

PROYECTO FIN DE CARRERA
(Ingeniería Técnica Industrial Mecánica)

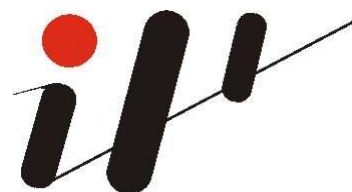
CÁLCULO Y OPTIMIZACIÓN MEDIANTE
EL M.E.F. DE UN CHASIS DE
SEMIREMOLQUE PARA BASCULANTES



Universidad de Zaragoza



E.U.I.T.I.Z



Dpto. Ingeniería Mecánica

Director de Proyecto:

Dr. Ing. Ind. Marco Carrera Alegre

Autor:

Adolfo Vicente García

Diciembre 2010

Departamento de Ingeniería Mecánica

INDICE

MEMORIA TÉCNICA

INDICE.....	I
MEMORIA TÉCNICA	I
1.- DEFINICIÓN DEL PROYECTO	3
1.1.- TÍTULO DEL PROYECTO.....	3
1.2.- DEFINICIÓN	3
1.3.- AGRADECIMIENTOS	3
2.- OBJETO DEL PROYECTO.....	4
3.- PLANIFICACIÓN	5
3.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
3.2.- DESCRIPCIÓN DE LAS FASES DEL PROYECTO	5
3.2.1- <i>Cálculo preliminar del chasis del semirremolque</i>	6
3.2.2- <i>Análisis e interpretación de los resultados del modelo inicial</i>	10
3.2.3. <i>Optimización del modelo inicial</i>	10
4.- CÁLCULO PRELIMINAR DE LA ESTRUCTURA POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	12
4.1. EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	12
4.1.1. <i>INTRODUCCIÓN</i>	12
4.1.2. <i>ABAQUS: PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS</i>	15
4.1.2.1. <i>Patran</i>	16
4.1.2.2. <i>Abaqus</i>	20
4.1.2.3. <i>Abaqus viewer</i>	21
4.2.- MODELO DE ELEMENTOS FINITOS UTILIZADO	21
4.3.- PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	28
4.4.- CONDICIONES DE CONTORNO Y CASOS DE CARGA.....	30
4.4.1.- <i>Condiciones de contorno</i>	30
4.4.2.- <i>Casos de carga</i>	34



4.5.- EVOLUCIÓN DEL PROYECTO Y REPLANTEO DE UNOS COMPONENTES DEL CHASIS.	37
4.6.- RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL CHASIS DE SEMIRREMOLQUE PARA BASCULANTES.	38
4.7.- CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS DEL CÁLCULO PRELIMINAR	51
5.- REDISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL MODELO INICIAL	53
5.1.- MODIFICACIÓN 1: CARTABONES DE REFUERZO EN LOS BULONES.....	53
5.2.- MODIFICACIÓN 2: NERVIOS DE REFUERZO EN EL CAMBIO DE SECCIÓN.....	69
6.- COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE EL MODELO INICIAL Y SU REDISEÑO Y OPTIMIZACIÓN. CONCLUSIONES	85
6.1.-COMPARATIVA DE RESULTADOS.....	85
6.2.- CONCLUSIONES	87
7.- CONCLUSIONES FINALES	90
8.- BIBLIOGRAFÍA.....	91
9.- ENLACES.....	92



1.- DEFINICIÓN DEL PROYECTO

1.1.- TÍTULO DEL PROYECTO

CÁLCULO Y OPTIMIZACIÓN MEDIANTE EL M.E.F. DE UN CHASIS DE SEMIRREMOLQUE PARA BASCULANTES

1.2.- DEFINICIÓN

El presente proyecto consiste en el cálculo y optimización mediante el Método de los Elementos Finitos de un chasis de un semirremolque para basculantes respecto uno inicial facilitado por la empresa Leciñena S.A. Este se lleva fabricando desde hace tiempo en la empresa fundamentándose en la experiencia de la misma en el sector y por tanto se desconoce cómo se distribuyen las tensiones y si algún elemento del mismo está sobredimensionado, de esto la necesidad del proyecto.

La finalidad será un análisis de cálculo y simulación mediante elementos finitos capaces de reproducir el comportamiento del chasis teniendo en cuenta la situación más desfavorable del semirremolque.

Después de haber analizado cómo trabaja cada elemento del chasis, se pasará a la parte de optimización, cuya finalidad es conseguir una buena distribución de tensiones y después ahorrar en lo posible peso en la estructura.

Por último, y no menos importante, se darán una serie de conclusiones relativas a cómo se comporta el chasis del semirremolque para basculantes original y las posibles optimizaciones frente a este primero.

1.3.- AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su apoyo a lo largo de estos años de formación.

A Pilar, por ayudarme cada segundo de este último año y por recordarme lo importantes que son las sonrisas...por una vida juntos.

A Jesús, Diego, Félix, José Eduardo y David, por hacerme entender lo que significa la palabra “amigo” y haber compartido parte de nuestras vidas estos años.

A Fran, lo más cercano a un hermano, por tu paciencia, buenos y malos momentos que hemos pasado.

A todos de Bello que compartimos tan buenos y malos momentos, siempre juntos.

A la gente del C.M.U. Xavierre y todos aquellos que nuestros caminos se cruzaron en algún momento consiguiendo entablar una buena relación.

Por último, y no menos importante, agradecer la ayuda prestada por el director de proyecto, D. Marco Carrera Alegre, por haberme enseñado una parte magnífica de la ingeniería, por su paciencia y esfuerzo por ayudarme a pesar de no disponer casi de tiempo para ello; sin todo esto no hubiera sido posible concluir a tiempo este proyecto.

2.- OBJETO DEL PROYECTO

El objeto del presente proyecto es calcular y optimizar el chasis de un semirremolque sujeto a unas determinadas condiciones de carga y funcionamiento.

El estudio realizado supondrá la ejecución de tareas de numéricas de cálculo y simulación basadas en el método de los elementos finitos, capaces de reproducir el comportamiento de la estructura analizada ante los casos de carga aplicados, los cuales se realizarán de modo que proporcionen información del estado de deformaciones y tensiones que existen en cada uno de los componentes de la estructura. Hay que estudiar previamente a las cargas y condiciones que está sometido el chasis, en un primer momento como valor numérico y en segundo la manera de modelizarlas en los programas que se van a utilizar.

Por último, y partiendo de los resultados obtenidos numéricamente, se procederá a la optimización del chasis por medio del rediseño de algunos de sus componentes llegando a un diseño mejorado respecto del inicial frente a las condiciones exigidas.

3.- PLANIFICACIÓN

3.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como se ha citado anteriormente, el proyecto consiste en un cálculo y un rediseño del chasis de un semirremolque para basculantes fabricado en acero por la empresa Leciñena S.A durante años y lo quieren mejorar. Para ello se necesita conocer cómo se distribuyen las tensiones (deformaciones) del semirremolque. Esto es la primera parte del proyecto que se hace mediante los elementos finitos, debido (como se ha comentado con anterioridad) a que este semirremolque no se había sometido a ningún tipo de estudio, sino que se limitaba a una construcción fundamentada en la experiencia de muchos años de fabricación.

Al final del análisis y la optimización lo más importante es una serie de conclusiones que se fundamentan principalmente en coeficientes de seguridad de los elementos del chasis y pesos del chasis, que relacionan las optimizaciones con el modelo primitivo.

3.2.- DESCRIPCIÓN DE LAS FASES DEL PROYECTO

Para cumplir con los objetivos finales del proyecto éste debe constar de una serie de fases que comprenden tanto tareas numéricas de cálculo y simulación, interpretación de los resultados y otras para conseguir la optimización del semirremolque proporcionado inicialmente.

A continuación se muestra de forma esquemática las diferentes fases de que consta el proyecto. Una descripción más detallada de cada una de ellas se muestra en los puntos presentados a continuación de éste.

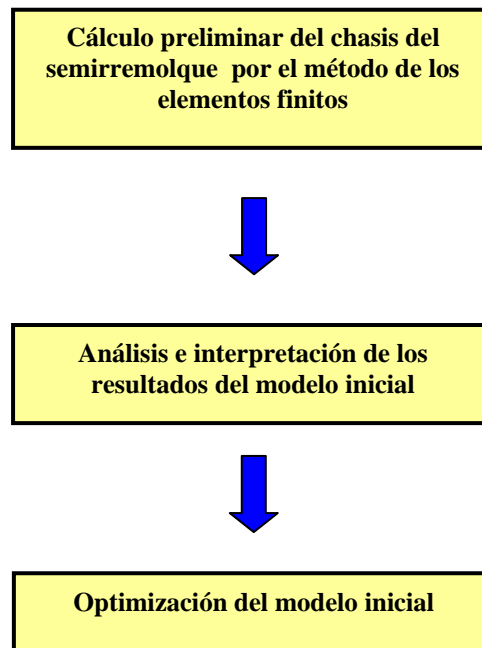


Figura 3.1: Esquema de las diferentes fases del proyecto.

3.2.1- CÁLCULO PRELIMINAR DEL CHASIS DEL SEMIRREMOLQUE

Se tiene de partida un chasis de un semirremolque para basculantes fabricado en acero (véase la *figura 3.2*), el cual habrá que modelar para poder calcular previamente.



Figura 3.2: Ejemplo de un semirremolque basculante

Se puede apreciar en la imagen anterior dos partes diferenciadas en este tipo de semirremolques: el chasis y el basculante. Este último es lo que se denomina como el

“carrozado del semirremolque”, que consiste a que a partir de un chasis ya fabricado, se le acoplan una serie de elementos: laterales, viguetas, arcos, portones... de los cuales cabe destacar los cilindros. Estos elementos pueden ser dos como en la *figura 3.3* o pueden ser uno como se aprecia en la *figura 3.2*.

En cuanto al chasis, es la parte que se va a analizar. Este está dividido de manera muy general en los siguientes elementos: King- pin, largueros, pies de apoyo, travesaños, escudos y la zona de ejes. Se puede observar de manera genérica estos elementos en la *figura 3.3* y en la *figura 3.4*.

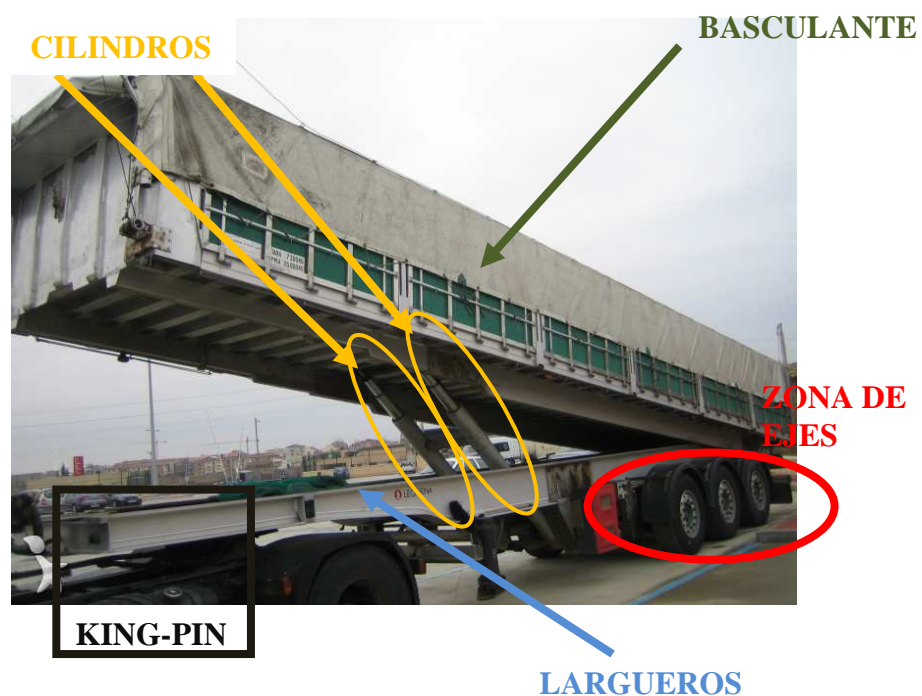


Figura 3.3: Ejemplo de un semirremolque basculante en la operación de basculado.



Figura 3.4: Semirremolque basculante de Leciñena S.A.

Para el cálculo hay que tener en cuenta cómo está solicitado este tipo de semirremolques, para lo cual se considera una capacidad de carga del basculante de 35 Toneladas (que es la que generalmente tienen todos los semirremolques de este tipo). En cuanto a la situación que se va a analizar, es la más desfavorable, es decir, es en la situación de descarga, como se puede apreciar en la *figura 3.3*. Este tipo de chasis, si soporta la situación descrita, no hace falta analizar otra (como puede ser la de giro de radio mínimo, subida de un escalón...) ya que las solicitaciones son mucho menores.

En relación con las condiciones de contorno existen dos: la unión King-pin con la quinta rueda y el sistema de arriostramiento. Esta unión se puede observar en la *figura 3.5* y está compuesta por dos partes, la quinta rueda (una plataforma que va acoplada en la cabeza tractora que sirve de apoyo al semirremolque, que va engrasada para reducir el coeficiente de rozamiento) y el King-pin, que es un elemento unido al chasis en su parte delantera, que se acopla con la quinta rueda y lo que permite es un giro relativo entre semirremolque y cabeza tractora, pudiendo aportar a su vez un movimiento lineal al semirremolque.



Figura 3.5: Unión de un semirremolque con una cabeza tractora.

El sistema de arriostramiento se considera a un grupo de elementos: ballestas, Diapress, Amortiguador y travesaño del eje. Las ballestas van desde el soporte del eje (al cual están unidas mediante un bulón) hasta su correspondiente Diapress y soportando el travesaño del eje (donde van montados los rodamientos, frenos de disco o tambor, etc). A este travesaño se le une el amortiguador que va hasta el soporte del eje donde se une con este mediante un casquillo.

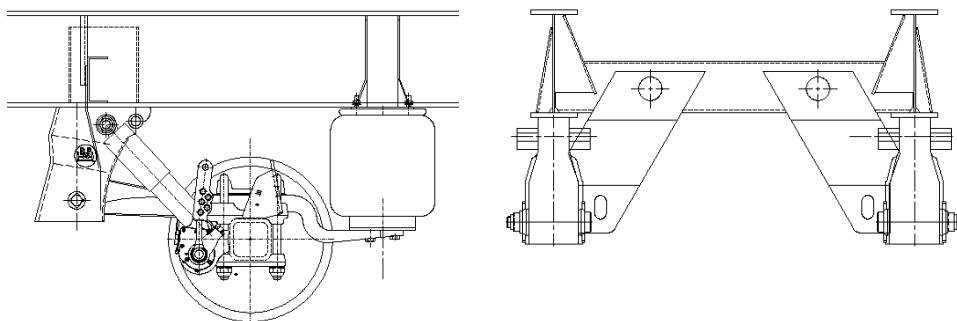


Figura 3.6: Vistas de un sistema de arriostramiento.

Todo en conjunto, forman el sistema de arriostramiento de un eje, es decir, que generalmente en los semirremolque para basculantes este sistema se repite 3 veces

(una por eje) a una misma distancia, que en el caso a analizar en este proyecto es de 1310mm.

3.2.2- ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO INICIAL

En cuanto a los resultados, se pueden interpretar resistencia y rigidez. Este último no se tienen restricciones de normativas, por tanto lo único que se puede hacer es observar cómo se deforma el chasis, sus flechas máximas, dónde y en qué elementos del chasis están localizadas. La resistencia sí que es muy importante, ahora bien, hay que notar que en este aspecto tampoco hay una normativa específica que haya que seguir, simplemente el criterio será que la tensión equivalente de Von Mises sea menor que la tensión admisible del material, es decir, que no supere el límite elástico de los materiales utilizados (ya que interesa que se trabaje en la zona elástica para que no se produzcan deformaciones permanentes en la estructura).

En resumen, para los cálculos se tomará el límite elástico del material y la tensión equivalente de Von Mises de cada elemento y se hará una relación entre ambos, o sea, un coeficiente de seguridad (o como algunos entendidos y bibliografía comentan: coeficiente de incertidumbre, coeficiente de desconocimiento, coeficiente de ineptitud...) y este deberá superar la unidad, es decir, que la estructura trabaje por debajo de su límite elástico, o lo que es lo mismo, que todas deformaciones sean elásticas.

3.2.3. OPTIMIZACIÓN DEL MODELO INICIAL

Como se ha comentado anteriormente no existe restricciones de rigidez pero si de resistencia, la única condición es trabajar en la zona elástica de los materiales que componen el semirremolque. Esto último se observa (como también se ha comentado) con los coeficientes de seguridad, que todos superen la unidad.

Llegados a este punto, se plantean dos posibles opciones de optimización: la primera es añadir elementos de refuerzo en las zonas donde esté cargada de tensión o quitar material que no soporta apenas esfuerzos; la segunda sería una vez controlados las tensiones intentar reducir al máximo la cantidad de material y por tanto el peso de la estructura. En este caso hay que hacer notar que todos los elementos están conformados por contornos laminares, planos, es decir, que de ellos lo único que se debe variar son los espesores.



En relación a optimizar existe un amplio abanico de posibilidades. Por una parte en cuanto a la geometría de los posibles refuerzos y/o modificaciones de la misma, luego en el tema de los materiales. El criterio fundamental es el de resistencia, y muy importante el del peso pero hay que tener en cuenta que al final lo que se consigue es un producto que se va a vender en el mercado, es decir, que estas optimizaciones vienen limitadas por el precio de las mismas, ya que a priori se podría pensar que con materiales con unas características superiores se reduce de una manera drástica el peso de estos chasis, pero ¿Qué aparatos y procesos son necesarios para soldar y unir esos materiales? ¿Qué coste tienen los materiales de altas prestaciones y los equipos y procesos necesarios? Si se tiene en cuenta estas cuestiones a la hora de optimizar directamente se pueden desechar ciertos materiales y geometrías debidos a su elevado costo y por no hablar de las necesidades de los equipos para trabajarlos.

4.- CÁLCULO PRELIMINAR DE LA ESTRUCTURA POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

En esta primera fase del proyecto va a simularse mediante técnicas de análisis numérico el comportamiento del chasis de un semirremolque basculante mediante la aplicación del método de los elementos finitos.

En el punto 4.1 se presenta un resumen teórico general sobre el método de los elementos finitos. Como se verá más adelante es necesaria la utilización de tres módulos distintos para completar el proceso de modelado, cálculo y post proceso. Todas las simulaciones numéricas realizadas en este proyecto van a realizarse mediante la aplicación de este método a cada uno de los modelos presentados.

Los resultados obtenidos al final de este primer proceso de cálculo servirán para tener una noción de las solicitaciones mecánicas actuantes sobre el chasis del semirremolque sometida a una serie de cargas y sujeta unas determinadas condiciones de contorno según el estudio del que se trate. Así mismo, proporcionarán valores representativos de componentes de tensión y deformación que servirán de base para posteriores fases de este proyecto.

4.1. EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

4.1.1. INTRODUCCIÓN

El Método de los Elementos Finitos (MEF) es un método numérico para la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales. Su desarrollo desde los años cincuenta hasta la actualidad ha sido constante y actualmente puede considerarse como el método numérico más extendido en la mayoría de los ámbitos de la ingeniería. Son muchas las facetas de la ingeniería en las que se precisa determinar la distribución de tensiones y deformaciones en un continuo elástico. Los casos particulares de dichos problemas pueden variar desde problemas bidimensionales de tensión o deformación plana, sólidos de revolución y flexión de placas y láminas, hasta el análisis más general de sólidos tridimensionales.

El MEF consiste en su formulación física en la división del dominio espacial, ya sea uni, bi o tridimensional en una serie de subdominios de geometría simple, a los cuales se le denomina elementos. Estos elementos se encuentran formados

por una serie de puntos que definen su geometría y se denominan nodos. En el interior de cada elemento se interpola una función de desplazamientos que se formula en función de los valores de desplazamientos que existen en los nodos.

La forma de trabajo de estos elementos consiste en aplicar las ecuaciones de compatibilidad y comportamiento y obtener una relación entre la fuerza aplicada sobre los elementos y los desplazamientos de los nodos. Esta relación se expresa mediante la matriz elemental, la cual depende del número de nodos, situación de estos, material utilizado, geometría del elementos y tipo de problema.

Dependiendo del tipo de formulación del problema se determina si el problema es lineal (elasticidad lineal) o si es no lineal (grandes desplazamientos o deformaciones, comportamiento del material complejo)

A continuación se expresa el proceso de cálculo con el MEF:

- Planteamiento de continuidad de desplazamientos y equilibrio de fuerza entre elementos.
- Sistema de ecuaciones globales de la estructura
- Tipo de formulación inicial (lineal o no lineal)
- Resolución
- Obtención de los desplazamientos nodales (incógnitas básicas)
- Obtención de otras variables: deformaciones y tensiones

La aproximación de los elementos finitos no requiere la selección del tipo de ecuación que será usada para modelar la estructura. Los códigos disponibles en el mercado han definido previamente los elementos para los cuales la matriz de rigidez individual del elemento ha sido resuelta.

De esta forma, el usuario necesita definir únicamente el tipo de elemento. Una vez que el elemento ha sido definido el procedimiento es el siguiente:

1. Decidir la geometría requerida para modelar correctamente el problema.

- 1D (cables, vigas)
- 2D (tensión o deformación plana)
- 2D axisimétrica (láminas y sólidos de revolución)
- 3D (láminas y sólidos)

2. Seleccionar el tipo de elemento y formular la matriz de rigidez del elemento si se requiere:

- Definir la matriz que relaciona las deformaciones del elemento con los desplazamientos nodales $\{B\}$
- Definir la matriz de la ley constitutiva $\{D\}$
- Aplicar una rutina numérica cuadrática para evaluar la rigidez del elemento sobre el volumen del elemento,
$$\int_V \{B\}^T \{D\} \{B\} dv$$

El MEF consiste en dividir un medio continuo en un número finito de partes cuyo comportamiento se especifica con un número finito de parámetros, pasando de un sistema con infinitos grados de libertad a otro con un número fijo, con similares propiedades físicas y geométricas, en el que las ecuaciones de equilibrio se pueden expresar mediante un sistema algebraico de ecuaciones simultáneas con un determinado número de incógnitas, obteniéndose la solución del sistema completo mediante el ensamblaje de las soluciones para cada elemento finito.

3. Discretizar la geometría en una malla.

- Definir las localizaciones de los nodos de los elementos
- Refinar el mallado en zonas de concentración de tensiones

4. Definir las propiedades locales del elemento.

- anisótropo
- isótropo
- ortótropo

5. Siguiendo los pasos anteriores obtenemos la matriz de rigidez del elemento

6. Transformar la matriz de rigidez local del elemento en coordenadas globales

7. Obtener el ensamblaje de la matriz de rigidez superponiendo las matrices de rigidez globales de los elementos

8. Definir las condiciones de contorno aplicadas al sistema y formular el vector de fuerzas nodales $\{F\}$ así como definir desplazamientos, nodos fijos, contactos, cargas, temperatura, etc.
9. Resolver el conjunto de ecuaciones algebraicas lineales resultante usando los métodos apropiados.
10. Resolver tensiones y deformaciones locales de elementos. Calcular tensiones y deformaciones en lámina y comparar con el criterio de rotura.

Una vez que se han establecido las características de los nodos o los elementos las ecuaciones individuales deben ensamblarse para formar un sistema global de ecuaciones que describa la respuesta general del sistema. Este ensamblaje, el cual aparece en el punto 9, da lugar a un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales cuya forma básica es la siguiente:

$$[K]\{u\}=\{f\}$$

en donde:

$[K]$ es una matriz (nxn) de rigidez del sistema;

$\{u\}$ es un vector columna (nx1) que normalmente representa las deflexiones del sistema que son desconocidas

$\{f\}$, es un vector columna (nx1) que normalmente son las cargas aplicadas que son conocidas.

4.1.2. ABAQUS: PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS

Un programa de cálculo de Elementos finitos, sea cual sea el tipo de problema, tiene tres partes (o módulos) claramente diferenciadas, ver *Figura 4.1*.

En letra negrita aparecen los nombres de los programas comerciales utilizado en cada uno de los módulos o partes.

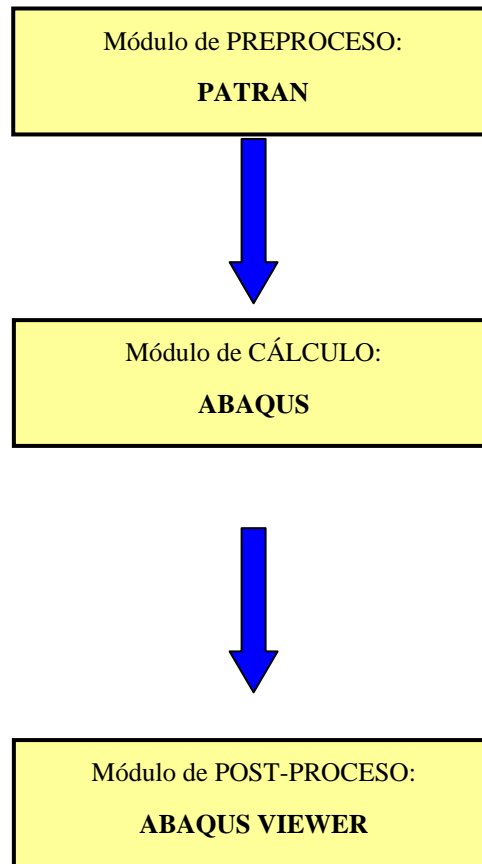


Figura 4.1: Partes de un Programa de Elementos Finitos

A continuación se explican las características del programa comercial utilizado para la realización de este proyecto, en concreto del paquete de elementos finitos ABAQUS.

4.1.2.1. PATRAN

Patran es el módulo de Preproceso utilizado en este caso con salida a Abaqus, en él se define el elemento a estudiar y el tipo de discretización deseada para la resolución del problema. Para ello se siguen los siguientes pasos

- Geometría: El objeto a estudio se define su geometría por medio de coordenadas u otros elementos de ayuda auxiliar (rectas, circunferencia, etc.,...).
- Discretización: El sólido que queremos analizar se divide en nodos, en donde se consideran los grados de libertad del objeto a estudio, y elementos, los cuales forman la malla de nuestro estudio conectando los nodos. Este apartado es muy importante ya que hay que definir el

elemento con el cual se va a discretizar el objeto. Una vez elegido el elemento a utilizar la discretización se puede realizar de forma automática o generando elemento a elemento.

Abaqus posee una librería muy amplia de elementos que pueden ser utilizados dependiendo del tipo de geometría sobre la que se quiera efectuar el cálculo y de la precisión que se desea en el mismo dentro del propio elemento. En la Figura 3.12 se muestran los distintos tipos de elementos:

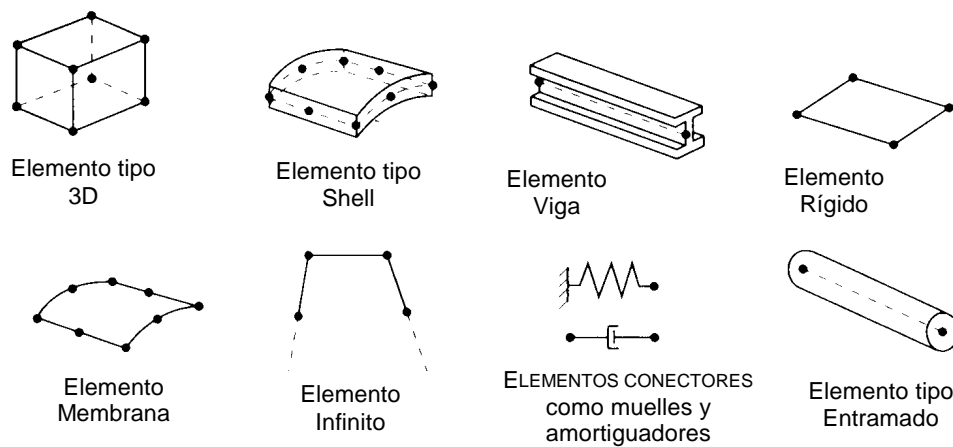
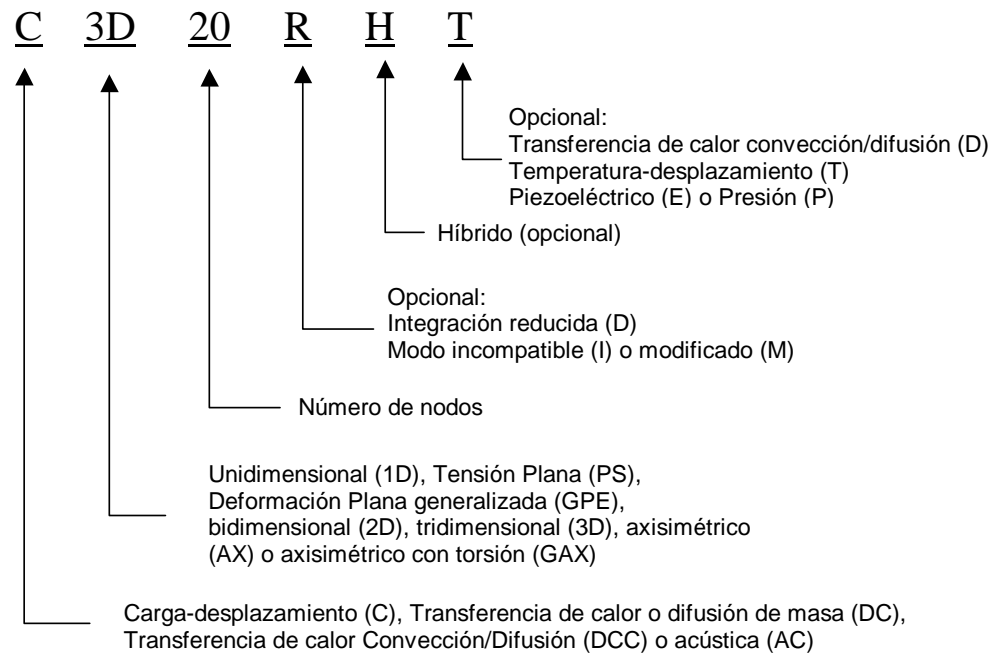


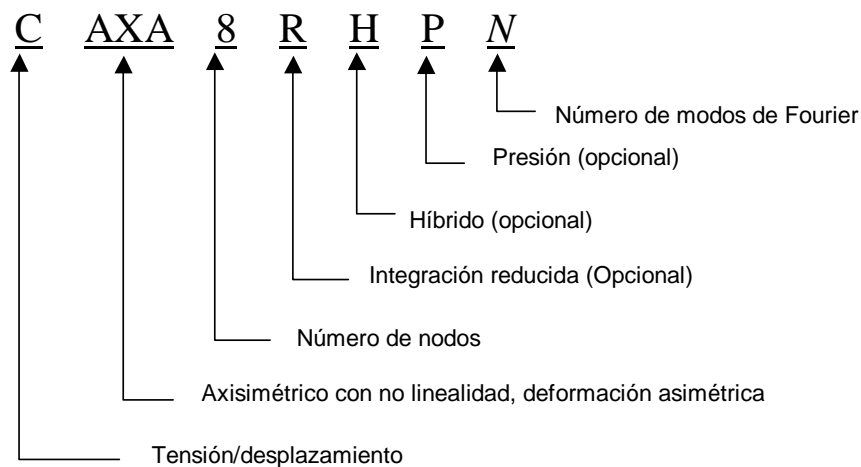
Figura 4.2: Tipos de Elementos

Abaqus tiene un criterio a la hora de nombrar los distintos elementos de su librería. A continuación se detalla la manera que tiene este programa de nombrar a los elementos.

- a) Elementos unidimensionales, bidimensionales, tridimensionales axisimétricos.



- b) Elementos axisimétricos con deformación no lineal asimétrica.



- **Materiales:** Se define la característica del material del cual está hecho nuestro sólido (módulo elástico, coeficiente de dilatación, etc). En Patran se puede introducir la curva del material (pares de valores tensión – deformación) con la precisión que se quiera (tantos pares de valores como se precise).

- Cargas y condiciones de contorno: Por último se definen las cargas a las que está sometido el sólido, condiciones de apoyo en desplazamiento y contactos entre distintas superficies.

Una vez llegado a este paso la etapa en Patran ha finalizado pero antes éste prepara la información para ser enviada a la siguiente etapa, procesador o programa principal, e imprime o dibuja por pantalla de forma interactiva la geometría inicial y las condiciones para que sean verificadas por el usuario.

Posteriormente, deberá obtenerse un fichero de datos (input) en el cual se especifica todos los parámetros necesarios para, posteriormente, llevar a cabo el cálculo. Este fichero contiene la siguiente información:

- En primer lugar, aparece un listado de todos los nodos que forman parte del modelo y con las coordenadas espaciales de cada uno de pendiendo del sistema de referencia utilizado.
- A continuación, aparecen los distintos grupos de elementos existentes. Cada uno de los grupos se especifican de la siguiente forma: primero aparece un listado del conjunto de nodos que forman parte de dicho grupo (NSET) y, después, se enumera cada elemento detallando el conjunto de nodos que forma parte del mismo (ELSET).
- En el siguiente bloque se asigna a cada uno de los grupos el material correspondiente según las especificaciones dadas. Además, cuando se trata de elementos tipo lámina (SHELL) se especifica el espesor, el número de puntos de integración y el sistema de orientación de cada grupo de elementos.
- Después, se definen los materiales utilizados. En este bloque se especifica el nombre del material y las distintas propiedades asociadas a los mismos (densidad, módulo elástico, límite de rotura, etc).
- Posteriormente, se define el tipo de cálculo que va a realizarse (en este caso estático).
- Por último, se especifican tanto las condiciones de contorno como las cargas aplicadas. En este caso aparece un listado de los nodos en los cuales se aplican las condiciones de contorno con sus correspondientes valores de restricción, y otro listado de los nodos en los que deben aplicarse las cargas con el correspondiente valor de las mismas.

- Una vez obtenido y comprobado el fichero anterior, se realizará el proceso de cálculo en sí del modelo. En este caso, va a utilizarse el módulo de cálculo mediante elementos finitos Abaqus descrito a continuación.

4.1.2.2. ABAQUS

Es el bloque en donde se da lugar el cálculo, realizando éste por medio de la aplicación del método de los elementos finitos a partir de la introducción e interpretación de los datos de la geometría, mallado, cargas, apoyo, contactos y material utilizados.

Este bloque no necesita ninguna interacción con el usuario y la manera de ejecutarlo es decirle por medio de un comando que fichero queremos calcular. Una vez que se le ha ordenado la ejecución, el programa revisa el fichero obtenido del preproceso para obtener algún posible fallo de estructura de datos y si no hay errores da paso a la etapa de cálculo.

Abaqus posee dos tipos de cálculo diferenciados que son los siguientes:

- **Abaqus/Standard.** Corresponde con el método general de cálculo estático del programa. Es el más ampliamente utilizado en el cálculo de geometrías y permite calcular el comportamiento mecánico en cuanto a tensiones y deformaciones de cualquier estructura que le sea introducida y en cualquier dirección. En este módulo de cálculo se obtienen los resultados aplicando la teoría del Método de los Elementos Finitos mediante integración implícita, lo que implica mayor gasto computacional pero también mayor precisión.
- **Abaqus/explicit.** Corresponde con el otro módulo de cálculo convencional de ABAQUS y está desarrollado con una estructura completamente vectorizada para su utilización en supercomputadores. El análisis dinámico con explicit está basado en la implementación de una regla de integración explícita junto con el uso de matrices masa diagonales o agrupadas. Permite el cálculo de cualquier estructura sometida a cargas dinámica en el tiempo.

4.1.2.3. ABAQUS VIEWER

Este bloque es el encargado de presentar la información obtenida durante el cálculo. Los módulos de cálculo, en este caso ABAQUS, escriben los resultados del cálculo en unos fichero de texto los cuales recogen toda la información por nodo y elemento pudiendo saber de esta manera los desplazamientos de los nodos, mapas de tensiones o deformaciones, deformada de la estructura, etc.

Como el usuario no puede manejar de forma efectiva todo este volumen de datos es en este momento cuando intervienen los post-procesadores. Éstos representan de una forma gráfica todos los resultados obtenidos en el cálculo, pudiendo así obtener los resultados pedidos mediante una gradación de tonalidades y colores, y realizar a su vez vistas de cualquier ángulo posible.

4.2.- MODELO DE ELEMENTOS FINITOS UTILIZADO

Partiendo de la geometría del chasis del semirremolque para basculantes se ha procedido a su modelado y mallado (discretización de cada uno de los componentes en elementos finitos) mediante la utilización del módulo de preproceso Patran comentado anteriormente.

La geometría de partida es un archivo de extensión .gif, generado con *SolidWorks* (o un programa similar), véase *figura 4.3*. Esta geometría tiene el siguiente problema: no se puede mallar con elementos tipo “Shell”, que son los que se utilizan para modelizar este chasis. Esto se debe al uso de este tipo de elementos ya que es necesario tener previamente definida una superficie plana a la cual se le asocian este tipo de elementos.

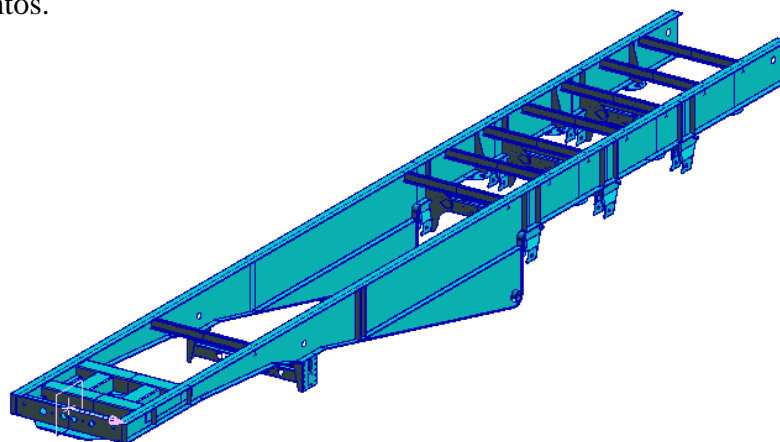


Figura 4.3: Chasis completo en formato .gif.

Para entenderlo mejor hay que observar la *figura 4.4* y la *figura 4.5*. en las que se ve un detalle de un elemento del chasis y se puede observar la cómo se representa la superficie en el .gif y cómo se debe dejar para poder en el siguiente paso mallarla.

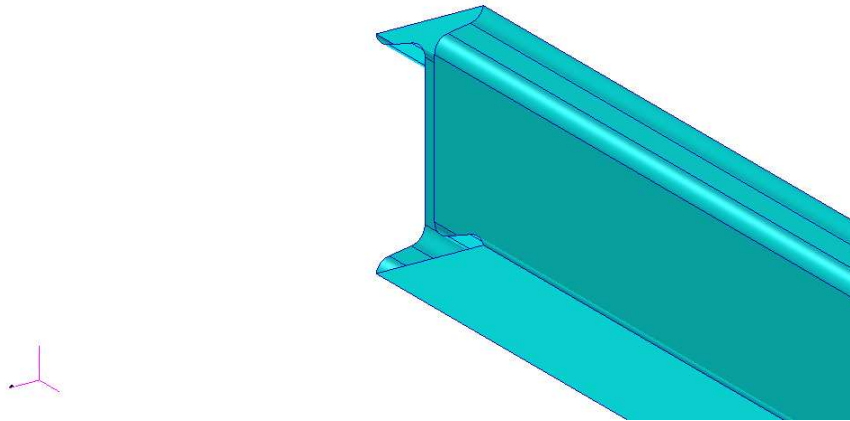


Figura 4.4: Detalle de un travesaño

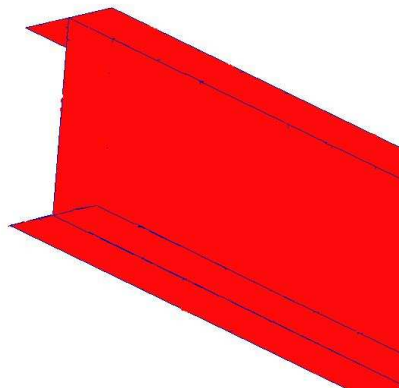


Figura 4.5: Detalle de la "superficie mallable" en un travesaño

Después de tener preparada la "superficie mallable" se procede a mallar mediante elementos finitos, fundamentalmente tipo "Shell", salvo algún elemento concreto que se hace con elementos sólidos (en una tabla posterior se explicará en los casos que hay un tipo u otro de esos elementos). En la *figura 4.6* se puede apreciar el detalle de un travesaño trabajado y transformado en "superficie mallable" y modelado también mediante elementos finitos. Aplicando iterativamente esto a todo el modelo queda como puede apreciarse en las siguientes imágenes.

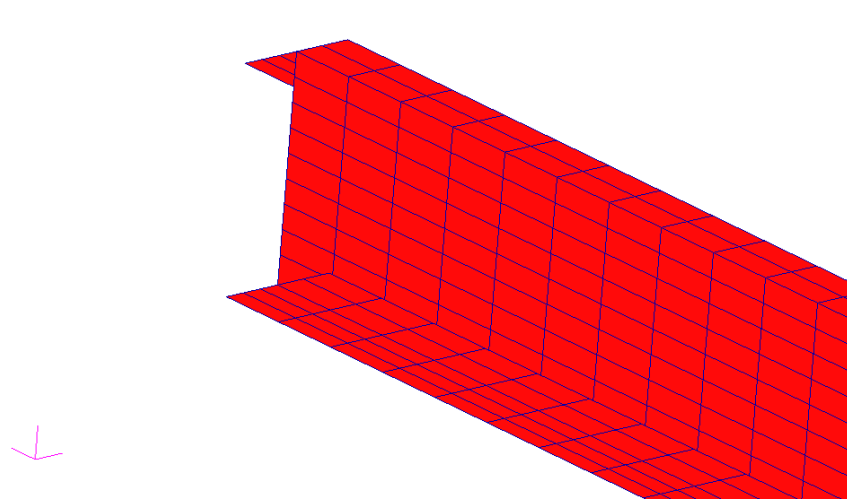


Figura 4.6: Detalle de un travesaño mallado

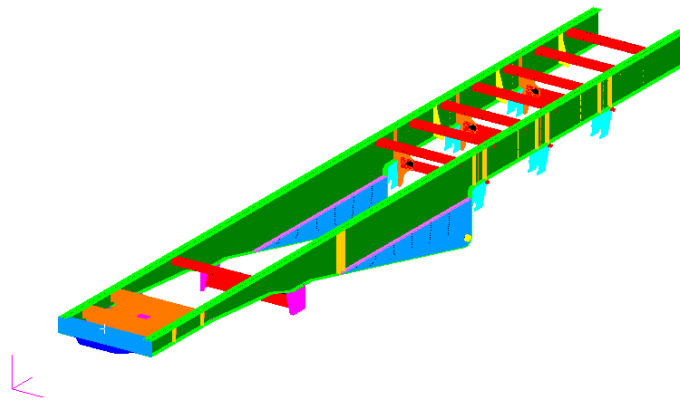


Figura 4.7: Chasis mallado, vista perspectiva isométrica.

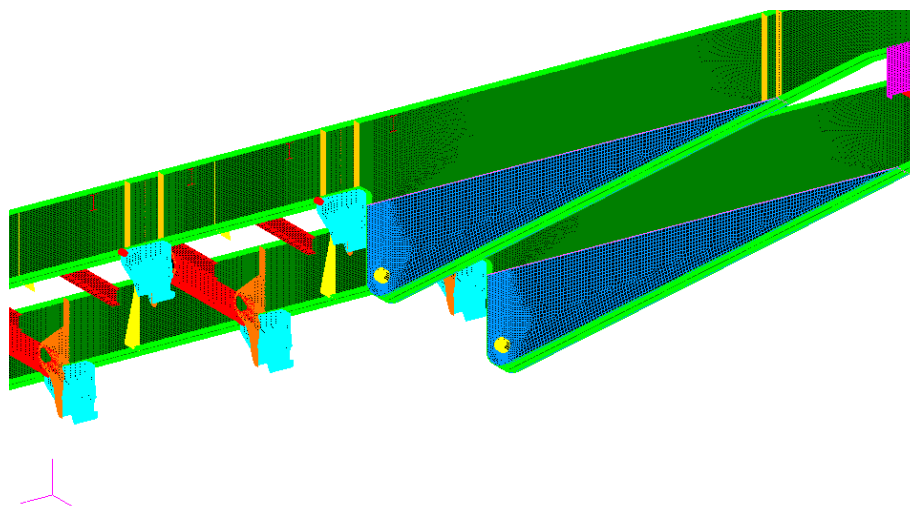
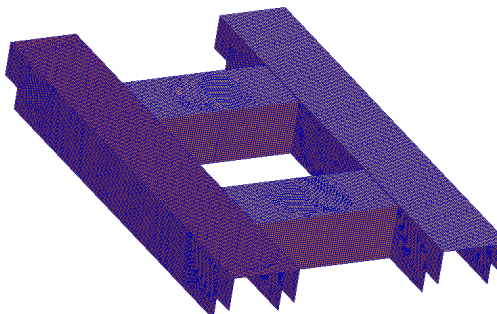
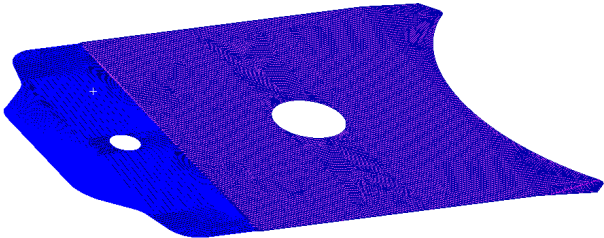
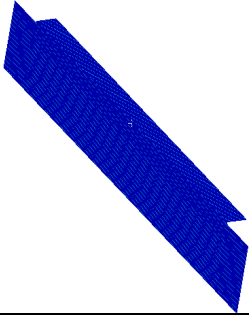
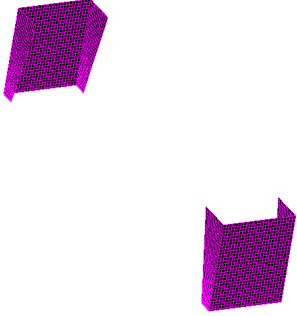
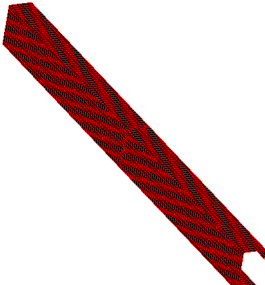
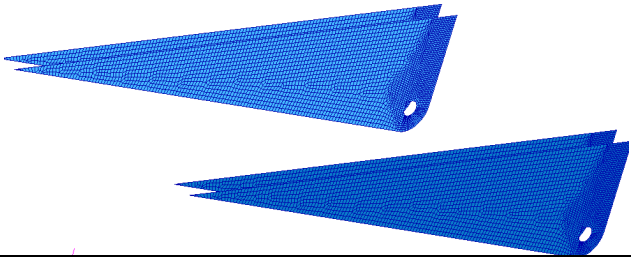
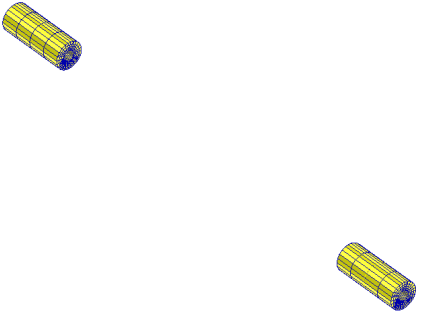
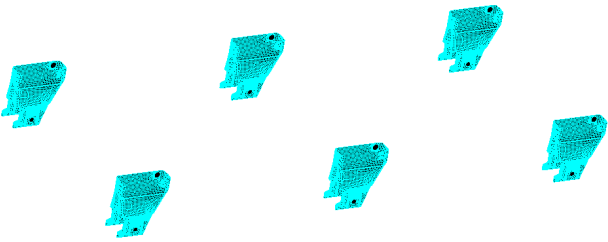



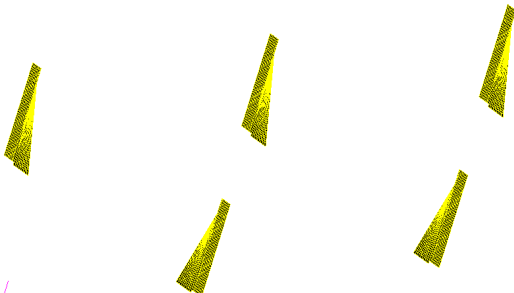



Figura 4.8: Chasis mallado, vista en otra perspectiva..

A continuación, en la *tabla 4.1* se muestra en detalle el modelo de elementos finitos así como el tipo y el número de elementos utilizado en cada uno de los componentes del chasis del semirremolque para basculantes inicial antes de realizar ninguna optimización.

COMPONENTE	MODELO DE ELEMENTOS FINITOS	NÚMERO DE ELEMENTOS	TIPO DE ELEMENTO
Puente (King-Pin)		44370	S4R
Chapas de deslizamiento (King-Pin)		64431	S4R S3R

Banda de cierre Delantero (King-Pin)		18912	S4R
Soporte pies apoyo		2964	S4R S3R
Travesaño pies apoyo		4389	S4R
Escudos		12527	S4R S3R
Bulones escudos		52	C3D8 C3D6

Soportes ruedas		32030	S4R S3R
Travesaños (soporte ruedas)		5975	S4R S3R
Cartabones (soporte ruedas)		11976	S4R S3R
Bulones rígidos (soporte ruedas)		1800	R3D4
Cartabones Diapress		4055	S4R S3R
Travesaños		6571	S4R

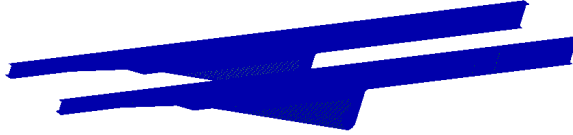
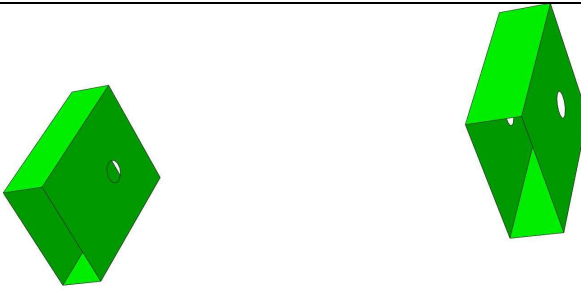
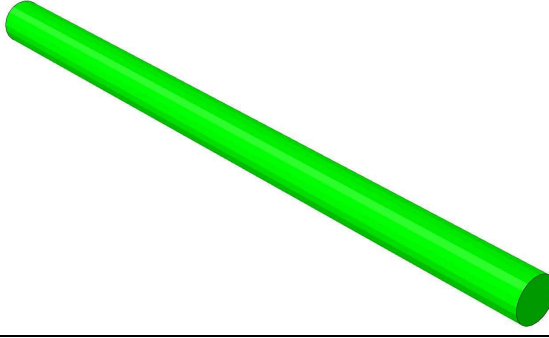
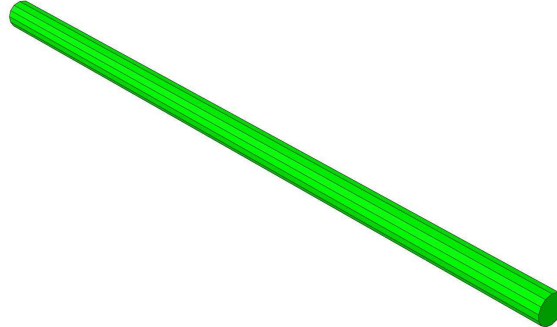
Largueros		220580	S4R S3R
Cartabones giro trasero		2352	SR4
Barra giro cilindros		120	R3D4 R3D3
Barra giro trasero		204	C3D8 C3D6

Tabla 4.1: Modelo de elementos finitos de los distintos componentes del chasis del semirremolque.

El modelo total está formado por 404.481 elementos, contando elementos plano (S3R y S4R), sólidos (C3D6 y C3D8) y los elementos sólidos rígidos (R3D6 y R3D8).

4.3.- PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Los materiales que se van a utilizar en este modelo de chasis para basculantes son aceros para la construcción. A continuación se hará una breve explicación sobre los aceros, tipos y los que concretamente se utilizan para este modelo para acabar con una explicación de cómo se van a tomar sus propiedades para modelizar mediante elementos finitos.

El ACERO es el nombre que se les da a las aleaciones de hierro (Fe) y carbono (C), en las que el contenido en carbono va desde el 0.10 al 2 por ciento. También puede contener otros minerales en menor proporción, como Fósforo (P), azufre (S) y nitrógeno (N). Los aceros que son aleados contienen también otros elementos como magnesio (Mg), silicio (Si), cromo (Cr), níquel (Ni) y molibdeno (Mo).

El contenido en carbono tiene una importancia fundamental en sus propiedades: si crece la cantidad de carbono en el acero, la dureza y resistencia crecen, pero también aumenta su fragilidad y disminuye la ductilidad. En cambio, si el contenido decrece mejora la soldabilidad, una propiedad muy interesante para este tipo de construcciones, ya que el chasis está construido mediante la unión por soldeo, desde las alas y alma de los largueros hasta la unión entre elementos.

La designación simbólica es la más extendida a nivel comercial y europeo, se puede observar en la *figura 4.10*, en la que aparece un pequeño esquema muy general de lo que significa cada dígito. Si se quiere consultar información más extensa sobre cómo funciona esta manera de nombrar los aceros se puede consultar la norma UNE EN 10027-1.

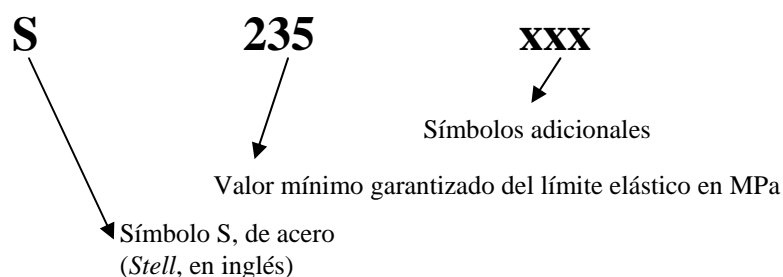


Figura 4.10: Esquema de la designación simbólica de aceros según la UNE EN 10027-1.

En relación a este proyecto y al estudio estructural que se va a realizar al chasis del semirremolque, interesa el valor del límite elástico, los *símbolos adicionales* tiene carácter secundario. Esto se debe a que para la construcción de este producto se

utilizan fundamentalmente aceros para la construcción, que son S355 y S275 (dentro de este tipo de aceros también estaría el S235, aunque no se aplique para este tipo de aceros) y observando cuadros de aceros comerciales se llega a la conclusión que sus límites elásticos no varían en función de los *símbolos adicionales*, sino que solo influyen espesores nominales (como cualquier acero).

Los materiales que se van a utilizar en cada componente del chasis con sus respectivas propiedades se muestran en la *tabla 4.2*. Estos valores se introducirán en Patran, adquiriendo así los elementos finitos construidos previamente unas propiedades dependiendo el material al que discreticen.

GRUPO	Acero	Límite Elástico (MPa)	Densidad (kg/mm ³)	Módulo de Young (N/mm ²)	Coefficiente de Poisson
Puente (King-pin)	S355	355	7,87*10 ⁻⁶	210.000	0,3
Chapas de deslizamiento (King-pin)	S355				
Banda de cierre delantera (King-pin)	S355				
Ala superior e inferior de los largueros	S355				
Alma largueros	S355				
Cartabones del Giro trasero	S355				
Bulones escudos	S355				
Travesaños	S275	275			
Travesaños (Pies de Apoyo)	S275				
Soportes pies de apoyo	S275				
Travesaños (Soporte ruedas)	S355	355			
Soportes ruedas	S355				
Cartabones (Soporte ruedas)	S355				
Cartabones (Diapress)	S275	275			

Tabla 4.2: Resumen de las propiedades de los materiales utilizados.

En cuanto a cómo se introducen en el programa, se considera al material en una situación elastoplástica, es decir, que siempre se está en situación de deformación elástica, por tanto el comportamiento del material es lineal y viene determinado por el módulo de Young (E) y el límite elástico (σ_e). Se puede observar el comportamiento lineal en la *figura 4.11* en la que se ha esquematizado lo expuesto sobre una curva de ejemplo tensión-deformación.

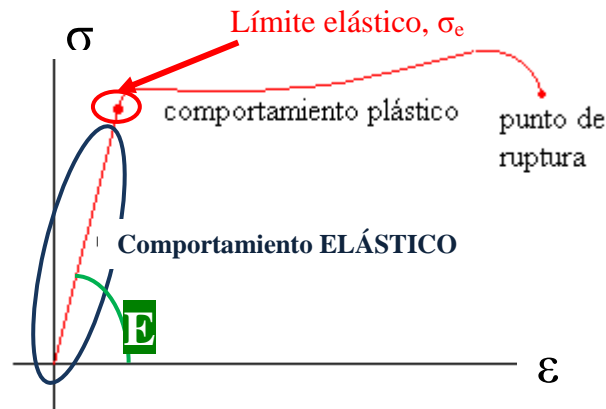


Figura 4.11: Diagrama de ejemplo de la curva tensión-deformación

4.4.- CONDICIONES DE CONTORNO Y CASOS DE CARGA

En este punto van a describirse tanto el conjunto de solicitaciones a aplicar en el chasis del semirremolque para basculantes así como las condiciones de contorno aplicadas consideradas en la misma.

4.4.1.- CONDICIONES DE CONTORNO

En cuanto a las condiciones de contorno ya se ha comentado antes que son fundamentalmente dos: la unión del King-Pin con la quinta rueda y el sistema de arriostramiento que existe en cada eje. Se puede observar la *figura 4.12* en la que aparecen estos además de la carga a la que está sometido (y que se explicará en detalle en el siguiente apartado).

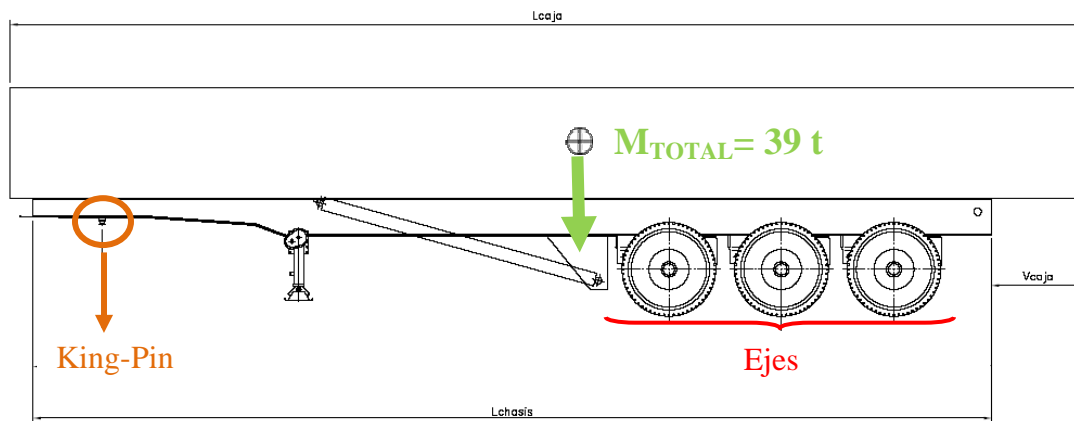


Figura 4.12: Ilustración de las condiciones de contorno y cargas.

En ambos casos, se podría hacer una simplificación: apoyos puntuales para las ruedas y un empotramiento para la unión entre el King-Pin y el semirremolque, pero el problema es que al hacer esto en los modelos quedan unas concentraciones de tensiones que en la realidad no existen. También hay que sumar a esto que el sistema de suspensión de un semirremolque varía en altura en relación con el peso que se le carga gracias a los Diapress que llevan los ejes, sin contar el efecto de las ballestas y el amortiguador.

Teniendo en cuenta esta situación se modela y aproxima al funcionamiento que aporta las ballestas y los amortiguadores a cada rueda como un muelle de una rigidez determinada (k_1), como se puede observar en la figura 4.13. Además gracias al comportamiento elástico del muelle también se modifica la posición del chasis con el peso, como ocurre con el sistema de suspensión al completo descrito en el párrafo anterior.

En cuanto a los otros muelles que aparecen en la figura 4.13 con rigidez (k_2) se tratan de los que modelan a los Diapress que actúan con cada rueda, siendo el conjunto de ambos lo que modela el sistema de arriostramiento al completo. Hacer notar que la constante de rigidez de los Diapress, para acercar al modelo a la realidad se modela mediante una curva que no es lineal.

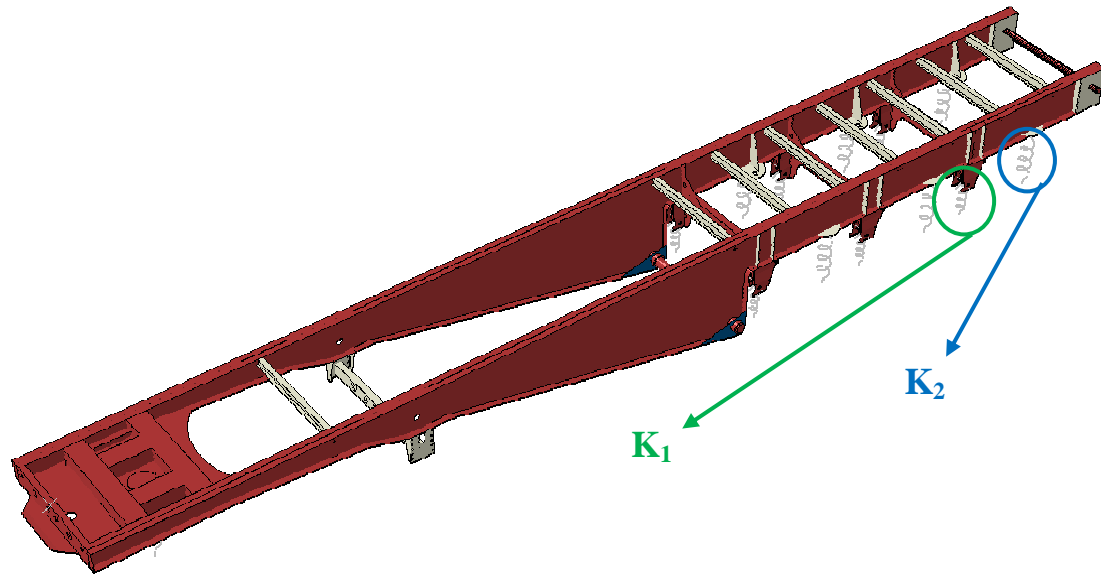


Figura 4.13: Condiciones de contorno de los ejes

Para la aplicación de los muelles de rigidez k_1 , se han aplicado en nodos de referencia, que están en mitad de los bulones rígidos pertenecientes a los soportes de los ejes. En proyectos anteriores al presente se estudió la posibilidad de aplicarlas uniformemente distribuidas en los nodos pertenecientes a los extremos de los bulones pero, los resultados obtenidos de una forma u otra son muy similares por lo que la primera forma ahora para estas situaciones se aplica así (ya que es más sencillo aplicar las cargas sobre un único nodo que distribuir las entre varios). Estos bulones rígidos van encajados a los soportes de las ruedas y mediante estos se transmiten las condiciones de contorno al modelo.

En la siguiente figura se muestra un detalle de la ubicación de uno de los bulones rígidos de un soporte indicando la posición del nodo de referencia elegido.

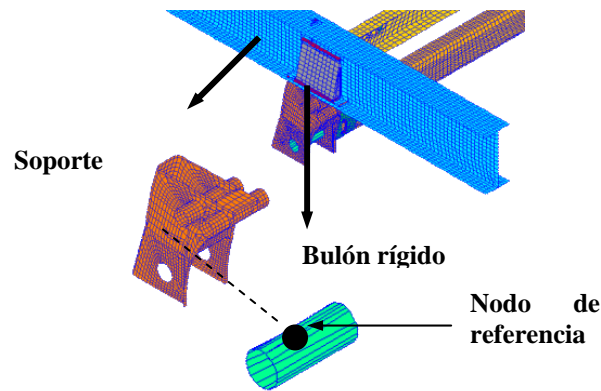


Figura 4.14: Situación del bulón rígido y nodo de aplicación de cargas.

La aplicación de los muelles de rigidez k_2 se realiza en unos nodos de referencia del cartabón del Diapress, lo más centrado posible, como simplificación de las acciones que producen estos elementos.

En cuanto al King-Pin, como va unido a la quinta rueda y esta a la cabeza tractora, tiene también una cierta variación de altura y suspensión (ya que la cabeza tractora lo tiene), por tanto se modela mediante un muelle de rigidez K , de valor 2000N/mm^2 . Para relacionar la quinta rueda con el King-pin del semirremolque se utiliza una réplica de la quinta rueda mediante elementos finitos y a la cual se le da una condición de que tenga una rigidez en la vertical. Se consigue de esta manera que no se produzca la concentración de tensiones de la que se ha hablado antes y una aproximación más concreta (si cabe) a la realidad. El acoplamiento de la quinta rueda al semirremolque se puede observar en la figura 4.15.

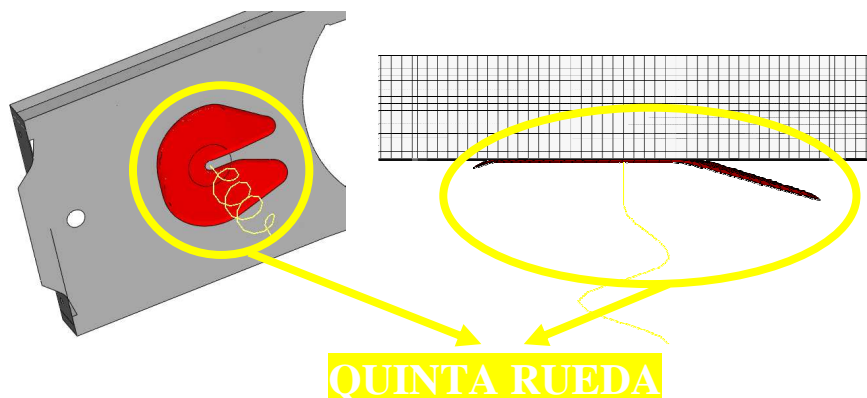


Figura 4.15: Dos vistas de la unión del King-pin con la quinta rueda

Este trabajo de hacer un modelo en elementos finitos que simule cómo apoya el semirremolque en la quinta rueda y la caracterización de su rigidez fue desarrollado hace algún tiempo gracias al grupo de investigación de “vehivial”. Otra característica muy importante a destacar de este modelo de quinta rueda es que se le incorpora la capacidad de cabeceo de valor 15° en el eje transversal y 12° el longitudinal, que es como funciona en la realidad.

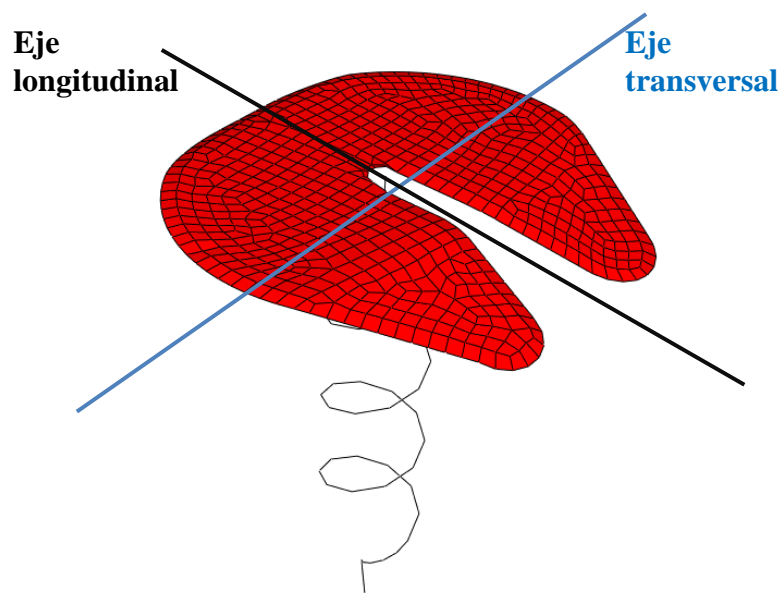


Figura 4.16: Modelo de quinta rueda desarrollado por el grupo “vehivial”

4.4.2.- CASOS DE CARGA

Hay que tener en cuenta que la situación más desfavorable de este tipo de chasis no es en situación normal de circulación, algo que soporta perfectamente, es cuando realiza la operación de bascular, en al cual se transmite toda carga al cilindro (va entre los bulones de los escudos) y al sistema de giro trasero.

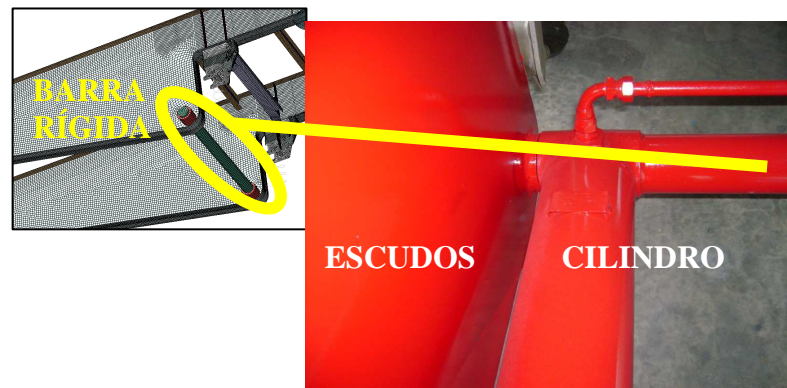


Figura 4.16: Barra rígida real y modelada con EE.FF.

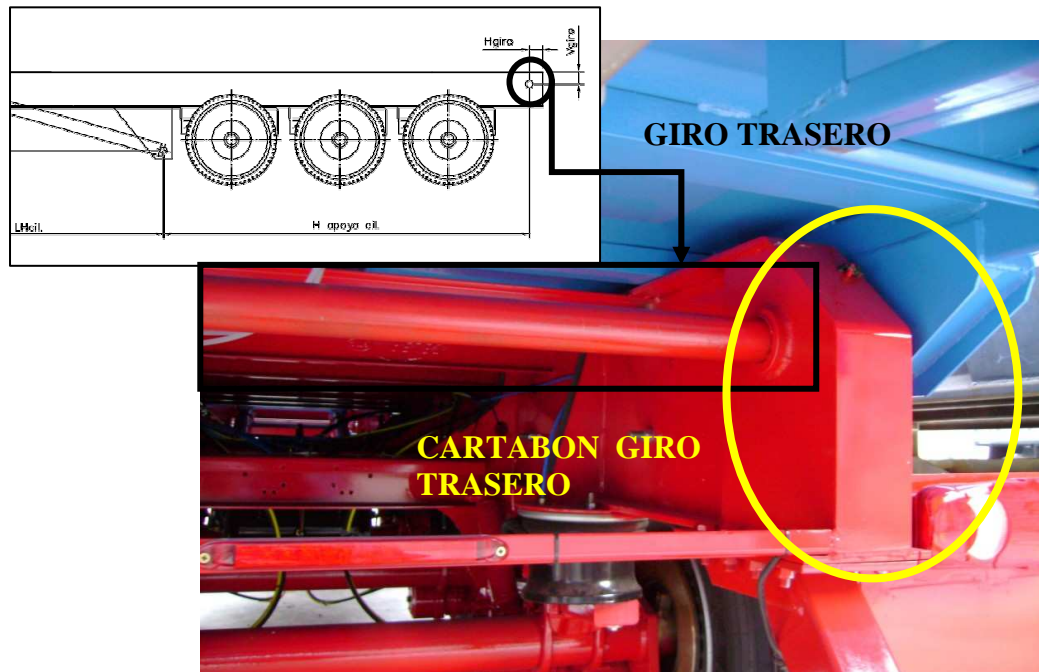


Figura 4.17:Detalle de la posición y foto del sistema de anclaje trasero.

Por tanto, la única acción que se puede considerar es la acción de la masa del basculante cargado. La masa máxima que puede llevar este tipo de semirremolques es de 35 toneladas que se supone como uniformemente distribuida a lo largo de todo el basculante. Se puede observar que en la *figura 4.11* se ha puesto el valor de la carga de 39 toneladas en vez de las 35 toneladas nombradas, esto se debe a que se multiplica el valor de la capacidad máxima del basculante por un coeficiente de 1,3 y así recoger en el cálculo estructural (que es el que se lleva a cabo en este proyecto) las posibles acciones dinámicas del comienzo de recorrido de los pistones, ya que en ese instante de

comienzo de carrera se sabe que llevan una pequeña aceleración y que luego ya sí que trabajan a velocidad constante.

$$M_{\text{CALCULO}} = M_{\text{máx. Basculante}} * \text{Coeficiente de mayoración} = 35 \text{ t} * 1,3 = 39 \text{ t}$$

En cuanto a la modelización por el M.E.F no se hace un basculante como tal, sino que se hace una lámina de la misma anchura y longitud y a esos elementos se les da la densidad y un espesor de manera que sea una carga distribuida que en su totalidad equivalga a las 39 toneladas.

Después se une al giro trasero y a la barra rígida de los cilindros. La transición entre la plancha que simula el basculante y la barra rígida lo simula un elemento finito de tipo barra al cual se le dan propiedades de rigidez infinita, de manera que su única función es como se ha dicho de elemento de unión, para transmitir la parte de carga que le correspondería al cilindro. Se puede entender que se suponen totalmente rígidos ya que se trata de elementos comerciales del cual solo interesa que eleve el basculante y, en relación a este proyecto, que transmita reacciones entre el basculante y la barra de giro de los cilindros.

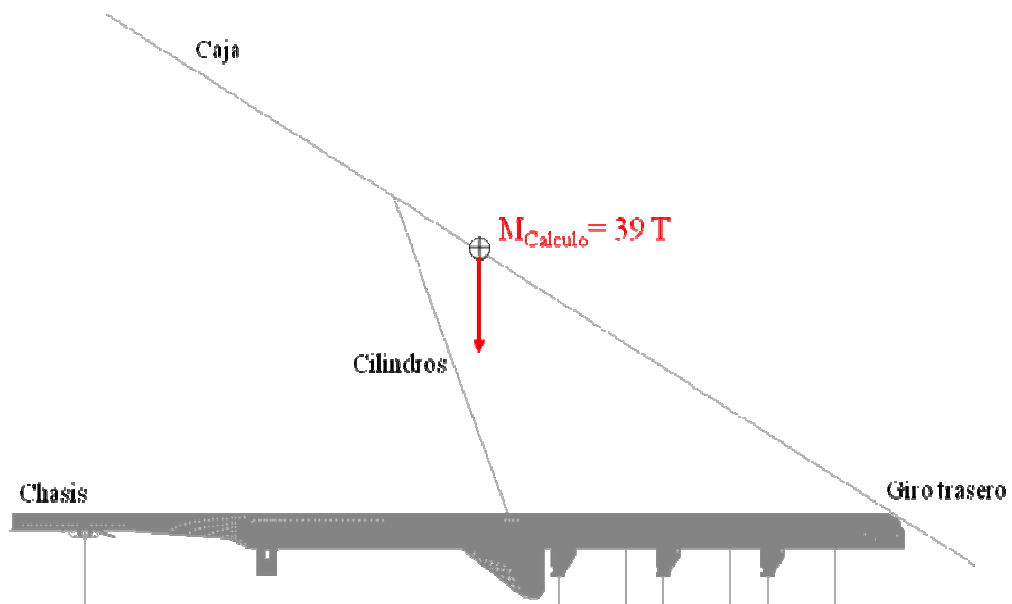


Figura 4.18: Modelo de EE.FF. del chasis con la simplificación del basculante

En la *figura 4.18* aparecen todos los elementos con los nombres reales en una posición cualquiera en la acción de bascular. No olvidar que se les ha colocado el nombre que reciben en la realidad pero todos ellos están modelados en Patran (que se ha explicado anteriormente), pudiéndose incluso apreciar el elemento tipo barra que simula el cilindro.

Como se explicó en el punto 4.1 sobre el método de los elementos finitos, todo esto ha sido realizado mediante el módulo de preproceso Patran cuyo resultado final ha sido la obtención de un fichero de texto (input) en el cual quedan definidas todas las variables y demás condiciones del cálculo.

Este fichero será el que deberá ser calculado con el programa de cálculo mediante elementos finitos Abaqus una vez comprobado. En este caso el tipo de cálculo realizado va a ser de tipo estático. Como resultado final al proceso de cálculo van a obtenerse una serie de ficheros de texto. Quizás el más importante es el que tiene extensión *.res en el cual se recoge todo lo relativo al modelo de elementos finitos así como los resultados obtenidos para cada caso analizado. La interpretación de dicho fichero se realizará mediante el módulo de post proceso Abaqus viewer.

4.5.- EVOLUCIÓN DEL PROYECTO Y REPLANTEO DE UNOS COMPONENTES DEL CHASIS

Llegados a este punto, se plantea un giro inesperado en el proyecto: se deben eliminar los escudos del modelo inicial que se va a meter a cálculo. Véase la *figura 4.19* para entender que elementos desaparecen y cómo queda antes de entrar al cálculo.

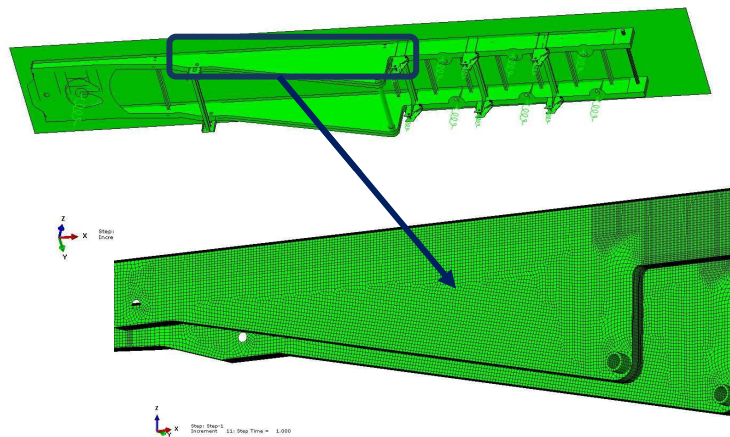


Figura 4.19: Ilustración de cómo queda el modelo inicial antes del cálculo

Esta modificación no es aleatoria, la justificación se debe a que se está desarrollando en paralelo a este proyecto otros que tiene relación con chasis de Leciñena, en concreto uno de un chasis de semirremolque para basculantes pero fabricado en aluminio y que tiene una configuración muy similar al presente proyecto. En el citado se observa que los escudos no tiene un compromiso elevado de tensiones, es decir, se puede prescindir de ellos, por tanto se toma la decisión de no tenerlos en cuenta para este cálculo (evidentemente se hubiera llegar a la misma conclusión si se hubiera hecho con escudos: que se pueden quitar).

En resumen, el modelo inicial de cálculo será el mismo que se ha presentado en los puntos anteriores salvo que se eliminan los escudos, por tanto todo el trabajo previo es válido con la diferencia de una pequeña modificación que como se ha insistido solo consiste en borrar unos elementos que no tienen una función estructural a tener en cuenta.

4.6.- RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL CHASIS DE SEMIRREMOLQUE PARA BASCULANTES.

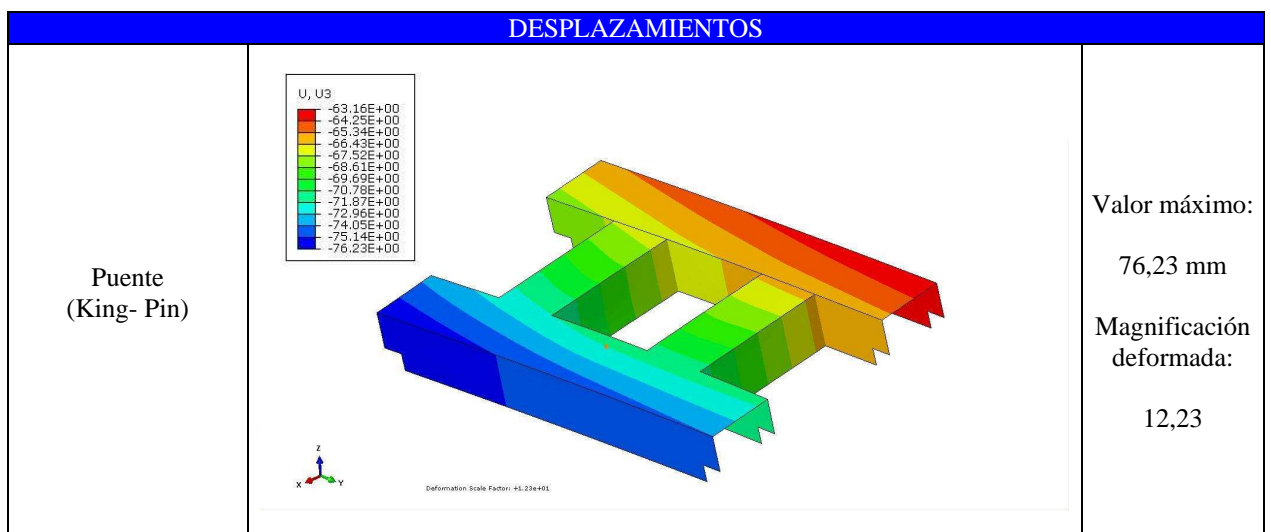
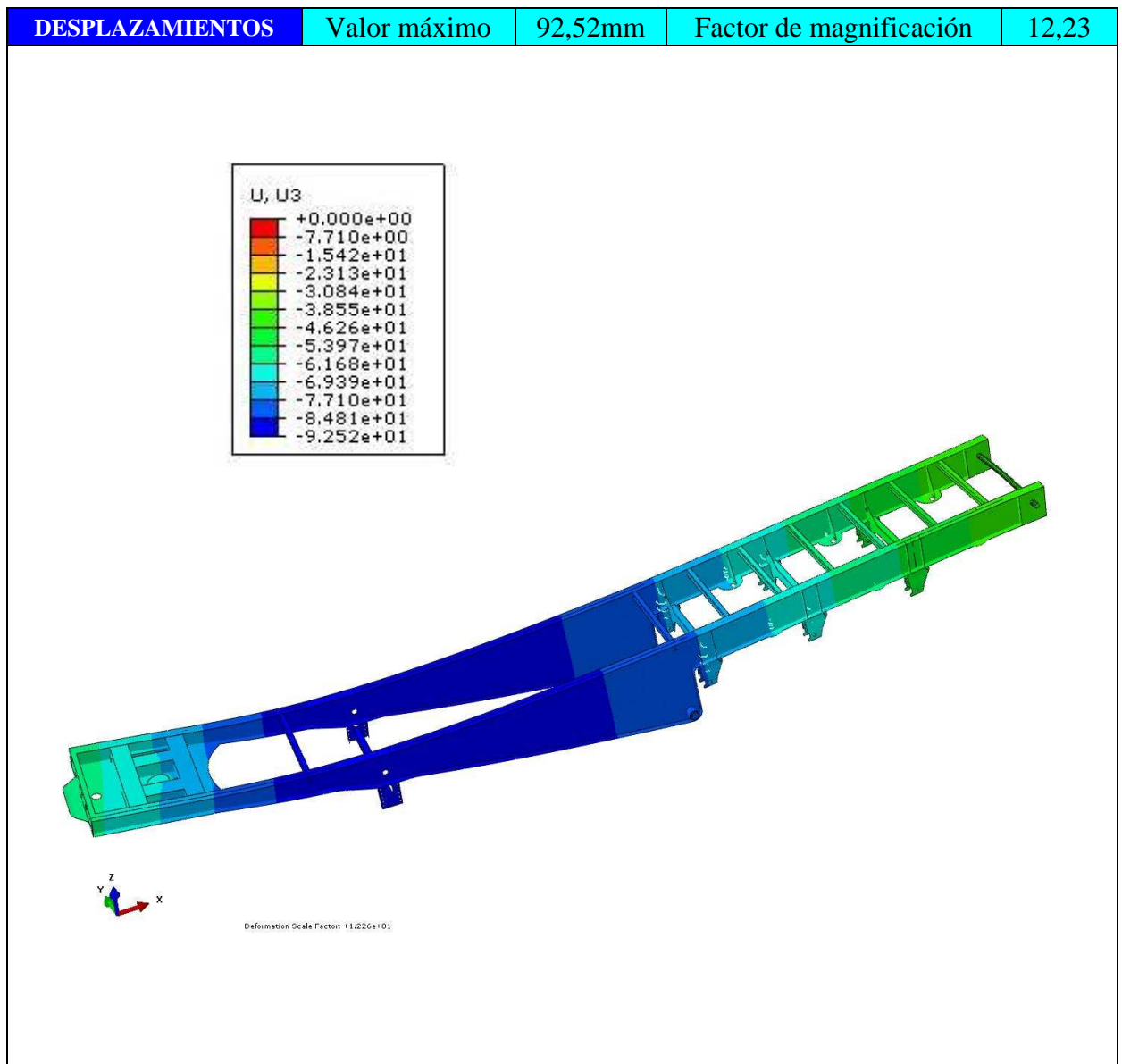
En este punto van a mostrarse los resultados obtenidos para modelo inicial del chasis de semirremolque para basculantes que Leciñena, incluyendo las últimas modificaciones citadas anteriormente, las debidas a los estudios que se llevan a cabo. Como ya se comentó, los resultados van a representarse mediante la utilización del módulo de post proceso Abaqus Viewer, mediante el cual se pueden obtener, entre

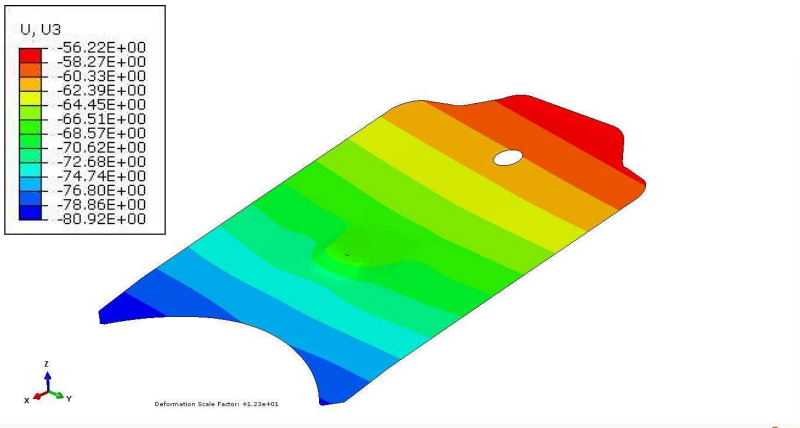
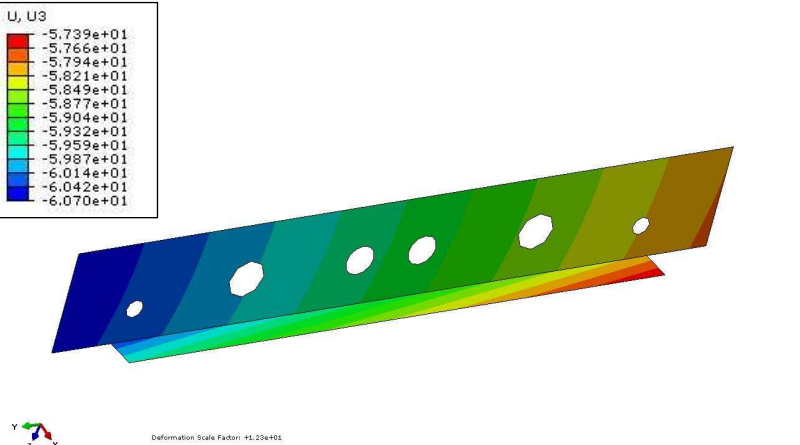
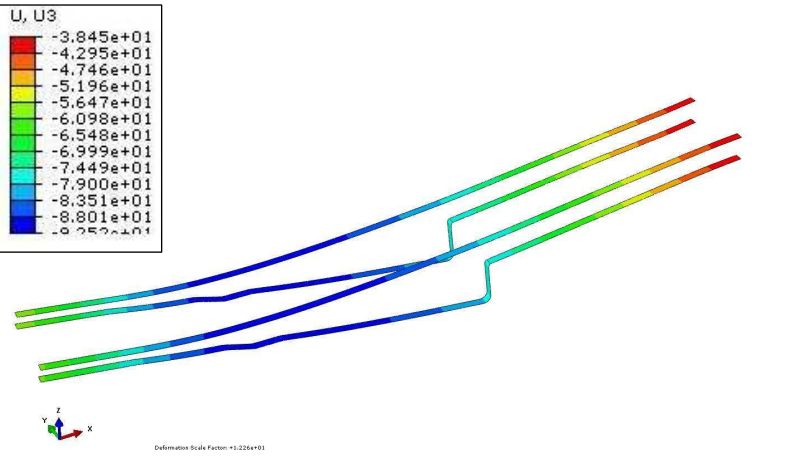
otros, deformadas de la estructura, valores y mapas de tensión (en este caso se utilizará la tensión equivalente de Von Mises) y mapas de deformación plástica (en los casos en que se produzca).

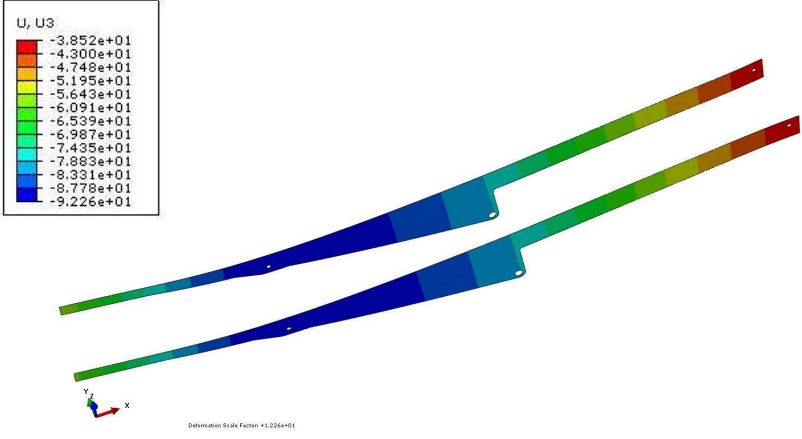
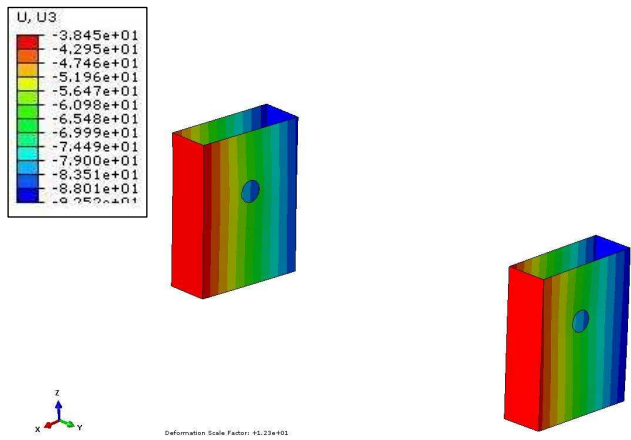
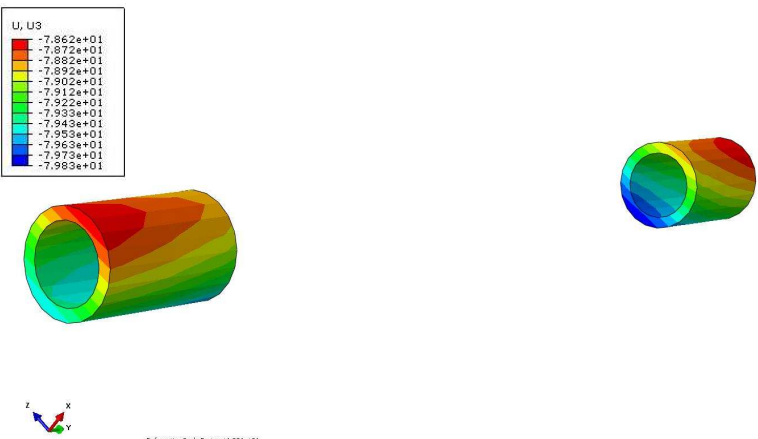
Posteriormente, se realizará un análisis comparativo entre los resultados obtenidos para este modelo.

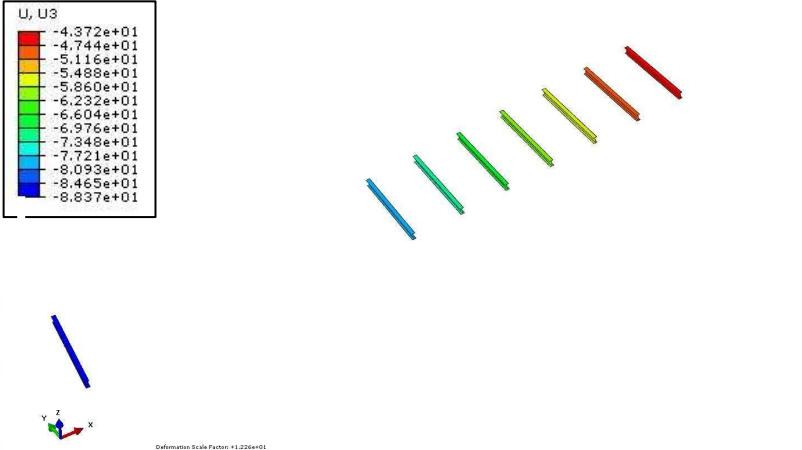
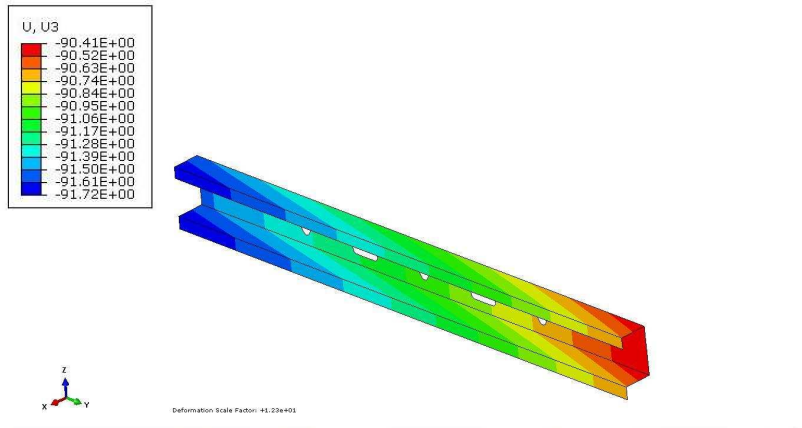
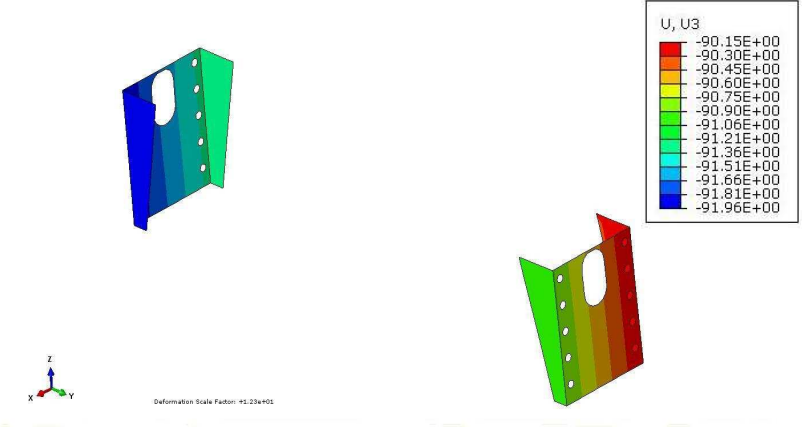
A continuación van a presentarse en forma de tabla los resultados obtenidos ,en concreto, va a obtenerse la deformada de la estructura global, mapas de tensión equivalente de Von Mises del modelo global así como de cada uno de los componentes que lo forman.

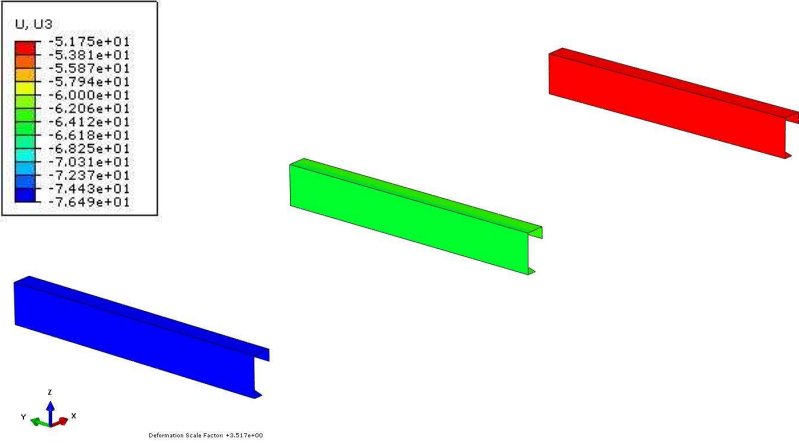
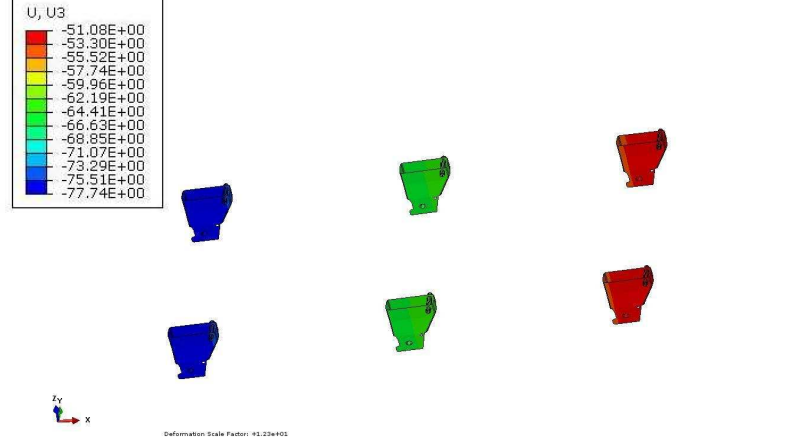
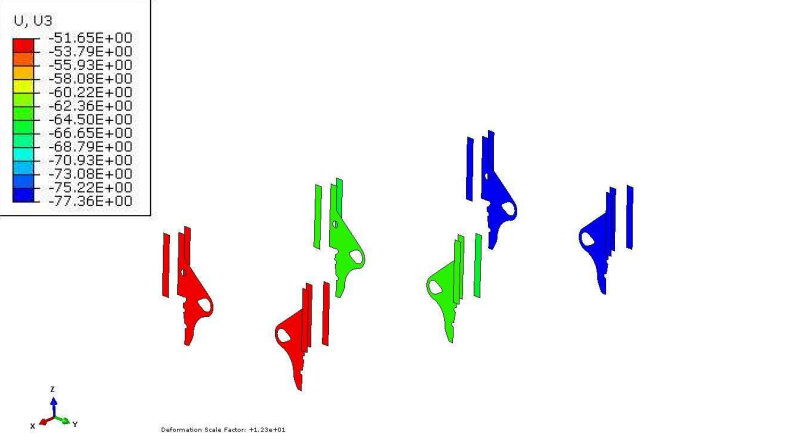
Según el sistema de unidades utilizado en las dimensiones del modelo así como el utilizado en la definición de las propiedades de los distintos materiales, los resultados se expresan en las siguientes unidades: la deformada de la estructura es expresada en milímetros, los valores de tensión en MPa.

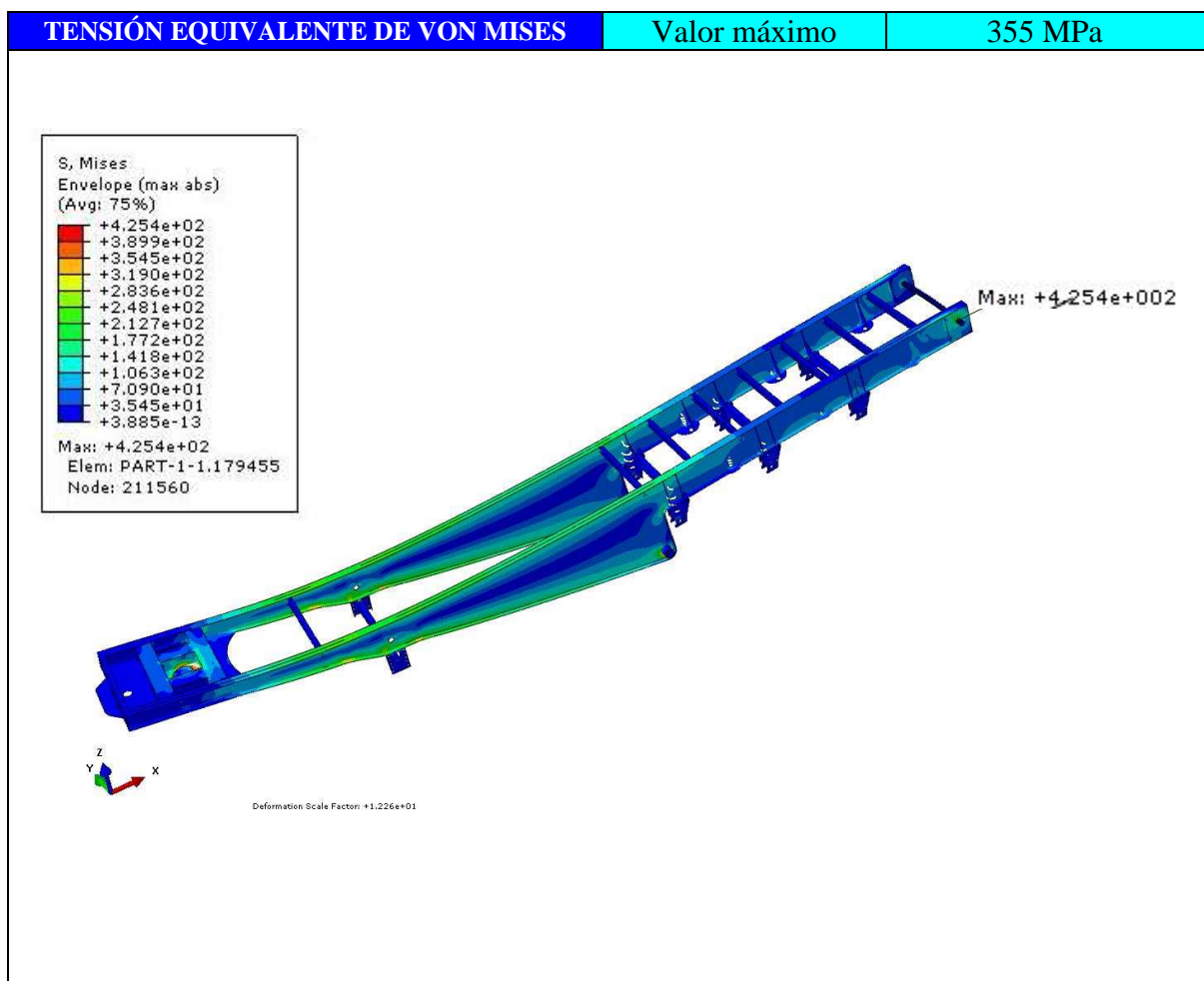
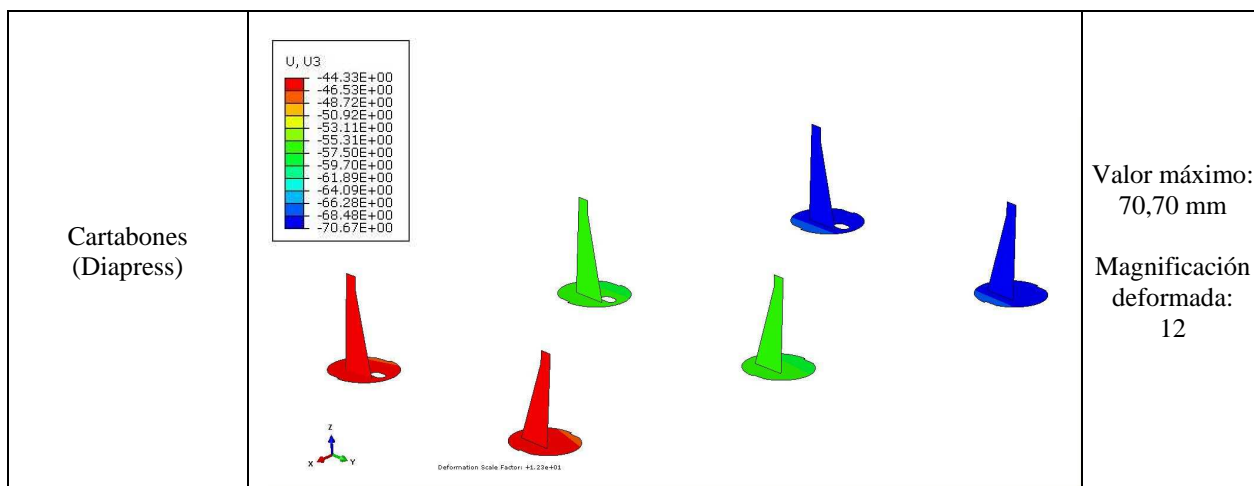


<p>Chapas de deslizamiento (King – pin)</p>		<p>Valor máximo: 80,92 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,2</p>
<p>Banda de cierre delantera (King-pin)</p>		<p>Valor máximo: 60,70 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Ala superior e inferior de los largueros</p>		<p>Valor máximo: 92,52 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>

<p>Alma largueros</p>		<p>Valor máximo: 92,26 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Cartabones del giro trasero</p>		<p>Valor máximo: 41,31 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Bulones escudos</p>		<p>Valor máximo: 79,83 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>

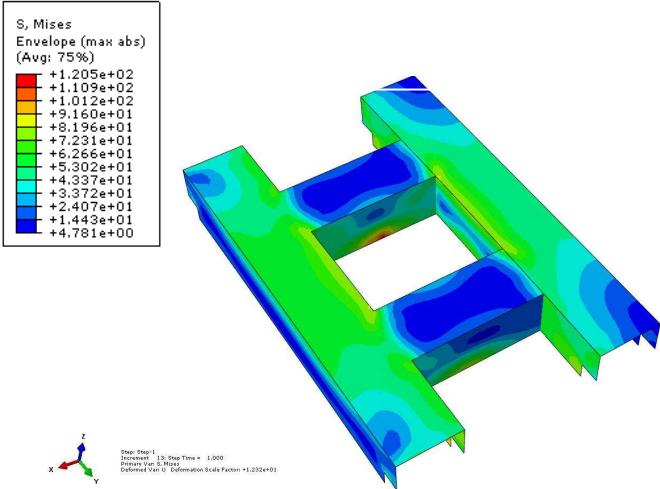
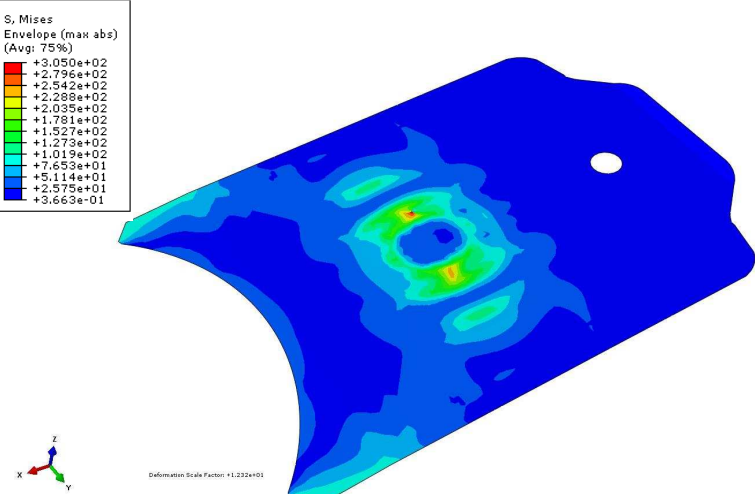
<p>Travesaños</p>		<p>Valor máximo: 88,37 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Travesaño de los pies de apoyo</p>		<p>Valor máximo: 91,72 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Soportes pies de apoyo</p>		<p>Valor máximo: 91,96 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>

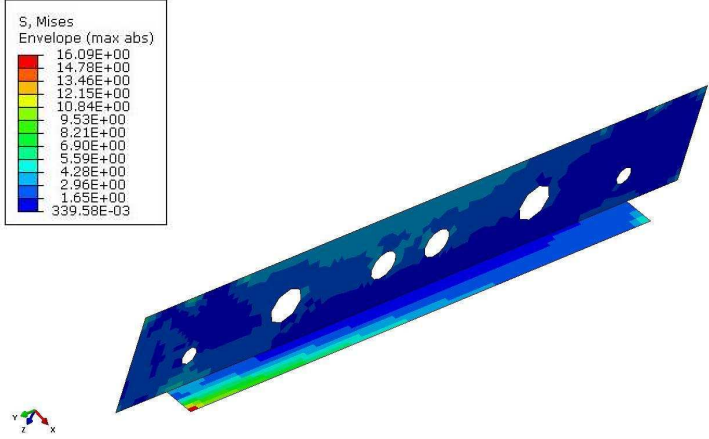
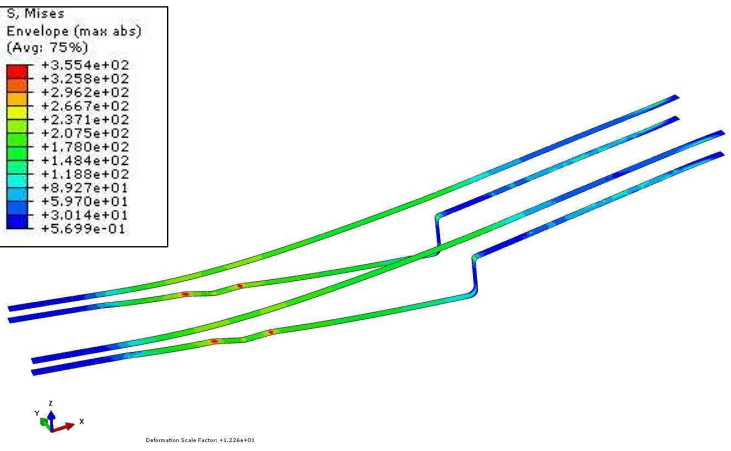
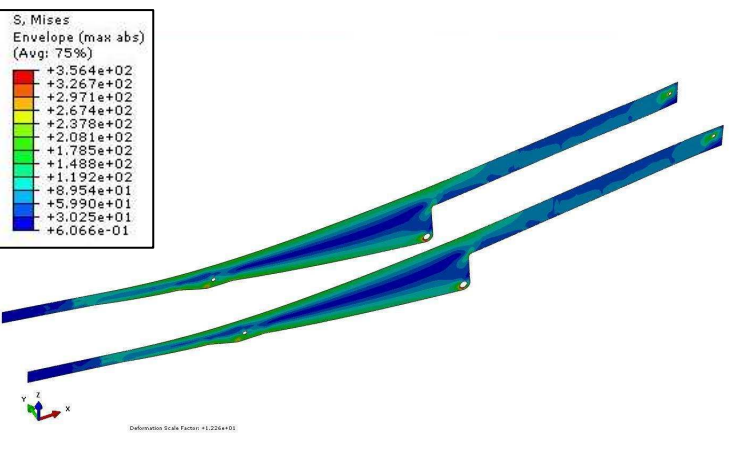
<p>Travesaños (soportes ruedas)</p>		<p>Valor máximo: 76,49 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Soportes ruedas</p>		<p>Valor máximo: 77,74 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Cartabones (Soporte ruedas)</p>		<p>Valor máximo: 77,36mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>

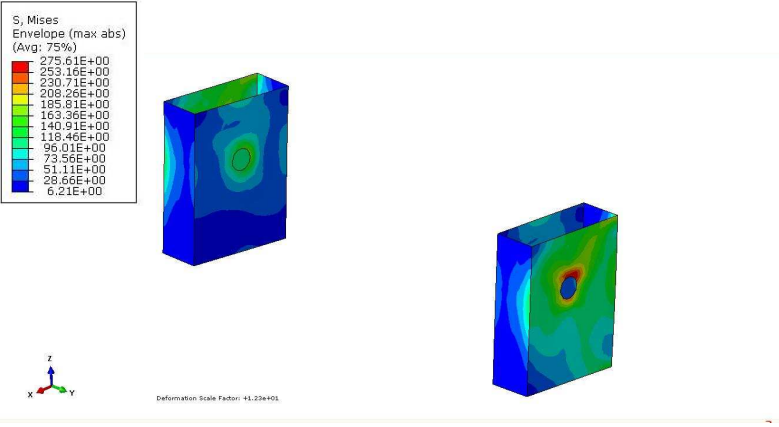
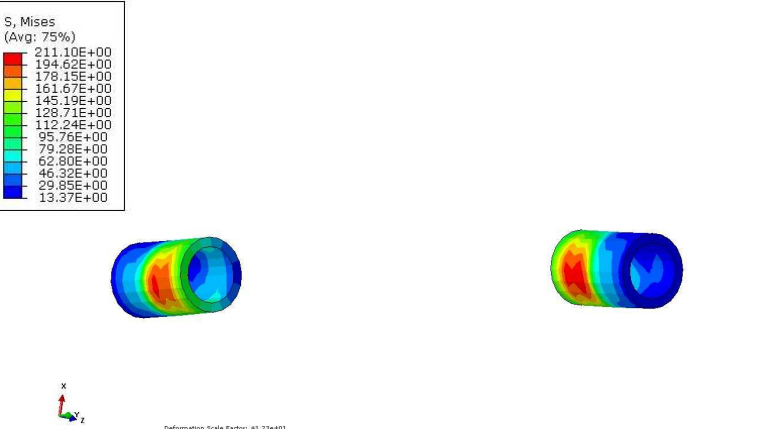
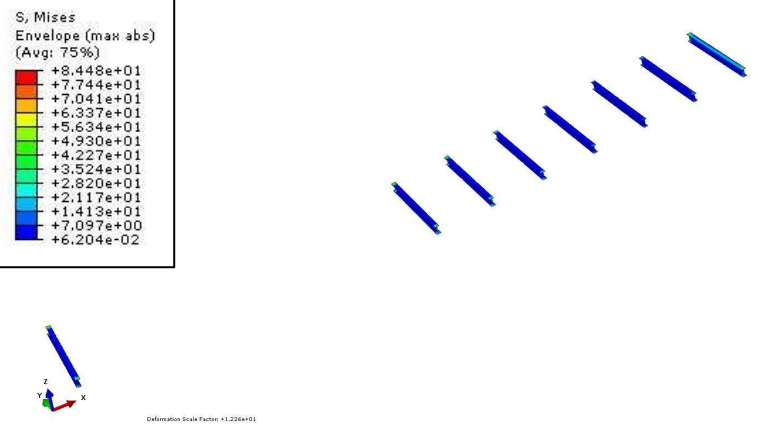


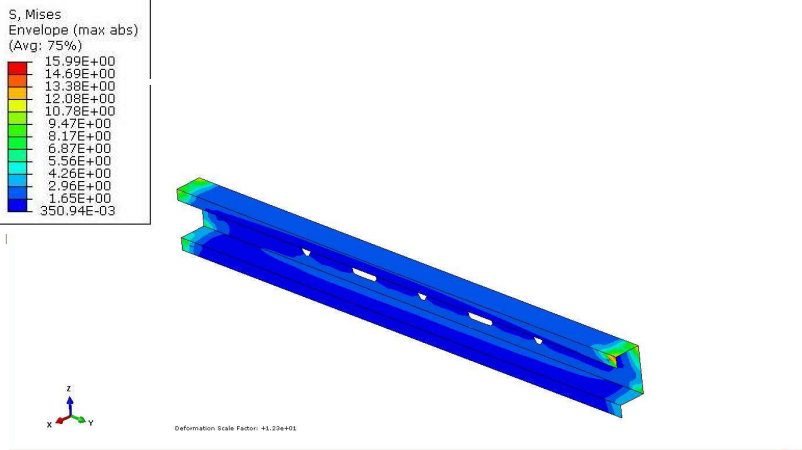
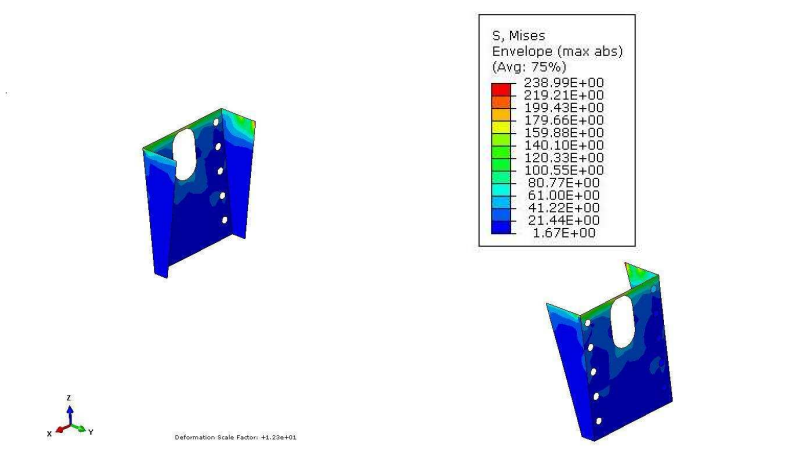
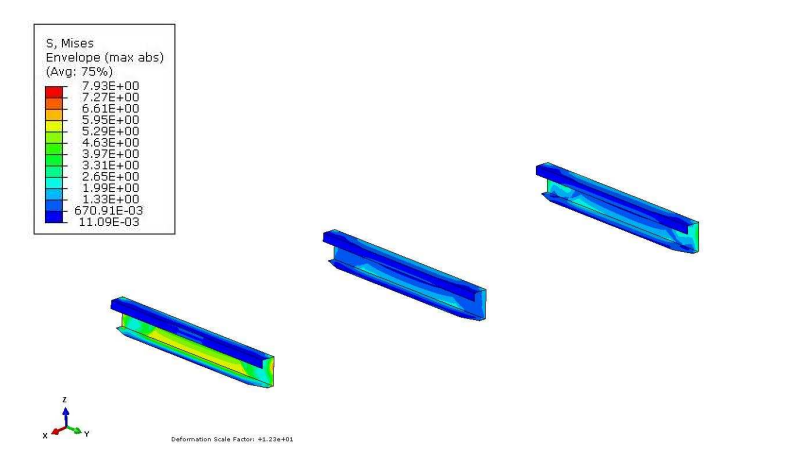
Hacer notar que la tensión de 425 MPa se debe a un elemento en concreto que ha sacado ese máximo, no una zona, por tanto a la hora de interpretar los resultados no se debe de considerar, ya que no se puede considerar si quiera una concentración de tensión, sino un pico.

Analizando con Abaqus Viewer se pueden determinar las zonas de máximas tensiones reales que se concentran fundamentalmente en el cambio de sección de los largueros y en los bulones escudos, descontando la zona de chapa de deslizamiento en la zona de King- Pin, que también ocurre lo mismo. Esto se desarrolla de manera más particular en la siguiente tabla donde se presentan todos los componentes del semirremolque con sus respectivos mapas de tensiones y máximos de los mismos.

TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES		
Puente (King- Pin)	 <p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +1.205e+02 +1.109e+02 +1.012e+02 +9.160e+01 +8.196e+01 +7.231e+01 +6.266e+01 +5.302e+01 +4.337e+01 +3.372e+01 +2.407e+01 +1.443e+01 +4.781e+00 <p>Step: Step 1 Increment: 15, Step Time = 1.000 Element Type: S, Mises Deformed (Von U) Deformation Scale Factor = 1.222e+01</p>	Valor máximo: 121 MPa:
Chapas de deslizamiento (King-Pin)	 <p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +3.050e+02 +2.796e+02 +2.542e+02 +2.288e+02 +2.035e+02 +1.781e+02 +1.527e+02 +1.273e+02 +1.019e+02 +7.653e+01 +5.114e+01 +2.575e+01 +3.663e+01 <p>Deformation Scale Factor = 1.222e+01</p>	Valor máximo: 305 MPa

<p>Banda de cierre delantera (King-Pin)</p>		<p>Valor máximo: 16 MPa</p>
<p>Ala superior e inferior de los largueros</p>		<p>Valor máximo: 355 MPa</p>
<p>Alma largueros</p>		<p>Valor máximo: 356 MPa</p>

<p>Cartabones del giro trasero</p>		<p>Valor máximo: 275 MPa</p>
<p>Bulones escudos</p>		<p>Valor máximo: 211 MPa</p>
<p>Travesaños</p>		<p>Valor máximo: 84 MPa</p>

<p>Travesaño (pies de apoyo)</p>	 <p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> 15.99E+00 14.69E+00 13.38E+00 12.08E+00 10.78E+00 9.47E+00 8.17E+00 6.87E+00 5.56E+00 4.26E+00 2.96E+00 1.65E+00 350.94E-03 <p>Deformation Scale Factor: 41.23e+01</p>	<p>Valor máximo: 16 MPa</p>
<p>Soportes pies de apoyo</p>	 <p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> 238.99E+00 219.21E+00 199.43E+00 179.66E+00 159.88E+00 140.10E+00 120.33E+00 100.55E+00 80.77E+00 61.00E+00 41.22E+00 21.44E+00 1.67E+00 <p>Deformation Scale Factor: 41.23e+01</p>	<p>Valor máximo: 239 MPa</p>
<p>Travesaños (soportes ruedas)</p>	 <p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> 7.93E+00 7.27E+00 6.61E+00 5.95E+00 5.29E+00 4.63E+00 3.97E+00 3.31E+00 2.65E+00 1.99E+00 1.33E+00 670.91E-03 11.09E-03 <p>Deformation Scale Factor: 41.23e+01</p>	<p>Valor máximo: 8 MPa</p>

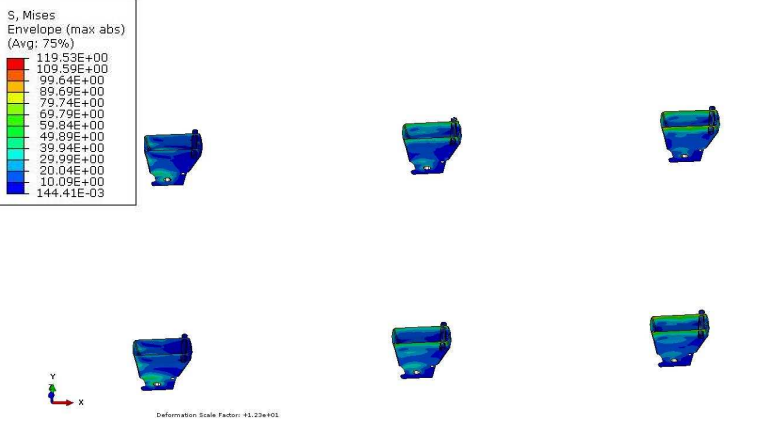
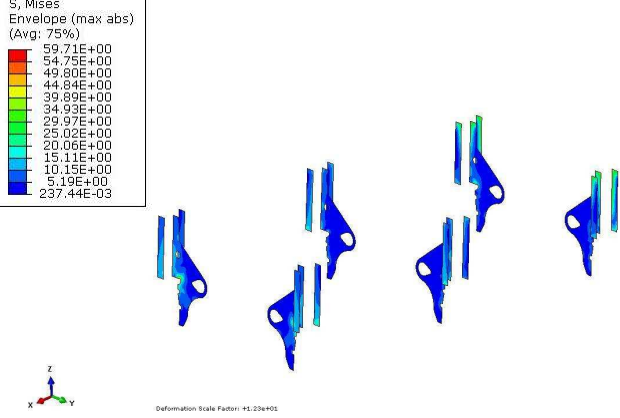
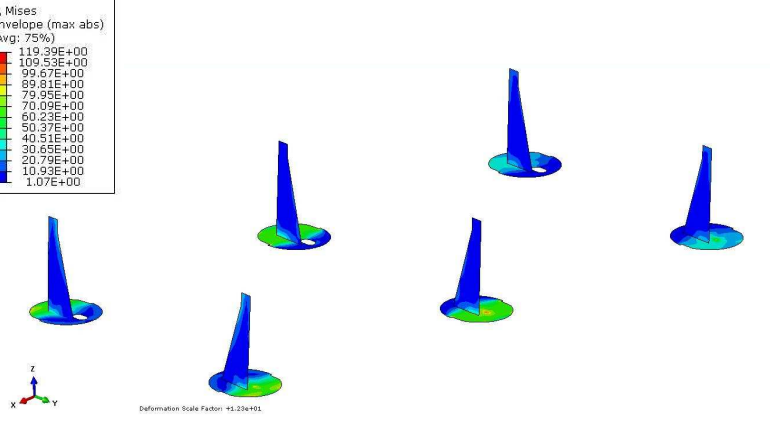
Soportes ruedas	 <p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> 119.53E+00 109.59E+00 99.64E+00 89.69E+00 79.74E+00 69.79E+00 59.84E+00 49.89E+00 39.94E+00 29.99E+00 20.04E+00 10.09E+00 144.41E-03 <p>Deformation Scale Factor: +1.23e+01</p>	Valor máximo: 120 MPa
Cartabones de soportes ruedas	 <p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> 59.71E+00 54.75E+00 49.80E+00 44.84E+00 39.89E+00 34.93E+00 29.97E+00 25.02E+00 20.06E+00 15.11E+00 10.15E+00 5.19E+00 237.44E-03 <p>Deformation Scale Factor: +1.23e+01</p>	Valor máximo: 60 MPa
Cartabones de Diapress	 <p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> 119.39E+00 109.53E+00 99.67E+00 89.81E+00 79.95E+00 70.09E+00 60.23E+00 50.37E+00 40.51E+00 30.65E+00 20.79E+00 10.93E+00 1.07E+00 <p>Deformation Scale Factor: +1.23e+01</p>	Valor máximo: 119 MPa

Tabla 4.2: Resultados obtenidos para el modelo inicial

4.7.- CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS DEL CÁLCULO PRELIMINAR

GRUPO	Modelo inicial		
	0°, 39T		
	Tensión máxima (MPa)	Coefficiente de seguridad	Peso (kg)
Puente (king-pin)	121	2,93	72
Chapas de deslizamiento (King-pin)	305	1,16	99,8
Banda de cierre delantera (King-pin)	16	22,19	10,5
Ala superior e inferior de los largueros	355	1,00	460
Alma largueros	356	1,00	698
Cartabones del Giro trasero	275	1,29	12
Bulones escudos	211	1,68	10
Travesaños	84	3,27	65,2
Travesaños (Pies de Apoyo)	16	17,19	12,6
Soportes pies de apoyo	239	1,15	11,2
Travesaños (soporte Ruedas)	120	44,38	24,1
Soportes ruedas	8	2,96	52,3
Cartabones (soporte ruedas)	60	5,92	50,2
Cartabones (diapress)	119	2,31	14,5

Tabla 4.3: Resumen de resultados del modelo inicial

De este cuadro que se acaba de presentar hay que interpretar y matizar algunos de los resultados obtenidos, los cuales se van a presentar por las agrupaciones que ya se pueden observar en el cuadro mediante los códigos de colores.

Los **largueros** tienen un coeficiente de la unidad debido a unas concentraciones de tensión bien localizadas. En las **alas inferiores y alas superiores** de los largueros, existen en las primeras unas zonas rojas de concentración de tensiones que son las culpables de un coeficiente tan pobre. Estas se dan justo en la zona del

larguero que se produce un cambio de sección, como se puede observar en la *figura 4.20*. En relación a las **almas** también presentan idéntico caso: unas concentraciones de tensiones coincidentes con la unión de los bulones con estas (ver *figura 4.20*).

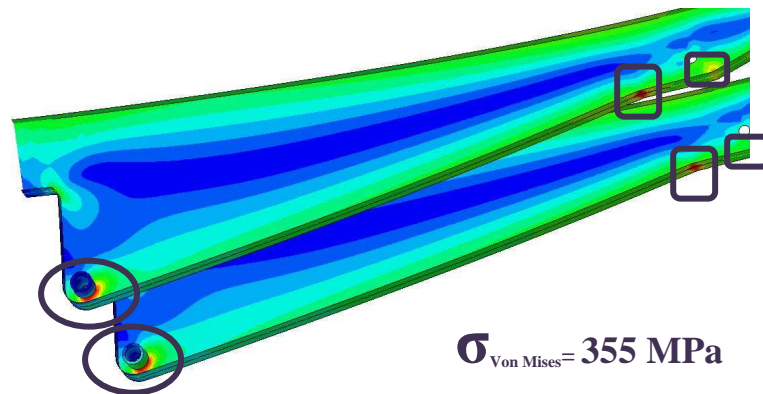


Figura 4.20: Detalle de la localización y del valor de las concentraciones de tensiones en los largueros

Las concentraciones que se producen en las uniones bulones-almas eran “previsibles” porque se han eliminado los escudos. Además hay que tener en cuenta que en esa zona se produce una gran deformación en el eje z, además de 6mm en el x y 1,5 mm en el y, por esto y porque la unión se produce en un espesor de 6mm, que es el que tienen las almas, se puede intuir una situación de inestabilidad o si se quiere incluso se podría clasificar de una unión insegura entre los bulones y las almas de los largueros.

En relación con el resto de elementos que componen la estructura se puede afirmar que su servicio es seguro (todos tienen un coeficiente de seguridad superior a la unidad) y se van a tener en especial consideración para realizar las optimizaciones.

5.- REDISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL MODELO INICIAL

Una vez calculado el modelo inicial y observado cómo se distribuyen sus tensiones y deformaciones, es momento de idear algún elemento o modificación en el semirremolque que modifique el mapa de tensiones, si es posible, a uno más deseable

En relación con los resultados obtenidos las tensiones que interesan rebajar lo máximo posible son las que se producen en los largueros, en concreto en los primeros, por lo motivos expuestos con anterioridad.

5.1.- MODIFICACIÓN 1: CARTABONES DE REFUERZO EN LOS BULONES

Los bulones que reciben a la barra de giro de los cilindros y con ella unas grandes fuerzas debidas a la reacción que le transmiten los cilindros y que provienen del peso del basculante. Estos bulones reciben el nombre a lo largo de la memoria de “bulones escudos” y se debe a que en el modelo inicial iban anclados en los escudos.

En cuanto a los cartabones, son dos chapas de espesor de 8 mm que se cortan de forma que se pueda unir entre el bulón y el ala inferior de los largueros. Véase *figura 5.1*.

La finalidad de esta optimización es que la tensión que ahora se concentra en el alma de los largueros se reparta con el ala inferior mediante estos refuerzos, además la unión alma-refuerzo se vuelve mucho más estable, porque los bulones apoyan en tres puntos: alma y los cartabones (uno por la izquierda y otro por la derecha). Lo único extraño que pueda pasar es que estos cartabones “carguen” en exceso algún elemento del chasis o como la intuición indica lo hagan con el ala inferior y entonces no sean válidos, pero esto no se puede afirmar hasta el cálculo y obtener los resultados correspondientes

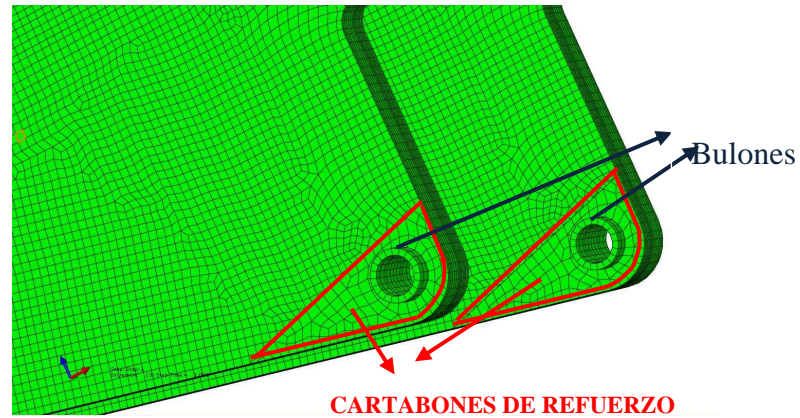
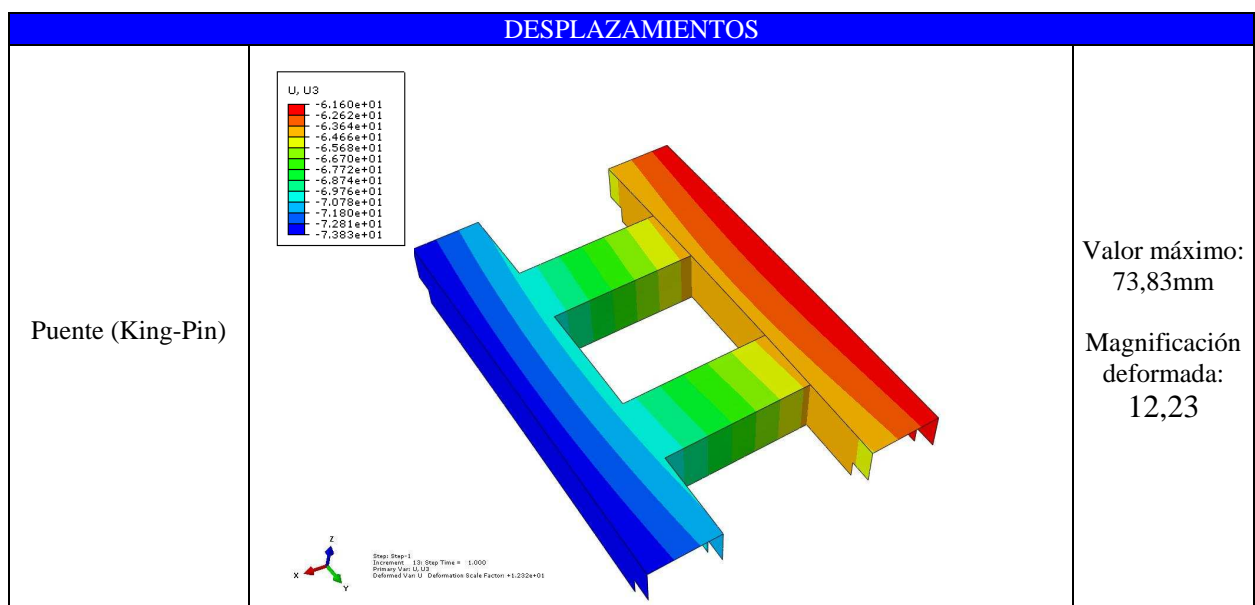
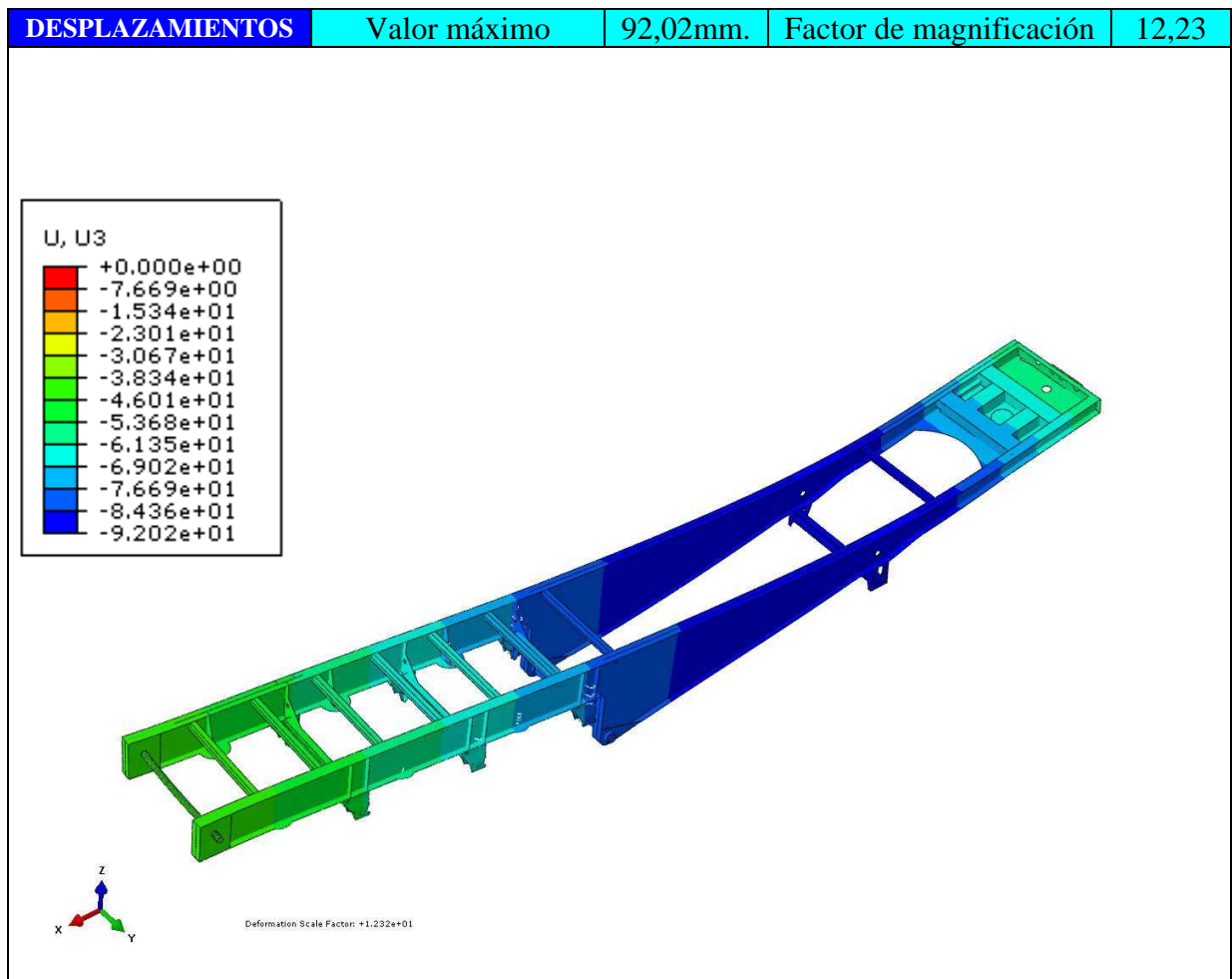
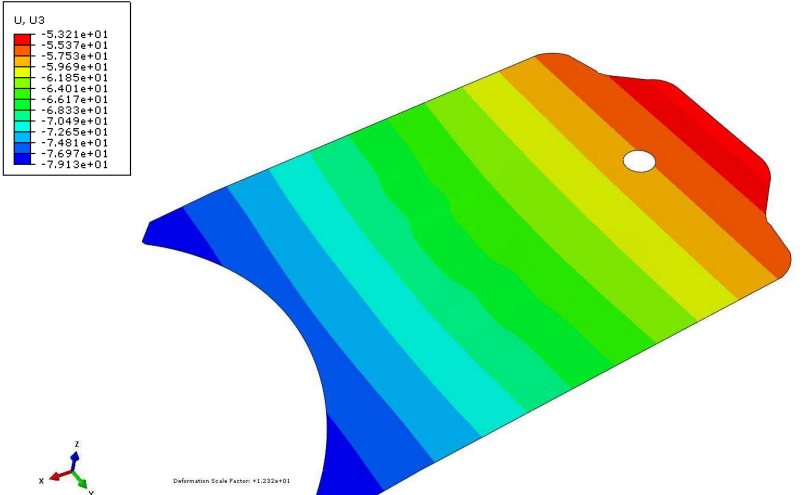
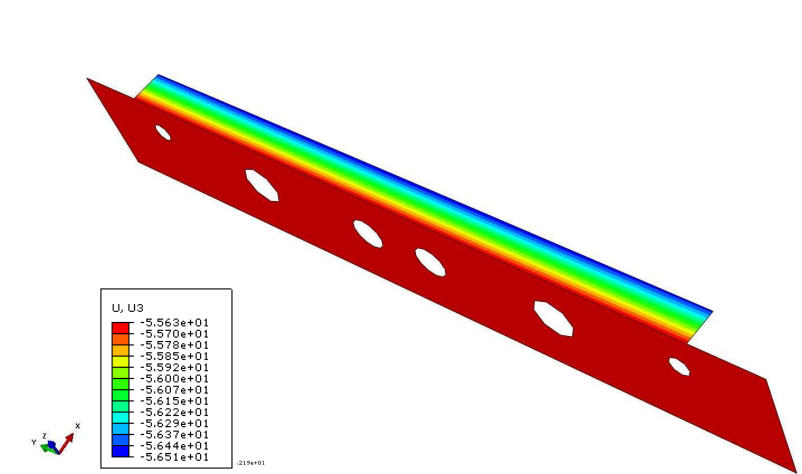
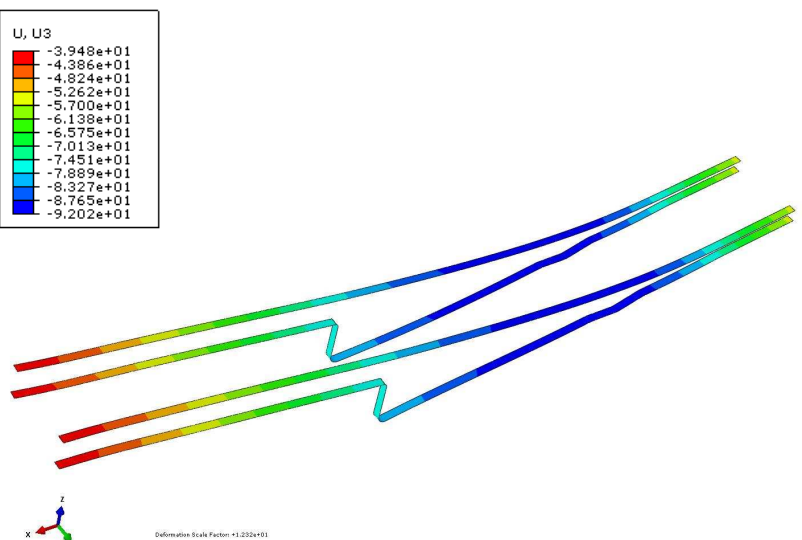
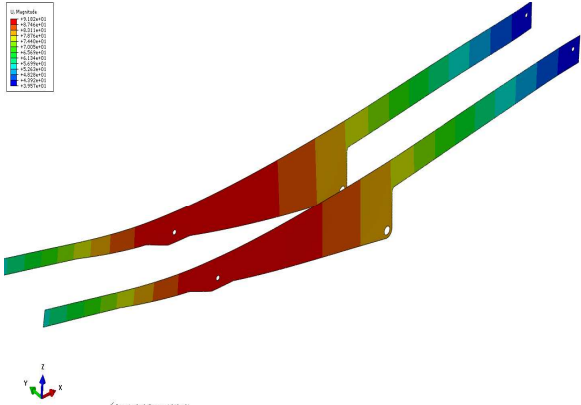
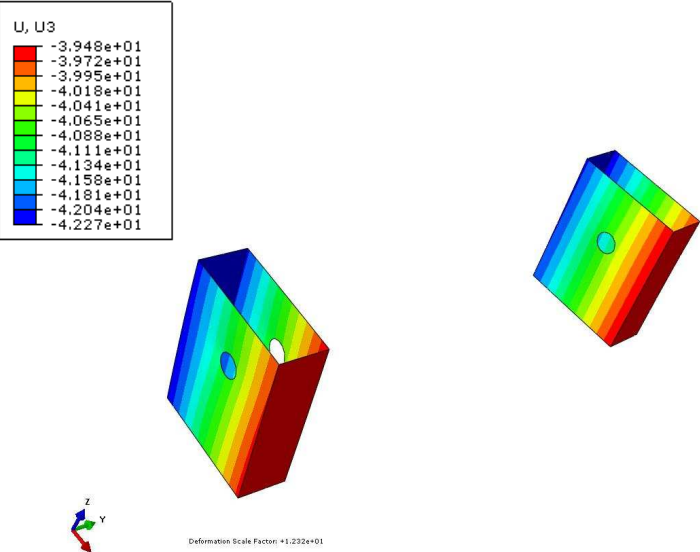
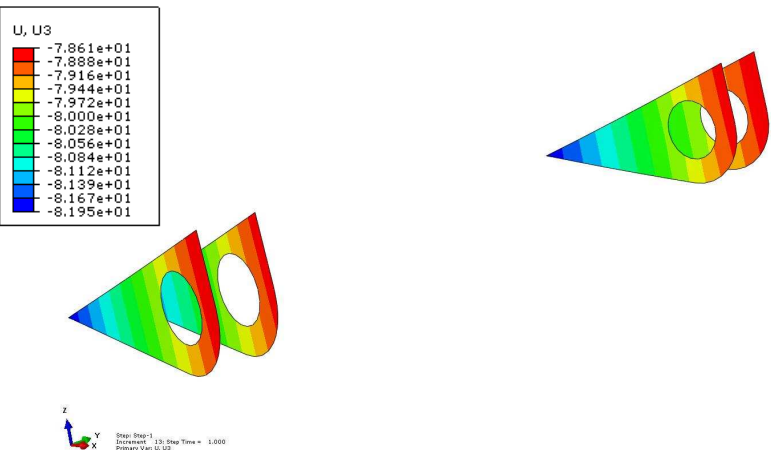


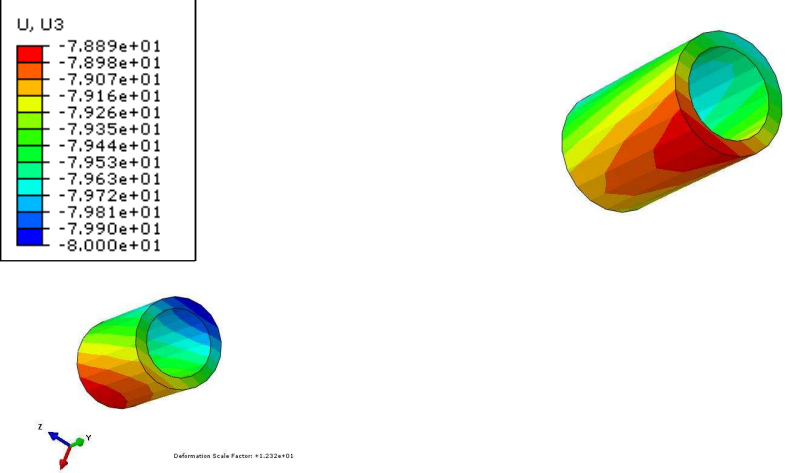
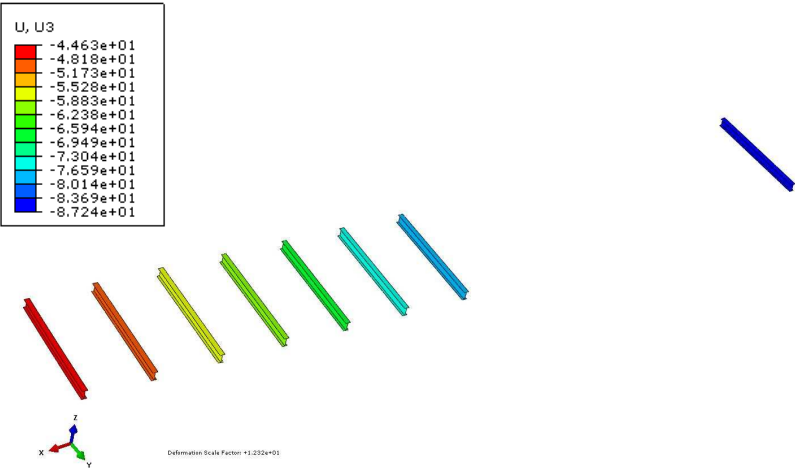
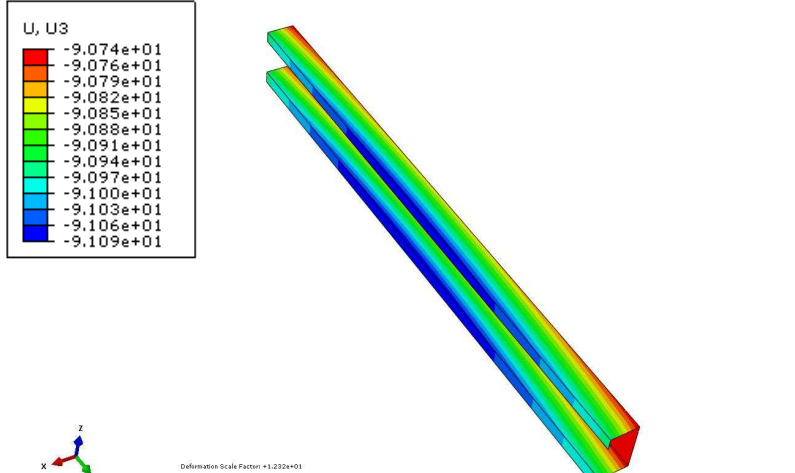
Figura 5.1: Detalle de los cartabones de refuerzo de los bulones

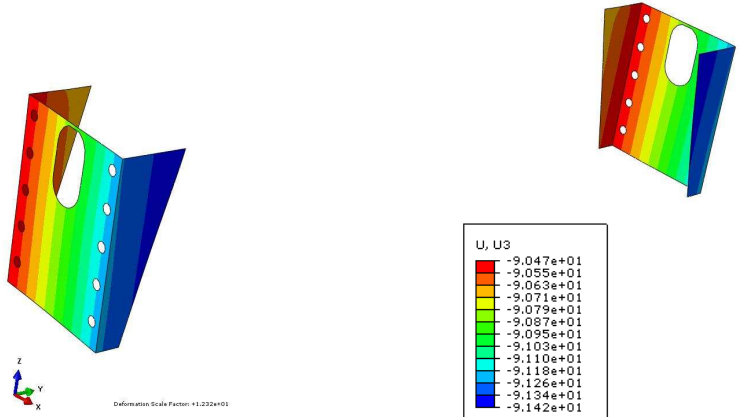
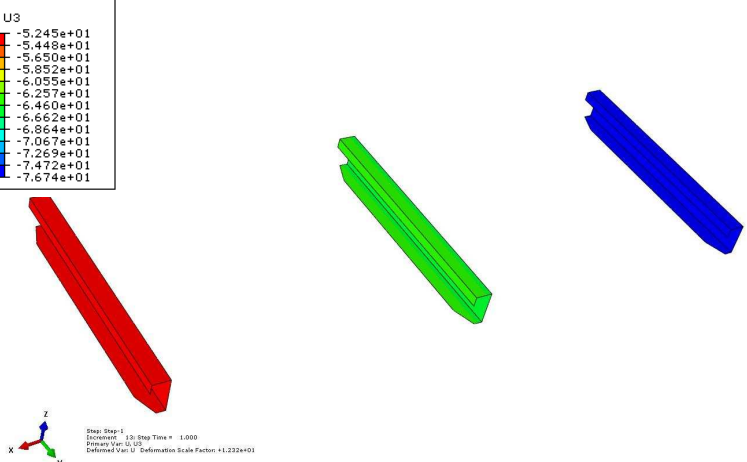
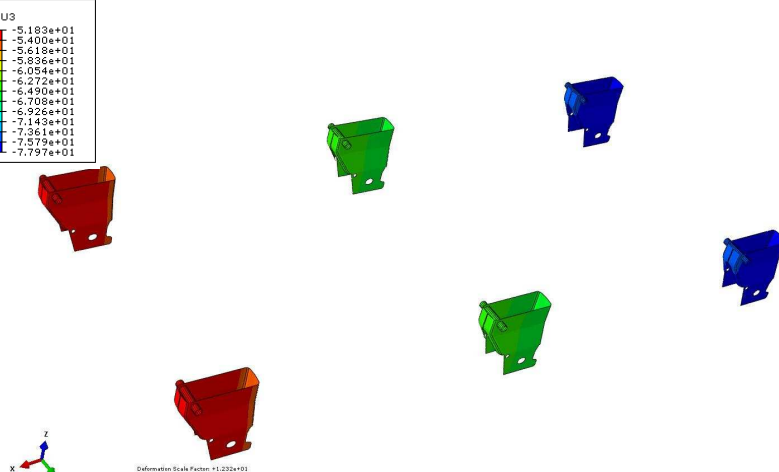
En cuanto a los criterios de resistencia y rigidez se repiten de la misma manera que para el modelo inicial: tensiones en la zona elástica del material (coeficiente de seguridad igual o superior a la unidad) y la deformación que no tiene ninguna restricción por normativa, así que esta última servirá como ayuda para interpretar los resultados obtenidos. El material de estos refuerzos se ha elegido un acero St-52 (equivale a un S-355J0), se trata de un tipo de acero un poco más especial, de manera que facilite la soldabilidad y tenga unas características mecánicas mejoradas.

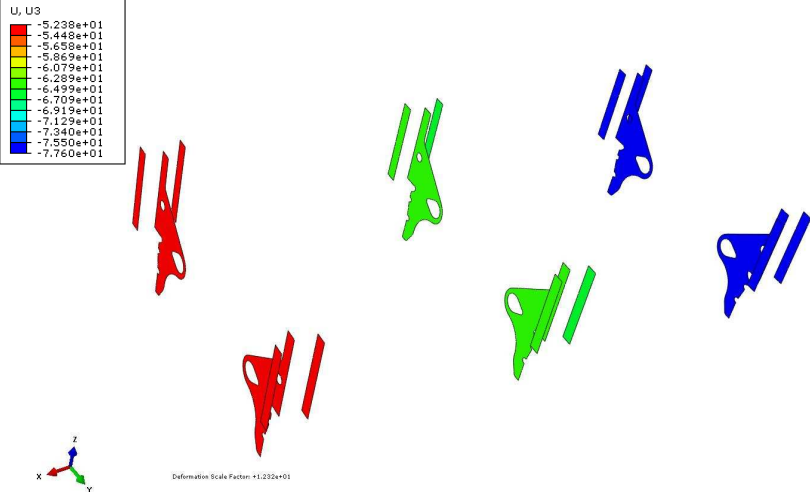
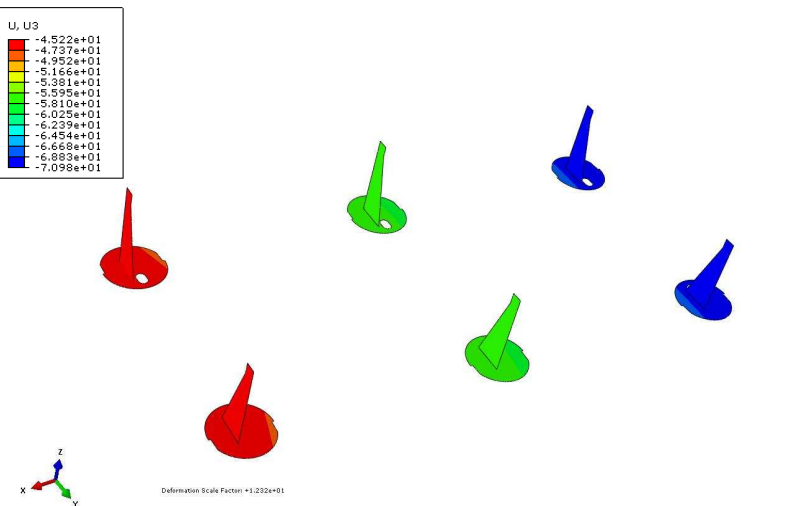


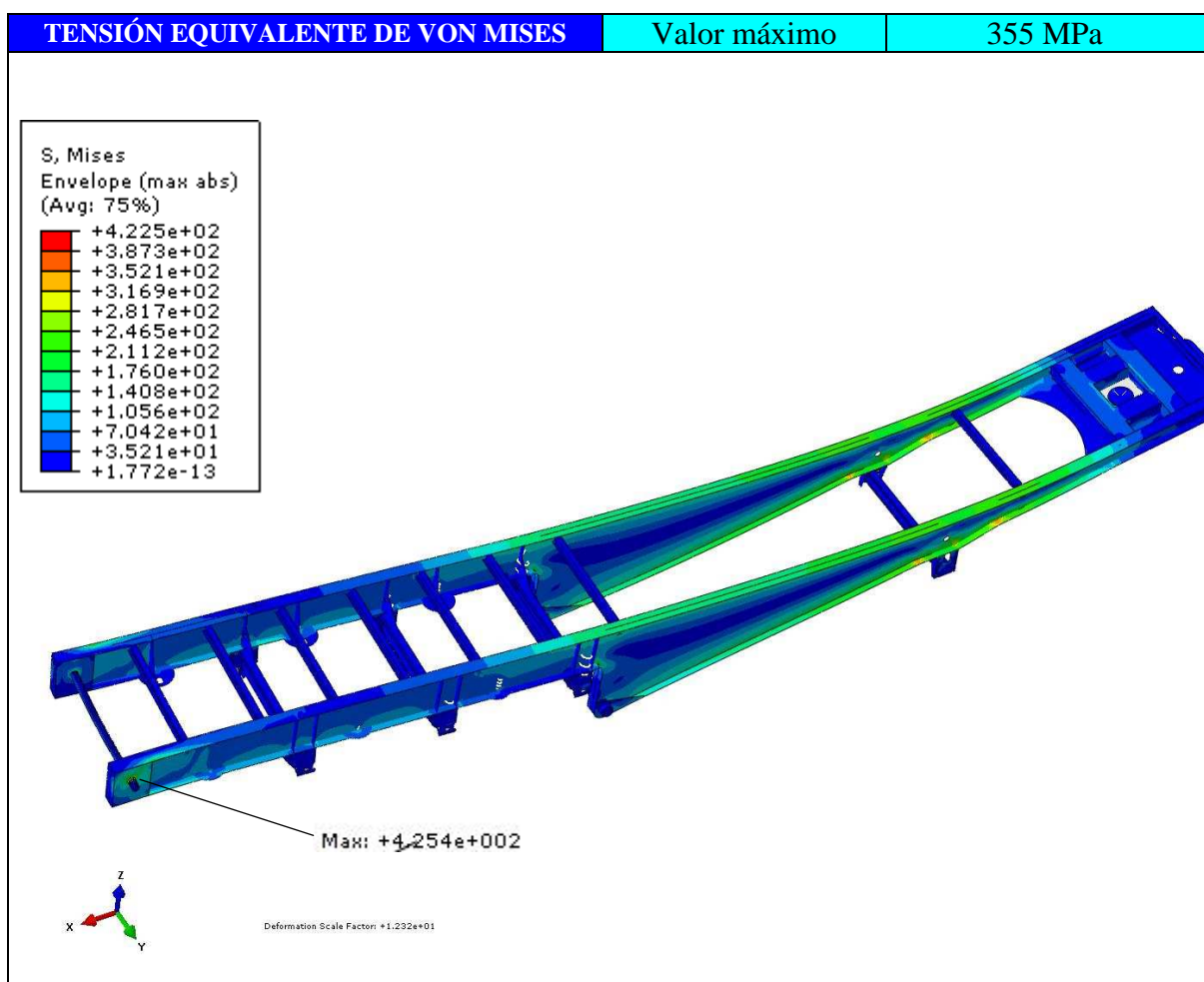
<p>Chapas de deslizamiento (King-Pin)</p>		<p>Valor máximo: 79,13 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Banda de cierre delantera</p>		<p>Valor máximo: 56,51mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Ala superior e inferior de los largueros</p>		<p>Valor máximo: 92,02 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>

Alma largueros		<p>Valor máximo: 91,98 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
Cartabones del giro trasero		<p>Valor máximo: 42,27 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
Cartabones de refuerzo de los bulones escudo		<p>Valor máximo: 81,95mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>

<p>Bulones escudos</p>		<p>Valor máximo: 80,00 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12</p>
<p>Travesaños</p>		<p>Valor máximo: 87,24 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Travesaño (pies de apoyo)</p>		<p>Valor máximo: 91,09mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>

<p>Soportes pies de apoyo</p>	 <p>U, U3</p> <ul style="list-style-type: none"> -9.047e+01 -9.055e+01 -9.063e+01 -9.071e+01 -9.079e+01 -9.087e+01 -9.095e+01 -9.103e+01 -9.110e+01 -9.118e+01 -9.126e+01 -9.134e+01 -9.142e+01 <p>Deformation Scale Factor: +1.222e+01</p>	<p>Valor máximo: 91,42 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Travesaños (soportes ruedas)</p>	 <p>U, U3</p> <ul style="list-style-type: none"> -5.245e+01 -5.448e+01 -5.650e+01 -5.852e+01 -6.055e+01 -6.257e+01 -6.460e+01 -6.662e+01 -6.864e+01 -7.067e+01 -7.269e+01 -7.472e+01 -7.674e+01 <p>Step: Step-1 Increment: 13, Step Time = 1.000 Primary Var: U3 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.222e+01</p>	<p>Valor máximo: 76,67 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Soporte ruedas</p>	 <p>U, U3</p> <ul style="list-style-type: none"> -5.183e+01 -5.400e+01 -5.619e+01 -5.836e+01 -6.054e+01 -6.272e+01 -6.490e+01 -6.708e+01 -6.926e+01 -7.143e+01 -7.361e+01 -7.579e+01 -7.797e+01 <p>Deformation Scale Factor: +1.222e+01</p>	<p>Valor máximo: 77,97 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>

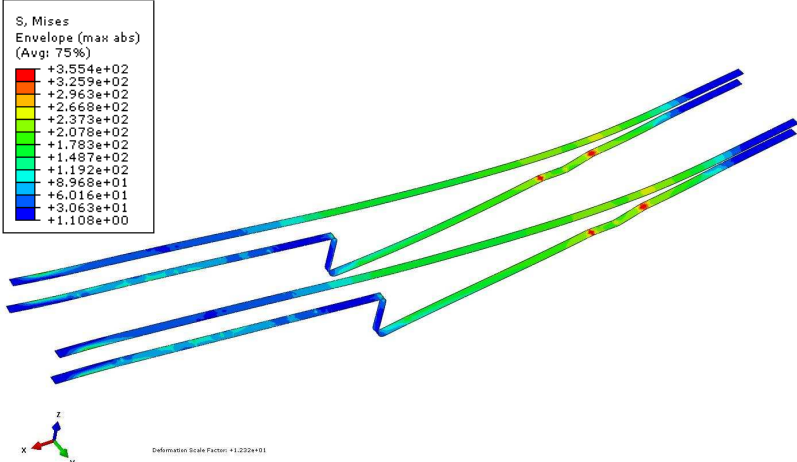
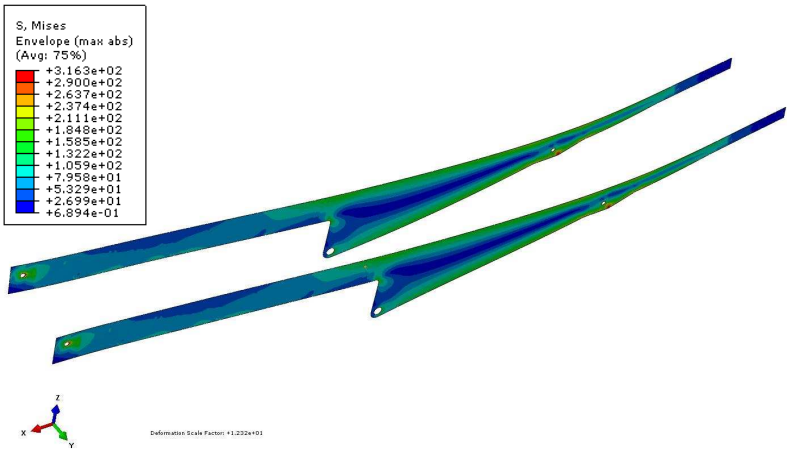
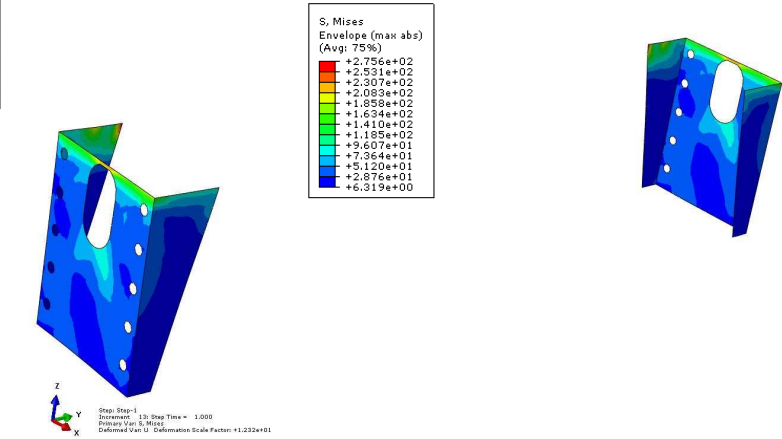
<p>Cartabones (soporte ruedas)</p>	 <p>U, U3 -5.238e+01 -5.448e+01 -5.658e+01 -5.869e+01 -6.079e+01 -6.289e+01 -6.499e+01 -6.709e+01 -6.919e+01 -7.129e+01 -7.340e+01 -7.550e+01 -7.760e+01</p> <p>Deformation Scale Factor: +1.232e+01</p>	<p>Valor máximo: 77,76 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Cartabones (Diapress)</p>	 <p>U, U3 -4.522e+01 -4.737e+01 -4.952e+01 -5.166e+01 -5.381e+01 -5.595e+01 -5.810e+01 -6.025e+01 -6.239e+01 -6.454e+01 -6.668e+01 -6.883e+01 -7.098e+01</p> <p>Deformation Scale Factor: +1.232e+01</p>	<p>Valor máximo: 70,98 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>

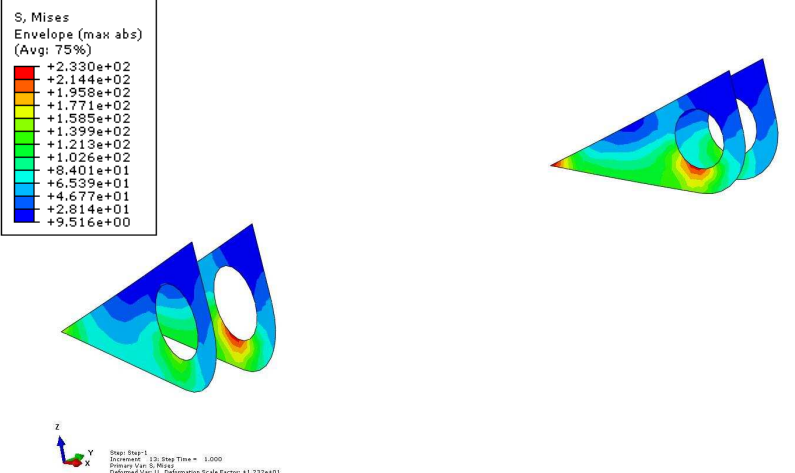
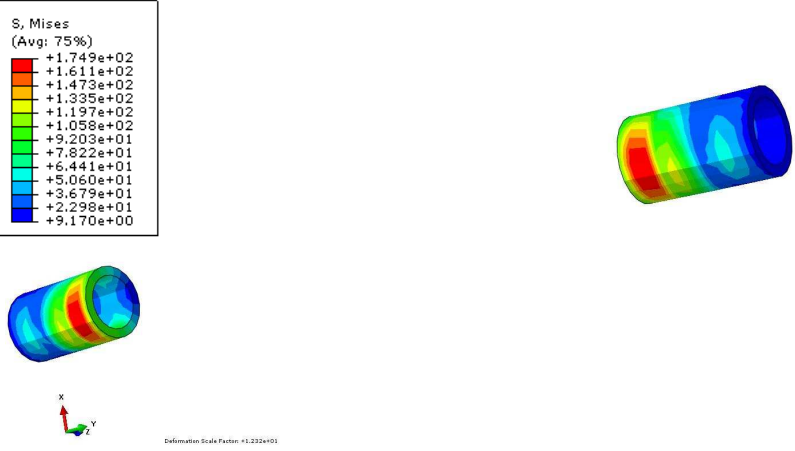
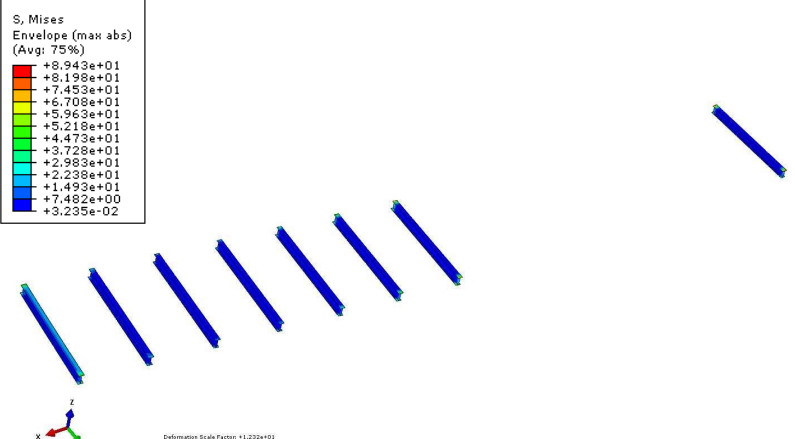


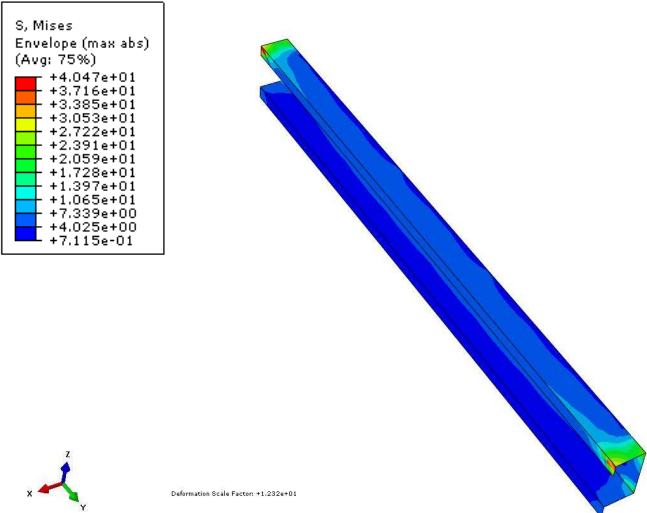
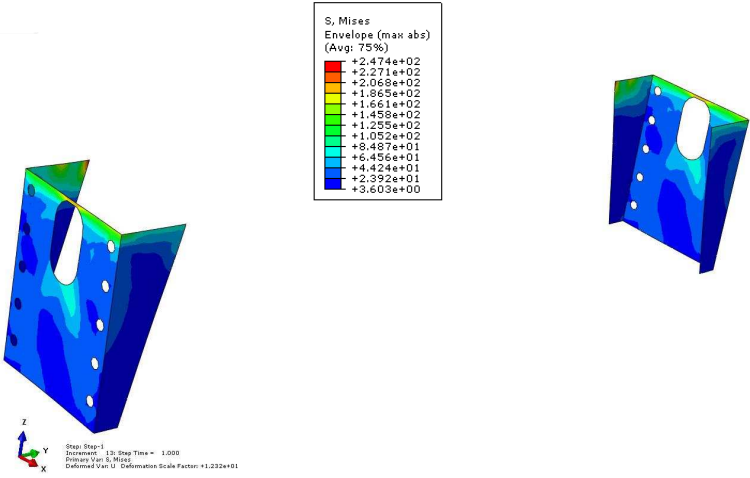
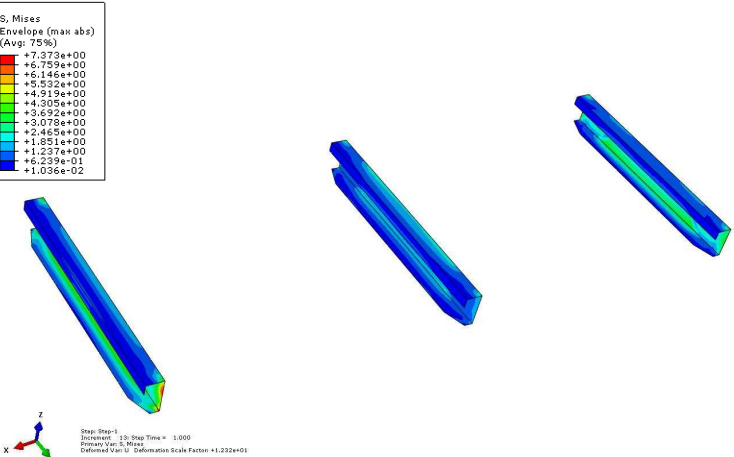
Hacer notar que la tensión de 425 MPa se debe a un elemento en concreto que ha sacado ese máximo, no una zona, por tanto a la hora de interpretar los resultados no se debe de considerar, ya que no se puede considerar si quiera una concentración de tensión, sino un pico.

Analizando con Abaqus Viewer se pueden determinar las zonas de máximas tensiones reales que se concentran fundamentalmente en el cambio de sección de los largueros. Esto se desarrolla de manera más particular en la siguiente tabla donde se presentan todos los componentes del semirremolque con sus respectivos mapas de tensiones y máximos de los mismos.

TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES		
Puente (King-Pin)	<p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +1.205e+02 +1.109e+02 +1.012e+02 +9.160e+01 +8.196e+01 +7.231e+01 +6.266e+01 +5.302e+01 +4.337e+01 +3.372e+01 +2.407e+01 +1.443e+01 +4.781e+00 <p>Deformation Scale Factor: +1.222e+01</p>	Valor máximo: 121 MPa
Chapas de deslizamiento (King-Pin)	<p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +3.050e+02 +2.796e+02 +2.542e+02 +2.288e+02 +2.035e+02 +1.781e+02 +1.527e+02 +1.273e+02 +1.019e+02 +7.653e+01 +5.114e+01 +2.575e+01 +3.663e+01 <p>Deformation Scale Factor: +1.222e+01</p>	Valor máximo: 305 MPa
Banda de cierre delantera	<p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +3.050e+02 +2.796e+02 +2.542e+02 +2.288e+02 +2.035e+02 +1.781e+02 +1.527e+02 +1.273e+02 +1.019e+02 +7.653e+01 +5.114e+01 +2.575e+01 +3.663e+01 <p>Deformation Scale Factor: +1.222e+01</p>	Valor máximo: 11 MPa

<p>Ala superior e inferior de los largueros</p>	 <p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +3.554e+02 +3.259e+02 +2.963e+02 +2.668e+02 +2.373e+02 +2.078e+02 +1.783e+02 +1.487e+02 +1.192e+02 +8.968e+01 +6.016e+01 +3.063e+01 +1.108e+00 <p>Deformation Scale Factor: +1.222e+01</p>	<p>Valor máximo: 355 MPa</p>
<p>Alma largueros</p>	 <p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +3.163e+02 +2.900e+02 +2.637e+02 +2.374e+02 +2.111e+02 +1.848e+02 +1.585e+02 +1.322e+02 +1.059e+02 +7.958e+01 +5.329e+01 +2.699e+01 +6.894e-01 <p>Deformation Scale Factor: +1.222e+01</p>	<p>Valor máximo: 316 MPa</p>
<p>Cartabones del giro trasero</p>	 <p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +2.756e+02 +2.531e+02 +2.307e+02 +2.083e+02 +1.858e+02 +1.634e+02 +1.410e+02 +1.185e+02 +9.607e+01 +7.364e+01 +5.120e+01 +2.876e+01 +6.319e+00 <p>Step: Step-1 Increment: 10; Step Time = 1.000 Display: Von S, 9600 Deformed: Von U; Deformation Scale Factor: +1.222e+01</p>	<p>Valor máximo: 276 MPa</p>

<p>Cartabones de refuerzo de los bulones escudo</p>		<p>Valor máximo: 233 MPa</p>
<p>Bulones escudos</p>		<p>Valor máximo: 175 MPa</p>
<p>Travesaños</p>		<p>Valor máximo: 89 MPa</p>

<p>Travesaño (pies de apoyo)</p>		<p>Valor máximo: 41 MPa</p>
<p>Soportes pies de apoyo</p>		<p>Valor máximo: 247 MPa</p>
<p>Travesaños (soportes ruedas)</p>		<p>Valor máximo: 7 MPa</p>

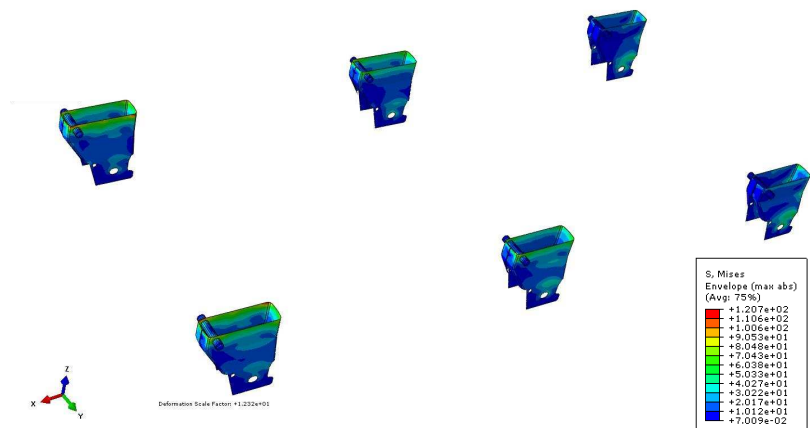
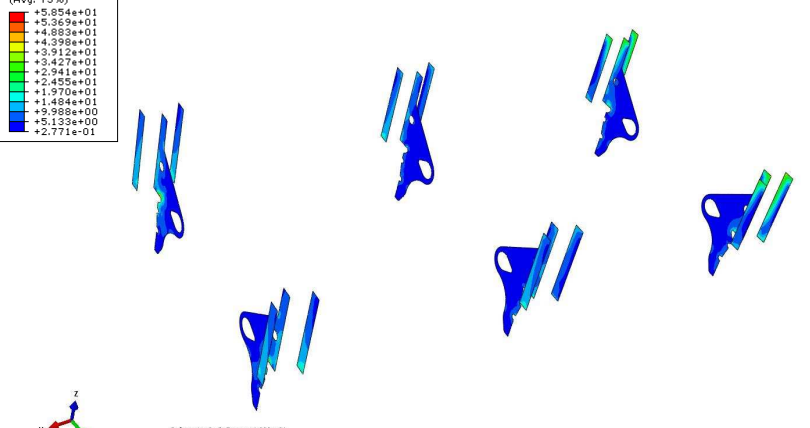
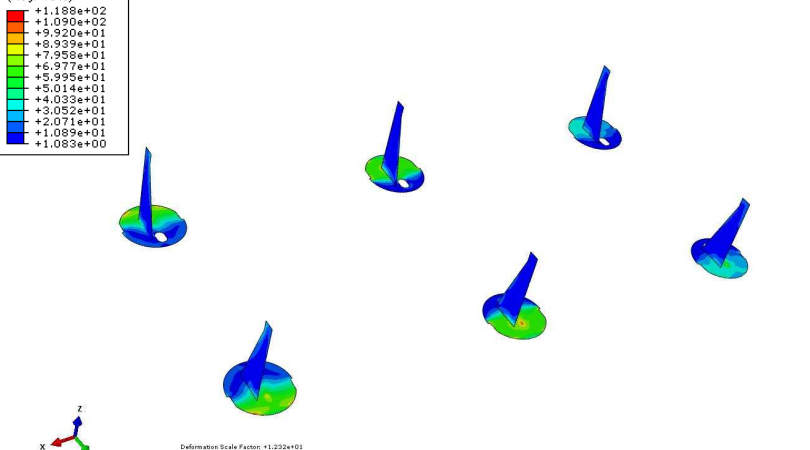
<p>Soporte ruedas</p>		<p>Valor máximo: 121 MPa</p>
<p>Cartabones (soporte ruedas)</p>		<p>Valor máximo: 59 MPa</p>
<p>Cartabones (Diapress)</p>		<p>Valor máximo: 119 MPa</p>

Tabla 5.1: Resultados obtenidos añadiendo cartabones de refuerzo a los bulones escudos

A continuación se presenta un cuadro resumen de los resultados obtenidos para cada elemento que componen el chasis:

GRUPO	Modificación 1		
	0°, 39T		
	Tensión máxima (MPa)	Coefficiente de seguridad	Peso (kg)
Puente (king-pin)	121	2,93	72
Chapas de deslizamiento (King-pin)	305	1,16	99,8
Banda de cierre delantera (King-pin)	11	32,27	10,5
Ala superior e inferior de los largueros	355	1,00	460
Alma largueros	316	1,12	698
Cartabones del Giro trasero	276	1,29	12
Bulones escudos	175	2,03	10
Travesaños	89	3,09	65,2
Travesaños (Pies de Apoyo)	41	6,71	12,6
Soportes pies de apoyo	247	1,11	11,2
Travesaños (soporte Ruedas)	7	50,71	24,1
Soportes ruedas	121	2,93	52,3
Cartabones (soporte ruedas)	59	6,02	50,2
Cartabones (diapress)	119	2,31	14,5
Cartabones refuerzo bulones	233	1,52	11,5

Tabla 5.2: Cuadro resumen de la modificación 1

Se puede apreciar que la finalidad de la modificación ha tenido éxito: el coeficiente del alma de los largueros ha aumentado considerablemente, ya no se concentra la tensión de manera tan elevada, se consigue una estabilidad en la unión de los bulones con el resto de estructura. En la *figura 5.2* se puede como la distribución de tensiones de Von Mises es mucho más suave, homogénea y de valor mucho menor. En

concreto se señala la zona de mayor tensión que hace que su coeficiente de seguridad se vea reducido.

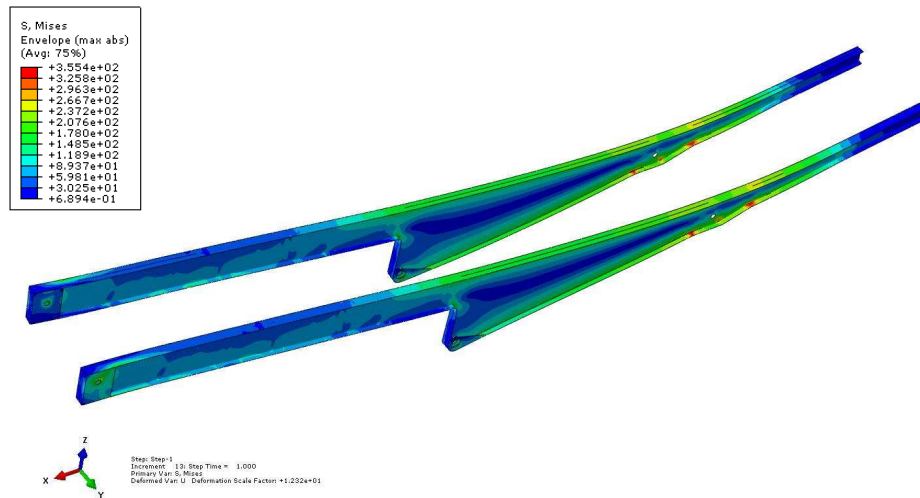


Figura 5.2: Distribución de tensiones en los largueros

El resto de elementos superan la unidad salvo el caso de las alas, que sigue al límite y una vez más se debe a la concentración que se produce en el cambio de sección de los largueros.

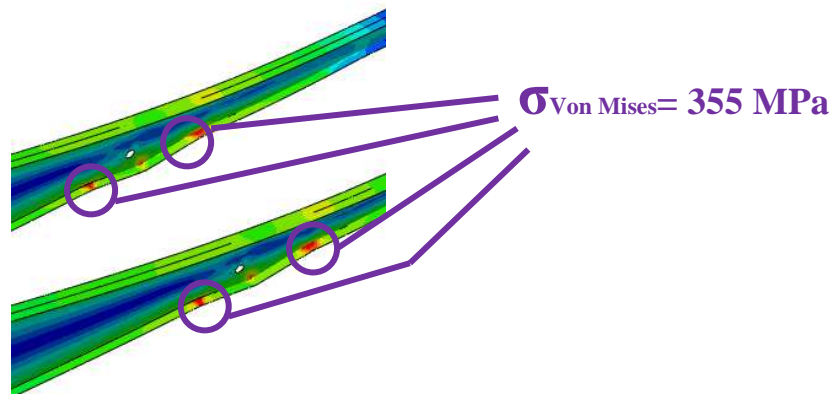


Figura 5.3: Detalle del cambio de sección de los largueros y las tensiones.

5.2.- MODIFICACIÓN 2: NERVIOS DE REFUERZO EN EL CAMBIO DE SECCIÓN

Ahora se plantea intentar apaliar en lo posible la concentración de tensión que se produce en la ala inferior de las alas en el cambio de sección de los largueros, para ello hay varias soluciones que se pueden plantear de manera que se solucione el problema sin cambiar la geometría, es decir, sin cambiar la producción. La primera opción sería soldar una placa debajo del ala que tuviera su misma geometría y que simplemente abarcara las zonas de concentración de tensiones. Otra sería unos nervios soldados que unieran ala inferior, larguero y ala superior.

Se realizará la segunda, el motivo fundamental es que este sistema ya se utiliza en el chasis, concretamente en la zona de ejes, por un lado de los largueros hay unos cartabones soldados a los soportes de las ruedas y a su vez al larguero; pero por el otro lado del larguero bajan unos nervios que realizan la función descrita al principio del párrafo. Si se observan resultados anteriores su funcionamiento parece correcto, ya que esas zonas no tienen sobrecarga de tensiones. Básicamente lo que hacen es transmitir la tensión al alma y lo que más interesa, al ala superior que es la más descargada del larguero. También hay que tener en cuenta que el proceso de unión nervio-larguero ya está coordinado y por tanto no hay que introducir en la empresa nuevos sistemas de producción.

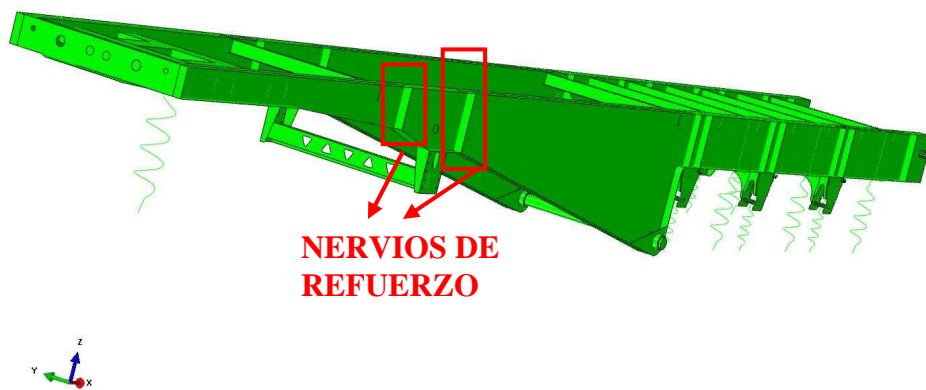
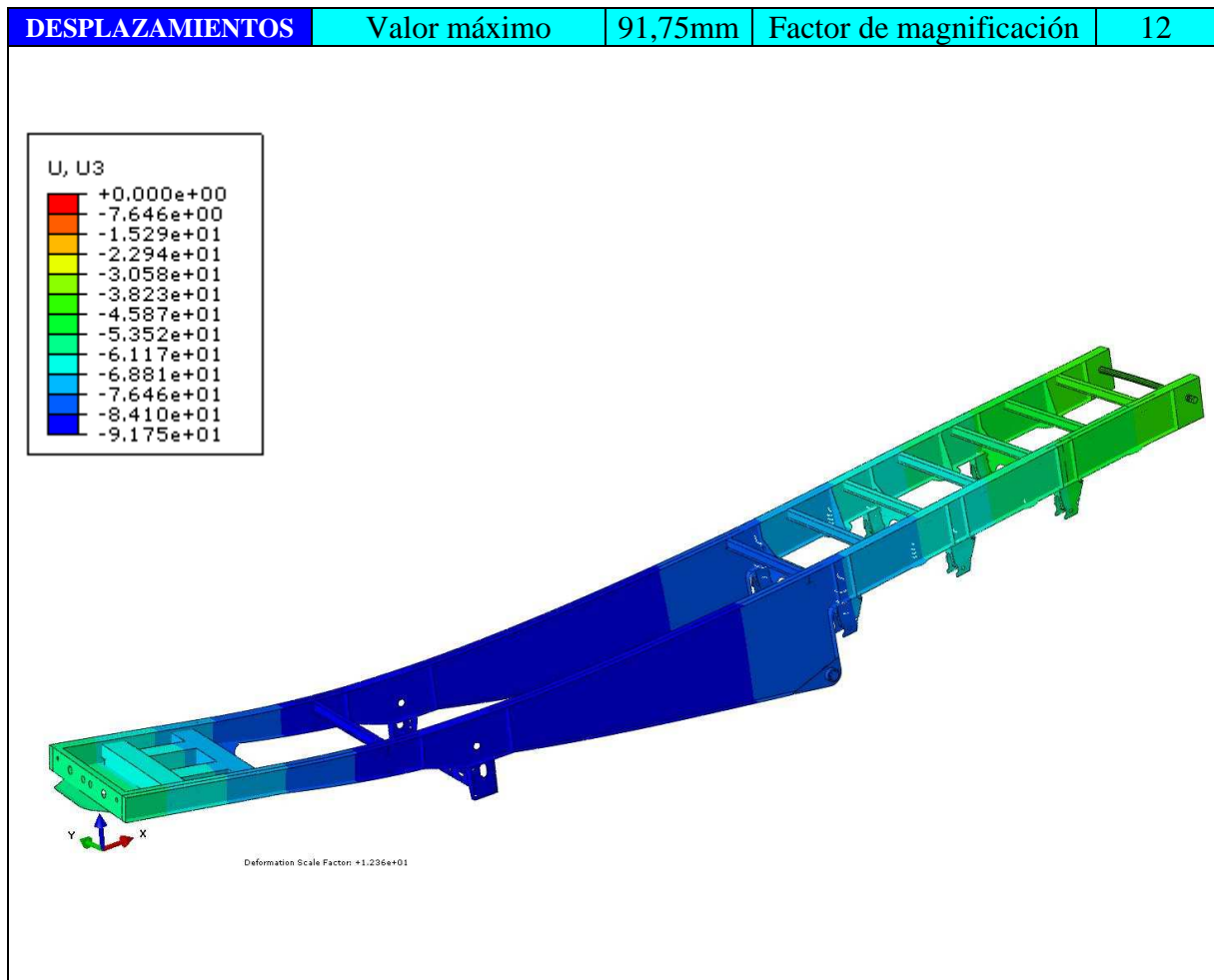
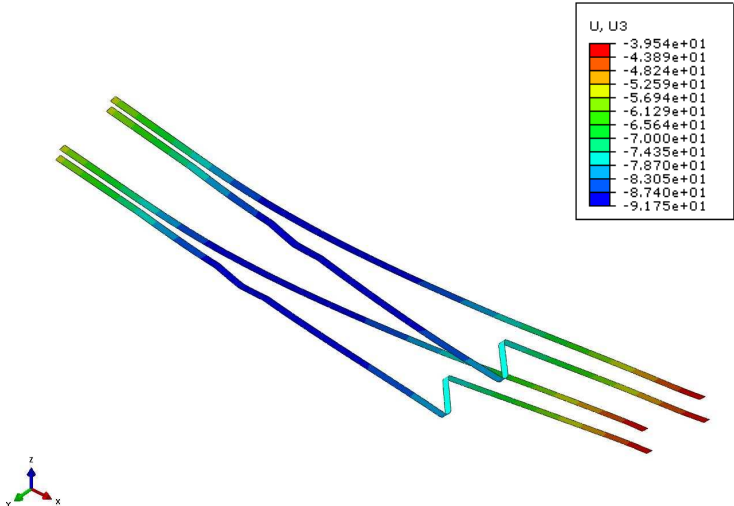
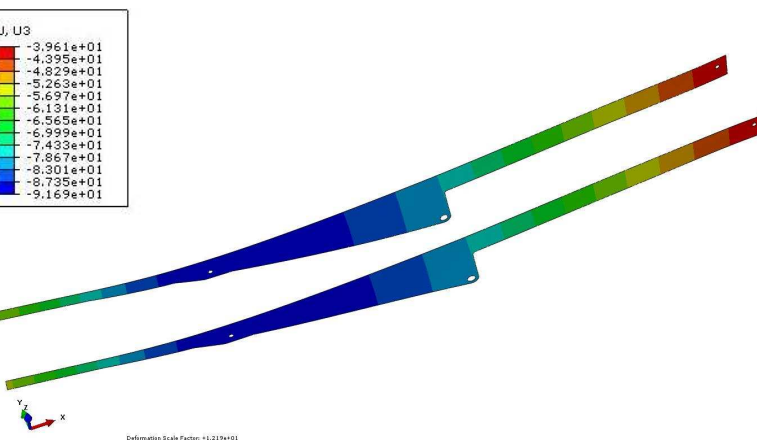
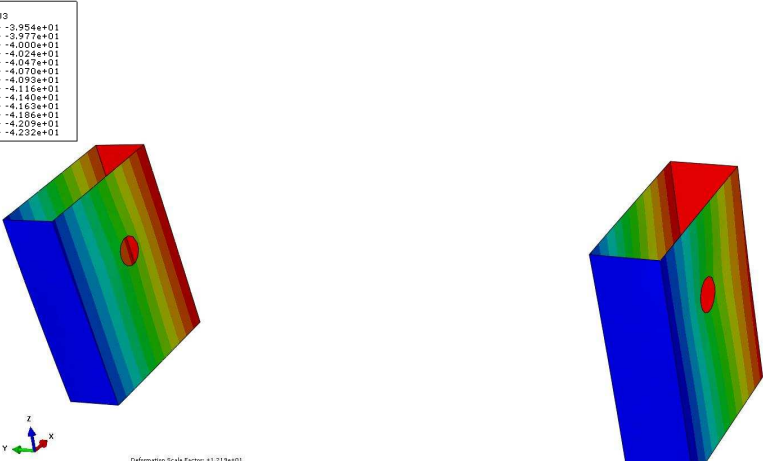
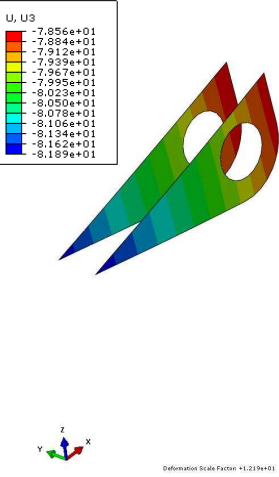
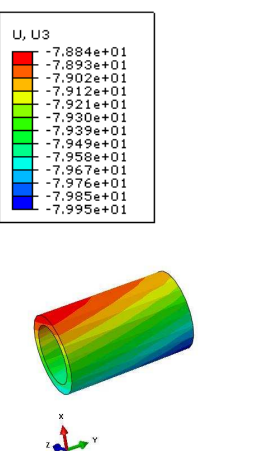
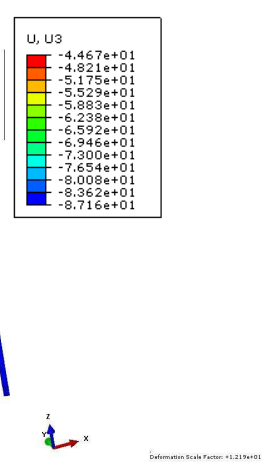


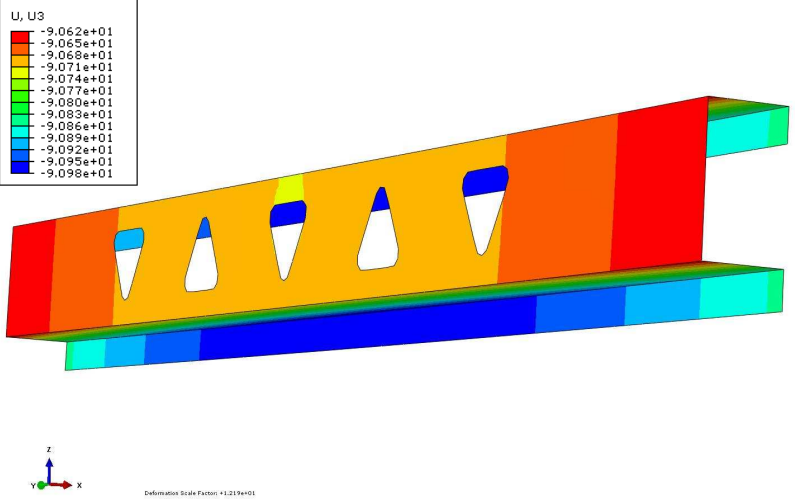

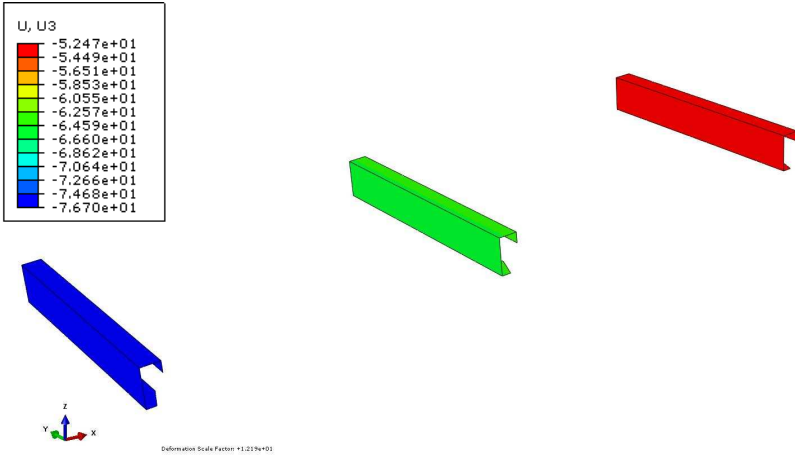
Figura 5.4: Chasis con los nervios con la modificación 2 aplicada.



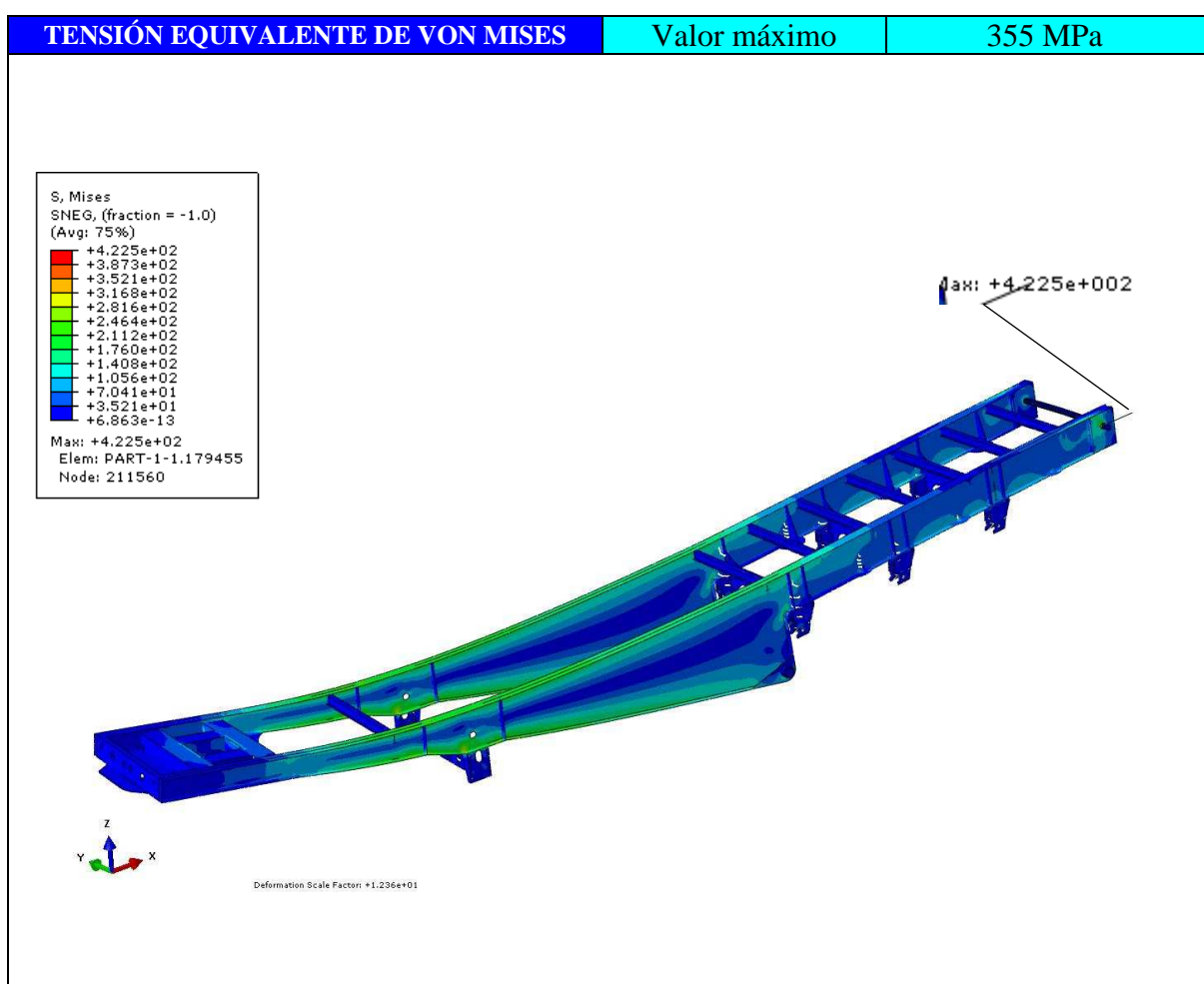
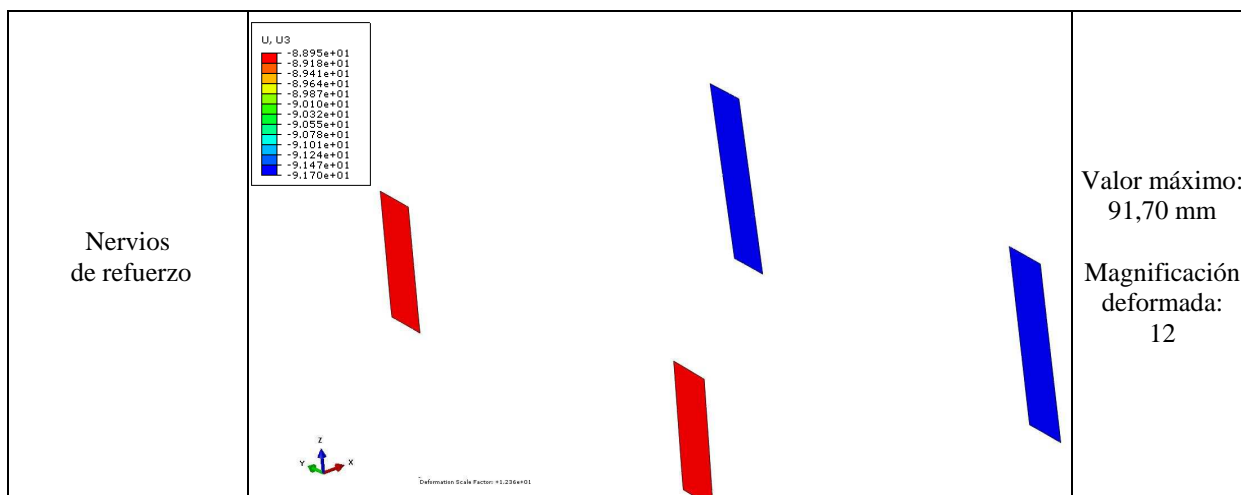
DESPLAZAMIENTOS		
Puente (King-Pin)	<p>U, U3</p> <ul style="list-style-type: none"> -6.167e+01 -6.269e+01 -6.370e+01 -6.472e+01 -6.573e+01 -6.675e+01 -6.776e+01 -6.878e+01 -6.979e+01 -7.080e+01 -7.182e+01 -7.283e+01 -7.385e+01 <p>Deformation Scale Factor: +1.219e+01</p>	<p>Valor máximo: 73,85 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
Chapas de deslizamiento (King-Pin)	<p>U, U3</p> <ul style="list-style-type: none"> -5.334e+01 -5.548e+01 -5.763e+01 -5.978e+01 -6.193e+01 -6.408e+01 -6.622e+01 -6.837e+01 -7.052e+01 -7.267e+01 -7.482e+01 -7.696e+01 -7.911e+01 <p>Deformation Scale Factor: +1.219e+01</p>	<p>Valor máximo: 79,11mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
Banda de cierre Delantero (King-Pin)	<p>U, U3</p> <ul style="list-style-type: none"> -5.574e+01 -5.581e+01 -5.589e+01 -5.596e+01 -5.603e+01 -5.611e+01 -5.618e+01 -5.625e+01 -5.633e+01 -5.640e+01 -5.647e+01 -5.654e+01 -5.662e+01 <p>Deformation Scale Factor: +1.219e+01</p>	<p>Valor máximo: 56,62 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>

<p>Ala superior e inferior de los largueros</p>	 <p>U, U3</p> <ul style="list-style-type: none"> -3.954e+01 -4.389e+01 -4.824e+01 -5.259e+01 -5.694e+01 -6.129e+01 -6.564e+01 -7.000e+01 -7.435e+01 -7.870e+01 -8.305e+01 -8.740e+01 -9.175e+01 <p>Deformation Scale Factor: *1.219e+01</p>	<p>Valor máximo: 91,75 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Alma largueros</p>	 <p>U, U3</p> <ul style="list-style-type: none"> -3.961e+01 -4.395e+01 -4.829e+01 -5.263e+01 -5.697e+01 -6.131e+01 -6.565e+01 -6.999e+01 -7.433e+01 -7.867e+01 -8.301e+01 -8.735e+01 -9.169e+01 <p>Deformation Scale Factor: *1.219e+01</p>	<p>Valor máximo: 91,69mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Cartabones del giro trasero</p>	 <p>U, U3</p> <ul style="list-style-type: none"> -3.954e+01 -3.977e+01 -4.000e+01 -4.024e+01 -4.047e+01 -4.070e+01 -4.093e+01 -4.116e+01 -4.140e+01 -4.163e+01 -4.186e+01 -4.209e+01 -4.232e+01 <p>Deformation Scale Factor: *1.219e+01</p>	<p>Valor máximo: 42,32mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>

<p>Cartabones de refuerzo de los bulones escudo</p>		<p>Valor máximo: 81,89 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Bulones escudos</p>		<p>Valor máximo: 79,95 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Travesaños</p>		<p>Valor máximo: 87,16 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>

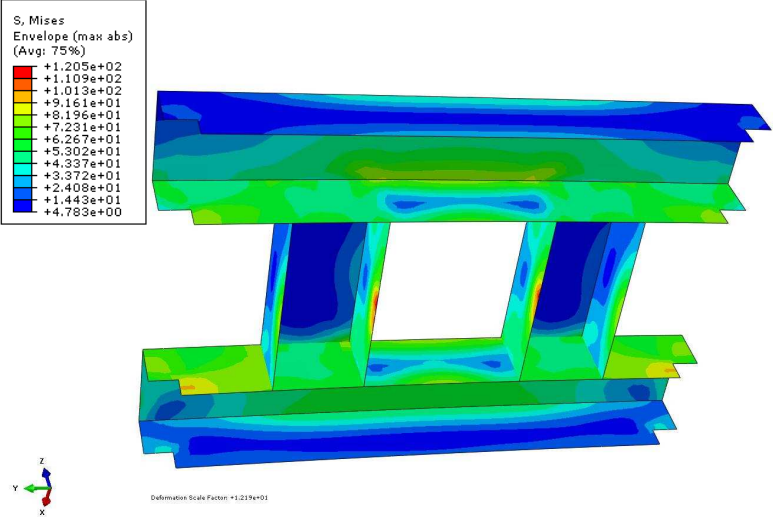
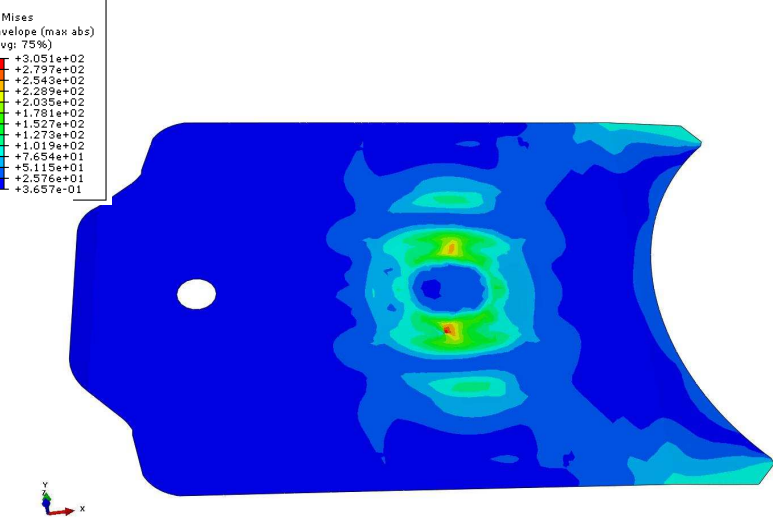
<p>Travesaño (pies de apoyo)</p>		<p>Valor máximo: 90,98 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Soportes pies de apoyo</p>		<p>Valor máximo: 91,29 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Travesaños (soportes ruedas)</p>		<p>Valor máximo: 76,70 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>

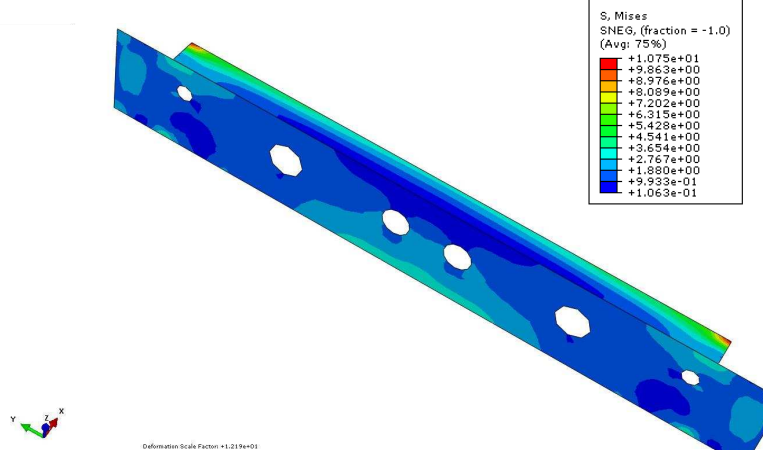
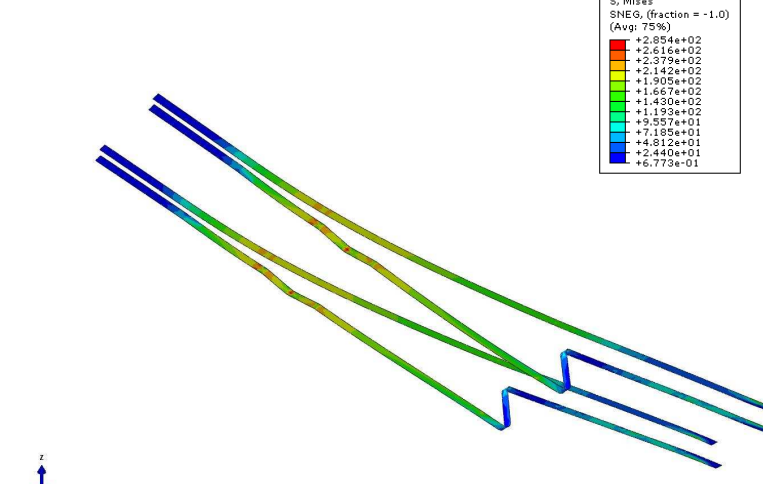
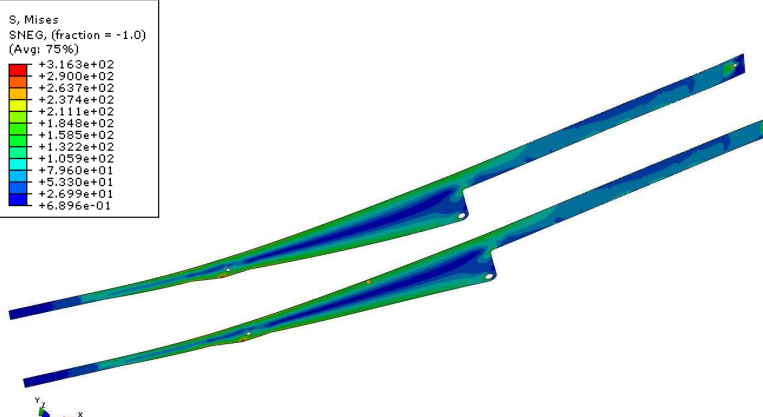
<p>Soporte ruedas</p>		<p>Valor máximo: 77,93 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Cartabones (soporte ruedas)</p>		<p>Valor máximo: 77,56 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>
<p>Cartabones (Diapress)</p>		<p>Valor máximo: 70,95 mm</p> <p>Magnificación deformada: 12,23</p>

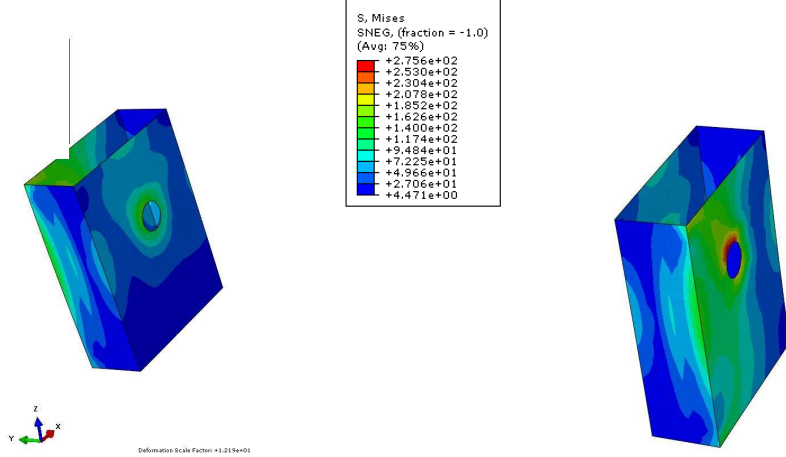

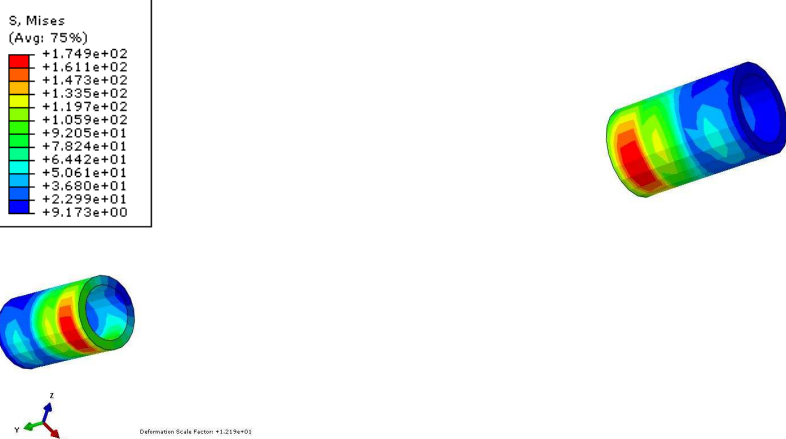


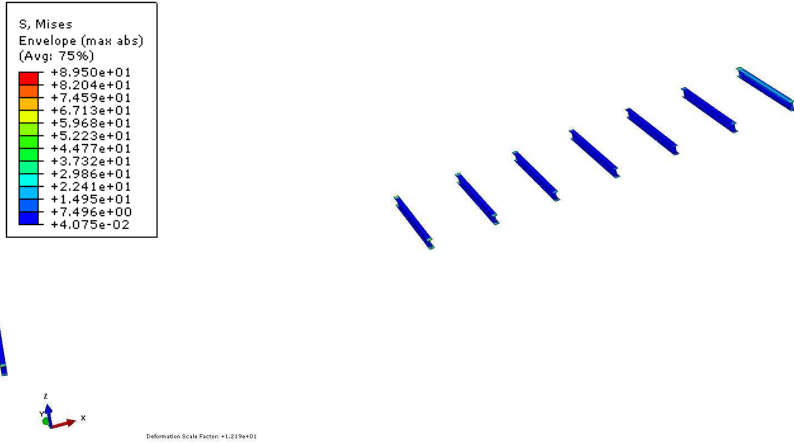
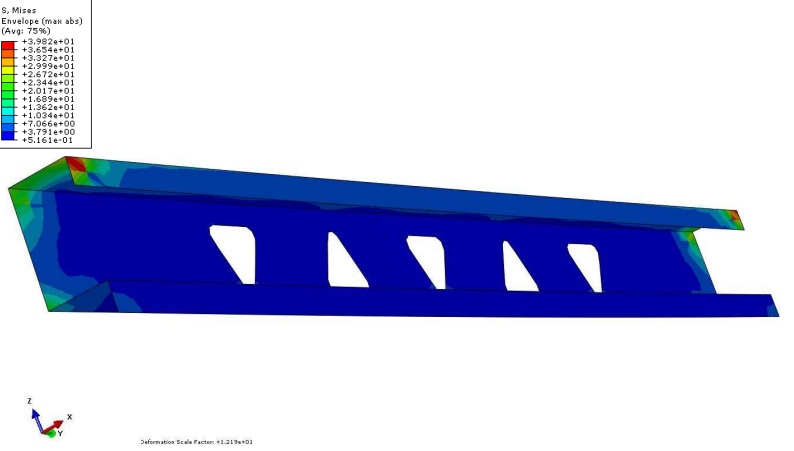
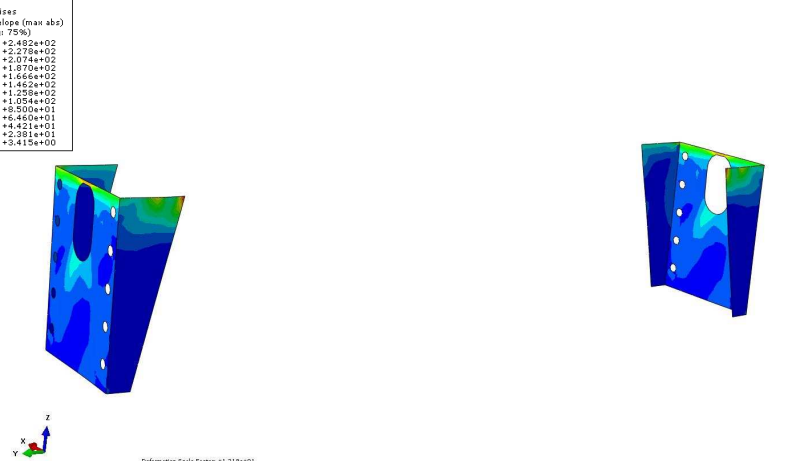
Hacer notar que la tensión de 425 MPa se debe a un elemento en concreto que ha sacado ese máximo, no una zona, por tanto a la hora de interpretar los resultados no se debe de considerar, ya que no se puede considerar si quiera una concentración de tensión, sino un pico.

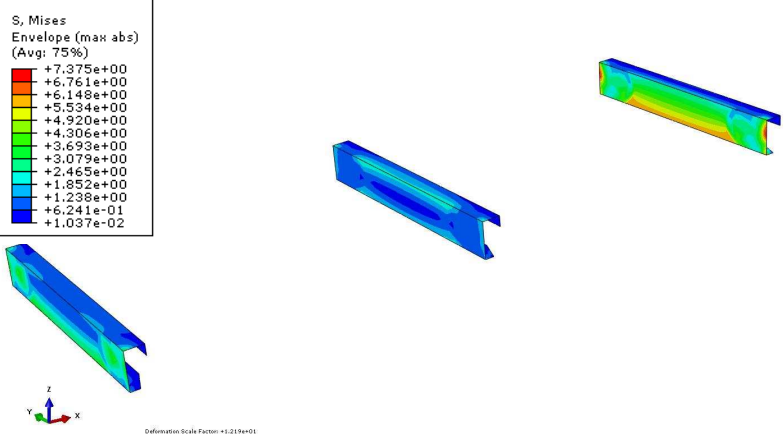
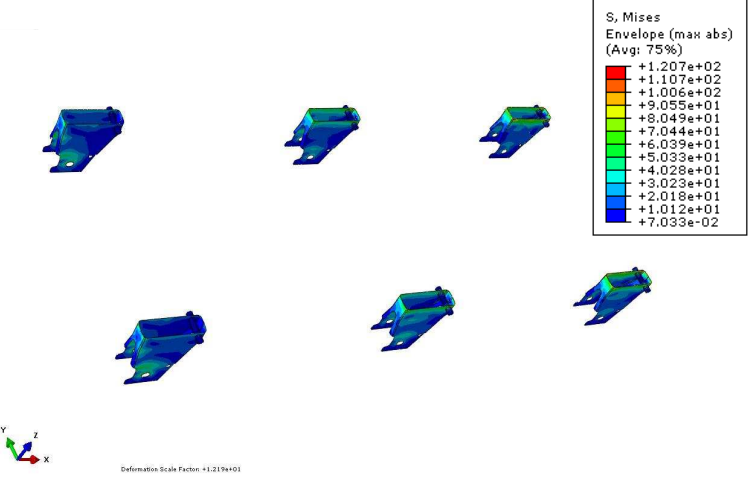

Analizando con Abaqus Viewer se pueden determinar las zonas de máximas tensiones reales que se concentran fundamentalmente en el cambio de sección de los largueros, en concreto en la zona del cambio de sección que no tiene nervio. Esto se desarrolla de manera más particular en la siguiente tabla donde se presentan todos los componentes del semirremolque con sus respectivos mapas de tensiones y máximos de los mismos.

TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES		
Puente (King-Pin)	 <p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +1.205e+02 +1.109e+02 +1.013e+02 +9.161e+01 +8.196e+01 +7.231e+01 +6.267e+01 +5.302e+01 +4.337e+01 +3.372e+01 +2.408e+01 +1.443e+01 +4.783e+00 <p>Deformation Scale Factor: +1.215e+01</p>	Valor máximo: 121 MPa:
Chapas de deslizamiento (King-Pin)	 <p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +3.051e+02 +2.797e+02 +2.543e+02 +2.289e+02 +2.035e+02 +1.781e+02 +1.527e+02 +1.273e+02 +1.019e+02 +7.654e+01 +5.115e+01 +2.576e+01 +3.657e+01 <p>Deformation Scale Factor: +1.215e+01</p>	Valor máximo: 305 MPa

<p>Banda de cierre delantero (King-Pin)</p>	 <p>S, Mises SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +1.075e+01 +9.863e+00 +8.976e+00 +8.089e+00 +7.202e+00 +6.315e+00 +5.428e+00 +4.541e+00 +3.654e+00 +2.767e+00 +1.880e+00 +9.933e-01 +1.063e-01 <p>Deformation Scale Factor: +1.219e+01</p>	<p>Valor máximo: 11 MPa</p>
<p>Ala superior e inferior de los largueros</p>	 <p>S, Mises SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +2.854e+02 +2.616e+02 +2.379e+02 +2.142e+02 +1.905e+02 +1.667e+02 +1.430e+02 +1.193e+02 +9.557e+01 +7.185e+01 +4.812e+01 +2.440e+01 +6.773e-01 <p>Deformation Scale Factor: +1.219e+01</p>	<p>Valor máximo: 285 MPa</p>
<p>Alma largueros</p>	 <p>S, Mises SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +3.163e+02 +2.900e+02 +2.637e+02 +2.374e+02 +2.111e+02 +1.848e+02 +1.585e+02 +1.322e+02 +1.059e+02 +7.960e+01 +5.330e+01 +2.699e+01 +6.896e-01 <p>Deformation Scale Factor: +1.219e+01</p>	<p>Valor máximo: 316 MPa</p>

<p>Cartabones del giro trasero</p>	 <p>S, Mises SNE.S. (fraction = -1.0) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +2.756e+02 +2.530e+02 +2.304e+02 +2.078e+02 +1.852e+02 +1.626e+02 +1.400e+02 +1.174e+02 +9.484e+01 +7.225e+01 +4.966e+01 +2.706e+01 +4.471e+00 <p>Deformation Scale Factor: +1.219e+01</p>	<p>Valor máximo: 276 MPa</p>
<p>Cartabones de refuerzo de los bulones escudo</p>	 <p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +2.332e+02 +2.146e+02 +1.959e+02 +1.779e+02 +1.587e+02 +1.400e+02 +1.214e+02 +1.027e+02 +8.408e+01 +6.544e+01 +4.679e+01 +2.815e+01 +9.505e+00 <p>Deformation Scale Factor: +1.219e+01</p>	<p>Valor máximo: 233 MPa</p>
<p>Bulones escudos</p>	 <p>S, Mises (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +1.749e+02 +1.611e+02 +1.473e+02 +1.335e+02 +1.197e+02 +1.059e+02 +9.205e+01 +7.824e+01 +6.442e+01 +5.061e+01 +3.680e+01 +2.299e+01 +9.173e+00 <p>Deformation Scale Factor: +1.219e+01</p>	<p>Valor máximo: 175 MPa</p>

<p>Travesaños</p>		<p>Valor máximo: 90 MPa</p>
<p>Travesaño (pies de apoyo)</p>		<p>Valor máximo: 40 MPa</p>
<p>Soportes pies de apoyo</p>		<p>Valor máximo: 248 MPa</p>

<p>Travesaños (soportes ruedas)</p>		<p>Valor máximo: 8 MPa</p>
<p>Soporte ruedas</p>		<p>Valor máximo: 121 MPa</p>
<p>Cartabones (soporte ruedas)</p>		<p>Valor máximo: 59 MPa</p>

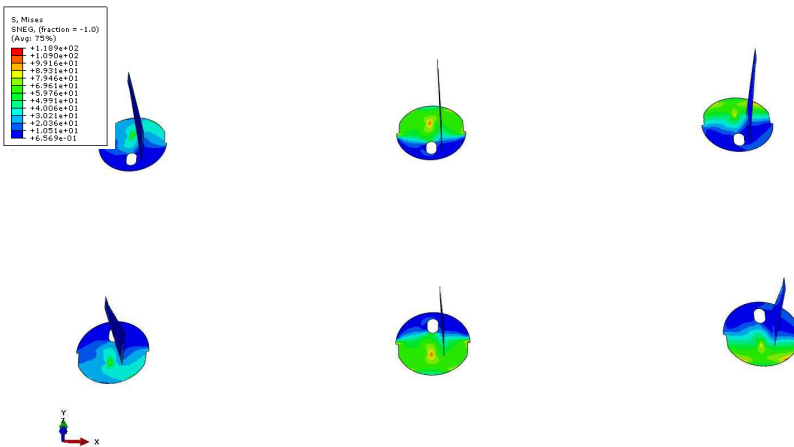
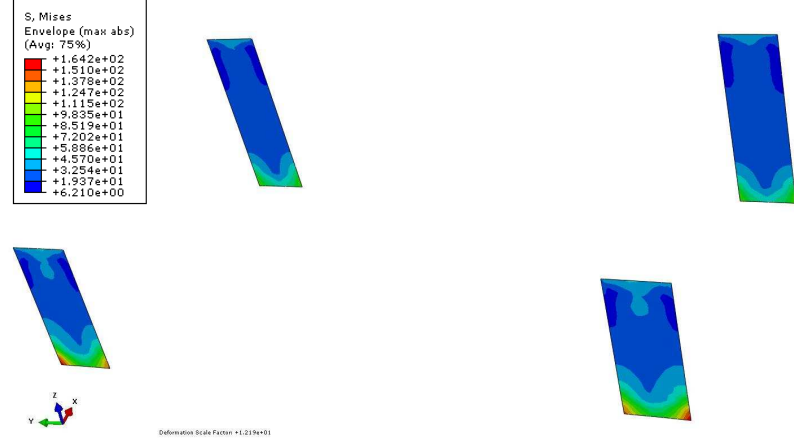
<p>Cartabones (Diapress)</p>		<p>Valor máximo: 119 MPa</p>
<p>Nervios de refuerzo</p>		<p>Valor máximo: 164 MPa</p>

Tabla 5.3: Resultados obtenidos añadiendo nervios de refuerzo.

Se van a presentar un cuadro resumen de los resultados de tensiones equivalentes de Von Mises, para poder entender cómo ha afectado la modificación realizada. Ver *tabla 5.4*.

	Modificación 2		
	0°, 39T		
GRUPO	Tensión máxima (MPa)	Coefficiente de seguridad	Peso (kg)
Puente (king-pin)	121	2,93	72
Chapas de deslizamiento (King-pin)	305	1,16	99,8
Banda de cierre delantera (King-pin)	11	32,27	10,5
Ala superior e inferior de los largueros	285	1,25	460
Alma largueros	316	1,12	698
Cartabones del Giro trasero	276	1,29	12
Bulones escudos	175	2,03	10
Travesaños	90	3,06	65,2
Travesaños (Pies de Apoyo)	40	6,88	12,6
Soportes pies de apoyo	248	1,11	11,2
Travesaños (soporte Ruedas)	8	44,38	24,1
Soportes ruedas	121	2,93	52,3
Cartabones (soporte ruedas)	59	6,02	50,2
Cartabones (diapress)	119	2,31	14,5
Cartabones refuerzo bulones	233	1,52	11,5
Nervios de refuerzo	164	2,16	11

Tabla 5.4: Cuadro resumen para los resultados en la modificación2.

En principio el objetivo que se buscaba se ha conseguido: disminuir la concentración de tensiones en la zona de cambio de sección del larguero, como se puede observar en la *figura 5.5*. A pesar de ello decir que todavía se genera un pico de tensión algo menor (aparece en tonos rojizos en la figura) en otro cambio de dirección del larguero (aparece ciertamente en alama y ala inferior) y de valor máximo de 285 MPa.

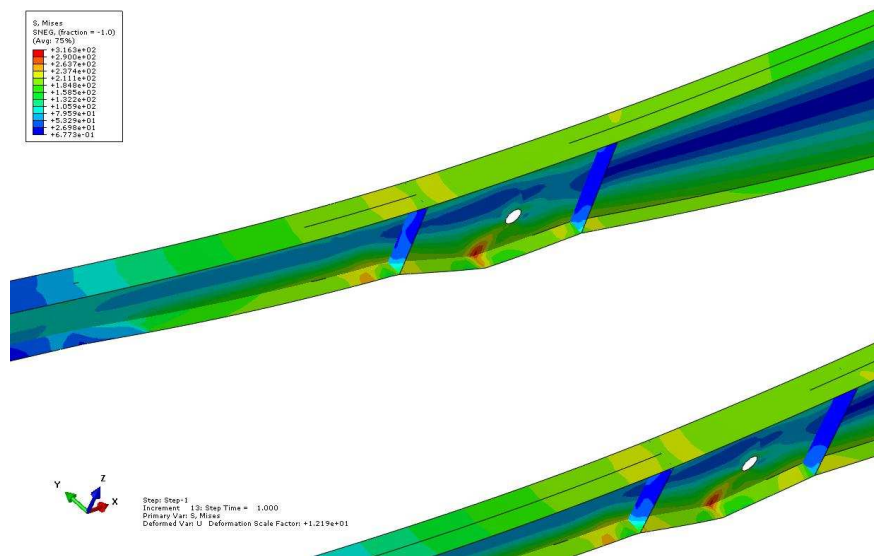


Figura 5.5: Detalle de tensiones en el cambio de sección del larguero



6.- COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE EL MODELO INICIAL Y SU REDISEÑO Y OPTIMIZACIÓN. CONCLUSIONES

6.1.-COMPARATIVA DE RESULTADOS

Se presenta una tabla resumen con cada situación de carga para el semirremolque analizado como estructura inicial. Se recogen los datos que nos interesan, la tensión máxima de Von Mises para cada elemento, su peso y el coeficiente de seguridad; teniendo en cuenta los materiales expuestos en puntos anteriores.



GRUPO	Modelo inicial		Modificación 1		Modificación 2	
	Tensión máxima (MPa)	Cs	Tensión máxima (MPa)	Cs	Tensión máxima (MPa)	Cs
Puente (king-pin)	121	2,93	121	2,93	121	2,93
Chapas de deslizamiento (King-pin)	305	1,16	305	1,16	305	1,16
Banda de cierre delantera (King-pin)	11	32,27	11	32,27	11	32,27
Ala superior e inferior de los largueros	355	1,00	355	1,00	285	1,25
Alma largueros	356	1,00	316	1,12	316	1,12
Cartabones del Giro trasero	275	1,29	276	1,29	276	1,29
Bulones escudos	211	1,68	175	2,03	175	2,03
Travesaños	84	3,27	89	3,09	90	3,06
Travesaños (Pies de Apoyo)	40	6,88	41	6,71	40	6,88
Soportes pies de apoyo	239	1,15	247	1,11	248	1,11
Travesaños (soporte Ruedas)	8	44,38	7	50,71	8	44,38
Soportes ruedas	120	2,96	121	2,93	121	2,93
Cartabones (soporte ruedas)	60	5,92	59	6,02	59	6,02
Cartabones (diapress)	119	2,31	119	2,31	119	2,31
Cartabones refuerzo bulones	-	-	233	1,52	233	1,52
Nervios de refuerzo	-	-	-	-	164	2,16

Tabla 6.1: Resumen de resultados para cada grupo y caso de carga

(*) C_s es el coeficiente de seguridad

6.2.- CONCLUSIONES

Las modificaciones realizadas al modelo son perfectamente válidas, ya que se consigue pasar de un coeficiente de 1,00 en ala inferior y alma a 1,12 y 1,25 respectivamente y lo más importante, una distribución mucho más homogénea de las tensiones.

En el caso del alma, concretamente en la zona de escudos, en la unión bulón-alma que era inestable y concentraba tensiones, pasa a ser una zona de estabilidad y una concentración de tensiones muy moderada para las solicitaciones que tiene, ya que hay que tener en cuenta que recibe todas las solicitaciones de la barra de cilindros. Para la “zona de escudos” que es la del alma en la que va el bulón, se eliminaron los escudos de la geometría previa que eran los que podían aportar una cierta estabilidad a los bulones y al final de la modificación 1 vuelven a quedar los bulones en situación correcta, es decir, se consigue una distribución de tensiones cuanto menos igual que con los escudos con la diferencia de un ahorro muy importante de peso: 142, 5 Kg respecto el modelo enviado por Leciñena (el que tenía escudos)

También se puede hablar de los refuerzos de los nervios colocados en el cambio de sección, que lo que se consigue con ellos es repartir la tensión acumulada en ala inferior con alma y ala superior. En la siguiente ilustración se muestra la distribución de tensiones en la zona de cambio de sección de los largueros.

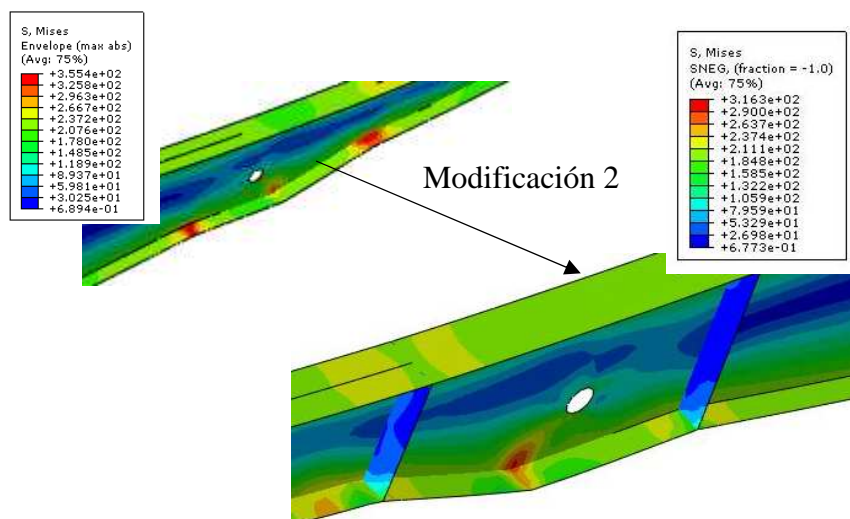


Figura 6.1. Detalle del cambio de sección del larguero y sus tensiones

En la imagen se puede apreciar claramente la variación de la distribución y del valor de las tensiones en el ala inferior pero también queda un pequeño concentrador de tensión en el cambio de sección.

En relación con esto último van los futuros estudios de este semirremolque, en cómo suavizar este cambio de sección. De hecho se está acabando este proyecto y se está comenzando ya uno que tiene como finalidad suavizar este cambio y se está pensando en un prototipo que evita este “zigzag”, haciendo que el larguero cambie su tamaño de forma progresiva desde la zona de escudos hasta la posición que se ha comentado antes. A falta de cálculos, se intuye que se van a eliminar la concentración de tensión mencionada antes porque es bastante evidente que se debe a la geometría de ese tramo del larguero.



Figura 6.2: Prototipo de larguero para semirremolque.

Otro proyecto que podría nacer a raíz de este sería una optimización de materiales. Este se realiza una vez realizados todos los cambios necesarios en la geometría ya que es necesario que se repartan bien las tensiones. Consiste fundamentalmente en variar espesores y materiales de elementos, con objeto de reducir la tara del vehículo lo máximo posible. El fundamento de esa posible línea de investigación sería con los materiales que están disponibles para su fabricación variar los espesores de los elementos más tensionados y que son más influyentes en el peso del semirremolque. En este caso serían los largueros los elementos por los que se comenzaría. La manera de desarrollar este proyecto sería que una vez modelado el chasis mediante elementos finitos se van variando espesores para cada material en los “input”. Este proceso iterativo se repite con varios materiales. Aquí vendría la parte de los espesores comerciales que la empresa sigue (los fundamentales aparecen en la

siguiente figura), estudio de precios, soldabilidad, etc. También habría que ir valorando ahorros de peso y cálculo de las tensiones para cada situación de material y espesor.

Elemento a optimizar (Tensiones máximas, MPa)		Espesores		
		12 mm	10 mm	8 mm
Materiales	Material inicio			
	Nuevo material optimización			
	Nuevo material optimización 2			

Figura 6.1: Ejemplo de combinación de tabla para optimización de espesores

Este ejemplo representado sería una tabla resumen que iría recogiendo los resultados de esta línea de investigación y en la cual previamente habría que introducir los materiales que se han estudiado y decidido con la empresa de utilizar y los espesores comprados por la empresa. Insistir que para rellenarla con los valores de tensiones máximas habría que “lanzar” cálculos para cada posibilidad espesor-material.

Se puede decir que sin seguir estas posibles líneas de investigación descritas anteriormente el modelo queda mejorado sustancialmente, con una estructura perfectamente estable y con un ahorro de material respecto el modelo inicial planteado por Leciñena S.A. (el de los escudos) de 131,5 Kg.

Para finalizar se puede decir que se ha conseguido un chasis de semirremolque basculante fabricado en los aceros que la empresa utiliza, con una geometría muy parecida a la de inicio y en la que las modificaciones realizadas hacen una estructura más ligera y con tensiones mejor distribuidas (se evitan muchos concentradores de tensión), además de plantearse posibles líneas de investigación y mejora de este chasis de semirremolque para basculantes.

7.- CONCLUSIONES FINALES

En las diferentes fases del proyecto se ha estudiado, modelado, calculado y optimizado el chasis de un semirremolque para basculantes, partiendo de un modelo inicial que fue facilitado por Leciñena S.A debido a la colaboración que existe entre esta y la universidad de Zaragoza.

En un primer momento del proyecto hay que plantearse a qué situaciones de carga se somete al chasis (giro radio mínimo, escalón, etc.) y gracias a la experiencia de Leciñena S.A en el sector se decide en situación en la que el semirremolque se encuentra basculando. Teniendo en cuenta un estudio previo que se realiza por el grupo “vehivial” de la Universidad de Zaragoza se dentro de esta situación la posición más desfavorable para la estructura es cuando comienza este movimiento, cuando el ángulo entre el basculante y los largueros es de cero grados y la caja solamente apoyada en los giros traseros y en los anclajes de los cilindros de elevación.

La siguiente fase ha consistido en modelar mediante el Método de los Elementos Finitos el chasis originario que ha facilitado la empresa con un programa comercial. Una vez seleccionados los elementos a utilizar, materiales, espesores...lo que sería definir las variables del problema se pasa a realizar el cálculo. Antes de “lanzar” a calcularlo se introduce una variación importante en este modelo. Esta se deduce de otros proyectos que se llevan a cabo simultáneamente entre Leciñena S.A y la Universidad de Zaragoza.

Analizado el modelo de partida, se observan zonas en las que se debe de mejorar su comportamiento resistente. Para ello se modifica una de ellas y se vuelve a calcular y analizar los resultados. Siendo estos positivos se procede a optimizar la otra que también es crítica y “lanzando” otra vez a cálculo. El resultado es bueno.

Estudiados todos los resultados de las modificaciones se observa que el nuevo modelo planteado distribuye mejor las tensiones y presenta un peso total menor que el modelo original.

Hay que tener en cuenta futuras líneas de investigación que seguramente podrían optimizar pesos de la estructura y modificación de su estructura resistente utilizando acero avanzados (que son aquellos que tiene alta y ultraalta resistencia), aceros que poseen una resistencia específica mucho mejor que los tradicionales.

8.- BIBLIOGRAFÍA

- 1.- **HIBBITT, KARLSSON & SORENSEN**, *Abaqus/Standard*, versión 5.8, Theory Manual, HIBBITT, KARLSSON&SORENSEN INC., 1998.
- 2.- **HIBBITT, KARLSSON & SORENSEN**, *Abaqus/Post* versión 5.8, Theory Manual, HIBBITT, KARLSSON&SORENSEN INC., 1998.
- 3.- **S.P. TIMOSHENKO**, *Theory of elastic stability*. 2ª Ed., Mc Graw- Hill, N.Y. 1961.
- 4.- **L. ORTIZ BERROCAL**, *Resistencia de materiales*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Madrid, 1980.
- 5.- **L. ORTIZ BERROCAL**, *Elasticidad*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Madrid, 1980.
- 6.- **L. CASTEJÓN, M.A. JIMÉNEZ, D. REVUELTA Y A. MIRAVETE (1998)**. *Los materiales compuestos frente a los requerimientos existentes para el transporte terrestre*. Revista Internacional de Información Tecnológica. La Serena (Chile), Vol.9, Nº2, pp. 207-219, 1998. ISSN: 0716-8756
- 7.- **E. LARRODÉ, A. MIRAVETE AND L. CASTEJÓN. (1998)**. *Design and Optimisation of a Lightweight Refrigeric Semitrailer*. *International Journal of Vehicle Design*. Heavy vehicles systems. (U.K.), Vol. 5, Nº 1, pp. 45-67. ISSN. 1351-7848.
- 8.- **E. LARRODÉ, L. CASTEJÓN Y A. MIRAVETE. (1996)**. *Analysis of Large Structures for Ground Transportation Applications*. 29th ISATA International Symposium on Automotive Technology and Automation. Florencia (Italia). 3-6 Junio 1996. Road and Vehicle Safety, pp. 345-351,
- 9.- **HIBBITT, KARLSSON & SORENSEN**, *Abaqus/Standard manual 5.8*, vol. I, vol. II, vol. III, HIBBITT, KARLSSON&SORENSEN INC., 1998.
- 10.- **ANDERS EKBERG**, *Course of fatigue design*. Department of solid mechanics, Chalmers University of technology, 2000/01.

9.- ENLACES

<http://www.apta.com.es/pdf/aceros.pdf>

<http://www.lecinena.com/ES/home.asp>

http://www.construmatica.com/construpedia/Calidades_de_los_Aceros

http://www.arcelormittal.com/sections/fileadmin/redaction/PV_ES/table_steel_grade/Tabla12.pdf

<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3319/4/55868-4.pdf>

http://books.google.es/books?id=29fAnJQBV10C&pg=PA79&dq=acero+s355&hl=es&ei=_irYTOzJOJWQ4QajwqX7Bg&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=0CDAQ6AEwAA#v=onepage&q=acero%20s355&f=false

<http://www.google.es/#q=acero+s355&hl=es&biw=1280&bih=685&tbs=bks:1&ei=KyvYTKSmCNOA5Aa93Lm1Bw&start=10&sa=N&fp=7a1eae15f997bb1a>

<http://www.find-docs.com/ACERO-ST-52~2.html>

http://www.find-docs.com/view.php?url=http://www.arcelormittal.com/sections/fileadmin/redaction/PV_ES/table_steel_grade/Tabla12.pdf&searchquery=ACERO+ST+52

[http://www.find-docs.com/view.php?url=http://www.acerosims.com/ims/aceros_ims/cmscontent.nsf/DocumentsByIDWeb/7F2CB4/\\$File/ACEROS%2520ESPECIALES%2520Cat%25C3%25A1logo.pdf&searchquery=ACERO+ST+52](http://www.find-docs.com/view.php?url=http://www.acerosims.com/ims/aceros_ims/cmscontent.nsf/DocumentsByIDWeb/7F2CB4/$File/ACEROS%2520ESPECIALES%2520Cat%25C3%25A1logo.pdf&searchquery=ACERO+ST+52)

http://www.find-docs.com/view.php?url=http://www.thyssenkruppmaterials-iberica.es/htm/pdf_aconstruccion.pdf&searchquery=ACERO+ST+52

<http://www.find-docs.com/view.php?url=http://www.metalasa.es/folleto.pdf&searchquery=A CERO+ST+52>