



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Cálculo y análisis de un nuevo diseño aligerado
de suelo de contenedor para transporte
intermodal de mercancías.

Calculation and analysis of a new lightened container
floor design for intermodal freight transport.

Autor/es

José Bielsa Barrabés

Director/es

Emilio Larrodé Pellicer

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2019

RESUMEN

En el presente proyecto se desea conseguir que la estructura portante de un contenedor de transporte intermodal pueda utilizarse de manera independiente. Se incorporarán perfiles que otorguen rigidez al conjunto y se llevará a cabo una reducción de peso de la misma.

Para ello se modelizará el sistema en un software de elementos finitos y se simularán ensayos que determinen las condiciones de trabajo de este.

Los resultados obtenidos darán información sobre la viabilidad o no de este proyecto, determinando si se puede conseguir su propósito y poder llevarlo a cabo en un futuro.

ÍNDICE

1. OBJETO, JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE	7
2. ESTADO DEL ARTE.....	8
2.1. EL TRANSPORTE INTERMODAL	8
2.2. UNIDADES DE TRANSPORTE	9
2.3. INFRAESTRUCTURAS.....	9
2.4. EQUIPOS.....	10
3. DISEÑO DE LA PLATAFORMA DE CONTENEDOR	11
3.1. ELEMENTOS QUE COMPONEN LA PLATAFORMA.....	11
3.2. MATERIALES UTILIZADOS.....	15
4. CÁLCULO Y ANÁLISIS DE LA PLATAFORMA.....	16
4.1. CREACIÓN DEL MODELO	16
4.2. CREACIÓN DE LA MALLA	17
4.3. ANÁLISIS DE LOS MODOS DE VIBRACIÓN	17
4.4. CONDICIONES DE CONTORNO	19
4.4.1. ENSAYO DE IZADO.....	19
4.4.2. ENSAYO DE FLEXIÓN.....	20
4.4.3. ENSAYO DE TORSIÓN.....	21
4.5. CARGAS	22
4.5.1. ENSAYO DE IZADO.....	22
4.5.2. ENSAYOS DE FLEXIÓN	22
4.5.3. ENSAYO DE TORSIÓN.....	22
5. RESULTADOS Y MEJORAS OBTENIDAS	23
5.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS INICIALES	23
5.1.1. ENSAYO DE IZADO.....	23
5.1.2. ENSAYO DE FLEXIÓN.....	24
5.1.3. ENSAYO DE TORSIÓN.....	25
5.2. OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO.....	26
5.2.1. ENSAYO DE IZADO.....	27
5.2.2. ENSAYO DE FLEXIÓN.....	28
5.2.3. ENSAYO DE TORSIÓN.....	29
5.2.4. CONCLUSIONES	30
5.3. REDUCCIÓN DE PESO DE LA PLATAFORMA	31
5.3.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	31
5.3.2. ENSAYO DE IZADO.....	34

5.3.3. ENSAYO DE FLEXIÓN.....	35
5.3.4. ENSAYO DE TORSIÓN.....	36
5.3.5. CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS.....	37
5.3.6. ANÁLISIS DE LOS MODOS DE VIBRACIÓN	37
6. CONCLUSIONES	40
7. BIBLIOGRAFÍA.....	41
ANEXO I: PLANOS DE PARTIDA	42
ANEXO II: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	49

1. OBJETO, JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE

El objeto de este proyecto es la modificación de la estructura portante de un contenedor de transporte intermodal para conseguir aligerar su peso, y adaptarla a una plataforma perfectamente funcional sin tener que acoplar las paredes y el techo para conseguir las condiciones de rigidez necesarias. Esta estructura está conformada por perfiles de acero que, a menudo, se sobredimensionan.

Para ello se tendrán en cuenta las dimensiones y características del material iniciales, provenientes de los diseños actuales, y se modelizará la estructura para poder variar los parámetros del diseño.

Se debe tener en cuenta que el proyecto se destina a una aplicación particular en la que la carga que se desea soportar es, concretamente, de tres toneladas y media. Por ello los ensayos que simulan condiciones de trabajo se realizan con este peso.

El diseño se realizará en dos etapas: una de mejora del funcionamiento de la plataforma y otra de reducción de peso. En la primera se introducirán nuevos perfiles para conseguir que el comportamiento de la misma en las condiciones de trabajo sea el correcto. Tras esto, la segunda consistirá en reducir o aumentar los espesores de determinadas piezas para redistribuir el peso y mantener, o incluso mejorar, las prestaciones de la plataforma con un peso reducido.

La plataforma se modelizará con ABAQUS, un software que utiliza herramientas de método de elementos finitos. Se simularán ensayos de situaciones a las que puede estar sometida la estructura y se observará la evolución de los resultados conforme se van incorporando las mejoras oportunas.

Las etapas en las que se divide el proyecto son las siguientes:

- Etapa 1: Poner en contexto el trabajo, explicando qué es el transporte intermodal, tipos y elementos que lo componen.
- Etapa 1: Definir el actual diseño de la estructura, detallando los perfiles que la conforman y los materiales que se utilizan.
- Etapa 2: Creación del modelo en ABAQUS y simulación de los ensayos pertinentes, determinando las características de estos.
- Etapa 3: Análisis de los resultados obtenidos y planteamiento y desarrollo de las optimizaciones que se realizan sobre la estructura.
- Etapa 4: Extracción de conclusiones y planteamientos futuros.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. EL TRANSPORTE INTERMODAL

El Ministerio de Fomento define el transporte intermodal como “el movimiento de mercancías en una misma unidad o vehículo usando sucesivamente dos o más modos de transporte sin manipular la mercancía en los intercambios de modo”.

Las ventajas de esta forma de transporte se dividen en dos subgrupos:

- Reducción de costes sociales: seguridad viaria, contaminación tanto atmosférica como acústica, consumo de energía, consumo de materias primas...
- Reducción de costes infraestructurales: reducción del tráfico por carretera y mejor aprovechamiento de las capacidades de los sistemas de transporte.

Esto conlleva la necesidad de crear unas redes de distribución que permitan que el intercambio de mercancías en las estaciones intermodales sea lo más eficiente posible para disminuir costes y tiempos.

En la intermodalidad intervienen cuatro tipos de transporte:

- Transporte marítimo de corta distancia, que se refiere al transporte de mercancías entre puertos europeos o entre un puerto europeo con uno localizado en un mar que sirven de frontera de Europa. Cuando se conectan dos o más puertos para distribuir o consolidar la carga se denomina servicio de aporte.

Para realizar operaciones entre los grandes puertos de buques oceánicos con puertos menores se utiliza un buque feeder, pues el calado de los grandes transoceánicos no permite el desplazamiento costero ni sale rentable mover tal cantidad de masa. El feeder se alimenta de contenedores del buque de tamaño mayor y es él el encargado de distribuirlos por los puertos más pequeños, permitiendo que el buque oceánico haga escala en menos puertos.

- Transporte aéreo. Es el más rápido y eficaz para largas distancias, pero también el más costoso. Principalmente se utiliza para el transporte de materiales perecederos, como alimentos que no pueden congelarse como por ejemplo la fruta.
- Transporte por ferrocarril. Una vez la carga llega a tierra, o simplemente parte desde un almacén y no necesita viajar por mar, se puede utilizar el ferrocarril para su envío. Para grandes cargas es una forma mucho más barata de transporte que por carretera, aunque tiene la desventaja de que no puede llegar hasta el mismo destino en la mayoría de los casos.
- Transporte por carretera. La carga se lleva en camiones que van desde el mismo almacén de salida hasta la puerta del almacén de llegada, pues la

red de carreteras es mucho más extensa que la de ferrocarril. La desventaja es que, mientras el ferrocarril puede transportar cantidades más grandes de carga, los camiones deben hacer muchos más viajes para llevar la misma cantidad, lo que supone un aumento de coste y tiempo.

Para conseguir uniformizar las unidades de carga en los tres tipos de transporte se utilizan unidades de transporte normalizadas que se acoplan fácilmente a los tres modos de transporte, permitiendo así una agilidad mayor en los envíos.

Consecuentemente, se deben emplear herramientas normalizadas para las cargas y descargas de los mismos, así como sistemas de sujeción en cada modalidad de transporte que se adapten a los contenedores sin que estos tengan que ser modificados.

2.2. UNIDADES DE TRANSPORTE

Las unidades de transporte más utilizadas son dos:

Caja móvil: Es aquella unidad creada para el transporte de mercancías y adaptada perfectamente a los vehículos terrestres, lo que la convierte en excepcional para el viaje en carretera o tren, y equipada con dispositivos adecuados para el transbordo entre ambos modos.

Contenedor: Es el término utilizado para designar una caja que transporta mercancías, que puede utilizarse multitud de veces gracias a la rigidez de su estructura, que puede apilarse y que cuenta con los elementos necesarios para permitir la transferencia entre modos. Existen tres tipos:

- **Contenedor terrestre:** Aquel que cumple la normativa de la International Railway Union (UIC) para utilizarse en ferrocarril o carretera.
- **Contenedor marítimo:** El más utilizado es el contenedor cerrado fabricado en acero.
- **Contenedor aéreo:** Está adaptado a la normativa de navegación aérea.

De las distintas opciones de contenedor el más utilizado es el cerrado, pero existen otros como el granelero, de techo abierto, isoterma, cisterna o plataforma, entre otros.

2.3. INFRAESTRUCTURAS

Se debe contar con espacios acondicionados para la realización de operaciones que permitan el transporte intermodal. Las más habituales son las siguientes:

- **Centro de transporte:** Plataforma logística centrada en el transporte por carretera, habitualmente de ámbito metropolitano o provincial.

- Centro de carga aérea: plataforma especializada en el intercambio modal aire-tierra y el tratamiento de mercancías aéreas.
- Estación nodal: punto para recogida, clasificación, transbordo y redistribución de mercancías en una zona geográfica determinada.
- Plataforma logística: Puntos o áreas de ruptura de las cadenas de transporte en los que se concentran actividades y funciones técnicas de valor añadido (carga y descarga, intercambio modal, almacenamiento, etc.)
- Puerto seco: terminal intermodal de mercancías situada en el interior de un país que dispone de enlace directo con un puerto marítimo.
- Terminal multimodal: lugar equipado para el transbordo y almacenamiento de UTIs (unidad de transporte intermodal)

2.4. EQUIPOS

Para realizar todo este entramado de operaciones e intercambios de cargas se precisa de una maquinaria que se adapte adecuadamente a las unidades de transporte intermodal y facilite su manipulación. Estos equipos son:

- Apiladora telescópica: grúa automóvil equipada de un dispositivo de elevación frontal que permite desplazar, elevar y apilar las UTIs.
- Grúa pórtico: elemento de elevación formado por un pórtico que puede desplazar cargas vertical, horizontal y lateralmente, maniobrando sobre raíles o neumáticos. Para coger los contenedores se utiliza el spreader, el cual se acopla a los corners que tienen en la parte inferior permitiendo una fuerte sujeción.
- Carretilla pórtico: similar a la grúa pórtico, pero con más libertad de movimiento, pues no va guiada.

3. DISEÑO DE LA PLATAFORMA DE CONTENEDOR

Se estudia el caso de una plataforma que, en un principio, se utiliza como base de un contenedor de 13200 mm de largo y 2550 mm de ancho, con capacidad para soportar una carga de 34 toneladas, incluyendo el peso propio.

Este contenedor cumple la normativa UNE-EN 452:1995 de cajas móviles de clase A, dimensiones y especificaciones generales.

El suelo está compuesto de 64 piezas, de las cuales 10 son perfiles, 12 son traviesas y 42 son placas de refuerzo. Inicialmente todas las piezas tienen un espesor de 3mm, espesor que variará para lograr el objetivo del estudio.

3.1. ELEMENTOS QUE COMPONEN LA PLATAFORMA

La plataforma se puede dividir en dos partes de acuerdo a la longitud de los perfiles que la componen, pudiéndose ver en la siguiente imagen:

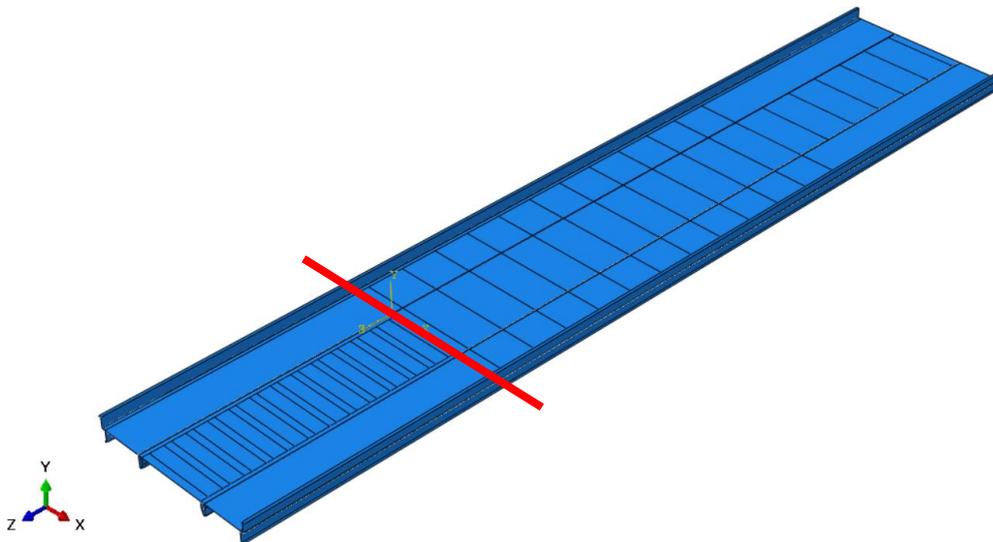


Figura 1 - Vista del conjunto de la plataforma

Por un lado se distingue el cuello de cisne, que supone en torno a un tercio de la longitud. Está muy reforzado porque es la zona de enganche entre el contenedor y los camiones que lo transportan, de forma que debe absorber los esfuerzos de gancho.

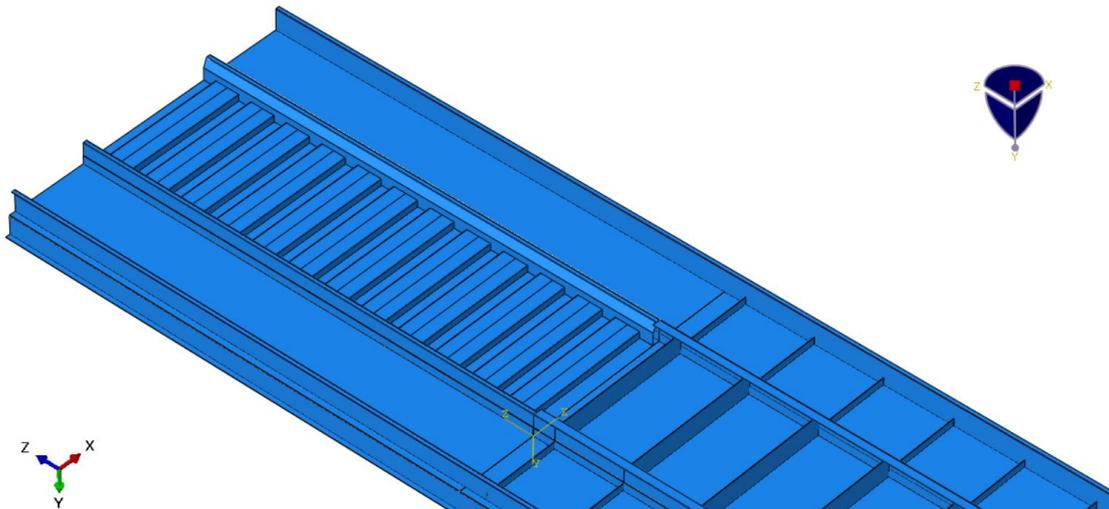


Figura 2 – Vista inferior del cuello de cisne

Los perfiles que componen el cuello de cisne son los siguientes:

- Perfil central en forma de C con pie. En su interior se sueldan las traviesas de refuerzo y los cartabones, mientras que los perfiles laterales se sitúan en las caras exteriores. Su longitud es de 3704mm.

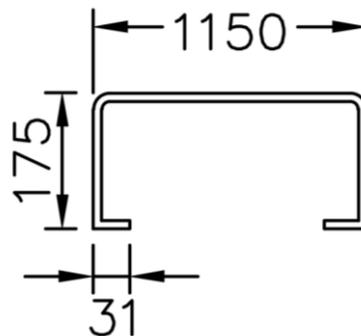


Figura 3 - Perfil central del cuello de cisne

- Dos perfiles laterales en forma de L. Se localizan a ambos lados del perfil central, y su longitud también es de 3704mm.

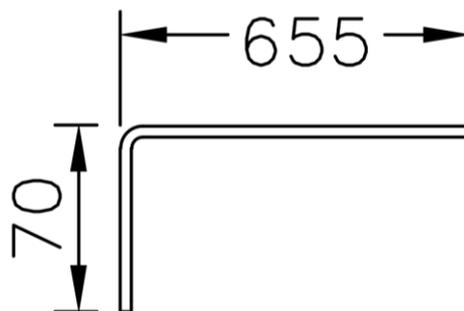


Figura 4 - Perfil lateral del cuello de cisne

- Dos cartabones en forma de L con chaflán, apoyados en el pie del perfil central. De nuevo de longitud 3704mm.

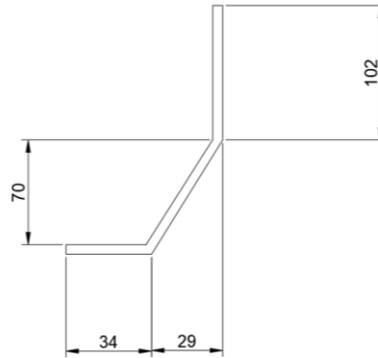


Figura 5 - Cartabones de unión del cuello de cisne

- Doce traviesas de 1028mm de longitud, soldadas por la parte inferior del perfil central.

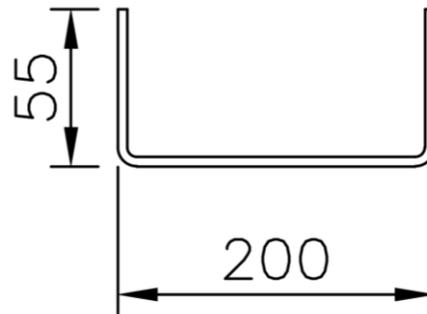


Figura 6 - Traviesas del cuello de cisne

Por otro lado están los perfiles más largos, aunque con una forma similar, que componen una estructura que permite soportar los esfuerzos de las cargas que se colocan encima:

- Perfil central en forma de C con un pie mayor que en el cuello de cisne, de longitud 6636mm.

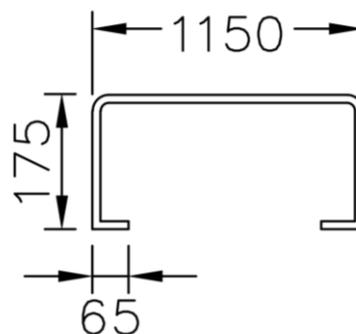


Figura 7 - Perfil central de la plataforma

- Dos perfiles laterales idénticos a los del cuello de cisne, pero de longitud 6636mm.

- 16 placas centrales de 169x1150mm, más 2 situadas en el final de 60x1150mm.
- 24 placas laterales, distribuidas en dos hileras de 12 en cada lado, de 70x607mm.

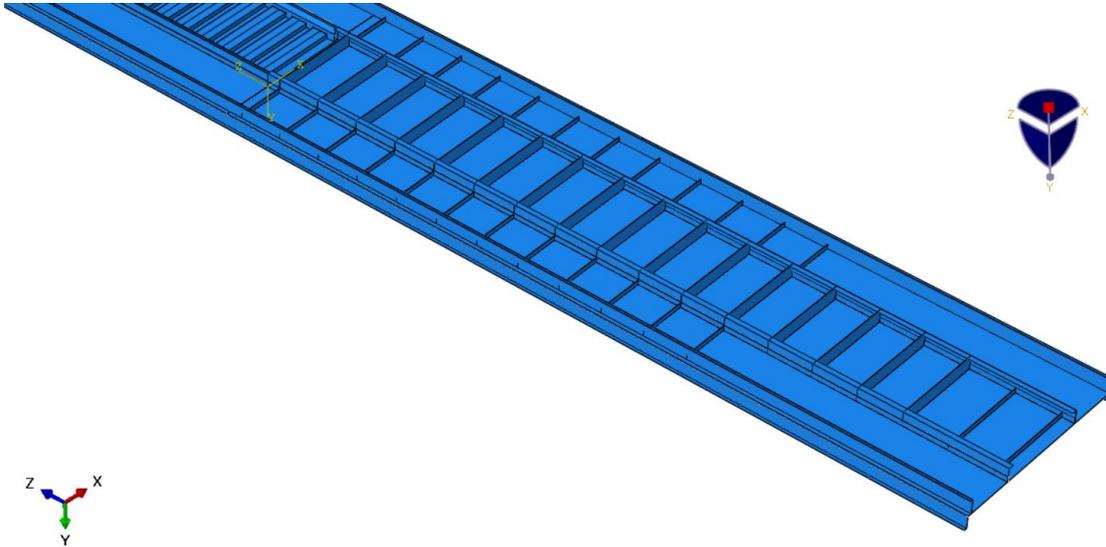


Figura 8 - Vista inferior de la plataforma

Finalmente aparecen dos perfiles exteriores en forma de escalera que abarcan por completo la longitud de la plataforma y que sirven de apoyo para el contenedor.

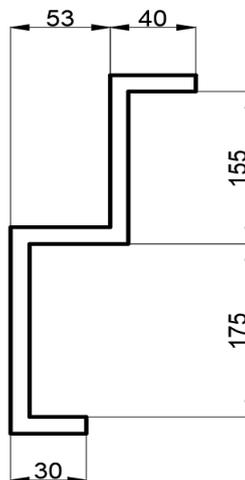


Figura 9 - Perfil exterior

La suma del peso de todos ellos es de 1.458,13Kg, valor que se intentará disminuir tras realizar los ensayos y modificaciones pertinentes.

3.2. MATERIALES UTILIZADOS

La estructura estudiada se compone de perfiles de acero de 3mm de espesor, en concreto el acero estructural S355. Presenta las siguientes propiedades de interés:

ACERO 355	VALOR
Módulo de elasticidad	210.000 N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.3
Densidad	7.850 kg/m ³
Tensión de límite elástico (espesor<16mm)	355 N/mm ²
Tensión de rotura	470 N/mm ²

Tabla 1 - Propiedades del acero utilizado

4. CÁLCULO Y ANÁLISIS DE LA PLATAFORMA

El proceso de cálculo y análisis será el siguiente:

- a) Para empezar e introducirá el modelo en el programa Abaqus a partir de los planos proporcionados.
- b) Después se realizará el mallado de la plataforma y se impondrán las condiciones de contorno y las cargas.
- c) Se analizarán los modos de vibración de la estructura para encontrar erratas o fallos en el modelado y solucionarlos debidamente.
- d) A continuación se harán los ensayos de izado, flexión y torsión y se evaluarán los resultados.
- e) Posteriormente se introducirán mejoras en el modelo.
- f) Por último se harán ensayos de sensibilidad y se reducirá el peso de la estructura de acuerdo a estos.

4.1. CREACIÓN DEL MODELO

El análisis se llevará a cabo mediante el software de elementos finitos Abaqus CAE. Este programa se divide en distintos módulos para facilitar la labor del usuario a la hora de definir el problema a analizar:

Módulo part: En él se definen las piezas que se desean introducir y que luego compondrán la estructura final. Las piezas pueden ser formato Beam (la magnitud en una dirección mucho mayor que en las otras dos), Shell (la magnitud en una dirección mucho menor que en las otras dos) o Solid (las tres magnitudes similares). Para este estudio utilizaremos el formato Shell, pues el espesor de los perfiles y placas es mucho menor que las dimensiones a lo largo y alto. De este modo, se dibuja la forma del perfil y posteriormente se hace una extrusión de valor la longitud del perfil.

Módulo Property: en este módulo se definen los materiales y secciones y se asignan a las piezas creadas en el módulo Part. En este caso se define un material llamado “acero”, con las características mecánicas correspondientes, y una sección llamada “espesor3”, de forma que, al realizar la asignación, la pieza posee las propiedades definidas en este módulo.

Módulo Assembly: Aquí se establecen las relaciones entre todas las Parts creadas anteriormente, pero sin definir ninguna interacción entre ellas, es solo colocación espacial. Permite rotar y desplazar las piezas para diseñar la estructura final.

Módulo Step: Este módulo se utiliza para agrupar un conjunto de cargas o condiciones de contorno y aplicarlas sobre la estructura de forma ordenada. Se ha creado un step “Initial” en el que se introducen las condiciones de contorno y las precargas (en caso de haberlas), un step “carga”, que engloba todas las cargas que actúan sobre la estructura, y un step “freq”, para realizar el análisis de frecuencias naturales.

Módulo Interaction: su función es establecer las relaciones entre las partes del Assembly. En este módulo y para este proyecto se han creado todas las soldaduras que unen las piezas mediante la función Tie.

Módulo Load: En él se introducen las cargas deseadas para el análisis. Se elige la categoría de la carga, para este estudio mecánica, y el tipo, de los que se ha elegido de presión para simular las cargas apoyadas sobre la estructura, y puntuales para el ensayo de torsión.

Módulo Mesh: Se utiliza para caracterizar la malla. Este módulo se comenta posteriormente para explicar las particularidades de la malla de la plataforma objeto de estudio.

4.2. CREACIÓN DE LA MALLA

Para crear el mallado se utiliza la función *Mesh* de Abaqus. Se define una malla estructurada con elementos de tipo *Quad* para el cálculo de la estructura, debido a que las formas de los perfiles son más fácilmente aproximables a elementos cuadrados o rectangulares. El tipo de elemento es el *S4R*, con un punto de integración y seis grados de libertad por nodo, el cual se adapta perfectamente a los elementos tipo *Shell*, como en este caso. El tamaño del nodo es de 100mm, por lo que definirán 136 nodos a lo largo de la longitud del contenedor, con un total de 9342 nodos.

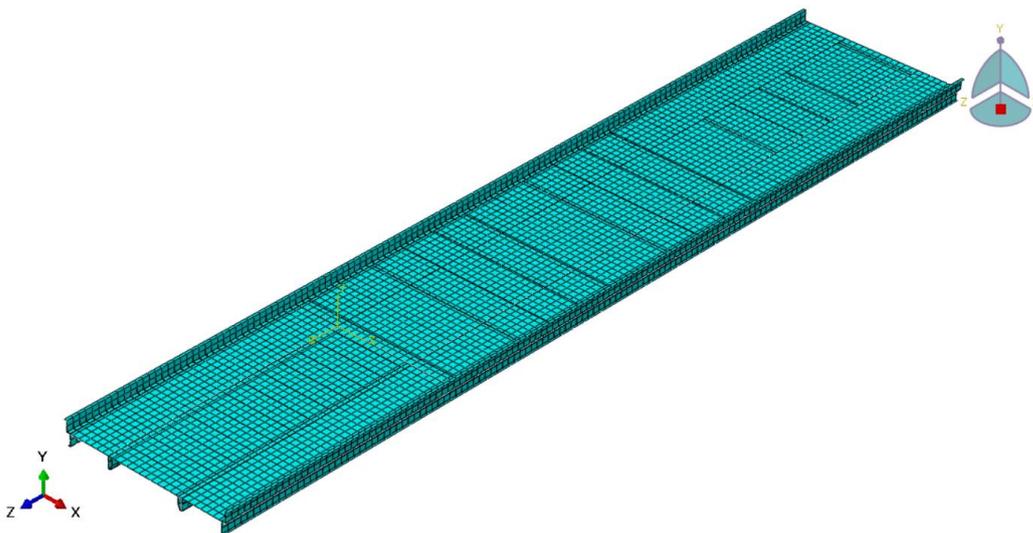


Figura 10 - plataforma mallada

4.3. ANÁLISIS DE LOS MODOS DE VIBRACIÓN

Para determinar cuales son los estadios más probables de fallo de la estructura se realiza un análisis de frecuencias naturales. Este ensayo proporciona información valiosa en cuanto a la consistencia de esta, pues se pueden

determinar fácilmente fallos en la modelización, como interacciones mal planteadas o inexistentes, que equivaldrían a malas soldaduras, o debilidad de alguna zona en particular.

Para realizar este análisis no se establece ninguna condición de contorno ni ninguna carga, de forma que se permite que la estructura se deforme libremente en función de las frecuencias introducidas.

Modo	Frecuencia (Hz)	Esfuerzo que provoca la deformación
0-7	0	-
8	0.17	Flexión
9	0.24	Flexión
10	0.26	Torsión

Tabla 2 - Modos de vibración

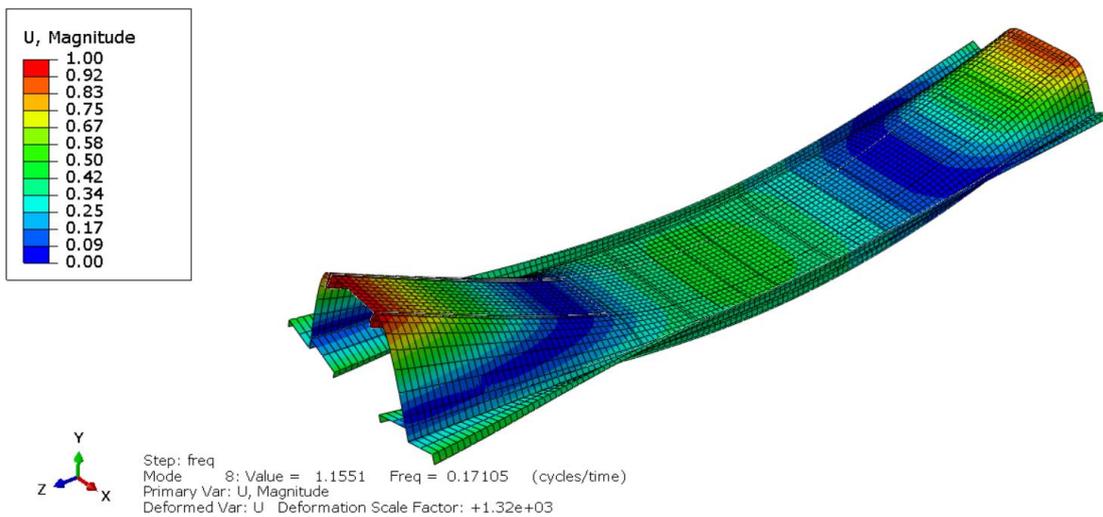


Figura 11 - Modo 8 de vibración

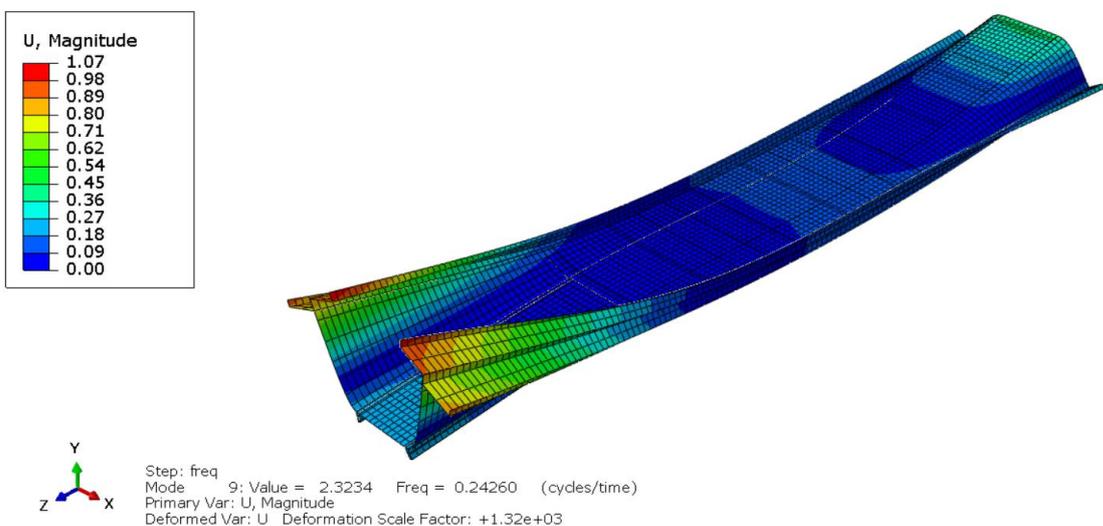


Figura 12 - Modo 9 de vibración

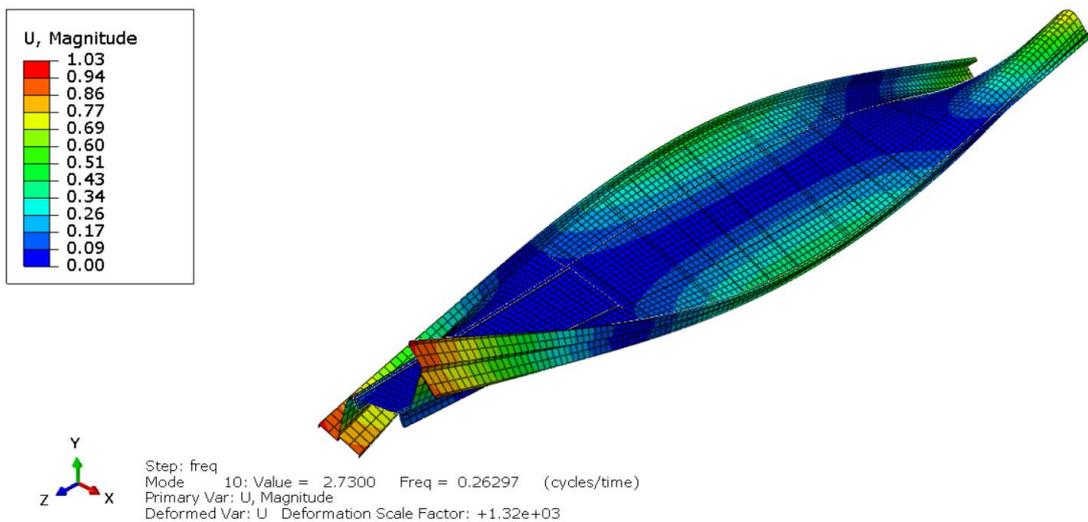


Figura 13 - Modo 10 de vibración

Dado que los primeros modos de vibración son a flexión y a torsión, se llevarán a cabo ensayos para asegurar que aguanten las condiciones de trabajo cuando se someten a esfuerzos de estas características.

4.4. CONDICIONES DE CONTORNO

4.4.1. ENSAYO DE IZADO

En este caso las condiciones de contorno simulan las situaciones de carga y descarga de contenedores en puertos o estaciones de transporte intermodal, en las que la plataforma es agarrada por las cuatro esquinas inferiores mediante una grúa o spreader. Para aproximarse a esta situación, se establecen dos empotramientos en dos esquinas y dos restricciones de movimiento en las direcciones Y y Z en las otras dos. Para ello se ha definido una superficie de 250mm (de la misma dimensión que el *corner* que se ubica en esa posición) como la que se ve en la imagen.

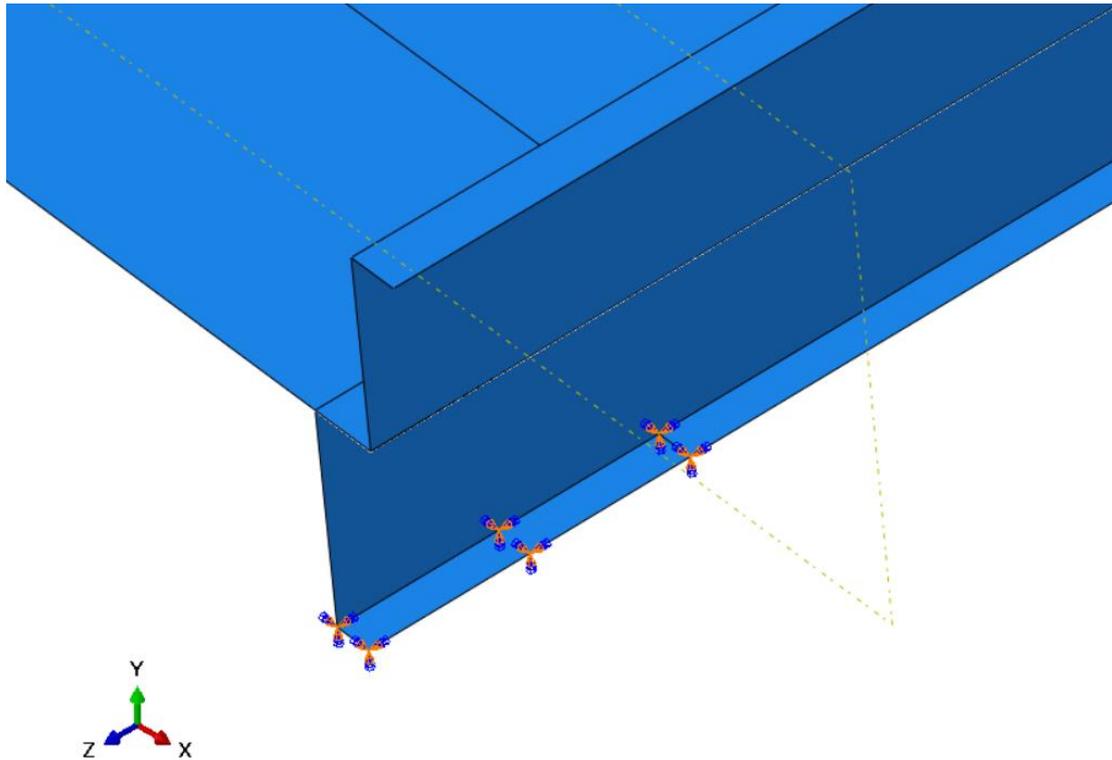


Figura 14 - Condiciones de contorno del ensayo de izado

4.4.2. ENSAYO DE FLEXIÓN

Mediante este ensayo se simula la situación de funcionamiento, es decir, cuando la plataforma porta carga y está apoyada, ya sea en un camión, en un vagón de ferrocarril o en un almacén portuario. Las condiciones de contorno en este caso son dos apoyos a lo largo de toda la parte inferior de los perfiles exteriores que impiden el desplazamiento en Y , permitiendo el movimiento en las direcciones X y Z .

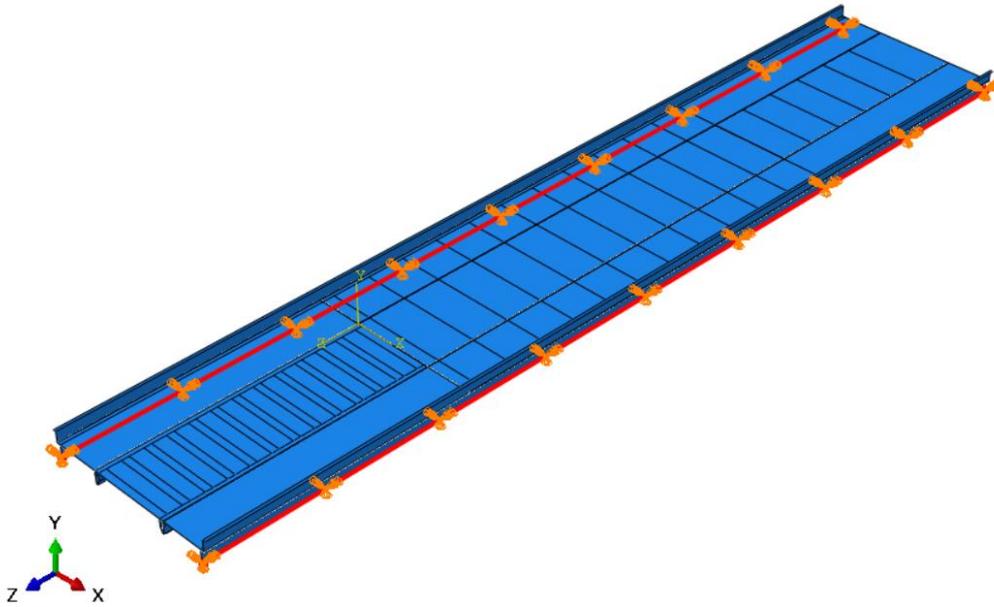


Figura 15 - Condiciones de contorno del ensayo de flexión

4.4.3. ENSAYO DE TORSIÓN

Se va a estudiar el hipotético suceso de que fallase un *corner* y la plataforma quedase coja, de manera que se garantice la seguridad de que la estructura no va a romperse. Para simularlo se establecen unas condiciones de contorno similares a las del caso de izado, pero esta vez solo apoya en tres puntos.

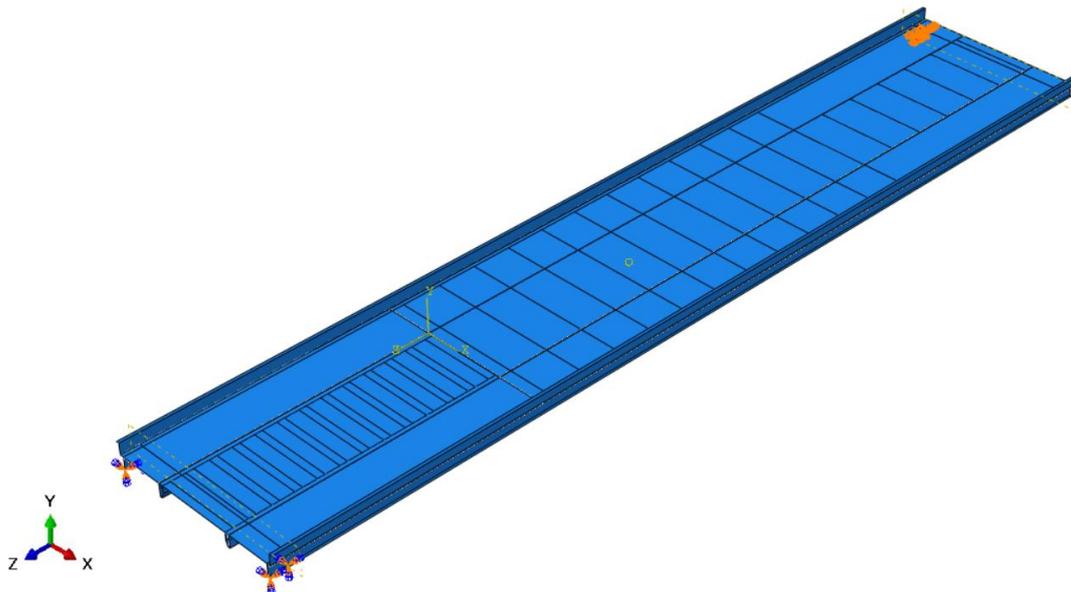


Figura 16 - Condiciones de contorno del ensayo de torsión

4.5. CARGAS

4.5.1. ENSAYO DE IZADO

La carga aplicada en este ensayo es de 3,5 toneladas uniformemente distribuidas por toda la superficie.

Teniendo en cuenta que la superficie de la plataforma es de 13.200mm por 2.550mm, la presión aplicada en la dirección -Y es de 0.015MPa.

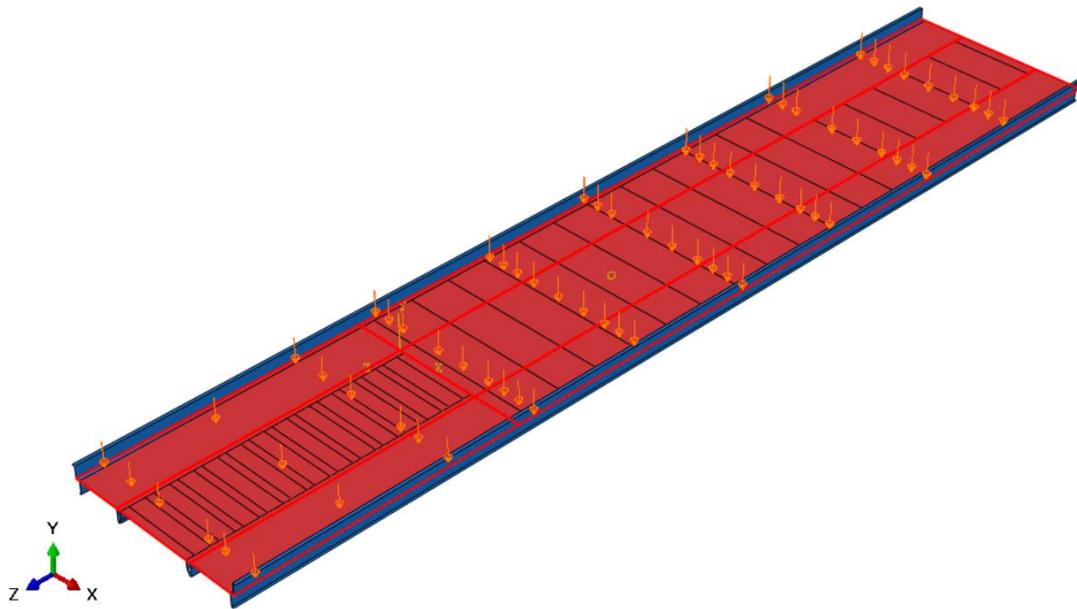


Figura 17 - Cargas en el ensayo de izado

4.5.2. ENSAYOS DE FLEXIÓN

En este caso se aplica la misma carga que en el ensayo de izado e igualmente distribuida.

4.5.3. ENSAYO DE TORSIÓN

La carga aplicada en este ensayo será solo el propio peso de la estructura, pues se trata de un caso excepcional y no una condición de trabajo.

5. RESULTADOS Y MEJORAS OBTENIDAS

Para determinar si los resultados obtenidos son buenos o no se deben tener en cuenta las limitaciones de tensión y flecha:

- La tensión máxima está condicionada por el límite elástico del material, que como se ha indicado anteriormente es de 355 MPa.
- La flecha máxima permitida es la longitud entre doscientos cincuenta, es decir:

$$F_{max} \frac{13.200}{250} = 52,8 \text{ mm}$$

5.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS INICIALES

5.1.1. ENSAYO DE IZADO

Las tensiones máximas obtenidas en el ensayo superan el límite elástico del material, llegando casi a doblar su valor, por lo que plastificaría. Esta tensión máxima se da en los puntos de apoyo de la plataforma, por donde agarraría el spreader.

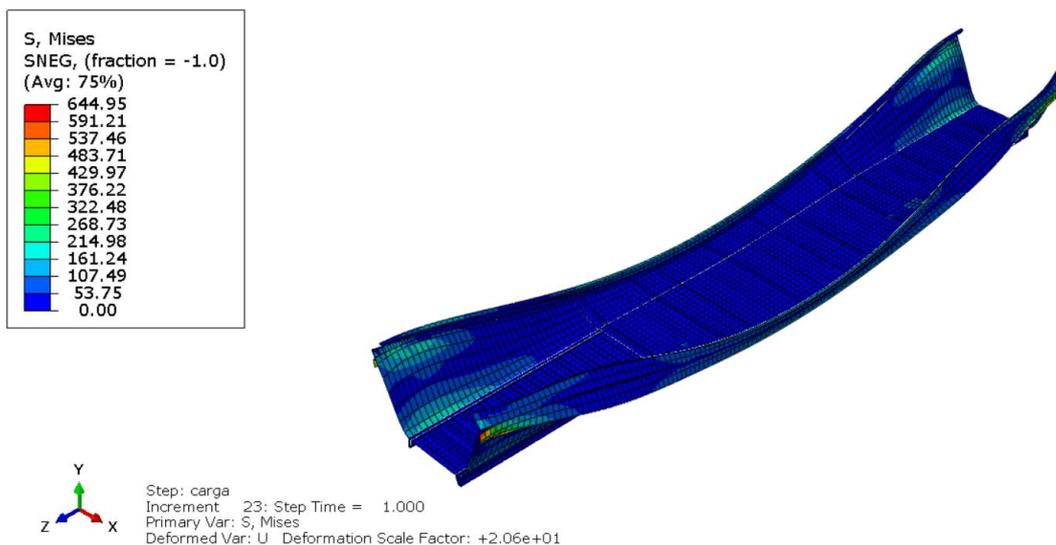


Figura 18 - Tensión máxima en ensayo de izado

Las deformaciones también son superiores a las permitidas, de manera que esta plataforma no podría utilizarse por no cumplir las condiciones de trabajo exigidas. Su valor máximo se da en la parte central, concretamente en el perfil central.

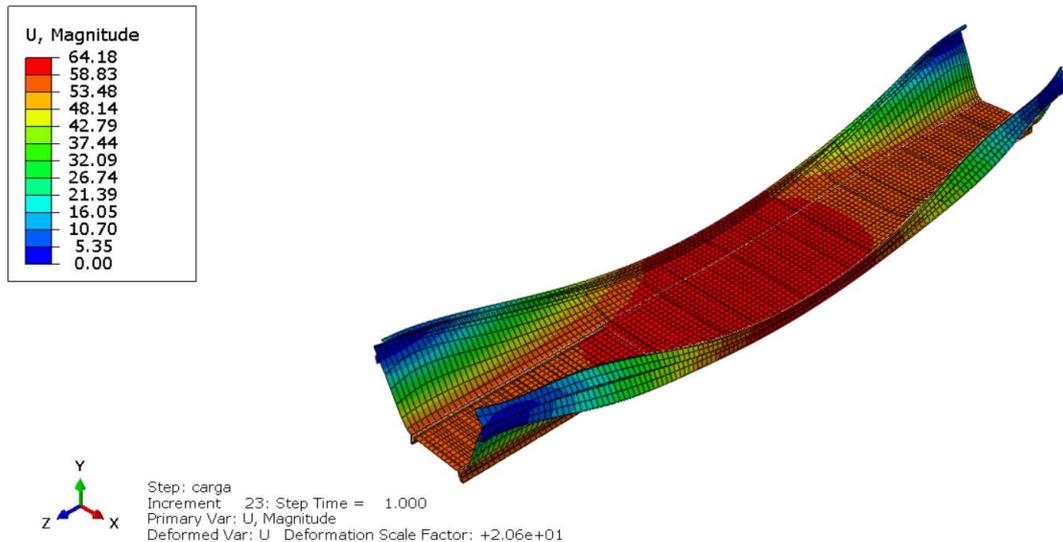


Figura 19 - Deformación máxima en el ensayo de izado

5.1.2. ENSAYO DE FLEXIÓN

Las tensiones, en este caso, quedan por debajo del límite elástico del acero, por tanto cumple el ensayo. Las tensiones máximas aparecen en las placas laterales de refuerzo más cercanas al cuello de cisne.

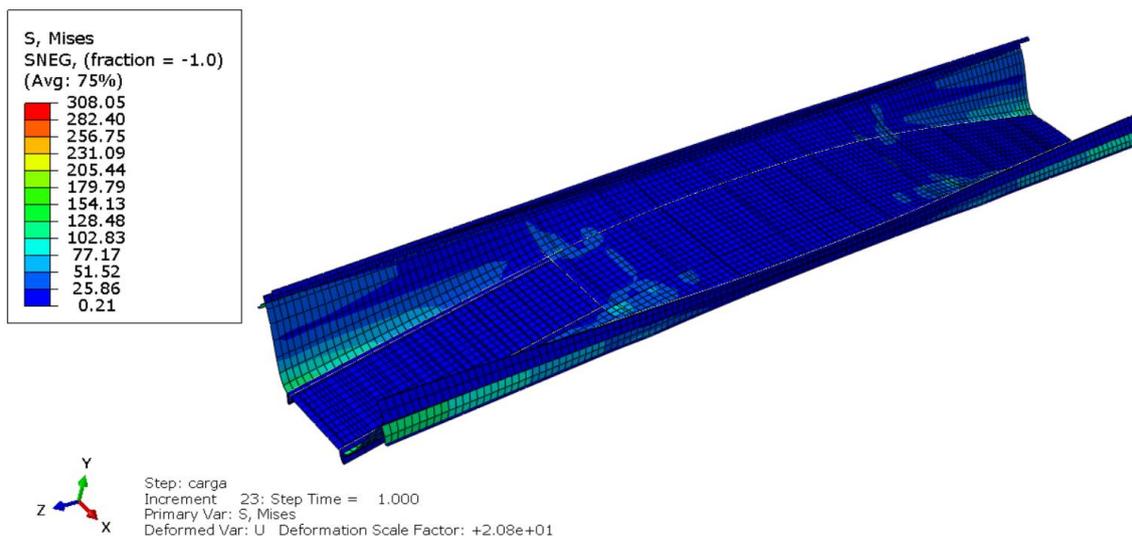


Figura 20 - Tensión máxima en el ensayo de flexión

En cambio, las deformaciones superan la flecha máxima permitida, siendo máximas en la parte posterior de la plataforma. Esto se debe a que en esa zona se dejan de acoplar las placas laterales, lo que hace que disminuya la rigidez, provocando que los desplazamientos sean mayores.

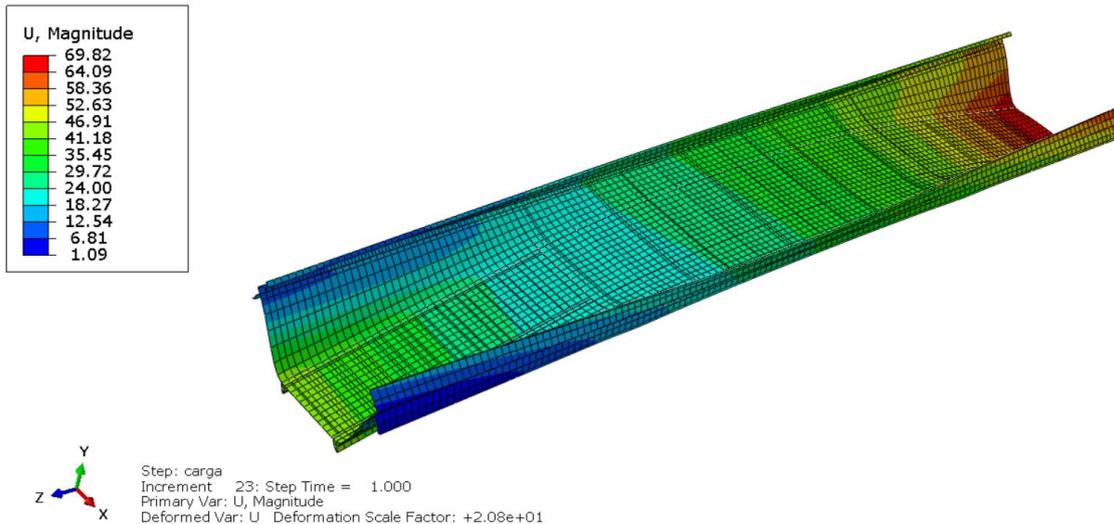


Figura 21 - Deformación máxima en el ensayo de flexión

5.1.3. ENSAYO DE TORSIÓN

Las tensiones, para una carga de 3,5 toneladas, ascienden a 2100 MPa, por lo que se descarta que resista a un fallo en uno de los apoyos sin plastificar. En cambio, cuando no lleva carga sí que resistiría, por ejemplo en un fallo en las tareas de maniobra.

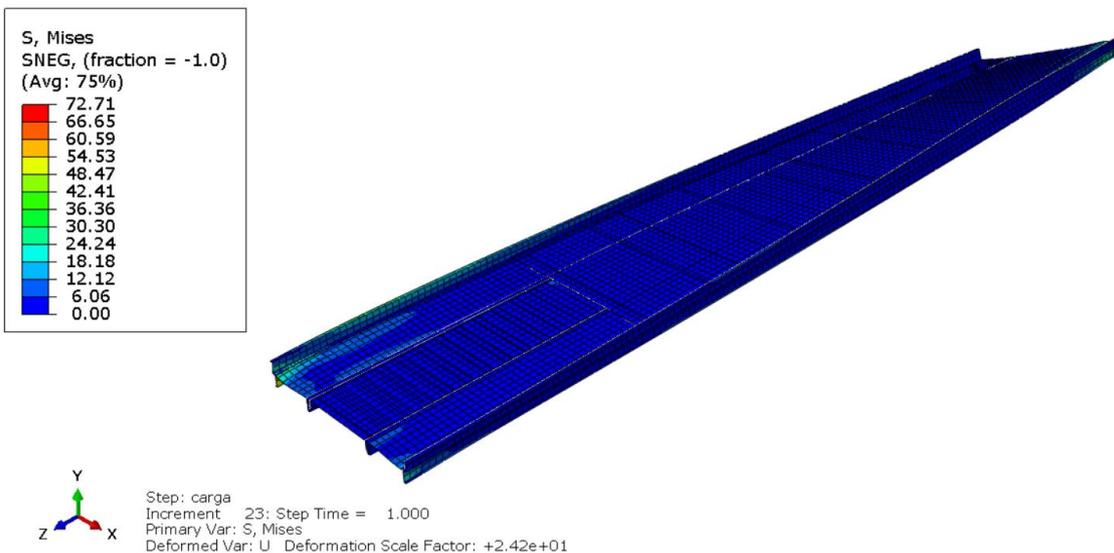


Figura 22 - Tensión máxima en el ensayo de torsión

La flecha máxima supera la permitida, pero como es un caso excepcional no se tendrá en cuenta. Simplemente interesa ver si la estructura podría recuperarse, pues el límite de flecha es para que el diseño sea funcional y no se está dando un caso de estas características.

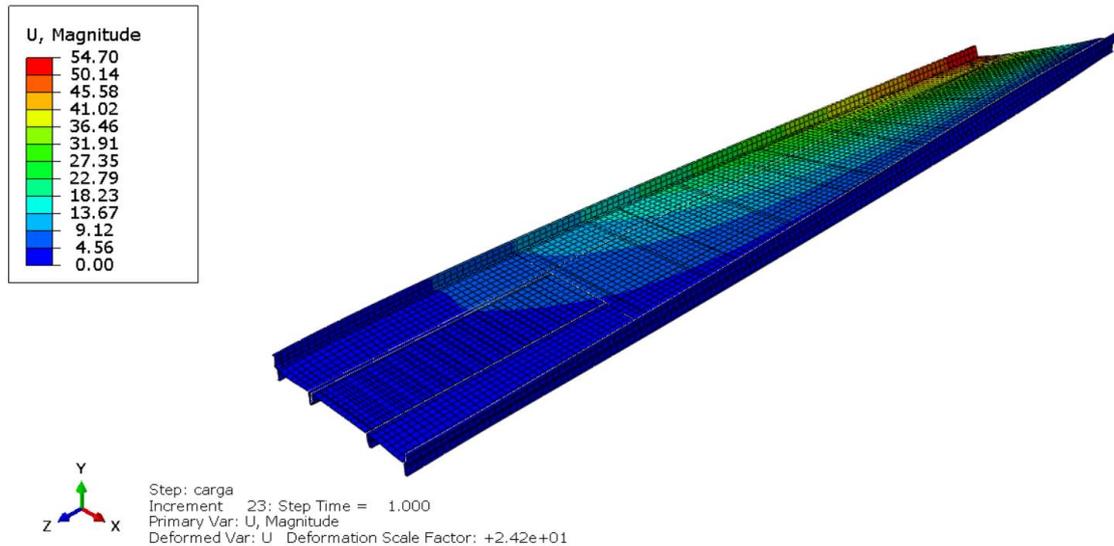


Figura 23 - Deformación máxima en el ensayo de torsión

5.2. OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO

A la vista de los resultados obtenidos se llega a la conclusión de que la estructura necesita aumentar su rigidez. Los perfiles exteriores están desaprovechados en este diseño ya que, trabajando en condiciones óptimas, pueden aportar muchísima rigidez. Como están trabajando de manera independiente no cumplen su función eficientemente, algo que sí ocurriría al incorporar las paredes y el techo del contenedor, de forma que se va a acoplar un perfil en C en la parte anterior y posterior para conseguir una plataforma compacta y poder disminuir las tensiones máximas.

La posición con la plataforma vista de frente sería la siguiente, y así en ambos extremos de la estructura. El espesor es el mismo que para los demás perfiles de la estructura, 3mm.

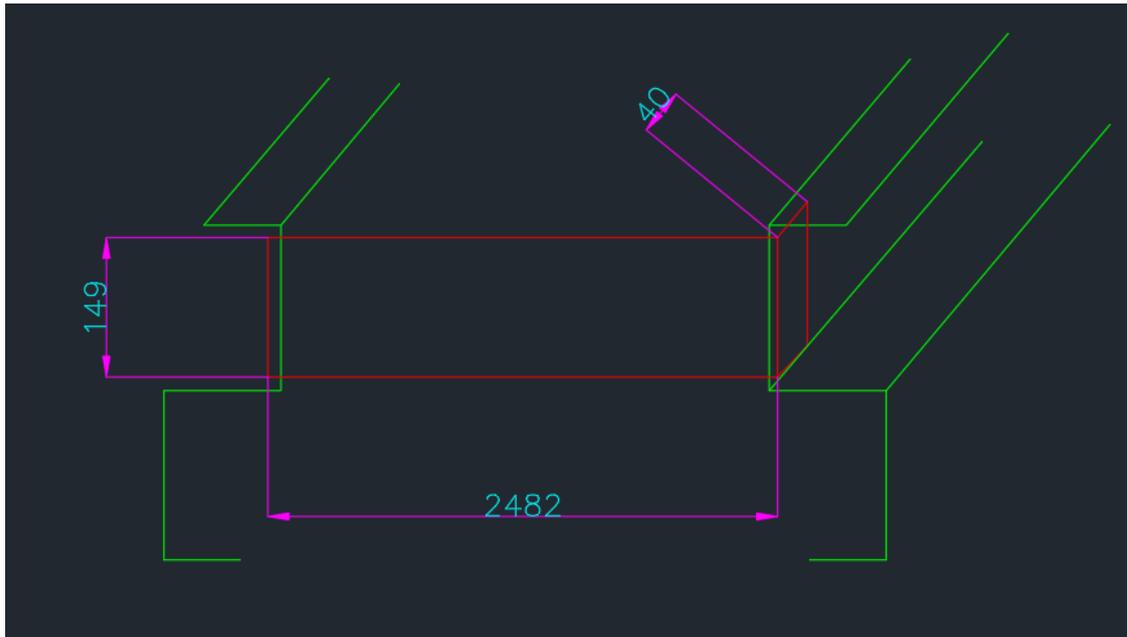


Figura 24 - Acople del nuevo perfil a la estructura

Únicamente se coloca en la parte superior de los perfiles exteriores para no dificultar las labores de carga y descarga, puesto que se obstruirían los agujeros para las cinchas y amarres de los camiones o para cargarla con el spreader.

Se han repetido los tres ensayos para poder comparar las mejoras obtenidas con los casos anteriores.

5.2.1. ENSAYO DE IZADO

Al incorporar los perfiles en C las tensiones máximas durante el izado entran dentro del rango elástico del material, siendo inferiores a 355 MPa. La distribución es similar y las tensiones máximas siguen apareciendo en los puntos de agarre de la estructura.

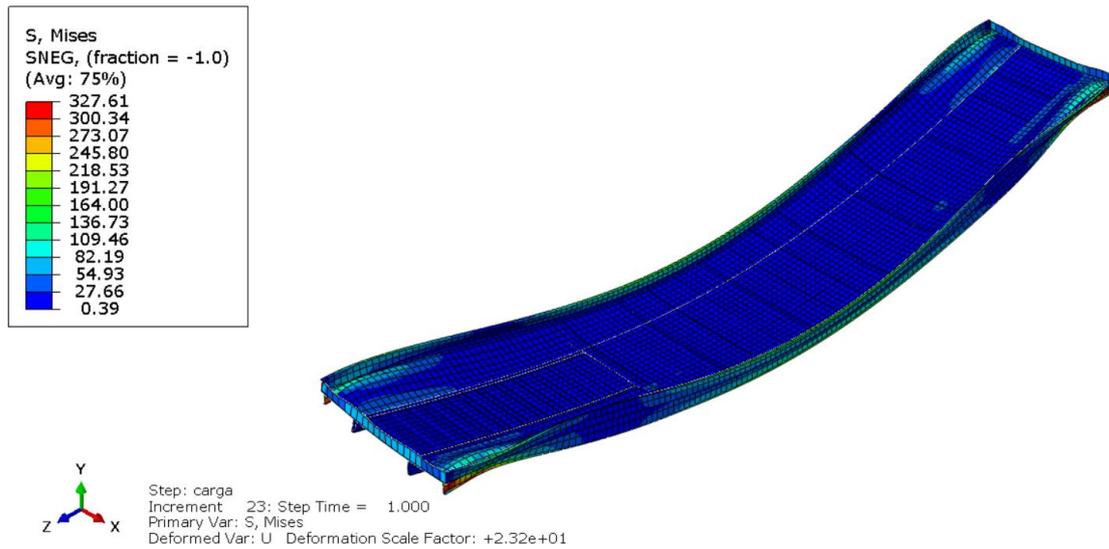


Figura 25 - Tensiones máximas en el ensayo de izado tras incorporar el nuevo perfil

La flecha máxima obtenida todavía está fuera de la permitida, y sigue apareciendo en la parte central de la plataforma siguiendo la misma distribución que anteriormente.

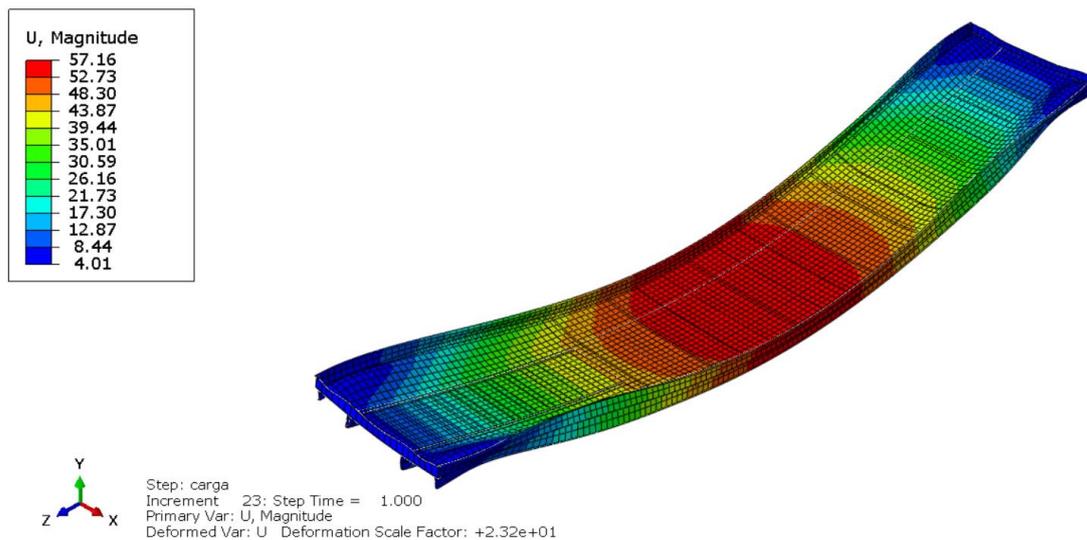


Figura 26 - Deformaciones máximas en el ensayo de izado tras incorporar el nuevo perfil

5.2.2. ENSAYO DE FLEXIÓN

Las tensiones máximas se reducen a la mitad, consiguiendo así un coeficiente de seguridad mayor de 2. La distribución continúa siendo la misma, ya la tensión máxima aparece en las primeras placas laterales de refuerzo.

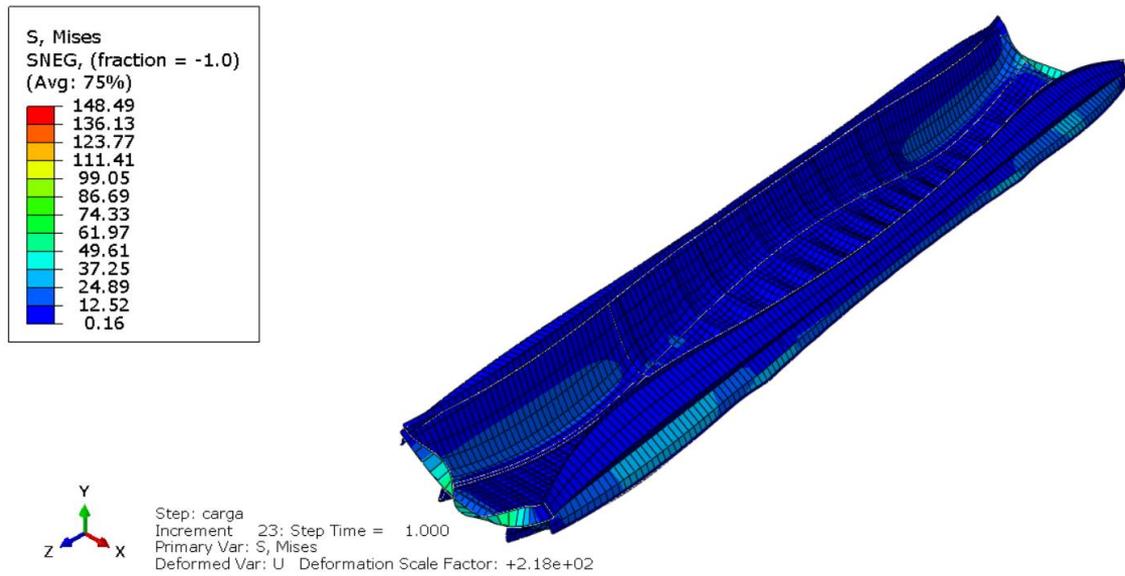


Figura 27 - Tensiones máximas en el ensayo de flexión tras incorporar el nuevo perfil

Lo que se consigue con esta modificación se plasma en este ensayo: una gran reducción de la flecha máxima, obteniendo unas deformaciones máximas diez veces menores que las anteriores. La distribución cambia, y los desplazamientos máximos se dan en el cuello de cisne, pero muy por debajo del límite de flecha.

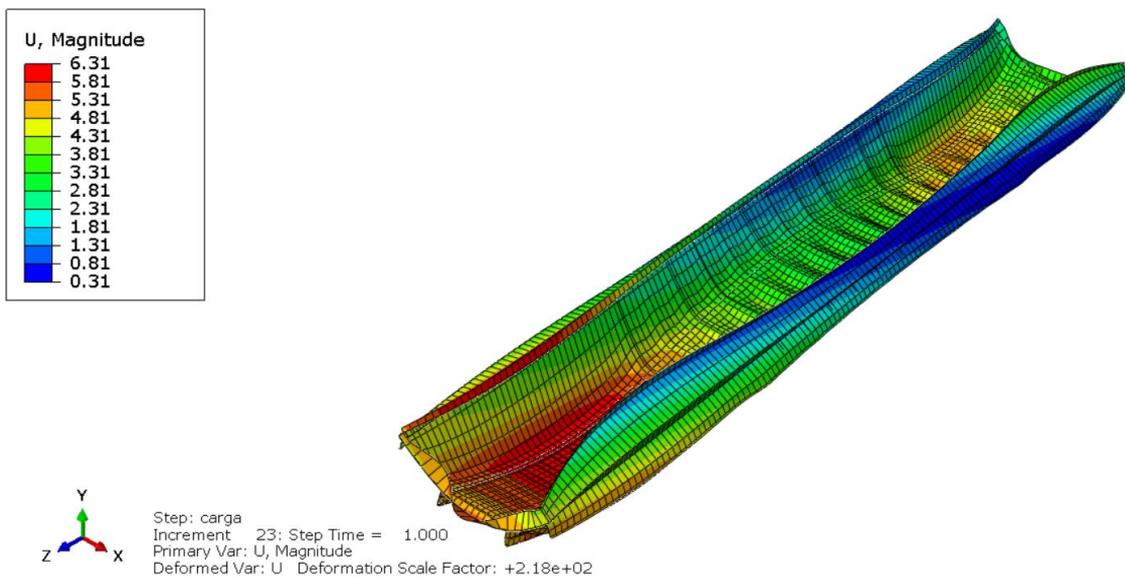


Figura 28 - Deformaciones máximas en el ensayo de flexión tras incorporar el nuevo perfil

5.2.3. ENSAYO DE TORSIÓN

Las modificaciones introducidas permiten reducir la tensión máxima de 72MPa a 60 MPa, que aparece también en los puntos de apoyo.

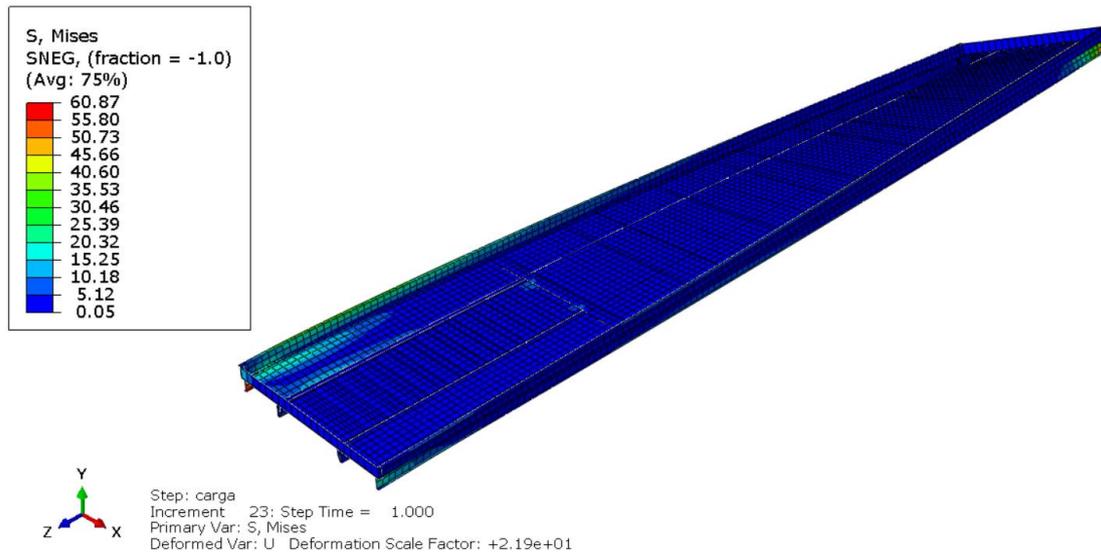


Figura 29 - Tensiones máximas en el ensayo de torsión tras incorporar el nuevo perfil

La flecha sigue siendo superior a la permitida, pero, como se ha comentado anteriormente, es una flecha extraordinaria, y solo interesa que no plastifique el material.

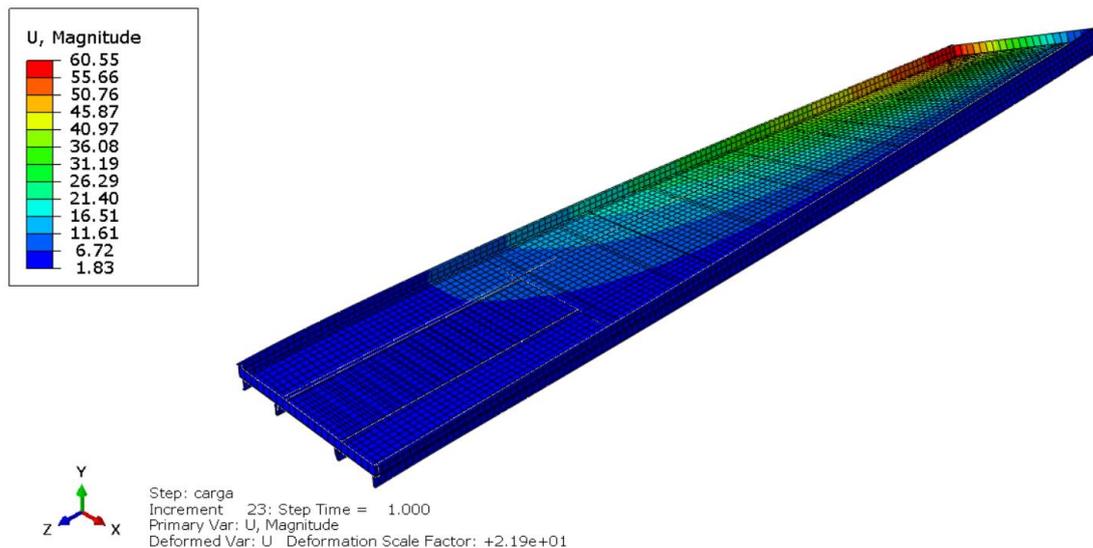


Figura 30 - Deformaciones máximas en el ensayo de torsión tras incorporar el nuevo perfil

5.2.4. CONCLUSIONES

En esta tabla se recogen los valores de tensión y deformación máximos y la variación experimentada respecto de la situación inicial.

ENSAYO	Smax(MPa)	VARIACIÓN	Umax(mm)	VARIACIÓN
IZADO	327,61	-49,20%	57,16	-10,94%
FLEXIÓN	148,49	-51,80%	6,31	-90,96%
TORSIÓN	60,87	-16,28%	60,55	+10,87%

Tabla 3 - Conclusiones de los ensayos tras incorporar el nuevo perfil

5.3. REDUCCIÓN DE PESO DE LA PLATAFORMA

Para realizar las modificaciones de reducción de peso se parte de la premisa de que únicamente se cambiarán los espesores de las piezas que se desee, sin cambiar su localización y sin retocar la parte del cuello del cisne, pues es una zona más conflictiva.

5.3.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para llevar a cabo la reducción de peso de la estructura se realiza un análisis de sensibilidad a las piezas que pueden reducir su espesor. De todos ellos se obtendrán los espesores que permiten que la plataforma soporte las cargas de los ensayos, consiguiendo que la reducción sea la máxima posible sin que falle la estructura.

Se definirán tres *Sections* adicionales en el programa que, junto con el espesor de 3mm ya establecido, conformarán los cuatro espesores que componen este análisis. Solo se realizan ensayando a flexión y a izado, pues son los casos reales de funcionamiento.

El peso inicial del conjunto es de 1.458,13 Kg, pero se ha aumentado en 17,98 Kg por los perfiles en C acoplados, llegando a 1.476,11 Kg.

- **A los perfiles superiores:**

Se toman el perfil central y los dos perfiles laterales como conjunto, pues las deformaciones que se han observado en los ensayos anteriores tienen una distribución similar en los tres. También se consigue así que la superficie de la plataforma sea uniforme, sin variaciones a lo largo de su anchura.

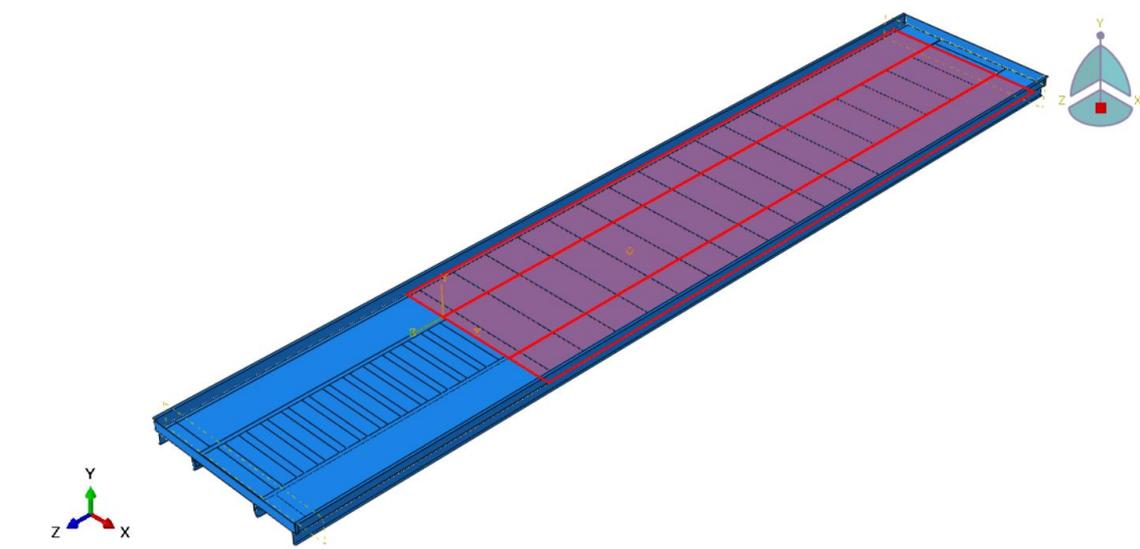


Figura 31 - Perfiles superiores

Partiendo del espesor inicial de 3mm, se reduce progresivamente cada medio milímetro hasta 1,5, obteniendo los valores de la tabla que se representan posteriormente en las gráficas:

Ensayo	Flexión		Izado	
Espesor (mm)	Tensión (MPa)	Deformación (mm)	Tensión (MPa)	Deformación (mm)
1,5	151,5	10,5	352,12	67,36
2	150,7	7,56	339,1	62,45
2,5	149,6	7,08	332,9	59,43
3	148,5	6,51	327,6	57,16

Tabla 4 - Análisis de sensibilidad a los perfiles superiores

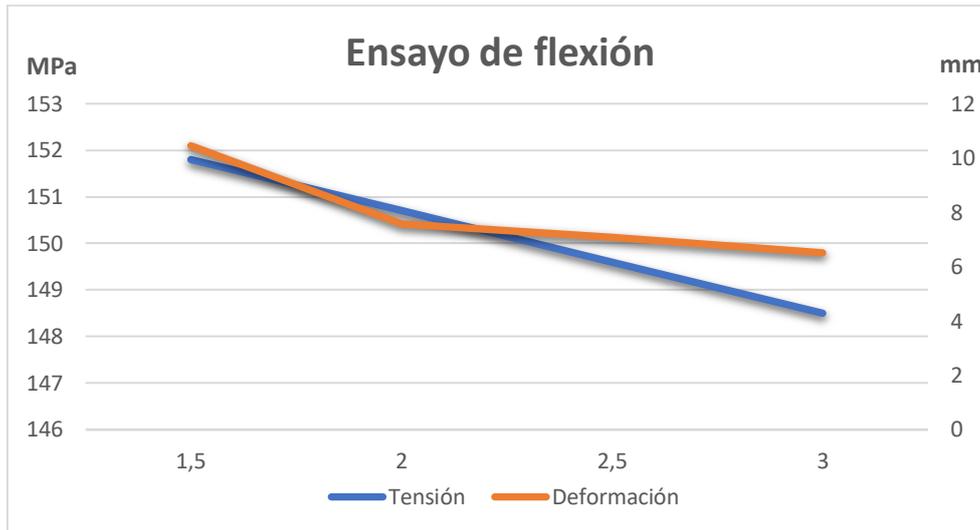


Gráfico 1 - Análisis de sensibilidad a los perfiles superiores: ensayo de flexión

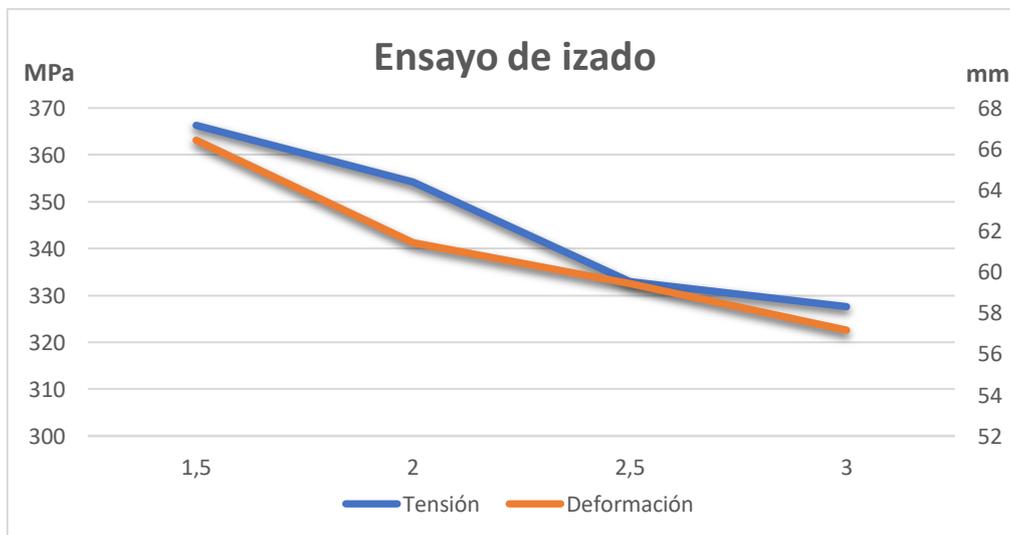


Gráfico 2 - Análisis de sensibilidad a los perfiles superiores: ensayo de izado

En el ensayo de flexión no aparecen problemas ni de tensión ni de deformación, pues apenas trabajan esos perfiles, tal y como se aprecia en las imágenes de los ensayos. En cambio, la flecha es mayor cuanto menor es el espesor, y en ningún momento entra dentro del rango de trabajo permitido.

Para solucionar este problema se repiten los ensayos reforzando las tres primeras placas laterales de cada lado, pues se prevé que la flecha disminuya por lo visto en las pruebas anteriores.

Ensayo	Flexión		Izado	
	Esesor (Mm)	Tensión (MPa)	Deformación (mm)	Tensión (MPa)
3	148,2	5,8	345	58,49
3,5	136,4	17,37	298,98	50,61

Tabla 5 - Análisis de sensibilidad a las placas laterales

Tras hacerlo se ve que al aumentar en medio milímetro el espesor la deformación en el ensayo de izado entra dentro del rango permitido, inferior a 52,8 mm.

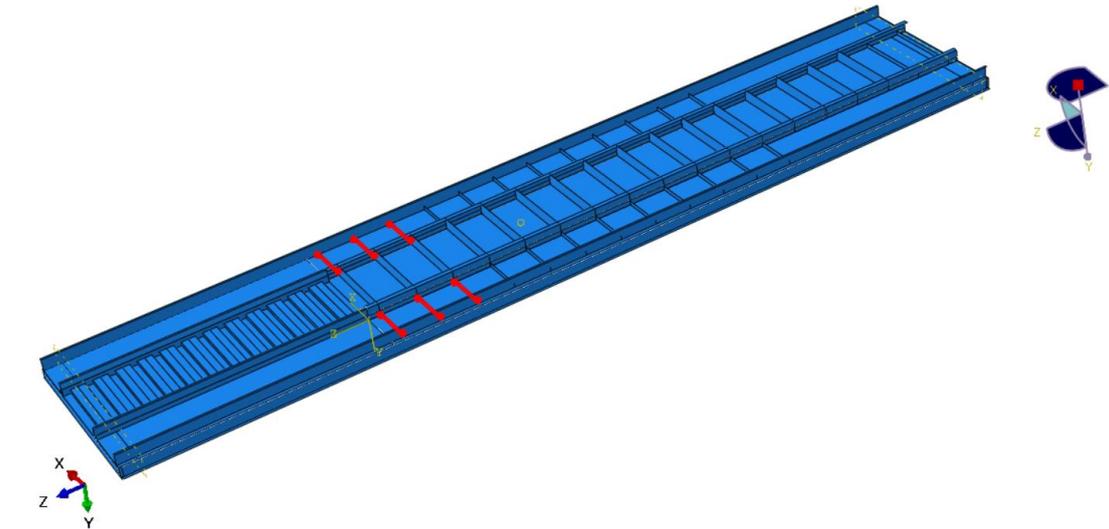


Figura 32 - Placas laterales a las que se modifica el espesor

De este modo se puede conseguir una reducción de peso de 115,17 Kg al disminuir el espesor de los perfiles que componen la superficie de 3 a 2,5 mm, ya que el aumento de espesor de las placas laterales así lo permiten.

Por otro lado, este aumento de espesor de las placas laterales supone un peso adicional de 0,85 Kg.

- **A los perfiles exteriores**

Del análisis de sensibilidad realizado a los perfiles exteriores se concluye que no se puede disminuir su espesor, pues la tensión máxima de la estructura llega hasta 391 MPa ensayando el izado, por lo tanto plastificaría en un punto precisamente de los estos perfiles.

- **Al perfil en C añadido**

Tras haber tomado las decisiones anteriores se comprueba si se puede disminuir el espesor del perfil en C que cierra la estructura por delante y por detrás. Los resultados de los ensayos realizados son los siguientes:

Ensayo Espesor (mm)	Flexión		Izado	
	Tensión (MPa)	Deformación (mm)	Tensión (MPa)	Deformación (mm)
3	136,4	17,37	298,98	50,61
2,5	137,53	6,04	344,53	58,42

Tabla 6 - Análisis de sensibilidad al perfil en C

Al disminuir el espesor la flecha máxima en el ensayo de izado supera el límite, por lo que esta modificación no se puede realizar.

De esta manera, el peso total de la estructura se reduce de 1.473,11 Kg a 1.361,80 Kg, un total de 114,31 Kg, lo que supone un 7,76% del peso inicial.

Tras las modificaciones se vuelven a realizar los ensayos anteriores en las mismas condiciones para ver si se mantiene la rigidez necesaria.

5.3.2. ENSAYO DE IZADO

Se consigue una reducción de las tensiones máximas de unos 30 MPa, aumentando así el coeficiente de seguridad. La distribución es similar a los casos anteriores, situando la máxima tensión en los puntos de apoyo.

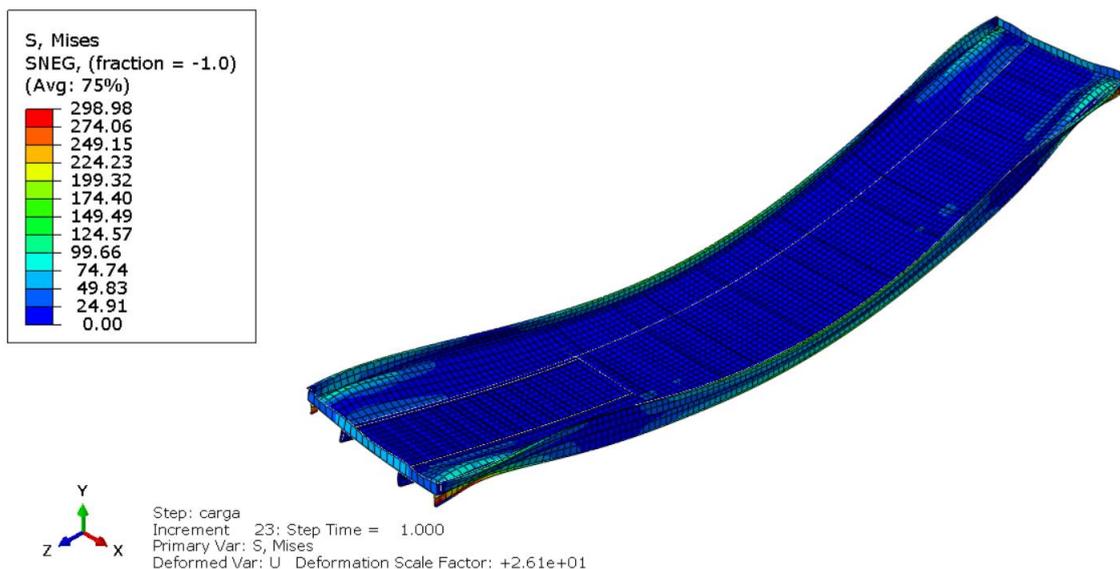


Figura 33 - Tensiones en el ensayo de izado final

Con las nuevas modificaciones, además de reducir el peso se distribuye mejor, consiguiendo así que la flecha entre dentro de las limitaciones de trabajo y la plataforma sea funcional. La flecha máxima se ubica de nuevo en el centro de la estructura.

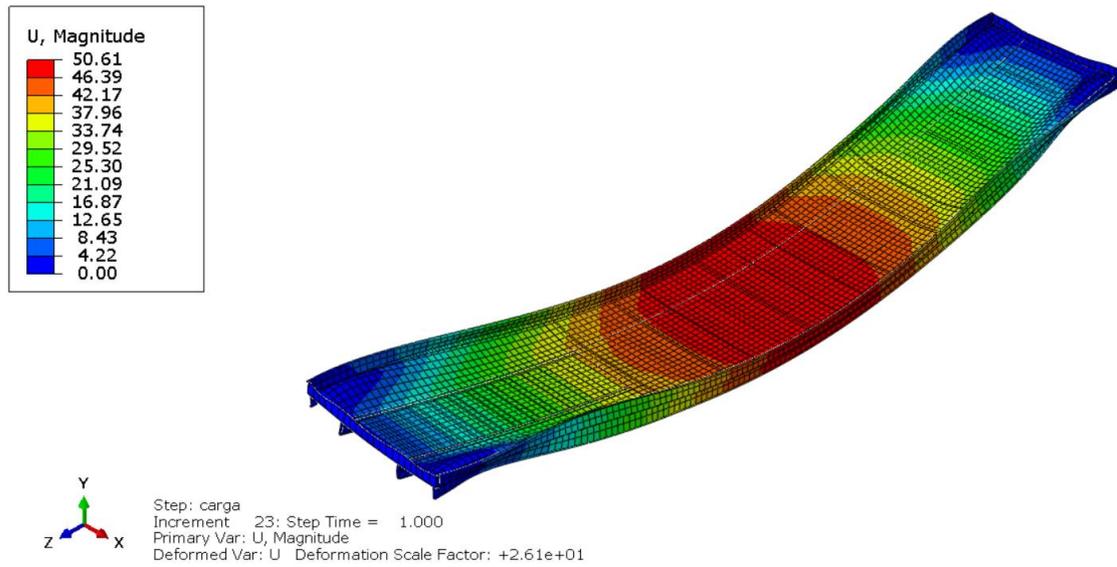


Figura 34 - Deformaciones en el ensayo de izado final

5.3.3. ENSAYO DE FLEXIÓN

Se ha conseguido una pequeña reducción de la tensión máxima. Esta aparecía en las placas laterales y, gracias al aumento de espesor, se ha ganado algo de rigidez.

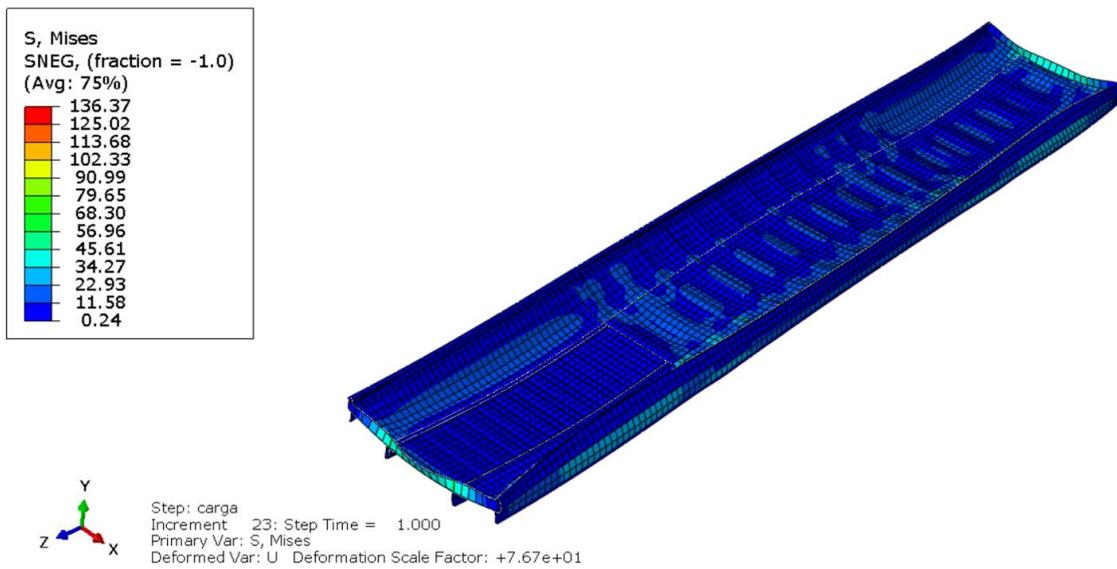


Figura 35 - Tensiones en el ensayo de flexión final

En cambio la flecha máxima ha aumentado en 11 mm, pero sigue muy por debajo del límite.

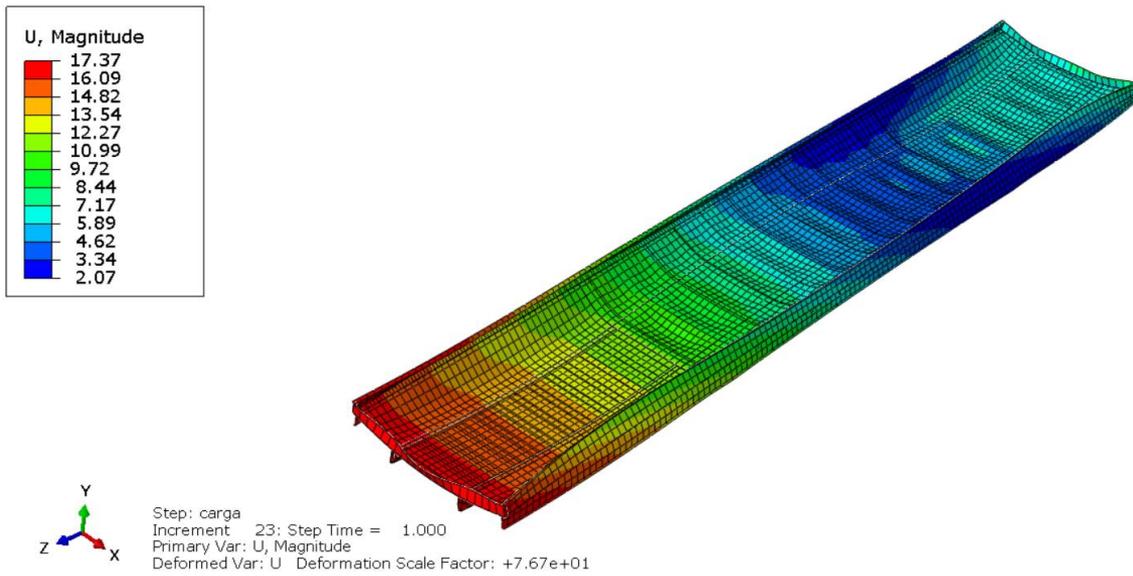


Figura 36 - Deformaciones en el ensayo de flexión final

5.3.4. ENSAYO DE TORSIÓN

Las modificaciones realizadas no afectan en exceso en la resistencia a torsión. La tensión máxima disminuye 5MPa, y la distribución se mantiene.

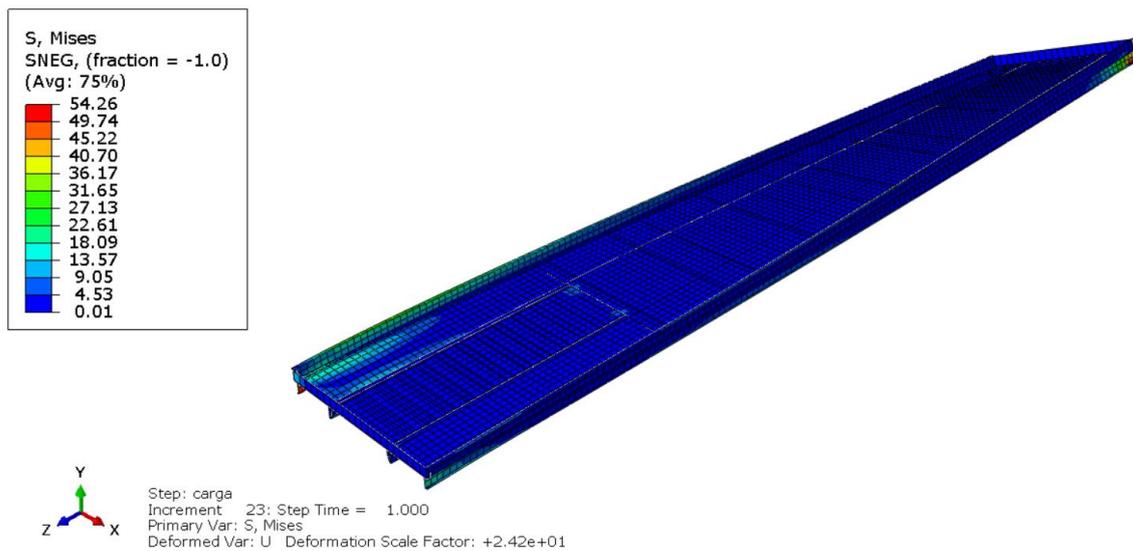


Figura 37 - Tensiones en el ensayo de torsión final

La flecha máxima apenas sufre modificaciones tampoco, manteniéndose en un valor similar al anterior.

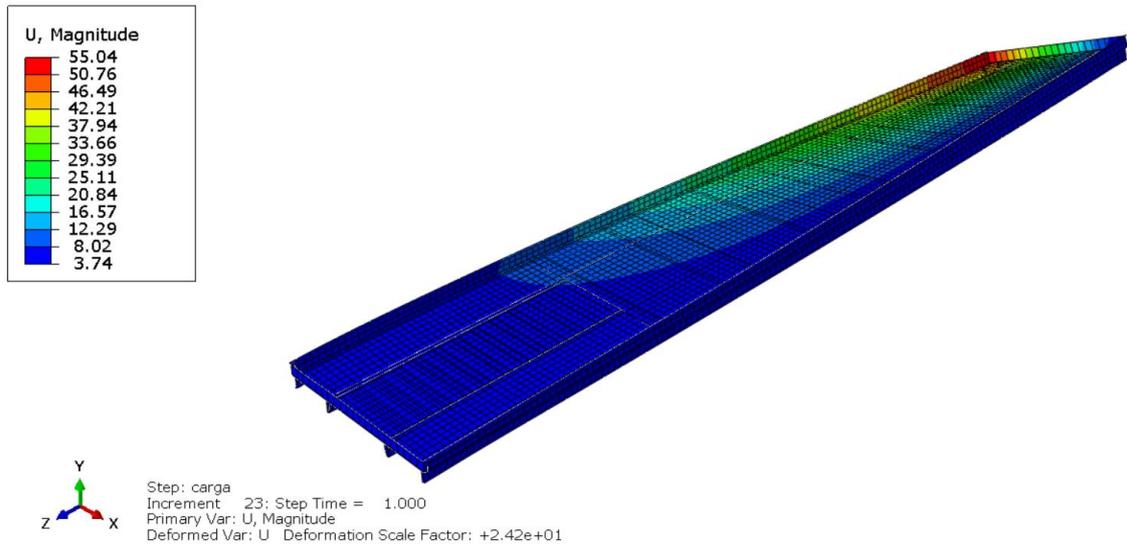


Figura 38 - Deformaciones en el ensayo de torsión final

5.3.5. CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS

En la tabla siguiente se recogen los resultados obtenidos y su variación respecto de la situación de partida.

ENSAYO	S_{max}	VARIACIÓN	U_{max}	VARIACIÓN
IZADO	298,98	-8,74%	50,61	-11,16%
FLEXIÓN	136,37	-8,16%	17,37	+175,28%
TORSIÓN	54,26	-10,86%	55,04	-9,10%

Tabla 7 - Variación de tensiones y deformaciones tras la modificación del espesor

5.3.6. ANÁLISIS DE LOS MODOS DE VIBRACIÓN

Una vez creada la nueva estructura se repite este análisis para comprobar cómo han variado los modos de vibración y sus frecuencias.

MODO	FRECUENCIA (Hz)	ESFUERZO QUE PROVOCA LA DEFORMACIÓN
0-7	0	-
8	0,18	Flexión
9	0,27	Torsión
10	0,50	Flexión

Como se puede apreciar ha cambiado el orden en el que aparecen. El modo 9 sufre torsión, cuando antes sufría flexión, y el modo 10 sufre flexión en vez de torsión como ocurría. Las frecuencias a las que ocurren son similares, todas por debajo de 1 Hz.

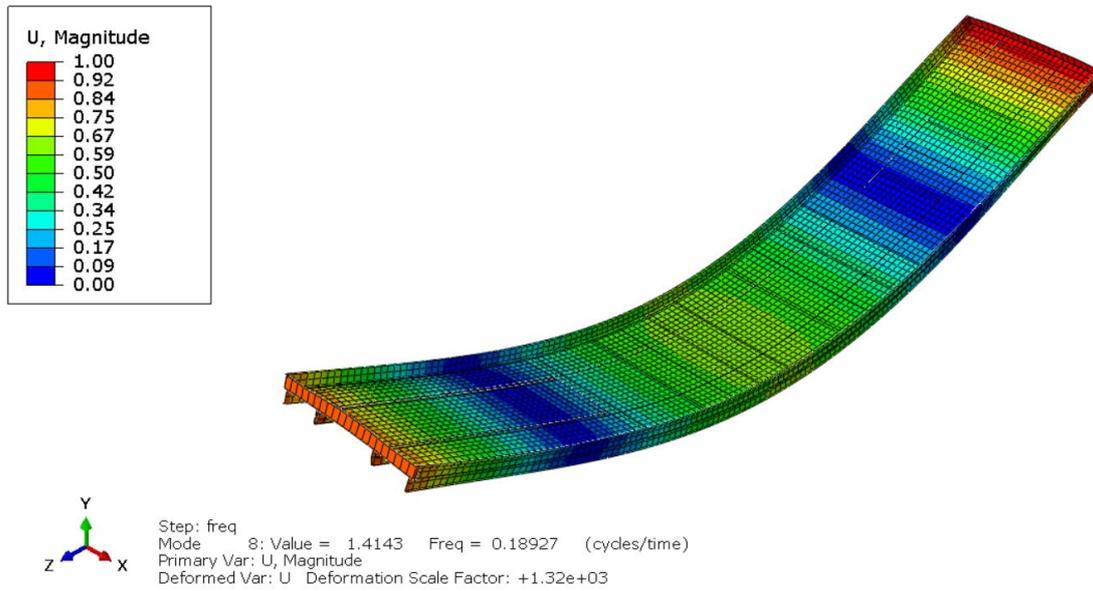


Figura 39 - Modo 8 de vibración tras optimizaciones

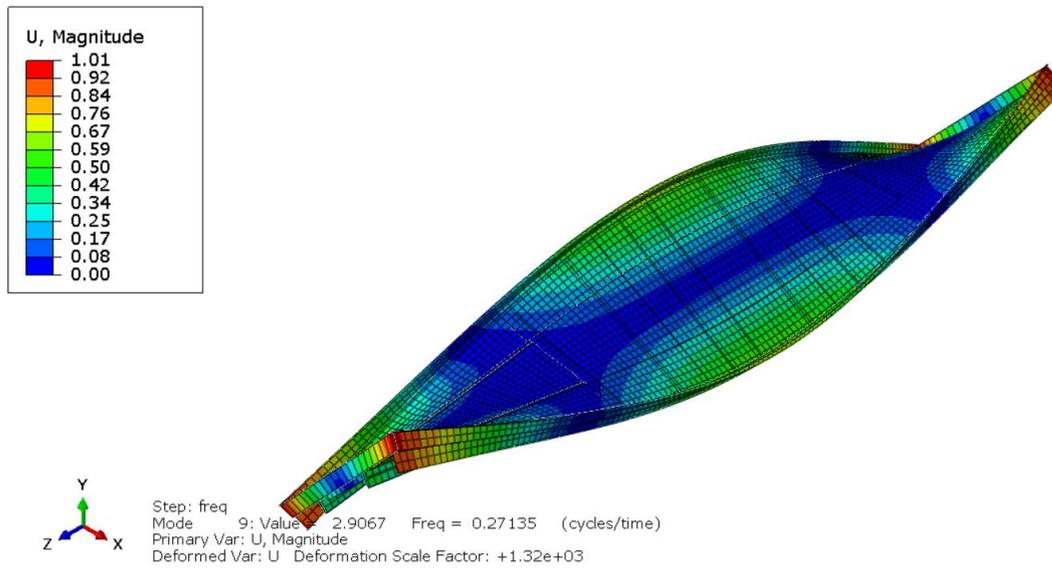


Figura 40 - Modo 9 de vibración tras optimizaciones

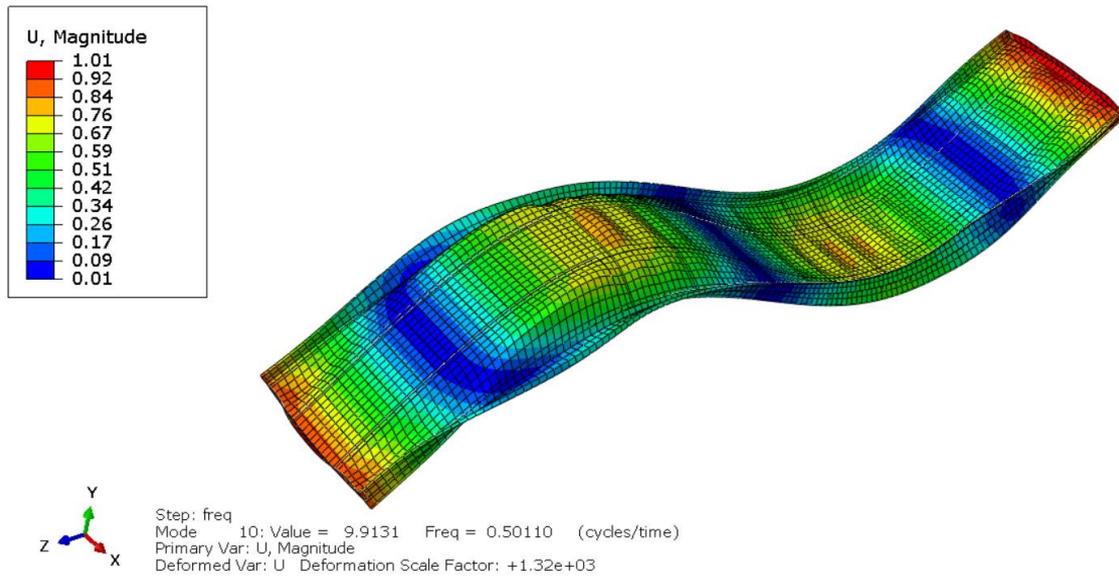


Figura 41 - Modo 10 de vibración tras optimizaciones

6. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

1. De manera global, la reducción de tensiones y deformaciones ha sido la siguiente:

ENSAYO	S_{max}	VARIACIÓN	U_{max}	VARIACIÓN
IZADO	298,98	-53,64%	50,61	-21,14%
FLEXIÓN	136,37	-55,73%	17,37	-75,12%
TORSIÓN	54,26	-25,37%	55,04	+1,83%

Tabla 8 - Mejoras obtenidas

2. El coeficiente de seguridad a izado es de 1,19 y a flexión de 2,59.
3. La reducción de peso es de 114,31 Kg, un 7,75% menos. Esta reducción de peso conlleva también una redistribución del mismo, consiguiendo, como se ve en la tabla anterior, reducir considerablemente las tensiones máximas.
4. Como resultado de las optimizaciones se consigue que la plataforma sea funcional, pues cumple con las limitaciones elásticas del material y las de flecha máxima permitida.
5. En caso de fallo de un apoyo se ha comprobado que la plataforma no plastificaría, de forma que se llevaría a cabo la reparación de este y podría volver a utilizarse sin problema.

Como desarrollos futuros se proponen:

1. Búsqueda de materiales más resistentes y menos densos que permitan aligerar la estructura, manteniendo las prestaciones necesarias.
2. Búsqueda de nuevas configuraciones de perfiles que utilicen menos material, pero garantizando la seguridad necesaria.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Ministerio de Fomento: lenguaje del transporte intermodal

https://www.fomento.gob.es/recursos_mfom/pdf/17FBCF00-91E0-4761-A11C-88A16277D8A4/1550/01_lenguaje_transporte_intermodal.pdf

[2] Ministerio de Fomento: estado actual del transporte intermodal en España.

https://www.fomento.gob.es/recursos_mfom/pdf/099ABA39-1132-4A57-90FB-E5082A2DAE64/1552/03_intermodalidad_espana.pdf

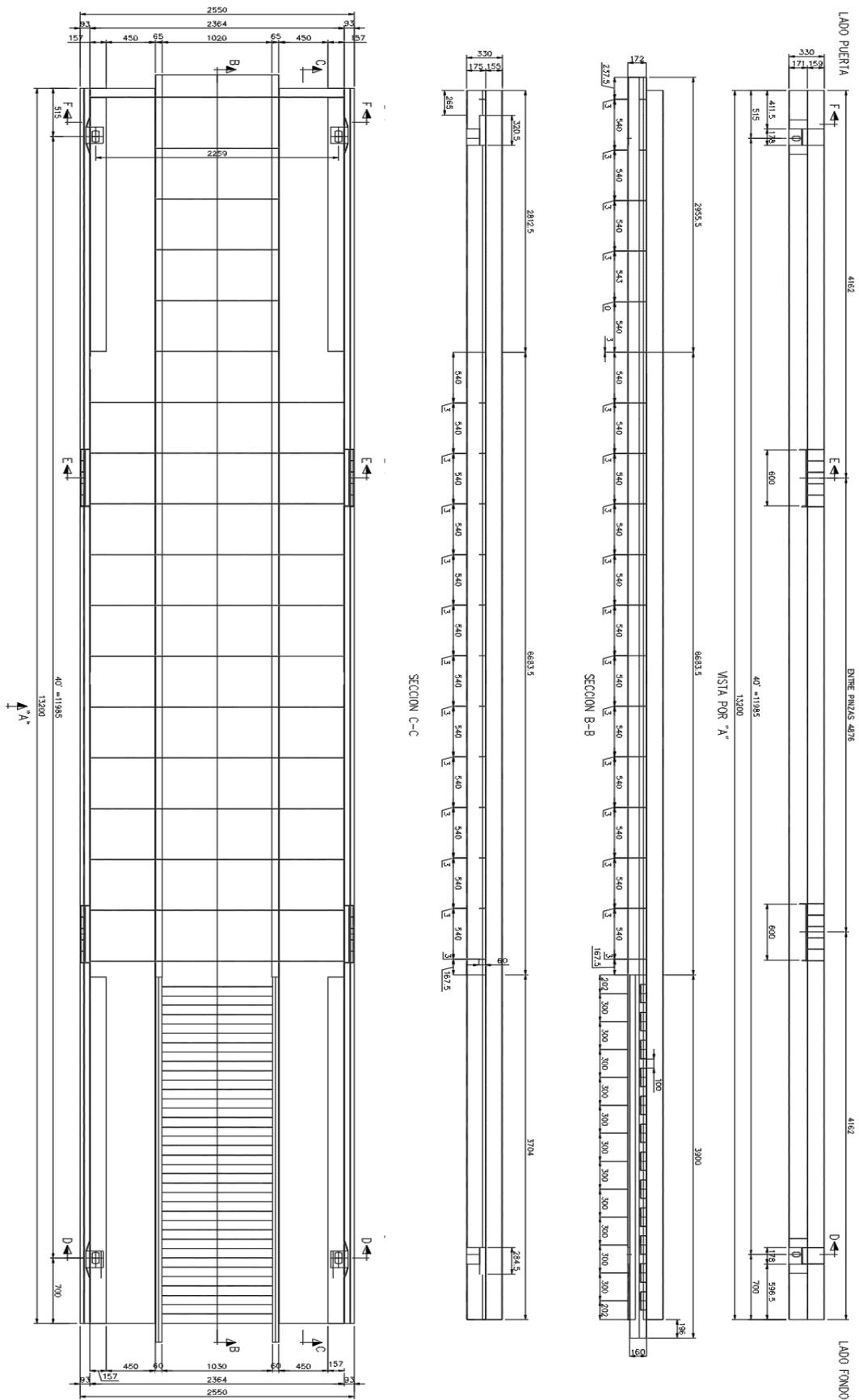
[3] Prontuario de características del acero

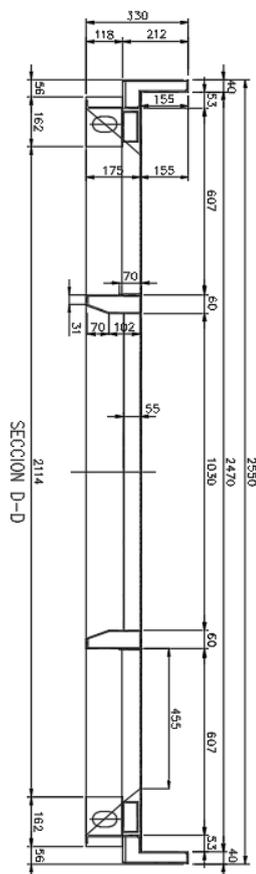
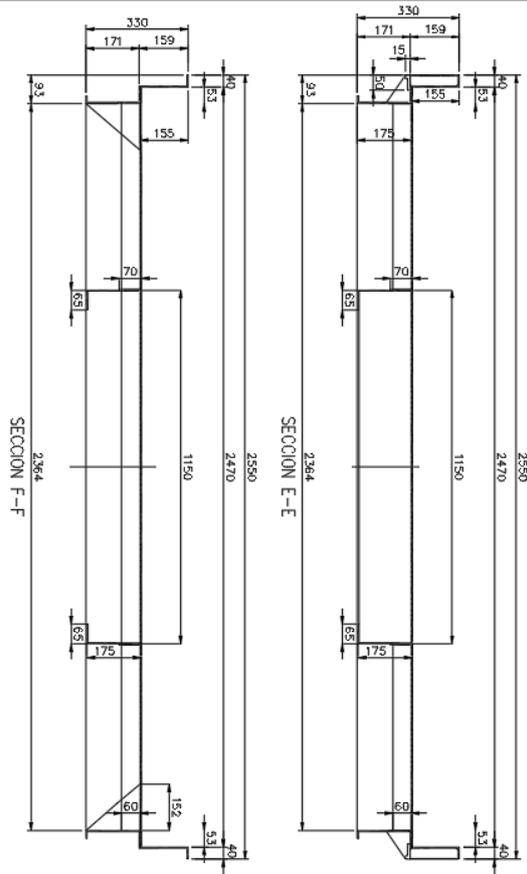
<http://prontuarios.info/materiales/acero>

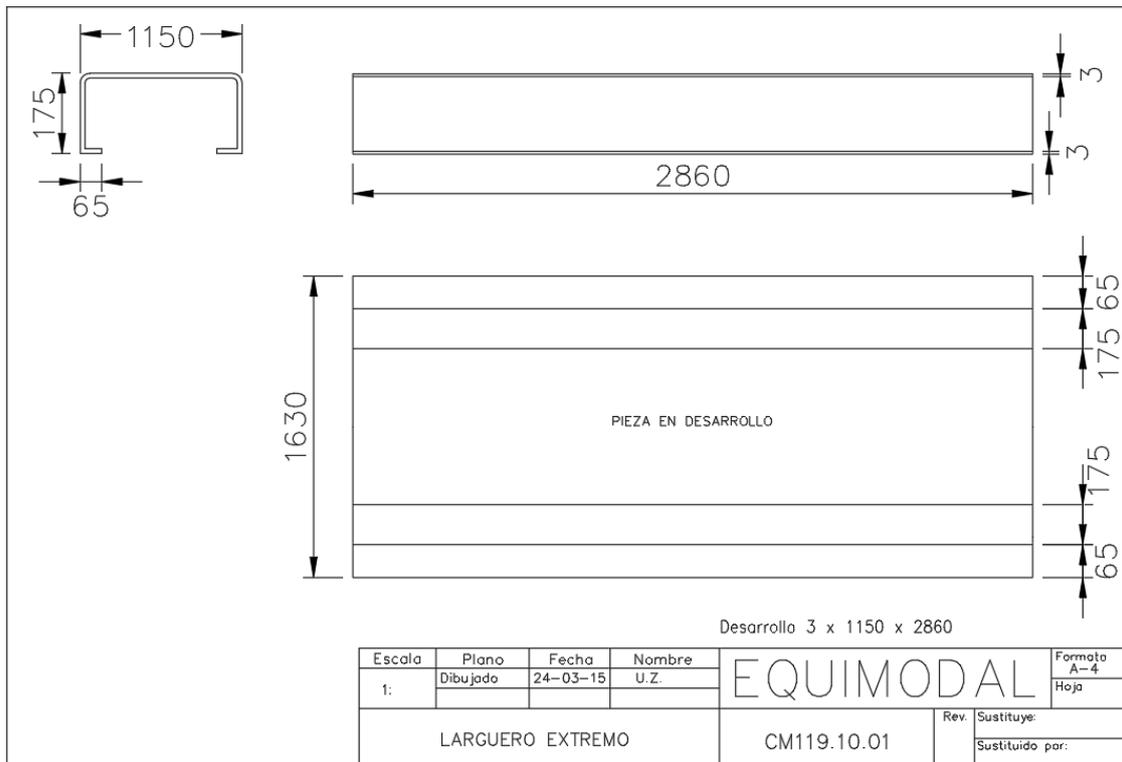
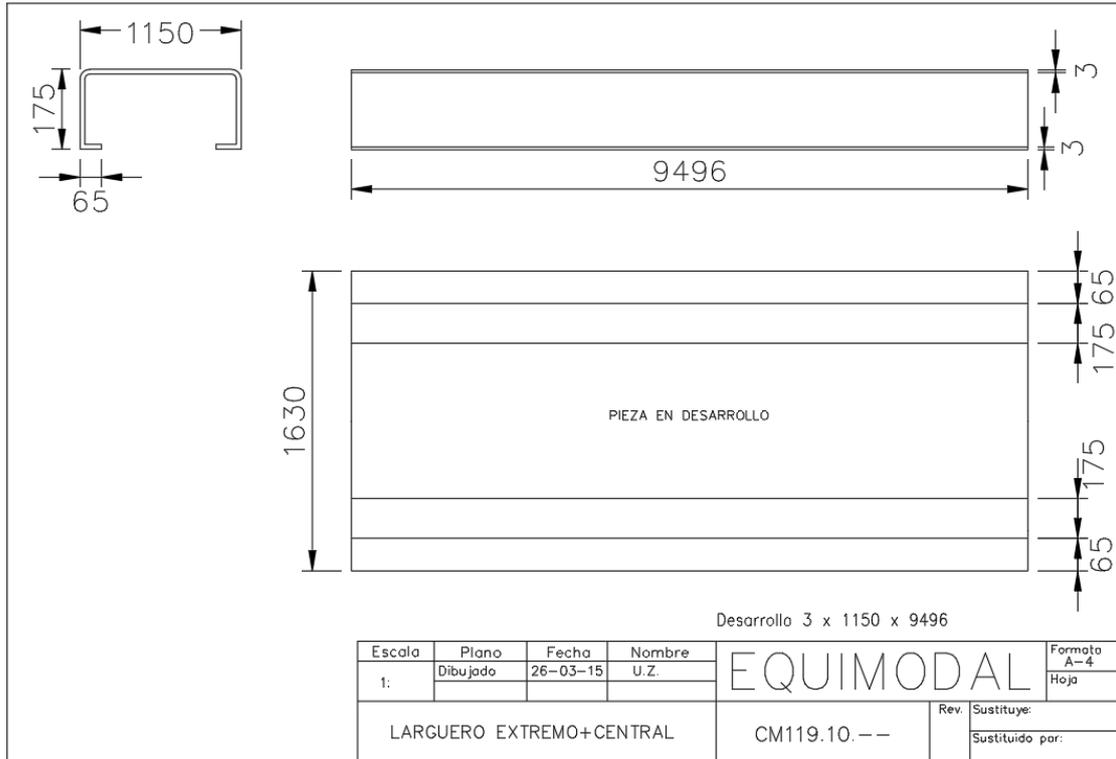
[4] Características de los distintos tipos de malla

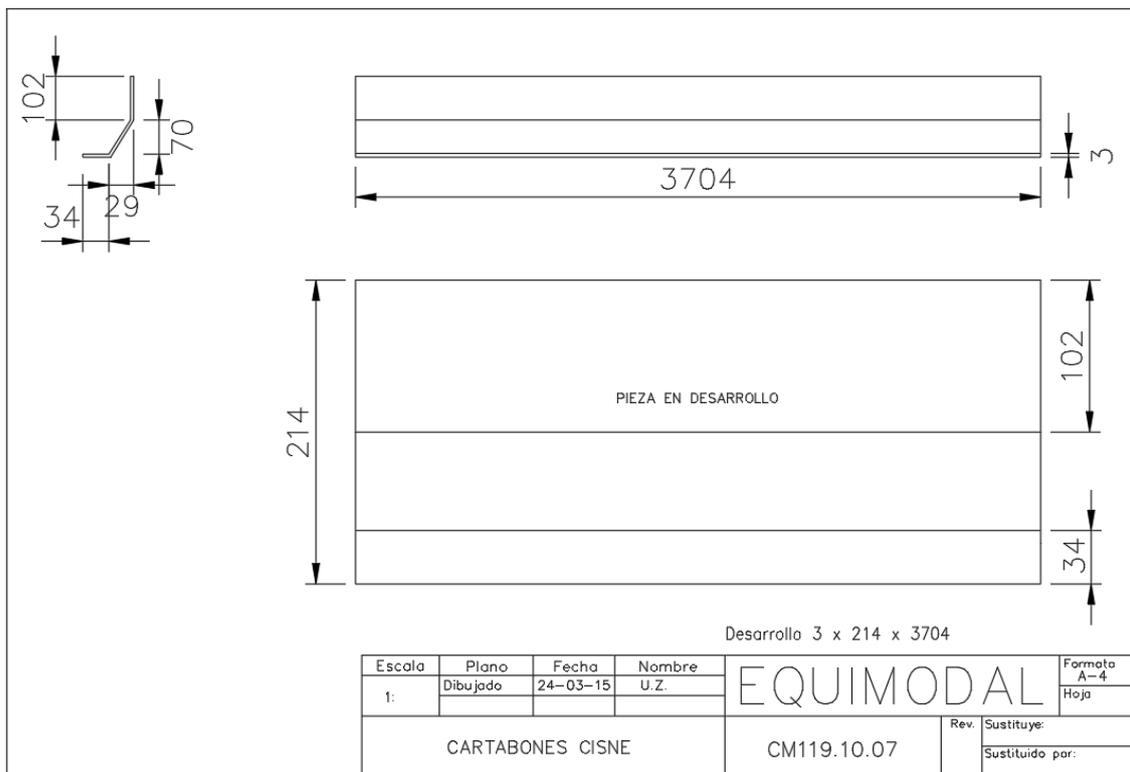
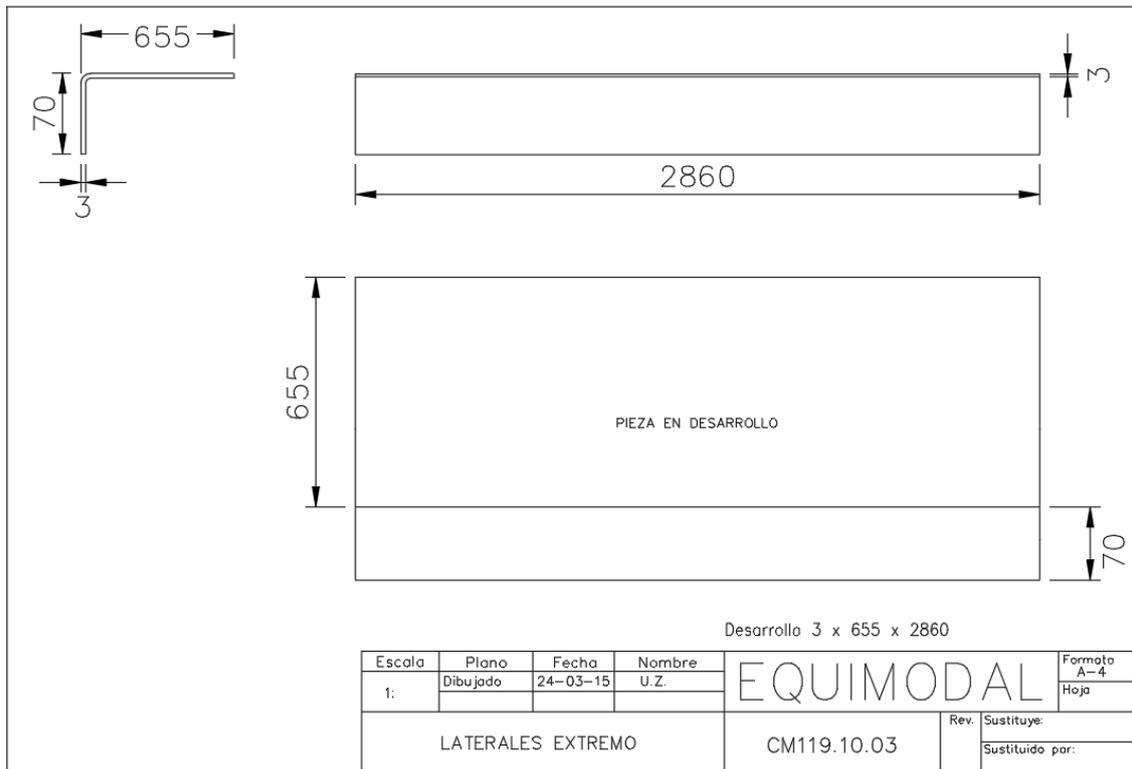
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/60195/fichero/2.pdf>

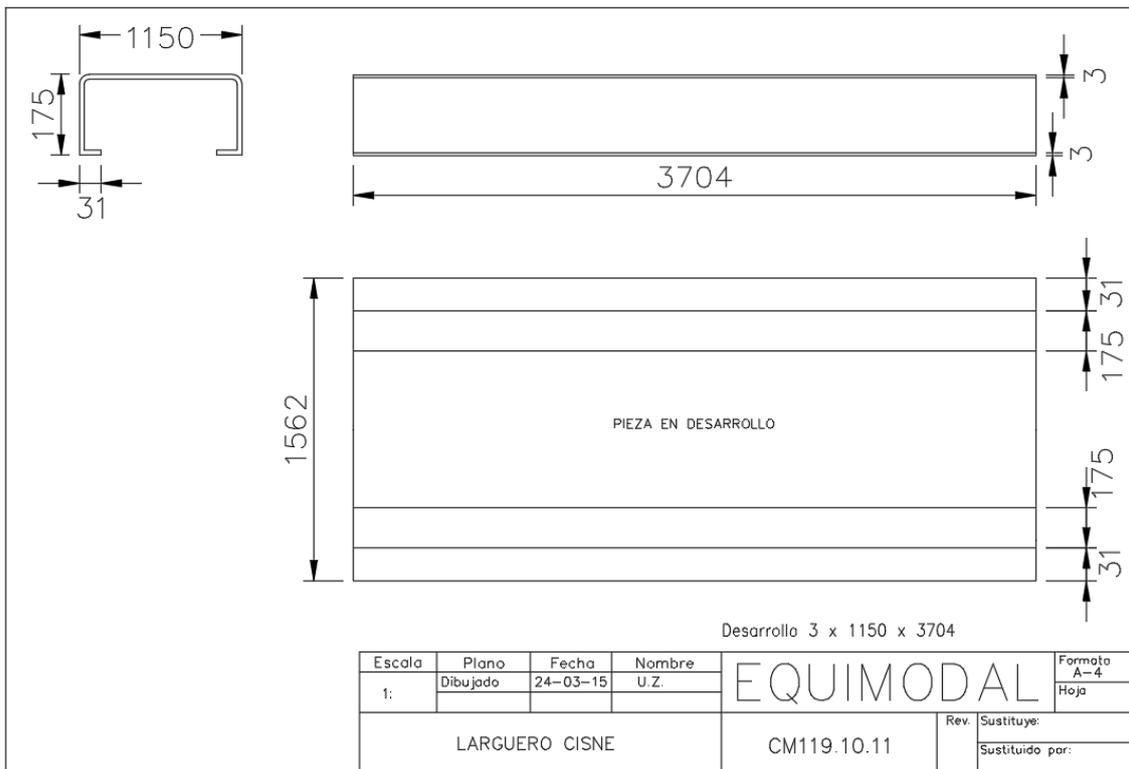
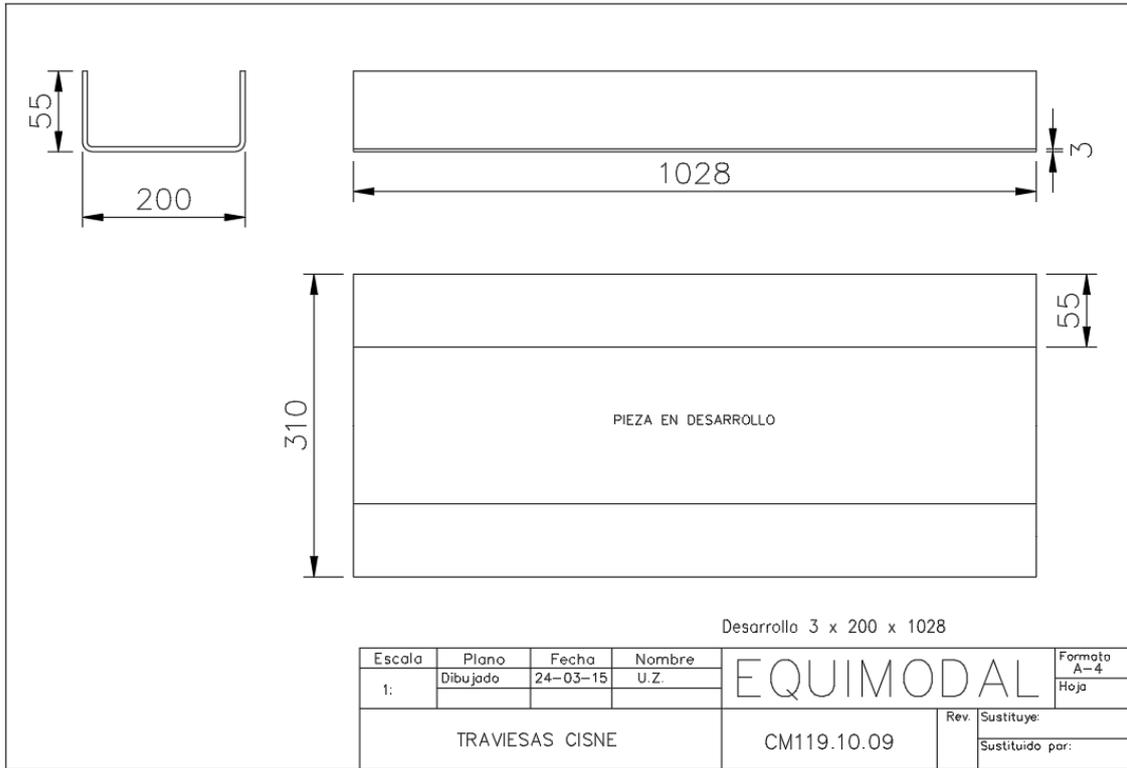
ANEXO I: PLANOS DE PARTIDA

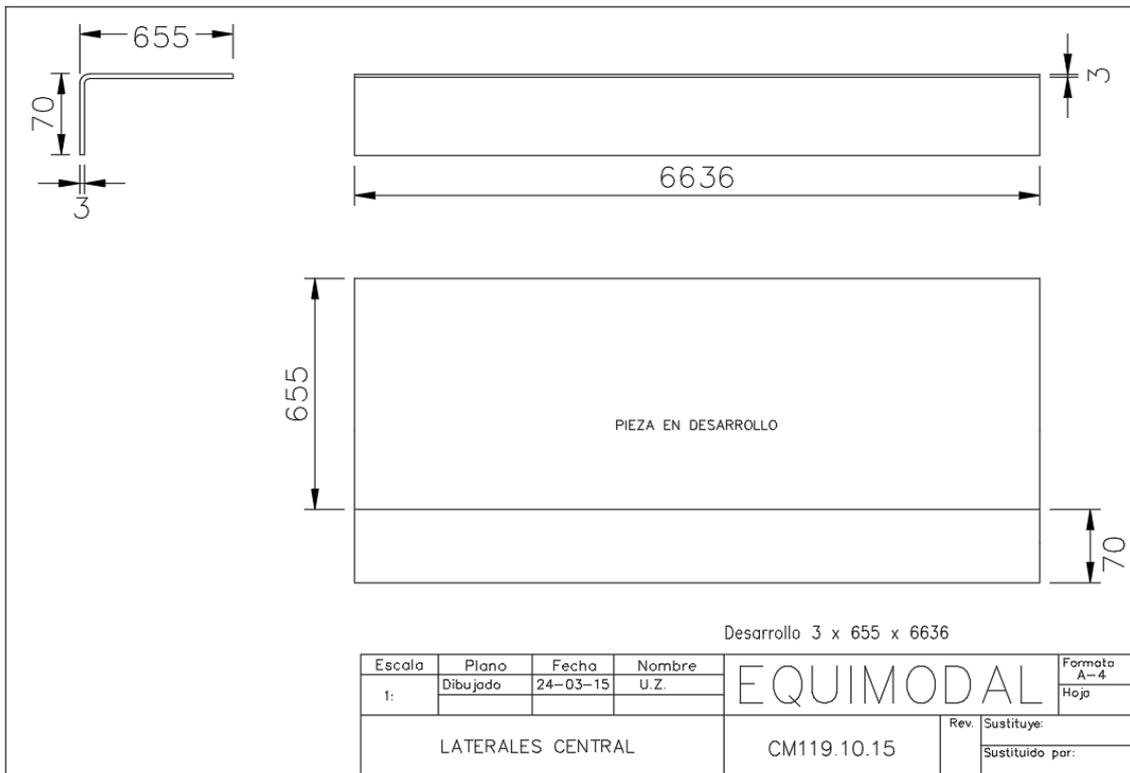
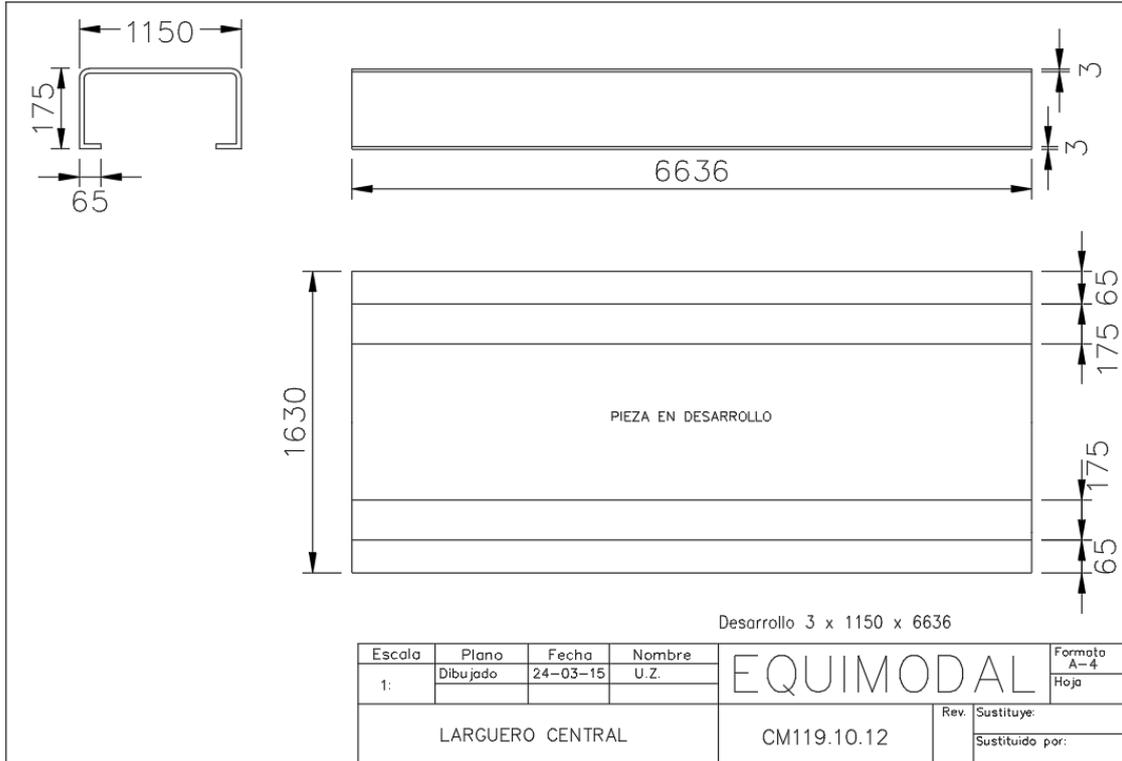


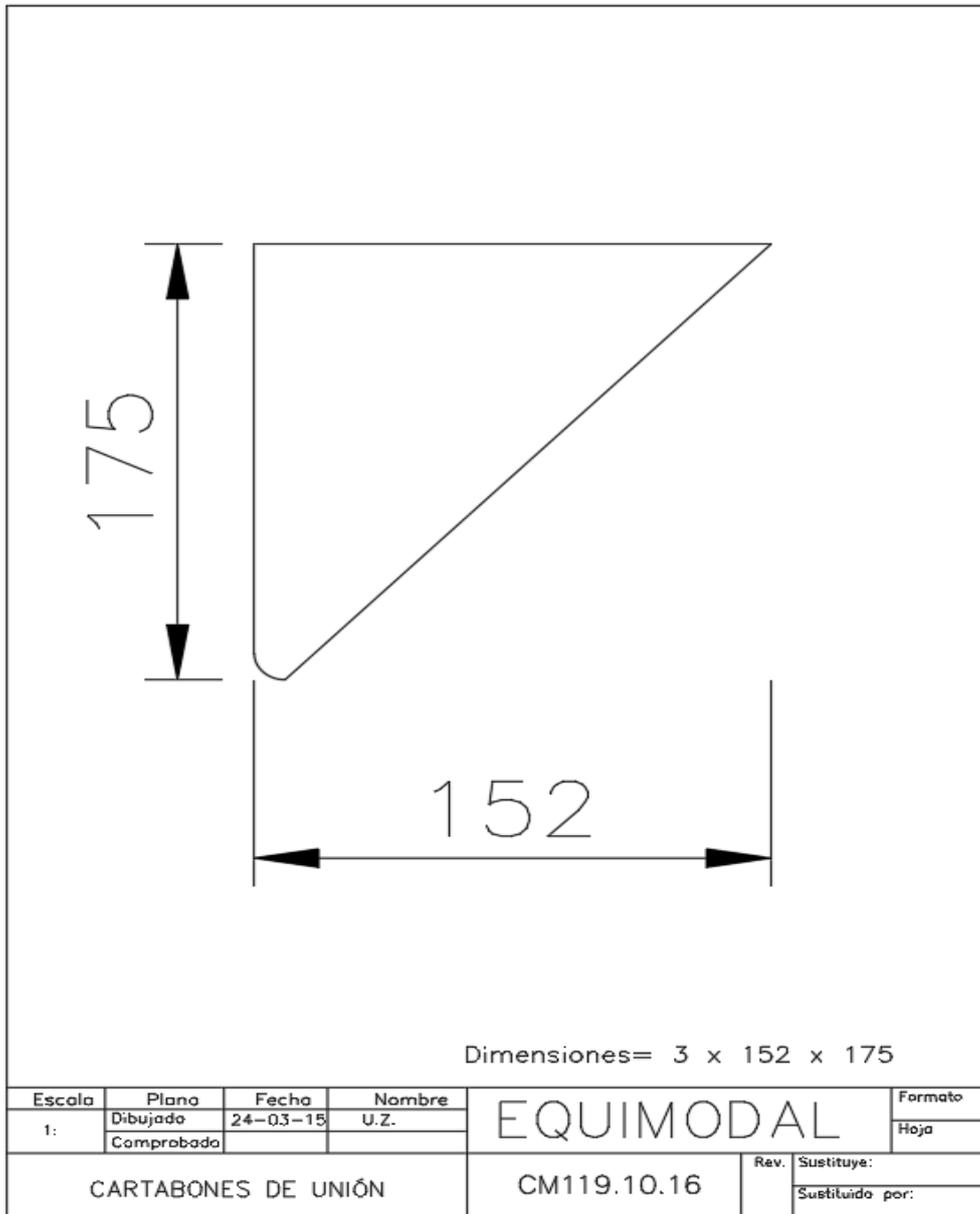






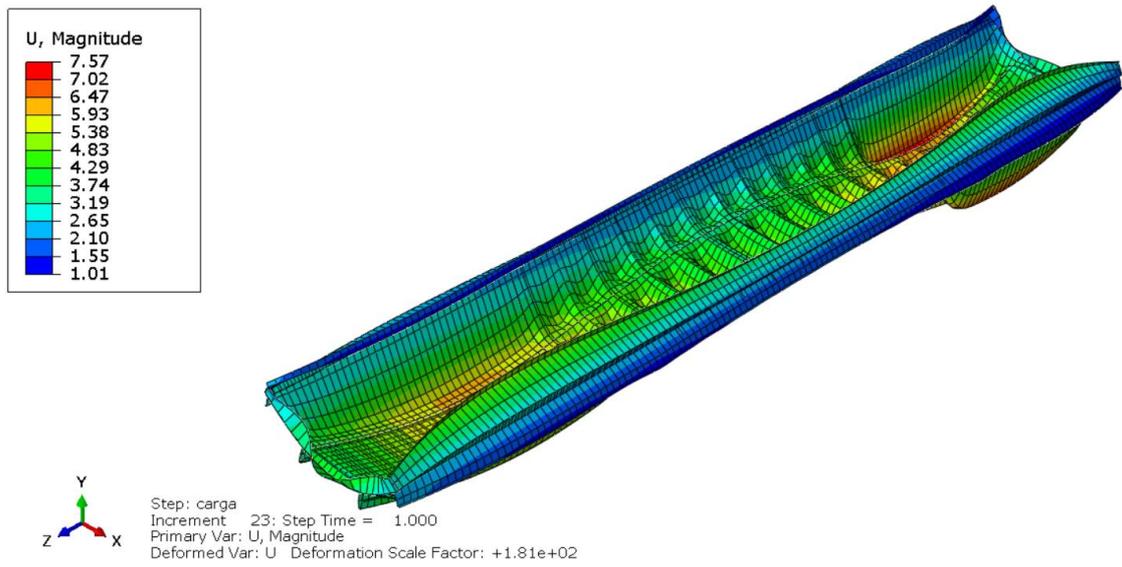
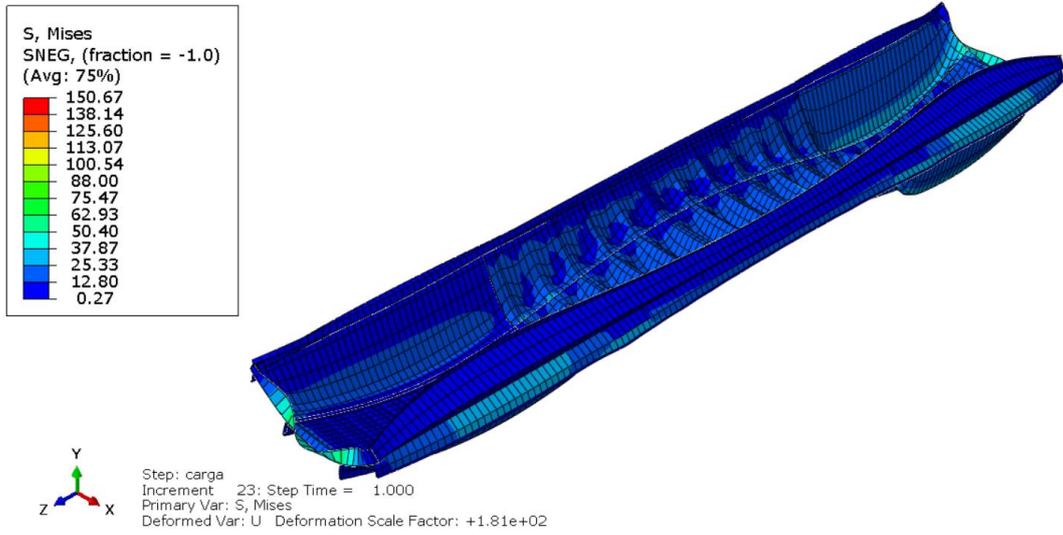




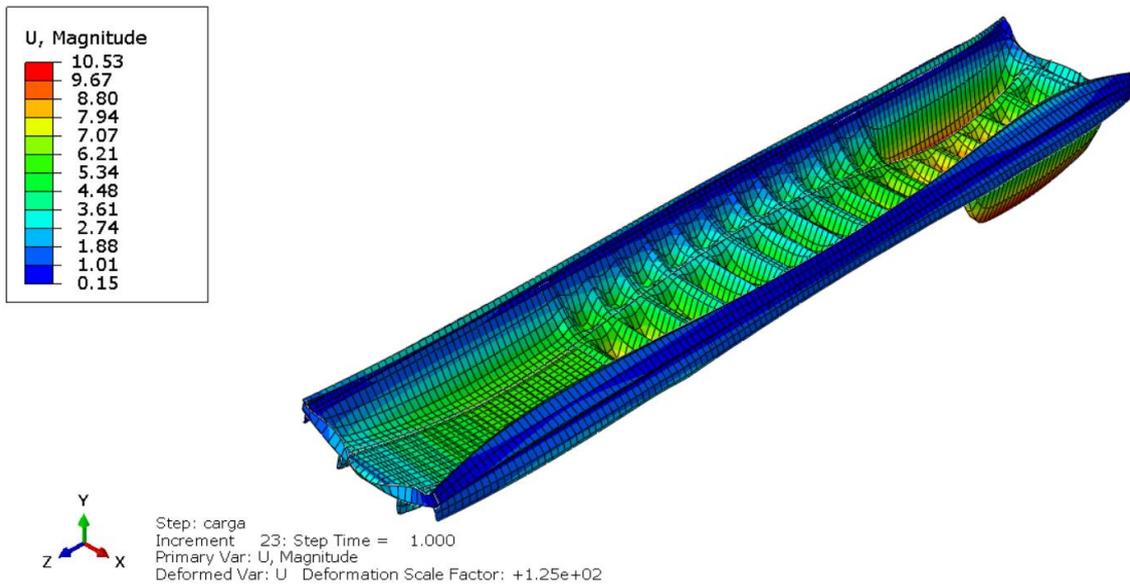
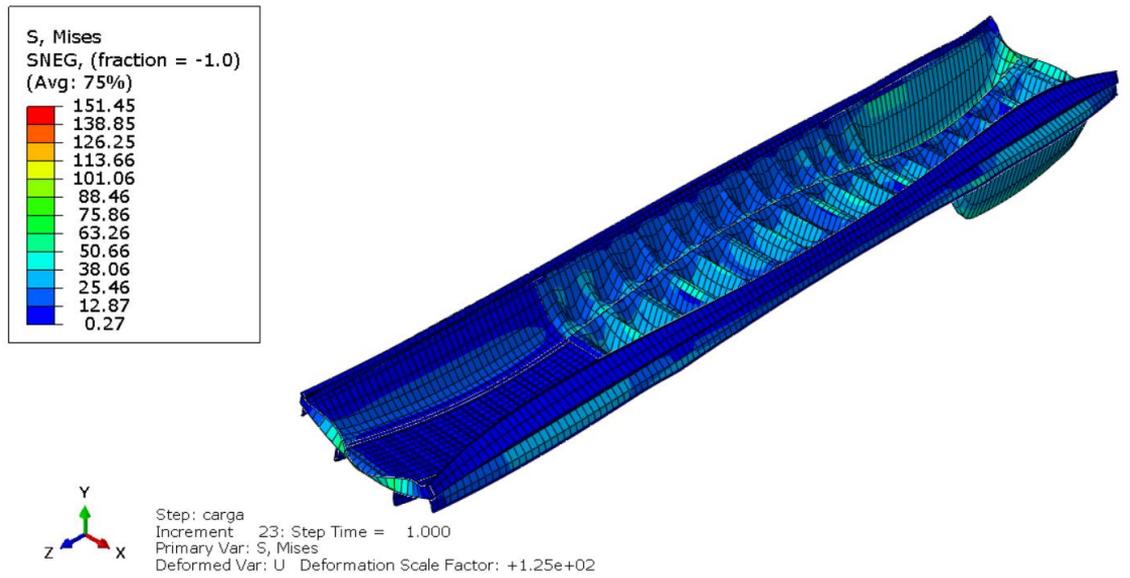


ANEXO II: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

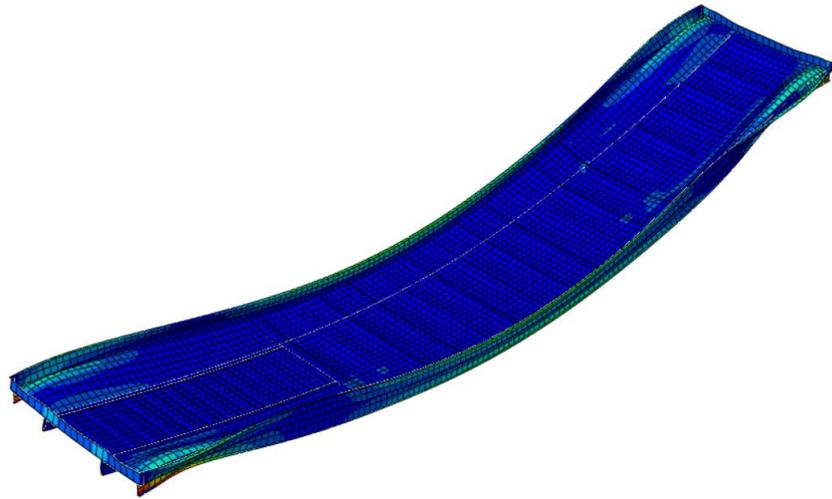
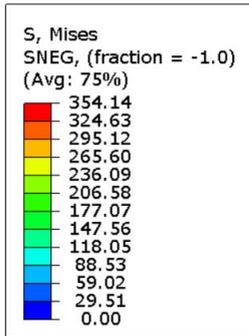
- FLEXIÓN CON PERFILES DE 2mm.



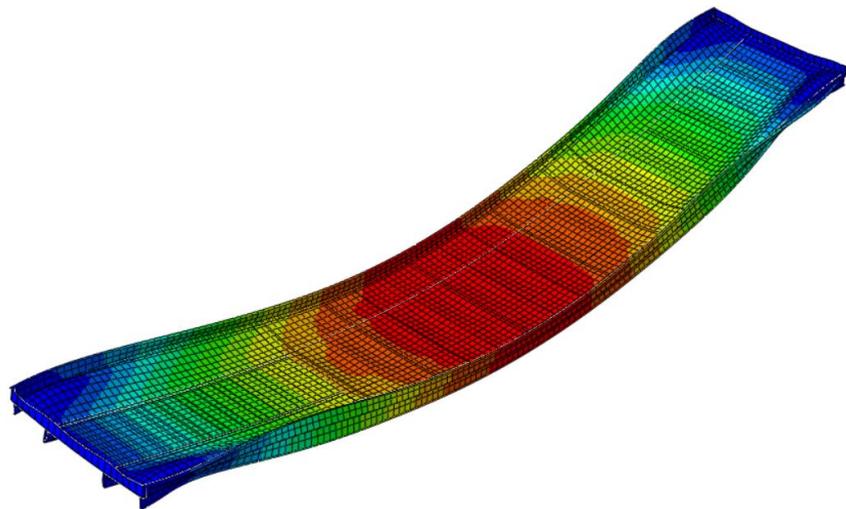
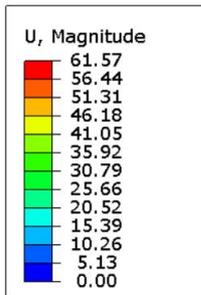
- FLEXIÓN CON PERFILES DE 1,5mm.



- IZADO CON PERFILES DE 2mm.

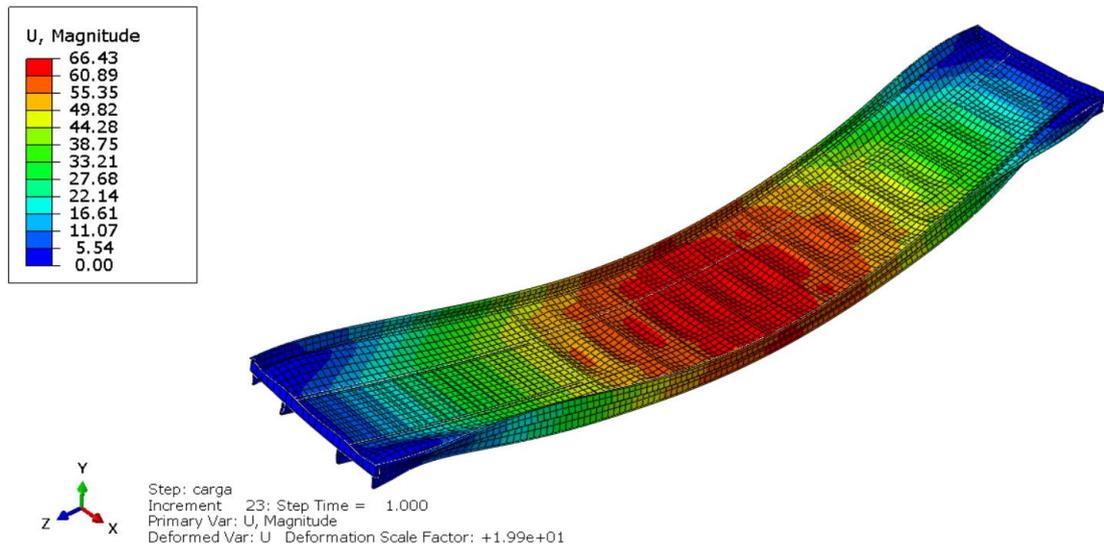
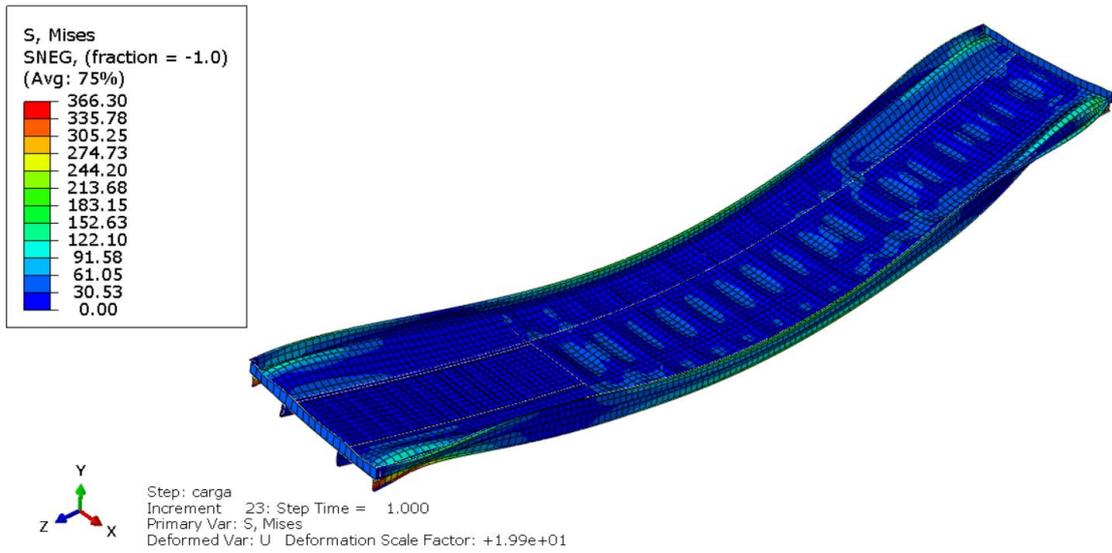


Step: carga
Increment: 23; Step Time = 1.000
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.14e+01

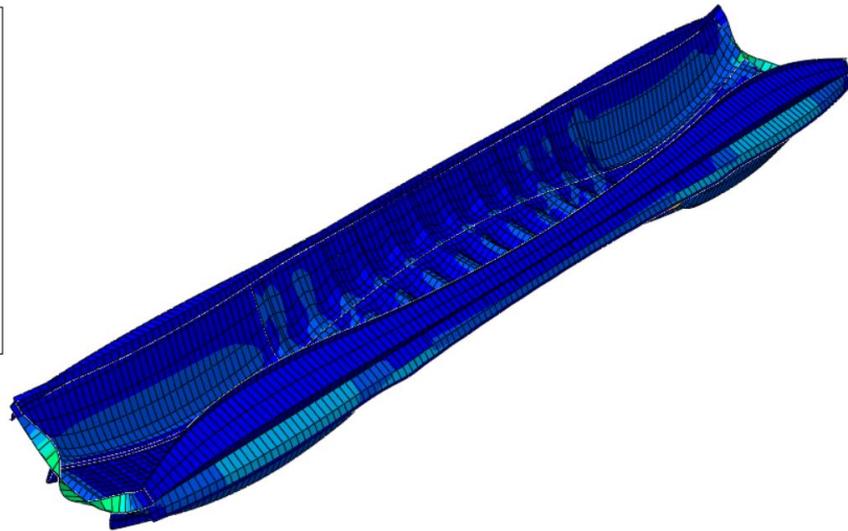
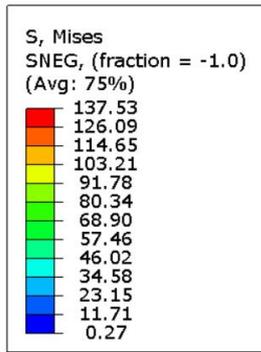


Step: carga
Increment: 23; Step Time = 1.000
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.14e+01

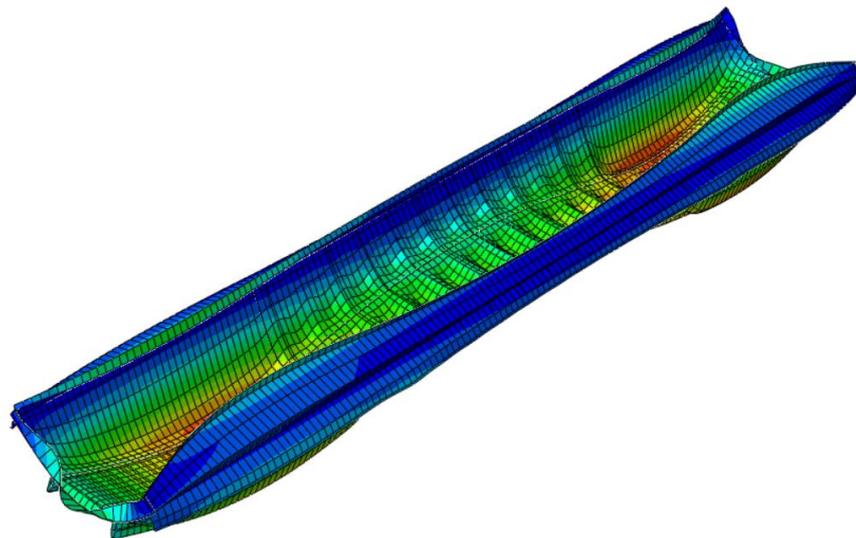
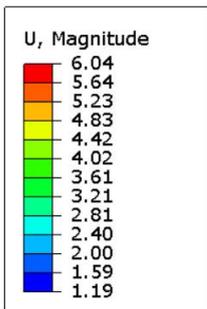
- IZADO CON PERFILES DE 1,5mm.



- ENSAYO DE FLEXIÓN CON EL PERFIL EN C A 2,5mm.

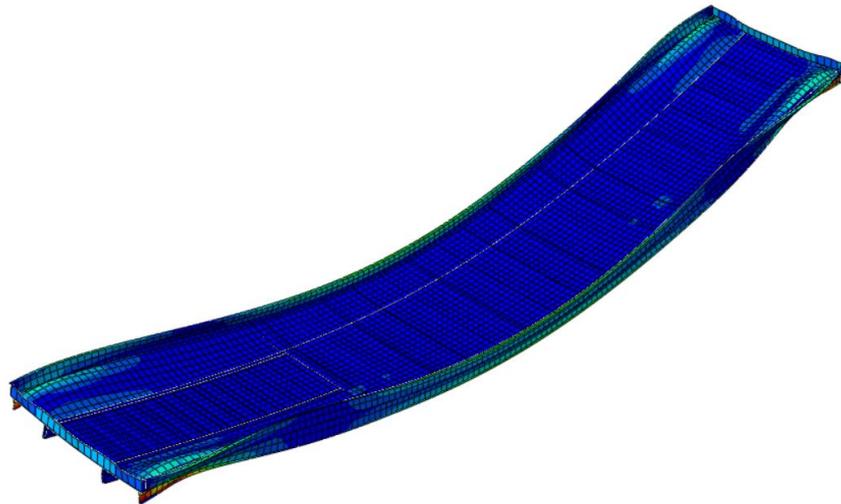
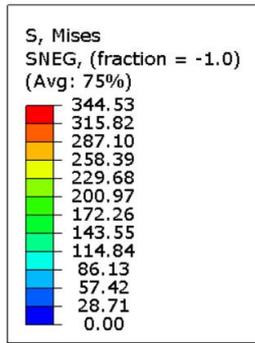


Step: carga
 Increment 23; Step Time = 1.000
 Primary Var: S, Mises
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.24e+02

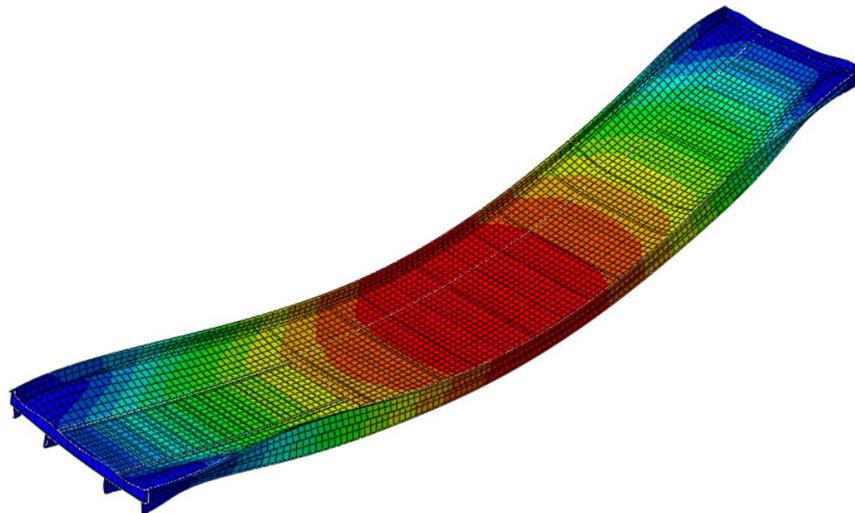
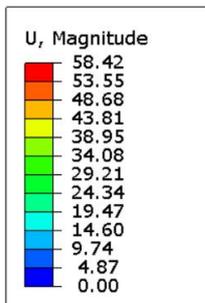


Step: carga
 Increment 23; Step Time = 1.000
 Primary Var: U, Magnitude
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.24e+02

- ENSAYO DE IZADO CON EL PERFIL EN C A 2,5mm.



Step: carga
Increment 23: Step Time = 1.000
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.26e+01



Step: carga
Increment 23: Step Time = 1.000
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.26e+01