

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



"ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN  
TOPOLÓGICA DE LA ESTRUCTURA DE  
UN CAMIÓN HORMIGONERA"

TRABAJO FIN DE GRADO

Enero - 2024

AUTOR: Abraham Sarmiento García  
DIRECTOR: David Abellán López

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>5</b>
1.1. Historia y antecedentes .....	5
1.1.1. Científicos relevantes .....	5
1.1.2. Optimización por computador hasta la actualidad .....	8
1.1.3. Usos presentes y futuros .....	9
1.2. Usos y pasos que seguir en optimización topológica .....	11
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	<b>13</b>
3.1. Antecedentes .....	13
3.2. Uniones de los componentes .....	14
3.3. Metodología de análisis.....	16
3.3.1. Reducción de peso sin sacrificar prestaciones .....	16
3.3.2. Caso de cargas .....	16
3.3.3. Simplificación de la geometría .....	17
<b>4. ANÁLISIS POR MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS</b> .....	<b>21</b>
<b>5. OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE LA ESTRUCTURA</b> .....	<b>27</b>
<b>6. DISEÑO DE LAS NUEVAS ESTRUCTURAS</b> .....	<b>34</b>
<b>7. ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA Y SUS PUNTOS DESFAVORABLES</b>	<b>41</b>
7.3. Realización del análisis estático.....	41
7.4. Estudio de fuerzas y deformaciones .....	43
7.5. Resumen de resultados de deformaciones .....	60
<b>8. CONCLUSIONES</b> .....	<b>62</b>
8.3. Estudios futuros .....	63
<b>9. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>64</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Análisis algorítmico en el que se unen vértices de la forma más óptima y resistente (Amir Safdarian, 2013). .....	6
<b>Figura 2.</b> Deformación de una viga con agujero en forma de óvalo tras 4 días trabajando a compresión a altas temperaturas (Navina Waschinsky, 2021).....	7
<b>Figura 3.</b> Evaluación final de la deformación a través del tiempo de las vigas (Structural optimisation of diffusion driven degradation processes, 2021).....	7
<b>Figura 4.</b> Pieza optimizada e impresa en 3D (Jihong Zhu, 2020).....	9
<b>Figura 5.</b> Vigas porosas optimizadas y su resistencia a deformación (Jihong Zhu, 2020).....	10
<b>Figura 6.</b> Retocando chasis de moto impresa en 3D (La optimización topológica en la impresión 3D, 2020) .....	11
<b>Figura 7.</b> Pasos en la optimización de una pieza (Jihong Zhu, 2020) .....	12
<b>Figura 8.</b> Camión hormigonera y centro de gravedad aproximado. ....	14
<b>Figura 9.</b> Estructura de soporte de la hormigonera de un camión hormigonera. ....	15
<b>Figura 10.</b> Estructuras de la hormigonera ancladas al chasis del camión. ....	16
<b>Figura 11.</b> Cargas desfavorables de simulación preliminar. ....	17
<b>Figura 12.</b> Estructura superior donde realizaremos el estudio. ....	18
<b>Figura 13.</b> Parametrización de la simulación de fuerzas.....	19
<b>Figura 14.</b> Restricción de movimiento respecto al chasis. ....	20
<b>Figura 15.</b> Análisis por elementos finitos del software ANSYS (Giuseppe Mirlisenna, 2016) .....	21
<b>Figura 16.</b> Resultado de la estructura tras el análisis de malla.....	23
<b>Figura 17.</b> Restricción de eliminación material en la lámina superior de apoyo. ....	24
<b>Figura 18.</b> Análisis de deformaciones de la estructura.....	25
<b>Figura 19.</b> Análisis de eliminación de 10% de material en el mallado .....	28
<b>Figura 20.</b> Análisis de eliminación de 12% de material en el mallado. ....	29
<b>Figura 21.</b> Análisis de eliminación de 15% de material en el mallado. ....	30
<b>Figura 22.</b> Análisis de eliminación de 18% de material en el mallado. ....	31
<b>Figura 23.</b> Análisis de eliminación de 21% de material en el mallado. ....	32

<b>Figura 24.</b> Análisis de eliminación de 23% de material en el mallado.....	33
<b>Figura 25.</b> Nuevo diseño de la estructura con análisis de eliminación de 12% de material.....	35
<b>Figura 26.</b> Nuevo diseño de la estructura con análisis de eliminación de 15% de material.....	36
<b>Figura 27.</b> Nuevo diseño de la estructura con análisis de eliminación de 18% de material.....	37
<b>Figura 28.</b> Nuevo diseño de la estructura con análisis de eliminación de 21% de material.....	38
<b>Figura 29.</b> Nuevo diseño de la estructura con análisis de eliminación de 23% de material.....	39
<b>Figura 30.</b> Valores y restricciones del análisis estático.....	42
<b>Figura 31.</b> Análisis de fuerzas de la estructura de 12% de eliminación de material (zona frontal y posterior).....	43
<b>Figura 32.</b> Análisis de fuerzas de la estructura de 12% de eliminación de material (zona interior vista desde abajo).....	44
<b>Figura 33.</b> Análisis de deformaciones de la estructura de 12% de eliminación de material.....	44
<b>Figura 34.</b> Análisis de fuerzas de la estructura de 15% de eliminación de material (zona frontal y posterior).....	46
<b>Figura 35.</b> Análisis de fuerzas de la estructura de 15% de eliminación de material (zona interior vista desde abajo).....	47
<b>Figura 36.</b> Análisis de deformaciones de la estructura de 15% de eliminación de material.....	47
<b>Figura 37.</b> Análisis de fuerzas de la estructura de 18% de eliminación de material (zona frontal).....	48
<b>Figura 38.</b> Análisis de fuerzas de la estructura de 18% de eliminación de material (zona posterior y zona interior vista desde abajo).....	49
<b>Figura 39.</b> Análisis de deformaciones de la estructura de 18% de eliminación de material.....	50
<b>Figura 40.</b> Análisis de fuerzas de la estructura de 21% de eliminación de material (zona frontal y posterior).....	52

<b>Figura 41.</b> Análisis de fuerzas de la estructura de 21% de eliminación de material (zona interior vista desde abajo). .....	53
<b>Figura 42.</b> Análisis de deformaciones de la estructura de 21% de eliminación de material.....	54
<b>Figura 43.</b> Análisis de fuerzas de la estructura de 23% de eliminación de material (zona frontal). .....	55
<b>Figura 44.</b> Análisis de fuerzas de la estructura de 23% de eliminación de material (zona posterior y zona interior vista desde abajo).....	56
<b>Figura 45.</b> Análisis de deformaciones de la estructura de 23% de eliminación de material.....	57
<b>Figura 46.</b> Indicación de puntos de estudio de concentradores de tensión. ....	59
<b>Figura 47.</b> Indicación de puntos extra de estudio de concentradores de tensión. ....	60
<b>Figura 48.</b> Indicación de puntos de estudio de zonas de deformación.....	61



## 1. INTRODUCCIÓN

La optimización en la fabricación siempre ha sido un objetivo que alcanzar desde los primeros moldeados de metales con maquinaria.

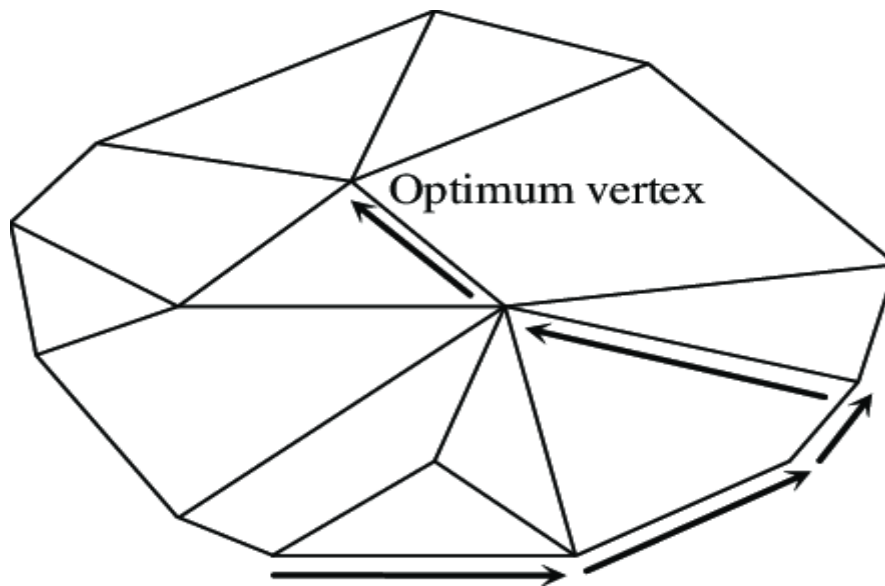
Reducir costes tanto de material como de fabricación nos ha llevado a una búsqueda incansable de como poder ahorrar los máximos recursos consiguiendo a su vez los resultados que queríamos o incluso superiores, tras un correcto análisis y modificación de ciertos aspectos y zonas [1].

Antes de la llegada de la computación, la optimización topológica se realizaba de forma más práctica y experimental, realizando cálculos más simples sobre la estructuras y se iban recreando diferentes modelos con ligeros cambios en su estructura, pero con la llegada de los ordenadores, se pudo empezar a recrear diferentes modelos y analizarlos sin tener la necesidad de recrearlos y experimentar con ellos, abaratando enormemente los costes que suponía que una empresa quisiera mejorar una estructura o máquina para reducir su gasto de material en futuras fabricaciones.

### 1.1. Historia y antecedentes

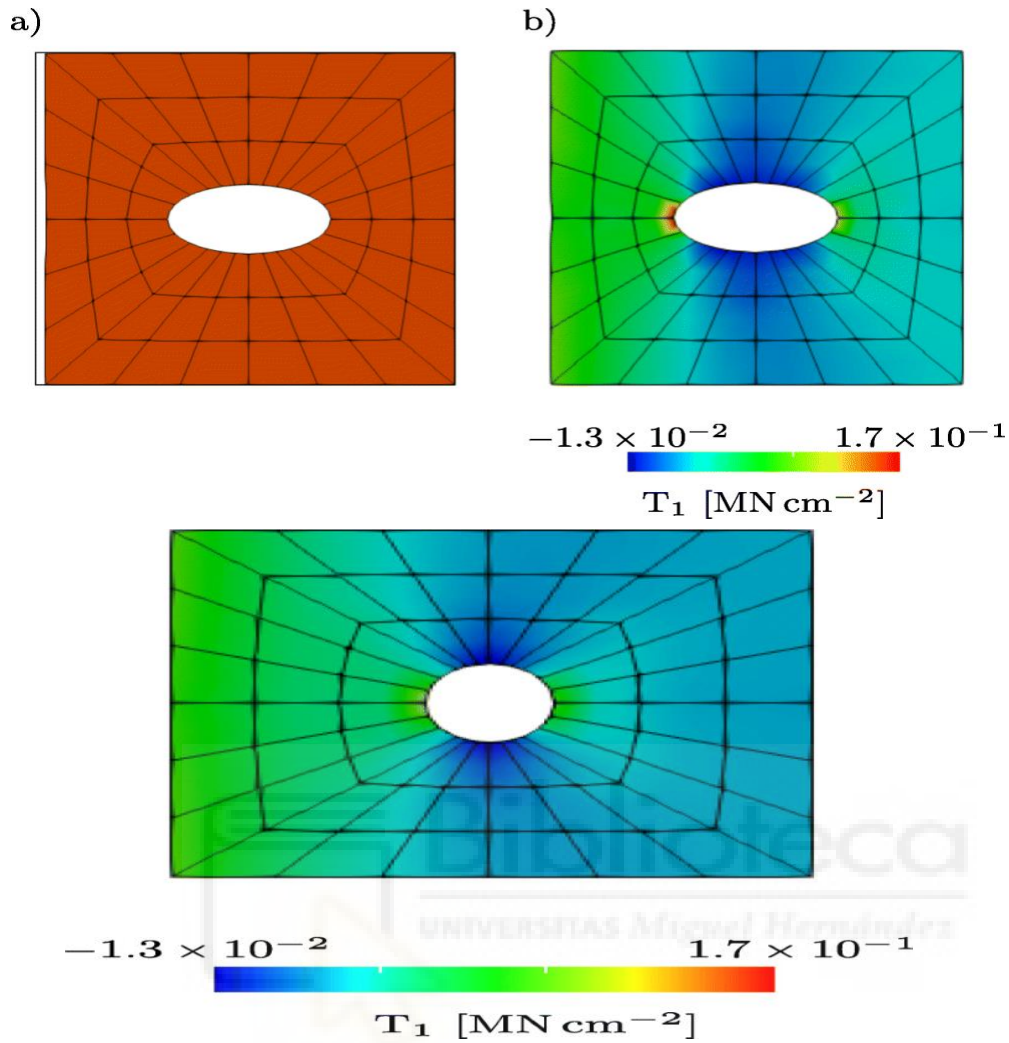
#### 1.1.1. Científicos relevantes

Para empezar a hablar de la optimización topológica actual primero tenemos que repasar quienes son los padres de los principios de la optimización por computación tal y como la conocemos. Uno de ellos fue en americano George Dantzig, el cual mediante su “simplex algorithm” consiguió programar un algoritmo en el que las líneas se alinearan formando polígonos bidimensionales o poliedros tridimensionales consiguiendo así la estructura óptima en cuanto a capacidades mecánicas y a su vez la que menos material necesitaba para su construcción. Este gran invento consiguió llevarlo al terreno económico y empresarial, mejorando los beneficios de muchas empresas [2].

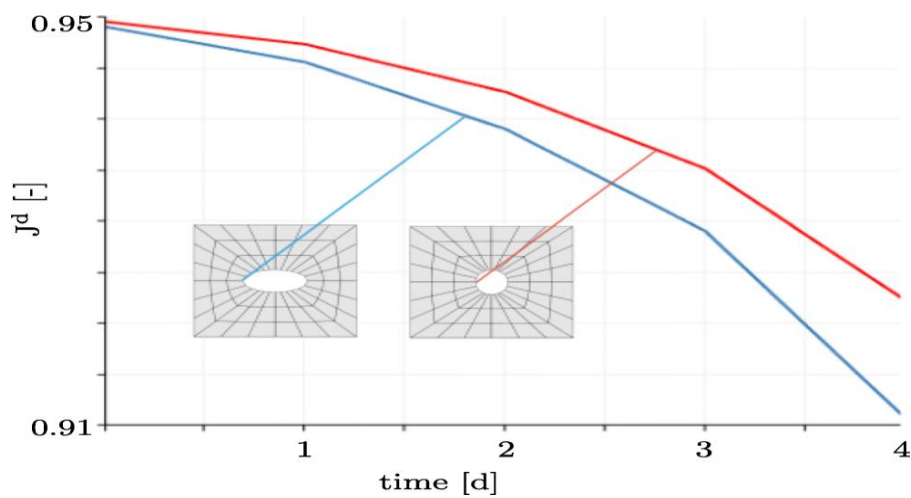


**Figura 1.** Análisis algorítmico en el que se unen vértices de la forma más óptima y resistente [3].

Otro gran ingeniero al cual debemos agradecer su gran aportación a la optimización topológica es el francés Gérard A. Maugin. Su obra más famosa es el libro *Continuum Mechanics Through the Twentieth Century* en el que realiza una exploración de los distintos métodos de optimización de mecanismos utilizados desde el renacimiento hasta el siglo XX y sus ayudas en el progreso. A su vez, una de sus mayores aportaciones es la inclusión de la termomecánica en la optimización de la geometría de las estructuras. Pudo ver como en ciertas formas, la deformación empezaba antes y en menores temperaturas que otras, por lo que optimizando ligeramente esas formas pudo reducir el desgaste tanto mecánico como térmico. Esto donde más se llevó a cabo fue para la reducción del pandeo en estructuras que se deformaban más fácilmente por el calor debido a ciertas formas en su estructura.



**Figura 2.** Deformación de una viga con agujero en forma de óvalo tras 4 días trabajando a compresión a altas temperaturas [4].



**Figura 3.** Evaluación final de la deformación a través del tiempo de las vigas [4].



### 1.1.2. Optimización por computador hasta la actualidad

En una primera instancia, la optimización topológica tal y como la conocemos comenzó a finales de los años 80, conforme las primeras computadoras fueron ganando potencia y la programación permitió insertar estructuras reales en formato digital. Uno de los lanzamientos más importante de esos años, fue en 1994 el lanzamiento al mercado de Altair OptiStruct, software que actualmente se ha ido actualizando hasta ser Altair HyperMesh, uno de los primeros softwares basado en elementos finitos pensado para la optimización de estructuras. Principalmente se utilizaba para la optimización en el sector automotriz, ya que es uno de los campos en los que el aligeramiento de peso más se nota en diferentes aspectos, tanto en comportamiento móvil del vehículo, como la aerodinámica, el consumo o la seguridad dependiendo del tipo de material. Tras ese lanzamiento se pudo observar rápidamente como la optimización topológica mediante ordenador no era algo exclusivo de vehículos móviles terrestres aéreos, sino que tenía infinidad de usos, siendo estructuras de chapa metálica soldada o atornillada, fundición o fresado o la nueva creación de los años 80 y 90, el modelado con plástico mediante inyección, que permitía un diseño y creación rápido y barato para piezas que no requerían de propiedades mecánicas excesivamente exigentes y duraderas.

En campos con el automotriz y el aeronáutico se implantaron rápidamente gracias a la facilidad para ahorrar costes. Gran parte de los coches americanos han sufrido una reducción del peso de su chasis de un 30% mientras en el aeroespacial, partes del avión como asientos y cabina han podido reducir su peso en casi un 50% [5].

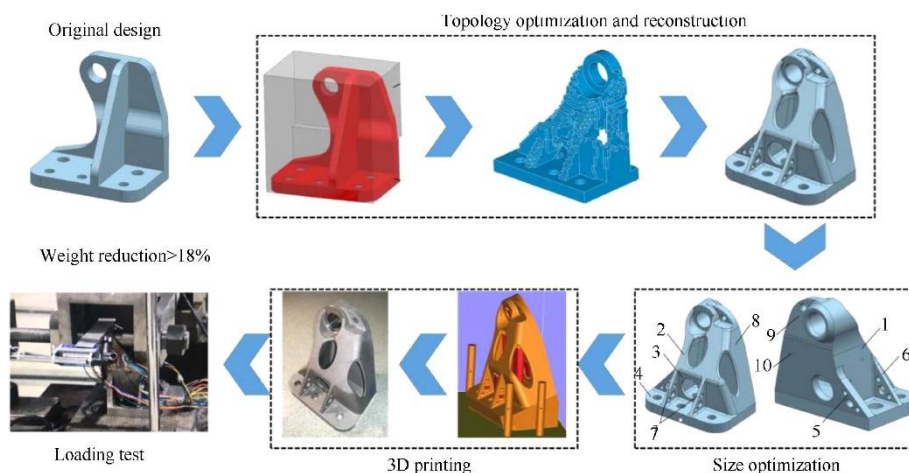
En los últimos años, con avances progresivos y nuevos de métodos y enfoques matemáticos, y la accesibilidad de la capacidad de procesamiento, la optimización topológica mediante computación ha sido cada vez más accesible en la industria. Industrias, como la automotriz, aeroespacial, industria del metal, energía.... En campos con el automotriz y el aeronáutico se implantaron rápidamente gracias a la facilidad para ahorrar costes. Gran parte de los coches americanos han sufrido una reducción del peso de su chasis de un 30% mientras

en el aeroespacial, partes del avión como asientos y cabina han podido reducir su peso en casi un 50%.

Varios de los softwares de optimización topológica utilizada en los campos anteriormente mencionados son comunes los que realizan el análisis mediante elementos finitos. Dentro de marcos CAD/CAE destacan algunos como Optistruct-Hyperworks (Altair), Ansys, Simula-Abaqus (Dassault), Simula-Tosca (Dassault), Fusion 360 (Autodesk), Genesis (VR&D), Inspire (Solidthinking), MSC Nastran (MSCsoftware), Generate-NX (Frustum -Siemens), Solidworks, CYPE (openBIM), entre otros [6].

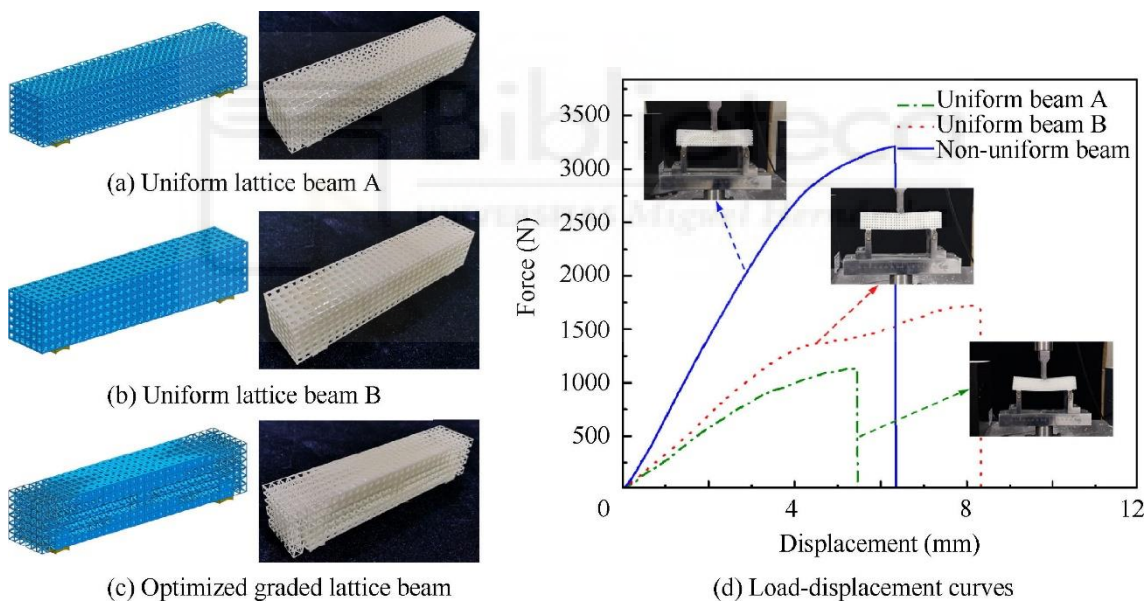
### 1.1.3. Usos presentes y futuros

Uno de los usos que más se está expandiendo en la actualidad es la impresión 3D mediante fabricación aditiva (impresión 3D desarrollo) [5]. La fabricación aditiva (AM), ha permitido crear piezas combinando materiales capa por capa. AM abre posibilidades para la fabricación de estructuras complejas, especialmente estructuras para optimización de topología. Sin herramientas adicionales, moldes y procesos complicados, la fabricación aditiva es flexible para cualquier diseño complejo, lo que no solo reduce los costes de producción, sino que también acorta el ciclo de producción, especialmente para la creación rápida de prototipos y la producción en series pequeñas. Además, el potencial de AM para estructuras complejas también fomenta el diseño de estructuras integrales que reducen la cantidad de piezas y procesos de ensamblaje [7].



**Figura 4.** Pieza optimizada e impresa en 3D [7].

Otro uso realmente importante en que la optimización topológica ha supuesto un gran avance es en las estructuras micro porosas, estas estructuras están ideadas para distribuir y reducir de una manera más eficiente las vibraciones y la carga térmica y energética. Sin embargo, su fabricación a través de técnicas convencionales es complicada y requiere mucho tiempo. Por otro lado, las estructuras reticulares complejas pueden ser fabricadas de manera rápida y precisa mediante técnicas de fabricación aditiva, como SLM. En muchos casos se puede reducir el peso entre un 15 y un 20% y su respuesta ante vibraciones y cargas mecánicas en un 25%, que ha logrado reducir la respuesta dinámica en un 25% y el peso en un 17% en comparación con el diseño original. Esta capacidad de fabricación ofrece nuevas oportunidades para mejorar la eficiencia y el rendimiento de las estructuras reticulares con un reducido tiempo de diseño y fabricación.



**Figura 5.** Vigas porosas optimizadas y su resistencia a deformación [7].

Otro gran avance que ha supuesto la unión de la fabricación aditiva junto a la optimización topología es la posibilidad de poder realizar una sola pieza sin la necesidad de un gasto extra de material o de soportes para la pieza impresa en 3D. Aunque este tipo de creaciones solo son factibles en piezas con una en V o en L en la que la propia figura forma parte de su soporte, se está investigando en como poder realizar modelos con los mínimos soportes posibles.

La integración de restricciones de voladizos en la optimización de topología para buscar estructuras auto-soportadas es uno de los temas de investigación actuales que más fuerza y relevancia están cogiendo. Al igual que las restricciones de escala de longitud, las restricciones de voladizos también se pueden imponer mediante proyección de densidad en la optimización de topología, programando una densidad límite inferior para la estructura diseñada. Solo se conservan aquellos que deben proyectarse a sólido y cumplir con las restricciones de voladizos. También se utilizó un enfoque adjunto para el análisis de sensibilidad para acelerar el procedimiento de cálculo, que se puede aplicar fácilmente a problemas de optimización estructural a gran escala. De manera similar, se propuso un procedimiento de filtrado de AM en el que, para simplificar el proceso de impresión, se simplifica la impresión capa por capa para excluir piezas difícilmente imprimibles o inútiles de la pieza optimizada final [8].



*Figura 6. Retocando chasis de moto impresa en 3D [9].*

## **1.2. Usos y pasos que seguir en optimización topológica**

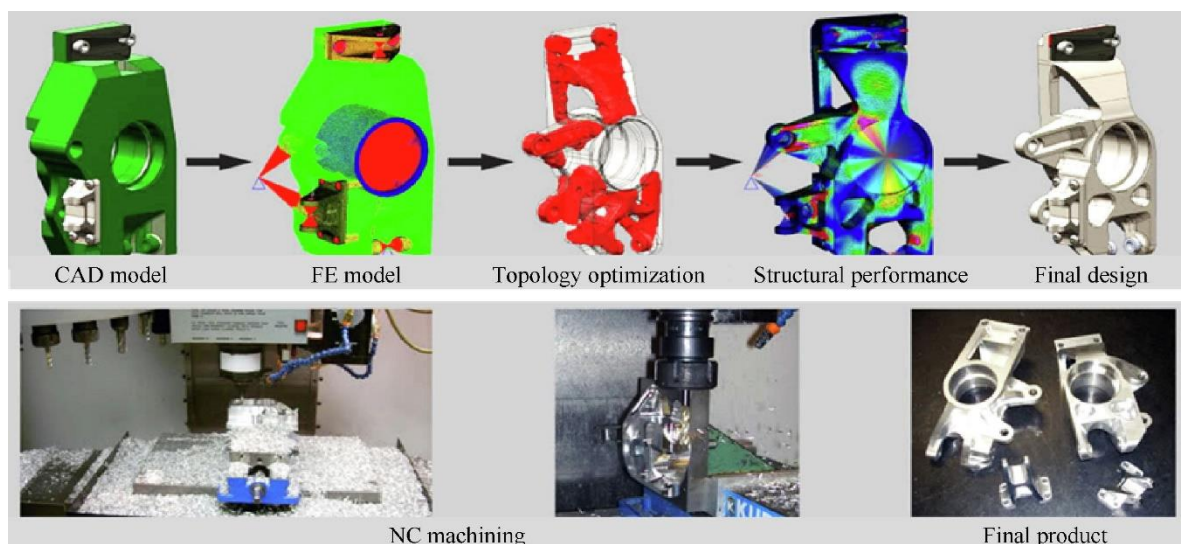
La optimización topológica es una metodología incluida en el ámbito del análisis estructural que se fundamenta en el estudio mecánico de un elemento o construcción. Sus principales propósitos se resumen en 4: Reducción de peso, mejora del comportamiento mecánico sin comprometer la integridad de la



estructura, lograr un mejor comportamiento térmico y termomecánico y aplicación a diferentes ámbitos consiguiendo reducción de costes. A diferencia de otros enfoques de optimización, la optimización topológica presenta un nuevo enfoque de diseño estructural destinado a aplicaciones donde el peso del componente resulta fundamental. Esta técnica busca identificar la configuración óptima de material en una estructura, eliminando material innecesario y manteniendo la resistencia y rigidez requeridas. Gracias a los softwares de computación y a una serie de procesos, esta metodología es fácilmente aplicable a cada vez más aspectos de la ingeniería y la arquitectura [10].

Para conseguir el objetivo de una pieza optimizada mediante softwares, se necesitan seguir una serie de procedimientos para que el resultado final sea el esperado y cumpla las necesidades [8]:

- Diseñar la geometría básica.
- Crear puntos de unión, juntas, contactos, etc.
- Asignar materiales a los diferentes componentes.
- Añadir las cargas para las simulaciones.
- Generar la simulación y estudiar los resultados.
- Rediseñar la geometría aliviando material.
- Preparar y exportar para la fabricación.



*Figura 7. Pasos en la optimización de una pieza [7].*

## 2. OBJETIVOS

Como caso concreto de este Trabajo, la finalidad de este será el análisis de la estructura que soporta la hormigonera en un camión hormigonera. Este tipo de camiones tienen la peculiaridad que tienen un centro de gravedad bastante elevado, ya que el fluido que lleva en su interior no está sobre una base recta y cercana al chasis como ocurriría en un camión convencional si no que está dentro de una estructura metálica de forma ovalada e inclinada, por lo que las fuerzas que tendrá que soportar la estructura serán más críticas y tendremos que estar más pendientes a la deformación, ya que al ser una estructura compleja de posicionar, no tiene tanta zona de apoyo sobre el bastidor como en los camiones con remolque convencional.

Gracias a ello, el objetivo de este Trabajo de Fin de Grado será la optimización de la estructura de un camión hormigonera, suponiendo una carga muy desfavorable como sería superponiendo una frenada y una curva y realizando diferentes simulaciones sobre esa carga teórica desfavorable para analizar donde serían las zonas donde la estructura no realiza esfuerzos y por tanto son factibles de aligerar material.

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1. Antecedentes

Antes de centrarnos en el análisis en sí, debemos para tener en cuenta la observación de las fuerzas laterales en el análisis de las cargas más desfavorables utilizadas para las simulaciones de deformación y resistencia. Esto es debido a que al llevar un fluido que se va desplazando con el movimiento del camión y ejerciendo fuerzas adicionales en la pared opuesta al giro del camión, es importante prestar atención en las deformaciones laterales debido a estas fuerzas, ya que, con el paso del tiempo, la fatiga y el desgaste del material, serán las fuerzas que más fácilmente puedas dañar la estructura de soporte de la hormigonera



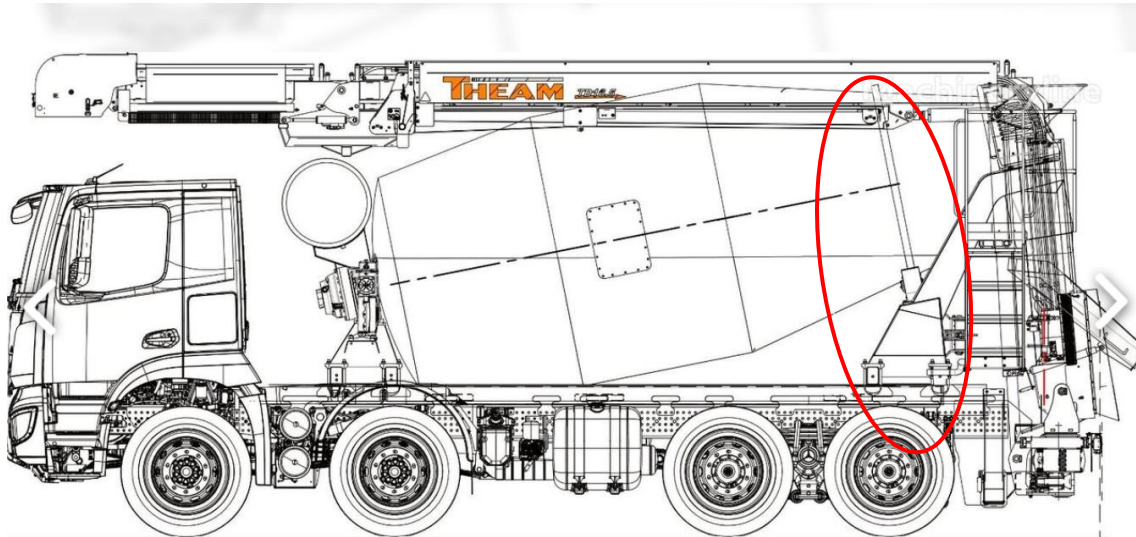
**Figura 8.** *Camión hormigonera y centro de gravedad aproximado.*

A su vez, tendremos en cuenta de que esta simulación se centrará en la deformación de la estructura de acero que soporta la hormigonera y que los puntos de tensión situados entre las juntas de las chapas serán obviados ya que estos se aliviarán a la hora de la construcción mediante cordones de soldadura ya que, debido a ligeras interferencias milimétricas en el dibujo, estos puntos de tensión están muy exagerados por el programa y no son reales ni representativos en el modelo de la realidad.

### **3.2. Uniones de los componentes**

Aunque no hemos incluido las uniones por pernos para simplificar el cálculo y no crear tensiones extras en los puntos donde irán introducidos los pernos, tanto del chasis con el bastidor, como las cartelas de fijación irán sujetas mediante uniones rígidas mediante pernos. Estos componentes han de ir cara contra cara. El método de unión por perno es la más eficiente y la que más fácil se puede desmontar en el caso de que queramos cambiar o sustituir alguna parte de la estructura por cierto desgaste o añadir más sujeción atornillando más pernos. A su vez, el camión tiene varias cartelas situadas a lo largo del bastidor, en la unión entre el bastidor del propio camión y el chasis sobre el que irán las sujetas las estructuras para la hormigonera. Estas cartelas se colocan sobre todo para fijar el movimiento lateral de la hormigonera, ya que, como hemos mencionado previamente, al ser un fluido y desplazarse por las paredes interiores, crean una gran fuerza en los giros laterales.

Para la unión del soporte sobre el que se apoya la hormigonera con la estructura unida al bastidor del camión, usaremos también uniones por perno para fijar las chapas, y, para eliminar los puntos de tensión en los bordes, en se usarán cordones de soldadura en las aristas en contacto.



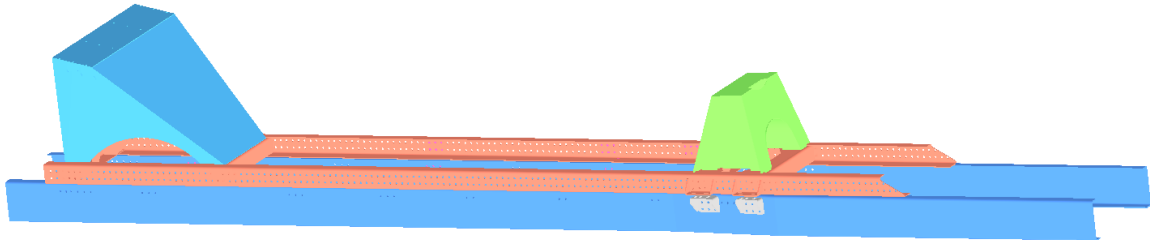
**Figura 9.** Estructura de soporte de la hormigonera de un camión hormigonera [11].

Nuestro caballete se compone en de 3 chapas verticales, las 2 exteriores actuarán de pilares de la estructura sobre la que colocaremos la hormigonera y la chapa central actuará de nervio, reforzando la estructura superior que será la que tendrá que soportar directamente el peso. En la parte frontal tendremos otra chapa apoyada sobre las 2 chapas verticales de los laterales. Esta chapa tendrá forma de trapecio escaleno, con una base algo más estrecha para encajar entre los 2 largueros del chasis y ampliándose conforme llegamos a la parte superior. En la parte trasera colocaremos una chapa con una forma parecida, trapezoidal que se va ampliando cuando llega a la zona más alta para unirse con la chapa que colocaremos en dicha zona. Esta placa será rectangular y tendrá una ligera inclinación para que los soportes de la hormigonera sean más fácilmente anclables a la estructura. En la parte exterior, unida a las chapas verticales laterales, se acoplan 2 pequeños refuerzos para evitar el movimiento y la deformación de la chapa superior sobre la que irá la hormigonera.

Para dicha estructura utilizaremos el acero S700, ya que en su acero bastante utilizado en la industria para construir grúas, semirremolques y otros



accesorios añadidos a camiones y tractores. Este acero es ideal ya que tiene un límite elástico muy superior a los aceros estructurales normales y a su vez una alta resistencia.



*Figura 10. Estructuras de la hormigonera ancladas al chasis del camión.*

### **3.3. Metodología de análisis**

#### **3.3.1. Reducción de peso sin sacrificar prestaciones**

Una vez definido la estructura y el tipo de material y uniones que vamos a utilizar para la estructura vamos a desarrollar el siguiente paso en nuestro estudio, el cual consiste en la parametrización de una serie de fuerzas desfavorables, las cuales se ejercerán en los 3 ejes, para a partir de ellas, poder estudiar cómo se comportan nuestras diferentes estructuras que diseñaremos más adelante.

Las estructuras que analizaremos en los pasos posteriores no podrán superar los límites de tensión del material ni la deformación admisible, por lo que es importante realizar este paso de forma precisa para que los análisis futuros no tengas errores que puedan desviar los resultados de nuestro estudio.

#### **3.3.2. Caso de cargas**

Como primer paso para el estudio de las propiedades, hemos supuesto un conjunto de fuerzas muy desfavorables para el análisis de la estructura. En dicha suposición hemos considerado la fuerza vertical hacia debajo del peso propio de la estructura, la hormigonera y la carga de la misma junto a una fuerza horizontal hacia delante, suponiendo una frenada en el que la hormigonera y su carga generan un gran fuerza a tracción sobre la estructura y puede comprometer la

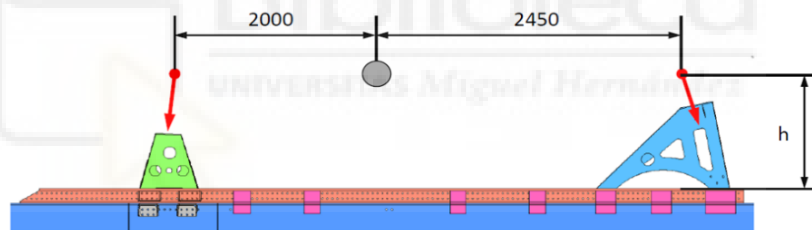
solidez de las uniones y a su vez, una fuerza lateral simulando una curva y generando una fuerza centrífuga añadida a la propia fuerza centrípeta sobre toda la estructura y al peso del fluido extra sobre el interior lateral de la hormigonera.

La carga desfavorable la suponemos a una altura de 1,05 m aproximadamente, ya que a esa altura aproximado donde estará el centro de masas de la carga. A su vez la posición longitudinal la supondremos en un punto en el que la carga caiga perpendicular a la placa superior, para hacer la distribución de tensiones lo más simétrica y óptima posible, y no nos genere tensiones irregulares en distintas zonas alejadas del soporte de la hormigonera.

## Estimación de las cargas

Cargas resultantes:

		Fuerza longitudinal	Fuerza lateral	Fuerza vertical
Caballete delantero	Paso por curva	28950 N	36091 N	-188000 N
	Frenada	66550 N	0 N	-188000 N
Caballete trasero	Paso por curva	-28950 N	32484 N	-136200 N



Fuerzas aplicadas de forma remota sobre los caballetes. Altura del punto de aplicación:  $h = 1054$  mm medido desde el sobrechasis

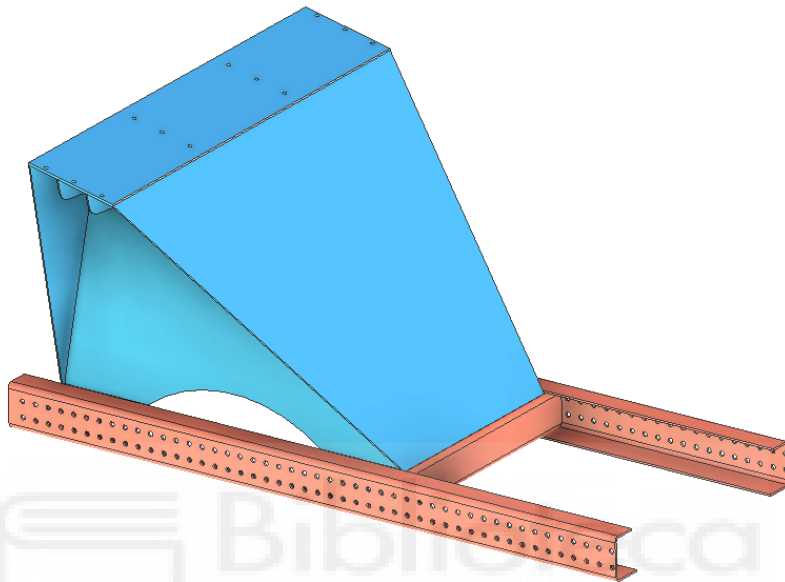
**Figura 11.** Cargas desfavorables de simulación preliminar.

### 3.3.3. Simplificación de la geometría

Dado que usaremos el caballete trasero para hacer el análisis, en primer lugar, editaremos el soporte para solo centrarnos en ese tramo, obviando el caballete delantero, el cuál seguiría los mismos procedimientos para realizar la optimización de dicha estructura. También nos centraremos en las 2 partes más importantes del análisis de la estructura, nuestra propia estructura y el chasis adicional unido al bastidor del camión sobre el que ira anclada la estructura.

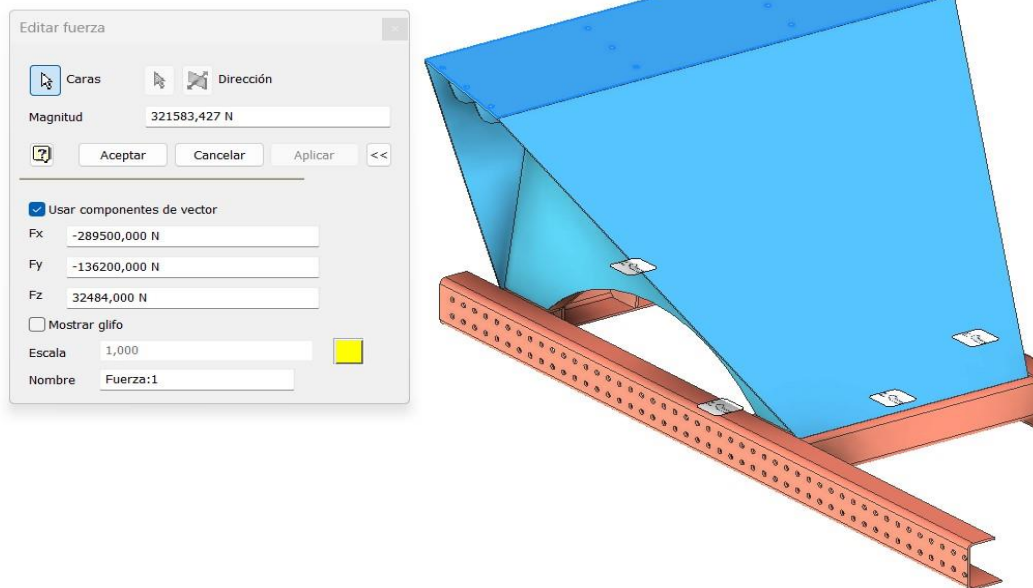
Esta simplificación la hacemos para reducir piezas extras que no aportaran información a nuestro análisis, como el mismo chasis del camión, que lo supondremos como una estructura plana rígida sobre lo que se colocará el resto

de los accesorios al camión, cartelas de unión entre el propio bastidor y el chasis y sus elementos de sujeción. A su vez, también eliminaremos los principales agujeros en la estructura, utilizados para los sistemas de lubricación de los rodamientos que sujetan los diferentes elementos de nuestra estructura y del soporte superior de la hormigonera.



**Figura 12.** Estructura superior donde realizaremos el estudio.

Una vez realizada esta simplificación, el siguiente paso será la introducción de la carga más desfavorable en la estructura. Con este procedimiento iniciamos el estudio de cargas en el cuál realizaremos nuestro análisis. Debemos tener en consideración una de las premisas explicadas anteriormente, y es la de aplicar la fuerza perpendicular a la placa superior de acero de la estructura, ya que es en dicha zona sobre la que caerá el peso de la hormigonera y donde se colocará el soporte de esta. Como vemos a continuación, esta zona se ha resaltado para comprobar que nuestras fuerzas son aplicadas en la zona deseada.

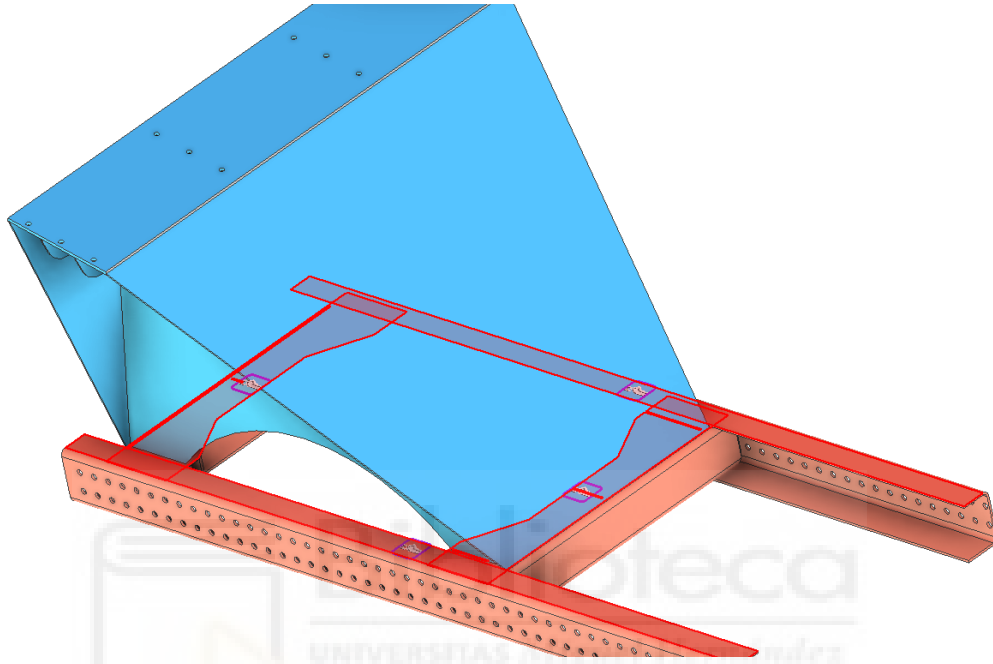


**Figura 13.** Parametrización de la simulación de fuerzas.

Como ya hemos mencionado previamente, usaremos un acero bastante utilizado en maquinaria para la industria como es el acero S700, ya que tiene un límite elástico muy elevado y una resistencia a rotura igualmente alta. Este punto será clave ya que cuando analicemos los puntos de tensión, tendremos que comprobar si la tensión de nuestro acero es excesiva como para poder ocasionar una posible fractura temprana tras la aplicación de nuestras fuerzas.

Así mismo, otro punto clave en el análisis es la selección de restricciones para eliminar puntos de tensión extra o hipótesis que consideramos ciertas, como que la estructura será correctamente atornillada y soldada al chasis sobre el que se dispondrá y no habrá movimientos sobre él. Esta parte también se realiza para reducir los posibles teóricos puntos de tensión que puedan aparecer durante el estudio debido a mínimos fallos de diseño durante el modelado, ya que puntos o zonas que estén a décimas de milímetro separadas unas de otras o atravesando unas a otras (algo imposible en la realidad), marcarán puntos extremadamente altos de tensión siendo estos irreales e imposibles, al tener nuestra estructura bien fijada al chasis. Como indicamos a continuación, las zonas que hemos restringido son los puntos de contacto de la base de la estructura con la parte superior del chasis sobre el que irá colocado. Con estas

restricciones nos aseguramos de que el análisis se realizará solo en las zonas deseadas y nos evitaremos información equívoca extra. En nuestro caso, la base de la estructura contará con 4 zonas, formando un cuadrado con huecos en la estructura por la aligeración, que irán unidas a los 2 largueros y los 2 travesaños que forman la estructura del chasis en la zona posterior.



**Figura 14.** Restricción de movimiento respecto al chasis.

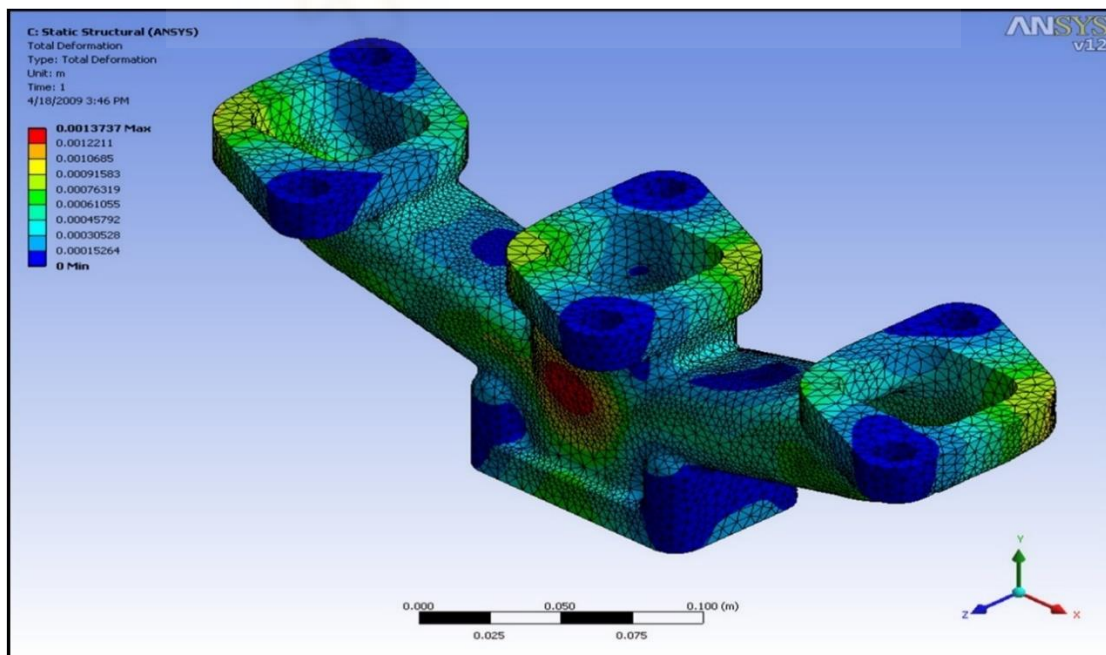
## 4. ANÁLISIS POR MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Una vez realizados todos los pasos previos, podemos empezar con el análisis por elementos finitos sobre el que tratara nuestro estudio.

La base principal del estudio por elementos finitos se basa en la división del sistema que queremos optimizar en elementos mucho más pequeños y con geometrías simples para que sea fácil su mallado. Cada punto donde se unen los diferentes elementos finitos entre ellos se denomina nodo, que serán los puntos para evaluar en el análisis mediante diferentes ecuaciones se calcula automáticamente el programa.

Este análisis computacional es el más utilizado para diferentes estructuras ya que es un método ampliamente desarrollado por diversos softwares es los que con una sencilla programación se calcula fácilmente el comportamiento de cualquier estructura o pieza [12].

Este sistema es utilizado diariamente en análisis de estructuras o materiales para simplificar estructuras o conocer su comportamiento en zonas concretas.



*Figura 15. Análisis por elementos finitos del software ANSYS [12].*

Como hemos mencionado previamente, nosotros también realizaremos un análisis por elementos finitos de la estructura con unos parámetros iniciales concretos. Estos nodos creados para el análisis deben tener un tamaño definido entre cierto rango de valores, los cuales no deben ser muy grandes; ya que esto nos causaría error al intentar definir zonas con perfiles con cortes bruscos, perfiles muy afilados o zonas curvadas mediante polígonos rectos grandes, debido a que no podrían llegar a definir dichas zonas y quedarían zonas muy imprecisas, huecas o simplemente sería imposible que se pudiera definir la geometría; ni tampoco muy pequeños, ya que esto generaría unos tiempos de procesamiento excesivos para una estructura de gran tamaño que no necesita esa precisión ni podemos acceder a una potencia de computación necesaria en la que los tiempos de espera sean ampliamente reducidos [13, 14].

Una vez tenemos claro sobre que rangos de valores el programa puede tener una alta precisión sin necesitar largas horas de cálculo, elegimos cuál puede ser un buen rango. En este caso, los parámetros seleccionados han sido los siguientes:

#### CONFIGURACIÓN DE MALLA

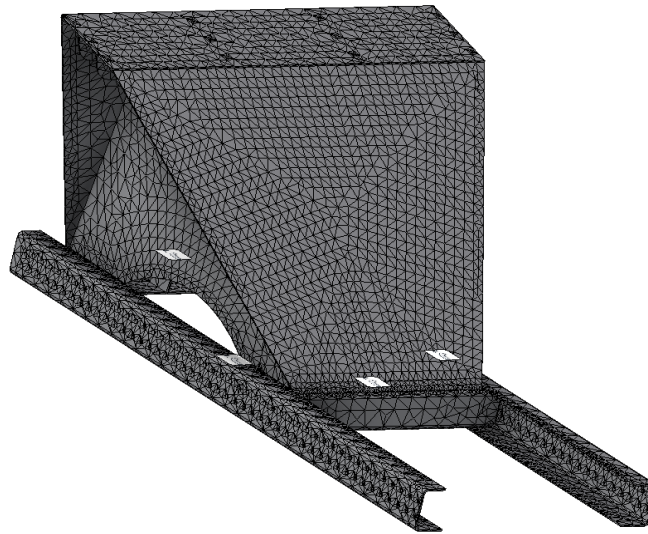
Tamaño medio de elemento (como fracción de la longitud del cuadro delimitador)	0,350
Tamaño mínimo de elemento (como fracción del tamaño medio)	0,500
Factor de modificación	1,5
Ángulo máximo de giro	60°

A su vez aceptamos la opción de crear elementos de malla curva para las zonas donde haya un chaflán en la estructura, que pueda ser definida correctamente.

Una vez realizados estos parámetros, el resultado del análisis nodal mediante el método de elementos finitos sería el siguiente:



Nodos:125703  
Elementos:62376



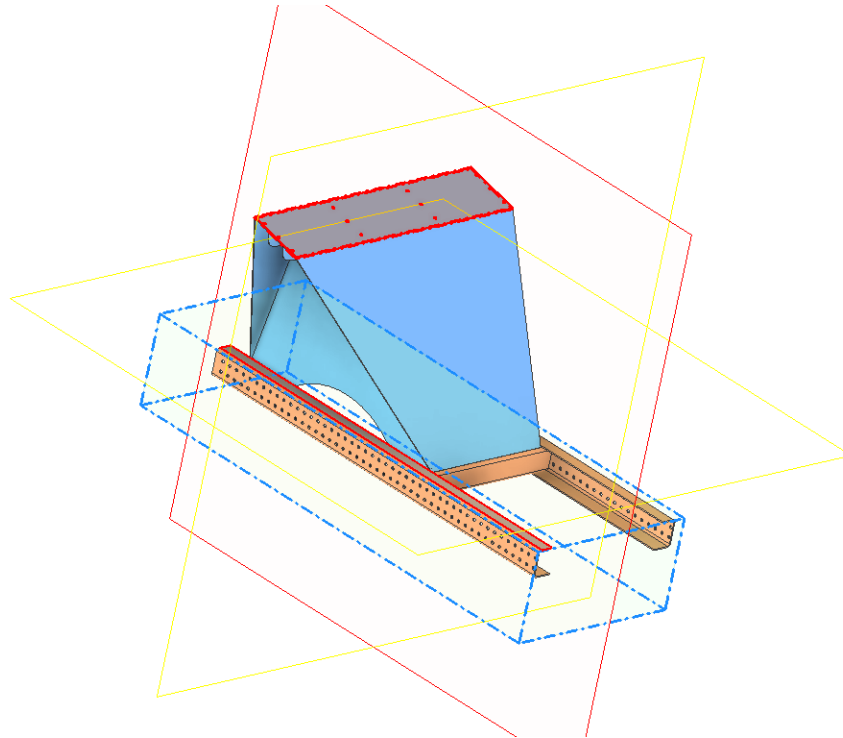
**Figura 16.** Resultado de la estructura tras el análisis de malla.

Como podemos ver en la imagen, nuestra estructura se ha dividido en miles de polígonos simples, en este caso triángulos, se van uniendo entre sí mediante nodos, y que van formando una red que cubre por completo la estructura para su posterior análisis. Como se ve en la parte superior, el número total de nodos es en torno a 125.000, un número suficiente para un correcto análisis.

Una vez tengamos realizado el primer paso de nuestro análisis por elementos finitos, en este caso la descripción de la estructura mediante mallado con elementos de pequeño tamaño es importante realizar ciertas restricciones antes de pasar al estudio completo y la optimización de la estructura.

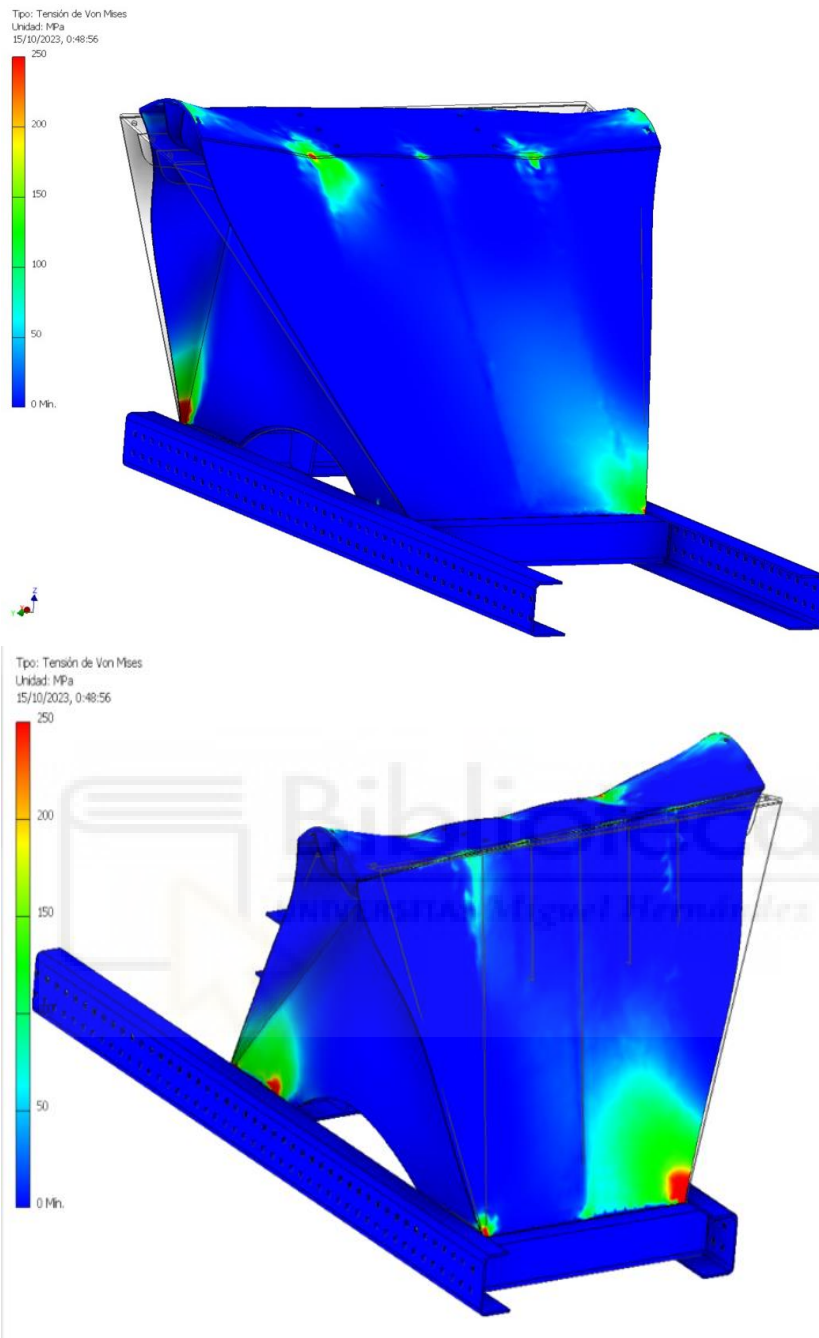
Dos de las restricciones necesarias serán la Conservación de regiones y el plano de simetría. La primera consistirá en restringir la reducción de material de los próximos análisis en zonas claves y críticas de la estructura. Estas zonas que hemos elegido serán el chasis y el suelo de la estructura, ya que esta zona es necesaria para poder unir una sección a otra, ya que, reduciendo aún más la superficie de la base, su correcta sujeción podría no estar garantizada y sufrir una separación grave mientras sufre alguna fuerza. La otra zona clave sería la parte superior de la estructura.





**Figura 17.** Restricción de eliminación material en la lámina superior de apoyo.

Una vez hemos configurado todas nuestras restricciones y parámetros, podemos empezar las simulaciones. En primer lugar, antes de empezar con la optimización de material, vamos a realizar un análisis estático para ver cómo se distribuyen las distintas fuerzas y tensiones sobre la estructura. Aunque en el análisis se muestren diferentes resultados como tensiones principales, coeficiente de seguridad, deformaciones y tensiones en los diferentes ejes, nos centraremos en los dos valores principales que más nos interesan, la tensión de Von Mises para ver los puntos de máxima tensión y las zonas que pueden ser optimizadas y el desplazamiento, para controlar el movimiento de las placas y de la estructura y comprobar que en nuestro análisis no se deforma en exceso el acero.



**Figura 18.** Análisis de deformaciones de la estructura.

Tras haber realizado este primer análisis, y poder ver la distribución de tensiones a lo largo de nuestra estructura, podemos hacernos una idea de que zonas están siendo infrutilizadas, y, por tanto, podremos optimizar fácilmente esa zona de la estructura, y que zonas son las que más tensión reciben, incluso sobrepasan las cargas admisibles multiplicadas por el coeficiente de seguridad. Entrando un poco en profundidad en el análisis, podemos observar que la zona

interior de los perfiles verticales de la estructura recibe poca carga y que solo está siendo utilizada para dar forma a la estructura, mientras que, en los puntos de unión con el chasis, hay concentradores de tensión en todas las esquinas. De la misma manera pasa lo mismo con las chapas delantera y trasera vertical; sus puntos de tensión son en las uniones con otras chapas o chasis o zonas donde una chapa está alienada perpendicularmente con ella, creando una zona de compresión sobre ese perfil. En cambio, en zonas centrales y alejadas de puntos de unión, la estructura apenas tiene cargas que puedan suponer un gran esfuerzo para la estructura.

Una vez hemos completado este primer análisis, y podemos empezar la optimización de la estructura y su posterior análisis para comprobar si esta optimización ha sido realizada en los lugares adecuados.



## 5. OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE LA ESTRUCTURA

Tras haber comprobado cómo se comporta nuestra estructura tras las diferentes cargas propuestas y cuáles son los puntos más sensibles y los menos utilizados, el siguiente paso será la optimización de la estructura eliminando material de zonas en la que este no tiene un trabajo ni una función realmente clave ni representativa. Para ello, iremos eliminando cierto porcentaje de material con la función “Generar forma” de Inventor. Este proceso nos será imprescindible a la hora de poder ir haciendo nuevas estructuras con menos material a utilizar, sobre nuestra estructura original. Con diferentes modelos de diseño, podremos analizar y ver el progreso de las tensiones y como los diferentes porcentajes de eliminación de material afecta a las propiedades mecánicas de las estructuras.

Para ir estudiando cuál puede ser la eliminación de material límite en la que las tensiones provocadas no sobrepasen los valores admisibles, hemos decidido realizar 6 estudios de optimización, incrementando ligeramente el porcentaje en cada estudio, para finalmente poder analizarlos todos en conjunto.

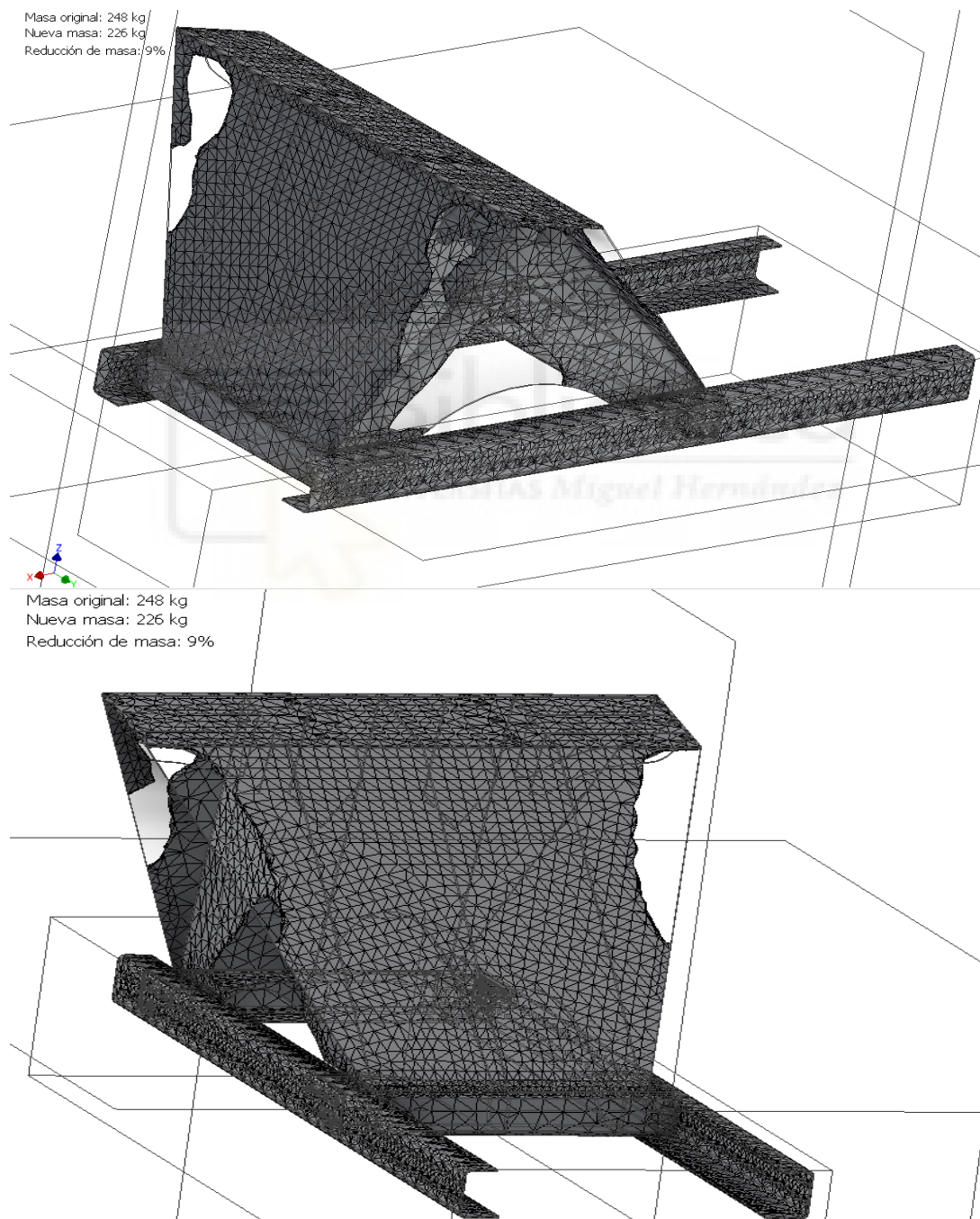
En primer lugar, comenzaremos con una optimización de la estructura con eliminación de material del 10% e iremos aumentando en distintos porcentajes; en nuestro caso serán 12%, 15%, 18%, 21% y 23%. Hemos elegido estos porcentajes ya que existe una progresión lineal entre dichos valores y se puede estudiar claramente como afecta la eliminación de material en las tensiones de la estructura de forma progresiva, sin que haya grandes saltos en los valores de los concentradores de tensión y poder realizar un análisis más preciso,

Para configurar nuestro análisis, el programa nos permite realizarlo mediante % de masa del original eliminada, o por masa final que deseemos. La opción más común y efectiva es la del porcentaje, ya que realmente no sabemos cuántos kilos finales de masa pueden ser los ideales y no tendría sentido guiarse por eso, por lo que realizar la optimización basada en la reducción del porcentaje de masa del original es la mejor opción.

Un punto clave que cabe mencionar es que, pese a la precisión del programa, en la eliminación de masa no suele ser el número exacto que utilizamos en nuestros parámetros, ya que se suele desviar unas décimas y al

redondear suele salir un 1% por debajo del indicado. Aun así, esta pequeña desviación no es relevante ya que cuando eliminemos el material al realizar las optimizaciones, podemos eliminar bordes extra que sepamos que no son necesario o ampliar ligeramente la zona eliminada, por lo que no sería ningún problema.

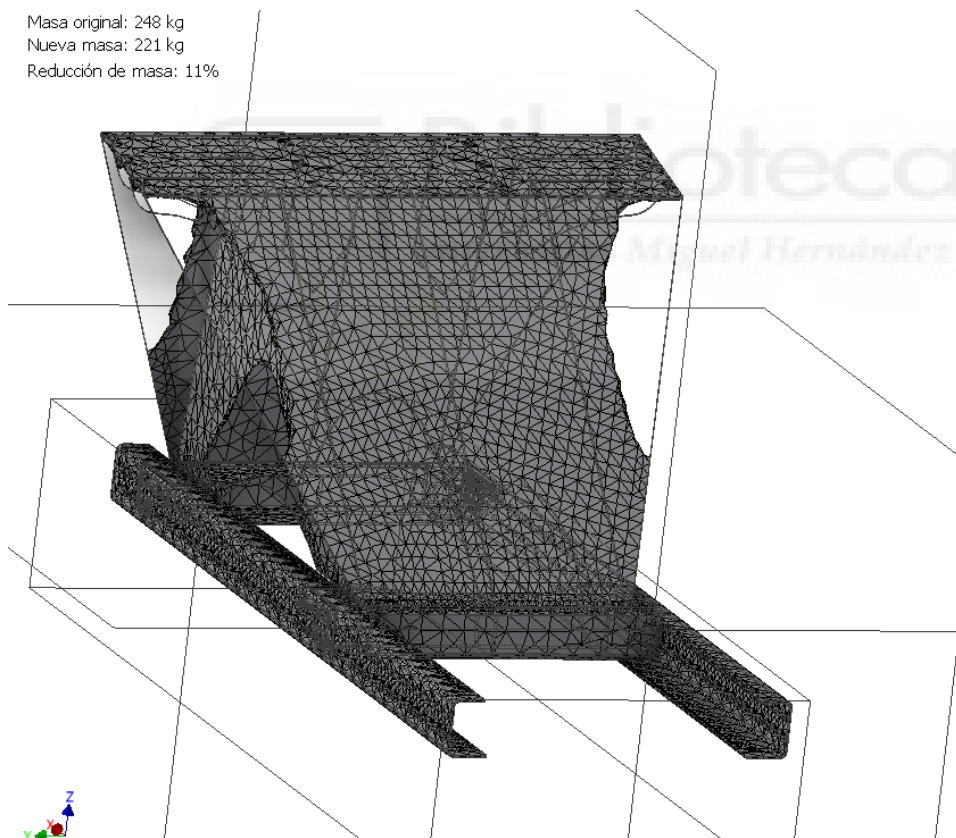
Teniendo en cuenta estas consideraciones, podemos empezar con la primera optimización del 10% de material eliminado y su estudio.



**Figura 19.** Análisis de eliminación de 10% de material en el mallado.

Aunque hayamos decidido empezar por el 10% de la eliminación del material, hemos decidido no continuar el análisis de tensión con este porcentaje de material para el segundo análisis tras la optimización, ya que las formas obtenidas para la optimización no siguen una forma lógica y deja demasiado material que no está trabajando sin eliminar, por lo que no optimiza la estructura de manera significativa. Esto se debe a que no se ha podido eliminar suficiente material. Como se puede observar arriba en el resultado final, apenas se ha conseguido eliminar el 9% del material, lo que equivaldría a solo 22 kg, algo que con el grosor de nuestras chapas de acero S700 utilizadas, es insuficiente para conseguir formas con sentido a partir de las cuales recortar material.

Una vez hemos hecho esta observación, proseguimos con la generación de forma del resto de porcentajes, en este caso 12%.

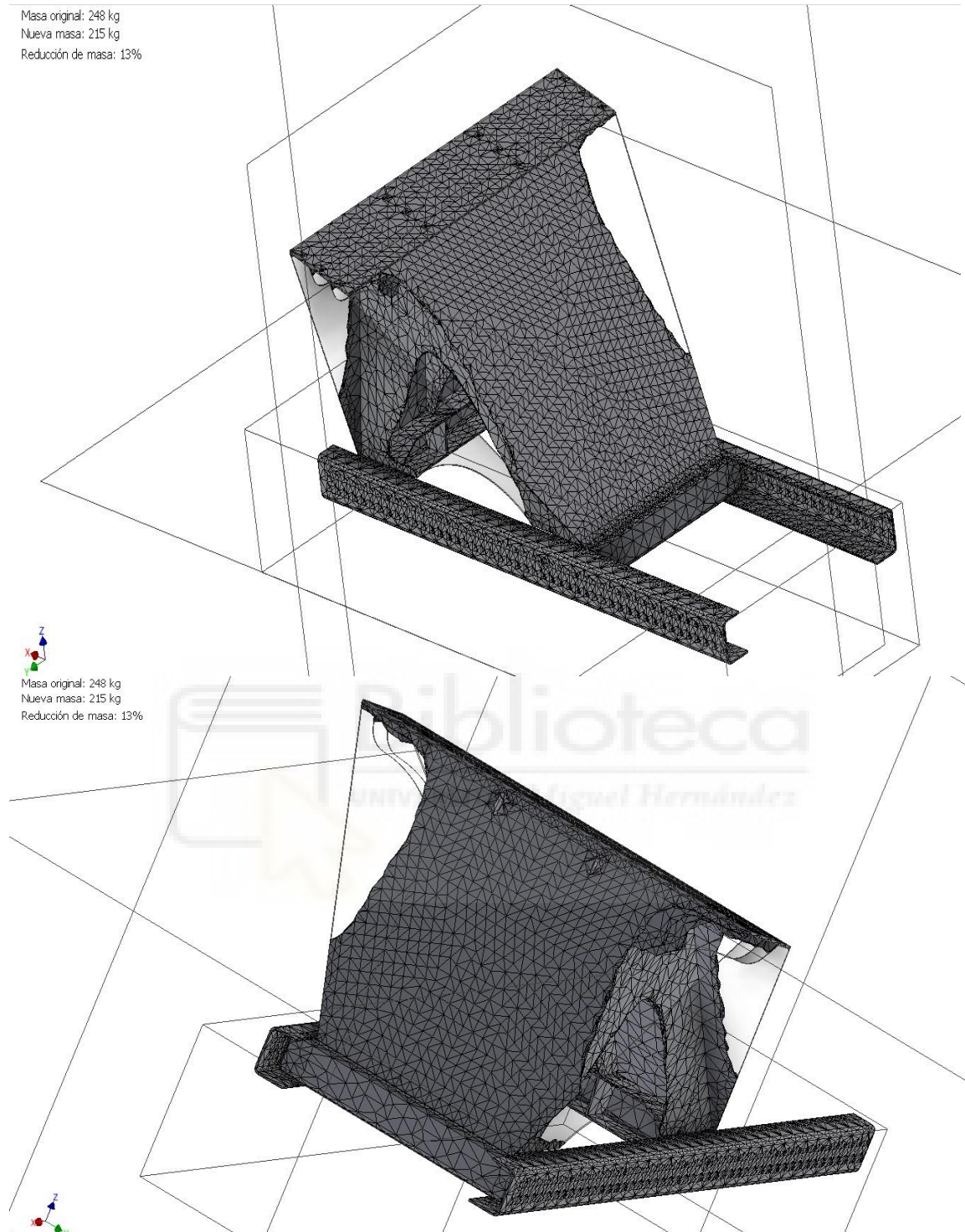


**Figura 20.** Análisis de eliminación de 12% de material en el mallado.

A continuación, el siguiente porcentaje de eliminación de material que hemos elegido es el 15%. Como hemos mencionado previamente, aunqueelijamos un porcentaje concreto, el programa eliminará un porcentaje ligeramente inferior.



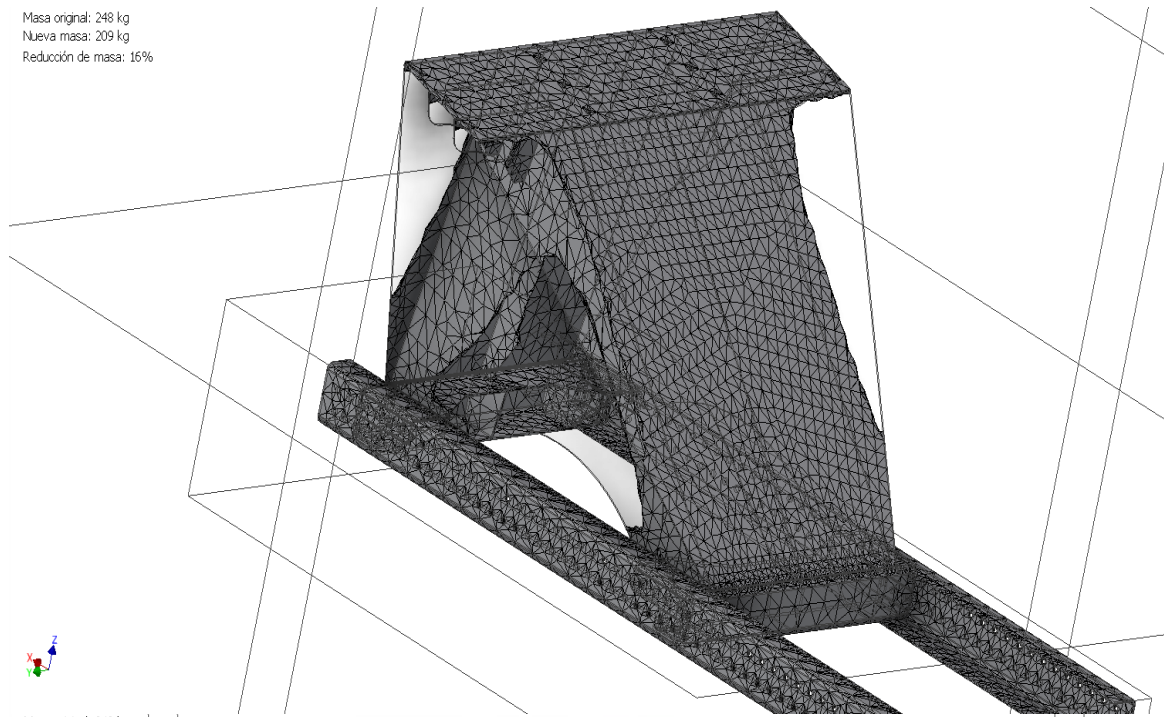
Masa original: 248 kg  
Nueva masa: 215 kg  
Reducción de masa: 13%



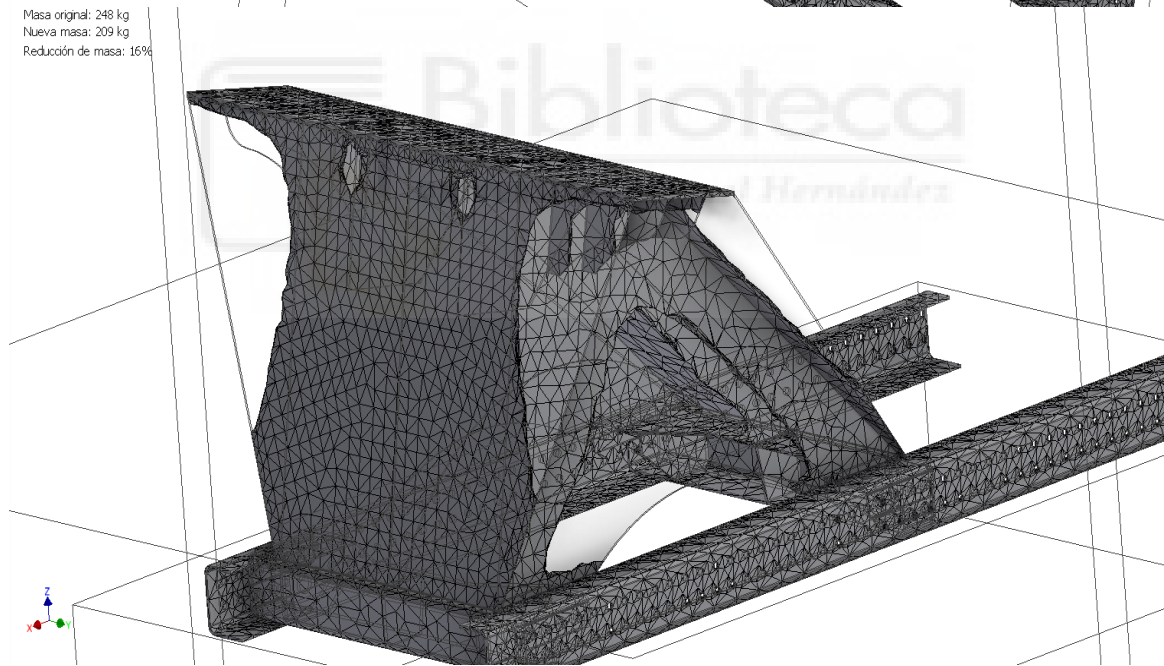
**Figura 21.** Análisis de eliminación de 15% de material en el mallado.

Nuestra tercera elección de eliminación de material es 18%, que, tras programarlo y ejecutarlo en Inventor, finalmente resulta en una eliminación del 16%.

Masa original: 248 kg  
Nueva masa: 209 kg  
Reducción de masa: 16%



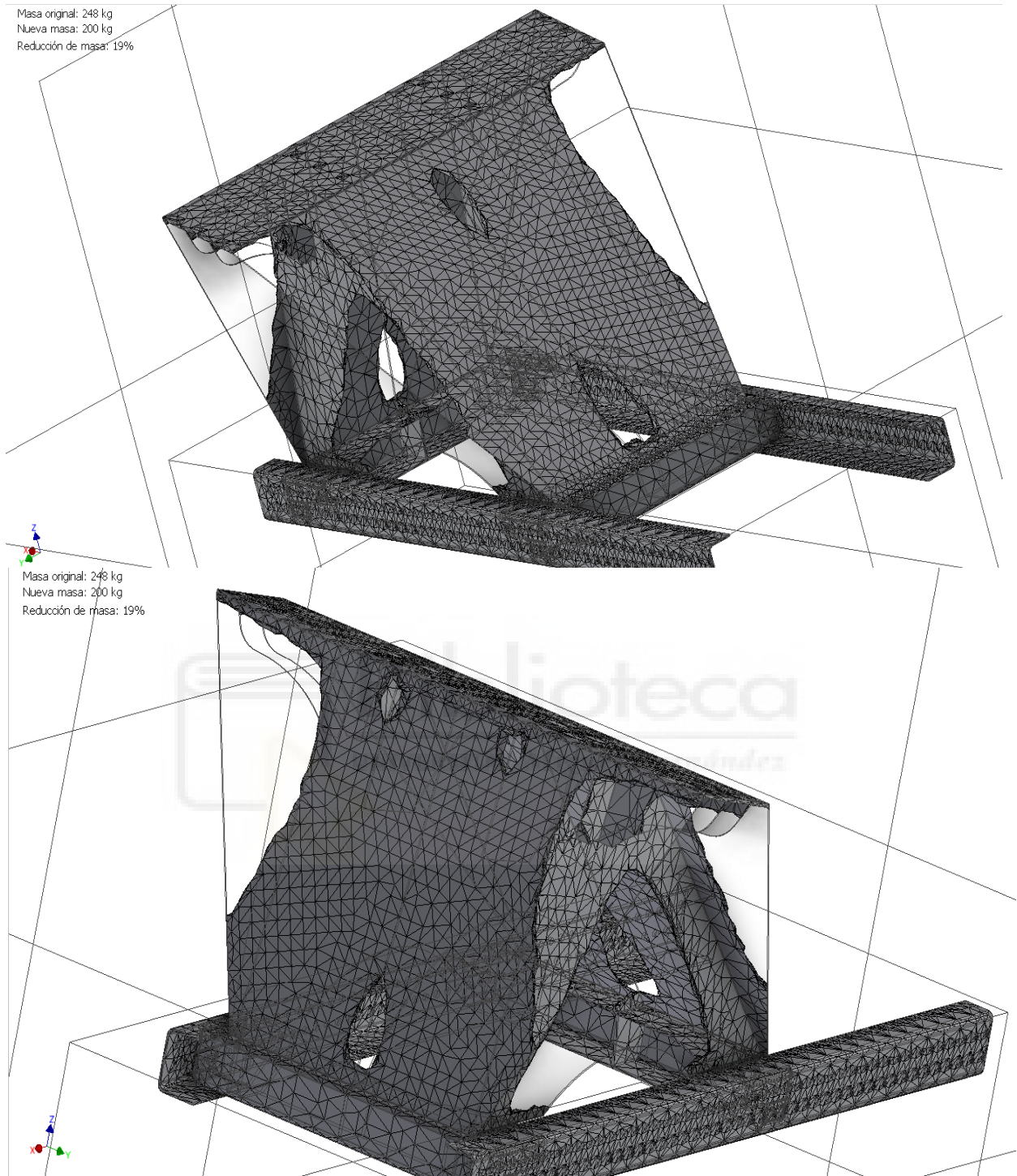
Masa original: 248 kg  
Nueva masa: 209 kg  
Reducción de masa: 16%



**Figura 22.** Análisis de eliminación de 18% de material en el mallado.

Consecutivamente, hemos realizado el análisis de una eliminación teórica del 21% de material, que, como resultado final, ha dado lugar a una eliminación real del 19% de la masa de la estructura.

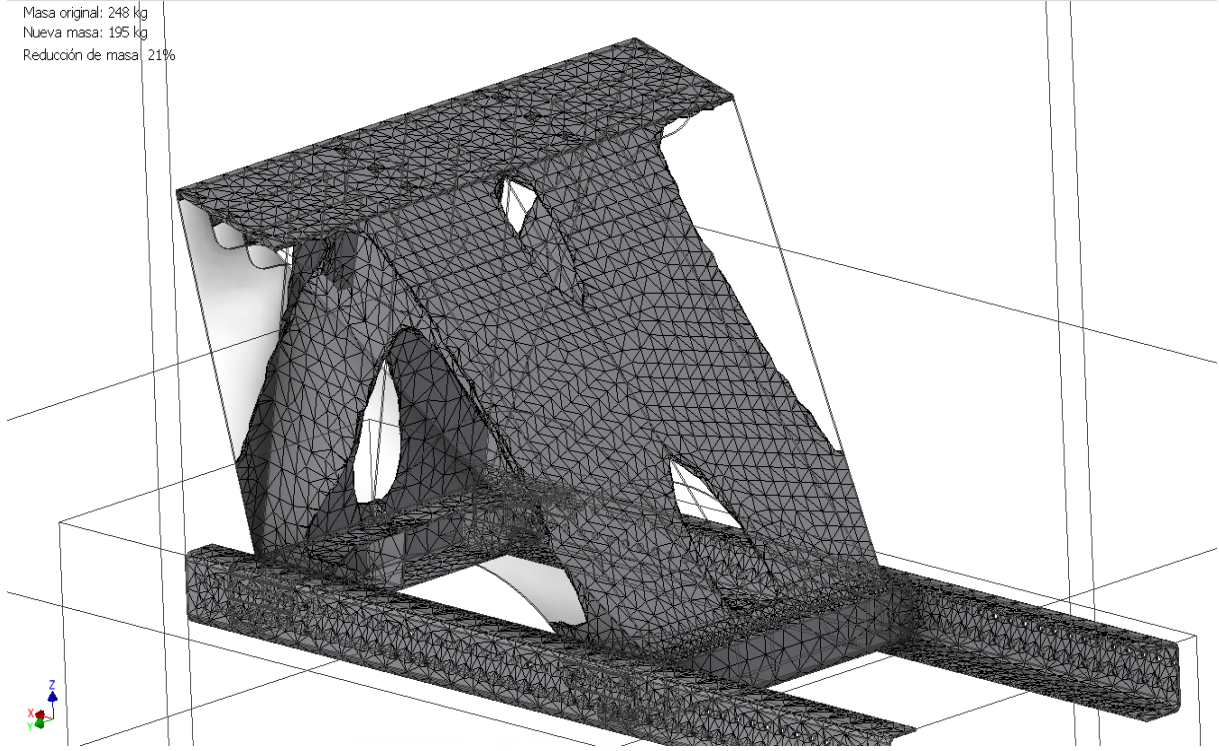




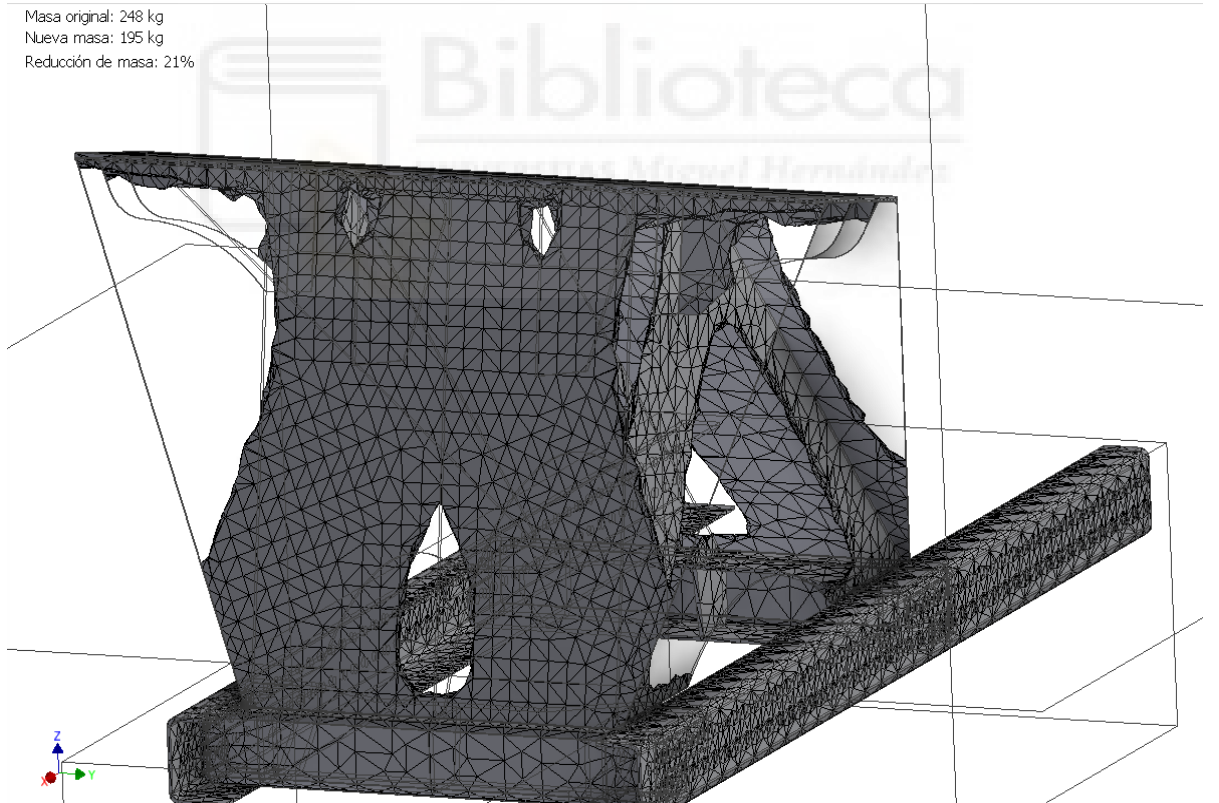
**Figura 23.** Análisis de eliminación de 21% de material en el mallado.

Como análisis final elegimos un 23% de eliminación de masa de la estructura, que finalmente queda un porcentaje del 21%.

Masa original: 248 kg  
Nueva masa: 195 kg  
Reducción de masa: 21%



Masa original: 248 kg  
Nueva masa: 195 kg  
Reducción de masa: 21%



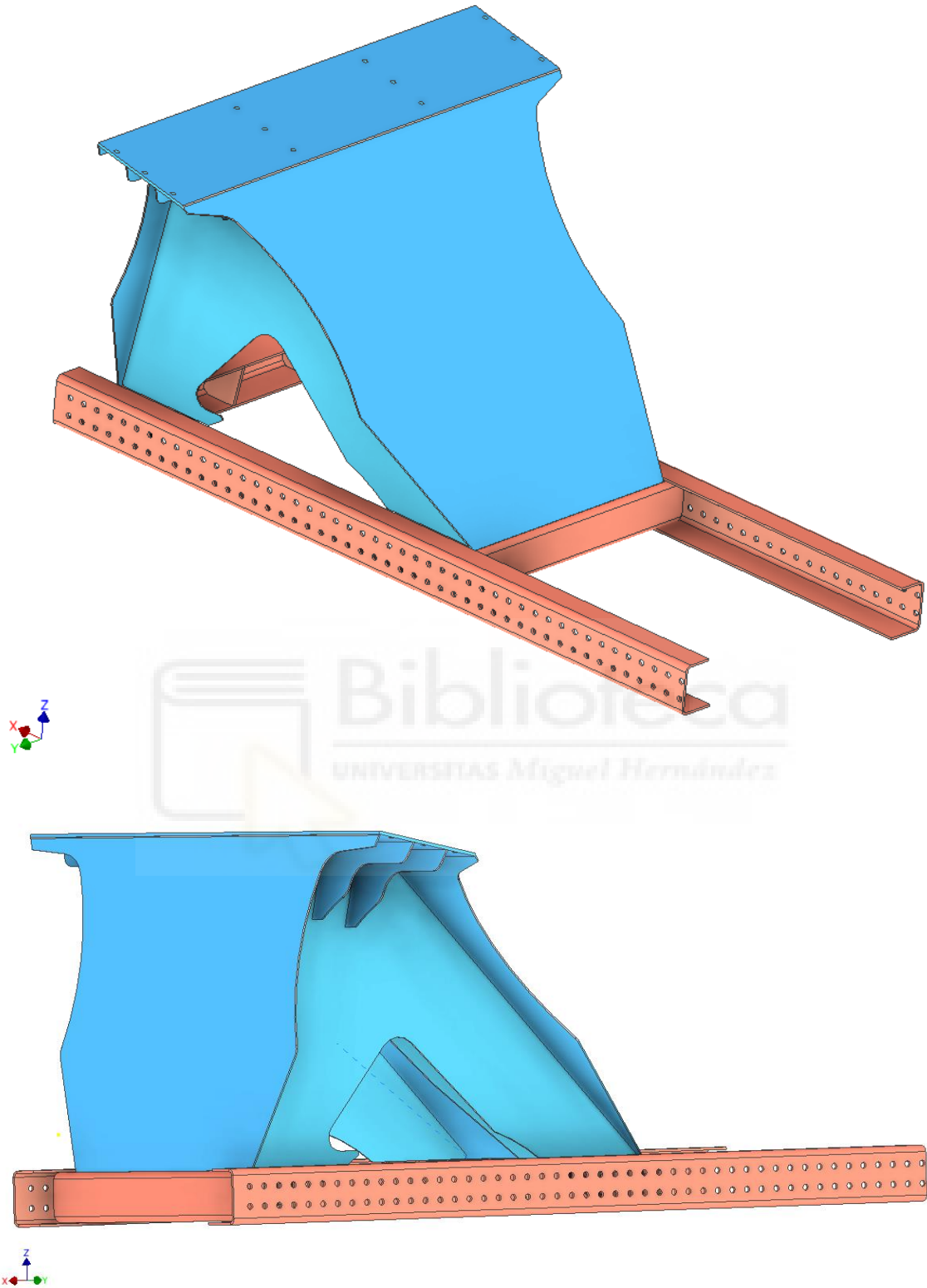
**Figura 24.** Análisis de eliminación de 23% de material en el mallado.

## 6. DISEÑO DE LAS NUEVAS ESTRUCTURAS

Una vez hemos concluido la optimización topológica de la estructura, a continuación, deberemos recortar la y redefinir ligeramente la estructura, acorde a la nueva malla optimizada por Inventor mediante el generador de forma. Uno de los puntos más importantes a la hora de redefinir la estructura será el diseño de formas suaves y redondeadas para no crear zonas con cambios bruscos en el trazado que puedan convertirse en nuevos concentradores de tensión que puedan fatigar aún más la estructura. Pese a que la malla generada tiene una estructura bien delimitada, intentaremos dejar un ligero margen a la hora de rediseñar las formas para no acercarnos en exceso a las zonas en la que la estructura soporta el mayor esfuerzo. También intentaremos realizar formas armónicas y fácilmente fabricables, ya que seguir estrictamente las formas de la malla, sería poco práctico y realista y dificultaría la fabricación de la estructura.

Otro aspecto importante a la hora de la eliminación de material existente es no tener en cuenta solo la función mecánica de la estructura sino también la función estructural. Uno de los momentos en donde esto se vuelve crucial, es conforme la eliminación de material de va aumentando en la zona central de la lámina frontal. Aunque esa zona no soporte una gran tensión ni sea crítica su deformación, no sería prudente demasiada eliminación de material hasta un punto de ser casi 2 láminas separadas, ya que esto afectaría a la unión y al movimiento del nervio central, sacrificando la estabilidad de la estructura ya que las uniones soldadas entre placas serían mucho menores. Este mismo problema también se vuelve visible conforme la eliminación de material es creciente en la parte posterior de la estructura, en la que la parte inferior central, se empieza a eliminar material en zonas cercanas a la arista inferior, que, aunque esa zona no soporte las mayores tensiones, es importante que tenga una superficie de unión con respecto al chasis lo más amplia posible y que no genere concentradores de tensión en dicha zona.

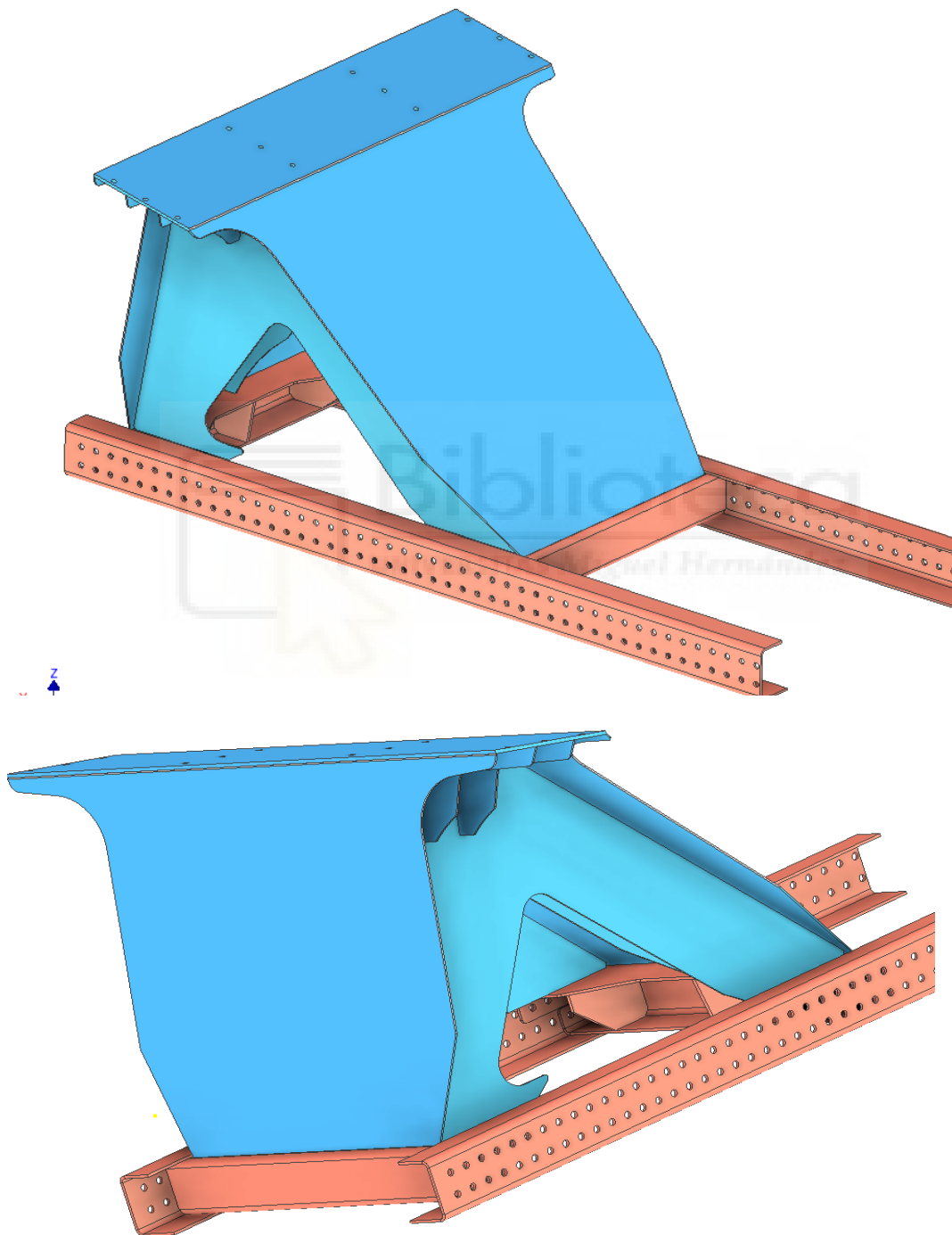




**Figura 25.** Nuevo diseño de la estructura con análisis de eliminación de 12% de material.

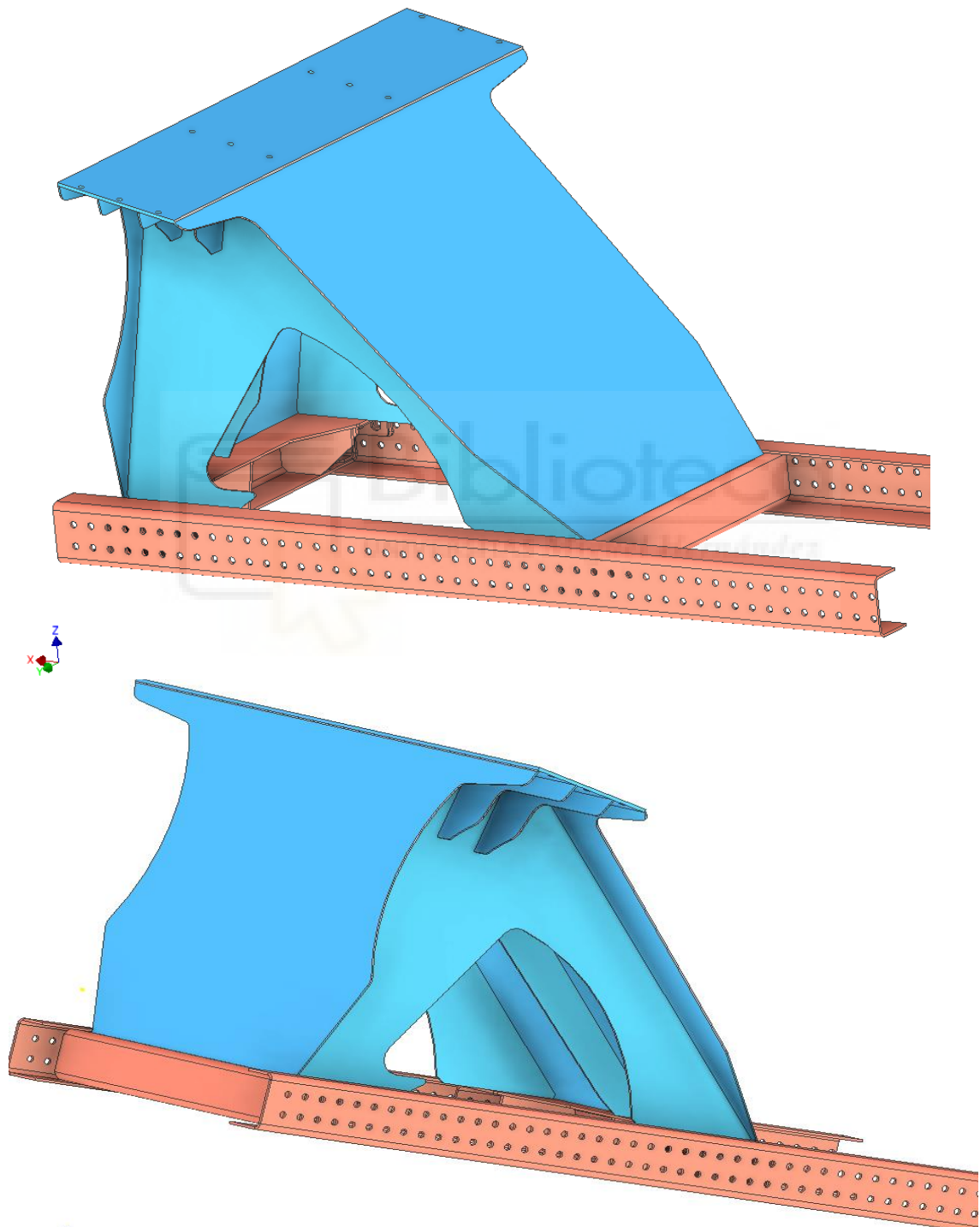
La primera nueva estructura que añadiremos será la de eliminación del 12% de material y seguiremos por orden creciente de eliminación de material.

Como hemos mencionado previamente intentamos realizar trazos suaves y sin vértices bruscos. Ya con una primera eliminación de material, podemos observar como las zonas donde la estructura no soporta gran tensión es en las zonas laterales medias del placas delantera y posterior de la estructura, y la zona central de los nervios interiores.



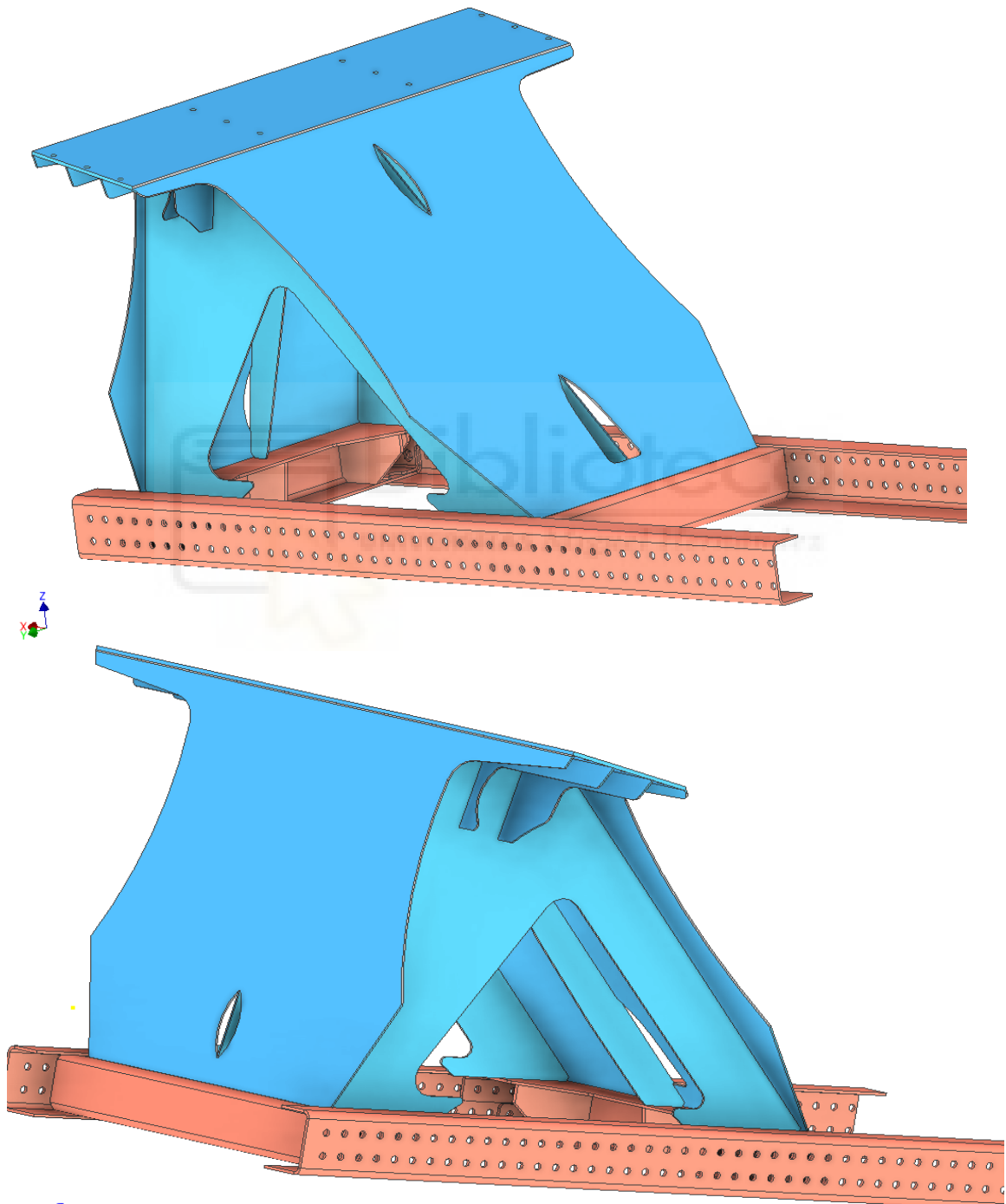
**Figura 26.** Nuevo diseño de la estructura con análisis de eliminación de 15% de material.

Conforme vamos avanzando, se observa también que los nervios colocados entre los 2 nervios laterales estructurales y la lámina superior donde apoya el soporte de la hormigonera dejan de tener utilidad en el soporte de tensiones, sin embargo, es importante mantenerlos ya que reducen la posible deformación a compresión de dicha lámina superior.



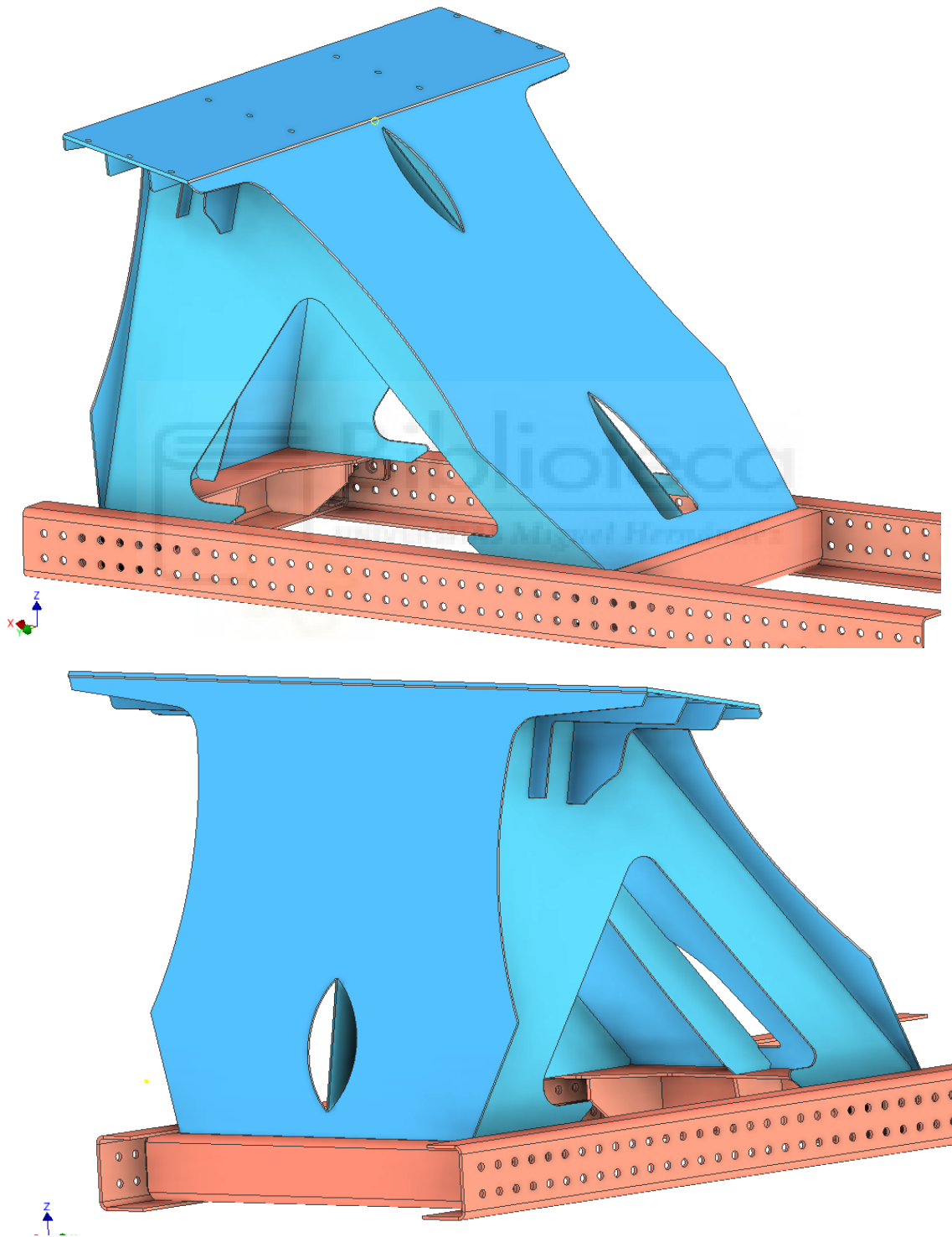
**Figura 27.** Nuevo diseño de la estructura con análisis de eliminación de 18% de material.

Con este porcentaje de eliminación, los nervios laterales y central y los nervios más pequeños situados en el interior colocados para el mantener la forma estructural empiezan a perder gran parte de su masa, acercándose a quedar simplemente los bordes exteriores que ayudarán en mantener la estructura con las menores deformaciones



**Figura 28.** Nuevo diseño de la estructura con análisis de eliminación de 21% de material.

La eliminación de material en las zonas centrales de las láminas delantera y posterior empieza a crecer, ya que es en las zonas que están soldadas perpendicularmente a los nervios interiores donde recaen las mayores fuerzas, quedando los bordes exteriores y la zona más central infrutilizadas en comparación.



**Figura 29.** Nuevo diseño de la estructura con análisis de eliminación de 23% de material.



En este extremo, la superficie eliminada ya llega a los bordes inferiores de unión entre las láminas delantera y posterior de la estructura con el chasis del camión. También podemos observar cómo los extremos han eliminado tanto material que están cerca de llegar los nervios interiores. Esta eliminación puede llegar a ser excesiva ya que puede producir problemas de unión con los nervios interiores y con la correcta fijación con el chasis.



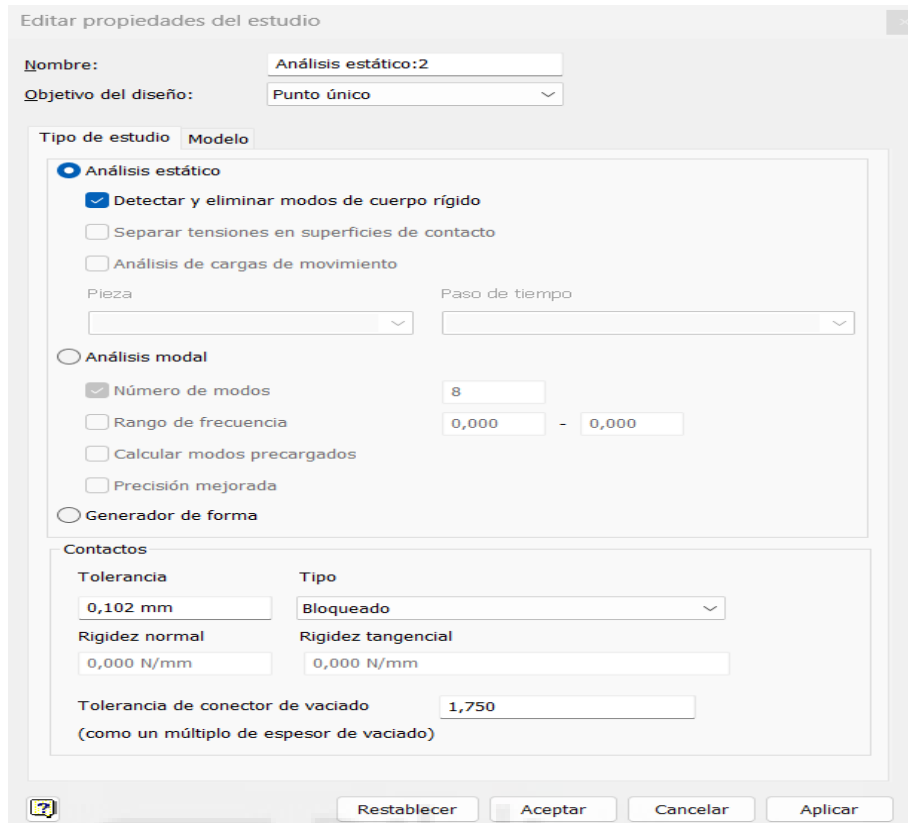
## 7. ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA Y SUS PUNTOS DESFAVORABLES

Una vez hemos concluido nuestros diferentes casos y hemos observado las zonas de la eliminación de material de en la estructura, el siguiente paso a proceder será un análisis estático de la estructura para poder determinar cuáles son los puntos más desfavorables en cada nueva estructura con los diferentes porcentajes de eliminación de material para poder entender cuáles serán los posibles puntos de fatiga y rotura en caso de que se produzcan y que zonas pese a su reducción de masa total, mantienen sus propiedades mecánicas dentro de todos los rangos de seguridad estructural y podemos decidir diseñar con la total seguridad de que tras optimizar la estructura, esta sigue pudiendo mantener el peso y los esfuerzos de soportar la hormigonera del camión a un coste considerablemente menor debido al menor uso de acero necesario para estructura igualmente sólida pero más barata.

Para realizar este análisis de la forma más precisa posible, pero sin la necesidad de analizar cada arista o unión de la estructura, nos centraremos en el estudio de 3 parámetros clave: El desplazamiento máximo, la tensión máxima o también llamada tensión de von Mises en la región más crítica y la tensión máxima en puntos concretos de los concentradores de tensión. A su vez, relacionaremos estos resultados con la masa final de la nueva estructura, para determinar a partir de qué porcentaje de eliminación de masa, la optimización de la estructura es viable o en cambio, pierde demasiadas propiedades mecánicas y no es lo suficientemente resistente para los esfuerzos a los que esta será sometida.

### 7.3. Realización del análisis estático

En primer, antes de empezar a análisis, cabe mencionar como se realiza este proceso. Los primeros pasos serán similares a la creación, crearemos un estudio nuevo, añadiremos las mismas restricciones como si fuera un análisis de generación de forma. Tras eso pasos denominaremos los parámetros propios del análisis estático.



**Figura 30.** Valores y restricciones del análisis estático.

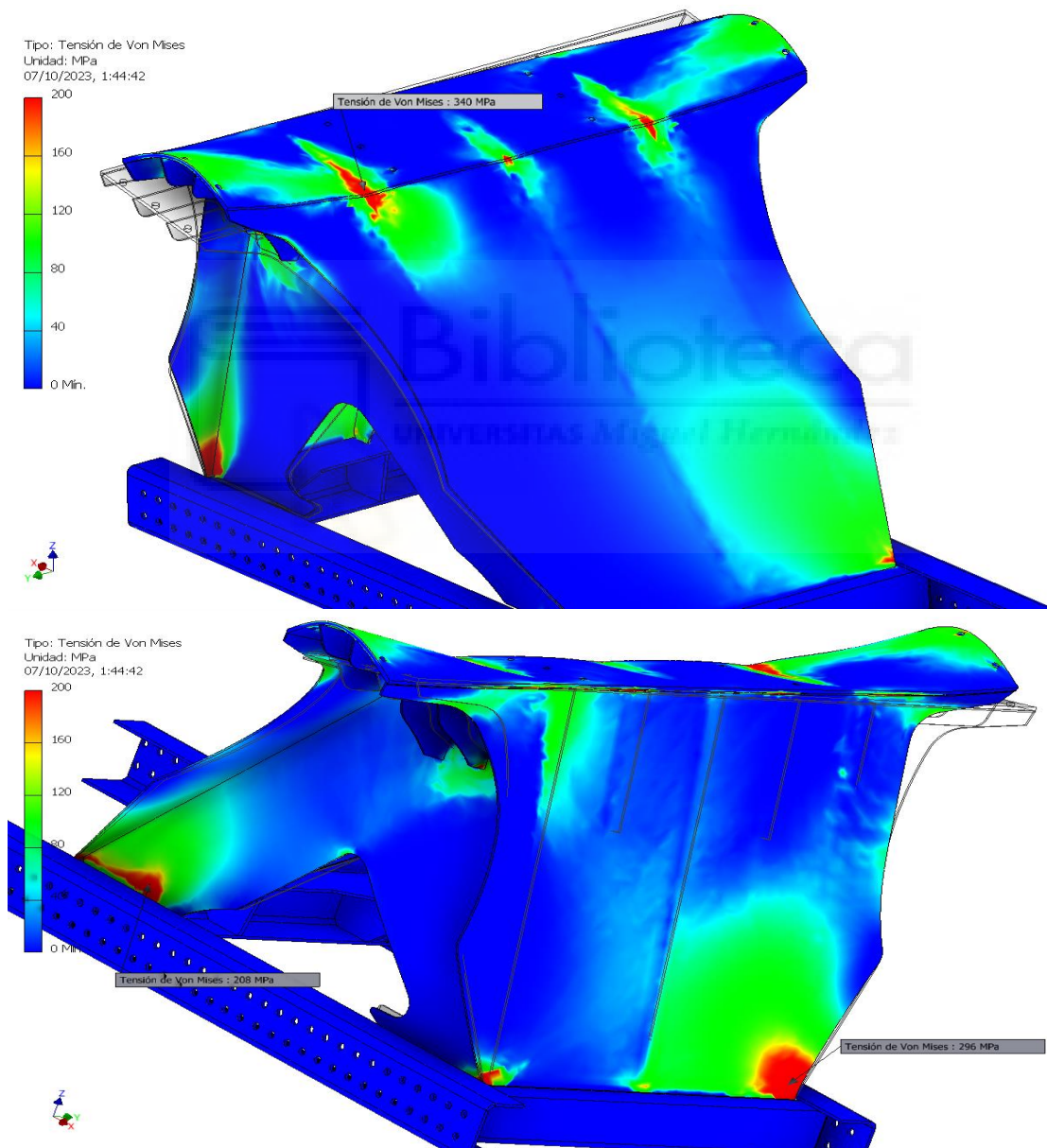
En esta pestaña, seleccionaremos la opción de “Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido”, para evitar que, si ha habido zonas restringidas anteriormente como fijas, estas sufran también la acción de las fuerzas y podamos ver la deformación y desplazamiento en dichas regiones. La tolerancia la dejaremos con el valor predeterminado, ya que con 0.1 mm es suficiente para eliminar los posibles errores de contacto en las restricciones de la figura en el caso de que este no haya sido completamente preciso.

Una vez hemos explicado el procedimiento a seguir, expondremos el análisis de los diferentes porcentajes de masa. Para seguir el mismo procedimiento en todos, seguiremos un mismo orden, en el que primero añadiremos 3 imágenes de la parte delantera, trasera e interior de la figura, en las que veremos la tensión de von Mises en las cuales añadiremos alguna sonda en regiones importantes para orientarnos de la tensión en toda una región y posteriormente 2 imágenes con la deformación. Si fuera necesario, debido a que hay varias regiones que es importante mencionar su estado, añadiremos más

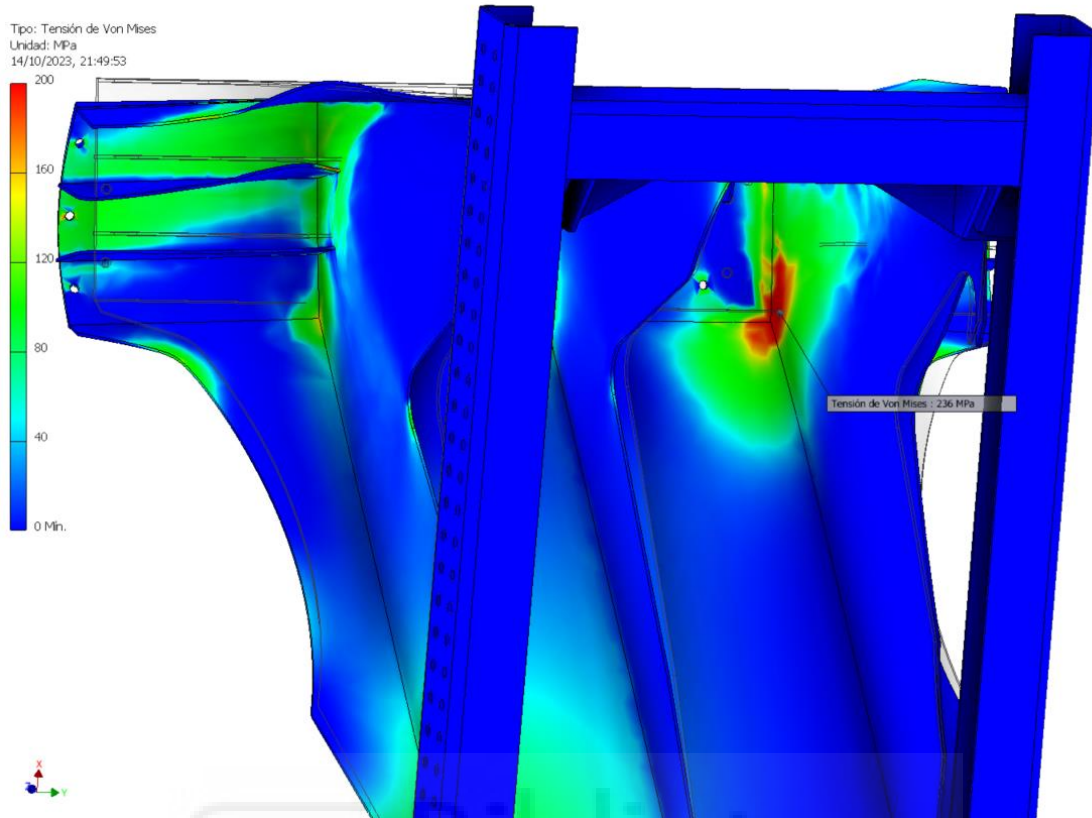
imágenes de regiones que son concentradoras de tensión para analizar su tensión de von Mises.

Una vez hemos añadido todas las imágenes necesarias, procederemos a estudiarlas y analizarlas para ver cómo van evolucionando ciertas regiones en su concentración de tensiones y deformación. Finalmente concluiremos con una gráfica en la que agruparemos los valores de tensión y desplazamiento máximo respecto a *su* masa final y su porcentaje de masa eliminada.

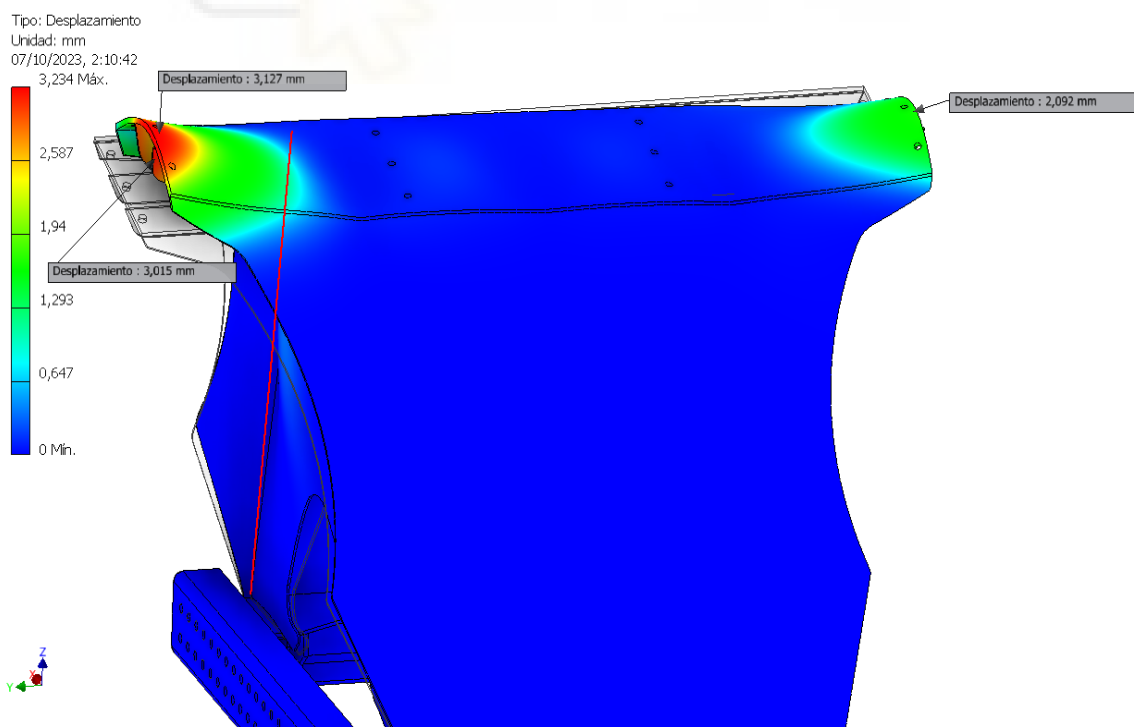
#### 7.4. Estudio de fuerzas y deformaciones



**Figura 31.** Análisis de fuerzas de la estructura de 12% de eliminación de material (zona frontal y posterior).



**Figura 32.** Análisis de fuerzas de la estructura de 12% de eliminación de material (zona interior vista desde abajo).



**Figura 33.** Análisis de deformaciones de la estructura de 12% de eliminación de material.



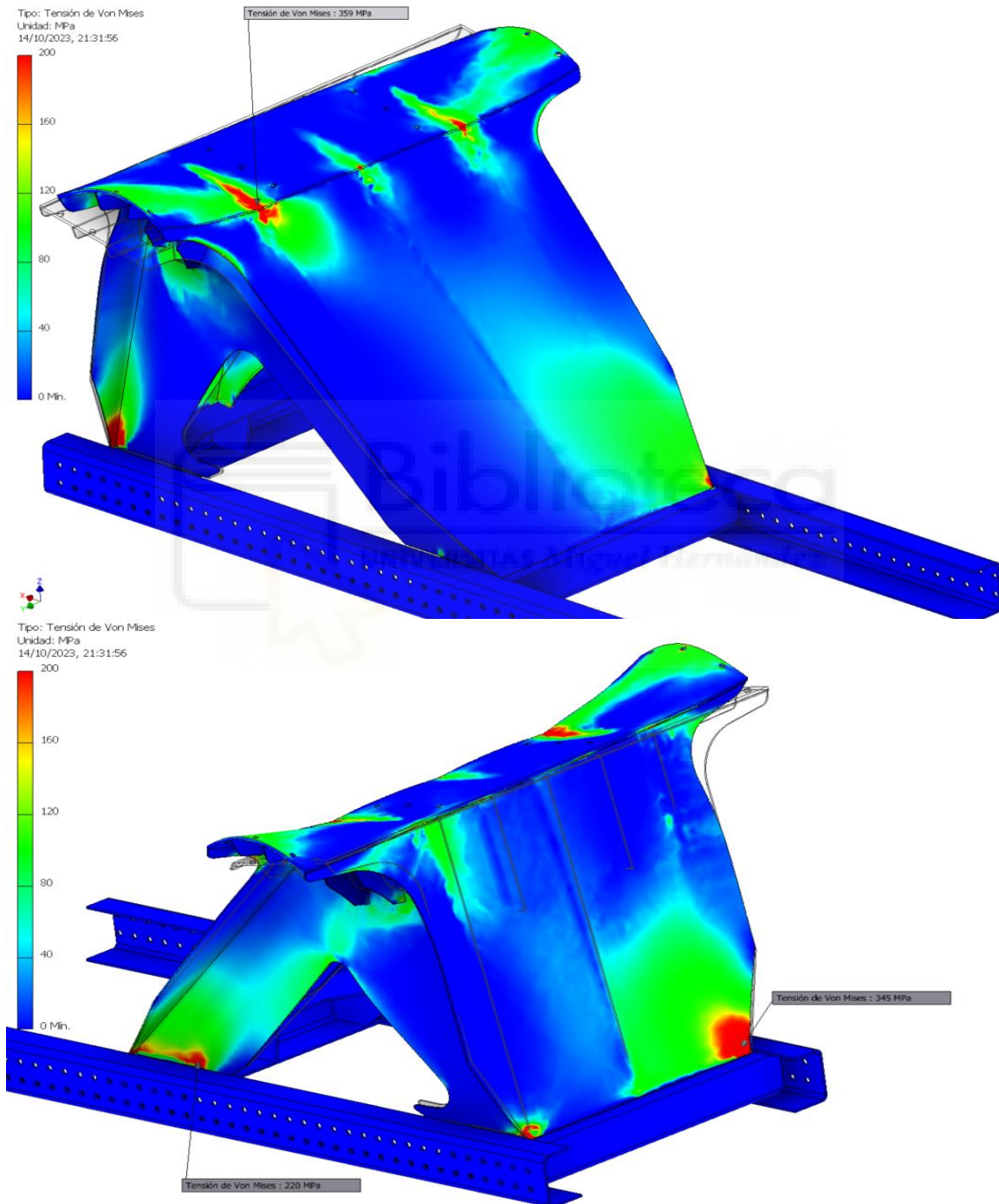
Sobre estas imágenes empezaremos analizando las regiones concentradoras de tensión. Observando las zonas en color rojo más intenso, podemos ver que estas se disponen en las zonas donde debajo de ellas, hay un nervio interior, que sirve de elemento estructural, en la esquina inferior derecha de la lámina posterior y en la zona inferior izquierda y superior derecha del nervio lateral derecho (mirando de frente).

Sobre la lámina superior en unión con la lámina frontal, la concentración de tensión es debida a la fuerza de compresión que hemos programado en el eje X (esta está producida por la fuerza del peso del soporte de la hormigonera y de la propia hormigonera producirán en nuestra estructura). Al haber nervios debajo que hagan contacto, esta se intensifica claramente en los vértices de contacto. En el sucesivo estudio de los puntos más críticos en cuanto a tensión soportada, nos centraremos en la región encima del nervio izquierdo, ya que al haber parametrizado una fuerza hacia el lado contrario representando la fuerza lateral creada por un giro en curva, sobre esta región las fuerzas serán mayores. También dado a que, ante una supuesta mejora futura en esta región para reforzarla, la placa creada será simétrica, por lo que, si soporta las fuerzas en la región izquierda siendo esta más desfavorable, también soportará más fácilmente los concentradores de tensión en la zona central y derecha.

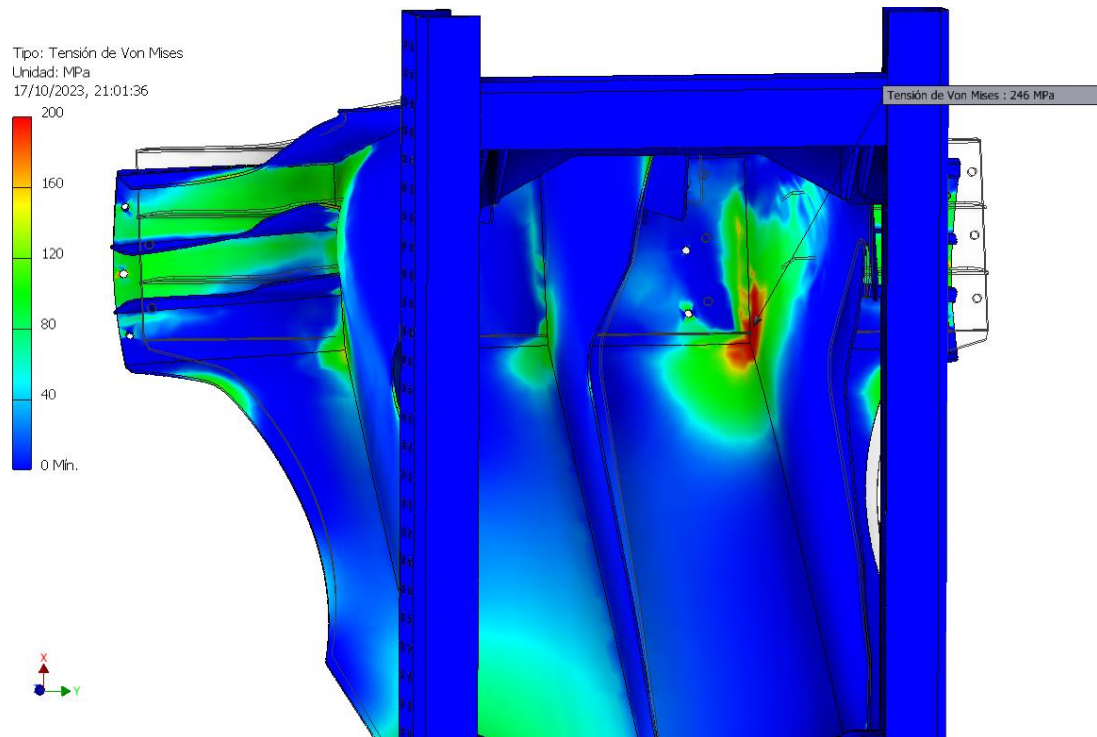
Por la misma razón (simulación a giro), podemos observar como en el nervio derecho, esquina superior en contacto con la lámina superior y con la frontal, hay una concentración de tensión importante, no tanto por el peso soportado hacia abajo en el eje X, sino por las fuerzas a tracción soportadas en los giros que realiza el camión, ya que esa zona es crítica para que no se separen la lámina superior donde recae directamente el peso de la hormigonera con el resto de la estructura de la mantiene estable ante las sucesivas fuerzas externas.

En cuanto a la deformación, vemos como esta se localiza sobre todo en la zona superior de la lámina superior, donde se coloca el soporte de la hormigonera. Esta deformación es debida a que la fuerza del peso en el centro de dicha lámina provoca que los extremos donde esta no cae exactamente se deformen hacia arriba. Como podemos observar, la parte central no tiene ninguna deformación mientras que el centro de los extremos y los nervios

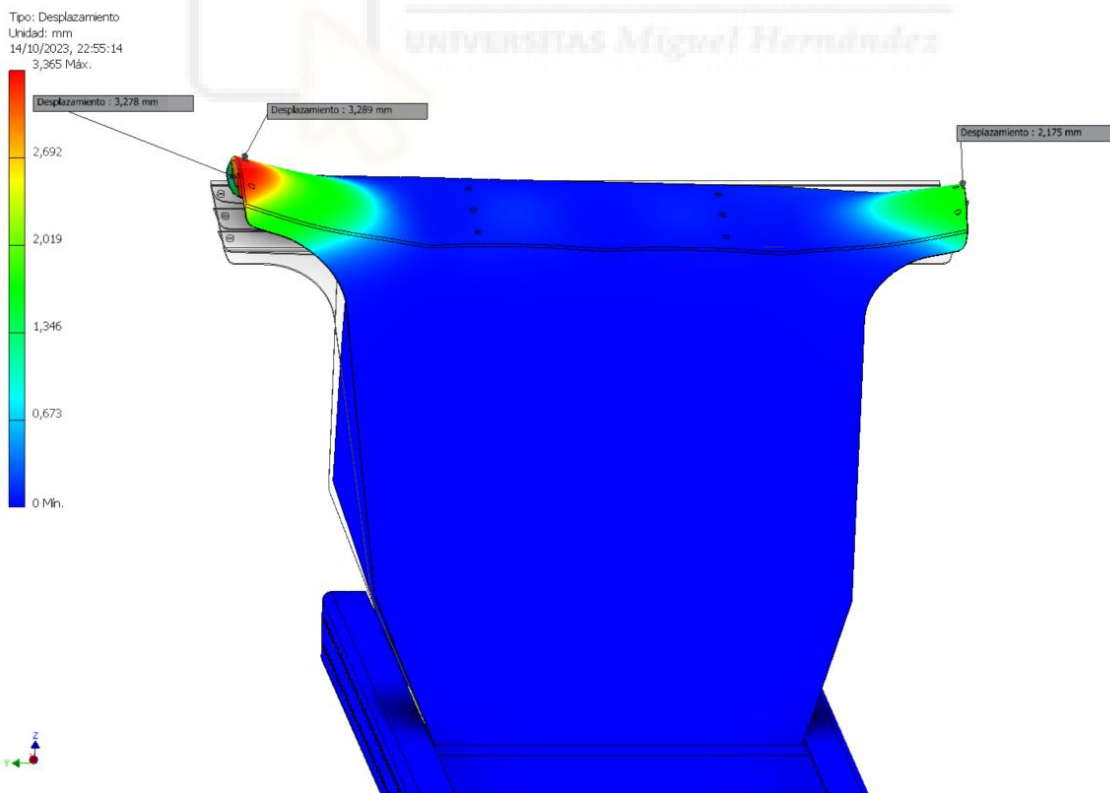
laterales de sujeción también se deforman. En el lado izquierdo, esta deformación es mayor ya que en el estudio, se incluye la fuerza del peso hacia abajo y la fuerza en el eje Y hacia la derecha, haciendo que esta zona esté más exigida, sin embargo, en la realidad, ambas deformaciones serán simétricas ya que habrá curvas a izquierdas y a derechas.



**Figura 34.** Análisis de fuerzas de la estructura de 15% de eliminación de material (zona frontal y posterior).



**Figura 35.** Análisis de fuerzas de la estructura de 15% de eliminación de material (zona interior vista desde abajo).

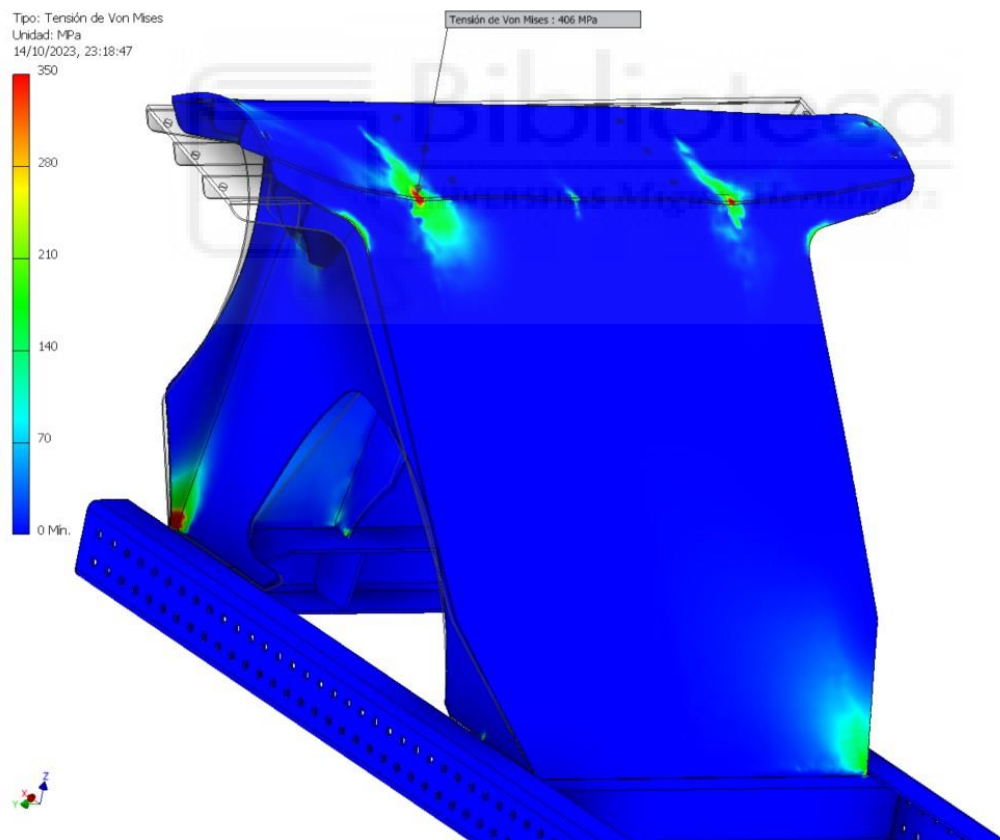


**Figura 36.** Análisis de deformaciones de la estructura de 15% de eliminación de material.

En el caso de la eliminación de material teórica del 15% vemos un aumento en la tensión soportada por las regiones concentradoras de tensión, sin embargo, la localización de dichas regiones se mantiene, sin ampliar su tamaño debido a un mayor aumento de la reducción de material.

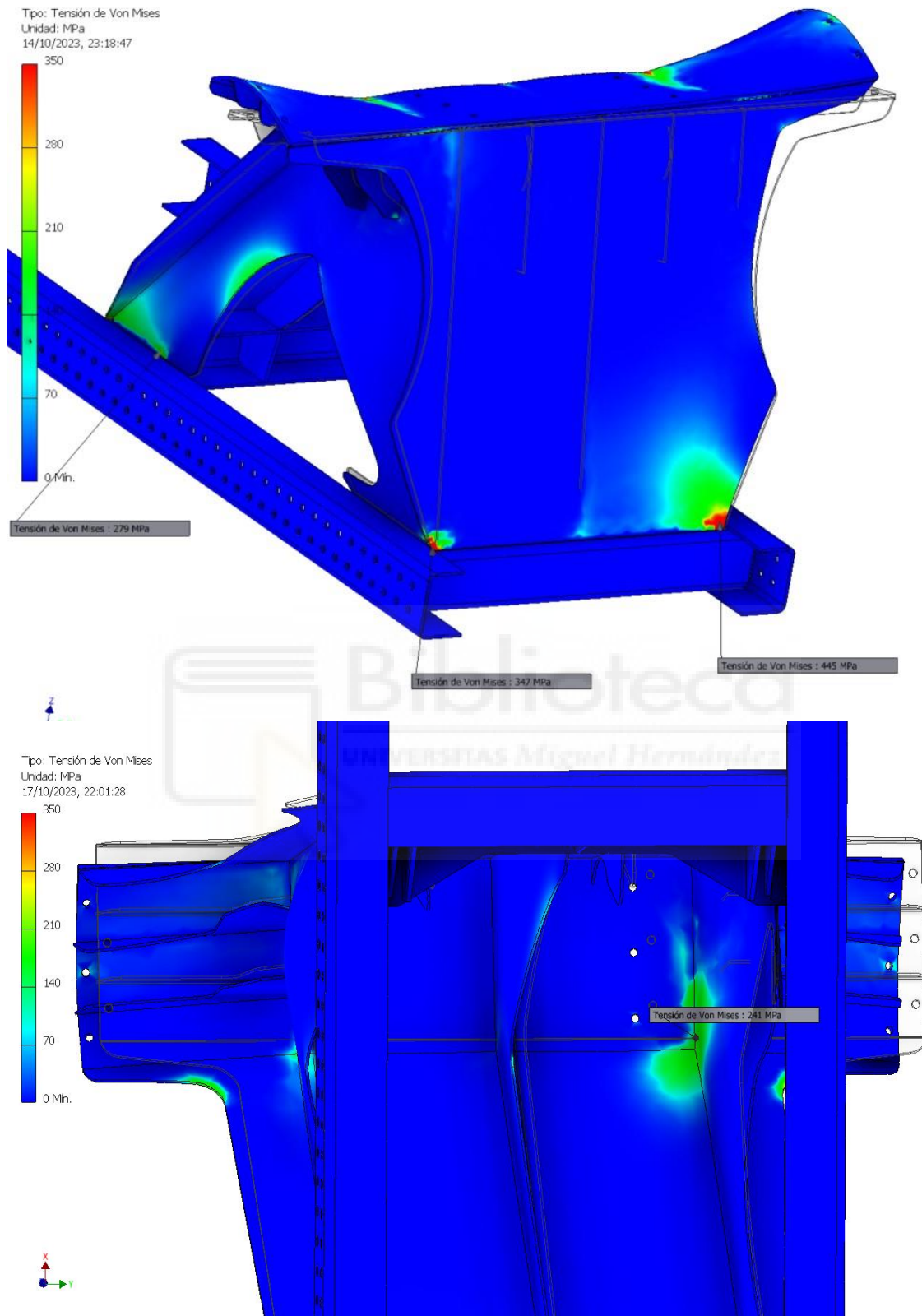
Como punto a destacar, vemos como en los nervios pequeños de las zonas laterales superiores, utilizadas para darle rigidez a la lámina superior, el nervio trasero crea una tensión mayor en la lámina superior que el nervio anterior.

En cuanto a deformación, ocurre un ligero cambio en el valor, sin embargo, este se sigue manteniendo entorno a los 3 mm con algunos decimales, por lo que el cambio entre ambas eliminaciones de masa no es representativo. Las zonas de deformación se mantienen, localizándose las zonas más deformadas en los extremos laterales de la lámina superior.



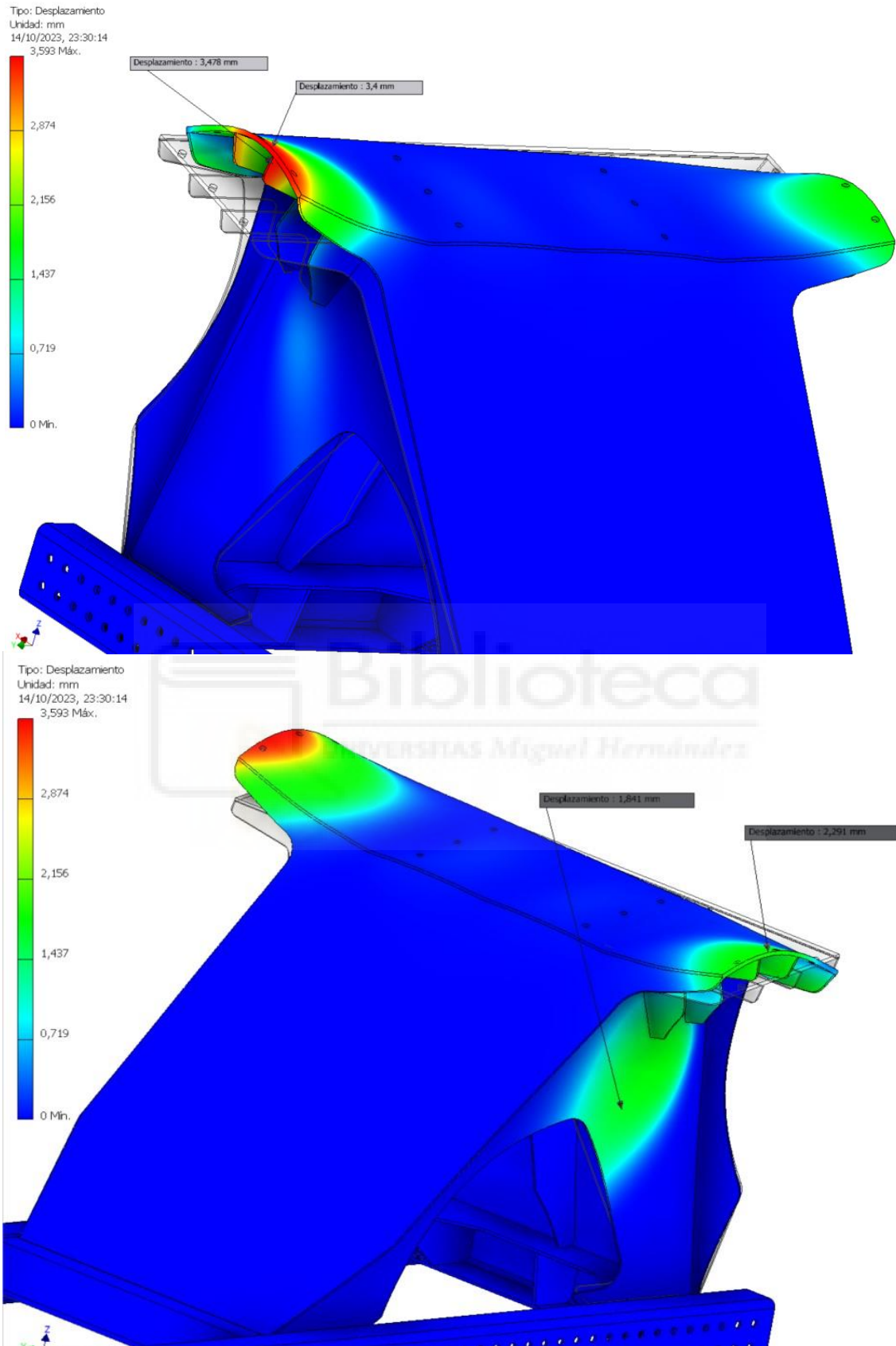
**Figura 37.** Análisis de fuerzas de la estructura de 18% de eliminación de material (zona frontal).





**Figura 38.** Análisis de fuerzas de la estructura de 18% de eliminación de material (zona posterior y zona interior vista desde abajo).





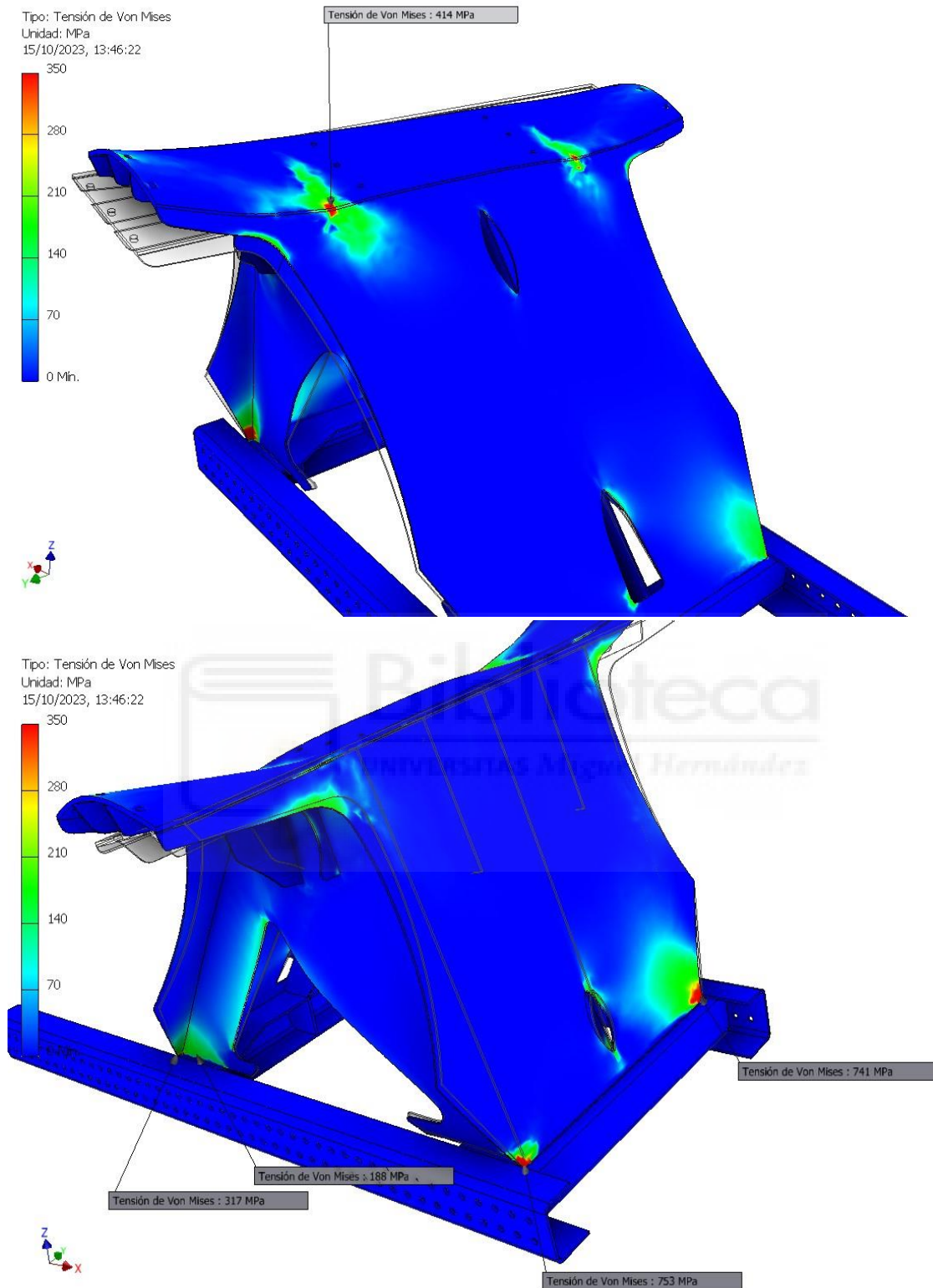
**Figura 39.** Análisis de deformaciones de la estructura de 18% de eliminación de material.

Para este análisis y los próximos que sucederán, hemos cambiado la escala de colores de 200Mpa a 350Mpa, para así poder apreciar mejor las zonas verdaderamente críticas en la estructura. Las zonas de los nervios siguen siendo los concentradores de tensión, pero podemos visualizar más claramente dónde se producen los puntos máximos, que es en las aristas de unión entre láminas.

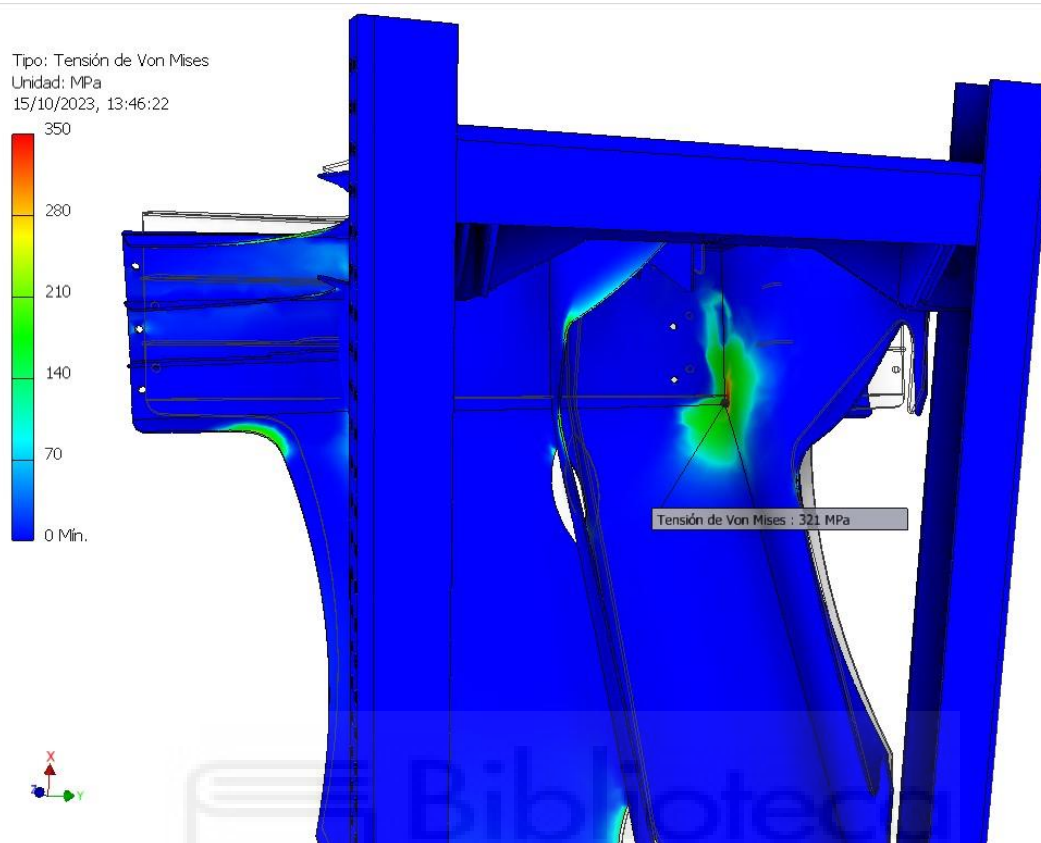
En la parte posterior hemos observado que, en la esquina inferior izquierda de la lámina, empieza a crecer otro concentrador de tensión que analizaremos próximamente. Esta zona de tensión se encuentra bastante concentrada en las zonas muy cercanas a las aristas que entran en contacto con el chasis que se encuentra bajo ella.

En cuanto al nervio derecho, la concentración de tensión en la parte más delantera empieza a difuminarse ligeramente, mientras esta va creciendo en su arista delantera en contacto con la lámina frontal. Respecto a las zonas interiores, las tensiones y las regiones en las que se localizan siguen prácticamente igual, sin cambios significativos.

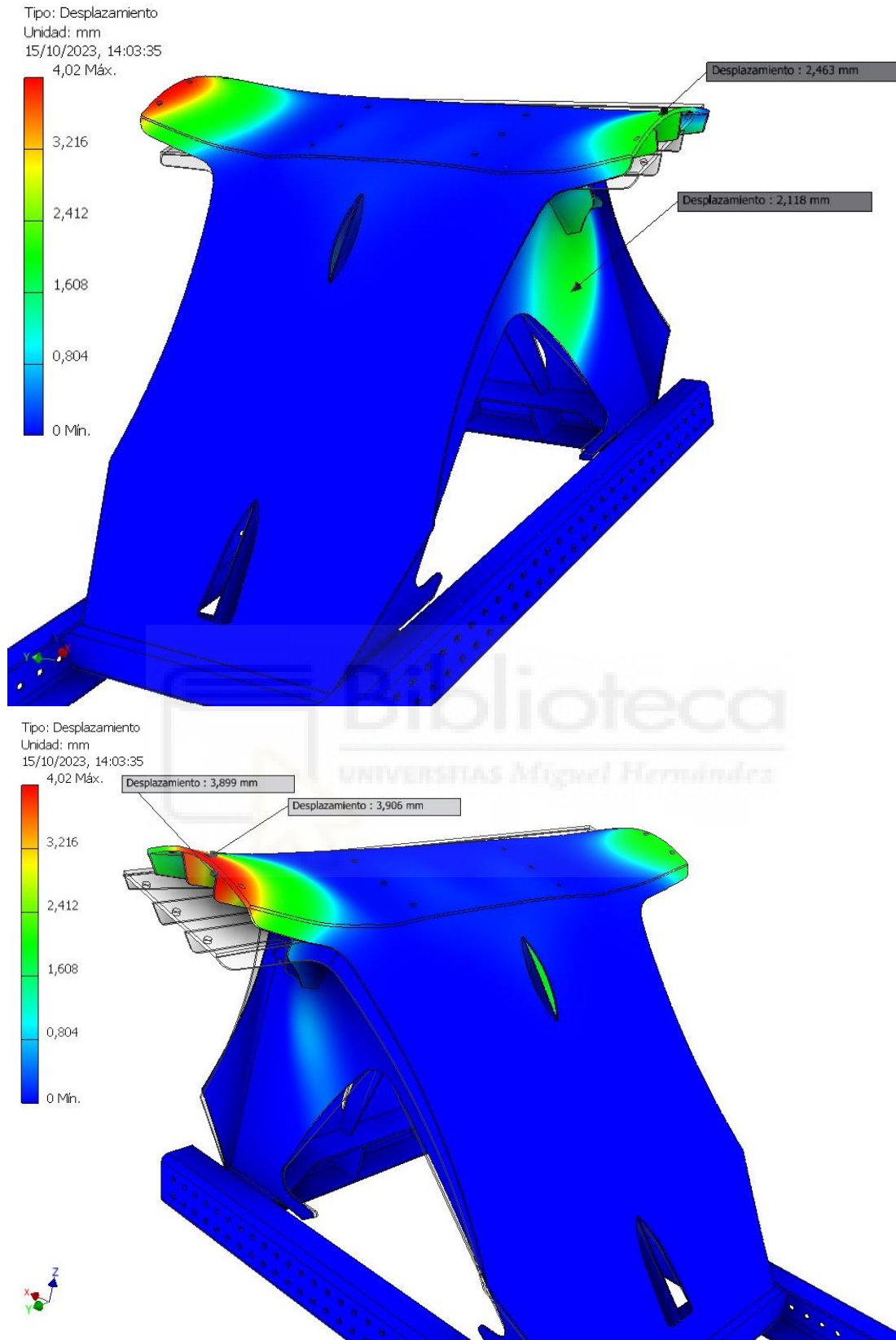
En cuanto a la deformación, las zonas deformadas siguen siendo las mismas, aumentando ligeramente, tan solo unas décimas de milímetro, su desplazamiento. Sin embargo, conforme la reducción de masa es mayor, vemos como una región localizada en la parte central del nervio derecho empieza a aumentar ligeramente de deformación, superando valores previos de deformación de apenas 1 mm.



**Figura 40.** Análisis de fuerzas de la estructura de 21% de eliminación de material (zona frontal y posterior).



**Figura 41.** Análisis de fuerzas de la estructura de 21% de eliminación de material (zona interior vista desde abajo).



**Figura 42.** Análisis de deformaciones de la estructura de 21% de eliminación de material.

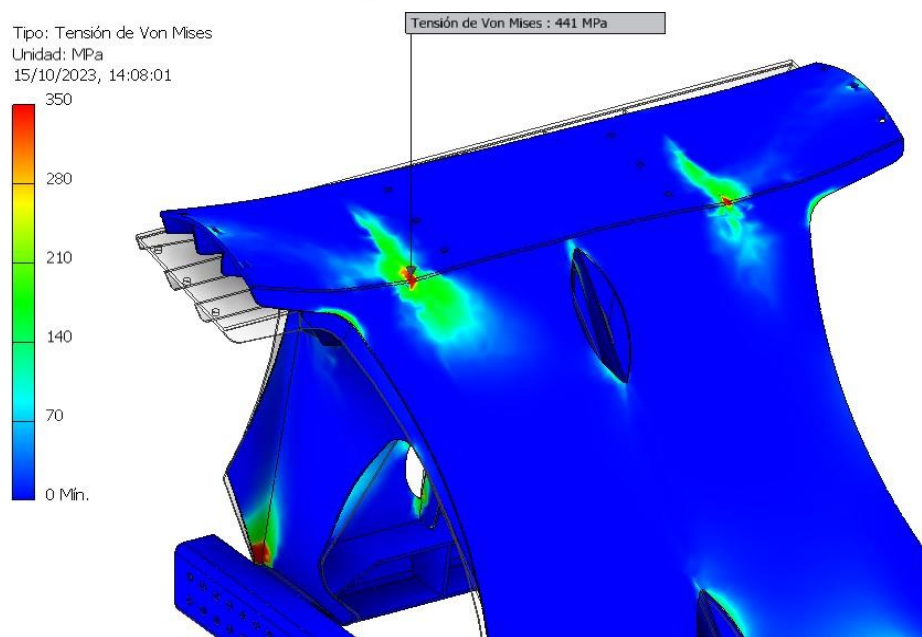


En cuanto a la tensión causada por los nervios interiores, se mantiene prácticamente igual, sin embargo, en la parte posterior, tras realizar agujeros en el centro de las láminas de acero frontal y trasera para eliminar masa extra, las tensiones situadas en las esquinas inferiores de la lámina posterior crecen considerablemente, incluso en el caso de la parte izquierda, su zona de concentración comienza a crecer.

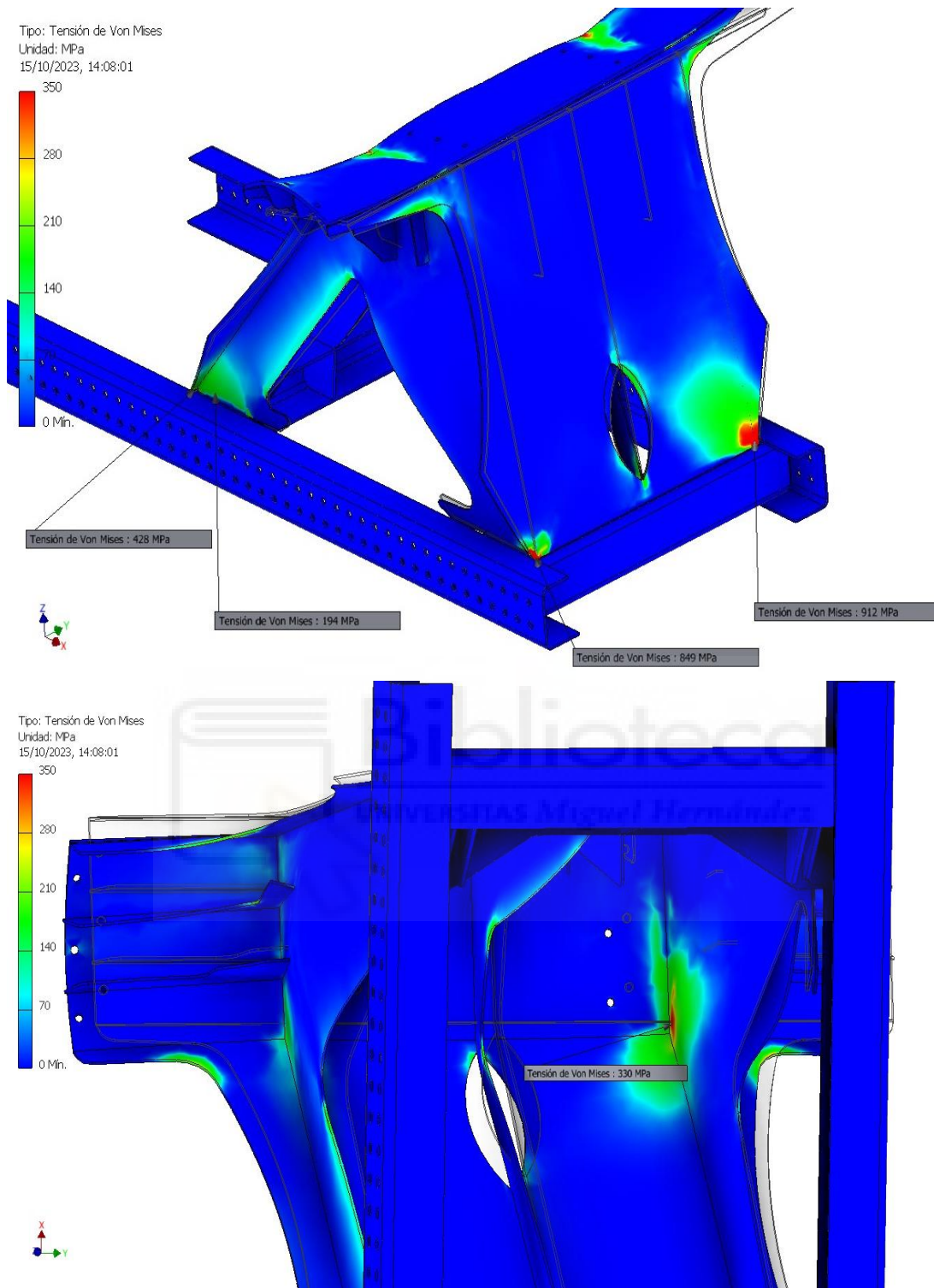
En su nervio derecho, la zona que anteriormente analizamos va perdiendo tensión, la cual, como hemos mencionado en el caso anterior, se va desplazando a la lámina frontal y a las aristas en contacto. Viendo los valores y los colores en esa zona se puede observar el cambio claro.

En la zona interior, la región se mantiene, aunque el valor también crece bastante comparado con el aumento lineal que seguía en los casos previos.

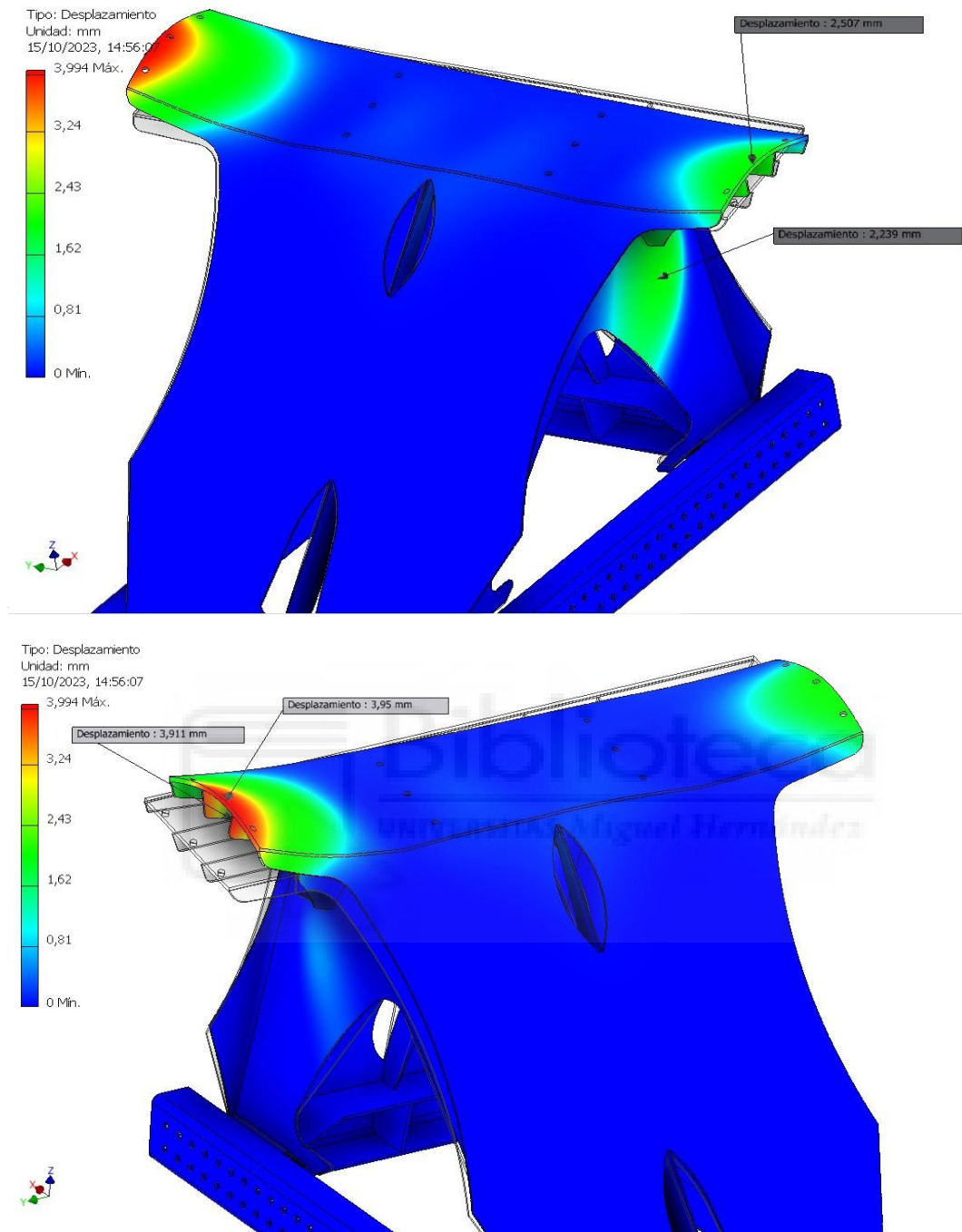
En cuanto a desplazamientos, las regiones se mantienen y los valores siguen creciendo ligeramente, con la misma tendencia de siempre. El único cambio significativo es que la región central del nervio derecho va aumentando ligeramente mientras que su valor de desplazamiento sube con una tendencia mayor que el resto de las zonas.



**Figura 43.** Análisis de fuerzas de la estructura de 23% de eliminación de material (zona frontal).



**Figura 44.** Análisis de fuerzas de la estructura de 23% de eliminación de material (zona posterior y zona interior vista desde abajo).



**Figura 45.** Análisis de deformaciones de la estructura de 23% de eliminación de material.

En la lámina trasera, los concentradores de tensión situados en las esquinas inferiores siguen creciendo conforme más material en la zona central de las láminas delanteras y traseras eliminamos. Llegan a valores que incluso superan el límite elástico del acero utilizado, por lo que romperían en un ensayo. La zona delantera inferior del nervio derecho sigue entorno a los mismos valores,

sin embargo, como ocurre en el caso de la eliminación de masa del 21%, la tensión generada en la lámina delantera en contacto con dicho nervio sigue creciendo de forma considerable.

En la zona interior no nos detendremos, ya que su valor apenas cambia con la eliminación de material en las zonas centrales.

En cuanto al desplazamiento, los concentradores de tensión han aumentado su valor ligeramente respecto al caso anterior, ya que, aunque se ha seguido reduciendo la cantidad de masa total de la estructura, la deformación solo se ha incrementado unas décimas de milímetro respecto.

### **-Concentradores de tensiones**

Para esquematizar de una forma sencilla y fácilmente visible, realizaremos una tabla con algunos de los puntos de concentración de tensión más interesantes de analizar y observaremos cuál es su tendencia en función de la eliminación de material.

Para aclarar que puntos vamos a utilizar, representaremos y explicaremos a continuación cuales usaremos. Adicionalmente añadiremos 2 puntos clave más que para las estructuras de mayor material eliminado, que también se han convertido en puntos críticos de la estructura.

- 1- Nervio izquierdo en contacto perpendicular con la lámina superior y la lámina frontal.
- 2- Esquina inferior derecha de la lámina trasera.
- 3- Parte inferior delantera del nervio derecho.
- 4- Esquina interior en la que se unen el nervio izquierdo y la lámina frontal.

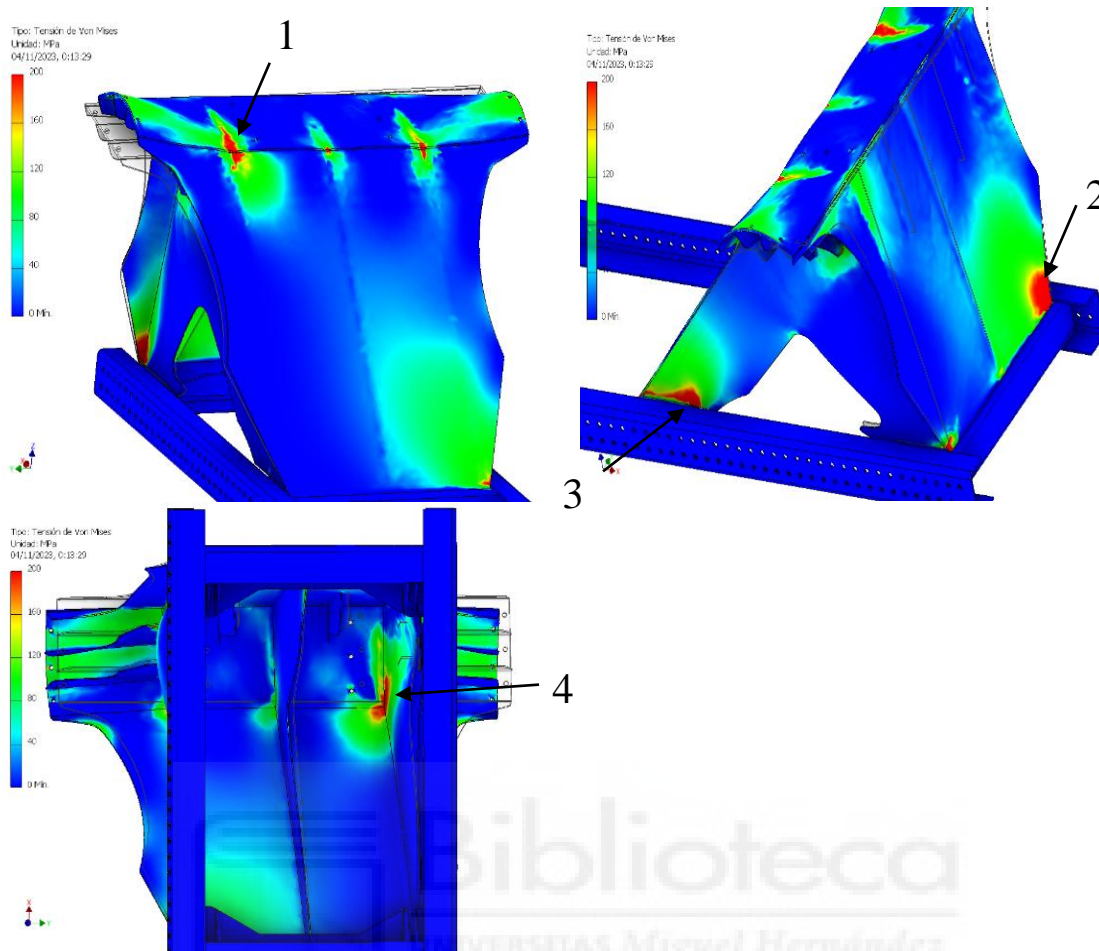


Figura 46. Indicación de puntos de estudio de concentradores de tensión.

Eliminación de material (%)	Puntos concentradores de tensión (MPa)			
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
<b>12%</b>	340	296	208	236
<b>15%</b>	359	345	220	246
<b>18%</b>	406	445	279	241
<b>21%</b>	414	741	188	321
<b>23%</b>	441	912	194	330

Como hemos mencionado previamente, al ir avanzando en el análisis y contrastando los valores y las regiones del estudio, hemos decidido añadir 2 puntos más al estudio en las estructuras que más material hemos eliminado, ya que hemos localizado zonas en las que la tensión en la región ha aumentado rápidamente y de forma brusca cuando el porcentaje de eliminación de material ha sido considerable, mientras que en otras zonas, dicha región que con una eliminación de material parecía un concentrador de tensión importante y una zona crítica por la que la estructura podría colapsar, dicha región se ha ido



desplazando a regiones aledañas a la misma, cambiando dichas concentraciones de tensión de zona.

Por ello hemos añadido 2 puntos más:

- 1- Esquina inferior izquierda de la lámina trasera.
- 2- Parte interior de la esquina inferior derecha de la lámina delantera, en contacto con el nervio derecho.

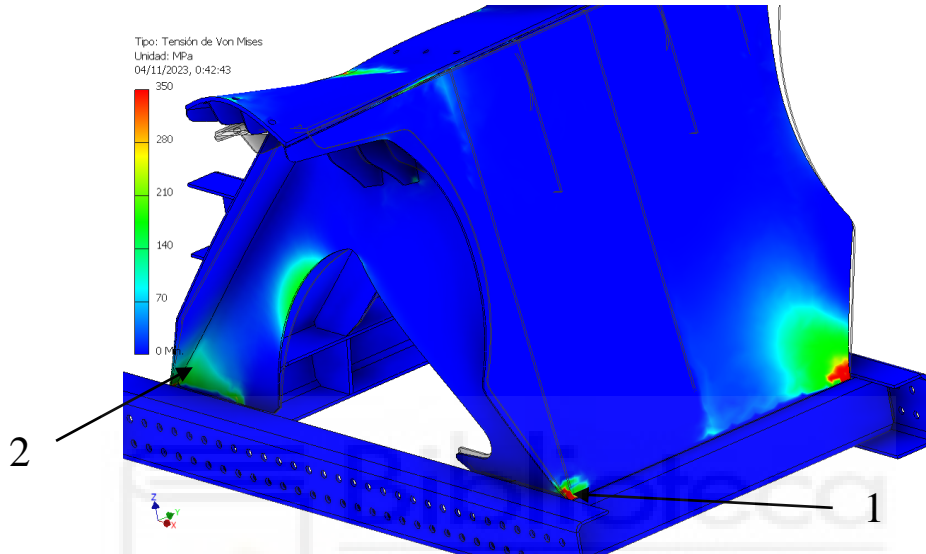


Figura 47. Indicación de puntos extra de estudio de concentradores de tensión.

Eliminación de material (%)	Puntos concentradores de tensión (MPa)	
	Punto 1	Punto 2
<b>18%</b>	406	445
<b>21%</b>	414	741
<b>23%</b>	441	912

Tras haber realizado una tabla con los valores más importantes en cuanto a la tensión de von Mises, vamos a realizar lo propio con las deformaciones de las zonas más interesantes de la estructura.

### 7.5. Resumen de resultados de deformaciones

Con las deformaciones, realizaremos el mismo proceso para simplificar el estudio de los puntos críticos donde las deformaciones toman unos valores bastante considerables y hay que tener en cuenta en futuras optimizaciones.

En este estudio, utilizaremos 3 puntos principales situados en los extremos de la lámina superior, para comprobar la deformación en dichas zonas tras el peso de la hormigonera, un tercer punto en los nervios estructurales en la zona superior de diseñados para favorecer la rigidez de la en dicha zona, y un cuarto punto que analizaremos en las zonas de mayor eliminación de masa, el cual crece de forma importante conforme la eliminación de material es mayor.

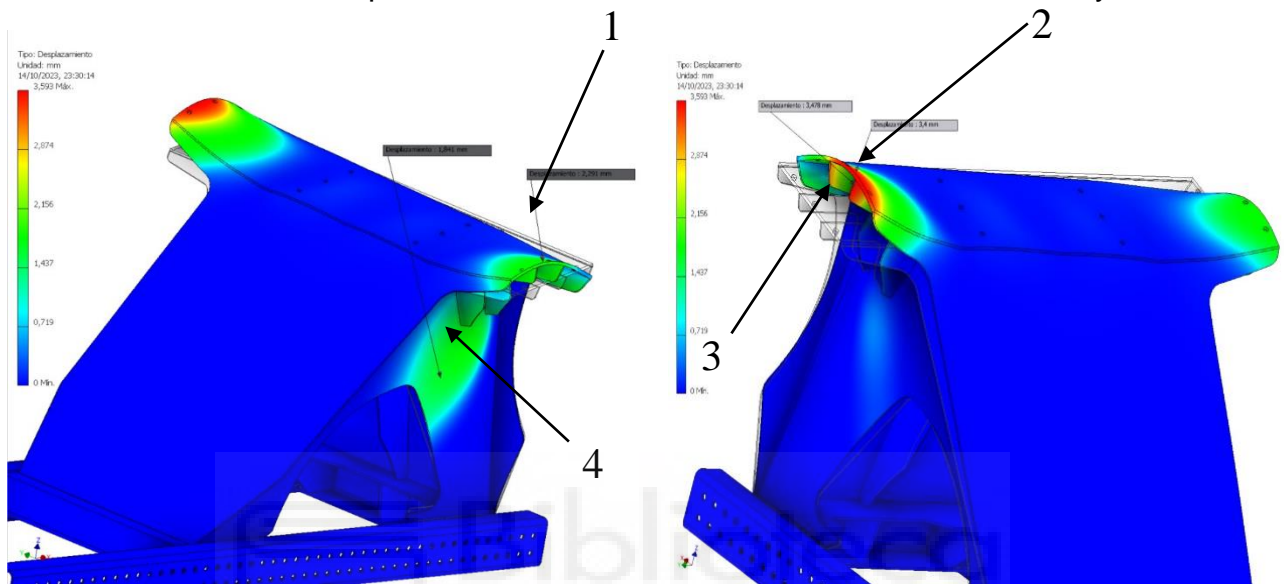


Figura 48. Indicación de puntos de estudio de zonas de deformación.

Eliminación de material (%)	Zonas de deformación (mm)			
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
12%	2,092	3,127	3,015	-
15%	2,175	3,289	3,278	-
18%	2,291	3,4	3,478	1,841
21%	2,463	3,906	3,899	2,118
23%	2,507	3,95	3,911	2,239

Analizando los valores mostrados en la tabla, podemos observar claramente como la deformación de las diferentes regiones crece de una manera más constante y líneas que los concentradores de tensión.

A su vez, nos damos cuenta de que, aunque esta deformación crezca de manera lineal, en puntos como el 2 y el 3 (zona izquierda de la lámina superior y nervio central de refuerzo de la estructura superior) estos valores tienden a 4mm o valor muy similar, ya que, aunque la eliminación de masa siga siendo considerable, esta solo crece unas pocas décimas de milímetro.

## 8. CONCLUSIONES

Tras este estudio completo de análisis de tensiones y deformaciones en los que se han sacado distinguido las zonas críticas y los valores de estas, es clave dar una conclusión.

Como hemos podido observar tras revisar los resultados de la tabla de puntos de concentración, sobre todo centrándonos en los puntos 2 y 4 de la primera gráfica y el punto 2 de los valores extra, una vez era necesario la eliminación de material de las zonas centrales de la lámina frontal y trasera, es decir, con los porcentajes de eliminación de material del 21% y 23% , los concentradores de tensión, sobre todo los colocados en las esquinas inferiores en contacto con el chasis del camión sufrían un aumento considerable, incluso superando el límite elástico del acero S700 que utilizamos. Estas zonas son críticas ya que son las que más deben resistir las fuerzas laterales para evitar el colapso hacia un lado de la estructura en mitad de una curva.

Estos valores en las esquinas inferiores en contacto con el chasis nos dan una señal clara de la importancia de una fijación extra en esa zona, como soldaduras o nervios añadidos que soporten parte de la tensión.

Con las deformaciones, al contrario que con las tensiones, podemos observar que, aunque eliminemos material en el centro de las láminas anterior y posterior, la deformación en las zonas más críticas, como es la placa superior donde se apoya el soporte de la hormigonera y los nervios laterales que ayudan a la estabilidad, se van deformando de una forma contante, tendiendo a los 4mm de deformación aún con gran cantidad de material eliminado. Esta deformación no sería realmente un problema en los porcentajes de material que vamos a eliminar ya que es una distancia mínima en comparación con las cargas que soporta.

Para finalizar, concluimos con que es posible realizar unas eliminaciones de material de hasta el 18-19% de material total sin que estas pérdidas afecten de forma considerable a la estabilidad y resistencia de la estructura, con unos valores tensionales dentro de los rangos de seguridad, en zonas como los nervios interiores en las regiones más alejadas de las láminas frontal y posterior, en los nervios laterales que refuerzan la estabilidad de la lámina superior donde

se apoyará la hormigonera y en las zonas más exteriores de la lámina frontal y posterior. A su vez, podemos observar que en las zonas centrales de las propias láminas frontal y posteriores inviable la eliminación de material, ya que, aunque haya zonas que en sí no soporten tensiones, la reducción de material afecta a su componente estructural y hace que las zonas de concentración de tensiones aumenten sus valores de tensión de forma considerable, superando los límites de seguridad permitidos.

### 8.3. Estudios futuros

Una forma de seguir con este proyecto sería la realización de la optimización de la estructura frontal, realizando el mismo procedimiento que hemos realizado anteriormente.

A su vez, si queremos adentrarnos en las últimas tendencias sobre optimización topológica, otra continuación ideal sería el estudio mediante elementos finitos con el uso de inteligencia artificial.

Ya actualmente, a un alto nivel tecnológico, se está empezando a extender la inteligencia artificial para este tipo de análisis de estructuras, mediante el cual, programando una serie de parámetros sobre la eliminación de masa y las propiedades mecánicas que debe tener, se puede realizar un diseño generativo en el cual haya una mayor precisión en las formas, pudiendo eliminar el máximo de material con las mismas propiedades, eliminando la parte de la creación humana que es claramente menos precisa a la hora de definir perfiles exactos para la reducción de material y que por tanto, pueden llevar a mayores posibles puntos de concentradores de tensiones que mediante una IA.

A su vez, aunque la IA pueda realizar los diseños más precisos y con mejores propiedades mecánicas, la labor del ingeniero debe mantenerse a la hora de poder asegurar que la figura diseñada por IA es posible de recrear en la realidad y no un diseño en ordenador cuya puesta en cadena de producción sea prácticamente imposible o a unos costes de fabricación que igualarían o superarían los costes de haber mantenido la cantidad de material anterior al estudio.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

1. Wikipedia – *Topology Optimization*. Consultado (06/2023). Disponible en: [https://en.wikipedia.org/wiki/Topology\\_optimization](https://en.wikipedia.org/wiki/Topology_optimization)
2. Birge, J.R. (2021). George Bernard Dantzig: The Pioneer of Linear Optimization. Consultado (07/2023). Disponible en: <https://mbrjournal.com/2021/01/26/george-bernard-dantzig-the-pioneer-of-linear-optimization/>
3. Safdarian, A., Fotuhi-Firuzabad, M., Aminifar, F., (2013). Composite power system adequacy assessment based on postoptimal analysis. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. Volume, 21 <https://doi.org/10.3906/elk-1104-36>
4. Waschinsky, N., Barthold, F.J. & Menzel, A. (2021). Structural optimisation of diffusion driven degradation processes. Volume 64, Pages 889–903 <https://doi.org/10.1007/s00158-021-02900-8>
5. *Formlabs – Topology Optimization 101: How to Use Algorithmic Models to Create Lightweight Design*. Consultado (06/2023). Disponible en: <https://formlabs.com/blog/topology-optimization/>
6. Contreras, L. (2020). *La optimización topológica en la impresión 3D*. Consultado (01/2024). Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/optimizacion-topologica-10012017/>
7. Jihong, Z., Han, Z., Chuang, W., Lu, Z., Shangqin, Y. and Weihong, Z. (2021). A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. Chinese Journal of Aeronautics, Volume 34, Issue 1, Pages 91-110. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.020>.
8. Costa, P. (2018). *The History of the Topology Optimisation*. Consultado (01/2024). Disponible en: <https://phelipecostapde.blogspot.com/2018/04/the-history-of-topology-optimisation.html>
9. Parametric House: Architecture, Art & Design®. Topology optimization. Consultado (01/2024). Disponible en: <https://parametrichouse.com/topology-optimization2/>



10. Papadrakakis, M., Tsompanakis, Y., Hinton, E. and Sienz, J. (1996). Advanced solution methods in topology optimization and shape sensitivity analysis. Engineering Computations, Volume 13, Issue 5, Pages 57-90. <https://doi.org/10.1108/02644409610120696>
11. Machineryline – Mercedes-Benz 3746 camión hormigonera nueva. Consultado (01/2024). Disponible en: <https://machineryline.pe/-/venta/camiones-hormigoneras/Mercedes-Benz/3746--23052302183350820700>
12. Mirlisena, G., (2016). Método de los elementos finitos: ¿qué es? Consultado (01/2024). Disponible en: <https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>
13. Rodrigues, J.S. (1975). Node Numbering Optimization in Structural Analysis. Journal of the Structural Division, Volume 101, Issue 2, Pages: 361-376. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0003997>
14. PROJECTPAPERS.NET©. Development of Nodal Analysis for Production Optimization- A Software Assisted Approach. Consultado (01/2024). Disponible en: <https://www.projectpapers.net/development-of-nodal-analysis-for-production-optimization-a-software-assisted-approach/>