de competición cuyo objetivo no era la velocidad sino aspectos más subjetivos como la comodidad del vehículo. Estas pruebas estaban destinadas a la clase adinerada, puesto que eran los únicos que podían comprarse un automóvil. La de mayor renombre, que se continúa celebrando en la actualidad, es el *Rallye Automobile Monte Carlo*, fundada en el año 1911. Es la primera competición en la que se nombra el término Rallye (rali en francés). Esta prueba con el paso de los años fue incorporando etapas de velocidad no puntuables para la clasificación final que resultaron ser un éxito rotundo. Por otra parte, se fueron añadiendo de forma progresiva diferentes elementos como pruebas de frenada o de manejo del vehículo.

Tras la Segunda Guerra Mundial, los ralis se retomaron con gran interés por parte de los competidores. Esto se debía a que se empezaron a asfaltar muchas carreteras que conformaban las etapas de los mismos y, por otra parte, a diferencia de las carreras de automóviles en circuitos, para competir en un rali únicamente era necesario poseer un automóvil de calle y abonar la inscripción del evento.

Este auge de los ralis favoreció la aparición de una gran cantidad de competiciones en diferentes países, todas emulando el modelo empleado por el *Rallye Automobile Monte Carlo*. Al disputarse un mayor número de pruebas, la preocupación de las autoridades por la seguridad de los competidores y de los ciudadanos iba en aumento, dando lugar a las primeras etapas en carreteras cortadas al tránsito. Pese a ello, los pilotos, al abandonar el tramo cronometrado e incorporarse al tránsito, debían acatar escrupulosamente el código de circulación. La negativa de algunas autoridades a cortar la circulación en las carreteras por las que discurría el rali, obligó a una parte de

Introducción

las organizaciones a realizarlos en caminos privados o de tierra, donde no se aplicaba la legislación de circulación, como por ejemplo el RAC de Gran Bretaña o *Acrópolis Rally of Greece*.



Ilustración 2: Competidores del Acrópolis Rally of Greece en el año 1963

Como se puede observar en la Ilustración 1, durante el final del siglo XIX y primera mitad del siglo XX, los elementos de seguridad eran inexistentes. No se realizaba ningún tipo de ensayo que reflejara que tipo de deformación sufría el vehículo en caso de accidente, por lo que los fabricantes sobreestimaban la seguridad de los vehículos y diseñaban chasis y carrocerías muy ligeras y dúctiles, provocando consecuencias fatales en caso de accidente. Por otra parte, la luna de los vehículos y los cristales auxiliares eran de vidrio que, al recibir un impacto, se rompía en infinidad de fragmentos que impactaban contra los ocupantes produciendo numerosos cortes. Además, los vehículos por norma general contaban con aristas cortantes tanto en el exterior como en el interior de los mismos, por lo que en caso de accidente se podían producir laceraciones tanto a ocupantes como a espectadores.

Por ello, durante esta época, la principal medida para aumentar la seguridad consistió en cortar las carreteras al tráfico, para evitar accidentes con vehículos que estuvieren transitando en ese momento.

Evolución hasta la actualidad

En los años sesenta se produjo una evolución significativa en los ralis, marcando una diferencia entre sus predecesores y creando el sistema que se conoce en

Introducción

la actualidad, incorporando de forma paulatina numerosos elementos para favorecer la seguridad de los participantes y los espectadores.

Tras la creación de diferentes tramos en carreteras cortadas al tráfico, los ralis que continuaban implementando el formato antiguo, en el que se corrían etapas de larga distancia por carreteras abiertas, vieron reducir paulatinamente el número de participantes. Al realizarse la mayoría de etapas en carretera cortada, se introdujeron tramos de entrenamiento reglamentarios.

Por otra parte, se crearon los primeros equipos oficiales, con el respaldo de las marcas. El más destacado fue BMC (*British Motor Corporation*). Este equipo, compitiendo con coches de la marca MINI, fue el primero en crear vehículos específicos de esta categoría, así como la introducción del copiloto profesional, ya que hasta esa fecha los copilotos eran mecánicos de la marca sin entrenamiento específico, y la creación de la figura del *ouvreur*, un asistente del equipo que circula por los tramos inmediatamente antes de la celebración de la etapa para indicar posibles cambios en el pavimento entre la toma de notas del copiloto y el comienzo de la sección.



Ilustración 3: MINI del equipo BMC disputando el Rallye Monte-Carlo en 1967

Uno de los avances más importantes fue la introducción del cinturón de seguridad de tres puntos en el año 1958 en un Saab 93 por Nils Bohlin, inventor del asiento eyectable (elemento de seguridad que permite a los pilotos de las aeronaves de combate salir propulsados al exterior en caso de emergencia). Este elemento es una

Introducción

evolución de su antecesor que estaba anclado en dos puntos al vehículo diseñado por Preston Tucker en el año 1948.

Los orígenes de los cinturones de seguridad tienen lugar en la aviación, ya que era común que los pilotos durante las maniobras de combate salieran despedidos del asiento, por lo que se vio necesario diseñar un sistema de anclaje para evitarlo. El elemento que desencadenó su implantación en los vehículos fue el fallecimiento de un familiar cercano del director de la marca Volvo, quien potenció el interés de la firma en el desarrollo de elementos de seguridad para reducir la siniestralidad.

Con un incremento exponencial por el interés de los competidores en los ralis, las marcas comenzaron a realizar pruebas para diseñar nuevos sistemas que aumentaran la competitividad de los vehículos. De esta manera se probaron elementos como los discos de freno o la tracción integral. Por otra parte, al aumentar el número de participantes se volvió necesaria la creación de una normativa aplicable a estos eventos, formando diferentes categorías en función, ya no solo de la cilindrada del vehículo, sino del grado de preparación del mismo. Esta normativa impulsada por la *Federación Internacional de Automovilismo (FIA en adelante)* en el año 1957, denominada *Formulario Internacional de Homologación*, obligó además a introducir diferentes elementos de seguridad hacia los competidores, como los arcos de seguridad interior. Esta normativa se ha ido actualizando anualmente, y el equivalente en la actualidad es el *Anexo J* de la FIA.

Este anexo contiene todos los requisitos de seguridad imprescindibles para que los vehículos puedan participar, los esfuerzos que deben soportar los diferentes elementos del automóvil, así como su correcta instalación. Todos los aspectos recogidos en el *Anexo J*, se verifican antes del inicio de cualquier competición y, en caso de que algún vehículo no cumpla con los requisitos, será expulsado de la prueba.

I.2. Creación de los primeros campeonatos internacionales

Con el aumento de la popularidad de los ralis, se aumentaron la cantidad de pruebas celebradas, así como la participación, cada vez más numerosa, de diferentes

Introducción

equipos oficiales y pilotos particulares. De esta manera se crearon numerosos campeonatos a lo largo de la temporada que incluían diferentes pruebas.

Campeonato de Europa de Rally

En el año 1953 se fundó el Campeonato de Europa de Rally [1], que reunía las etapas más importantes del continente, para premiar al mejor piloto de la temporada. Era el único campeonato que se realizaba en la época, por lo que los equipos no supieron cómo afrontar el reto y únicamente participaron en los ralis más cercanos a su residencia. Este hecho provocó que los vencedores de las primeras celebraciones de este certamen fueran aquellos que por su cercanía pudieron participar en el mayor número de pruebas. Las etapas se realizaban empleando el nuevo formato de carretera cortada al tránsito, por lo que se estableció una tendencia para posibles futuras pruebas.

Hay que destacar un cambio de tendencia con la introducción del equipo BMC en 1965. Antes de su participación, el interés de los equipos en la competición era mínimo, ya que se limitaban a luchar por las pruebas de gran renombre. Este participó de manera continuada en la mayoría de las pruebas, obteniendo el título ese año.

Una vez la organización observó el interés de la marca BMC por la prueba, decidió aumentar el número de citas en la temporada, y otorgó diferentes títulos en función de la categoría del vehículo. Poco después se creó el Campeonato de Constructores, dónde no se premiaba ya al piloto, sino al equipo con mejor actuación en la temporada.

Con la creación en la década de los 70 del *Campeonato Internacional de Marcas* y posteriormente del *Campeonato Mundial de Rally*, se relegó a un segundo plano la competición europea. La época de mayor éxito tuvo lugar al final de los años 70, cuando los principales equipos participantes del *Campeonato Mundial de Rally* utilizaron el campeonato europeo como un entrenamiento de cara a las etapas del *Campeonato del Mundo*, con el objetivo de realizar una puesta a punto de los vehículos de la temporada siguiente, y la introducción de diferentes prototipos.

Introducción



Ilustración 4: Fiat 124 Spyder disputando el Rally Costa Brava 1972 del Campeonato de Europa

Para determinar la puntuación se asignaba un valor de importancia a cada una de las pruebas. Este valor comenzó siendo de 1 a 4, pero se ha ido modificando a lo largo de los años en función de las pruebas realizadas y la normativa vigente. De esta manera, las pruebas con mayor importancia, con valor 4, cuadruplicaban su peso con respecto a las de menor importancia, con valor 1.

Campeonato Mundial de Rally

Inicialmente se creó el *Campeonato Internacional de Marcas*, en el año 1970, que albergaba siete pruebas, seis de ellas provenientes del *Campeonato de Europa de Rally*, y el *Rally Safari*, que discurría por África. El objetivo del campeonato era reducir el número de pruebas para simplificar la competición, ya que la normativa de la competición europea era bastante compleja, y favorecer la participación de diversos equipos.

Este sistema de puntuación, muy similar al empleado por la Fórmula 1, atrajo a numerosos equipos, por lo que fue ganando adeptos rápidamente. De esta manera en el año 1973 se transformó en el *Campeonato Mundial de Rally (FIA World Rally Championship, WRC en adelante [2])*. Destacar que este campeonato premiaba a las marcas, no a los pilotos.

Introducción

Al reconocer la FIA esta competición, que se equiparaba en importancia a la Fórmula 1, se asentaba finalmente el deporte como disciplina a nivel mundial, aumentando de esta manera su publicidad y prestigio. El mismo año de su creación se incrementaron el número de pruebas, de las siete iniciales a trece, siendo dos en África, una en América y las restantes en Europa.

Durante la década de los 70 estuvo monopolizado por las firmas italianas Lancia, con el modelo Stratos, y Fiat, con un 131 Abarth, siendo la primera la vencedora durante los inicios de la década con una victoria en una mayoría aplastante de etapas, y la segunda la única marca, a excepción de Lancia, que competía de manera regular en todas las pruebas. En la segunda mitad de década, Lancia se retiró del campeonato, y comenzó una competición muy igualada entre Fiat y Ford. En el año 1979 se creó el *Campeonato del Mundo de Pilotos*, para seleccionar un piloto vencedor de todas las pruebas del WRC y aumentar el interés de nuevas firmas en la competición.

Los años 80, también considerados como la edad de oro de los ralis, fueron testigos de una revolución en la tecnología de los vehículos y un aumento considerable de sus prestaciones. Afianzada ya la WRC, se produjo un aumento de interés de diferentes marcas oficiales que,

en un intento por vencer el campeonato, implantaron nuevos sistemas en los vehículos. En el año 1982, Audi introdujo el modelo Quattro, primer vehículo en incorporar un sistema de tracción total, naciendo el Grupo B. El primer año de competición, Audi consiguió el subcampeonato a los mandos de



Ilustración 5: Audi Quattro del Grupo B junto al público.

la piloto Michèle Bouton. Al observar las marcas rivales el buen comportamiento de la tracción integral, la implantaron en sus modelos y aumentaron significativamente la potencia de los vehículos introduciendo los motores con turbocompresor o, como en el caso de Lancia, turbocompresor y compresor mecánico.

Introducción

Al aumentar la potencia de los vehículos tan rápidamente, llegando a alcanzar los 500 caballos, se disminuyó enormemente la seguridad tanto de los pilotos como de los espectadores, produciéndose numerosos accidentes catastróficos. Uno de los factores más influyentes en la alta mortalidad en los ralis de la época se debe a que los vehículos circulaban muy próximos a los espectadores (Ilustración 5). A causa de estas deficiencias, la FIA modificó el reglamento en el año 1987, creando el Grupo A y prohibiendo el Grupo B, originando una nueva categoría de vehículos que estaban limitados a una potencia máxima de 300 caballos. Este movimiento marcó un cambio de tendencia de los ralis, concediéndole más importancia a la seguridad que a la velocidad.

Con la regulación del Grupo A se estableció una potencia máxima que no se ha modificado apenas a lo largo de los años. Este límite se ha aplicado a la categoría máxima, pero con el paso del tiempo se han creado numerosas divisiones de menor potencia para aumentar la variedad de vehículos. Desde la categoría Kit Car, vehículos de tracción delantera y una potencia de 260cv, hasta los WRC actuales, vehículos de categoría Rally 1 (implantada en 2021) con una potencia de 380cv y tracción integral.

Elementos de seguridad en la actualidad

En el campo de la seguridad el progreso ha sido muy claro, con un interés que se ha incrementado con el paso del tiempo. Hay que diferenciar entre dos ámbitos de la seguridad: el de los integrantes del vehículo y el de los espectadores. En ambas situaciones se han implementado nuevas medidas que han reducido de manera muy drástica la siniestralidad en este tipo de eventos.

Como se ha citado anteriormente, en el año 1957 se creó una normativa para regular los elementos de seguridad de los vehículos de estas competiciones. En este novedoso documento, conocido en la actualidad como *Anexo J*, se introduce por primera vez un arco de seguridad interior contra el vuelco, que aumenta la rigidez del vehículo imposibilitando la deformación del habitáculo en caso de accidente. Este elemento va acoplado de manera solidaria al chasis, envolviendo todo el habitáculo,

Introducción

para proteger de esta manera a los ocupantes de un impacto, independientemente de su dirección. A continuación se desarrollará de manera más detallada.

Arco de seguridad

Se trata de uno de los elementos de seguridad de los vehículos de rali más característicos, pudiendo ir colocado o en el interior del vehículo o en el exterior. Pese a ser predominante su colocación en el interior, también se pueden observar colocadas en la parte exterior de la carrocería en vehículos todoterreno, para evitar daños a la carrocería en caso de vuelco o impacto leve. Este tipo de jaulas no son válidas para competiciones de ralis en la actualidad pero era común que se emplearan en diferentes etapas del campeonato del mundo caracterizadas por la dificultad de sus pruebas, como sucedía con el *African Safari Rally*.



Ilustración 6: Lancia Stratos con refuerzos exteriores para impactos.

Los materiales a emplear en el diseño de estos elementos vienen determinados por la normativa aplicable a la competición en la que se va a participar, si bien es común a todas las normativas de la FIA independientemente de la competición. En la actualidad se ha de emplear un acero al carbono no aleado con un 0.3% de carbono como máximo.

En lo respectivo al diseño de la jaula, hay numerosas opciones, en función del tipo de vehículo y de la normativa de la competición, por lo que se analizarán las diferentes partes que integran una jaula de seguridad y la geometría de los elementos principales. Cada uno de los arcos ha de ser construido a partir de una pieza inicial sin procesos de soldadura y empleando íntegramente tubos redondos sin aristas (elementos sombreados en la Ilustración 7):

- Arco principal: Elemento colocado inmediatamente detrás de los asientos de conductor y acompañante de manera vertical (dependiendo de la normativa se acepta un 10% de inclinación) anclado al chasis del vehículo en sus dos terminaciones.

Introducción

- Arco frontal: Similar al arco principal colocado en el marco de la luna delantera y anclado al chasis por las terminaciones inferiores.
- Arco lateral: Comienza en la parte trasera de los asientos al igual que el arco principal, pero discurre a lo largo del vehículo hacia la zona de la luna delantera por el marco superior de la puerta. Al alcanzar la zona frontal del habitáculo discurre por el marco de la luna delantera en paralelo al pilar delantero del chasis hasta anclarse al suelo del habitáculo de la misma manera que el arco frontal (Ilustración 7; imagen 253.2).



Ilustración 7: Configuraciones básicas de una jaula según Anexo J

- Elementos adicionales: Hay que añadir a estos arcos unas barras de anclaje traseras, situadas en la parte final del vehículo y soldadas al arco principal o en su defecto la parte trasera del arco lateral. También es posible, en algunas normativas, añadir unos elementos desmontables a la altura de la puerta que unen los puntos de anclaje del arco principal y frontal o las terminaciones del arco lateral. Por último se acepta también la adición de unas barras de refuerzo entre los diferentes arcos para aumentar la rigidez de la estructura.
- Anclaje: La jaula ha de ir anclada al chasis mediante unas pletinas soldadas en el extremo de los arcos anteriormente citados y atornilladas, a su vez, a unos refuerzos situados en el chasis para evitar la deformación de éste en caso de accidente.

No es necesario que una jaula antivuelco este conformada por todos los elementos citados anteriormente, sino que cada normativa contempla distintas configuraciones añadiendo unos elementos adicionales soldados aumentando la rigidez de la estructura. Es en este apartado donde se puede modificar la estructura para tratar de reducir en la medida de lo posible el peso de la misma.

Introducción

Continuando con los elementos de seguridad para los ocupantes, con la idea de disminuir las lesiones de cuello de los pilotos, se desarrolló un sistema novedoso denominado HANS en el año 1983 (Ilustración 8). Este sistema, obligatorio en todas las competiciones a partir del 2003, disminuye la fuerza aplicada en el cuello y la deceleración de la cabeza considerablemente. Consiste en colocar un collarín sobre los hombros del piloto, de manera que quede fijado al cuerpo del mismo, y unirlo al casco para que, en caso de accidente, el movimiento del casco esté vinculado al del collarín. De esta manera se limita el desplazamiento de la cabeza con respecto al torso, disminuyendo el riesgo de lesión.



Ilustración 8: Sistema HANS en funcionamiento y su creador Robert Hubbard

Por otra parte, hay elementos de seguridad que no son exclusivamente diseñados para ralis, sino que son una evolución de diferentes elementos empleados en la automoción. El primero de estos es el cinturón de seguridad. Ya no posee tres puntos de anclaje exclusivamente, sino que cuenta con seis o incluso ocho puntos de anclaje. El cinturón debe ir anclado de manera fija al chasis, para evitar que los pilotos salgan proyectados en caso de vuelco. Otro elemento peculiar es el asiento, que cuenta con protecciones laterales a la altura de la cabeza para limitar el desplazamiento lateral en caso de impacto. Al igual que los cinturones de rali, los asientos han de ir anclados al chasis del vehículo. Estos



Ilustración 9: Anclaje de

Introducción

dos elementos de seguridad poseen una fecha de caducidad, no siendo válidos para competiciones organizadas por la FIA una vez expirado el plazo.

Además de incluir estos elementos de seguridad en el vehículo, tanto piloto como copiloto han de vestir ropa ignífuga homologada: mono externo, ropa interior, guantes, sotocasco y casco resistentes a altas temperaturas (Ilustración 10).



Ilustración 10: Fotografía del habitáculo de un vehículo de rali con los sistemas de seguridad obligatorios

En adición a todas las medidas de seguridad, es necesario instalar diferentes sistemas de extinción de incendios. Primeramente se instalan varios extintores en diferentes zonas del vehículo de fácil acceso, para que tanto los pilotos como los organismos que asisten al rally (espectadores, comisarios, bomberos, etc.) puedan recurrir a ellos en caso de necesidad. Independientemente de estos sistemas, se incorpora también un extintor automático enfocado al habitáculo y al compartimiento del motor. Además se instalan elementos de protección de los circuitos eléctricos que permiten desconectar la batería desde el interior o el exterior del automóvil según se precise. Por último, se modifica el depósito de combustible para evitar fugas o fracturas en caso de que sea golpeado. Para ello se instala un material absorbente en el interior y una válvula que se cierra automáticamente bloqueando la salida de combustible hacia el motor.

Por otra parte, con el paso de los años, la FIA ha ido implementando diferentes normas para aumentar la seguridad de los espectadores. En la época del Grupo B, era muy común que los vehículos circularan muy próximos al público, provocando que en

Introducción

una salida de vía se produjeran numerosos atropellos. Para evitar estos accidentes, se introdujo la figura del delegado de seguridad encargado de supervisar la colocación del público en los tramos. Para ello antes del inicio de cada tramo circulan una serie de vehículos supervisando la colocación correcta del público y de los servicios de emergencias para facilitar su intervención. Durante el evento, se encuentran situados a lo largo del recorrido un número determinado de comisarios, para que en caso de que se produzca algún percance se comunique rápidamente a la organización y verificar que se cumplan las directrices del delegado de seguridad.



Ilustración 11: Cartel informativo para la colocación del público de la RFEDA

Introducción

I.3. Diferentes categorías en las competiciones de ralis en la actualidad.

Conocidos los sucesos más importantes que han ido dando forma de manera progresiva a las competiciones actuales de ralis, a continuación se analizarán y explicarán las diferentes modalidades más populares.

Ralis actuales

Las competiciones actuales de ralis se disputan sobre numerosas superficies, desde asfalto hasta hielo, con una variación del número de etapas dependiendo de la prueba a disputar y un sistema de puntuación diferente, mas con numerosos puntos en común entre todos ellos. De esta manera, se expondrán los elementos más importantes de los ralis actuales siendo aplicables a la mayoría de competiciones de esta categoría.

Generalmente se comienza la prueba realizando una serie de pasadas en un tramo cronometrado con características similares a las etapas que se realizarán a lo largo del rali, para permitir a los equipos efectuar un correcto ajuste del vehículo. En este tramo, denominado *Shakedown*, se hará una clasificación que determinará el orden de salida de los vehículos, siendo el más rápido el que salga en primer lugar. Realizado el *Shakedown* los vehículos se estacionan en el *Parque Cerrado*, restringiendo el acceso a los mismos a los mecánicos y equipo, de manera que se impide modificar los vehículos.

Una vez definido el orden de salida se dará inicio al primer tramo cronometrado de la prueba. La longitud de las etapas es variable, pudiendo cambiar el pavimento entre una y otra o incluso dentro de la misma. Una vez terminada una etapa hay un tramo de enlace en carreteras abiertas al tránsito. Este tramo no es cronometrado, pero los participantes tienen un margen de tiempo para recorrerlo y tomar la salida en la siguiente etapa. En caso de incumplir esa ventana de tiempo otorgada por la organización, se impondrían sanciones a los pilotos.

Introducción

Por norma general, a lo largo del día se realizan alrededor de 8 etapas por 4 tramos cronometrados distintos, aunque dependiendo de la competición la cantidad de etapas y de tramos puede variar (Ilustración 12). Así, por la mañana disputan dos pasadas por dos tramos cronometrados diferentes y por la tarde discurren por otro recorrido completamente distinto. Estas condiciones las determina la

organización de cada rali, por lo que hay una gran variedad de opciones, si bien todas tienen en común la repetición de tramos dos veces, aunque en raras ocasiones hay tramos que pueden no repetirse.

Una vez realizadas varias etapas, generalmente después de los tramos matutinos y vespertinos, los vehículos pasan por el *Parque de Servicio*, lugar donde se encuentran los equipos y las asistencias, para realizar las reparaciones necesarias al vehículo o prepararlo para las etapas siguientes. Para ello hay un equipo de mecánicos con un número limitado, máximo ocho en *WRC*, y un límite de tiempo definido por la organización para trabajar en el vehículo. Si los mecánicos superan ese tiempo se penaliza al piloto en el tiempo final de las pruebas.

Para realizar el repostaje de los vehículos, la dirección de carrera dispone entre etapas un puesto de *refueling*, que puede ser una gasolinera o un camión cisterna. Los

ITINERARIO HORARIO PARTICIPANTES CERA Y VELOCIDAD FACV

SECTOR	CH / TC	Descripción	Kms TC's	Kms Enlace	Kms Totales	Tiempo	Km/h	HORA 1º
1ª Sección	1	CH 0 Salida 1ª Sección						7:45
		CH 1 CH Tc 1		35,17	35,17	0:47'	44,9	8:32
	2	Tc 1 Tc 1 Alcoleja / Penáguila	20,88			0:03'		8:35
		CH 2 CH Tc 2		4,97	25,85	0:31'	50,0	9:06
2ª Sección	3	Tc 2 Tc 2 Benasau / Tomás Ortiz (TC PLUS)	14,17			0:03'		9:09
		CH 2A Entrada Reagrupamiento La Nucía		42,48	56,65	1:10'	48,6	10:19
	4	Reagrupamiento La Nucía				0:25'		
	5	CH 2B Salida Reagrupamiento La Nucía						10:44
3ª Sección		CH 2C Entrada Asistencia		0,23	0,23	0:03'	4,6	10:47
	6	Zona Asistencia "A"	(35,05)	(82,85)	(117,90)	0:30'		
	7	CH 2D Salida Asistencia						11:17
		CH 3 CH Tc 3		35,17	35,17	0:47'	44,9	12:04
4ª Sección	8	Tc 3 Tc 3 Alcoleja / Penáguila	20,88			0:03'		12:07
		CH 4 CH Tc 4		4,97	25,85	0:31'	50,0	12:38
		Tc 4 Tc 4 Benasau / Tomás Ortiz	14,17			0:03'		12:41
	9	CP Control Paso Callosa d'en Sarrià						
	CP Control Paso Benidorm							
	CH 4A Entrada Reagrupamiento La Nucía		61,42	75,59	1:37'	46,8	14:18	
10	Reagrupamiento La Nucía				0:40'			
3ª Sección	11	CH 4B Salida Reagrupamiento La Nucía						14:58
		CH 4C Entrada Asistencia		0,23	0,23	0:03'	4,6	15:01
	12	Zona Asistencia "B"	(35,05)	(101,79)	(136,84)	0:30'		
	13	CH 4D Salida Asistencia						15:31
4ª Sección		CH 5 CH Tc 5		16,04	16,04	0:24'	40,1	15:55
	14	Tc 5 Tc 5 Bolulla / Coll de Rates	13,79			0:03'		15:58
		CH 5A Entrada Reagrupamiento Pego		23,77	37,56	0:55'	41,0	16:53
	15	Reagrupamiento Pego				0:35'		
4ª Sección	16	CH 5B Salida Reagrupamiento Pego + Refuelling						17:28
		CH 6 CH Tc 6		5,36	5,36	0:25'	12,9	17:53
		Tc 6 Tc 6 Pego / Petracos	18,67			0:03'		17:56
	17	CP Control Paso Tárbena (colocación opcional parrilla)						
	CH 7 CH Tc 7		19,95	38,62	1:17'	30,1	19:13	
	Tc 7 Tc 7 Tarbena / Coll de Rates	6,85			0:03'		19:16	
	CH 8 CH Tc 8		22,86	29,71	0:41'	43,5	19:57	
	Tc 8 Tc 8 Pego / Petracos	18,67			0:03'		20:00	
	CH 8A Fin Rallye La Nucía		41,24	59,91	1:00'	59,9	21:00	
			(57,98)	(129,22)	(187,20)			
			TC	ENLACES	TOTAL	% TC		
			128,08	313,86	441,94	28,98		

Ilustración 12: Esquema del horario y recorrido del Rally de La Nucía con los tramos cronometrados en rojo

Introducción

equipos no tienen permitido añadir combustible en ningún momento, ni en el parque de asistencia ni en el parque cerrado, y si lo hicieran supondría la expulsión inmediata del rali.

Para determinar el vencedor del rali, se suma el tiempo de todos los tramos cronometrados y el piloto con un menor tiempo es el vencedor. Una vez conocida la clasificación final se otorga una puntuación válida para el campeonato que se dispute (como puede ser WRC o el Campeonato de Europa por ejemplo) en función del puesto obtenido.

En algunos campeonatos, existen etapas que se conocen como *Power Stages*. Por regla general suelen ser los últimos tramos de la prueba con una longitud normalmente menor y en núcleos urbanos, aunque no es requisito imprescindible. En estos tramos, se asignan puntos extras a los cinco pilotos más rápidos, que se añaden directamente a la clasificación del campeonato.

Ralis de regularidad

Analizado ya el funcionamiento de los ralis de velocidad, se expondrán las características de los ralis de regularidad, prueba automovilística que permite participar a vehículos con una preparación considerablemente menor que los de velocidad, o a veces incluso no es necesaria preparación alguna.

Los ralis de regularidad discurren generalmente por las mismas etapas que los ralis convencionales, incluso a veces se realizan a la vez. Mientras que los vehículos se preparan para disputar por segunda vez los tramos correspondientes, los de regularidad realizan el recorrido, disminuyendo el tiempo de espera del público entre una prueba y otra.

Por otra parte, la normativa de los ralis de regularidad es muy similar a los convencionales, ya que tienen tramos de enlace que pueden o no ser cronometrados, dependiendo de la organización de la competición, un parque cerrado para depositar los vehículos y unas condiciones idénticas para el repostaje del combustible.

Introducción

Un aspecto característico de este tipo de eventos es que no se requiere que el tramo este cortado al tránsito, ya que en numerosas ocasiones las velocidades exigidas por la organización se encuentran dentro del máximo permitido para la circulación.

La principal diferencia consiste en la velocidad de realización de los tramos cronometrados, ya que no tienen como objetivo realizarlos a la mayor velocidad posible, sino que han de discurrirlos en un tiempo determinado sin exceder un máximo de velocidad. De esta manera, aquellos que obtienen una diferencia entre el tiempo de la etapa y el establecido por la organización son penalizados en el cómputo global, saliendo vencedor aquel piloto que más se aproxime al dictado por los organizadores. Otra modalidad dentro de estos ralis consiste en realizar una pasada a una velocidad constante, intentando igualar el tiempo establecido por la organización y, después, en la repetición del tramo, el objetivo consiste en intentar copiar el tiempo realizado en el primer recorrido. De esta manera se mide la pericia de piloto y copiloto para manejar la velocidad media del vehículo por encima de la habilidad para ir a altas velocidades.

A diferencia de los ralis de velocidad, en esta modalidad la función del copiloto consiste principalmente en marcar la velocidad al conductor para que no se desvíe del ritmo definido por la organización, ya sea mediante dispositivos electrónicos o contrastando el tiempo al pasar por diferentes hitos kilométricos del tramo.

Introducción



Ilustración 13: Dispositivo Rallymeter empleado en ralis de regularidad

Se pueden apreciar dos categorías en esta modalidad, una conocida como Regularidad Sport y su variante Regularidad 55 km/h. La diferencia entre ambas categorías básicamente consiste en la velocidad exigida para cada una de ellas, siendo en la Sport una velocidad media entre 45 y 65 km/h y en Regularidad una media inferior siempre a 55km/h. Esto se debe a que los vehículos alistados en la modalidad Sport han de estar equipados con diferentes sistemas de seguridad propios de vehículos de competición, mientras que los de la variante de Regularidad 55 km/h han de estar equipados únicamente con un extintor, dos chalecos reflectantes como mínimo y una antigüedad del vehículo no inferior a 25 años.

Históricos

Se trata de una variante cada vez más popular tanto de ralis de regularidad como de velocidad. Las condiciones de participación son idénticas a los anteriores pero con la excepción de que únicamente pueden participar vehículos homologados por la FIA para ralis fabricados antes de los años 90.

Introducción

En este caso los vehículos han de cumplir con la normativa específica de la época de su uso competitivo y además una reglamentación específica actualizada para este tipo de coches. De esta manera se consigue realizar pruebas muy atractivas hacia el público que alargan la vida útil de los vehículos.

Rallysprint

Es una modificación de un rali de velocidad considerablemente más corta. Suele consistir en uno o dos tramos, y se pueden realizar pasadas en ambos sentidos. Esto permite realizar una competición más ágil con un mayor entretenimiento del público.

Subidas de montaña

Se trata de una de las variantes que más interés genera para los equipos privados, puesto que discurre únicamente por un tramo y carece de secciones de enlace por carretera, por lo que no es necesario que los vehículos cumplan la normativa de circulación.

Esta modalidad de pruebas son muy comunes para todo tipo de equipos, ya que se puede participar con un vehículo de un presupuesto bajo o con vehículos provenientes de competiciones en circuitos, debido a que se suelen realizar en pavimentos en muy buen estado.

Al tener una normativa bastante más laxa que los ralis de velocidad, muchas firmas lo utilizan para analizar el comportamiento de sus vehículos antes de otro tipo de competiciones. Por otra parte, no se limitan exclusivamente a coches, sino que también es habitual ver participar tanto camiones como incluso sidecares. La principal característica de estos vehículos es la inserción de grandes alerones, o sistemas equivalentes que aumenten la adherencia del vehículo a altas velocidades.

Introducción



Ilustración 14: Wolkswagen Golf y Audi Quattro en una competición de subidas.

Un aspecto que la diferencia de manera destacada del resto de modalidades es la ausencia del copiloto y, por ello, de las notas del mismo. Esto se debe a que los pilotos realizan numerosas pasadas por el tramo cronometrado, por lo que se lo memorizan como si de un circuito se tratase.

Por norma general, se suelen realizar una serie de tandas de entrenamiento por el recorrido íntegro de la competición, a diferencia de los ralis, dónde los equipos pueden optimizar el comportamiento del vehículo a las condiciones esperadas. Una vez realizados los entrenamientos, se inicia inmediatamente después la clasificación. Para la clasificación se establece un orden de salida en función de la categoría y potencia del vehículo, saliendo primero los menos potentes y con un mayor tiempo en realizar el recorrido y después, de manera progresiva, van saliendo los vehículos más rápidos.

Realizada la clasificación, se invierte el orden de salida de los vehículos, saliendo primero aquellos con un mayor tiempo de la prueba y los últimos aquellos que han obtenido los mejores tiempos. Durante la realización de la prueba, se realizan por norma general tres repeticiones del recorrido, tomando los dos mejores tiempos. Aquel piloto que suma el menor tiempo total es el vencedor de la prueba.

De esta categoría de competiciones hay que destacar la subida *Pikes Peak*, que ha servido como pista de pruebas para la introducción de los vehículos eléctricos a las competiciones, ya que al producirse un enorme cambio de altitud a lo largo del recorrido, los motores de combustión sufrían una reducción muy significativa de potencia, hecho que no sucedía con los vehículos eléctricos.

Introducción



Ilustración 15: Volkswagen I.D. R, vehículo eléctrico que actualmente posee el récord de Pikes Peak

Raid

La diferencia entre este tipo de pruebas y los ralis ya analizados radica básicamente en el tipo de etapa, siendo la competición muy similar en el resto de aspectos a los ralis convencionales.

Al igual que los ralis convencionales, estas competiciones discurren por etapas, con tramos de enlace, intervalos de repostaje y un tiempo limitado para las reparaciones de los vehículos. Por otra parte, los vehículos cuentan con piloto y copiloto, y pueden participar tanto equipos oficiales como privados.

La principal seña de identidad de estos ralis es la longitud de los mismos, similar a la de los ralis de inicio del siglo XX, y que no discurren por un recorrido perfectamente definido, como carreteras o pistas de grava, sino que el objetivo de la prueba es llegar a la meta pasando por unos puntos definidos con una ruta establecida por cada copiloto de la forma más rápida posible campo a través. Esto hace que el tramo cronometrado deje de ser de menos de cincuenta kilómetros por norma general y pase a superar los doscientos, dando más protagonismo a la capacidad de orientación del copiloto. Al discurrir por etapas tan largas se suele realizar una etapa diaria, hecho

Introducción

que propicia que este tipo de ralis duren varias semanas, poniendo a prueba la resistencia de los participantes y sus vehículos.



Ilustración 16: Peugeot procedente del Grupo B disputando el Rallye Dakar.

Antes del inicio de las etapas, los pilotos no conocen el recorrido exacto de las mismas sino que, poco tiempo antes de comenzar, se les entrega un documento conocido como *Roadbook*, donde se les indican todas las instrucciones necesarias para completar la etapa. Es por ello que, tanto piloto como copiloto, tienen un conocimiento mínimo del recorrido y, por ello, es común que se desorienten o circulen por lugares no definidos por la competición.

Hay que destacar que estos ralis no se limitan exclusivamente a coches, sino que su participación incluye a camiones, motos, quads y vehículos ligeros entre otros, lo que lo hace más atractivo al público general y amplía el número de competidores con respecto a otras modalidades.

Objetivo del trabajo

II. Objetivo del trabajo

Una vez explicada la historia de los ralis y las diferentes modalidades que existen, se puede desarrollar la finalidad del trabajo de manera más clara y concisa, facilitando su interpretación.

El objetivo del trabajo consiste en diseñar una jaula antivuelco válida para competiciones de ralis, ya sean de velocidad o de regularidad, para un vehículo Mazda mx-3 fabricado en el año 1993. Para ello hay que centrarse en la normativa específica de cada modalidad aplicable a este vehículo en particular, para comprobar su validez. Por otra parte, se ha de encontrar un diseño eficaz con el menor peso posible cuya fabricación no suponga un coste demasiado alto.

Los ralis de regularidad no requieren obligatoriamente un arco de seguridad, pero aconsejan que se realice uno conforme al *Anexo K* [7] de la FIA, que regula a los vehículos históricos. Por otra parte, para competir en ralis de velocidad se necesita diseñar una jaula que cumpla con los requisitos establecidos en el *Anexo J* [5]. De esta manera, se analizarán los requisitos de cada una de las normativas y se seleccionará la que mejor cumpla con las necesidades del vehículo o, en caso de que sea posible, la más restrictiva, de manera que se pueda aplicar en ambas competiciones.

Por otra parte, se comprobará si el diseño del arco de seguridad se encuentra dentro de los límites establecidos por la normativa de circulación española para poder emplear el vehículo de manera habitual más allá de un uso competitivo. Para ello, se ha de verificar el cumplimiento conforme a la normativa vigente en el momento de primera matriculación del vehículo. En este caso, al ser matriculado en 1993, la normativa aplicable es la directiva 74/60/CEE [10] modificada el 9 de mayo de 1978 [10], que regula el acondicionamiento interior de los vehículos, obtenida a partir del manual de reforma de vehículos en su sexta revisión [9].

Una vez obtenido un diseño base, se plantearán una serie de mejoras para aumentar las prestaciones de la jaula. Estas mejoras pueden consistir bien en modificar la geometría del diseño para reducir los esfuerzos en diferentes puntos críticos o bien cambiar el material de fabricación, consiguiendo una resistencia igual o mayor con una

Objetivo del trabajo

variación del peso total de la estructura. Puede darse el caso de que alguna de las mejoras planteadas no estén adaptadas en la normativa de alguna de las competiciones pero sí que cumpla con la normativa de circulación. Este caso se consideraría favorable, ya que la finalidad principal del vehículo son las competiciones de regularidad en la que no se exige este elemento de seguridad, únicamente se exige que esté apto para circular por la vía pública.

Planteados todos los diseños posibles, hay que comprobar que su fabricación sea viable y con un coste moderado, incluyendo el coste de los materiales y el proceso propio de fabricación. Una vez conocidas las características técnicas de los diferentes diseños y el coste final de cada una de las variantes, se seleccionará aquella que, cumpliendo los requisitos establecidos en la normativa, tenga un menor coste de fabricación.

III. Normativa aplicable

A continuación se realizará un análisis detallado de las diferentes normativas de aplicación de la estructura de seguridad, ya sea para la instalación en un vehículo de uso diario o para la participación en diferentes pruebas cronometradas. Para definir los requisitos mínimos primero se estudiarán los reglamentos que regulan ambos ámbitos de aplicación para conocer de manera precisa los artículos a cumplir. Una vez conocidos, se realizará una comparación de los diferentes elementos que afecten al proyecto, de manera que cumpliendo esos requisitos, la estructura sería válida para ambos usos.

III.1. Normativa aplicable para la competición

Por una parte, se encuentra la normativa de vehículos de regularidad, de la Federación de Automovilismo de la Comunitat Valenciana (FEDACV) [3], aplicable para aquellos automóviles matriculados antes de 1990. Al ser matriculado el vehículo al que está destinada la jaula en el año 1993, no es posible su participación en estos campeonatos en la actualidad, pero en un futuro cercano es muy probable que se permita su participación. Este documento establece que cualquier elemento instalado en estos vehículos que no sea requisito indispensable para su participación ha de estar diseñado e instalado conforme al artículo 251, 252, 255, 258 y 253 del *Anexo J* de la *FIA*. Refiriéndose este último a los requisitos exigibles a las jaulas antivuelco.

Por otra parte, se encuentra la reglamentación aplicable para la participación del vehículo en ralis de velocidad proporcionada por la FEDACV. Este articulado incorpora al vehículo en la categoría de *Grupo 5* [4], ya que no es un vehículo destinado originalmente para la competición, y establece como reglamento aplicable para la homologación del mismo el artículo 253 del *Anexo J* [5], considerándolo como un vehículo del *Grupo A* para el diseño de los diferentes elementos. Las modificaciones

Normativa aplicable

realizadas serán supervisadas por la FEDACV para su uso de manera exclusiva en pruebas de nivel autonómico.

De manera adicional, se encuentran la normativa de vehículos históricos de la FIA, recogida en el *Anexo K* [7], que a diferencia de las anteriores, se aplica a vehículos con un vínculo histórico en la competición, como por ejemplo participantes de los primeros ralis, cuando todavía no había una regulación correctamente definida. Este texto no es de aplicación al vehículo del trabajo, pero al no establecer unos requisitos de resistencia de la jaula antivuelco en el *Anexo J*, se ha considerado aceptable introducir los requisitos aplicables a los vehículos históricos, ya que en lo relativo a geometría e instalación de los arcos, es prácticamente idéntica.

Comenzando con el análisis del artículo 253.8 del *Anexo J*, aplicable para los arcos de seguridad interior y en vigor en el año 2021 [5], se indica que en caso de que el vehículo sea matriculado con anterioridad al año 2017 se aplicará su homónimo en vigor en el año 2016, por lo que de ahora en adelante el reglamento a considerar para el diseño de los arcos de seguridad se basará en la versión del 2016 [6].

III.2. Normativa aplicable para la circulación por la vía pública

Como se desea que el vehículo, además de competir en tramos de rali pueda emplearse de manera habitual, a continuación se seleccionará el articulado aplicable para la correcta homologación de los arcos de seguridad interiores, y se verificará si es posible compaginar la aplicación del reglamento de competición con el de circulación.

Para conocer los requisitos aplicables a estos elementos, es necesario analizar detenidamente el manual de reforma de vehículos publicado por el *Ministerio de Industria, Comercio y Turismo* en su 6ª revisión, en vigor desde mayo de 2020. En este caso se ha de consultar el artículo 8.33 sobre la instalación de un arco de seguridad interior contra vuelco.

Normativa aplicable

El arco de seguridad afecta exclusivamente al acondicionamiento interior del vehículo, que al ser de la categoría M1 nos indica que es viable, pero con la modificación indicada en el acto reglamentario (AR en adelante) segundo aplicable sobre la directiva 74/60/CEE y su correspondiente transposición en el BOE. Este AR indica que se ha de aplicar la normativa en vigor en la fecha de primera matriculación del vehículo.

Para conocer el articulado en vigor en el año 1993 se ha de obtener la fecha de primera aplicación de la directiva y las sucesivas actualizaciones, descartando aquellas posteriores a la fecha indicada. En este caso se trata de la directiva 74/60/CEE modificada el 9 de mayo de 1978 en vigor hasta el 28 de febrero del 2000.

III.3. Tabla comparativa normativas

Una vez conocidos los documentos que regulan el diseño e instalación de la estructura de seguridad, se realizará una comparación entre los requisitos de competición aplicables (art. 253.8 del *Anexo J* de la *FIA*) y el articulado a cumplir por un vehículo de turismo de uso diario (74/60/CEE del 9 de mayo de 1978). La estructura de seguridad ha de reunir todos los elementos citados a continuación para estar conforme con la normativa correspondiente. Destacar que no se introducen todas las disposiciones de ambos documentos, sino que se han seleccionado y extraído aquellas que influyen directamente o puedan influir en el proceso de diseño e instalación de la estructura.

Artículo 253.8 <i>Anexo J</i> <i>FIA</i> 2016	Directiva 74/60/CEE de 1978
Barras verticales cercanas a las paredes del habitáculo	Arco principal, frontal y barras laterales a menos de 10 cm de las superficies acristaladas
Pilares frontales lo más cercano posible al marco de la luna delantera.	Si es golpeado por una esfera de un diámetro 165mm se considera un objeto susceptible de ser golpeado en un accidente
Conexiones entre arco frontal y principal a la altura del techo	Los objetos susceptibles de ser golpeados han de tener aristas redondeadas con un

Normativa aplicable

	radio mínimo de 3.2mm
Miembros diagonales pueden ser desmontables	Las disposiciones anteriores se aplican a los elementos situados por delante de las plazas tanto delanteras como traseras.
Unión elementos adicionales con el arco a una distancia inferior a 100mm de la base o pliegue	Los elementos situados por debajo del salpicadero no deberán ser susceptibles de ser tocados por los ocupantes en caso de accidente
Los refuerzos en la puerta, techo y arco principal son opcionales	Todos los elementos situados por encima y por delante del "Punto H" delantero deberán estar recubiertos por un material susceptible de disipar energía según el Anexo III. No se aplica a los colocados por debajo del salpicadero
Los anclajes de la estructura han de estar entre los soportes de la suspensión	Punto H: Posición de un ocupante en el vehículo definida como el punto de rotación entre la pierna y el torso.
Los anclajes de los pilares principales han de ser de 120cm ² útiles y 3mm de espesor como mínimo atornillados a una base de igual medida soldada al chasis	Material susceptible de disipar energía: al recibir el impacto de una falsa cabeza de diámetro 165mm y un peso de 6.8kg a una velocidad de 24.1 km/h provoca una deceleración de máximo 80g durante 3 milisegundos.
La sujeción de los anclajes de los arcos a la base debe de ser mediante tres tornillos M8 calidad 8.8 ISO Estándar	
La sujeción de los elementos adicionales a las bases han de realizarse mediante dos tornillos M8 idénticos a los anteriores y una superficie de contacto de 60cm ²	
El material ha de ser acero al carbono (con un máximo de 0.3%), no aleado, con una tensión admisible superior a 350 N/mm ²	
Las dimensiones de los tubos que forman los elementos de los arcos frontal y	

Normativa aplicable

principal han de ser de 45x2.5 mm o bien de 50x2 mm	
Los tubos auxiliares pueden ser de 38x2.5 o de 40x2	

Como se puede observar ninguno de los dos textos establece requisito alguno de resistencia ni deformación permisible de la estructura de seguridad. Encontrado esta falla, se ha considerado emplear el anteriormente citado *Anexo K*, aplicable a los vehículos históricos. Esta normativa establece unas condiciones de diseño de la jaula antivuelco muy similares al *Anexo J*, por lo que los esfuerzos se han considerado aceptables para su aplicación en la estructura. Por otra parte, carece de límites en la deformación de la estructura una vez aplicados los esfuerzos, por lo que se ha establecido una deformación máxima de 40 mm en el arco frontal y 20 mm en el principal, garantizando que no se produzca el aplastamiento de piloto y copiloto. Más adelante, cuando se realice la simulación de la estructura, se desarrollará detalladamente este aspecto.

Conocidos los requisitos establecidos por ambas normativas, se puede comenzar a realizar el diseño de la pieza. Hay que tener en consideración que, al colocar la estructura completa, es necesario eliminar las plazas traseras del vehículo, ya que de no ser eliminadas no se cumplirían los requisitos necesarios para la circulación por la vía pública. Además, a causa de los puntos de anclaje traseros de la estructura de seguridad, sería prácticamente imposible el acceso y asiento a las plazas traseras, ya que el arco principal bloquearía el acceso y las barras adicionales traseras se colocarían en la zona de los respaldos traseros.

IV. Diseño de la estructura

Conocidos los requisitos establecidos por ambas normativas, se puede comenzar a realizar el diseño de la pieza. Hay que tener en consideración que, al colocar la estructura completa, es necesario eliminar las plazas traseras del vehículo, ya que de no ser eliminadas no se cumplirían los requisitos necesarios para la circulación por la vía pública. Además, a causa de los puntos de anclaje traseros de la estructura de seguridad, sería prácticamente imposible el acceso y asiento a las plazas traseras, ya que el arco principal bloquearía el paso y las barras adicionales traseras se colocarían en la zona de los respaldos traseros.

Antes de comenzar con el diseño de la estructura, es necesario realizar una correcta medición del habitáculo del vehículo para conocer tanto los puntos de anclaje como las medidas internas del mismo, para garantizar que una vez diseñada la estructura se pueda instalar con los mínimos perances posibles.

IV.1. Medición del habitáculo.

Primero se deben definir los puntos de anclaje de la estructura de seguridad para posteriormente establecer las correspondientes relaciones de posición entre éstos y usarlos como referencia para la toma de medidas.

Para ello, se ha seleccionado como puntos de anclaje del arco frontal la parte inferior del salpicadero colocada inmediatamente detrás del reposapiés izquierdo del conductor, junto a la pedalera. A continuación se ha optado por colocar los soportes del arco principal tras el asiento de conductor y copiloto en el extremo exterior, lo más cercano posible a la pared interior del habitáculo a los pies de los asientos traseros. Por último se anclarán las barras traseras en la parte superior del soporte de suspensión trasero. Cabe recalcar que la posición del asiento es lo más retrasado posible con una ligera inclinación del respaldo hacia atrás, según lo estipulado en la Directiva 74/60/CEE.

Diseño de la estructura

Una vez conocidos los anclajes en la base del habitáculo, se procederá a medir la altura del techo del mismo, y la anchura con respecto a la base, por si los elementos verticales del arco principal y trasero tuvieran que estar ligeramente inclinados para adaptarse a la forma de la pared. Además se medirá las dimensiones de la puerta, ya que el arco principal ha de ir por la unión entre la puerta y el techo lo más pegado posible al marco superior. Por último se medirá la distancia de una de las esquinas superiores del arco principal a los anclajes de la suspensión trasera, para conocer de esta manera la longitud necesaria de las barras.

Conocidas ya estas medidas se comenzará con el diseño en el programa de cálculo por elementos finitos Solidworks.

IV.2. Diseño inicial de la estructura.

Si se observan los requisitos exigibles para este tipo de estructuras en la competición, se puede apreciar que establece una configuración mínima del número de elementos que forman la jaula sin los cuales no cumple la normativa, pese a que reúna el resto de exigencias. Por ello, para realizar el diseño inicial de la pieza se ha optado por diseñar la configuración mínima exigible, ya que si es capaz de soportar las cargas deseadas sería la opción más ligera posible y más adecuada. Por lo que se realizará el diseño 253.20 del *Anexo J*.

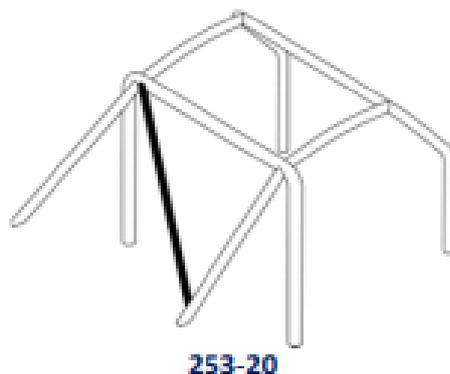


Ilustración 17: Diseño mínimo de una estructura de seguridad.

Inicialmente, se realizará un diseño en diferentes croquis creados en planos que conformen las diferentes partes del sistema. Una vez creados todos los croquis planos,

Diseño de la estructura

se realizará un croquis 3-D usando como plantilla los anteriores para poder construir a partir de este último la estructura mediante la operación “miembro estructural” de la pestaña “piezas soldadas”. De esta manera, si se desea implementar alguna modificación en la estructura para la adición o supresión de miembros, únicamente con modificar el croquis 3-D se cumple, sin tener que eliminar cotas o vínculos que puedan afectar a otra parte del sistema.

Se comenzará con el diseño del croquis a partir del plano “planta” proporcionado por el programa, creando en éste la estructura del techo.

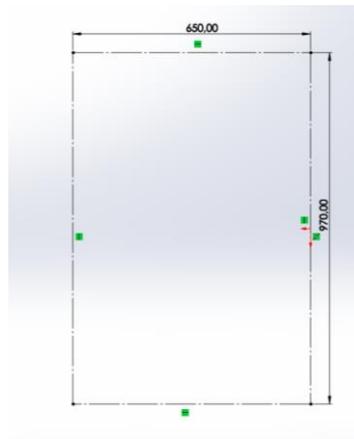


Ilustración 18: Medidas de los elementos del techo.

A continuación se ha de crear un plano paralelo que integrará los anclajes de la base de la estructura con la distancia al plano del techo medida en el habitáculo. En este plano se marcarán los puntos que representarán las bases de unión de los arcos frontal y central con el habitáculo.

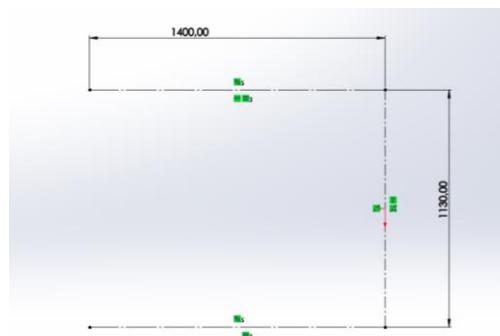


Ilustración 19: Medidas de la base de los arcos principales.

Diseño de la estructura

Como se puede apreciar en la Ilustración 4, la anchura del techo y de las bases es diferente, por lo que los planos que integran los elementos de los arcos principales han de estar inclinados. Para ello se crea un plano de referencia que incluye los puntos de anclaje de las bases de un lateral de la jaula con los elementos que conforman el techo. En este plano se procederá a su vez con el diseño de los elementos verticales del arco frontal y del principal, considerando las medidas tomadas en el vehículo. Esta operación se ha de realizar dos veces, una por cada lado.

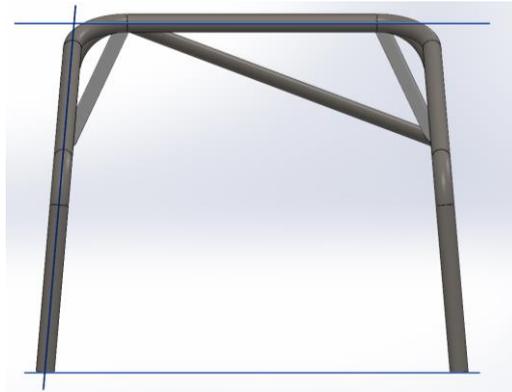


Ilustración 20: Vista frontal de la estructura.

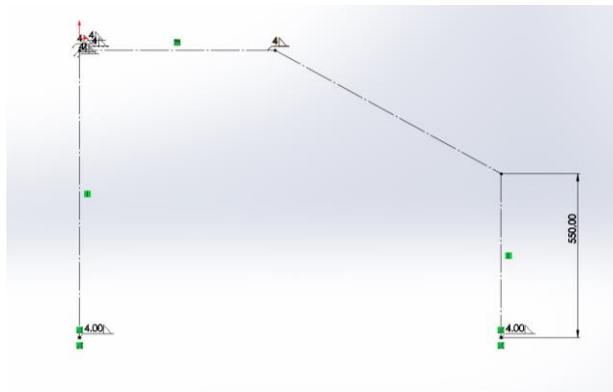


Ilustración 21: Medidas de los elementos verticales del vehículo.

Por último se realizará un croquis con los anclajes en la suspensión trasera. Para la ubicación de estos elementos se ha medido la diferencia de altura con respecto al techo (Ilustración 22). Por ello se creará un plano paralelo al plano “planta” con la diferencia de altura medida anteriormente. Por otra parte, la distancia al arco principal se realiza mediante la conversión del elemento superior de dicho arco en el plano de los anclajes traseros.

Diseño de la estructura

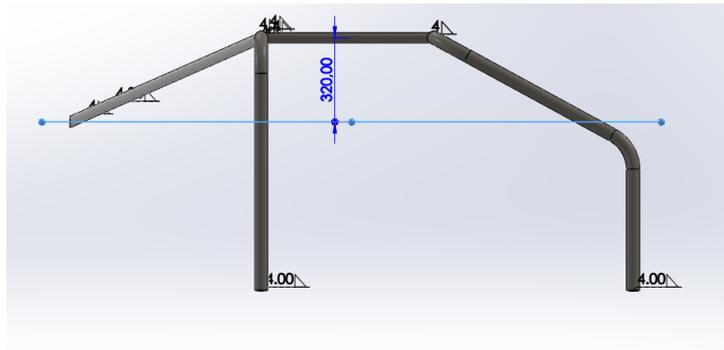


Ilustración 22: Vista lateral de la estructura.

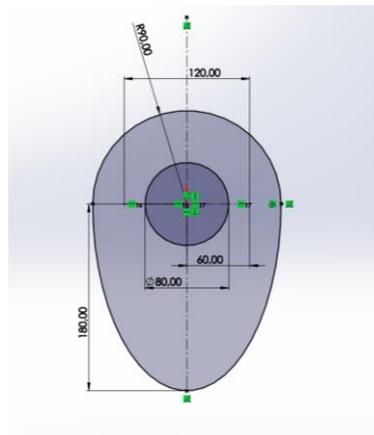


Ilustración 23: Dimensiones de los anclajes traseros.

Una vez establecidos todos los planos y sus respectivos croquis en geometría constructiva, se realizará un croquis 3-D cuyo recorrido consistirá en la unión de los diferentes puntos ya establecidos creando los elementos que se desea que estén en la estructura. Se puede observar que en el croquis se ha realizado una operación de redondeo en las esquinas de los arcos principales. Esto se debe a que estos elementos no pueden tener soldaduras en ningún punto de su recorrido, por lo que se han de realizar dobladuras. Estos pliegues tienen un radio en la pieza de diseño de 150 mm, cumpliendo el requisito de la norma que exige que sea como mínimo el triple del diámetro del tubo.

Diseño de la estructura

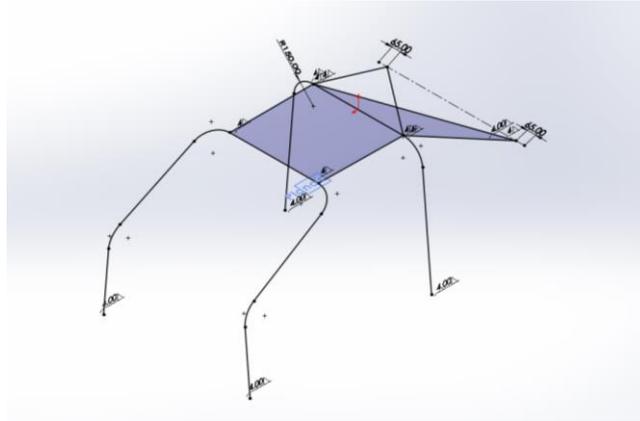


Ilustración 24: Diseño final del croquis 3-D.

Obtenido el croquis 3-D se realizará la operación “miembro estructural”. Primero se realizará con el diámetro seleccionado para los arcos principales y a continuación se repetirá con los elementos adicionales. Para ello se ha creado un perfil circular personalizado de tamaño 50x2 mm y se ha seleccionado el recorrido de cada uno de los arcos. Después, con el perfil 40x2 mm, también personalizado, se marcarán todos los elementos adicionales. Finalmente se aplicarán varias operaciones de recorte para eliminar el sobrante de las barras creadas anteriormente. Destacar que para limitar la extensión de las barras traseras se ha creado un plano vertical que incorpora el centro de los anclajes de la estructura.

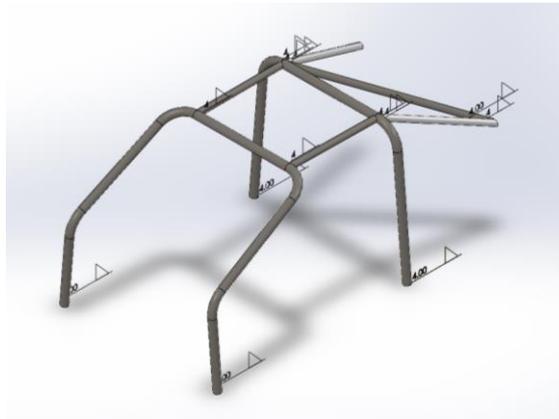


Ilustración 25: Estructura final.

Por último se ha de seleccionar los cordones de soldadura a realizar, estando cada uno de ellos ubicado en las uniones entre los elementos adicionales y ambos arcos principales.

Diseño de la estructura

Cabe indicar que en la simulación de la estructura no se ha considerado implementar los anclajes de la misma al habitáculo, ya que al ser placas rígidas de acero atornilladas a un refuerzo del chasis del mismo material los esfuerzos a soportar en comparación con la resistencia de estos elementos son mucho menores que en las barras que integran la estructura.

IV.3. Selección del material deseado.

El material a emplear debe reunir unas condiciones especificadas en el Anexo J para su aplicación en la competición. Por otra parte, en la directiva europea se indica que ha de estar recubierto por un protector que absorba los impactos en caso de accidente, sin establecer ningún material específico para la construcción de la estructura. Por ello, únicamente será necesario basarse en la normativa FIA para la elección del mismo.

Esta normativa especifica que el material debe ser un acero no aleado con un porcentaje máximo de 0,3% de carbono estirado en frío. Además, si se continúa con una lectura detallada se observa que debe tener como valores máximos un 1,7% de manganeso y un 0,6% del resto de aditivos.

Diseño de la estructura

Only tubes with a circular section are authorised.
Specifications of the tubes used :

Material	Minimum tensile strength	Minimum dimensions (mm)	Use
Cold drawn seamless unalloyed carbon steel (see below) containing a maximum of 0.3 % of carbon	350 N/mm ²	45 x 2.5 (1.75"x0.095") or 50 x 2.0 (2.0"x0.083")	Main rollbar (Drawings 253-1 and 253-3) or Lateral rollbars and Rear transverse member (Drawing 253-2)
		38 x 2.5 (1.5"x0.095") or 40 x 2.0 (1.6"x0.083")	Lateral half-rollbars and other parts of the safety cage (unless otherwise indicated in the articles above)

Ilustración 26: Requisitos de los elementos de la estructura según Anexo J [6].

Por otra parte se necesita que sea un material cuya deformación en frío sea sencilla, ya que se han de realizar dobladuras en los arcos principales sin dañar el material ni modificar considerablemente sus propiedades. Además ha de ser fácilmente soldable, ya que en la unión entre todos los elementos de la estructura se realizará mediante este método. Por último interesa que sea un material comercial, ya que reduciría el presupuesto de la estructura y facilita la comparación entre diferentes marcas suministradoras.

Para la selección del material se ha consultado primero la base de datos de materiales del programa SolidWorks, sin obtener un material que reúna los requisitos exigidos. A continuación, se realizó un análisis en la base de datos de CES Edupack, obteniendo un listado de materiales cuyas propiedades de soldadura y deformación en frío eran buenas, cumpliendo con los requisitos de porcentaje de aditivos y carbono, pero con un límite elástico bajo (consultar Anexo III). Al no obtener un material mediante estos programas, se decidió realizar un análisis de diferentes estructuras en el mercado para observar los materiales empleados y la disponibilidad de los mismos. Mediante este método se obtuvieron dos materiales, el acero Fe-45 (marcas Sparco y OMP) y E355 (marca AST).

Diseño de la estructura

Ante estas dos opciones de materiales, se ha consultado las propiedades mecánicas de cada uno de ellos, siendo por regla general superior las del material E355 en comparación con Fe-45.

Viendo las necesidades a cubrir y los requisitos exigidos, se ha optado por seleccionar un acero E355. Puesto que este material no se encuentra en la base de datos del SolidWorks, se ha consultado un segundo programa (CES Edupack) para tratar de encontrar dicho material. Como esta búsqueda ha sido infructuosa se han obtenido las propiedades de este material y se han introducido de manera manual en SolidWorks para realizar el análisis de la pieza.

Chemical composition % of steel E355 (1.0580): EN 10296-1-2003				
P max =0.025%; S max =0.025%; Al min =0.02% (EN 10305-1:2010)				
C	Si	Mn	P	S
max 0.22	max 0.55	max 1.6	max 0.045	max 0.045

Ilustración 27: Composición química del acero E355 [12].

Rm - Tensile strength (MPa) (+U)	540			
Rm - Tensile strength (MPa) (+A)	450-490			
Rm - Tensile strength (MPa) (+N)	490-630			
Nominal thickness (mm):	to 16	16 - 40	40 - 65	65 - 100
Rm - Tensile strength (MPa) (+AR)	490	490	490	470
Rm - Tensile strength (MPa) (+C)	640			
Rm - Tensile strength (MPa) (+LC)	580-590			
Rm - Tensile strength (MPa) (+SR)	580-590			

Ilustración 28: Propiedades del material E355 [12].

IV.4. Introducción de las cargas.

Para la selección de las cargas, al no estar indicadas en el Anexo J ni en la directiva 74/60/CEE, es necesario dirigirse a la normativa de vehículos históricos, según se ha indicado anteriormente.

En el Apéndice V del Anexo K [8] de vehículos históricos se indica que la estructura ha de soportar una carga lateral de $1,5 W$, una carga vertical de $7,5 W$ y una longitudinal en dos direcciones de $5,5 W$. Siendo la incógnita W el peso propio del vehículo indicado en la ficha técnica añadiéndole 75Kg .

8.1.1. Free Structural Conception Roll Over Protection Structure

The ROPS of entirely free structural conception must be capable to withstand the stress minima of three simultaneous loads as indicated below:

- $1.5 w$ lateral
- $5.5 w$ fore and aft
- $7.5 w$ vertical

- With w corresponding to the weight of the car $+75\text{kg}$

Ilustración 29: Esfuerzos indicados por Apéndice V.

Como no se especifica ningún dato más, se ha optado por aplicar la fuerza vertical en la estructura que conforma el techo de la jaula, ya que en caso de vuelco o aplastamiento se aplicaría en esa zona. Por otra parte, la carga lateral se aplicará en los elementos verticales de un lado de ambos arcos, tanto frontal como principal, simulando un impacto lateral en el vehículo. Por último, para la aplicación de las fuerzas longitudinales se ha simulado la frontal en toda la superficie del arco delantero hacia el trasero y la trasera en el arco principal hacia el delantero, para tratar de emular en la medida de lo posible un impacto real. En concordancia con lo anterior se obtiene:

$$P = 1125 [Kg] \Rightarrow W = 1200 [Kg] = 11772 [N]$$

$$C_{Lat} = 1,5 * W = 17658 [N]$$

$$C_{Vert} = 7,5 * W = 88290 [N]$$

$$C_{Long} = 5,5 * W = 64746 [N]$$

Diseño de la estructura

Los esfuerzos se introducirán como una carga distribuida en diferentes elementos, por lo que habrá que dividir la fuerza a colocar entre el número de entidades a las que se aplica, quedando de la siguiente manera para su introducción en el programa (se observa que la carga longitudinal adquiere dos valores distintos debido a que los elementos del arco principal son menos que los del arco delantero):

$$F_{Lat} = C_{lat}/4 = 4414.5 [N]$$

$$F_{Vert} = C_{Vert}/4 = 22072.5[N]$$

$$F_{Long} = C_{Long}/5 = 12949.2[N]$$

$$F_{Long'} = C_{Long}/8 = 7194.5[N]$$

IV.5. Simulación

Para el cálculo de la estructura se ha de realizar un análisis estático. Para ello se seleccionarán como puntos de apoyo fijos los anclajes de la estructura con la base del habitáculo y la parte superior de la suspensión trasera. A continuación se introducen las cargas con las magnitudes que se han indicado anteriormente, teniendo en cuenta que es el valor que se aplicará a cada elemento. Finalmente se creará la malla, cuyo tamaño será relativamente fino, para no ralentizar excesivamente la simulación. En caso de que se encuentre algún punto donde sea interesante disminuir el tamaño de malla, se colocará un elemento de control de malla para realizar una simulación más precisa en zonas concretas.

Para validar la estructura se ha considerado realizar tres simulaciones que presenten distintas combinaciones de los esfuerzos a soportar, siendo apta si las supera todas. La primera simulación consiste en la introducción de la carga vertical, la carga lateral en la zona derecha del vehículo y la carga longitudinal en la zona trasera. La segunda simulación mantiene la carga vertical, pero se aplica la carga lateral en la parte izquierda y la carga longitudinal frontal. Por último se realizará una simulación con la carga lateral en ambos lados, la carga vertical no varía y se aplica la longitudinal tanto

Diseño de la estructura

en la zona frontal como trasera. Si supera todas estas simulaciones la estructura es válida.

Para considerar válida una simulación la estructura no debe tener tensiones superiores al límite elástico del material en cuestión, y la deformación provocada en los elementos que puedan estar en contacto con los ocupantes no debe provocar ninguna situación de riesgo añadida, como puede ser el atrapamiento de los mismos o una deformación excesiva que imposibilite la apertura de las puertas.

Para comprobar las tensiones a las que se somete la estructura se debe obtener la tensión de Von Mises, ya que el programa no la computa automáticamente en este tipo de simulaciones. Su cálculo es necesario, puesto que se produce una combinación de las tensiones normales (axial y flexión) con las torsionales en la cara externa de la sección circular. Como se debe calcular manualmente se ha optado por obtenerla en los puntos más críticos de la estructura para, una vez verificada en esas zonas exclusivamente, extrapolar los resultados al resto del sistema.

El cálculo de la tensión de Von Mises se realizará en las zonas que se consideren que pueden ser fruto de máximas tensiones, ya que al ser un cálculo manual, no es productivo realizar un número excesivo de operaciones. Para ello, se ha nombrado como "Punto A" a la zona de la estructura con una mayor tensión axial y de flexión, y "Punto B" a la zona con mayor tensión torsional.

IV.6. Resultados

Como se puede apreciar en esta primera simulación, las tensiones creadas en los diferentes elementos que conforman la estructura se encuentran muy por encima del límite elástico del material en numerosos puntos, por lo que no cumple con los requisitos establecidos.

Diseño de la estructura

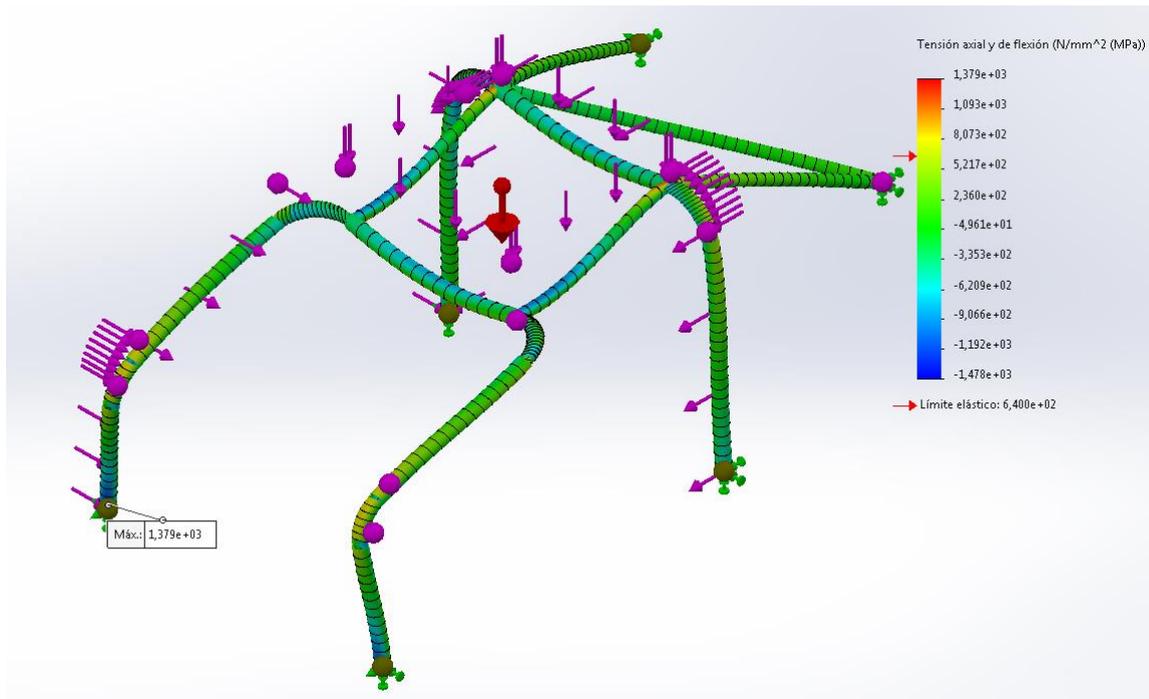


Ilustración 30: Resultados primera simulación de la estructura.

De manera que con la geometría mínima exigida por el Anexo J de la FIA, la estructura no es viable para su uso. Por ello se ha de volver a la etapa de diseño y añadir diferentes elementos que aumenten la resistencia pese a que ello implique un aumento del peso.

IV.7. Primer diseño modificado.

En este caso, como anteriormente ya se han desarrollado todos los aspectos relacionados con las medidas, materiales y simulación, y puesto que esas condiciones se mantendrán, no se volverá a incidir en ellas a no ser que se realice alguna modificación que les afecte. Únicamente se indicaran los elementos a añadir o eliminar a la estructura para que cumpla con los requisitos.

En este modelo se realizará la idea opuesta al anterior, en lugar de partir de la configuración mínima, se introducirán todos los elementos posibles que permita el Anexo J, con el objetivo de comprobar si la estructura cumple con el material seleccionado o sería necesario elegir otro material de mejores propiedades.

Diseño de la estructura

Se ha optado por colocar unos elementos diagonales en ambos sentidos tanto en la estructura del techo (Ilustración 31) como en el arco principal (Ilustración 32). Estos elementos están destinados a disminuir las tensiones en los elementos de unión entre ambos arcos y los elementos verticales del arco principal respectivamente.

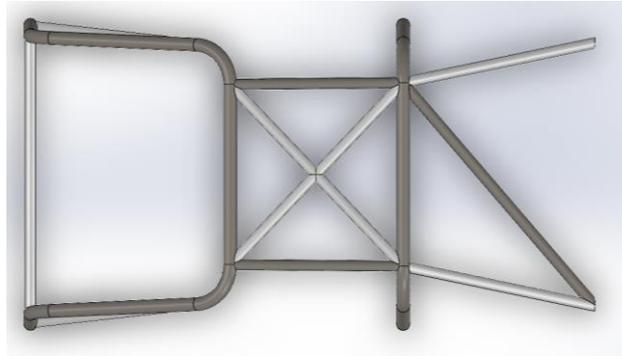


Ilustración 31: Vista superior de la estructura.

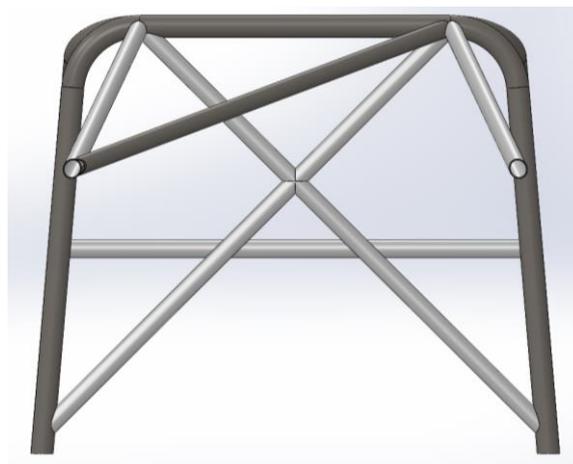


Ilustración 32: Vista posterior de la estructura.

Como se puede observar en las ilustraciones anteriores, únicamente se ha colocado un elemento diagonal en los anclajes traseros. Esto se debe a que no se han observado tensiones suficientemente altas que aconsejen introducir una segunda barra, junto con el objetivo de obtener el mínimo peso posible. Por otra parte se han añadido refuerzos en el arco principal, uniendo la parte baja de ambos anclajes por debajo del salpicadero para aumentar su rigidez (segmento horizontal de la Ilustración 32) y añadiendo un elemento de refuerzo a lo largo del plano que conforma la pared de dicho habitáculo y el arco, para reducir el esfuerzo que soporta la doblez que se ha de realizar a esta barra (Ilustración 33).

Diseño de la estructura



Ilustración 33: Vista lateral de la estructura.

Definida la geometría de la estructura, se realizará la primera simulación. Superada adecuadamente se realizarían las restantes. Si el resultado fuera negativo habría que consultar la normativa para observar qué tipo de refuerzos se pueden añadir para contrarrestar los defectos.

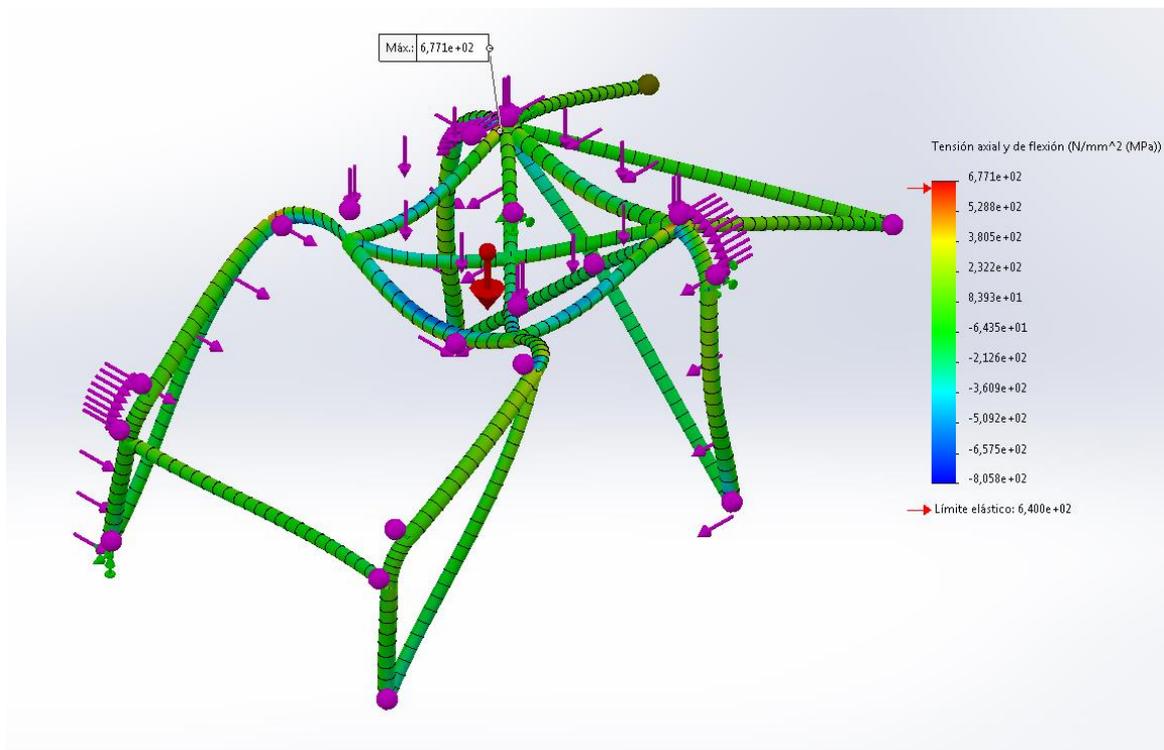


Ilustración 34: Resultados de la primera simulación.

Como se puede observar en la imagen superior, al añadir más elementos, los esfuerzos axiales y flectores que provocan las cargas en la estructura se han reducido drásticamente, pero aún se encuentran ligeramente por encima del límite elástico del material en las uniones de los elementos del techo con los arcos principales, por lo que

Diseño de la estructura

es necesario volver a la etapa de diseño de la pieza para añadir más refuerzos hasta que se reduzcan las tensiones.

IV.8. Segundo diseño modificado.

Partiendo del diseño anterior, y observando que las tensiones más altas se ubicaban en la parte superior de los arcos principales y en la estructura del techo, se ha optado por colocar unos refuerzos en la unión entre el arco principal para disminuir tanto la flexión del techo como las cargas que se producen en la unión con este arco. Este elemento ha de cumplir con las medidas exigidas en el art. 253.8.3.2.5 del Anexo J.

- Dimension A must be a minimum of 300 mm
- Dimension B must be a maximum of 250 mm
- Dimension C must be a maximum of 300 mm
- Dimension E must not be more than half the height of the door aperture (H).

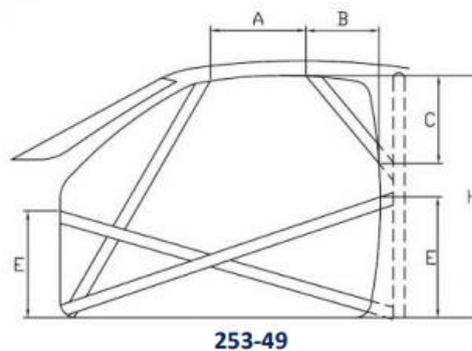


Ilustración 35: Requisitos exigidos en el Anexo J.

Para cumplir con la disposición anterior se ha introducido un nuevo elemento en el Croquis 3-D del SolidWorks con las siguientes medidas: Situado a 150 mm del arco principal en el techo y a 250 mm de la parte superior en el elemento vertical del arco principal.

Diseño de la estructura

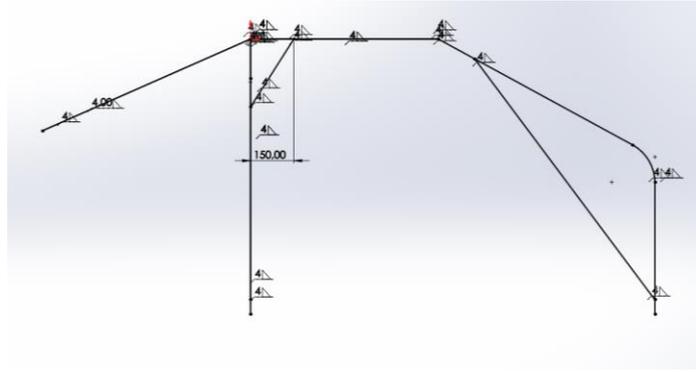


Ilustración 36: Vista lateral de la estructura con medidas del refuerzo.

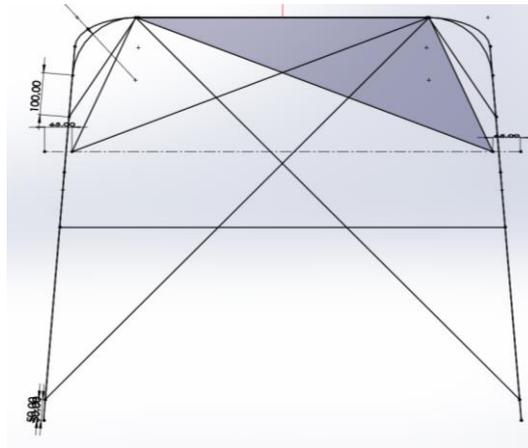


Ilustración 37: Vista frontal de la estructura.

Una vez diseñado se realizará la primera simulación:

Diseño de la estructura

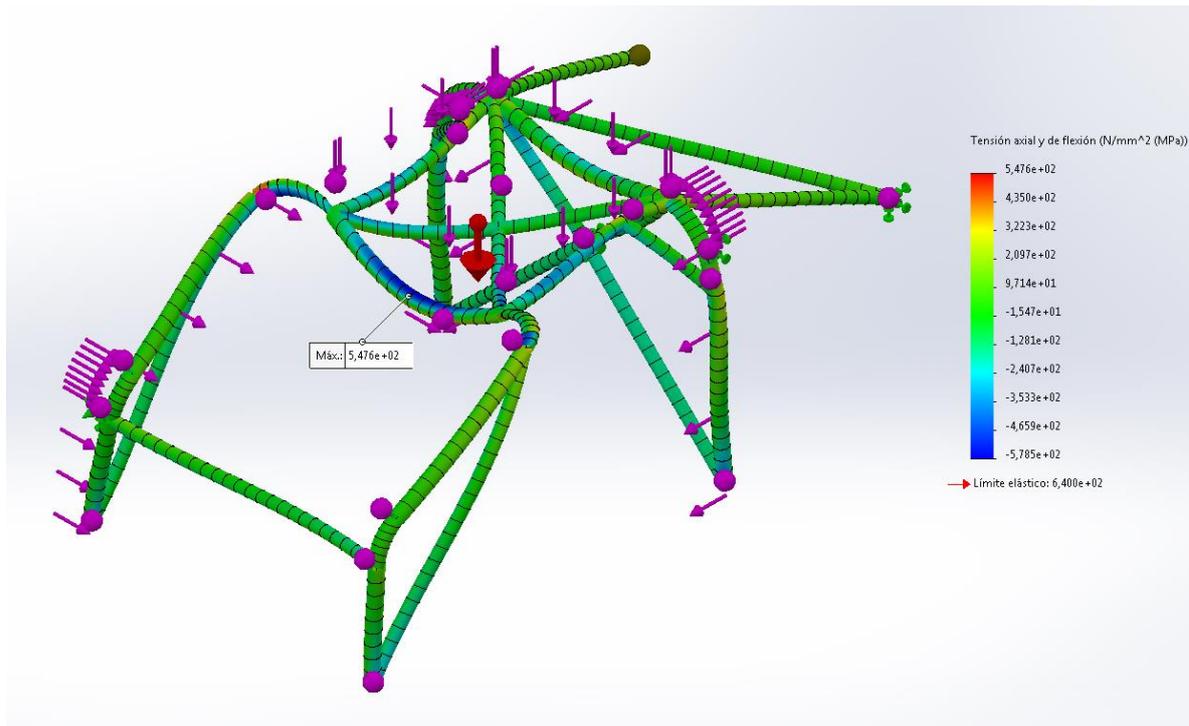


Ilustración 38: Resultados de la primera simulación.

Como se puede apreciar, las tensiones máximas creadas se han reducido muy significativamente, hasta encontrarse por debajo del límite elástico del material. El siguiente paso consiste en realizar la segunda simulación, donde se aplicará la carga lateral en la otra parte de la estructura. La longitudinal, en lugar de aplicarse en el arco principal, se aplicará en el delantero con diferente sentido.

No se ha optado por realizar la comprobación de la tensión de Von Mises hasta verificar que las tensiones axiales y de flexión en las tres simulaciones son menores que el límite elástico.

Diseño de la estructura

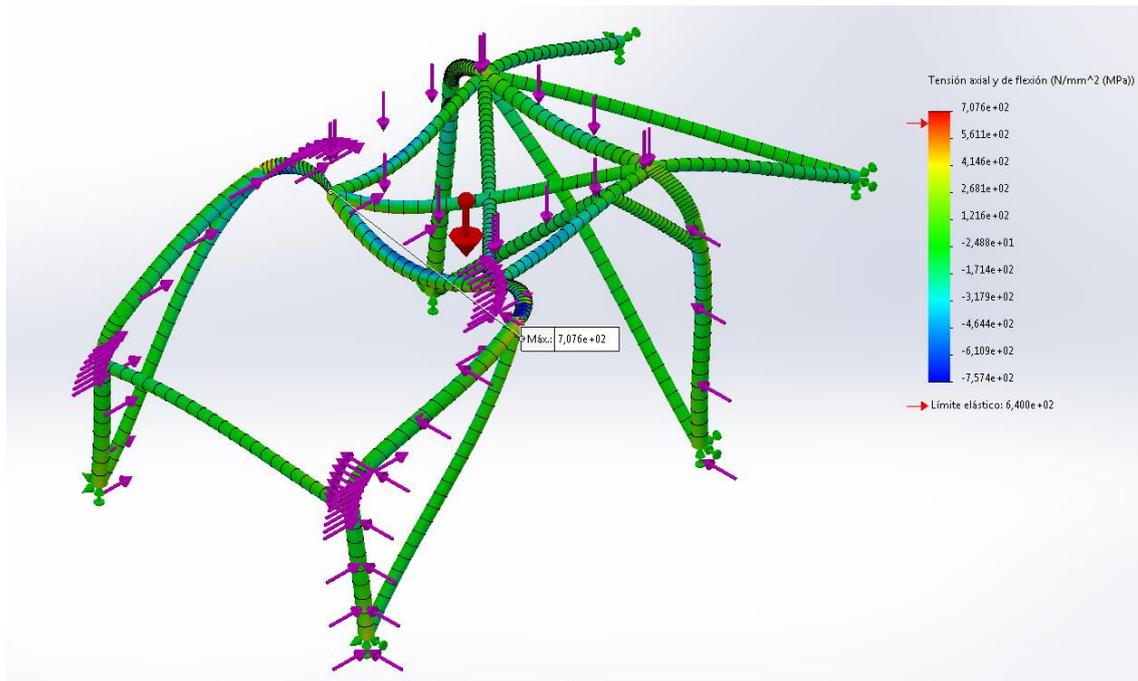


Ilustración 39: Tensión axial y de flexión máximas de la segunda simulación.

En los resultados de la simulación se observa que se produce un incremento de tensión muy significativo en el pliegue del arco principal antes de la unión con el techo a causa de la fuerza horizontal aplicada en el arco frontal combinada con la fuerza lateral. Con estos datos, la pieza no supera la simulación, por lo que no tiene sentido continuar con el tercer cálculo.

IV.9. Tercer diseño modificado

A diferencia de los casos anteriores, se parte de un diseño que ya ha superado uno de las situaciones planteadas, por lo que las modificaciones a realizar no convienen que modifiquen en gran medida los resultados obtenidos. Por otra parte, observando la segunda simulación, donde la estructura ha fallado, se aprecia que es necesario instalar algún tipo de refuerzo en la parte superior del arco principal. Es por ello que hay que volver a consultar la normativa para analizar las diferentes posibilidades y seleccionar la mejor.

En este caso particular se ha optado por colocar una cartela cumpliendo con el artículo 8.2.14 del Anexo J. Las dimensiones de la misma serán de 175x175 mm cada uno de los lados y un espesor de 5 mm. La normativa establece como requisitos

Diseño de la estructura

mínimos que la longitud del lateral sea entre 2 y 4 veces el diámetro del tubo de mayor dimensión, y el espesor como mínimo 1 mm. Además indica que se pueden realizar perforaciones con un diámetro como máximo igual al del tubo mayor, dato que será muy importante de cara a la optimización del diseño.

No se ha considerado realizar más modificaciones puesto que únicamente se observaba deficiencias en las zonas ya reforzadas. En caso de que no superara alguna simulación sería necesario repetir la fase de rediseño. El diseño con estas modificaciones quedaría de la siguiente manera:

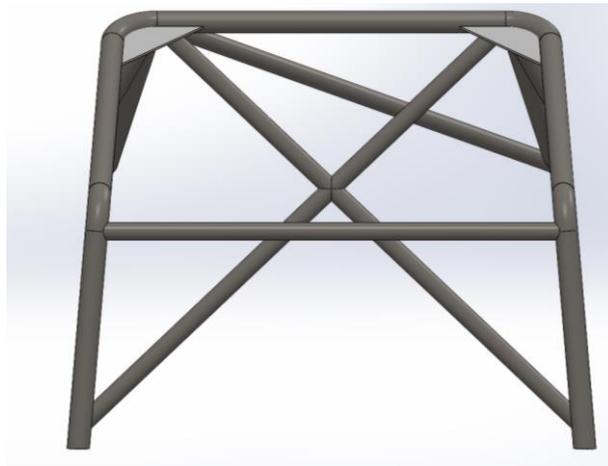


Ilustración 40: Vista frontal de la estructura con las cartelas.

Con los refuerzos ubicados en esta posición se pretende únicamente distribuir entre las barras y las cartelas los esfuerzos provocados por las cargas, disminuyendo las tensiones originadas que propiciaban el fallo en la anterior simulación. Al realizar el primer cálculo se obtienen los siguientes resultados:

Diseño de la estructura

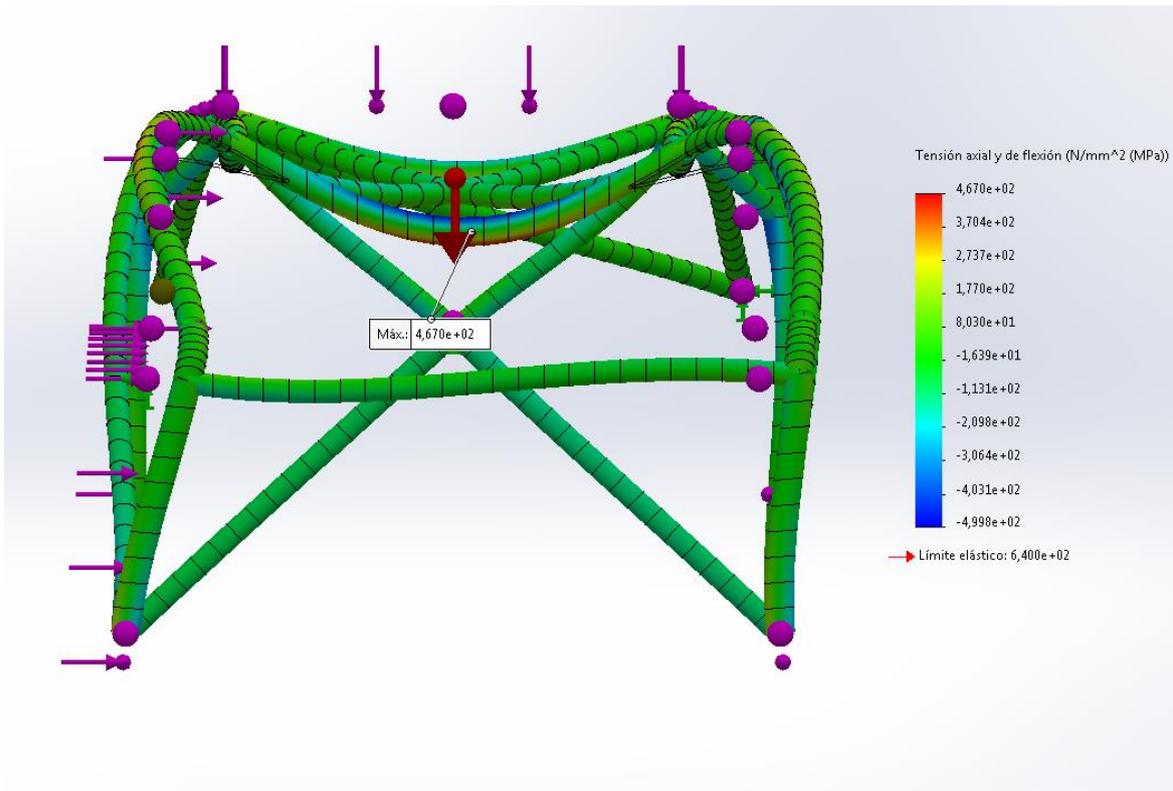


Ilustración 41: Vista frontal de las tensiones axiales y de flexión provocadas en la primera simulación.

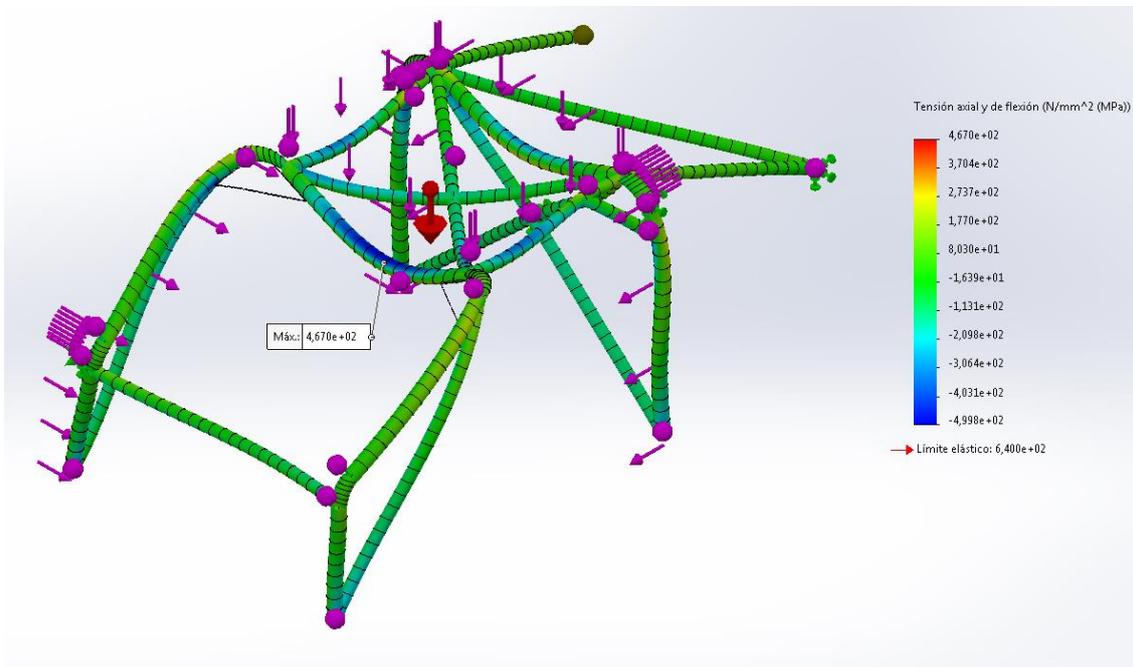


Ilustración 42: Resultados de la primera simulación.

Se puede apreciar en los resultados de la primera simulación que la estructura la supera exitosamente, con una tensión máxima muy inferior al límite elástico del

Diseño de la estructura

material. A continuación se realizará el segundo análisis prestando especial atención a la zona en la que se han colocado estos refuerzos, así como a posibles nuevas zonas con altas tensiones originadas por las cartelas.

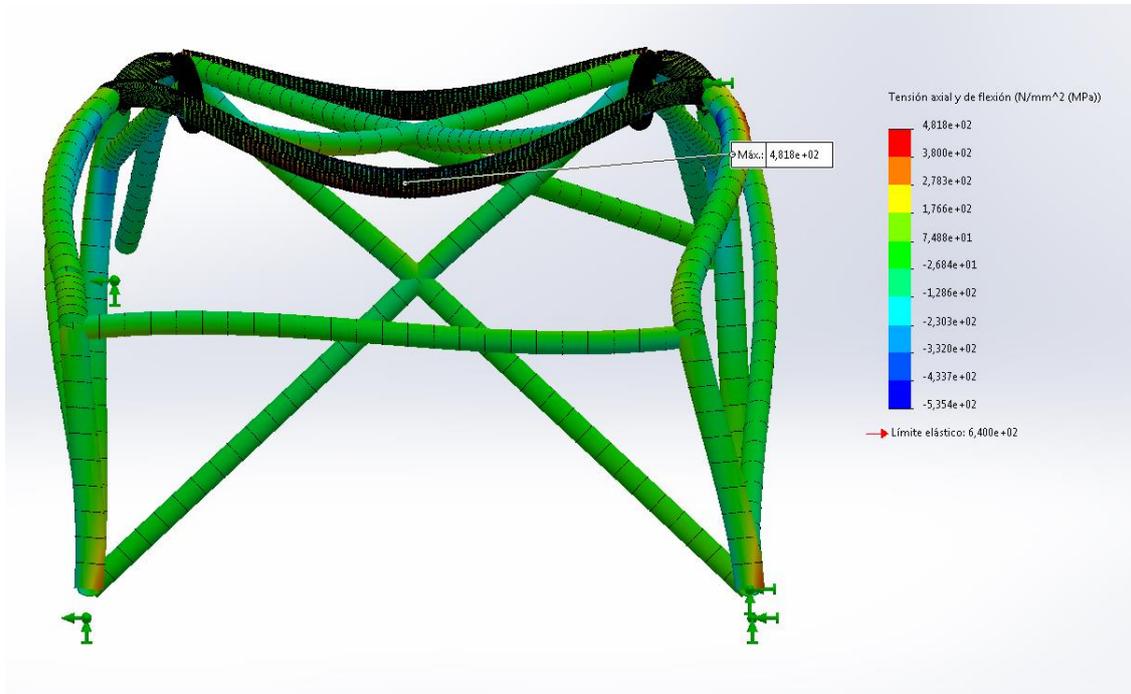


Ilustración 43: Vista frontal de los resultados de la segunda simulación.

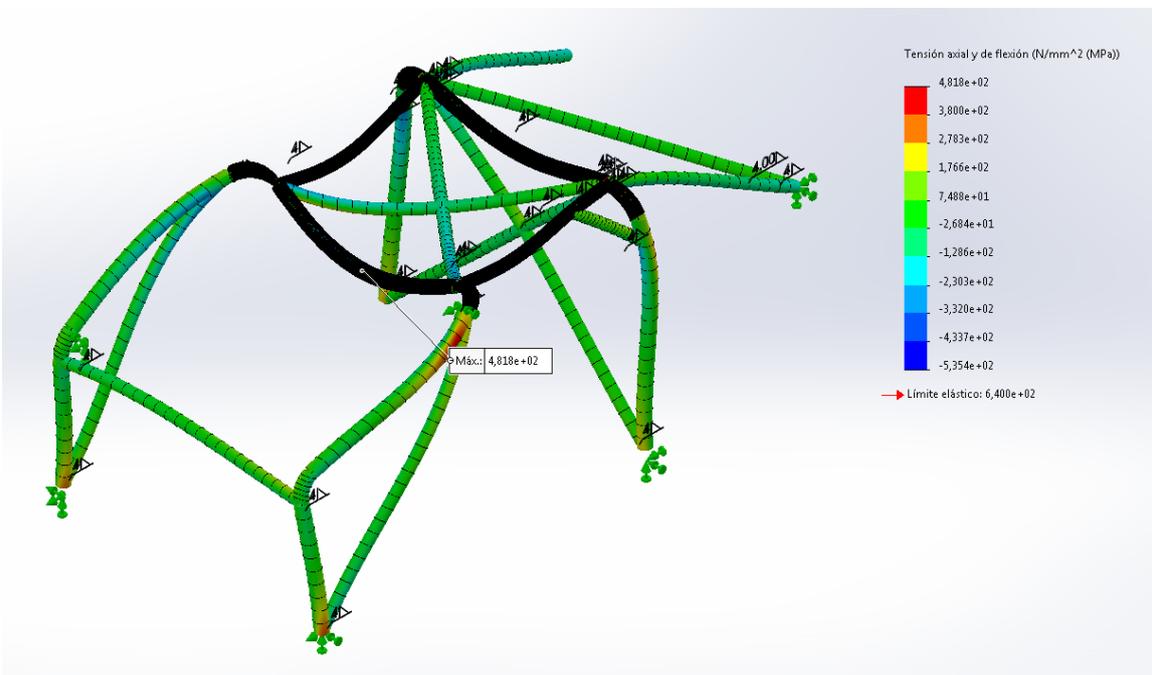


Ilustración 44: Resultados obtenidos en la segunda simulación.

Diseño de la estructura

Con los resultados obtenidos en la segunda simulación, se confirma una reducción drástica de las tensiones provocadas en la zona reforzada. De esta manera, la estructura ya cumple con los requisitos necesarios para superar este segundo cálculo.

Finalmente se realizará un tercer y último estudio variando las cargas aplicadas. En este caso se mantienen todas las cargas de la simulación anterior y además se le añade una carga longitudinal en el arco principal en el sentido contrario a la marcha del vehículo y la carga lateral en el lado derecho del mismo, de manera idéntica a la introducida en la primera simulación. Al ejecutar el estudio se obtienen los siguientes resultados:

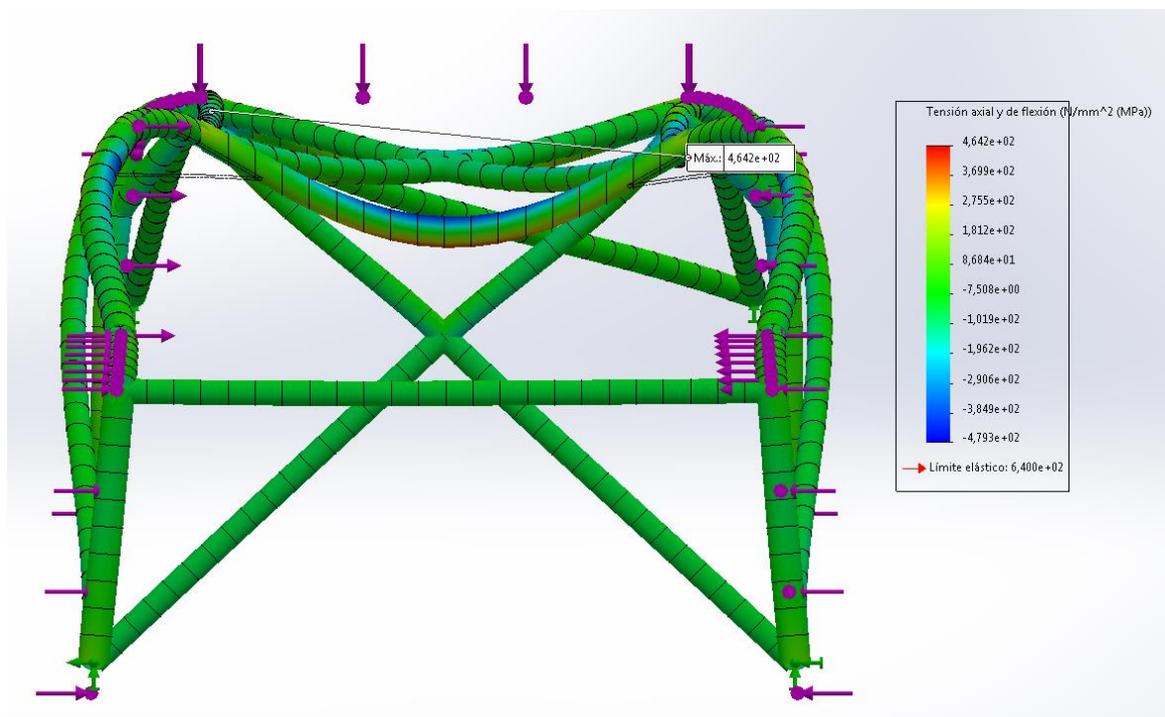


Ilustración 45: Vista frontal de las tensiones axiales y de flexión de la tercera simulación.

Diseño de la estructura

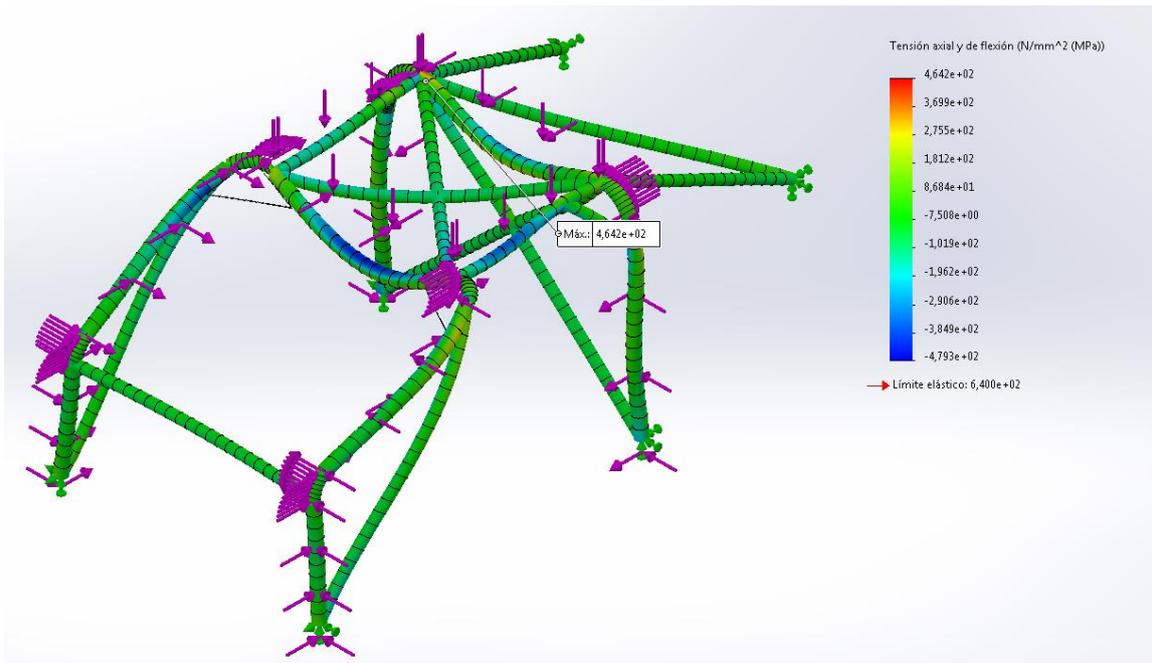


Ilustración 46: Resultados generados en la tercera simulación.

Observando que las tensiones axiales y de flexión son inferiores al límite elástico del material se realizará la posterior comprobación con la tensión de Von Mises en las zonas definidas anteriormente. Para ello se deben obtener primero las tensiones torsionales provocadas en cada una de las simulaciones y realizar el posterior cálculo.

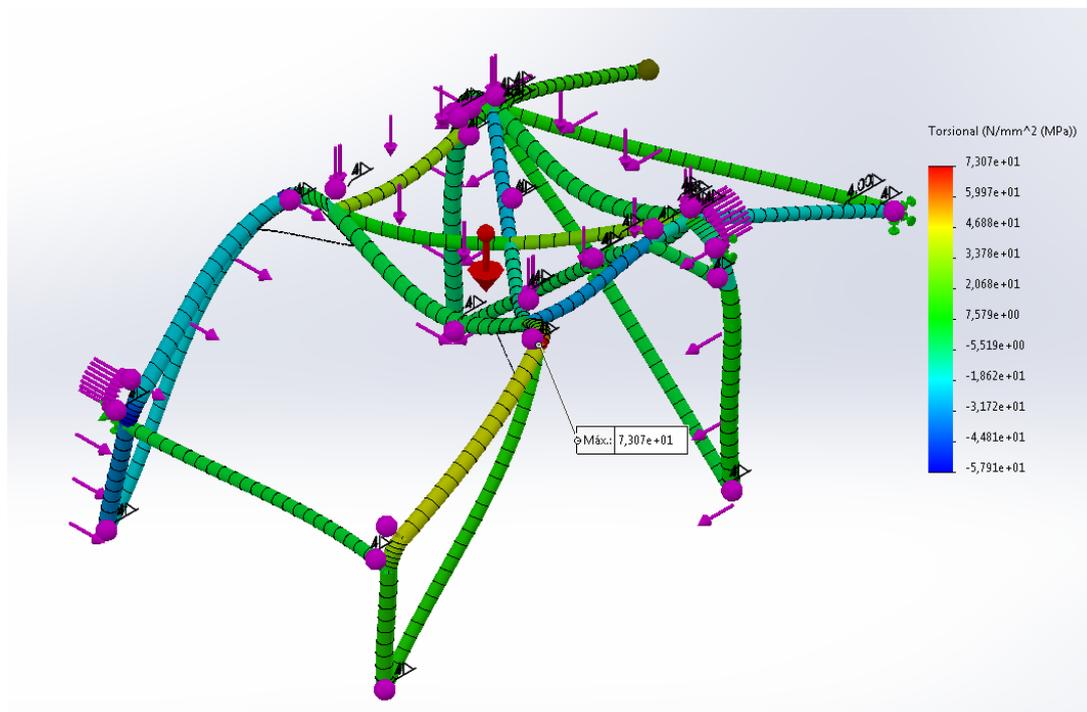


Ilustración 47: Tensión torsional provocada en la primera simulación.

Diseño de la estructura

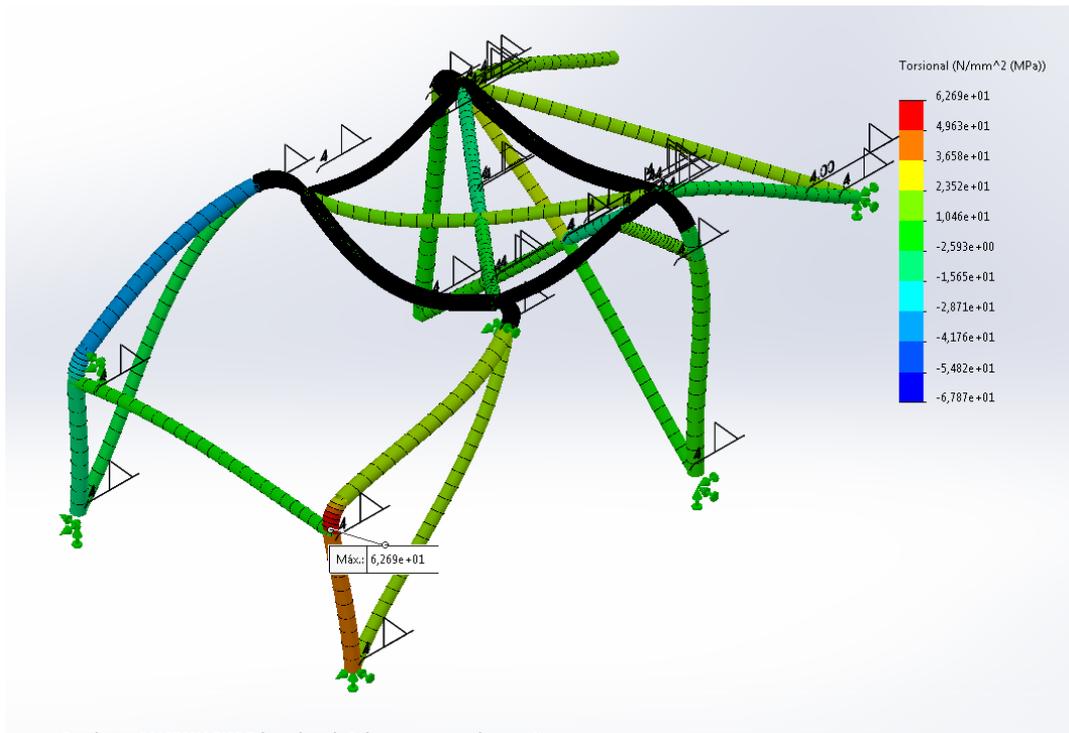


Ilustración 48: Tensión torsional obtenida a partir de la segunda simulación.

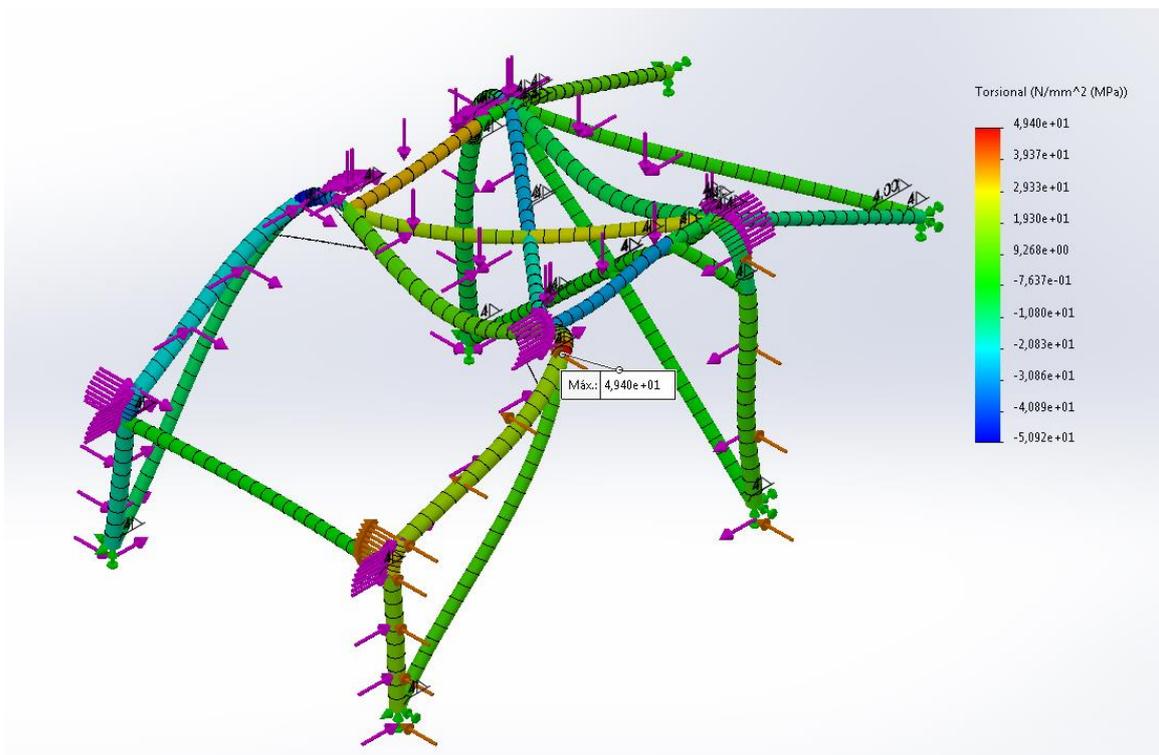


Ilustración 49: Tensión torsional en la tercera simulación.

Analizando los datos de las tensiones torsionales creadas se puede proceder con el cálculo en el programa Excel de la tensión de Von Mises resultante de la siguiente

Diseño de la estructura

fórmula, suponiendo la tensión axial y de flexión obtenida en el programa como la suma de ambas:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_f)^2 + (3 * \sigma_t)^2}$$

Diseño inicial			
Simulación 1			
	tension axial + flexión	tension torsión	Von Mises
Punto A	467,00	-0,36	467,00
Punto B	80,10	73,07	233,39
Simulación 2			
	tension axial + flexión	tension torsión	Von Mises
Punto A	481,80	-0,01	481,80
Punto B	116,20	62,69	221,07
Simulación 3			
	tension axial + flexión	tension torsión	Von Mises
Punto A	464,20	-8,00	464,82
Punto B	-427,00	73,07	479,98

Tabla 1: Cálculo de las tensiones de Von Mises del diseño inicial.

Observando los resultados de las tensiones, se puede apreciar que ninguna excede el límite elástico del material, por lo que se concluye que la estructura supera esta fase del diseño. Supervisadas las tensiones de Von Mises producidas se debe analizar la deformación de la misma, para verificar que sea seguro su uso.

Diseño de la estructura

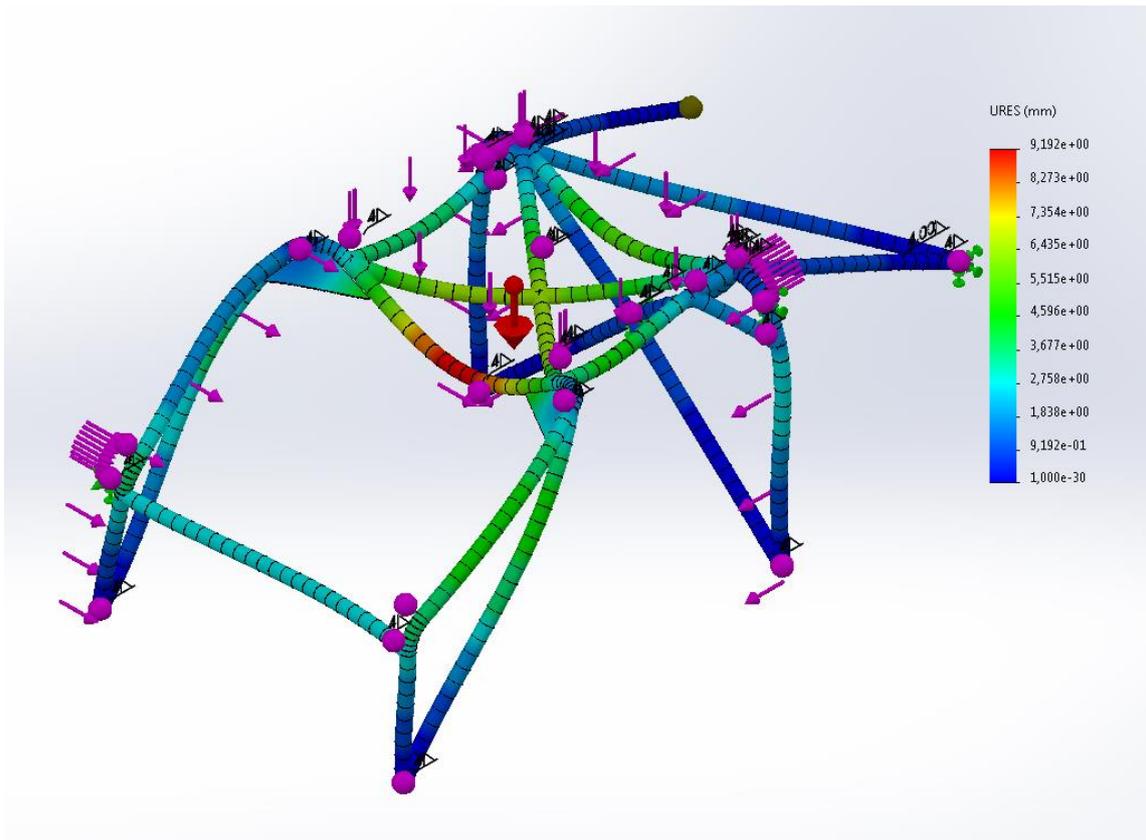


Ilustración 50: Resultados del desplazamiento provocado en la primera simulación.

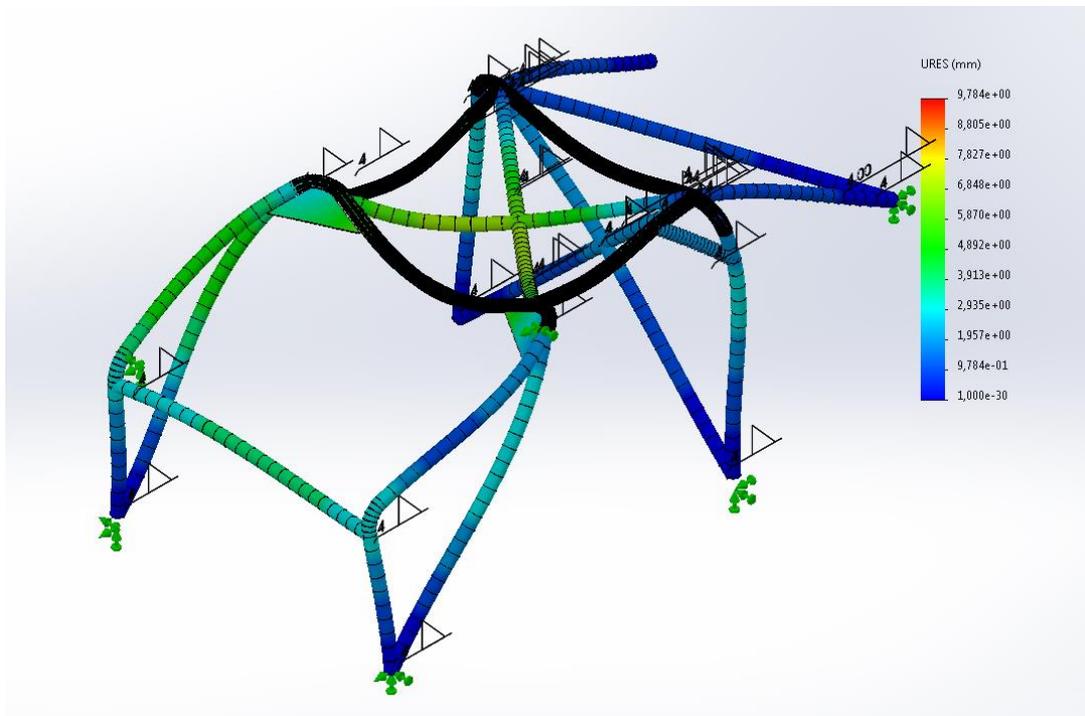


Ilustración 51: Desplazamiento producido en la segunda simulación.

Diseño de la estructura

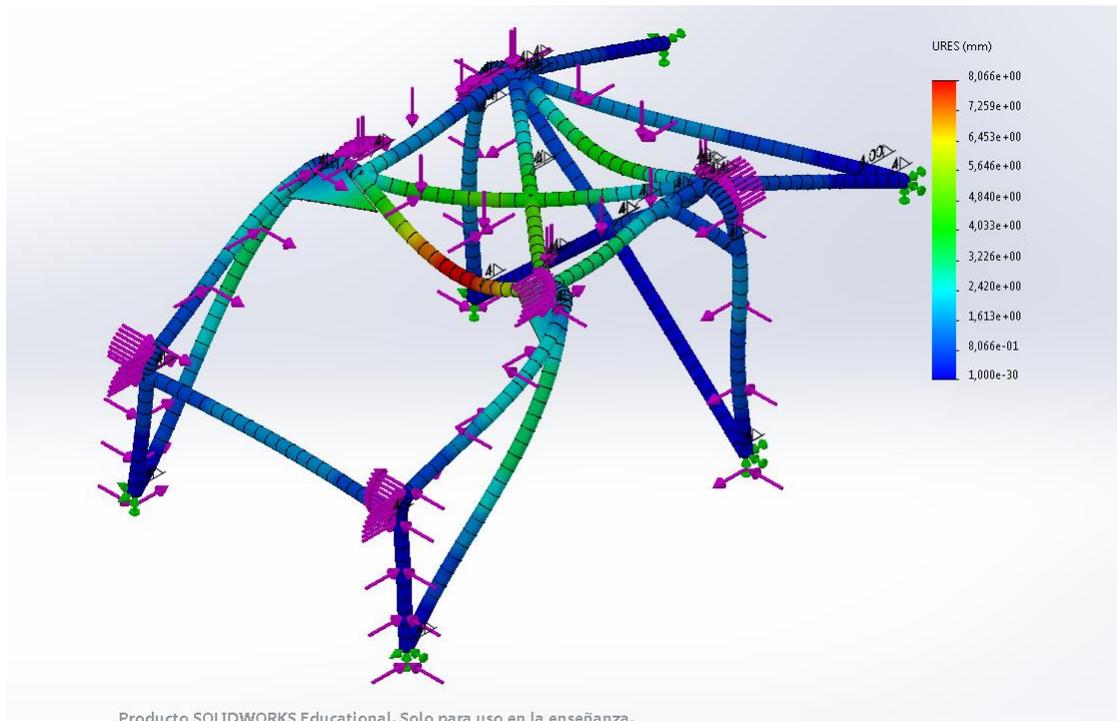


Ilustración 52: Desplazamiento obtenido a partir de la tercera simulación.

Analizando los desplazamientos producidos por las diferentes cargas, se observa que el valor máximo producido en las tres simulaciones es inferior a un centímetro. Esta deformación es aceptable, ya que independientemente de la zona en la que se produzca, no pone en riesgo la seguridad del habitáculo.

De esta manera se obtiene una estructura que ha superado todos los requisitos establecidos para validar el diseño. No obstante, antes de comenzar con la fabricación del diseño, pese a que cumpla con las necesidades, se realizarán diferentes modificaciones para intentar obtener una estructura con un coste de fabricación menor, un peso más reducido o un menor número de elementos que simplifique la estructura.

IV.10. Optimización del diseño.

Conocida ya una estructura que supera todas las situaciones consideradas, se procederá a realizar un segundo diseño optimizado eliminando la mayor cantidad de elementos innecesarios para reducir el coste de los materiales, el peso de la estructura y la mano de obra, para poder establecer una comparación entre ambos diseños y seleccionar el más adecuado.

Diseño de la estructura

Para el rediseño se comenzará por realizar una serie de agujeros en las cartelas instaladas para aligerar su peso. Estos orificios serán de un diámetro inferior al del tubo que refuerzan las cartelas, siendo en este caso 50 mm. Además, se ha reducido el espesor de estos refuerzos de 5 mm a 3,5 mm.

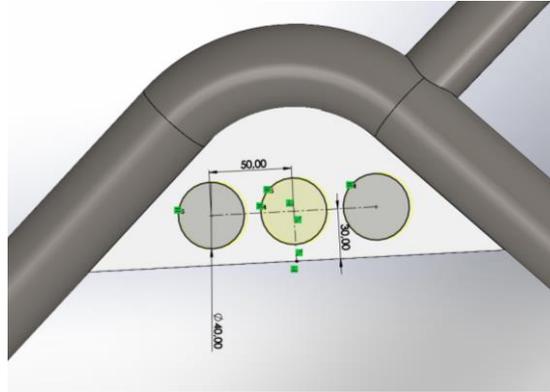


Ilustración 53: Dimensiones y ubicación de los orificios de las cartelas.

Por otra parte, se han eliminado todos los elementos diagonales que forman parte del techo y del arco principal, ya que los esfuerzos soportados no eran suficientemente considerables para indicar su aplicación. Al eliminarlos se producía una deformación no deseada en el arco principal que favorecía una separación de los elementos verticales hacia el exterior (como se puede observar en el esfuerzo que se origina en el elemento de refuerzo de la Ilustración 57), por lo que se ha optado por colocar una barra horizontal a media altura que restrinja este movimiento y se emplee además para el anclaje de los arneses de los ocupantes.



Ilustración 54: Estructura final optimizada.

Diseño de la estructura

Pese a resultar innecesaria la instalación del elemento diagonal de los anclajes traseros, se ha ubicado por indicación expresa del art. 253.8.3.2.11, en el que se mencionan los elementos mínimos que ha de incorporar una estructura.

Finalmente, definidos los elementos que se han modificado en el rediseño de la estructura se procederá a comprobar su resistencia realizando los tres cálculos establecidos.

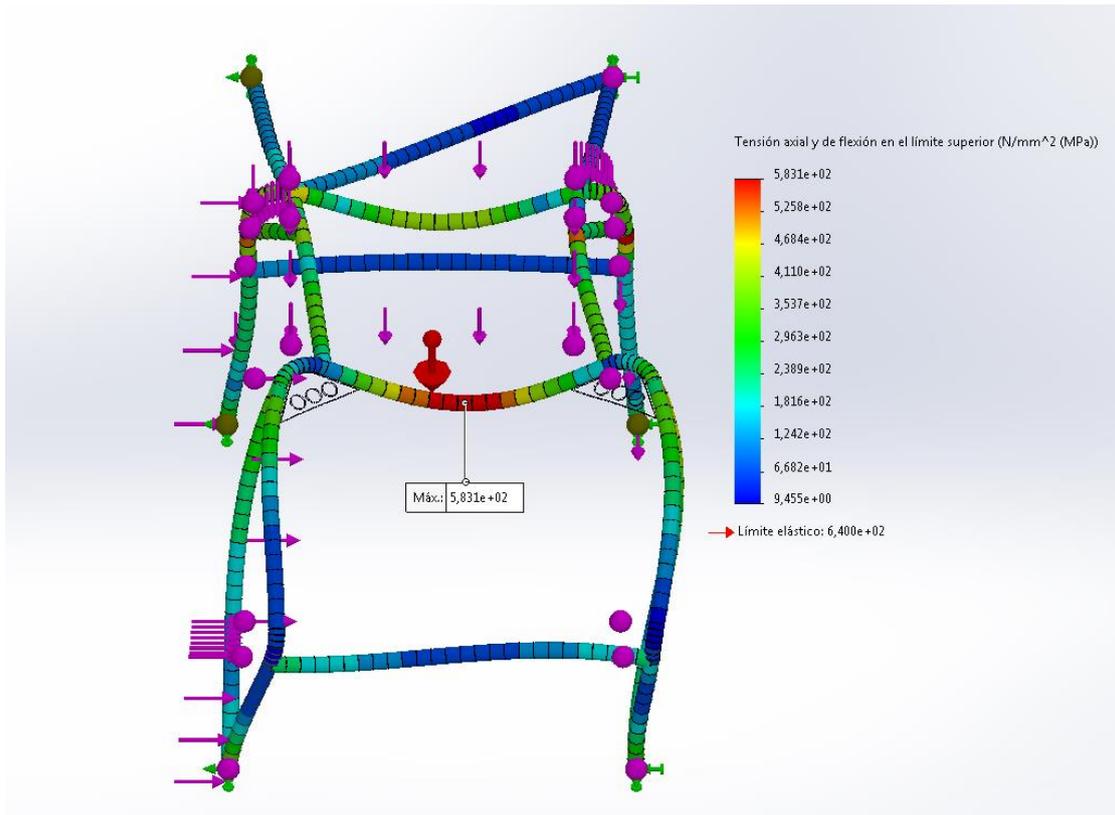


Ilustración 55: Resultados de tensión axial y de flexión de la primera simulación.

Diseño de la estructura

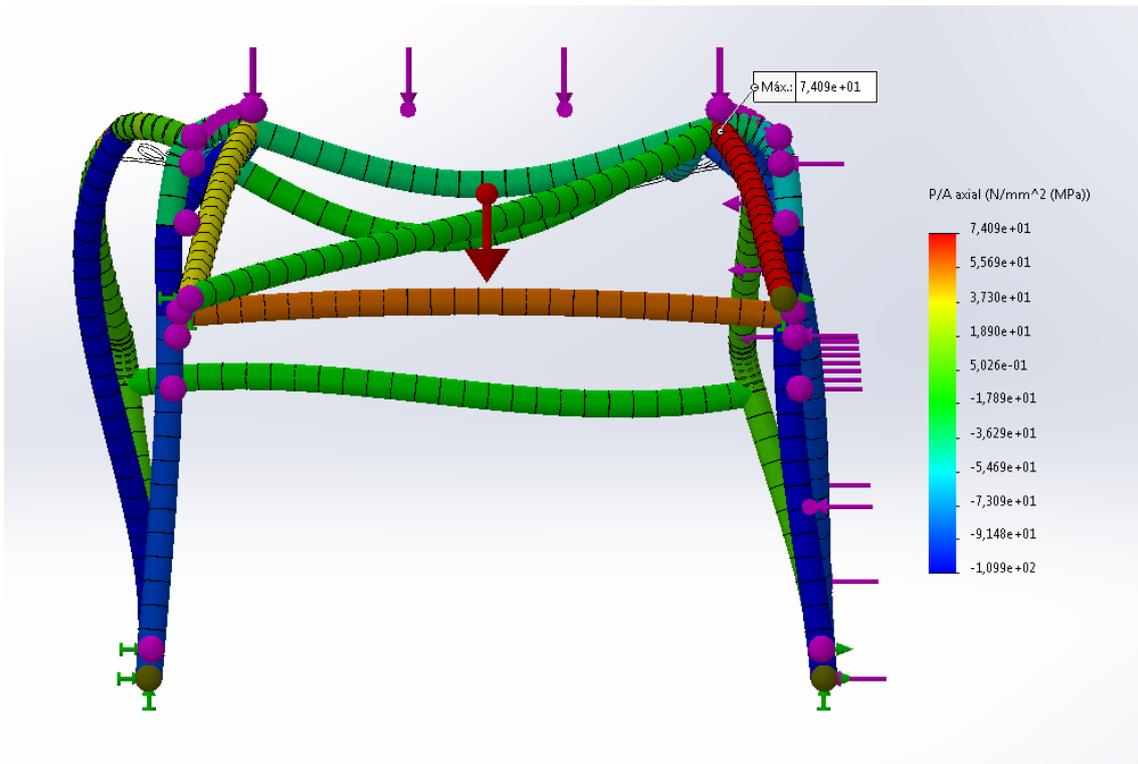


Ilustración 56: Representación de tensiones axiales provocadas en la primera simulación (destacar el elemento horizontal sometido a tracción).

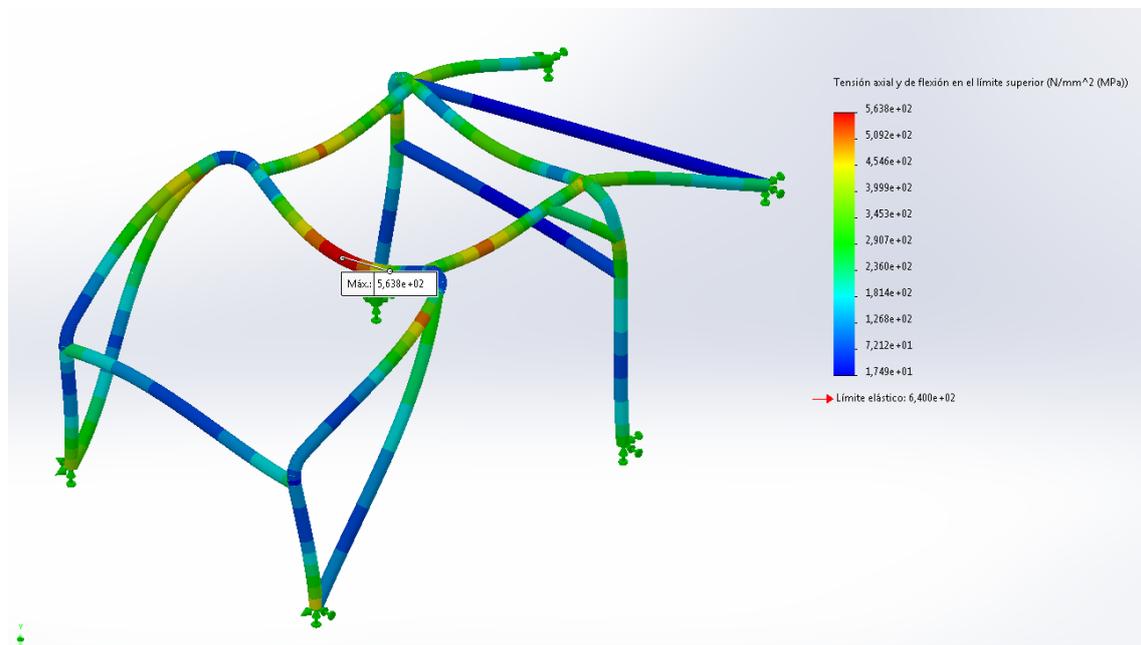


Ilustración 57: Resultados de las tensiones axiales y de flexión en la segunda simulación.

Diseño de la estructura

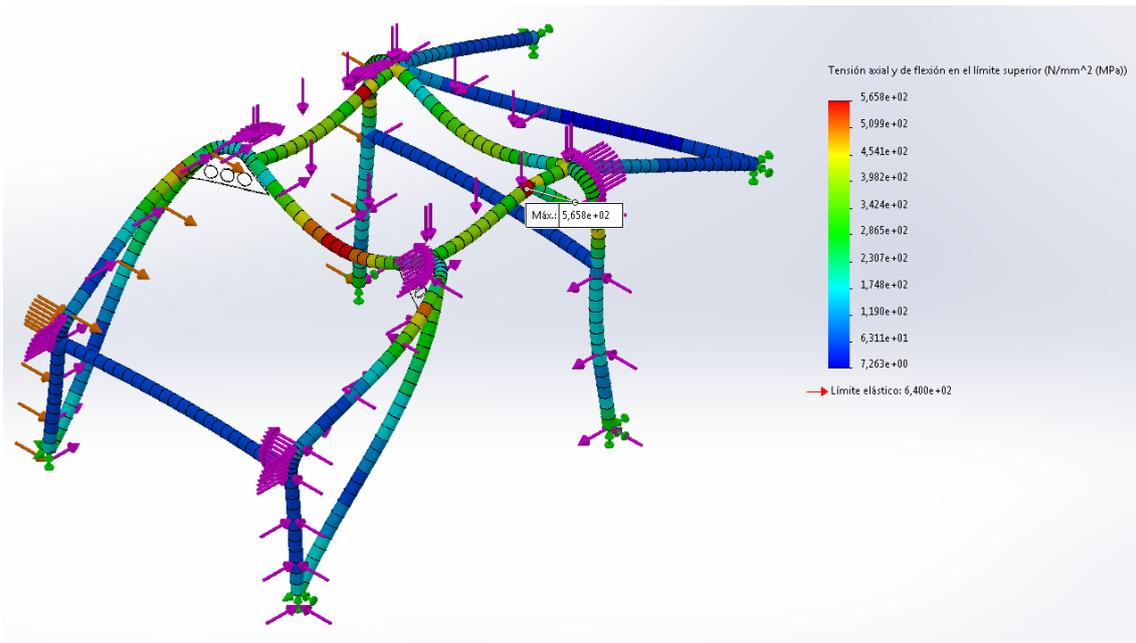


Ilustración 58: Tensiones axiales y de flexión obtenidas en la tercera simulación.

Conocidos los resultados de las tensiones axiales se obtendrán las tensiones de torsión para calcular la tensión de Von Mises.

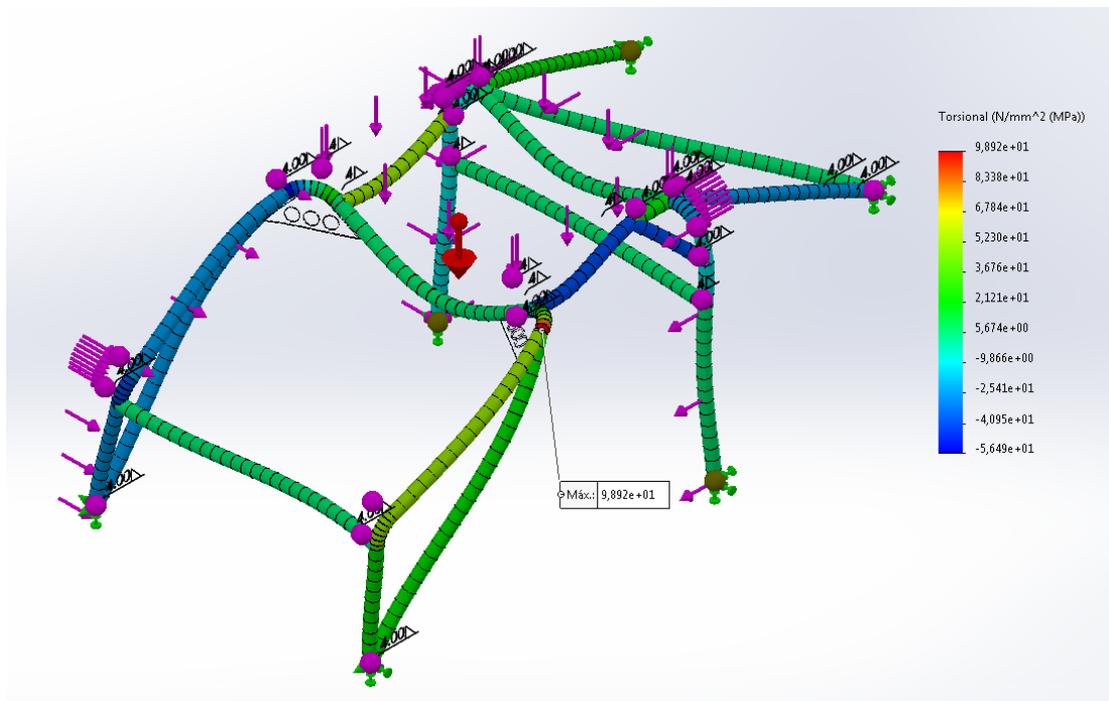


Ilustración 59: Resultados de tensión torsional obtenidos en la primera simulación.

Diseño de la estructura

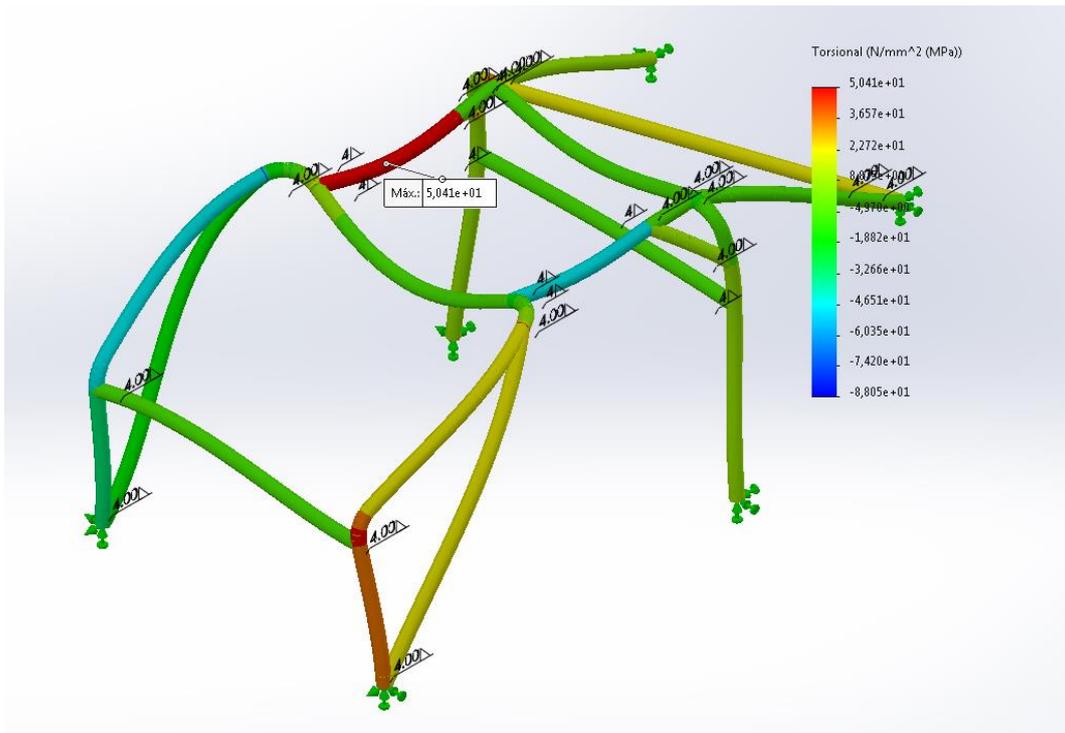


Ilustración 60: Tensión torsional generada en la segunda simulación.

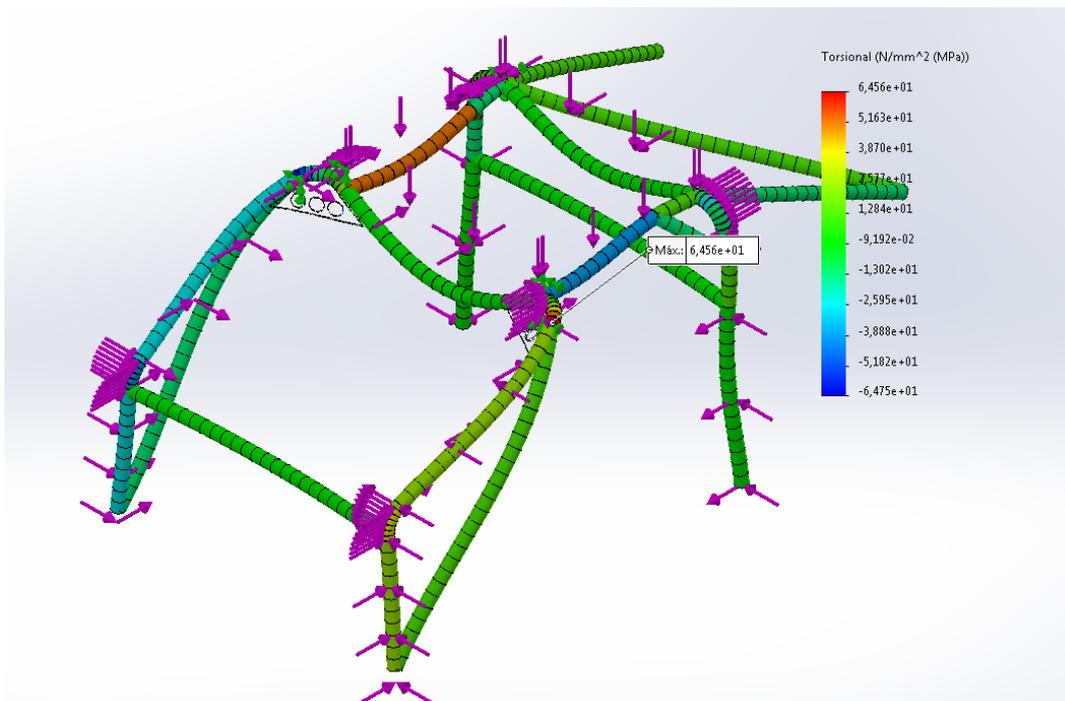


Ilustración 61: Resultados tensión torsional obtenida en la tercera simulación.

Con la tensión torsional provocada en cada simulación, se han obtenido los parámetros necesarios para el cálculo de la tensión de Von Mises:

Diseño de la estructura

Diseño optimizado			
Simulación 1			
	tension axial + flexión	tension torsión	Von Mises
Punto A	583,20	0,77	583,20
Punto B	273,20	98,92	403,37
Simulación 2			
	tension axial + flexión	tension torsión	Von Mises
Punto A	563,80	-0,90	563,81
Punto B	433,90	50,41	459,50
Simulación 3			
	tension axial + flexión	tension torsión	Von Mises
Punto A	565,80	43,51	580,66
Punto B	191,00	64,56	272,02

Tabla 2: Cálculo de las tensiones de Von Mises del diseño optimizado.

Finalmente se comprobará el desplazamiento provocado en cada una de las simulaciones para verificar que la estructura sea segura para los ocupantes.

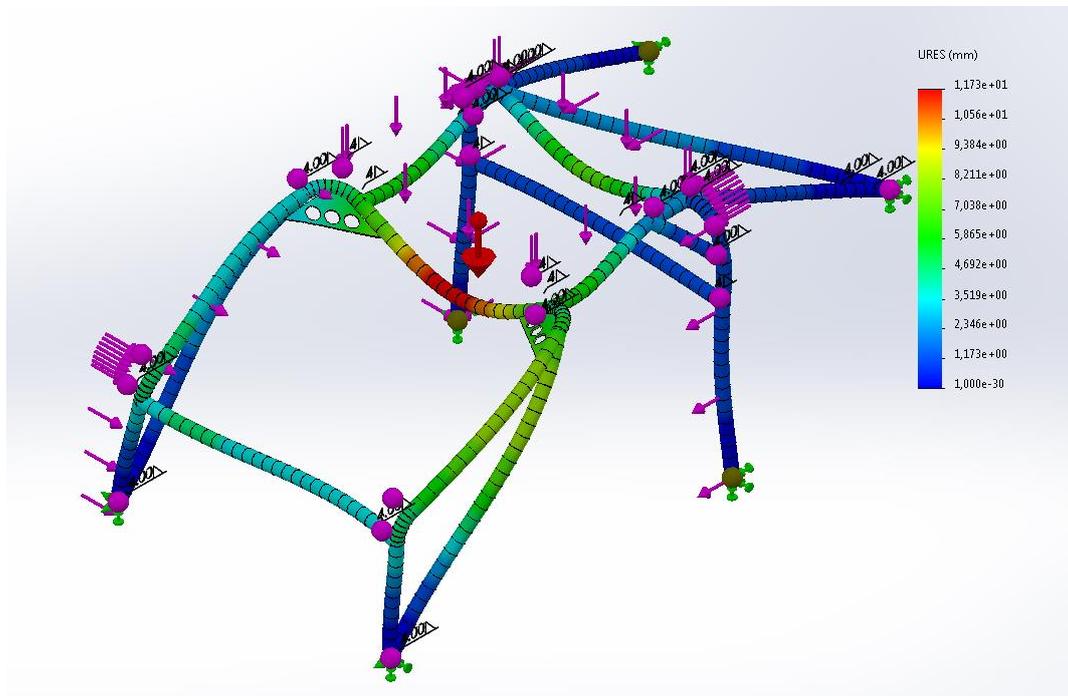


Ilustración 62: Resultados del desplazamiento producido en la primera simulación.

Diseño de la estructura

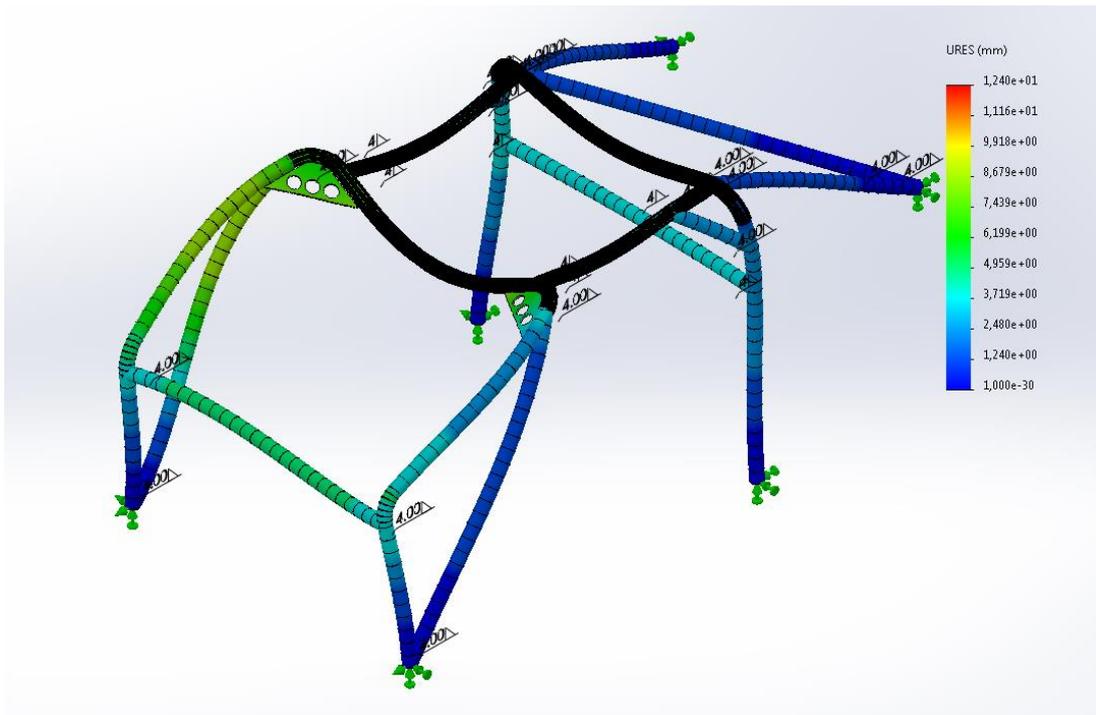


Ilustración 63: Desplazamiento provocado en la simulación número dos.

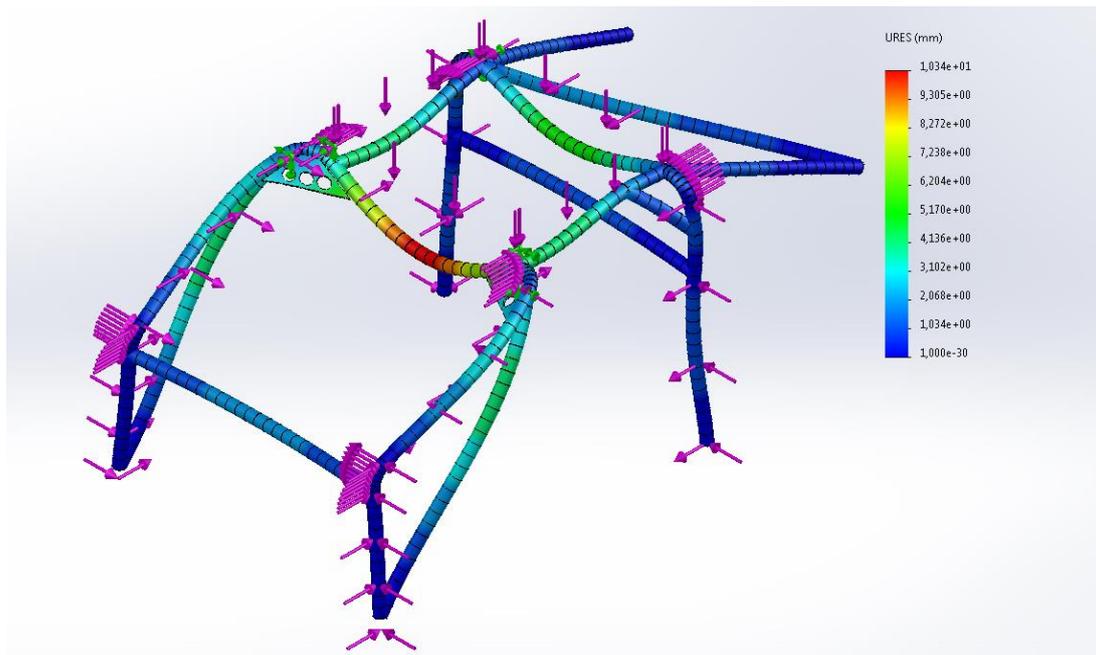


Ilustración 64: Desplazamiento obtenido en la tercera simulación.

Se puede apreciar que la deformación de la estructura se ha aumentado ligeramente con respecto al diseño inicial fruto de optimización. Este aumento de la deformación se debe a la eliminación de los elementos de refuerzo del techo. Pese a ser ligeramente superior a la inicial, la estructura sigue siendo viable, puesto que en el

Diseño de la estructura

mayor de los casos, la variación resultante es inferior a dos centímetros en la zona superior de la luna delantera, lugar no susceptible de impacto de los ocupantes ni zona de apertura de las puertas.

Observando los resultados tanto de la tensión de Von Mises, como la deformación de la estructura sometida a las cargas predefinidas, se obtiene un segundo diseño apto para su instalación en el vehículo.

De esta manera se han obtenido dos diseños viables que más adelante serán objeto de comparación para definir cuál es más recomendable para la fabricación e instalación en el vehículo. Antes de realizar esta comparativa se realizará un tercer diseño, cuyo objeto de aplicación será únicamente la circulación por la vía pública y la competición en ralis de regularidad.

IV.11. Diseño opcional regularidad.

Analizando detenidamente el reglamento técnico de ralis de regularidad de la FACV se puede leer en el artículo 1 que las modificaciones realizadas que no sean obligatorias han de estar recogidas en el Anexo J. Sin embargo, en el apartado 3.1 se especifica que los vehículos han de cumplir con la normativa vigente para la circulación en la vía pública y así participar en los eventos. De esta manera se puede interpretar que si se instala una estructura de seguridad en concordancia con el reglamento de circulación (Directiva 74/60/CEE en este caso en particular) correctamente montada y homologada puede participar, pese a no cumplir con el Anexo J.

Artículo 3. – SEGURIDAD. REGULARIDAD (media -55Km/h)

3.1.- Todos los vehículos deberán cumplir las normativas vigentes para su circulación por las vías públicas.

- ✓ Estar al corriente en las inspecciones técnicas (ITV).
- ✓ Poseer como mínimo seguro obligatorio en vigor.
- ✓ Los Comisarios Deportivos podrán excluir a un vehículo cuya construcción o estado parezca presentar peligro.

Ilustración 65: Requisitos FACV ralis regularidad.

Partiendo de la premisa anterior se desarrollará una estructura formada únicamente por un arco principal, eliminando tanto el arco delantero como los elementos del techo. Al tener esta geometría, se facilita enormemente las restricciones

Diseño de la estructura

de la Directiva, ya que con eliminar únicamente los asientos traseros se puede colocar la estructura.

Para ello se creará a partir de la estructura optimizada en el apartado anterior, y se modificarán elementos usando como guía el Apéndice V del Anexo K que regula los vehículos históricos, ya que ese documento sí que recoge este tipo de estructuras como válidas para ciertos grupos de automóviles.

Primero se realizará una geometría mínima y a continuación se le incorporarán elementos adicionales de refuerzo en las zonas que se consideren necesarias. Se comenzará con el diseño K-1 del Apéndice V [8] y se le instalarán los elementos de refuerzo resaltados en el modelo K-13.

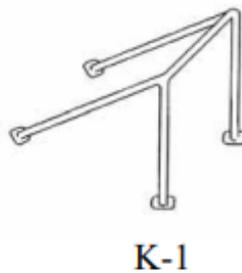


Ilustración 66: Diseño K-1 vehículos históricos.

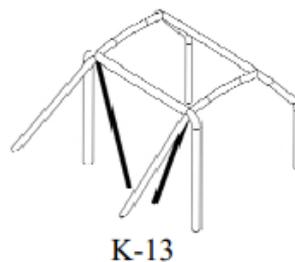


Ilustración 67: Diseño K-13.

Estos refuerzos se han colocado con el objetivo de distribuir una carga vertical en el arco principal en seis anclajes en lugar de los cuatro indicados en el primer diseño con la finalidad de evitar posibles deformaciones en el chasis del vehículo. Por último se han añadido unos elementos diagonales en el arco trasero para limitar las tensiones generadas por cargas horizontales y reducir la deformación producida.

Diseño de la estructura

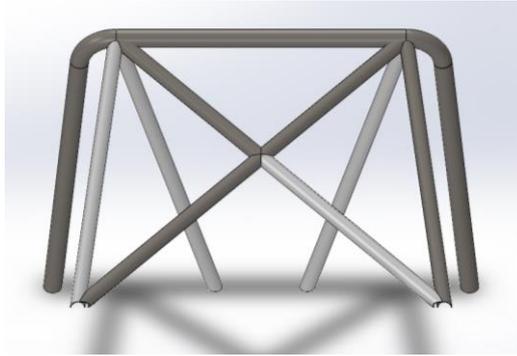


Ilustración 68: Vista posterior de la estructura.

Finalmente se realizará una variación de las simulaciones aplicadas a la estructura completa, reduciendo la carga aplicada y modificando la combinación de las cargas en el tercer y último estudio. Todas las cargas indicadas a continuación se aplicarán sobre el arco principal. En consecuencia, las cargas aplicadas serán:

$$P = 1125 [Kg] \Rightarrow W = 1200 [Kg] = 11772 [N]$$

$$C_{Lat} = W = 11772 [N]$$

$$C_{Vert} = 2 * W = 23544 [N]$$

$$C_{Long} = W = 11772 [N]$$

Esta disminución de cargas se realiza con el objetivo de tratar de emular las condiciones de impacto en caso de accidente. Como solo hay un arco principal, en caso de vuelco, la carga se distribuye a lo largo del techo del vehículo, aplicándose a la estructura una fracción de la introducida en las simulaciones anteriores. En la carga longitudinal, los esfuerzos son considerablemente menores al eliminarse el arco frontal, elemento que protege el habitáculo en impactos frontales. En lo relativo a las cargas laterales, se ha disminuido ligeramente, ya que se entiende que es la principal función de esta estructura, conjuntamente con la protección contra vuelco.

Una vez definidas las cargas, las simulaciones consistirán en la siguiente combinación de las mismas:

- Simulación 1: Carga vertical, carga longitudinal desde la zona trasera del vehículo y carga lateral en el elemento derecho
- Simulación 2: Carga vertical, carga longitudinal desde la zona delantera y carga lateral izquierda.

Diseño de la estructura

- Simulación 3: Idénticas condiciones de la segunda simulación añadiendo una carga lateral derecha.

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones anteriores:

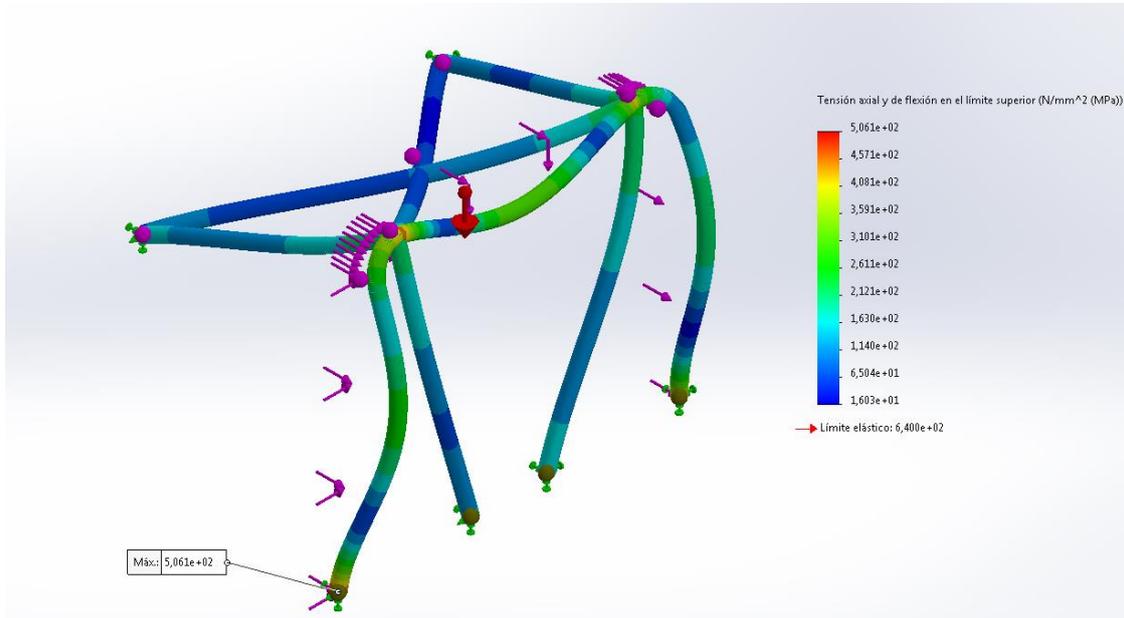


Ilustración 69: Tensiones axiales y de flexión obtenidas en la primera simulación.

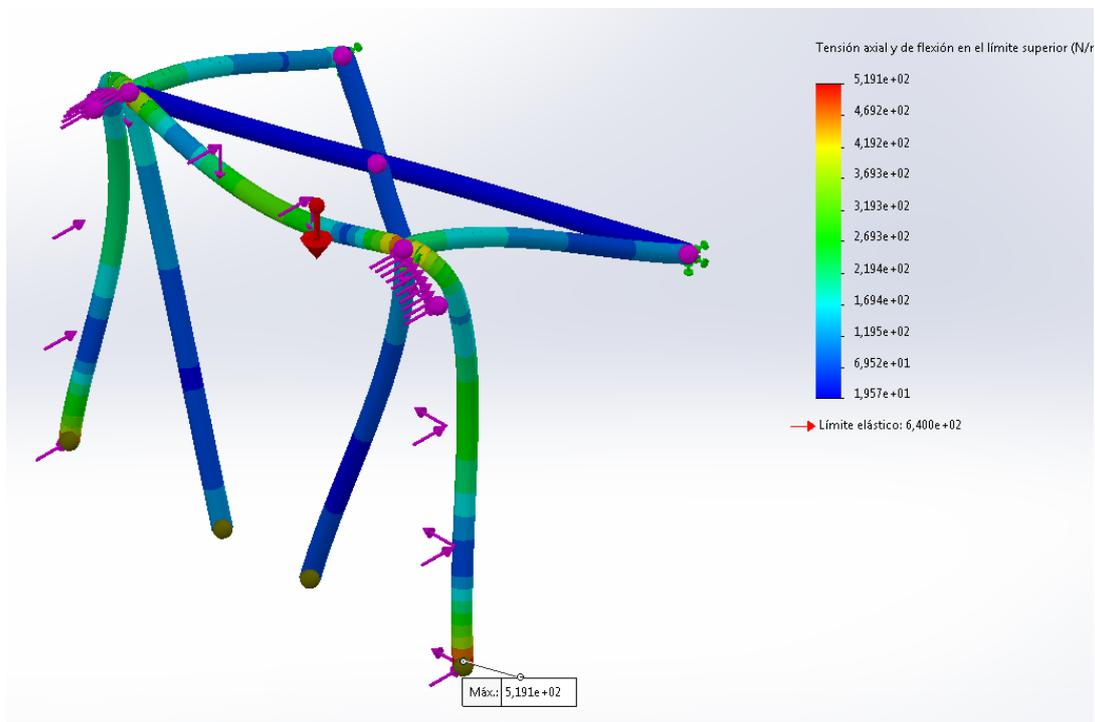


Ilustración 70: Resultados de tensiones axiales y de flexión provocados en la segunda simulación.

Diseño de la estructura

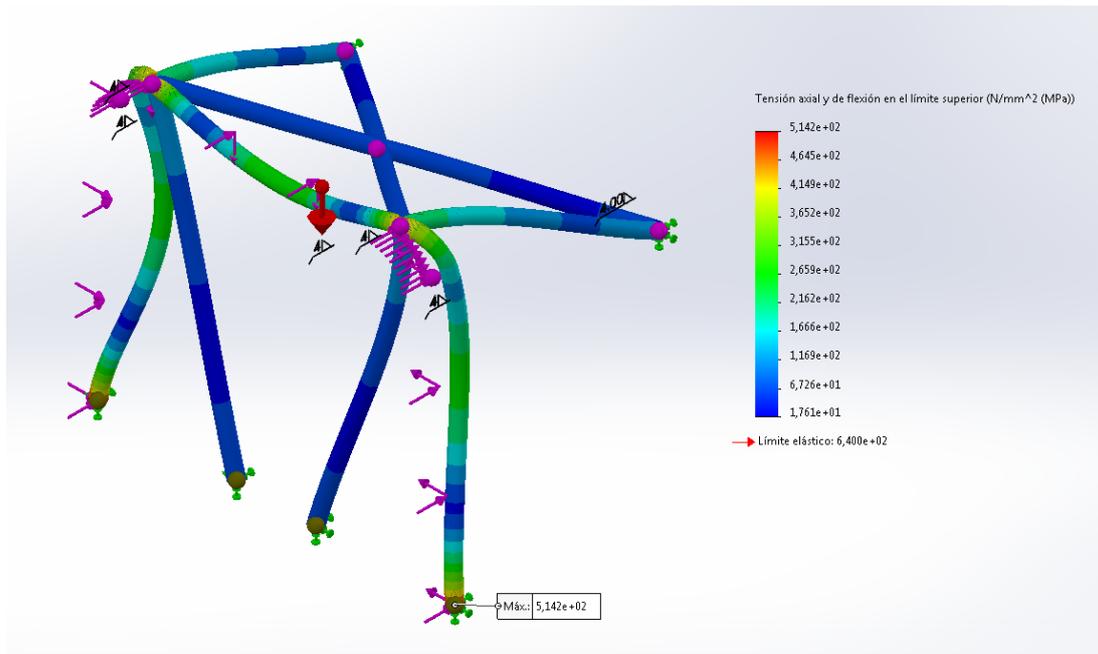


Ilustración 71: Tensiones axiales y de flexión obtenidas a partir de la tercera simulación.

Obtenidos los esfuerzos de tensión axial y flexión, se procederá con el cálculo de las tensiones de torsión para conocer la tensión de Von Mises.

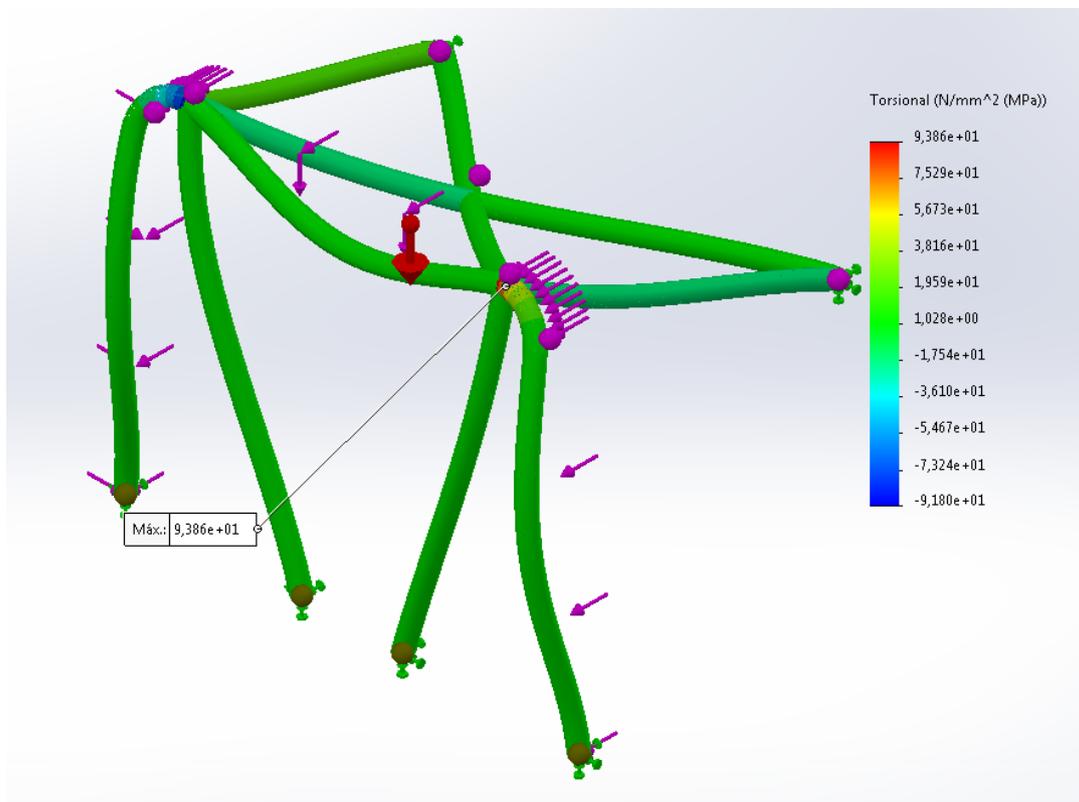


Ilustración 72: Resultados de la tensión torsional en la primera simulación.

Diseño de la estructura

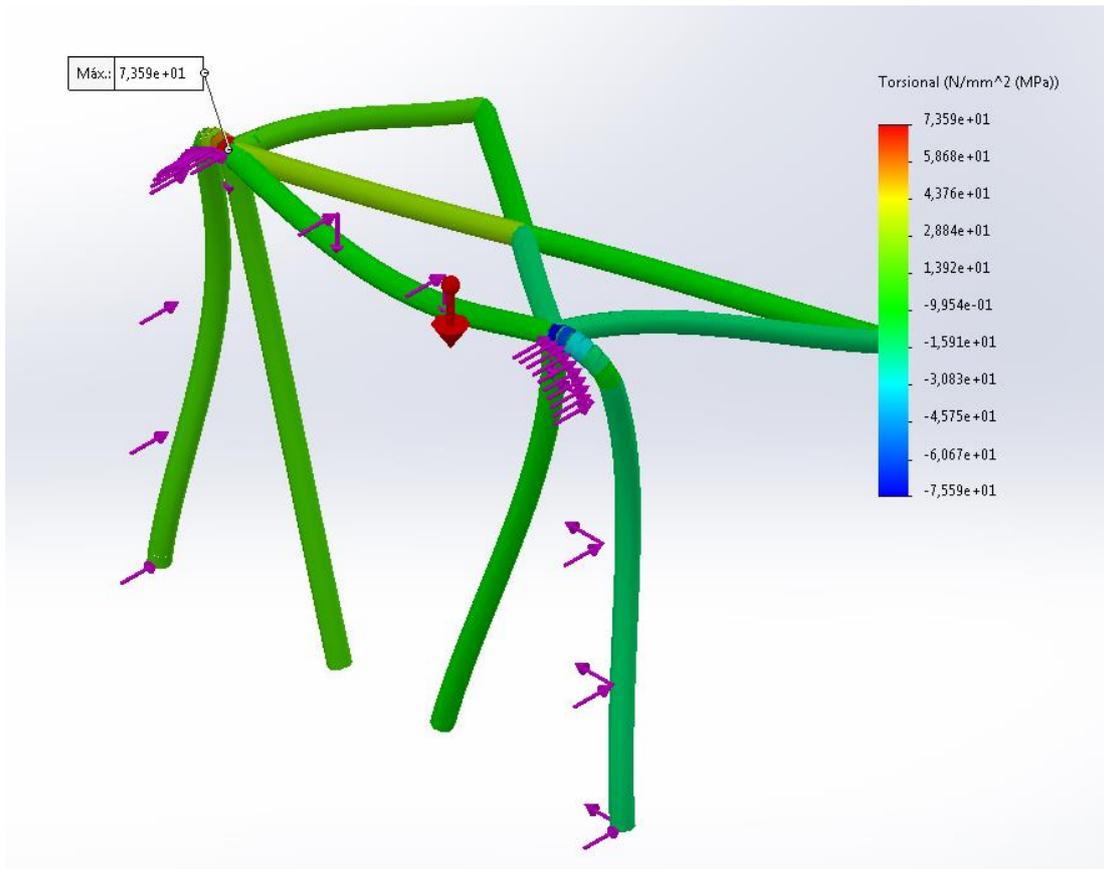


Ilustración 73: Tensión torsional obtenida en la segunda simulación.

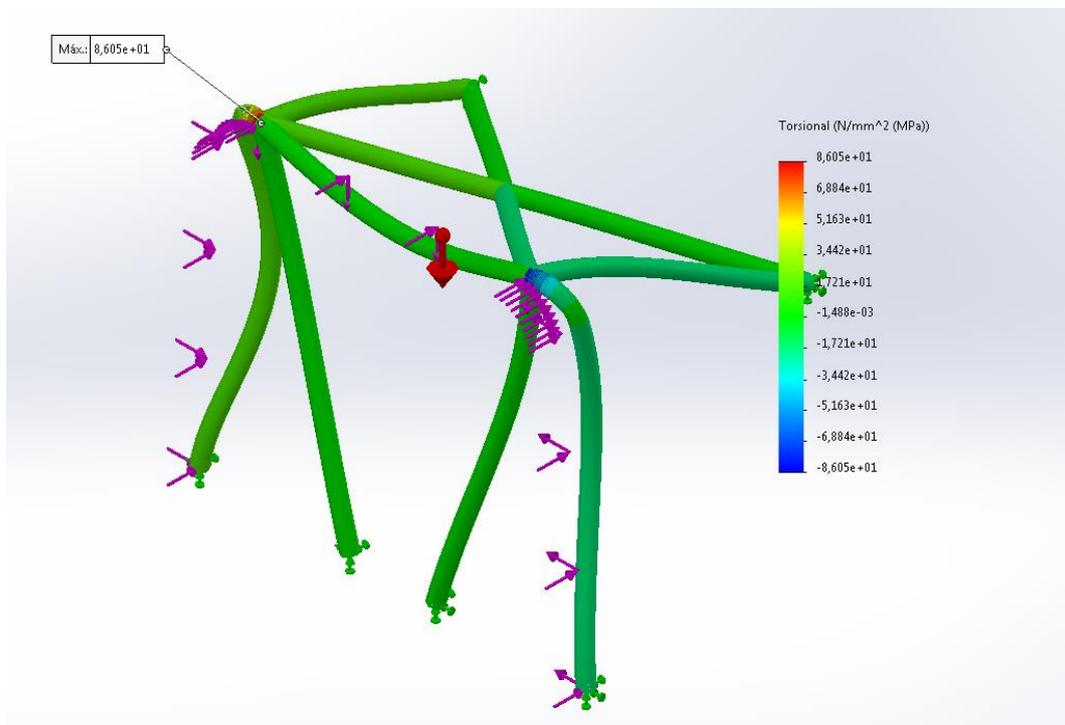


Ilustración 74: Resultados de tensión torsional en la tercera simulación.

Diseño de la estructura

Conocidos los valores de las tensiones torsionales provocadas en la estructura se procederá con el cálculo de la tensión de Von Mises de la misma manera que se realizó en los diseños anteriores:

Diseño alternativo			
Simulación 1			
	tension axial + flexión	tension torsión	Von Mises
Punto A	506,10	-6,86	506,52
Punto B	260,50	93,86	383,60
Simulación 2			
	tension axial + flexión	tension torsión	Von Mises
Punto A	519,10	-10,38	520,03
Punto B	444,70	73,59	496,49
Simulación 3			
	tension axial + flexión	tension torsión	Von Mises
Punto A	514,20	-10,21	515,11
Punto B	440,70	86,05	510,74

Tabla 3: Cálculo de la tensión de Von Mises del diseño alternativo.

Partiendo de los datos calculados en la ilustración anterior, se puede observar que las tensiones obtenidas en los puntos de interés son menores que el límite elástico del material, por lo que se concluye que la estructura supera esta fase del diseño. El siguiente paso consistirá en la obtención de las deformaciones generadas para verificar que en caso de accidente no suponga un riesgo añadido para los ocupantes.

Diseño de la estructura

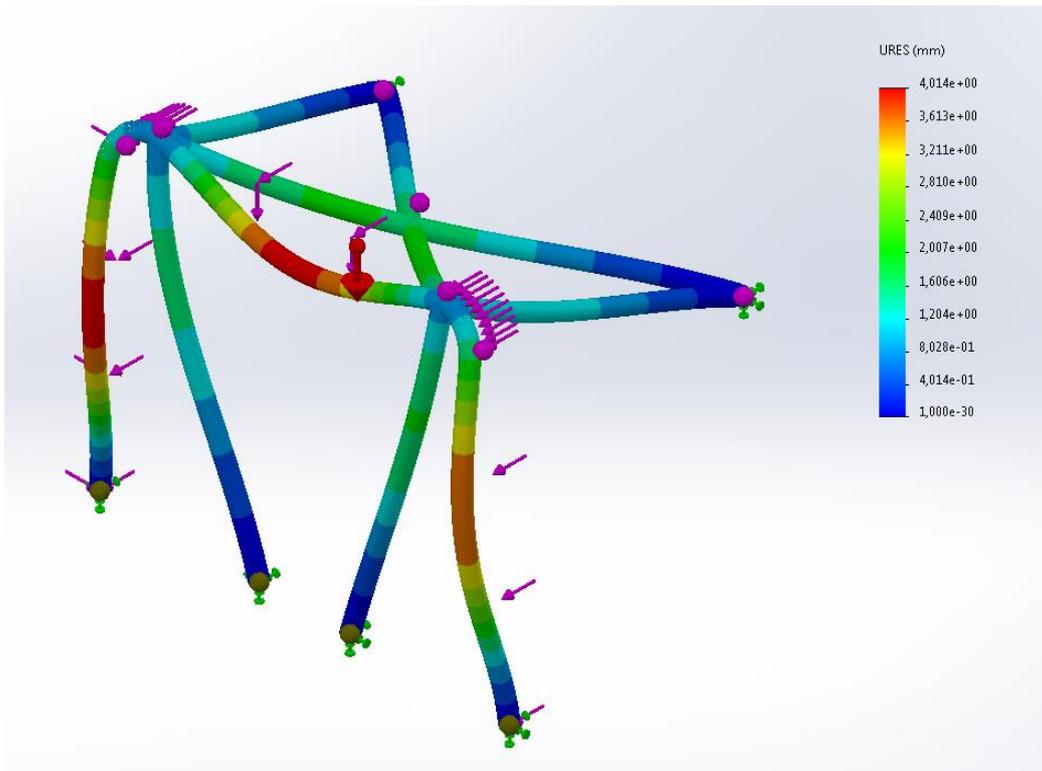


Ilustración 75: Deformación obtenida en la primera simulación.

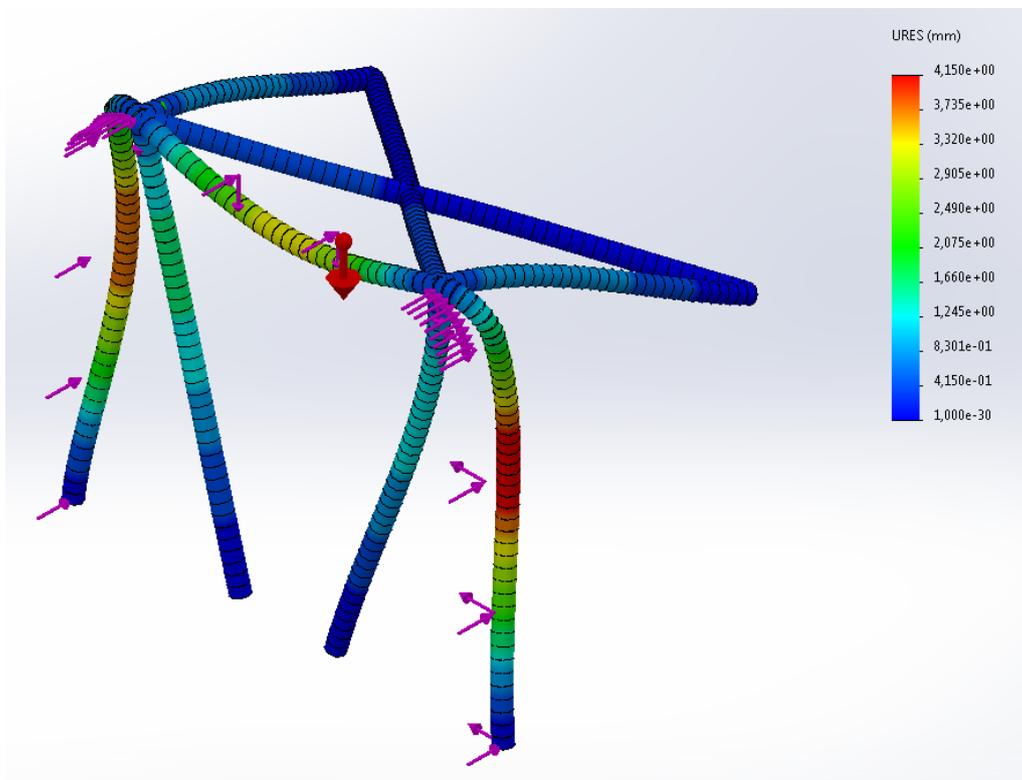


Ilustración 76: Desplazamiento de los elementos provocado en la segunda simulación.

Diseño de la estructura

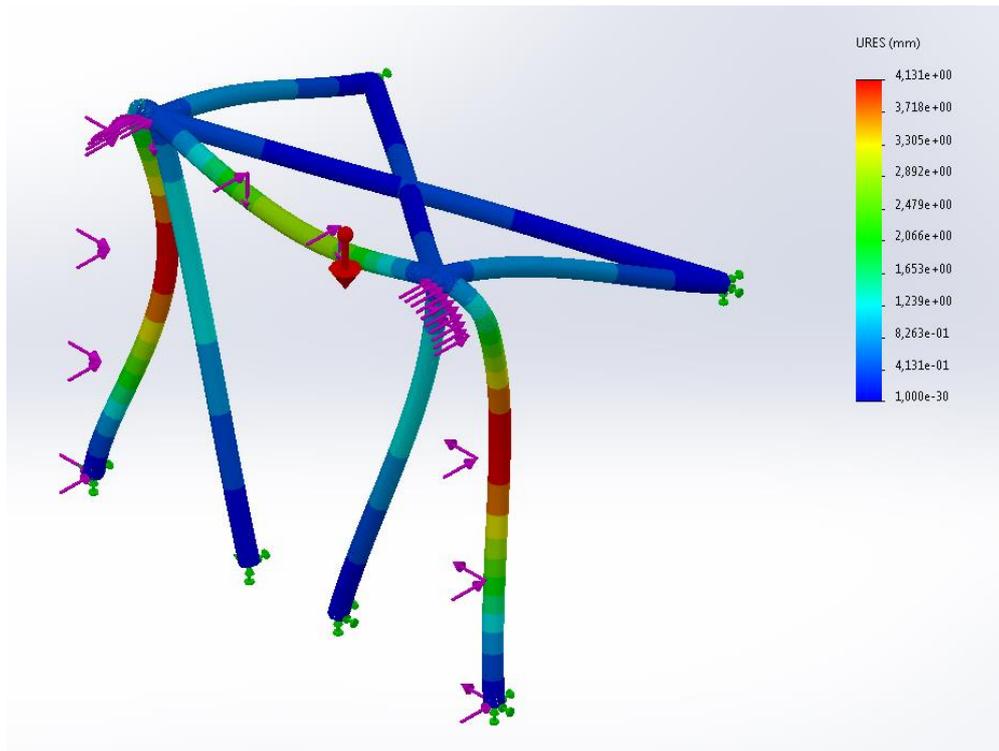


Ilustración 77: Deformación de los elementos en la tercera simulación.

En este caso particular, al encontrarse la estructura situada tras los asientos de conductor y copiloto, la deformación máxima permisible es igual a la distancia desde la estructura a los respaldos de los asientos, puesto que en caso de accidente no debe interferir en estos. Observando los valores de las deformaciones provocadas, se aprecia que en todos los casos su magnitud es inferior al centímetro, por lo que se garantiza la seguridad de la estructura.

Se puede observar claramente que la estructura supera con éxito los cálculos realizados. Analizando los resultados obtenidos, se puede apreciar que las mayores tensiones en todos los supuestos se obtienen en los soportes de la estructura con el vehículo, motivo por el cual se han añadido dos soportes centrales.

IV.12. Resultados

Con los requisitos establecidos por las normativas aplicables y, en su defecto, por normas de similar ámbito de aplicación, se han obtenido dos diseños definitivos de estructuras completas de seguridad contra vuelco y un tercer diseño de un arco de seguridad principal. Los dos primeros diseños han de incorporar unos elementos adicionales capaces de disipar la energía producida por un impacto de la cabeza de los ocupantes según la Directiva, a diferencia del tercer diseño que no es aplicable esta medida, al estar ubicado detrás de los asientos de piloto y copiloto.

Selección del proceso de fabricación y cálculo del presupuesto.

V. Selección del proceso de fabricación y cálculo del presupuesto.

Al disponer de diferentes diseños es necesario establecer una serie de condiciones adicionales para considerar cuál es más apropiado instalar. Para ello se realizará más adelante un cálculo del coste de fabricación e instalación, indicando los elementos adicionales necesarios para cumplir con la normativa y un análisis del peso de la estructura.

El objetivo de este apartado consiste en la selección de un proceso de fabricación que cumpla con los requisitos exigidos en las diferentes normativas considerando también el proceso de montaje en el vehículo, con las dificultades que ello implica. Por otra parte se analizarán los costes de las tres estructuras diseñadas anteriormente para, una vez sean conocidos, poder realizar una comparación y selección de la más adecuada.

V.1. Proceso de fabricación de la estructura.

En la selección del material se ha considerado que los elementos de la estructura, durante el proceso de fabricación, serán sometidos a deformaciones en frío y a operaciones de soldadura. Estas deformaciones se deben realizar obligatoriamente en los arcos principales, tanto frontal como central, ya que en el Anexo J se especifica que no podrán tener ningún tipo de soldaduras, salvo aquellas que se emplean para unir los elementos adicionales.

De manera adicional, la normativa reconoce la posibilidad de instalar elementos desmontables en la estructura mediante unos anclajes homologados. La principal

Selección del proceso de fabricación y cálculo del presupuesto.

finalidad de este sistema consiste en facilitar el acceso al vehículo, que en las estructuras que cuentan con elementos de refuerzo en la zona de la puerta se complica considerablemente. Debido a que ninguno de los diseños realizados incorpora este tipo de elementos, su aplicación no se considera recomendable, puesto que encarecen considerablemente la estructura sin aportar ningún beneficio claro.

Definidas las condiciones preliminares, se subdividirá este apartado en tres diferentes: selección de la soldadura (tipo, material de aporte y elementos adicionales), proceso de fabricación (selección del método de corte y doblado de los elementos) y proceso de montaje (elementos a unir antes y después del montaje en el vehículo).

Selección de la soldadura.

Puesto que se trata de una estructura que debe soportar grandes tensiones se ha optado por seleccionar como sistema de soldadura el método TIG, puesto que es un sistema con unos resultados considerablemente mejores que la soldadura por electrodo, que permite soldar en diferentes posiciones sin afectar al resultado y realizar la unión en el interior del habitáculo.

Conocido ya el método de soldadura ha de seleccionarse el sistema de suministro de energía. Se han considerado tres posibilidades distintas: por corriente continua en polaridad directa, polaridad indirecta y corriente alterna. Se ha optado por seleccionar corriente continua en polaridad indirecta, aconsejada para soldar elementos con bajo contenido en carbono y para la soldadura de perfiles o chapas de bajo espesor, como es el caso, además se recomienda la polaridad indirecta, debido a que al depositarse el gas inerte sobre la pieza a soldar, se concentra la temperatura en el electrodo, a diferencia de la polaridad directa que concentra la temperatura en el elemento a soldar y que, en chapas finas, puede agujerear la pieza. Al realizarla en polaridad indirecta, se facilita la penetración de la soldadura en el material consiguiendo mejores prestaciones mecánicas [16].

A continuación se ha de seleccionar el material de aporte del electrodo. Este ha de ser compatible con el acero bajo en carbono de la estructura. Por ello se ha optado por emplear un electrodo ER70-6 [17], con un alto contenido en manganeso y silicio para permitir una mayor protección frente al óxido, debido a que por la geometría de

Selección del proceso de fabricación y cálculo del presupuesto.

la estructura una vez montada en el vehículo se deberán realizar soldaduras en lugares de difícil acceso.

Finalmente es necesario conocer el gas de protección de la soldadura. Se plantean dos opciones principales: el argón exclusivamente o una mezcla con hidrógeno o helio. Al estar destinado a soldadura de acero bajo en carbono se utilizará únicamente argón, ya que las combinaciones de argón con hidrógeno o helio se emplearán en la soldadura de aceros inoxidable y aleaciones especiales, puesto que no son compatibles con el argón puro.

Proceso de fabricación.

Como se ha citado anteriormente, en el Anexo J se indica que los elementos que forman parte de los arcos principales no podrán tener soldaduras, sino que será necesario que se formen a partir de una pieza inicial. Por ello, como estos elementos tienen curvas a lo largo de su trayectoria será necesario introducir una fase de doblado adicional.

De esta manera, en el arco delantero se crearán cuatro pliegues a lo largo del mismo con un radio de 150 mm, y en el arco central otras dos dobleces del mismo diámetro. Esta operación se debe realizar con el material en frío, como indica la norma, y se ha de verificar que no se produzca un aplastamiento que genere una diferencia entre el diámetro mayor y menor superior al 10%, indicado en el artículo 253.8.3.3 del Anexo J.

Conocidas ya las seis operaciones de dobladura a realizar en los arcos principales se tendrán que cortar todos los elementos de la estructura para conseguir un correcto acoplamiento de cara a comenzar con el proceso de soldadura.

Para crear los cortes hay diferentes posibilidades, dependiendo de la geometría que se desea obtener y de las dimensiones y materiales de los elementos a procesar. En este caso todos los elementos son del mismo material, únicamente varía la geometría (existen tubos de 50x2 mm, 40x2 mm y pletinas de 3 mm de espesor). Las diferentes opciones que se han planteado para realizar los cortes son: corte por láser, sierra de cinta y sierra circular.

Selección del proceso de fabricación y cálculo del presupuesto.

Analizando la geometría de los cortes, que puede llegar a ser compleja en determinadas uniones y considerablemente simple en otras, se entiende que la que mejor cubre las necesidades es el corte por láser. Sin embargo este método es bastante más caro que el resto, obteniendo como principal beneficio unas tolerancias muy buenas y una capacidad de generar geometrías muy complejas a costa de una capacidad de producción baja. En contraposición, la sierra de cinta ofrece una gran capacidad de producción, ya que permite apilar una gran cantidad de tubos y cortarlos conjuntamente, pero no es posible generar ningún tipo de corte oblicuo. Por último, la sierra de disco se podría interpretar como un proceso con unas propiedades combinadas de los dos anteriores, puesto que la capacidad de producción es mayor que los cortes láser y permite generar cortes en diferentes ángulos en el tubo.

Conocidas las propiedades de cada uno de los sistemas de corte se ha optado por aplicar el corte por disco, ya que no es necesario obtener una buena tolerancia, como ofrece el corte por láser, puesto que al ir soldados entre sí los diferentes elementos se puede crear una separación de unos varios milímetros que podrá rellenar la soldadura. Por otra parte, aplicando el mismo principio, se puede considerar una variación en la geometría de los cortes con respecto a la diseñada, puesto que puede ser contrarrestada con el proceso de soldadura, descartando de esta manera el corte por láser.

Montaje de la estructura.

Para el montaje de la estructura hay que considerar las limitaciones de espacio del vehículo, puesto que al no ser descapotable y no poseer puertas traseras, la estructura no se podrá montar en una única pieza, debiendo subdividirla en dos o más grupos para, a continuación, ensamblarlas en el interior del vehículo.

Antes de comenzar con el montaje, es necesario retirar todos los elementos que conforman el habitáculo: los asientos delanteros y la fila de asientos posterior, salpicadero y elementos adicionales que cubran total o parcialmente la superficie de anclaje de la estructura (embellecedores, anclaje de los cinturones traseros, etc.).

Selección del proceso de fabricación y cálculo del presupuesto.

Creado ya el espacio necesario para la instalación se subdividirá la estructura en tres subsistemas, de los cuales dos se completarán antes de comenzar la instalación y el tercero se unirá en el mismo vehículo.

1. Subsistema frontal: Estará formado por el arco frontal con los refuerzos horizontales colocados a la altura del salpicadero a lo ancho del vehículo y los elementos diagonales que unen la base del arco con la parte superior. Además se instalarán las cartelas seleccionadas y las bases de anclaje de la estructura atornilladas a los refuerzos a soldar en el chasis.
2. Subsistema trasero: Está integrado por el arco principal, con los tirantes traseros y los elementos de refuerzo colocados tanto en el plano del arco como en los tirantes. Al igual que en el subsistema frontal, se montará con las bases de la estructura atornilladas a las pletinas de refuerzo sin soldar al chasis.
3. Subsistema del techo: Este, a diferencia de los anteriores que se unen fuera del automóvil antes de su instalación, se soldará *in situ*, ya que de hacerse de otra manera no sería posible introducir la estructura dentro del mismo. Este subsistema está integrado por los elementos de unión entre el arco frontal y el central y sus refuerzos correspondientes colocados a la altura del techo.

Como se ha citado anteriormente, una vez unidos ambos subsistemas, se obtiene la estructura final sin anclar al vehículo. De esta manera se consigue evitar que una vez construida completamente la estructura, considerando que se deben realizar diferentes soldaduras que posiblemente modifiquen ligeramente la geometría, ésta no asiente correctamente en los refuerzos habilitados para ello. Por esto, una vez soldada íntegramente y con todas las operaciones realizadas, se procederá a la soldadura de los elementos de anclaje a la plataforma del vehículo, garantizando que el asiento de los mismos es óptimo.

V.2. Cálculo del presupuesto.

Conocido ya el proceso de fabricación y montaje de la estructura, se procederá a realizar un cálculo del presupuesto completo de los tres modelos propuestos. Este

Selección del proceso de fabricación y cálculo del presupuesto.

cálculo se subdividirá en cuatro apartados diferentes: Cálculo del coste y peso de las barras de la estructura, coste y tiempo del proceso de soldadura, coste y tiempo del corte y doblado de los tubos, y finalmente elementos adicionales necesarios como las cartelas, tornillería o protecciones específicas indicadas en la normativa.

Cálculo del coste y peso de la materia prima

Pese a que en el proceso de diseño ya se han introducido las propiedades del material, y el programa a partir de éstas calcula el peso de manera automática, en este paso se realizará el cálculo de manera manual, ya que en los catálogos obtenidos se indica el peso por metro de cada elemento suministrado en función del diámetro y el espesor. Este paso se repite para observar si se produce una variación significativa en el peso de la estructura, que implicaría un error en alguno de los cálculos o en los datos introducidos en el material en la fase de diseño.

Primero hay que nombrar a cada uno de los elementos de la estructura para referenciarlo en el presupuesto y poder hacerlo de manera organizada (Consultar Anexo IV con los planos y las denominaciones de los elementos).

Una vez conocida la denominación de todos los elementos de la estructura, se procederá con el cálculo. Primero se medirá la longitud de cada uno de ellos a partir del Croquis 3-D empleado en el diseño de las piezas. A continuación se introducirá el diámetro, de 50 mm en los arcos principales y 40 mm en el resto. Después, se seleccionará automáticamente el peso por metro de longitud de cada uno de los elementos. Estos valores se han obtenido a partir del catálogo de la empresa Protubsa [13].

A continuación se consultará el coste unitario de cada uno de los diámetros de los tubos. Conocido el coste se debe insertar la longitud de suministro de cada diámetro. En el caso de los diámetros de 40 mm la longitud es de metro y medio. En los de 50 mm se corta a medida, por lo que la longitud de suministro será la deseada. A continuación se obtienen las unidades necesarias por elemento.

En caso de que la longitud del elemento sea superior a la de suministro se necesitarán dos unidades, y si por el contrario se pueden combinar dos elementos en

Selección del proceso de fabricación y cálculo del presupuesto.

uno sin superar la longitud de suministro, se combinarán para reducir el impacto económico.

Finalmente se calculará el coste total, contando las unidades de diámetro 40 necesarias y el coste de cada una y la longitud del diámetro 50 y el coste por metro. De manera adicional se calculará el peso, ya que se conoce la longitud de cada elemento y

Materia prima										
Elemento	Longitud [mm]	Diámetro [mm]	Peso teórico [kg/m]	Coste unitario	Longitud unidad [m]	Unidades necesarias	Coste total	Peso total [kg]		
A	1048	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	1,96		
Arco delantero	3682	50	2,37	40,00 €	4	1	160,00 €	8,73		
Arco principal	2826	50	2,37	40,00 €	3	1	120,00 €	6,70		
B	1093	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	2,04		
C	1093	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	2,04		
D	1017	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	1,90		
E	1017	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	1,90		
F	650	40	1,87	33,00 €	1,5	F+G	- €	1,22		
G	650	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	1,22		
H	1318	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	2,46		
I	1318	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	2,46		
J	266	40	1,87	33,00 €	1,5	J+L	- €	0,50		
K	266	40	1,87	33,00 €	1,5	M+K	- €	0,50		
L	795	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	1,49		
M	795	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	1,49		
N	1189	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	2,22		
Total							13	643,00 €	38,83	

Tabla 6: Cálculo del coste de la materia prima del diseño inicial

Materia prima										
Elemento	Longitud [mm]	Diámetro [mm]	Peso teórico [kg/m]	Coste unitario	Longitud unidad [m]	Unidades necesarias	Coste total	Peso total [kg]		
A	1048	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	1,96		
Arco delantero	3682	50	2,37	40,00 €	4	1	160,00 €	8,73		
Arco principal	2826	50	2,37	40,00 €	3	1	120,00 €	6,70		
B	1093	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	2,04		
C	1093	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	2,04		
D	650	40	1,87	33,00 €	1,5	D+I	- €	1,22		
E	650	40	1,87	33,00 €	1,5	E+J	- €	1,22		
F	266	40	1,87	33,00 €	1,5	F+G	- €	0,50		
G	266	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	0,50		
H	1027	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	1,92		
I	795	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	1,49		
J	795	40	1,87	33,00 €	1,5	1	- €	1,49		
K	1189	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	2,22		
Total							10	511,00 €	32,02	

Tabla 5: Cálculo del coste de la materia prima del diseño optimizado.

Materia prima										
Elemento	Longitud [mm]	Diámetro [mm]	Peso teórico [kg/m]	Coste unitario	Longitud unidad [m]	Unidades necesarias	Coste total	Peso total [kg]		
E	795	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	1,49		
F	795	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	1,49		
A	997	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	1,86		
B	997	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	1,86		
C	1189	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	2,22		
D	1189	40	1,87	33,00 €	1,5	1	33,00 €	2,22		
Arco principal	2826	50	2,37	40,00 €	3	1	120,00 €	6,70		
Total							7	318,00 €	17,85	

Tabla 4: Cálculo del coste de la materia prima del diseño alternativo.

el peso específico de cada uno.

Selección del proceso de fabricación y cálculo del presupuesto.

Cálculo del coste de la soldadura

El siguiente paso consistirá en calcular el coste de la soldadura de los elementos. Para ello se realizará la operación de cordón de soldadura en el programa SolidWorks entre todas las partes de la jaula que sean necesarias soldar. Una vez realizados los diferentes cordones de soldadura, con la herramienta de medición de dicho programa se obtendrán las dimensiones de cada uno.

Estas dimensiones se introducirán en una tabla realizada anteriormente en Excel, indicando los elementos que se unen y la longitud de dicha soldadura. El siguiente parámetro a obtener es la velocidad de avance de la soldadura para calcular el tiempo de creación del cordón. Esta velocidad depende tanto del espesor del material como del tipo de soldadura, seleccionando un valor aproximado de 3,5 mm/s. El siguiente paso consiste en conocer el caudal de gas, que depende del diámetro de la boquilla que varía en función del espesor de las chapas a soldar. Como el espesor es de 2 mm, se ha obtenido un diámetro de 9mm y un caudal de 9 l/min [14]. A continuación se calculará aproximadamente el peso del electrodo necesario para realizar la soldadura. Este se obtiene a partir de la densidad del electrodo y el volumen necesario, considerando que el rendimiento de la soldadura no es óptimo. De esta manera, se ha obtenido un valor aproximado a partir de una tabla [19].

DIAMETRO DE LA BOQUILLA, depende del espesor de las chapas

ESPEJOR	Ø BOQUILLA	CAUDAL DE GAS
1	6 mm	Depende de la boquilla a utilizar. Suele utilizarse, como máximo, 1 litro por milímetro de Ø de boquilla.
1 a 2	8 o 9	
2 a 4	10 o 11	
4 a 6	12 o 13	

Ilustración 78: Obtención caudal de gas.

Selección del proceso de fabricación y cálculo del presupuesto.

SOLDADURA DE FILETE HORIZONTAL

Medida del pie Pulgada / milímetro	Peso de los electrodos requeridos* (Aproximadamente)		Acero depositado	
	Libras por pie lineal	Kgs. Por mt lineal	Libras por pie lineal	Kgs. Por pie lineal
1/8 - 3.175	0,048	0,072	0,027	0,039
3/16 - 4.763	0,113	0,167	0,063	0,092
1/4 - 6.350	0,189	0,322	0,106	0,157
5/16 - 7.938	0,296	0,439	0,166	0,246
3/8 - 9.525	0,427	0,634	0,239	0,354
1/2 - 12.7	0,760	1,134	0,425	0,633
5/8 - 15.875	1,185	1,764	0,663	0,987
3/4 - 19.05	1,705	2,535	0,955	1,42
1 - 25.4	3,030	4,506	1,698	2,525

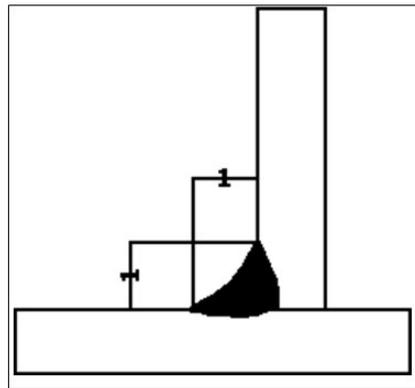


Ilustración 79: Obtención peso del electrodo empleado

Para el cálculo de la mano de obra se ha supuesto un gasto de 40 €/hora y un tiempo de preparación de siete minutos por pieza. Se esta manera el precio de la mano de obra se obtiene a partir del tiempo total empleado, suma del tiempo de preparación más el tiempo de soldadura, multiplicado por el coste por hora.

Por otra parte se ha calculado el coste de la materia prima, que incluye material de aportación y gas de protección. Para ello se ha obtenido el precio de la bobina del material deseado y el de la bombona de gas. Conocido el peso necesario de electrodo y el caudal del gas, se pueden obtener ambos costes.

El coste final consiste en la suma tanto del coste de la mano de obra como el coste de los materiales. Este cálculo se realizará en todas las uniones a realizar, modificándose únicamente la longitud del cordón de soldadura.

Selección del proceso de fabricación y cálculo del presupuesto.

Coste soldadura TIG Corriente continua polaridad indirecta								
Unión	Longitud [mm]	Velocidad avance [mm/s]	Tiempo empleado [s]	Cantidad Gas [l]	Cantidad electrodo [kg]	Coste mano de obra	Coste material	Coste total
Anclajes centrales	629	3,5	600	89,97	0,105	6,66 €	0,98 €	7,65 €
Anclajes traseros	398	3,5	534	80,04	0,066	5,93 €	0,82 €	6,75 €
Arco delantero-A	133	3,5	458	68,72	0,022	5,09 €	0,63 €	5,72 €
Arco delantero-A'	133	3,5	458	68,72	0,022	5,09 €	0,63 €	5,72 €
Arco delantero-B	178	3,5	471	70,61	0,030	5,23 €	0,66 €	5,89 €
Arco delantero-B'	240	3,5	489	73,28	0,040	5,43 €	0,70 €	6,13 €
Arco delantero-C	178	3,5	471	70,61	0,030	5,23 €	0,66 €	5,89 €
Arco delantero-C'	240	3,5	489	73,28	0,040	5,43 €	0,70 €	6,13 €
Arco delantero-D	197	3,5	476	71,43	0,033	5,29 €	0,67 €	5,96 €
Arco delantero-E	197	3,5	476	71,43	0,033	5,29 €	0,67 €	5,96 €
Arco delantero-F	132	3,5	458	68,67	0,022	5,09 €	0,63 €	5,71 €
Arco delantero-G	132	3,5	458	68,67	0,022	5,09 €	0,63 €	5,71 €
Arco principal-D'	198	3,5	476	71,47	0,033	5,29 €	0,67 €	5,97 €
Arco principal-E'	198	3,5	476	71,47	0,033	5,29 €	0,67 €	5,97 €
Arco principal-F'	147	3,5	462	69,32	0,025	5,13 €	0,64 €	5,77 €
Arco principal-G'	147	3,5	462	69,32	0,025	5,13 €	0,64 €	5,77 €
Arco principal-J	166	3,5	467	70,10	0,028	5,19 €	0,65 €	5,84 €
Arco principal-J'	168	3,5	468	70,20	0,028	5,20 €	0,65 €	5,85 €
Arco principal-K	166	3,5	467	70,10	0,028	5,19 €	0,65 €	5,84 €
Arco principal-K'	168	3,5	468	70,20	0,028	5,20 €	0,65 €	5,85 €
Arco principal-L	135	3,5	459	68,78	0,023	5,09 €	0,63 €	5,72 €
Arco principal-M	135	3,5	459	68,78	0,023	5,09 €	0,63 €	5,72 €
Arco principal-N	187	3,5	474	71,03	0,031	5,26 €	0,66 €	5,93 €
Cartela	710	3,5	623	93,43	0,119	6,92 €	1,04 €	7,96 €
Cartela	710	3,5	623	93,43	0,119	6,92 €	1,04 €	7,96 €
D'-E'	154	3,5	464	69,61	0,026	5,16 €	0,64 €	5,80 €
D-E	154	3,5	464	69,61	0,026	5,16 €	0,64 €	5,80 €
F-H	169	3,5	468	70,25	0,028	5,20 €	0,65 €	5,86 €
G-I	169	3,5	468	70,25	0,028	5,20 €	0,65 €	5,86 €
H'-Arco principal	168	3,5	468	70,22	0,028	5,20 €	0,65 €	5,85 €
I'-Arco principal	168	3,5	468	70,22	0,028	5,20 €	0,65 €	5,85 €
J'-K'	153	3,5	464	69,55	0,026	5,15 €	0,64 €	5,79 €
J-K	153	3,5	464	69,55	0,026	5,15 €	0,64 €	5,79 €
L-N	145	3,5	462	69,23	0,024	5,13 €	0,63 €	5,76 €
							Total	205,72 €

Tabla 9: Coste soldadura diseño inicial

Coste soldadura TIG Corriente continua polaridad indirecta								
Unión	Longitud [mm]	Velocidad avance [mm/s]	Tiempo empleado [s]	Cantidad Gas [l]	Cantidad electrodo [kg]	Coste mano de obra	Coste material	Coste total
Anclajes centrales	629	3,5	600	89,97	0,105	6,66 €	2,43 €	9,10 €
Anclajes traseros	398	3,5	534	80,04	0,066	5,93 €	1,73 €	7,66 €
Arco delantero-A	133	3,5	458	68,72	0,022	5,09 €	0,93 €	6,02 €
Arco delantero-A'	133	3,5	458	68,72	0,022	5,09 €	0,93 €	6,02 €
Arco delantero-B	158	3,5	465	69,75	0,026	5,17 €	1,01 €	6,17 €
Arco delantero-B'	240	3,5	489	73,28	0,040	5,43 €	1,25 €	6,68 €
Arco delantero-C	158	3,5	465	69,75	0,026	5,17 €	1,01 €	6,17 €
Arco delantero-C'	240	3,5	489	73,28	0,040	5,43 €	1,25 €	6,68 €
Arco delantero-D	132	3,5	458	68,67	0,022	5,09 €	0,93 €	6,02 €
Arco delantero-E	132	3,5	458	68,67	0,022	5,09 €	0,93 €	6,02 €
Arco principal-D	133	3,5	458	68,71	0,022	5,09 €	0,93 €	6,02 €
Arco principal-E	133	3,5	458	68,71	0,022	5,09 €	0,93 €	6,02 €
Arco principal-F'	168	3,5	468	70,22	0,028	5,20 €	1,04 €	6,24 €
Arco principal-G'	168	3,5	468	70,22	0,028	5,20 €	1,04 €	6,24 €
Arco principal-H	133	3,5	458	68,72	0,022	5,09 €	0,93 €	6,02 €
Arco principal-H'	133	3,5	458	68,72	0,022	5,09 €	0,93 €	6,02 €
Arco principal-I	135	3,5	459	68,78	0,023	5,09 €	0,94 €	6,03 €
Arco principal-J	135	3,5	459	68,78	0,023	5,09 €	0,94 €	6,03 €
Arco principal-K	187	3,5	474	71,03	0,031	5,26 €	1,10 €	6,36 €
Cartela	710	3,5	623	93,43	0,119	6,92 €	2,68 €	9,60 €
Cartela	710	3,5	623	93,43	0,119	6,92 €	2,68 €	9,60 €
D-F	169	3,5	468	70,25	0,028	5,20 €	1,04 €	6,24 €
E-G	169	3,5	468	70,25	0,028	5,20 €	1,04 €	6,24 €
J'-K'	168	3,5	468	70,20	0,028	5,20 €	1,04 €	6,24 €
							Total	159,46 €

Tabla 8: Coste soldadura diseño optimizado.

Coste soldadura TIG Corriente continua polaridad indirecta								
Unión	Longitud [mm]	Velocidad avance [mm/s]	Tiempo empleado [s]	Cantidad Gas [l]	Cantidad electrodo [kg]	Coste mano de obra	Coste material	Coste total
Anclajes centrales	315	3,5	510	76,49	0,053	5,67 €	1,48 €	7,15 €
Anclajes traseros	398	3,5	534	80,04	0,066	5,93 €	1,73 €	7,66 €
Arco principal-A	139	3,5	460	68,97	0,023	5,11 €	0,95 €	6,06 €
Arco principal-B	139	3,5	460	68,97	0,023	5,11 €	0,95 €	6,06 €
Arco principal-C	178	3,5	471	70,65	0,030	5,23 €	1,07 €	6,30 €
Arco principal-D	178	3,5	471	70,65	0,030	5,23 €	1,07 €	6,30 €
Arco principal-E	135	3,5	459	68,78	0,023	5,09 €	0,94 €	6,03 €
Arco principal-F	135	3,5	459	68,78	0,023	5,09 €	0,94 €	6,03 €
C'-D'	153	3,5	464	69,57	0,026	5,15 €	0,99 €	6,15 €
C-D	153	3,5	464	69,57	0,026	5,15 €	0,99 €	6,15 €
E'-C'	80	3,5	443	66,43	0,013	4,92 €	0,77 €	5,69 €
F'-D'	80	3,5	443	66,43	0,013	4,92 €	0,77 €	5,69 €
							Total	75,27 €

Tabla 7: Coste soldadura diseño alternativo

Selección del proceso de fabricación y cálculo del presupuesto.

Cálculo del coste de mecanizado

El siguiente cálculo a realizar será el coste de mecanizado de los diferentes elementos que conforman la estructura. Estas operaciones serán las de corte y doblado de los tubos.

Para el cálculo de esta operación se debe conocer el tiempo de corte, el coste de la maquinaria y de la mano de obra. Primero se ha simplificado la geometría de corte y se ha supuesto una longitud equivalente a la de soldadura. Esta longitud no representa a la real, ya que en un corte perpendicular sería el diámetro del tubo, pero como hay diferentes geometrías complejas se ha optado por esta medida para representar los diferentes cortes a realizar.

Para conocer la velocidad de corte de una sierra de disco se han consultado las recomendaciones de la empresa *Kinkelder*, especializada en este tipo de cortes, obteniendo un valor aproximado de 280 m/min y un avance por diente de 0.15 mm. Este segundo dato sería interesante de cara a conocer el desgaste de la herramienta, la duración de la misma y el disco necesario para realizar los cortes, pero para este caso en particular, observando el número de cortes a realizar y la longitud de los mismos, no es necesario conocer el desgaste del disco. De esta manera, conocida la longitud del corte y la velocidad de avance podemos obtener el tiempo de corte. A este tiempo se le han añadido siete minutos de colocación de los elementos y preparación de la máquina. Para el precio final se supone un coste de mano de obra de 40 €/hora a calcular sobre el tiempo de corte más el de preparación.

Selección del proceso de fabricación y cálculo del presupuesto.

Coste mecanizado							
Unión	Longitud corte [mm]	Velocidad corte [m/min]	Avance [mm/diente]	Tiempo doblado [min]	Tiempo empleado [min]	Coste mano de obra	Coste total
Anclajes centrales	629	280	0,15		9,25	6,17 €	7,46 €
Anclajes traseros	398	280	0,15		8,42	5,61 €	6,79 €
Arco delantero-A	398	280	0,15		8,42	5,61 €	6,79 €
Arco delantero-A'	133	280	0,15		7,48	4,98 €	6,03 €
Arco delantero-B	133	280	0,15		7,48	4,98 €	6,03 €
Arco delantero-B'	178	280	0,15		7,63	5,09 €	6,16 €
Arco delantero-C	240	280	0,15		7,86	5,24 €	6,34 €
Arco delantero-C'	178	280	0,15		7,63	5,09 €	6,16 €
Arco delantero-D	240	280	0,15		7,86	5,24 €	6,34 €
Arco delantero-E	197	280	0,15		7,70	5,14 €	6,21 €
Arco delantero-F	132	280	0,15		7,47	4,98 €	6,03 €
Arco delantero-G	132	280	0,15		7,47	4,98 €	6,03 €
Arco principal-D'	198	280	0,15		7,71	5,14 €	6,22 €
Arco principal-E'	198	280	0,15		7,71	5,14 €	6,22 €
Arco principal-F'	147	280	0,15		7,53	5,02 €	6,07 €
Arco principal-G'	147	280	0,15		7,53	5,02 €	6,07 €
Arco principal-J	166	280	0,15		7,59	5,06 €	6,12 €
Arco principal-J'	168	280	0,15		7,60	5,07 €	6,13 €
Arco principal-K	166	280	0,15		7,59	5,06 €	6,12 €
Arco principal-K'	168	280	0,15		7,60	5,07 €	6,13 €
Arco principal-L	135	280	0,15		7,48	4,99 €	6,04 €
Arco principal-M	135	280	0,15		7,48	4,99 €	6,04 €
Arco principal-N	187	280	0,15		7,67	5,11 €	6,19 €
Cartela	710	280	0,15		9,54	6,36 €	7,69 €
Cartela	710	280	0,15		9,54	6,36 €	7,69 €
D'-E'	154	280	0,15		7,55	5,03 €	6,09 €
D-E	154	280	0,15		7,55	5,03 €	6,09 €
Doblado 1				10		6,67 €	8,07 €
Doblado 2				10		6,67 €	8,07 €
Doblado 3				10		6,67 €	8,07 €
Doblado 4				10		6,67 €	8,07 €
Doblado 5				10		6,67 €	8,07 €
Doblado 6				10		6,67 €	8,07 €
F-H	169	280	0,15		7,60	5,07 €	6,13 €
G-I	169	280	0,15		7,60	5,07 €	6,13 €
H'-Arco principal	168	280	0,15		7,60	5,07 €	6,13 €
I'-Arco principal	168	280	0,15		7,60	5,07 €	6,13 €
J'-K'	153	280	0,15		7,55	5,03 €	6,09 €
J-K	153	280	0,15		7,55	5,03 €	6,09 €
L-N	145	280	0,15		7,52	5,01 €	6,07 €
						Total	262,45 €

Tabla 11: Coste del mecanizado del diseño inicial.

Coste mecanizado							
Unión	Longitud corte [mm]	Velocidad corte [m/min]	Avance [mm/diente]	Tiempo doblado [min]	Tiempo empleado [min]	Coste mano de obra	Coste total
Anclajes centrales	629	280	0,15		9,25	6,17 €	6,17 €
Anclajes traseros	398	280	0,15		8,42	5,61 €	5,61 €
Arco delantero-A	133	280	0,15		7,48	4,98 €	4,98 €
Arco delantero-A'	133	280	0,15		7,48	4,98 €	4,98 €
Arco delantero-B	158	280	0,15		7,56	5,04 €	5,04 €
Arco delantero-B'	240	280	0,15		7,86	5,24 €	5,24 €
Arco delantero-C	158	280	0,15		7,56	5,04 €	5,04 €
Arco delantero-C'	240	280	0,15		7,86	5,24 €	5,24 €
Arco delantero-D	132	280	0,15		7,47	4,98 €	4,98 €
Arco delantero-E	132	280	0,15		7,47	4,98 €	4,98 €
Arco principal-D	133	280	0,15		7,48	4,98 €	4,98 €
Arco principal-E	133	280	0,15		7,48	4,98 €	4,98 €
Arco principal-F'	168	280	0,15		7,60	5,07 €	5,07 €
Arco principal-G'	168	280	0,15		7,60	5,07 €	5,07 €
Arco principal-H	133	280	0,15		7,48	4,98 €	4,98 €
Arco principal-H'	133	280	0,15		7,48	4,98 €	4,98 €
Arco principal-I	135	280	0,15		7,48	4,99 €	4,99 €
Arco principal-J	135	280	0,15		7,48	4,99 €	4,99 €
Arco principal-K	187	280	0,15		7,67	5,11 €	5,11 €
Cartela	710	280	0,15		9,54	6,36 €	6,36 €
Cartela	710	280	0,15		9,54	6,36 €	6,36 €
D-F	169	280	0,15		7,60	5,07 €	5,07 €
Doblado 1				10		6,67 €	6,67 €
Doblado 2				10		6,67 €	6,67 €
Doblado 3				10		6,67 €	6,67 €
Doblado 4				10		6,67 €	6,67 €
Doblado 5				10		6,67 €	6,67 €
Doblado 6				10		6,67 €	6,67 €
E-G	169	280	0,15		7,60	5,07 €	5,07 €
J'-K'	168	280	0,15		7,60	5,07 €	5,07 €
						Total	165,35 €

Tabla 10: Coste del mecanizado del diseño optimizado

Selección del proceso de fabricación y cálculo del presupuesto.

Unión	Longitud corte [mm]	Velocidad corte [m/min]	Coste mecanizado			Coste mano de obra	Coste total
			Avance [mm/diente]	Tiempo doblado [min]	Tiempo empleado [min]		
Anclajes centrales	315	6000	7,05		7,05	4,70 €	4,70 €
Anclajes traseros	398	6000	7,07		7,07	4,71 €	4,71 €
Arco principal-A	139	280	0,15		7,50	5,00 €	5,00 €
Arco principal-B	139	6000	7,02		7,02	4,68 €	4,68 €
Arco principal-C	178	6000	7,03		7,03	4,69 €	4,69 €
Arco principal-D	178	6000	7,03		7,03	4,69 €	4,69 €
Arco principal-E	135	6000	7,02		7,02	4,68 €	4,68 €
Arco principal-F	135	6000	7,02		7,02	4,68 €	4,68 €
C-D'	153	6000	7,03		7,03	4,68 €	4,68 €
C-D	153	6000	7,03		7,03	4,68 €	4,68 €
Doblado 1				10		6,67 €	6,67 €
Doblado 2				10		6,67 €	6,67 €
E-C'	80	6000	7,01		7,01	4,68 €	4,68 €
F-D'	80	6000	7,01		7,01	4,68 €	4,68 €
						Total	69,88 €

Tabla 12: Coste del mecanizado del diseño alternativo.

El cálculo del gasto de doblado es considerablemente más sencillo, puesto que únicamente se debe colocar el elemento en cuestión en la dobladora y realizar la operación en frío. De esta manera se ha supuesto un tiempo empleado por elemento de diez minutos, considerando colocación y doblado, y un coste de la mano de obra de 40 €/hora, idéntico al de la operación de corte.

Elementos adicionales.

Se han considerado dentro de este apartado todos los elementos que conforman la estructura no contabilizados en la materia prima del primer apartado. Estos elementos son: chapas de anclaje de la estructura al piso del vehículo, cartelas si corresponde, tornillería (tornillo y tuerca) y elementos de protección de los tubos si fuere necesario.

Para los tornillos de anclaje de la estructura se debe tener en cuenta que la normativa indica que deberán ser de calidad 8.8 ISO Estándar y M8.

Por otra parte, en el Anexo J se recoge que los elementos que puedan estar en contacto con los ocupantes deben estar protegidos por un material no inflamable y en la Directiva 74/60/CEE se indica que tendrán que estar recubiertos por un material susceptible de disipar energía. Por ello se ha considerado que el material homologado por la FIA para la protección de las estructuras cumple de manera adicional con los requisitos necesarios para considerarse un material capaz de disipar energía.

Selección del proceso de fabricación y cálculo del presupuesto.

Elementos adicionales			
Elemento	Cantidad	Coste unitario	Coste total
Chapa anclaje	6	5,00 €	30,00 €
Cartela	2	5,00 €	10,00 €
Tornillos anclaje FT097327 65mm	20	2,28 €	45,60 €
Tuerca anclaje	20	0,10 €	2,00 €
Protección tubos 50mm	3	33,00 €	99,00 €
Protección tubos 40mm	6	33,00 €	198,00 €
Taladrado bases anclaje	20	1,00 €	20,00 €
Fresado orificios cartelas	6	5,00 €	30,00 €
Total			434,60 €

Tabla 13: Elementos adicionales diseño inicial.

Elementos adicionales			
Elemento	Cantidad [m ²]	Coste unitario	Coste total
Chapa anclaje	6	5,00 €	30,00 €
Cartela	2	5,00 €	10,00 €
Tornillos anclaje FT097327 65	20	2,28 €	45,60 €
Tuerca anclaje	20	0,10 €	2,00 €
Protección tubos 50mm	3	33,00 €	99,00 €
Protección tubos 40mm	9	33,00 €	297,00 €
Taladrado bases anclaje	20	1,00 €	20,00 €
Total			503,60 €

Tabla 14: Elementos adicionales diseño optimizado.

Elementos adicionales			
Elemento	Cantidad [m ²]	Coste unitario	Coste total
Chapa anclaje	6	5,00 €	30,00 €
Cartela	0	5,00 €	- €
Tornillos anclaje FT097327 65mm	20	2,28 €	45,60 €
Tuerca anclaje	20	0,10 €	2,00 €
Protección tubos 50mm	0	33,00 €	- €
Protección tubos 40mm	0	33,00 €	- €
Taladrado bases anclaje	20	1,00 €	20,00 €
Total			97,60 €

Tabla 15: Elementos adicionales diseño alternativo.

V.3. Coste final

Una vez calculados los diferentes subapartados en los que se ha dividido el presupuesto, el coste total consistirá en la suma de todos ellos aplicando el IVA necesario en los apartados correspondientes.

Selección del proceso de fabricación y cálculo del presupuesto.

Para el coste de los tubos seleccionados y los elementos adicionales, al estar suministrados por páginas de compra online, está el IVA aplicable incluido. Sin embargo, en el cálculo de la mano de obra necesaria no se ha considerado el IVA, por lo que se debe aplicar. Consultando las diferentes modalidades de impuestos existentes y la aplicación de cada una de ellas se obtiene que el IVA a añadir a estos subapartados es del 21%. Su cálculo se ha realizado de la siguiente manera:

Presupuesto final diseño inicial	
Precio productos con IVA	1.146,60 €
Precio productos sin IVA	468,16 €
IVA aplicable	21%
Importe IVA	98,31 €
Importe total	1.713,08 €
Presupuesto final diseño optimizado	
Precio productos con IVA	978,60 €
Precio productos sin IVA	324,81 €
IVA aplicable	21%
Importe IVA	68,21 €
Importe total	1.371,62 €
Presupuesto final diseño alternativo	
Precio productos con IVA	415,60 €
Precio productos sin IVA	145,15 €
IVA aplicable	21%
Importe IVA	30,48 €
Importe total	591,24 €

Observando los resultados se puede apreciar una gran diferencia de precio entre todos los diseños. Esto se debe a que entre el diseño inicial y el optimizado se ha reducido de manera significativa el número de elementos a emplear, disminuyendo igualmente el coste de mano de obra y materia prima. En lo relativo al diseño alternativo, al ser una estructura más simple se reducen igualmente los dos aspectos anteriores, pero añadiendo el hecho de que al estar situada tras los asientos de los ocupantes no es necesario instalar elementos de protección adicionales. Ello provoca una reducción del presupuesto de manera muy considerable.

Conclusión

VI. Conclusión

Analizando el objetivo del trabajo, que consistía en obtener un diseño apto tanto para la normativa de competición como para el uso diario por la vía pública, se puede confirmar que, con los requisitos actuales en la normativa de circulación y los aplicables según la normativa FIA y la normativa propia de la FEDACV, es viable tanto la fabricación como el diseño de una estructura que cumpla ambos requisitos de manera simultánea.

Conocidos los tres diseños realizados, el ámbito de aplicación de cada uno de ellos y el coste y peso de las estructuras, se debe proceder con la selección del más adecuado para el uso del vehículo.

Ante la opción de seleccionar el diseño inicial, que ha sido el primero en obtenerse, o un segundo diseño fruto de la evolución del anterior, es aconsejable el segundo, puesto que el coste de materia prima y fabricación es significativamente menor (una reducción cercana a 100€ de materia prima y ligeramente inferior a 150€ de mano de obra entre soldadura y mecanizado), y el peso final de la estructura se reduce de manera similar (de 38,83 kg a 32,02 kg en el diseño optimizado). Estas modificaciones realizadas entre un diseño y el otro no afectan de manera alguna a la resistencia de la estructura, garantizando ambos la seguridad de los ocupantes.

En contraposición, podría resultar interesante seleccionar la estructura inicial. Esto se debe a que, dependiendo de la categoría en la que se inscriba el vehículo, se exigen unos requisitos mínimos de peso, que en caso de no cumplirse podrían significar la negativa de la organización para la participación en la prueba. De esta manera, instalando la estructura más pesada se puede facilitar el cumplimiento de esta exigencia.

Por otra parte, debe plantearse la selección de un diseño que cumpla con el Anexo J, para la participación del mismo en las pruebas de velocidad, u otro que no cumpla con esta normativa pero sí con la de circulación. Se trata del diseño alternativo propuesto, con un coste bastante más reducido que el resto, y con un peso igualmente inferior. Sin embargo, esta estructura posee una resistencia frente a los accidentes bastante más reducida que las estructuras completas, puesto que se compone del arco principal únicamente.

Conclusión

El beneficio de esta estructura alternativa se basa principalmente en el reducido precio, debido a que el número de elementos y la complejidad del diseño es menor. Aunque si se va a dedicar el vehículo a un uso prácticamente diario con participación en pruebas de regularidad (y no de velocidad), instalando únicamente un arco de seguridad principal se mantiene la comodidad dentro del habitáculo, puesto que no interfiere en la zona de asiento de los ocupantes ni en la entrada y salida del vehículo. Además, el reducido peso de la estructura y la facilidad de instalación, ya que es un elemento que se puede fabricar fuera del vehículo e instalarlo en una única pieza, hacen que este diseño sea el más apropiado para un uso diario del mismo.

Por ende, se reducen las opciones al diseño optimizado de la estructura completa y el diseño alternativo con un único arco principal.

Es en este momento cuando se debe replantear la finalidad del vehículo. Si se van a añadir elementos adicionales exigidos para la competición como los arneses y una sustitución de los asientos por baquets, que reducen la altura de conducción aumentando la distancia al techo, es preferible la instalación de una estructura completa, puesto que la resistencia es considerablemente superior y protege tanto de impactos posteriores como verticales, frontales y laterales. Sin embargo, si no se añaden estos elementos adicionales, cuya homologación no siempre es posible, se desaconseja instalar la estructura de seguridad completa. Esto se debe a que la capacidad de retención de un cinturón convencional en comparación con un arnés de competición es significativamente menor. Este hecho, considerando adicionalmente que con la instalación de la estructura se reduce el espacio disponible en el habitáculo, favorece que en caso de impacto frontal, lateral o vuelco de lugar a la colisión de alguno de los ocupantes con los elementos de la estructura que, pese a estar recubiertos de elementos protectores, ocasionen lesiones superiores a aquellas que se pretende evitar.

En conclusión, si la finalidad es exclusivamente ralis de regularidad y circulación por la vía pública se recomienda encarecidamente la instalación de una estructura formada por un único arco de seguridad. Si por el contrario se va a emplear el vehículo en pruebas de velocidad, se considera necesaria la instalación como mínimo de arneses de seguridad que impidan la proyección de los ocupantes contra la estructura.

Apéndices

Anexo I

Listado de ilustraciones

Ilustración 1: Imagen de un vehículo en el año 1910 preparado para disputar la Targa-Florio _____	10
Ilustración 2: Competidores del Acrópolis Rally of Greece en el año 1963 _____	11
Ilustración 3: MINI del equipo BMC disputando el Rallye Monte-Carlo en 1967 _____	12
Ilustración 4: Fiat 124 Spyder disputando el Rally Costa Brava 1972 del Campeonato de Europa _____	15
Ilustración 5: Audi Quattro del Grupo B junto al público. _____	16
Ilustración 6: Lancia Stratos con refuerzos exteriores para impactos. _____	18
Ilustración 7: Configuraciones básicas de una jaula según Anexo J _____	19
Ilustración 8: Sistema HANS en funcionamiento y su creador Robert Hubbard _____	20
Ilustración 9: Anclaje de un asiento _____	20
Ilustración 10: Fotografía del habitáculo de un vehículo de rali con los sistemas de seguridad obligatorios _____	21
Ilustración 11: Cartel informativo para la colocación del público de la RFEDA _____	22
Ilustración 12: Esquema del horario y recorrido del Rally de La Nucía con los tramos cronometrados en rojo _____	24
Ilustración 13: Dispositivo <i>Rallymeter</i> empleado en ralis de regularidad _____	27
Ilustración 14: Wolksvagen Golf y Audi Quattro en una competición de subidas. _____	29
Ilustración 15: Wolksvagen I.D. R, vehículo eléctrico que actualmente posee el récord de Pikes Peak _____	30
Ilustración 16: Peugeot procedente del Grupo B disputando el Rallye Dakar. _____	31
Ilustración 17: Diseño mínimo de una estructura de seguridad. _____	40
Ilustración 18: Medidas de los elementos del techo. _____	41
Ilustración 19: Medidas de la base de los arcos principales. _____	41
Ilustración 20: Vista frontal de la estructura. _____	42
Ilustración 21: Medidas de los elementos verticales del vehículo. _____	42

Anexo I

Ilustración 22: Vista lateral de la estructura. _____	43
Ilustración 23: Dimensiones de los anclajes traseros. _____	43
Ilustración 24: Diseño final del croquis 3-D. _____	44
Ilustración 25: Estructura final. _____	44
Ilustración 26: Requisitos de los elementos de la estructura según Anexo J [6]. _____	46
Ilustración 27: Composición química del acero E355 [12]. _____	47
Ilustración 28: Propiedades del material E355 [12]. _____	47
Ilustración 29: Esfuerzos indicados por Apéndice V. _____	48
Ilustración 30: Resultados primera simulación de la estructura. _____	51
Ilustración 31: Vista superior de la estructura. _____	52
Ilustración 32: Vista posterior de la estructura. _____	52
Ilustración 33: Vista lateral de la estructura. _____	53
Ilustración 34: Resultados de la primera simulación. _____	53
Ilustración 35: Requisitos exigidos en el Anexo J. _____	54
Ilustración 36: Vista lateral de la estructura con medidas del refuerzo. _____	55
Ilustración 37: Vista frontal de la estructura. _____	55
Ilustración 38: Resultados de la primera simulación. _____	56
Ilustración 39: Tensión axial y de flexión máximas de la segunda simulación. _____	57
Ilustración 40: Vista frontal de la estructura con las cartelas. _____	58
Ilustración 41: Vista frontal de las tensiones axiales y de flexión provocadas en la primera simulación. _____	59
Ilustración 42: Resultados de la primera simulación. _____	59
Ilustración 43: Vista frontal de los resultados de la segunda simulación. _____	60
Ilustración 44: Resultados obtenidos en la segunda simulación. _____	60
Ilustración 45: Vista frontal de las tensiones axiales y de flexión de la tercera simulación. _____	61
Ilustración 46: Resultados generados en la tercera simulación. _____	62
Ilustración 47: Tensión torsional provocada en la primera simulación. _____	62
Ilustración 48: Tensión torsional obtenida a partir de la segunda simulación. _____	63
Ilustración 49: Tensión torsional en la tercera simulación. _____	63
Ilustración 50: Resultados del desplazamiento provocado en la primera simulación. _____	65
Ilustración 51: Desplazamiento producido en la segunda simulación. _____	65
Ilustración 52: Desplazamiento obtenido a partir de la tercera simulación. _____	66
Ilustración 53: Dimensiones y ubicación de los orificios de las cartelas. _____	67

Anexo I

Ilustración 54: Estructura final optimizada. _____	67
Ilustración 55: Resultados de tensión axial y de flexión de la primera simulación. ____	68
Ilustración 56: Representación de tensiones axiales provocadas en la primera simulación (destacar el elemento horizontal sometido a tracción). _____	69
Ilustración 57: Resultados de las tensiones axiales y de flexión en la segunda simulación. _____	69
Ilustración 58: Tensiones axiales y de flexión obtenidas en la tercera simulación. ____	70
Ilustración 59: Resultados de tensión torsional obtenidos en la primera simulación. _	70
Ilustración 60: Tensión torsional generada en la segunda simulación. _____	71
Ilustración 61: Resultados tensión torsional obtenida en la tercera simulación. _____	71
Ilustración 62: Resultados del desplazamiento producido en la primera simulación. _	72
Ilustración 63: Desplazamiento provocado en la simulación número dos. _____	73
Ilustración 64: Desplazamiento obtenido en la tercera simulación. _____	73
Ilustración 65: Requisitos FACV ralis regularidad. _____	74
Ilustración 66: Diseño K-1 vehículos históricos. _____	75
Ilustración 67: Diseño K-13. _____	75
Ilustración 68: Vista posterior de la estructura. _____	76
Ilustración 69: Tensiones axiales y de flexión obtenidas en la primera simulación. ____	77
Ilustración 70: Resultados de tensiones axiales y de flexión provocados en la segunda simulación. _____	77
Ilustración 71: Tensiones axiales y de flexión obtenidas a partir de la tercera simulación. _____	78
Ilustración 72: Resultados de la tensión torsional en la primera simulación. _____	78
Ilustración 73: Tensión torsional obtenida en la segunda simulación. _____	79
Ilustración 74: Resultados de tensión torsional en la tercera simulación. _____	79
Ilustración 75: Deformación obtenida en la primera simulación. _____	81
Ilustración 76: Desplazamiento de los elementos provocado en la segunda simulación. _____	81
Ilustración 77: Deformación de los elementos en la tercera simulación. _____	82
Ilustración 78: Obtención caudal de gas. _____	91
Ilustración 79: Obtención peso del electrodo empleado _____	92
Ilustración 80: Gráfica representativa del límite elástico de los materiales que cumplen con los requisitos. _____	105
Ilustración 81: Resistencia a la fatiga del material a tratar. _____	107

Anexo II

Listado de tablas

Tabla 1: Cálculo de las tensiones de Von Mises del diseño inicial. _____	64
Tabla 2: Cálculo de las tensiones de Von Mises del diseño optimizado. _____	72
Tabla 3: Cálculo de la tensión de Von Mises del diseño alternativo. _____	80
Tabla 4: Cálculo del coste de la materia prima del diseño alternativo. _____	90
Tabla 5: Cálculo del coste de la materia prima del diseño optimizado. _____	90
Tabla 6: Cálculo del coste de la materia prima del diseño inicial _____	90
Tabla 7: Coste soldadura diseño alternativo _____	93
Tabla 8: Coste soldadura diseño optimizado. _____	93
Tabla 9: Coste soldadura diseño inicial _____	93
Tabla 10: Coste del mecanizado del diseño optimizado _____	95
Tabla 11: Coste del mecanizado del diseño inicial. _____	95
Tabla 12: Coste del mecanizado del diseño alternativo. _____	96
Tabla 13: Elementos adicionales diseño inicial. _____	97
Tabla 14: Elementos adicionales diseño optimizado. _____	97
Tabla 15: Elementos adicionales diseño alternativo. _____	97

Anexo III

Búsqueda de materiales en CES-Edupack

Partiendo de los requisitos exigidos a los materiales de la estructura, se han trasladado las necesidades establecidas por las normativas a cubrir al programa CES-Edupack. Entre estas se debe añadir que el material ha de ser fácilmente soldable y mecanizable en frío, considerando que se deben realizar estas operaciones durante la fase de fabricación.

Con los requisitos establecidos se ha obtenido un listado de materiales válidos, y entre ellos se ha seleccionado el de mayor límite elástico.

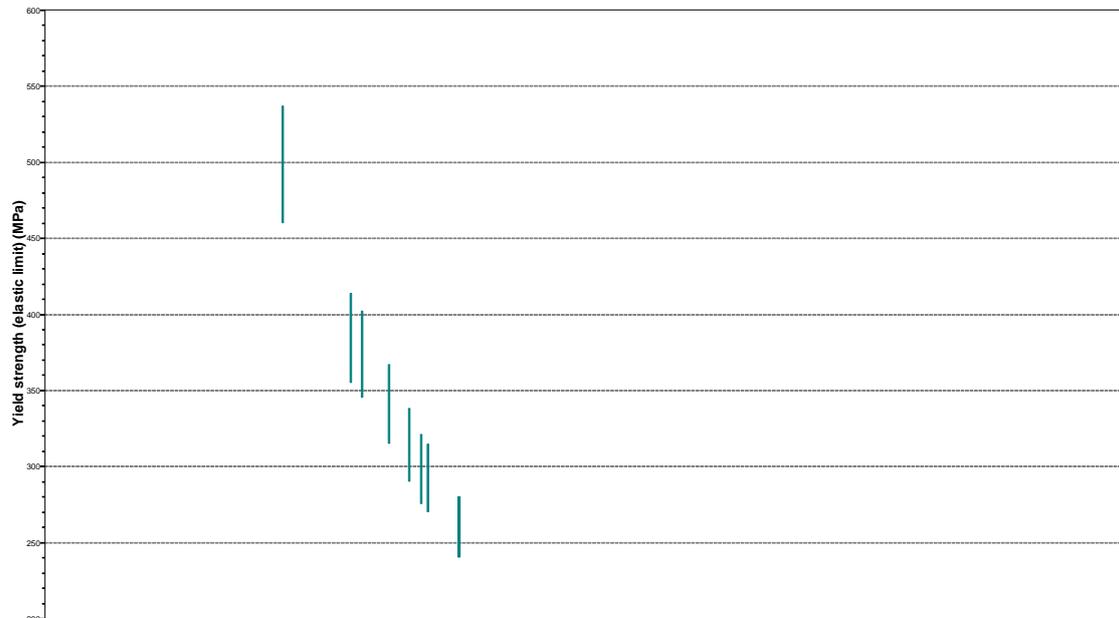


Ilustración 80: Gráfica representativa del límite elástico de los materiales que cumplen con los requisitos.

Observando la gráfica se aprecia un material con un límite elástico claramente superior al resto. A continuación se detallarán las propiedades del material. Se puede apreciar un límite elástico ubicado entre los 410 y los 575 MPa, muy inferior a los 640 MPa del acero E355 seleccionado.

Niobium-W-Hf alloy, Alloy Cb-129Y **General information**

Anexo III

Designation

Niobium-W-Hf alloy, Alloy Cb-129Y

Typical uses

Aerospace, high temperature applications

Composition overview

Compositional summary

Nb77-82 / Hf9-11 / W9-11 / Y0.05-0.3 (impurities: Ta<0.5, Zr<0.5, Other<0.1)

Material family

Metal (non-ferrous)

Base material

Nb (Niobium)

Composition detail (metals, ceramics and glasses)

Hf (hafnium)	9	-	11	%
Nb (niobium)	76,6	-	82	%
Ta (tantalum)	0	-	0,5	%
W (tungsten)	9	-	11	%
Y (yttrium)	0,05	-	0,3	%
Zr (zirconium)	0	-	0,5	%
Other	0	-	0,1	%

Price

Price	* 129	-	152	
	EUR/kg			
Price per unit volume	* 1,22e6	-	1,46e6	
	EUR/m ³			

Physical properties

Density	9,4e3	-	9,6e3	
	kg/m ³			

Mechanical properties

Young's modulus	108	-	116	GPa
Specific stiffness	11,4	-	12,2	
	MN.m/kg			
Yield strength (elastic limit)	410	-	575	MPa
Tensile strength	550	-	685	MPa
Specific strength	43,1	-	60,5	
	kN.m/kg			
Elongation strain	20	-	30	%
Compressive strength	* 410	-	575	MPa
Flexural modulus	* 108	-	116	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	* 410	-	575	MPa
Shear modulus	* 35	-	45	GPa
Bulk modulus	* 125	-	165	GPa
Poisson's ratio	* 0,36	-	0,38	
Shape factor	18			
Hardness - Vickers	190	-	270	HV
Elastic stored energy (springs)	769	-	1,44e3	
	kJ/m ³			
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 220	-	345	MPa
Fatigue strength model (stress amplitude)	* 204	-	371	MPa

Parámetros: Stress Ratio = -1, Number of Cycles = 1e7cycles

Anexo III

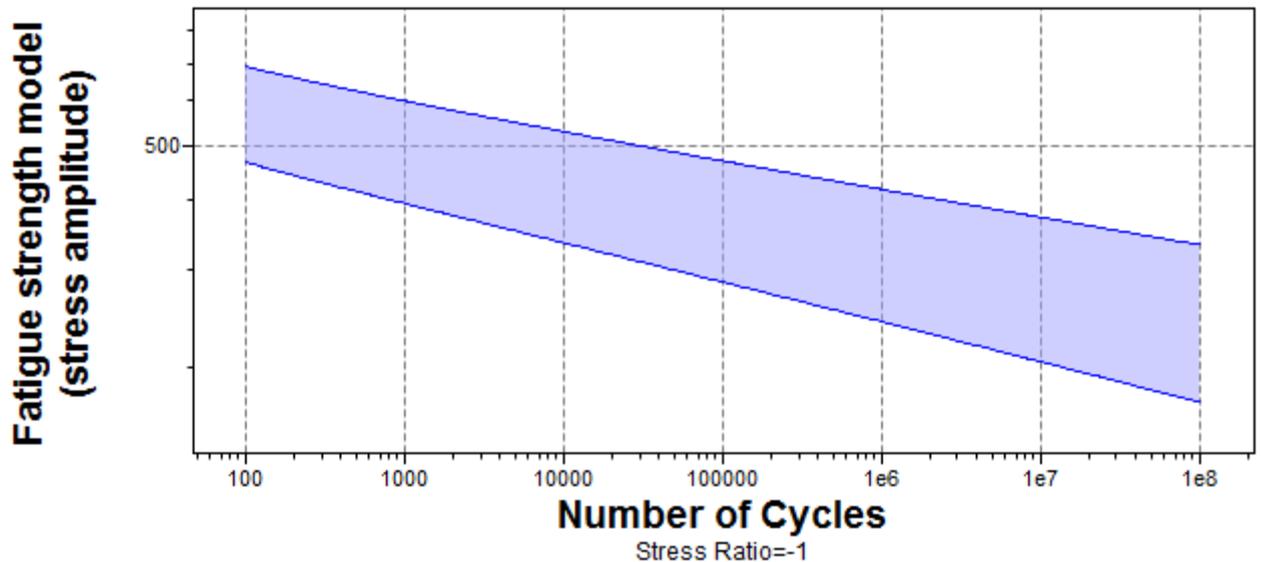


Ilustración 81: Resistencia a la fatiga del material a tratar.

Impact & fracture properties

Fracture toughness	* 120	-	150	
	MPa.m ^{0.5}			
Toughness (G)	130	-	199	
	kJ/m ²			

Thermal properties

Melting point	2,39e3	-	2,41e3	°C
Maximum service temperature	* 540	-	720	°C
Minimum service temperature	-273			°C
Thermal conductivity	67	-	72	
	W/m.°C			
Specific heat capacity	255	-	280	
	J/kg.°C			
Thermal expansion coefficient	6,8	-	6,95	
	µstrain/°C			
Thermal shock resistance	531	-	750	°C
Thermal distortion resistance	* 9,73	-	10,5	
	MW/m			
Latent heat of fusion	* 260	-	290	kJ/kg

Electrical properties

Electrical resistivity	* 9	-	12	
	µohm.cm			
Electrical conductivity	* 14,4	-	19,2	
	%IACS			
Galvanic potential	* -0,29	-	-0,21	V

Magnetic properties

Magnetic type	Non-magnetic			
---------------	--------------	--	--	--

Optical, aesthetic and acoustic properties

Transparency	Opaque			
Acoustic velocity	3,37e3	-	3,5e3	m/s
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 3e-4	-	5e-4	

Critical materials risk

Contains >5wt% critical elements?	Yes			
-----------------------------------	-----	--	--	--

Processing properties

Metal casting	Unsuitable			
Metal cold forming	Excellent			

Anexo III

Metal hot forming	Excellent	
Metal press forming	Acceptable	
Metal deep drawing	Limited use	
Machining speed	14	m/min
Weldability	Poor	

Notes

Preheating and post v

Durability

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Excellent
Weak acids	Excellent
Strong acids	Acceptable
Weak alkalis	Excellent
Strong alkalis	Limited use
Organic solvents	Excellent
Oxidation at 500C	Limited use
UV radiation (sunlight)	Excellent
Galling resistance (adhesive wear)	Unacceptable

Notes

Oxidizing the surface can reduce galling but increase abrasive wear.

Flammability Non-flammable

Corrosion resistance of metals

Stress corrosion cracking Not susceptible

Notes

Rated in chloride; May

Primary production energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production (virgin grade)	* 1,57e3	-	1,73e3	MJ/kg
Embodied energy, primary production (typical grade)	* 1,27e3	-	1,44e3	MJ/kg
CO2 footprint, primary production (virgin grade)	* 105	-	116	kg/kg
CO2 footprint, primary production (typical grade)	* 85,6	-	96,6	kg/kg
Water usage	* 917	-	1,01e3	l/kg

Processing energy, CO2 footprint & water

Casting energy	* 10,5	-	11,6	MJ/kg
Casting CO2	* 0,789	-	0,872	kg/kg
Casting water	* 19,9	-	29,9	l/kg
Roll forming, forging energy	* 3,52	-	3,89	MJ/kg
Roll forming, forging CO2	* 0,264	-	0,292	kg/kg
Roll forming, forging water	* 3,06	-	4,59	l/kg
Extrusion, foil rolling energy	* 6,76	-	7,47	MJ/kg
Extrusion, foil rolling CO2	* 0,507	-	0,56	kg/kg
Extrusion, foil rolling water	* 4,44	-	6,66	l/kg
Wire drawing energy	* 24,6	-	27,1	MJ/kg
Wire drawing CO2	* 1,84	-	2,04	kg/kg
Wire drawing water	* 9,26	-	13,9	l/kg
Metal powder forming energy	* 48,7	-	53,8	MJ/kg
Metal powder forming CO2	* 3,9	-	4,3	kg/kg
Metal powder forming water	* 53,1	-	79,6	l/kg
Vaporization energy	* 1,1e4	-	1,21e4	MJ/kg
Vaporization CO2	* 822	-	908	kg/kg
Vaporization water	* 4,57e3	-	6,85e3	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 0,961	-	1,06	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,072	-	0,0796	kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 5,33	-	5,89	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,4	-	0,442	kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 10,2	-	11,3	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 0,764	-	0,844	kg/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)	* 110	-	121	MJ/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed)	* 8,22	-	9,08	kg/kg

Recycling and end of life

Recycle	Verdadero			
Embodied energy, recycling	* 161	-	178	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 12,6	-	14	kg/kg

Anexo III

Recycle fraction in current supply	19	-	21	%
Downcycle	Verdadero			
Combust for energy recovery	Falso			
Landfill	Verdadero			
Biodegrade	Falso			

Notes

Warning

Not recommended for use with hydrofluoric acid or strong alkalis. Niobium metal is stable under standard conditions but some Nb compounds can be highly toxic. The compounds are encountered relatively rarely by most people. The metal dust causes eye and skin irritation.

Other notes

Sold under the tradename "WC-129Y" by Teledyne Wah Chang. Coat with a silicide or aluminide for high temp. use. Niobium is also known as Columbium, particularly in N. America.

Standards with similar compositions

- Tradenames:

WC-129Y

Enlaces

ProcessUniverse

Producers

Reference

Shape

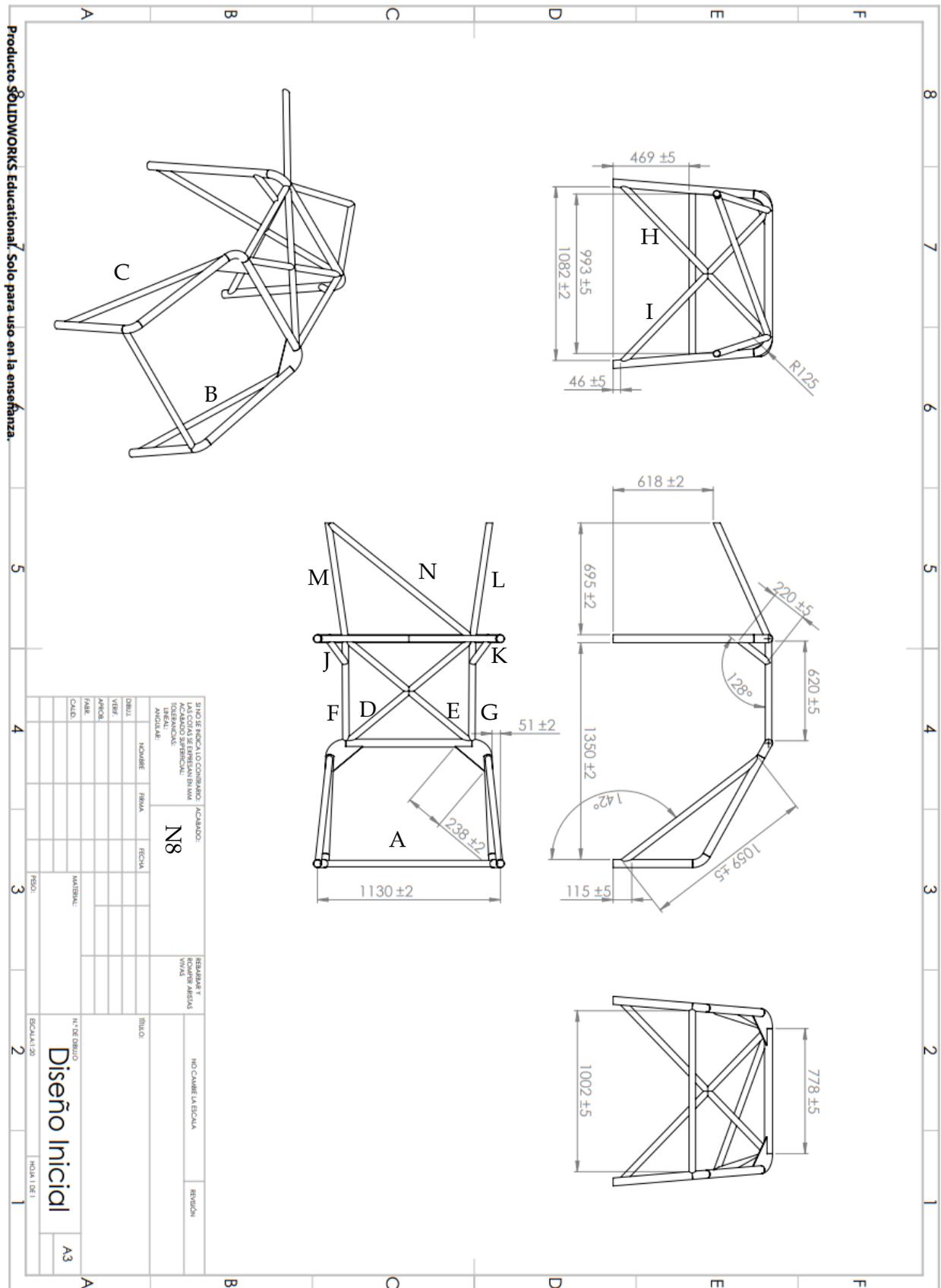
Los valores marcados con * son aproximaciones

Ansys Granta provides no warranty for this data.

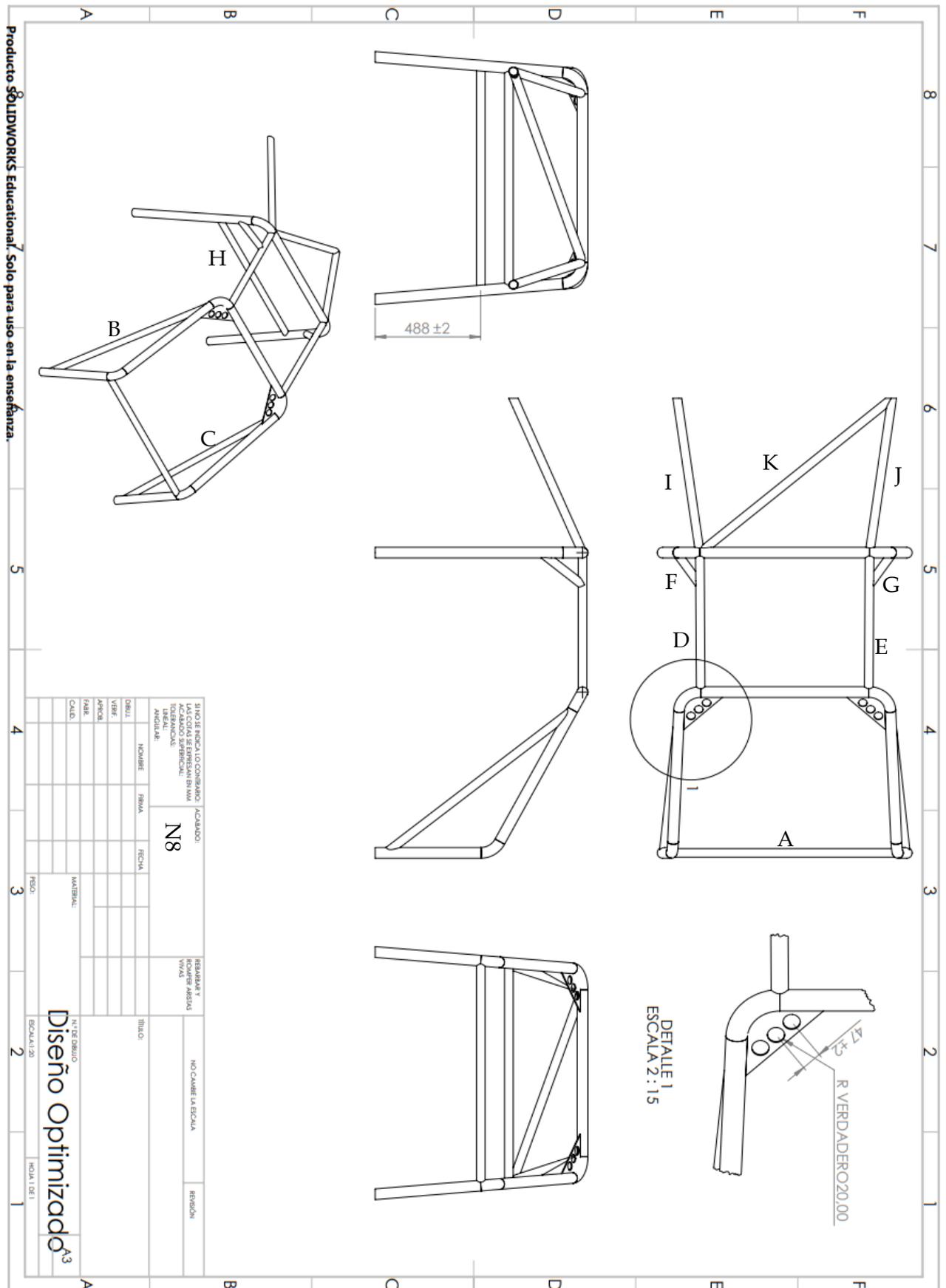
Anexo IV

Planos de las diferentes estructuras diseñadas con la denominación de los elementos empleada en el cálculo del presupuesto.

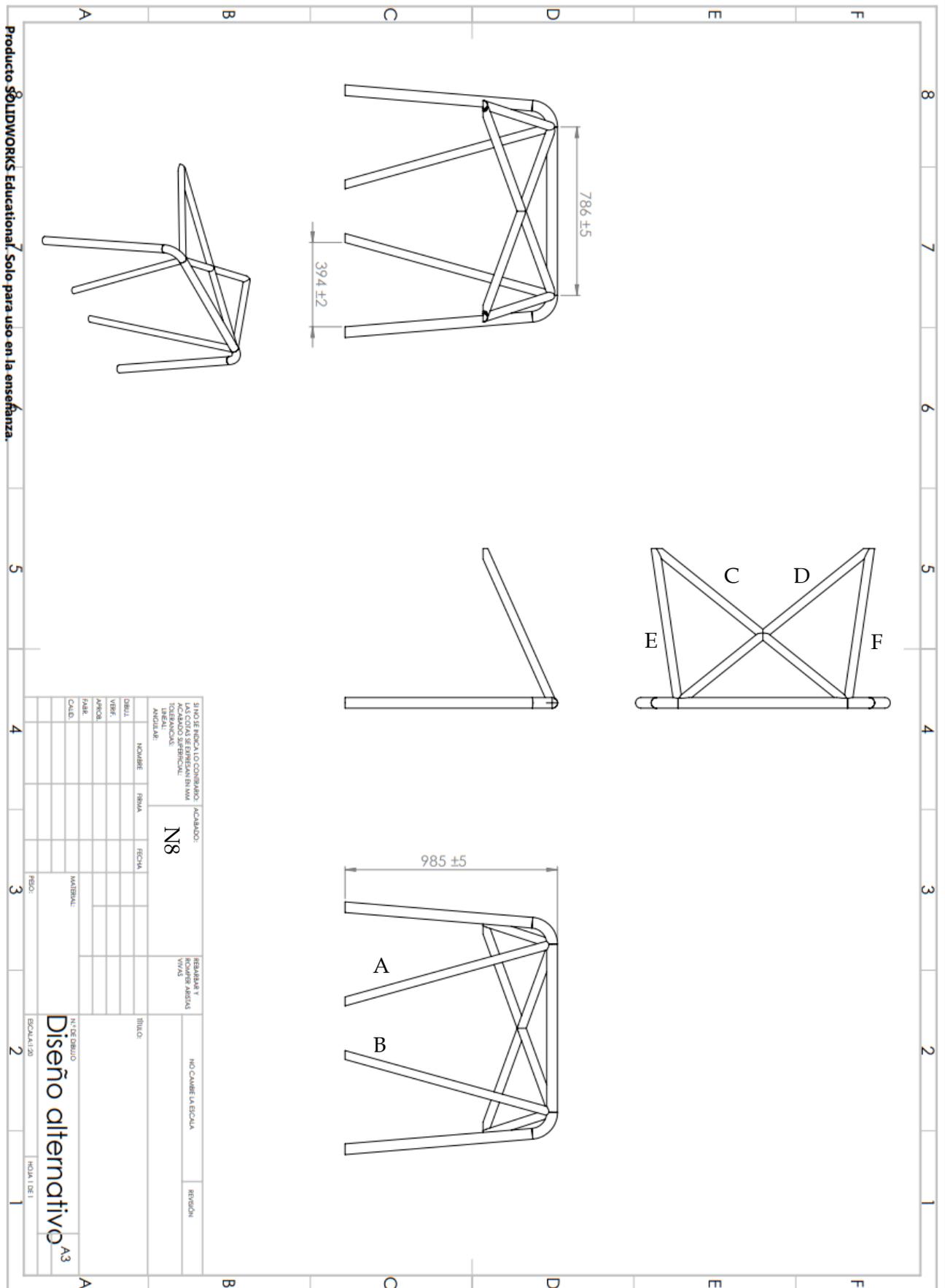
Anexo IV



Anexo IV

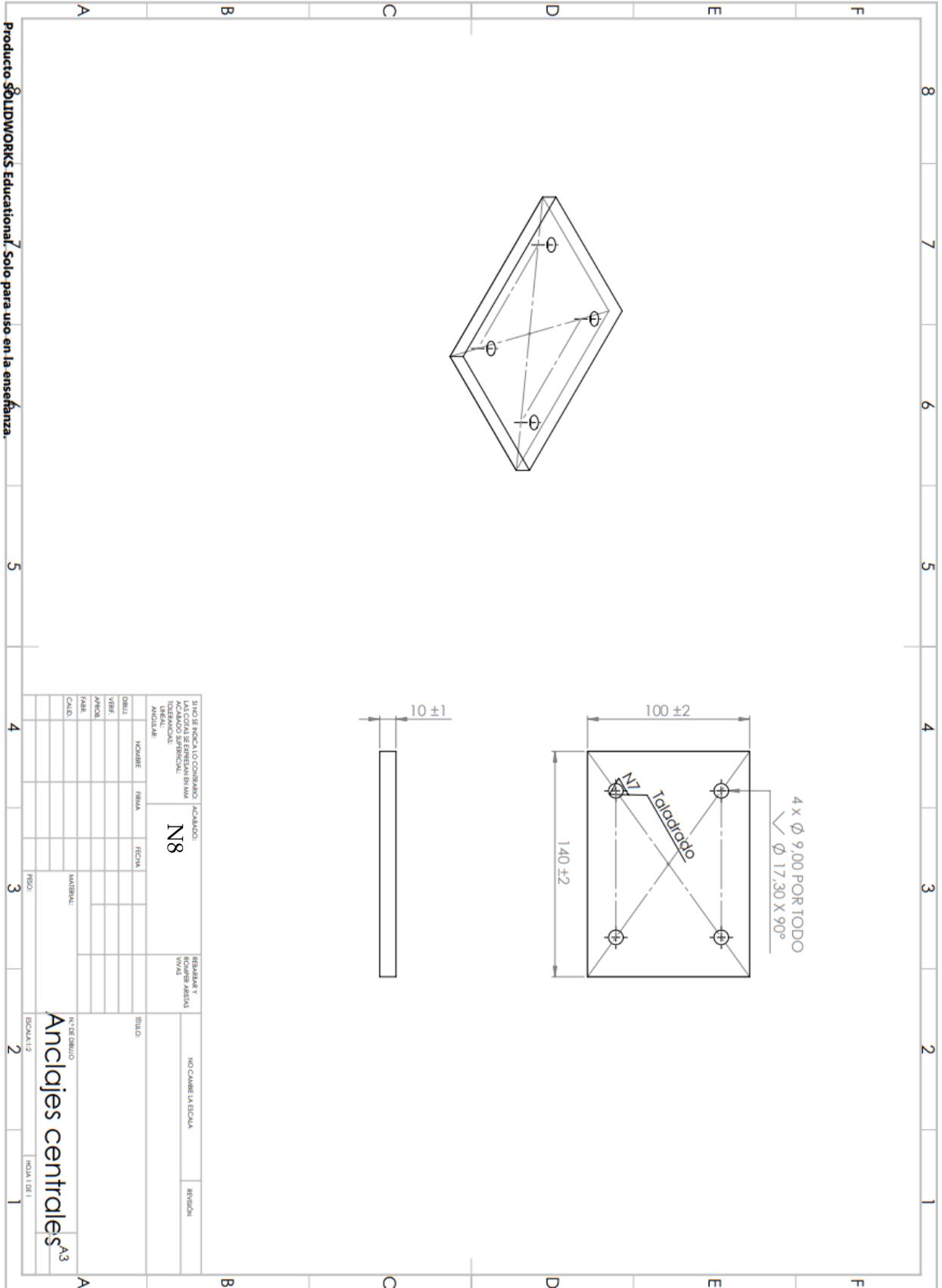


Anexo IV



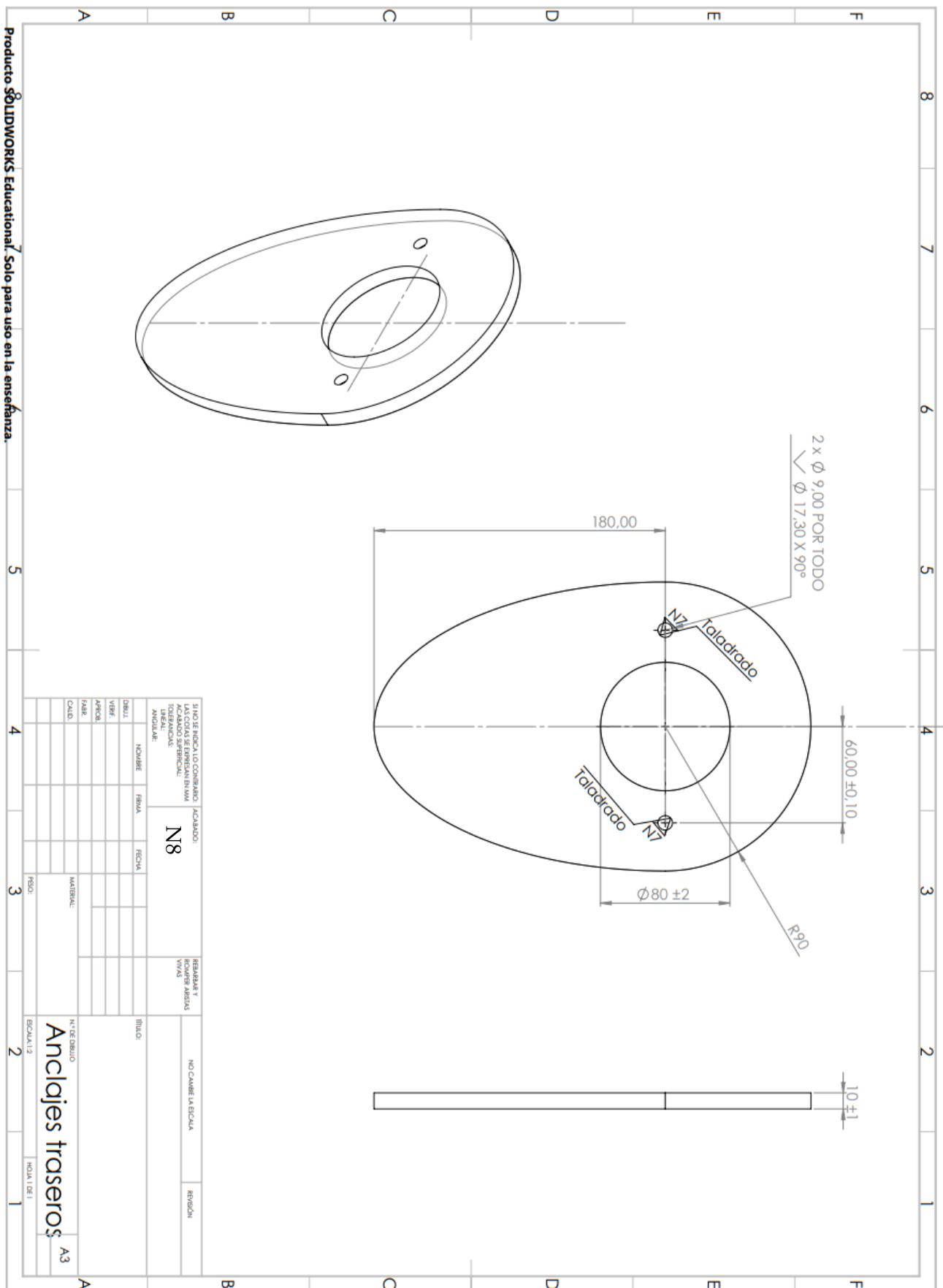
Producto SOLIDWORKS Educativo. Solo para uso en la enseñanza.

SINDE INDICADO COMBARAO		ACABADOS:		REBARBAR Y	
LAS CORTAS SE ENTENDEN EN MM		LAS CORTAS SE ENTENDEN EN MM		HOMBRES ASISTIS	
ACABADOS SUPERFICIALES:		N.º DE DIBUJO		NO CUMBRE LA ESCALA	
LINEALES:		N.º DE DIBUJO		REVISION	
ANGULARES:		DISEÑO alternativo		A3	
NOBRE	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA
DEBIL					
VERB					
AYORCI					
PARB					
CLAD					
MATERIAL:		ESCALA: 1/20		HORA: 1/21	
FEBO		2		1	



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

NOMBRE DEL DIBUJO Anclajes centrales A3		ESCALA 1:2		HOJA 1 DE 1	
NOMBRE DEL COMPONENTE N8		MATERIAL		TÍTULO	
DISEÑADOR VERIFICADOR APROBADO PAIS CALIF.		FECHA		NO CUMBRE LA ESCALA	
ESTADÍSTICA DE COMPONENTES UNIDADES DE MEDIDA UNIDADES DE MEDIDA UNIDADES DE MEDIDA UNIDADES DE MEDIDA		REVISOR Y REVISOR VIVA		REVISIÓN	



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Anexo V

Bibliografía.

- [1]. *FIA European Rally Championship*. Federation Internationale de l'Automobile. (2021). Retrieved 28 March 2021, from <https://www.fia.com/events/european-rally-championship/season-2021/fia-european-rally-championship>.
- [2]. *2021 World Rally Championship*. Federation Internationale de l'Automobile. (2021). Retrieved 28 March 2021, from <https://www.fia.com/events/world-rally-championship/season-2021/2021-world-rally-championship>.
- [3]. *CAMPEONATO DE LA COMUNIDAD VALENCIANA DE REGULARIDAD 2021 REGLAMENTO TECNICO*. Fedacv.com. (2021). Retrieved 27 February 2021, from <https://fedacv.com/wp-content/uploads/2021/02/Reglamento-Tecnico-Regularidad-2021-APROBADO.pdf>.
- [4]. *Grupo 5 Reglamento Técnico*. Fedacv.com. (2021). Retrieved 27 February 2021, from <https://fedacv.com/wp-content/uploads/2021/02/Reglamento-Tecnico-Grupo-5-2021-APROBADO.pdf>.
- [5]. *Appendix J 2020 - Article 253.8 - Safety Cages (Groups N, A and RGT) - WMSC 09.10.2020*. FIA. (2021). Retrieved 23 February 2021, from <https://www.fia.com/regulation/category/117>.
- [6]. *Appendix J 2016 - Article 253.8 - Safety Cages (Groups N, A and RGT) - WMSC 04.03.2016*. FIA. (2017). Retrieved 23 February 2021, from <https://www.fia.com/regulation/category/119>.
- [7]. *APPENDIX K TO THE INTERNATIONAL SPORTING CODE*. FIA. (2021). Retrieved 23 February 2021, from <https://www.fia.com/regulations-0>.
- [8]. *APPENDIX V TO APPENDIX "K"*. FIA. (2020). Retrieved 23 February 2021, from <https://www.fia.com/regulations-0>.
- [9]. *MANUAL DE REFORMAS DE VEHÍCULOS REVISIÓN 6ª - Corrección 1*. Aeca-itv.com. (2020). Retrieved 10 January 2021, from <https://www.aeca-itv.com/wp-content/uploads/2021/01/ManualReformasVehiculosRev6Corr1.pdf>.
- [10]. *Adaptación BOE Directiva 74/60/CEE*. Boe.es. (1978). Retrieved 28 February 2021, from <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-1978-80245>.
- [11]. *1.0570 | S355J2G3 ficha técnica - Acero estructural de alto límite elástico*. Gss-spain.com. (2021). Retrieved 1 July 2021, from <https://www.gss-spain.com/productos/acero-estructural-de-alto-limite-elastico/10570-s355j2g3-forjado.html>.
- [12]. *E355 / 1.0580 -Chemical composition, equivalent, properties*. Steelnumber.com. (2021). Retrieved 1 July 2021, from http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=570.
- [13]. *Tubos de Acero de precisión calibrados sin soldadura*. Protubsa Calibrados. (2016). Retrieved 1 June 2021, from https://www.protubsa.com/wp-content/uploads/2018/10/O_Protubsa_Calibrados_2018.pdf.
- [14]. *Principios del Proceso TIG*. (2012). [Blog]. Retrieved 2 June 2021, from https://www.academia.edu/32908432/DENOMINACION_DE_LA_ACCION_FORMATIVA_X_ORNADAS_DE_TRANSPORTE_E_MANTENIMIENTO_DE_VEHICULOS_SANTIAGO_-SEPTIEMBRE_2012_3_PROCESO_TIG.
- [15]. *Soldadura TIG*. Ingemecanica.com. (2021). Retrieved 1 July 2021, from <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn52.html>.

Anexo V

- [16]. *Soldadora TIG AC/DC vs soldadora TIG DC*. De Máquinas y Herramientas. (2021). Retrieved 29 June 2021, from <https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-electricas-y-accesorios/soldadora-tig-ac-dc>.
- [17]. *Material de aporte TIG*. Empresascarbhone.com. (2021). Retrieved 10 June 2021, from <https://www.empresascarbhone.com/pdf/material-aporte-tig.pdf>.
- [18]. *Varilla TIG acero al carbono E70S-6 | SERECON*. Tienda Serecon. (2021). Retrieved 1 July 2021, from https://www.tiendaserecon.com/varilla-tig-e70s6.html#/205-diametro-24_mm.
- [19]. *COMO CALCULAR EL RENDIMIENTO DE LOS ELECTRODOS SEGÚN LA JUNTA..* Doctorwelding. (2021). Retrieved 1 July 2021, from <https://doctorwelding.com/como-calcular-el-rendimiento-de-los-electrodos-segun-la-junta/>.
- [20]. *Botella Argón 50L/200 Bar*. Induon360.com. (2021). Retrieved 15 June 2021, from <http://www.induon360.com/botella-argon-50h-200-bar.html>.
- [21]. *Tubo Arco GT2I E355 Diámetro 40mm Longitud 1.500m*. Gt2i España. (2021). Retrieved 2 July 2021, from <https://www.gt2i.es/accesorios-de-montaje-competicion/22645-tubo-arco-gt2i-fe45-diametro-40mm-longitud-150-mtrs.html>.
- [22]. *Tornillo din-933 de cabeza hexagonal, totalmente roscado, de acero (8.8) cincado y rosca métrica..* Rationalstock.es. (2021). Retrieved 2 July 2021, from <https://www.rationalstock.es/catalogo/producto/fijacion/tornillos/tornillos-hexagonales-rosca-metrica-bsw/tornillo-din-933-de-cabeza-hexagonal--totalmente-roscado--de-acero--8-8--cincado-y-rosca-metrica--dimension-a--m-8--dimension-b--10-mm/20400500003>.
- [23]. *Soluciones para problemas de corte | Kinkelder - Los expertos de corte*. Kinkelder. (2021). Retrieved 1 July 2021, from <https://kinkelder.es/soporte-de-sierra/informacion-de-corte/soluciones-para-problemas-de-corte/>.