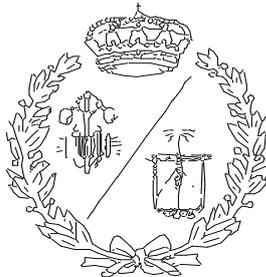


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Proyecto Fin de Grado***

**DISEÑO DE UN HALO PARA VEHÍCULOS DE  
FÓRMULA 1**

**Design of a halo for Formula 1 vehicles**

**Para acceder al Título de**

**GRADUADO/ EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**Autor: Jorge Becares Solana**

**Julio - 2024**



## RESUMEN

El presente trabajo de fin de grado tiene como objetivo principal el diseño de un halo para vehículos de Fórmula 1 en conformidad con las regulaciones establecidas en la normativa FIA STANDARD 8869-2018.

Para ello se busca obtener el modelo inicial mediante el software de modelado Autodesk Inventor, siguiendo las especificaciones establecidas por la normativa.

Una vez se tiene un modelo inicial, se procede a realizar un análisis estructural mediante el método de elementos finitos. Para ello se utiliza el software especializado MsC Nastran-Patran, y se estudian los casos de carga que estipula la normativa. A la hora de realizar el modelo de elementos finitos se toman inicialmente unas hipótesis simplificadoras que resultan en una geometría más sencilla, obteniendo en principio resultados parecidos al modelo 3D completo.

Se analizan los resultados obtenidos y se toman las decisiones oportunas en caso de no ser favorables los resultados según los criterios de la norma. En concreto se realiza un modelo final con el objetivo de que cumpla con los requisitos.

Además, se realizan dos estudios del modelo final: Uno modal con el objetivo de obtener las frecuencias naturales y los modos de vibración, y determinar si existe peligro de fallo a causa de las vibraciones del sistema. Por otro lado, se realiza un estudio aerodinámico con el fin de analizar la eficiencia del halo en términos de rendimiento en uso de alto nivel.

Finalmente se expone el proceso de fabricación, así como los planos y el presupuesto necesario para la ejecución del proyecto.



## ABSTRACT

The main objective of this final degree project is the design of a halo for Formula 1 vehicles in accordance with the regulations established in the FIA STANDARD 8869-2018.

To achieve this, the initial model is obtained using Autodesk Inventor modeling software, following the specifications established by the regulation.

Once an initial model is obtained, a structural analysis is carried out using the finite element method. For this purpose, specialized software MsC Nastran-Patran is used, and the load cases stipulated by the regulation are studied. In creating the finite element model, simplified assumptions are initially made, resulting in a simpler geometry, which initially yields results similar to the complete 3D model.

The results obtained are analyzed, and appropriate decisions are made if the results are not favorable according to the criteria of the standard. Specifically, a final model is created with the objective of meeting the requirements.

Additionally, two studies of the final model are carried out: a modal study with the aim of obtaining the natural frequencies and vibration modes, and determining if there is a risk of failure due to system vibrations. On the other hand, an aerodynamic study is conducted to analyze the efficiency of the halo in terms of high-level performance use.

Finally, the manufacturing process is presented, as well as the plans and the necessary budget for the execution of the project.



# ÍNDICE GENERAL

**DOCUMENTO I: MEMORIA**

**DOCUMENTO II: ANEXO DE CÁLCULOS**

**DOCUMENTO III: PLANOS**

**DOCUMENTO IV: PLIEGO DE CONDICIONES**

**DOCUMENTO V: PRESUPUESTO**

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

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Proyecto Fin de Grado***

**DOCUMENTO I: MEMORIA**

**Autor: Jorge Becares Solana**

**Julio - 2024**

## ÍNDICE

1. OBJETO Y ALCANCE DEL PROYECTO.....	1
2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES .....	2
2.1 Competición Fórmula 1.....	2
2.2 Evolución de los sistemas de seguridad en la Fórmula 1.....	3
2.2.1 Década de los 50-60.....	4
2.2.2 Década de los 70-80.....	4
2.2.3 Gran premio de San Marino 1994.....	5
2.2.4 Gran Premio de Japón 2014.....	6
2.3 Implantación del Halo como elemento de seguridad.....	7
2.3.1 Variedad en las posibles opciones a introducir.....	7
2.3.2 Prototipo Aeroscreen de Redbull .....	9
2.3.3 Imposición del halo .....	10
3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y REQUISITOS DE DISEÑO.....	15
3.1 Definición.....	15
3.2 Requisitos de diseño .....	16
3.2.1 Geometría .....	16
3.2.2 Masa del modelo.....	16
3.2.3 Material.....	16
3.3 Requisitos estructurales .....	16
4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL SISTEMA INICIAL.....	17
4.1 Modelo inicial.....	17
4.2 Evolución del diseño.....	19
5. SOLUCIÓN ADOPTADA.....	21
5.1 Resultados de los análisis de la solución adoptada .....	23
5.2 Análisis modal de la solución adoptada .....	24
5.3 Análisis aerodinámico de la solución adoptada.....	25



6. FABRICACIÓN DEL HALO .....	26
7. PLANIFICACIÓN .....	29
8. PRESUPUESTO .....	30
9. REFERENCIAS .....	31

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Calles de Mónaco durante el Gran Premio de 2019 [1] .....	2
Ilustración 2: Primer gran premio celebrado en la historia. Silverstone 1950 [2] .....	4
Ilustración 3: Accidente mortal de Ayrton Senna en la curva Tamburello [3] .....	5
Ilustración 4: Elemento HANS en el casco del piloto español Fernando Alonso [4] .....	6
Ilustración 5: Primer diseño presentado por Mercedes en 2015 [5] .....	8
Ilustración 6: Primera prueba real del halo en pista en el ferrari de Kimi Raikkonen [5] .....	8
Ilustración 7: Vista del piloto Valtteri Bottas desde su Mercedes W09 [6] .....	9
Ilustración 8: Daniel Ricciardo, piloto de Redbull, probando en unos entrenamientos libres de 2016 el prototipo Aeroscreen [5] .....	9
Ilustración 9: Vista del halo una vez terminado su proceso de fabricación [7] .....	10
Ilustración 10: Vista del accidente en el Gran premio de Bélgica 2018 [8] .....	11
Ilustración 11: Estado del halo de Charles Leclerc después del accidente [8] .....	11
Ilustración 12: Accidente del Haas de Grosjean contra las barreras de protección en el Gran Premio de Bahrein 2020 [9] .....	12
Ilustración 13: Estado del monoplaza de Grosjean tras el incendio producido en el accidente [9] .....	12
Ilustración 14: Accidente producido entre Verstappen y Hamilton en el gran premio de Monza 2021 [10] .....	13
Ilustración 15: Vista del monoplaza de Zhou arrastrándose boca abajo debido al choque producido [11] .....	14
Ilustración 16: Estado del Alfa Romeo de Guanyu Zhou en el accidente sufrido en Silverstone 2022 [12] .....	14
Ilustración 17: Referencias de las definiciones del halo que establece la FIA [13] .....	15
Ilustración 18: Modelo del soporte frontal .....	17
Ilustración 19: Modelo del aro principal .....	17
Ilustración 20: Modelo del soporte trasero .....	17
Ilustración 21: Modelo del halo completo .....	17
Ilustración 22: Modelo inicial en MsC Nastran-Patran .....	18
Ilustración 23: Tensiones producidas en el aro principal en el modelo inicial .....	18
Ilustración 24: Tensiones producidas en el soporte frontal en el modelo inicial .....	18
Ilustración 25: Deformación producida en el modelo inicial .....	19
Ilustración 26: Segundo modelo rediseñado .....	19
Ilustración 27: Superficies ficticias en la zona de unión de elementos .....	19
Ilustración 28: Tensiones producidas en el modelo rediseñado .....	20
Ilustración 29: Modelo de diseño final 2D-2D .....	21



Ilustración 30: Modificación del espesor del soporte frontal .....	21
Ilustración 31: Modificación del espesor del aro principal.....	22
Ilustración 32: Reducción de la longitud del soporte frontal.....	22
Ilustración 33: Modificación de longitud de la base del soporte frontal .....	22
Ilustración 34: Tensión producida en el caso de carga 2.....	23
Ilustración 35: Tensión producida en el caso de carga 1.....	23
Ilustración 36: Deformación producida en el caso de carga 1 .....	23
Ilustración 37: Trayectoria del aire a 350 km/h.....	25
Ilustración 38: Trayectoria del aire a 80 km/h.....	25
Ilustración 39: Presión generada a 350 km/h .....	25
Ilustración 40: Bloque de titanio forjado, suministrado por el proveedor Tsm Technology [19] .....	26
Ilustración 41: Fresadora de 5 ejes encargada de mecanizar las partes del halo [18].....	27
Ilustración 42: Proceso de soldadura en una cámara cerrada [18].....	27
Ilustración 43: Empaquetado final del halo por el proveedor CP Autosport [18] .....	28



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resultados del modelo final .....	23
Tabla 2: Frecuencias naturales del sistema .....	24
Tabla 3: Planificación del proyecto.....	29



# 1. OBJETO Y ALCANCE DEL PROYECTO

El propósito fundamental de este proyecto es desarrollar el diseño de un halo para monoplasas de Fórmula 1, en conformidad con las regulaciones establecidas en la normativa FIA STANDARD 8869-2018.

Para lograr este objetivo, se llevará a cabo un análisis estructural utilizando los requisitos establecidos en la normativa. Este análisis tiene como finalidad examinar las propiedades mecánicas del Halo y garantizar su idoneidad en términos de seguridad.

Además, se realizará un estudio aerodinámico con el fin de evaluar la eficiencia del diseño. Este estudio permitirá entender mejor cómo se comporta el halo frente a diferentes situaciones de resistencia aerodinámica.

Con ello se pretende que el halo sea apto en términos de seguridad y eficiencia para su uso en competiciones de alto nivel, como es este caso la Fórmula 1.

La ejecución de este proyecto implica la investigación, diseño y análisis del halo utilizando herramientas especializadas como Autodesk Inventor, MsC Nastran-Patran y Autodesk CFD.

## 2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

### 2.1 Competición Fórmula 1

El campeonato mundial de Fórmula 1 es la principal competición de automovilismo internacional más prestigiosa y popular del mundo. La FIA (Federación Internacional de Automovilismo) es la entidad que la dirige y actualmente la empresa estadounidense Liberty Media es la dueña de los derechos de la Fórmula 1, siendo ésta la responsable de gestionar y operar el campeonato.

En la competición participan un total de 20 pilotos y 10 escuderías, cada una compuesta por un equipo de profesionales que incluye pilotos, ingenieros, mecánicos, jefes/as de prensa, psicólogos, entre otros expertos en diversas áreas.

El campeonato de Fórmula 1 se celebra anualmente, con una serie de carreras que tienen lugar en diferentes países alrededor del mundo. Estas carreras se llevan a cabo en circuitos de renombre internacional, como el Circuito de Mónaco (Ilustración 1), el Autódromo Nazionale Monza en Italia y el Circuito de Silverstone en el Reino Unido, entre otros.



*Ilustración 1: Calles de Mónaco durante el Gran Premio de 2019 [1]*

Cada temporada de Fórmula 1 atrae a millones de espectadores tanto en televisión como en los propios circuitos, convirtiéndose en un evento de gran interés tanto para los aficionados al deporte del motor como para un público más amplio.

Además de las carreras en sí, la Fórmula 1 también es un escaparate para la innovación tecnológica en el ámbito del automovilismo. Los equipos invierten grandes sumas de dinero



en el desarrollo de nuevos componentes y tecnologías para mejorar el rendimiento de sus monoplasas, lo que a menudo resulta en avances significativos que eventualmente se transfieren a la industria automotriz de consumo.

Un ejemplo destacado es el desarrollo de sistemas de recuperación de energía. En la Fórmula 1, los sistemas de recuperación de energía, como el Sistema de Recuperación de Energía Cinética (KERS) y el Sistema de Recuperación de Energía Térmica (ERS), se utilizan para capturar y almacenar la energía generada durante la frenada y la desaceleración. Esta energía se puede utilizar posteriormente para proporcionar un impulso adicional al vehículo, aumentando así su eficiencia y rendimiento en la pista.

Estos sistemas de recuperación de energía se han convertido en características comunes en los vehículos de consumo, especialmente en los modelos híbridos y eléctricos. Los fabricantes de automóviles han adoptado y refinado esta tecnología para mejorar la eficiencia de combustible y reducir las emisiones en sus vehículos de producción en serie. De esta manera, los avances desarrollados en la Fórmula 1 no solo impulsan el rendimiento en la pista, sino que también contribuyen a la evolución y la innovación en la industria automotriz global.

En los últimos años, la Fórmula 1 ha experimentado una serie de cambios significativos en un esfuerzo por hacer la competición más emocionante y accesible para los aficionados. Desde la introducción de nuevas regulaciones técnicas hasta la implementación de medidas para mejorar la competencia y seguridad en la pista, la Fórmula 1 continúa evolucionando para mantener su posición como la competición de automovilismo más prestigiosa del mundo.

## **2.2 Evolución de los sistemas de seguridad en la Fórmula 1**

La fórmula 1 se trata de un deporte de riesgo, y como tal, los avances en seguridad lo han hecho cada vez más seguro. Pero esto no ha sido siempre así, y a medida que avanzaba la tecnología y sucesos trágicos ocurrían se iban implementando nuevos sistemas de seguridad.

### 2.2.1 Década de los 50-60

El primer Gran Premio se realizó el 13 de mayo de 1950 en el circuito de Silverstone (Ilustración 2) y fue ganado por el italiano Giuseppe Farina. Por aquel entonces, las medidas de seguridad eran casi nulas.

Los pilotos manejaban vehículos de grandes motores delanteros y discos de tambor, lo que hacía que sumado a la no vestimenta adecuada (llegaban a correr con ropa de calle) la seguridad fuese casi nula.



*Ilustración 2: Primer gran premio celebrado en la historia. Silverstone 1950 [2]*

El uso obligatorio del casco no llegó hasta el año 1952, así como los motores traseros o el uso de discos de freno, lo que supuso mayor estabilidad y menos vuelcos.

### 2.2.2 Década de los 70-80

Esta década estuvo marcada por varios sucesos trágicos que subrayaron la urgencia de mejorar la seguridad en la Fórmula 1. Accidentes como el fatal incidente de Jochen Rindt en 1970 y el impactante accidente de Niki Lauda en 1976 condujeron a la introducción de nuevas medidas de seguridad. Se mejoró el diseño de los circuitos, y se establecieron requisitos más estrictos para los cascos y los cinturones de seguridad.

En 1980, se lograron avances significativos en materia de seguridad. Se comenzaron a usar materiales compuestos más resistentes en la construcción de chasis y carrocerías, y se establecieron estándares más exigentes para la seguridad de los pilotos, incluyendo la introducción de la célula de supervivencia. A pesar de ello, los accidentes graves seguían siendo comunes en la Fórmula 1.

### 2.2.3 Gran premio de San Marino 1994

Sin duda alguna, el gran premio de San Marino en 1994 marcó un antes y un después en la historia del automovilismo. El fin de semana de la carrera estuvo marcado por las muertes del austríaco Roland Ratzenberger (el sábado) y del triple campeón mundial Ayrton Senna (el domingo), así como por otros numerosos accidentes graves, de los que varios de ellos provocaron lesiones.

Veinte minutos después de iniciarse la segunda sesión de clasificación, el piloto austríaco Roland Ratzenberger, perteneciente al equipo Simtek, perdió el control de su automóvil al pasar la curva *Villeneuve*. Su vehículo impactó casi de frente contra una barrera de hormigón, ocasionándole la muerte de manera instantánea. A pesar de que la célula de supervivencia se mantuvo en su mayoría intacta, la intensidad del choque le provocó una fractura en la base del cráneo.

Al día siguiente, la carrera se disputó con normalidad, y fue entonces, cuando en la vuelta 7 Senna perdió el control de su monoplaça en la curva *Tamburello* y se estrelló violentamente contra el muro de contención después de desacelerar de 306 km/h a 211 km/h (Ilustración 3)



Ilustración 3: Accidente mortal de Ayrton Senna en la curva Tamburello [3]

Senna fue retirado del siniestrado Williams y trasladado por vía aérea al Hospital Maggiore en la cercana Bolonia. Equipos médicos continuaron atendiéndolo durante el vuelo. Treinta y siete minutos después del choque, a las 14:55, la carrera fue reanudada.

Dos horas y veinte minutos después de que finalizase la carrera, a las 18:40, se anunció que Ayrton Senna había muerto. El brasileño tenía 34 años. La hora oficial de la muerte fue dada, indicando que Senna había muerto instantáneamente. La causa de la muerte establecida por una autopsia fue que un pedazo de la suspensión del coche perforó su casco y cráneo.

En octubre de 1996 la FIA, en cooperación con McLaren y Mercedes, se puso a buscar un sistema de sujeción del piloto para los casos de impacto frontal. Mercedes-Benz contactó con los fabricantes del HANS (Head and Neck Support) con vistas a adaptarlo a su uso en la Fórmula 1. El accesorio HANS (Ilustración 4) había sido lanzado en 1991 y fue diseñado para sujetar la cabeza y el cuello en caso de accidente y evitar las fracturas de la base del cráneo, la herida que mató a Ratzenberger. Las pruebas iniciales se mostraron exitosas y durante el Gran Premio de San Marino 2000 se publicó el reporte final el cual recomendaba el uso del HANS. Su empleo fue hecho obligatorio desde el inicio de la temporada 2001, resultando un salvavidas en muchos accidentes, como en el sufrido por Fernando Alonso en el Gran Premio de Brasil de 2003.



*Ilustración 4: Elemento HANS en el casco del piloto español Fernando Alonso [4]*

#### **2.2.4 Gran Premio de Japón 2014**

Desde el trágico Gran Premio de San Marino 1994, el mundo de la Fórmula 1 no había vuelto a lamentar ninguna víctima mortal más, confirmando así la eficacia de las mejoras en seguridad introducidas desde entonces.



El 5 de octubre de 2014 se celebró la carrera del gran premio de Japón. El piloto francés Jules Bianchi, perdió el control de su monoplaza en la curva *Dunlop* haciendo que chocase frontalmente contra la parte trasera de una grúa, la cual estaba retirando el vehículo de Adrian Sutil, piloto que había tenido un accidente en las vueltas previas.

Bianchi fue diagnosticado inconsciente después de no responder a una llamada de radio de su equipo ni de los comisarios. Estos informaron del accidente, y se enviaron vehículos médicos y de seguridad. Bianchi fue extraído de su vehículo y tratado en el lugar del choque antes de ser llevado en ambulancia al centro médico del circuito.

Tras nueve meses en estado de coma, en la tarde del 17 de julio de 2015, Jules Bianchi fallecía en Niza, semanas antes de cumplir 26 años.

Esto supuso a la FIA, que después de varios años valorando seriamente la implementación de un elemento de seguridad que protegiese al piloto en caso de choque frontal, se llevase a cabo.

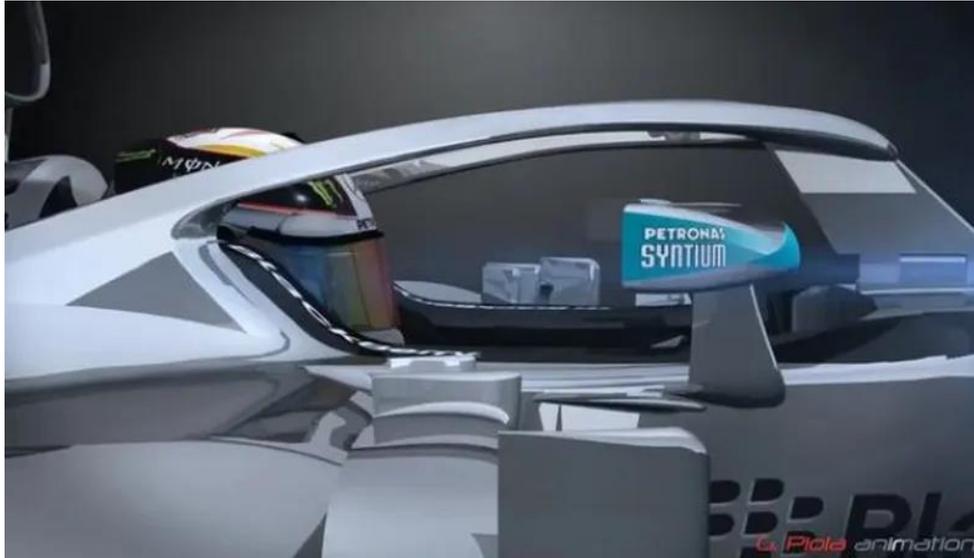
## 2.3 Implantación del Halo como elemento de seguridad

### 2.3.1 Variedad en las posibles opciones a introducir

En 2011, la FIA comenzó a realizar pruebas con cúpulas cerradas, llegando incluso a estudiar la tecnología utilizada en los aviones de combate. Pero un sistema de seguridad cerrado planteaba la duda de cómo extraer al piloto en caso de accidente al no poder contar con una puerta como en el caso de los prototipos de resistencia o un sistema eyector adaptable a un monoplaza o que funcione en caso de vuelco.

Por ello, la FIA comenzó a valorar otras opciones que protegieran al piloto frontal y lateralmente, pero le permitieran salir del habitáculo con rapidez y sin grandes impedimentos, intensificando su estudio en 2014 y pidiendo a los equipos colaboración para que aportaran ideas y prototipos a partir de los cuales evolucionar el concepto.

En 2015, Mercedes sacó a la luz el Halo (Ilustración 5), un dispositivo móvil diseñado para retraerse hacia atrás y facilitar la salida del piloto. En marzo de ese mismo año, Ferrari llevó esto un paso adelante al probar una variante con formas más suavizadas y fija en la pista (Ilustración 6). Desde entonces, ha habido un debate constante con dos posturas principales: aquellos que creen que la seguridad actual de los monoplazas de Fórmula 1 es adecuada y no debe comprometerse la esencia de la categoría, y aquellos que argumentan que la estética es menos relevante y que cualquier medida para prevenir accidentes fatales debe ser implementada sin miramientos.



*Ilustración 5: Primer diseño presentado por Mercedes en 2015 [5]*



*Ilustración 6: Primera prueba real del halo en pista en el ferrari de Kimi Raikkonen [5]*

El Halo enfrentó críticas y desafíos iniciales debido a su impacto en la estética de los monoplazas y la resistencia de algunos pilotos a su implementación. Muchos argumentaron que alteraba la esencia y la identidad visual de la Fórmula 1, mientras que otros cuestionaron su efectividad en situaciones de emergencia. Además, hubo preocupaciones sobre la visibilidad y la dificultad para salir del auto en caso de vuelco o accidente. Sin embargo, el problema de visibilidad fue rápidamente descartado por los propios pilotos, que aseguraron que no llegaba a ser un problema debido a que la parte más estrecha del soporte central no llegaba a los 20mm de ancho, lo que les permitía tener una visión completa del alrededor (Ilustración 7).



*Ilustración 7: Vista del piloto Valtteri Bottas desde su Mercedes W09 [6]*

### 2.3.2 Prototipo Aeroscreen de Redbull

En abril de 2016, Red Bull presentó el *Aeroscreen*, una cúpula que protegía al piloto de cualquier objeto (Ilustración 8), pero que planteaba un problema adicional: la influencia aerodinámica del mismo sobre la refrigeración del monoplaza. La estela creada por el *Aeroscreen* provocaba que la toma de admisión situada sobre la cabeza del piloto recogiese una cantidad de aire mucho menor de lo exigido.



*Ilustración 8: Daniel Ricciardo, piloto de Redbull, probando en unos entrenamientos libres de 2016 el prototipo Aeroscreen [5]*

Además, presentaba un desafío en cuanto a su resistencia estructural y su capacidad para soportar impactos sin comprometer la visibilidad del piloto. No obstante, Christian Horner, jefe de equipo de la escudería austríaca afirmó que las pruebas realizadas por Daniel Ricciardo habían sido satisfactorias y que pondrían a disposición de la FIA toda la documentación para que continuara con el desarrollo si lo consideraba oportuno.

Debido a que los equipos no querían destinar tiempo y recursos de la competición en desarrollar un elemento común que podía ser desechado en el futuro en favor de otro, este prototipo no tardó mucho tiempo en ser descartado. Además, fueron muchas las simulaciones de accidentes reales que se hicieron y en la mayoría de ellas el halo se imponía como la mejor opción.

### **2.3.3 Imposición del halo**

Así pues, el halo fue el elemento que se llevó adelante en cuánto a desarrollo, y en los años 2016 y 2017 todos los equipos fueron implementándolo en entrenamientos y test, siendo este obligatorio a partir del año 2018 dónde se incluyó en el reglamento.

#### *2.3.3.1 Definición*

El halo es un dispositivo de protección diseñado para aumentar la seguridad de los pilotos en la Fórmula 1 y en otras categorías del automovilismo. Consiste en una estructura de titanio en forma de arco que se monta alrededor del cockpit del monoplaza, justo por encima de la cabeza del piloto (Ilustración 9).



*Ilustración 9: Vista del halo una vez terminado su proceso de fabricación [7]*

El objetivo principal del halo es proteger al piloto de impactos potenciales en la cabeza provenientes de objetos externos, como escombros u otros vehículos, durante un accidente o incidente en la pista.

### 2.3.3.2 Situaciones reales del halo

En todos estos años desde su implantación en 2018, ha habido múltiples accidentes donde el halo ha tenido una gran importancia en cuanto a la seguridad aportada al piloto.

En el gran premio de Bélgica 2018, el piloto español Fernando Alonso fue embestido por el monoplaza de Nico Hülkenberg, provocando que el monoplaza golpease en la parte trasera del Sauber del monegasco Charles Leclerc, elevándose por encima de este último (Ilustración 10).

La parte inferior del monoplaza se deslizó sobre el halo, mientras que uno de los neumáticos golpeó directamente en el lateral del arco de protección (Ilustración 11)

Informes posteriores de la FIA declararon que Charles Leclerc se salvó del choque sobre su cabeza gracias a la existencia del halo.



Ilustración 11: Estado del halo de Charles Leclerc después del accidente [8]



Ilustración 10: Vista del accidente en el Gran premio de Bélgica 2018 [8]

El accidente de Romain Grosjean en el Gran Premio de Bahrein de 2020 fue otro momento impactante que puso de manifiesto la importancia del Halo en la seguridad de los pilotos en la Fórmula 1. Durante la primera vuelta de la carrera, Grosjean se vio involucrado en un accidente en el que su monoplaza de Haas chocó violentamente contra las barreras de protección en la curva 3 del circuito de Sakhir (Ilustración 12).

El impacto fue extremadamente grave, y el monoplaza se partió en dos, con la parte delantera del chasis atravesando las barreras de protección y quedando en llamas. Sin embargo, gracias al Halo, la parte trasera del monoplaza, donde estaba ubicado el cockpit, permaneció intacta y protegida.



*Ilustración 12: Accidente del Haas de Grosjean contra las barreras de protección en el Gran Premio de Bahrein 2020 [9]*

El Halo actuó como una estructura de protección crucial, desviando la energía del impacto hacia los lados y evitando que la cabeza de Grosjean fuera golpeada por los escombros que se desprendieron en el choque. Además, el diseño del Halo impidió que el monoplaza fuera aplastado por el peso de las barreras de protección que se desplomaron sobre él.

A pesar de la intensidad del accidente y el fuego que se desató, Grosjean logró salir del monoplaza por sus propios medios, aunque sufrió quemaduras en las manos debido al calor generado por el incendio (Ilustración 13).



*Ilustración 13: Estado del monoplaza de Grosjean tras el incendio producido en el accidente [9]*

El accidente producido entre Lewis Hamilton y Max Verstappen en el Gran Premio de Monza 2021 (Ilustración 14) y el que sufrió el piloto chino Guanyu Zhou en la salida del Gran Premio de Silverstone 2022 (Ilustración 15) son otros dos ejemplos recientes de la importancia del halo.

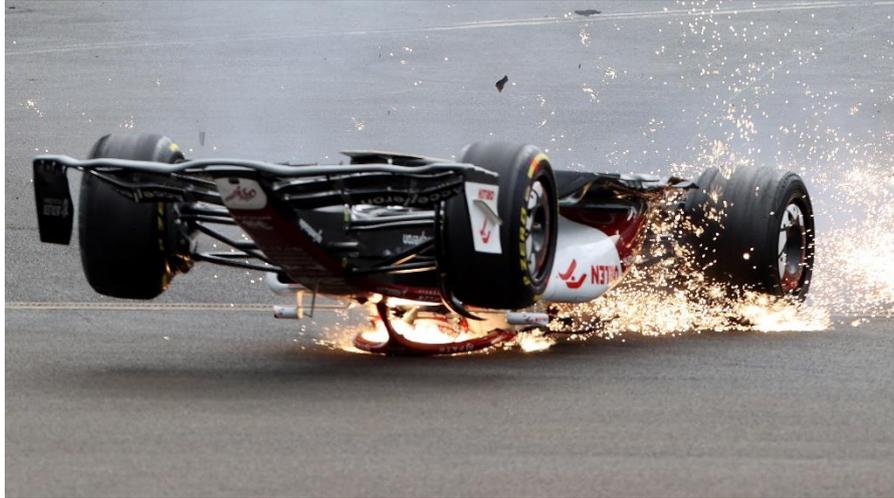
Hamilton y Verstappen llegaron a la famosa curva 1 de Monza emparejados, y fue entonces cuando Verstappen al tocar su rueda con el monoplaza del británico hizo que se elevara y aterrizase encima del Mercedes de Hamilton. Ocurrió a una velocidad no muy elevada pero las consecuencias para Hamilton sin la existencia del halo podían haber sido fatales.



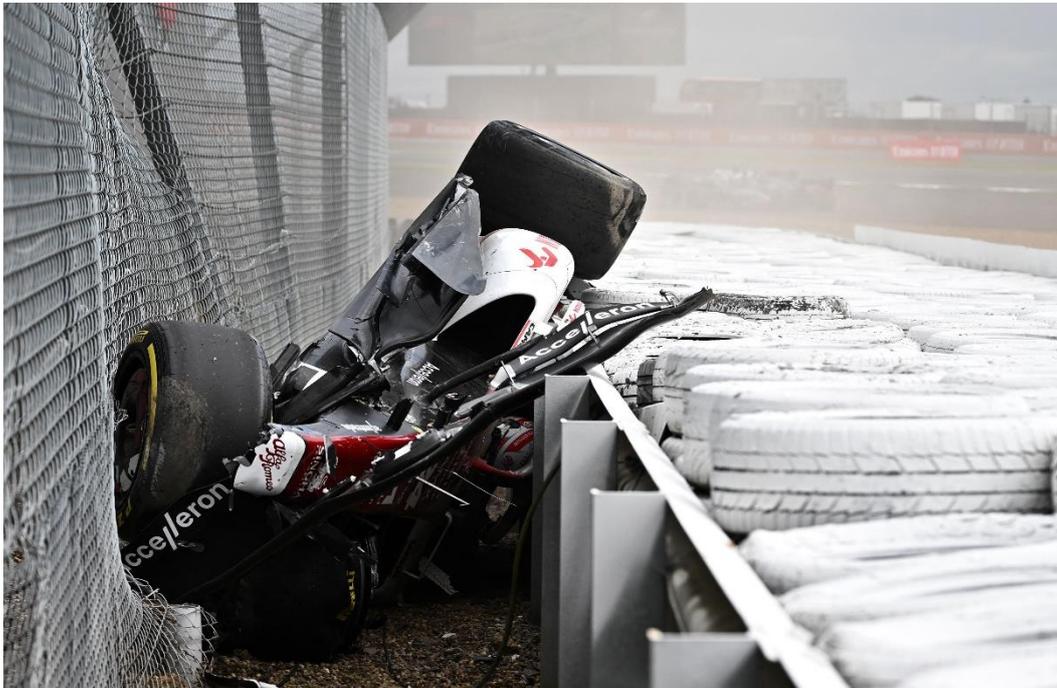
*Ilustración 14: Accidente producido entre Verstappen y Hamilton en el gran premio de Monza 2021 [10]*

Una situación totalmente diferente sufrió el piloto chino Guanyu Zhou en Silverstone 2022. El piloto de Alfa Romeo sufrió un toque en la salida, lo que supuso que su monoplaza se elevara por los aires y recorriese varios metros a gran velocidad y boca abajo (Ilustración 15), acabando en las vallas de protección (Ilustración 16).

El halo fue vital una vez más no sólo en el momento de proteger al piloto en el impacto, sino también durante todo el tiempo en el que el vehículo estuvo arrastrándose boca abajo contra el asfalto y la grava.



*Ilustración 15: Vista del monoplaza de Zhou arrastrándose boca abajo debido al choque producido [11]*



*Ilustración 16: Estado del Alfa Romeo de Guanyu Zhou en el accidente sufrido en Silverstone 2022 [12]*

Aunque muchas personas fueron en contra de su implantación, ya sea por temas estéticos, aerodinámicos... el halo ha demostrado ser en los últimos años un elemento de seguridad crucial en la vida de los pilotos.

## 3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y REQUISITOS DE DISEÑO

### 3.1 Definición

La normativa FIA STANDARD 8869-2018 establece las distintas partes en las que está compuesta el halo y las define en la Ilustración 17:

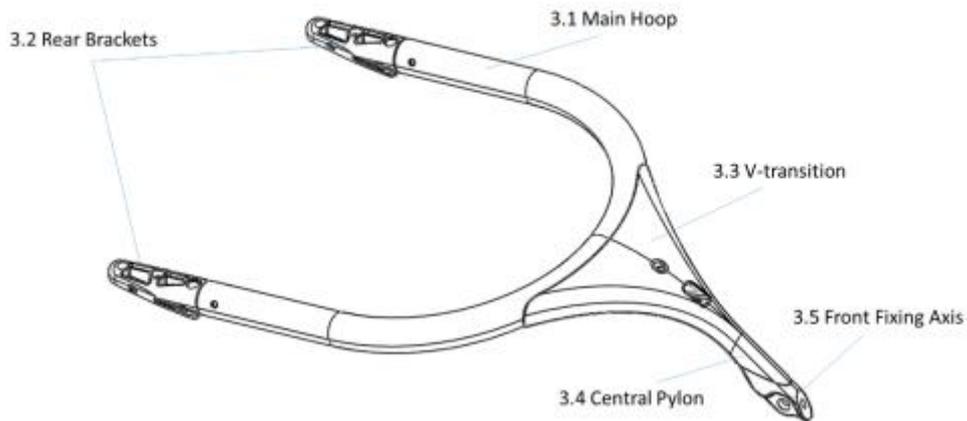


Ilustración 17: Referencias de las definiciones del halo que establece la FIA [13]

- **3.1 Main Hoop**

Tubo en forma de C al que se conectan los soportes traseros y la transición en V.

- **3.2 Rear Brackets**

Los soportes en cada extremo del arco principal utilizados para conectar la estructura a los puntos de fijación dentro del coche a ambos lados del habitáculo del conductor.

- **3.3 V-Transition**

La sección entre el arco principal y el pilar central.

- **3.4 Central Pylon**

La sección frontal delante de la transición en V que se conecta al soporte delantero dentro del coche.

- **3.5 Front Fixing Axis**

La junta cilíndrica que conecta el pilar central con el soporte delantero.



## 3.2 Requisitos de diseño

### 3.2.1 Geometría

Las dimensiones y tolerancias del halo están reservadas únicamente a los fabricantes y a la FIA. No obstante, en el documento en el que se recoge la normativa FIA STANDARD 8869-2018 y en el de las regulaciones técnicas de 2021 se pueden sacar varias conclusiones sobre las dimensiones del halo. Las aplicables a este proyecto se encuentran recogidas en el Documento II: Anexos de Cálculos.

### 3.2.2 Masa del modelo

Según la normativa FIA STANDARD 8869-2018 el halo deberá tener un peso de 7 kg con unas tolerancias de +0.05 kg y -0.15 kg.

### 3.2.3 Material

Según la normativa FIA STANDARD 8869-2018, el conjunto completo deberá estar producido en aleación de titanio Ti6Al4V de grado 5.

Los métodos de fabricación deben asegurar que el material conserve sus propiedades mecánicas. Esto incluye procesos como el mecanizado de precisión y tratamientos térmicos específicos.

Las técnicas de unión y soldadura deben estar controladas estrictamente para evitar puntos débiles en la estructura del halo.

## 3.3 Requisitos estructurales

La normativa FIA STANDARD 8869-2018 establece dos test de impacto que obligatoriamente el halo deberá de superar para ser válido. Además, la FIA establece una serie de condiciones a la hora de realizar los dos casos de carga. En el Documento II: Anexo de cálculos se explica en detalle los requisitos estructurales.

## 4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL SISTEMA INICIAL

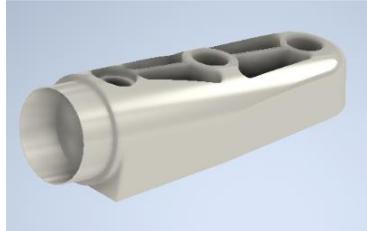
El diseño del halo ha sido un proceso iterativo de mejora, desde el planteamiento del modelo inicial que no cumplía con algunos de los test de carga que plantea la normativa, hasta la definición y análisis de la solución propuesta. En este apartado de la memoria se establece un resumen de las distintas etapas de diseño, desde la obtención del modelo en Autodesk Inventor, hasta realizar los análisis estructurales en MsC Nastran-Patran. En el Documento II: Anexo de cálculos se extiende la información de los diseños y los cálculos asociados.

### 4.1 Modelo inicial

En primer lugar, gracias a las medidas obtenidas en los documentos de la FIA y que se han detallado anteriormente, se realiza el modelo de cada parte principal del halo en Autodesk Inventor, para posteriormente realizar un ensamblaje de estos.



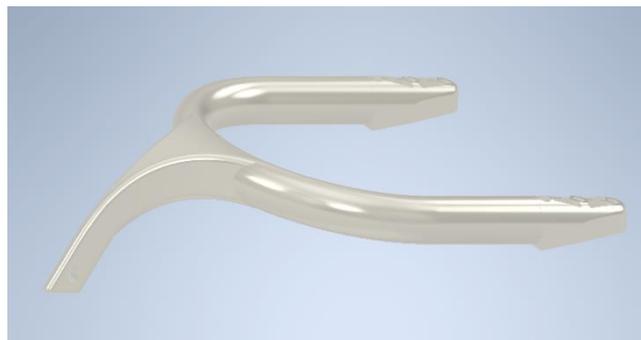
*Ilustración 19: Modelo del aro principal*



*Ilustración 20: Modelo del soporte trasero*



*Ilustración 18: Modelo del soporte frontal*



*Ilustración 21: Modelo del halo completo*

Se define el material del halo, en este caso Aleación de titanio Ti6Al4V de grado 5 y se calcula la masa total del conjunto. Se obtuvo una masa total de 6,953 kg por lo que cumple correctamente con la normativa.

Posteriormente, se realiza el análisis resistente del sistema. Para ello, se realiza un modelo de elementos finitos en MsC Nastran-Patran. En este caso, se decide realizar un modelo 2D-1D con hipótesis simplificadoras, ya que importar el modelo 3D directamente producía problemas computacionales y de cálculo. A priori, el modelo 2D-1D debería de dar resultados fiables.

Como se observa en la Ilustración 22, al modelo se le aplican los dos casos de carga que estipula la normativa.

Los resultados obtenidos en el primer test de impacto se detallan a continuación:

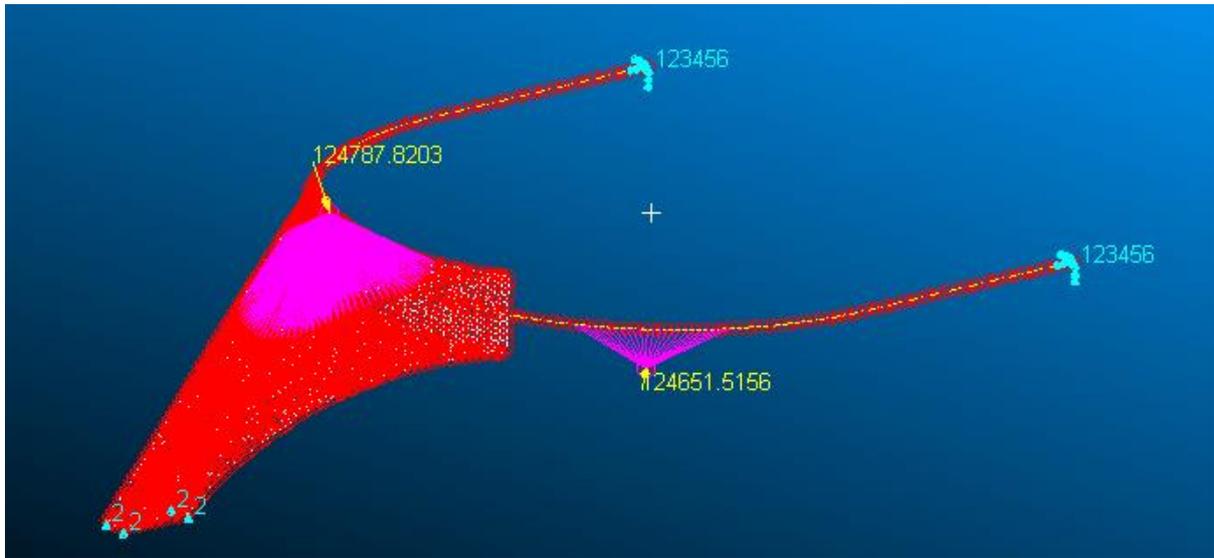


Ilustración 22: Modelo inicial en MsC Nastran-Patran

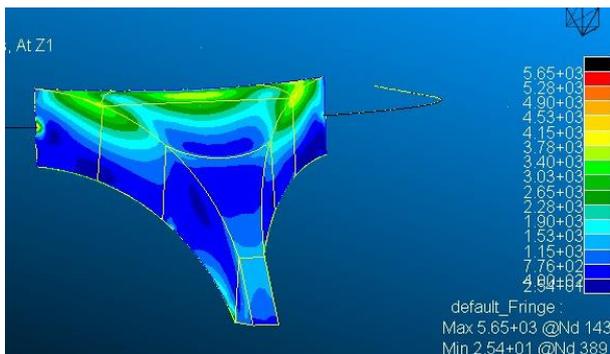


Ilustración 24: Tensiones producidas en el soporte frontal en el modelo inicial

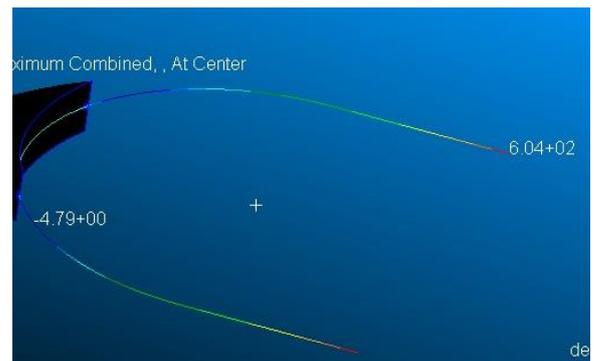


Ilustración 23: Tensiones producidas en el aro principal en el modelo inicial

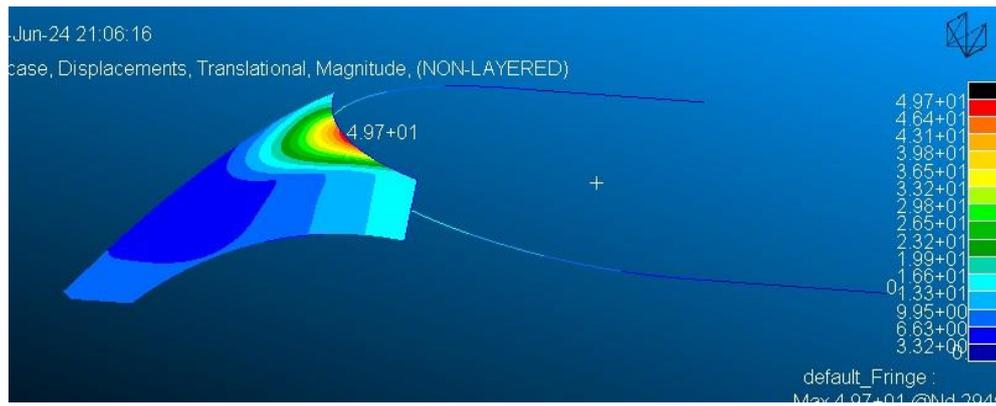


Ilustración 25: Deformación producida en el modelo inicial

Se observa en la Ilustración 24 como se producen dos puntos singulares de tensión en la unión entre elementos. Esto provoca unas tensiones que llegan hasta los 5.000 MPa, siendo el límite elástico del material de 1.100 MPa. Además, la deformación sobrepasa los 17,5mm por lo que no estaría cumpliendo la normativa en ningún momento.

Dado que el modelo no es válido de ningún modo, será necesario plantear mejoras con el fin de subsanar los errores cometidos.

## 4.2 Evolución del diseño

Se plantea un segundo modelo, al que se modifica la geometría del soporte frontal de tal manera que se ensancha la curvatura de unión entre el soporte y el aro principal. Con esto se busca que los puntos singulares de tensión estén lo más alejados posible de la superficie dónde se aplica la carga.

Además, dado que la modelización de unión entre elementos 2D-1D no se está haciendo correctamente, se decide crear dos superficies "ficticias", a las que se le aplicará un espesor despreciable, con el fin de poder aplicar un mallado a la zona de unión entre el soporte frontal y el aro.

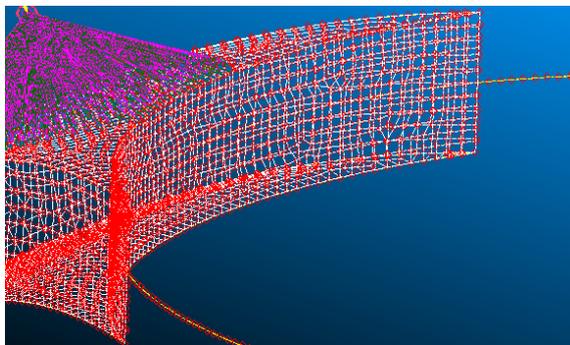


Ilustración 27: Superficies ficticias en la zona de unión de elementos

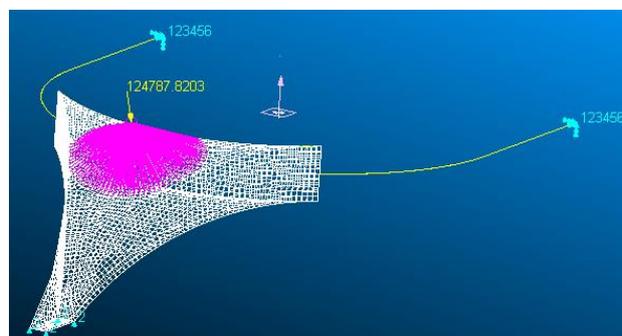


Ilustración 26: Segundo modelo rediseñado

En este caso se estudia solo el test de impacto 1 ya que era el que planteaba los problemas iniciales. A continuación, se muestran los resultados obtenidos del modelo rediseñado en la Ilustración 28:

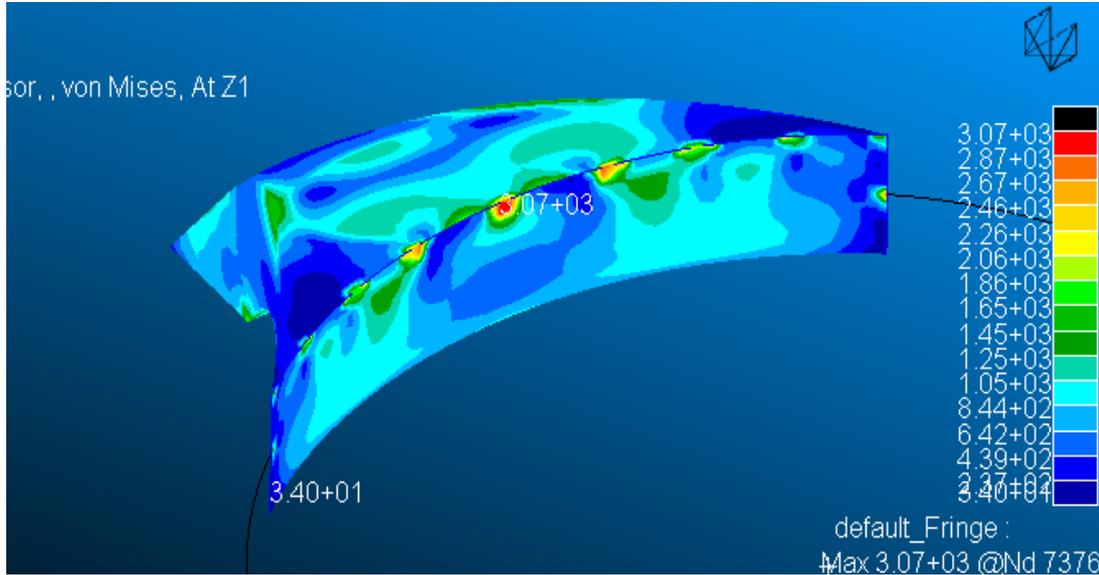


Ilustración 28: Tensiones producidas en el modelo rediseñado

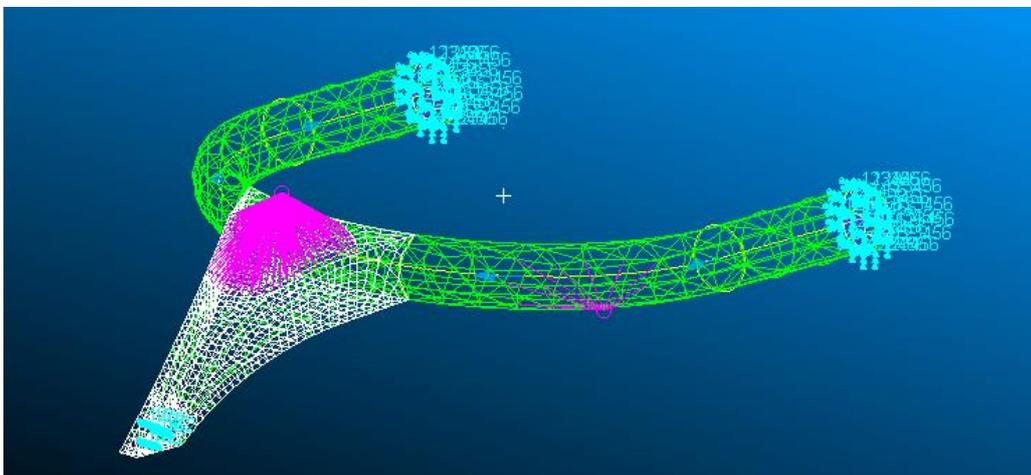
De la Ilustración 28 se extrae la conclusión de que el modelo sigue siendo no válido, ya que, aunque las tensiones en general sufridas en el soporte son menores que en el modelo anterior, siguen produciéndose los dos puntos singulares.

Por tanto, se decide que el problema reside en el fallo de modelización entre la unión de elementos 2D-1D, por lo que se deberán de volver a plantear mejoras con el objetivo de mitigar los problemas.

## 5. SOLUCIÓN ADOPTADA

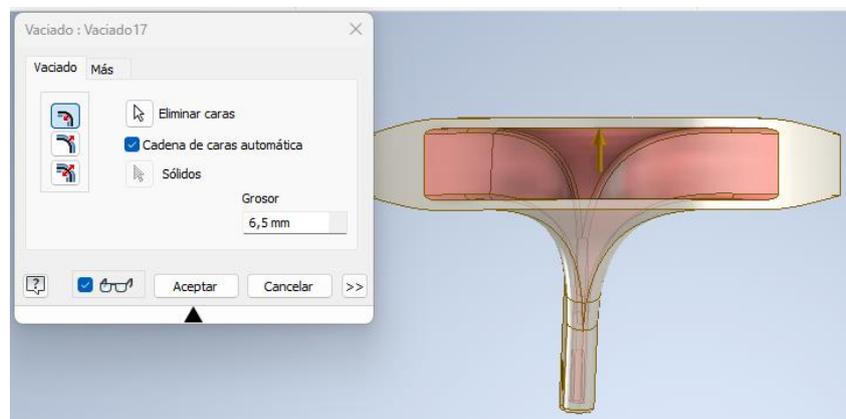
En este apartado se plantea la posible solución que se debe adoptar para obtener los resultados correctos. Los cambios realizados y los análisis obtenidos vienen detallados en el Documento II: Anexo de cálculos.

Dado que el modelo 2D-1D no ha resultado ser viable, se procede a realizar un modelo de los elementos como bidimensionales, tanto el soporte frontal como el aro principal. Al modelo se le aplican diferentes condiciones de restricción en el soporte frontal ya que se añade el agujero del anclaje, mientras que los soportes traseros mantienen las mismas. El modelo con los elementos bidimensionales, así como con el mallado y cargas aplicadas se detalla en la Ilustración 29:



*Ilustración 29: Modelo de diseño final 2D-2D*

Además, también se modifican los espesores del soporte frontal (Ilustración 30), así como del aro principal (Ilustración 31). Éstos pasan a ser de 6,5mm y 3,5mm, respectivamente.



*Ilustración 30: Modificación del espesor del soporte frontal*

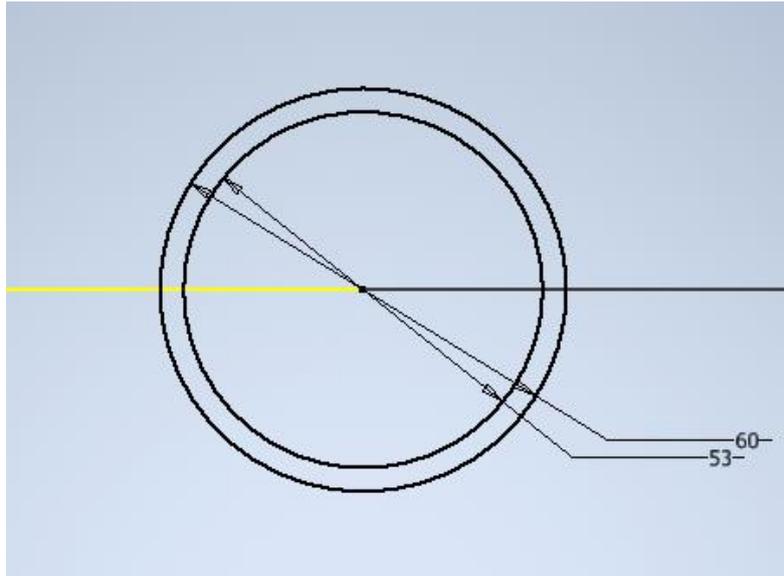


Ilustración 31: Modificación del espesor del aro principal

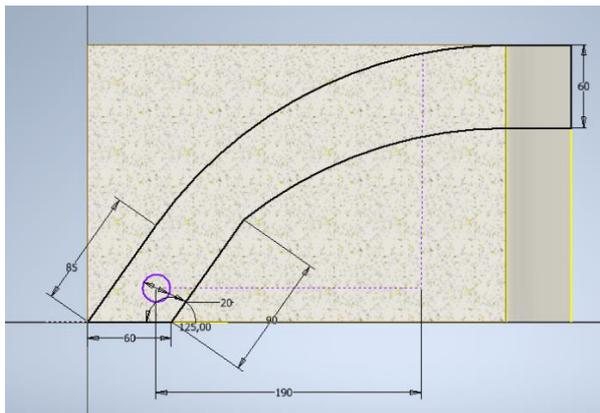


Ilustración 33: Modificación de longitud de la base del soporte frontal

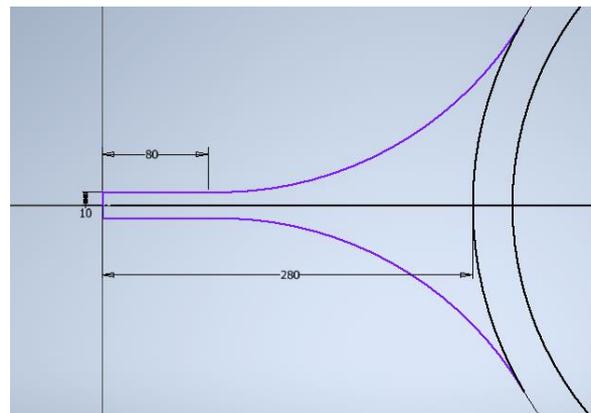


Ilustración 32: Reducción de la longitud del soporte frontal

Por último, se modifica la geometría del soporte frontal, haciéndolo más corto y compacto. Esto se realiza para poder conseguir un peso óptimo que cumpla la normativa. Aplicados los cambios, el peso total del halo es de 6,888 kg por lo que es satisfactorio.

## 5.1 Resultados de los análisis de la solución adoptada

Una vez se tiene el modelo rediseñado con las mejoras implementadas se calculan los resultados de los test de impacto recogidos en la normativa.

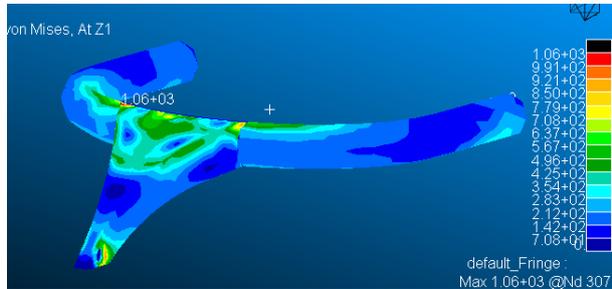


Ilustración 35: Tensión producida en el caso de carga 1

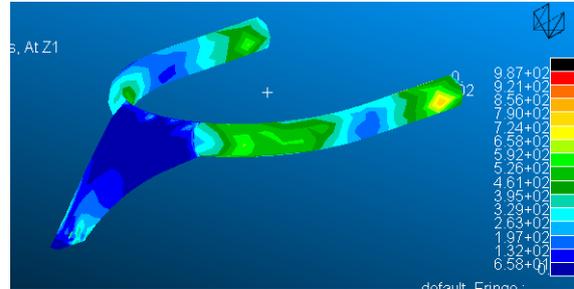


Ilustración 34: Tensión producida en el caso de carga 2

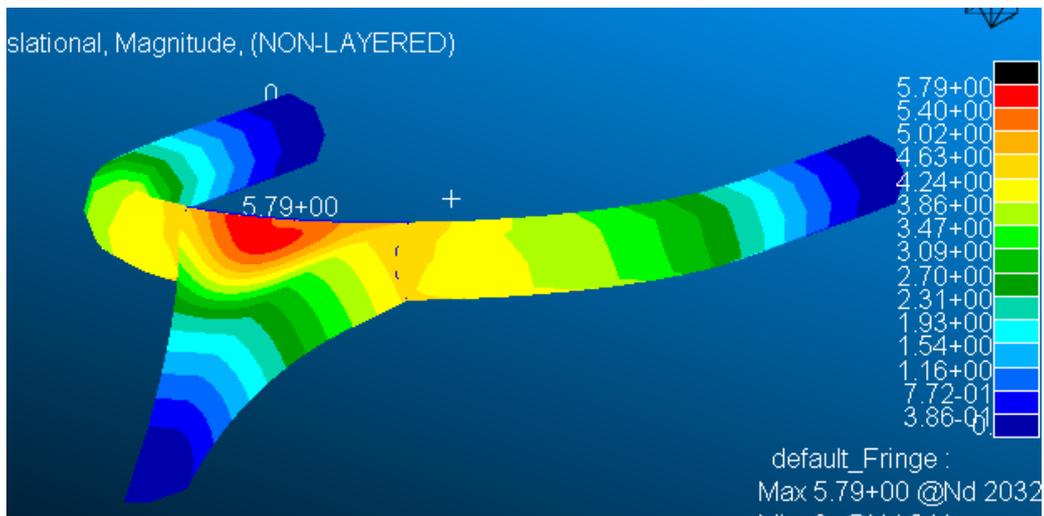


Ilustración 36: Deformación producida en el caso de carga 1

En la Tabla 1 se recogen los valores obtenidos en cada ensayo:

Tabla 1: Resultados del modelo final

	Tensión (MPa)	Límite por normativa (MPa)	Deformación (mm)	Límite por normativa (mm)	¿Cumple?
Caso 1	1.060	1.100	5,79	17,5	Sí
Caso 2	987	1.100	11,7	45	Sí
Caso 2.1	FALLO	-	26,3	100	Sí

Se observa como para el modelo bidimensional en su totalidad, el halo cumple la normativa en todos los casos impuestos por lo que el resultado de la evolución del diseño con las mejoras implementadas es satisfactorio.

## 5.2 Análisis modal de la solución adoptada

Se realiza un análisis modal del modelo final con el objetivo de encontrar posibles modos de fallo de la estructura debido a vibraciones indeseadas. Todos los cálculos realizados en este estudio se detallan en el Documento II: Anexo de cálculos.

Para ello se calculan los modos de vibración y las frecuencias naturales del sistema, a través de MsC Nastran-Patran:

En la Tabla 2 se muestran las frecuencias naturales obtenidas:

*Tabla 2: Frecuencias naturales del sistema*

	Frecuencia de vibración (Hz)
<b>Modo 1</b>	258,565
<b>Modo 2</b>	454,867
<b>Modo 3</b>	498,326
<b>Modo 4</b>	558,509
<b>Modo 5</b>	712,669
<b>Modo 6</b>	1182,09
<b>Modo 7</b>	1537,72
<b>Modo 8</b>	2001,3
<b>Modo 9</b>	2029,79
<b>Modo 10</b>	2281,29

Para comparar estos valores, se obtienen las frecuencias de excitación a las que está sometido el halo, en este caso debido al motor del monoplaza. Se obtiene una frecuencia mínima de 100 Hz y máxima de 500 Hz.

Se concluye en que no hay peligro de resonancia salvo en los tres primeros modos de vibración, y se propone una posible mejora reducir el riesgo de resonancia.

### 5.3 Análisis aerodinámico de la solución adoptada

Como estudio final del halo, se realiza un análisis aerodinámico con el objetivo de determinar la eficiencia del halo en términos de rendimiento en competición.

Para ello se realizan dos pruebas aerodinámicas a 80km/h y a 350km/h, y se comprueba el comportamiento del aire y la presión generada a esas velocidades:

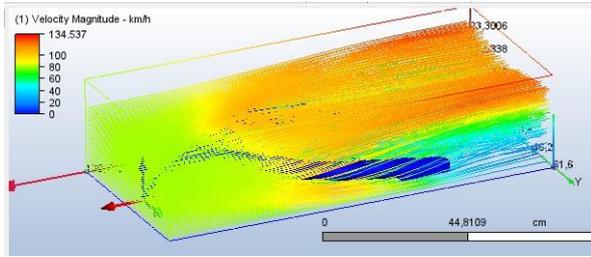


Ilustración 38: Trayectoria del aire a 80 km/h

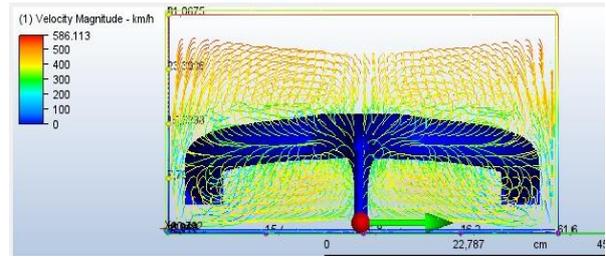


Ilustración 37: Trayectoria del aire a 350 km/h

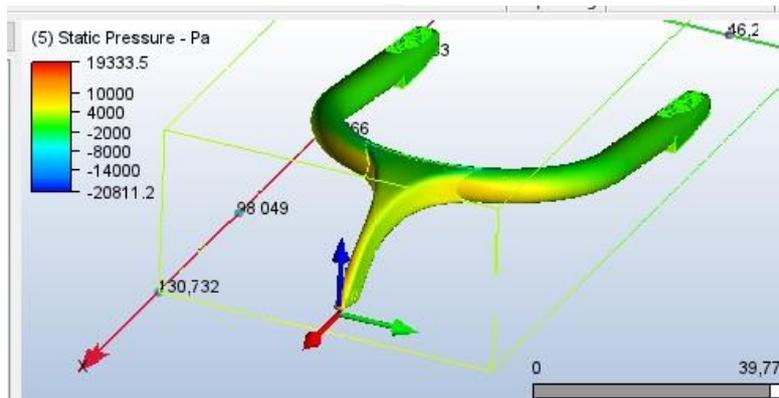


Ilustración 39: Presión generada a 350 km/h

Se obtienen resultados satisfactorios ya que no se producen vórtices de aire que puedan influir en el comportamiento del monoplaça, y la presión que se genera tiene un efecto insignificante en el comportamiento mecánico del halo.

Los resultados en detalle del estudio aerodinámico vienen expuestos en el Documento II: Anexo de cálculos.

## 6. FABRICACIÓN DEL HALO

En este apartado se explica de manera general el proceso de fabricación del Halo. Aunque la información referente al proceso está restringida a los fabricantes encargados del proceso y la FIA, existen documentos explicativos proporcionados por la federación que abordan el tema. En concreto, se explicará desde el punto de vista de CP Autosport (uno de los 3 fabricantes elegidos por la FIA como proveedores oficiales del Halo).

El proceso de fabricación del Halo comienza con la adquisición de grandes cantidades de titanio de alta resistencia. Este tipo de titanio es extensamente utilizado en la industria aeroespacial debido a su alta resistencia y rigidez en comparación con su peso relativamente bajo.

Antes de trabajar con el titanio, es esencial someterlo a un tratamiento térmico para optimizar sus propiedades. Se reciben bloques de titanio forjado (Ilustración 40) que han sido pretratados según especificaciones individuales. Este pretratamiento es crucial para asegurar que el material pueda soportar las cargas extremas que enfrentará el Halo durante su uso en carrera.



*Ilustración 40: Bloque de titanio forjado,  
suministrado por el proveedor Tsm Technology  
[19]*

Una vez que el titanio ha sido tratado térmicamente, comienza el proceso de pre-mecanizado. Cada parte del Halo se esculpe utilizando fresadoras de alto rendimiento (Ilustración 41) capaces de cortar elementos con precisión absoluta. El pre-mecanizado incluye la perforación de los tubos que se soldarán juntos para formar el Halo.



*Ilustración 41: Fresadora de 5 ejes encargada de mecanizar las partes del halo [18]*

La soldadura de las partes del Halo (Aro principal, soportes traseros y soporte frontal) se realiza en una cámara cerrada para evitar que cualquier objeto extraño interfiera con el material. Este ambiente controlado es crucial para asegurar la integridad del titanio durante la unión de las partes.

El tipo de soldadura utilizada es por arco de gas inerte con tungsteno (GTAW), más comúnmente conocida como soldadura TIG (Tungsten Inert Gas). Se trata de una soldadura que ofrece un control muy preciso del calor y la adición de material, además de ser resistente a la corrosión. El uso de este tipo de soldadura añadido con las condiciones de trabajo en una cámara cerrada hace que el proceso sea muy preciso y eficaz.



*Ilustración 42: Proceso de soldadura en una cámara cerrada [18]*

Después de la soldadura, el dispositivo entero se somete a un tratamiento térmico adicional para reforzar su estructura. El proceso implica someter al Halo a altas temperaturas durante un período específico de tiempo en un horno controlado. Este proceso tiene múltiples beneficios para el material, entre ellos, el alivio tensional de la estructura.

Una vez completado el tratamiento térmico, el Halo se enfría de manera controlada para evitar la formación de tensiones residuales. Este paso es crítico para mantener las mejoras obtenidas durante el tratamiento y asegurar que el dispositivo final tenga la máxima durabilidad y resistencia.

Además de las pruebas destructivas iniciales, cada dispositivo se somete a ensayos no destructivos. Estas incluyen pruebas de rayos X y pruebas de grietas para asegurar que no haya defectos ocultos en el material.

Una vez que el Halo ha pasado todas las pruebas de calidad, se somete a un proceso de limpieza manual con disparos para crear una superficie abrasiva. Esto facilita a los equipos la adhesión de cualquier pieza aerodinámica permitida por la FIA. Finalmente, el Halo estaría listo para ser empaquetado y enviado a los equipos de Fórmula 1 (Ilustración 43).



*Ilustración 43: Empaquetado final del halo por el proveedor CP Autosport [18]*

## 7. PLANIFICACIÓN

En este apartado se detalla la planificación de cada una de las fases de ejecución del proyecto.

Tabla 3: Planificación del proyecto

ACTIVIDAD	INICIO	FINAL	DURACIÓN	MES						
				1	2	3	4	5	6	7
Planificación análisis y mejora halo	1	7	7	■	■	■	■	■	■	■
Preparación del proyecto	1	1	1	■						
Reunión directiva	1	1	1	■						
Asignación del proyecto	1	1	1	■						
Diseño del modelo CAD 3D	1	2	2	■	■					
Diseño MEF	2	6	5		■	■	■	■	■	
Análisis elementos finitos	2	6	5		■	■	■	■	■	
Propuesta de mejora	4	7	4				■	■	■	■
Análisis Aerodinámico	4	6	3				■	■	■	
Elaboración de documentación	1	7	7	■	■	■	■	■	■	■
Memoria	2	7	6		■	■	■	■	■	■
Anexos	1	7	7	■	■	■	■	■	■	■
Planos	3	5	3			■	■	■		
Pliego de condiciones	5	7	3					■	■	■
Presupuesto	6	7	2						■	■



## 8. PRESUPUESTO

El coste de la elaboración del proyecto, incluyendo los costes de ejecución y fabricación del halo es de **26.107,75 euros**.

El desglose de cada uno de los costes se detalla en el Documento V: Presupuesto.



## 9. REFERENCIAS

- [1] DAZN, [En línea]. Available: <https://www.dazn.com/es-ES/news/motor/gran-premio-de-monaco-de-f1-por-que-los-entrenamientos-libres-son-en-jueves-en-vez-de-viernes/s4q4tqhmuahk1rfts6wouzhao>. [Último acceso: 2024].
- [2] «Matrax lubricants,» [En línea]. Available: <https://matraxlubricantes.com/la-primera-carrera-formula-1-gp-gran-bretana-1950/>. [Último acceso: 2024].
- [3] [En línea]. Available: <https://es.motorsport.com/f1/news/relato-brasil-muerte-senna/4787267/>. [Último acceso: 2024].
- [4] «SoyMotor,» [En línea]. Available: <https://soymotor.com/noticias/muere-robert-hubbard-el-inventor-del-hans-959870>. [Último acceso: 2024].
- [5] G. Piola. [En línea]. Available: <https://www.motor.es/formula-1/cronologia-halo-sistema-proteccion-cabeza-f1-201737986.html>. [Último acceso: 2024].
- [6] «AutoBild,» [En línea]. Available: <https://www.autobild.es/noticias/video-subete-mercedes-williams-halo-molesta-192648>. [Último acceso: 2024].
- [7] «V System,» [En línea]. Available: <https://www.vsystem.it/blog/dallhalo-alla-scocca-ce-un-made-in-italy-che-protolge-i-piloti>. [Último acceso: 2024].
- [8] «Autobild,» [En línea]. Available: <https://www.autobild.es/noticias/gp-belgica-2018-accidente-pudo-ser-mucho-peor-halo-294699>. [Último acceso: 2024].
- [9] «SoyMotor,» [En línea]. Available: <https://soymotor.com/noticias/la-f1-abre-investigacion-accidente-de-grosjean-barein-982796>. [Último acceso: 2024].
- [10] «AS TV,» [En línea]. Available: [https://colombia.as.com/colombia/2021/09/12/videos/1631465608\\_403298.html](https://colombia.as.com/colombia/2021/09/12/videos/1631465608_403298.html). [Último acceso: 2024].
- [11] «InfoBae,» [En línea]. Available: <https://www.infobae.com/autos/2022/07/04/formula-1-por-que-guanyu-zhou-salio-vivo-de-milagro-en-el-accidente-de-silverstone/>. [Último acceso: 2024].



- [12] «ABC,» [En línea]. Available: <https://elpais.com/deportes/2022-07-03/accidente-multiple-en-la-formula-1-el-golpe-de-guanyu-zhou-en-silverstone-en-imagenes.html>. [Último acceso: 2024].
- [13] FIA, [En línea]. Available: [https://www.fia.com/sites/default/files/fia\\_standard\\_8869-2018\\_afp\\_v1\\_0.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/fia_standard_8869-2018_afp_v1_0.pdf). [Último acceso: 2024].
- [14] FIA , «2021 TECHNICAL REGULATIONS,» [En línea]. Available: [https://www.fia.com/sites/default/files/2021\\_formula\\_1\\_technical\\_regulations\\_-\\_iss\\_7\\_-\\_2020-12-16.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/2021_formula_1_technical_regulations_-_iss_7_-_2020-12-16.pdf). [Último acceso: 2024].
- [15] [En línea]. Available: <https://www.neonickel.com/es/alloys/aleaciones-de-titanio/ti-6al-4v-grade-5/>. [Último acceso: 2024].
- [16] «Quimica.es,» [En línea]. Available: [https://www.quimica.es/enciclopedia/Ti6Al4V.html#Propiedades\\_mec.C3.A1nicas](https://www.quimica.es/enciclopedia/Ti6Al4V.html#Propiedades_mec.C3.A1nicas). [Último acceso: 2024].
- [17] Alloys International, [En línea]. Available: [https://alloysintl.com/es/titanium-alloys-supplier/titanium\\_6al-4v/](https://alloysintl.com/es/titanium-alloys-supplier/titanium_6al-4v/). [Último acceso: 2024].
- [18] F. I. d. Automovilismo, «FIA,» [En línea]. Available: <https://www.fia.com/news/how-make-f1-halo>. [Último acceso: 2024].
- [19] «TSM Technology,» [En línea]. Available: <https://es.china-titanio.com/titanium-forging/gr5-forged-titanium-block.html>. [Último acceso: 2024].

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

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Proyecto Fin de Grado***

**DOCUMENTO II: ANEXO DE CÁLCULOS**

**Autor: Jorge Becares Solana**

**Julio - 2024**

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS .....	2
2.1 Geometría .....	2
2.2 Masa del modelo .....	4
2.3 Material.....	4
2.3.1 Composición química .....	5
2.3.2 Propiedades mecánicas.....	5
2.3.3 Propiedades físicas.....	5
2.4 Requisitos estructurales .....	6
2.4.1 Caso de carga 1 .....	6
2.4.2 Caso de carga 2 .....	7
3. MODELO INICIAL.....	8
3.1 Aro principal o Main hoop .....	8
3.2 Soportes traseros o Rear Brackets.....	10
3.3 Soporte frontal o Central Pylon.....	14
3.4 Ensamblaje del conjunto completo .....	19
3.5 Comprobación del peso del modelo inicial.....	21
4. DEFINICIÓN DEL MODELO INICIAL DE ELEMENTOS FINITOS PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL .....	23
4.1 Método de análisis mediante elementos finitos.....	23
4.2 Modelo inicial de elementos finitos en MsC Nastran-Patran .....	24
4.3 ANÁLISIS DE TENSIONES Y DEFORMACIONES EN EL MODELO INICIAL.....	29
4.3.1 Tensiones y deformaciones en el caso de carga 1 .....	29
4.3.2 Tensiones y deformaciones en el caso de carga 2 .....	30
5. DEFINICIÓN DEL SEGUNDO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL .....	33
5.1 Mejora de diseño del modelo inicial.....	33
5.2 Análisis de tensiones y deformaciones en el segundo modelo .....	34



6.	PROPUESTA DE DISEÑO FINAL .....	37
6.1	Modelo geométrico del diseño final.....	39
6.2	Análisis de Tensiones y deformaciones en el caso de carga 1 .....	42
6.3	Análisis de Tensiones y deformaciones en el caso de carga 2 .....	43
6.4	Cálculo en las uniones del halo .....	45
6.4.1	Cálculo de tensiones en el anclaje frontal .....	47
6.4.2	Cálculo de tensiones en los anclajes traseros.....	48
6.5	ANÁLISIS MODAL DEL DISEÑO FINAL .....	49
6.5.1	Conclusiones .....	51
6.6	ANÁLISIS AERODINÁMICO DEL DISEÑO FINAL .....	52
6.6.1	Simulaciones aerodinámicas.....	52
6.6.2	Resultados de las simulaciones aerodinámicas .....	55
6.6.3	Resistencia aerodinámica.....	59
7.	CONCLUSIONES Y SÍNTESIS DE RESULTADOS .....	63
8.	REFERENCIAS .....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: Punto de aplicación de la carga en el crash test 1 [16].....	2
Ilustración 2: Punto de aplicación de la carga en el crash test 2 [16].....	2
Ilustración 3: Dimensiones generales del bodywork del monoplace de 2021 [13] .....	3
Ilustración 4: Medidas de la plancha inferior del monoplace de 2021 [13].....	3
Ilustración 5: Barras de aleación Ti6Al4V almacenadas por el proveedor Alloys International [15].....	4
Ilustración 6: Ejemplo real del test de impacto 1 [13].....	6
Ilustración 7: Ejemplo real del test de impacto 2 [13].....	7
Ilustración 8: Ejemplo real del test de impacto 2 [13].....	7
Ilustración 9: Croquis de la geometría del aro principal del halo.....	8
Ilustración 10: Croquis de la sección del aro principal del halo.....	8
Ilustración 11: Medidas del aro principal .....	9
Ilustración 12: Modelo completo del aro principal del halo .....	9
Ilustración 13: Geometría de la vista en planta del soporte trasero del halo .....	10
Ilustración 14: Ángulo de inclinación que tendrá el halo respecto a la horizontal.....	10
Ilustración 15: Modelo con el plano inclinado de la sección.....	11
Ilustración 16: Variación de la altura del soporte .....	11
Ilustración 17: Extrusión de tipo corte para conseguir la forma semi cilíndrica de la pieza ..	12
Ilustración 18: Cilindro hueco que actuará como unión en el ensamblaje de ambas piezas	12
Ilustración 19: Croquis de los anclajes del soporte trasero.....	12
Ilustración 20: Extrusión de los anclajes del soporte trasero .....	13
Ilustración 21: Creación de los dos planos donde cambian las secciones de los anclajes izquierdo y central.....	13
Ilustración 22: Extrusión en el anclaje izquierdo.....	13
Ilustración 23: Extrusión en el anclaje central .....	13
Ilustración 24: Modelo completo del soporte trasero del halo .....	14
Ilustración 25: Boceto de la geometría del Soporte frontal .....	14
Ilustración 26: Extrusión de altura del modelo.....	15
Ilustración 27: Geometría del contorno lateral del soporte .....	15
Ilustración 28: Extrusión del contorno del soporte central .....	16
Ilustración 29: Redondeo de las aristas exteriores del pilar central .....	16
Ilustración 30: Redondeo de la arista de la base del pilar central.....	16
Ilustración 31: Vaciado interior de la pieza.....	17
Ilustración 32: Creación del boceto 3D, eje de referencia y punto común de unión.....	17
Ilustración 33: Boceto de la geometría del aro principal .....	18

Ilustración 34: Boceto de la sección exterior del aro principal .....	18
Ilustración 35: Función barrido de tipo corte del aro principal.....	18
Ilustración 36: Modelo completo del soporte frontal del halo .....	19
Ilustración 37: Todas las partes del halo listas para ser ensambladas entre sí .....	19
Ilustración 38: Restricciones de coincidencia entre las dos secciones .....	20
Ilustración 39: Restricciones entre los ejes del soporte trasero y del aro principal .....	20
Ilustración 40: Restricción entre planos de simetría .....	20
Ilustración 41: a) Restricción entre ejes y b) restricción de tangencia entre superficies.....	21
Ilustración 42: Ensamblaje del modelo inicial del Halo .....	21
Ilustración 43: Propiedades del conjunto completo del halo .....	22
Ilustración 44: Tabla de materiales existentes en la biblioteca de Autodesk.....	22
Ilustración 45: Método de elementos finitos [19].....	23
Ilustración 46: Modelo geométrico inicial en MsC Nastran-Patran.....	25
Ilustración 47: Mallado del modelo inicial .....	26
Ilustración 48: Modelo inicial con las restricciones de contorno y casos de carga .....	27
Ilustración 49: Propiedades del material en Nastran-Patran.....	28
Ilustración 50: Tensiones producidas en el soporte en el caso de carga 1 .....	29
Ilustración 51: Tensiones producidas en el aro principal en el caso de carga 1.....	29
Ilustración 52: Deformaciones producidas en el caso de carga 1 .....	30
Ilustración 53: Tensiones producidas en el soporte en el caso de carga 2 .....	30
Ilustración 54: Tensiones producidas en el aro principal en el caso de carga 2.....	31
Ilustración 55: Deformaciones producidas en el caso de carga 2.....	31
Ilustración 56: Distancia entre los puntos singulares del segundo modelo .....	33
Ilustración 57: Distancia entre los puntos singulares del modelo inicial .....	33
Ilustración 58: Vista en detalle del elemento ficticio creado en la unión .....	34
Ilustración 59: Modelo en Nastran-Patran aplicado el rediseño.....	34
Ilustración 60: Tensiones producidas en el segundo modelo .....	35
Ilustración 61: Tensiones producidas en el segundo modelo .....	35
Ilustración 62: Deformaciones producidas en el segundo modelo.....	35
Ilustración 63: Modelo geométrico 2D-2D .....	37
Ilustración 64: Modelo final con las condiciones de contorno, cargas y mallados creados ..	38
Ilustración 65: Vaciado interior de 6,5mm en el soporte .....	39
Ilustración 66: Reducción del espesor del aro principal a 3,5mm .....	39
Ilustración 67: Masa del modelo aplicados los cambios de espesores .....	40
Ilustración 68: Modificación de la longitud de la base del pilar central.....	40
Ilustración 69: Modificación en la geometría del soporte .....	41
Ilustración 70: Masa del modelo final .....	41

Ilustración 71: Tensiones producidas en el caso de carga 1 .....	42
Ilustración 72: Deformaciones producidas en el caso de carga 1 .....	42
Ilustración 73: Tensiones producidas en el caso de carga 2 .....	43
Ilustración 74: Deformaciones producidas en el caso de carga 2.....	43
Ilustración 75: Tensión de rotura.....	44
Ilustración 76: Deformación sufrida en el fallo estructural de la pieza .....	44
Ilustración 77: Modelo final MEF para el cálculo en las uniones.....	45
Ilustración 78: Tipo de restricción en el anclaje frontal .....	45
Ilustración 79: Tipo de restricción en el anclaje trasero .....	46
Ilustración 80: Deformación de todos los modos de vibración .....	50
Ilustración 81: Volumen de control del análisis CFD.....	52
Ilustración 82: Asignación del tipo de material al volumen exterior.....	53
Ilustración 83: Asignación del tipo de material al halo .....	53
Ilustración 84: Condición de contorno de velocidad frontal del aire .....	53
Ilustración 85: Condición de contorno de presión absoluta .....	54
Ilustración 86: Creación del mallado del modelo en CFD .....	54
Ilustración 87: Propiedades que se establecen para ser mostradas en los resultados .....	54
Ilustración 88: Comienzo de la simulación .....	54
Ilustración 89: Trayectoria del aire a 80 km/h.....	55
Ilustración 90: Velocidad que alcanza el aire en la pieza visto desde el perfil .....	55
Ilustración 91: Velocidad que alcanza el aire en la pieza visto en planta.....	55
Ilustración 92: Presión del aire desde diferentes vistas .....	56
Ilustración 93: Trayectoria del aire en vista frontal .....	57
Ilustración 94: Trayectoria del aire en vista isométrica .....	57
Ilustración 95: Velocidad del aire vista desde el perfil .....	57
Ilustración 96: Velocidad del aire vista en planta.....	57
Ilustración 97: Presión del aire desde diferentes vistas .....	58
Ilustración 98: Función "Wall calculator" en Autodesk CFD.....	60
Ilustración 99: Resultado de la resistencia aerodinámica en el caso de 350 km/h.....	60
Ilustración 100: Boceto del contorno frontal del halo .....	61
Ilustración 101: Área total frontal.....	61

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Composición química de la aleación de titanio [1] .....	5
Tabla 2: Propiedades mecánicas de la aleación de titanio [1] .....	5
Tabla 3: Propiedades físicas de la aleación de titanio [1] .....	5
Tabla 4: Valores de las fuerzas y momentos en los anclajes tras el caso de carga 1 .....	46
Tabla 5: Valores de las fuerzas y momentos en los anclajes tras el caso de carga 2 .....	46
Tabla 6: Frecuencia de vibración obtenida en cada modo .....	49
Tabla 7: Resistencias aerodinámicas .....	59
Tabla 8: Resultado del coeficiente aerodinámico para cada valor de velocidad .....	62



# 1. INTRODUCCIÓN

En el presente documento se recoge de forma detallada y justificada los resultados, el análisis, mejora de diseño y simulaciones realizadas en el halo de un Fórmula 1.

En primer lugar, se genera el modelo 3D en Autodesk Inventor, a partir de bocetos y medidas proporcionadas en la norma que establece la FIA STANDARD 8869-2018.

Una vez se ha diseñado el modelo 3D del halo, y cumple con el peso establecido por la norma, se construye el modelo de elementos finitos en MsC Nastran-Patran.

Para su análisis, se decide realizar un modelo unidimensional para el aro principal del halo, y uno bidimensional para el soporte central en forma de V. Se opta por realizar este diseño debido a que su simplificación, en principio, no afecta a los resultados obtenidos, siendo igual de válidos que un modelo tridimensional completo.

Se estudian las tensiones y deformaciones generadas en los dos test de impacto detallados en la norma para ver si cumple o no con las especificaciones.

Con los resultados obtenidos en los casos estáticos, se plantean posibles mejoras en el diseño del halo y se realizan las simulaciones pertinentes con el objetivo de cumplir con todos los requerimientos estructurales y mecánicos.

Además, se opta por realizar un análisis modal del mismo, con el fin de calcular las frecuencias naturales y modos de vibración del sistema bajo cargas dinámicas. Esto permite localizar las posibles deficiencias el modelo en términos de seguridad, evitando que el modelo o algún componente entre en resonancia.

Finalmente se realiza un análisis aerodinámico mediante Autodesk CFD, planteando diferentes situaciones reales y analizando los resultados obtenidos en términos de eficiencia aerodinámica y resistencia al avance.

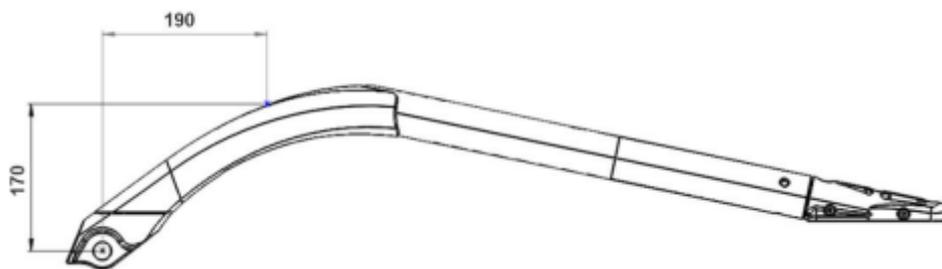
## 2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

El objetivo principal del proyecto es diseñar el modelo 3D del halo en Autodesk Inventor. Para ello, se ha analizado la normativa que el diseño ha de cumplir y que por lo tanto va a condicionar el diseño final del mismo. Dado que la FIA no proporciona ningún documento en el que se recojan las medidas y tolerancias del halo, sino que éstas están únicamente restringidas al fabricante y a la FIA, se opta por utilizar la información existente en la normativa FIA STANDARD 8869-2018 y en las regulaciones técnicas de 2021.

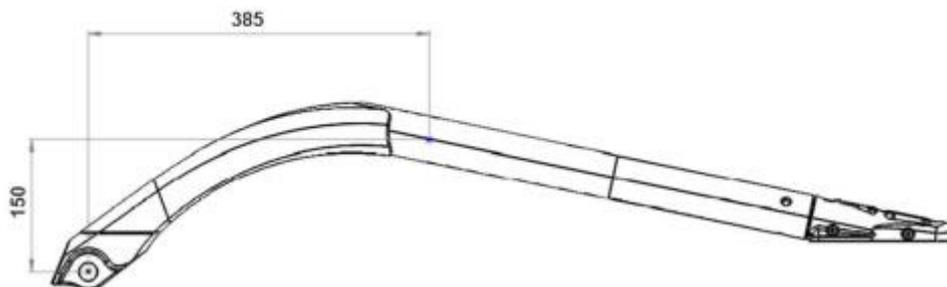
A continuación, se van a exponer las especificaciones técnicas recogidas en dicha normativa, las cuales van a afectar diversos parámetros del diseño como son: su geometría, masa, material utilizado y cargas a soportar.

### 2.1 Geometría

En primer lugar, en el apéndice C de la normativa FIA STANDARD 8869-2018 se observa en la Ilustración 1 y en la Ilustración 2 la distancia a la que se debe aplicar la carga en los dos test de impacto.



*Ilustración 1: Punto de aplicación de la carga en el crash test 1 [16]*



*Ilustración 2: Punto de aplicación de la carga en el crash test 2 [16]*

Gracias a estas medidas, se toma como referencia una serie de valores de la altura y la longitud del modelo.

Por otro lado, en el artículo 3 de la normativa 2021 FORMULA 1 TECHNICAL REGULATIONS existe un croquis (Ilustración 3) con las medidas generales del *Bodywork* del monoplaza.

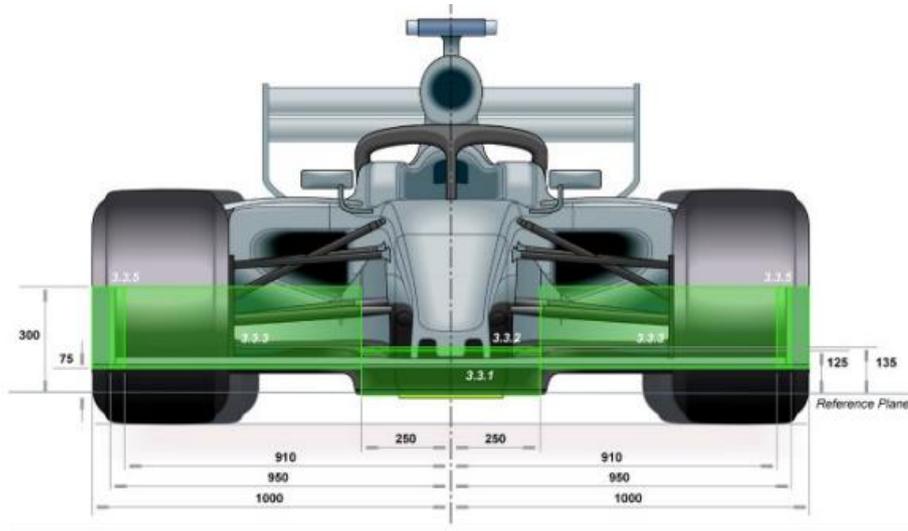


Ilustración 3: Dimensiones generales del bodywork del monoplaza de 2021 [13]

Se concluye que el diámetro del arco principal del halo estaría alrededor de los 500mm.

Por último, en la Ilustración 4 tenemos las medidas de la plancha inferior. Esta plancha funciona como elemento para medir lo que roza el monoplaza con el suelo, regulando así la altura de este.

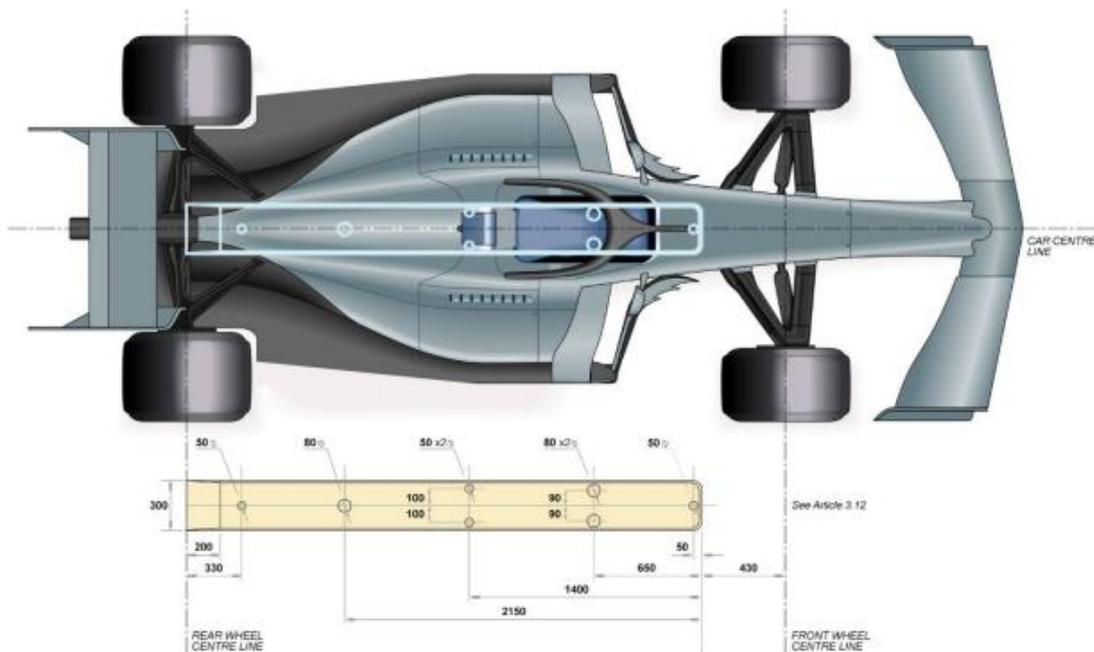


Ilustración 4: Medidas de la plancha inferior del monoplaza de 2021 [13]

Teniendo en cuenta todas las medidas proporcionadas en los documentos de las distintas normativas de la FIA, se tiene una clara idea de las dimensiones y tolerancias del modelo.

## 2.2 Masa del modelo

Según la normativa FIA STANDARD 8869-2018 el halo deberá tener un peso de 7 kg con unas tolerancias de +0.05 kg y -0.15 kg.

## 2.3 Material

Según la normativa FIA STANDARD 8869-2018, el conjunto completo deberá estar producido en aleación de titanio Ti6Al4V de grado 5.

Se trata de una de las aleaciones de titanio más utilizadas debido a su excelente combinación de propiedades mecánicas, como alta resistencia a la tracción y a la fluencia, y su destacada resistencia a la corrosión. Compuesta aproximadamente por 90% de titanio, 6% de aluminio y 4% de vanadio, esta aleación se destaca por su relación resistencia-peso, que la hace ideal para aplicaciones críticas en diversas industrias.

En el sector aeroespacial, el Ti6Al4V se utiliza en componentes de motores de aviones, estructuras de fuselajes y trenes de aterrizaje. En la industria médica, es valorado por su biocompatibilidad, siendo común en prótesis ortopédicas e implantes dentales. También encuentra aplicaciones en la industria automotriz, en componentes de alto rendimiento, y en la marina, para ejes y hélices de barcos. Además, su uso se extiende a equipos deportivos e instrumentación científica debido a su durabilidad y resistencia.

Sin embargo, la aleación presenta algunos inconvenientes, como su alto costo de producción y procesamiento, y la dificultad de maquinado debido a su alta resistencia y baja conductividad térmica, lo que provoca un desgaste rápido de las herramientas. Además, la soldadura de Ti6Al4V requiere un control estricto para evitar la contaminación. A pesar de ello, las ventajas del Ti6Al4V en términos de resistencia, peso y durabilidad lo convierten en una opción preferida en aplicaciones de alta tecnología y exigencia.



*Ilustración 5: Barras de aleación Ti6Al4V almacenadas por el proveedor Alloys International [15]*



### 2.3.1 Composición química

En la Tabla 1, se muestran los porcentajes existentes de elementos en la aleación:

Tabla 1: Composición química de la aleación de titanio [1]

%	C	N	O	H	Fe	Ti	Al	V
Min	-	-	-	-	-	Balance	5.5	3.5
Max	0.08	0.05	0.2	0.125	0.4	Balance	6.75	4.5

### 2.3.2 Propiedades mecánicas

En la Tabla 2 se observan las propiedades mecánicas:

Tabla 2: Propiedades mecánicas de la aleación de titanio [1]

Resistencia a la tracción (MPa)	1170
Límite elástico (MPa)	1100
Dureza Rockwell C	36
Ductilidad (%)	10
Coefficiente de Poisson	0.33
Módulo de Young (GPa)	114
Resistencia a Fatiga (MPa)	350

### 2.3.3 Propiedades físicas

Las propiedades físicas se detallan en la Tabla 3:

Tabla 3: Propiedades físicas de la aleación de titanio [1]

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	4.42
Punto de fusión (°C/°F)	1649/3000
Calor específico (J/kg.cm)	560
Resistencia eléctrica (ohm.cm)	170
Conductividad térmica (w/m.k)	7.2
Coefficiente de dilatación térmica (µm/m°C)	8,6

## 2.4 Requisitos estructurales

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la normativa FIA STANDARD 8869-2018 establece dos test de impacto que obligatoriamente el halo deberá de superar para ser considerado apto para su uso en carrera. Antes de ello, la FIA establece una serie de condiciones a la hora de realizar los dos test:

- El conjunto completo debe estar fijado al equipo con sujeciones para los anclajes delantero y trasero, según se especifica en la Información Técnica Complementaria.
- El halo deberá estar posicionado de manera que las caras de montaje para las fijaciones traseras sean completamente horizontales.
- Las cargas se aplicarán utilizando una almohadilla de 150 mm de diámetro cuyo centro esté a menos de 5 mm de la posición de carga especificada. Se permite un radio de 3 mm en los bordes de la almohadilla.
- Se puede usar goma de 3 mm de grosor entre la almohadilla y la estructura.
- Las cargas se aplicarán mediante un solo cilindro con una dirección de aplicación constante.
- Las deflexiones se medirán en la dirección de la aplicación de la carga.
- Las direcciones de las cargas se describen con referencia a la posición del sistema en el automóvil.

### 2.4.1 Caso de carga 1

La primera prueba consiste en aplicar una fuerza resultante descendente y vertical de 116 kN y otra carga resultante horizontal y en sentido hacia los soportes traseros de 46 kN en la posición fijada por la Ilustración 1. Aplicada la carga, la pieza no deberá romper y su deformación no podrá exceder 17,5mm.



Ilustración 6: Ejemplo real del test de impacto 1 [13]

### 2.4.2 Caso de carga 2

En este segundo test de impacto se deberá aplicar una carga mínima de 125kN, que se descompone en una fuerza de 93 kN lateralmente hacia dentro y 83 kN longitudinalmente en sentido hacia los soportes traseros en la posición fijada de la Ilustración 2.

Ante la aplicación de dicha carga, no deberá de haber fallos estructurales en la pieza y la deformación no deberá exceder los 45mm. Seguidamente se deberá de aumentar la carga hasta que la pieza rompa. La deformación no deberá de superar los 100mm.



*Ilustración 8: Ejemplo real del test de impacto 2 [13]*



*Ilustración 7: Ejemplo real del test de impacto 2 [13]*

### 3. MODELO INICIAL

Para el diseño del halo, se opta por realizar cada parte principal por separado para posteriormente ensamblarlo. Esto resulta ser lo más realista ya que el halo contiene en su proceso de fabricación la soldadura de las diferentes partes del modelo. Concretamente, se va a dividir en aro principal, soporte frontal y soportes traseros.

#### 3.1 Aro principal o Main hoop

En la Ilustración 9 se muestra la fibra neutra de la sección transversal. Esta consta de un semicírculo de 500mm de diámetro y una prolongación de 195mm en ambos lados.

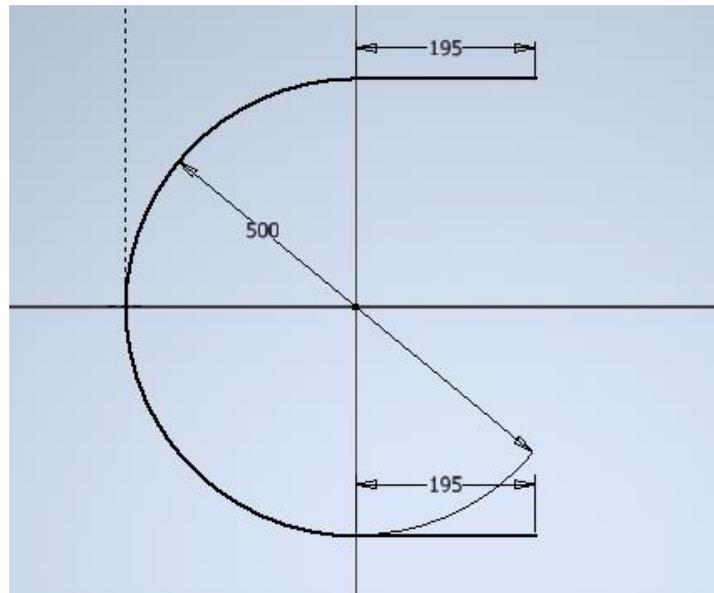


Ilustración 9: Croquis de la geometría del aro principal del halo

La sección del aro principal se detalla en la Ilustración 10. Se trata de un diámetro exterior de 60mm e interior de 52mm, con un espesor total de 4mm.

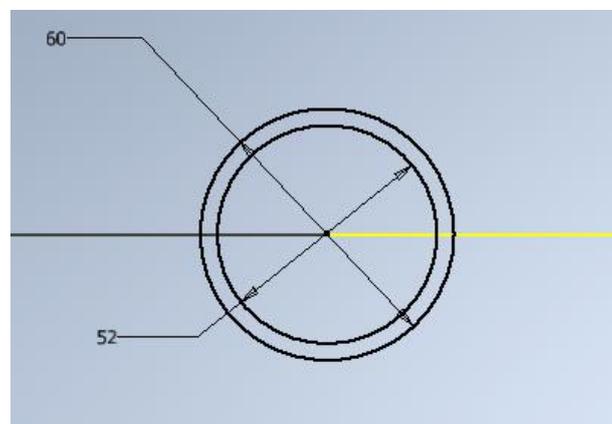
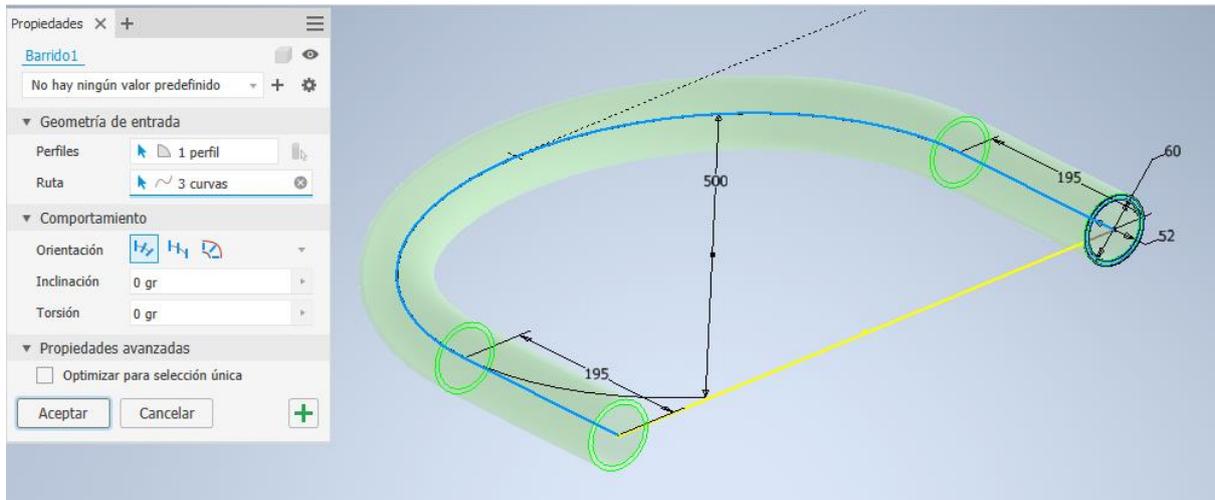


Ilustración 10: Croquis de la sección del aro principal del halo

Una vez definida la geometría del aro principal y de su sección, se genera el modelo 3D.



*Ilustración 11: Medidas del aro principal*

De esta manera, quedaría finalizado el diseño del aro principal del halo en Autodesk Inventor. (Ilustración 12)



*Ilustración 12: Modelo completo del aro principal del halo*

### 3.2 Soportes traseros o Rear Brackets

Para el diseño de los soportes traseros, se procede a diseñar uno de ellos ya que son totalmente idénticos, para posteriormente insertar dos en el ensamblaje.

En primer lugar, se crea la geometría de la vista en planta del modelo (Ilustración 13), para realizar una “extrusión” y dar lugar tanto a la altura, como la longitud que tendrá el soporte trasero.

Un dato importante es la anchura de 60mm que se le da a la parte que estará en contacto con el aro principal, siendo igual que el diámetro exterior de la sección.

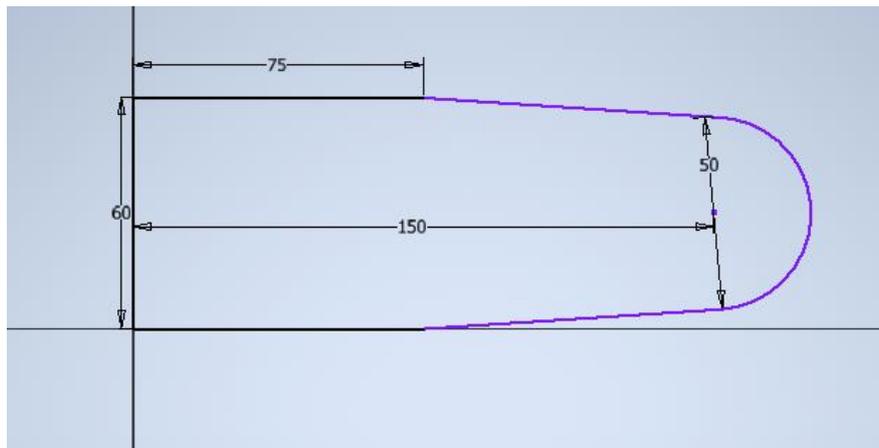


Ilustración 13: Geometría de la vista en planta del soporte trasero del halo

El ángulo de inclinación que tendrá el halo respecto a la horizontal la deberán de tener los soportes traseros ya que posteriormente serán ensamblados junto al aro principal. Se decide aplicar una inclinación de  $8^\circ$  tal y como refleja la Ilustración 14:

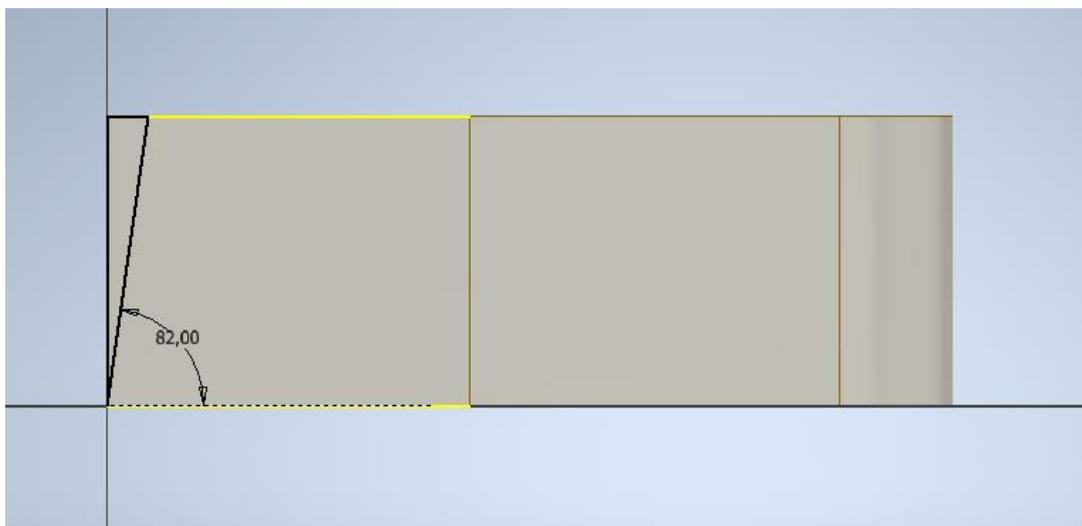


Ilustración 14: Ángulo de inclinación que tendrá el halo respecto a la horizontal

Una vez realizado el boceto del perfil lateral se procede a realizar una extrusión de tipo "corte" de modo que se obtiene el modelo con el plano de la sección inclinado. (Ilustración 15)

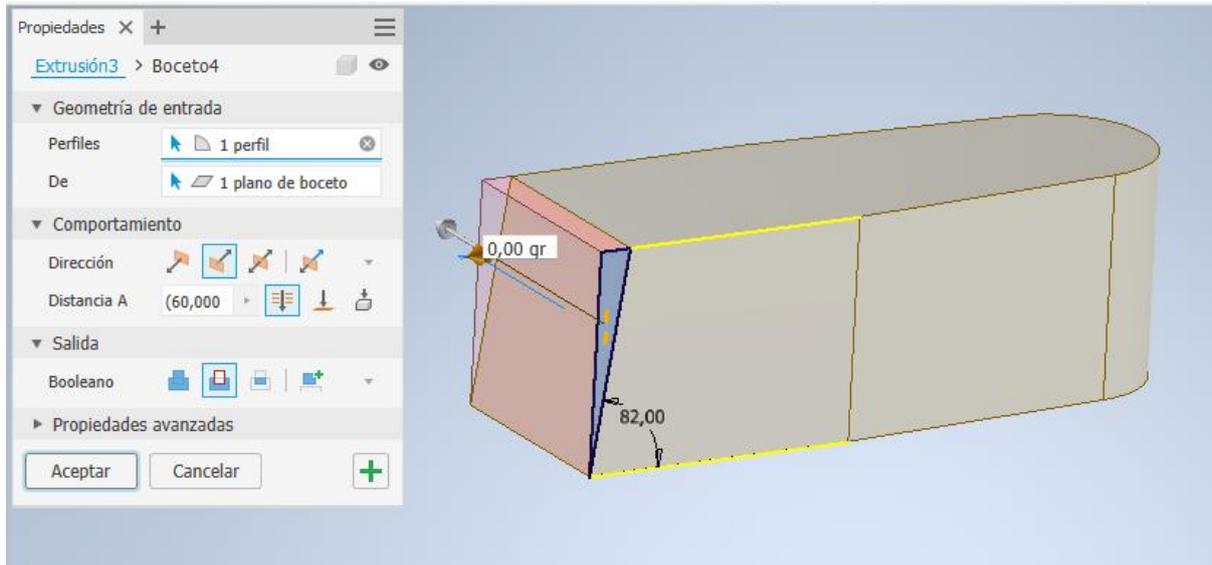


Ilustración 15: Modelo con el plano inclinado de la sección

El soporte no será uniforme en altura, como se observa en la Ilustración 16:

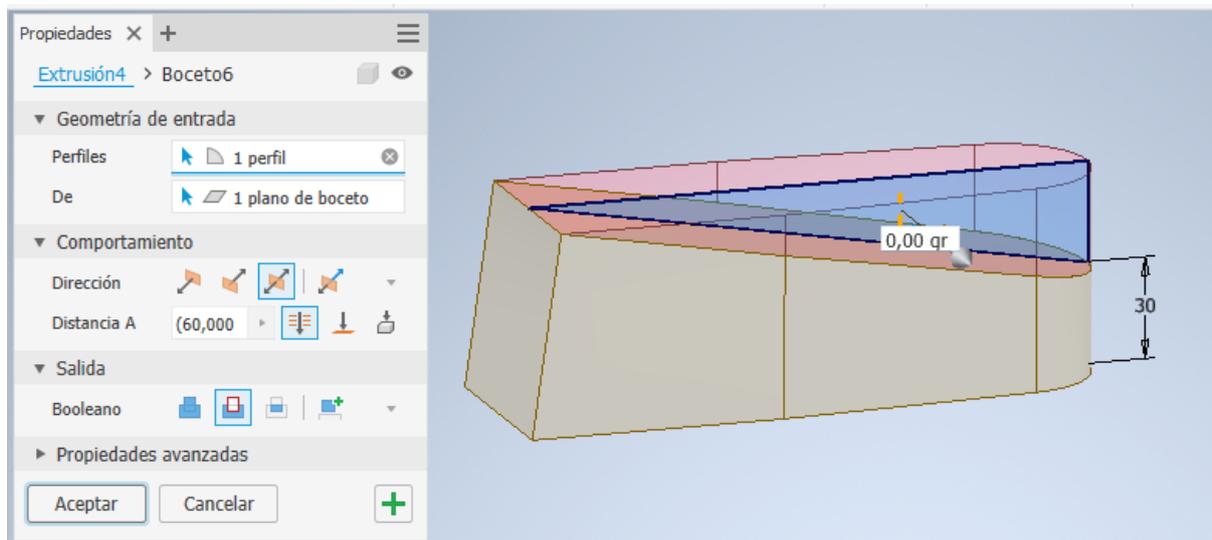


Ilustración 16: Variación de la altura del soporte

El siguiente paso es darle a la pieza una forma semi cilíndrica cuyo diámetro coincida con el exterior de la sección del aro principal al que irán unidos los soportes traseros. (Ilustración 17)

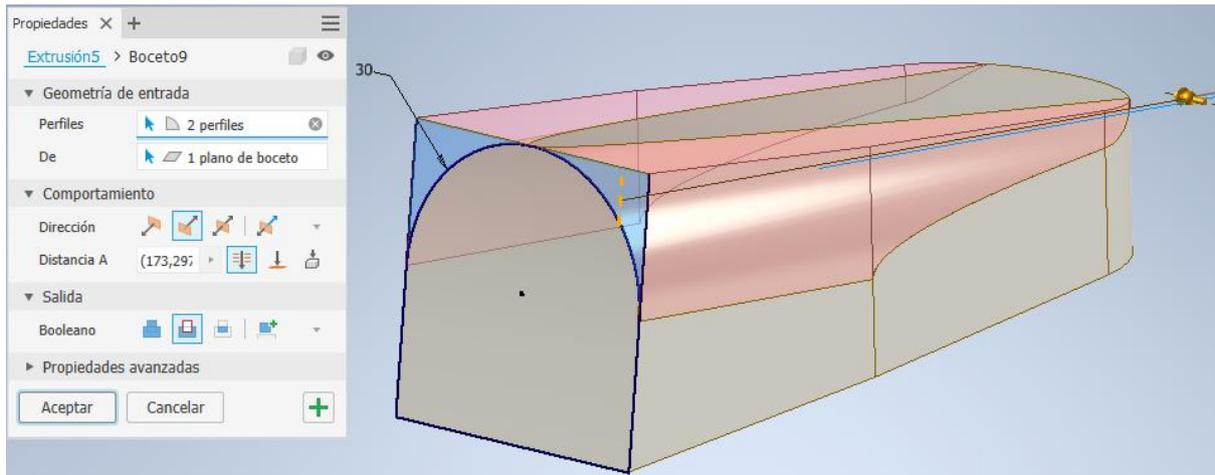


Ilustración 17: Extrusión de tipo corte para conseguir la forma semi cilíndrica de la pieza

En ese mismo plano, se crea un boceto con una sección de diámetro exterior de 52mm (coincidente con el diámetro interior del aro principal) e interior de 51mm, de tal forma que se obtiene un cilindro corto muy hueco (espesor despreciable) que actuará como nexo a la hora de ensamblar los soportes traseros con el aro principal. (Ilustración 18)

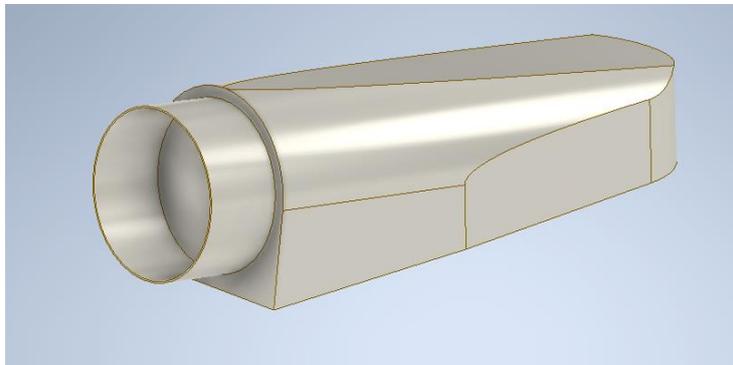


Ilustración 18: Cilindro hueco que actuará como unión en el ensamblaje de ambas piezas

En la Ilustración 19, se detalla el croquis de los anclajes del soporte al chasis.

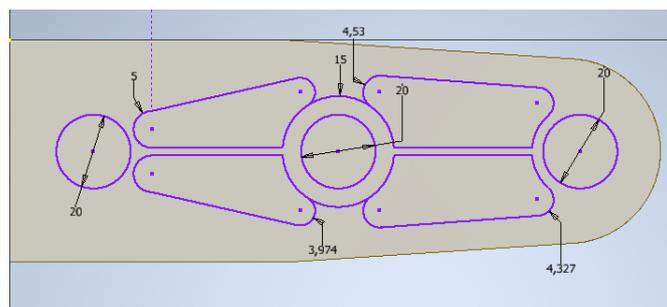


Ilustración 19: Croquis de los anclajes del soporte trasero

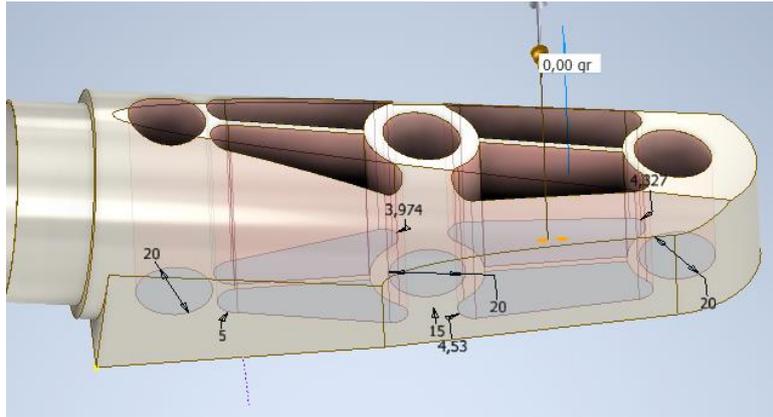


Ilustración 20: Extrusión de los anclajes del soporte trasero

El anclaje izquierdo (Ilustración 22) y central (Ilustración 23) tienen a su vez un pequeño vaciado en su interior de forma que la sección del anclaje no es idéntica en toda su longitud. Para su creación es necesario la existencia de los planos que se observan en la Ilustración 21:

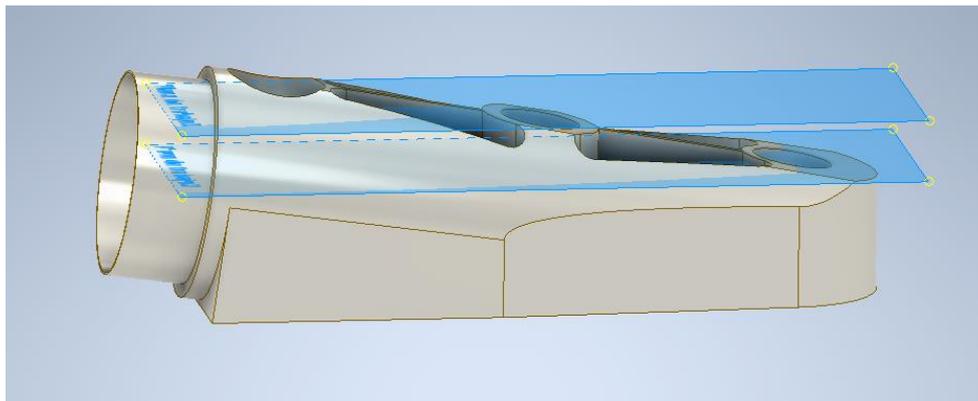


Ilustración 21: Creación de los dos planos donde cambian las secciones de los anclajes izquierdo y central

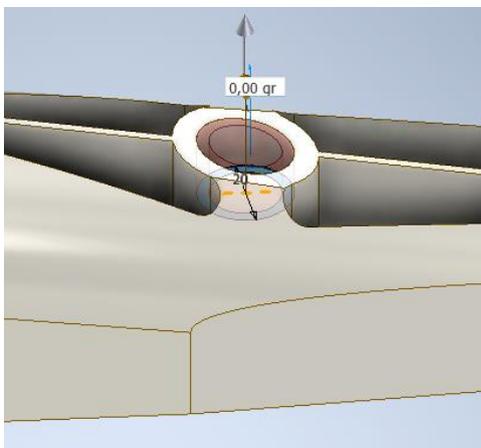


Ilustración 23: Extrusión en el anclaje central

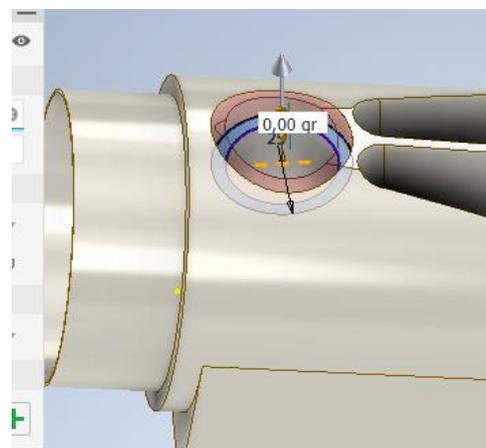


Ilustración 22: Extrusión en el anclaje izquierdo

Se obtiene así el modelo completo del soporte trasero. (Ilustración 24)

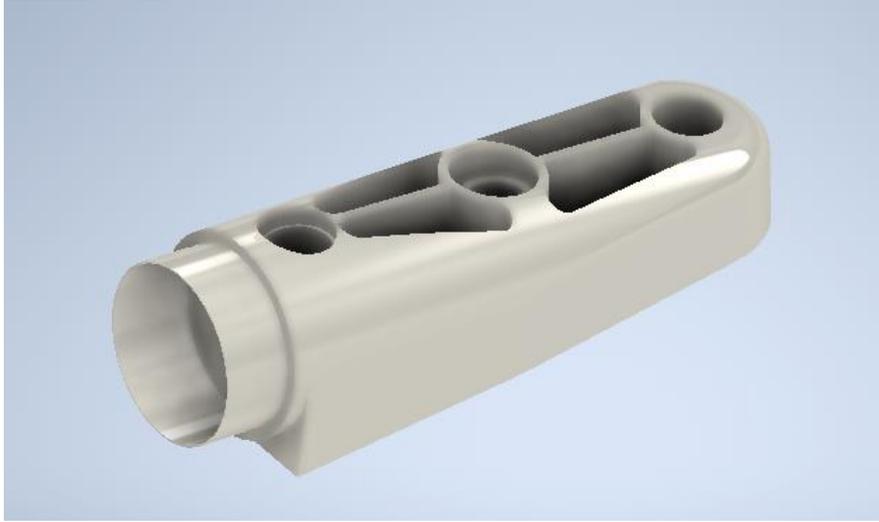


Ilustración 24: Modelo completo del soporte trasero del halo

### 3.3 Soporte frontal o Central Pylon

La geometría desde la vista en planta del soporte frontal se detalla en la Ilustración 25, de tal manera que se diferencian dos partes: El pilar central que va integrado en el chasis del monoplaza y el soporte en forma de V que va unido al aro principal. El soporte en V está formado por 3 arcos de tal forma que va unido tangente al aro principal, optimizando así la geometría y haciéndola más eficiente aerodinámicamente.

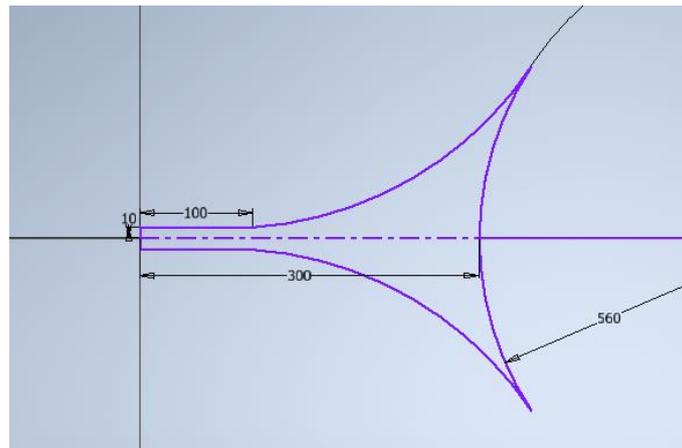


Ilustración 25: Boceto de la geometría del Soporte frontal

La altura del modelo se obtiene mediante la extrusión de la Ilustración 26:

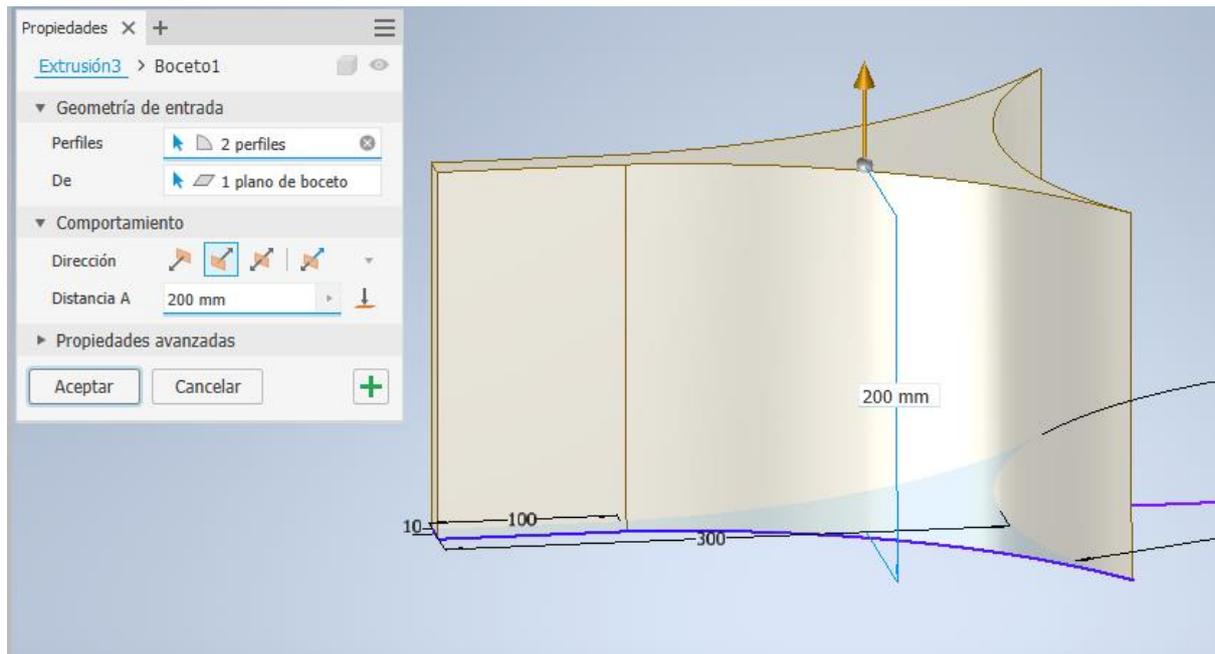


Ilustración 26: Extrusión de altura del modelo

La geometría del contorno lateral del soporte viene definida en la Ilustración 27. En ella se establece la distancia a la que se deberá de aplicar el caso de carga 1 (Ilustración 1)

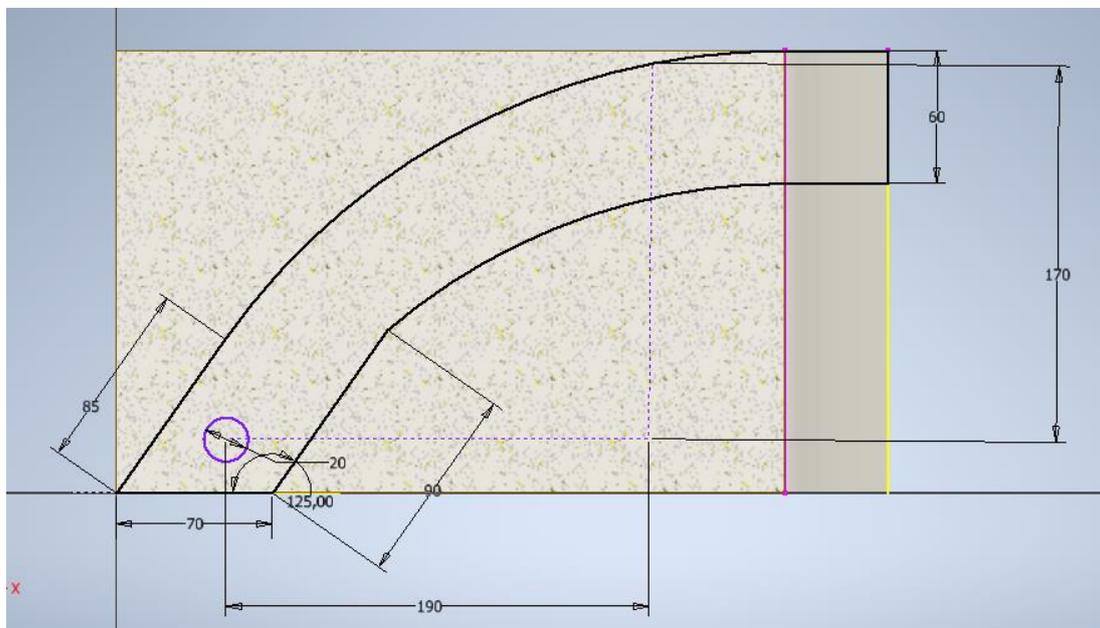


Ilustración 27: Geometría del contorno lateral del soporte

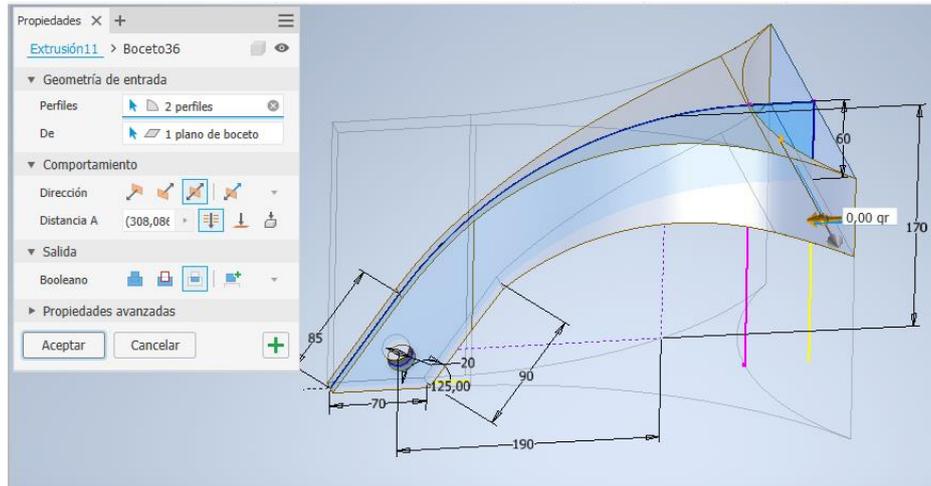


Ilustración 28: Extrusión del contorno del soporte central

Se debe de aplicar un redondeo tanto en las aristas exteriores del contorno como las de la base donde apoya el pilar central, tal y como reflejan la Ilustración 29 y la Ilustración 30:



Ilustración 29: Redondeo de las aristas exteriores del pilar central

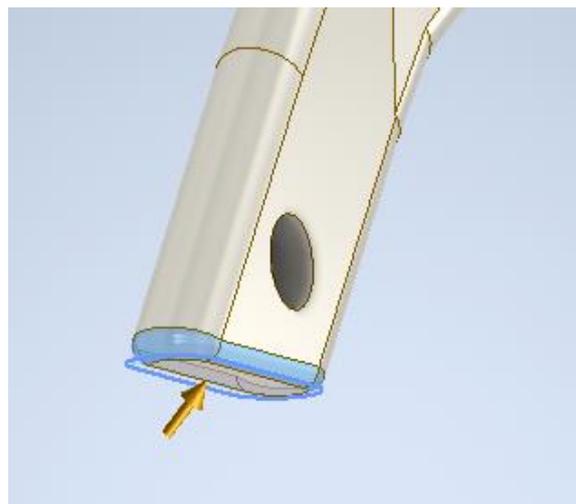
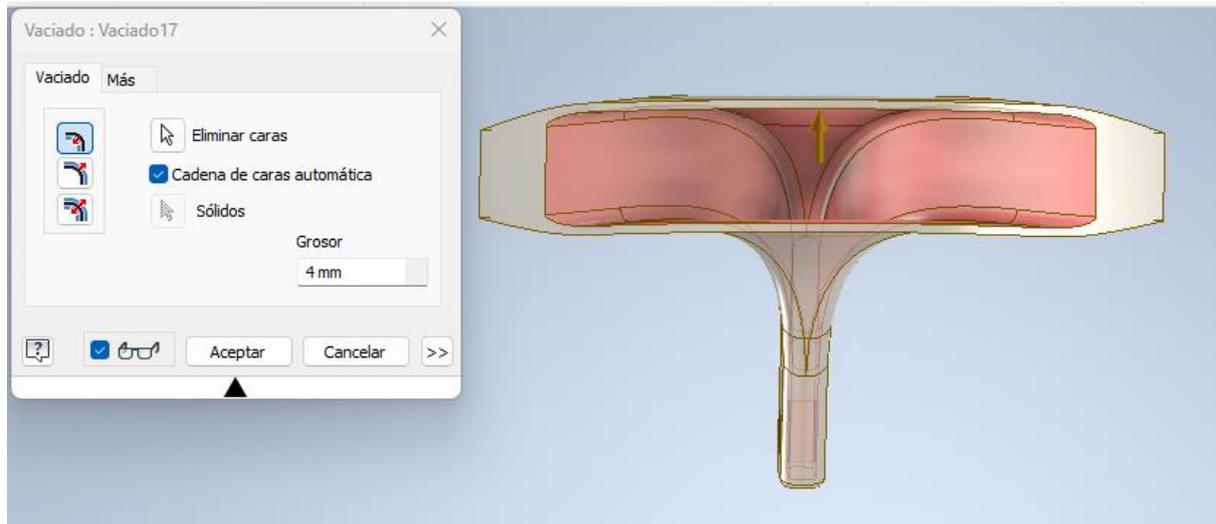


Ilustración 30: Redondeo de la arista de la base del pilar central

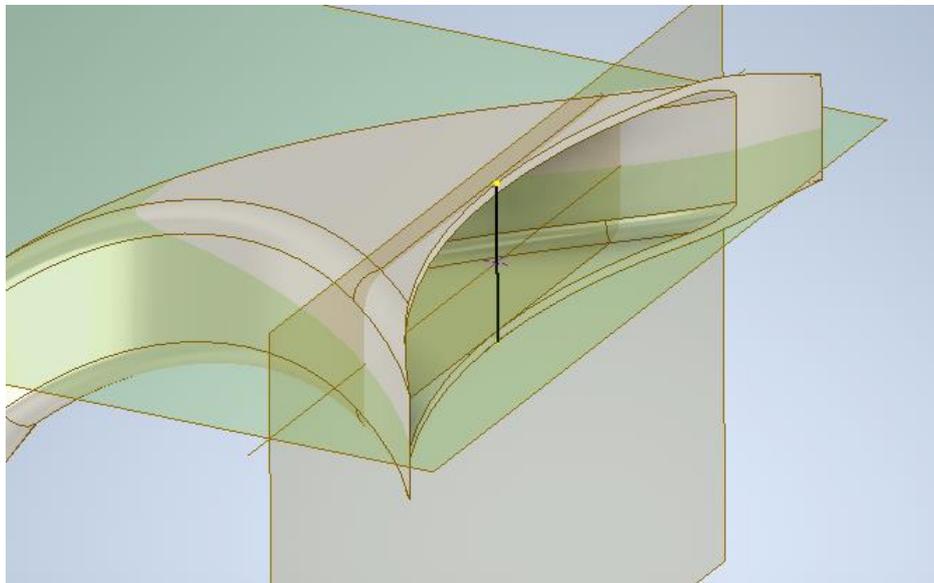
El siguiente paso será crear un vaciado de la pieza ya que esta deberá de ser hueca. Se optará por utilizar un espesor de 4mm.



*Ilustración 31: Vaciado interior de la pieza*

Por último, se deberá crear la geometría que facilitará la unión entre el aro principal y el soporte en forma de V, de tal manera de que a la hora de ensamblarlo sea 100% precisa y no haya material sobrante entre las piezas.

En la Ilustración 32, Ilustración 33 e Ilustración 34 se detallan los elementos creados para facilitar el ensamblaje:



*Ilustración 32: Creación del boceto 3D, eje de referencia y punto común de unión*

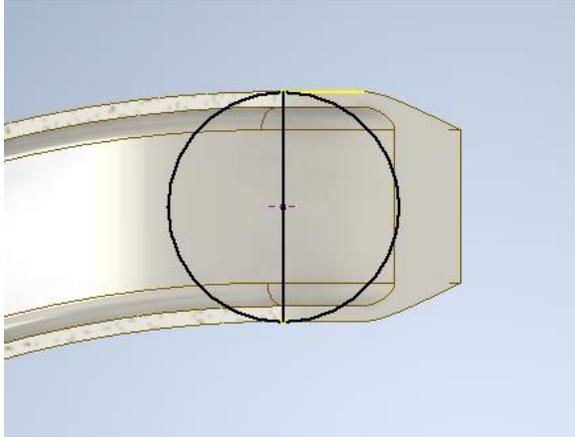


Ilustración 34: Boceto de la sección exterior del aro principal

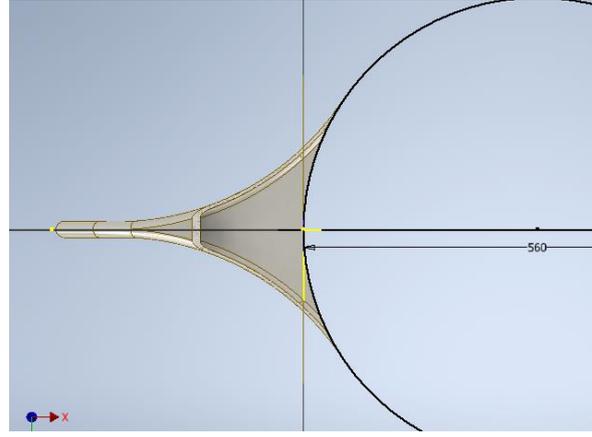


Ilustración 33: Boceto de la geometría del aro principal

Se simula la existencia del aro principal que permite eliminar el material sobrante en la unión de los dos elementos (Ilustración 35)

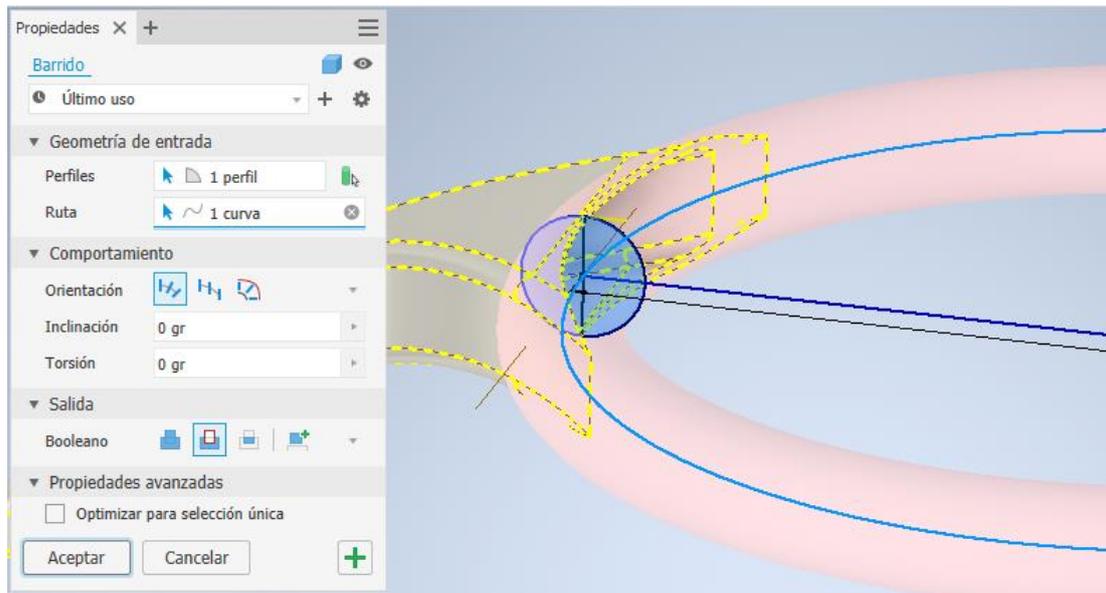


Ilustración 35: Función barrido de tipo corte del aro principal

Se obtiene así el diseño completo del soporte frontal del halo en Autodesk Inventor. (Ilustración 36)



*Ilustración 36: Modelo completo del soporte frontal del halo*

### 3.4 Ensamblaje del conjunto completo

Una vez creados los modelos completos de cada parte principal del halo (Ilustración 37), se deben de ensamblar en un único conjunto.



*Ilustración 37: Todas las partes del halo listas para ser ensambladas entre sí*

La primera unión que se realiza es la de los soportes traseros con el aro principal. Se restringe la coincidencia entre ejes (Ilustración 39) y la coincidencia entre secciones (Ilustración 38).

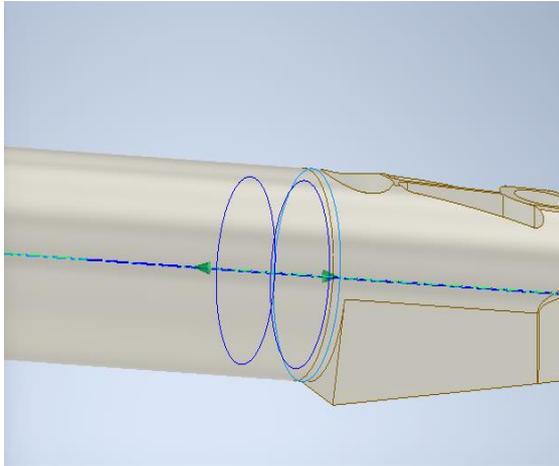


Ilustración 39: Restricciones entre los ejes del soporte trasero y del aro principal

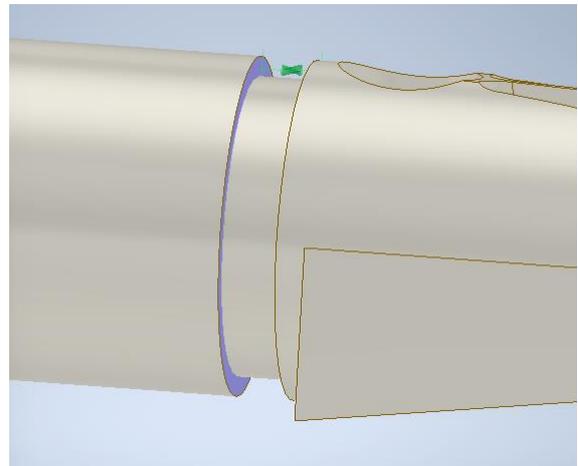


Ilustración 38: Restricciones de coincidencia entre las dos secciones

Una vez unidos los soportes traseros, se realiza la unión soporte central-aro principal. La primera restricción será la de coincidencia entre planos centrales de simetría (Ilustración 40)

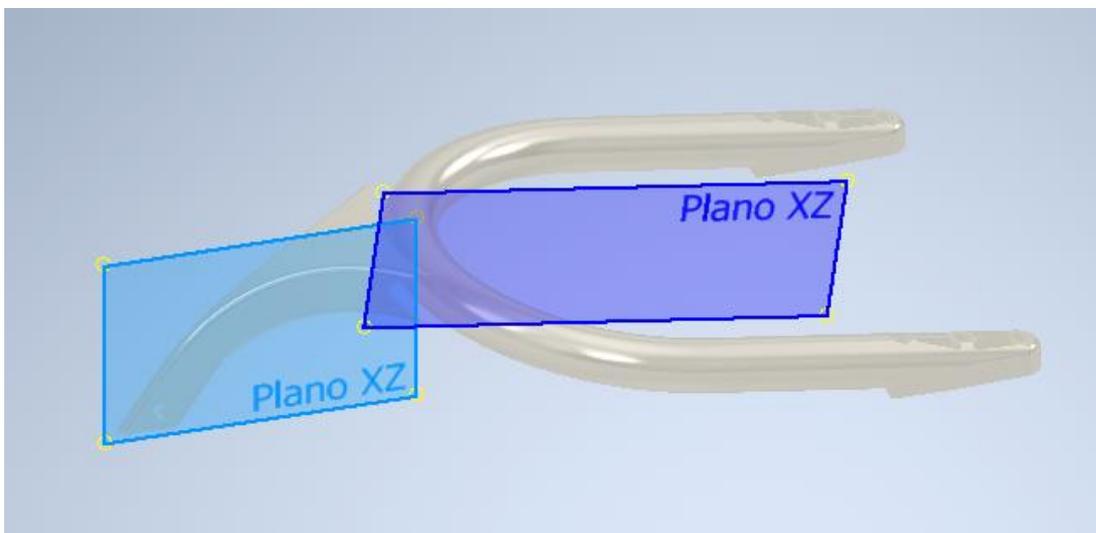
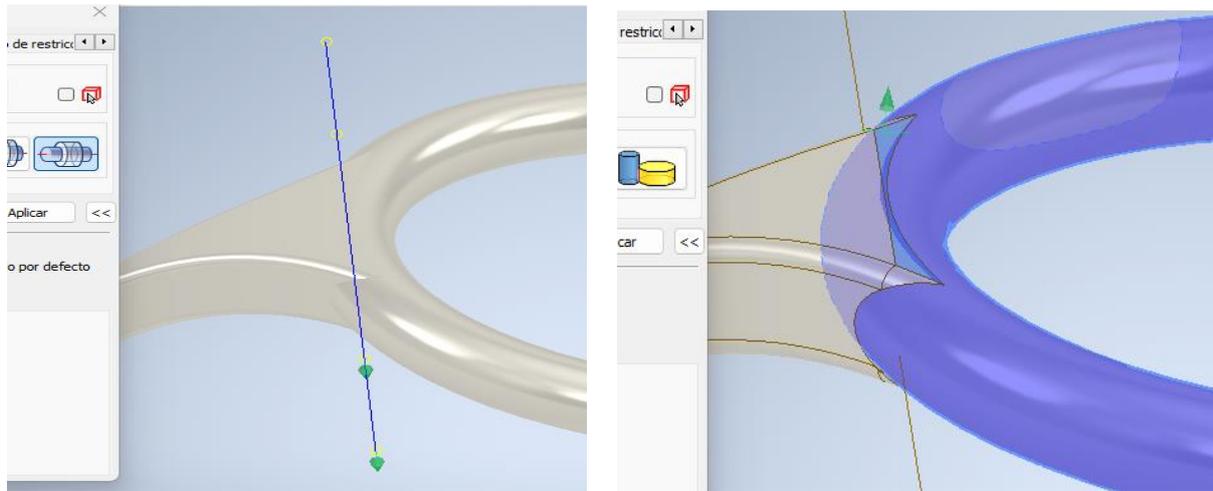


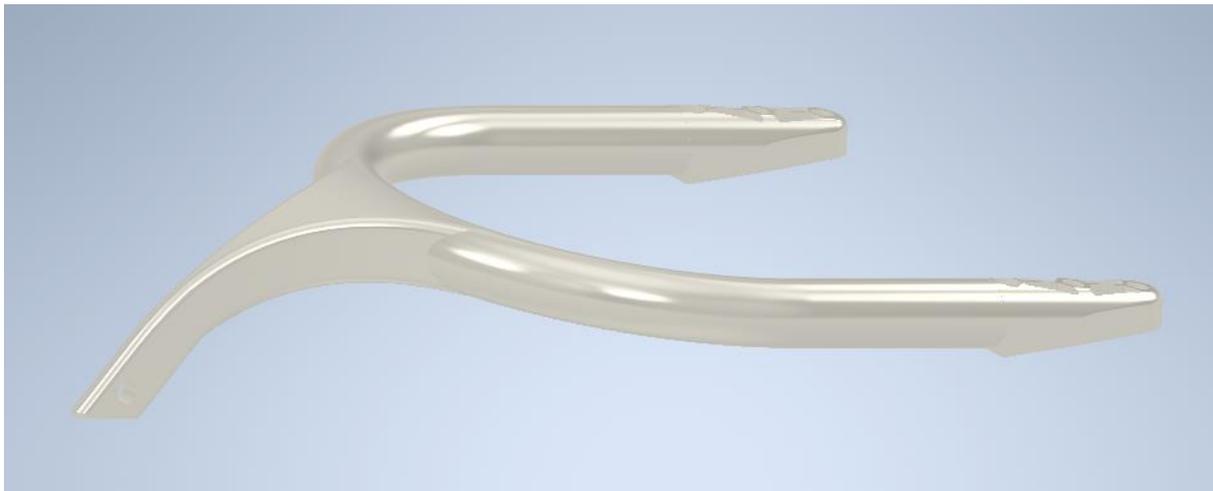
Ilustración 40: Restricción entre planos de simetría

En este caso, se aplica también una restricción de coincidencia entre los ejes creados auxiliarmente de los dos elementos, así como una de tangencia entre superficies (Ilustración 41).



*Ilustración 41: a) Restricción entre ejes y b) restricción de tangencia entre superficies*

Aplicadas todas las restricciones mencionadas anteriormente se consigue el montaje completo del halo con todos sus componentes principales (Ilustración 42)



*Ilustración 42: Ensamblaje del modelo inicial del Halo*

### 3.5 Comprobación del peso del modelo inicial

Una vez finalizado el proceso de ensamblaje entre piezas, será necesario comprobar el peso total del modelo. Este dato lo proporciona Autodesk Inventor automáticamente (Ilustración 43), no sin antes establecer el tipo de material el cual está hecho (Ilustración 44).

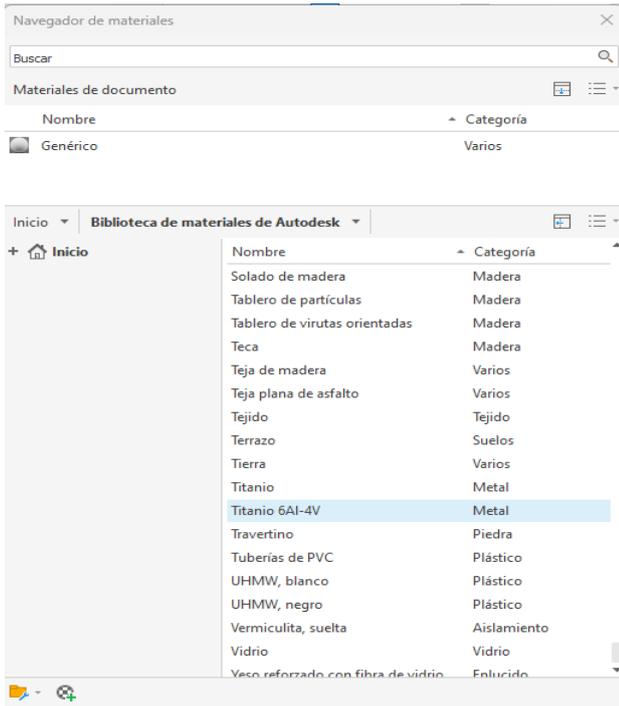


Ilustración 44: Tabla de materiales existentes en la biblioteca de Autodesk

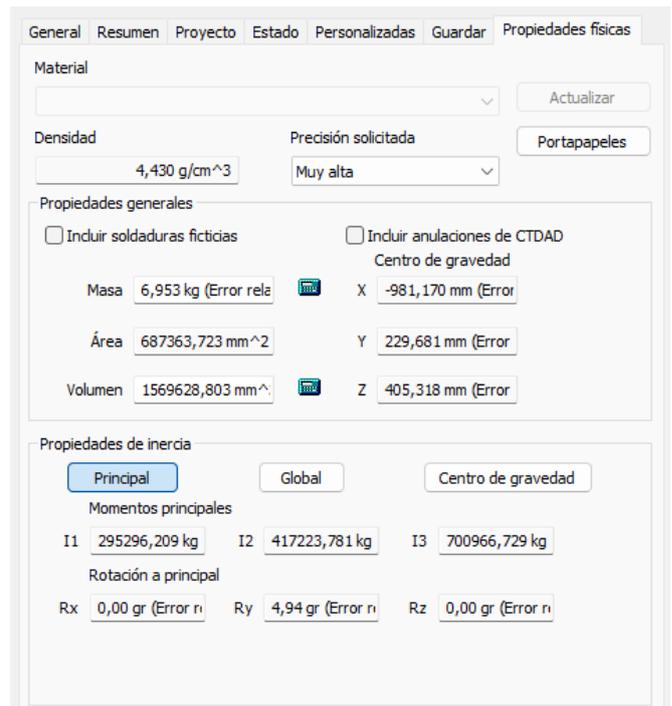


Ilustración 43: Propiedades del conjunto completo del halo

Como se puede observar en la Ilustración 43, la masa total del halo es de 6,953 kg, por lo que cumpliría perfectamente con la normativa.

## 4. DEFINICIÓN DEL MODELO INICIAL DE ELEMENTOS FINITOS PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

### 4.1 Método de análisis mediante elementos finitos

Antes de pasar a fabricar el conjunto del halo, es necesario realizar multitudes de ensayos y pruebas para garantizar el correcto funcionamiento de este. El método de análisis mediante elementos finitos proporciona una visualización detallada de la respuesta del sistema bajo diversas condiciones, permitiendo el análisis de sistemas complejos que no pueden resolverse mediante método analíticos. Además, reduce la posibilidad de realizar pruebas físicas que a menudo son muy costosas, lo que permite abaratar el coste final del proyecto.

Se trata de una técnica computacional usada para obtener valores de contorno (estática) y problemas de valor inicial (dinámica). Esta metodología se basa en la subdivisión del dominio de un problema en elementos más pequeños y manejables, llamados "elementos finitos", conectados en puntos denominados "nodos". Al conjunto de elementos se le denomina "Malla". Combinando las ecuaciones de los elementos, se obtendrán unas ecuaciones algebraicas que aproximan la solución de las variables de campo en los nodos (Ilustración 45).

Su aplicación para la resolución de un problema específico recibe el nombre de análisis de elementos finitos (AEF).

El AEF se basa en la idea de que cualquier problema continuo puede ser discretizado en un número finito de elementos más simples. Cada uno de estos elementos tiene ecuaciones que describen cómo responde a diferentes tipos de carga y condiciones de contorno. Al combinar estos elementos, se obtiene una solución aproximada del problema original.

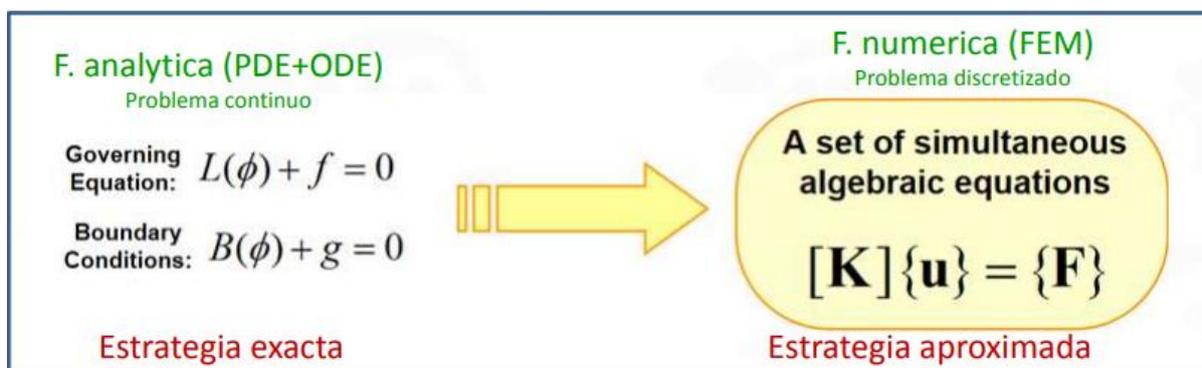


Ilustración 45: Método de elementos finitos [19]



La creación de la malla es un paso vital en el proceso, ya que los resultados que se obtengan dependerán en gran medida de la calidad de la malla. En las zonas críticas y en las concentraciones de tensiones se debe asegurar un correcto mallado, para que el software trabaje y consiga resultados más precisos. Este paso no es trivial, y muchas veces el éxito o no de los resultados obtenidos dependen de ello.

Una vez discretizado el modelo, se deben de introducir las condiciones de contorno que tendrá el sistema, así como las cargas aplicadas y las propiedades del material.

El último paso será el de la resolución de ecuaciones y el post-procesado de estas mediante gráficos de deformación, mapas de tensiones, etc.

## 4.2 Modelo inicial de elementos finitos en MsC Nastran-Patran

MsC Nastran-Patran es el software que se utilizará en este proyecto para realizar el análisis de elementos finitos.

Una vez se tiene creado el modelo CAD completo del halo, existen dos opciones:

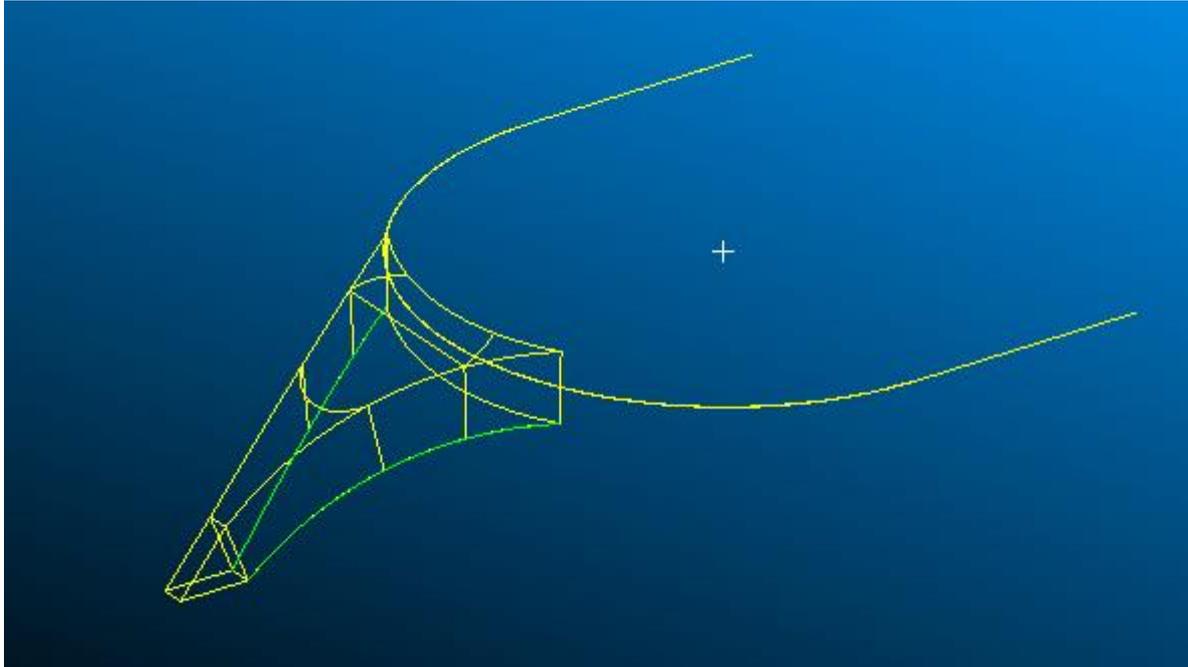
- Importar la geometría 3D a MsC Nastran-Patran, y trabajar con un modelo 3D.
- Realizar en MsC Nastran-Patran un modelo semejante con hipótesis simplificadoras, que pueda trabajar igual que el modelo 3D completo.

En este caso se decide optar por la segunda opción, por diferentes razones. La primera es la dificultad que conlleva el trabajar con un modelo 3D algo sofisticado como este caso es el ensamblaje del halo, ya que pueden existir problemas a la hora de la creación de la malla al producirse un número muy elevado de nodos y elementos, lo que requiere un esfuerzo computacional mayor. En este caso al trabajar con una licencia de estudiante se producía esa limitación de trabajo.

La segunda razón es que, en el análisis de elementos finitos, muchas veces la creación de un modelo aproximado combinando elementos 2D y 1D da resultados muy similares a los obtenidos con el modelo 3D, con menor esfuerzo computacional (menor nº de nodos y elementos).

Es por ello por lo que se opta por realizar el modelo en MsC Nastran-Patran del halo combinando elementos unidimensionales y bidimensionales. En concreto se obviarán la geometría de los soportes traseros ya que no aportan significantes cambios en los resultados y se utilizará un elemento 1D para el aro principal y elementos 2D para el soporte central en forma de V.

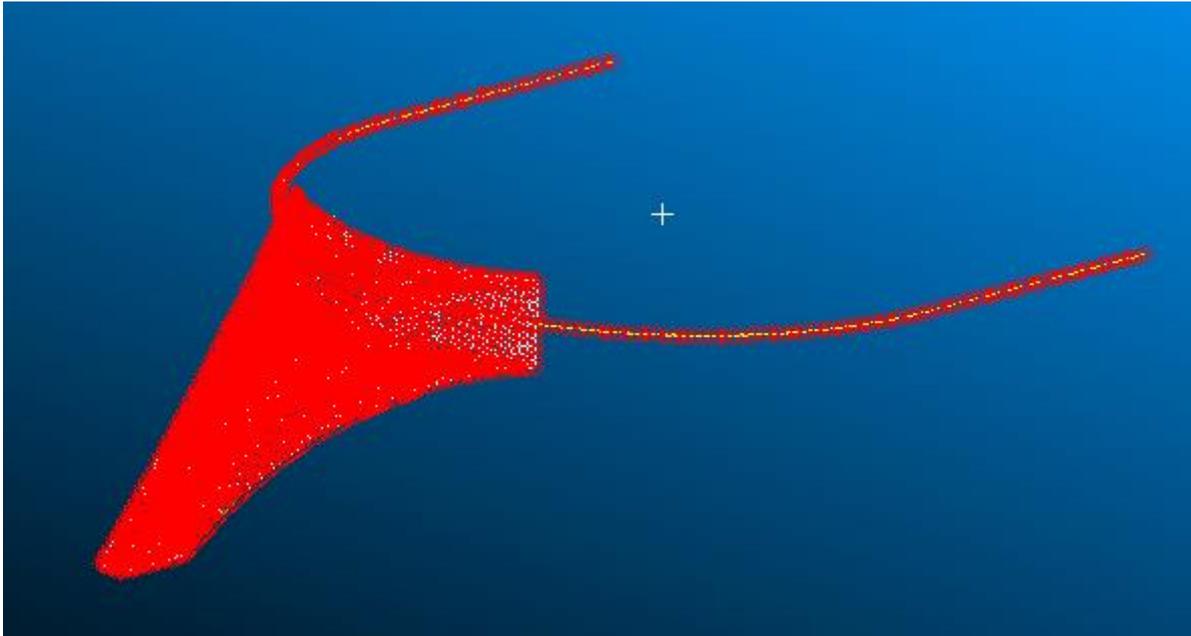
A partir de las coordenadas de los puntos en Autodesk Inventor, se crea el modelo geométrico en MsC Nastran-Patran mediante curvas unidas entre puntos. El siguiente paso es crear las "surfaces" a las que se aplicará el mallado. Todas ellas pertenecen al soporte en forma de V ya que es el elemento 2D del sistema. Además, también se proyecta la geometría del cilindro de 150mm de diámetro con el que se aplica la carga en los casos estipulados por la FIA, de tal manera que se genera otra "surface" más en el soporte (Ilustración 46).



*Ilustración 46: Modelo geométrico inicial en MsC Nastran-Patran*

Una vez creada la geometría, se debe crear el mallado tanto en las superficies 2D del soporte como en el elemento 1D del aro principal. Los mallados del elemento 2D con los del elemento 1D se unirán entre sí mediante el comando "equivalence". Este comando también permite unir esos nodos que comparten las diferentes superficies creadas en el soporte, muchas de ellas con geometría curva en el plano de trabajo.

Se muestra en la Ilustración 47 el modelo mallado en su totalidad:



*Ilustración 47: Mallado del modelo inicial*

El siguiente paso es introducir las condiciones de contorno y las cargas que se deberán aplicar al modelo. En cuanto a las condiciones de restricción, en los dos puntos dónde comienza la geometría del aro principal, que simularían los soportes traseros, se introduce una restricción de 6 grados de libertad, de manera que el halo queda empotrado en los dos soportes traseros. En cuanto a la restricción de la base del pilar central, se restringe únicamente el movimiento en el eje Y, de modo que simularía esa unión chasis-soporte sin ser como tal un empotramiento.

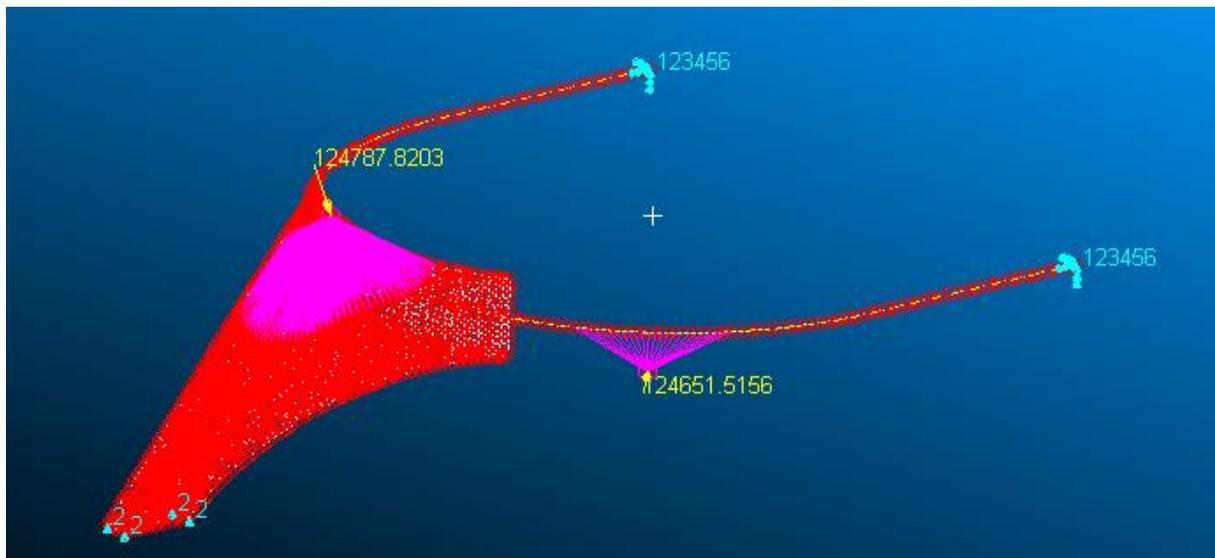
Para aplicar la carga en el test de impacto 1, se crea un punto a la distancia del eje axial del soporte central que estipula la norma (Ilustración 1), y se crea un MPC mediante el comando "RBE3", de manera que, aplicando una carga puntual a un punto, la distribuye en la superficie que se asigna. Esta superficie es la creada anteriormente por la proyección del cilindro de carga que utiliza la FIA para pasar los ensayos.

El comando MPC en MsC Nastran-Patran se refiere a "Multipoint Constraint" (Restricción Multipunto). Las MPC son utilizadas para definir relaciones lineales entre grados de libertad de diferentes nodos en un modelo. Estas restricciones permiten imponer condiciones de compatibilidad y movimiento entre nodos que de otra manera no estarían directamente conectados.

De tal manera que permite relacionar la carga aplicada en ese nodo solitario con los nodos pertenecientes a la superficie del cilindro proyectado en el soporte, haciendo que la carga se distribuya en toda la superficie como ocurre en la realidad.

Tal y como dice la norma, se aplica la carga puntual de 125.000N en el punto indicado. En este caso se descompone de 46.000N en la dirección positiva del eje X y 116.000N en la dirección negativa del eje Y.

Para el caso de carga 2 se repite el mismo proceso de creación de MPC en la ubicación que establece la norma en el test de impacto 2 (Ilustración 2). La carga en este caso es la misma de 125.000N, pero descomponiéndose en una fuerza de 83.000N en la dirección positiva del eje X y 93.000N en la dirección negativa del eje Z.



*Ilustración 48: Modelo inicial con las restricciones de contorno y casos de carga*

En el siguiente paso se debe de introducir las propiedades del material. En este caso es el mismo para todos los elementos, aleación de titanio de grado 5. Es importante mantener un rigor en las unidades utilizadas en el programa. Como el modelo se ha creado en mm, las unidades del módulo elástico se deberán de introducir en MPa y la densidad en kg/mm<sup>3</sup>.

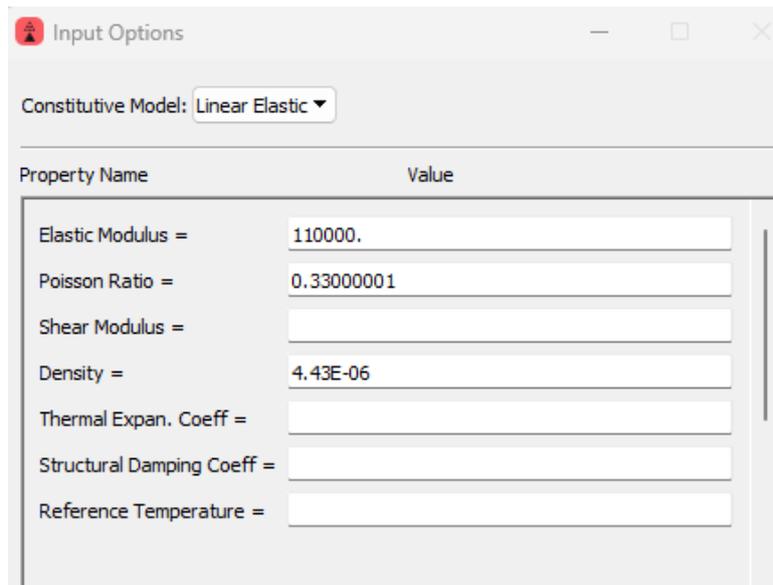


Ilustración 49: Propiedades del material en Nastran-Patran

Seguidamente se debe de introducir las propiedades que tendrán los elementos creados, en este caso para los bidimensionales y unidimensionales.

Para los elementos 2D se define el tipo "Shell", que permite tanto esfuerzos de flexión como de tracción y compresión. Además, es necesario especificar el espesor del elemento, en este caso de 4mm tal y como se hizo el vaciado interior en Autodesk Inventor (Ilustración 31).

Para el elemento 1D, se define el tipo "Beam", en el que se deberá de introducir el tipo de sección que tendrá el elemento (Ilustración 10), en este caso con un diámetro exterior de 60mm e interior de 52mm.

Por último, el programa permite definir diferentes casos de carga. Se crean los dos casos de carga estipulados en la normativa.

Realizado todo lo anterior, se extraen los resultados tanto de tensiones como deformaciones producidas en el halo.

### 4.3 ANÁLISIS DE TENSIONES Y DEFORMACIONES EN EL MODELO INICIAL

#### 4.3.1 Tensiones y deformaciones en el caso de carga 1

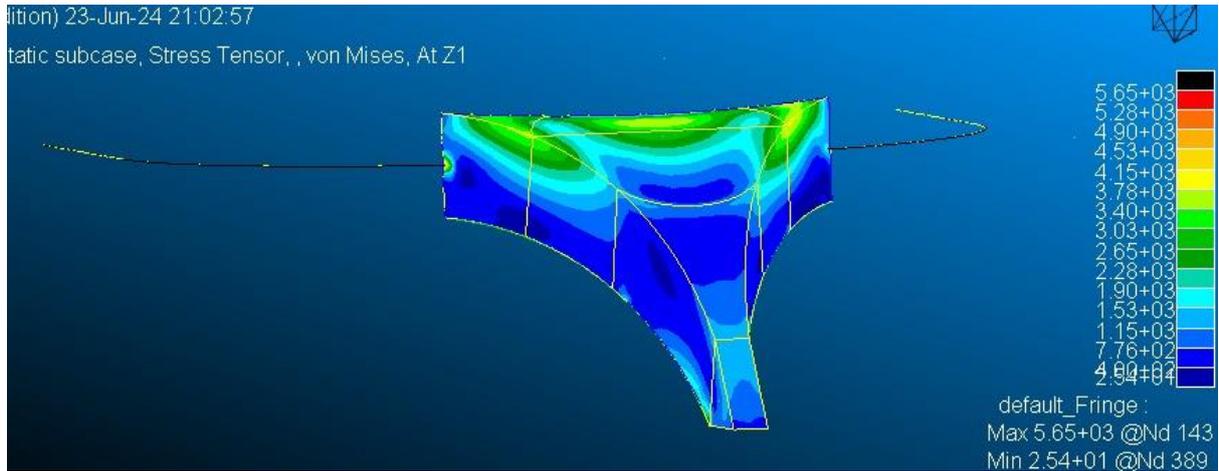


Ilustración 50: Tensiones producidas en el soporte en el caso de carga 1

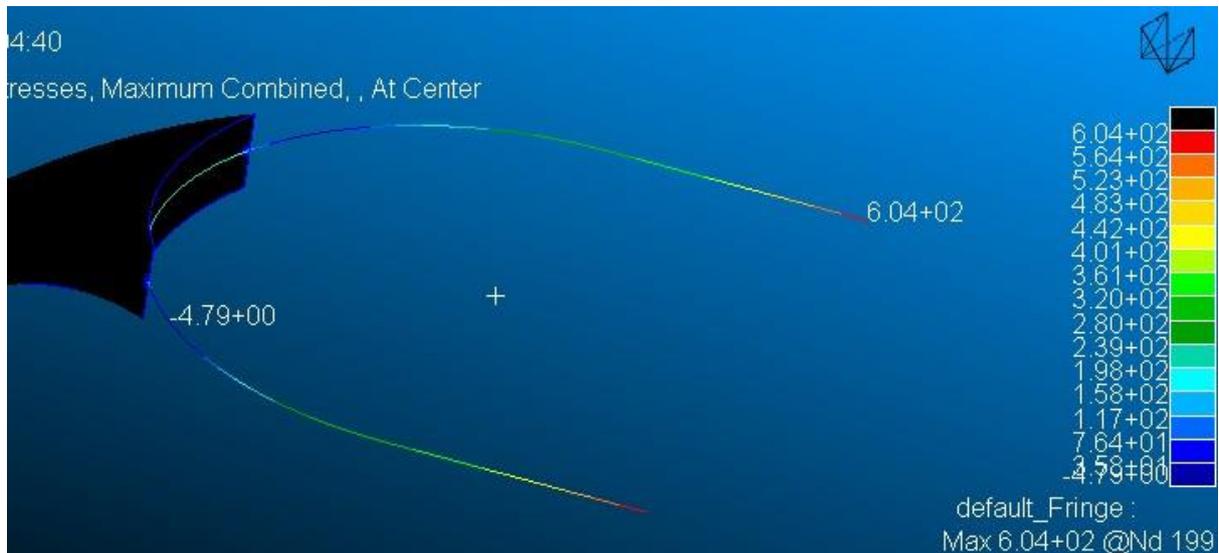


Ilustración 51: Tensiones producidas en el aro principal en el caso de carga 1

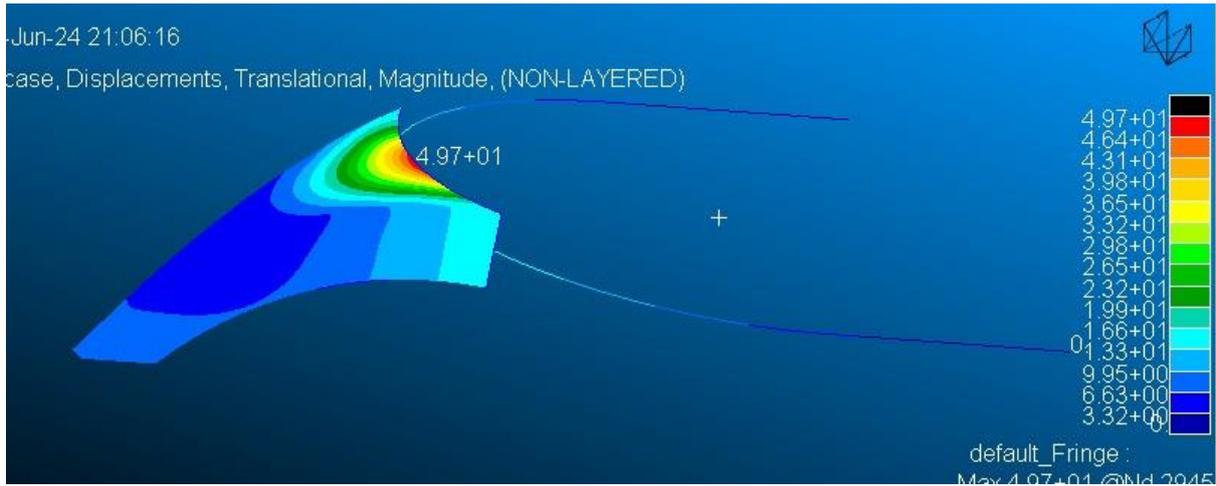


Ilustración 52: Deformaciones producidas en el caso de carga 1

Como se puede observar en las imágenes, existen varios problemas. Uno de ellos es que las tensiones producidas en el soporte central hacen que se produzca fallo, lo cual haría que no pasase el test de impacto. Además, se puede observar cómo se produce una concentración de tensiones elevada en los dos puntos de unión entre el elemento 1D y el elemento 2D (puntos singulares).

Además, las deformaciones producidas son de 49,7mm cuando la norma dice que no debe de sobrepasar los 17,5mm.

#### 4.3.2 Tensiones y deformaciones en el caso de carga 2

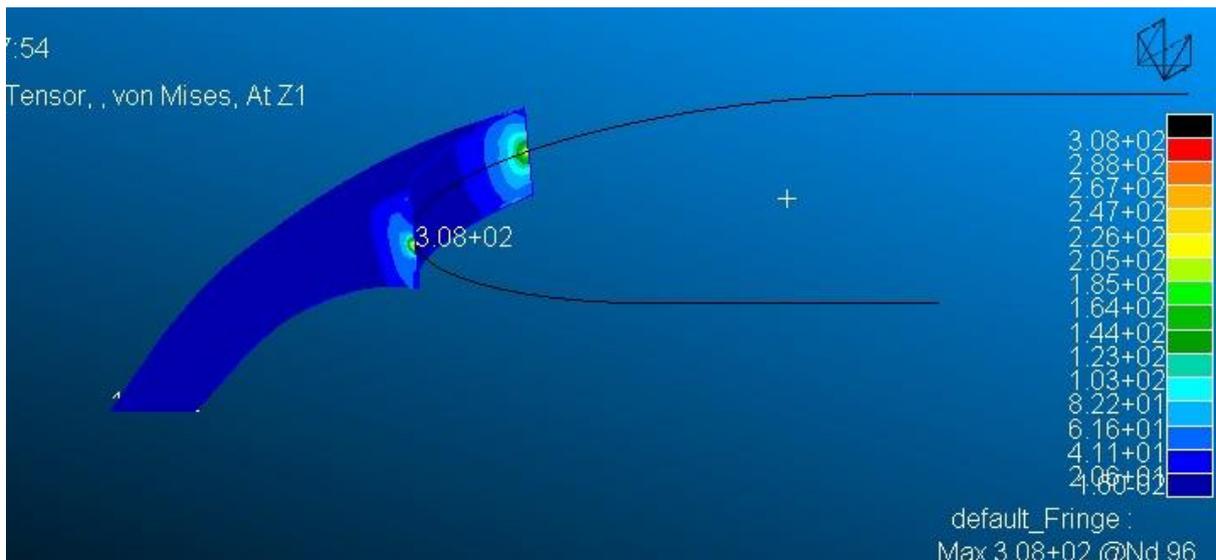


Ilustración 53: Tensiones producidas en el soporte en el caso de carga 2

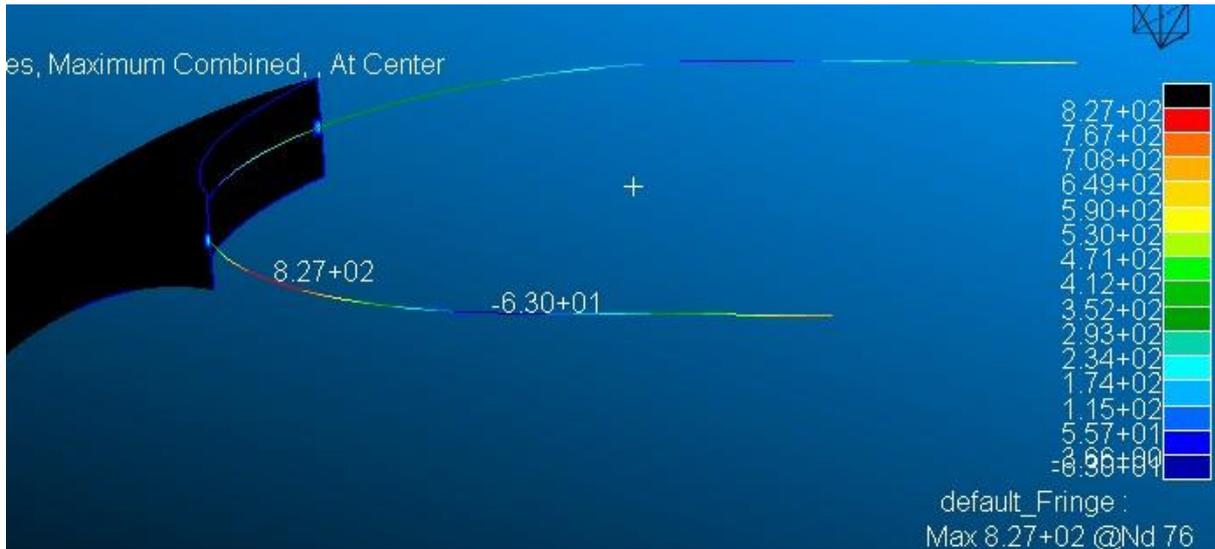


Ilustración 54: Tensiones producidas en el aro principal en el caso de carga 2

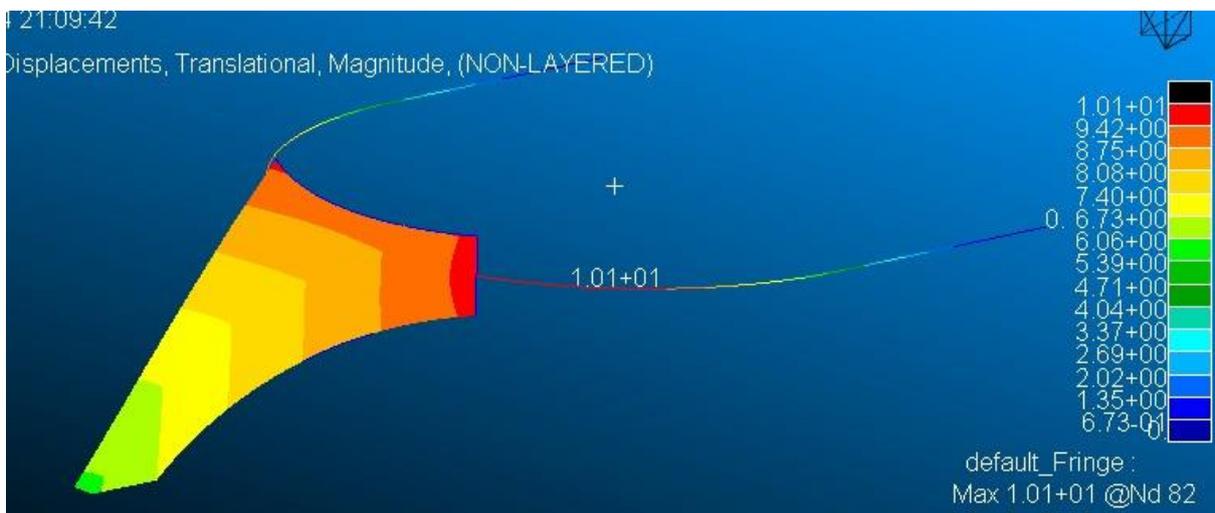


Ilustración 55: Deformaciones producidas en el caso de carga 2

En este caso, no se produce fallo tensional y la deformación no supera los 45mm, por lo que estaría cumpliendo con la norma. No obstante, se observa concentración de tensiones en los dos puntos de unión de elementos, al igual que en el caso 1 pero en menor medida. Además, las tensiones generales del soporte son muy bajas en comparación con el resto del modelo.



El principal problema reside en que el modelo 2D-1D que se ha realizado refleja resultados erróneos en concepto, como por ejemplo la unión entre elementos dónde existe una concentración de tensiones que son puntos singulares, que provoca que los resultados obtenidos no sean fiables debido a este problema de modelización.

Además, en el caso de carga 1 se están obteniendo tensiones por encima del límite elástico que es 1100 MPa, no sólo en los puntos singulares sino también en el resto de las superficies. Es por ello por lo que se debe de plantear modificaciones en el modelo inicial para reducir estas tensiones generadas.

No obstante, el primer objetivo a suplir es encontrar el modelo correcto que refleje resultados fiables. Por ello se estudiará sólo el caso de carga 1 durante el proceso de rediseño con el fin de encontrar el modelo correcto, ya que es el caso donde se han producido los puntos singulares.

## 5. DEFINICIÓN DEL SEGUNDO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Uno de los principales inconvenientes del modelo inicial era la falta de precisión en el cálculo de unión entre elementos 1D y 2D. En este modelo lo que se busca es seguir con el concepto de elementos unidimensionales y bidimensionales, pero rediseñando la unión entre ellos de manera que se reflejen resultados realistas. Además, se incluye una modificación al diseño, tal y como se muestra a continuación:

### 5.1 Mejora de diseño del modelo inicial

En primer lugar, se modifica el diseño del soporte, con el fin de hacerle más largo en el arco de unión en forma de V. Con esto se busca que los puntos singulares dónde se producía la concentración de tensiones estén lo más alejados posible de la superficie donde se aplica la fuerza. En la Ilustración 56 y en la Ilustración 57 se observa como la distancia entre los puntos singulares aumenta unos 92mm aproximadamente:

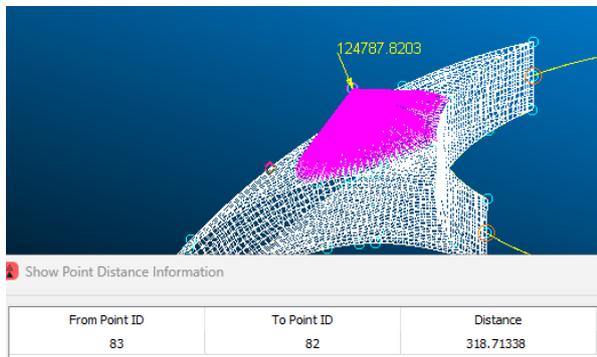


Ilustración 56: Distancia entre los puntos singulares del segundo modelo

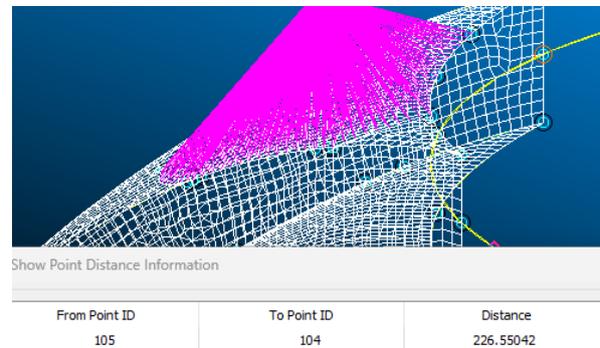
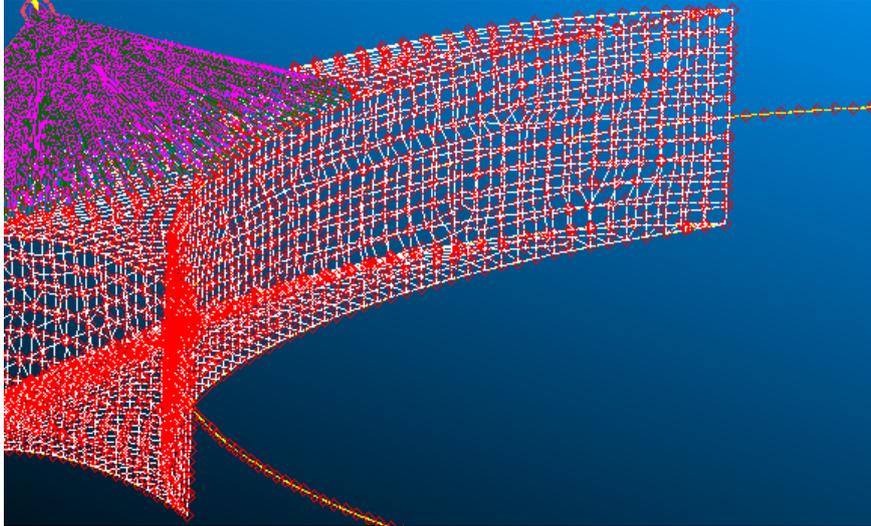


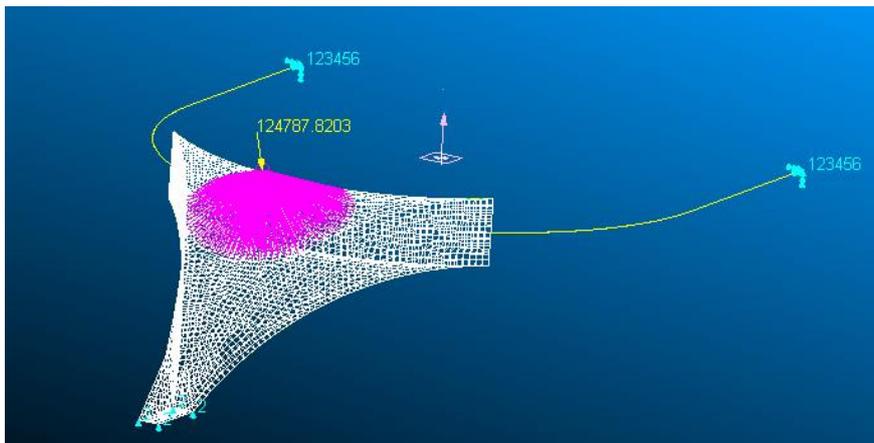
Ilustración 57: Distancia entre los puntos singulares del modelo inicial

El segundo rediseño consiste en la creación de un elemento “ficticio” en la curva de unión del elemento 1D con el soporte (Ilustración 58). De tal forma que dónde antes había sólo la curva 1D que simulaba el aro principal del halo, se crean dos superficies 2D curvas en semejanza con la curvatura del aro. El objetivo es tratar de evitar los puntos singulares en la unión de los elementos 1D con los 2D y obtener valores fiables de tensión y deformación en dichos puntos. Estas superficies ficticias son bidimensionales y de tipo “shell”, utilizando un espesor de 0,5mm.

Esto simula la unión entre los dos elementos mediante la creación de dos superficies con un espesor muy pequeño en comparación al resto, siendo éstas de alguna forma “ficticias”. El resto del modelo (Ilustración 59) es exactamente igual al mostrado en el diseño inicial.



*Ilustración 58: Vista en detalle del elemento ficticio creado en la unión*



*Ilustración 59: Modelo en Nastran-Patran aplicado el rediseño*

## 5.2 Análisis de tensiones y deformaciones en el segundo modelo

Una vez aplicado el rediseño, se procede a calcular las tensiones (Ilustración 60 e Ilustración 61) y las deformaciones producidas (Ilustración 62) sólo en el caso de carga 1, ya que era el que producía los resultados erróneos e incoherentes.

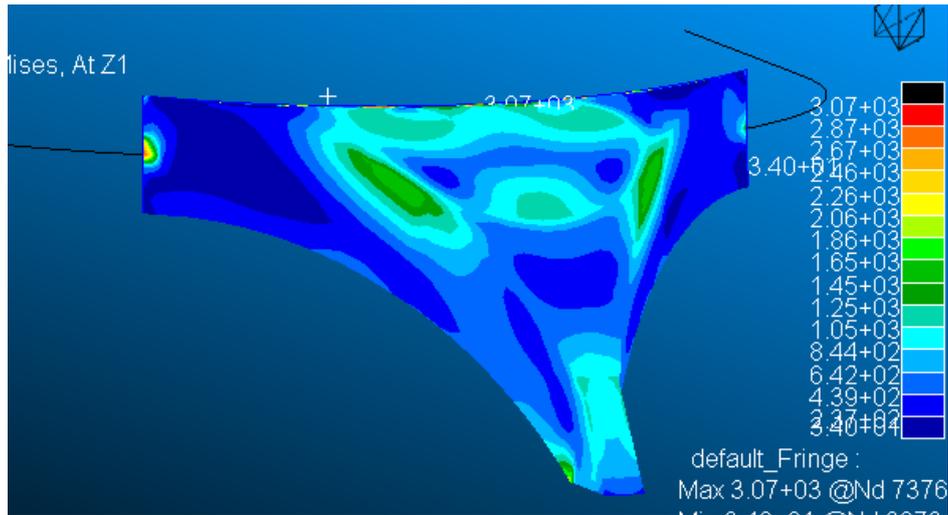


Ilustración 60: Tensiones producidas en el segundo modelo

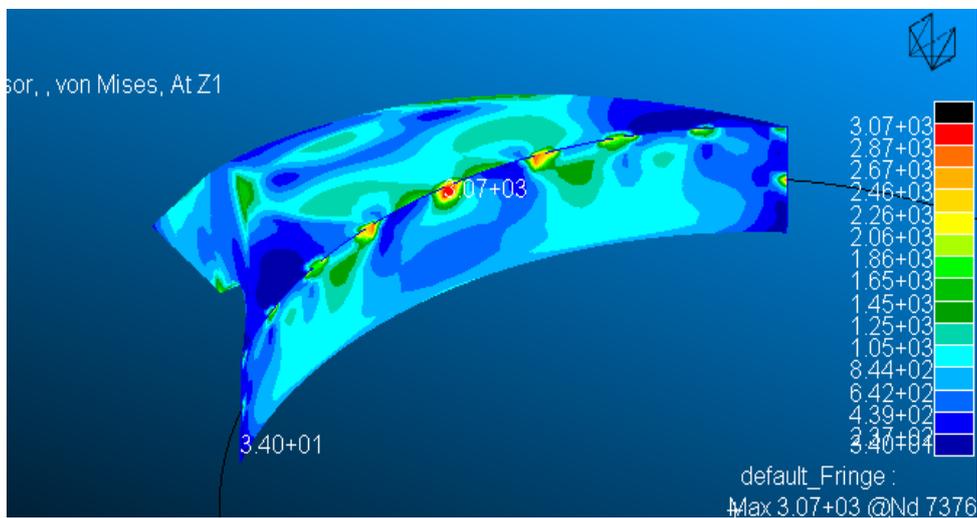


Ilustración 61: Tensiones producidas en el segundo modelo

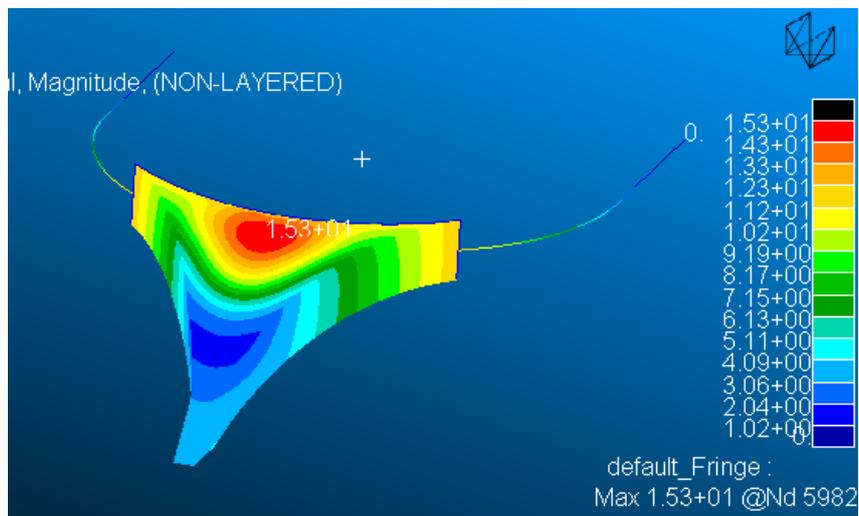


Ilustración 62: Deformaciones producidas en el segundo modelo



Se puede observar como las tensiones que se producen en el soporte del halo tienen unos valores más uniformes en todas sus superficies. En concreto, se obtienen tensiones más bajas que en el modelo inicial en casi todo el conjunto del soporte, pero sobrepasando de igual manera el límite elástico del material. En cuanto a la deformación producida, disminuye de los 49mm iniciales hasta los 15,3mm, lo que haría que cumpliera la norma.

Sin embargo, se producen las mismas concentraciones de tensiones en los dos puntos singulares, esta vez en menor medida gracias al ensanchamiento en la geometría.

A pesar de obtener mejores valores y más fiables, tanto el cambio en la geometría como la creación del elemento "ficticio" hacen que no desaparezca esa imprecisión del valor de tensiones en los dos puntos singulares, por lo que se plantea modelizarlo mediante otra estrategia.

## 6. PROPUESTA DE DISEÑO FINAL

Dado que ninguno de los dos modelos de elementos finitos realizados es válido en cuanto a sus resultados en las zonas de unión entre soporte frontal y aro se plantea otra estrategia de modelizado que solvente estos problemas.

Uno de los principales fallos de los dos modelos anteriores, es el concepto de unión entre elementos unidimensionales y bidimensionales que se produce al analizar los casos de carga en MsC Nastran-Patran. Es por ello por lo que para este modelo final se opta por realizar un diseño de elementos bidimensionales en su conjunto, tanto el soporte frontal como el aro principal del halo con el fin de solventar dichos problemas. Además, también se deberá de tener en cuenta que no solo se deben de solventar los problemas de puntos singulares de tensiones sino también realizar un modelo que cumpla con los dos casos de carga establecidos en la normativa.

Por tanto, la primera mejora del diseño es realizar un modelo 2D-2D en MsC Nastran-Patran.

En cuanto al soporte, dado que este ya era un elemento bidimensional se deberán de rediseñar los arcos laterales que se unen con el aro principal y además se añade el agujero del anclaje frontal que en los modelos simplificados se había despreciado. En cuanto al aro principal, se realiza la geometría de la superficie exterior de diámetro 60mm, y se extruye a lo largo de la trayectoria curva, que coincide con la creada en los modelos anteriores al ser unidimensional. En este caso, a los soportes traseros se les aplica una condición de restricción de empotramiento, mientras que al anclaje frontal se le permite el movimiento sólo en la dirección del perno. En la Ilustración 63 se muestra el modelo geométrico del diseño final en MsC Nastran-Patran:

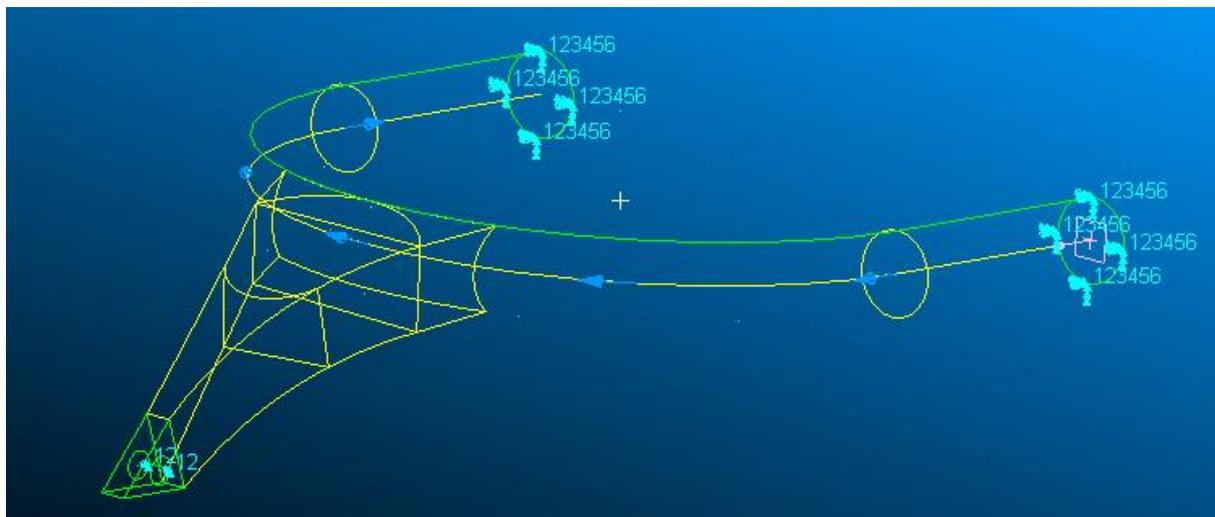
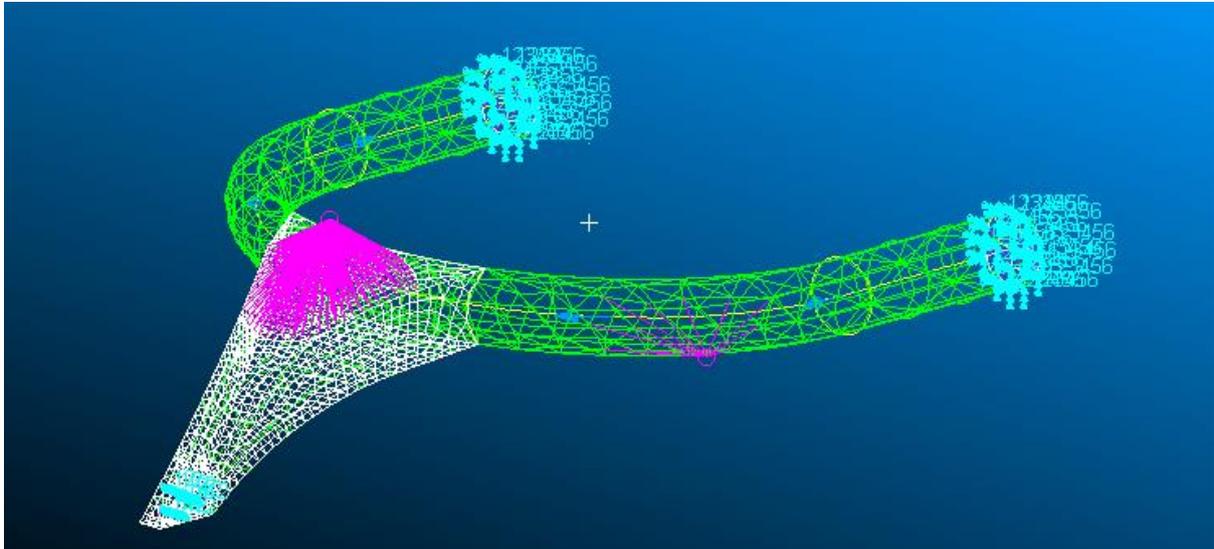


Ilustración 63: Modelo geométrico 2D-2D

Una vez creada la nueva geometría, se deben de crear los mallados. El soporte tendrá el mismo mallado que los demás modelos, pero al aro principal se le aplica un mallado de tipo 2D en la "surface" creada (Ilustración 64). En cuanto a los casos de carga, se aplican los mismos criterios que a los anteriores modelos.



*Ilustración 64: Modelo final con las condiciones de contorno, cargas y mallados creados*

La segunda mejora viene dada por una modificación del diseño inicial respecto al espesor de los elementos. Inicialmente, el soporte tenía un vaciado interior de 4mm, y el aro principal un espesor de 4mm también. Cómo se pudo ver en los resultados obtenidos en los dos modelos, el aro principal aguantaba bastante bien los esfuerzos producidos, pero el soporte fallaba en todos los casos. Es por ello por lo que se decide aumentar el espesor del soporte de 4mm a 6,5mm con el fin de solventar dichos problemas. Dado que con este cambio el peso del halo aumenta y el aro principal aguantaba bastante bien los esfuerzos producidos, se reduce el espesor de su sección de 4mm a 3,5mm con el fin de disminuir en cierta medida ese sobrepeso añadido en el soporte.

## 6.1 Modelo geométrico del diseño final

Antes de finalizar el proceso de rediseño final, dado que se han cambiado espesores en la pieza, será necesario comprobar en Autodesk Inventor el peso del modelo, ya que este no puede superar los 7 kg. Para ello se modifica el espesor del soporte de 4mm a 6,5mm (Ilustración 65) y el de la sección del aro principal de 4mm a 3,5mm (Ilustración 66).

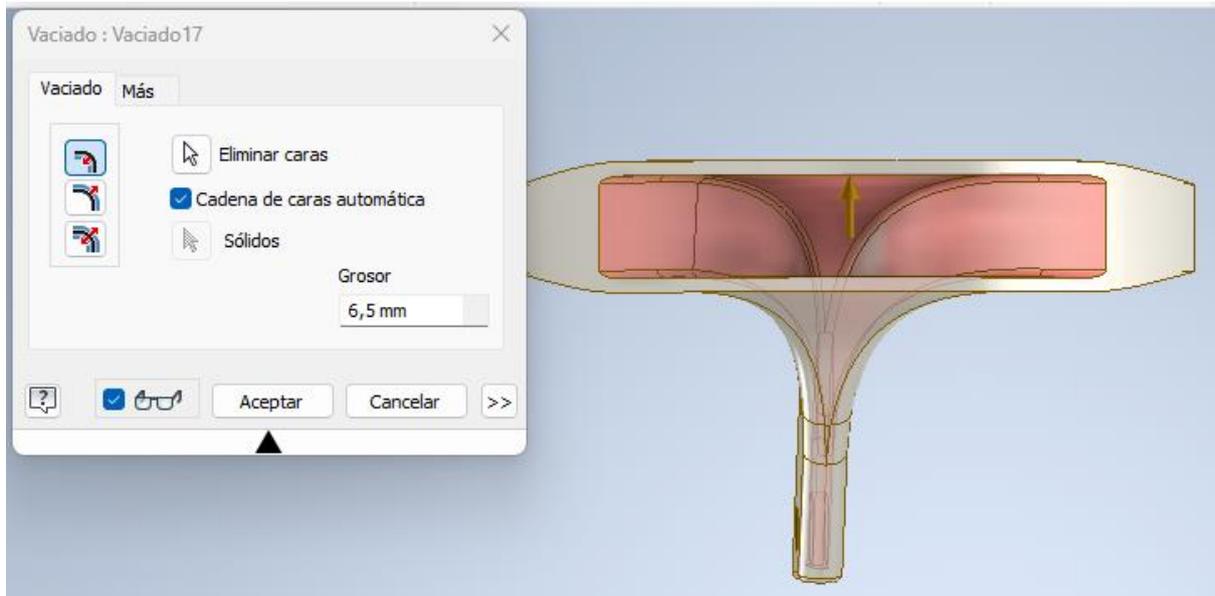


Ilustración 65: Vaciado interior de 6,5mm en el soporte

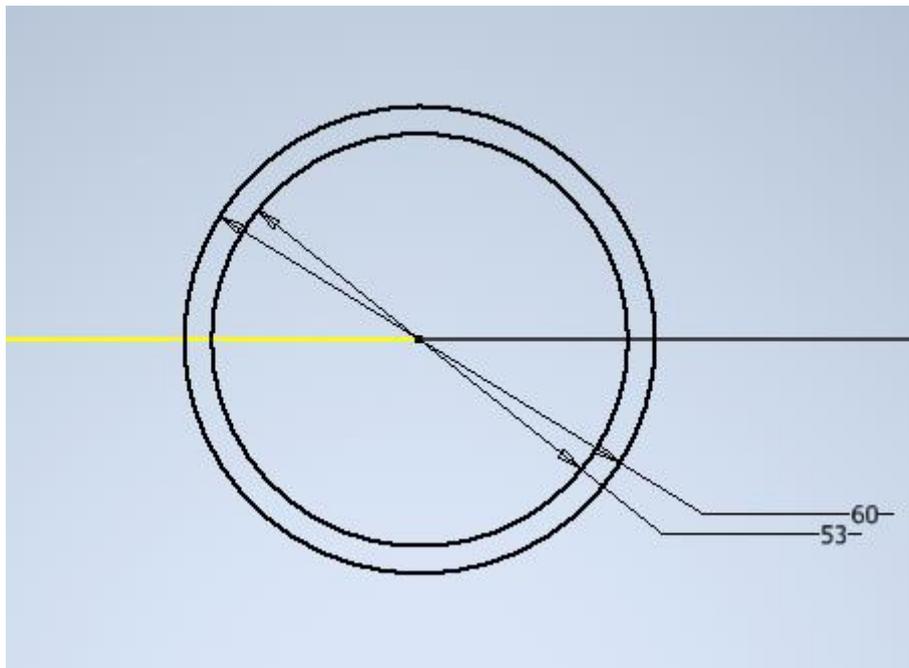


Ilustración 66: Reducción del espesor del aro principal a 3,5mm

Aplicando estos cambios, la masa total del modelo que se obtiene es de 7,122 kg (Ilustración 67).

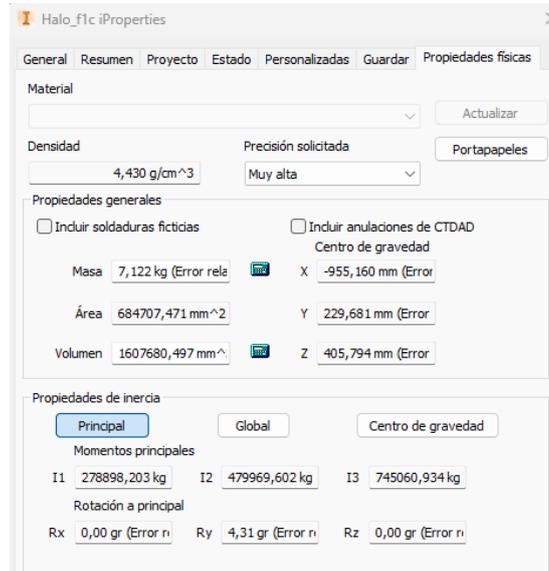


Ilustración 67: Masa del modelo aplicados los cambios de espesores

Tal y como dice la norma, el peso del halo deberá de ser de 7 kg con unas tolerancias de - 0,15 kg y +0,05 kg. En este caso el halo sobrepasaría el peso exigido.

Para solventarlo se decide cambiar la geometría del pilar central del soporte. En concreto, se disminuye la longitud de la base desde los 70mm iniciales hasta los 60mm, haciéndolo más estrecho y compacto (Ilustración 68).

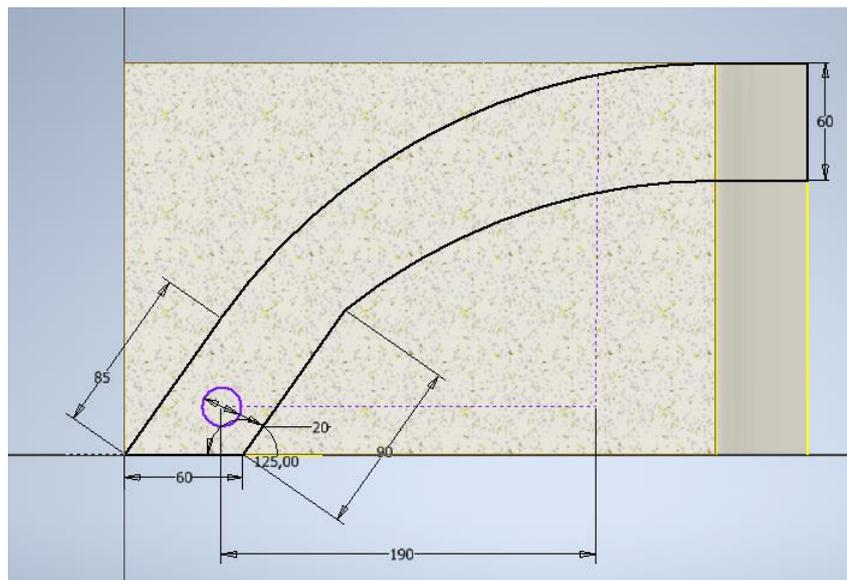


Ilustración 68: Modificación de la longitud de la base del pilar central

Además, se reduce la longitud del soporte desde la base hasta el punto de unión con el aro principal 20mm y la longitud horizontal del pilar central otros 20mm. (Ilustración 69).

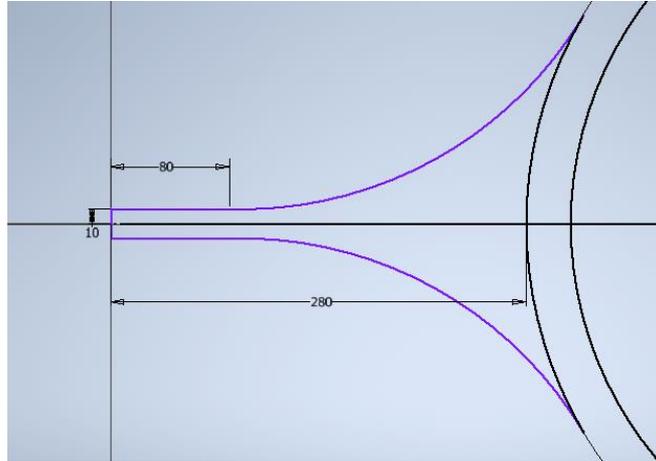


Ilustración 69: Modificación en la geometría del soporte

Densidad	4,430 g/cm <sup>3</sup>	Precisión solicitada	Muy alta	Portapapeles	
Propiedades generales					
<input type="checkbox"/> Incluir soldaduras ficticias		<input type="checkbox"/> Incluir anulaciones de CTDAD			
Masa	6,888 kg (Error rela)	X	-527,856 mm (Error		
Área	660772,688 mm <sup>2</sup>	Y	0,002 mm (Error rel		
Volumen	1554928,773 mm <sup>3</sup>	Z	83,824 mm (Error n		
Propiedades de inercia					
<input checked="" type="radio"/> Principal	<input type="radio"/> Global	<input type="radio"/> Centro de gravedad			
Momentos principales					
I1	281665,191 kg	I2	439369,560 kg	I3	709483,716 kg
Rotación a principal					
Rx	0,00 gr (Error n	Ry	4,82 gr (Error n	Rz	0,00 gr (Error n

Ilustración 70: Masa del modelo final

Aplicadas todas las modificaciones, como se puede observar en la Ilustración 70, la masa del halo es de 6,888 kg. Por consiguiente, queda demostrado que el modelo cumple perfectamente con la norma.

## 6.2 Análisis de Tensiones y deformaciones en el caso de carga 1

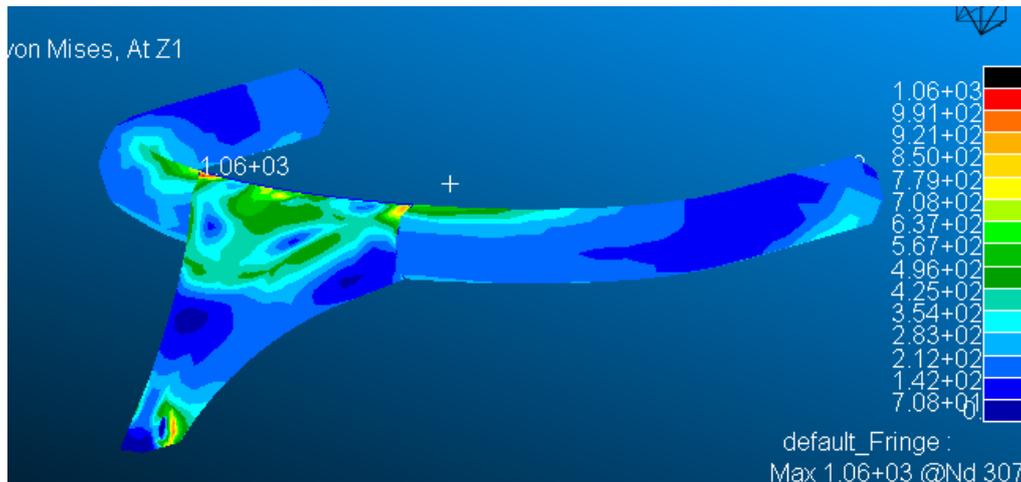


Ilustración 71: Tensiones producidas en el caso de carga 1

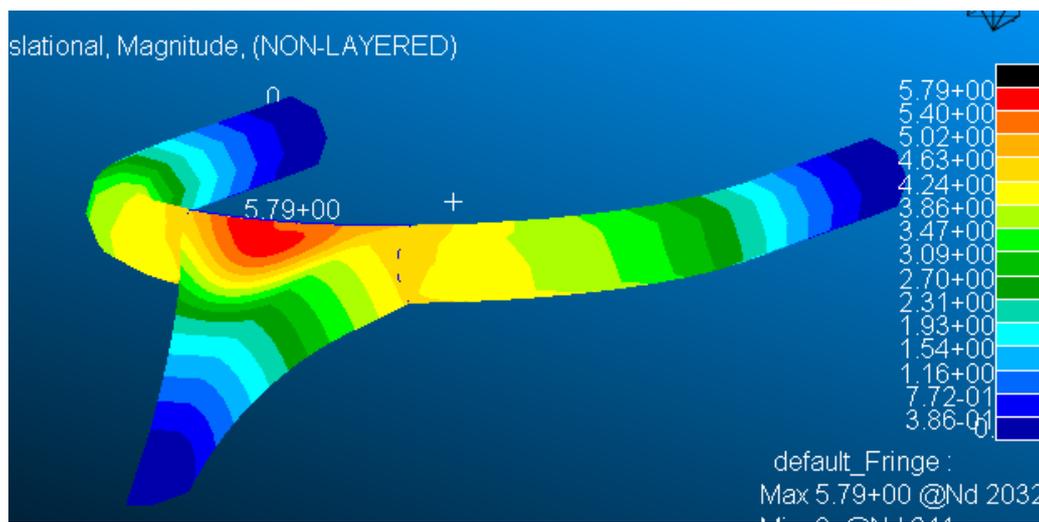


Ilustración 72: Deformaciones producidas en el caso de carga 1

Las tensiones producidas son las que observamos en la Ilustración 71. Se alcanza una tensión máxima de 1060 MPa. En cuanto a las deformaciones se alcanza una deformación máxima en la parte frontal superior del halo de 5,79mm (Ilustración 72).

Dado que la norma dice que para este primer caso en la pieza no debe producirse fallo, y la deformación máxima no debe superar los 17,5mm, podemos concluir con que este primer caso cumple la normativa al no sobrepasar la tensión los 1.100 MPa del límite elástico y los 17,5mm de deformación máxima.

### 6.3 Análisis de Tensiones y deformaciones en el caso de carga 2

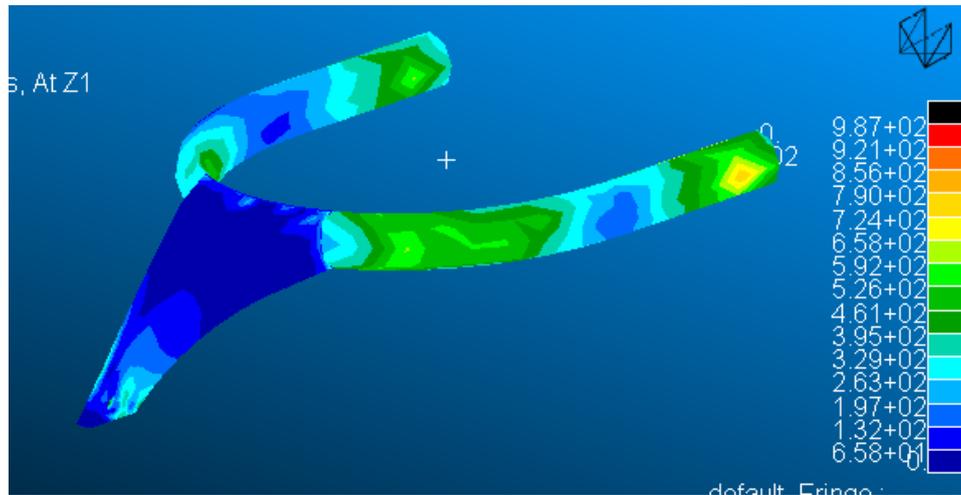


Ilustración 73: Tensiones producidas en el caso de carga 2

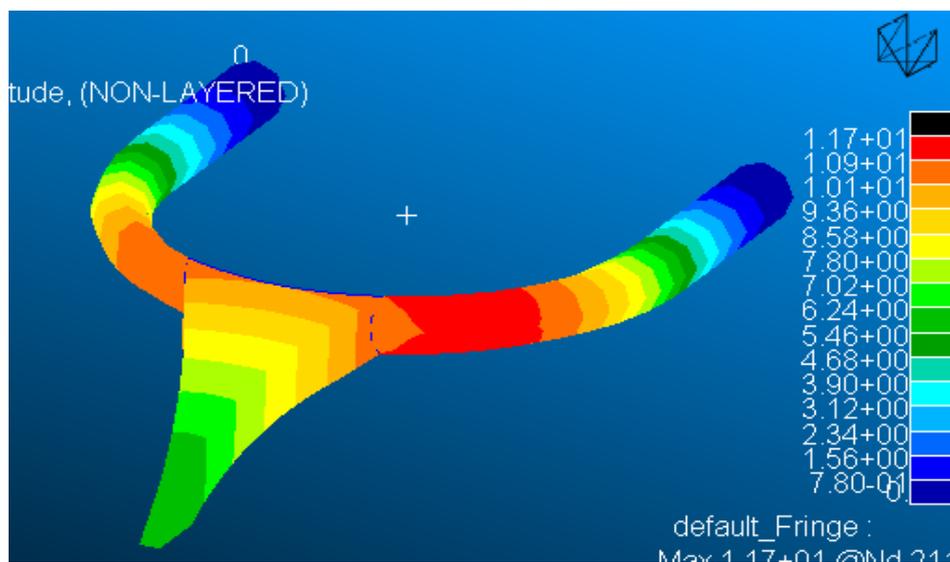


Ilustración 74: Deformaciones producidas en el caso de carga 2

En cuanto a las tensiones generadas (Ilustración 73), se obtiene un valor máximo de 987 MPa en el momento de aplicación de 125.000N. La deformación producida es de 11,7mm también en ese momento (Ilustración 74).

Tal y como dice la norma, en el momento que aplicamos la carga de 125.000N la pieza no deberá romper y la deformación no podrá superar los 45mm. Después, se deberá aumentar la carga hasta que se alcance el fallo, no pudiendo superar los 100mm de deformación en ese momento.

En el momento de aplicación de la carga, la pieza no rompe ya que no supera el límite elástico de 1.100 MPa, y la deformación sufrida no supera los 45mm.

Para el sub-caso de aumentar la carga hasta encontrar el fallo de la pieza (Ilustración 75), los resultados de deformación se detallan en la Ilustración 76:

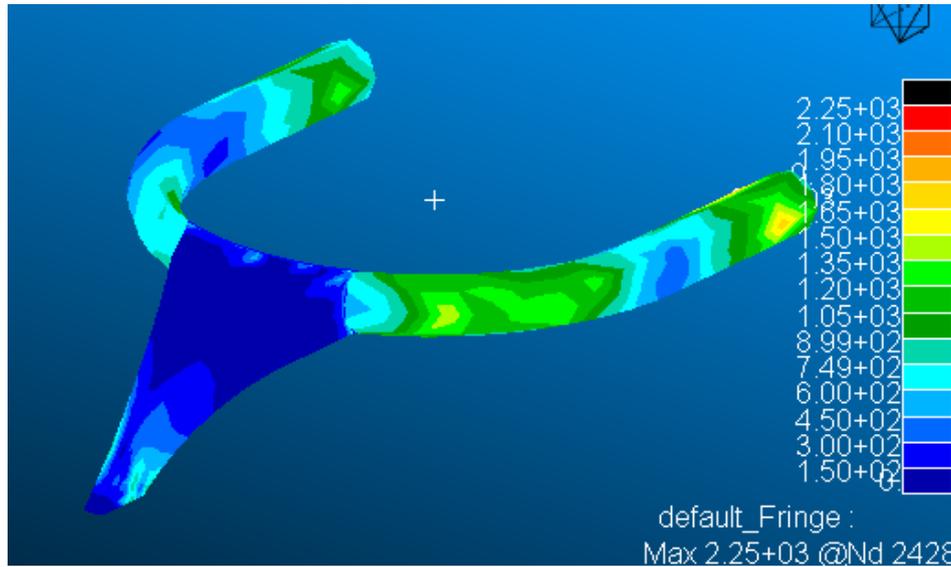


Ilustración 75: Tensión de rotura

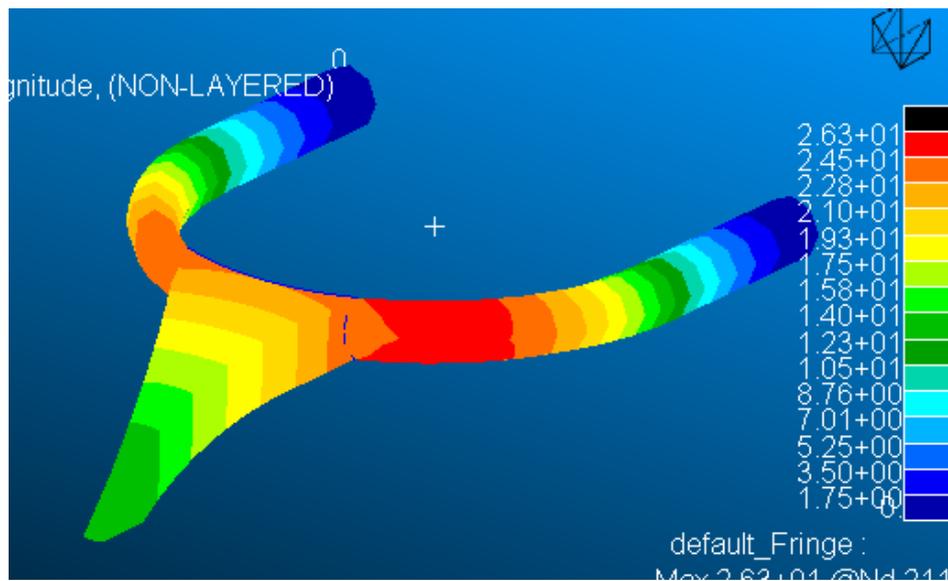


Ilustración 76: Deformación sufrida en el fallo estructural de la pieza

Se observa que cuando se alcanza el fallo de la estructura, la deformación no supera los 100mm, siendo esta de 26,3mm.

Con todo ello se concluye en que este nuevo modelo cumple en todos los test de impacto impuestos en la normativa FIA STANDARD 8869-2018.

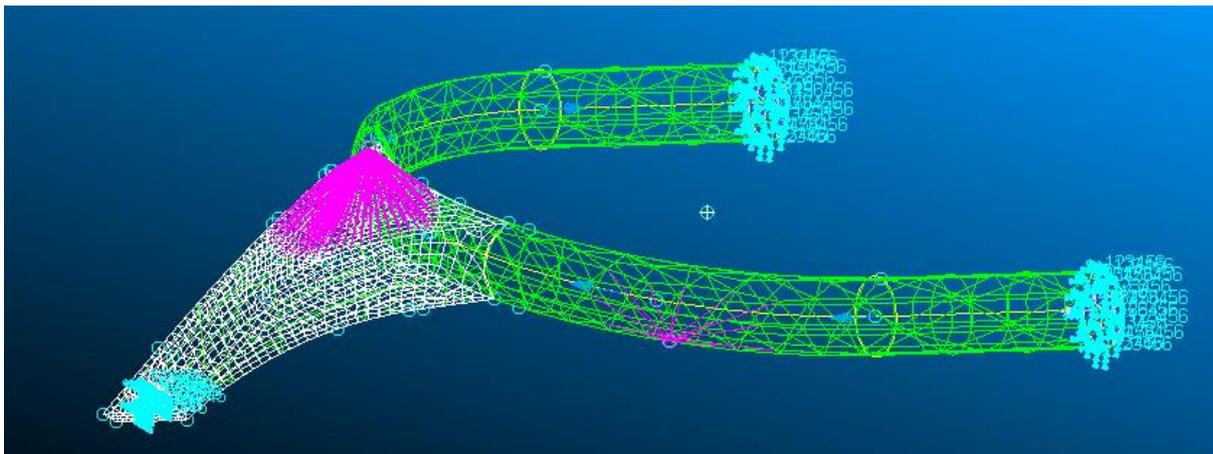
## 6.4 Cálculo en las uniones del halo

Como anexo al cálculo estructural del halo en los dos casos de carga de la normativa, se estudian las tensiones en las uniones del halo con el chasis del monoplaza.

El halo va anclado al chasis mediante pernos. Éstos son de acero de alta resistencia y deberán de asegurar que soportan los esfuerzos en los dos casos impuestos en la norma. En este caso se opta por utilizar pernos de Acero AISI 4130, debido a su alta resistencia comparado con su peso.

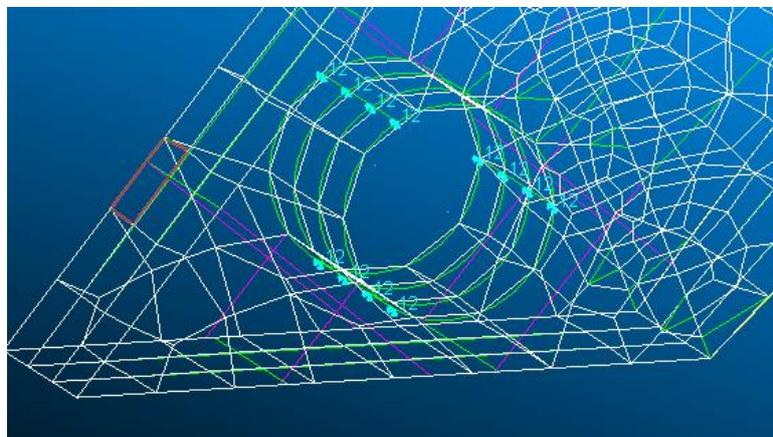
Se deben de calcular las fuerzas y momentos existentes tanto en el anclaje del soporte frontal, como en los anclajes de los soportes traseros. Mediante el modelo final de elementos finitos del halo en MsC Nastran-Patran, es posible calcular dichos valores, para posteriormente calcular los esfuerzos producidos.

En la Ilustración 77 se detalla el modelo final MEF utilizado anteriormente, con la geometría del anclaje frontal:



*Ilustración 77: Modelo final MEF para el cálculo en las uniones*

A continuación, se detallan las restricciones en cada uno de los anclajes:



*Ilustración 78: Tipo de restricción en el anclaje frontal*

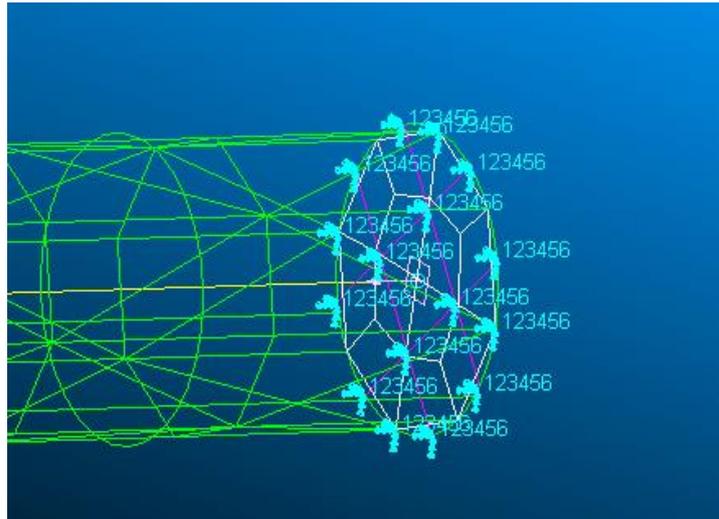


Ilustración 79: Tipo de restricción en el anclaje trasero

Como se puede observar en la Ilustración 78 e Ilustración 79, al anclaje frontal se le aplica una restricción dejando libre el movimiento en la dirección del perno (dirección Z), mientras que el anclaje trasero va totalmente empotrado. Esto resulta ser lo más realista si tenemos en cuenta la Ilustración 6 dónde se muestra el caso de carga real del halo.

Una vez definido el modelo, Msc Nastran-Patran nos proporciona los valores de las fuerzas y momentos aplicados en los anclajes. En la Tabla 4 y Tabla 5 se muestran los valores obtenidos en el caso 1 y 2, respectivamente:

Tabla 4: Valores de las fuerzas y momentos en los anclajes tras el caso de carga 1

ANCLAJE	Rx (N)	Ry (N)	Rz (N)	Mx (Nmm)	My (Nmm)	Mz (Nmm)
<b>Frontal</b>	19438	3791,2	0	0	0	0
<b>Trasero</b>	36072	6898,5	5481,3	210,96	1702,3	-1781,6

Tabla 5: Valores de las fuerzas y momentos en los anclajes tras el caso de carga 2

ANCLAJE	Rx (N)	Ry (N)	Rz (N)	Mx (Nmm)	My (Nmm)	Mz (Nmm)
<b>Frontal</b>	-16869	-955,61	0	0	0	0
<b>Trasero</b>	43407	1184	14005	-504,41	1814,3	-1408,9



### 6.4.1 Cálculo de tensiones en el anclaje frontal

Teniendo en cuenta que la sección del perno en el anclaje frontal se encuentra en el plano XY, sólo existen los esfuerzos producidos por el cortante ( $R_x$  y  $R_y$ ), Además, para el anclaje frontal se ha utilizado un diámetro de 20mm, tal y como se muestra en la Ilustración 68 y en el Documento III: Planos.

La tensión de cortadura máxima para la sección circular del anclaje viene dada por la siguiente expresión:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{4}{3} * \frac{Q}{A} ; \text{ siendo } Q \text{ el esfuerzo de cortante de la sección y } A \text{ el \u00e1rea de \u00e9sta \u00faltima.}$$

Sabiendo que para el Acero AISI 3140 se tiene una  $\tau_{adm} = 217,5 \text{ MPa}$  y  $\sigma_{adm} = 435 \text{ MPa}$

Para los dos casos de carga, se obtienen los siguientes valores:

$$\tau_{m\acute{a}x1} = \frac{4}{3} * \frac{\sqrt{(19438)^2 + (3791,2)^2}}{\frac{\pi}{4} * 20^2} = 84,05 \text{ MPa} < 217,5 \text{ MPa}$$

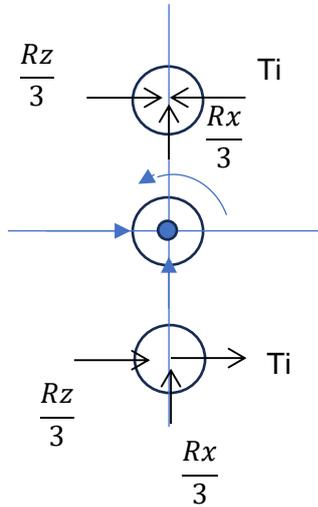
$$\tau_{m\acute{a}x2} = \frac{4}{3} * \frac{\sqrt{(16869)^2 + (955,61)^2}}{\frac{\pi}{4} * 20^2} = 71,71 \text{ MPa} < 217,5 \text{ MPa}$$

En cuanto a la tensi\u00f3n debido a la cortadura, en ambos casos se obtienen valores menores que la tensi\u00f3n admisible por lo que tambi\u00e9n se concluye en que el perno aguanta perfectamente los esfuerzos producidos.

En concreto, se utiliza un perno de M20 estandarizado, de tal manera que se obtiene un coeficiente de seguridad de  $CS = \frac{217,5}{84,05} = 2,59$ . En este caso se escoge este valor de di\u00e1metro porque el CS obtenido permite estar del lado de la seguridad, dado que la integridad f\u00edsica del piloto puede verse comprometida.

### 6.4.2 Cálculo de tensiones en los anclajes traseros

En el caso de los anclajes de los soportes traseros, las secciones de ellos se encuentran en el plano XZ, a diferencia del anclaje frontal. A continuación, se muestra un diagrama de esfuerzos en los 3 anclajes de un soporte trasero:



Se observa cómo se producen esfuerzos debido al cortante ( $R_x, R_z$ ), al axil ( $R_y$ ) y al momento torsor ( $M_y$ ).

En cuanto a las reacciones producidas en el anclaje trasero, se dividen en tres partes iguales en cada agujero, de manera que se tiene  $R_z/3$  y  $R_x/3$  en cada uno. Es por ello por lo que se observa que el más restrictivo va a ser el agujero inferior, ya que tiene el cortante de mayor valor (misma dirección ambas reacciones).

Siendo la tensión a cortadura del anclaje más restrictivo (el correspondiente a la parte baja de la figura):

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{4}{3} * \frac{\sqrt{\left(\frac{R_z}{3} + T_i\right)^2 + \left(\frac{R_x}{3}\right)^2}}{\frac{\pi}{4} * 20^2}$$

Siendo  $T_i = \frac{M_y}{2 * r_i}$  dónde  $r_i$  es la distancia del centro del perno central al centro de los pernos de los extremos (65mm).

Se obtienen entonces unos valores de tensión de cortadura máximas para los dos casos de carga de:

$$\tau_{m\acute{a}x1} = 51,63 \text{ MPa} < 217,5 \text{ MPa}$$

$$\tau_{m\acute{a}x2} = 64,54 \text{ MPa} < 217,5 \text{ MPa}$$

En este caso, la tensión debida al Axil y al Flector se desprecia ya que tiene un valor muy bajo en comparación con la tensión normal admisible. Como se puede observar, las tensiones obtenidas debido al cortante no superan el límite admisible por lo que los pernos aguantarían los esfuerzos producidos. En concreto, se utilizarán en total 6 pernos de M20 estandarizados con un  $CS = \frac{217,5}{64,54} = 3,37$ .



## 6.5 ANÁLISIS MODAL DEL DISEÑO FINAL

El análisis modal es una herramienta necesaria para comprender el comportamiento dinámico del halo de F1. En este análisis, se identificarán las frecuencias naturales, los modos de vibración y las deformaciones asociadas a la estructura del halo.

El objetivo principal de este análisis es garantizar que el diseño del halo sea óptimo y que minimice las vibraciones y la fatiga durante su funcionamiento. La resonancia es un fenómeno que ocurre cuando hay excitaciones vibratorias cercanas a las frecuencias naturales de la estructura. Si no se considera este tipo de análisis, el halo podría experimentar fallos debido a las vibraciones excesivas. Estas frecuencias deben medirse y compararse con las obtenidas mediante el software MsC Nastran-Patran, para determinar si existe riesgo de resonancia.

En este caso, se aplicarán las condiciones de restricción del modelo, para evaluar su comportamiento en operación de trabajo.

El análisis se lleva a cabo utilizando una solución de "Normal Modes" en MsC Nastran-Patran. Debido a que el modelo y la densidad están en milímetros, será necesario aplicar un valor de 0.001 al cociente "Wt/mass" para que el resultado de la frecuencia salga en hercios.

En la Tabla 6 se muestran los resultados de frecuencia obtenidos para los primeros diez modos de vibración.

Tabla 6: Frecuencia de vibración obtenida en cada modo

Frecuencia de vibración (Hz)	
Modo 1	258,565
Modo 2	454,867
Modo 3	498,326
Modo 4	558,509
Modo 5	712,669
Modo 6	1182,09
Modo 7	1537,72
Modo 8	2001,3
Modo 9	2029,79
Modo 10	2281,29

A continuación, se muestran las deformaciones producidas en los 10 primeros modos:

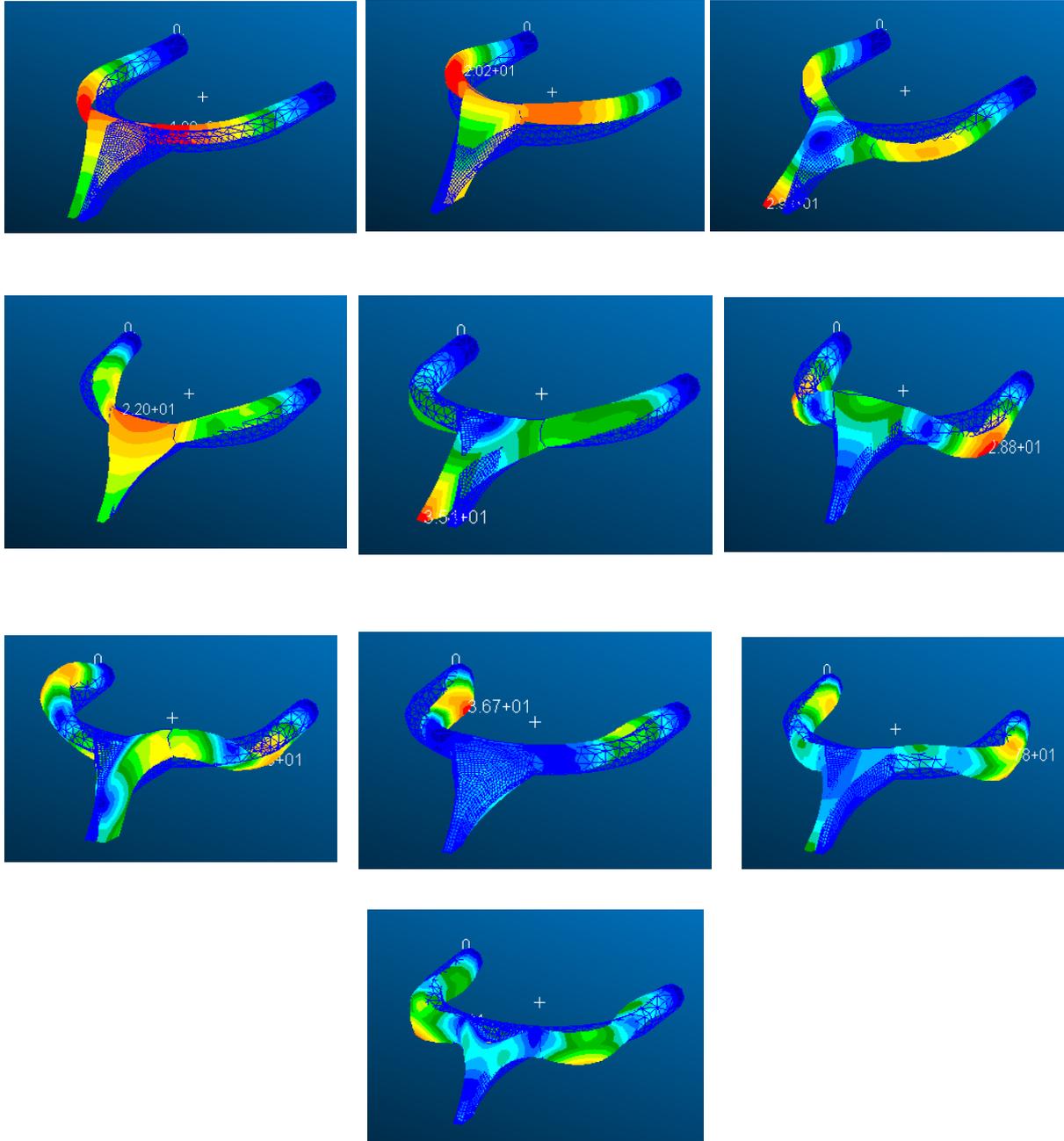


Ilustración 80: Deformación de todos los modos de vibración

Se puede observar cómo se producen deformaciones debido a esfuerzos de flexión, torsión, o combinación de ambas.

Una vez obtenidas las frecuencias naturales del sistema, debemos de calcular las frecuencias de excitación de aquellos elementos susceptibles de provocar vibraciones.

Uno de estos elementos es el motor. Actualmente, en un monoplaza de Fórmula 1 se utiliza un motor de combustión interna de seis cilindros en V, con una configuración de 1.6 litros y una arquitectura turboalimentada. Estos motores están diseñados para alcanzar RPM extremadamente altas, superiores a 15,000 RPM, lo que permite extraer una potencia impresionante en relación con su tamaño y peso reducidos.

Para el cálculo de las frecuencias de excitación, se establece un baremo de revoluciones por minuto que el motor de un F1 puede alcanzar. Para el cálculo de la frecuencia mínima, se supondrá 3000 RPM simulando el ralentí del motor. Por otro lado, 15000 RPM son las revoluciones máximas que se estiman en un F1.

Conocidas las RPM de partida, se procede a calcular el rango de frecuencias de excitación del motor:

$$f_{min} = \frac{n * RPM_{min}}{60} \quad ; \quad f_{max} = \frac{n * RPM_{max}}{60}$$

Donde  $n = 2$ , siendo los movimientos de subida y bajada que realiza el pistón en un ciclo

Obteniéndose así unos valores de:

$$f_{min} = 100 \text{ Hz}$$

$$f_{max} = 500 \text{ Hz}$$

### 6.5.1 Conclusiones

El rango de frecuencias naturales del halo va desde los 258 Hz hasta los 2281 Hz. En este caso, las vibraciones del motor podrían inducir en un fenómeno de resonancia sólo si se llegasen a superponer o acercar demasiado al valor de las frecuencias de los 3 primeros modos. Esto podría suponer un problema ya que podría aparecer daños fatales en los componentes.

Una de las medidas a realizar sería introducir elementos de amortiguación en la unión entre el chasis y el motor, ya que se puede observar como el soporte central que va unido al chasis, es el que más sufre en los 3 primeros modos.

## 6.6 ANÁLISIS AERODINÁMICO DEL DISEÑO FINAL

En este apartado se presenta un análisis del comportamiento aerodinámico del diseño final del halo de Fórmula 1, utilizando simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD). El halo es una estructura de seguridad crucial en los monoplazas de F1, diseñada para proteger al piloto de impactos. Por lo tanto, su diseño no solo debe maximizar la seguridad, sino también minimizar la resistencia aerodinámica para mantener un rendimiento óptimo del vehículo.

### 6.6.1 Simulaciones aerodinámicas

Para realizar el estudio aerodinámico del halo, se hará uso del software Autodesk CFD.

Después de importar el modelo de Inventor al software de CFD, se debe de especificar cuál va a ser el volumen de control para establecer los límites del campo de estudio (Ilustración 81). Es importante adecuar bien las medidas ya que un volumen muy grande supondría un esfuerzo computacional enorme.

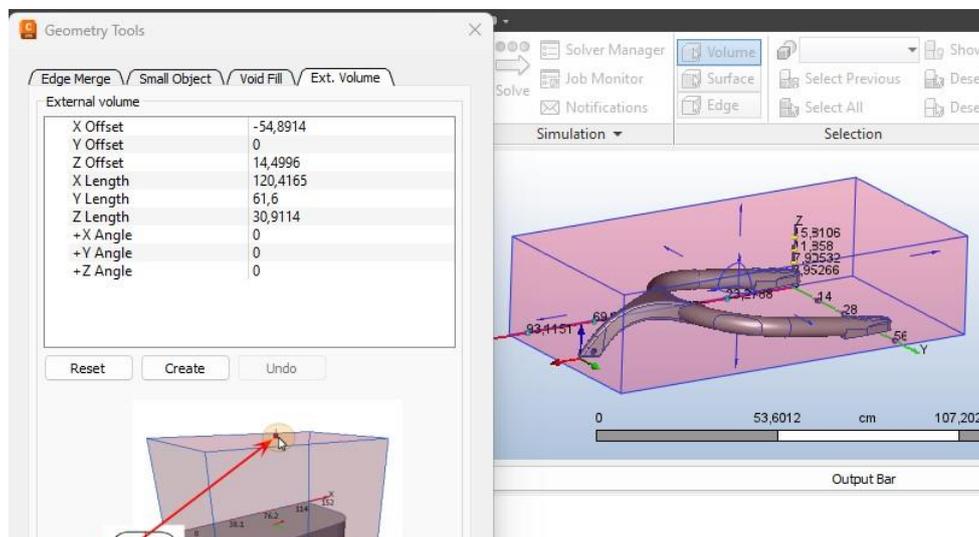


Ilustración 81: Volumen de control del análisis CFD

En este caso el halo está hecho de aleación de titanio de grado 5 (Ilustración 83). Al volumen exterior, le aplicamos un material de tipo “fluid” y en concreto aire, de manera que simula el ambiente exterior que tendría el halo en condiciones normales (Ilustración 82).

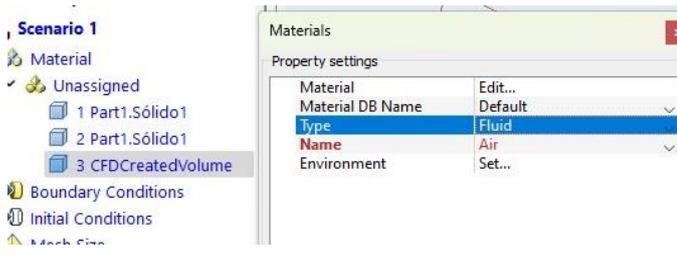


Ilustración 82: Asignación del tipo de material al volumen exterior

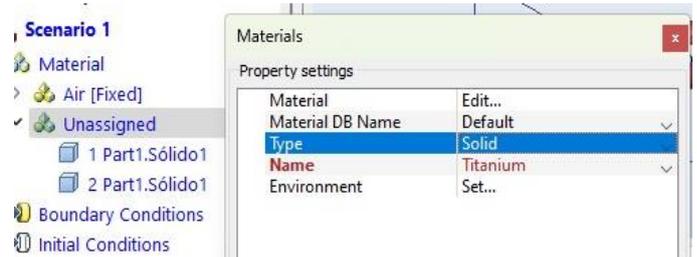


Ilustración 83: Asignación del tipo de material al halo

Asignado el material, es hora de crear las condiciones de contorno que tendrá el modelo. En la superficie frontal del halo, se aplica una velocidad de 80 km/h y otra de 350 km/h, de manera que simularía los dos casos extremos que se quieren analizar (Ilustración 84).

Además, en la superficie contraria del volumen de control, es decir, justo detrás del halo, se aplica una presión estática de 0 Pascales (Ilustración 85). Esto se realiza a menudo en los análisis CFD que realizan los equipos de Formula 1 en su túnel de viento, para representar una región de presión constante que representa el ambiente no perturbado del flujo libre. Cuando se realiza una simulación del flujo de aire alrededor del halo, el objetivo es entender cómo el aire se distribuye y se presiona en torno a la estructura. Estableciendo una presión de 0 pascales detrás del halo, se puede observar cómo el aire se acelera y se despresuriza al pasar por el halo, proporcionando datos cruciales para evaluar la eficiencia aerodinámica y las fuerzas de resistencia.

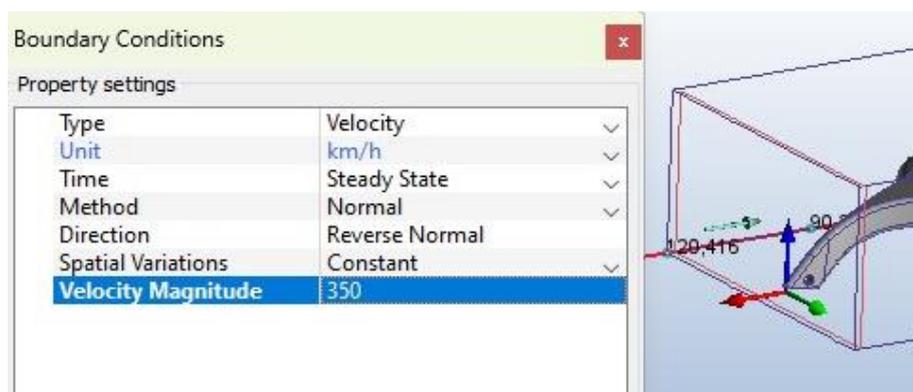


Ilustración 84: Condición de contorno de velocidad frontal del aire

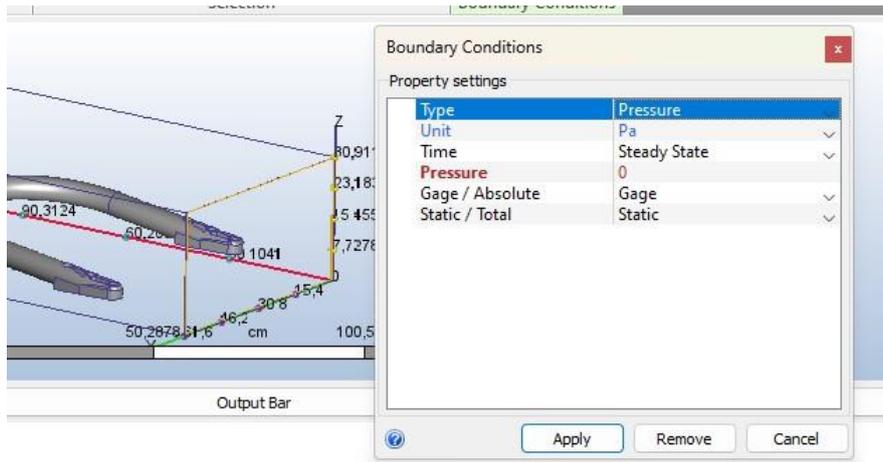


Ilustración 85: Condición de contorno de presión absoluta

El último paso antes de extraer los resultados del modelo es la creación de la malla (Ilustración 86). Al igual que en el análisis MEF, una correcta creación de malla hará que se produzcan resultados más fiables y correctos.

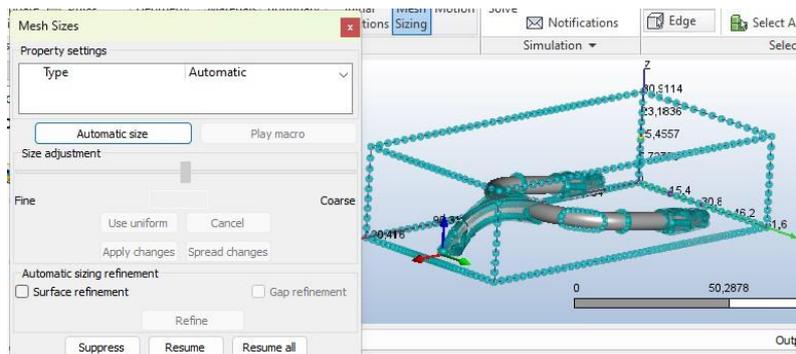


Ilustración 86: Creación del mallado del modelo en CFD

Una vez realizados todos los pasos anteriores, el modelo ya está listo para ser analizado. Se procede entonces con el comienzo de la simulación aerodinámica:

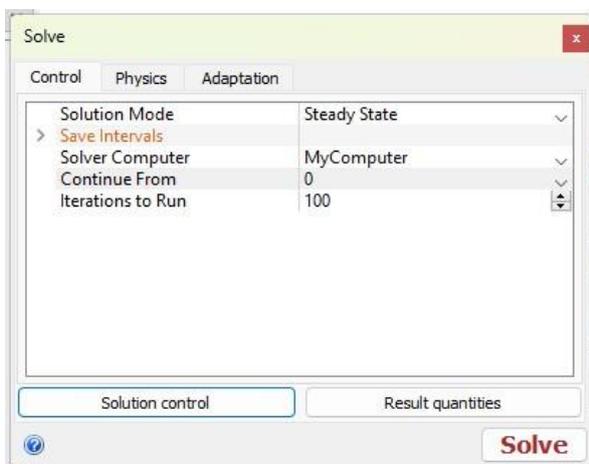


Ilustración 88: Comienzo de la simulación

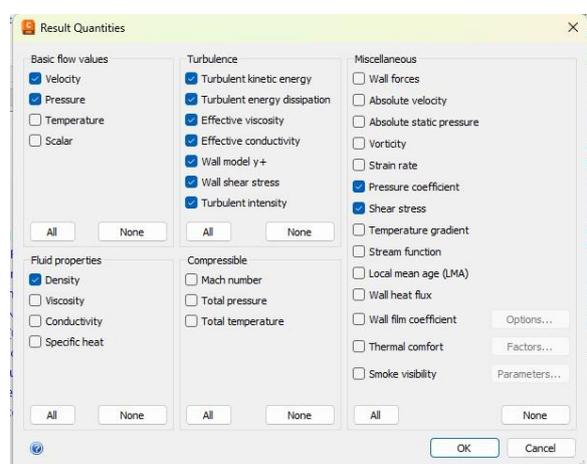


Ilustración 87: Propiedades que se establecen para ser mostradas en los resultados

### 6.6.2 Resultados de las simulaciones aerodinámicas

En este apartado se detallan los resultados obtenidos en los dos casos de velocidad de 80 km/h y 350 km/h. Posteriormente, se llevará a cabo un análisis en términos de resistencia al avance del conjunto en más situaciones de velocidad.

#### 6.6.2.1 Resultados de las simulaciones aerodinámicas a 80 km/h

A continuación, se muestran un conjunto de figuras que representan como el flujo de aire incide sobre la estructura (Ilustración 89), tomando una serie de valores en distintas zonas (Ilustración 90 e Ilustración 91)

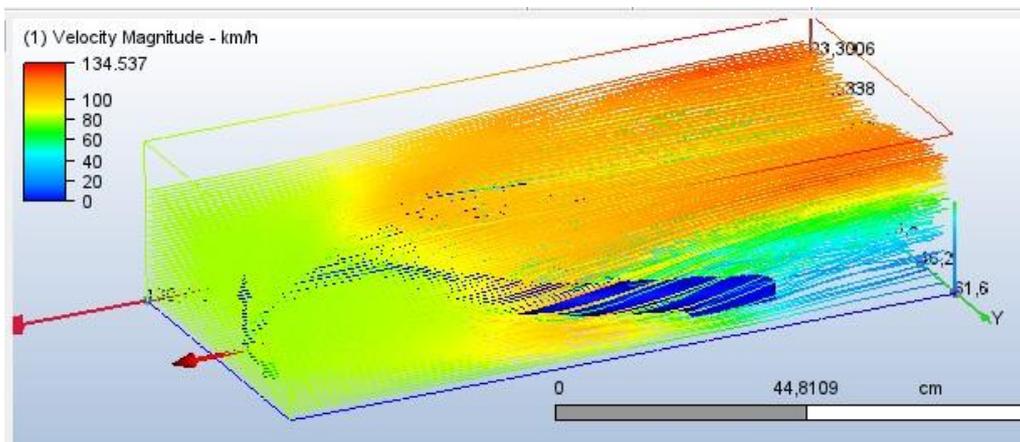


Ilustración 89: Trayectoria del aire a 80 km/h

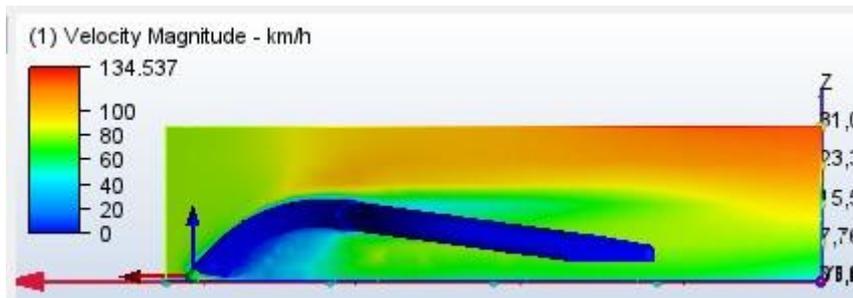


Ilustración 90: Velocidad que alcanza el aire en la pieza visto desde el perfil

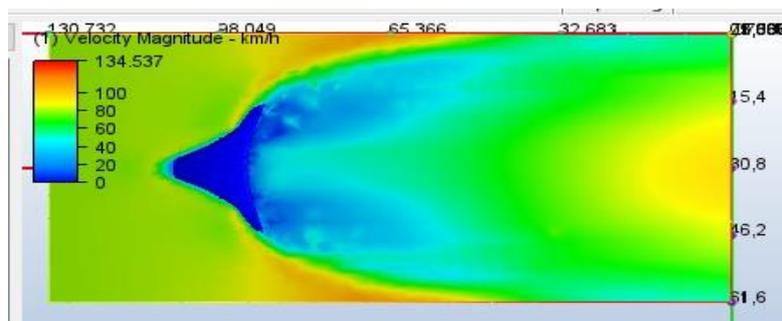


Ilustración 91: Velocidad que alcanza el aire en la pieza visto en planta

Se puede observar como la velocidad del aire es mínima justo en la zona de impacto del pilar central, así como en la parte contraria a este. En toda la altura del halo el aire mantiene una velocidad en torno a los 80 km/h. La velocidad máxima la alcanza cuando el aire sobrepasa la zona superior del modelo, aumentando así hasta los 134 km/h en toda la zona superior trasera del halo.

En cuanto a la trayectoria del aire, se observan líneas uniformes sin la aparición de vórtices en la parte posterior donde incide el aire. Esto demuestra que el diseño es eficiente en términos de aerodinámica ya que la aparición de remolinos provocaría pérdidas en velocidad punta, carga aerodinámica e inestabilidad del monoplaza.

Seguidamente, se detallan los resultados obtenidos en cuanto a la presión producida en la estructura:

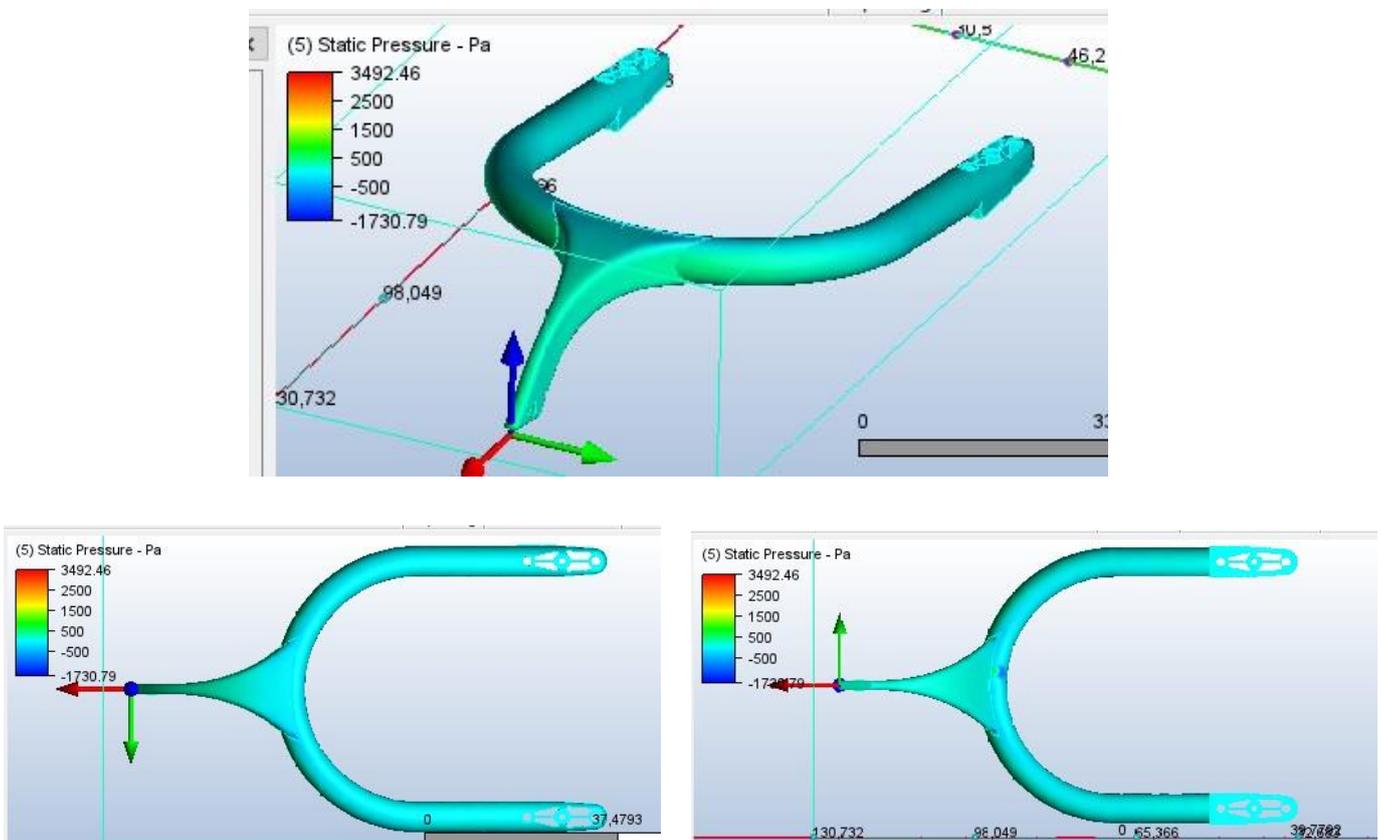
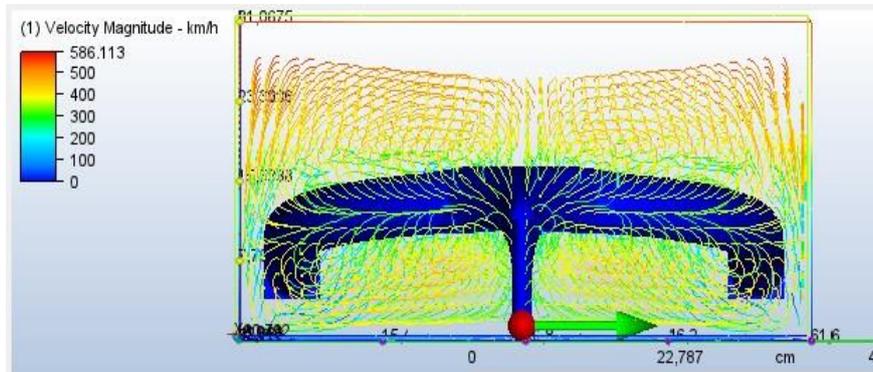


Ilustración 92: Presión del aire desde diferentes vistas

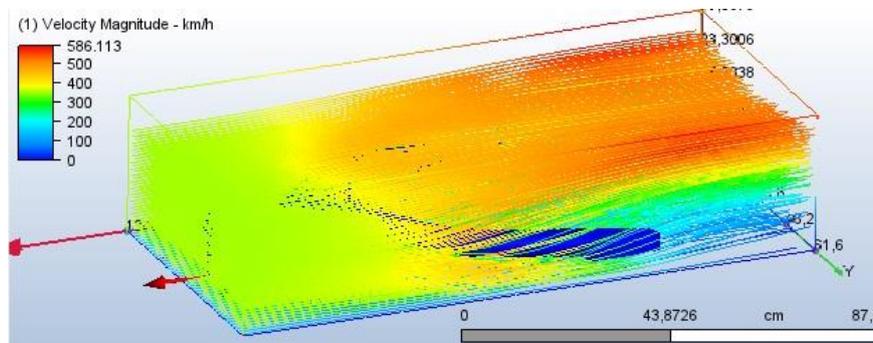
La presión máxima de 3.492 Pa se produce en las zonas directas de impacto del aire con el halo. En la cara opuesta del halo es dónde se produce la depresión (color azul). Si tenemos en cuenta que el límite elástico de la pieza es de 1.100 MPa, este valor no afecta en absoluto en cuanto al comportamiento mecánico de la pieza.

6.6.2.2 *Resultados de las simulaciones aerodinámicas a 350 km/h*

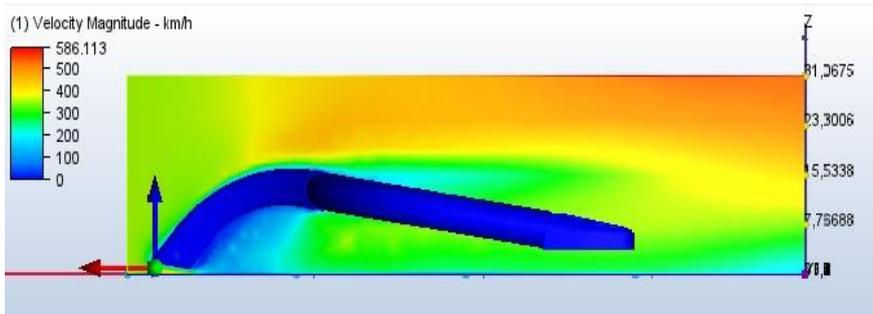
A continuación, se muestran un conjunto de figuras que representan como el flujo de aire incide sobre la estructura, tomando una serie de valores en distintas zonas:



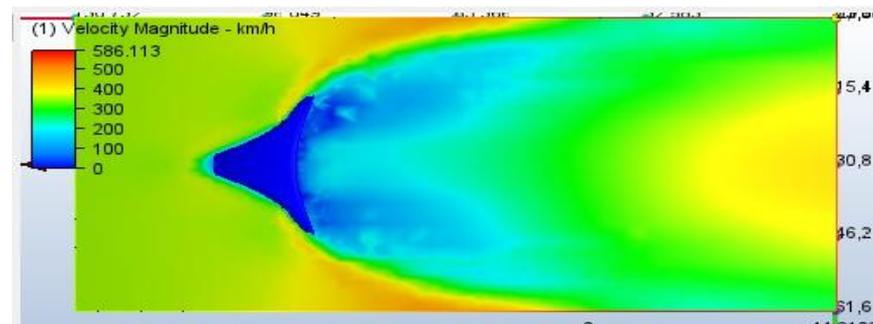
*Ilustración 93: Trayectoria del aire en vista frontal*



*Ilustración 94: Trayectoria del aire en vista isométrica*



*Ilustración 95: Velocidad del aire vista desde el perfil*



*Ilustración 96: Velocidad del aire vista en planta*

Al igual que en la simulación anterior, el aire alcanza su valor máximo de 586 km/h en la parte superior del modelo justo después de impactar con la parte frontal del halo. A pesar de ser una velocidad muy elevada, no se aprecia la aparición de vórtices por lo que el resultado sería satisfactorio.

Finalmente se detallan las siguientes figuras que representa la presión que alcanza el aire a esa velocidad:

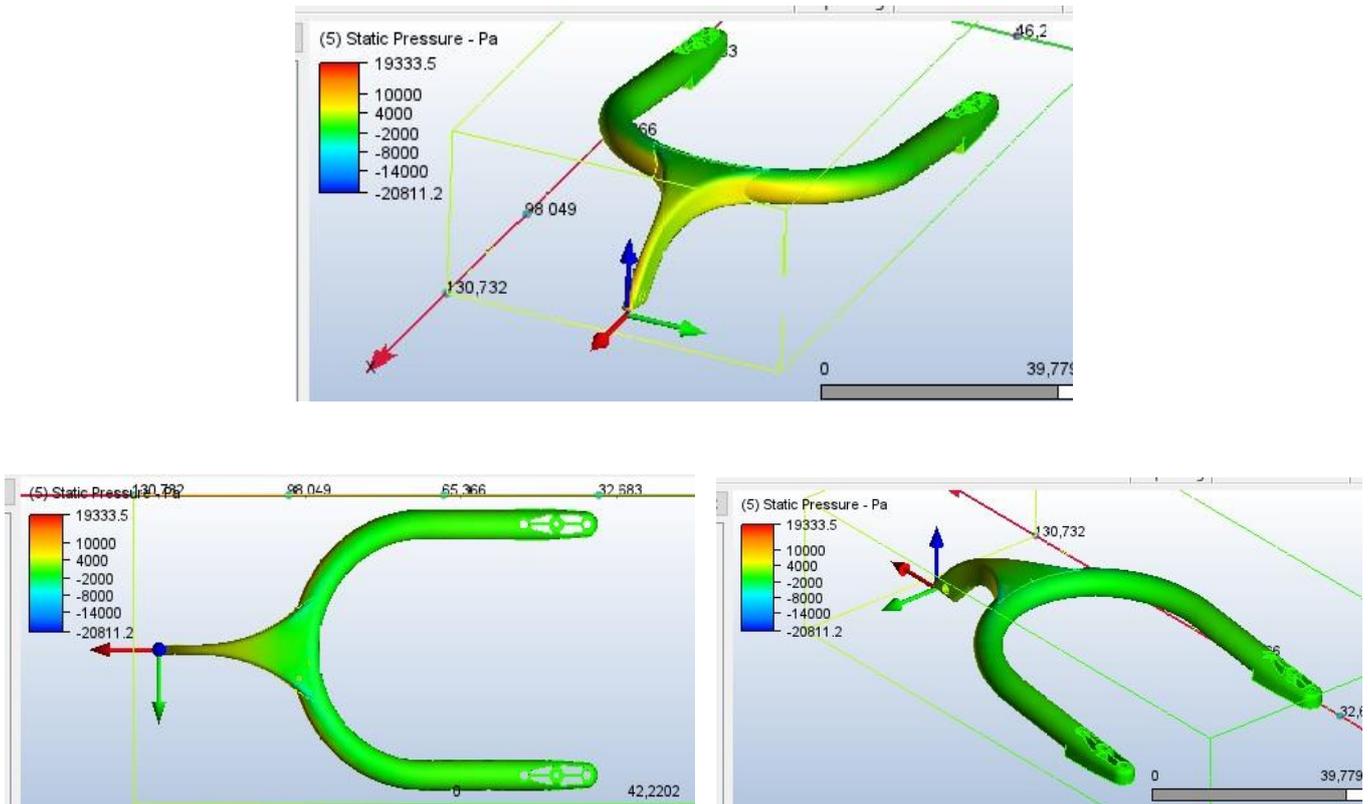


Ilustración 97: Presión del aire desde diferentes vistas

La presión máxima de 19.333 Pa se alcanza de igual manera en las zonas de impacto del aire con la estructura. Esta vez se alcanza una depresión de más valor en las zonas contrarias al impacto. A pesar de que la presión generada es bastante mayor que a 80 km/h, el valor máximo de 19.333 Pa sigue siendo un valor muy pequeño comparado con el límite elástico del material, 19,33 MPa < 1.100 MPa por lo que no tiene impacto mecánico en la estructura.



### 6.6.3 Resistencia aerodinámica

Como anexo a este caso de estudio, se ha realizado el cálculo de la fuerza de resistencia de avance que el aire ejerce sobre el halo, en diferentes situaciones: a 80km/h, 150 km/h, 200 km/h, 250 km/h, 300 km/h y 350 km/h.

La resistencia aerodinámica es la fuerza que actúa en dirección contraria al movimiento de un cuerpo a través del aire, dificultando su avance. Esta fuerza surge debido a la necesidad de desplazar el aire que se encuentra frente al cuerpo en movimiento y reubicarlo detrás de este. A medida que el objeto se desplaza, se genera una diferencia significativa de presión entre la parte frontal, donde el aire impacta directamente, y la parte posterior, donde se crea una zona de baja presión o succión debido al vacío generado.

La resistencia aerodinámica está determinada por cuatro factores clave: la densidad del aire, la superficie frontal del objeto, la velocidad de desplazamiento y el coeficiente de resistencia aerodinámica. La fórmula para calcular esta resistencia es la siguiente:

$$R_{aerod} = \frac{1}{2} * \rho_{aire} * A * v^2 * C_{aerod}$$

Siendo:

- $\rho_{aire}$  = La densidad el aire, en kg/m3
- $A$  = Área frontal donde impacta el aire
- $v$  = Velocidad del aire
- $C_{aerod}$  = Coeficiente de resistencia aerodinámica

Para ello, a través de la función “Wall calculator” en Autodesk CFD, se calcula la fuerza de resistencia producida en los 6 casos. A continuación, se muestra la Tabla 7 con los resultados obtenidos:

Tabla 7: Resistencias aerodinámicas

Velocidad (km/h)	Resistencia aerodinámica (N)
<b>80</b>	11,2739
<b>150</b>	36,4445
<b>200</b>	63,8875
<b>250</b>	98,4604
<b>300</b>	141,232
<b>350</b>	193,425

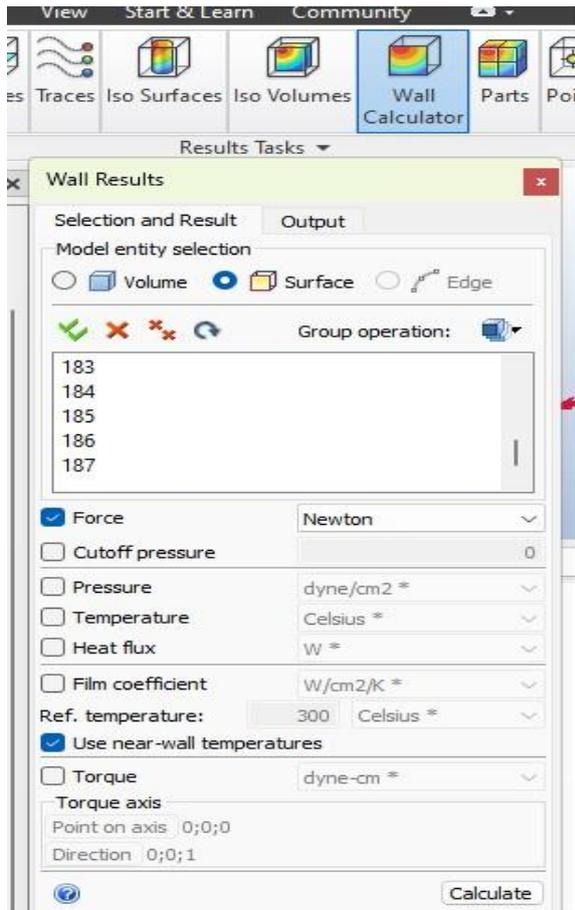


Ilustración 98: Función "Wall calculator" en Autodesk CFD

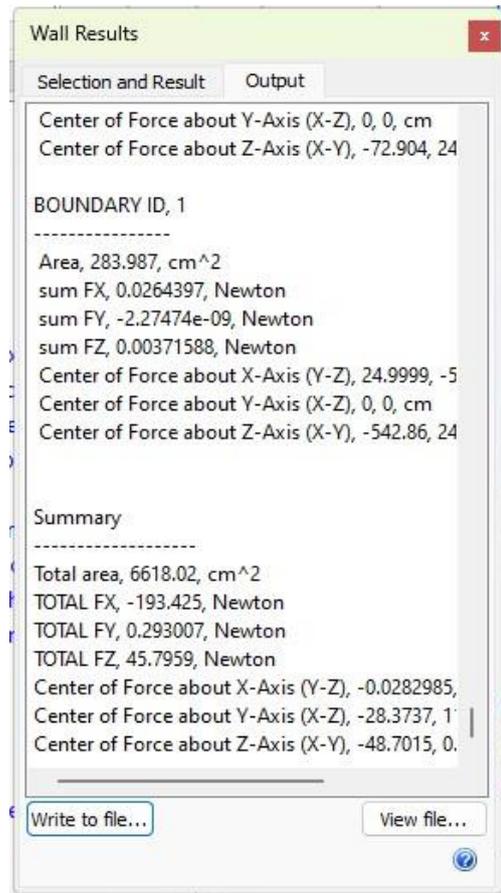
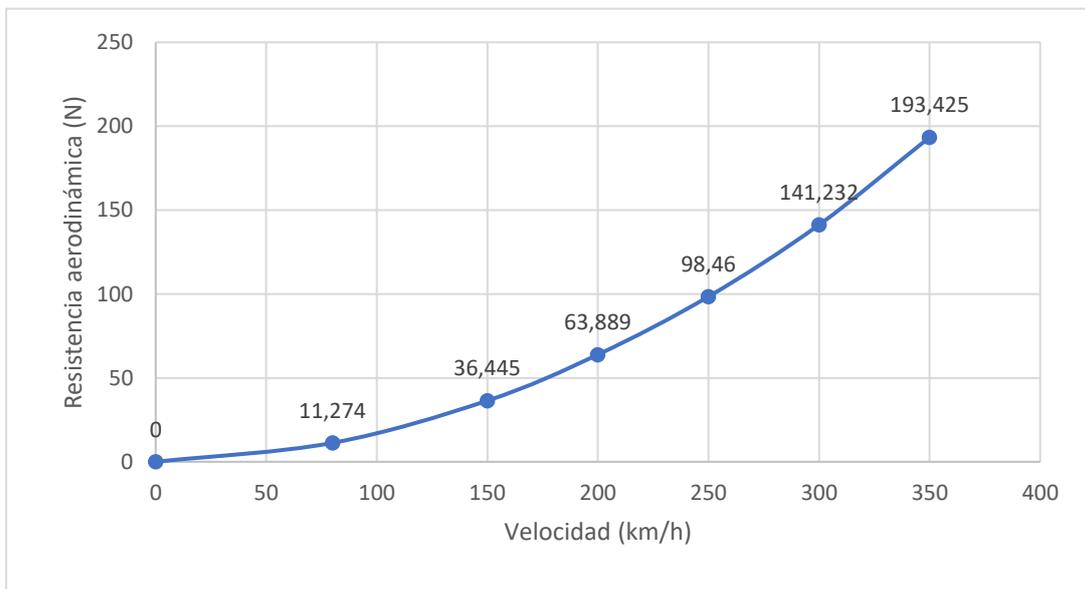


Ilustración 99: Resultado de la resistencia aerodinámica en el caso de 350 km/h

En la Tabla 7: Resistencias aerodinámicas, se observa como a medida que aumenta la velocidad, la resistencia aerodinámica aumenta exponencialmente. Esto se ve reflejado en la siguiente gráfica:



Una vez calculadas todas las resistencias aerodinámicas, se procede al cálculo de los coeficientes aerodinámicos en las distintas simulaciones. Despejando de la fórmula de la resistencia, se obtiene:

$$C_{aerod} = \frac{2 * R_{aerod}}{\rho_{aire} * A * v^2}$$

Antes de nada, es necesario calcular el área frontal de incidencia del halo. Para ello en Autodesk Inventor, nos creamos un boceto en un plano paralelo al frontal, y dibujamos el contorno frontal del halo (Ilustración 100) para poder extruirlo. Hecho esto, es posible calcular el área total (Ilustración 101) con la herramienta "medir":

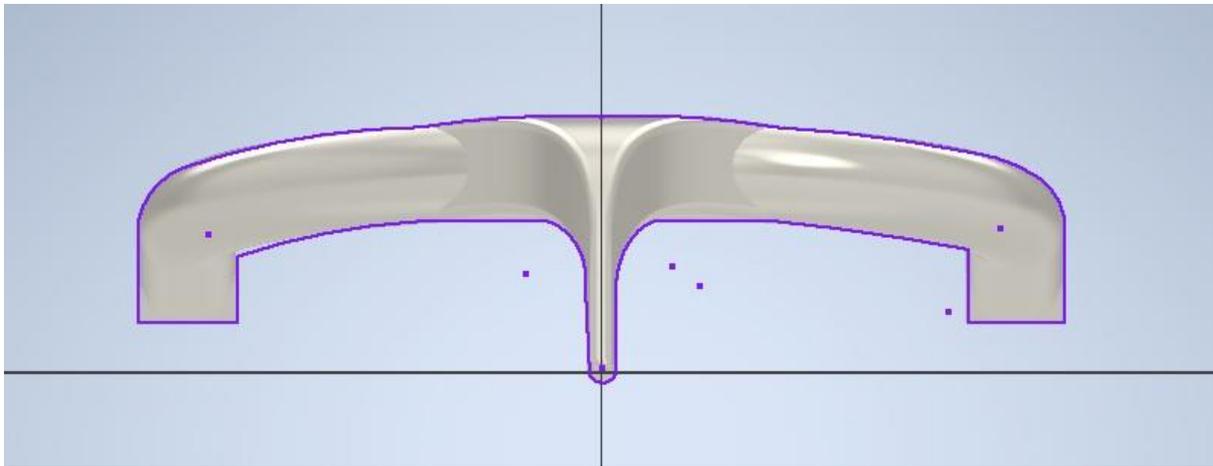


Ilustración 100: Boceto del contorno frontal del halo

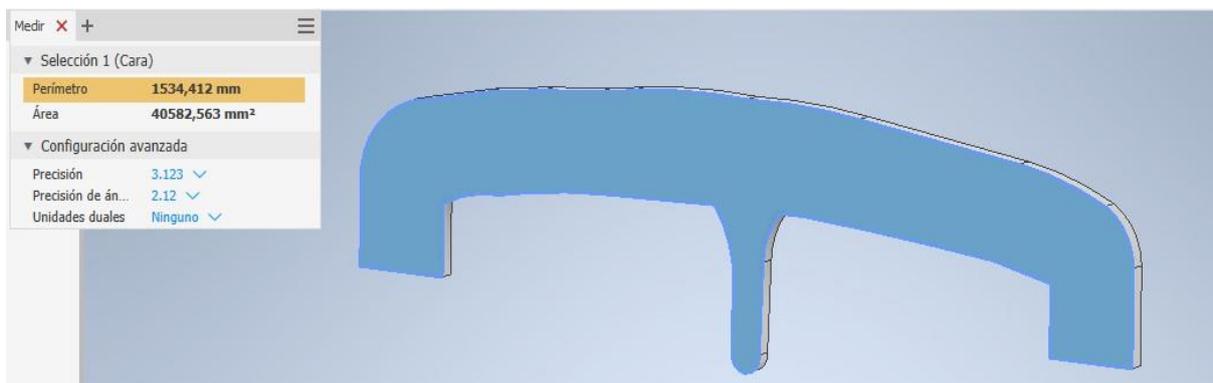


Ilustración 101: Área total frontal

Una vez calculados todos los parámetros necesarios, se detallan los coeficientes aerodinámicos en la Tabla 8:

Tabla 8: Resultado del coeficiente aerodinámico para cada valor de velocidad

Velocidad (km/h)	Resistencia aerodinámica (N)	Coeficiente Aerodinámico
<b>80</b>	11,2739	0,918
<b>150</b>	36,4445	0,845
<b>200</b>	63,8875	0,833
<b>250</b>	98,4604	0,821
<b>300</b>	141,232	0,818
<b>350</b>	193,425	0,823

Se obtiene un valor medio del coeficiente aerodinámico de 0,843.

Por lo general, el coeficiente aerodinámico para vehículos de calle oscila entre 0.25 y 0.40. Esto se debe a que son diseñados para priorizar la eficiencia de combustible, confort y bajas emisiones, frente al rendimiento deportivo.

Para un vehículo de fórmula 1, la principal preocupación es maximizar la carga aerodinámica para mejorar el agarre y la estabilidad en curvas, incluso si esto resulta en un coeficiente relativamente alto. No obstante, depende de varios factores ya que, dependiendo del tipo del circuito, se utilizan configuraciones aerodinámicas de más o menos carga aerodinámica. Estos valores oscilan entre 0,7 y 1. Por tanto, se puede asegurar que el coeficiente de aerodinámica calculado en el halo se encuentra dentro de los valores generales de un monoplace de Fórmula 1.



## 7. CONCLUSIONES Y SÍNTESIS DE RESULTADOS

Una vez calculados los resultados de todos los modelos realizados de elementos finitos, se extraen diferentes conclusiones:

En primer lugar, la primera idea del diseño fue la de realizar en MsC Nastran-Patran el diseño de un modelo compuesto por un elemento bidimensional, el soporte central, y un elemento unidimensional, el aro principal del halo. En un primer análisis, se detecta varios fallos en el modelo:

1. Concentración de tensiones muy elevada en los dos puntos de unión, ocasionadas por el fallo de modelización entre la unión de elementos
2. Tensiones que no superaban la normativa establecida, y que debían de ser subsanadas.

Sabiendo los fallos existentes, se decide rediseñar el modelo, separando los puntos singulares de tensión de la superficie de aplicación de la fuerza, con el fin de reducir considerablemente estas tensiones.

Se obtienen tensiones menores, pero con la existencia de concentración de tensiones en los mismos puntos, por lo que se concluye en que el fallo viene en la modelización del sistema.

Para ello se decide realizar un modelo 2D-2D, sustituyendo el aro principal unidimensional, por una extrusión de la superficie exterior, convirtiéndose en un elemento bidimensional.

Se realizan los análisis establecidos en la normativa y se detecta que el problema de la concentración de tensiones ha desaparecido, pero que persiste el no cumplimiento de la normativa al superar el rango de tensiones permitido. Para ello se modifican los espesores de los elementos y se obtienen para cada caso de carga obligatorio resultados satisfactorios.

Después, se decide realizar un análisis modal con el fin de detectar posibles modos de fallo de la pieza que puedan resultar en un fenómeno de resonancia. Para ello se calculan las frecuencias naturales del sistema, y se comparan con las frecuencias de excitación existentes. Los resultados son aceptables, pero se detectan posibles modificaciones a realizar para mejorar el modelo.

Por último, se realiza un estudio aerodinámico del halo en diferentes situaciones, donde se comprueba el comportamiento del aire en función de su velocidad y presión, así como la resistencia de avance que se produce en cada caso. Con esta última se calcula el coeficiente aerodinámico medio del halo, y se comprueba su eficiencia en términos de aerodinámica y rendimiento. Los resultados que se obtienen son satisfactorios dentro de los términos establecidos.

## 8. REFERENCIAS

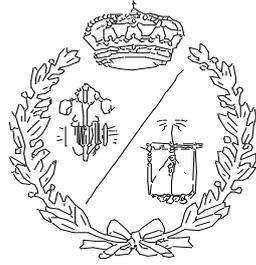
- [1] «Quimica.es,» [En línea]. Available: [https://www.quimica.es/enciclopedia/Ti6Al4V.html#Propiedades\\_mec.C3.A1nicas](https://www.quimica.es/enciclopedia/Ti6Al4V.html#Propiedades_mec.C3.A1nicas). [Último acceso: 2024].
- [2] U. d. Cantabria, «Universidad de Cantabria,» 2021. [En línea]. Available: <https://web.unican.es/>. [Último acceso: Septiembre 2021].
- [3] G. Piola. [En línea]. Available: <https://www.motor.es/formula-1/cronologia-halo-sistema-proteccion-cabeza-f1-201737986.html>. [Último acceso: 2024].
- [4] «V System,» [En línea]. Available: <https://www.vsystem.it/blog/dallhalo-alla-scocca-ce-un-made-in-italy-che-protolge-i-piloti>. [Último acceso: 2024].
- [5] «SoyMotor,» [En línea]. Available: <https://soymotor.com/noticias/la-f1-abre-investigacion-accidente-de-grosjean-barein-982796>. [Último acceso: 2024].
- [6] «SoyMotor,» [En línea]. Available: <https://soymotor.com/noticias/muere-robert-hubbard-el-inventor-del-hans-959870>. [Último acceso: 2024].
- [7] «Matrax lubricants,» [En línea]. Available: <https://matraxlubricantes.com/la-primera-carrera-formula-1-gp-gran-bretana-1950/>. [Último acceso: 2024].
- [8] «InfoBae,» [En línea]. Available: <https://www.infobae.com/autos/2022/07/04/formula-1-por-que-guanyu-zhou-salio-vivo-de-milagro-en-el-accidente-de-silverstone/>. [Último acceso: 2024].
- [9] «AutoBild,» [En línea]. Available: <https://www.autobild.es/noticias/video-subete-mercedes-williams-halo-molesta-192648>. [Último acceso: 2024].
- [10] «Autobild,» [En línea]. Available: <https://www.autobild.es/noticias/gp-belgica-2018-accidente-pudo-ser-mucho-peor-halo-294699>. [Último acceso: 2024].
- [11] «AS TV,» [En línea]. Available: [https://colombia.as.com/colombia/2021/09/12/videos/1631465608\\_403298.html](https://colombia.as.com/colombia/2021/09/12/videos/1631465608_403298.html). [Último acceso: 2024].



- [12 «ABC,» [En línea]. Available: <https://elpais.com/deportes/2022-07-03/accidente-multiple-en-la-formula-1-el-golpe-de-guanyu-zhou-en-silverstone-en-imagenes.html>. [Último acceso: 2024].
- [13 FIA , «2021 TECHNICAL REGULATIONS,» [En línea]. Available: [https://www.fia.com/sites/default/files/2021\\_formula\\_1\\_technical\\_regulations\\_-\\_iss\\_7\\_-\\_2020-12-16.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/2021_formula_1_technical_regulations_-_iss_7_-_2020-12-16.pdf). [Último acceso: 2024].
- [14 Alloys International, [En línea]. Available: [https://alloysintl.com/es/titanium-alloys-supplier/titanium\\_6al-4v/](https://alloysintl.com/es/titanium-alloys-supplier/titanium_6al-4v/). [Último acceso: 2024].
- [15 [En línea]. Available: <https://www.neonickel.com/es/alloys/aleaciones-de-titanio/ti-6al-4v-grade-5/>. [Último acceso: 2024].
- [16 FIA, [En línea]. Available: [https://www.fia.com/sites/default/files/fia\\_standard\\_8869-2018\\_afp\\_v1\\_0.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/fia_standard_8869-2018_afp_v1_0.pdf). [Último acceso: 2024].
- [17 [En línea]. Available: <https://es.motorsport.com/f1/news/relato-brasil-muerte-senna/4787267/>. [Último acceso: 2024].
- [18 DAZN, [En línea]. Available: <https://www.dazn.com/es-ES/news/motor/gran-premio-de-monaco-de-f1-por-que-los-entrenamientos-libres-son-en-jueves-en-vez-de-viernes/s4q4tqhmuhfk1rfts6wouzhao>. [Último acceso: 2024].
- [19 A. Diez, «Moodle Unican,» [En línea]. Available: [https://moodle.unican.es/pluginfile.php/1842924/mod\\_resource/content/1/Introduccion%20MEF\\_fb.pdf](https://moodle.unican.es/pluginfile.php/1842924/mod_resource/content/1/Introduccion%20MEF_fb.pdf). [Último acceso: 2024].

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

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**

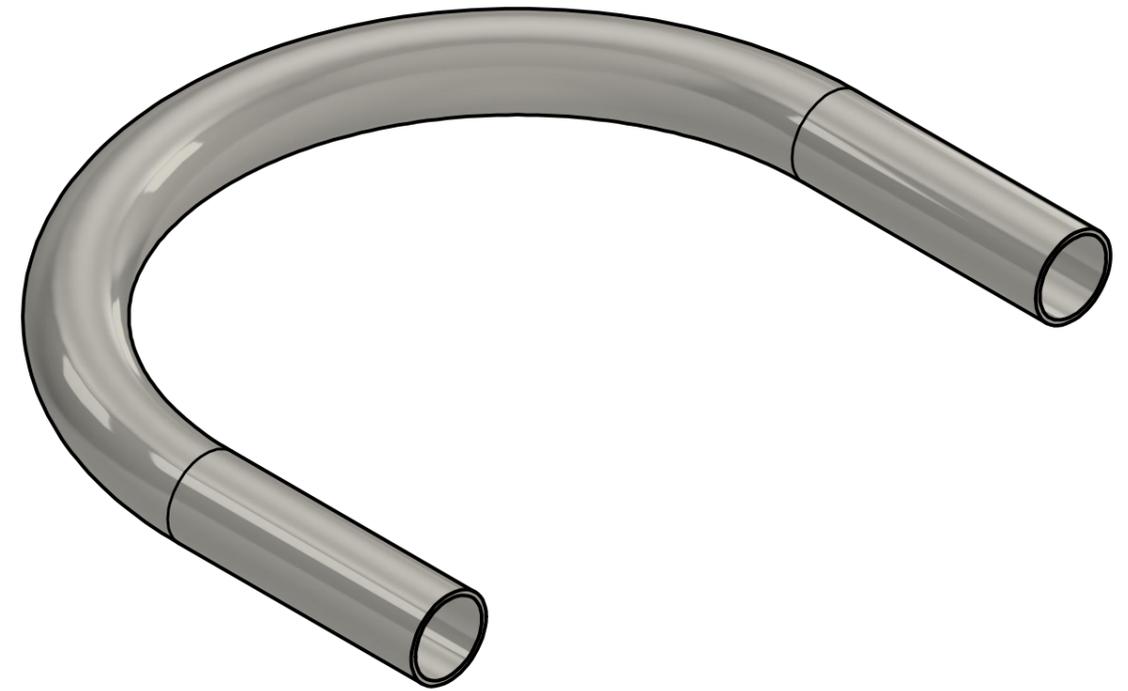
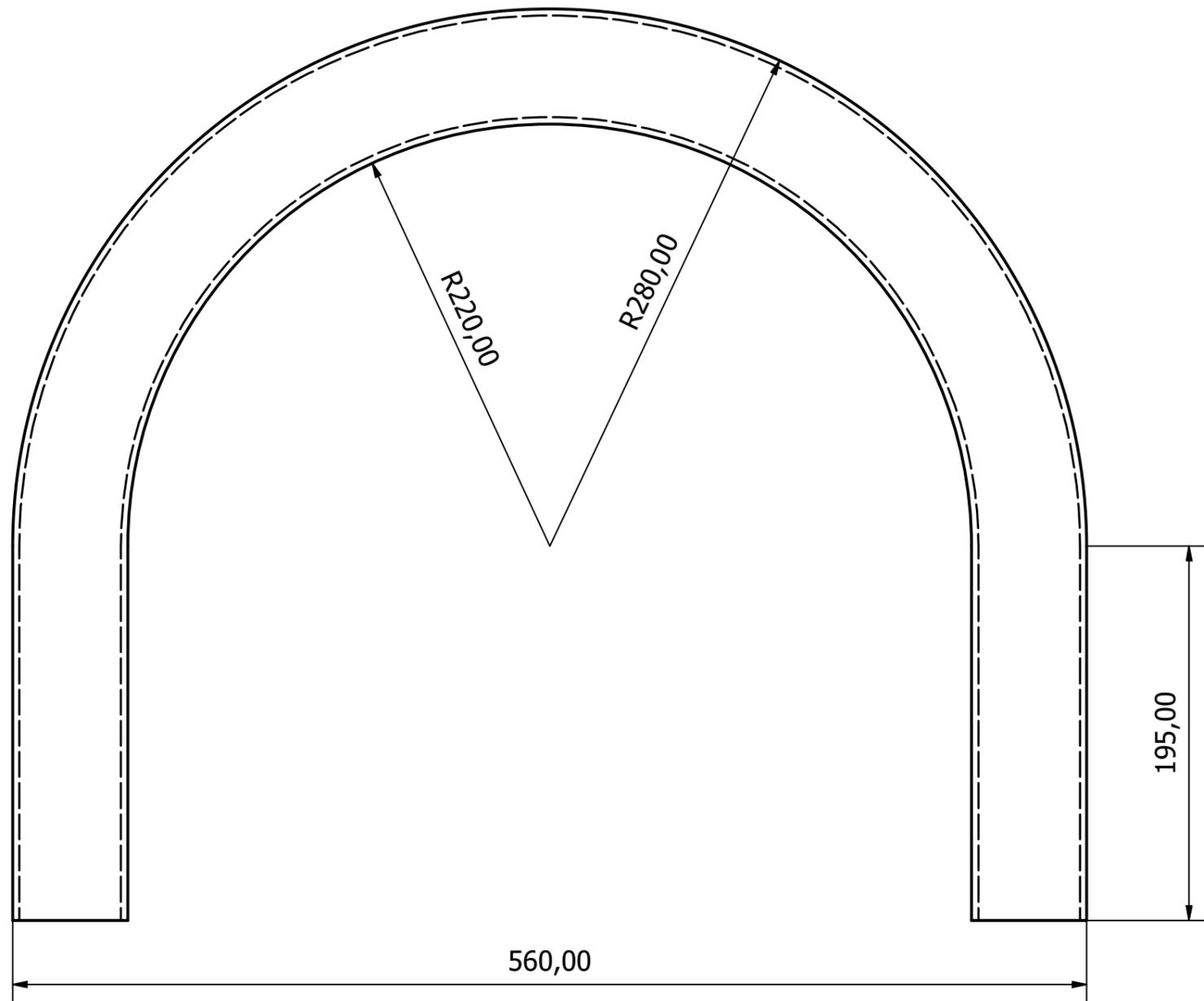


***Proyecto Fin de Grado***

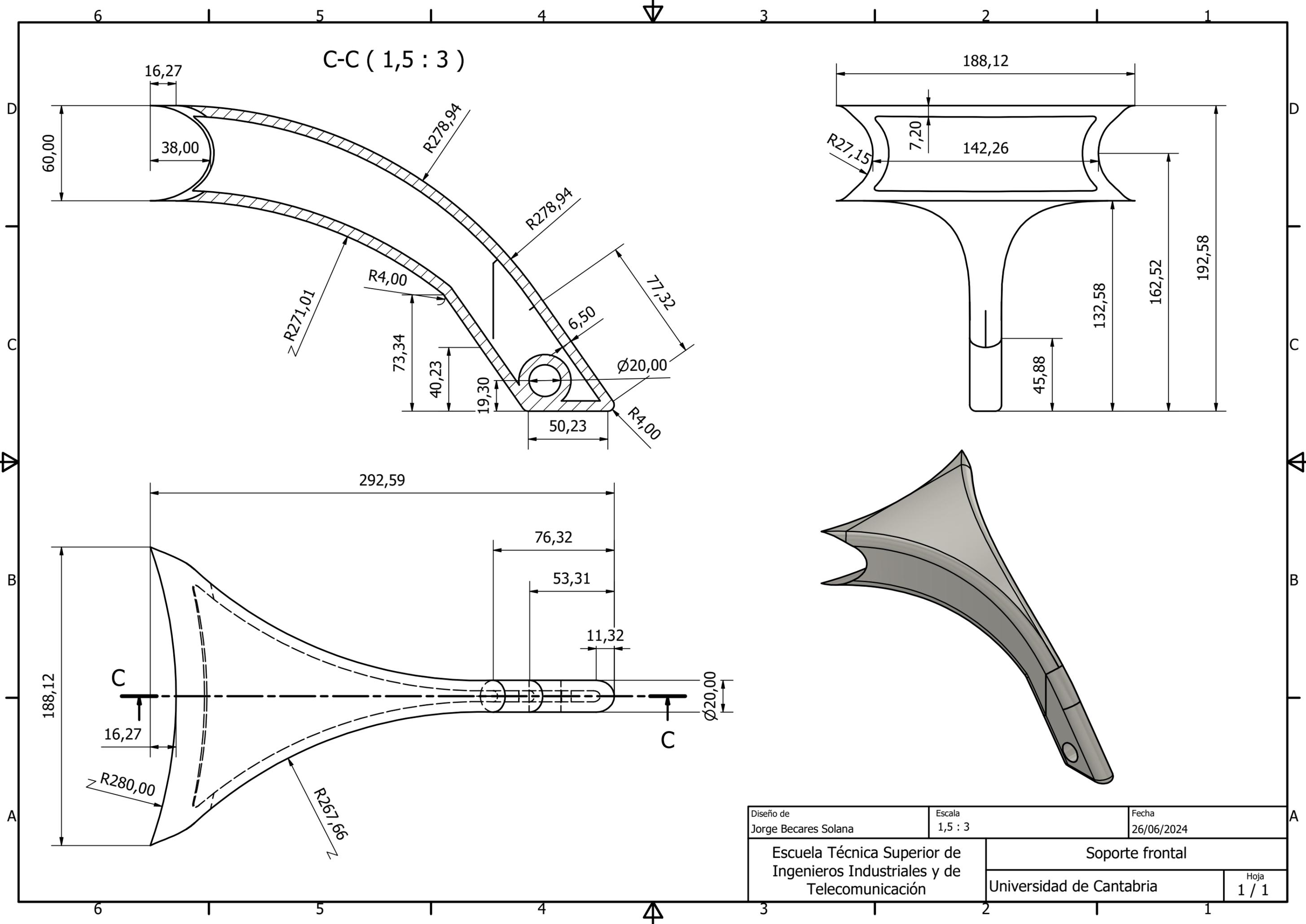
**DOCUMENTO III: PLANOS**

**Autor: Jorge Becares Solana**

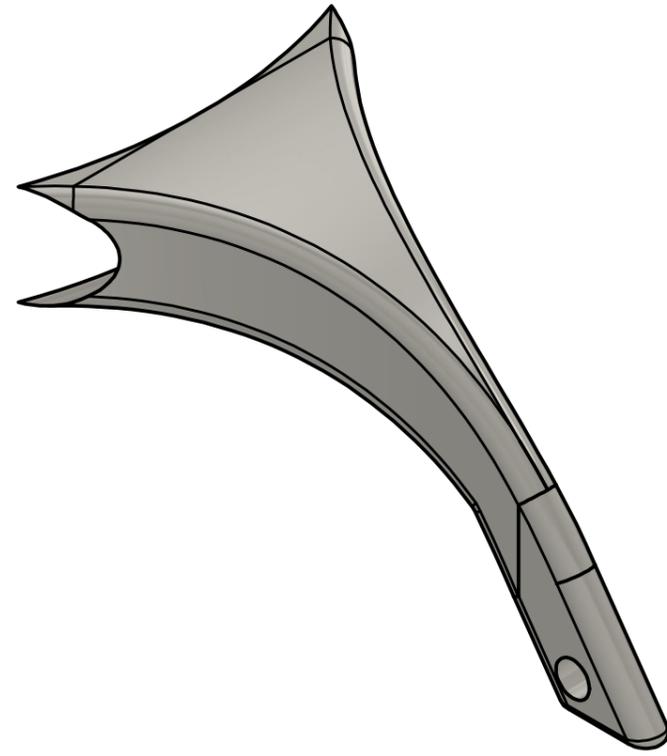
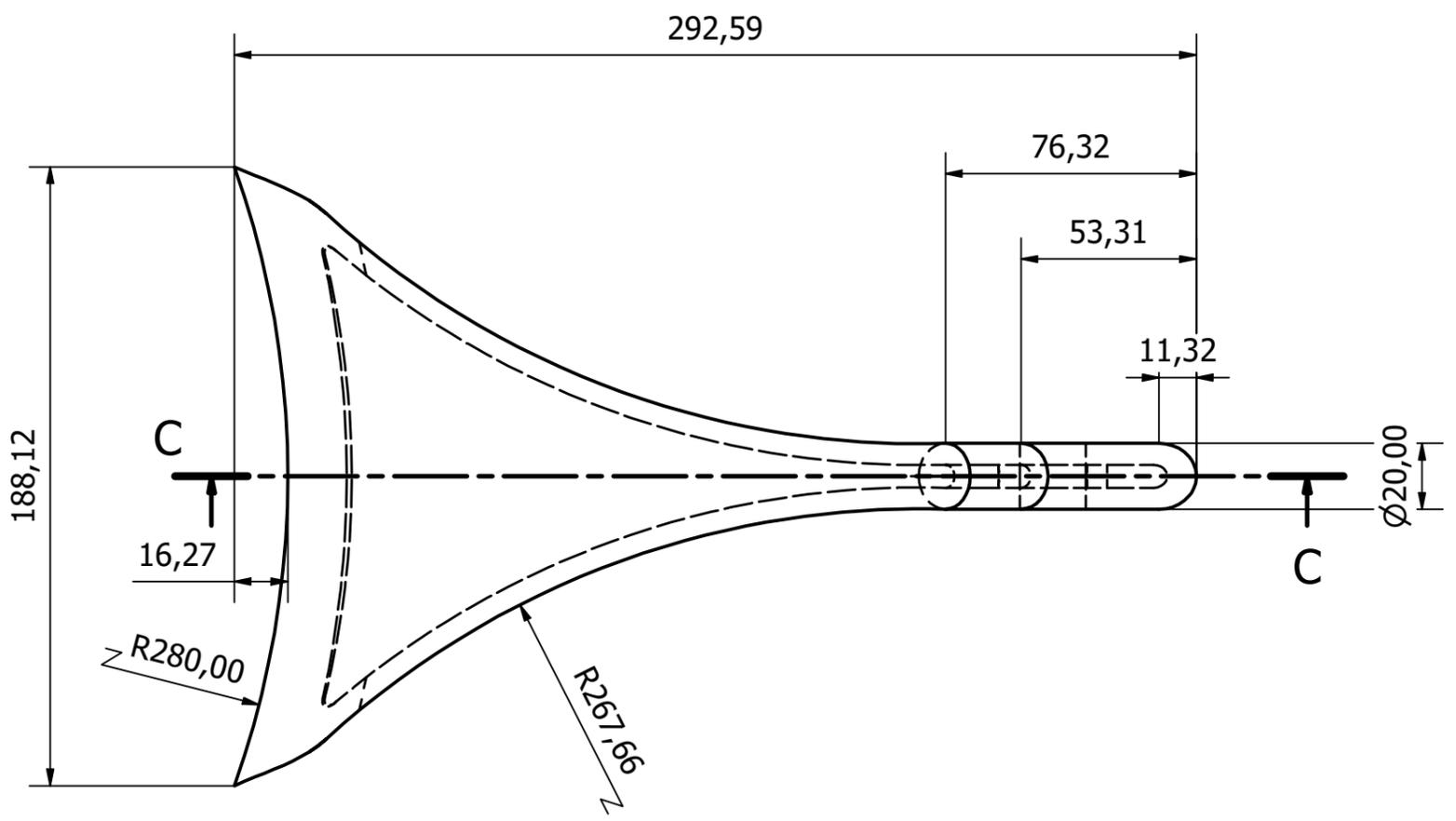
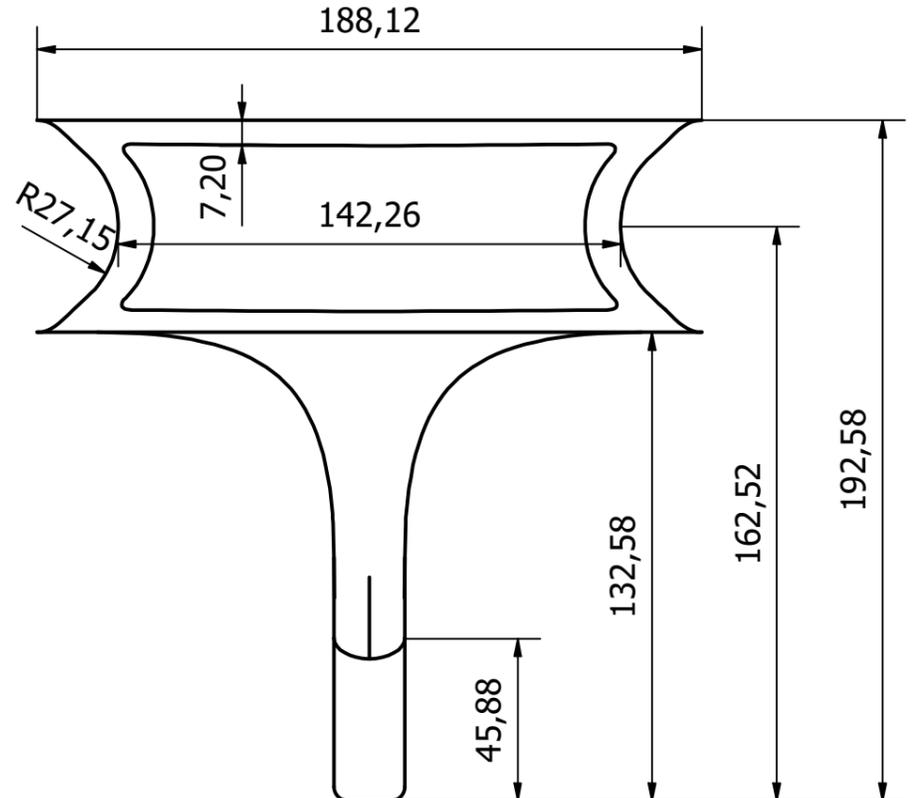
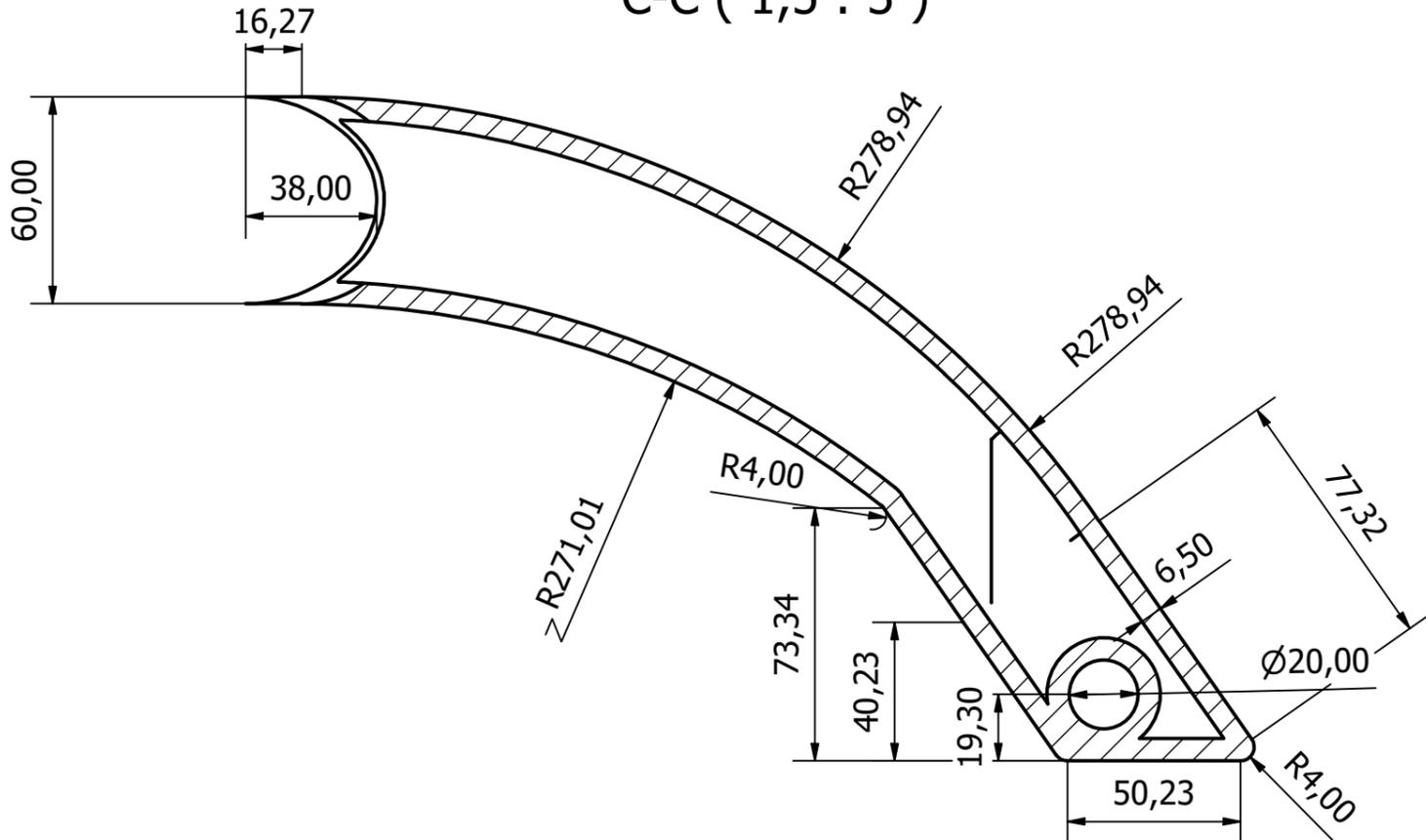
**Julio - 2024**



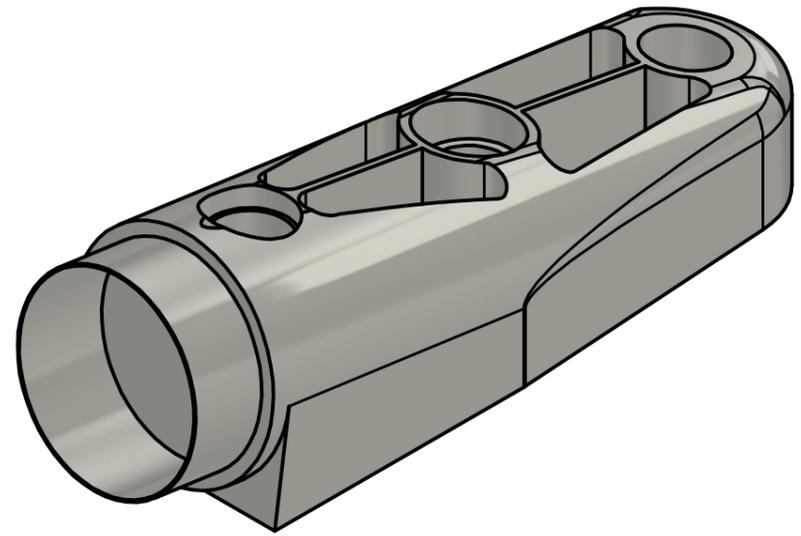
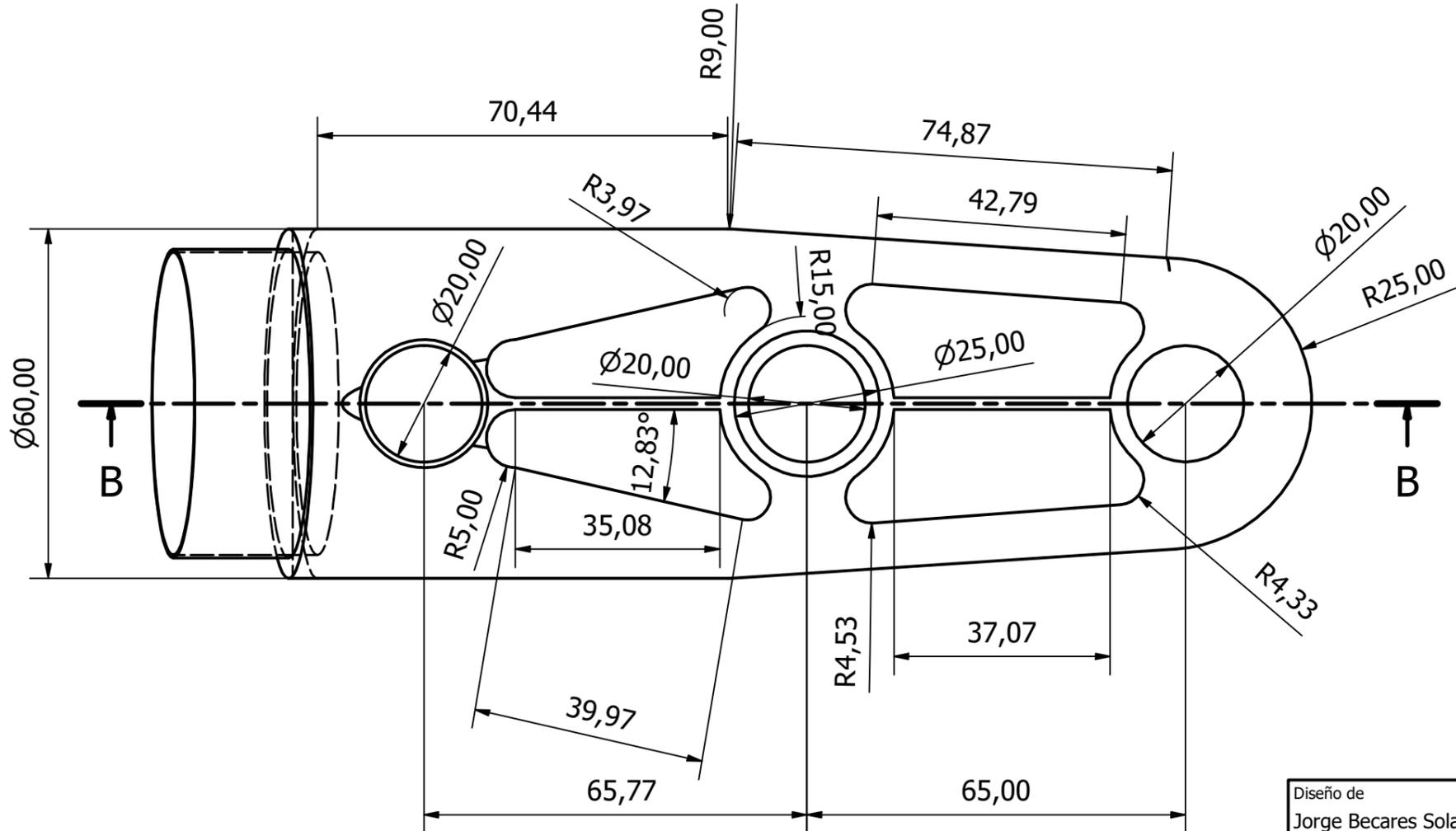
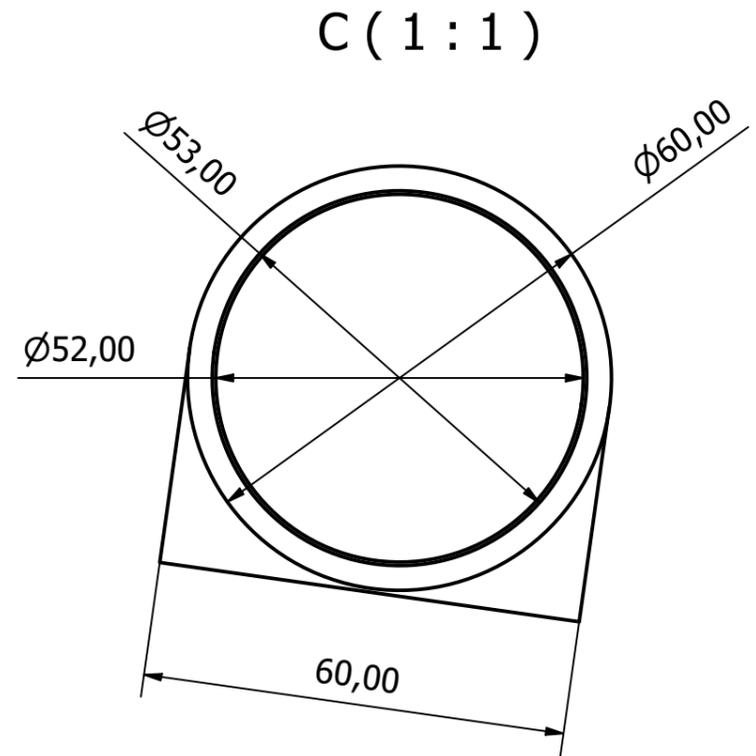
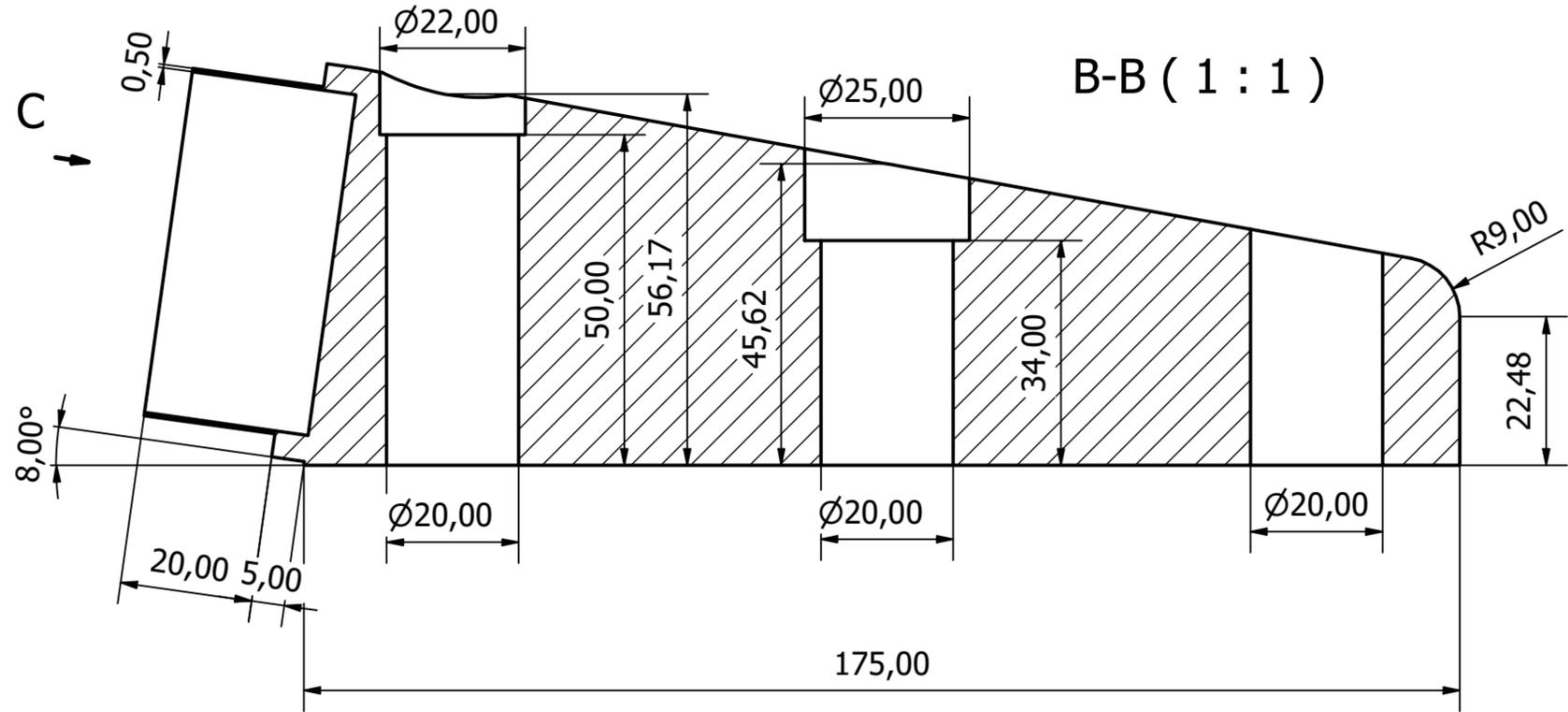
Diseño de Jorge Becares Solana	Escala 1 : 3	Fecha 26/06/2024
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación	Aro principal	
	Universidad de Cantabria	Hoja 1 / 1



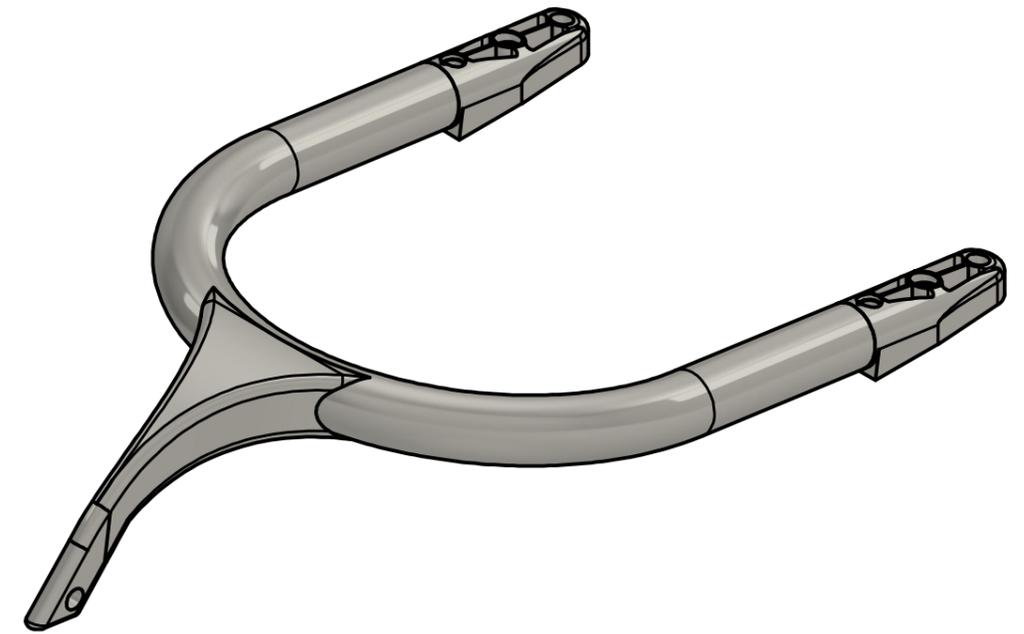
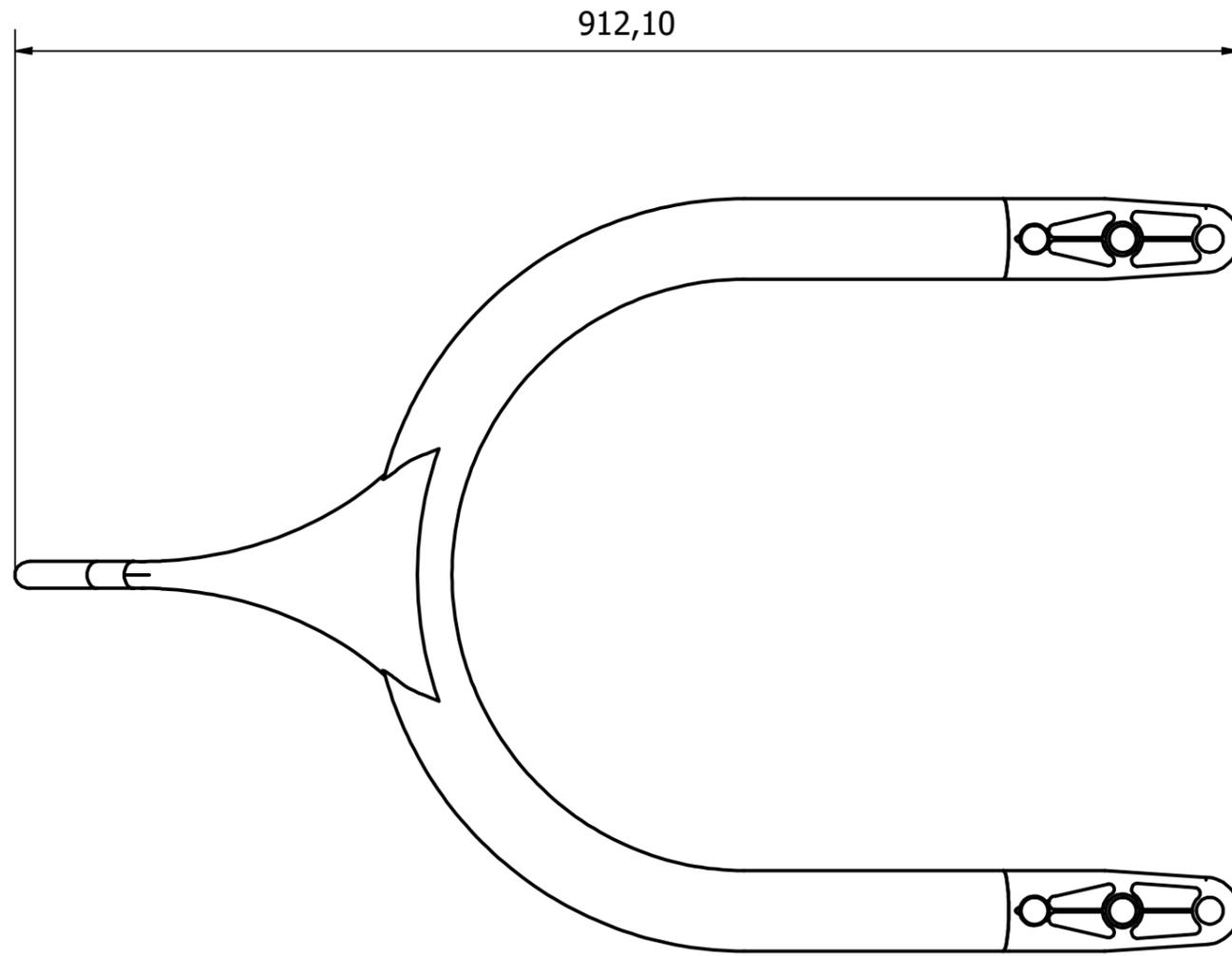
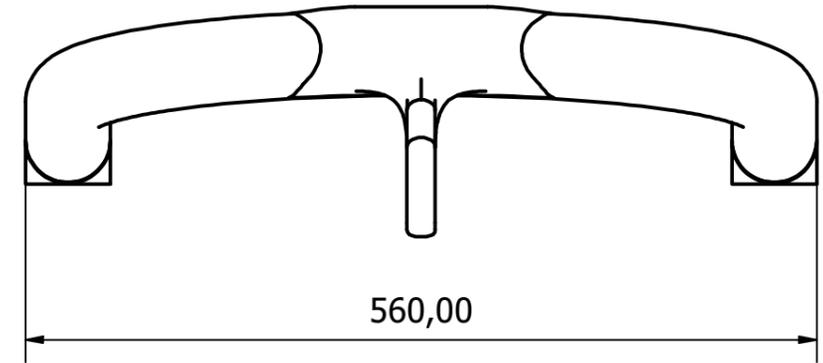
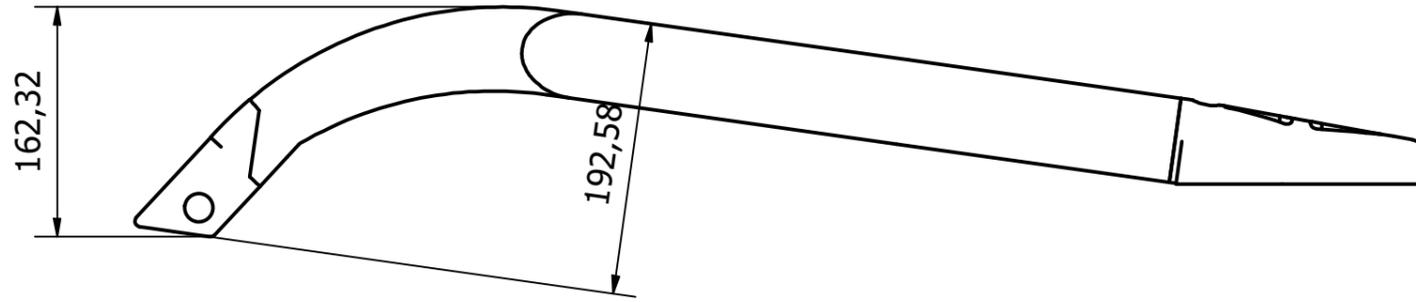
C-C ( 1,5 : 3 )



Diseño de Jorge Becares Solana	Escala 1,5 : 3	Fecha 26/06/2024
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación	Soporte frontal	
	Universidad de Cantabria	Hoja 1 / 1



Diseño de Jorge Becares Solana	Escala 1 : 1	Fecha 26/06/2024
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación	Soporte Trasero	
	Universidad de Cantabria	Hoja 1 / 1



Diseño de Jorge Becares Solana	Escala 1 : 5	Fecha 26/06/2024
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación	Halo	
	Universidad de Cantabria	Hoja 1 / 1

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

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Proyecto Fin de Grado***

**DOCUMENTO IV: PLIEGO DE CONDICIONES**

**Autor: Jorge Becares Solana**

**Julio - 2024**

## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Participantes .....	1
1.1.1	La propiedad .....	1
1.1.2	El técnico .....	1
1.1.3	El contratista .....	1
2.	MATERIALES .....	2
2.1	Bloques de titanio forjado .....	2
2.2	Materiales de trabajo .....	2
3.	ESPECIFICACIONES DE FABRICACIÓN .....	3
3.1	Tratamiento térmico .....	3
3.2	Corte de mecanizado .....	3
3.3	Soldadura .....	3
3.4	Tratamiento y acabado .....	3
3.5	Transporte y Logística .....	4
4.	ESPECIFICACIONES ECONÓMICAS .....	5
4.1	Costes .....	5
4.2	Garantía .....	5

# 1. INTRODUCCIÓN

El presente documento tiene como objetivo definir y regular los requisitos técnicos, económicos, y de seguridad para la realización del diseño, análisis y fabricación del halo de un vehículo de Fórmula 1. Para ello se recogen una serie de normas y especificaciones del tipo legal, administrativo, económicas y técnicas.

El alcance del proyecto incluye el diseño conceptual y detallado del halo, la selección de materiales por normativa, la realización de simulaciones y análisis estructurales, y la creación de la documentación técnica necesaria para su fabricación. No se incluye la producción física del halo, pero se proporcionarán todas las especificaciones técnicas.

## 1.1 Participantes

En este apartado se describen los participantes implicados en el proyecto y las funciones que realizan cada uno de ellos.

### 1.1.1 La propiedad

La propiedad del proyecto corresponde al equipo de Fórmula 1 que utilizará el halo. Este equipo asume los costes de diseño, materiales y fabricación del halo.

### 1.1.2 El técnico

Es el ingeniero o conjunto de ellos que deberán de redactar el proyecto en base a las normativas vigentes, detallando los cálculos y análisis realizados en la elaboración del proyecto.

### 1.1.3 El contratista

Es el encargado de validar el proceso de fabricación y montaje del halo. Deberá de contar con amplia experiencia en procesos de fabricación especializados, así como conocer al detalle la normativa y los materiales requeridos.



## **2. MATERIALES**

En este apartado se detallan los materiales necesarios para llevar a cabo la fabricación del halo. Éstos deberán de cumplir las especificaciones técnicas y los requisitos de calidad exigidos.

### **2.1 Bloques de titanio forjado**

Según normativa, se deberá de usar aleación de titanio de grado 5. En este caso se trata de un material con alta resistencia debido a su excelente relación entre resistencia y peso, así como su durabilidad y resistencia a la corrosión, lo que le hacen que sea un material idóneo para la fabricación del halo. Los proveedores oficiales reciben el titanio en bloques forjados que han sido pretratados térmicamente, para posteriormente hacer uso de él en el proceso de fabricación.

### **2.2 Materiales de trabajo**

Para realizar la fabricación del halo se debe de hacer uso de maquinaria especializada de corte y soldadura, así como los productos adecuados para el tratamiento térmico del material y los acabados de calidad del halo.



### **3. ESPECIFICACIONES DE FABRICACIÓN**

Para llevar a cabo la ejecución del proyecto se deberá de realizar la fabricación del halo completa. Esta consta de varias etapas que requieren un uso específico de maquinaria muy especializada.

#### **3.1 Tratamiento térmico**

Antes de trabajar con el titanio, es esencial aplicar un pretratamiento térmico con el fin de aliviar tensionalmente el material, lo que optimizará sus propiedades y hará que aguante mejor las cargas producidas durante su uso en alta competición.

#### **3.2 Corte de mecanizado**

Las diferentes partes del halo son mecanizadas en fresadoras de alto rendimiento que cortan las piezas con una precisión absoluta. La perforación de los tubos del aro principal también se incluye en este apartado.

#### **3.3 Soldadura**

Una vez se tienen mecanizadas todas las partes del halo (soporte frontal, aro principal y soportes traseros) se realiza la unión de todos ellos mediante soldadura de tipo TIG (por arco de gas inerte con Tungsteno). Esta se lleva a cabo de manera muy precisa utilizando una cámara cerrada de manera que se tiene un control absoluto de la integridad del titanio durante el proceso de unión.

#### **3.4 Tratamiento y acabado**

Después de la soldadura, el dispositivo completo se somete a un tratamiento térmico adicional para fortalecer su estructura. Una vez finalizado el tratamiento térmico, el Halo se enfría de manera controlada para prevenir la formación de tensiones residuales. Además de las pruebas destructivas iniciales, cada dispositivo se somete a ensayos no destructivos, incluyendo pruebas de rayos X y pruebas de grietas, para garantizar que no existan defectos ocultos en el material. Tras pasar todas las pruebas de calidad, el Halo se somete a un proceso de limpieza manual que permite la adhesión de elementos aerodinámicos.



### **3.5 Transporte y Logística**

Una vez finalizado el proceso de fabricación, cada halo es empaquetado individualmente y enviado a través de transporte terrestre o aéreo a la sede de cada equipo de Fórmula 1.



## 4. ESPECIFICACIONES ECONÓMICAS

### 4.1 Costes

El precio de cada una de las fases de ejecución viene detallado en los documentos correspondientes, no efectuándose el cobro total hasta que no se haya completado el proceso de fabricación del halo y haya cumplido con los requerimientos establecidos.

### 4.2 Garantía

La duración de la garantía, así como el proceso a seguir en caso de producirse deficiencias durante el proceso de fabricación deberán de quedar registrados en el contrato. En este caso el proveedor oficial será quién se haga cargo de que no se cumplan las especificaciones establecidas.

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

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Proyecto Fin de Grado***

**DOCUMENTO V: PRESUPUESTO**

**Autor: Jorge Becares Solana**

**Julio - 2024**



## ÍNDICE

1. DISTRIBUCIÓN DEL PRESUPUESTO.....	4
2. COSTE DE MATERIALES .....	5
3. COSTE DE OFICINA TÉCNICA.....	6
4. COSTE DE FABRICACIÓN .....	7
5. PRESUPUESTO TOTAL .....	8



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Desglose de costes de la oficina técnica .....	6
Tabla 2: Desglose del coste de fabricación .....	7
Tabla 3: Desglose del coste total del proyecto .....	8



## 1. DISTRIBUCIÓN DEL PRESUPUESTO

En este apartado se detalla el presupuesto total del proyecto. El cálculo del coste total estará conformado por el coste de los materiales, el coste de diseño de ejecución del proyecto y el coste de fabricación. Finalmente, al coste total se les añadirán los costes generales y los referidos a los impuestos y al beneficio industrial.

Es importante destacar que el coste de fabricación se realiza de manera aproximada ya que no forma parte del alcance del proyecto.



## 2. COSTE DE MATERIALES

El coste total de material viene definido por el coste de las materias primas necesarias para llevar a cabo su fabricación.

En este caso, el material del halo viene definido en la normativa. Éste deberá de estar fabricado en aleación de titanio de grado 5. El coste promedio de este material dependerá del proveedor encargado de suministrarlo, la pureza del material y las condiciones de mercado.

Tal y como se detalla el proceso de fabricación del halo en el Documento I: Memoria, los fabricantes encargados de la fabricación del Halo reciben bloques de titanio forjado. Según consulta de varios proveedores oficiales de este material, se estima un precio medio de 30 €/kg.

El peso oficial del halo exigido por normativa es de aproximadamente 7 kg. No obstante, a este peso habrá que sumarle la masa adicional que se añade en el proceso de montaje con todos los soportes. Por ello se estima un peso total de 11 kg, siendo 7 kg el peso correspondiente al halo y 4 kg el peso correspondiente al montaje con los soportes.

Por consiguiente, se define un coste total de materiales de 330 euros.

### 3. COSTE DE OFICINA TÉCNICA

En este apartado se detallan los costes dedicados a los cálculos y análisis necesarios para la redacción y realización del proyecto. En la Tabla 1 se detalla el desglose de los costes:

*Tabla 1: Desglose de costes de la oficina técnica*

<b>FASES DE EJECUCIÓN</b>	<b>HORAS</b>	<b>PRECIO UNITARIO (€/h)</b>	<b>SUBTOTAL</b>
<b>Estudio de la normativa</b>	16	33	528 €
<b>Diseño de los modelos elaborados</b>	50	33	1650 €
<b>Estudio de elementos finitos de los modelos elaborados</b>	50	33	1650 €
<b>Estudio Aerodinámico del modelo final</b>	32	33	1056 €
<b>Redacción del proyecto</b>	40	33	528 €

Por consiguiente, se estima un coste total de diseño de 5.412 euros.

## 4. COSTE DE FABRICACIÓN

En este apartado se detallan los costes de mano de obra necesarios para la fabricación del Halo. Los precios de las fases de soldadura y mecanizado son estimativos ya que no se consta de la información necesaria para el cálculo exacto.

En la Tabla 2 se desglosa el coste por fases de ejecución:

*Tabla 2: Desglose del coste de fabricación*

<b>FASES DE EJECUCIÓN</b>	<b>HORAS</b>	<b>PRECIO UNITARIO (€/h)</b>	<b>SUBTOTAL</b>
<b>Tratamiento térmico</b>	4	50	200 €
<b>Mecanizado CNC especializado</b>	40	200	8000 €
<b>Soldadura especializada</b>	16	200	3200 €
<b>Inspección y control de calidad</b>	8	50	400 €

Por consiguiente, se estima un precio total de fabricación de 11.800 euros.

## 5. PRESUPUESTO TOTAL

En este apartado se expone el coste total del proyecto, al que se le suman los costes generales, el beneficio industrial y los impuestos.

En la Tabla 3 se desglosa el coste total del proyecto:

*Tabla 3: Desglose del coste total del proyecto*

Coste de materiales	330 €
Coste de oficina técnica	5.412 €
Coste de fabricación	11.800 €
<b>COSTES DIRECTOS TOTALES</b>	<b>17.542 €</b>
Gastos generales (15%)	2.631,3 €
Beneficio industrial (8%)	1.403,36 €
<b>COSTE TOTAL</b>	<b>21.576,66 €</b>
IVA (21%)	4.531,09 €
<b><u>IMPORTE TOTAL</u></b>	<b>26.107,75 €</b>

El importe total de la creación y ejecución del proyecto asciende a **26.107,75 euros**.