

PROYECTO FIN DE CARRERA

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE ZONAS
CRÍTICAS EN VEHÍCULO BASCULANTE DE
ACERO MEDIANTE LA TÉCNICA DE
SUBMODELING



Ingeniería Técnica Industrial

**Área de Ingeniería Mecánica
Departamento de Ingeniería Mecánica
Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial
Universidad de Zaragoza**

*Autor: José Antonio Gracia Cortés
Director: Dr. Ing. Ind. Marco Carrera Alegre
Marzo 2011*

A mis padres.

Agradecer de forma especial la ayuda prestada en todo momento por Marco Carrera Alegre, sin cuyo trabajo, colaboración y dedicación, la realización del proyecto no podría haberse llevado a cabo.

Agradecer también a los becarios del área de ingeniería mecánica la ayuda prestada en el manejo de Patran, Abaqus y demás herramientas de cálculo y sin cuyas indicaciones este proyecto no podría haberse realizado .

ÍNDICE

MEMORIA TÉCNICA

1	INTRODUCCIÓN	3
1.1	Título del proyecto	5
1.2	Objeto	5
2	MODELO DE ELEMENTOS FINITOS	6
2.1	Fundamentos y formulación del M.E.F.	6
2.2	Como trabaja el método de los elementos finitos en la practica	7
2.3	Preproceso y generación de la malla	8
2.4	Cálculo y resolución de sistemas de ecuaciones:	9
2.5	Postproceso	9
2.6	Aplicaciones del método de los elementos finitos (MEF)	9
3	PATRAN	11
4	ABAQUS	14
5	DESCRIPCIÓN DE LAS FASES DEL PROYECTO	15
5.1	Importar la geometría	16
5.2	Transformar la geometría	17
5.3	Mallar	21
5.4	Materiales y propiedades	27
5.5	Condiciones de contorno y casos de carga	31
5.6	Análisis de tensiones y resultados obtenidos	32
5.6.1	Submodelo sin cordones de soldadura	33
5.6.2	Submodelo con cordones de soldadura	42
5.6.3	Comparativa entre el submodelo sin cordones de soldadura y el submodelo con cordones de soldadura	52
6	OPTIMIZACIONES	55
6.1	Optimización 1	55
6.2	Optimización 2	60
6.3	Optimización 3	64
6.4	Optimización 4	68
6.5	Optimización 5	68
7	CONCLUSIONES	69
8	BIBLIOGRAFÍA	71

1 INTRODUCCIÓN

El transporte por carretera es el medio que ostenta mayor protagonismo en la distribución de mercancías, cumpliendo una función insustituible como eslabón de las cadenas de transporte para otros medios. Este medio de transporte representa el 81,74% del tráfico interior de mercancías, frente a un 4,22% del ferrocarril y un 11,55% del transporte marítimo, manteniéndose este desajuste en relación a los años anteriores.

En cualquier sistema logístico se intenta optimizar los subsistemas que forman parte de la cadena de transporte. Este hecho crea la necesidad de aumentar el peso de mercancía en cada transporte, permitiendo una reducción de los costes y un ahorro de energía.

En la línea del transporte de productos por carretera, un factor importante que debe ser considerado es el peso que se desplaza en cada trayecto, y que no repercute en una optimización del sistema de transporte. Este peso, que debe analizarse, es el peso debido a los elementos constructivos que forman el vehículo y que están íntimamente relacionados con la capacidad de carga que puede trasladar el vehículo.

Los vehículos pesados utilizados en el transporte, se basan en vehículos de gran tonelaje rígidos o articulados. El peso máximo autorizado (PMA) del vehículo en cada uno de ellos está limitado por disposiciones legales, mientras que el peso en vacío (TARA) está dado por los elementos utilizados en la construcción de dicho vehículo. Por tanto, puesto que el peso propio del vehículo influye directamente sobre la capacidad de carga, el objetivo de aumentar la capacidad de carga, deriva en reducir el peso de los materiales utilizados. Esta reducción del peso de los materiales que forman el vehículo, se obtiene de una solución de compromiso con la resistencia mecánica de la estructura.

En el diseño de chasis de vehículos industriales se han ido utilizando diversas metodologías, con la finalidad de acercarse al máximo en las previsiones de comportamiento de los chasis sometidos a esfuerzo. Cada vez más se hace necesaria una optimización en los cálculos, permitiendo predecir con mayor exactitud, cuáles van a ser las tensiones y las deformaciones a las que va a estar sometido un chasis en las múltiples sollicitaciones a que se enfrenta en su utilización.

En el presente proyecto se aborda la metodología utilizada en el proyecto de diseño de un vehículo comercial haciendo uso del método de elementos finitos (PATRAN) implementado en programas de cálculo informático (ABAQUS).

Chasis de vehículos

Un chasis se podría definir como una estructura cuyo propósito es el de conectar rígidamente la suspensión delantera y la trasera y al mismo tiempo ofrecer puntos de amarre para los diferentes sistemas del vehículo, así como el de proteger al conductor frente a la colisión. Los diseños rara vez se someten a tensiones del orden del esfuerzo último. Lo determinante es la no deformación o en otras palabras la rigidez.

El chasis debe ser rígido para deformarse poco y así no alterar las características de la conducción. La construcción de un chasis es el compromiso entre la rigidez, el peso y el espacio, todo ello teniendo en cuenta el costo final. Deben considerarse la resistencia estática y la fatiga, la estabilidad de los miembros estructurales, la capacidad de carga de las uniones, la fabricación y el montaje.

Uno de los mayores desafíos en la industria de fabricación de chasis para diferentes aplicaciones, es resolver la demanda creciente de este tipo de vehículos y mejorar día a día sus actuaciones, bajar de peso, incrementar la vida útil de sus componentes, mejorar los procesos de fabricación, diseño y prestación, incorporando nuevos materiales, utilizando herramientas informáticas que permitan acelerar los procesos y lograr diseños más resistentes, de menor peso, optimizados de tal manera que los costos de las unidades sean razonables para el cliente y para el fabricante, en un período corto de tiempo.

Debido a que el chasis es un elemento complejo, se requiere un estudio especial desde el punto de vista de diseño geométrico.

Para su estudio se hace necesario el empleo de modernas técnicas de análisis numérico y medición experimental. Sobre el chasis se apoyan directa o indirectamente todos los conjuntos y órganos de trabajo que conforman el vehículo. El chasis debe resistir y tener la rigidez suficiente para soportar las cargas máximas que aparecen durante el trabajo del vehículo, para determinar estas cargas se realizan las pruebas en regímenes extremos de funcionamiento, que si bien a lo largo de la vida del vehículo no ocupan gran parte de la misma, provocan grandes esfuerzos debidos a la acción de las fuerzas de inercia de las diversas masas.

Estos regímenes extremos que aparecen, fundamentalmente en los desplazamientos de la máquina, se tienen en cuenta en los cálculos de resistencia, no considerándose los mismos para los cálculos de fiabilidad o durabilidad.

Al chasis se le puede considerar como la columna vertebral del vehículo y forma parte de los principales componentes dentro del conjunto, al que se incluyen ejes, suspensiones, motor, cabina y tráiler.

1.1 TÍTULO DEL PROYECTO

***ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE ZONAS CRÍTICAS EN VEHÍCULO
BASCULANTE DE ACERO MEDIANTE LA TÉCNICA DEL SUBMODELING***

1.2 OBJETO

El presente proyecto fin de carrera tiene como objetivo localizar y analizar los puntos donde se presentan mayores esfuerzos en un submodelo de un chasis para basculante de cilindros centrales.

Para el cálculo justificativo del submodelo han sido desarrollados modelos numéricos basados en el Método de los Elementos Finitos mediante los programas de diseño y cálculo PATRAN y ABAQUS capaces de simular el comportamiento de las piezas analizadas, sujetas a unas determinadas condiciones de contorno, ante las cargas aplicadas.

De este modo, se obtendrá información sobre el estado de las deformaciones y tensiones existentes en cada uno de los componentes del submodelo determinando así las zonas más desfavorables.

Una vez conocidos estos datos, se podrán plantear soluciones que permitan lograr el objetivo de aligerar el peso del chasis.

Entre otras posibles soluciones podrían estar considerar otros espesores en las piezas, así como eliminar refuerzos o sustituir el material por otro más ligero, consiguiendo siempre que las cargas aplicadas sean superadas con garantía.

Los submodelos a analizar serán dos:

El primero un submodelo sin cordones de soldadura y el segundo incluyendo dichos cordones analizando de esta manera la influencia de estos cordones en el material y por tanto en el submodelo.

2 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

2.1 FUNDAMENTOS Y FORMULACIÓN DEL M.E.F.

El **método de los elementos finitos** (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física.

El MEF está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. El MEF es utilizado en el diseño y en la mejora de productos y aplicaciones industriales, así como para muchas otras cosas.

La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, El MEF permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) —sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que caracterizan el comportamiento físico del problema— dividiéndolo en un número elevado de subdominios no-intersectantes entre sí denominados «elementos finitos».

El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados «nodos». Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama «mall».

Los cálculos se realizan sobre una mall» de puntos (llamados nodos), que sirven a su vez de base para discretización del dominio en elementos finitos. La generación de la mall» se realiza usualmente con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina preproceso.

De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas). La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Típicamente el método de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El método de los elementos finitos es muy

usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además el método es fácilmente adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (mecánica de fluidos computacional, CFD) o de campo electromagnético.

Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

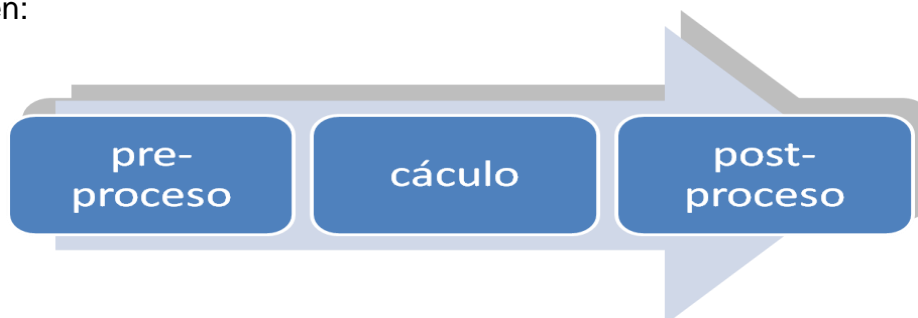
Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

2.2 COMO TRABAJA EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS EN LA PRACTICA

El MEF es un método numérico de resolución de ecuaciones diferenciales. La solución obtenida por MEF es sólo aproximada, coincidiendo con la solución exacta sólo en un número finito de puntos llamados **nodos**. En el resto de puntos que no son nodos, la solución aproximada se obtiene interpolando a partir de los resultados obtenidos para los nodos, lo cual hace que la solución sea sólo aproximada debido a ese último paso.

El MEF convierte un problema definido en términos de ecuaciones diferenciales en un problema en forma matricial que proporciona el resultado correcto para un número finito de puntos e interpola posteriormente la solución al resto del dominio, resultando finalmente sólo una solución aproximada. El conjunto de puntos donde la solución es exacta se denomina conjunto nodos. Dicho conjunto de nodos forma una red, denominada malla formada por retículos. Cada uno de los retículos contenidos en dicha malla es un "elemento finito". El conjunto de nodos se obtiene dividiendo o discretizando la estructura en elementos de forma variada (pueden ser superficies, volúmenes y barras).

Desde el punto de vista de la programación algorítmica modular las tareas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante un programa MEF se dividen en:



2.3 PREPROCESO Y GENERACIÓN DE LA MALLA

Consiste en la definición de geometría, generación de la malla, las condiciones de contorno y asignación de propiedades a los materiales y otras propiedades. En ocasiones existen operaciones de regularización de la malla y preconditionamiento para garantizar una mejor aproximación o una mejor convergencia del cálculo.

La malla se genera y ésta en general consta de miles (e incluso centenares de miles) de puntos. La información sobre las propiedades del material y otras características del problema se almacena junto con la información que describe la malla.

Por otro lado las fuerzas se reasignan a los puntos de la malla. A los nodos de la malla se les asigna una densidad por todo el material dependiendo del nivel de la tensión mecánica u otra propiedad. Las regiones que recibirán gran cantidad de tensión tienen normalmente una mayor densidad de nodos (densidad de malla) que aquellos que experimentan poco o ninguno.

Puntos de interés: puntos de fractura previamente probados del material, cambios de sección, esquinas, detalles complejos, y áreas de elevada tensión. La malla actúa como la red de una araña en la que desde cada nodo se extiende un elemento de malla a cada nodo adyacente. Este tipo de red vectorial es la que lleva las propiedades del material al objeto, creando varios elementos.

Las tareas asignadas al preproceso son:

1. El continuo se divide, mediante líneas o superficies imaginarias en un número de elementos finitos.
2. Se supone que los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de “nodos”, situados en sus contornos. Los desplazamientos de estos nodos serán las incógnitas fundamentales del problema, tal y como ocurre en el análisis simple de estructuras por el método matricial.
3. Se toma un conjunto de funciones que definan de manera única el campo de desplazamientos dentro de cada “elemento finito” en función de los desplazamientos nodales de dicho elemento.
4. Estas funciones de desplazamientos definirán entonces de manera única el estado de deformación del elemento en función de los desplazamientos nodales. Estas deformaciones, junto con las propiedades constitutivas del material, definirán a su vez el estado de tensiones en todo el elemento, y por consiguiente en sus contornos.
5. Se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, que equilibre las tensiones en el contorno y cualesquiera cargas repartidas, resultando una relación entre fuerzas y desplazamientos de la forma $F = k \times u$, que como se ve es similar a la del cálculo matricial.

2.4 CÁLCULO Y RESOLUCIÓN DE SISTEMAS DE ECUACIONES:

En un problema mecánico lineal no-dependiente del tiempo, como un problema de análisis estructural estático o un problema elástico, el cálculo generalmente se reduce a obtener los desplazamientos en los nodos y con ellos definir de manera aproximada el campo de desplazamientos en el elemento finito.

Cuando el problema es no-lineal en general la aplicación de las fuerzas requiere la aplicación incremental de las fuerzas y considerar incrementos numéricos, y calcular en cada incremento algunas magnitudes referidas a los nodos. Algo similar sucede con los problemas dependientes del tiempo, para los que se considera una sucesión de instantes, en general bastante cercanos en el tiempo, y se considera el equilibrio instantáneo en cada instante. En general estos dos últimos tipos de problemas requieren un tiempo de cálculo sustancialmente más elevado que en un problema estacionario y lineal.

2.5 POSTPROCESO

Actualmente, el MEF es usado para calcular problemas tan complejos, que los ficheros que se generan como resultado del MEF tienen tal cantidad de datos que resulta conveniente procesarlos de alguna manera adicional para hacerlos más comprensible e ilustrar diferentes aspectos del problema. En la etapa de postproceso los resultados obtenidos de la resolución del sistema son tratados, para obtener representación gráficas y obtener magnitudes derivadas, que permitan extraer conclusiones del problema.

El post-proceso del MEF generalmente requiere software adicional para organizar los datos de salida, de tal manera que sea más fácilmente comprensible el resultado y permita decidir si ciertas consecuencias del problema son o no aceptables. En el cálculo de estructuras por ejemplo, el post-proceso puede incluir comprobaciones adicionales de si una estructura cumple los requisitos de las normas pertinentes, calculando si se sobrepasan tensiones admisibles, o existe la posibilidad de pandeo en la estructura.

2.6 APLICACIONES DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Comúnmente se usa el método de los elementos finitos para determinar los esfuerzos y desplazamientos en sistemas mecánicos. Pero además es usado también de manera rutinaria en el análisis de muchos otros tipos de problemas, tales como transferencia de calor, dinámica de fluidos, electromagnetismo e incluso medicina. Mediante los elementos finitos se pueden manejar sistemas complejos cuyas soluciones analíticas son difícilmente encontradas.

Ventajas:

Las grandes ventajas del cálculo por ordenador se pueden resumir en:

- Hace posible el cálculo de piezas que por el gran número de operaciones que su resolución presenta son, en la práctica, inabordables para el cálculo manual.
- En la mayoría de los casos reduce a límites despreciables el riesgo de errores operativos.

Limitaciones:

En general el MEF tal como se usa actualmente tiene algunas limitaciones:

- El MEF calcula soluciones numéricas concretas y adaptadas a unos datos particulares de entrada, no puede hacerse un análisis de sensibilidad sencillo que permita conocer como variará la solución si alguno de los parámetros se altera ligeramente. Es decir, proporciona sólo respuestas numéricas cuantitativas concretas no relaciones cualitativas generales.

El MEF proporciona una solución aproximada cuyo margen de error en general es desconocido. Si bien algunos tipos de problemas permiten acotar el error de la solución, debido a los diversos tipos de aproximaciones que usa el método, los problemas no-lineales o dependientes del tiempo en general no permiten conocer el error.

- En el MEF la mayoría de aplicaciones prácticas requiere mucho tiempo para ajustar detalles de la geometría, existiendo frecuentemente problemas de mal condicionamiento de las mallas, desigual grado de convergencia de la solución aproximada hacia la solución exacta en diferentes puntos, etc. En general una simulación requiere el uso de numerosas pruebas y ensayos con geometrías simplificadas o casos menos generales que el que finalmente pretende simularse, antes de empezar a lograr resultados satisfactorios.

3 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:

La geometría del objeto a estudio se define por medio de coordenadas u otros elementos de ayuda auxiliar (rectas, circunferencia, etc.,..).

Discretización:

El sólido que se quiere 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 siguiente figura se muestran los distintos tipos de elementos:

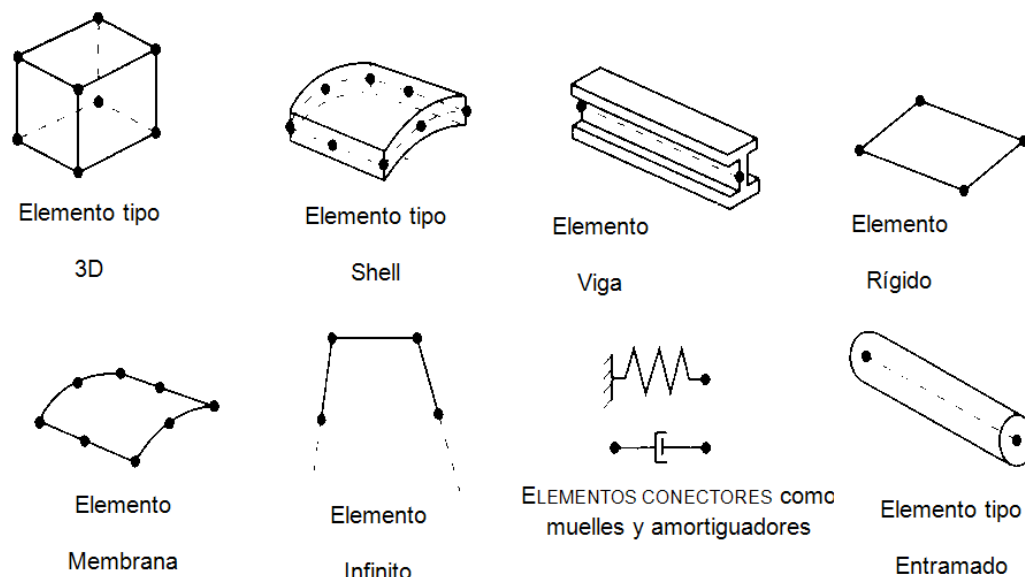


Figura 1: Tipos de elementos finitos

**Los elementos utilizados para la realización de este proyecto han sido elemento tipo Shell 2D para las piezas del semirremolque y elemento tipo Solid 3D para los cordones de soldadura.*

Materiales:

Se define la característica del material del cual esta hecho nuestro sólido (módulo elástico, coeficiente de poisson, 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 especifican 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.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE ZONAS CRÍTICAS EN VEHÍCULO BASCULANTE DE ACERO MEDIANTE LA TÉCNICA DE SUBMODELING

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 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 se quiere 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.

Como el usuario no puede manejar de forma efectiva todo este volumen de datos es en este momento cuando intervienen los postprocesadores.

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.

5 DESCRIPCIÓN DE LAS FASES DEL PROYECTO

A continuación se muestra un esquema de las diferentes fases de que consta el proyecto. A continuación del esquema se muestra una descripción más detallada de cada una de ellas.



Figura 2: Esquema fases del proyecto

CHASIS EN ACERO



Figura 3: chasis en acero

5.1 IMPORTAR LA GEOMETRÍA

A partir de un archivo .IGS ya dibujado se importa la geometría al módulo de preproceso Patran. (Fig.1).

Este archivo muestra un modelo que se encuentra en 3D y como se verá más adelante se deberá transformar en 2D para realizar el mallado y posterior cálculo.

Para ello, las piezas del submodelo se convierten en piezas de espesor 0.

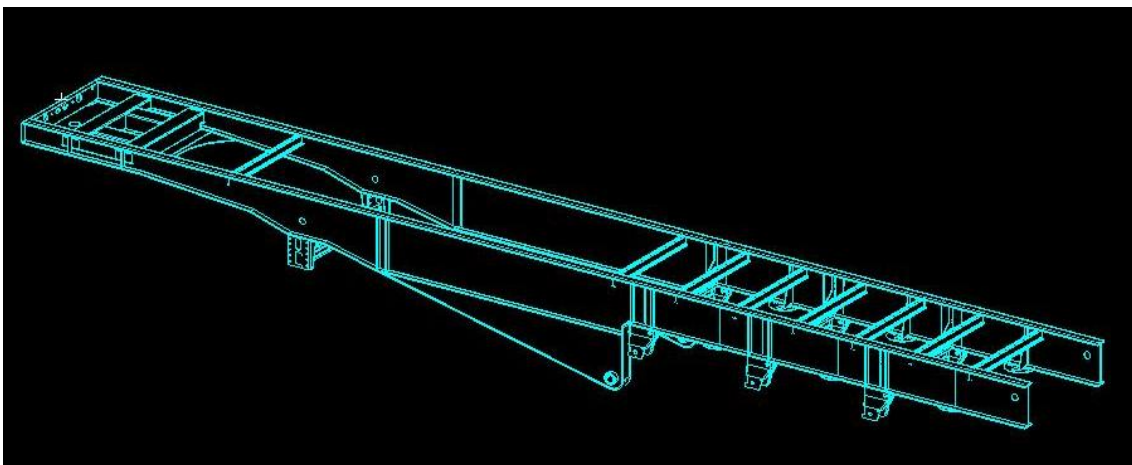


Figura 4: geometría modelo global

5.2 TRANSFORMAR LA GEOMETRÍA

En primer lugar se debe cortar el modelo para mostrar únicamente el campo de aplicación del proyecto.

Además, la simetría del modelo permite trabajar en una mitad del mismo, por lo que además de cortarlo transversalmente, se podrá cortar longitudinalmente.

A continuación se muestra el detalle de la zona sobre la que se ha actuado.

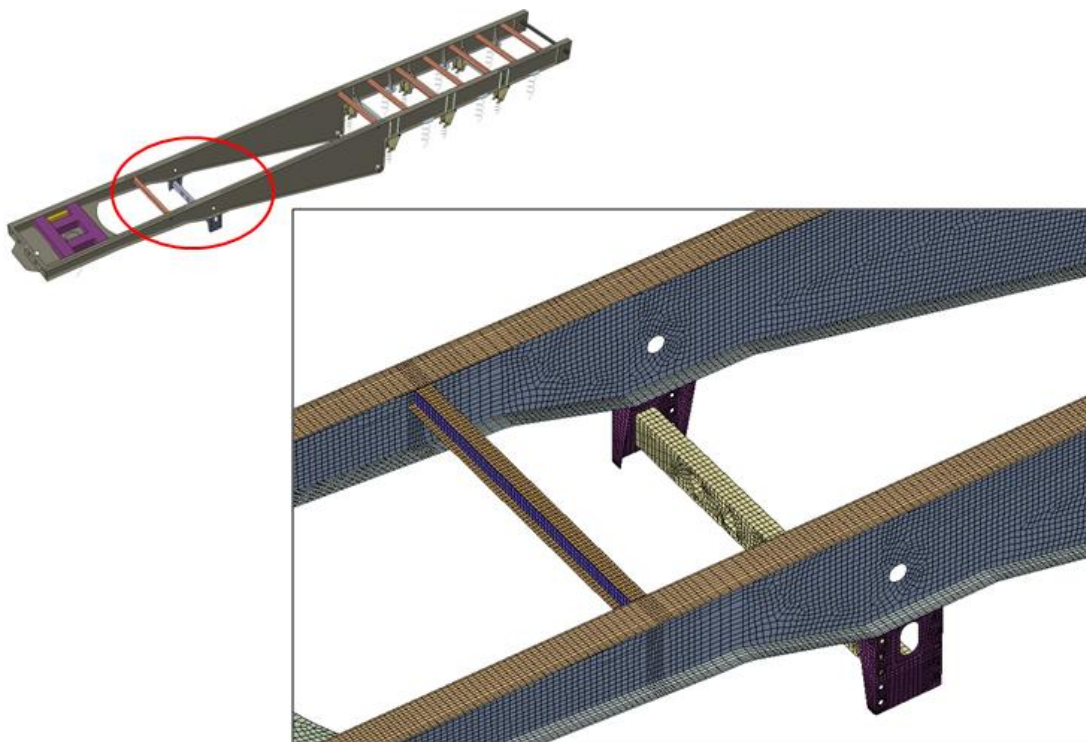


Figura 5: detalle zona del submodelo

La geometría viene dibujada en 3 dimensiones, por lo que se debe convertir a 2 dimensiones para realizar las operaciones pertinentes para llevar a cabo el análisis.

Por ello, una vez cortada la sección que se quiere estudiar, se debe convertir la geometría a 2 dimensiones. Para ello se toman, en unos casos, las líneas medias de las piezas en 3 dimensiones y en otros las líneas superiores o inferiores, según proceda.

Con ello se obtiene un submodelo en 2 dimensiones formado por las alas inferior y superior, el alma, el soporte y el travesaño, que serán las piezas a analizar en este proyecto.

Con el fin de facilitar el trabajo del mallado, se debe dividir la geometría en más divisiones que las propias de cada pieza. Además esto ayudará también a la hora de incorporar los cordones de soldadura.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE ZONAS CRÍTICAS EN VEHÍCULO BASCULANTE DE ACERO MEDIANTE LA TÉCNICA DE SUBMODELING

Por ello, se trabajará con cada una de ellas por separado, para posteriormente unir las y obtener el submodelo total.

Los detalles de cada pieza se pueden ver en las figuras siguientes:

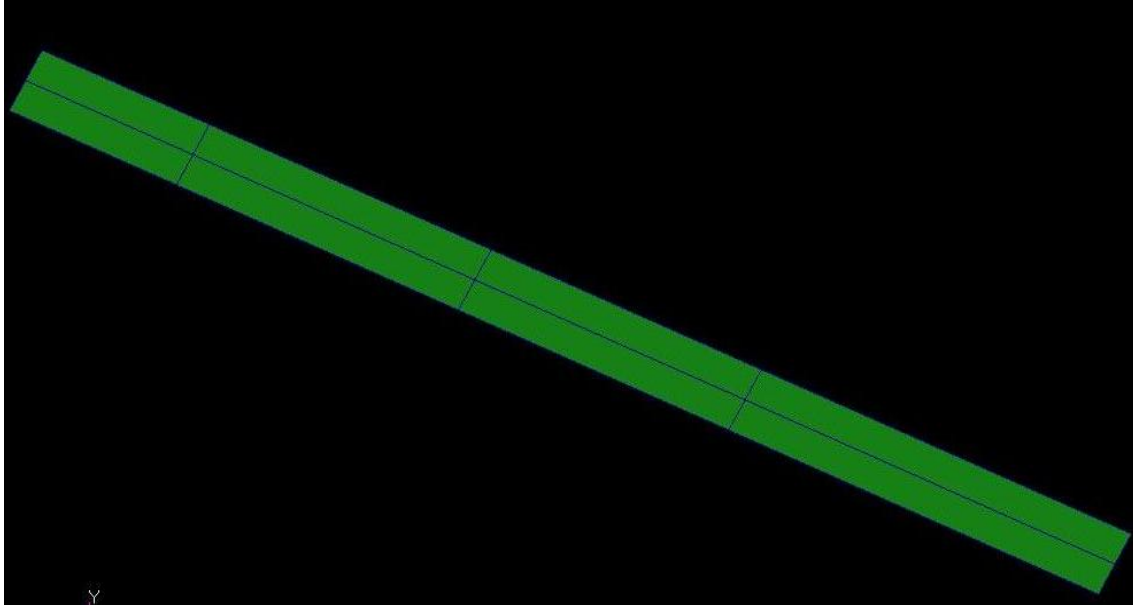


Figura 6: ala superior

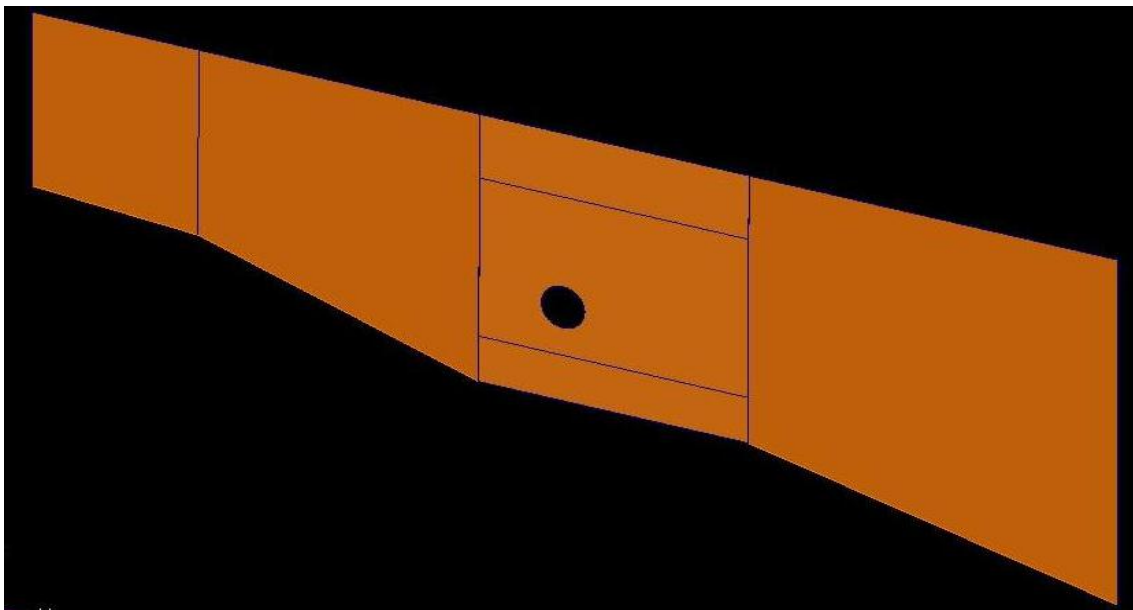


Figura 7: alma

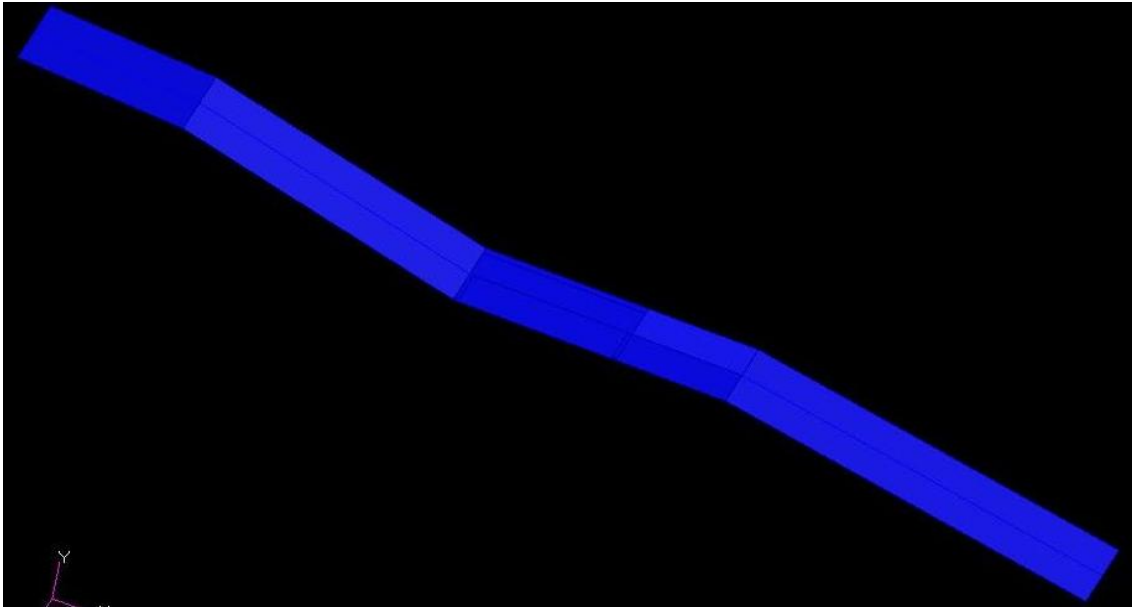


Figura 8: ala inferior

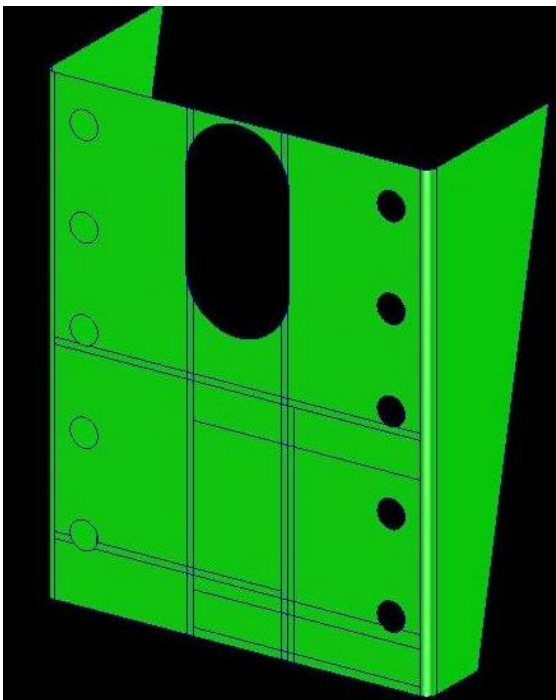


Figura 9: soporte

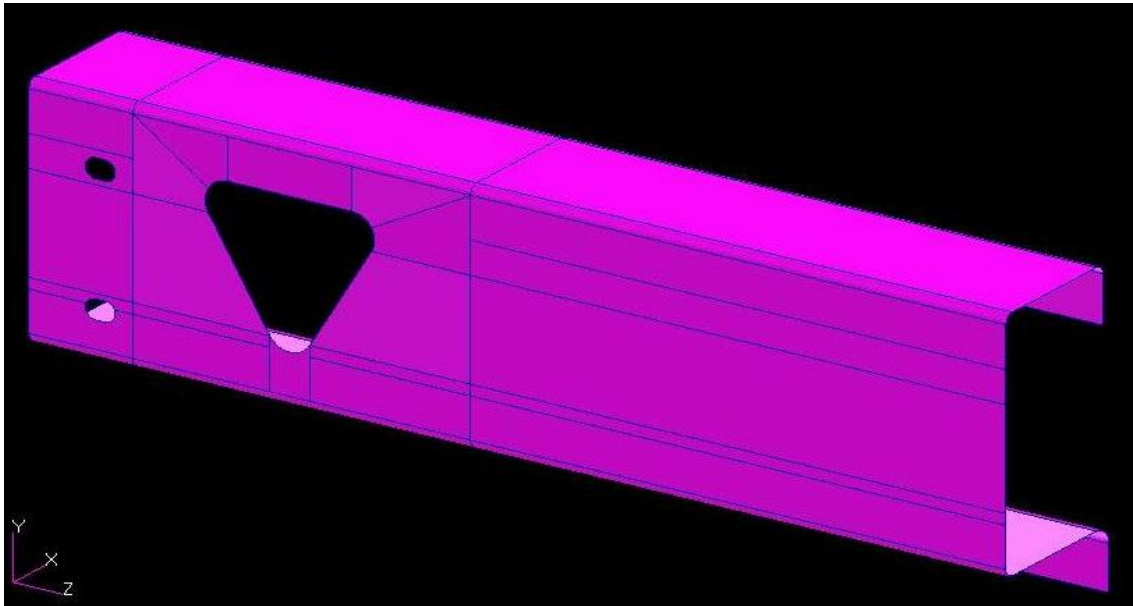


Figura 10: travesaño

El submodelo completo, una vez cortado, transformado a 2 dimensiones y dividida la geometría, quedará tal y como se muestra en la siguiente figura.

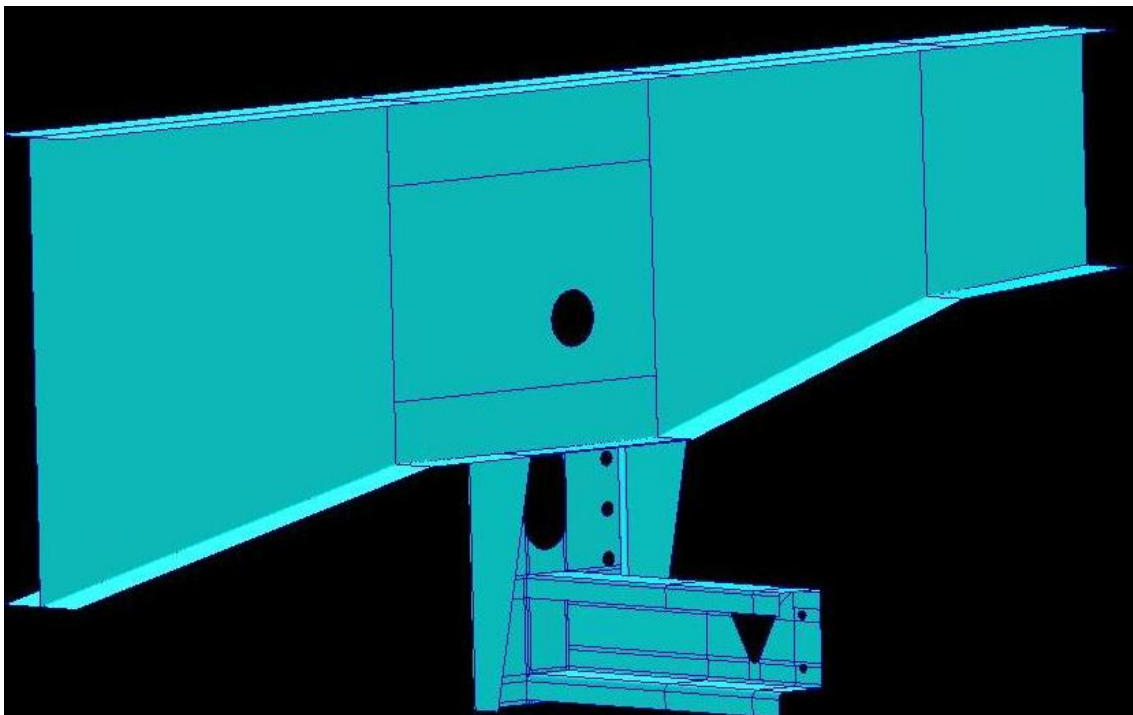


Figura 11: submodelo entero

5.3 MALLAR

Una vez obtenida la geometría deseada se procede con el mallado del submodelo. Para ello se actuará de manera análoga a la anterior y se mallará pieza a pieza aunque teniendo en cuenta que la malla de una pieza debe corresponderse con la malla de la pieza contigua.

En este caso, se ha empezado por el travesaño y a partir de ahí se ha ido completando la malla hasta conseguir mallar el submodelo entero.

Todos los elementos utilizados en el submodelo, a excepción de los utilizados para los cordones de soldadura, son elementos tipo plano (Surface) de forma cuadrangular (Quad de 4 nodos), y excepcionalmente alguno de forma triangular (Tria de 3 nodos) en las zonas más complejas de la malla.

Para los cordones de soldadura se ha utilizado el tipo de elemento Solid.

En cuanto a la forma del elemento utilizado, se ha procurado mallar con elementos lo más regulares posible, evitando los ángulos demasiado agudos en los elementos, siempre y cuando la geometría lo permitiera.

El tamaño de los elementos ha sido elegido de forma que fuesen lo suficientemente pequeños para que los resultados obtenidos fuesen lo más aproximados posible de acuerdo con la metodología utilizada por el método de los elementos finitos, pero lo suficientemente grandes para que el número de elementos totales del submodelo no fuese demasiado elevado ya que este factor está relacionado directamente con el tiempo de cálculo (un mayor número de elementos implica un mayor tiempo de cálculo).

Por ello, los elementos de menor tamaño se encuentran en piezas de área reducida mientras que en piezas de mayor superficie se ha optado por utilizar elementos de mayor tamaño.

Los diferentes tamaños de elementos que se han empleado en función del área de la zona mallada han variado desde los 2 milímetros en travesaño y partes del soporte hasta los 6 milímetros en partes del alma y alas.

Además del tamaño de la malla, también se debe tener en cuenta la forma de mallado. Por esto, se han empleado diferentes tipos de mallas en función de la geometría. En el caso de geometrías regulares el método utilizado ha sido **Isomesh**, mientras que en zonas irregulares el método utilizado ha sido **Paver**.

Los detalles de mallado de cada pieza se pueden ver en las figuras siguientes:

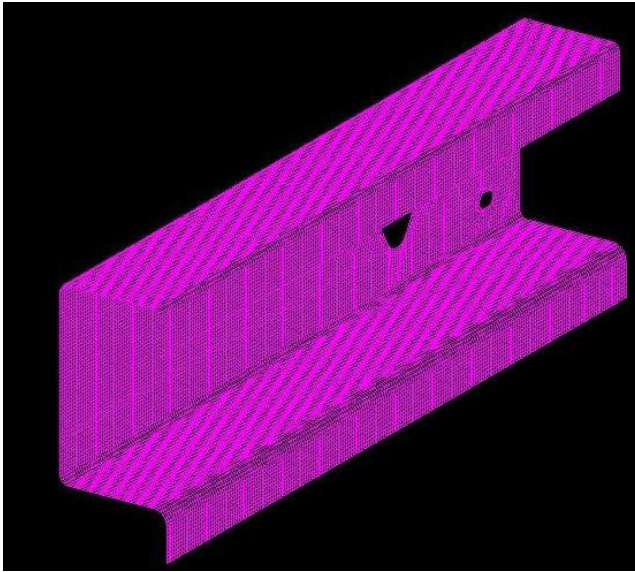


Figura 12: malla travesaño

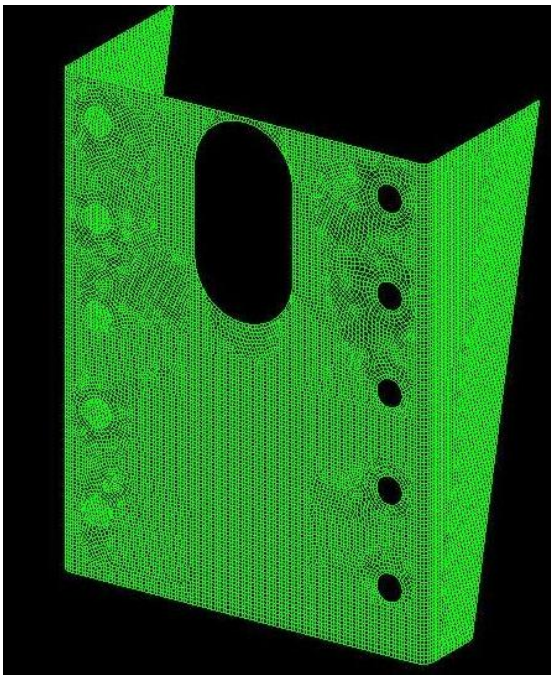


Figura 13: malla soporte



Figura 14: malla ala inferior

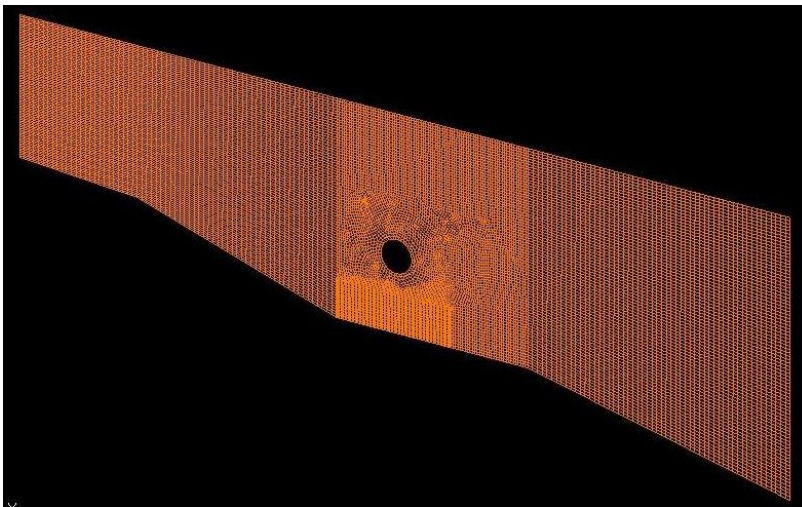


Figura 15: malla alma

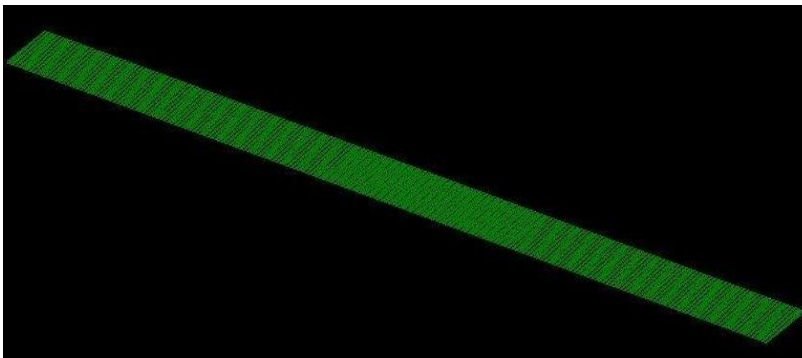


Figura 16: malla ala superior

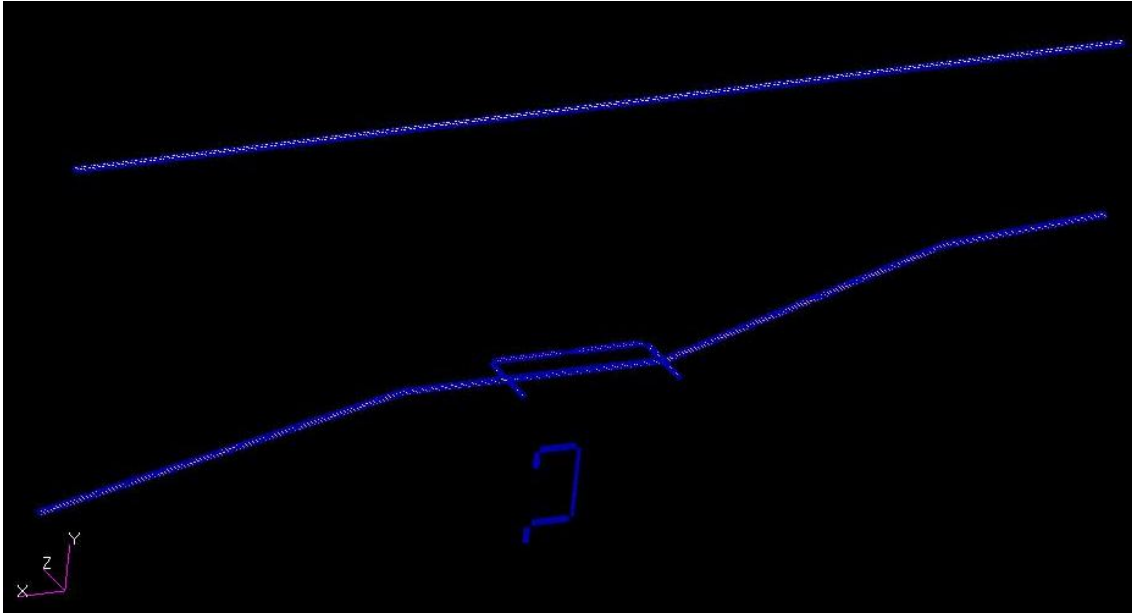


Figura 17: malla cordones de soldadura

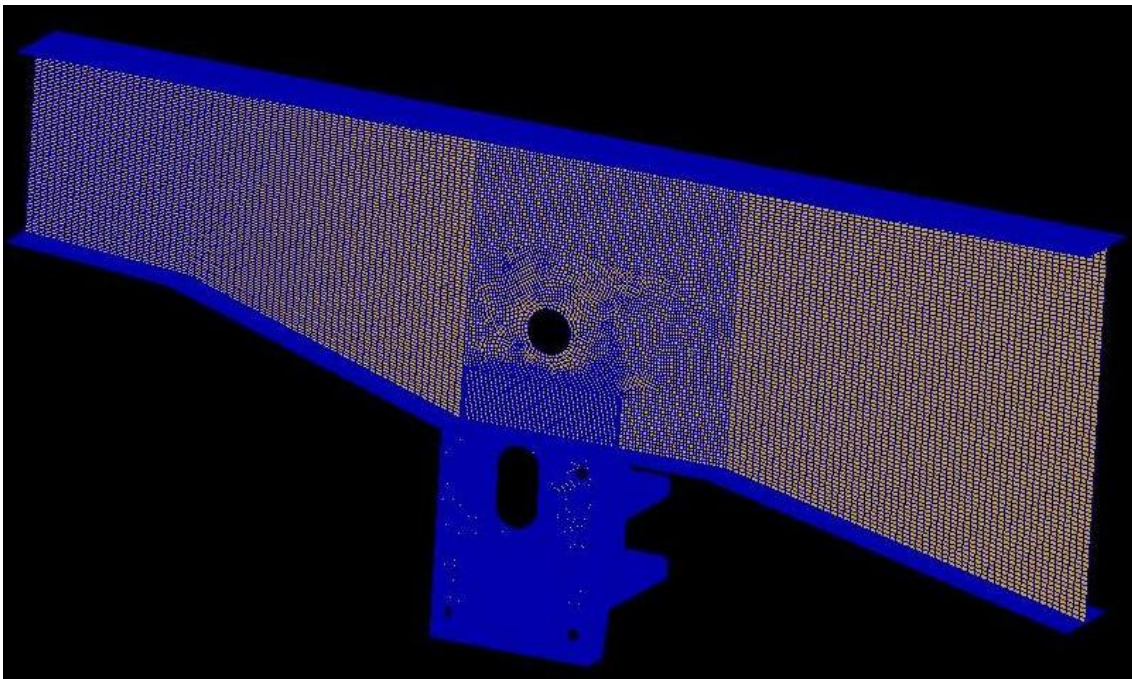


Figura 18: malla submodelo completo

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE ZONAS CRÍTICAS EN VEHÍCULO BASCULANTE DE ACERO MEDIANTE LA TÉCNICA DE SUBMODELING

En la tabla siguiente se indica el número de elementos que conforman cada pieza y el total de elementos de los que consta el submodelo.

PIEZA	Nº ELEMENTOS
TRAVESAÑO	28.533
SOPORTE	19.262
ALA INFERIOR	9.252
ALMA	22.874
ALA SUPERIOR	6.615
CORDONES	7.084
TOTAL	93.620

Tabla 1

El total de elementos que componen el submodelo son 93.620, que es un número digno de reseñar si se tiene en cuenta que el modelo global lo componen 161.582 elementos. Así pues, para una parte pequeña del modelo se han empleado más de la mitad de elementos que para el modelo global. Esto permitirá analizar con gran precisión los esfuerzos a los que está sometida cada zona de las piezas que forman el submodelo.

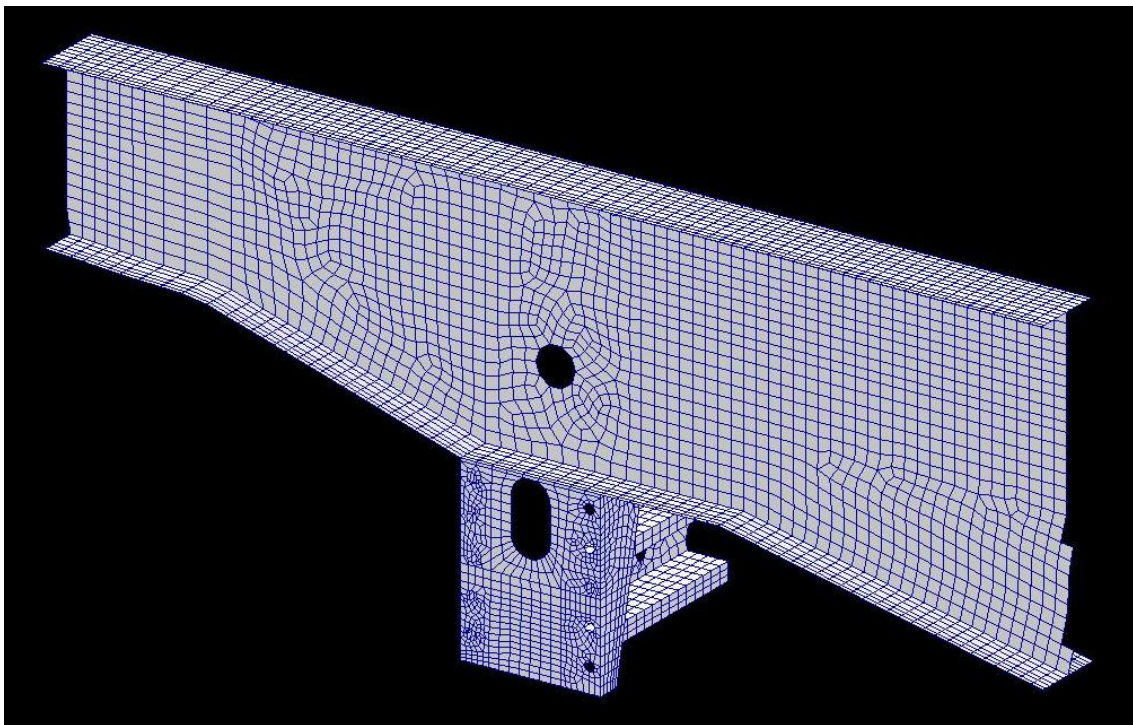


Figura 19: malla original

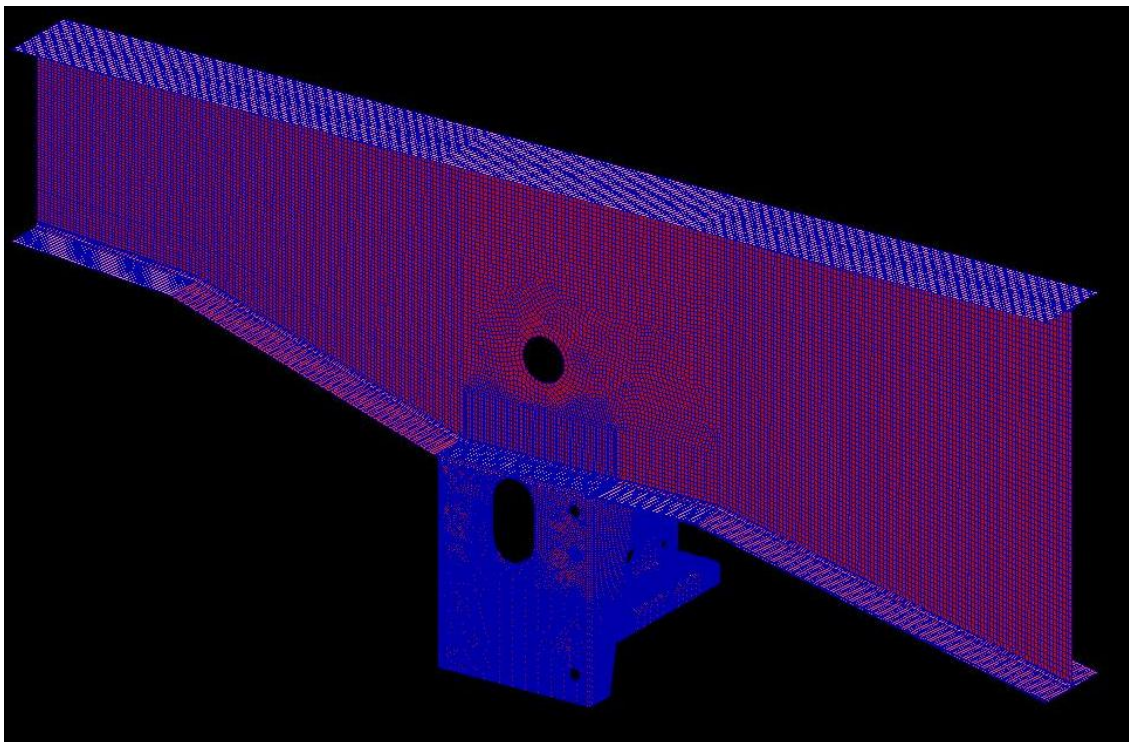


Figura 20: malla submodelo

Aunque a simple vista, se puede apreciar la diferencia en el tamaño de elementos, a continuación se presentan dos ejemplos con mayor detalle en los que se puede apreciar la diferencia de tamaño de elemento empleado en el submodelo respecto del empleado en el modelo global.

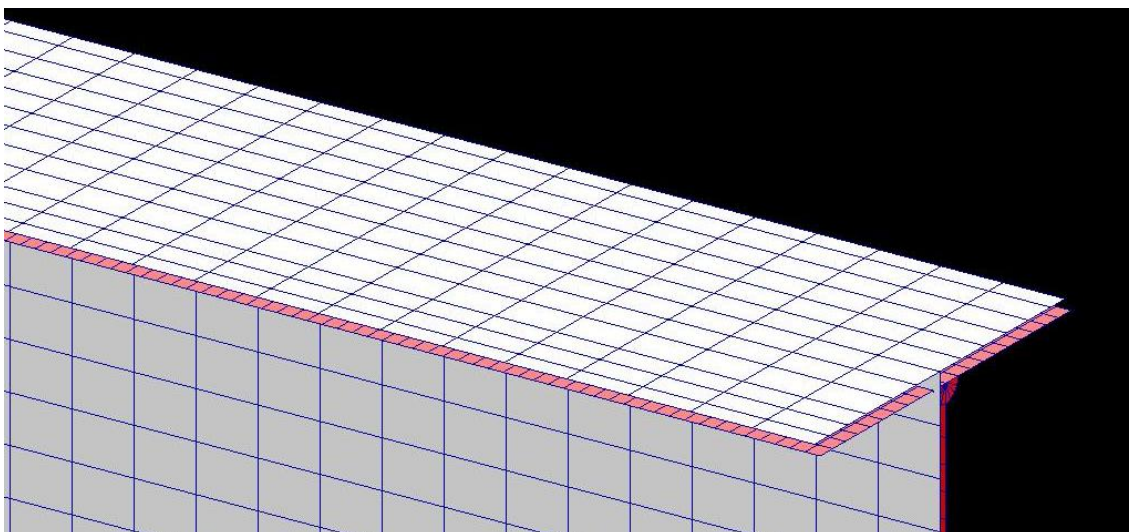


Figura 21: comparación tamaño de elementos

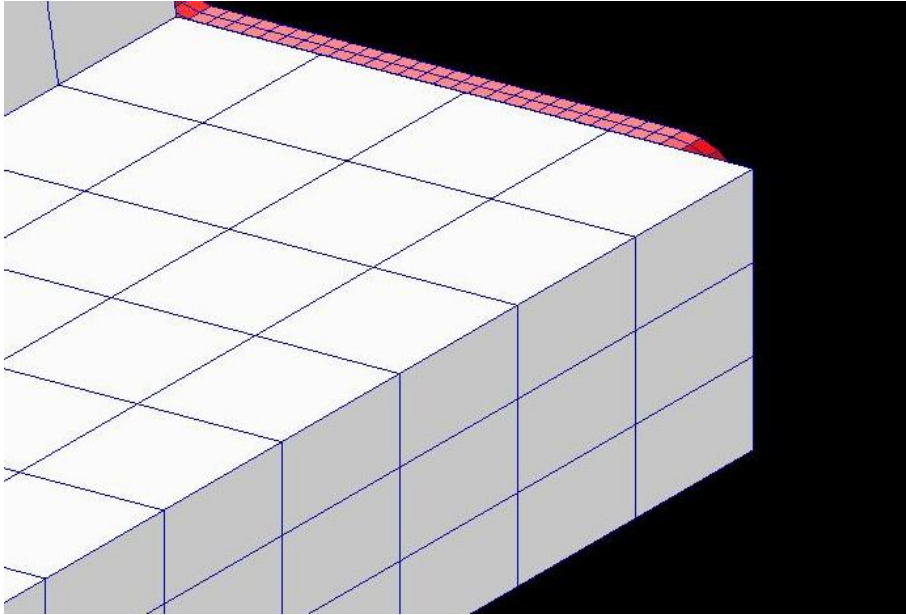


Figura 22: comparación tamaño de elementos 2

5.4 MATERIALES Y PROPIEDADES

ACERO

En este punto se van a describir los materiales utilizados durante la realización del proyecto.

La estructura del submodelo del chasis del semirremolque se realizará de Acero S-275 y S-355.

El material de aporte para los cordones de soldadura se definirá más adelante.

A continuación se especifica el material utilizado para cada pieza del submodelo:

PIEZA	ACERO UTILIZADO
TRAVESAÑO	S-275
SOPORTE	S-275
ALA INFERIOR	S-355
ALMA	S-355
ALA SUPERIOR	S-355
CORDONES	Cordón de soldadura

Tabla 2

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE ZONAS CRÍTICAS EN VEHÍCULO BASCULANTE DE ACERO MEDIANTE LA TÉCNICA DE SUBMODELING

Las propiedades necesarias para la correcta definición de cada uno de los materiales y su posterior utilización en los cálculos mediante el método de los elementos finitos figuran en la siguiente tabla:

PROPIEDADES		UNIDADES
E	Módulo elástico	MPa
N	Coefficiente de Poisson	adimensional
P	Densidad	Kg/mm ³
R _p	Límite elástico (As1 %)	MPa
R _m	Resistencia mecánica(As2 %)	MPa
As ₁	% de alargamiento dado para cada valor de R _p	Valor en %
As ₂	% de alargamiento dado para cada valor de R _m	Valor en %

Tabla 3

PROPIEDADES*	VALORES TOMADOS
E	210.000 MPa
ν	0.3
P	$7.8 \cdot 10^{-6}$ Kg/mm ³

Tabla 4

* (comunes a todos los aceros)

A continuación se detalla cada uno de los materiales mencionados anteriormente:

Acero S-355: Es el material asignado a las alas y al alma. En este caso se tienen unos valores de $R_p = 355$ Mpa (para un $A_{s1} = 0.2$ %) y $R_m = 550$ Mpa (para $A_{s2} = 26$ %).

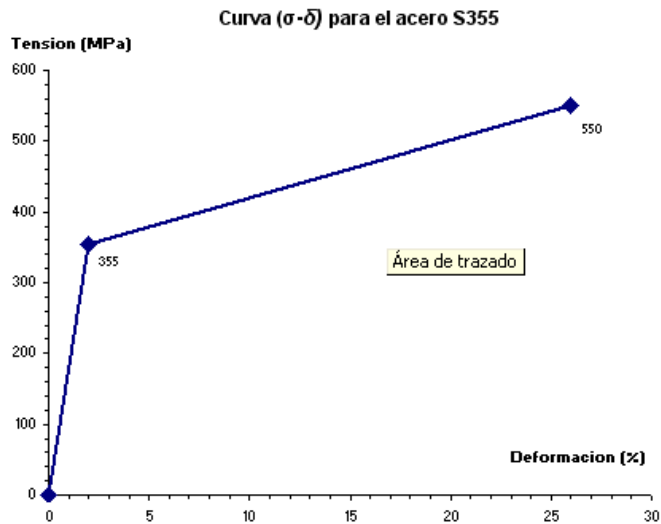


gráfico 1

Acero S-275: Es el material asignado al travesaño y al soporte. En este caso se tienen unos valores de $R_p = 275$ Mpa (para un $A_{s1} = 0.2$ %) y $R_m = 450$ Mpa (para $A_{s2} = 26$ %).

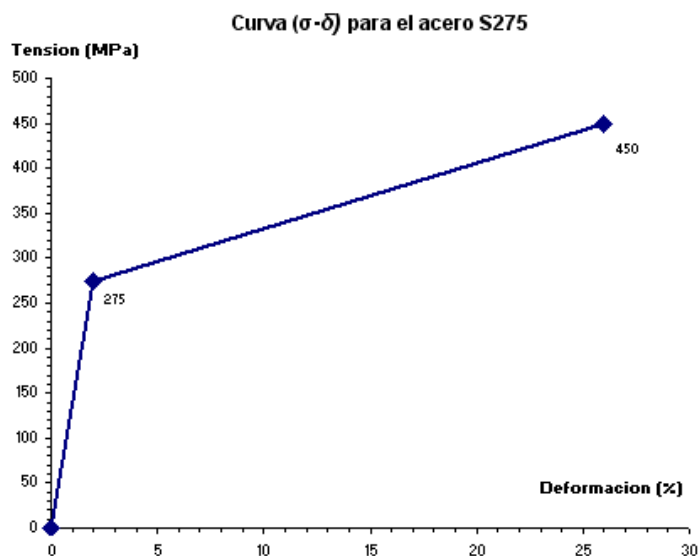


gráfico 2

Cordón de soldadura: Es el material asignado a los cordones de soldadura existentes entre las zonas de unión de los componentes del submodelo. Presenta unos valores de la curva σ - ϵ de $R_p = 410$ Mpa (para un $A_{s1} = 0.2 \%$) y $R_m = 560$ Mpa (para $A_{s2} = 25 \%$).

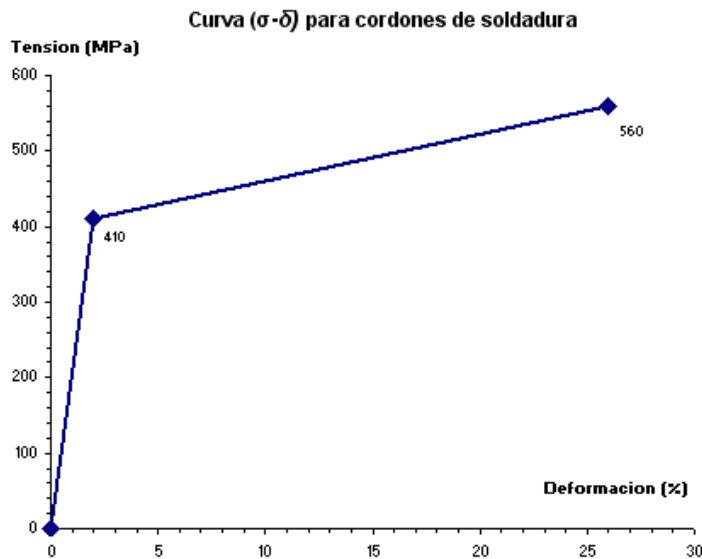


gráfico 3

En el apartado de propiedades se definirá también el espesor de cada una de las piezas:

PIEZA	ESPESOR (mm.)
TRAVESAÑO	4
SOPORTE	6
ALA INFERIOR	12
ALMA	6
ALA SUPERIOR	12

Tabla 5

5.5 CONDICIONES DE CONTORNO Y CASOS DE CARGA

$$\underline{M_{total}} = M_0 \times \text{Coeficiente de } \underline{\text{mayoración}} = 30 \text{ T} \times 1.3 = \underline{39 \text{ T}}$$

Posición 1

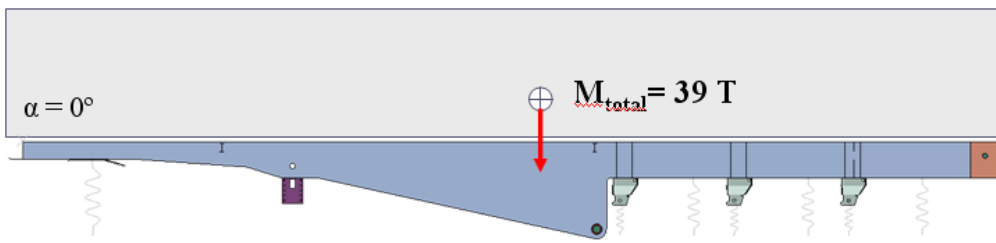


Figura 23: situación a analizar

Para el cálculo y aplicación de las condiciones de contorno y casos de carga se toma la referencia del cálculo en el modelo global.

Para ello se aplican en Patran las solicitaciones requeridas para la situación más desfavorable, que en nuestro caso será instantes antes de que comience la elevación considerando un ángulo inicial de 0° .

A partir del cálculo del modelo global, lo que se hace en Patran es crear un campo de desplazamientos únicamente en la zona del submodelo a estudiar, de forma que se obtienen los desplazamientos de cada nodo en las tres direcciones.

A continuación se importa el submodelo y se le hace coincidir con la parte correspondiente del modelo global.

Los desplazamientos para el submodelo los obtendrá Patran mediante una interpolación lineal.

Ahora se aplican dichos desplazamientos en las fronteras del submodelo y de esta forma se consiguen las condiciones de contorno requeridas.

Una vez transformada la geometría, mallado el submodelo, aplicados materiales y propiedades y establecidas las condiciones de contorno se podrán calcular y analizar los resultados obtenidos.

5.6 ANÁLISIS DE TENSIONES Y RESULTADOS OBTENIDOS

Lo que se quiere analizar en el cálculo del submodelo es el mapa de tensiones que indicará que zonas están sometidas a mayor tensión y que zonas apenas están sometidas a tensión.

De esta forma se podrán determinar varias actuaciones encaminadas, en primer lugar, a cumplir los coeficientes de seguridad en todo el submodelo con los materiales empleados, y en segundo lugar y si fuera posible, a aligerar el submodelo.

También se quiere obtener una comparativa del estudio del submodelo sin cordones de soldadura y del submodelo con cordones de soldadura.

A modo informativo cabe destacar los desplazamientos verticales que se producen en el submodelo como consecuencia de la acción de la carga.

Éstos vienen representados en el siguiente gráfico, en el que los valores vienen dados en milímetros.

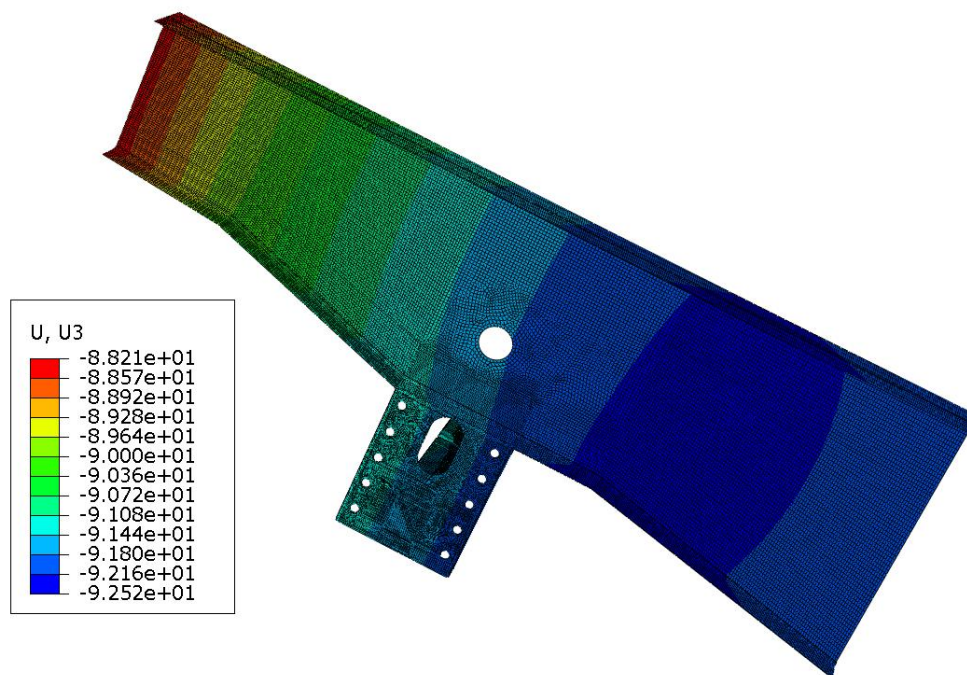


Figura 24: desplazamientos eje vertical

Como se puede ver los desplazamientos de todo el submodelo están situados en torno a los 8 o 9 centímetros de media. El signo negativo se debe a que los desplazamientos se producen hacia abajo.

5.6.1 *Submodelo sin cordones de soldadura*

Lo primero que se debe tener en cuenta a la hora de analizar las tensiones máximas es que pueden aparecer dichos valores en las fronteras del submodelo. Cuando aparezcan en estas zonas se podrá no tenerlos en cuenta, ya que pueden ser provocados por el propio corte del submodelo.

Por ejemplo, esta circunstancia se da en las fronteras del travesaño, que es una pieza que no está apenas sometida a tensión, y que sin embargo muestra puntos de elevada tensión (281 Mpa.), como se puede ver en la figura.

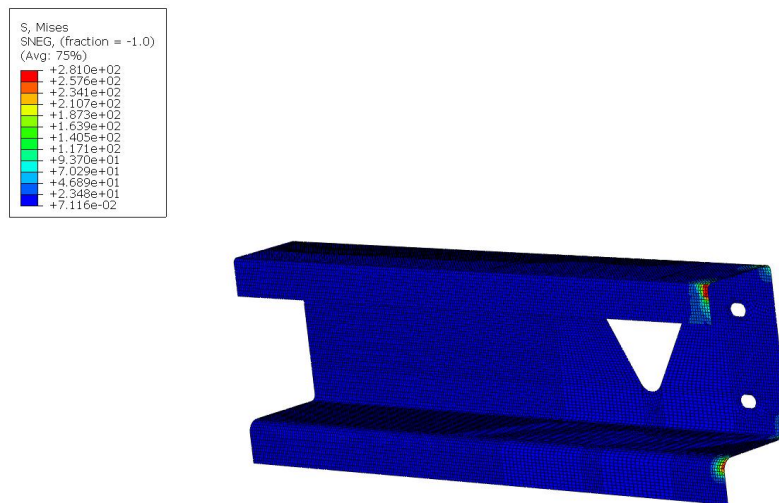


Figura 25: tensiones en las fronteras

Se puede observar la comparación de tensiones antes y después de eliminar los valores de la frontera. Ahora el valor máximo es de 167 MPa.

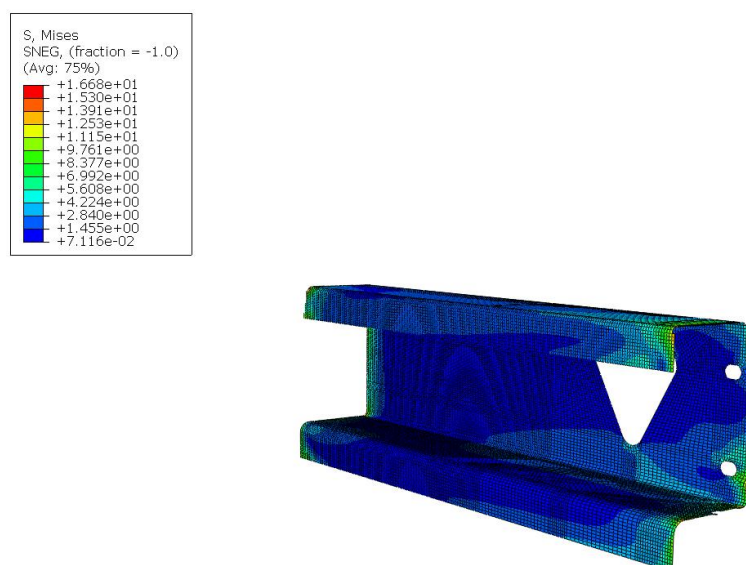


Figura 26: tensiones eliminadas en las fronteras

Una vez considerado esto, se puede valorar lo que sucede en el submodelo sin cordones de soldadura.

El valor máximo tensional obtenido para el submodelo sin cordones de soldadura es de 355,8 MPa. y se encuentra en uno de los cambios de sección del alero inferior.

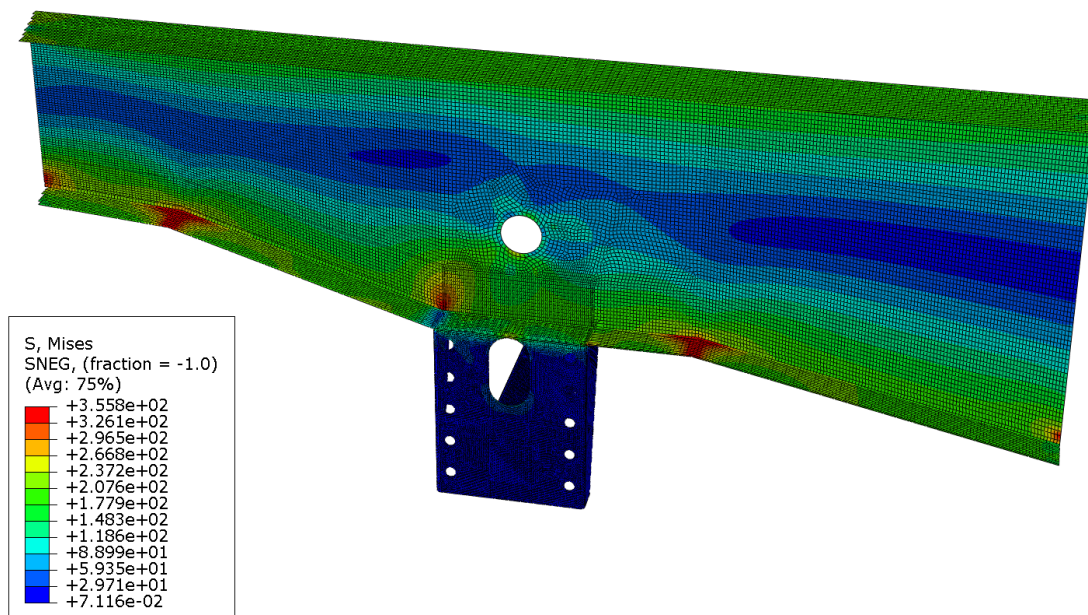


Figura 27: submodelo sin cordones

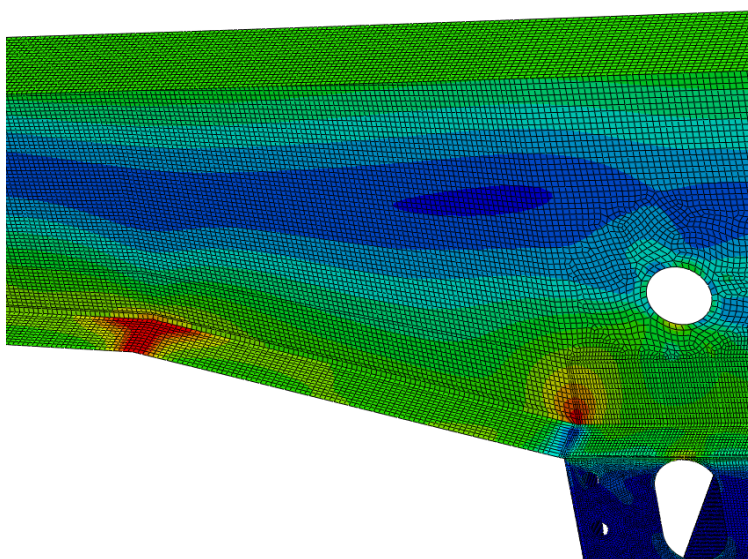


Figura 28: detalle submodelo sin cordones

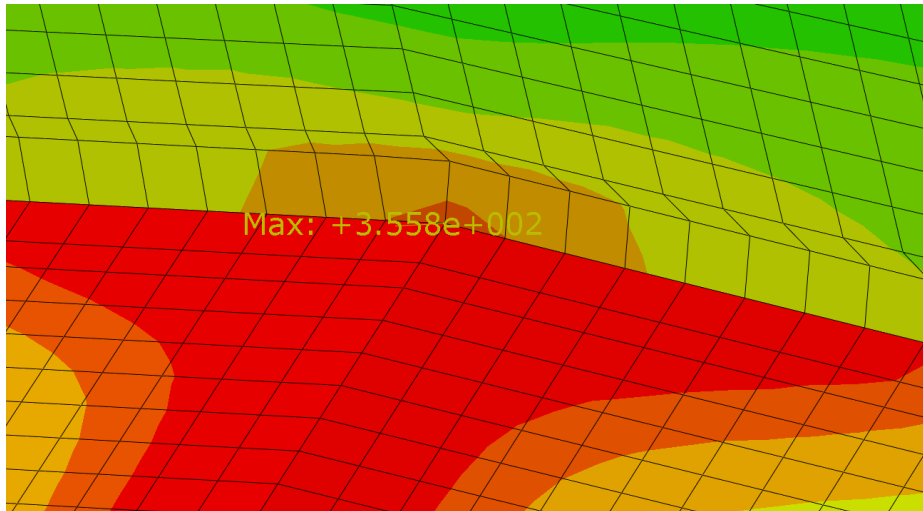


Figura 29: máxima tensión en submodelo sin cordones

A continuación se procederá a analizar pieza a pieza todo el submodelo.

TRAVESAÑO:

Se puede comprobar que, como se ha dicho antes, el travesaño apenas trabaja, siendo el valor de las tensiones a las que está sometido despreciables. Una vez eliminadas las tensiones “no reales” de los bordes se obtienen valores muy bajos de tensión. La tensión máxima alcanzada en el travesaño es de 16,6 MPa. Hay que tener en cuenta que este valor puede variar en función de los elementos de contorno que se decidan desestimar. Lo importante entonces, no será el valor absoluto en sí, si no que será saber que las tensiones a las que va a estar sometido el travesaño van a ser pequeñas y que va a ser una zona muy poco solicitada.

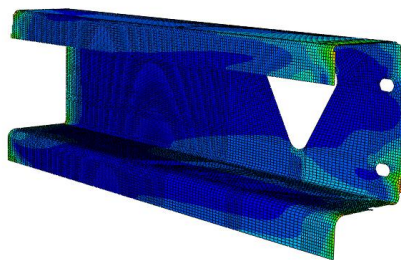
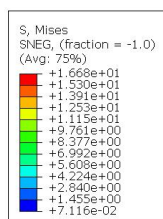


Figura 30: travesaño

SOPORTE:

Si se observa el soporte, se aprecia que es una pieza que apenas trabaja en su zona inferior, pero que es bastante solicitada en la unión con el ala inferior. Su tensión máxima es de 273 MPa.

Esto se deberá a que parte de los esfuerzos a los que está sometido el ala inferior se transferirán al soporte.

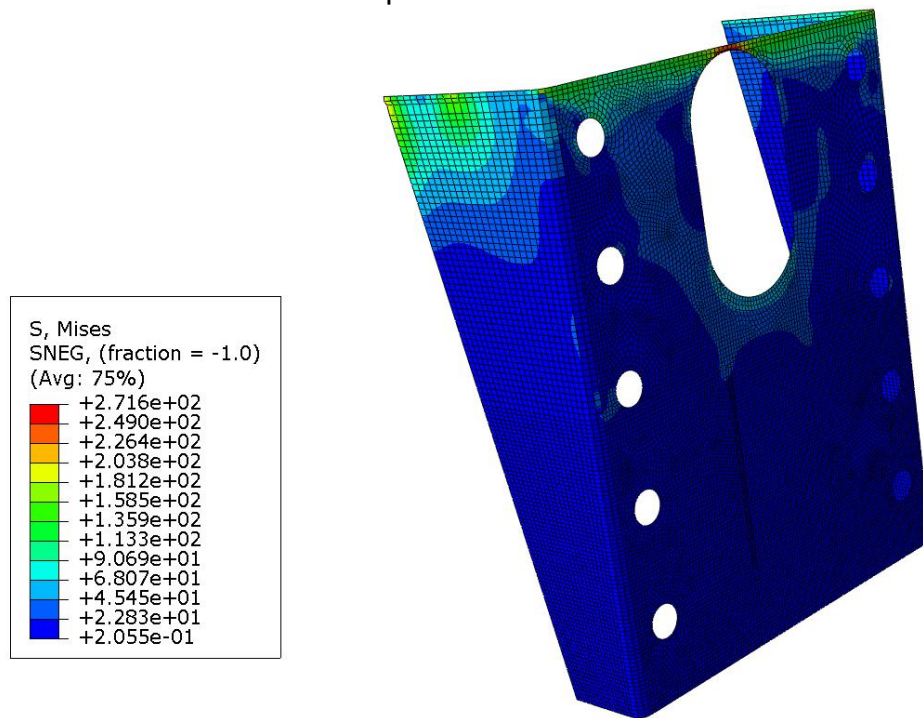


Figura 31: soporte

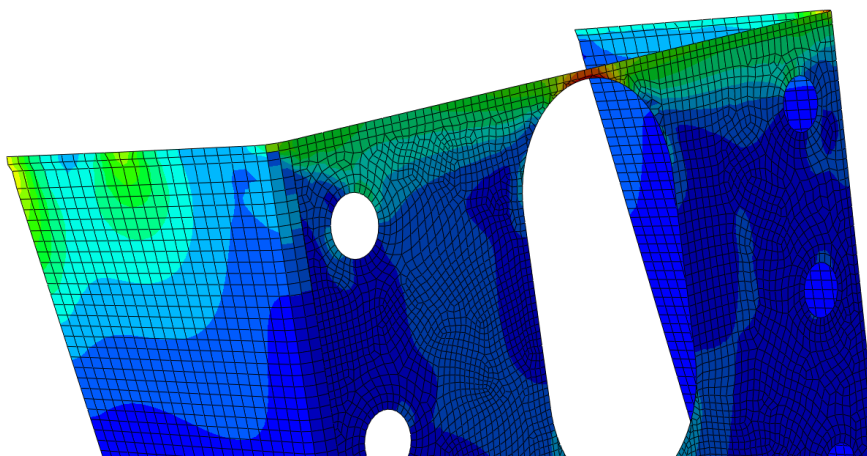


Figura 32: detalle soporte

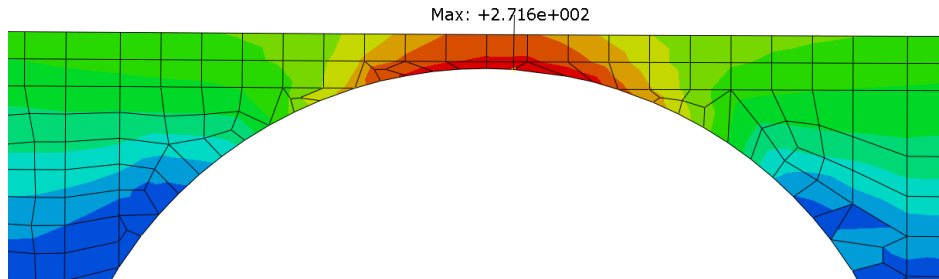


Figura 33: máxima tensión en soporte

ALA INFERIOR:

Como se puede apreciar en los cambios de sección del ala inferior es donde se encontrarán las zonas de mayor tensión. Parece normal que sea ahí donde se encuentren los puntos más solicitados, ya que los cambios de sección actúan como concentradores de tensiones.

Si se actúa como se ha hecho en el travesaño y se desprecian los valores máximos obtenidos en las fronteras se obtiene que el valor de la tensión máxima en el ala inferior es de 355,8 MPa.

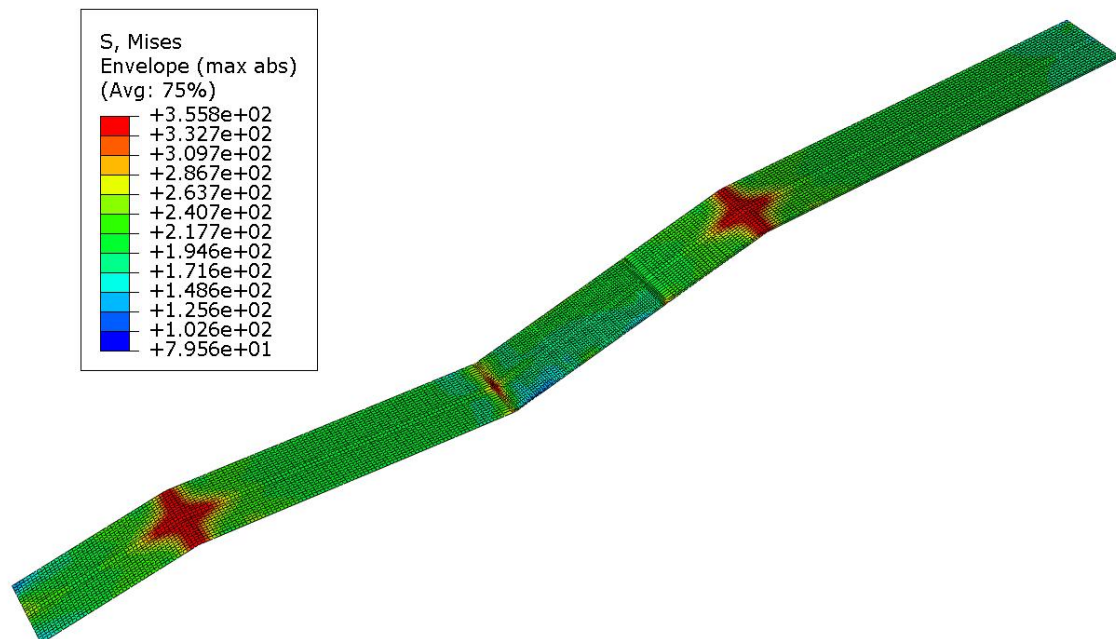


Figura 34: ala inferior

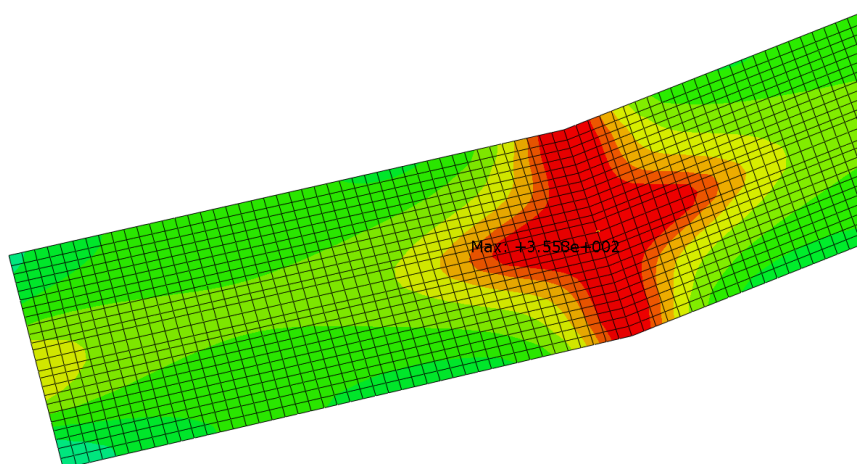


Figura 35: máxima tensión en ala inferior

Además aparece otra zona bastante solicitada que coincide con la unión entre el soporte y el ala inferior y que seguramente será debida al tipo de modelado utilizado en dicha zona.

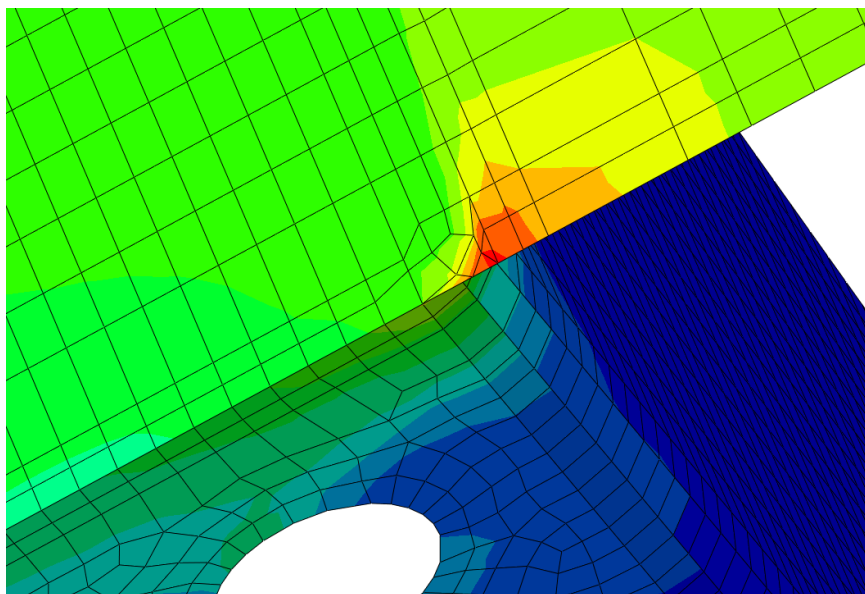


Figura 36: detalle unión ala inferior con soporte

ALMA:

En el alma se pueden apreciar dos cosas.

La primera es que las zonas coincidentes con los cambios de sección en su parte inferior están muy solicitadas. Parece lógico que sea así, ya que se transmiten los esfuerzos del ala inferior. El valor máximo alcanzado es de 355 MPa.

En segundo lugar se puede observar como la parte central del alma apenas trabaja, por lo que podría ser una de las zonas de actuación para el aligeramiento del submodelo.

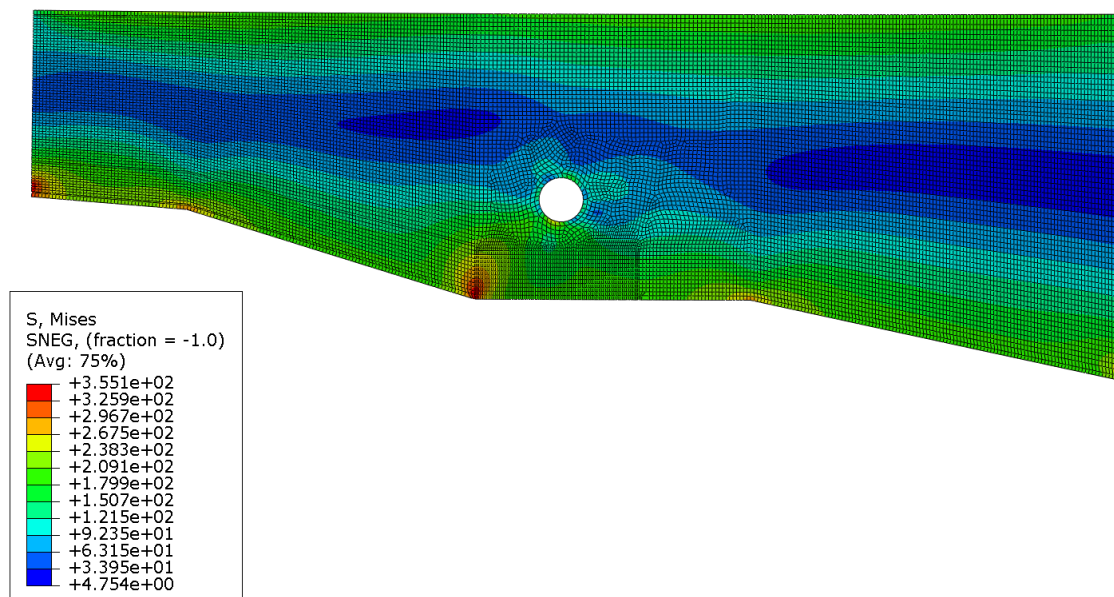


Figura 37: alma

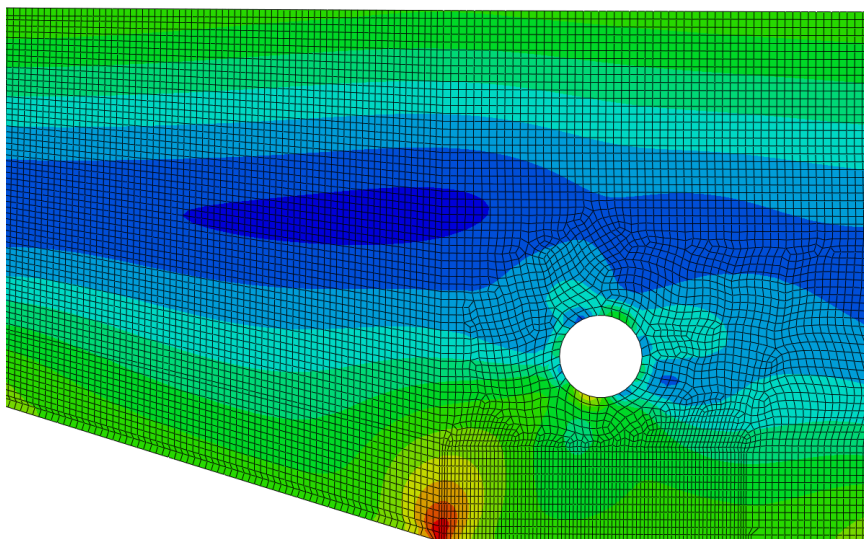


Figura 38: detalle alma

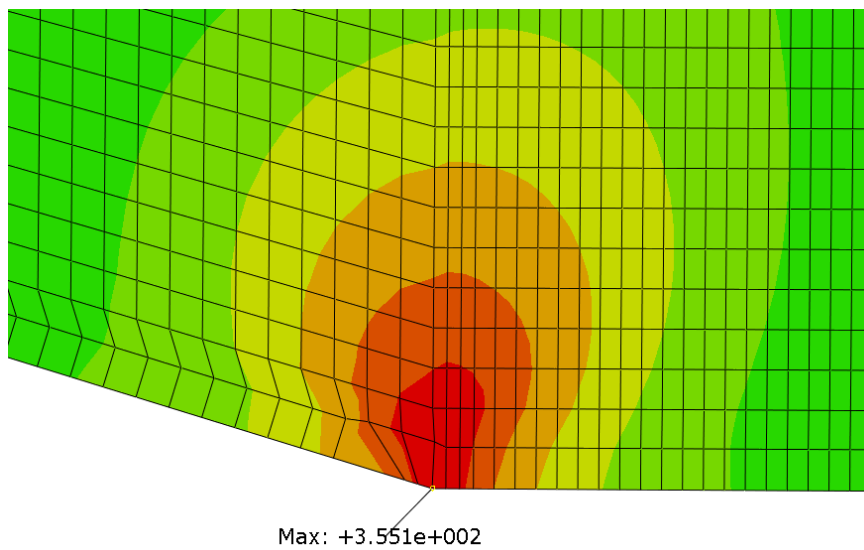


Figura 39: máxima tensión en alma

ALA SUPERIOR:

De nuevo, aparece que las tensiones son máximas en las fronteras, por lo que si no se tienen en cuenta esos valores se obtiene que es una pieza que apenas va a tener problemas de sollicitación de tensiones. Se podría decir que el ala superior es otra de las posibles zonas de actuación para el llevar a cabo el aligeramiento del submodelo.

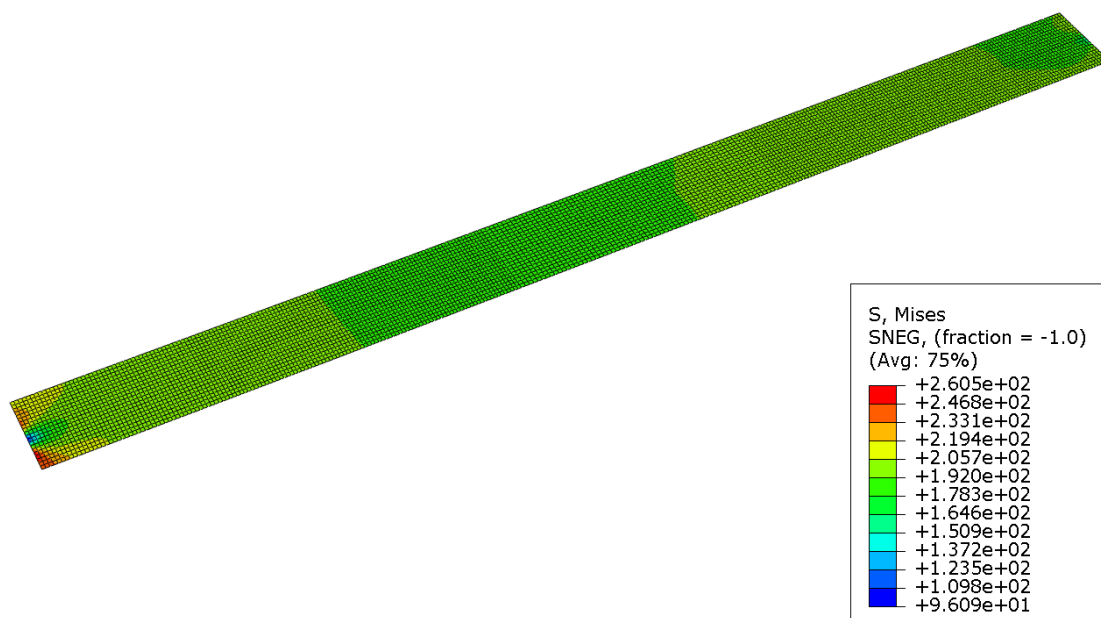


Figura 40: ala superior

CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE SEGURIDAD:

Una vez analizadas todas las piezas del submodelo sin cordones se pueden calcular los coeficientes de seguridad para cada una de ellas.

El coeficiente de seguridad (**Cs**) se podría definir como la relación entre la tensión máxima a la que puede estar sometido un elemento estructural y la tensión máxima a la que se supone va a estar sometido.

$$Cs = \sigma \text{ máx adm.} / \sigma \text{ máx}$$

Sin cordones	σ máx. adm (MPa)	σ máx. (MPa)	coeficiente de seguridad Cs
travesaño	275	16	17,19
soporte	275	271	1,01
ala inferior	355	356	1,00
alma	355	355	1,00
ala superior	355	260	1,37

Tabla 6

5.6.2 *Submodelo con cordones de soldadura*

Se procede ahora a analizar los resultados del submodelo con cordones de soldadura. De nuevo, se deberá tener en cuenta que los valores de la tensión en las fronteras pueden modificar el resultado global. Por ello, y como se ha realizado anteriormente se despreciarán.

Se observa que en el submodelo global el máximo se encuentra en uno de los cordones de soldadura que unen el soporte con el ala inferior.

Se aprecia que el valor de la tensión máxima es superior al de la tensión máxima del submodelo sin cordones de soldadura.

Se puede ver también como el ala inferior, que era la zona más conflictiva en el submodelo sin cordones, sigue siendo la zona más afectada tensionalmente. El valor máximo obtenido es de 376 MPa.

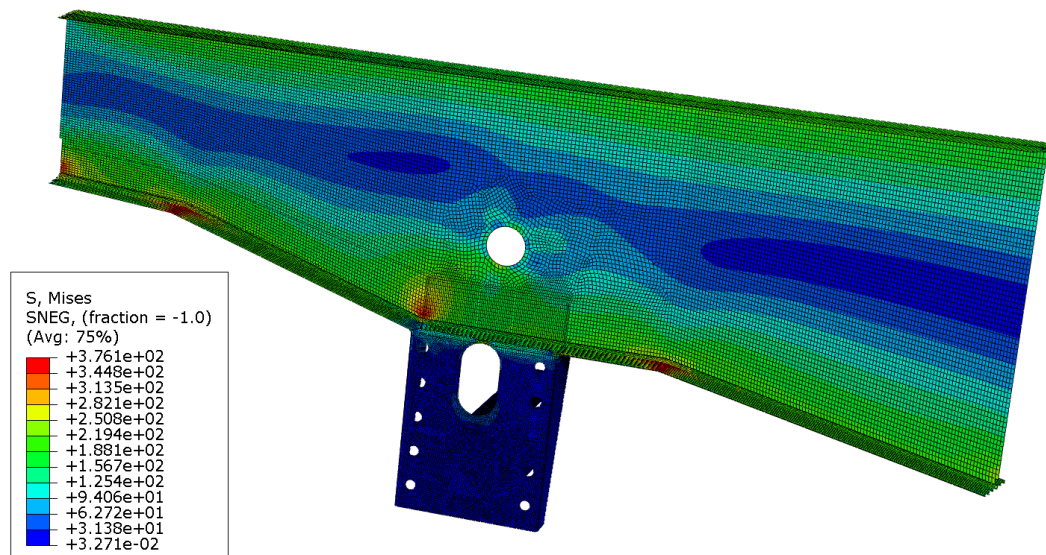


Figura 41: submodelo con cordones de soldadura

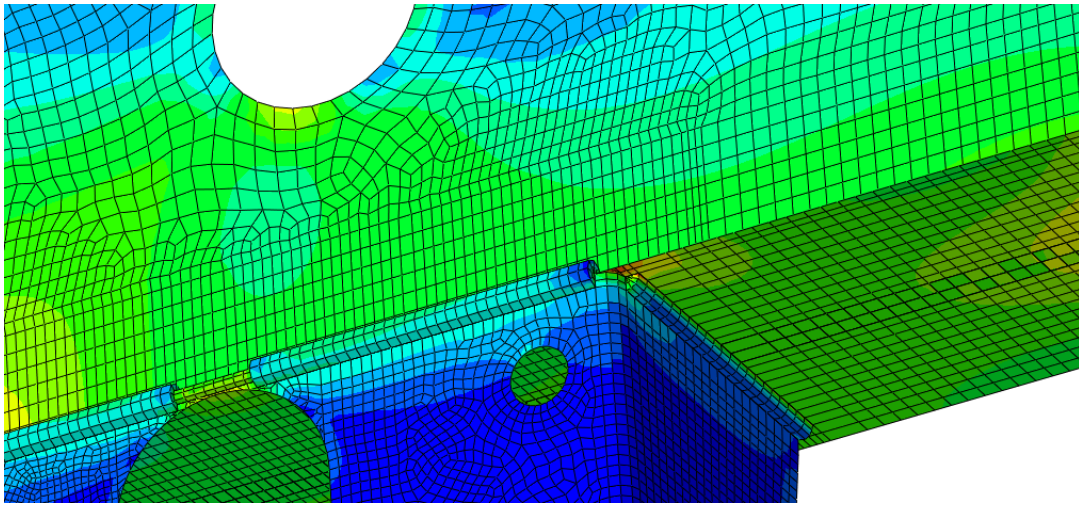


Figura 42: detalle submodelo con cordones de soldadura

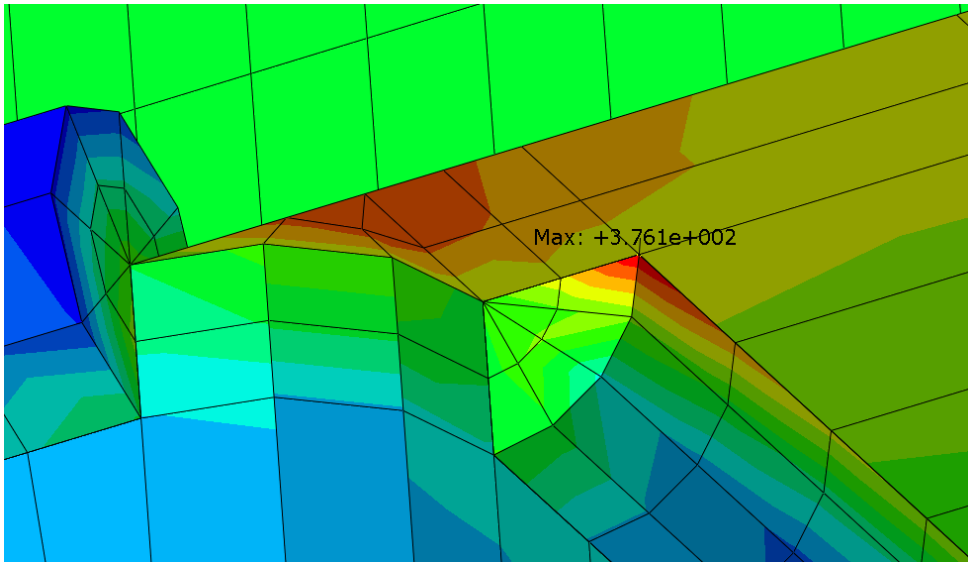


Figura 43: máxima tensión submodelo con cordones de soldadura

A continuación se procederá a analizar pieza a pieza todo el submodelo.

TRAVESAÑO:

Como ya sucediera en el submodelo sin cordones, se puede apreciar que el travesaño es una pieza que apenas trabaja. Si se eliminan las tensiones en las fronteras, el valor máximo de tensión que se obtiene es de apenas 6 MPa.

Se obtiene un valor similar al del submodelo sin cordones dependiendo de la zona fronteriza despreciada.

De esta forma, en ambos casos se puede asegurar que el travesaño apenas trabaja.

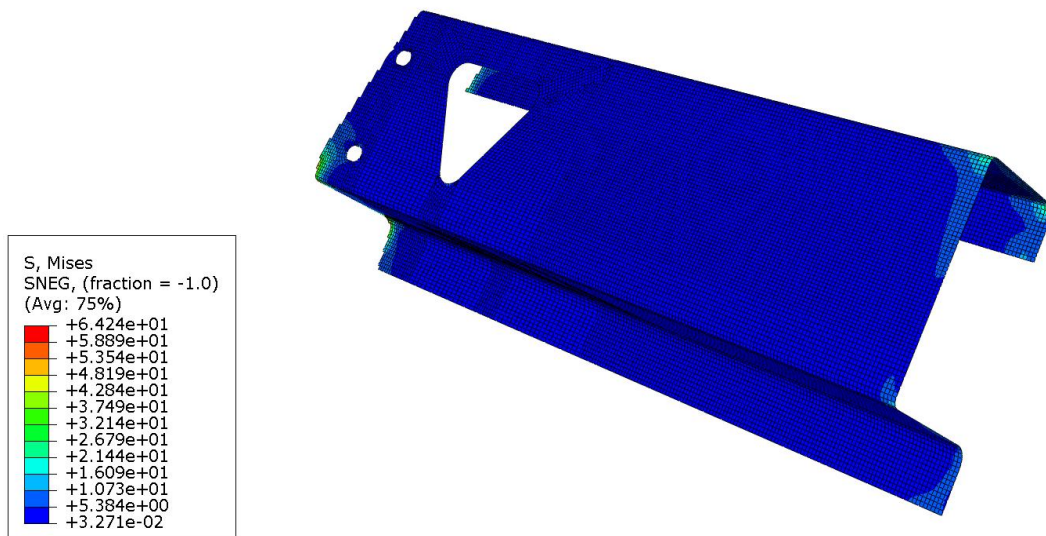


Figura 44: travesaño

SOPORTE:

En el submodelo sin cordones la zona más solicitada se encontraba en la unión del soporte con el ala inferior.

Se puede comparar con el resultado obtenido para el submodelo sin cordones y se obtiene que en este caso la tensión máxima que actúa en el soporte es de 2 MPa. más, por lo que podrían considerarse iguales.

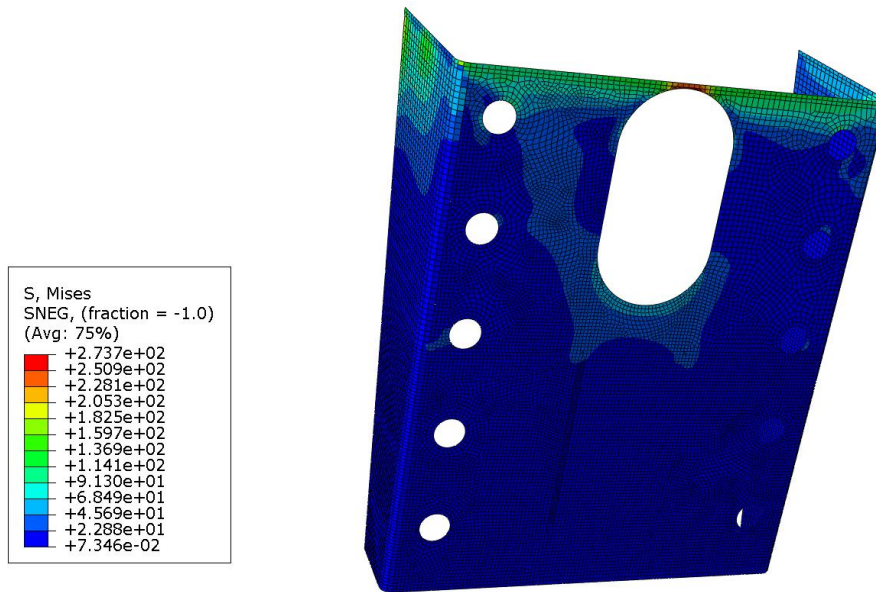


Figura 45: soporte

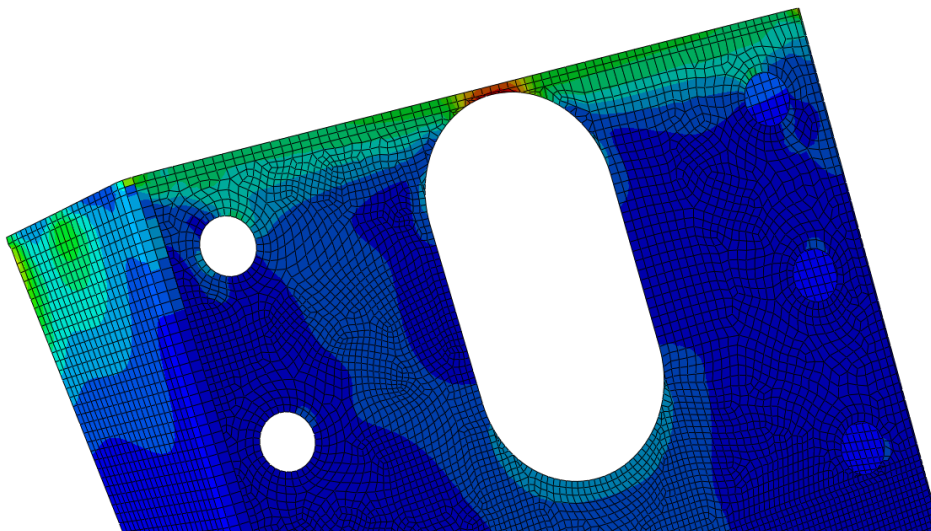


Figura 46: detalle soporte

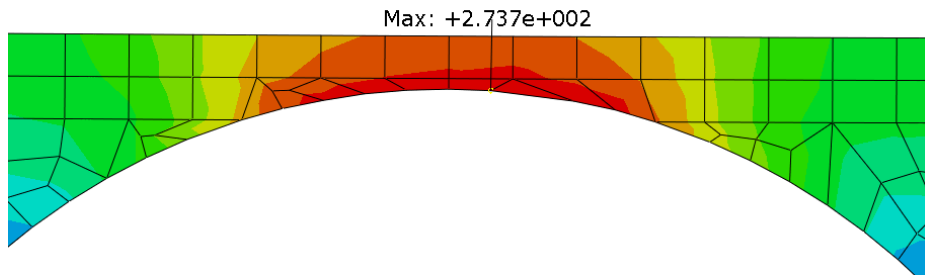


Figura 47: máxima tensión en soporte

ALA INFERIOR:

Es la pieza donde se encuentran las máximas tensiones. De nuevo, y como ya se ha visto en el submodelo anterior los cambios de sección actúan como concentradores de tensiones y provocan que las zonas más solicitadas vuelvan a coincidir con las del submodelo sin cordones.

Las zonas de unión entre el soporte y el ala inferior que en el submodelo sin cordones de soldadura estaban muy solicitadas siguen conservando los mismos valores. Esto puede deberse a que a esas zonas no llega el cordón de soldadura.

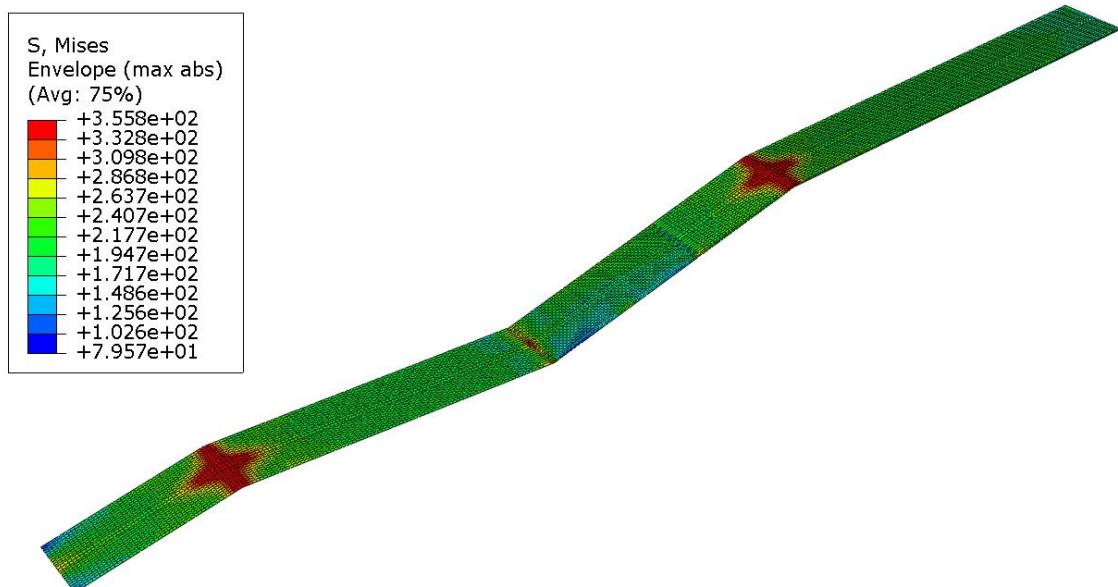


Figura 48: ala inferior

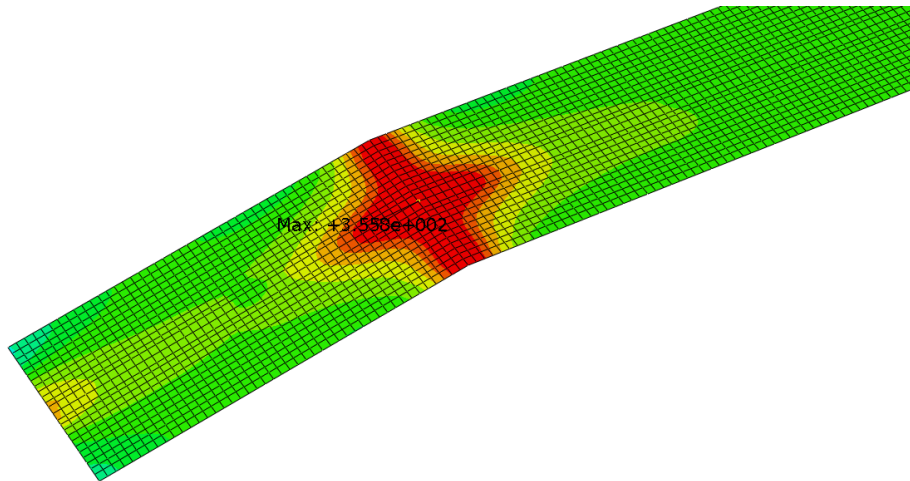


Figura 49: máxima tensión ala inferior

ALMA:

De nuevo, y como ya sucediera en el submodelo sin cordones, las zonas coincidentes con los cambios de sección en su parte inferior están muy solicitadas. Parece lógico que sea así, ya que se transmiten los esfuerzos del ala inferior. El valor máximo alcanzado vuelve a ser de 355 MPa.

Se puede observar, también, como la parte central del alma vuelve a estar poco solicitada.

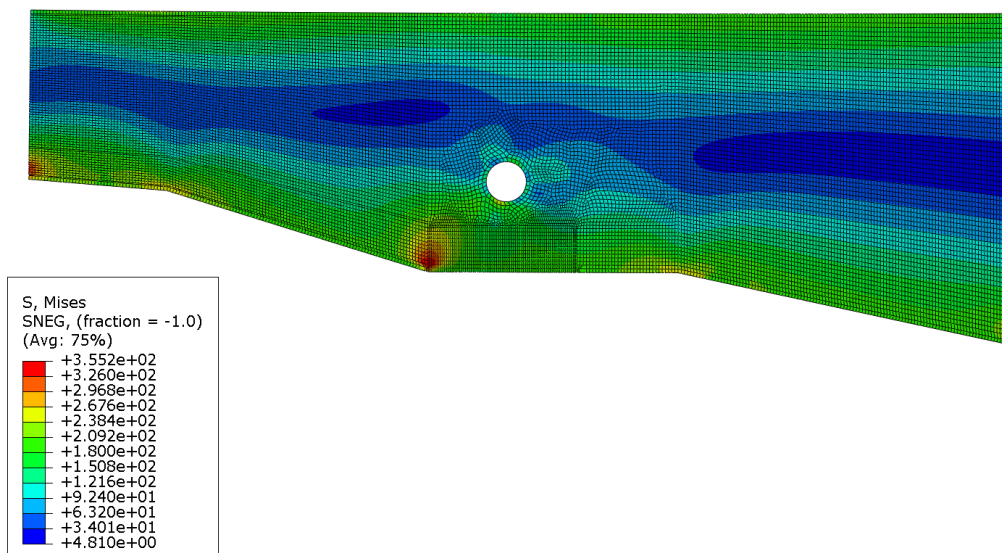


Figura 50: alma

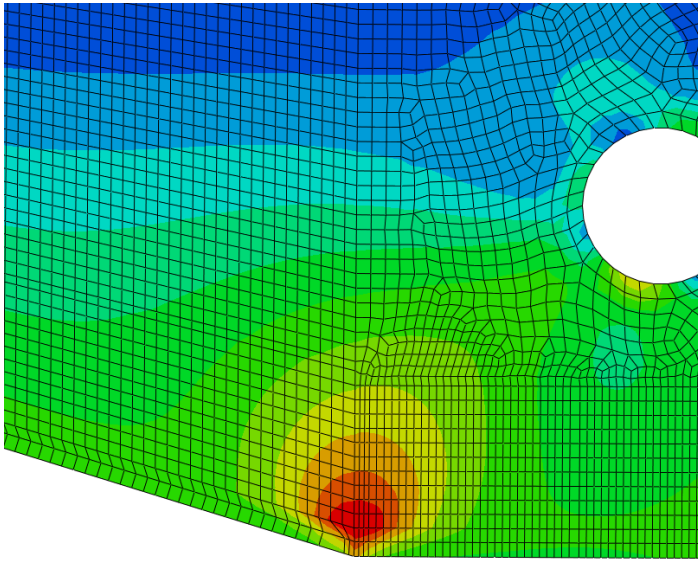


Figura 51: detalle alma

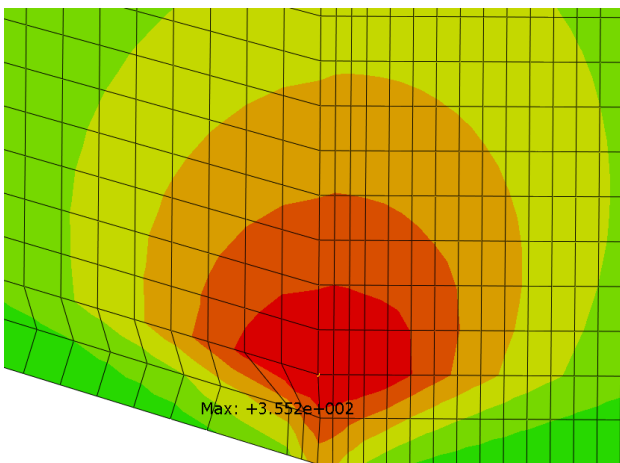


Figura 52: máxima tensión en alma

ALA SUPERIOR:

Como ya sucediera en el submodelo sin cordones, el ala superior es otra de las zonas poco solicitadas. Las únicas zonas donde la tensión podría ser tomada en cuenta son las fronteras de la pieza, por lo que si se discriminan sus valores se obtiene que no va a haber problemas con las tensiones en dicha pieza.

Como se ha comentado anteriormente, podría ser una de las piezas a tener en cuenta a la hora de optimizar el submodelo.

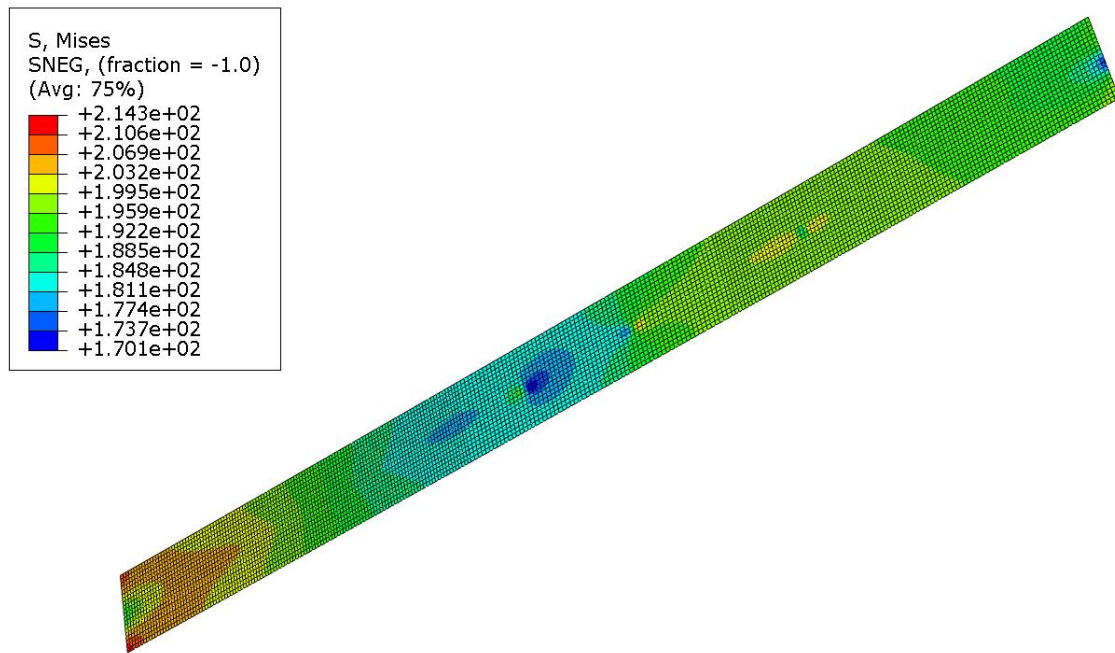


Figura 53: ala superior

CORDONES DE SOLDADURA:

Es en los cordones de soldadura donde se encuentra el valor de tensión máxima para todo el submodelo. Sin embargo, los cordones provocan la disminución de las solicitaciones de tensión en las zonas donde ellos trabajan. La tensión máxima se va a encontrar en uno de los cordones que unen el soporte con el ala inferior y va a coincidir con una de las zonas críticas del ala inferior. Sin embargo, los valores de tensión alcanzados por los cordones no parecen en ningún caso preocupantes.

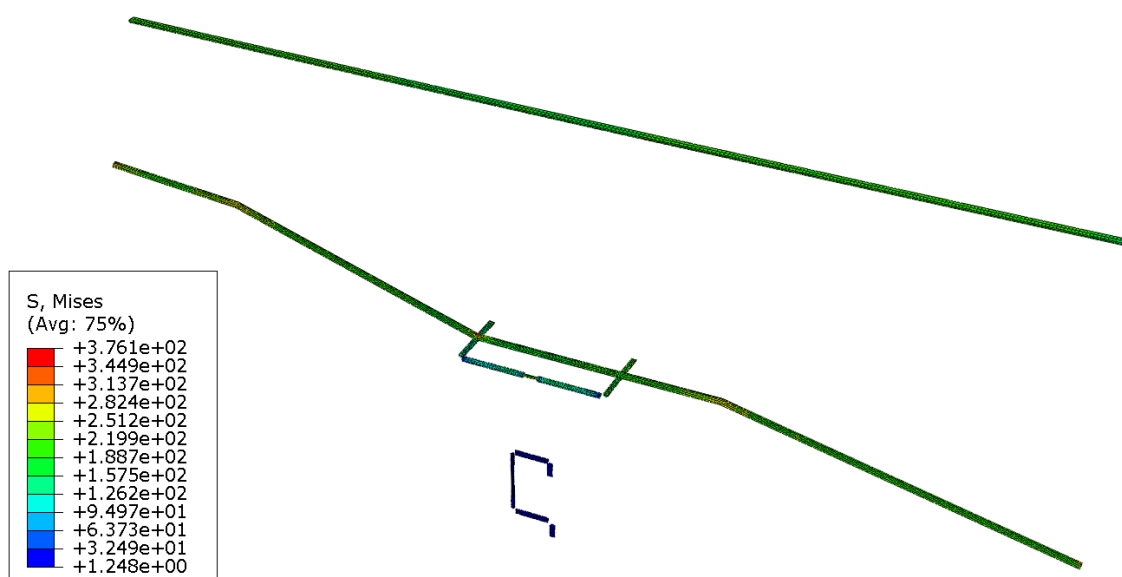


Figura 54: cordones de soldadura

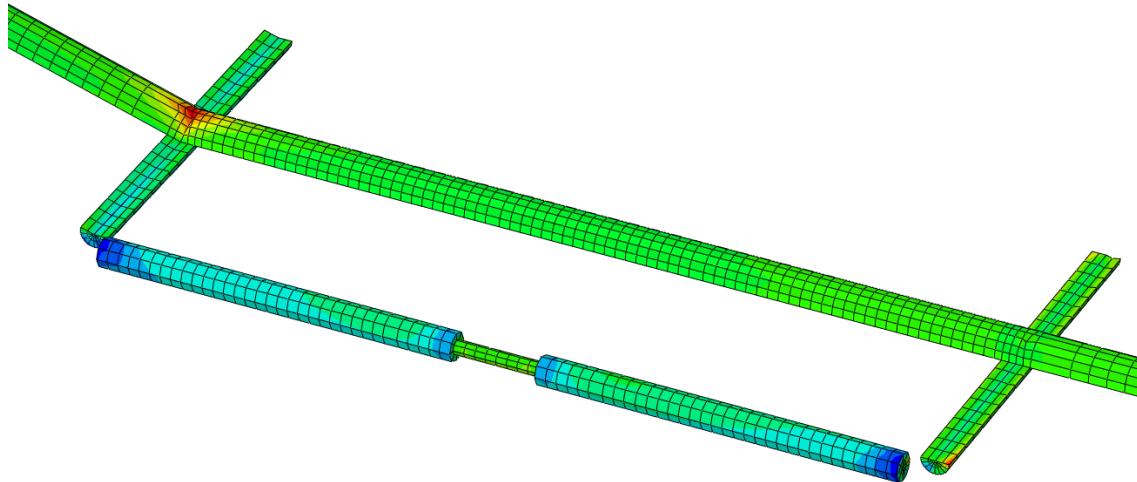


Figura 55: detalle cordones de soldadura

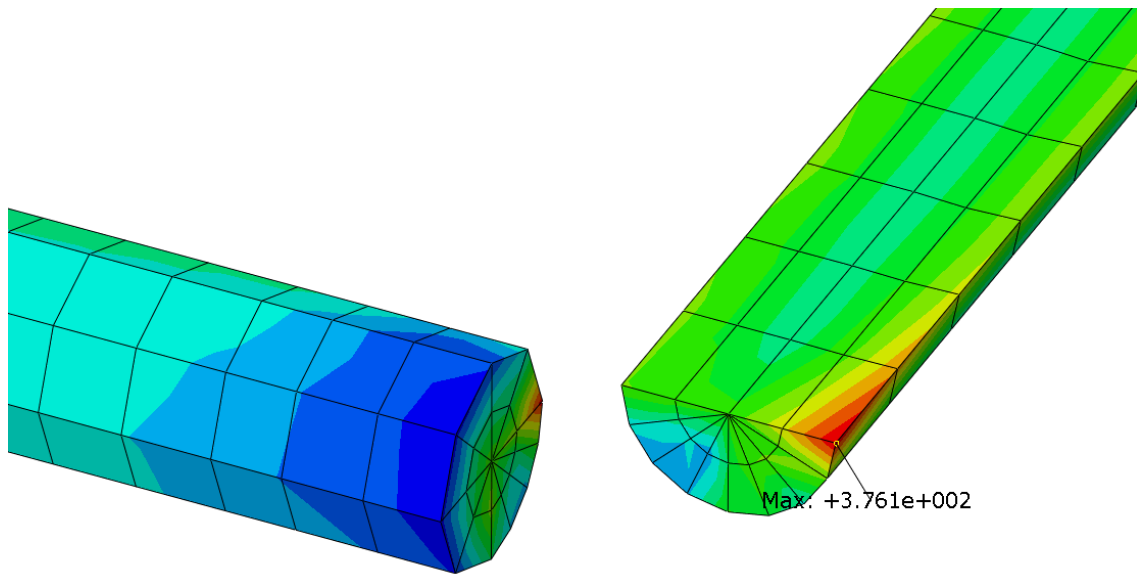


Figura 56: máxima tensión en cordones de soldadura

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE ZONAS CRÍTICAS EN VEHÍCULO BASCULANTE DE ACERO MEDIANTE LA TÉCNICA DE SUBMODELING

CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE SEGURIDAD:

Una vez analizadas todas las piezas del submodelo con cordones se pueden calcular los coeficientes de seguridad para cada una de ellas.

$$Cs = \sigma \text{ máx adm.} / \sigma \text{ máx}$$

Con cordones	σ máx. adm (MPa)	σ máx. (MPa)	coeficiente de seguridad Cs
travesaño	275	6,42	42,83
soporte	275	273	1,01
ala inferior	355	356	1,00
alma	355	355	1,00
ala superior	355	214	1,66
cordones	410	376	1,09

Tabla 7

5.6.3 Comparativa entre el submodelo sin cordones de soldadura y el submodelo con cordones de soldadura

TRAVESAÑO

El travesaño no sufre variación significativa alguna de un submodelo respecto del otro. Tan sólo se obtiene una diferencia del valor del coeficiente de seguridad debido a que los elementos de contorno desestimados para uno y otro submodelo no han sido los mismos.

SOPORTE

El soporte tampoco sufre variación significativa alguna. La zona más solicitada de dicha pieza sigue siendo la misma y los valores de las tensiones similares.

ALA INFERIOR

En el ala inferior las zonas de mayor sollicitación siguen siendo las mismas en uno y otro submodelo. Sin embargo, sí que se aprecia alguna pequeña diferencia.

En el cambio de sección central que coincide con la unión del soporte con el ala inferior y con el cordón de soldadura se aprecia una disminución de la tensión a la que trabaja el ala inferior.

En la primera figura se muestra el máximo valor obtenido para esa zona del ala inferior en el submodelo sin cordones de soldadura, mientras que en la segunda figura se muestra el máximo valor obtenido para esa zona del ala inferior en el submodelo con cordones.

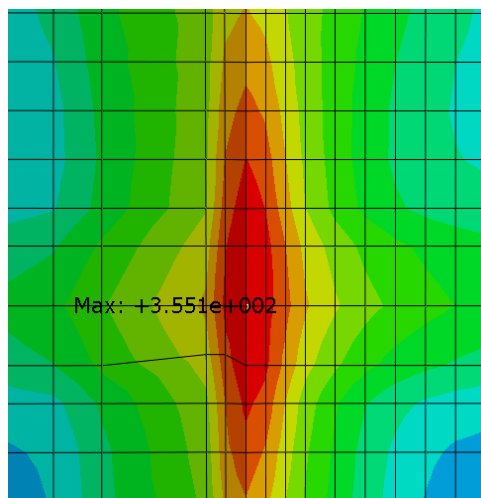


Figura 57: detalle cambio de sección ala inferior del submodelo sin cordones de soldadura

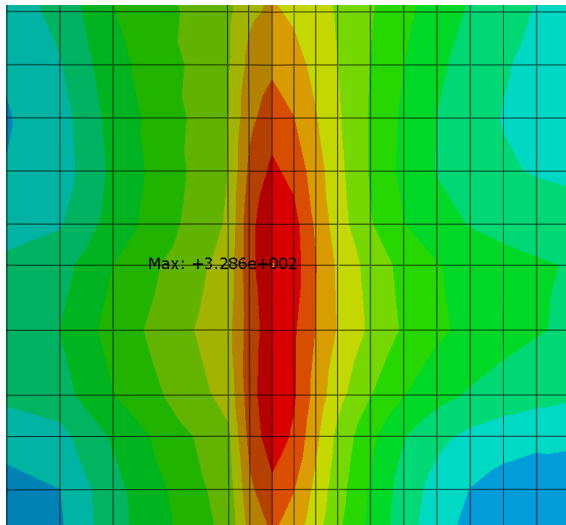


Figura 58: detalle cambio de sección ala inferior del submodelo con cordones de soldadura

ALMA

Aunque a simple vista los mapas de tensiones de ambos submodelos parecen semejantes, si se mira con más detalle se observa que existe una pequeña diferencia en la zona de máxima tensión. Mientras que en el submodelo sin cordones la tensión es máxima hasta el contorno de la pieza, se puede comprobar que en el submodelo con cordones la tensión disminuye en la zona de la pieza que está solapada con el cordón.

Este hecho parece lógico, pues al aplicar el cordón lo que realmente se está haciendo es un aporte de material con el consecuente aumento del espesor.

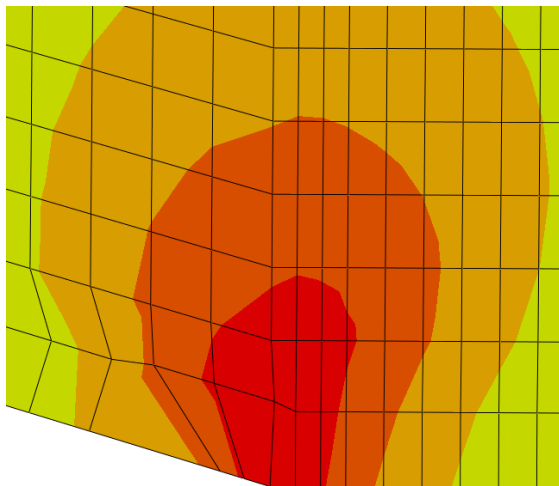


Figura 59: detalle tensiones en alma de submodelo sin cordones de soldadura

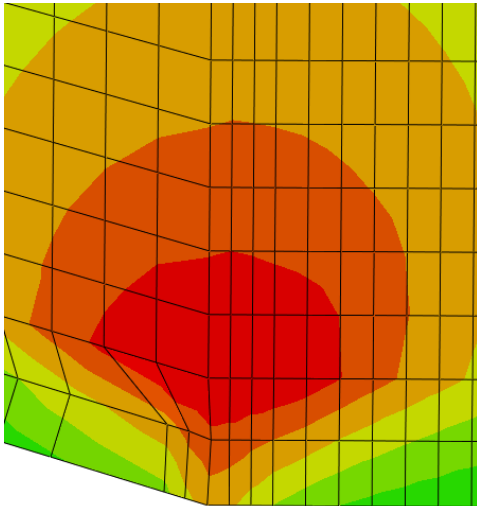


Figura 60: detalle tensiones en alma de submodelo con cordones de soldadura

ALA SUPERIOR

En el ala superior no se aprecian diferencias significativas. De nuevo el coeficiente de seguridad es distinto de un modelo respecto del otro por las causas ya conocidas de los elementos de contorno desestimados.

COEFICIENTES DE SEGURIDAD

Comparativa entre los coeficientes de seguridad del submodelo sin cordones con los coeficientes de seguridad del submodelo con cordones.

pieza	Cs sin cordones	Cs con cordones
travesaño	17,187	21,153
soporte	1,007	1
ala inferior	0,997	0,997
alma	1	1
ala superior	1,392	1,437
cordones	-	1,09

Tabla 8

6 OPTIMIZACIONES

6.1 OPTIMIZACIÓN I

En esta primera optimización propuesta se han modificado los espesores tanto del ala superior como del alma, ya que como se ha visto en el análisis anterior son zonas susceptibles de mejora.

pieza	espesor inicial	espesor optimización1
alma	6	5
ala superior	12	10

Tabla 9

Mediante la reducción de espesor se consigue una reducción de la masa total del submodelo dada por la reducción de masa de cada pieza optimizada.

Realizando esta optimización se obtiene un masa total del submodelo de 67 Kg. frente a los 75 Kg. que se obtenían antes de realizar el cambio de espesores. La reducción de masa conseguida es de un 10,67% en el total del submodelo.

Para las posteriores tablas de este apartado se deberá tener en cuenta que la masa estará calculada en Kg.

propiedad	unidades
masa	Kg

Tabla 10

pieza	valor masa submodelo	valor masa optimización	% masa reducido
SUBMODELO	75	67	10,67%

Tabla 11

Como se va a comprobar en las siguientes figuras la diferencia del campo de tensiones con respecto a los espesores iniciales es mínima y recalculando los coeficientes de seguridad se obtienen valores similares a los del submodelo inicial. Se va a observar también que el valor de la tensión máxima a la que está sometido el submodelo optimizado es ligeramente superior al del valor del submodelo inicial.

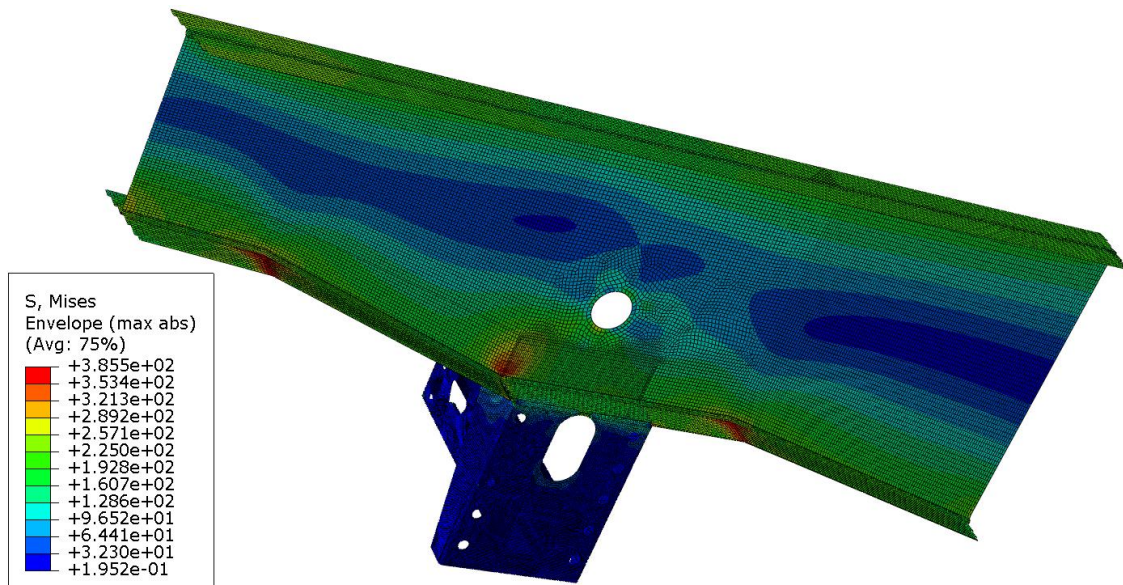


Figura 61: submodelo completo

A continuación se analiza cómo ha influido la optimización en cada una de las piezas del submodelo.

Ala superior

Al reducirse el espesor del ala superior de 12 a 10 mm. se ha reducido la masa de la pieza de 18 Kg. a 15,1 Kg.

Además el mapa de tensiones apenas se ha visto afectado manteniendo valores similares a los obtenidos antes de la optimización.

En la siguiente tabla se muestra la comparativa de masas entre el submodelo inicial y el submodelo optimización, así como la reducción de masa en valor absoluto y en valor porcentual.

pieza	masa (6 mm.)	masa (5 mm.)	valor masa reducido	% masa reducido
ala superior	18	15,1	2,9	16,11%

Tabla 12

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE ZONAS CRÍTICAS EN VEHÍCULO BASCULANTE DE ACERO MEDIANTE LA TÉCNICA DE SUBMODELING

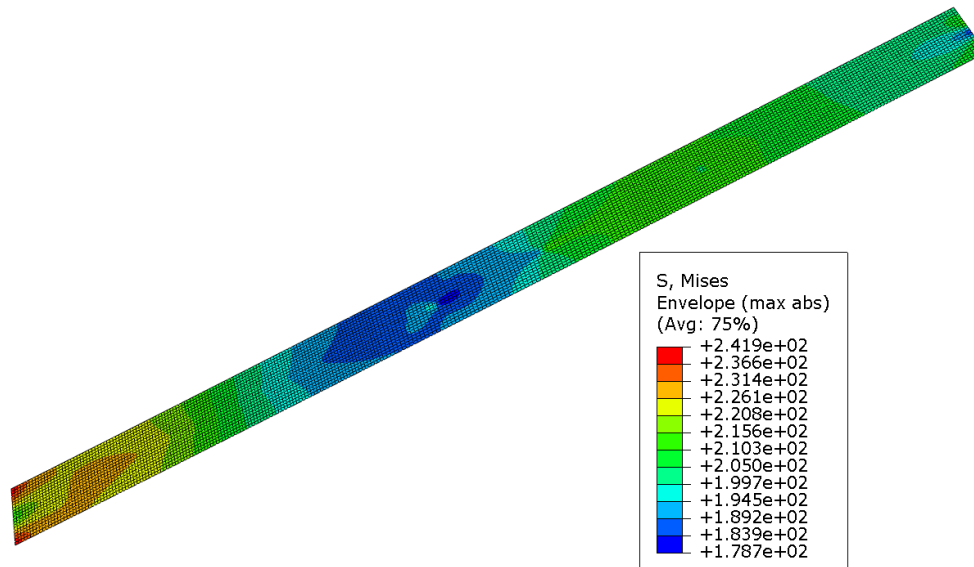


Figura 62: ala superior

En la siguiente tabla se muestra la comparativa de tensiones y de coeficientes de seguridad.

pieza	σ máx. adm (MPa)	σ máx. (MPa)	Cs optimización 1	Cs submodelo inicial
ala superior	355	217	1,636	1,437

Tabla 13

Alma

Al reducirse el espesor del alma de 6 a 5 mm. se ha reducido la masa de la pieza de 29,75 Kg. a 24,8 Kg.

Además el mapa de tensiones apenas se ha visto afectado manteniendo valores similares a los obtenidos antes de la optimización.

En la siguiente tabla se muestra la comparativa de masas entre el submodelo inicial y el submodelo optimización, así como la reducción de masa en valor absoluto y en valor porcentual.

pieza	masa (6 mm.)	masa (5 mm.)	valor masa reducida	% masa reducida
alma	29,7	24,8	4,9	16,50%

Tabla 14

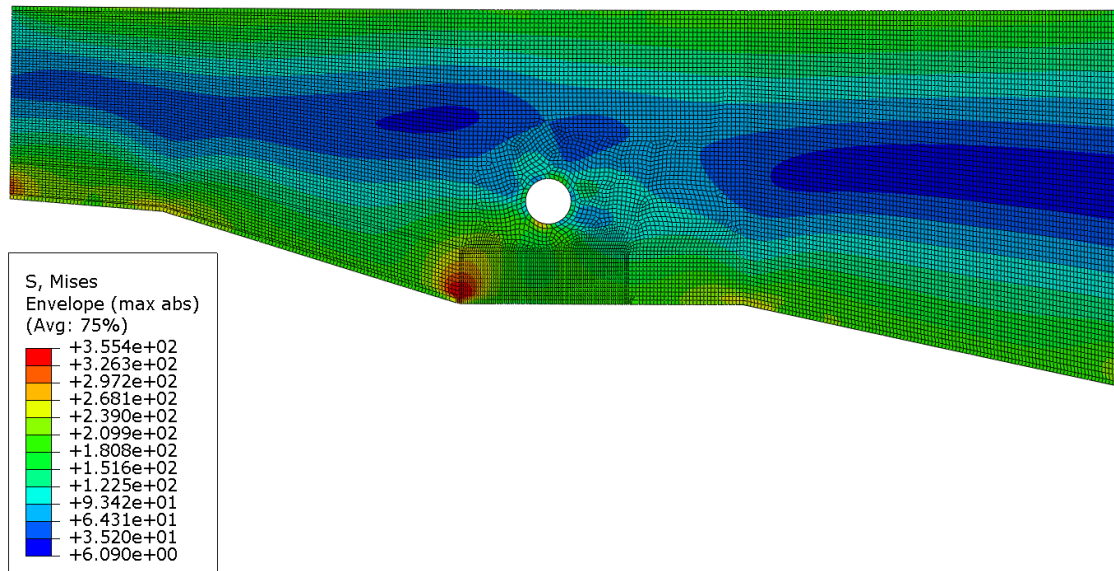


Figura 63: alma

En la siguiente tabla se muestra la comparativa de tensiones y de coeficientes de seguridad.

pieza	σ máx. adm (MPa)	σ máx. (MPa)	Cs optimización 1	Cs submodelo inicial
alma	355	355	1	1

Tabla 15

Cordones de soldadura

La reducción de los espesores del ala superior y del alma ha producido que la zona de los cordones de soldadura donde se obtiene la tensión máxima haya variado con respecto a la del submodelo inicial. Además, el valor de dicha tensión también ha variado aumentando desde los 376 MPa. del submodelo inicial hasta los 385 MPa. del submodelo optimizado.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE ZONAS CRÍTICAS EN VEHÍCULO BASCULANTE DE ACERO MEDIANTE LA TÉCNICA DE SUBMODELING



Figura 64: cordones de soldadura

En la siguiente tabla se muestra la comparativa de tensiones y de coeficientes de seguridad.

pieza	σ máx. adm (MPa)	σ máx. (MPa)	Cs optimización 1	Cs submodelo inicial
cordones	410	385	1,065	1,09

Tabla 16

En el resto de piezas del submodelo no se ha observado diferencia significativa alguna.

Del análisis de esta optimización se podría concluir que la propuesta sería perfectamente válida y podría plantearse como una posible actuación de cara al aligeramiento del submodelo.

6.2 OPTIMIZACIÓN 2

En esta segunda optimización propuesta se han modificado los materiales tanto del ala superior como del alma por otros materiales de inferior calidad. Se ha sustituido el acero S-355 de estas piezas por el acero S-275.

pieza	material inicial	material optimización 2
ala superior	S-355	S-275
alma	S-355	S-275

Tabla 17

Mediante la sustitución de material de estas piezas se conseguirá un ahorro económico que no se valorará en este proyecto por depender de factores que escapan al alcance del mismo.

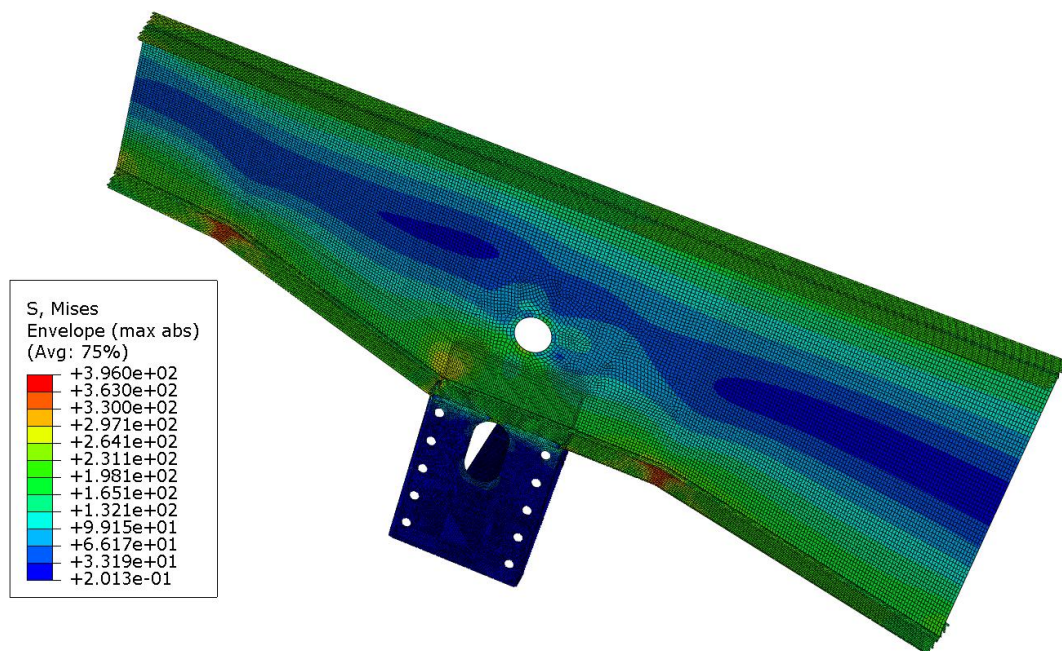


Figura 65: submodelo completo

A continuación se analiza cómo ha influido la optimización en cada una de las piezas del submodelo.

Ala superior

El mapa de tensiones apenas ha sufrido cambios con respecto al obtenido en el submodelo inicial. Las tensiones máximas se siguen produciendo en las fronteras de la pieza y los valores que se deben tener en cuenta no son relevantes en lo que al cálculo del coeficiente de seguridad se refiere.

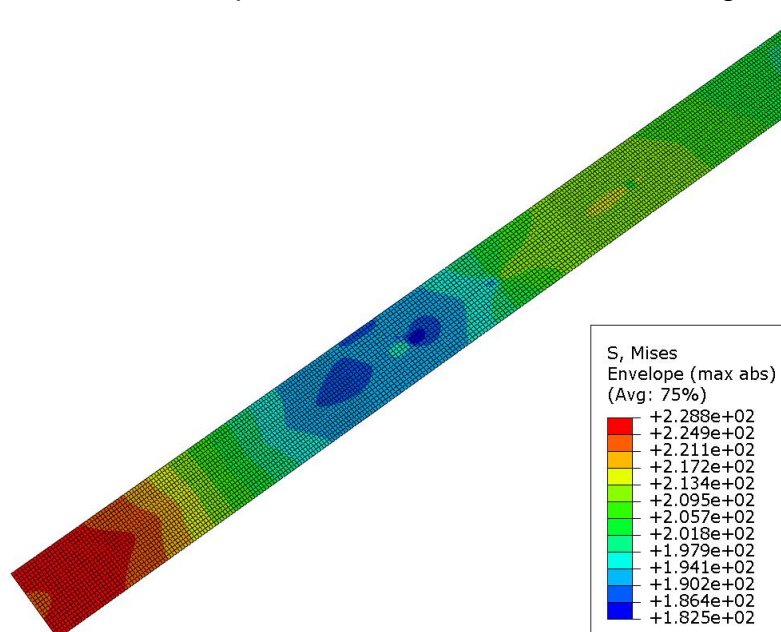


Figura 66: ala superior

En la siguiente tabla se muestra la comparativa de tensiones y de coeficientes de seguridad.

pieza	σ máx. adm (MPa)	σ máx. (MPa)	Cs optimización 2	Cs submodelo inicial
Ala superior	275	229	1,2	1,66

Tabla 18

Alma

Se puede observar que la parte central del alma sigue sin estar apenas solicitada, como ya ocurriera en el submodelo inicial.

Sin embargo, en la zona baja del alma sí que se aprecian más zonas con valores de tensión que se deberán tener en cuenta. Si bien, siguen estando entre los límites de seguridad.

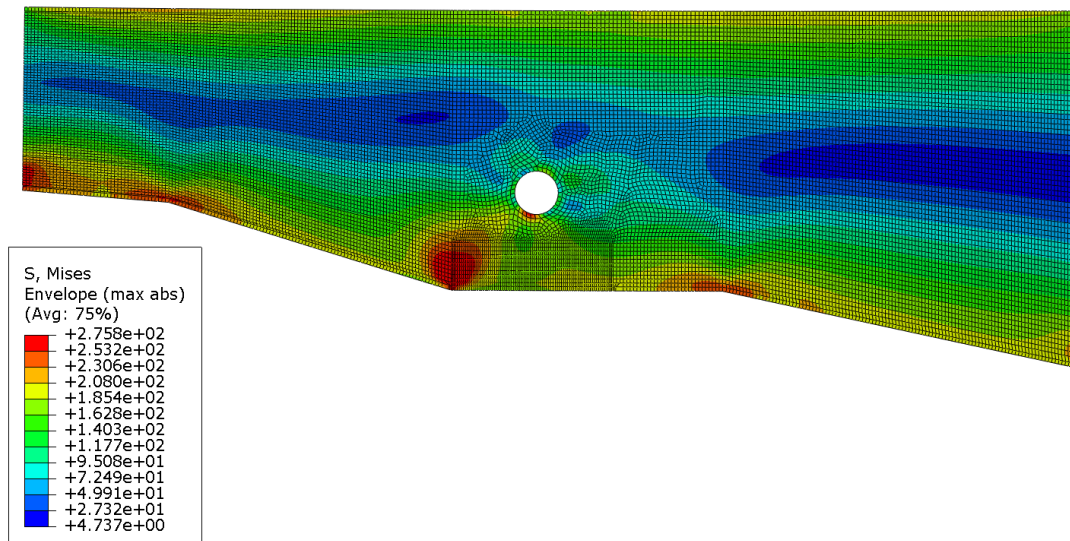


Figura 67: alma

En la siguiente tabla se muestra la comparativa de tensiones y de coeficientes de seguridad.

pieza	σ máx. adm (MPa)	σ máx. (MPa)	Cs optimización 2	Cs submodelo inicial
alma	275	275	1	1

Tabla 19

Cordones de soldadura

La sustitución de los materiales del ala superior y del alma ha provocado que el valor de la tensión máxima, que se encuentra en los cordones de soldadura haya aumentando desde los 376 MPa. del submodelo inicial hasta los 396 MPa. del submodelo optimizado.

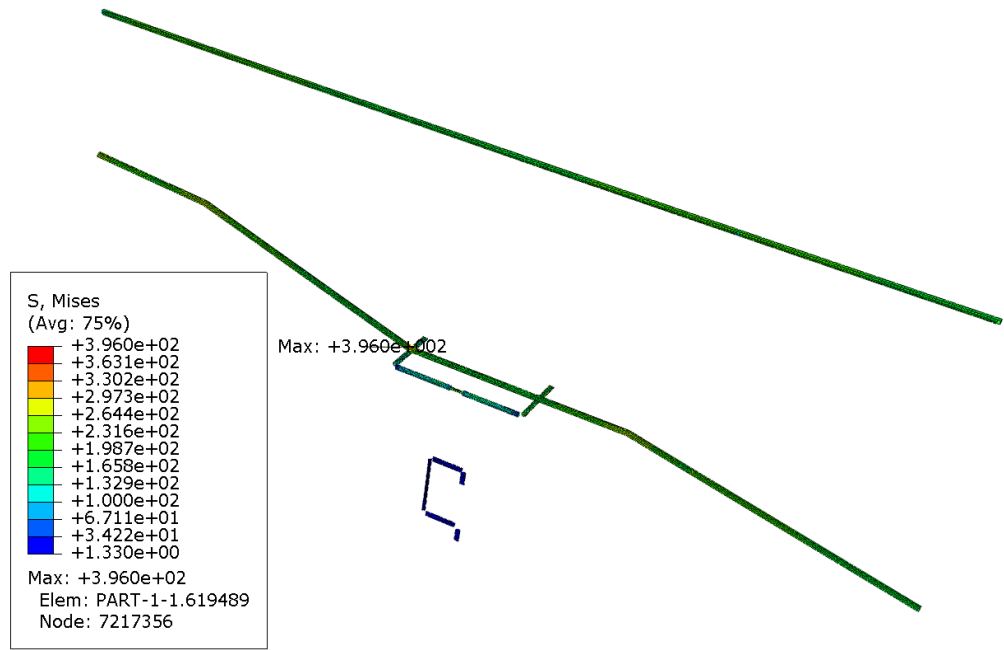


Figura 68: cordones de soldadura

En la siguiente tabla se muestra la comparativa de tensiones y de coeficientes de seguridad.

pieza	σ máx. adm (MPa)	σ máx. (MPa)	Cs optimización 2	Cs submodelo inicial
cordones	410	396	1,04	1,09

Tabla 20

En el resto de piezas del submodelo no se ha observado diferencia significativa alguna.

Del análisis de esta optimización se podría concluir que la propuesta sería perfectamente válida y podría plantearse como una posible actuación de cara al aligeramiento del submodelo.

6.3 OPTIMIZACIÓN 3

Una vez planteadas, analizadas y validadas las optimizaciones anteriores se plantea la implantación de ambas mejoras conjuntamente.

Por tanto, los cambios realizados han sido la reducción de los espesores del ala superior y del alma de la misma forma que en la optimización 1 y la sustitución del material de las mismas piezas como en la optimización 2.

Ahora se procederá a analizar la viabilidad de la realización de ambas mejoras conjuntamente.

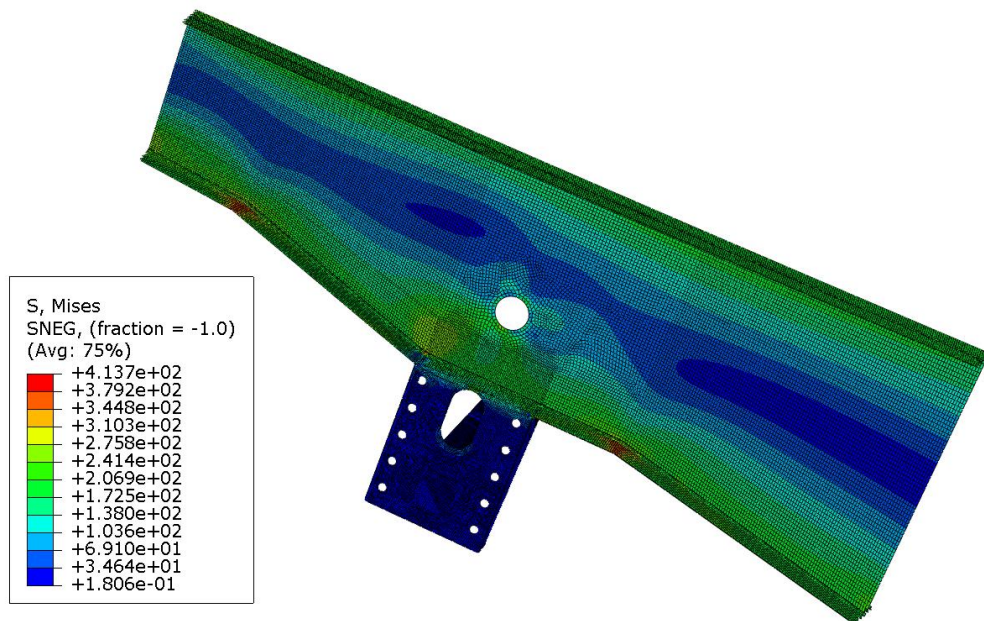


Figura 69: submodelo completo

A priori el mapa de tensiones no difiere mucho de los submodelos anteriores, si bien, la tensión máxima a la que está sometida el submodelo ha aumentado.

Esta tensión máxima se produce de nuevo en la misma zona que en el submodelo anterior.

A continuación se analiza cómo ha influido la optimización en cada una de las piezas del submodelo.

Ala superior

El mapa de tensiones apenas ha sufrido cambios con respecto al obtenido en el submodelo inicial. Las tensiones máximas se siguen produciendo en las fronteras de la pieza y los valores que se deben tener en cuenta no son relevantes en lo que al cálculo del coeficiente de seguridad se refiere.

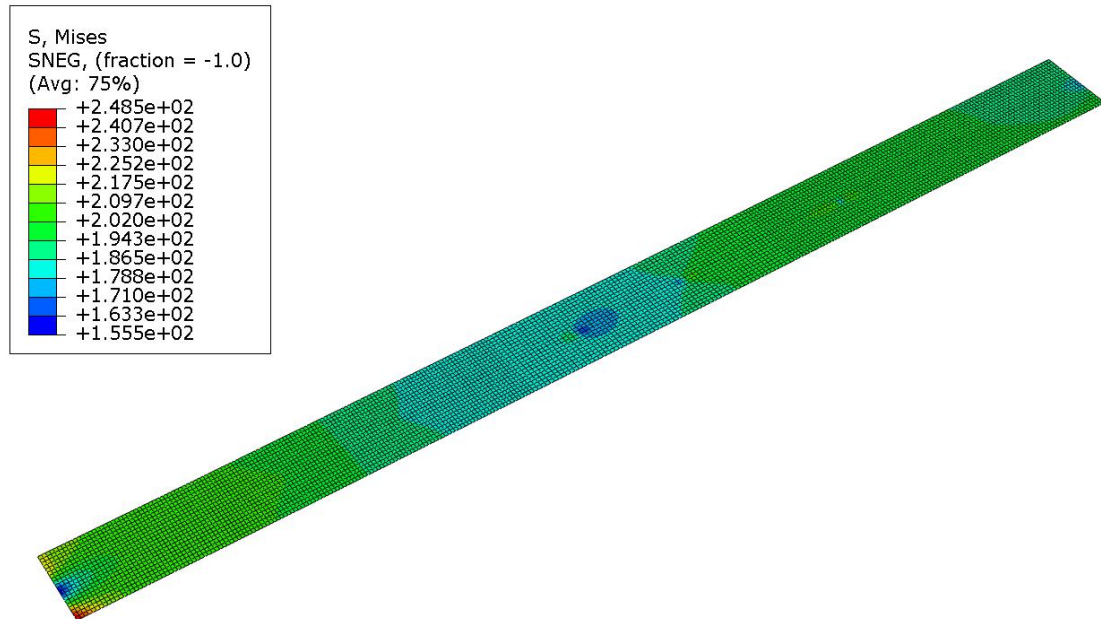


Figura 70: ala superior

En la siguiente tabla se muestra la comparativa de tensiones y de coeficientes de seguridad.

pieza	σ máx. adm (MPa)	σ máx. (MPa)	Cs optimización 3	Cs submodelo inicial
ala superior	275	248	1,11	1,66

Tabla 21

Alma

Se puede observar que la parte central del alma sigue sin estar apenas solicitada, como ya ocurriera en el submodelo inicial.

Sin embargo, en la zona baja del alma sí que se aprecian más zonas con valores de tensión que se deberán tener en cuenta. Hay que destacar que en este caso la máxima tensión alcanzada es de 276 MPa. y el límite elástico del material utilizado es de 275 MPa. por lo que el coeficiente de seguridad del alma estaría mínimamente por debajo de 1. Esto supondría que habría que calcular y analizar minuciosamente el caso para darle o no validez a esta optimización.

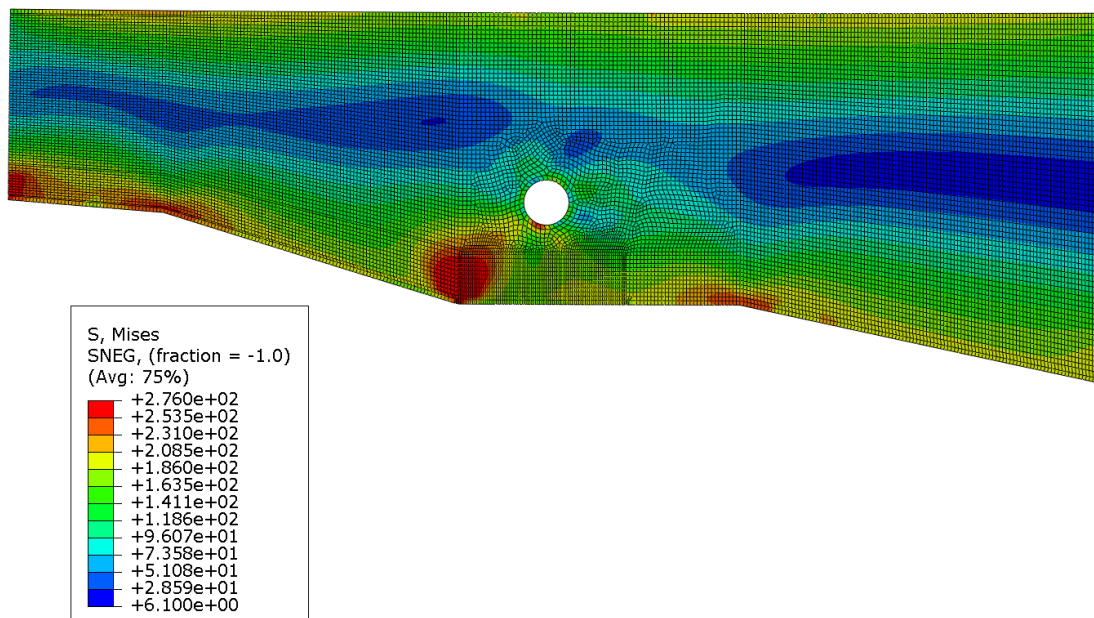


Figura 71: alma

En la siguiente tabla se muestra la comparativa de tensiones y de coeficientes de seguridad.

pieza	σ máx. adm (MPa)	σ máx. (MPa)	Cs optimización 3	Cs submodelo inicial
alma	275	276	<1	1

Tabla 22

Cordones de soldadura

La sustitución de los materiales del ala superior y del alma así como la reducción de los espesores en dichas piezas han provocado que el valor de la tensión máxima, que se encuentra en los cordones de soldadura haya aumentando desde los 396 MPa. del submodelo inicial hasta los 413 MPa. del submodelo nuevamente optimizado.

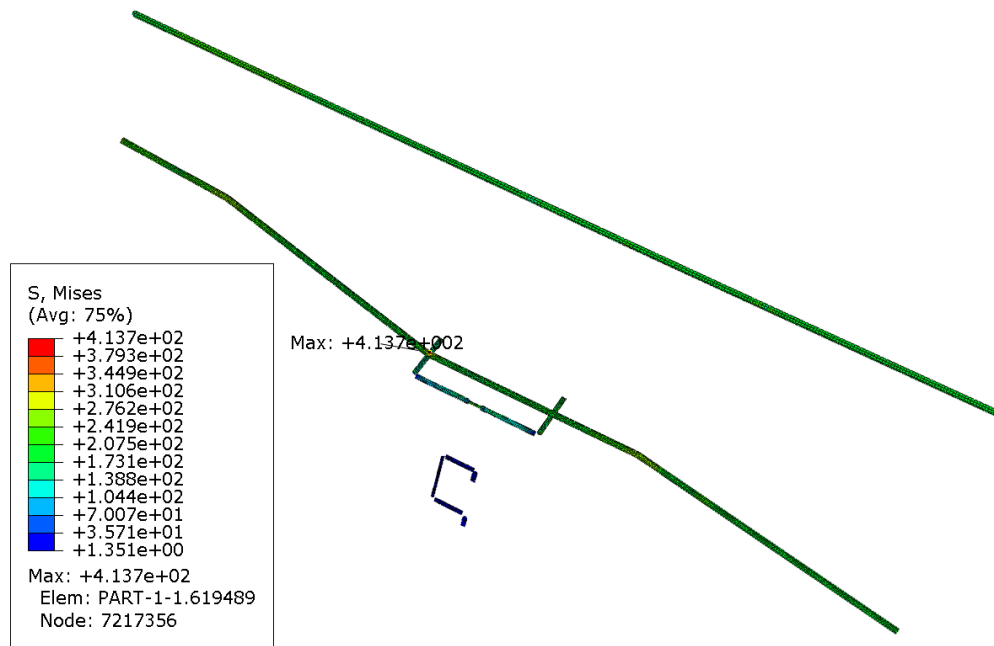


Figura 72: cordones de soldadura

En la siguiente tabla se muestra la comparativa de tensiones y de coeficientes de seguridad.

pieza	σ máx. adm (MPa)	σ máx. (MPa)	Cs optimización 3	Cs submodelo inicial
cordones	410	413	<1	1,09

Tabla 23

Como ya ha ocurrido en el alma la tensión máxima solicitada y la tensión máxima admisible por el material de los cordones de soldadura arrojan como resultado un coeficiente de seguridad mínimamente por debajo de 1. Esto supondría que, nuevamente, habría que calcular y analizar minuciosamente el caso para darle o no validez a esta optimización.

Del análisis de esta optimización se podría concluir que la propuesta habría que estudiarla más detenidamente y pulir algún detalle para poderla llevar a cabo o bien desestimarla.

6.4 OPTIMIZACIÓN 4

Como se ha comentado a lo largo del proyecto, el alma es una de las piezas a tener en cuenta a la hora de plantear un posible aligeramiento del submodelo. Por ello, y teniendo en cuenta que la zona media del alma apenas está solicitada podría estudiarse un aligeramiento de la misma mediante la realización de agujeros en dicha zona.

La masa inicial del alma en este submodelo es de 29,75 Kg., y no sería difícil aligerarla en un 10% o incluso en algo más realizando los agujeros indicados. Esta optimización podría ser complementaria con otro tipo de actuaciones como las realizadas en la optimización 1 de reducción de espesores.

6.5 OPTIMIZACIÓN 5

Otra mejora posible tendría que ver con la transmisión de esfuerzos.

Se ha comprobado que las mayores tensiones se encuentran en el ala inferior, por lo que otra solución para liberar de tensiones a esa zona podría ser intentar repartir los esfuerzos que ahí se concentran.

Se ha visto que el ala superior apenas está solicitada, por lo que podría ser una zona a la que transportar parte de los esfuerzos soportados por el ala inferior.

Para conseguir esto se propondría el uso de cartabones de una forma aproximada a como se indica en el esquema.

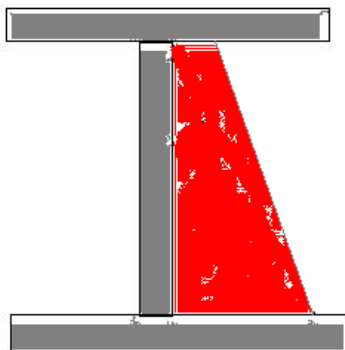


Figura 73: boceto aplicación de cartabones

7 CONCLUSIONES

Conclusiones técnicas

A lo largo de las diferentes fases de este proyecto se ha calculado y analizado mediante la técnica del submodeling una de las zonas críticas de chasis de un vehículo basculante.

Todos los cálculos teóricos de la estructura han sido realizados mediante la aplicación del método de los elementos finitos muy extendido en procesos de cálculo ingenieril en la actualidad.

En este caso, Patran, ha permitido la creación de un modelo de elementos finitos en el que es posible definir todas y cada una de las variables del problema en cuestión (materiales, condiciones de contorno, conjunto de solicitaciones,...).

El conjunto de solicitaciones reales actuantes sobre el submodelo han sido obtenidas por medio de la experiencia del departamento Técnico de Leciñena S.A.

Una vez obtenidas dichas solicitaciones se ha pasado a realizar el cálculo del submodelo mediante la aplicación informática Abaqus, para con los resultados obtenidos proceder al análisis del submodelo.

En el presente proyecto fin de carrera se han localizado y analizado las zonas donde se presentan mayores esfuerzos en un submodelo de un chasis para basculante de cilindros centrales.

También se ha observado que la diferencia de valores obtenidos tanto para el submodelo sin cordones de soldadura como para el submodelo con cordones de soldadura es apenas apreciable, por lo que a la hora de realizar un cálculo de un modelo global los cordones de soldadura podrían ser en cierto modo prescindibles. Con ello se obtendría un ahorro de tiempo en preparación y en cálculo del modelo.

Sin embargo, se ha comprobado que a la hora de realizar un submodelo sí que se aprecian pequeñas diferencias entre el submodelo calculado sin cordones y el calculado con cordones, como por ejemplo ocurre en ciertas zonas del ala inferior.

Además se ha comprobado, que el submodelo podría ser optimizado con el fin de aligerar la masa del mismo, entendiéndose que esta misma actuación podría ser llevada a cabo también en otras zonas del modelo global previo estudio y análisis de cada una de ellas.

Conclusiones personales

La realización de este proyecto me ha permitido conocer el funcionamiento de las tareas llevadas a cabo a través del análisis mediante elementos finitos. Además, al tratarse de una parte de un proyecto real me ha permitido trabajar con magnitudes, materiales y cargas empleadas por empresas del sector con la consiguiente oportunidad de aprendizaje acerca de esta rama de la ingeniería. Durante el proyecto he tenido la oportunidad de ver también como se trabaja en este ámbito y los pasos a seguir en el caso que tuviera que realizar un proyecto similar en un futuro.

8 BIBLIOGRAFÍA

MSC.Patran 301 Exercise Workbook

PATRAN301ExerciseWorkbook-Release7.5

PATRAN 302 Exercise Workbook - Release 8.0

HIBBITT, KARLSSON & SORENSEN, Abaqus/Standard, versión 5.8, Theory Manual, HIBBITT, KARLSSON&SORENSEN INC., 1998.

HIBBITT, KARLSSON & SORENSEN, Abaqus/Post versión 5.8, Theory Manual, HIBBITT, KARLSSON&SORENSEN INC., 1998.

HIBBITT, KARLSSON & SORENSEN, Abaqus/Standard manual 5.8, vol. I, vol. II, vol. III, HIBBITT, KARLSSON&SORENSEN INC., 1998.

APTA (Asociación para la promoción técnica del acero)

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

Ramón Argüelles Alvarez. "Fundamentos de Elasticidad y su Programación por Elementos Finitos". Bellisco, Madrid. 1992.

O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. "El Método de los Elementos Finitos". Vols 1 y 2 CIMNE-Mc Graw Hill, 1994.

Apuntes de la asignatura: "Elasticidad y Resistencia de Materiales"

Mecánica Computacional Vol XXVIII, págs. 503-517 (artículo completo) Cristian García Bauza, Pablo Lotito, Lisandro Parente, Marcelo Vénere (Eds.) Tandil, Argentina, 3-6 Noviembre 2009

Estudio del comportamiento bajo carga de un chasis para transporte de pasajeros por medio de la tecnología de elementos finitos en la empresa equitel cumandes s.a. artículo de reflexión.

Ing. Jaime Alberto Parra Plazas, Ing. Ricardo Augusto Rios Linares, Alumno: Roldan Ferney Rojas Hurtado, Alumno: David Mantilla Nova