



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Estudio y diseño de jaulas de seguridad para
automóvil

Study and design of rollcages for car

Autor

Víctor Villalba Sierra

Director

Dr. David Valladares Hernando

Titulación del autor

Grado en Ingeniería Mecánica

Universidad de Zaragoza / Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2021

RESUMEN

En este trabajo de fin de grado, vamos a realizar el estudio y diseño de una jaula o estructura de seguridad para automóvil, en concreto para el modelo de coche GEOMETRO. Para ello, trabajaremos a partir de normativas y especificaciones dadas por las entidades que regulan este tipo de estructuras, como son la Federación Internacional de Automovilismo (F.I.A.) a nivel internacional, y la Real Federación Española de Automovilismo (R.F.E. de A.), máxima autoridad deportiva de automovilismo en España, que a su vez forma parte de la F.I.A. Dichas normativas las encontraremos en los anexos que se adjuntan.

Con el fin de obtener un modelo específico, necesitaremos una serie de mediciones, necesarias para dimensionar las estructuras y sacar los puntos característicos del coche. Todas las medidas necesarias las obtenemos mediante el software LS-DYNA.

Una vez obtenidas las mediciones más importantes, vamos a realizar diferentes modelos, mediante el software PATRAN. Estos modelos los dimensionaremos y diseñaremos según los anexos, es decir, materiales, dimensiones y características en general que nos permita la normativa. Para poder conocer la respuesta a los esfuerzos sometidos de nuestra estructura, necesitaremos realizar un estudio mediante elementos finitos de los diferentes casos de carga. Una vez tengamos cada uno de los modelos completo en cuanto a geometría, mallado, condiciones de contorno y casos de carga, realizaremos las simulaciones con el software ABAQUS Explicit, se tratará de una simulación dinámica que representa el caso de carga cuasiestático de cada caso real. Es cálculo explícito y funciona a través de balance o equilibrio de energías.

Tras las simulaciones, veremos mediante un estudio exhaustivo de los resultados cuál de los modelos tiene un mejor comportamiento en cuanto a tensiones y deformaciones y evaluaremos una posible optimización del mejor modelo.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.	5
2. OBJETIVOS.	5
3. ALCANCE.	6
4. NORMATIVA.	6
5. METODOLOGÍA UTILIZADA.	7
6. MEDICIONES.	9
7. DISEÑO DE LOS DIFERENTES MODELOS.	12
7.1 DISEÑO DE LAS ESTRUCTURAS BASE DE LOS TRES MODELOS.	13
7.1.1. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA BASE DEL MODELO 1.	15
7.1.2. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA BASE DEL MODELO 2.	16
7.1.3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA BASE DEL MODELO 3.	16
7.1. DISEÑO DE LOS REFUERZOS OBLIGATORIOS DE LOS TRES MODELOS.	17
7.2.1. REFUERZOS OBLIGATORIOS DEL MODELO 1.	18
7.2.2. REFUERZOS OBLIGATORIOS DEL MODELO 2.	22
7.2.3. REFUERZOS OBLIGATORIOS DEL MODELO 3.	25
8. CREACIÓN DE MODELOS DE MALLA, PROPIEDADES Y MATERIAL.	29
8.1. CREACIÓN DE MODELOS DE MALLA.	29
8.2. PROPIEDADES DE LOS ELEMENTOS.	30
8.3. MATERIAL.	30
9. CASOS DE CARGA Y CONDICIONES DE CONTORNO.	31
9.1. PRUEBA VERTICAL.	33
9.2. PRUEBA EN EL ARCO DELANTERO DE SEGURIDAD.	33
9.3. PRUEBA LATERAL EN EL ARCO PRINCIPAL.	34

9.4. CONDICIONES DE CONTORNO.	35
10. CÁLCULO DE SIMULACIONES Y RESULTADOS DE LOS DIFERENTES MODELOS.....	35
10.1. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE CARGA VERTICAL EN EL ARCO PRINCIPAL DE SEGURIDAD.	36
10.1.1. RESPUESTA DEL MODELO 1 A CARGA VERTICAL.	37
10.1.2. RESPUESTA DEL MODELO 2 A CARGA VERTICAL.	40
10.1.3. RESPUESTA DEL MODELO 3 A CARGA VERTICAL.	43
10.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE CARGA EN EL ARCO DELANTERO DE SEGURIDAD.....	46
10.2.1. RESPUESTA DEL MODELO 1 A CARGA EN EL ARCO DELANTERO.	46
10.2.2. RESPUESTA DEL MODELO 2 A CARGA EN EL ARCO DELANTERO.	49
10.2.3. RESPUESTA DEL MODELO 3 A CARGA EN EL ARCO DELANTERO.	51
10.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE CARGA LATERAL EN EL ARCO PRINCIPAL.	54
10.3.1. RESPUESTA DEL MODELO 1 A CARGA LATERAL EN EL ARCO PRINCIPAL.	55
10.3.2. RESPUESTA DEL MODELO 2 A CARGA LATERAL EN EL ARCO PRINCIPAL.	58
10.3.3. RESPUESTA DEL MODELO 3 A CARGA LATERAL EN EL ARCO PRINCIPAL.	61
11. COMPARACIÓN DE COMPORTAMIENTO ENTRE LAS SIMULACIONES DE MODELOS Y SELECCIÓN DEL MODELO A OPTIMIZAR.....	64
12. OPTIMIZACIÓN DEL MODELO 2 SELECCIONADO.	66
12.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE CARGA EN EL ARCO PRINCIPAL DE SEGURIDAD DEL MODELO OPTIMIZADO.	67

12.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE CARGA EN EL ARCO DELANTERO DE SEGURIDAD DEL MODELO OPTIMIZADO.....	70
12.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE CARGA LATERAL EN EL ARCO PRINCIPAL DE SEGURIDAD DEL MODELO OPTIMIZADO.	73
12.4. RESUMEN DE RESULTADOS DEL MODELO OPTIMIZADO.	76
13. CONCLUSIONES.	77
14. REFERENCIAS.	78
ANEXO A: Tipos de estructuras de seguridad que se pueden montar en un vehículo de competición y normativa.	
ANEXO B: Creación en PATRAN de malla, asignación de propiedades y creación de material y atribución a los elementos.	
ANEXO C: Gráficas de energías de las simulaciones.	

1. INTRODUCCIÓN.

Una jaula de seguridad es un elemento estructural, formado por un entramado de barras generalmente de tubos huecos con diferentes espesores y longitudes, que trata de conceder al vehículo las siguientes características:

- Reforzar la seguridad de los ocupantes frente a impactos frontales, laterales y vuelcos, que son más propensos a producirse debido a conducciones deportivas a altas velocidades.
- Aumentar la rigidez del automóvil, intentando no aumentar considerablemente el peso del vehículo.

La estructura irá alojada en el interior del habitáculo, de manera que debe unirse al chasis de una forma segura, bien mediante soldadura o bien atornillada según la normativa.

El modelo de automóvil con el que vamos a trabajar es el GEO METRO, surgido de la unión de GM (General Motors) y Suzuki, fabricado de 1989 a 1997, y posee un peso de 826 kg [1].

2. OBJETIVOS.

El objetivo principal es obtener un diseño estructural que pueda ser homologado ante una ADN para competir, en nuestro caso la F.I.A. (Federación Internacional de Automovilismo) [2] y la R.F.E. de A. (Real Federación Española de Automovilismo) [3].

Por otra parte, realizar una optimización del diseño final, es decir, rediseñar la estructura creada inicialmente, manteniendo las especificaciones de la normativa, para conseguir un mejor comportamiento del automóvil.

3. ALCANCE.

El alcance de este proyecto es crear un diseño que cumpla la normativa, tanto de diseño como de propiedades de materiales, se encuentre dentro de unos límites establecidos de tensiones y deformaciones, y características en general. Es decir, que obtengamos una estructura que pueda deformarse dentro de unos límites establecidos cumpliendo unos requisitos mínimos de tensión y deformación.

Esto lo conseguiremos a partir de unos test de cargas, que realizaremos en ABAQUS, de obligado cumplimiento por la normativa vigente dónde se nos detalla cómo y dónde deben generarse dichas cargas en la estructura.

Para ello necesitaremos inicialmente el diseño de los modelos de las estructuras, con sus mediciones previas. Posteriormente necesitaremos un mallado adecuado a las estructuras creadas para los posteriores ensayos de carga estáticos.

Por otra parte, estos estudios se realizarán mediante elementos finitos generados en MSC.PATRAN al igual que la generación de la geometría de los modelos.

4. NORMATIVA.

Para llevar a cabo el diseño de la estructura en primer lugar debemos tener en cuenta la normativa, es por ello que la R.F.E.de A. nos indica qué tipos de estructuras se pueden montar en un vehículo de competición, este documento lo encontramos en el apartado de anexos, concretamente en el *anexo A, Tipos de estructuras de seguridad que se pueden montar en un vehículo de competición.*

Este anexo resumidamente nos dice que para vehículos de competición la instalación de una estructura de seguridad es obligatoria y debe estar:

- a) Fabricada según los requerimientos del Anexo J (conocidas como artesanales):

- Se debe seguir estrictamente el anexo J.

b) Homologada o certificada por una ADN (Autoridad Deportiva Nacional):

- Debe cumplir las especificaciones del “Reglamento de Homologación de jaulas de seguridad de la FIA”.

c) Homologada por la FIA (Federación Internacional de Automovilismo):

- Debe cumplir las especificaciones del “Reglamento de Homologación de jaulas de seguridad de la FIA”.

La diferencia entre la homologación o certificación entre una ADN y la FIA radica en el tipo de documentación a aportar, ya que la reglamentación a aplicar es el Reglamento de Homologación FIA para jaulas de seguridad en el caso de certificación FIA, que encontramos en los anexos, exactamente en el anexo C.

En la siguiente imagen vamos a ver un cuadro resumen orientativo:

TIPO DE ESTRUCTURA	HOMOLOGACIÓN	RGTO. APLICABLE	DOCUMENTACIÓN OBLIGATORIA	PLACA IDENTIFICATIVA
SEGÚN ANEXO J Art. 253.8	NO OBLIGATORIA	ANEXO J AL CDI	NINGUNA	NO NECESARIAMENTE
HOMOLOGADA ADN	OBLIGATORIA	RGTO. HOMOLOGACIÓN FIA	CERTIFICADO ADN	SI, OBLIGATORIA
HOMOLOGADA FIA	OBLIGATORIA	RGTO. HOMOLOGACIÓN FIA	FICHA HOMOLOGACIÓN FIA (VARIANTE OPCIÓN)	SI, OBLIGATORIA

Figura 1. Cuadro resumen normativa.

Hemos elegido la opción de homologada por ADN o FIA, ya que tenemos cierta libertad en cuanto a elección de dimensionado de tubos y selección de materiales.

5. METODOLOGÍA UTILIZADA.

Partimos de un estudio previo general en cuanto a cómo se fabrican y diseñan las estructuras de seguridad, además de observar que en el mercado existen diferentes modelos bastante diferenciados entre ellos. Todo ello hemos visto que tiene su diferenciación según las normativas o reglamentaciones en las que se fundamentan.

Tras los primeros pasos de estudio y análisis previos, vemos que nos conducen a realizar un estudio de la normativa a aplicar, así poder partir de unas ideas y asentar las bases de nuestras estructuras de seguridad.

Una vez conocemos la normativa, pasamos a la parte de las mediciones. Necesitamos conocer las dimensiones características del habitáculo del automóvil, tanto para las uniones de la estructura al chasis, que son puntos clave desde donde todas las estructuras que se van a diseñar van a partir y van a tener en común, como las medidas interiores del coche para introducir la estructura en el interior del habitáculo.

Una vez conocidas las medidas más características, debemos analizarlas ya que debemos tener en cuenta diversos factores como hasta dónde pueden llegar los tubos de la estructura y los puntos de anclaje, si no a la hora de ir introduciendo las barras que conforman la estructura en el habitáculo pueden surgirnos superposiciones de elementos.

Cuando ya tenemos las dimensiones más características del habitáculo, pasamos a realizar los diferentes diseños en PATRAN, tanto en geometría como dimensionado de tubos y selección de materiales.

Necesitaremos conocer los test de carga, impuestos por la normativa, ya que habrá que añadir al diseño de los modelos las partes necesarias, como las placas para realizar para poder llevar a cabo los test de carga.

Finalizados los diseños introduciremos las condiciones de contorno, para poder realizar el posterior estudio de comportamiento mediante elementos finitos.

Una parte importante que debemos tener muy en cuenta será el mallado. Necesitamos mallar tanto nuestra estructuras como las partes necesarias para realizar los test de carga. Realizaremos para nuestras estructuras de barras un mallado tipo “BEAM”, en cambio para las superficies donde se aplicaran los esfuerzos y placas de refuerzo de la estructura serán tipo “SHELL”.

Cuando tengamos tanto los diseños mallados como las partes que conforman los test de carga, pasaremos a realizar las simulaciones en ABAQUS.

Por último, tras realizar las simulaciones, veremos cómo se comportan nuestras estructuras frente a los diferentes test de carga a los que son sometidos. Compararemos

entre los diferentes diseños su comportamiento, obtendremos las conclusiones y optimizaremos el modelo con mejor comportamiento.

6. MEDICIONES.

Con el modelo que tenemos de GEO-METRO, utilizando el software LS-DYNA, vamos a sacar las dimensiones que necesitamos más importantes. De esta manera, conseguiremos los puntos anclaje de la estructura de seguridad al chasis del coche, y comenzaremos a diseñar partiendo de los mismos.

Necesitamos saber el tipo de anclajes necesarios para nuestra estructura. En el apartado 2.1.3.a, del anexo C, dice que la estructura de seguridad debe estar unida a la carrocería/chasis mediante al menos:

- 1 anclaje para cada pilar del arco principal de seguridad.
- 1 anclaje para cada pilar del semiarco lateral.
- 1 anclaje para cada barra trasera.

Conocida la normativa y los puntos a cumplir, realizamos las mediciones para poder comenzar a iniciar el diseño de nuestra jaula de seguridad. Lo que queremos tener en detalle son las dimensiones más características para definir las bases de la estructura, que se resumen en dos grupos destacados:

- Puntos de anclaje.
- Medidas características del habitáculo.

En las siguientes imágenes podemos ver la estructura base del chasis del modelo, con el que vamos a trabajar:

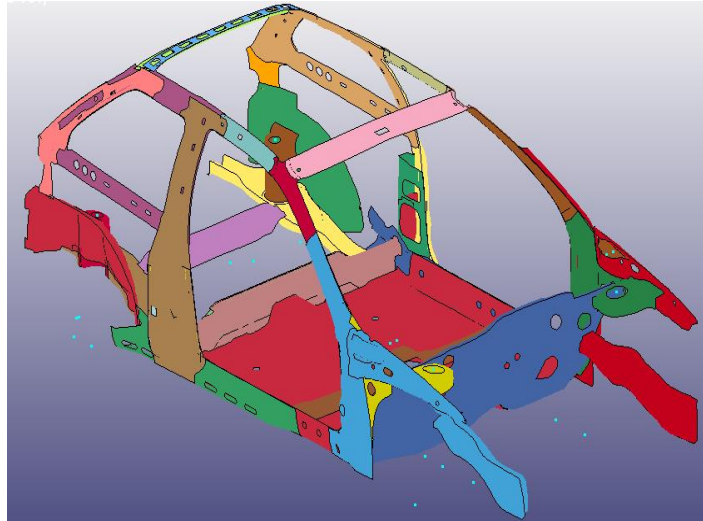


Figura 2. Chasis del modelo con el que trabajaremos.

- Mediciones de los puntos de anclaje:

Tomaremos las medidas necesarias para obtener los puntos de anclaje, dónde irían fijados los diferentes modelos.

- Distancia entre torretas de amortiguación traseras, donde irán ancladas las barras traseras: 1020 mm.
- Distancia entre puntos de anclaje del arco principal de seguridad: 1260 mm.
- Distancia entre puntos de anclaje de los semiarcos laterales: 1200 mm.
- Distancia longitudinales entre puntos de anclaje de semiarcos laterales y puntos de anclaje del arco principal: 1175 mm
- Distancia longitudinal entre torretas de amortiguación traseras y puntos de anclaje del arco principal: 750 mm.

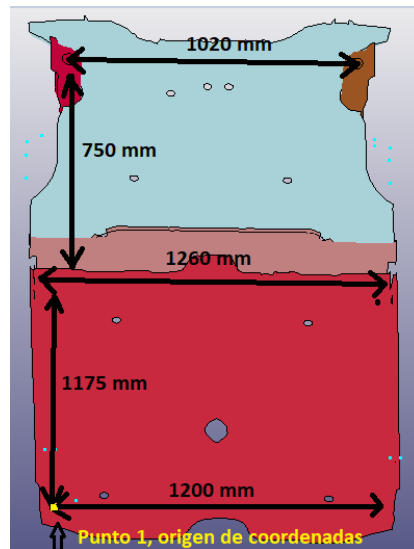


Figura 3. Mediciones de los puntos de anclaje.

- Mediciones de los puntos característicos del habitáculo:

Necesitamos conocer las medidas características del habitáculo para poder dimensionar las diferentes barras que conforman los modelos.

- Altura de la torreta de amortiguación al suelo de la estructura base: 400 mm.
- Altura de los pilares de los semiarcos laterales: 580 mm.
- Barra diagonal del semiarco lateral al techo: 736 mm.
- Altura total del habitáculo, desde el suelo al techo: 1040 mm.
- Distancia de los puntos de anclaje del arco principal a la perpendicular del techo: 180 mm.
- Travesaño delantero del techo: 1000 mm.
- Barra del arco principal, paralela al travesaño: 900 mm.
- Distancia del arco principal al travesaño: 600 mm.
- Altura del pilar del arco principal hasta la primera curva del mismo: 580 mm.
- Longitud desde la primera curva del arco principal hasta el techo: 470 mm.

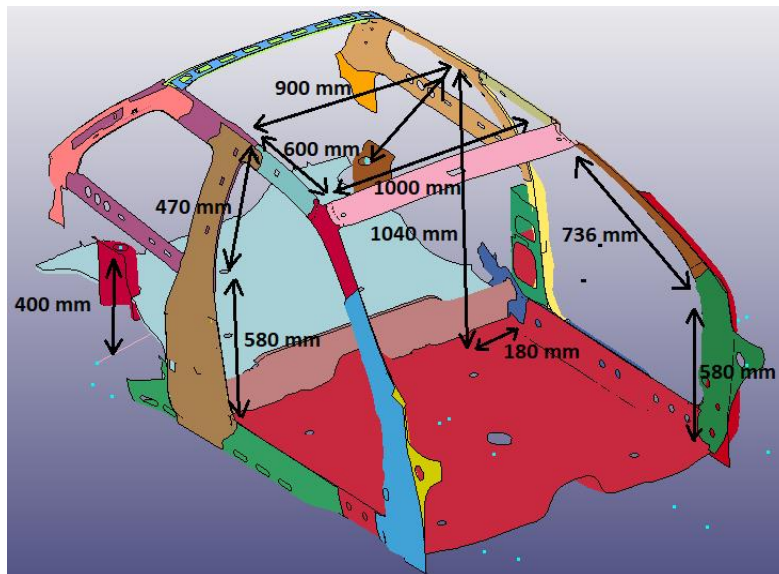


Figura 4. Mediciones de los puntos característicos.

Con todas estas medidas ya obtenidas, podemos comenzar a diseñar la estructura base de nuestra modelos, así una vez diseñadas las diferentes estructuras base de nuestros modelos realizaremos el diseño de los diferentes refuerzos obligatorios, según la normativa.

7. DISEÑO DE LOS DIFERENTES MODELOS.

Conocidas las medidas más importantes comenzaremos a diseñar los tres modelos. Antes de comenzar a diseñar, sacaremos las coordenadas de los puntos de anclaje y los puntos más significativos del habitáculo (hasta donde van a poder llegar las barras de la estructura) que van a ser comunes para todos los diseños, respecto a un sistema de referencia local que comenzará para todos en el punto 1, de coordenadas $[0, 0, 0]$, que se corresponde con el punto de anclaje derecho del semiarco lateral, es decir, el anclaje derecho del frente de la estructura.

A partir de este punto, y con las medidas obtenidas en el apartado de mediciones iremos sacando los diferentes puntos de los modelos.

En la figura 4, del apartado anterior, nos encontramos con las medidas en las que van a centrarse los diferentes diseños que vamos a realizar, que van a ser 3. A partir de estas medidas que van a formar la estructura general, las 3 estructuras se van a diferenciar según dos partes importantes:

a) Estructura base: tendrán las mismas medidas y puntos de anclaje pero la estructura inicial estará diseñada con diferentes partes.

b) Refuerzos obligatorios: cada uno de los tres diseños tendrá unos refuerzos diferenciados.

Teniendo claro para cada una de los modelos que tipo de estructura base vamos a utilizar, y posteriormente qué refuerzos obligatorios deben colocarse, seguiremos el *anexo B, Reglamento de homologación 2021 para jaulas de seguridad*. Según esta reglamentación todos los diseños parten de una estructura base y posteriormente de unos refuerzos obligatorios.

Entre las características generales en cuánto al diseño que son de obligado cumplimiento destacamos que el espesor mínimo de todos los tubos tiene que ser 1,5 mm, y que si utilizamos tubos de diámetro menor de 40 mm, la longitud total de la suma de los mismos no puede ser mayor de 15 m.

A continuación, vamos a ir viendo paso a paso como hemos seleccionado las diferentes partes que conforman nuestros modelos.

7.1 DISEÑO DE LAS ESTRUCTURAS BASE DE LOS TRES MODELOS.

En primer lugar, vamos a ver qué características deben cumplir las diferentes partes que conforman la estructura base para ser homologadas y qué hemos decidido diseñar para los diferentes modelos.

En cuanto a la estructura base en la normativa se diferencian 4 casos, estos son:

- ESTRUCTURA BASE 1:
Constará de: 1 arco principal, 1 arco delantero de seguridad, 2 miembros longitudinales (largueros), 2 barras traseras.
- ESTRUCTURA BASE 2:
Constará de: 2 arcos laterales principales, 2 miembros transversales (travesaños), 2 barras traseras.

- ESTRUCTURA BASE 3:

Constará de: 2 arcos laterales que incorporan las barras traseras, 2 miembros transversales (travesaños) y 2 pilares traseros rectos en vista lateral.

- ESTRUCTURA BASE 4:

Constará de: 1 arco principal, 2 semiarcos laterales, 1 miembro transversal (travesaño) y 2 barras traseras.

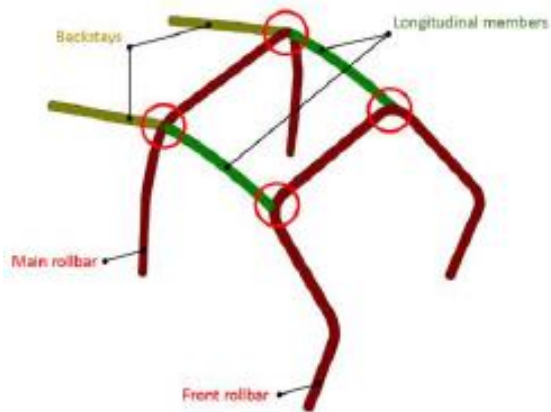


Figura 5. Estructura base 1 [2].

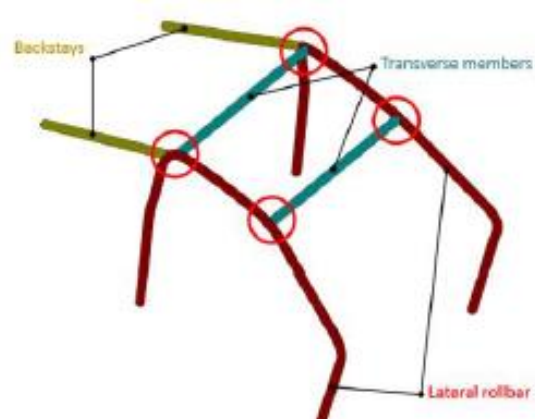


Figura 6. Estructura base 2 [2].

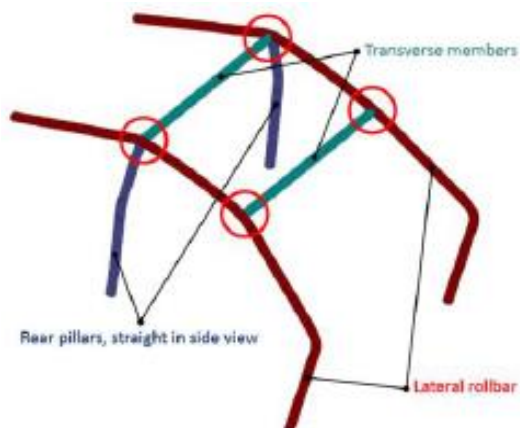


Figura 7. Estructura base [2].

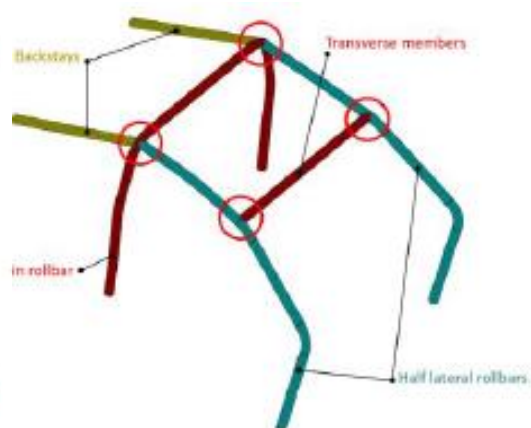


Figura 8. Estructura base 4 [2].

Veremos cómo hemos ido diseñando los diferentes modelos basándonos en los 4 tipos de estructuras base que nos da la normativa y cumpliendo las especificaciones que vamos a ir explicando.

7.1.1. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA BASE DEL MODELO 1.

Para este diseño 1, nos vamos a basar en la estructura base 4, formada por 1 arco principal, 2 semiarcos laterales, 1 miembro transversal y 2 barras traseras. Todos los tubos utilizados para la siguiente estructura base son de diámetro 50 mm y espesor 2 mm, cumplimos así la normativa.

Vamos a ver los diferentes elementos que forman la estructura y sus características para que cumplan la normativa:

- Arco principal:
El arco es totalmente vertical, el eje del tubo que forma el arco está contenido en un solo plano y se encuentra justo detrás de los asientos delanteros y por último los pilares principales del arco se encuentran lo más próximo posible de los laterales de la carrocería, además de que no tienen ninguna curva.
- Semiarcos laterales:
La normativa nos dice que deben ser casi longitudinales y verticales y estar a cada lado de la cabina, además siguen los pilares laterales y no tienen más de 10° respecto a su vertical hacia atrás y el tubo no está por detrás del punto más adelantado del arco principal.
- Miembro transversal o travesaño:
Está formado por un tubo de 50 mm y espesor 2 mm de sección circular hueca, es una pieza única y totalmente transversal sin curvaturas que une los semiarcos laterales.
- Barras traseras o backstays:
Son 2 tubos de 50 mm por 2 mm de espesor, son tubos de una sola pieza y totalmente rectos y longitudinales, unen la parte superior del arco principal y la parte trasera de la carrocería, tienen un ángulo mayor de 30° con la vertical, en particular es 40,47° para todos nuestros diseños. Además están fijados a nivel del techo y cerca de las curvas exteriores superiores del arco principal.

7.1.2. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA BASE DEL MODELO 2.

Esta estructura base 2 es idéntica a la estructura base del modelo 1, es decir, su estructura base seleccionada es la 4, formada por un arco principal, dos semiarcos laterales, un travesaño y dos barras traseras. Lo que diferencia a la estructura total del modelo 2 con la del modelo 1 son los refuerzos obligatorios, que van a ser diferentes, de esta manera, más adelante, veremos cómo afectan los distintos refuerzos pero con la misma estructura base. Destacar que el arco principal y todos los tubos tanto los que forman la estructura base como los de los refuerzos obligatorios son de sección circular hueca, de diámetro exterior 50 mm y espesor 2 mm.

7.1.3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA BASE DEL MODELO 3.

En este modelo hemos elegido la estructura base 1, entre sus partes características destacan un arco principal, seguido y también una parte importante es 1 arco delantero, y para unir los anteriores necesitamos dos miembros longitudinales o largueros, por último para unir la estructura a la parte trasera del chasis necesitamos dos miembros traseros o backstays. Al igual que en los otros modelos, las barras de esta estructura base no tienen ninguna barra de diámetro menor de 40 mm y ningún espesor menor de 1,5 mm. Ahora vamos a ver más detenidamente las partes de la estructura base que lo forman y sus características más destacadas.

- Arco principal:
Este arco es una barra de 50 mm de diámetro exterior y 2 mm de espesor. Además de que es totalmente vertical aunque como máximo la norma nos deja 10° respecto a la misma, y el eje del tubo está en un solo plano. El arco se encuentra en una posición en la que los asientos quedan por delante del mismo y las barras verticales del arco están lo más próximas a los laterales de la carrocería al igual que la parte paralela al techo está lo más próximo posible al mismo.
- Arco delantero de seguridad:

Las medidas más destacables son 50 mm de diámetro exterior y 2 mm de espesor de la pared de la tubería. Este arco sigue los pilares del parabrisas y el borde superior de la luna, como indica la normativa. Destacar también que no tiene curvas por debajo de donde debe seguir el pilar del parabrisas. Además la parte de los pilares delanteros que forman parte del arco delantero son totalmente verticales, siendo que la norma nos deja como límite 10°. Por último hay que destacar que el tubo se encuentra por detrás del punto más adelantado.

- **Miembros longitudinales o largueros:**
Estas barras están formadas por tubo de sección circular hueca de 50 mm por 2 mm de espesor, su misión principal es la unión tanto del arco principal como del arco delantero de seguridad, siendo esta unión a nivel del techo. Por otra parte y cumpliendo así la normativa, los tubos son totalmente transversales y sin curvaturas y sigue la curva del techo.
- **Barras traseras o backstays:**
Como sabemos tienen como misión la unión del arco principal con la parte trasera del chasis del coche. Son tubos de una sola pieza totalmente rectos y longitudinales de dimensiones 50 mm de diámetro exterior por 2 mm de espesor, intentando dejarlos lo más cerca de los paneles laterales. Además el ángulo que forman con la vertical es mayor de 30° como indica la norma, exactamente 40,47°.

7.1. DISEÑO DE LOS REFUERZOS OBLIGATORIOS DE LOS TRES MODELOS.

Una vez tenemos las estructuras base de nuestros tres modelos creadas y diseñadas, es el momento de integrar a las mismas una serie de refuerzos obligatorios. Estos refuerzos además de darle una mayor seguridad y rigidez a la estructura son de obligado cumplimiento, ya que el reglamento de homologación de la FIA pide unos requisitos mínimos en cuanto a refuerzos.

Vamos a ir viendo, para los tres modelos, qué refuerzos hemos creado y cuáles son sus medidas y características más importantes.

7.2.1. REFUERZOS OBLIGATORIOS DEL MODELO 1.

Estos refuerzos están formados por tubos de sección hueca de 40 mm de diámetro exterior y 2 mm de espesor.

- Refuerzos del arco principal:

Están formados por dos miembros diagonales de los cuáles uno de ellos es una única pieza, condición que obliga la norma, además de que deben de ser rectos.

Por otra parte, la normativa nos obliga a que la unión de estos miembros diagonales con las barras que forman el arco principal, no pueden sobrepasar una distancia máxima. Estas distancias son tanto para los extremos inferiores como los superiores, de dichas diagonales, de 100 mm respecto del anclaje al chasis y desde la unión con las barras traseras respectivamente. Estas distancias, teniendo en cuenta que las distancia entre los centros del tubo son 100 mm, tienen unas distancias de 80 mm desde el punto de anclaje al chasis del arco principal al extremo inferior de las dos diagonales y 60 mm desde los extremos superiores de las diagonales a la unión del arco con las barras traseras.

- Refuerzos de las barras trasera o backstays:

En este caso he elegido dos miembros diagonales, debido a esto uno de ellos debe de ser obligatoriamente de una sola pieza.

La unión de estos refuerzos deben cumplir unas limitaciones en cuánto a la distancia máxima a la que pueden estar. Esta distancia es tanto para los extremos inferiores como los superiores de los miembros diagonales de 100 mm. Para los extremos inferiores esta distancia es desde la unión de las barras traseras al chasis del coche, en nuestro diseño es de 80 mm, y para los extremos superiores desde la unión entre el arco principal y las barras traseras, en nuestro diseño 60 mm.

- Refuerzos del techo:

En este caso he elegido también unos miembros diagonales, que van a unir los semiarcos laterales. Lo más destacable es que al igual que en los demás miembros diagonales de los otros refuerzos, un miembro debe ser de una única pieza.

Se debe cumplir también unas distancias máximas de 100 mm, tanto desde los puntos que unen el arco principal a los semiarcos laterales como los puntos que unen los semiarcos laterales con el travesaño frontal. En nuestro diseño estas distancias son de 60 mm.

Se nos permite que estos miembros puedan seguir la curvatura del techo pero no es nuestro caso.

- Refuerzos de las puertas:

Estos refuerzos consisten en la unión de los pilares del arco principal con los pilares frontales de los semiarcos laterales, para así reforzar la estructura del vehículo en cuanto a impactos en el sentido longitudinal y salvaguardar a los ocupantes debido a golpes que se produzcan en los laterales. La norma nos dice que el diseño debe ser igual para ambos lados.

También hemos elegido que sean miembros diagonales y por ello uno de los miembros debe ser de una sola pieza.

En cuanto a las medidas características a cumplir las comentaremos tras explicar los refuerzos del pilar de la ventanilla ya que en la normativa nos viene regulado según el artículo 2.1.2, que explicaremos, y hace alusión a los dos tipos de refuerzos.

En este apartado vamos a incluir una barra de refuerzo, llamada Refuerzo de las puertas 2, que la normativa no nos da especificaciones respecto a la misma pero sí aparece en el artículo 2.1.2 dónde deben cumplirse una serie de medidas en el conjunto del refuerzo total de la puerta y refuerzo del pilar de la ventanilla. Lo que hemos hecho ha sido colocar una barra de 40 mm por 2 mm de espesor, desde el arco principal a la parte del semiarco lateral que da en el techo. En la siguiente imagen vemos a qué barra nos estamos refiriendo.

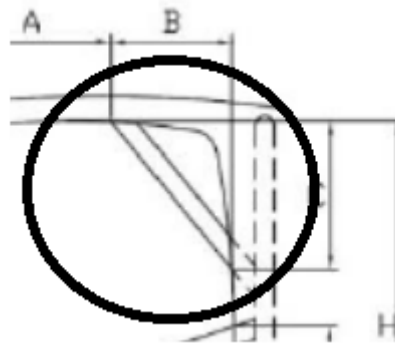


Figura 9. Detalle Refuerzo puertas 2 [2].

- Refuerzo del pilar de la ventanilla:

Estos elementos tienen como misión principal repartir los esfuerzos que se produzcan en un impacto por vuelco en la parte superior de la luna con el fin de que el habitáculo no sea deformado con facilidad. Lo forma una barra que va entre la esquina superior del parabrisas y la base del pilar del semiarco lateral. Este elemento puede doblarse siempre que se vea recto desde la vista lateral y que no supere 20° , en nuestros diseños este ángulo es de $13,69^\circ$, como vemos en la siguiente figura explicativa.



Figura 10. Refuerzo del pilar de la ventanilla [2].

Además, debemos cumplir que no deben de sobrepasar de 100 mm, la distancia desde la unión entre el arco lateral y el travesaño para el extremo superior, ni tampoco desde el pie de montaje del pilar frontal del semiarco lateral. En nuestro caso tenemos 80 mm. Destacar que en el caso de que se entrecrucen la barra de refuerzo del parabrisas con las

diagonales de refuerzos de las puertas, debe dividirse en varias partes la barra de refuerzo del parabrisas, tal y como hemos hecho.

Vamos a comentar las especificaciones en cuanto a las medidas que debemos cumplir según la normativa en el conjunto del refuerzo total lateral de la puerta (refuerzos de la puerta + refuerzos del pilar de la ventanilla), en la normativa estas especificaciones vienen en el artículo 2.1.2 limitaciones adicionales.

Estas limitaciones a cumplir para el caso el cuál nos referimos son:

- La dimensión A debe ser de un mínimo de 300 mm
- La dimensión B debe ser de un máximo de 250 mm
- La dimensión C debe ser de 300 mm como máximo
- La cota E no debe ser superior a la mitad de la altura del hueco de la puerta (H), en nuestro caso $520 = H/2$ ($H = 1040$).

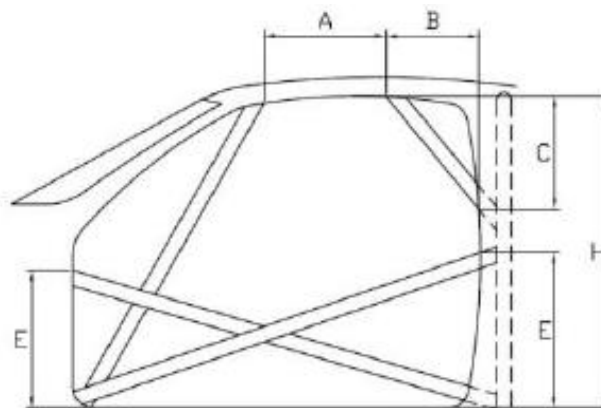


Figura 11. Limitaciones del dimensionado del refuerzo total de las puertas.

En nuestro diseño las medidas que tenemos, de centro a centro de tubo, tendríamos que restar el radio del tubo, son $A=428$ mm, $B=249$ mm, $C=279$ mm , E (pilar arco principal) = 500 mm y E (pilar frontal) = 400 mm. Por lo tanto, vemos que se cumplen todas las restricciones impuestas por la normativa.

- Refuerzo con cartelas:
Estos refuerzos son totalmente iguales para todos los modelos. Se trata de refuerzos para codos o uniones entre dos tubos, la norma nos dice que deben ser fabricadas con chapa metálica en forma de U y un espesor mayor de 1 mm y que

los extremos deben estar a una distancia entre 3 y 4 veces el diámetro exterior del mayor de los tubos que se unan.

En nuestro caso las cartelas son de 160 mm de distancia a los extremos, 4 veces el diámetro exterior de 40 mm y de espesor 1,5 mm. Para este MODELO 1, todas las cartelas diseñadas para los diferentes refuerzos que hemos puesto en la estructura son iguales en cuanto a distancia entre extremos y espesor. La geometría dependerá del hueco existente entre las barras que se van a unir.

En la siguiente imagen vemos como quedaría nuestro modelo 1 finalizado en cuanto al diseño en PATRAN.

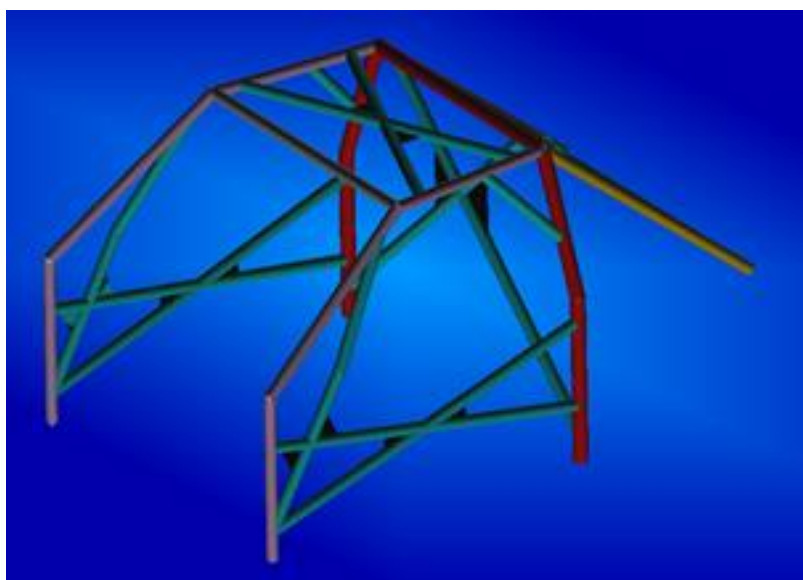


Figura 12. Modelo 1 con estructura base y refuerzos.

7.2.2. REFUERZOS OBLIGATORIOS DEL MODELO 2.

Todos los refuerzos que vamos a ir explicando a continuación del modelo 2, van a ser tubos de sección hueca de 40 mm de diámetro exterior y 2 mm de espesor.

- Refuerzos del arco principal:

Realizamos este refuerzo con dos miembros diagonales que van a ir desde los pilares del arco principal hasta la parte transversal del arco paralela al techo, al igual que en el modelo 1. Las uniones inferiores irán en los pilares del arco

frontal a una distancia de 80 mm de los anclajes que van al chasis, y las uniones superiores a 60 mm del punto de unión entre el arco principal y las barras traseras, estas distancias están dentro de lo que nos permite la norma, no pueden ser más de 100 mm de distancia.

- Refuerzos del techo:

A diferencia de los refuerzos del modelo 1, vamos a explicar primero en este modelo los refuerzos del techo, ya que los refuerzos que hemos decidido en este caso para el techo condicionan los refuerzos de las barras traseras, tal y como indica la normativa.

Para el modelo 2, hemos decidido para los refuerzos del techo seleccionar dos tubos independientes que no se entrecruzan entre ellos, en forma de V, a diferencia de los refuerzos diagonales que forman una X, como vemos en la figura 13 explicativa.

Estos refuerzos, para este modelo 2, parten del miembro transversal que une los semiarcos laterales hasta la parte del arco principal paralelo al techo, formando una V.

Además debemos comentar que la distancia entre la parte inferior de la V no puede ser mayor de 100 mm, al igual que la unión de dichos refuerzos con el miembro transversal que une los semiarcos laterales. En nuestro diseño estos valores son de 100 mm para ambos valores, distancia de centro del tubo a centro del tubo, la distancia real entre los tubos es de $60 \text{ mm} = 100 - 2 \times R$, siendo $R=20 \text{ mm}$.

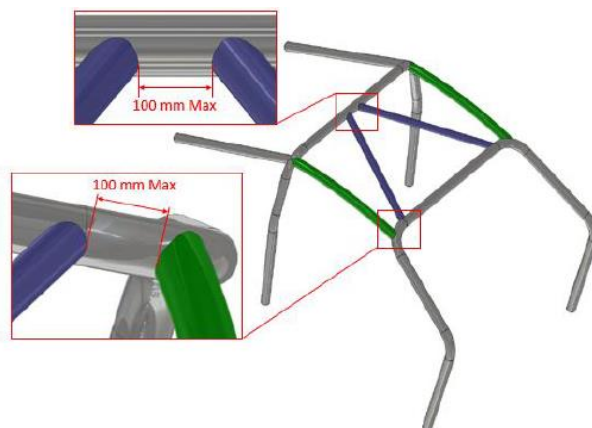


Figura 13. Refuerzo del techo en forma de V [2].

- Refuerzos de las barras traseras o backstays:

Los refuerzos de las barras traseras para este modelo vienen condicionados debido al diseño de refuerzos que hemos seleccionado para el techo. Ya que la normativa nos dice que como hemos seleccionado unos refuerzos del techo que no consisten en barras entrecruzadas diagonales, que son dos barras únicas e independientes que parten de los semiarcos laterales hasta el arco principal, los refuerzos de las barras traseras deben ser iguales.

Por lo tanto estos refuerzos deben ser dos barras independientes que vayan desde cada uno de los miembros traseros al miembro transversal del arco principal.

Como restricciones tenemos que la distancia entre, la unión de las barras traseras al chasis y la unión de los refuerzos a las barras traseras, no sea mayor de 100 mm, en nuestro modelo esta medida es de 80 mm.

También debemos cumplir que la distancia que tenemos entre los puntos de unión de los refuerzos traseros al travesaño del arco principal no debe ser mayor de 100 mm, esta medida es de 60 mm.

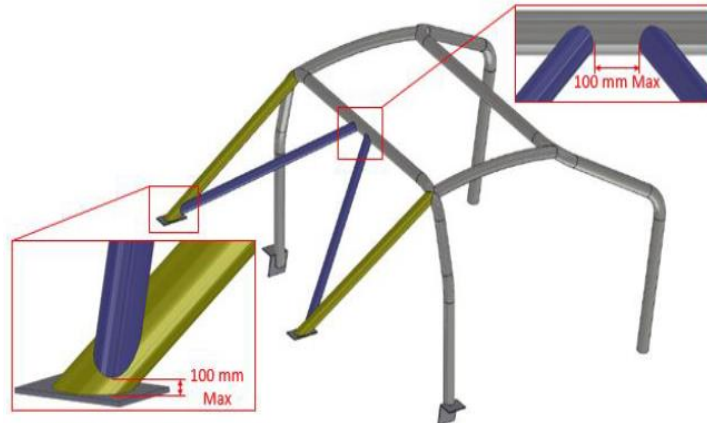


Figura 14. Refuerzos de las barras traseras.

- Refuerzos de las puertas y del pilar de la ventanilla:

Los refuerzos de las puertas son exactamente iguales que en el modelo 1, dos barras diagonales con el mismo diseño en ambas puertas tal y como obliga la norma.

Además tenemos el refuerzo del pilar de la ventanilla también semejante al del modelo 1.

Por ello cualquier especificación en cuanto a medidas la encontramos en el apartado Refuerzos de las puertas y Refuerzos del pilar de la ventanilla en el apartado 7.2.1. Refuerzos obligatorios del modelo 1.

- Refuerzos con cartelas:

Estos refuerzos al igual que el modelo 1 y veremos en el modelo 3, son de 160 mm de distancia a los extremos, 4 veces el diámetro exterior de 40 mm y de espesor 1,5 mm.

En las siguientes imágenes vemos como ha quedado nuestro diseño 2, con la estructura base y sus diferentes refuerzos.

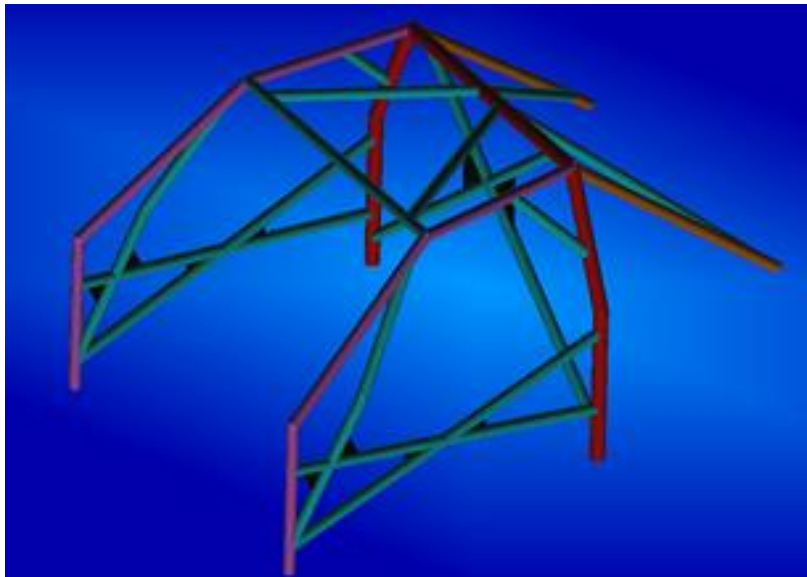


Figura 15. Modelos 2 con estructura base y refuerzos.

7.2.3. REFUERZOS OBLIGATORIOS DEL MODELO 3.

Los diferentes refuerzos que vamos a ir explicando en este modelo 3, van a ser tubos huecos de diámetro exterior 40 mm y espesor 2 mm.

Los refuerzos del arco principal y del techo son completamente iguales a los que hemos puesto en el modelo 1, ya que son barras diagonales entrecruzadas en la misma posición.

La diferenciación de refuerzos con los modelos 1 y 2 la encontramos en los refuerzos de las puertas, los refuerzos de las barras traseras y dos barras de refuerzo que nos unen los backstays con el arco principal.

- Refuerzos de las barras traseras:

Este refuerzo va a estar formado por una barra en diagonal, que va desde el extremo inferior de una de las barras traseras hasta el travesaño del arco principal. Debe cumplir que la distancia en las uniones no sea más de 100 mm. En nuestro caso la distancia desde la unión de la barra trasera al chasis y la unión del refuerzo diagonal a la barra trasera no sea más de 100 mm y en nuestro caso es de 80 mm. Además en la unión al travesaño del arco principal, la distancia entre los puntos de unión del pilar del arco principal no sea mayor de 100 mm y en nuestro caso es de 60 mm.

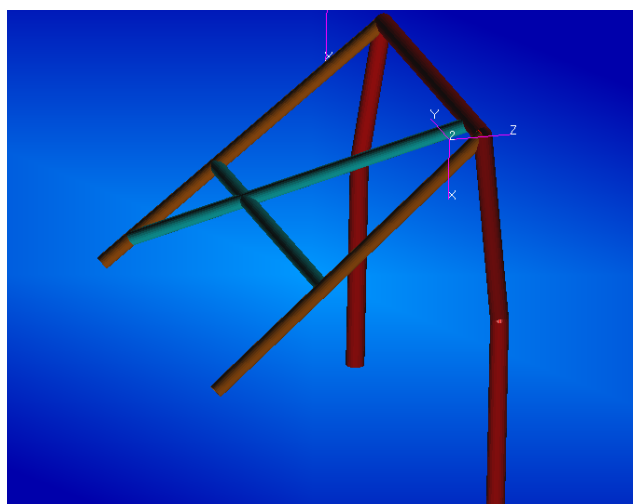


Figura 16. Refuerzo barras traseras del modelo 3.

- Refuerzos de las puertas:

En este modelo he seleccionado unos refuerzos especiales y no diagonales.

En la normativa nos da la posibilidad de realizar un refuerzo con barras dobladas.

En este caso he decidido colocar dos barras con dos doblados por barra y paralelos en una parte como vemos en la figura 17. Lo que se nos exige es que en la primera parte no podemos tener hasta la curvatura una distancia de menos de 300 mm, en la segunda parte ZONA A que es la paralela no nos ponen

mínimos ni máximos y en la última parte la distancia de la curvatura al arco principal no puede ser menor de 200 mm.

Las medidas en mi diseño son:

- $W = 1180 \text{ mm}$
- Zona 1 - del frente a la primera curvatura: $l = 300 \text{ mm}$.
- Zona 2 - barras paralelas: $l = 525 \text{ mm}$.
- Zona 3 - de la curvatura al arco principal: $l = 350 \text{ mm}$.

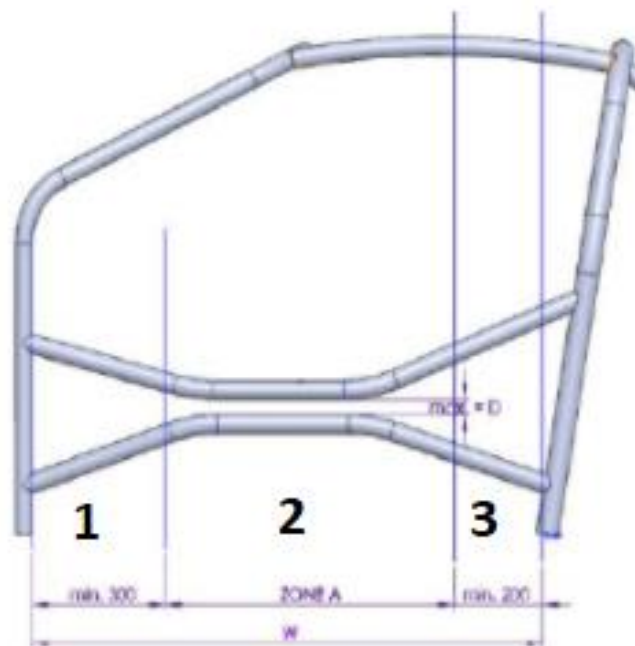


Figura 17. Refuerzo de las puertas del modelo 3.

- Refuerzo del pilar de la ventanilla:

Estos refuerzos son totalmente diferentes a los de los modelos 1 y 2, ya que como los refuerzos de las puertas son también totalmente diferentes, las medidas de los refuerzos del pilar de la ventanilla también tienen que cambiar.

Estos refuerzos los forman una barra que va entre la esquina superior del parabrisas y la base del pilar del semiarco lateral. Este elemento puede doblarse siempre que se vea recto desde la vista lateral y que no supere 20° , en nuestro caso $17,1^\circ$, podemos ver la imagen explicativa en la figura 10.

Aparte también debe cumplir que no deben de sobrepasar de 100 mm, la distancia desde la unión entre el arco lateral y el travesaño para el extremo superior, ni tampoco desde el pie de montaje del pilar frontal del semiarco

lateral. En nuestro caso tenemos 80 mm. Otro punto a destacar es que si se entrecruza la barra de refuerzo del parabrisas con las diagonales de refuerzos de las puertas, debe dividirse en varias partes la barra de refuerzo del parabrisas, tal y como hemos hecho.

Vamos a comentar las especificaciones en cuanto a las medidas que debemos cumplir según la normativa en el conjunto del refuerzo total lateral de la puerta (refuerzos de la puerta + refuerzos del pilar de la ventanilla), en la normativa estas especificaciones vienen en el artículo 2.1.2 limitaciones adicionales, en la figura 11 podemos verlo.

Estas limitaciones a cumplir para el caso el cuál nos referimos son:

- La dimensión A debe ser de un mínimo de 300 mm
- La dimensión B debe ser de un máximo de 250 mm
- La dimensión C debe ser de 300 mm como máximo
- La cota E no debe ser superior a la mitad de la altura del hueco de la puerta (H), en nuestro caso $520 = H/2$ ($H = 1040$).

En nuestro diseño las medidas que han quedado son $A=467$ mm, $B=250$ mm, $C=279$ mm, E (pilar arco principal) = 500 mm y E (pilar frontal) = 400 mm. Por lo tanto, vemos que se cumplen todas las restricciones impuestas por la normativa.

- Refuerzo longitudinales, barras desde backstays al arco principal:
Para este refuerzo la normativa no nos indica ningún tipo de restricción. Van a ser tubos de 40 mm de diámetro y 2 mm de espesor. Hemos decidido colocar una barra por cada backstay o barra trasera, de forma que refuerce la estructura en cuanto a impactos por vuelco que se produzcan en la parte trasera, con el fin de evitar que las barras traseras sean deformadas hacia el habitáculo. Además longitudinalmente también le dará a la estructura mayor rigidez.

Finalmente podemos ver en la siguiente imagen el modelo 3 final, donde aparece la estructura base y todos los refuerzos obligatorios.

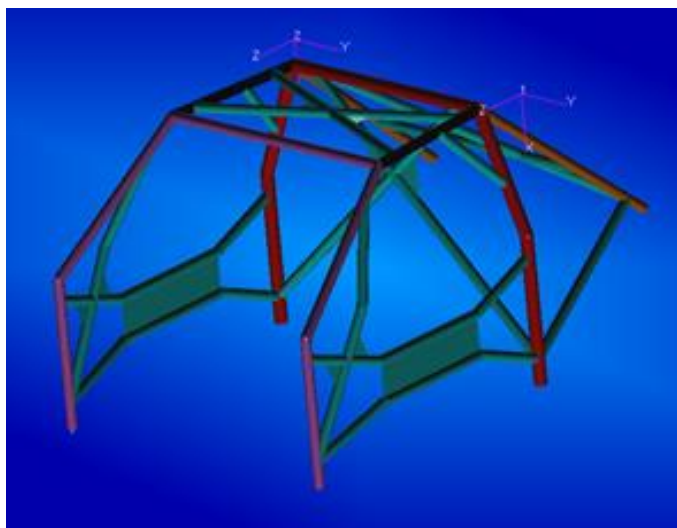


Figura 18. Modelo 3 con estructura base y refuerzos.

8. CREACIÓN DE MODELOS DE MALLA, PROPIEDADES Y MATERIAL.

En esta parte veremos qué tipo de malla hemos elegidos para el cálculo mediante elementos finitos de los diferentes modelos creados. Además veremos las propiedades asignadas a los diferentes elementos que forman las estructuras y las características del material. La creación y asignación en Patran de malla, propiedades y material lo encontramos en el *Anexo B, Creación en PATRAN de malla, asignación de propiedades y creación de material y atribución a los elementos.*

8.1. CREACIÓN DE MODELOS DE MALLA.

Una vez que hemos acabado el diseño de los diferentes modelos, es el momento de pasar a mallarlos, este mallado para el posterior estudio en elementos finitos lo realizaremos con el software PATRAN, al igual que la realización de los diseños.

Nuestros diseños son una estructura formada por un entramado de barras, que en diferentes partes tienen refuerzos con cartelas, que son chapas de pequeño espesor soldadas a los diferentes tubos en partes críticas de la estructura. Vamos a realizar un estudio orientativo y no tan exhaustivo, ya que no van orientados directamente a la fabricación, si no al estudio y comparación entre diferentes diseños pensados pero

cumpliendo la normativa. Por ello hemos decidido mallar utilizando dos tipos de elementos:

- Elementos tipo “BEAM”: los utilizaremos para mallar las diferentes barras, ya que se utilizan para modelar componentes en los que una dimensión, en nuestro caso la longitud de la barra, es significativamente mayor que las otras dos dimensiones, además la tensión en la dirección a lo largo del eje de la barra es lo más importante.
- Elementos tipo “SHELL”: estos elementos los vamos a utilizar para mallar las cartelas y las placas de apoyo, ya que las shell se utilizan para mallar elementos en los que una dimensión, en nuestro caso el espesor de las cartelas o de las placas, es significativamente menor que las otras dos dimensiones, y las tensiones en la dirección del espesor son insignificantes.

8.2. PROPIEDADES DE LOS ELEMENTOS.

Cuando ya tenemos el mallado de la estructura creado, debemos ponerles una serie de propiedades a los diferentes elementos de la estructura. Como tenemos todas las partes divididas en familias les ponemos sus respectivas propiedades. En los diferentes diseños, todas las barras son de geometría de tubo hueco, las barras que forman la estructura base son de 50 mm de diámetro y 2 mm de espesor, las demás barras de los diseños serán de 40 mm de diámetro y 2 mm de espesor. En cambio las cartelas las vamos a considerar como una placa de espesor 3 mm, debido a que como serían 2 placas de 1,5 mm, una a cada lado de la barra, diseñamos como una placa de 3 mm.

8.3. MATERIAL.

En cuanto a la selección de material utilizado para los diferentes diseños que hemos realizado, nos hemos puesto en contacto con la empresa fabricante de jaulas de seguridad aragonesa “AST Roll Cages” y nos informaron de que uno de los materiales más utilizados es el acero 25CrMo4.

Las propiedades del material las hemos buscado en la web Total Materia [4] y son las siguientes:

- Densidad: 7800 kg/m
- Coeficiente de Poisson: 0.28
- Modulo elástico: 210 GPa
- Límite de tracción: 700 MPa
- Límite elástico: 450 MPa
- Alargamiento a la rotura: 21,5%

Una vez que tenemos el material asignado y asignado en todos los elementos estructurales que conforman los tres diseños, el programa genera un Input de salida dónde podemos conocer la masa de los diferentes que modelos. Estas masas finales son de 63,218 kg en el modelo 1, 60,641 kg para el modelo 2 y 68,523 para el modelo 3.

Comentar que la forma de caracterizar el material para realizar los cálculos ha sido mediante modelos elastoplásticos bilineales con modelo de plasticidad de metal clásico de Von Mises.

Destacar que el material de la plataforma-placa es rígido y no sufre deformación. El movimiento está fijado mediante un nodo de referencia. En el input marcaremos su desplazamiento mediante la aplicación del movimiento correspondiente al nodo de referencia.

9. CASOS DE CARGA Y CONDICIONES DE CONTORNO.

Para los casos de carga nos encontramos con restricciones que nos impone la normativa. Vamos a ir explicando las particularidades que vamos a encontrar para nuestros modelos, seguiremos la normativa impuesta por la normativa F.I.A [2].

Independientemente de la carga que tengamos que aplicar, que dependerá de cada ensayo, la normativa nos exige que sea aplicada en menos de 15 segundos. En nuestros casos de carga hemos realizado las simulaciones en 0,1 segundos.

En estos 0,1 segundos hemos aplicado un desplazamiento de forma proporcional, de tal forma que vamos a ir desplazando una placa rígida, propia de cada ensayo, hasta el

máximo desplazamiento que permite la norma. De esta manera conseguiremos llevar al límite las estructuras de los diferentes modelos hasta el límite de deformación. Una vez realicemos el estudio de las diferentes simulaciones, veremos en cada uno de ellos cuando se ha llegado a la deformación límite que nos permita la norma y veremos en dicho punto el estado tensional de la estructura.

Observaremos mediante gráficas de desplazamiento de la placa – reacciones en los apoyos, si hemos conseguido alcanzar la carga que nos pide la normativa. Si no llegamos al valor de carga que nos indique la norma, significará que nuestra estructura no será lo suficientemente rígida, por lo que no será válida.

También veremos según la gráfica reacciones-desplazamientos en qué momento de desplazamiento de la placa conseguimos el valor de carga impuesto por la norma, lo que nos llevará a conocer el momento en el que se produce y estudiar en ese punto las tensiones y deformaciones que es el punto más significativo de estudio, para comparar entre los diferentes modelos y llegar a la elección del modelo de mejor comportamiento.

A la hora de sacar el punto de desplazamiento máximo de la estructura, que nos indique la normativa en cada caso, no debemos tener en cuenta el desplazamiento de la placa, ya que tiene un gap de separación a la estructura de 10 mm, es decir, durante 10 mm la placa se desplaza en vacío sin tener ninguna oposición.

Cuando ABAQUS nos muestre el desplazamiento debemos obviar el elemento placa del estudio ya que si no tendremos unos valores que nos darán lugar a error. Lo que nos interesa es la deformación de la estructura independientemente del desplazamiento de la placa. De esta forma se nos mostrarán los desplazamientos única y exclusivamente de los elementos que componen la estructura.

Vamos a ir viendo a continuación las especificaciones a cumplir de cada caso de carga y así veremos cuáles son nuestros límites, tanto de desplazamientos como de tensión y carga.

9.1. PRUEBA VERTICAL.

En esta prueba vamos a aplicar una carga vertical en la parte superior de la barra del arco principal o travesaño del arco principal, mediante una placa rígida. Esta carga viene determinada por la normativa en función del peso del coche y varios coeficientes que debemos tener en cuenta. El valor de la carga viene dado por la siguiente fórmula:

- $W = \text{peso del coche} + 160 \text{ kg} = 860 + 160 = 1020 \text{ kg}$
- $Q = 7,5 * W \text{ (daN)} = 7,5 * 1020 = 7650 \text{ daN} = 76500 \text{ N}$

La normativa nos dice que no se pueden producir roturas ni deformaciones plásticas de más de 50 mm en el eje de aplicación de la carga, así pues nuestro límite será de $U_3 \text{ (ejeZ)} = 50 \text{ mm}$.

La placa con la que vamos a ir deformando la estructura debe cumplir requisitos en cuanto a longitud, anchura y espesor. La longitud de la placa debe ser de 100 mm (mínimo) + anchura del arco (900 mm), es decir, mayor de 1000 mm, en nuestro caso tiene un valor de 1100 mm. La anchura tiene que ser de 250 (+-50mm), y tiene un valor de 250 mm. En cuanto a las dimensiones del espesor no las hemos tenido en cuenta ya que en las simulaciones que vamos a realizar no tendrá relevancia, sería importante en el caso de simulaciones reales en laboratorio.

9.2. PRUEBA EN EL ARCO DELANTERO DE SEGURIDAD.

En este caso de carga debemos aplicar una carga:

- $W = \text{peso del coche} + 160 \text{ kg} = 860 + 160 = 1020 \text{ kg}$
- $Q = 3,5 * W \text{ (daN)} = 3,5 * 1020 = 3570 \text{ daN} = 35700 \text{ N}$

Como nos dice la normativa que no se pueden producir deformaciones de más de 100 mm, en el eje de aplicación de la carga, nuestro límite de deformación será de $U_{\text{local}} = 100 \text{ mm}$, en la dirección del eje local de la placa en la que aplicamos la deformación.

La placa con la que realizamos el ensayo está dirigida hacia el frente y hacia abajo con un ángulo de 5 grados respecto a la horizontal y su eje transversal hacia el exterior y hacia abajo con un ángulo de 25 grados como vemos en la figura 30, todo ello como indica la normativa. En cuanto a las dimensiones de la placa tiene 450 mm de largo y 250 mm de ancho cumpliendo exactamente las medidas que nos indica la normativa.

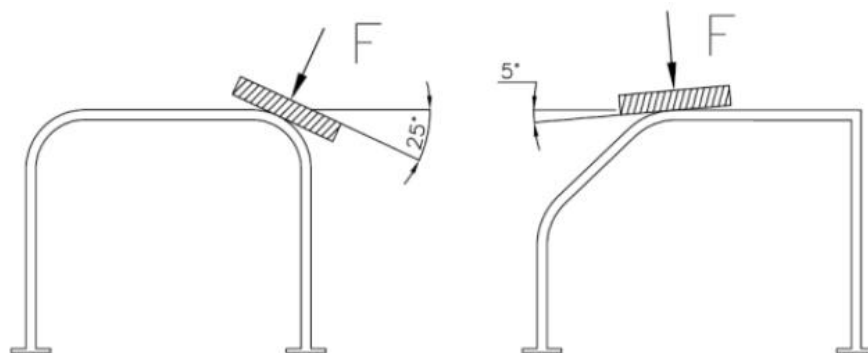


Figura 19. Ángulos de diseño para la placa del ensayo en el arco delantero.

9.3. PRUEBA LATERAL EN EL ARCO PRINCIPAL.

En este caso, al igual que en el ensayo del arco delantero de seguridad la carga a aplicar es la misma, que nos da un valor de 35.700 N.

No se pueden producir roturas, ni deformaciones de más de 50 mm en el eje de aplicación de la carga, es decir, nuestro punto de estudio será donde la deformación esté justo por debajo de $U_2 = 50$ mm (eje Y).

En este caso la placa con la que realizamos el ensayo tiene unas dimensiones de 450 mm de largo y 250 mm de ancho tal y como nos rige la normativa. Una parte importante es la altura de aplicación de la carga en la barra del arco principal que tiene que ser 550 mm (+50), y nuestra placa se encuentra en su punto medio de altura de la barra del arco principal a 500 mm, así que nos cumple las especificaciones.

9.4. CONDICIONES DE CONTORNO.

En cuánto a condiciones de contorno se ha impuesto para todos los diseños que la unión de las placas de apoyo con la estructura del coche tengan en los nodos exteriores de superficie de las placas restringidos tanto las traslaciones como los rotaciones. De esta manera al no restringir todos los nodos de la placas conseguimos que la estructura sea más realista y no tenga un comportamiento tan rígido, caso que ocurre al restringir traslacional y rotacionalmente todos los nodos de la placa de apoyo de superficie de la estructura, ya que comparando las dos situaciones hemos visto como se producían una gran concentración de tensiones en los puntos de las barras que estaban unidas directamente a las placas de apoyo.

La siguiente imagen nos muestra una de las placas de apoyo de las estructuras en la que podemos ver como todos los nodos exteriores están restringidos traslacional y rotacionalmente.

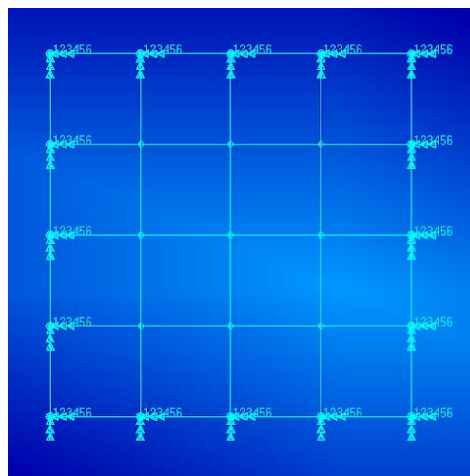


Figura 20. Restricciones rotacionales y traslacionales de las placas de apoyo.

10. CÁLCULO DE SIMULACIONES Y RESULTADOS DE LOS DIFERENTES MODELOS.

Una vez ya tenemos los casos de carga estudiados y hemos generado los diferentes situaciones de simulación de los diseños, lanzaremos las simulaciones mediante el

software “ABAQUS”. Es de gran relevancia el estudio de este apartado ya que según los resultados obtenidos en las simulaciones seleccionaremos el modelo que obtenga un mejor comportamiento.

Primeramente, veremos el estado tensional en el quedan las estructuras de los diferentes modelos en cuanto a tensión, llevándolos al extremo de máxima deformación, donde veremos hasta dónde pueden llegar y como quedarían.

Para poder realizar la elección nos fijamos detalladamente en la respuesta de la estructura en el momento de aplicación de la carga interpuesta por la normativa en cuánto a cuatro parámetros importantes como van a ser: tensiones, deformaciones, peso y rigidez. Todo ellos a partir de diferentes mapas de colores y gráficos que nos irá dando el programa ABAQUS.

Dentro de los tres modelos que tenemos, vamos a tener que realizar el estudio de tres casos de carga impuestos por la normativa para cada uno de ellos, que explicamos en el anterior apartado, estos casos van a ser:

- 1) Prueba de carga vertical en el arco principal de seguridad.
- 2) Prueba de carga en el arco delantero de seguridad.
- 3) Prueba de carga lateral en el arco principal.

Para ver que nuestras diferentes simulaciones se han realizado correctamente podemos ver el *anexo C, Gráficas de energía*.

10.1. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE CARGA VERTICAL EN EL ARCO PRINCIPAL DE SEGURIDAD.

En los siguientes apartados veremos cómo se han comportado los diferentes modelos a la prueba de carga vertical.

10.1.1. RESPUESTA DEL MODELO 1 A CARGA VERTICAL.

En primer lugar buscamos el momento de máxima deformación de la estructura en el eje de aplicación de la carga. La deformación máxima en esta simulación son 50 mm. No debemos tener en cuenta el desplazamiento de la placa por lo que no aparecerá en las imágenes, ya que el gráfico de deformaciones nos mostraría el valor de desplazamiento de la misma.

En la siguiente imagen podemos ver que la deformación máxima alcanzada es de 49,95 mm, en el siguiente frame sobrepasamos el valor de 50 mm.

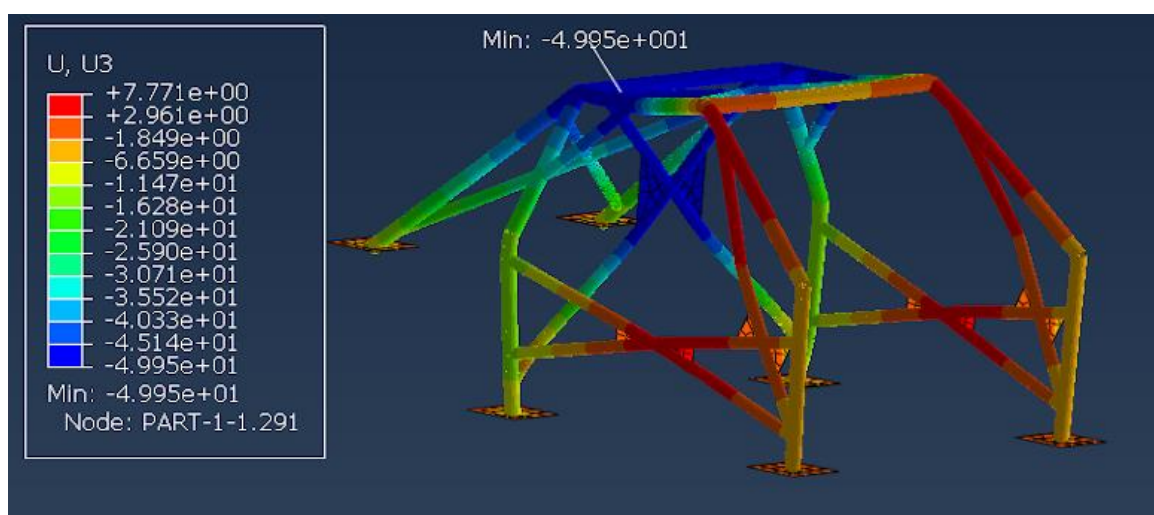


Figura 21. Deformaciones del modelo 1 en situación límite de deformación máxima (50 mm).

Al conocer el step en el que se produce la máxima deformación podemos conocer el estado tensional máximo, que vemos en la siguiente imagen. Vemos como la tensión máxima que nos aparece es de 570,3 MPa, lo que quiere decir que nuestra estructura está sobrepasando el valor del límite elástico, 450 MPa, llegando a plastificar pero sin llegar a la rotura, límite de rotura 700 MPa.

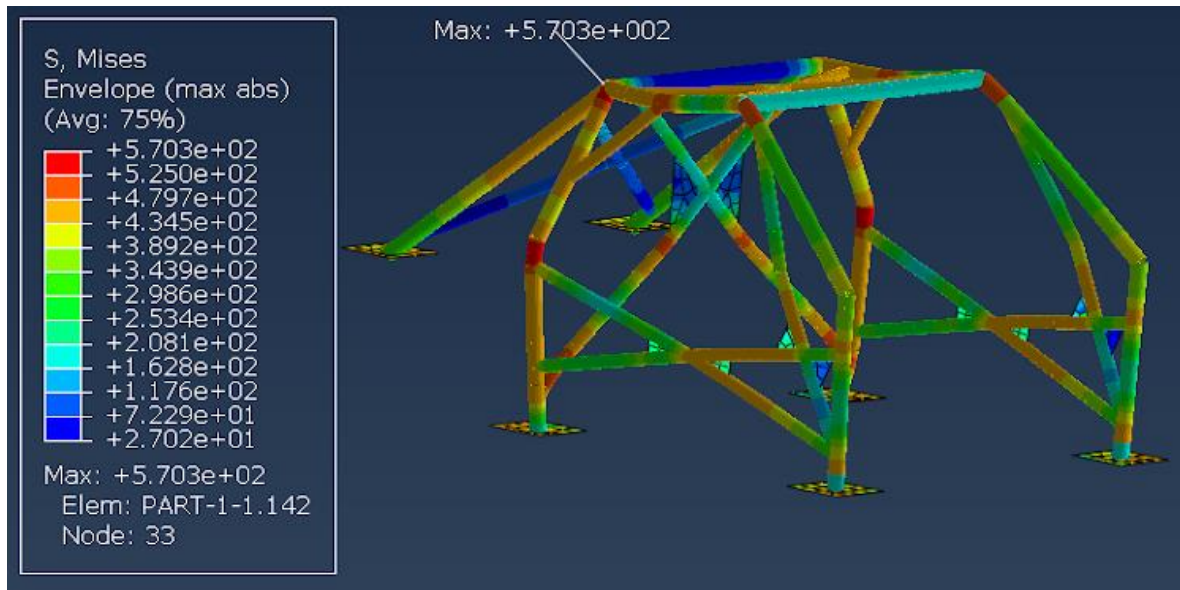


Figura 22. Distribución de tensiones en el momento de deformación máxima en el modelo 1.

Para corroborar que el ensayo ha alcanzado el valor de carga que nos impone la normativa, recurrimos a la gráfica donde vemos las reacciones de los apoyos en función del desplazamiento, ya que el sumatorio de fuerzas de los apoyos nos dará la fuerza que tiene ir haciendo la placa para ir deformando la estructura. En la figura 33 podemos ver como superamos la carga de 76.500 N, que nos exige la normativa, llegando a un máximo de 248.052 N, así que es válida en este ensayo la estructura diseñada y tiene una gran rigidez, superando notablemente el valor requerido de carga.

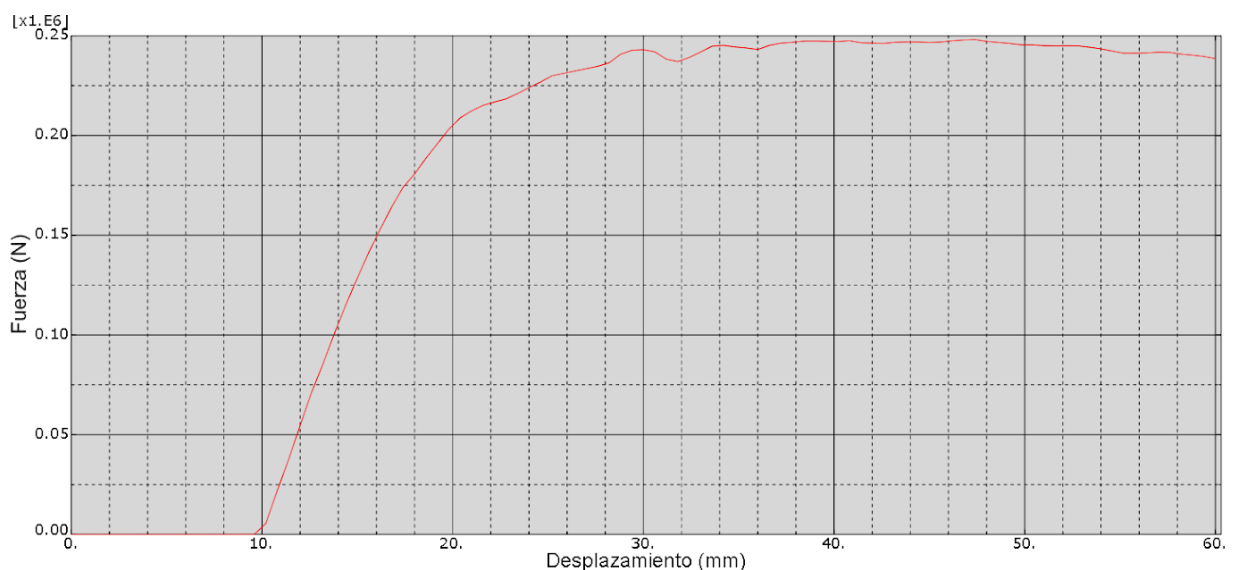


Figura 23. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo vertical en el modelo 1.

Por otra parte, en la siguiente figura 34, hemos ajustado el eje de ordenadas el valor de la fuerza requerida, así buscamos el valor de desplazamiento que se produciría con la carga requerida por la normativa de 76.500 N, ajustando su eje hasta el valor de desplazamiento de la placa. Vemos que tiene un valor aproximado de 12,8 mm, al que le tenemos que quitar el desplazamiento en vacío que realiza la placa que son 10 mm, pero abaqus comienza a detectar contacto desde 9,6 mm. Por lo tanto el desplazamiento para dicha fuerza sería de 3,6 mm, que es un valor muy bajo respecto al máximo de la norma de 50 mm.

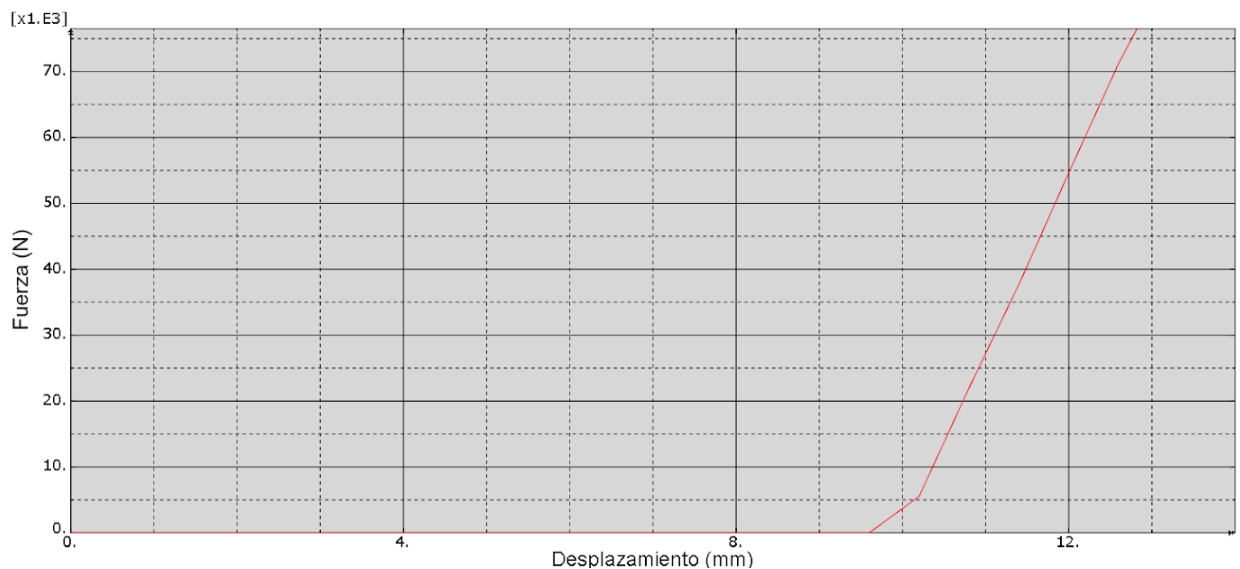


Figura 24. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo vertical en el modelo 1, ajustando al valor de carga y el desplazamiento de los ejes.

Por último vamos a ver el estado tensional que tenemos cuando se aplica la carga de 76.500 N, como vemos en la figura 35. Nos encontramos con una tensión máxima en las placas de los apoyos del arco principal, con un valor de 384,8 MPa, por lo que estamos en el régimen elástico.

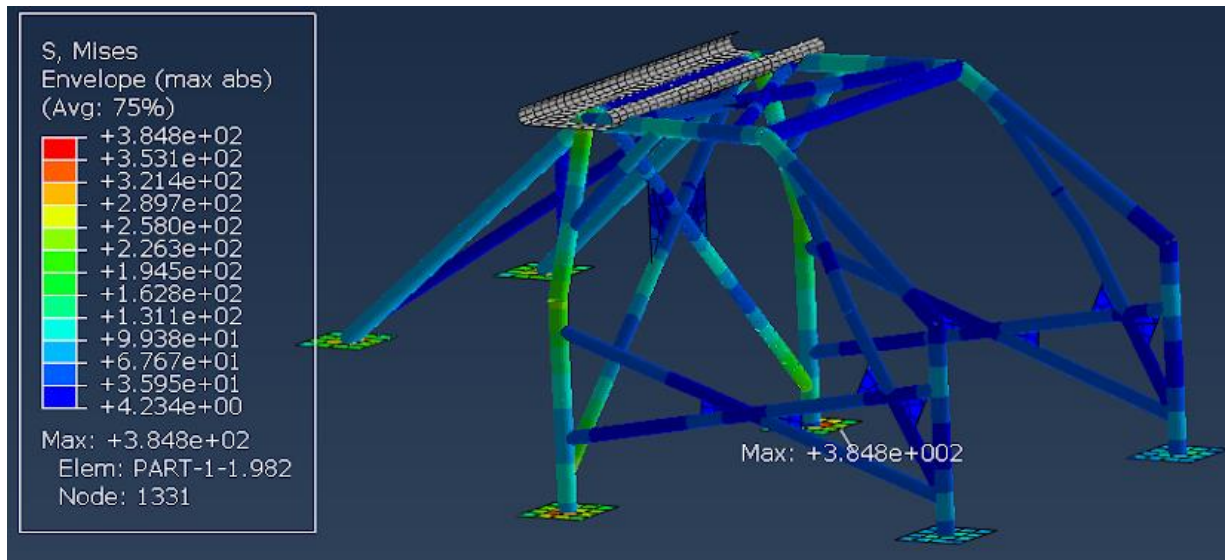


Figura 25. Estado tensional con carga de 76.500 N del modelo 1.

10.1.2. RESPUESTA DEL MODELO 2 A CARGA VERTICAL.

En esta simulación del modelo 2, la situación límite se produce en el step 0,094, con un desplazamiento máximo de la estructura de 49,94 mm en Z (U3), eje de aplicación de la carga.

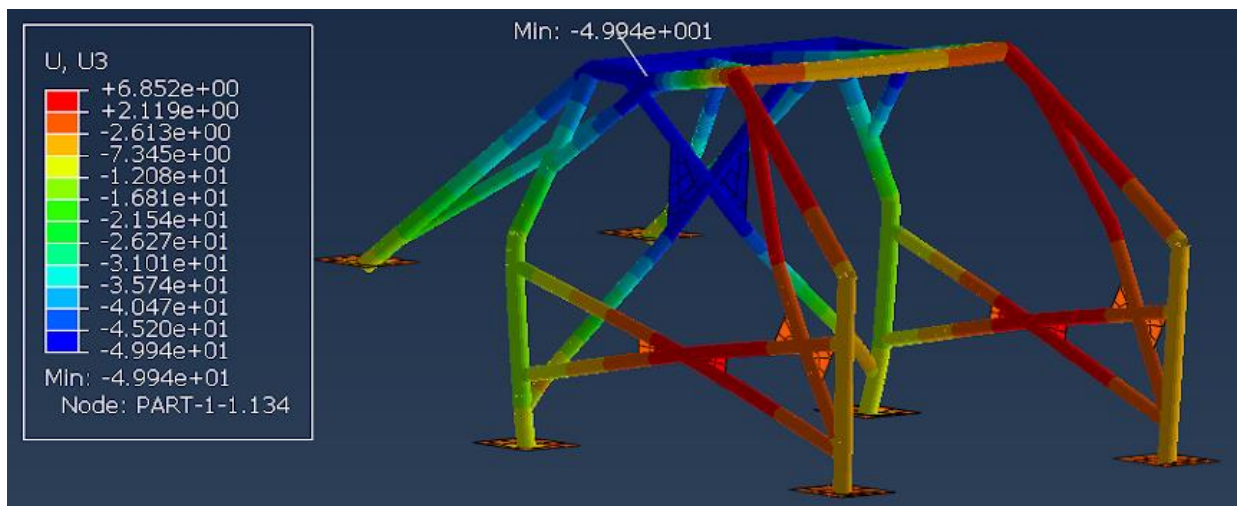
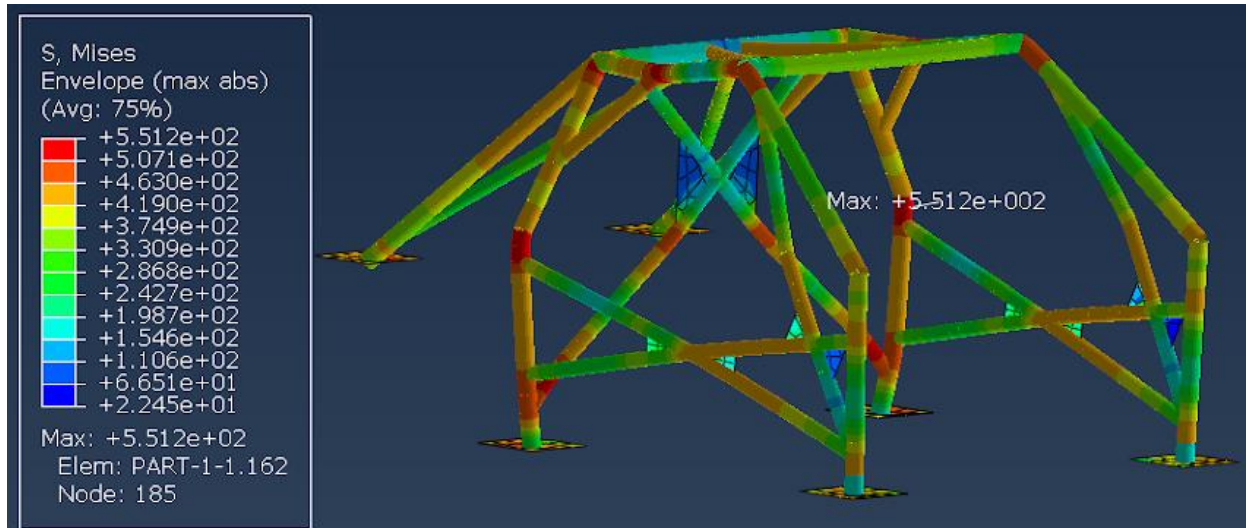
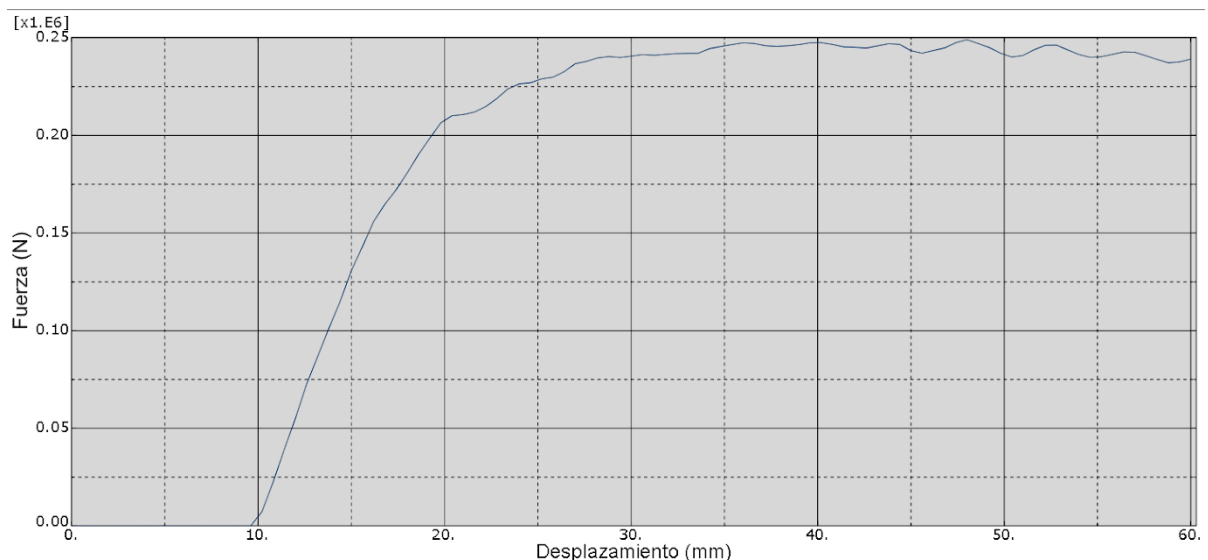


Figura 26. Deformaciones del modelo 2 en situación límite de deformación máxima (50 mm)

El comportamiento en cuanto tensiones en la situación límite, vemos en la figura 37, una tensión máxima de 551,2 MPa por lo que parte de la estructura ha plastificado pero no ha llegado romper ningún elemento.



Al observar la gráfica desplazamiento-reacciones, se puede afirmar que se ha conseguido alcanzar la carga que nos exige la norma durante la simulación. Tal y como vemos en la imagen 38, se ha sobrepasado el valor requerido de carga que son 76.500 N, y se ha alcanzado un máximo de 249.049 N.



Para la fuerza requerida por la normativa para este simulación se alcanza un valor aproximado de 12,8 mm de desplazamiento, como vemos en la siguiente 39, que en realidad sería de 3,2 mm, quitándole los 9,6 mm, distancia que se desplaza la placa hasta llegar a tocar la estructura.

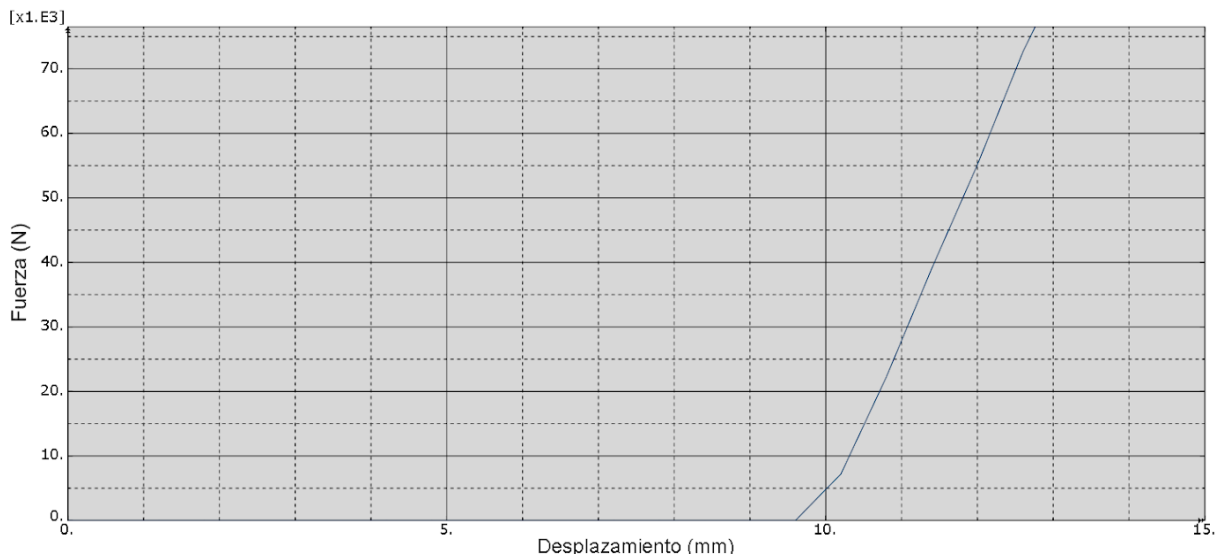


Figura 29. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo vertical en el modelo 2, ajustando al valor de carga y el desplazamiento de los ejes.

Conocido el momento de en el que se produce la aplicación de la carga de la norma, veremos el estado tensional en el que se encuentra la estructura en la figura 40. Nos encontramos con un valor de tensión máxima en las placas del arco principal de 386,3 MPa, lo que significa que tenemos toda la estructura en régimen elástico.

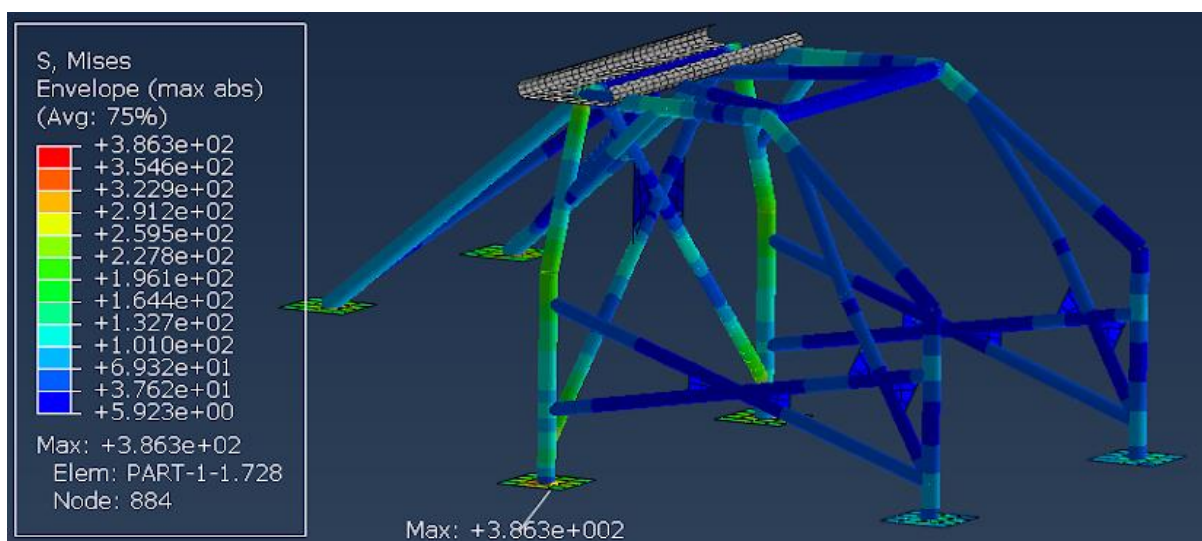


Figura 30. Estado tensional con carga de 76.500 N del modelo 2.

10.1.3. RESPUESTA DEL MODELO 3 A CARGA VERTICAL.

En este modelo la deformación límite tiene lugar en el step 0,099, con una deformación de 49,77 mm en la dirección de aplicación de la carga, como podemos ver en la figura 41 siguiente.

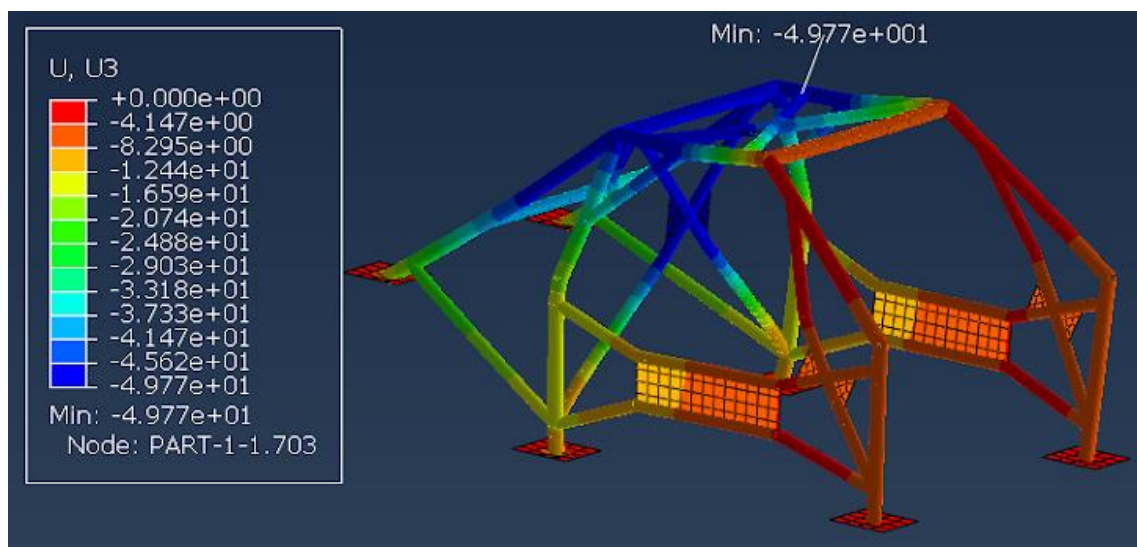


Figura 31. Deformaciones del modelo 3 en situación límite de deformación máxima (50 mm).

En el momento de deformación máxima, mirando las tensiones tenemos un máximo de 572,6 MPa, por lo que llega a plastificar pero no llegamos a la rotura de ninguna parte de la estructura.

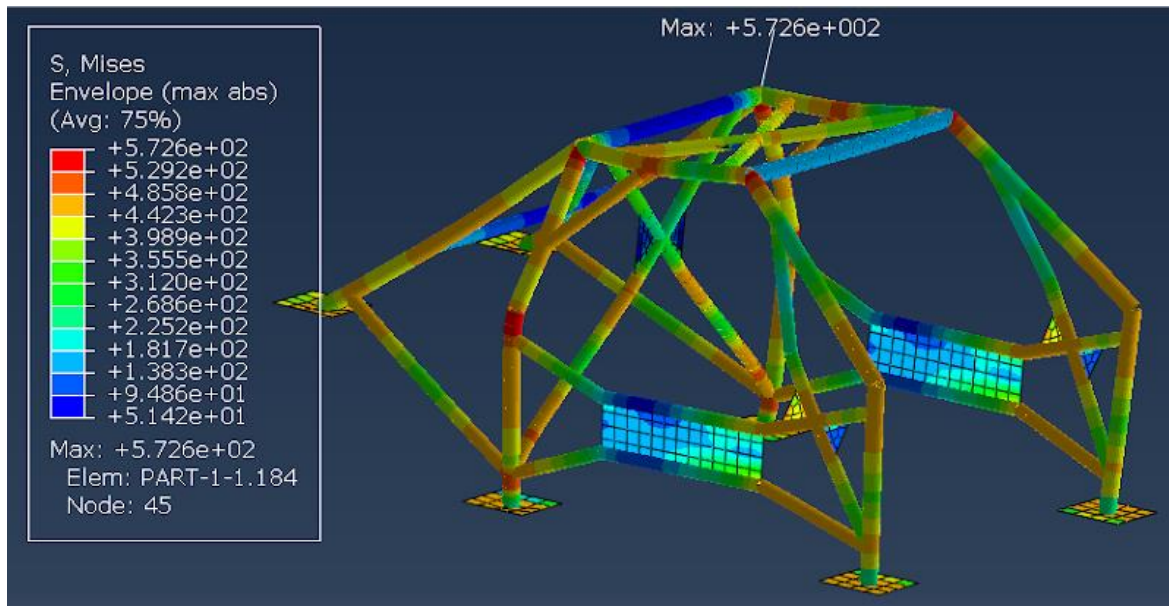


Figura 32. Distribución de tensiones en el momento de deformación máxima en el modelo 3.

En la gráfica desplazamientos-reacciones de la imagen 43, vemos que el valor de aplicación de carga impuesto por la normativa de 76.500 N lo superamos llegando a un máximo de 290.036 N.

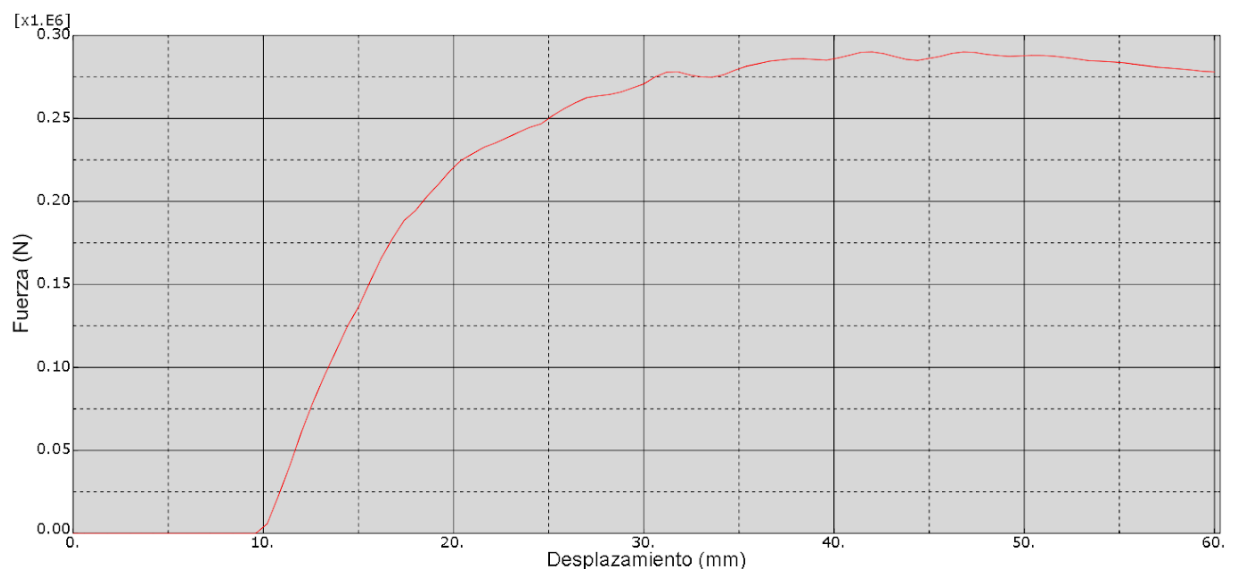


Figura 33. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo vertical en el modelo 3.

Para el valor de 76.500 N nos encontramos con 12,5 mm de desplazamiento, que serían restándole los 9,6 mm un valor aproximado de 2,9 mm de deformación, un valor de deformación muy bajo respecto al límite de deformación de 50 mm.

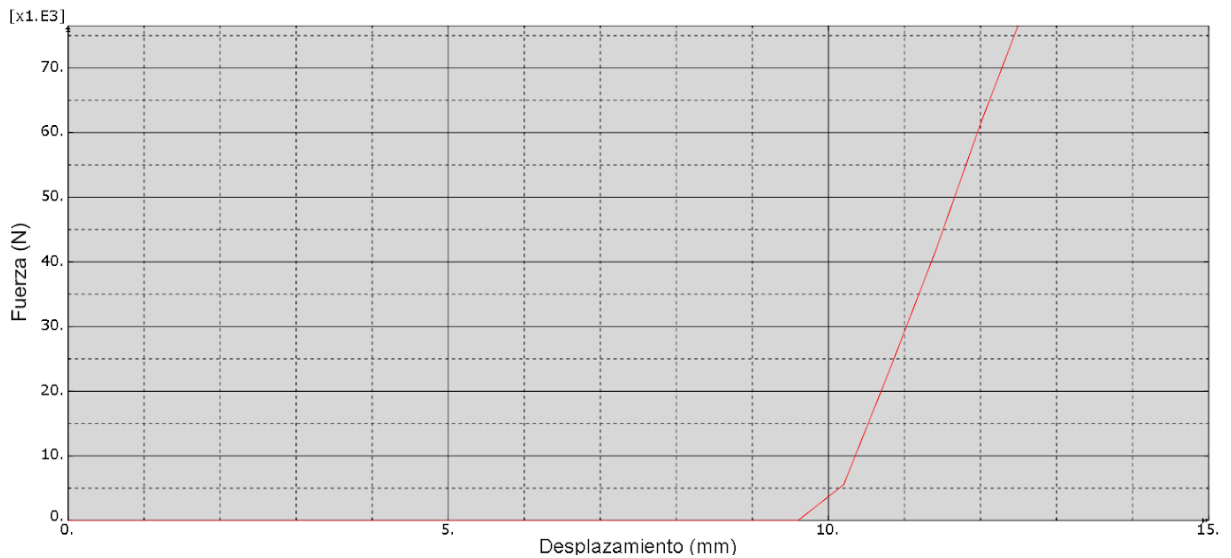


Figura 34. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo vertical en el modelo 2, ajustando al valor de carga y el desplazamiento de los ejes.

Por otra parte, el estado tensional en el momento de la carga de la normativa, tenemos 379,4 MPa de tensión en una de las placas de las barras traseras y es importante ver que estamos en la región elástica.

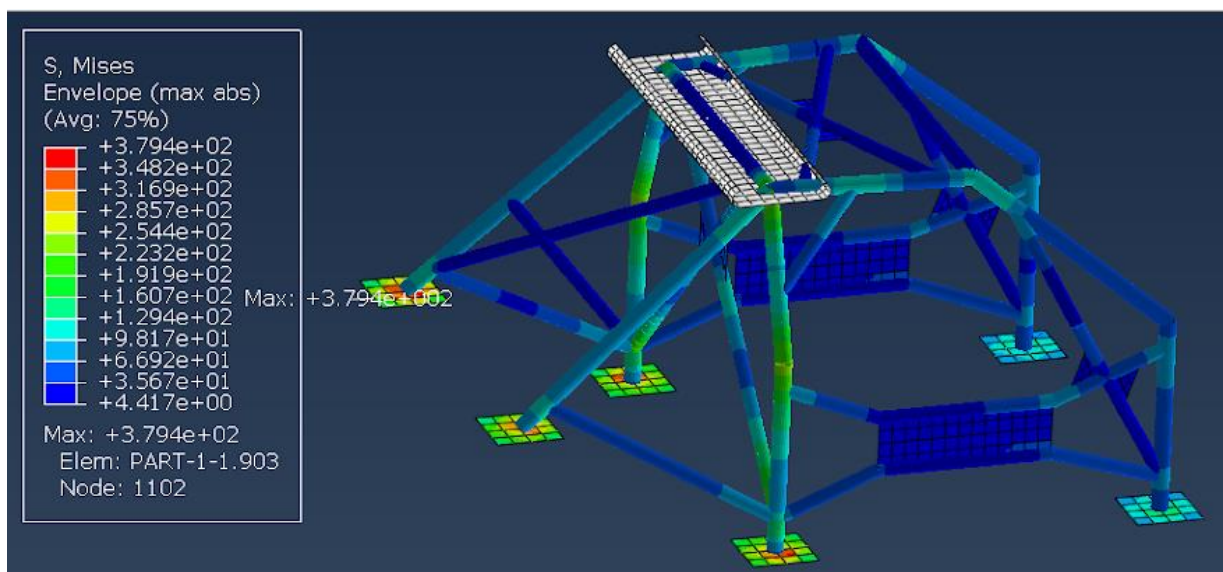


Figura 35. Estado tensional con carga de 76.500 N del modelo 3.

10.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE CARGA EN EL ARCO DELANTERO DE SEGURIDAD.

En esta prueba veremos cuál es el comportamiento frente a una carga en la parte frontal del piloto, que simulará por ejemplo un accidente por vuelco. Buscaremos en cada caso el step límite antes de sobrepasar los 100 mm de desplazamiento en el eje de aplicación de la carga que nos impone la normativa. Para ello utilizaremos el sistema de coordenadas local que hemos utilizado para construir la placa, de esta manera los desplazamientos que aparezcan serán en función de dicho sistema local, ya que en la normativa nos dice que tenemos que conocer los desplazamientos en el eje de aplicación de la carga. A partir de esta situación iremos comentando las diferentes puntos a destacar en cuanto a tensiones y deformaciones, y veremos si el ensayo alcanza la fuerza que la normativa nos obliga a realizar de 35.700N, necesaria para poder desplazar la placa e ir deformando la estructura.

10.2.1. RESPUESTA DEL MODELO 1 A CARGA EN EL ARCO DELANTERO.

La situación límite, en este caso aparece en el step 0,099, donde tenemos un desplazamiento máximo de la estructura de 99,87 mm. En el siguiente step ya sobrepasamos los 100 mm de máxima deformación que nos dice la norma, lo vemos en la siguiente figura.

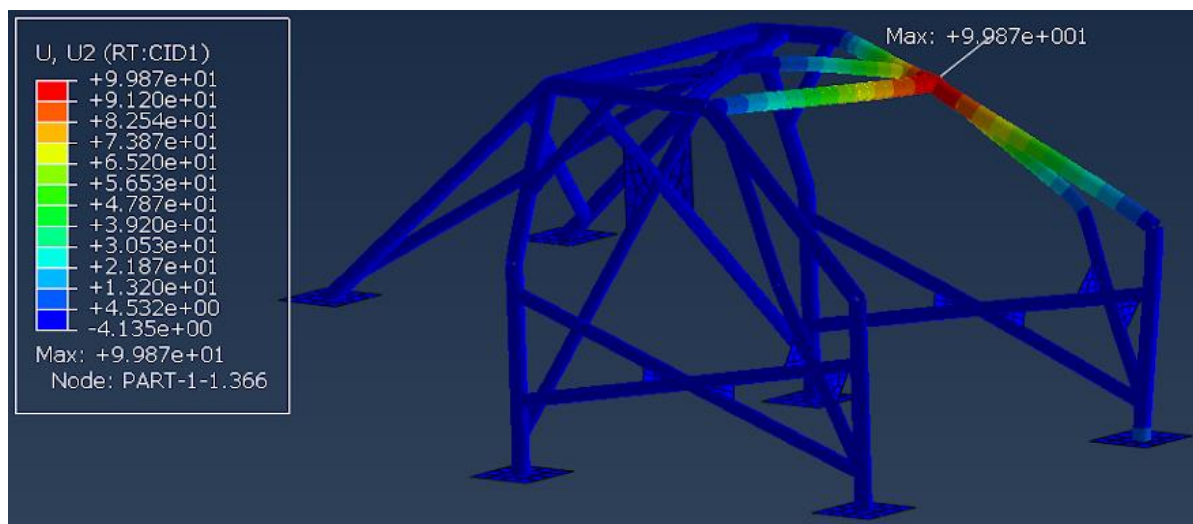


Figura 36. Deformaciones del modelo 1 en situación límite de deformación máxima (100 mm).

Conocido el momento de deformación máxima, vamos a ver qué tensiones encontramos en dicho step. Vemos en la figura 47 como llegamos a una tensión de 620,2 MPa, es decir, tenemos una plastificación de diferentes partes pero sin llegar a la rotura.

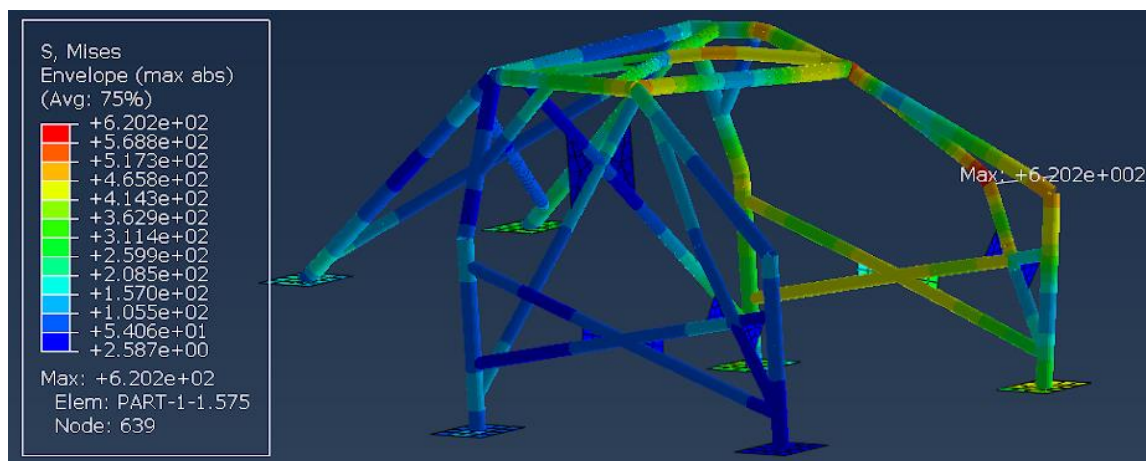


Figura 37. Distribución de tensiones en el momento de deformación máxima en el modelo 1.

Observamos la gráfica de desplazamientos-reacciones para constatar que hemos superado la carga impuesta por la normativa de 35.700 N. Vemos que superamos claramente dicha carga y se llega a un máximo de 67.270 N.

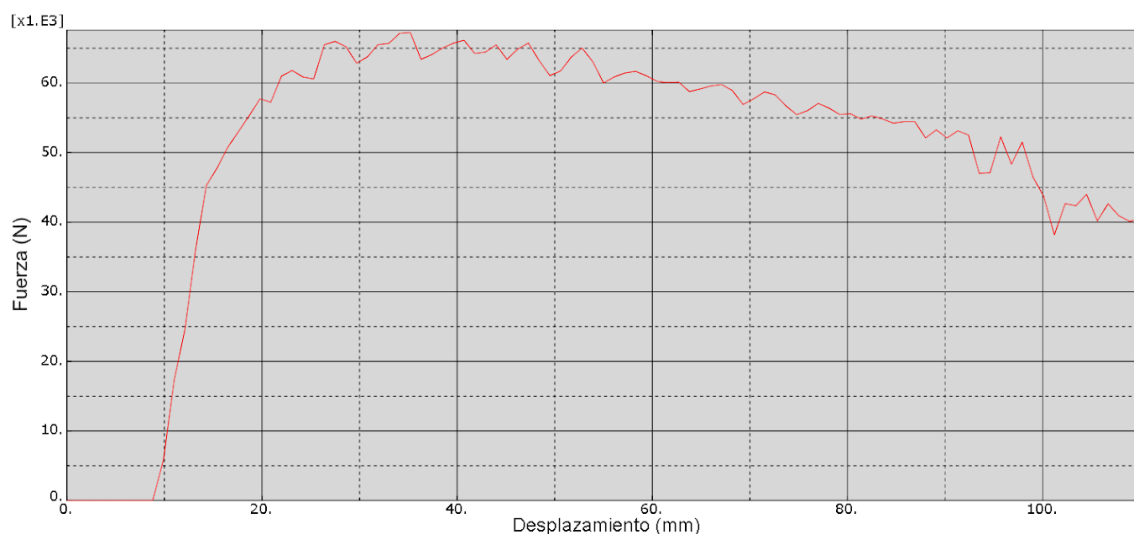


Figura 38. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo en el arco delantero en el modelo 1.

En la siguiente imagen vamos a ver que deformación obtenemos con la carga de 35.700 N. Se observa como alcanzamos un desplazamiento de aproximadamente 13,2 mm, a la que tenemos que quitarle en este caso 8,8 mm, ya que en la simulación comienza a tener contacto cuando la placa se mueve 8,8 mm, por lo tanto la deformación será de 4,4 mm. En la siguiente figura 49 podemos verlo.

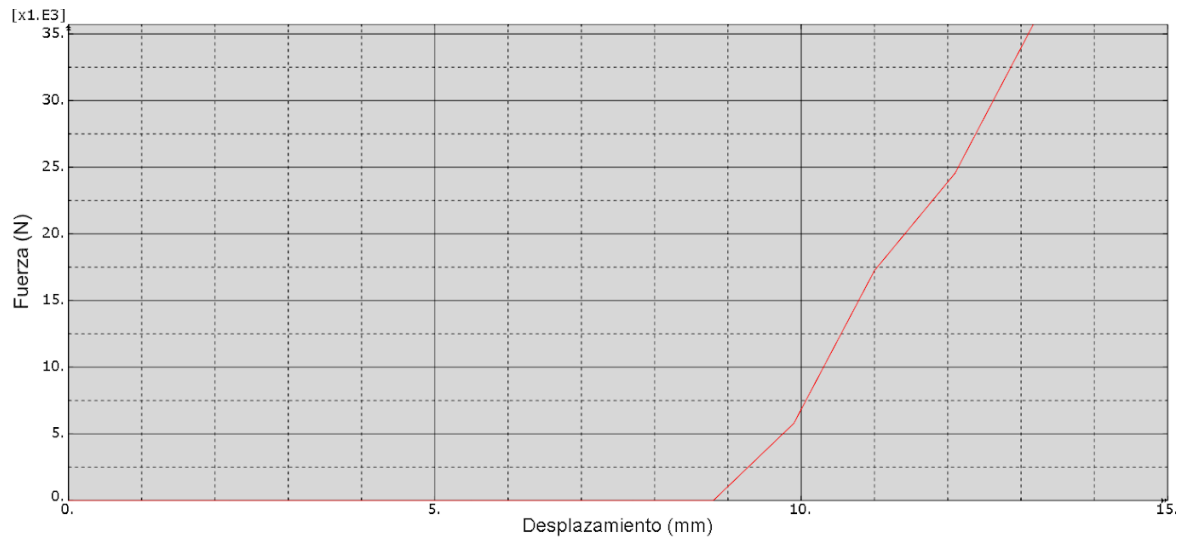


Figura 39. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo en el arco delantero en el modelo 1, ajustando al valor de carga y el desplazamiento de los ejes.

Nos falta observar el estado tensional en el momento de carga, aparecen una tensión máxima de 450,6 MPa, superando el límite elástico por muy poco, pero en las demás barras de la estructura vemos que nos encontramos en la zona elástica.

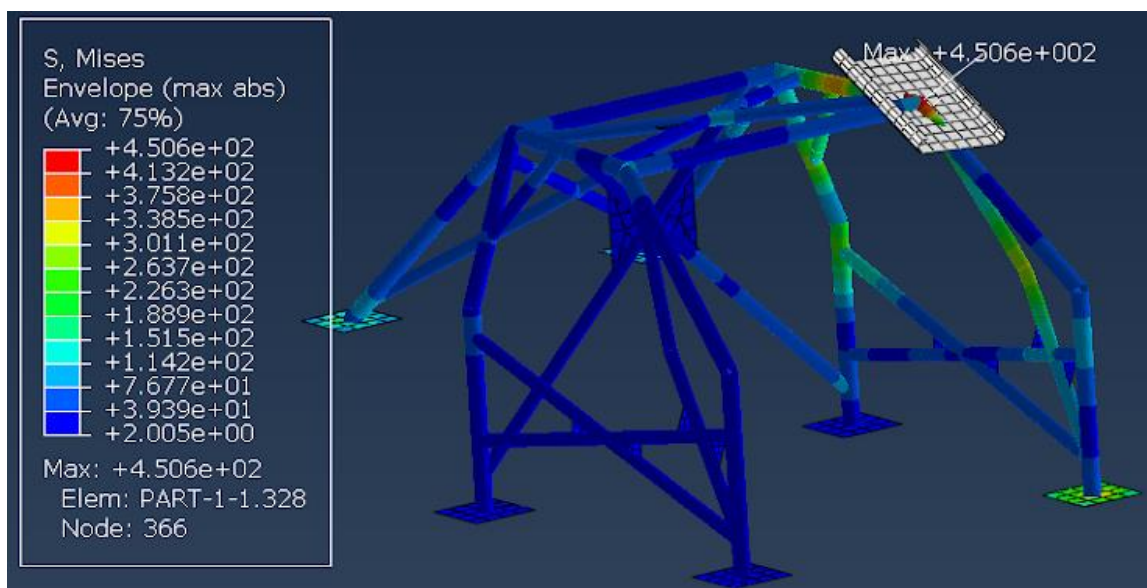


Figura 40. Estado tensional con carga de 35.700 N del modelo 1.

10.2.2. RESPUESTA DEL MODELO 2 A CARGA EN EL ARCO DELANTERO.

La situación límite en este caso la encontramos en el step 0,099, donde tiene lugar una deformación de 99,98 mm, ya que en el siguiente step pasamos los 100 mm que nos restringe la norma.

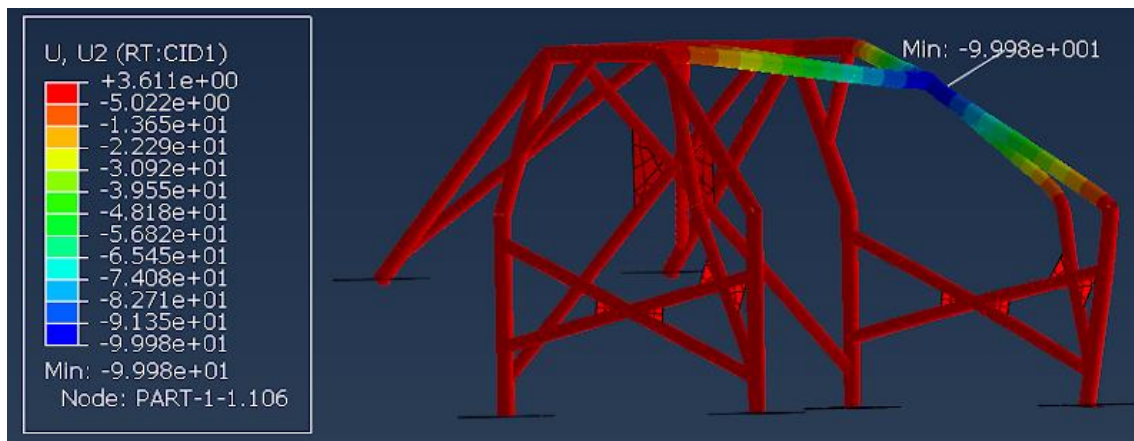


Figura 41. Deformaciones del modelo 2 en situación límite de deformación máxima (100 mm).

Vamos a ver en cuanto a tensiones el comportamiento en dicho momento crítico, en la figura 52 vemos que alcanzamos una tensión de 651,9 MPa, no llegamos a la rotura de la estructura pero a si al estado de plastificación.

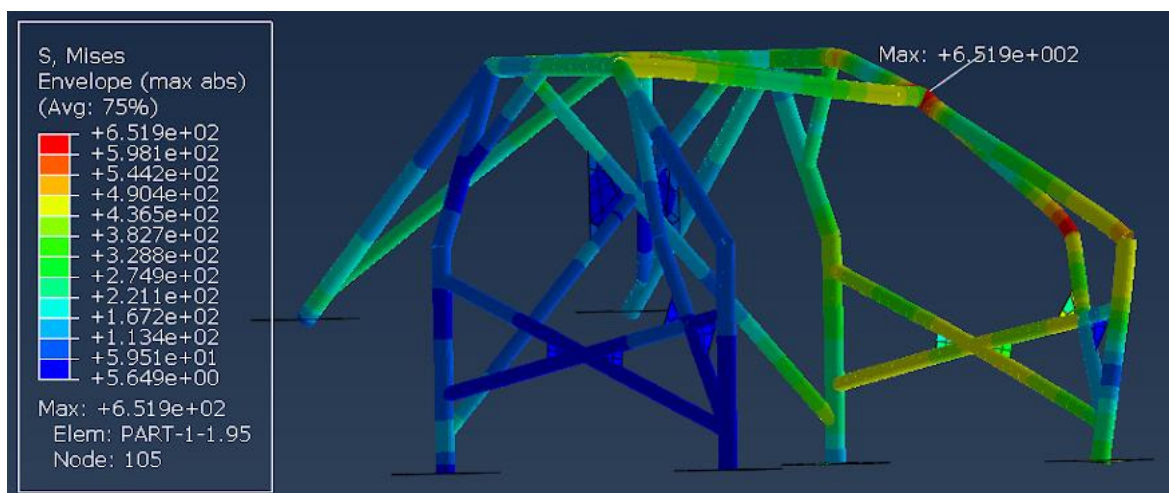


Figura 42. Distribución de tensiones en el momento de deformación máxima en el modelo 2.

Por otra parte, es importante conocer si hemos conseguido alcanzar la carga impuesta por la normativa de 35.700 N. En la figura 53 que aparece a continuación, se ve claramente como sobrepasamos dicha carga, alcanzando un máximo de 66.725,8 N.

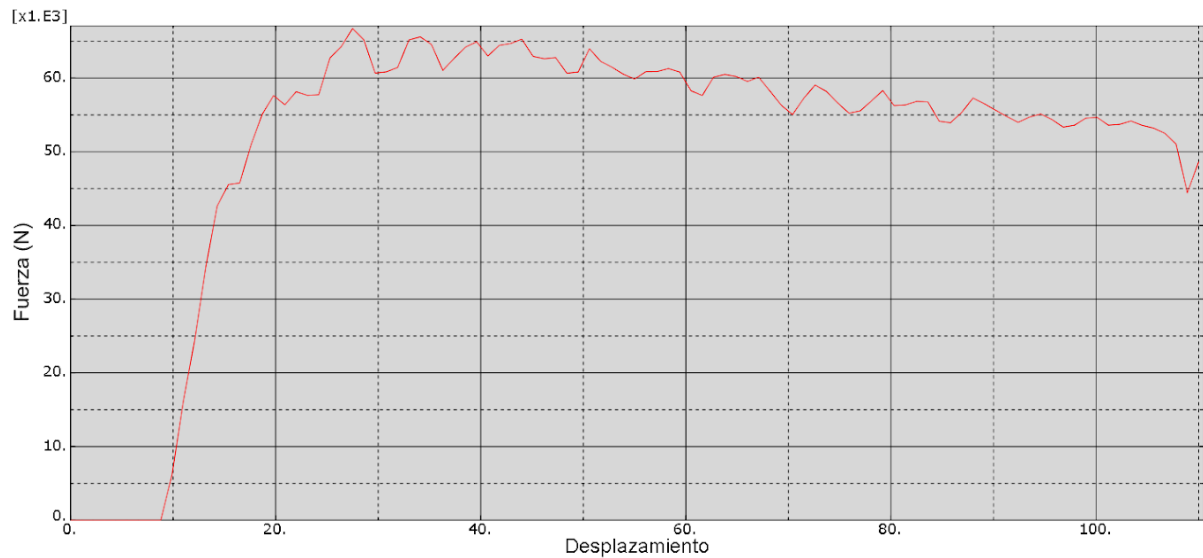


Figura 43. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo en el arco delantero del modelo 2.

Cuando se aplica la carga de 35.700 N vemos en la figura 54 que alcanzamos un desplazamiento aproximado de 13,4 mm, que se traduce en una deformación de 4,6 mm, quitándole los 8,8 mm de desplazamiento de la placa hasta que contacta con la estructura.

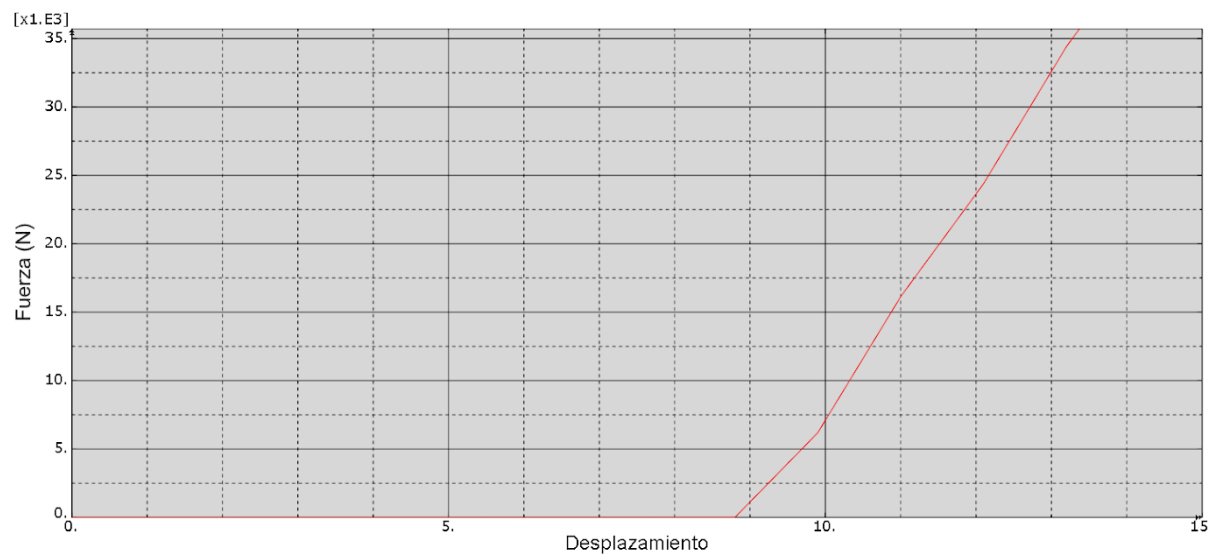


Figura 44. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo en el arco delantero en el modelo 2, ajustando al valor de carga y el desplazamiento de los ejes.

Vamos a ver en que estado tensional se encuentra la estructura cuando le aplicamos la fuerza que nos indica la normativa. Esta fuerza se produce en el step 0,012 según la gráfica reacciones-tiempo. Vemos como la tensión máxima es de 450,1 MPa, por lo que sobrepasamos por muy poco el valor del límite elástico, pero vemos como en todos los demás elementos de la estructura estamos en valores que son inferiores al límite elástico.

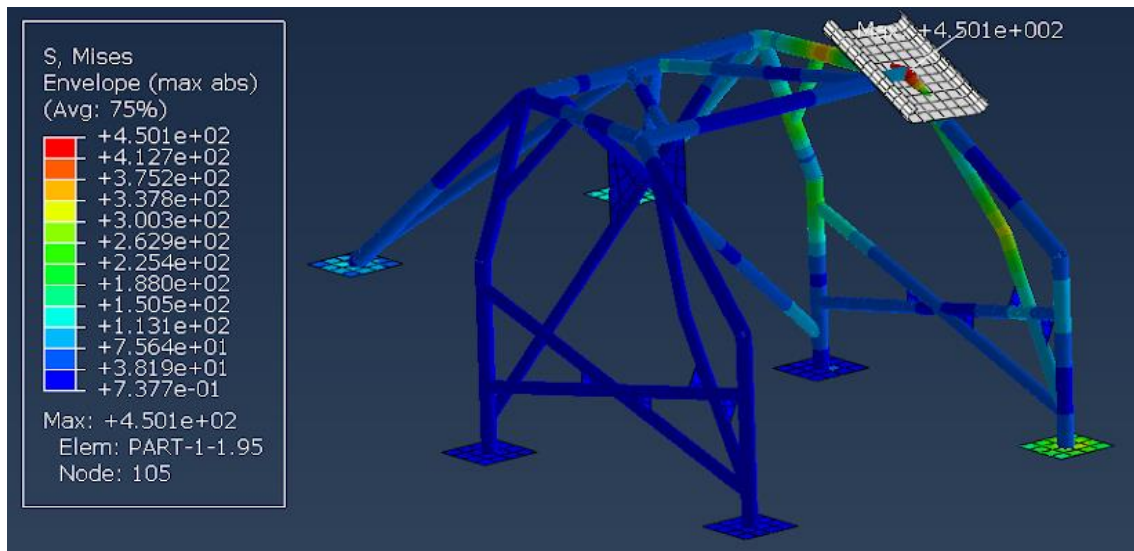


Figura 45. Estado tensional con carga de 35.700 N del modelo 2.

10.2.3. RESPUESTA DEL MODELO 3 A CARGA EN EL ARCO DELANTERO.

En esta simulación encontramos que la situación límite se produce en el step 0,099 con una deformación de 99,87 mm, ya que en el siguiente step la deformación pasa ser mayor de 100 mm. En la siguiente figura 56 podemos ver el estado de las deformaciones.

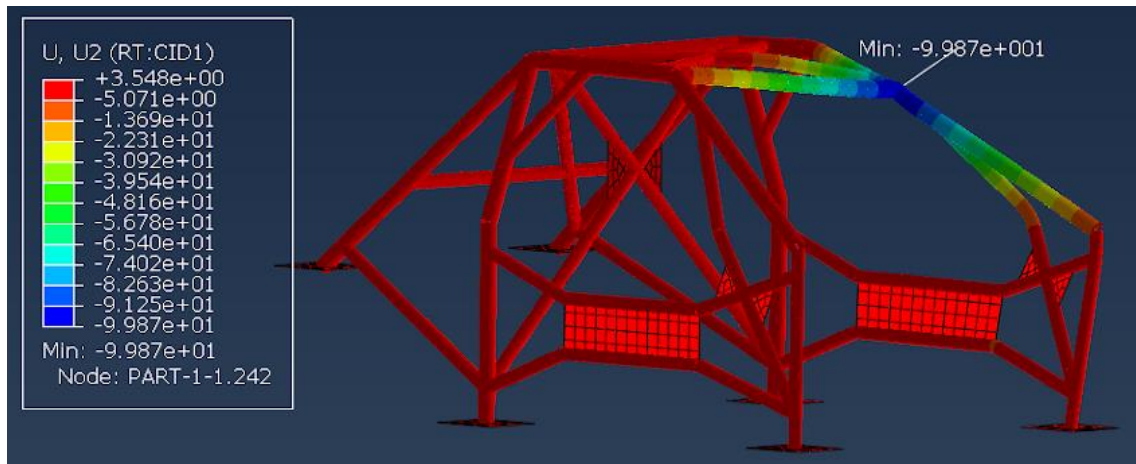


Figura 46. Deformaciones del modelo 3 en situación límite de deformación máxima (100 mm).

Cuando nos encontramos en la situación límite de deformación nos encontramos observando la figura 57 con un estado tensional de la estructura en el que la tensión máxima de Von Mises es de 690,6 MPa, por lo que llega a plastificar parte de la estructura pero sin llegar a la rotura.

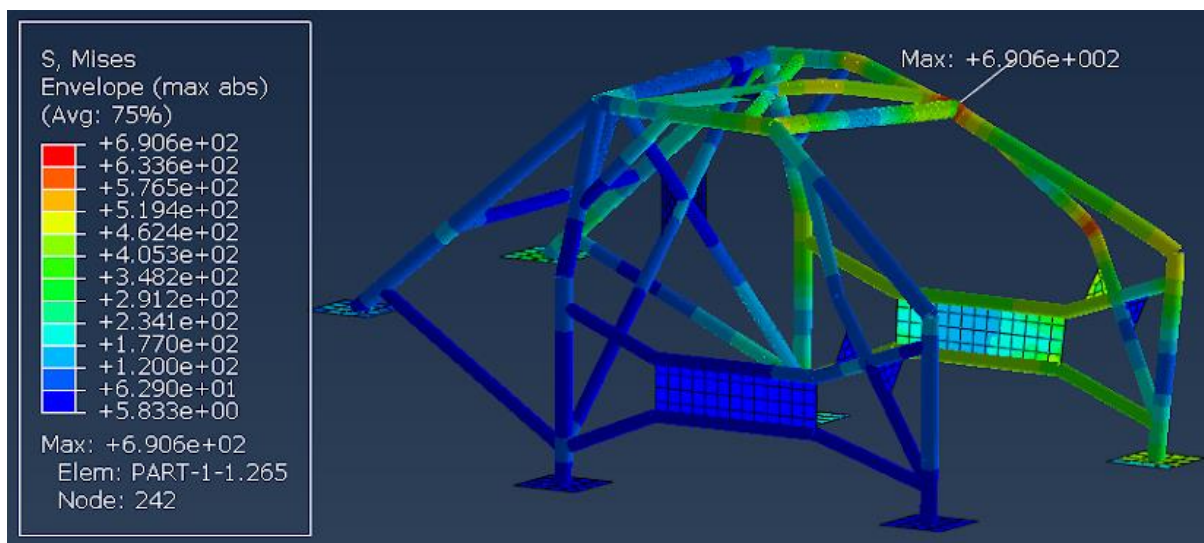


Figura 47. Distribución de tensiones en el momento de deformación máxima en el modelo 3.

En la siguiente gráfica de desplazamiento-reacciones, vemos cómo superamos los 35.700 N de fuerza alcanzado un valor máximo de 66.652,8 N de carga máxima.

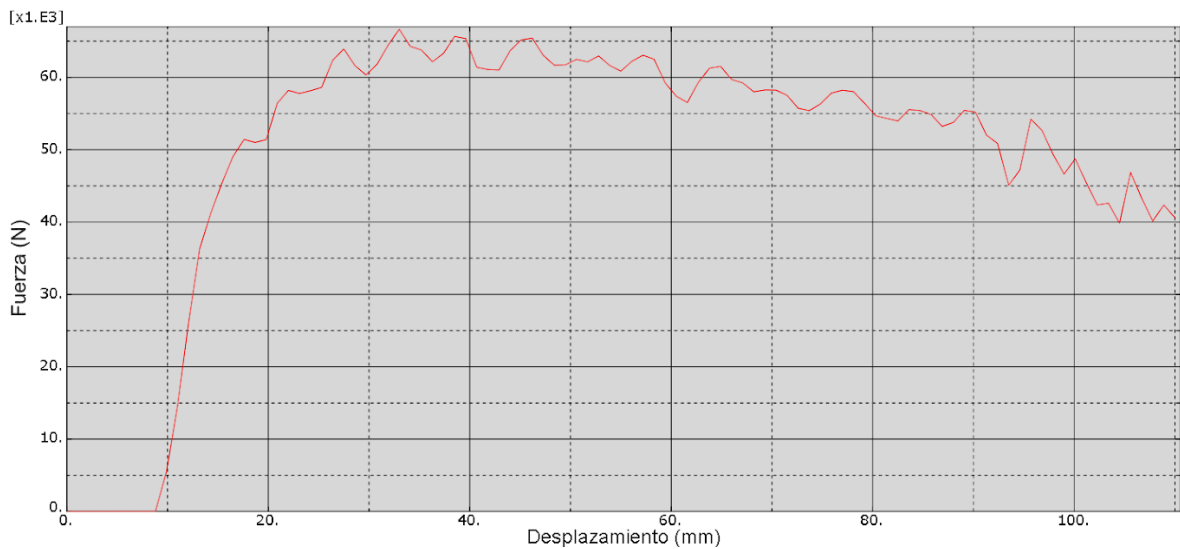


Figura 48. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo en el arco delantero del modelo 3.

En esta simulación nos queda conocer por una parte, qué deformación se produce en el momento en el que se realiza una fuerza de 35.700 N. Esta deformación tiene un valor aproximado de 13,2 mm, que se traduce en una deformación total de 4,4 mm.

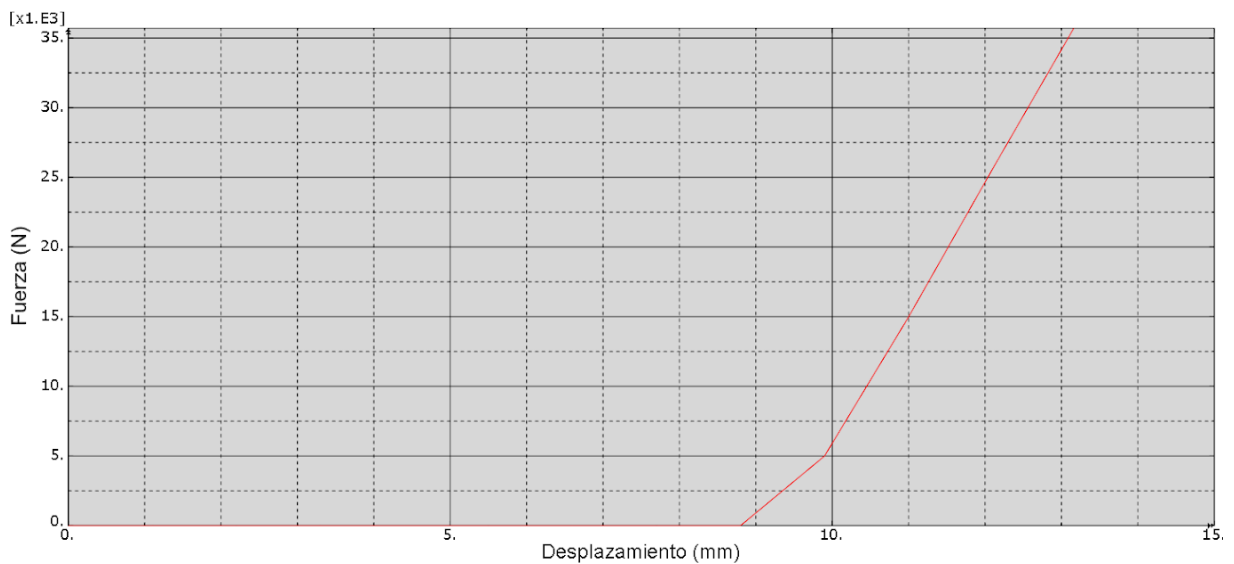


Figura 49. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo en el arco delantero en el modelo 2, ajustando al valor de carga y el desplazamiento de los ejes.

Por último, en el momento de aplicación de la carga 35.700 N, nos queda conocer la distribución de tensiones, en este step tenemos una tensión máxima de 450,6 MPa, como vemos en la figura 60, en un punto en concreto pero todos los demás elementos de

la estructura se encuentran por debajo de valores de tensión menores que el límite elástico.

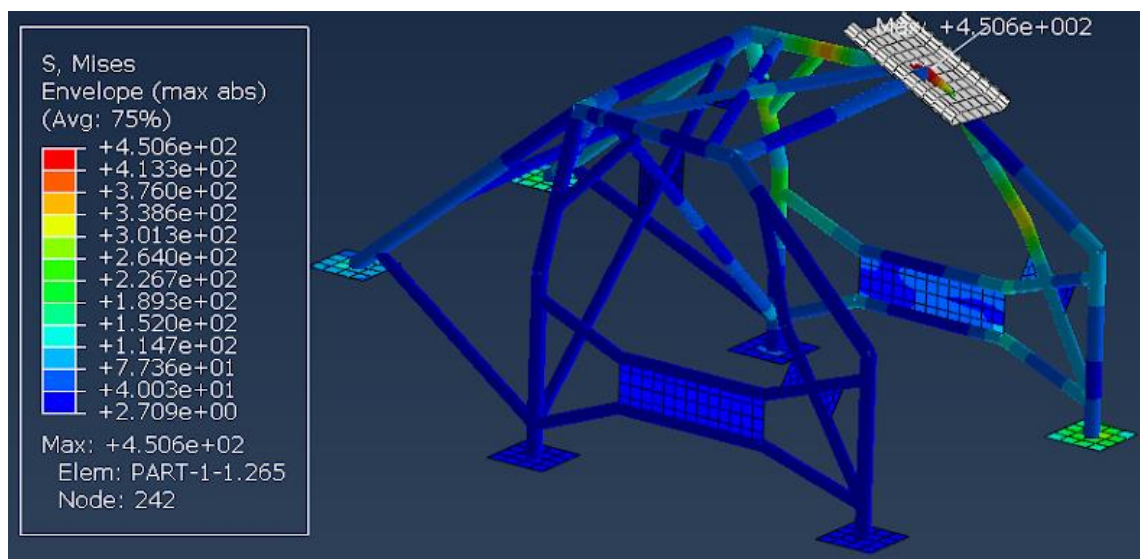


Figura 50. Estado tensional con carga de 35.700 N del modelo 3.

10.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE CARGA LATERAL EN EL ARCO PRINCIPAL.

En estas simulaciones vamos a ver el comportamiento de los diferentes diseños frente a una carga lateral aplicada en el pilar del arco principal, simulando así golpes laterales que se puedan producir. Al igual que en los demás casos observaremos en que step se produce la deformación máxima, la normativa nos dice que no se pueden producir deformaciones mayores de 50 mm en el eje de aplicación de la carga, es decir, eje Y.

Una vez conocido el instante de deformación máxima, analizaremos las tensiones de Von Mises en dicho punto crítico. Por último veremos si hemos cumplido los requisitos de carga a aplicar, corroborando así que cumplimos la reglamentación impuesta por la normativa en ese momento en cuanto a tensiones y deformaciones en dicho ensayo.

10.3.1. RESPUESTA DEL MODELO 1 A CARGA LATERAL EN EL ARCO PRINCIPAL.

En este ensayo nos encontramos que la situación límite se produce en el step 0,093 con una deformación máxima en el eje 2 - Y (U2-eje de aplicación de la carga) de 49,93 mm, ya que en el siguiente step superamos los 50 mm de deformación máxima en la estructura.

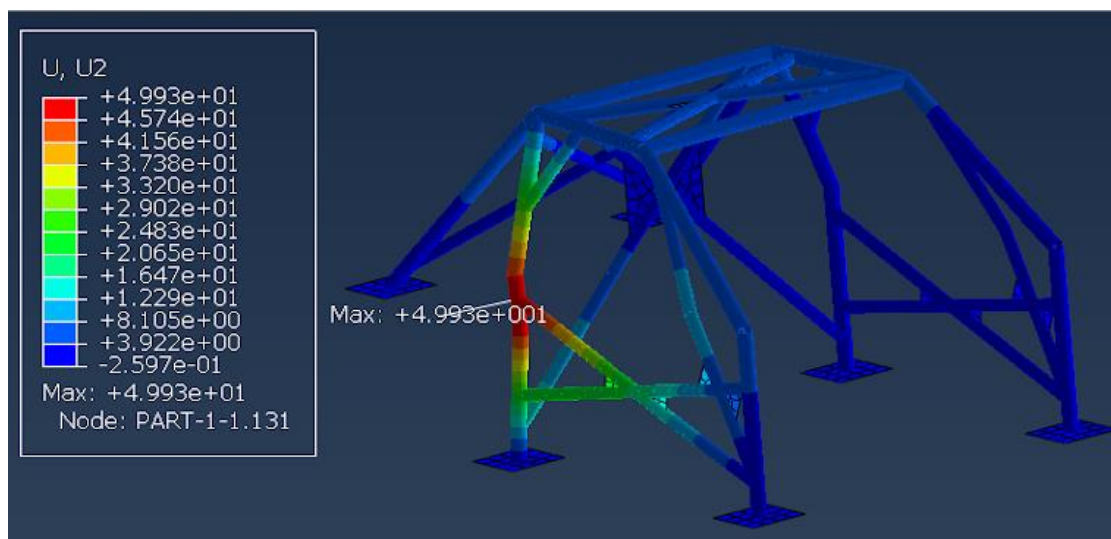


Figura 51. Deformaciones del modelo 1 en situación límite de deformación máxima (50 mm).

Si observamos las tensiones que tenemos en el momento de deformación máxima, vemos que nos aparece una tensión máxima de 519,8 MPa, por lo que llegamos a un estado de plastificación pero sin llegar a la rotura.

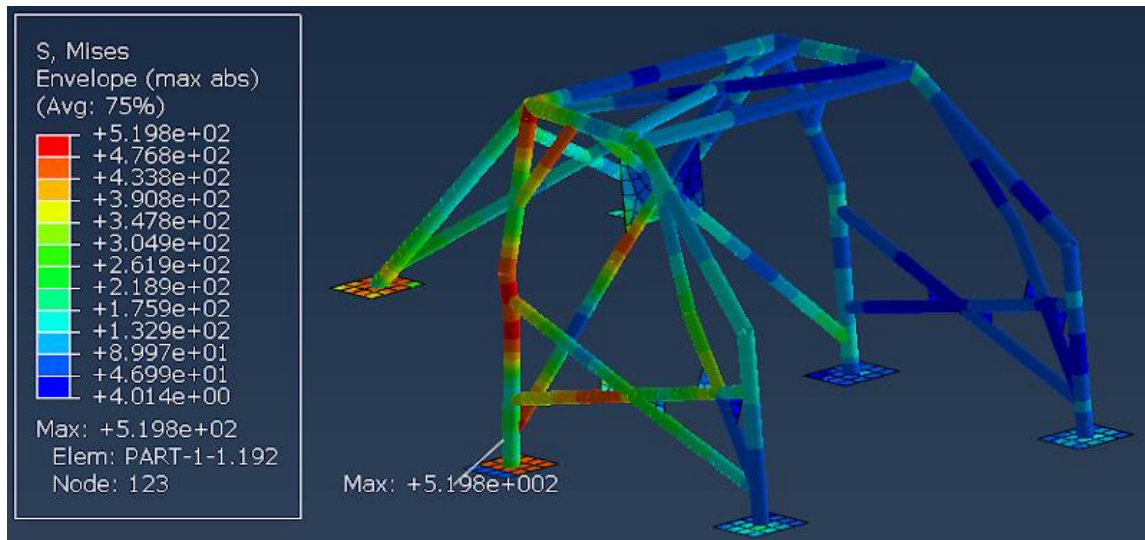


Figura 52. Distribución de tensiones en el momento de deformación máxima en el modelo 1.

Veremos a continuación, mediante la gráfica de la figura 63, si hemos conseguido alcanzar durante la simulación la fuerza requerida por la normativa que en este caso es de 35.700 N. Como podemos ver en la siguiente imagen conseguimos alcanzar la fuerza requerida por la normativa para este ensayo, alcanzando un valor máximo de 37.602,9 N.

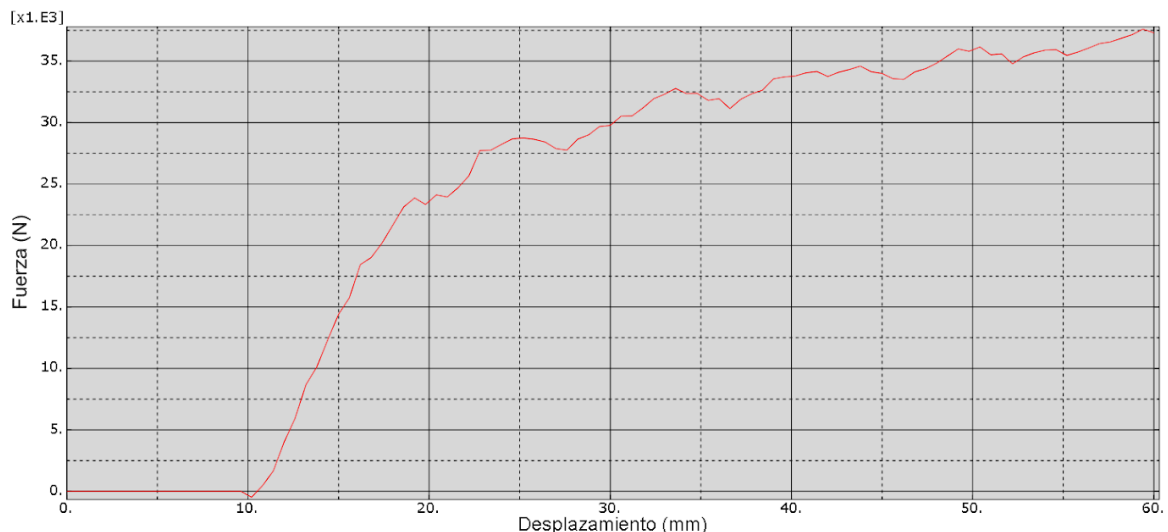


Figura 53. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo lateral en el arco delantero del modelo 1.

En la imagen 64 podemos ver como alcanzamos un desplazamiento de la placa de aproximadamente 49 mm que si restamos 9,6 mm, que es el instante en el que comienza

la placa a tocar la estructura, nos da un resultado de 39,4 mm de deformación cuando llegamos a la carga requerida por la normativa.

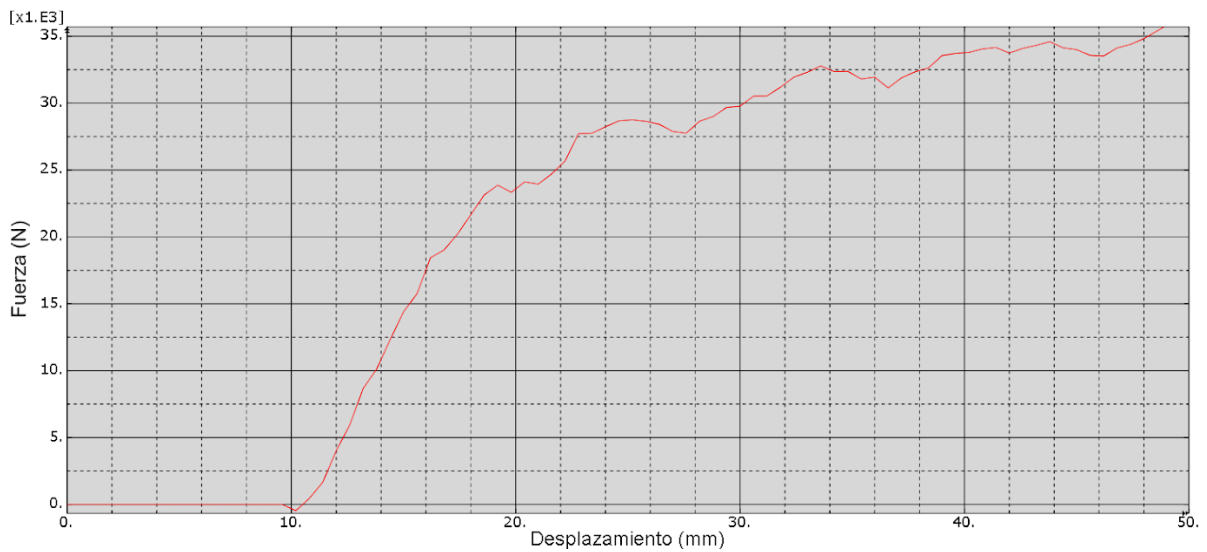


Figura 54. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo lateral en el arco principal en el modelo 1, ajustando al valor de carga y el desplazamiento de los ejes.

En la figura 65 vemos el estado tensional en el que nos encontramos en el momento que alcanzamos la fuerza de 35.700 N que la normativa nos dice. Este momento tiene lugar en el step 0,082 y tenemos una tensión máxima de 509,4 MPa, donde parte de la estructura llega a un estado de plastificación pero no tiene lugar ninguna rotura en la estructura del modelo.

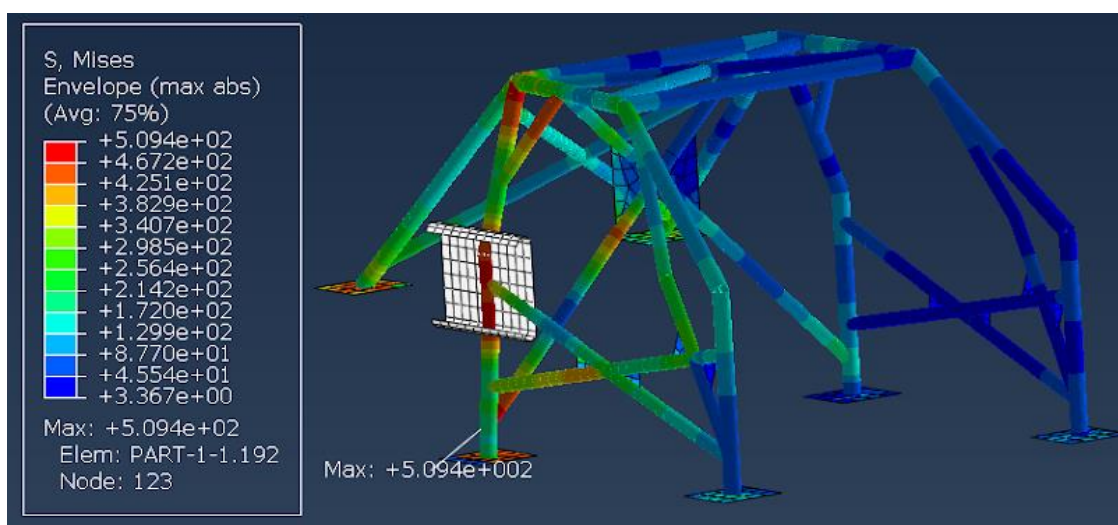


Figura 55. Estado tensional con carga de 35.700 N del modelo 1.

10.3.2. RESPUESTA DEL MODELO 2 A CARGA LATERAL EN EL ARCO PRINCIPAL.

En este modelo nos encontramos que la situación límite tiene lugar en el step 0,093 con una deformación máxima en el eje de aplicación de la carga de 49,81 mm. En el siguiente step ya superamos la deformación de 50 mm. Vamos a verlo en la siguiente imagen.

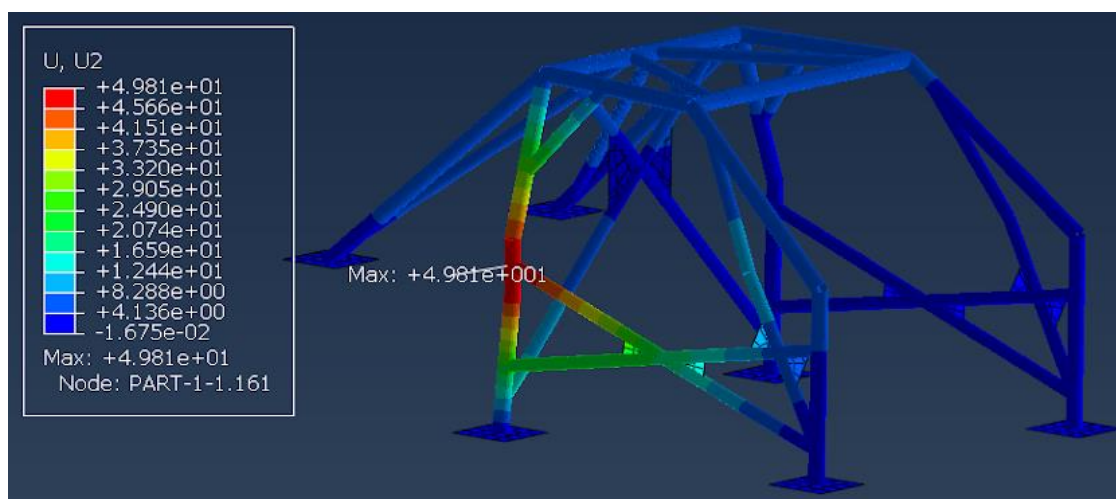


Figura 56. Deformaciones del modelo 2 en situación límite de deformación máxima (50 mm).

A la hora de analizar las tensiones en el momento de deformación máxima, nos encontramos que la tensión máxima de Von Mises es de 520,5 MPa, con lo que sobrepasamos el límite elástico pero sin llegar a la rotura, es decir, tenemos una plastificación de la estructura.

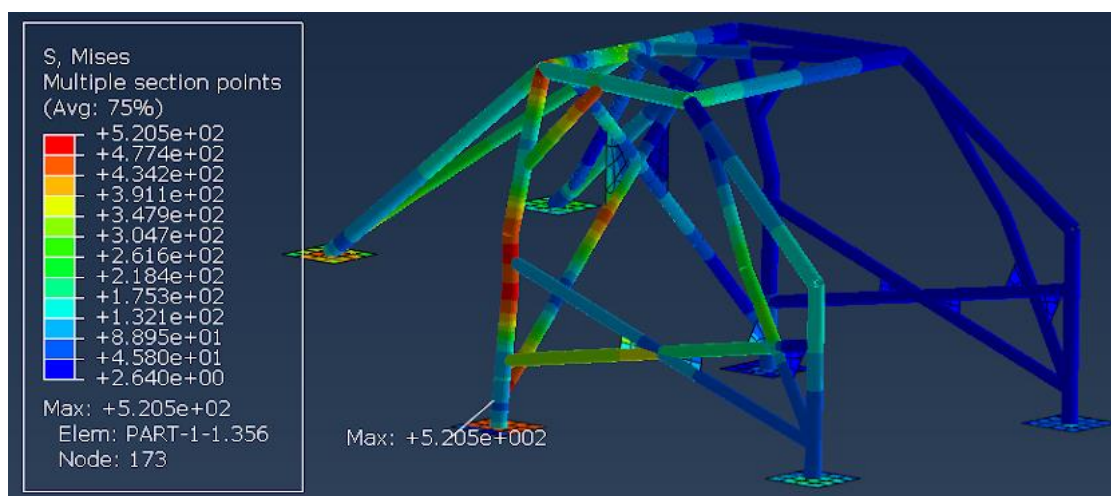


Figura 57. Distribución de tensiones en el momento de deformación máxima en el modelo 2.

Vamos a ver a continuación si alcanzamos la fuerza requerida por la normativa de 35.700 N. En la figura 68 que aparece a continuación vemos cómo superamos la carga requerida, hasta alcanzar un máximo de 36.272,7 N, lo que se traduce en que la simulación del ensayo cumple las especificaciones en cuanto carga de la normativa.

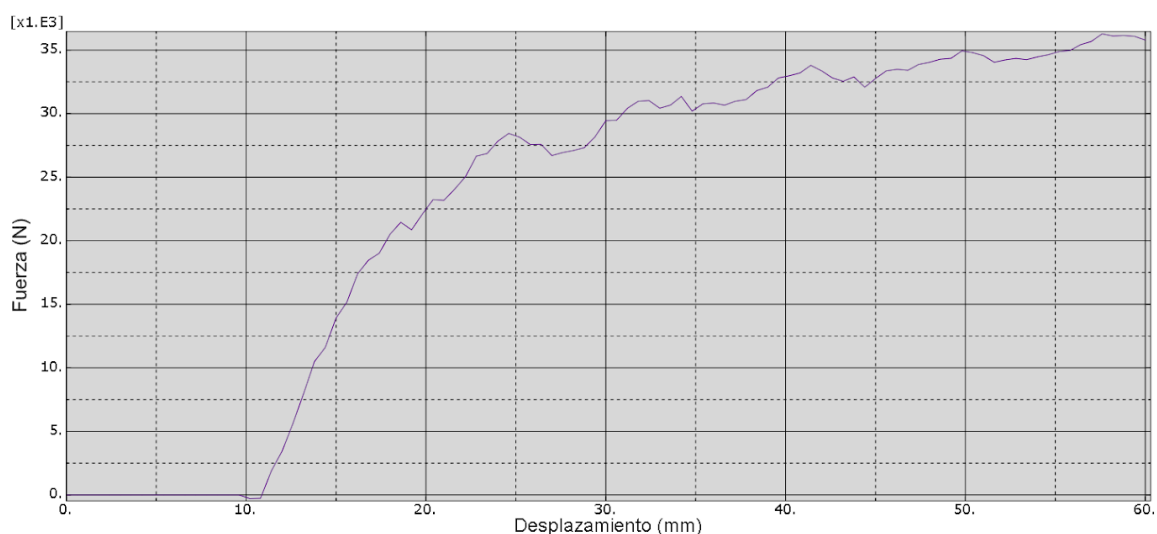


Figura 58. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo lateral en el arco delantero del modelo 2.

Una vez que hemos visto cómo se ha cumplido el valor de carga impuesto, es importante conocer, para la carga requerida por la norma, la deformación máxima que alcanza la estructura. Vemos en la siguiente imagen, como para los 35.700 N de fuerza la gráfica nos muestra un desplazamiento de la placa de 58,3 mm lo que se traduce en una deformación en el eje de aplicación de la carga de 48,7 mm, así que cumple la normativa ya que no llegamos a la máxima deformación de 50 mm.

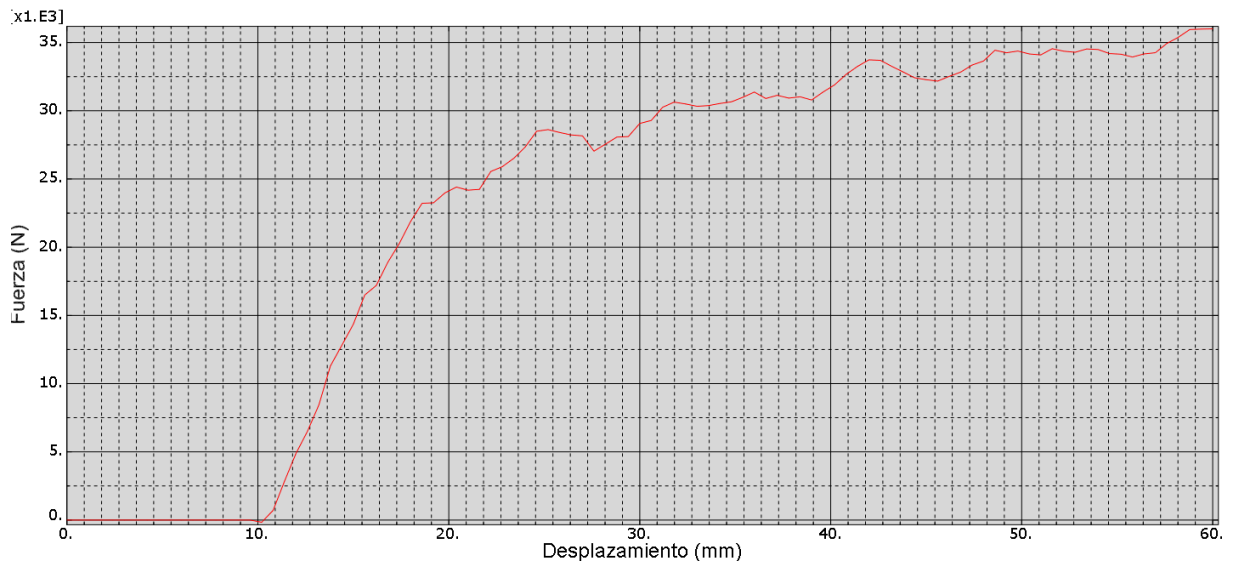


Figura 59. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo lateral en el arco principal en el modelo 2, ajustando al valor de carga y el desplazamiento de los ejes.

Observando el estado tensional en el momento de aplicación de la carga de 35.700 N, que viendo la gráfica reacciones-tiempo ocurre en el step 0,095, vemos que tenemos una tensión máxima de 521,7 MPa llegando a plastificar, además de que observamos como diferentes partes de la estructura llegan también al estado de plastificación.

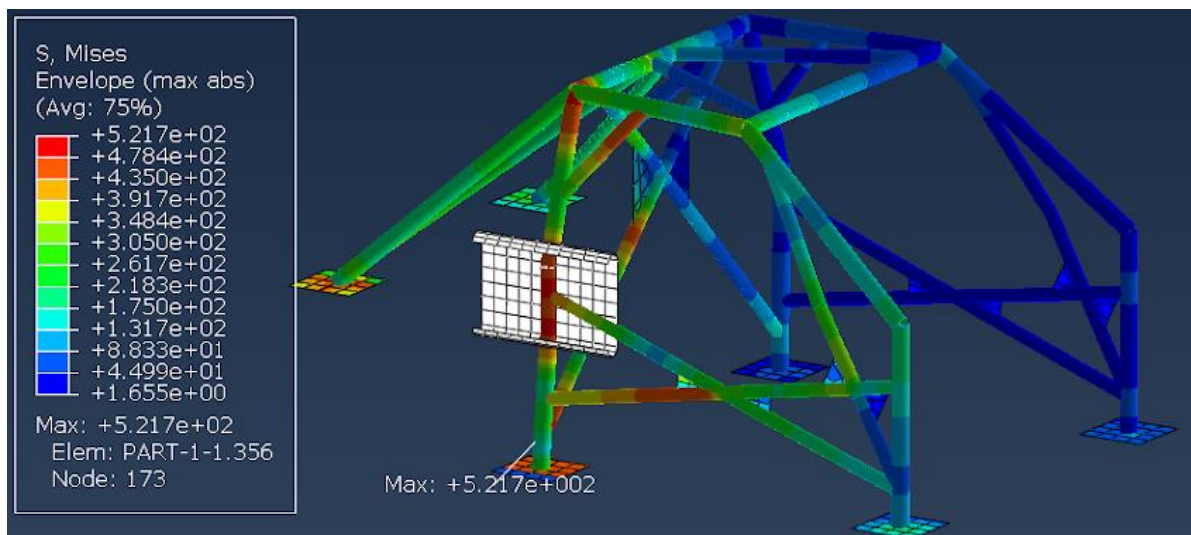


Figura 60. Estado tensional con carga de 35.700 N del modelo 2.

10.3.3. RESPUESTA DEL MODELO 3 A CARGA LATERAL EN EL ARCO PRINCIPAL.

Nos encontramos en este modelo que para la carga lateral, el momento crítico aparece en el step 0,091 donde tenemos una deformación de 49,48. En el siguiente step pasamos de los 50 mm de deformación que nos permite la normativa, por ello este punto es el momento de estudio. Lo podemos observar en la siguiente imagen.

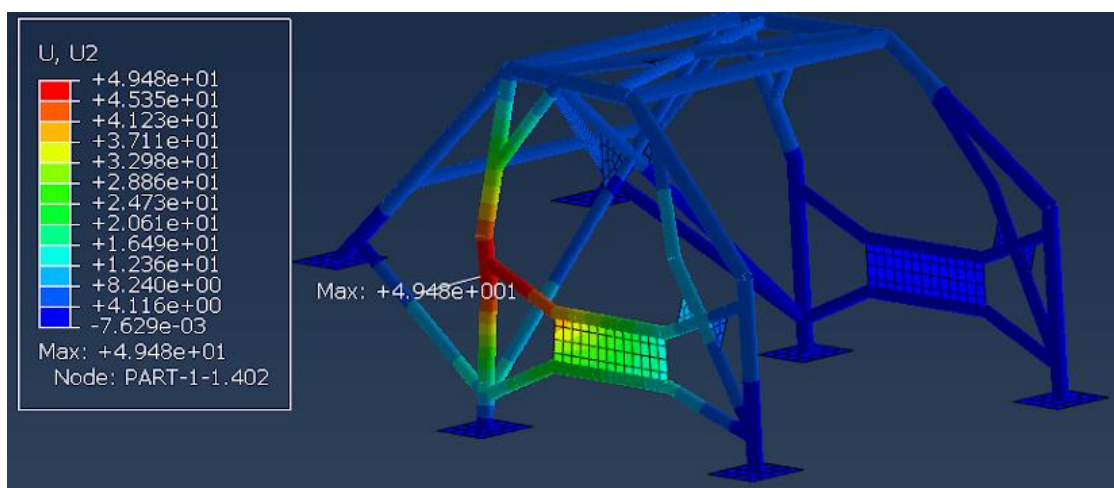


Figura 61. Deformaciones del modelo 3 en situación límite de deformación máxima (50 mm).

Conocido el momento de deformación máxima, donde hemos visto la deformación máxima, vamos a ver el estado tensional según el criterio de Von Mises en el que nos encontramos en dicha situación. Como podemos ver en la imagen tenemos una tensión máxima de 514,6 MPa, sobrepasando de esta manera el límite elástico pero sin llegar al límite de rotura, quedando en un estado de deformación plástica.

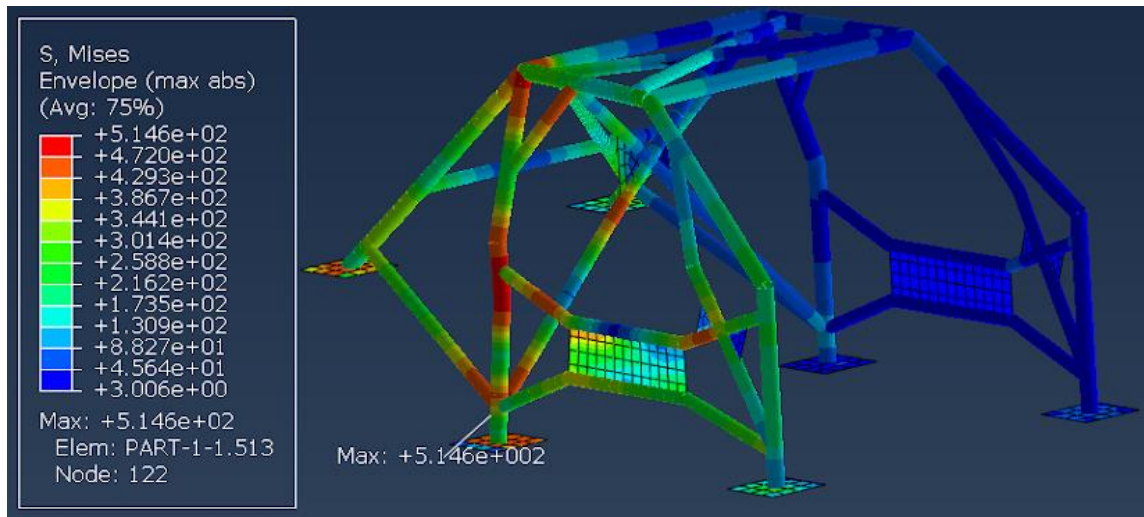


Figura 62. Distribución de tensiones en el momento de deformación máxima en el modelo 3.

Si observamos la gráfica desplazamiento-reacciones vemos que superamos la carga que marca la normativa de 35.700 N, alcanzando un máximo de 39.630 N.

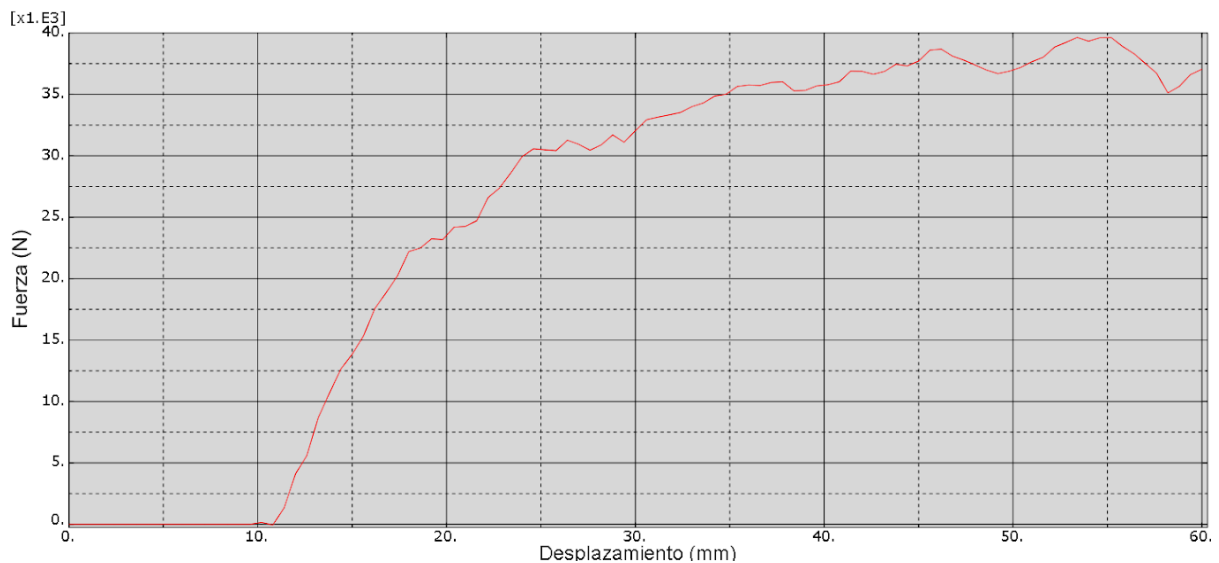


Figura 63. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo lateral en el arco delantero del modelo 3.

Vamos a ver que deformación tenemos en el momento de aplicación de la carga que marca el ensayo de la normativa de 35.700 N. Si observamos la gráfica desplazamiento-reacciones de la figura 74, podemos ver como el desplazamiento se encuentra aproximadamente en 36,5 mm, que se traduce en una deformación, quitándole los 9,6

mm de desplazamiento de la placa en vacío, de 26,9 mm de deformación máxima. Por lo tanto cumplimos la normativa ya que no llegamos a superar los 50 mm de máximo.

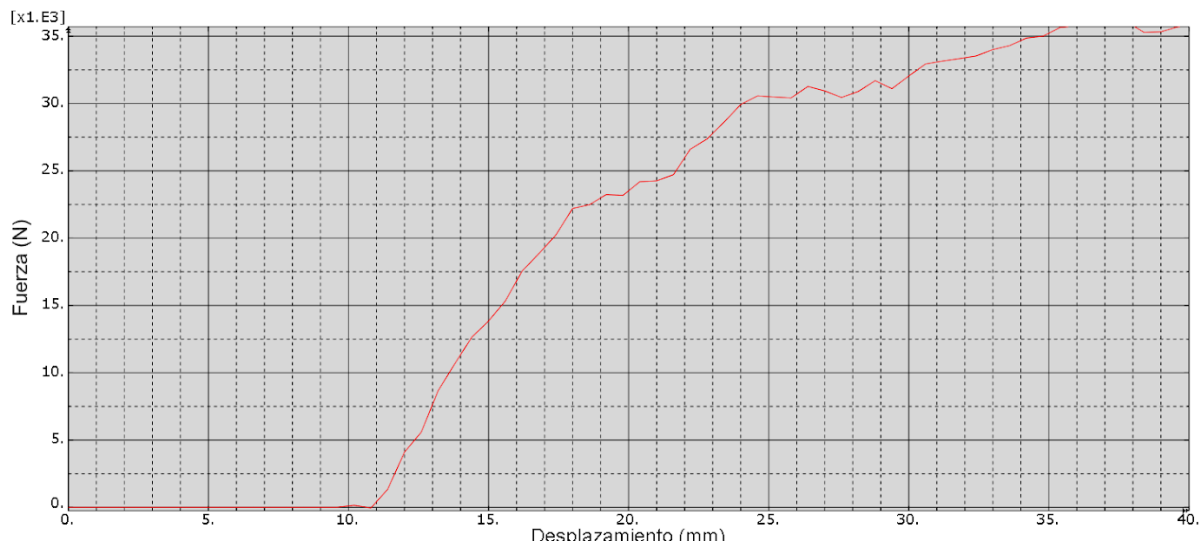


Figura 64. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo lateral en el arco principal en el modelo 3, ajustando al valor de carga y el desplazamiento de los ejes.

Conocido el momento en el que se aplica la carga impuesta por la norma, vamos a ver en que estado tensional nos encontramos. Observando la gráfica reacciones-tiempo vemos que ocurre en el step 0,059. Podemos ver en la figura 75 una tensión máxima de 481,5 MPa plastificando en varios puntos de la estructura sin llegar a tensiones mayores de 700 MPa.

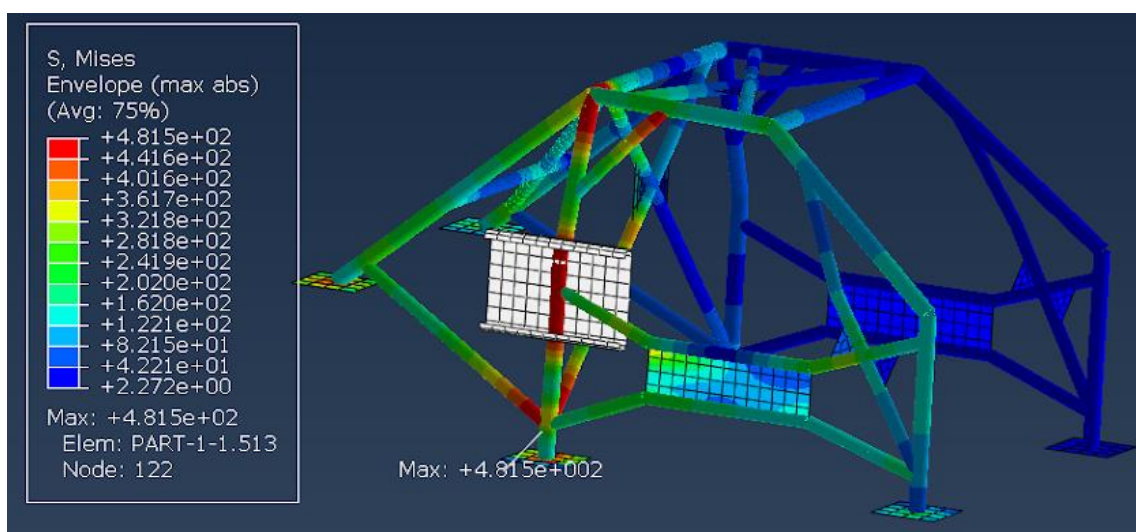


Figura 65. Estado tensional con carga de 35.700 N del modelo 3.

11. COMPARACIÓN DE COMPORTAMIENTO ENTRE LAS SIMULACIONES DE MODELOS Y SELECCIÓN DEL MODELO A OPTIMIZAR.

Veremos en adelante unos tablas resumen distinguiendo entre simulaciones, para poder seleccionar el modelo que más nos convenga para una situación de competición.

ENSAYO: VERTICAL	Fmáx. [N]	U(F.norma) [mm]	σ (F.norma) [MPa]	Masa [kg]
MODELO 1	248.052	3,6	384,8	63,128
MODELO 2	249.049	3,2	386,3	60,641
MODELO 3	290.036	2,9	379,4	68,523

Tabla 1. Resumen de resultados del ensayo vertical.

En esta tabla 1 del test vertical, con los resultados más significativos de cada modelo, vemos como los tres cumplen los requerimientos que impone la normativa, tanto de tensiones como deformaciones. Las cargas máximas están muy por encima de los 76.500 N exigidos por la norma. En cuanto a tensiones no se producen roturas y los tres modelos se encuentra en régimen elástico. Las deformaciones en el momento de aplicación de los 76.500 N están en torno a un 7% de la máxima deformación admitida. Para este ensayo de carga vertical podemos decir que se encuentran muy sobredimensionados.

ENSAYO: ARCO DELANTERO	Fmáx. [N]	U(F.norma) [mm]	σ (F.norma) [MPa]	Masa [kg]
MODELO 1	67.270	4,4	450,6	63,128
MODELO 2	66.725,8	4,6	450,1	60,641
MODELO 3	66.652,8	4,4	450,6	68,523

Tabla 2. Resumen de resultados del ensayo del arco delantero.

Al igual que en el ensayo vertical, podemos ver en la tabla 2 del arco delantero, que cumplen notablemente los requerimientos de la normativa, ya que no se producen

roturas ni deformaciones mayores de 100 mm. Además la fuerza máxima de cada una de las estructura es muy similar, llegando a doblar el valor de la norma.

Si observamos el comportamiento para la carga de 35.700 N, podemos ver como las tensiones son prácticamente iguales sobrepasando el límite plástico pero alejados del límite de rotura. En las deformaciones vemos que en el momento de aplicar la carga impuesta por la norma son muy similares, y se encuentran entorno a un 4,5% del valor de deformación máximo admitido por la norma de 100 mm.

Para este ensayo frontal se encuentran sobredimensionadas.

ENSAYO: LATERAL	Fmáx. [N]	U(F.norma) [mm]	σ (F.norma) [MPa]	Masa [kg]
MODELO 1	37.602,9	39,4	509,4	63,128
MODELO 2	36.272,7	48,7	521,7	60,641
MODELO 3	39.630	26,9	481,5	68,523

Tabla 3. Resumen de resultados del ensayo lateral.

El ensayo de carga lateral, vemos en la tabla 3, como nos da resultados menos favorables que los anteriores, así que es la simulación que va a condicionar los ensayos. Observando los resultados obtenidos podemos ver como la fuerza máxima que aguantan supera los 35.700 N.

En cuanto a deformaciones ningún modelo supera los 50 mm de deformación pero los valores son destacables comparando con los otros ensayos, llegando justo al límite en alguno de los modelos. Las tensiones máximas cuando aplicamos la carga de la norma tienen valores admisibles llegando a plastificar pero lejanos al límite de rotura.

Por último, los tres modelos cumplen los requerimientos que impone la normativa en cuanto a carga, tensiones y deformaciones en las tres simulaciones. Aunque en algunos casos se llegue a plastificar, la norma lo permite con tal de no llegar a la rotura. Aplicando un criterio de mínima masa, teniendo en cuenta que son destinadas en su mayoría para competiciones automovilísticas, el modelo seleccionado para optimizar sería el modelo 2.

12. OPTIMIZACIÓN DEL MODELO SELECCIONADO.

Con el objetivo de mejorar el modelo seleccionado, vamos a realizar una serie de modificaciones, intentando reducir el peso de la estructura utilizando barras de menores diámetros y espesores siempre cumpliendo la normativa.

A la hora de cambiar la geometría debemos tener en cuenta que para barras de diámetro menor de 40 mm, la suma de la longitud de las mismas no puede ser mayor de 15 metros.

Realizando diferentes cambios en las dimensiones de las barras y comprobando los resultados de las simulaciones, hemos visto como la siguiente geometría reduce notablemente el peso de la estructura y cumple los requisitos de cargas y deformaciones que nos impone la normativa. Para poder ir reduciendo diámetros y espesores, las comprobaciones se han realizado fijándonos en los resultados de las simulaciones del ensayo de carga lateral en el arco principal, ya que dicho ensayo es el más restrictivo.. Hemos ido viendo que barras se encuentran en mejores estados tensionales y así seleccionamos en que barras podemos reducir sus dimensiones. Veremos los cambios realizados en las dimensiones de las barras, y la suma de la longitud de las barras por familias que conforman la estructura, ya que debemos demostrar que la suma de todas las barras con diámetros inferiores de 40 mm sea menor de 15 metros.

- Barras traseras o backstays: diámetro 30 mm, espesor 1,5 mm, longitud de las barras 1.975,56 mm.
- Refuerzos diagonales de las barras traseras: diámetro 30 mm, espesor 1,5 mm, longitud de las barras 2.017,86 mm.
- Barras arco principal: diámetro 50 mm, espesor 2 mm, longitud total de las barras 3.047,92 mm.
- Refuerzos diagonales del arco principal: diámetro 50 mm, espesor 2 mm, longitud de las barras 2.715,88 mm.
- Refuerzos del techo: diámetro 30 mm, espesor 1,5 mm, longitud de las barras 1.389,24 mm.

- Barras de los semiarcos laterales: diámetro 40 mm, espesor 2 mm, longitud de las barras 3.850,4 mm.
- Travesaño que une los semiarcos laterales: diámetro 40 mm, espesor 2 mm, longitud total 1.000 mm.
- Refuerzos diagonales de las puertas: diámetro 40 mm, espesor 1,5 mm, longitud total de las barras 4.966,32 mm.
- Refuerzos de las puertas 2 (apartado 7.2.1): diámetro 40 mm, espesor 2 mm, longitud total de las barras 769,32 mm.
- Refuerzos del pilar de la ventanilla: diámetro 30 mm, espesor, 1,5 mm, longitud total de las barras 2.038,56 mm.

Una vez que tenemos todas las barras con sus dimensiones y longitudes totales, debemos conocer las barras con diámetro menor de 40 mm y sumar sus longitudes totales para cerciorarnos de que cumplimos la norma. Estas barras son las barras traseras o backstays, los refuerzos diagonales de las barras traseras, los refuerzos diagonales del techo y los refuerzos del pilar de la ventanilla. Todas estas barras tienen una longitud total de 7.224,224 mm por lo que queda demostrado que la longitud de las barras utilizadas con diámetro menor de 40 mm, es menor de 15 metros.

Todos estos cambios realizados de dimensionamiento han hecho reducir el peso de la estructura en un 20,54% hasta los 48,195 kg.

Vamos a ver los resultados obtenidos de tensiones y deformaciones para los diferentes casos de carga.

12.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE CARGA EN EL ARCO PRINCIPAL DE SEGURIDAD DEL MODELO OPTIMIZADO.

En el ensayo de carga vertical vemos que la situación crítica se produce en el step 0,093 donde alcanzamos la deformación máxima de la estructura de 49,59 mm antes de sobrepasar los 50 mm de deformación máxima impuesto por la normativa. Vemos que tiene lugar en las barras traseras.

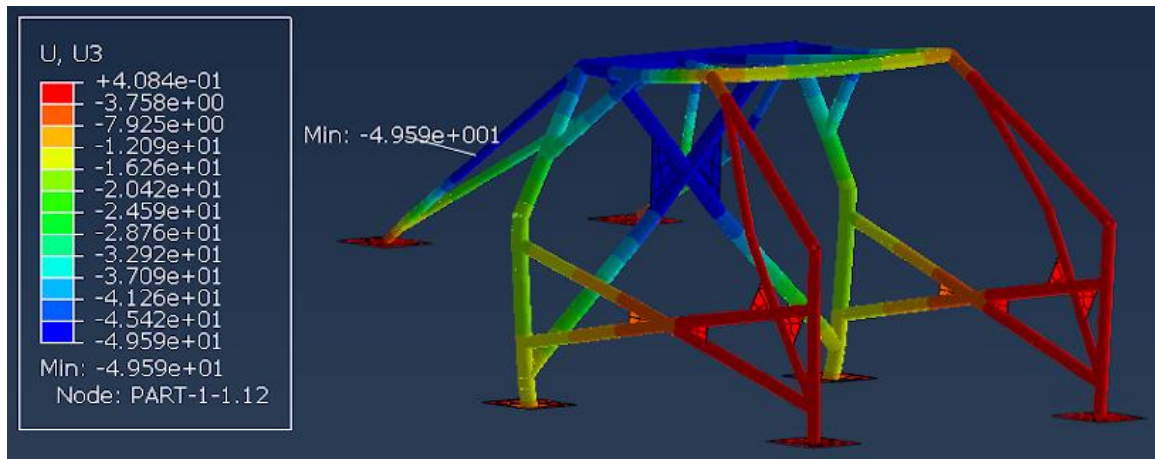


Figura 66. Deformaciones del modelo optimizado en situación límite de deformación máxima (50 mm).

Una vez conocemos el momento de deformación máxima de la estructura vamos a ver en qué estado tensional se encuentra la estructura. En la figura 77 siguiente, vemos como la tensión máxima se encuentra en las barras traseras justo donde se unen a sus respectivas placas de apoyo, con un valor de tensión de 635,2 MPa, dónde sobrepasamos el límite elástico llegando a plastificar pero sin llegar a la rotura ya que no sobrepasamos los 700 MPa.

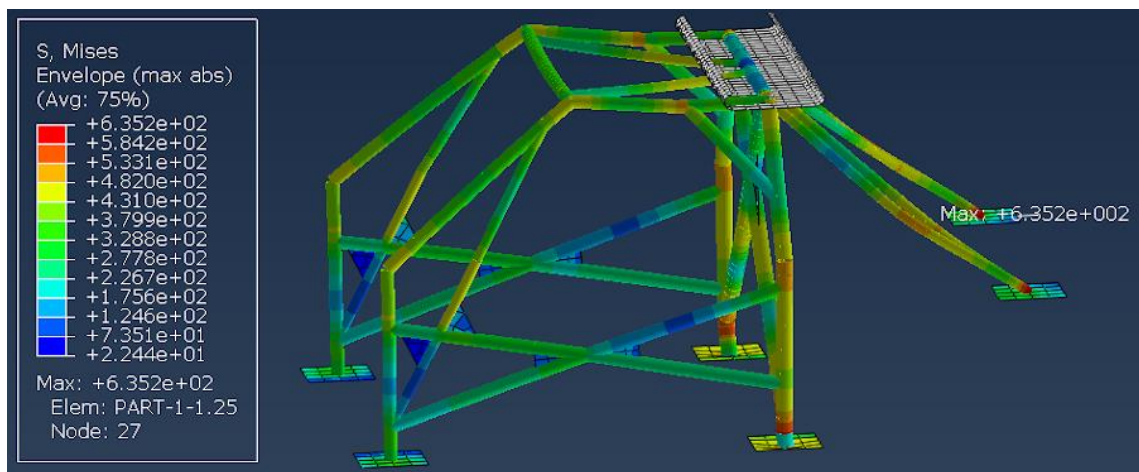


Figura 67. Distribución de tensiones en el momento de deformación máxima en el modelo optimizado.

Viendo la gráfica de reacciones-desplazamiento podemos ver cómo superamos la carga de 76.500 N, llegando hasta un máximo de 194.486 N, así que se cumple la normativa de carga a la que tenemos que someter la estructura para que el ensayo sea válido.

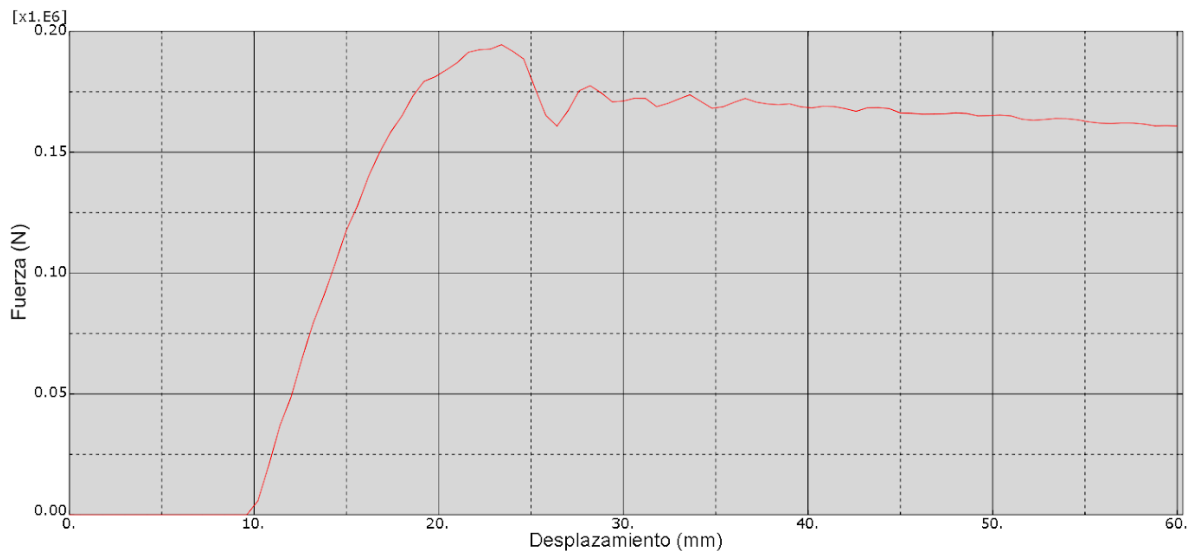


Figura 68. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo en el arco principal del modelo optimizado.

En cuánto a las deformaciones que tenemos en el momento de actuación de la carga impuesta por la norma, obtenemos un valor de la gráfica reacciones-desplazamientos de 13,2 mm que si le restamos los 9,6 mm de desplazamiento de la placa en vacío, se traducen en una deformación en el eje de aplicación de la carga de 3,6 mm, que se encuentra muy por debajo de los 50 mm de deformación máxima permitida.

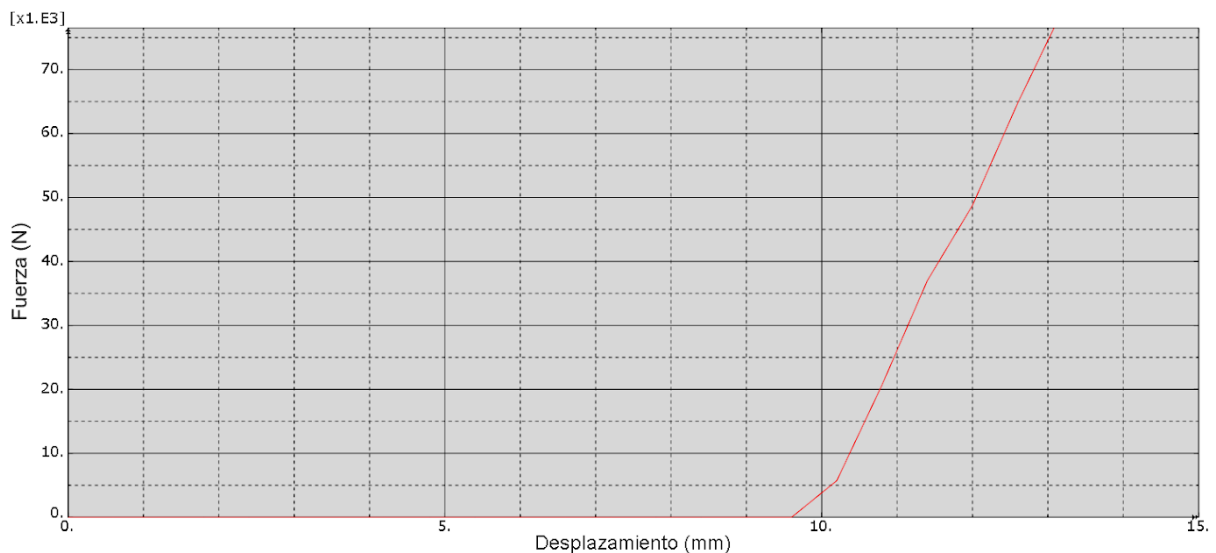


Figura 69. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo lateral en el arco principal en el modelo optimizado, ajustando al valor de carga y el desplazamiento de los ejes.

En el momento de carga que nos impone la normativa de 76.500 N, tenemos una tensión máxima de 450,6 MPa, justo por encima del límite elástico por lo que plastificará pero estamos lejos del límite de rotura de 700 MPa.

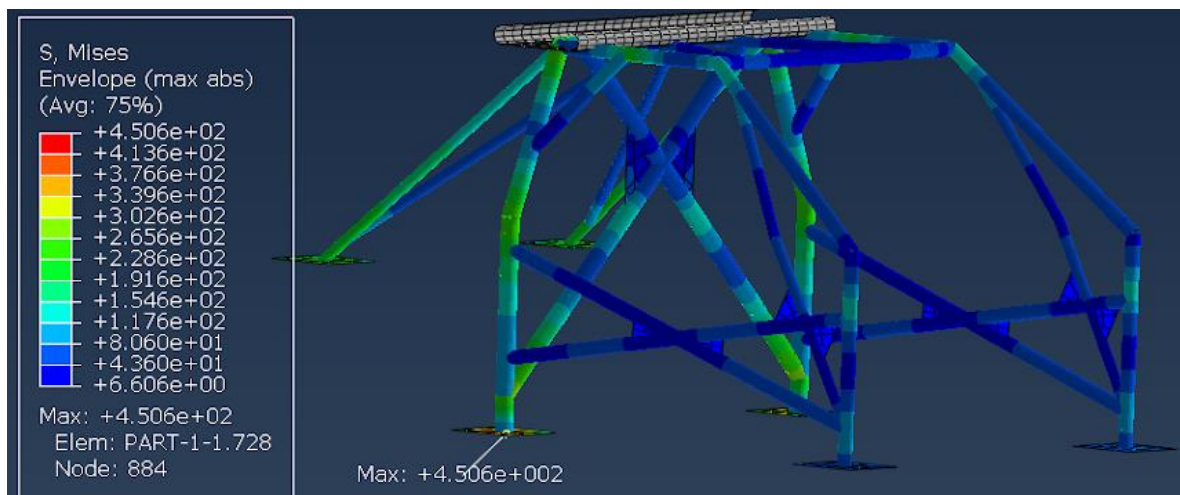


Figura 70. Estado tensional con carga de 76.500 N del modelo optimizado.

12.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE CARGA EN EL ARCO DELANTERO DE SEGURIDAD DEL MODELO OPTIMIZADO.

En este ensayo en el step 0,098 alcanzamos el límite de deformación que marca la normativa con un valor de 98,92 mm, ya que en el siguiente step sobrepasamos los 100 mm de deformación en el eje de aplicación de la carga.

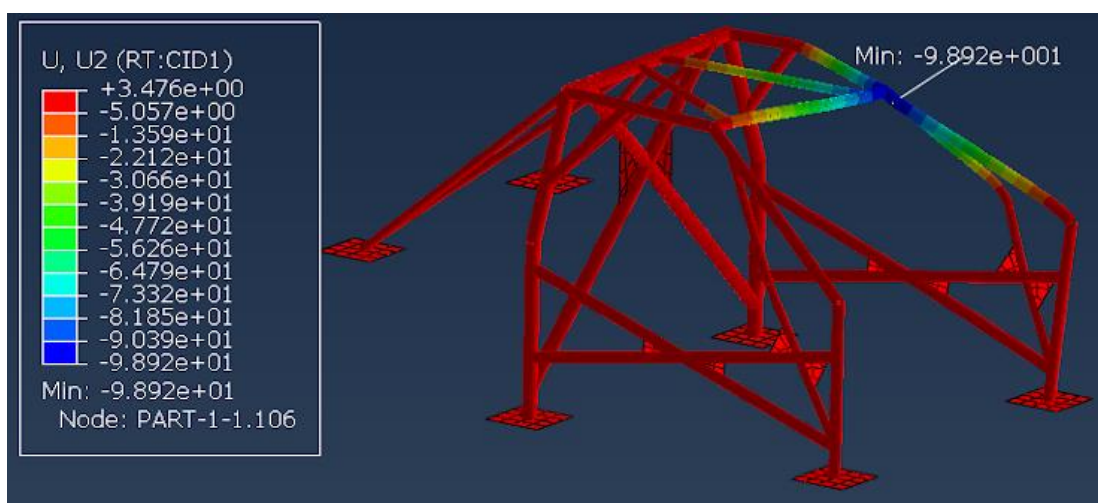


Figura 71. Deformaciones del modelo optimizado en situación límite de deformación máxima (100 mm).

Vamos a ver para el step anteriormente señalado en que estado tensional se encuentra la estructura. Vemos cómo se alcanza un valor máximo de tensión de 616,6 MPa.

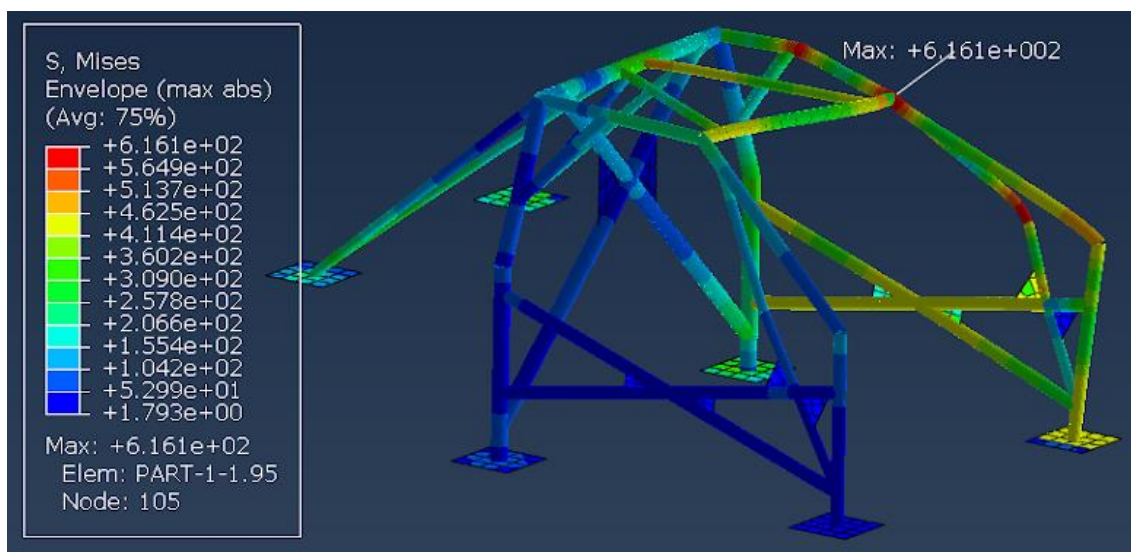


Figura 72. Distribución de tensiones en el momento de deformación máxima en el modelo optimizado.

Para cerciorarnos de que el ensayo se realizado adecuadamente, debemos ver en la gráfica reacciones-desplazamiento que alcanzamos el valor de la carga que nos impone la normativa de 35.700 N, que como podemos ver en la figura 83 se supera y alcanzamos un máximo de 39.018,5 N.

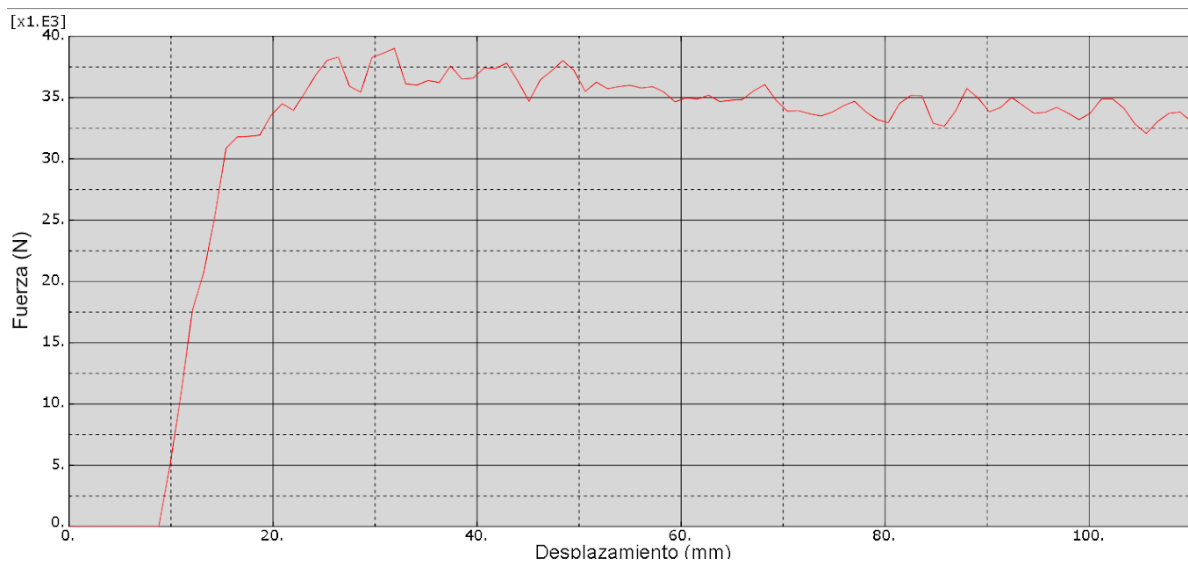


Figura 73. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo en el arco frontal del modelo optimizado.

Nos quedaría conocer el valor de deformación que tenemos cuando aplicamos 35.700 N. Si ajustamos la gráfica anterior vemos como esta carga tiene lugar en el momento en que la placa se desplaza 23,4 mm, lo que quiere decir que, restándole los 8,8 mm que se desplaza en vacío hasta contactar con la estructura, nos produce una deformación de 14,6 mm como vemos en la figura 84 que aparece a continuación.

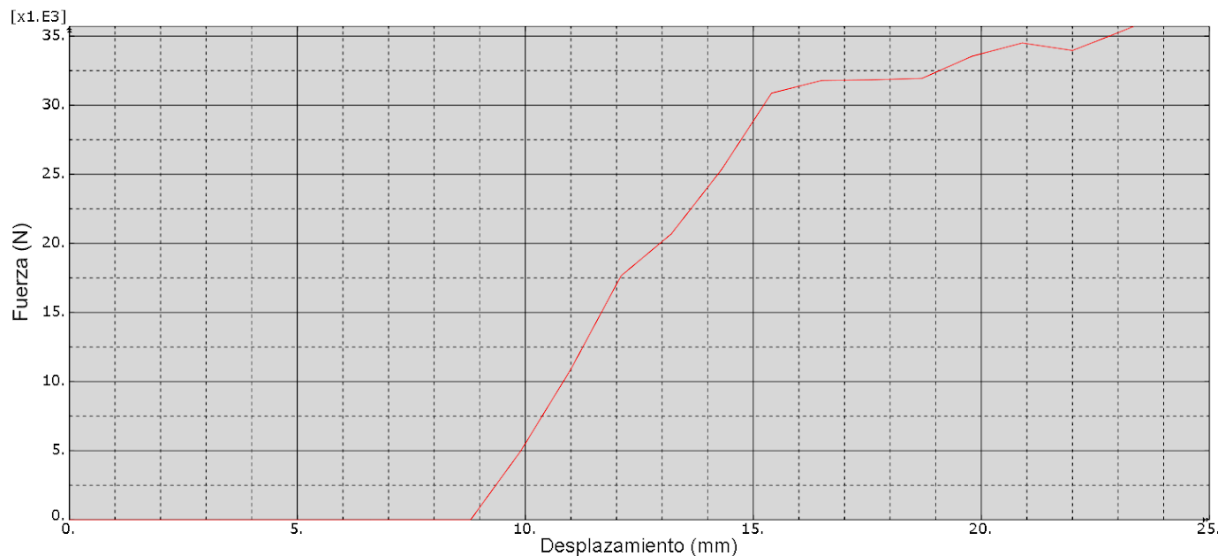


Figura 74. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo en el arco frontal en el modelo optimizado, ajustando al valor de carga y el desplazamiento de los ejes.

En cuanto a tensiones, observamos cómo se encuentra la estructura en el momento de aplicación de la carga de 35.700 N que tiene lugar en el step 0,03. Vemos en la figura 85 como la tensión máxima que nos aparece es de 527,8 MPa, por lo que cumplimos los requerimientos de la normativa ya que no llegamos a la rotura de ninguna parte de la estructura. Tendremos plastificación en algunas de las barras al sobrepasar el límite elástico.

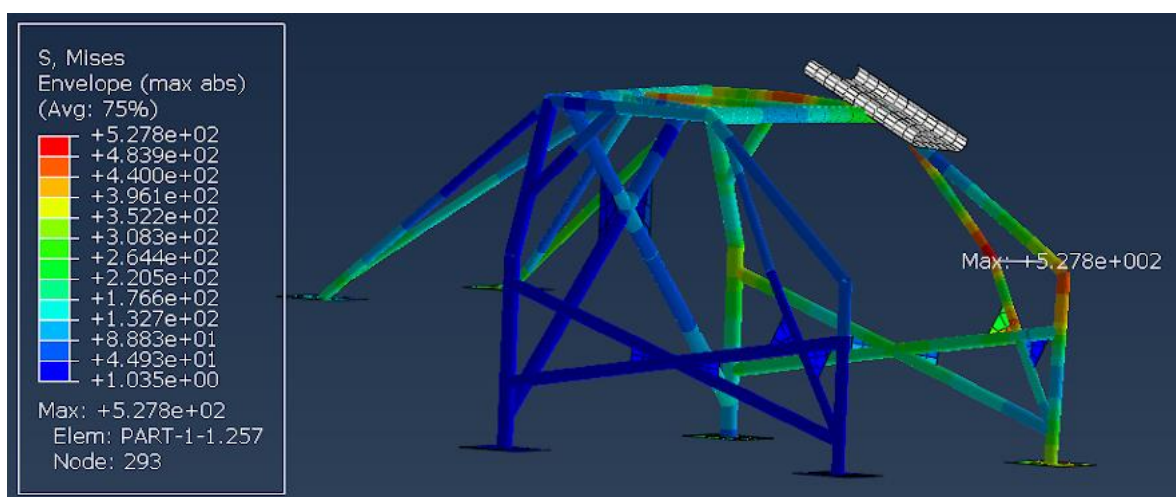


Figura 75. Estado tensional con carga de 35.700 N del modelo optimizado.

12.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE CARGA LATERAL EN EL ARCO PRINCIPAL DE SEGURIDAD DEL MODELO OPTIMIZADO.

Nos queda ver el comportamiento de la estructura optimizada frente al caso más crítico de carga como es el test lateral.

En este ensayo vemos como la deformación máxima tiene lugar en el step 0,093 con un valor de 49,68 mm. En el siguiente step sobrepasamos la deformación de 50 mm, que es el máximo que nos dice la norma.

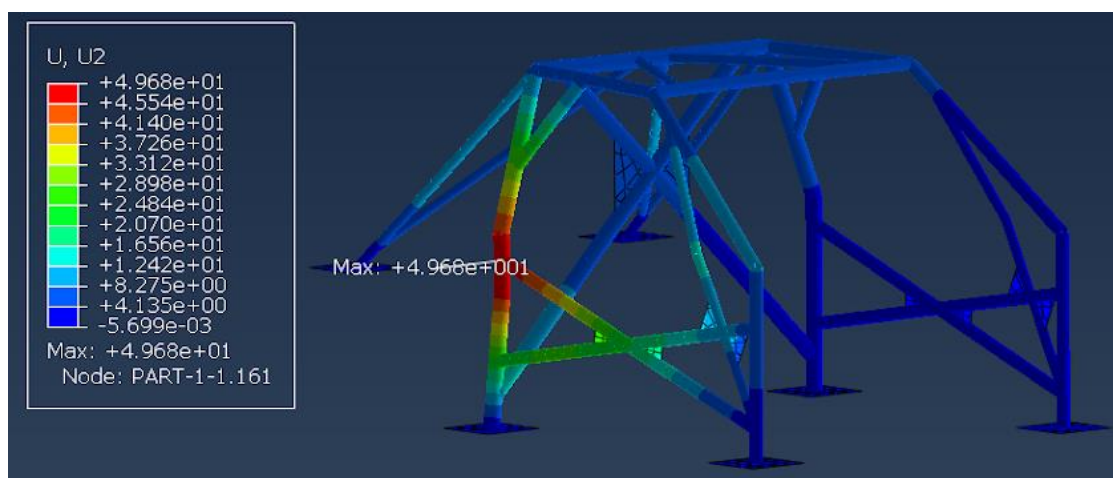


Figura 76. Deformaciones del modelo optimizado en situación límite de deformación máxima (50 mm).

Vamos a ver el estado tensional en el que se encuentra la estructura en el momento de máxima deformación. La tensión máxima que nos encontramos es de 534,4 MPa, superior al límite elástico, por lo que parte de la estructura plastificará pero no tendremos ninguna rotura en la estructura.

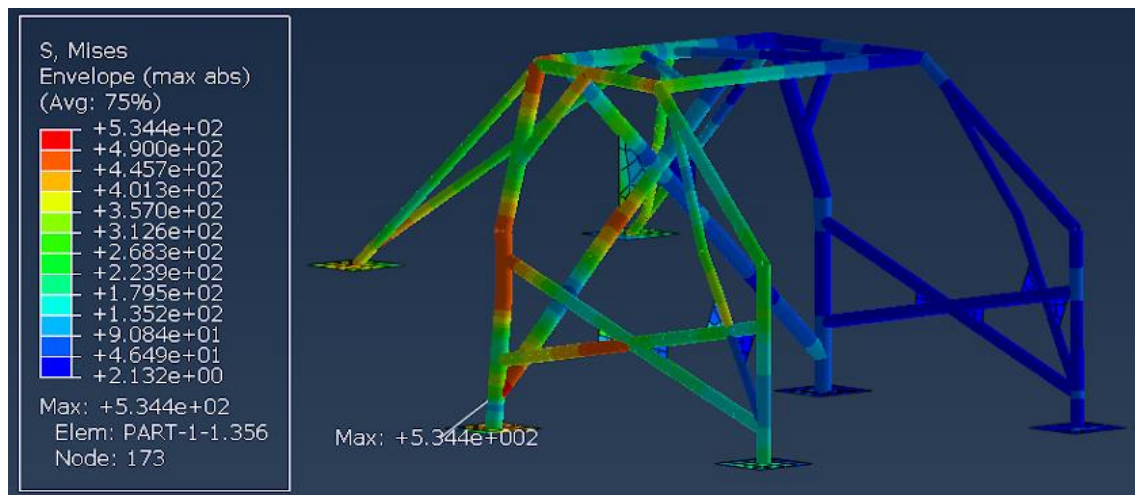


Figura 77. Distribución de tensiones en el momento de deformación máxima en el modelo optimizado

Para asegurarnos de que llegamos a la carga requerida por la norma durante el ensayo, vamos a ver la gráfica de desplazamiento-reacciones, de la figura 87. Podemos ver como sobrepasamos los 35.700 N de carga, obteniendo un máximo de 36.004,9 N. Así podemos ver que cumplimos los requerimientos de la norma.

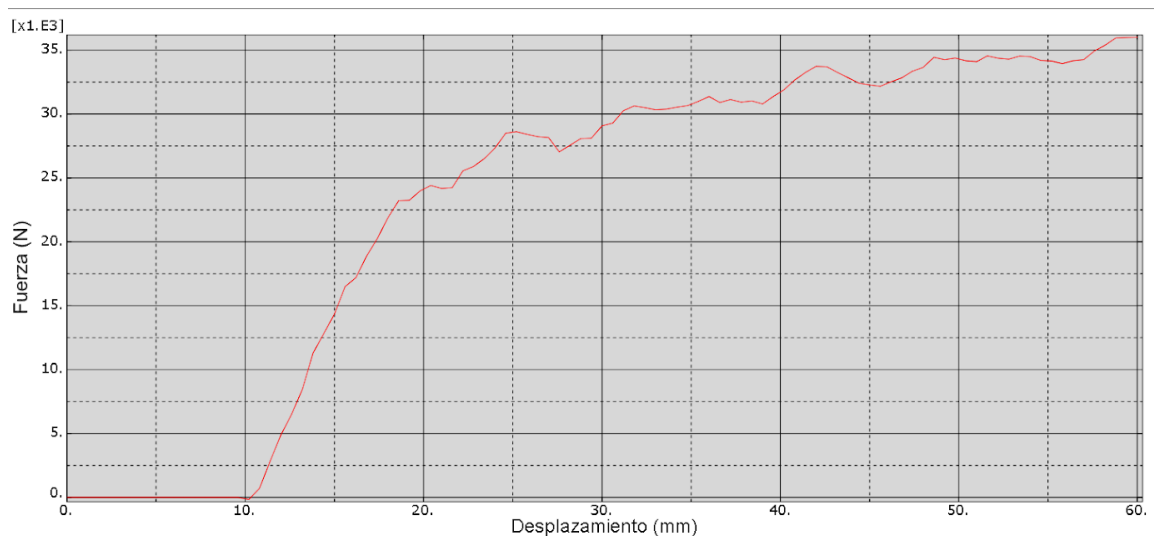


Figura 78. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo lateral en el arco principal del modelo optimizado.

Otra parte importante es conocer la deformación en el momento que aplicamos la carga de 35.700 N. Mediante la anterior gráfica y ajustando los ejes, como vemos en la figura 89, alcanzamos 58,5 mm de desplazamiento de la placa, que se traduce en una deformación máxima de 48,9 mm, restándole al desplazamiento de la placa total los 9,6 mm de desplazamiento en vacío hasta que contacta con la estructura.

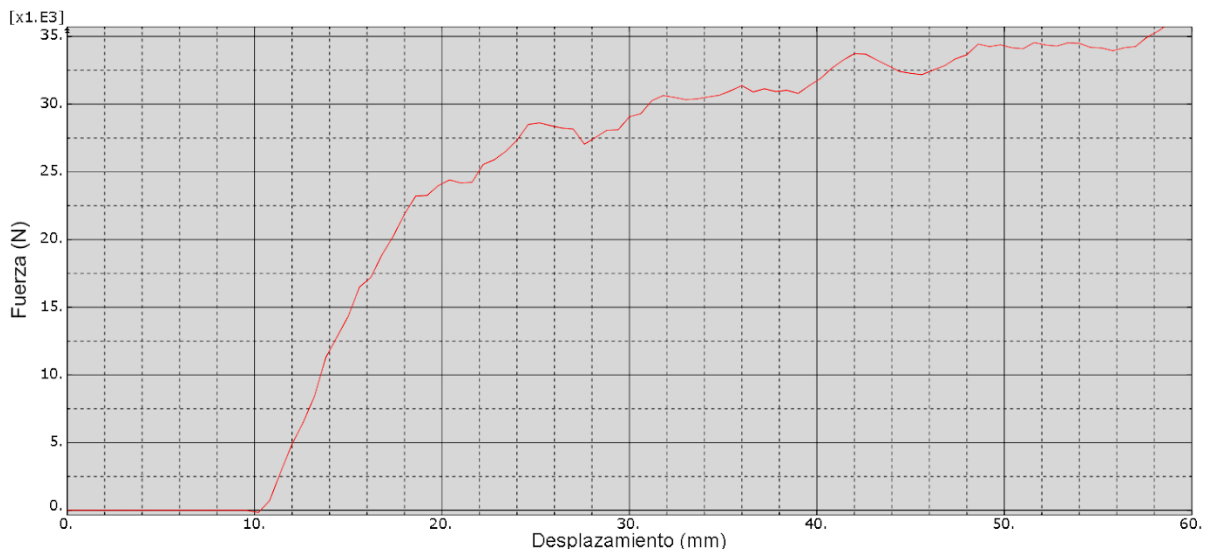


Figura 79. Gráfica reacciones-desplazamientos del ensayo lateral en el arco principal en el modelo optimizado, ajustando al valor de carga y el desplazamiento de los ejes.

Debemos observar el momento en el que se aplica la carga lateral de 35.700 N, y así asegurarnos de cómo se encuentra tensionalmente la estructura en el momento de aplicación de la carga. Conociendo en que momento se produce esta aplicación de la carga mediante la gráfica de reacciones-desplazamientos, podemos ver en ese instante el estado tensional mediante la siguiente figura 86. Podemos ver como la tensión máxima es de 538,3 MPa, por lo llegaremos a zonas dónde la estructura plastificará pero no llegaremos a la rotura por lo que cumplimos la normativa.

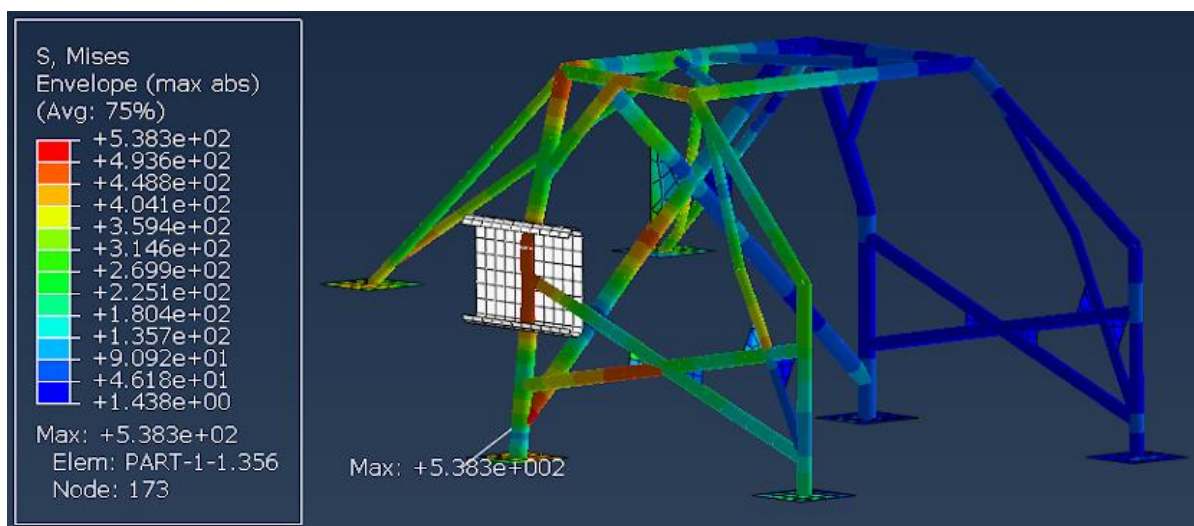


Figura 80. Estado tensional con carga de 35.700 N del modelo optimizado.

12.4. RESUMEN DE RESULTADOS DEL MODELO OPTIMIZADO.

En la siguiente tabla aparecen los resultados obtenidos de las simulaciones de nuestro modelo 2.

ENSAYO:	Fmáx [N]--Fnorma [N]	U(F.norma) [mm] -- Umáx [mm]	σ (F.norma) [MPa]
VERTICAL	194.486 > 76.500	3,6 < 50	450,6
FRONTAL	39.018,5 > 35.700	14,6 < 100	527,8
LATERAL	36.004,9 > 35.700	48,9 < 50	538,3

Tabla 4. Resumen de resultados del modelo optimizado.

En la anterior tabla podemos ver una diferenciación entre los diferentes ensayos, en la primera columna tenemos cada uno de los ensayos realizados.

En la segunda columna tenemos la comparación entre la fuerza máxima a la que llegamos en cada simulación y la fuerza que nos impone la normativa que debemos aplicar. Vemos como en todos los ensayos superamos la fuerza requerida. Se ha disminuido la rigidez de la estructura en los tres ensayos pero siguen cumpliendo la normativa, ajustándonos al ensayo lateral y frontal.

En cuanto a deformaciones podemos ver en la tercera columna como todas las deformaciones que aparecen en el momento de aplicación de la carga son menores que las máximas deformaciones permitidas. En los casos de carga vertical y frontal las deformaciones en el momento de carga son muy bajas comparando con las máximas permitidas por la norma, pero seguimos viendo como es el ensayo vertical el que nos delimita el diseño ya que es dónde se obtienen las mayores deformaciones.

Si nos fijamos en la cuarta columna aparecen las tensiones máximas que tenemos en la estructura cuando aplicamos las cargas de la normativa. Todas estas tensiones son superiores al límite elástico del material de 450 MPa, por lo que la estructura plastificará en diferentes partes y no se produce ninguna rotura ya que las tensiones son menores que el límite de rotura del material de 700 MPa.

Podemos decir que la estructura optimizada cumple los requerimientos en cuanto a tensiones y deformaciones que nos impone la normativa, además de que superan los valores de carga impuestos cerciorándonos así de que los ensayos se realizan adecuadamente.

Un aspecto no menos importante es que hemos conseguido reducir la masa de la estructura en un 20,54% del peso de la estructura inicial 2, por lo que hemos conseguido realizar una estructura mucho más competente de cara a la competición automovilística.

13. CONCLUSIONES.

En este proyecto se ha realizado el diseño y simulación de tres modelos diferentes de estructuras de seguridad para automóvil y la optimización de uno de ellos con el objetivo de homologarlos mediante la F.I.A., organismo regulador de este tipo de estructuras.

Las conclusiones que se han obtenido, mediante cuadros comparativos de resultados entre los tres modelos iniciales y el posterior estudio de resultados del modelo optimizado son, por una parte, que los comportamientos de las estructuras depende del diseño de los refuerzos obligatorios y las dimensiones de diámetro y espesor de las barras utilizadas.

Otra de las conclusiones es que las estructuras tienen un gran comportamiento en las pruebas de carga vertical y frontal que simulan accidentes por vuelco. Los valores de tensión, superan los límites elásticos, plastificando una pequeña parte de las estructuras pero alejadas de los límites de rotura. Los valores de deformaciones son muy bajos comparados con los máximos de la normativa y la carga máxima que sale en los ensayos indican una gran rigidez. En cambio, en la simulación de carga lateral, por ejemplo contra mobiliario como farolas, árboles o casos de accidente frontolateral, son los peores casos ya que nos encontramos con deformaciones cercanas a los límites que marca la norma y tensiones mayores que en las demás simulaciones. Podemos decir que la simulación carga lateral ha influido mayoritariamente en los diseños debido a los resultados tan ajustados en las simulaciones.

Por otro lado de cara a líneas futuras de trabajo sería importante estudiar el refuerzo de las estructuras para accidentes laterales y la optimización mediante diferentes materiales para mejorar peso y comportamiento.

14. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1]. Auto-data.net. 1995 Geo Metro Sedan 1.3 (70 CV).
<https://www.auto-data.net/es/geo-metro-sedan-1.3-70hp-10162>
- [2]. F.I.A. SPORT, TECHNICAL DEPARTAMENT (06/12/17). 2018 *homologation regulations for safety cages*.
<http://www.rfeda.es/documents/20185/776060/RH+ES+FIA>
- [3]. R.F.E. de A., DEPARTAMENTO TÉCNICO (27/05/16). Tipos de estructura de seguridad que se pueden dar en un turismo de competición.
http://www.rfeda.es/documents/20185/45671/tipos_estructuras_seguridad.pdf
- [4] TOTAL MATERIA. Propiedades del acero 25CrMo4.
<https://www.totalmateria.com/subgroup.aspx?LN=ES&id1=320094&db=S>