

PROYECTO FIN DE CARRERA

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE ZONAS

CRÍTICAS EN VEHÍCULO BASCULANTE

DE ALUMINIO MEDIANTE LA

TÉCNICA DEL SUBMODELING.



Ingeniería Técnica Industrial

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

Autor: Jesús Sebastián López
Director: Dr. Ing. Ind. Marco Carrera Alegre
Junio 2011

INDICE

1. DEFINICION DEL PROYECTO	1
1.1 TITULO DEL PROYECTO	1
1.2 OBJETO DEL PROYECTO.....	1
2. PLANIFICACION DEL PROYECTO	2
2.1 EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	2
2.2 SOTWARE UTILIZADO:.....	6
2.2.1 ABAQUS: PROGRAMA ELEMENTOS FINITOS	6
2.2.1.1 PATRAN.....	7
2.2.1.2. ABAQUS	10
2.2.1.3. ABAQUS/POST	11
2.3 DESCRIPCION DEL CHASIS	12
2.3.1 Introducción	12
2.3.2 Descripción de componentes	13
2.3.3 Descripción de uniones entre componentes	14
2.4 FASES DEL PROYECTO.....	15
2.4.1 Importar geometría	15
2.4.2 Modificar geometría	15
2.4.3 Mallar	18
2.4.4 Materiales y propiedades.	26
2.4.5 Condiciones de contorno:	27
2.4.6 Análisis de tensiones y resultados:	28
2.4.6.1 Análisis de tensiones del Submodelo 1:	30
2.4.6.2 Análisis de tensiones del Submodelo 2:	33
2.4.6.3 Calculo coeficientes de seguridad:	40
3. OPTIMIZACIONES	41
4. CONCLUSIONES	43
5. BIBLIOGRAFÍA.....	44

1. DEFINICION DEL PROYECTO

1.1 TITULO DEL PROYECTO

Análisis estructural de zonas críticas en vehículo basculante de aluminio mediante la técnica del submodeling.

1.2 OBJETO DEL PROYECTO

El presente proyecto fin de carrera tiene como objetivo localizar y analizar los puntos donde se presentan mayores esfuerzos mediante la técnica del submodeling, en un chasis para basculante de cilindros centrales fabricado en aluminio.

Este proyecto nace a consecuencia de la petición de la empresa LECIÑENA S.A. de la verificación de un chasis completo de aluminio inicialmente creado por ellos mismos. El estudio de sus componentes servirá de base a futuros proyectos relacionados con el cálculo y diseño de chasis para la misma empresa.

Para el cálculo justificativo del chasis y sus componentes han sido desarrollados modelos numéricos basados en el Método de los Elementos Finitos mediante los programas de diseño y cálculo MSC.PATRAN y Dassault Systèmes ABAQUS, capaces de simular el comportamiento de las estructuras 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.

Por último, partiendo de los resultados obtenidos en la simulación de los modelos iniciales del chasis, la investigación se centrará sobre las zonas que se consideren más desfavorables. Aplicando la técnica del submodeling para obtener unos resultados más precisos en dichas zonas críticas, de las cuales se propondrán una serie de optimizaciones para mejorar su resistencia y disminuir la deformación, y así conseguir que las cargas aplicadas sean superadas con garantía.

2. PLANIFICACION DEL PROYECTO

2.1 EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

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 elemento 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 los criterios 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 ($n \times n$) de rigidez del sistema;

$\{u\}$ es un vector columna ($n \times 1$) que normalmente representa las deflexiones del sistema que son desconocidas

$\{f\}$, es un vector columna ($n \times 1$) que normalmente son las cargas aplicadas que son conocidas.

2.2 SOFTWARE UTILIZADO:

2.2.1 ABAQUS: PROGRAMA 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 2.1.

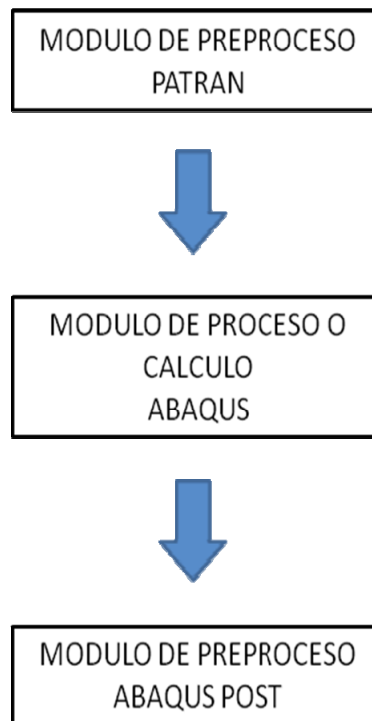


Figura 2.1: Partes de un Programa de Elementos Finitos

Podemos observar los nombres de los programas comerciales utilizado en cada uno de los módulos o partes.

A continuación se explican las características de dichos programas comerciales utilizados para la realización de este proyecto.

2.1.1.1 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:

- GEOMETRIA: El objeto a estudio se define su geometría por medio de coordenadas u otros elementos de ayuda auxiliar (rectas, circunferencia, etc.,...).
- DISCRETIZACION: 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 2.2 se muestran los distintos tipos de elementos:

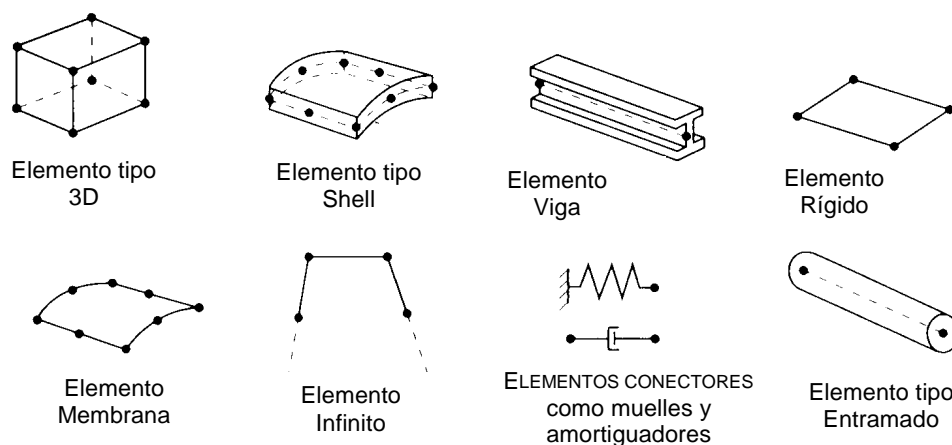
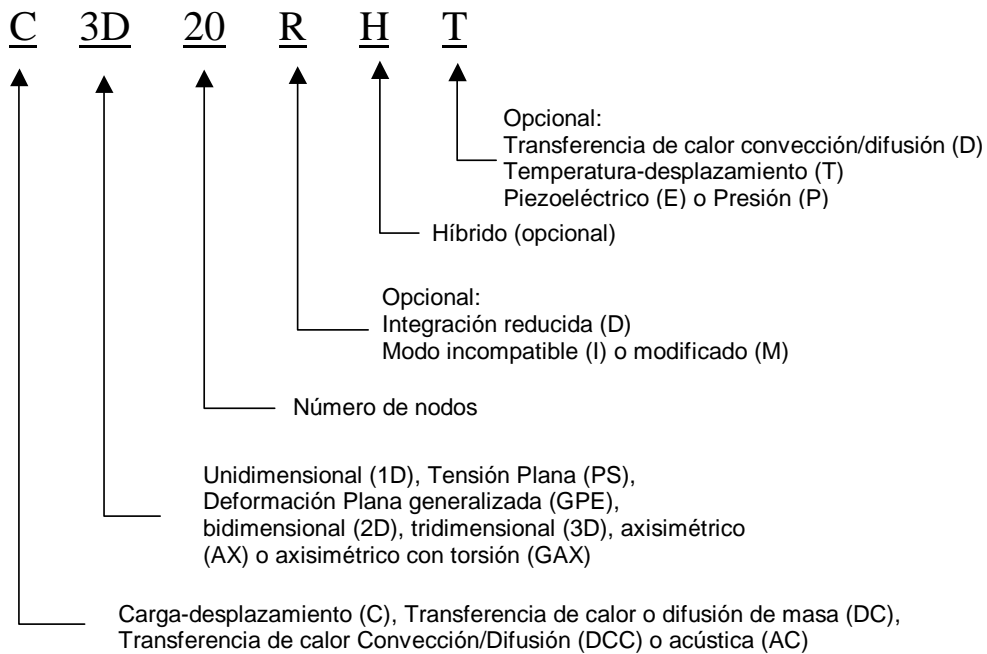


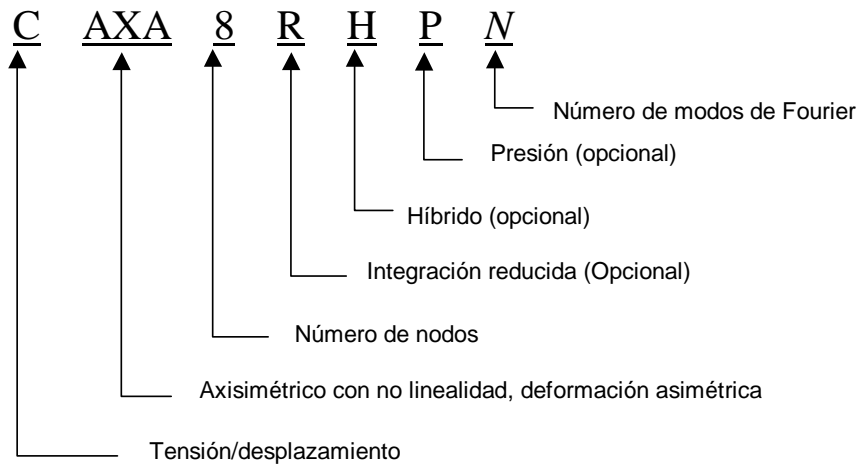
Figura 2.2 Tipos de Elementos

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 esta 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. Cado 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 3D (Solidos) se especifican sus características que lo definen.

- 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.

2.2.1.2. 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.

2.2.1.3. ABAQUS/POST

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 postprocesadores. Éstos representan de una forma gráfica todos los resultados obtenidos en el cálculo, pudiendo así obtener los resultados pedidos mediante un mapa de colores y tonalidades, y realizar a su vez vistas de cualquier ángulo posible.

2.3 DESCRIPCION DEL CHASIS

2.3.1 INTRODUCCIÓN

Un chasis se podría definir como una estructura cuyo propósito es conectar rígidamente la suspensión delantera y 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 de este caso de esfuerzo último.

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, teniendo en cuenta que todo ello repercute en 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.

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.

2.3.2 DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES

En la siguiente figura puede verse un plano general del chasis sometido a estudio (Figura 2.3). Todos los planos utilizados en este proyecto han sido proporcionados en formato digital por el departamento técnico de LECIÑENA y son propiedad de la empresa, por lo tanto, no han sido incluidos en este proyecto de forma implícita por petición de la misma.

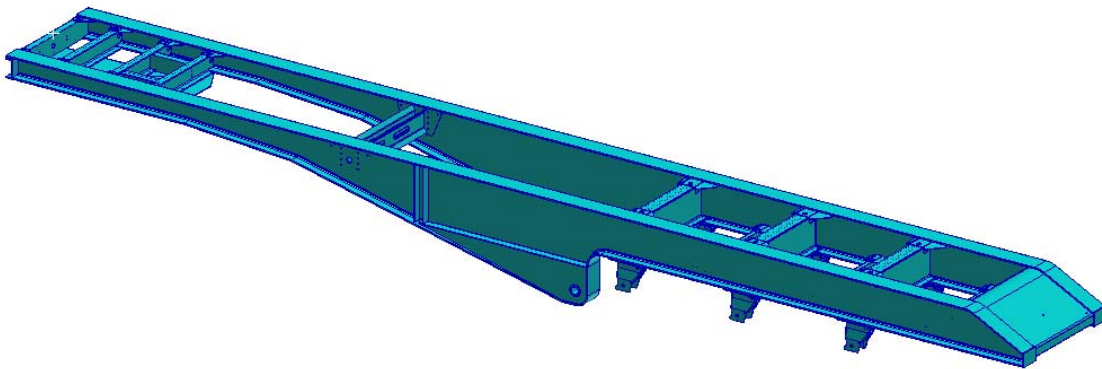


Figura 2.3 Vista isométrica del chasis de aluminio

El chasis se puede considerar simétrico a lo largo de su eje longitudinal. Por tanto puede ser simplificado y de esta manera se trabajará sólo con mitad del modelo inicial. Los elementos presentados a continuación son los que componen los submodelos que posteriormente serán analizados y por ello sometidos a un mayor estudio.

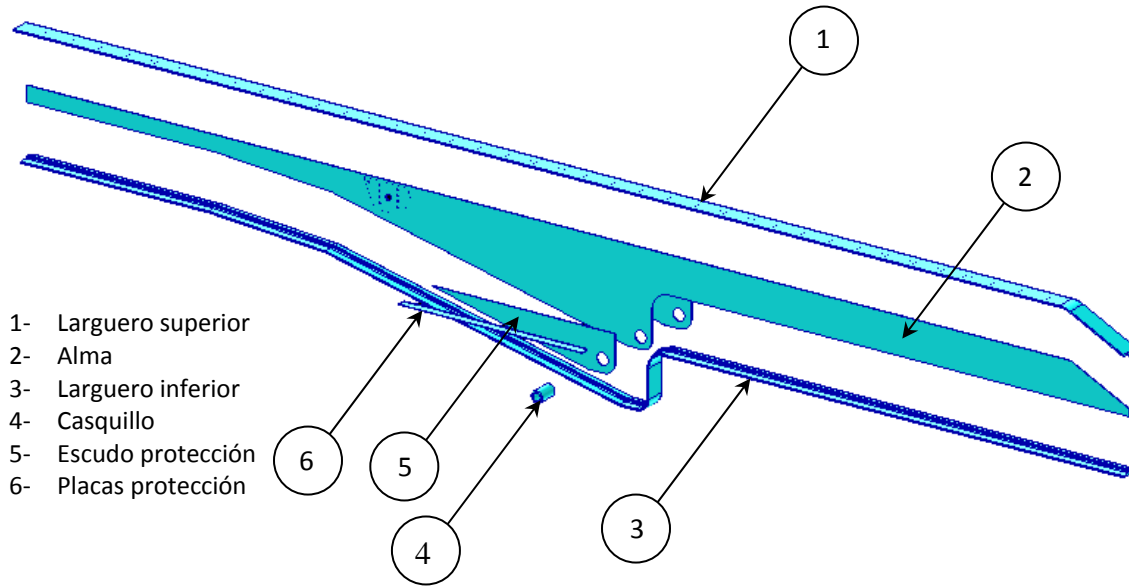


Figura 2.4 Despiece del chasis de aluminio

2.3.3 DESCRIPCIÓN DE UNIONES ENTRE COMPONENTES

Los elementos de la figura anterior están fabricados en su mayoría por chapas de un espesor determinado, cortadas, plegadas y deformadas hasta obtener la forma necesaria. Una vez obtenidas en el proceso de fabricación esto se ensamblan entre ellas. Tras el montaje, y para darle mayor resistencia al conjunto, se añaden varios cordones de soldadura mediante las máquinas correspondientes. Las propiedades de estos cordones serán distintas a las del elemento base ya que al tratarse de cordones de aluminio la zona soldada tendrá peor características que el resto de material. En particular las zonas afectadas térmicamente (ZAT's) de las piezas a unir (Figura 2.5). La profundidad de garganta de dichos cordones es aproximadamente de unos 6 mm.

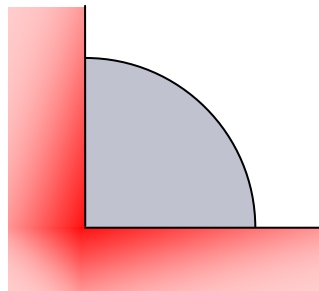


Figura 2.5 Zonas afectadas térmicamente (ZAT's) al aplicar el cordón de soldadura.

2.4 FASES DEL PROYECTO

2.4.1 IMPORTAR GEOMETRÍA

En esta primera etapa se parte, como ya se ha citado, del modelo que la empresa Leciñena nos ha facilitado para el análisis del chasis. Dicho modelo ha sido realizado con el programa Solid Edge en formato IGS, compatible con el programa de análisis PATRAN.

Una vez importado el chasis a PATRAN toda la geometría se divide en grupos, es decir, para cada componente del modelo inicial (alma, largueros, casquillo, etc) se crea un grupo. De esta manera se divide el modelo y se trabaja de una manera mucho más cómoda. Además los resultados posteriores se podrán obtener individualmente para cada grupo.

2.4.2 MODIFICAR GEOMETRÍA

El modelo inicial, como ya se ha indicado, se puede simplificar ya que es simétrico a lo largo de un eje longitudinal. Tras eliminar los elementos innecesarios se aíslan los dos submodelos de las zonas sometidas a estudio.

Los dos submodelos de trabajo son los representados en la Figura 2.6

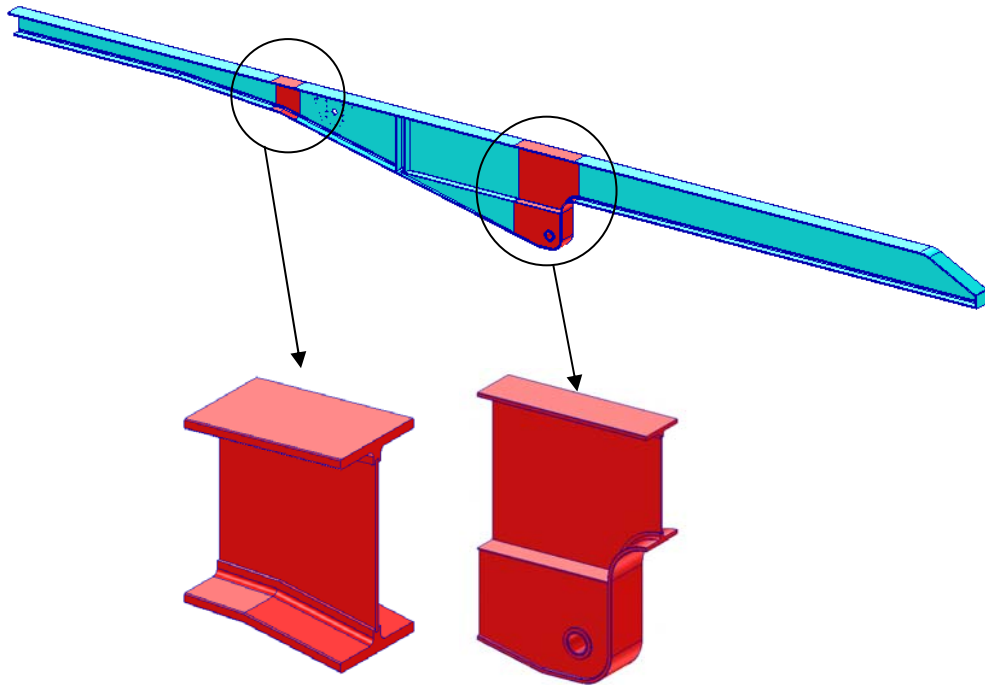


Figura 2.6 Detalle submodelos 1 y 2

Estos dos submodelos están formados únicamente por elementos sólidos lo que dificulta su posterior mallado, por lo que es necesario crear todas las superficies planas del contorno, así como los puntos y vectores que definan la extrusión de estas superficies en sólidos.

La existencia de varias superficies para definir una única cara de un sólido se debe a las proyecciones de unas piezas sobre otras. Por esto en ambos modelos se empieza a trabajar por el alma y a partir de este componente se continúa por el resto de las piezas en contacto. En la figura 2.7 se puede observar el alma de los dos submodelos dividida en varias superficies, correspondientes a las zonas de los largueros superior e inferior, las chapas de protección y el casquillo.

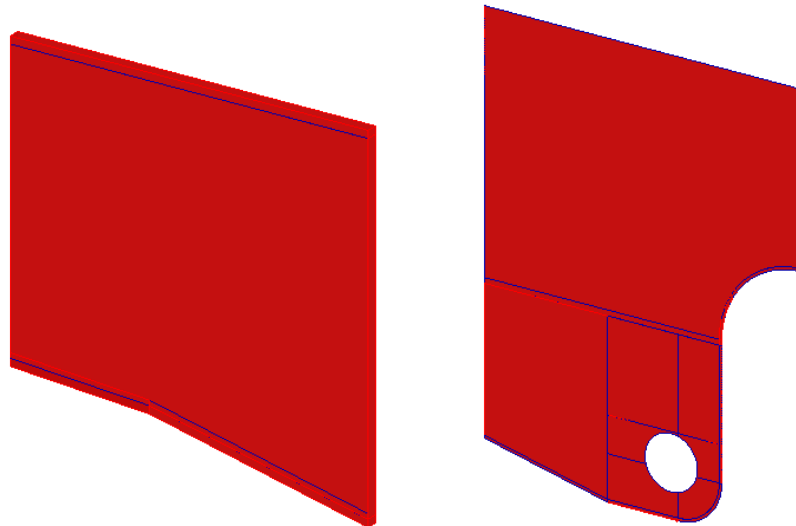


Figura 2.7 Almas formadas por varias superficies planas

El modelo inicial del que partíamos ha sido creado para la fabricación del conjunto por lo que presentaba las tolerancias necesarias para su montaje. Se debe modificar la geometría de los submodelos para que las superficies que vayan a estar en contacto compartan puntos geométricos y posteriormente nodos.

Esta modificación implica una variación insignificante en las medidas entre el modelo real y el analizado, sin afectar a los resultados finales.

Otra comprobación necesaria para conocer la magnitud de los resultados finales es escalar los submodelos hasta obtener las cotas en valores de mm. Así tras aplicar las cargas en Newton se obtendrán los resultados en MPa.

Ya que los cordones de soldadura no son componentes necesarios para la fabricación del chasis sino que son añadidos posteriormente no están incluidos en el modelo inicial aportado por la empresa. Por lo tanto será necesario crearlos, para ello se crea una superficie con forma de cuarto de círculo, que será extruida a lo largo de las piezas a soldar.

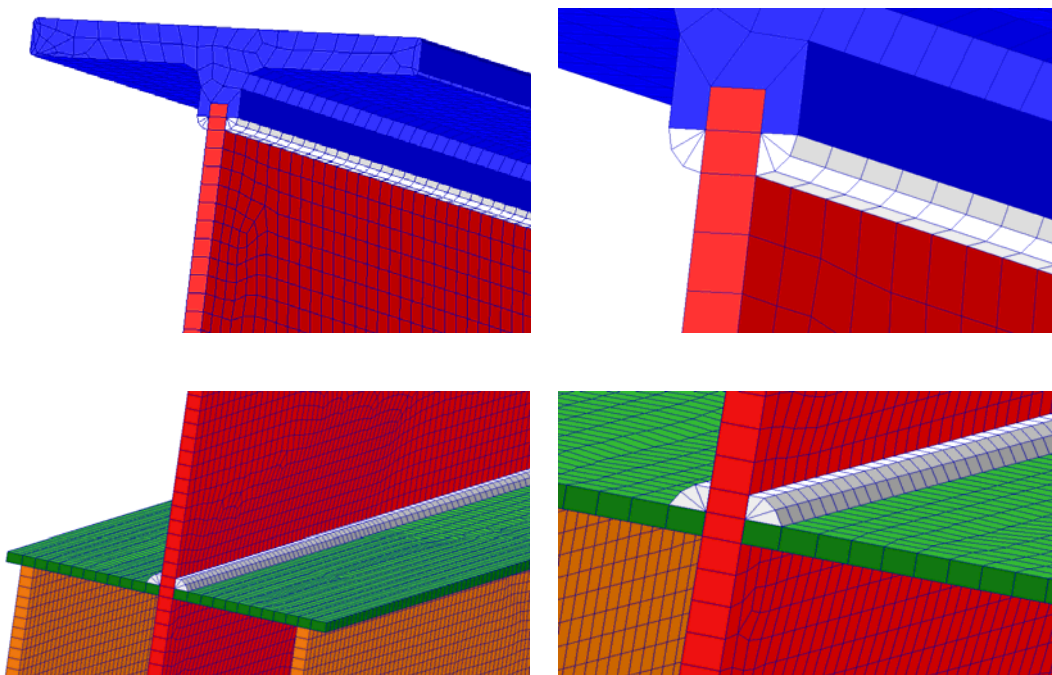


Figura 2.8 Detalle sección cordones soldadura

2.4.3 MALLAR

Una vez que tenemos ambos submodelos con toda la geometría definida el siguiente paso es convertir las superficies planas de cada pieza en mallas de elementos también planos, que posteriormente serán extruidos a lo largo de la longitud de dicha pieza.

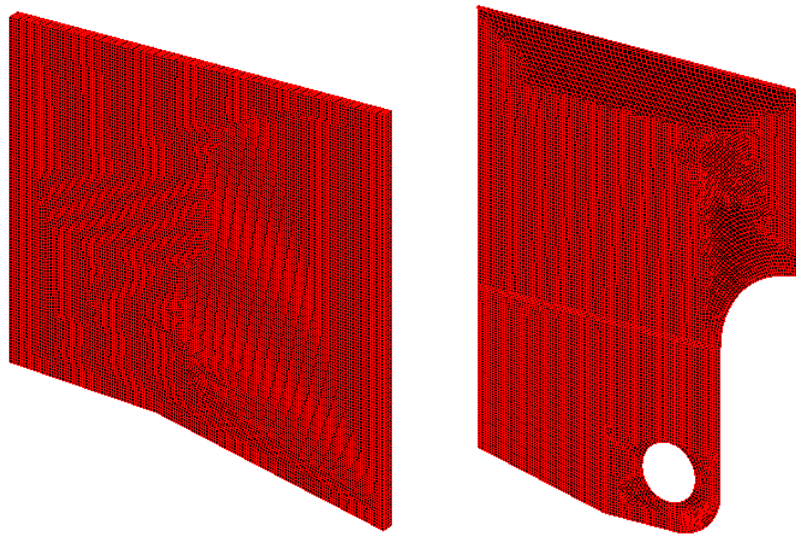


Figura 2.9 Almas con malla plana

El submodelo número 1 se compone de 3 partes diferenciadas: Larguero superior, larguero inferior y alma. El mallado de este submodelo se hace pieza a pieza, teniendo en cuenta que la malla de una pieza debe coincidir con la contigua. Para ello como se ha indicado anteriormente facilita el trabajo la división de la pieza en diferentes superficies geométricas, que serán malladas con el mismo número de elementos que la superficie idéntica de la pieza contigua en contacto. A la hora de mallar si una superficie es regular se realiza con el tipo de malla ISOMESH y en el caso de tratarse de una superficie irregular el tipo de malla es la denominada PAVER.

Los elementos utilizados para estos componentes son tipo SHELL (3D), de forma Hex8, es decir, cubos formados por 8 nodos. Estos cubos deben tener la forma más regular posible, sin distorsiones importantes ni nodos dentro de un mismo elemento que sean coincidentes. De lo contrario el proceso de cálculo posterior daría error.

La unión entre componentes a la hora de la fabricación se hace por ensamblaje con una tolerancia de apriete. Pese a ello para dar mayor resistencia al conjunto se echan cuatro cordones de soldadura en las correspondientes uniones entre alma y largueros.

Los elementos utilizados para mallar los cordones de soldadura son los llamados SHELL (3D), de forma Wedge6, es decir, cuñas formadas por 6 nodos.

La zona a estudio más importante en el submodelo 1 es el cambio de sección que existe en el larguero inferior.

El submodelo número 2 se compone de las siguientes partes: Larguero superior, alma, larguero inferior, escudos de protección, chapas de unión y casquillo.

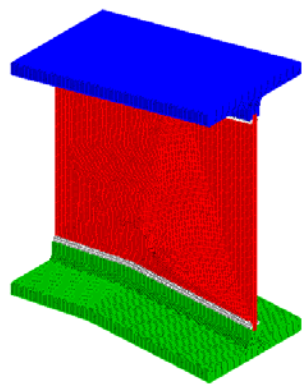
El mallado de este submodelo se realiza exactamente como en el caso anterior, pieza a pieza comenzando por el alma central. Hay que tener en cuenta que las mallas de piezas con zonas próximas deben coincidir. Cada pieza se divide en diferentes superficies, que serán malladas con el mismo número de elementos que la superficie idéntica de la pieza en contacto.

La unión entre alma y largueros se hace por ensamblaje con una tolerancia de apriete. Pese a ello para dar mayor resistencia al conjunto se echan varios cordones de soldadura en las uniones entre alma, largueros, escudos y chapas de protección.

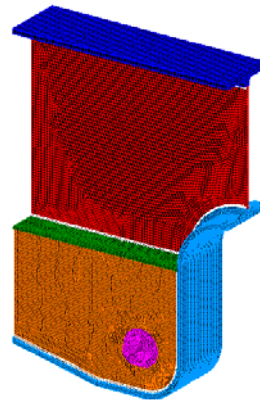
En este submodelo las zonas más críticas serán los agujeros en los escudos y en el alma ya que trabajan como concentradores de tensiones.

Una vez malladas todas las partes de un submodelo ya que hay nodos coincidentes entre las piezas en contacto se debe realizar una simplificación. Todo aquel nodo que este duplicado ya que forma parte de 2 elementos distintos en contacto podrán ser eliminados consiguiendo de esta manera un gran ahorro de espacio en el modelo, al disminuir la cantidad de información con la que se trabaja.

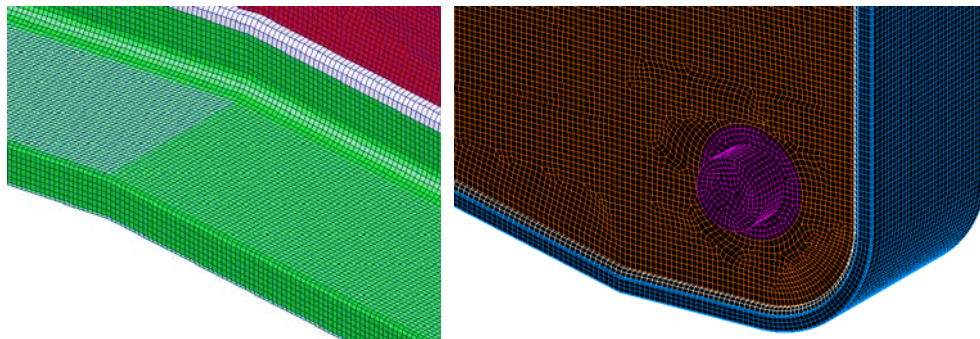
A continuación aparecen reflejados el número de elementos que componen la malla de los submodelos 1 y 2.



DENOMINACION
SUBMODELO 1
Nº DE ELEMENTOS
352.876
TIPO DE ELEMENTOS
Hex8;
Wedge 6
MATERIALES
Al-5383-H34;
Al-6082-T6



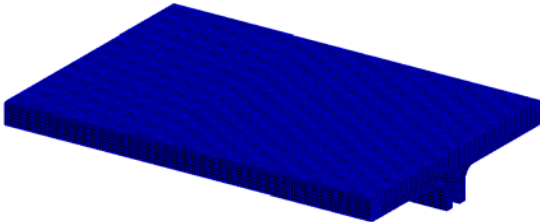
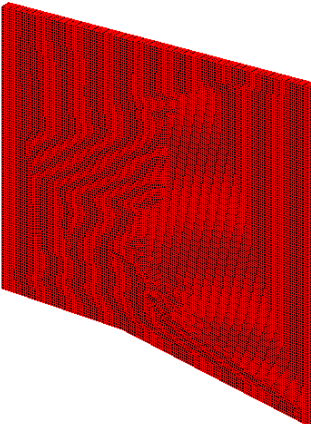
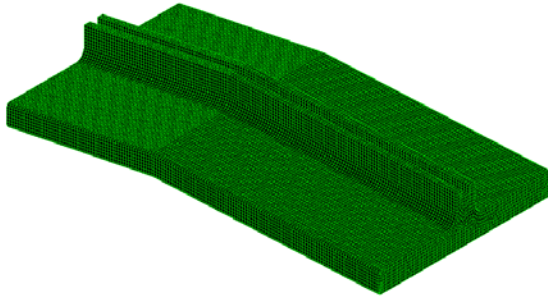
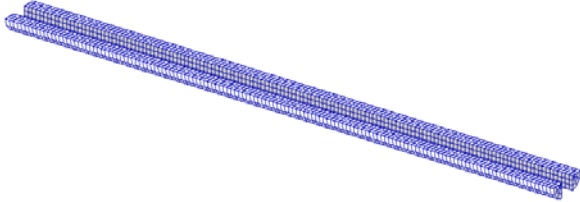
DENOMINACION
SUBMODELO 2
Nº DE ELEMENTOS
68.596
TIPO DE ELEMENTOS
Hex8;
Wedge 6
MATERIALES
Al-5383-H34;
Al-6082-T6



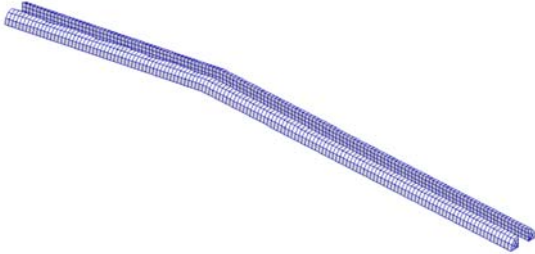
2.10 Zonas críticas submodelos – Concentradores de tensiones

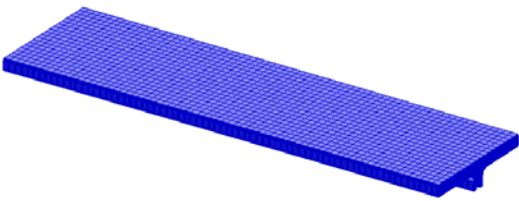
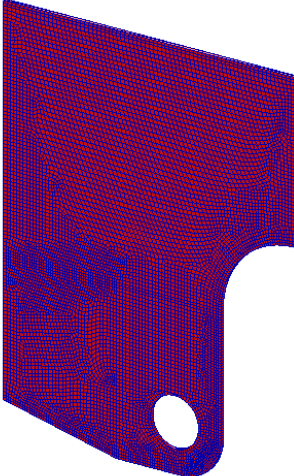
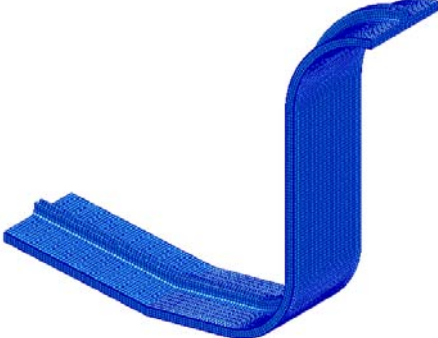
De la tabla anterior destaca el elevado número de elementos que forman el submodelo 1 con respecto al submodelo 2. Esto se debe a que el submodelo 1 está formado únicamente por 3 componentes (alma, larguero superior y larguero inferior) y por tanto de menos zonas “comunes” en las que compartir elementos. El tamaño de la malla se puede hacer con más elementos. En cambio en el submodelo 2 se utiliza un tamaño de elemento pequeño donde aparecen zonas de contacto entre componentes y se utiliza un tamaño de elemento mayor para el resto del componente conforme se aleja de la zona en contacto. De otra manera el modelo tendría tal cantidad de elementos que dificultaría el trabajo y su posterior cálculo.

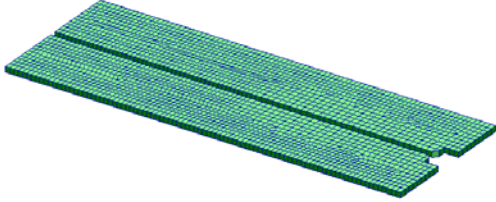
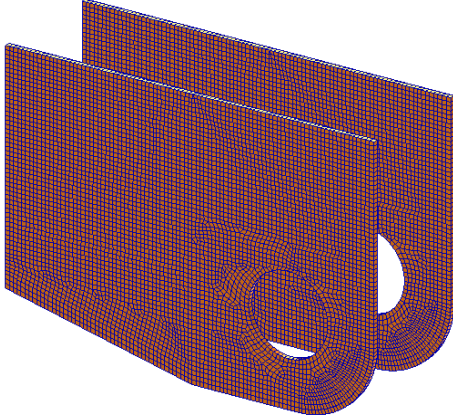
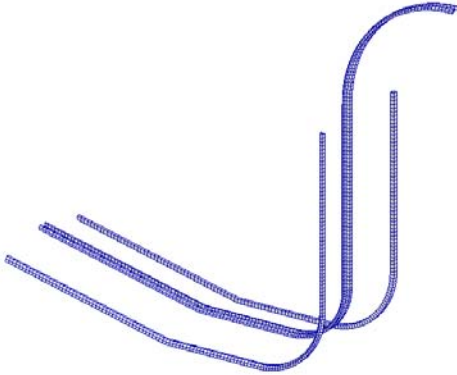
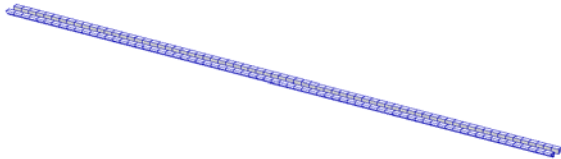
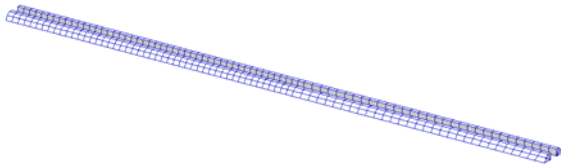
La siguiente tabla muestra el material, tipo y número de elementos que forma cada componente de los submodelos 1 y 2.

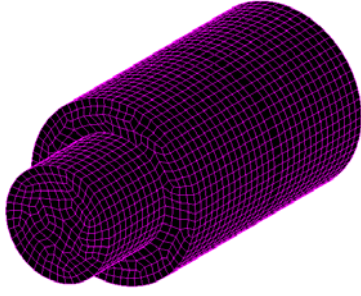
SUBMODELO 1				
DENOMINACION	IMAGEN	Nº DE ELEMENTOS	TIPO DE ELEMENTOS	MATERIAL
LARGUERO SUPERIOR		136.994	Hex8	Al-6082 T6
ALMA		76.507	Hex8	Al-5383-H34
LARGUERO INFERIOR		134.173	Hex8	Al-6082 T6
CORDON SUPERIOR		2.574	Wedge6	Al-Soldaduras

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

CORDON INFERIOR		2.628	Wedge6	Al-Soldaduras
----------------------------	---	-------	--------	---------------

SUBMODELO 2				
DENOMINACION	IMAGEN	Nº DE ELEMENTOS	TIPO DE ELEMENTOS	MATERIAL
LARGUERO SUPERIOR		4.968	Hex8	Al-6082 T6
ALMA		8.538	Hex8	Al-5383 H34
LARGUERO INFERIOR		26.082	Hex8	Al-6082 T6

CHAPAS		2.158	Hex8	Al-5383 H34
ESCUDOS		11.192	Hex8	Al-5383 H34
CORDONES INFERIORES		2.168	Wedge6	Al-Soldaduras
CORDONES SUPERIORES		434	Wedge6	Al-Soldaduras
CORDONES INTERMEDIOS		488	Wedge6	Al-Soldaduras

CASQUILLO		12.568	Hex8	S355
-----------	---	--------	------	------

La técnica del submodeling se caracteriza por estudiar una zona concreta con mayor precisión que en un análisis previo general de todo el conjunto. Es decir, en nuestro caso los dos submodelos al tener una malla más fina nos darán información con mayor precisión que el modelo inicial del que partían. Para ello el número de elementos que forman las mallas debe ser mayor. Esto sería prácticamente imposible de hacer en el modelo inicial ya que dado su complejidad alcanzaría un número de elementos tan elevado que resultaría imposible su cálculo.

En las tablas anteriores se puede observar el elevado número de elementos que forman cada componente. A continuación se presentan unas capturas en los que se puede comprobar este aumento de elementos respecto al modelo inicial.

Se aprecia que el tamaño de elemento es menor, por tanto se obtiene una malla más fina en comparación con el modelo global del que partíamos.

Además en el análisis previo del chasis se simulaban las alas superior e inferior con elementos planos, sin espesor. Como se observa en la Figura 2.11 en el mallado de los submodelos al utilizar elementos 3D se les ha aplicado su espesor real.

Otro detalle añadido que acerca los submodelos al modelo real es el redondeo de las aristas en los extremos. Con una malla con tamaño de elementos pequeños se puede aproximar mejor los chaflanes y redondeos en los cantos de las piezas.

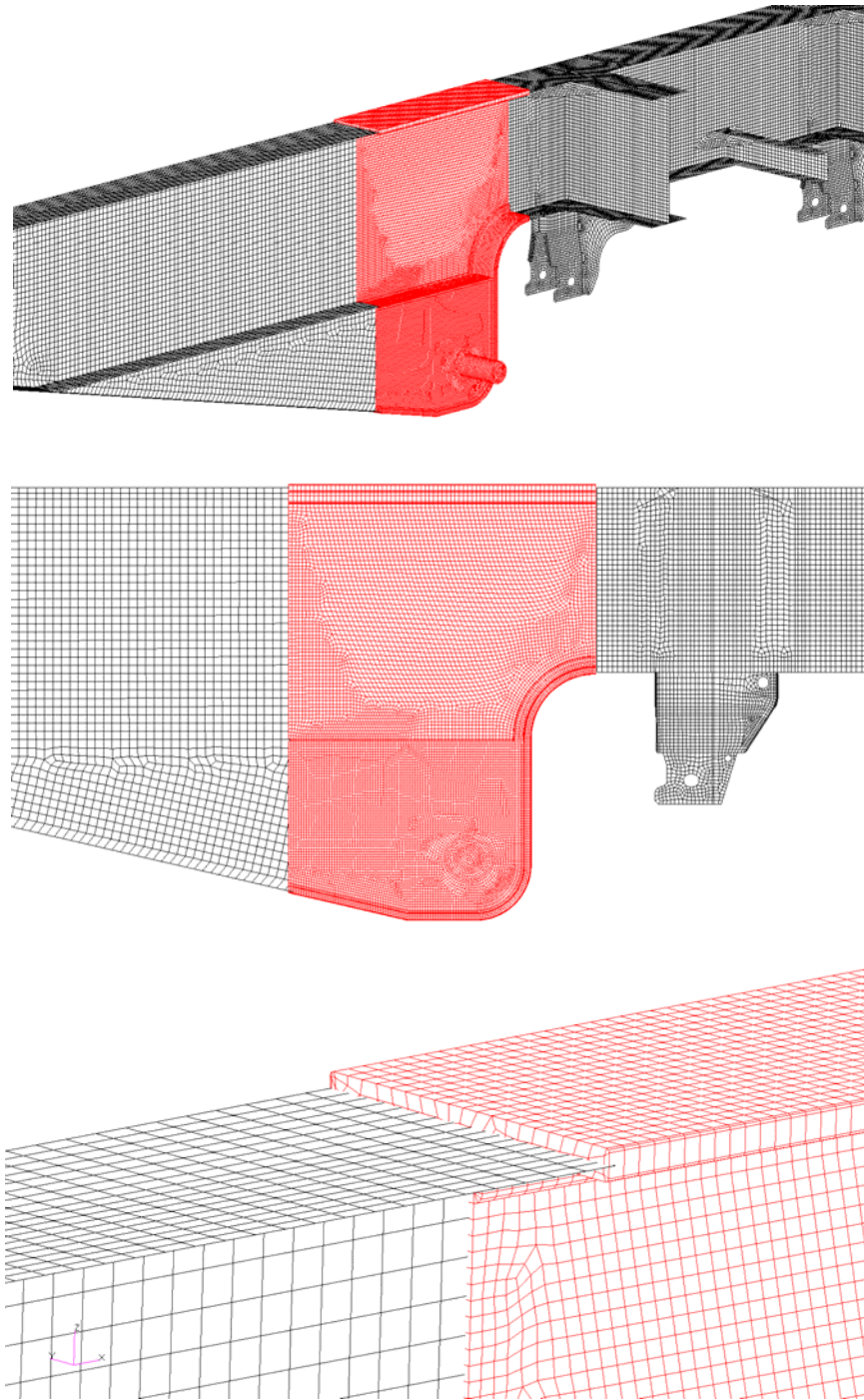


Figura 2.11 Comparación malla submodelo 2-modelo inicial

2.4.4 MATERIALES Y PROPIEDADES.

Las propiedades necesarias para la correcta definición de cada uno de los materiales para la realización de los cálculos mediante el método de los elementos finitos son las que se recogen en la siguiente tabla:

PROPIEDADES UTILIZADAS		UNIDADES CONSIDERADAS
E	Módulo elástico	MPa
v	Coeficiente de Poisson	Adimensional
ρ	Densidad	Kg/mm ³
σ_p	Límite elástico (correspondiente a un A _{s1} % de deformación)	Mpa
σ_m	Resistencia mecánica (correspondiente a un A _{s2} % de deformación)	Mpa
A_{s1}	% de alargamiento dado para cada valor de σ _p	Valor en %
A_{s2}	% de alargamiento dado para cada valor de σ _m	Valor en %

Tabla 2.12: Propiedades utilizadas en la definición de los materiales.

Como aproximación va a tenerse en cuenta que todos los aluminios considerados (componentes, cordones de soldadura y ZAT's) van a tener los mismos valores de E, v y ρ correspondientes al aluminio base y que son las mostradas en la siguiente tabla:

MATERIAL	E	Limite Elástico	Limite Rotura	Alargamiento Rotura	v
Al 5383 H34	70.000 Mpa	270 MPa	340 MPa	8 %	0,3
Al 6082 T6	70.000 Mpa	310 Mpa	340 Mpa	11 %	0,3
S 355	210.000 Mpa	355 MPa	550 MPa	21.7 %	0,3
Al - Soldaduras	70.000 Mpa	110 MPa	240 MPa	17 %	0,3

Ya que se plantea que los modelos analizados no alcanzan valores de tensión superiores a su límite elástico no se han considerado sus correspondientes curvas plásticas.

Otras propiedades del Aluminio Al 6082 T6 son las siguientes:

PROPIEDAD	VALOR
Punto de fusión	555°C
Resistividad eléctrica	$0,038 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$
Conductividad térmica	180 W/m·K
Expansión térmica	$24 \cdot 10^{-6}/K$
Dureza Vickers (HV)	100

2.4.5 CONDICIONES DE CONTORNO:

$$M_{TOTAL} = M_0 \times 1.3 = 30 \text{ T} \times 1.3 = 39 \text{ T}$$

Coeficiente de mayoración

Posición 1

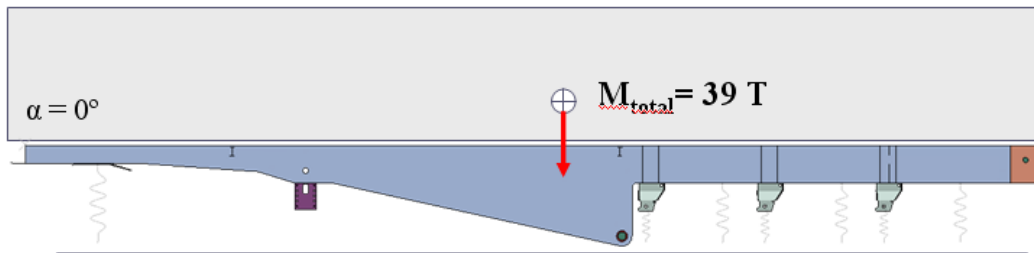


Figura 2.12 Caso de carga mas desfavorable, basculante a 0°

Para la 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 del basculante, considerando por tanto un ángulo inicial de $\alpha=0^\circ$. (Ver figura 2.12)

A partir del cálculo del modelo inicial (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. Después 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, es decir, como tenemos un mayor número de nodos que en el modelo inicial, estos nuevos nodos tomarán un valor intermedio que proviene de los valores de los nodos que los rodean.

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.

Para analizar los resultados se debe utilizar la herramienta ABAQUS, que nos permite trabajar con archivos de resultados obtenidos mediante el cálculo en PATRAN.

2.4.6 ANÁLISIS DE TENSIONES Y RESULTADOS:

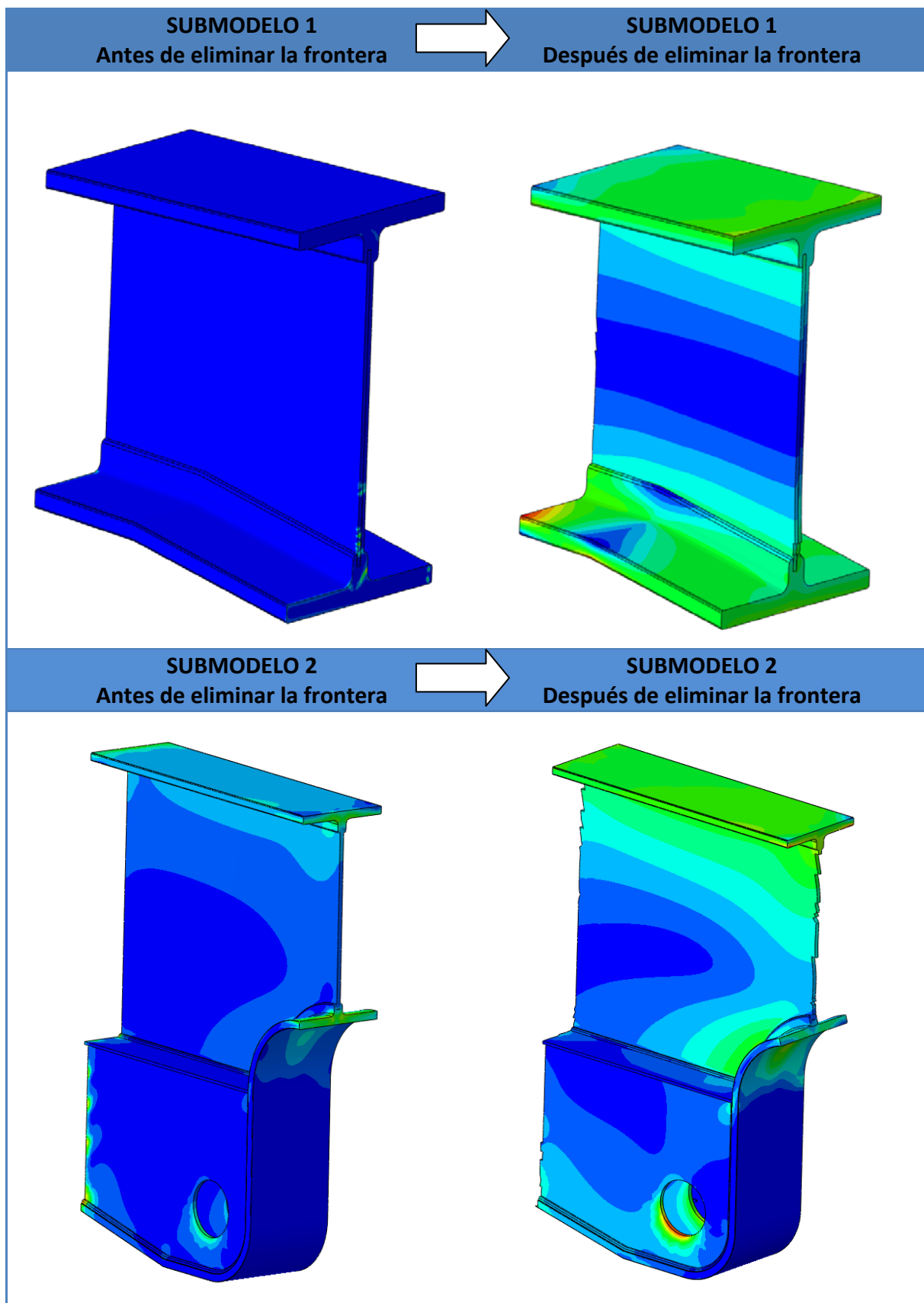
Lo que se quiere analizar en el cálculo de los submodelos es el mapa de tensiones que indicará las que zonas están sometidas a mayor carga.

De esta forma se podrán proponer varias soluciones encaminadas, en primer lugar, a cumplir los coeficientes de seguridad en los submodelos con los materiales empleados, y en segundo lugar y si fuera posible, a mejoras para aligerar dichos submodelos.

A la hora de analizar las tensiones obtenidas lo primero que se debe de tener en cuenta es que nuestros submodelos tienen unos límites impuestos por nosotros desde el principio que no son sus fronteras reales, sino todo lo contrario, simplemente una sección extraída del modelo global. Además dado que el número de elementos es mayor en estos submodelos que en el modelo global de partida los resultados en las fronteras no se pueden considerar.

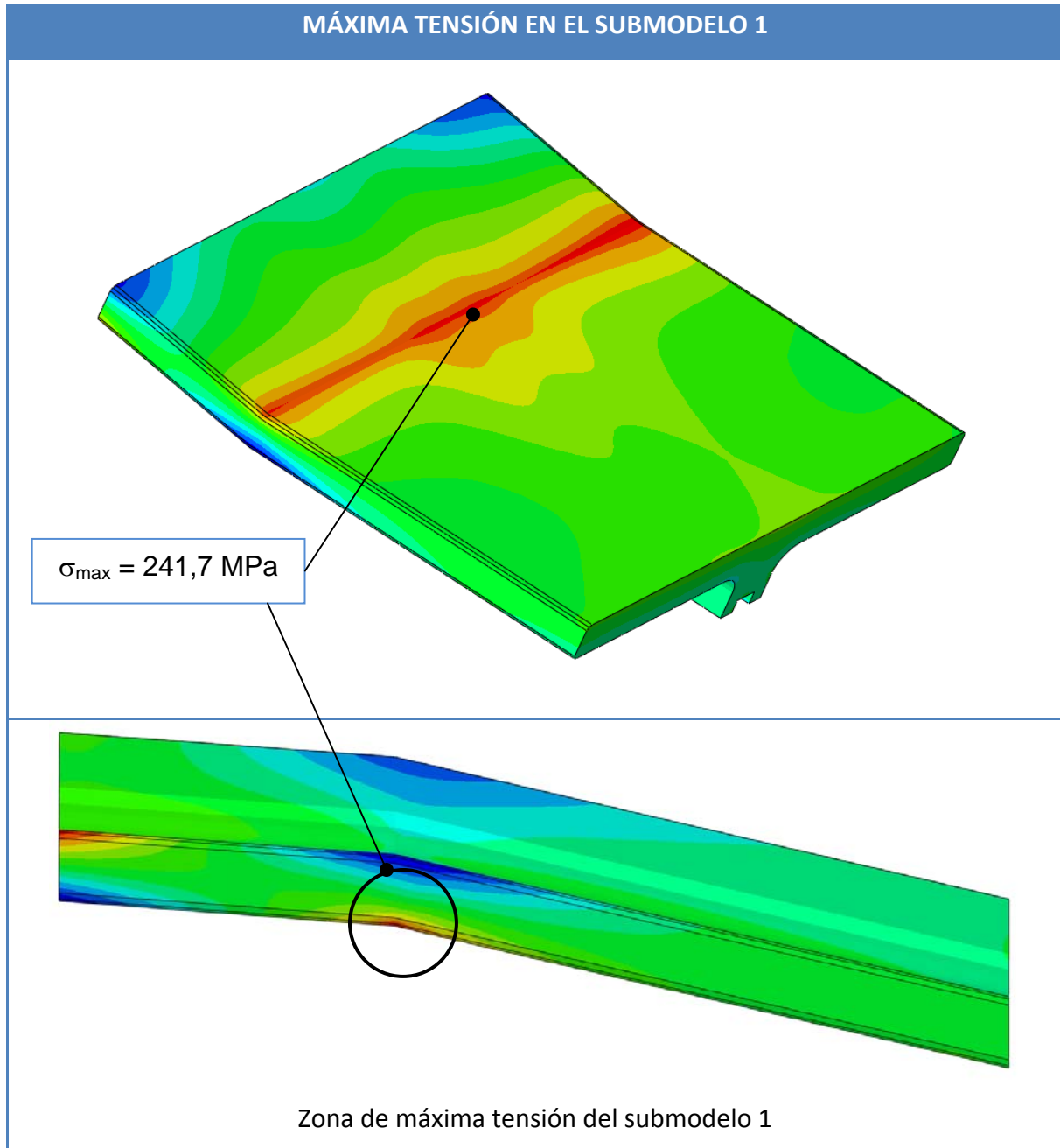
Por tanto los valores dados en las fronteras del submodelo deben ser despreciados. Para ello se recorta los extremos de la pieza en el propio ABAQUS, esto genera un nuevo mapa de tensiones con un nuevo máximo situado en otro punto.

A continuación se muestra una tabla que muestra la variación en el mapa de tensiones en ambos submodelos al eliminar los primeros nodos en los límites de los submodelos.

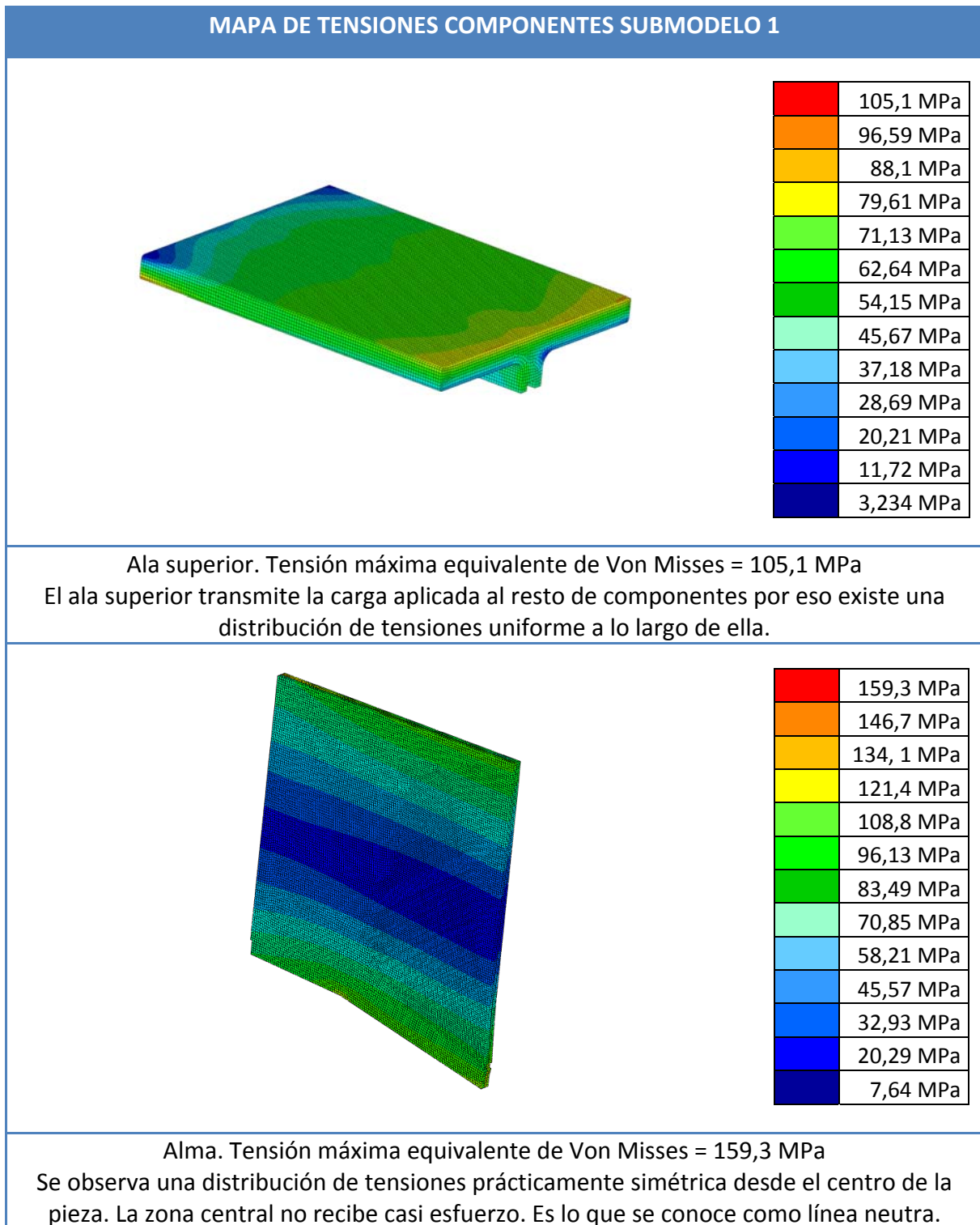


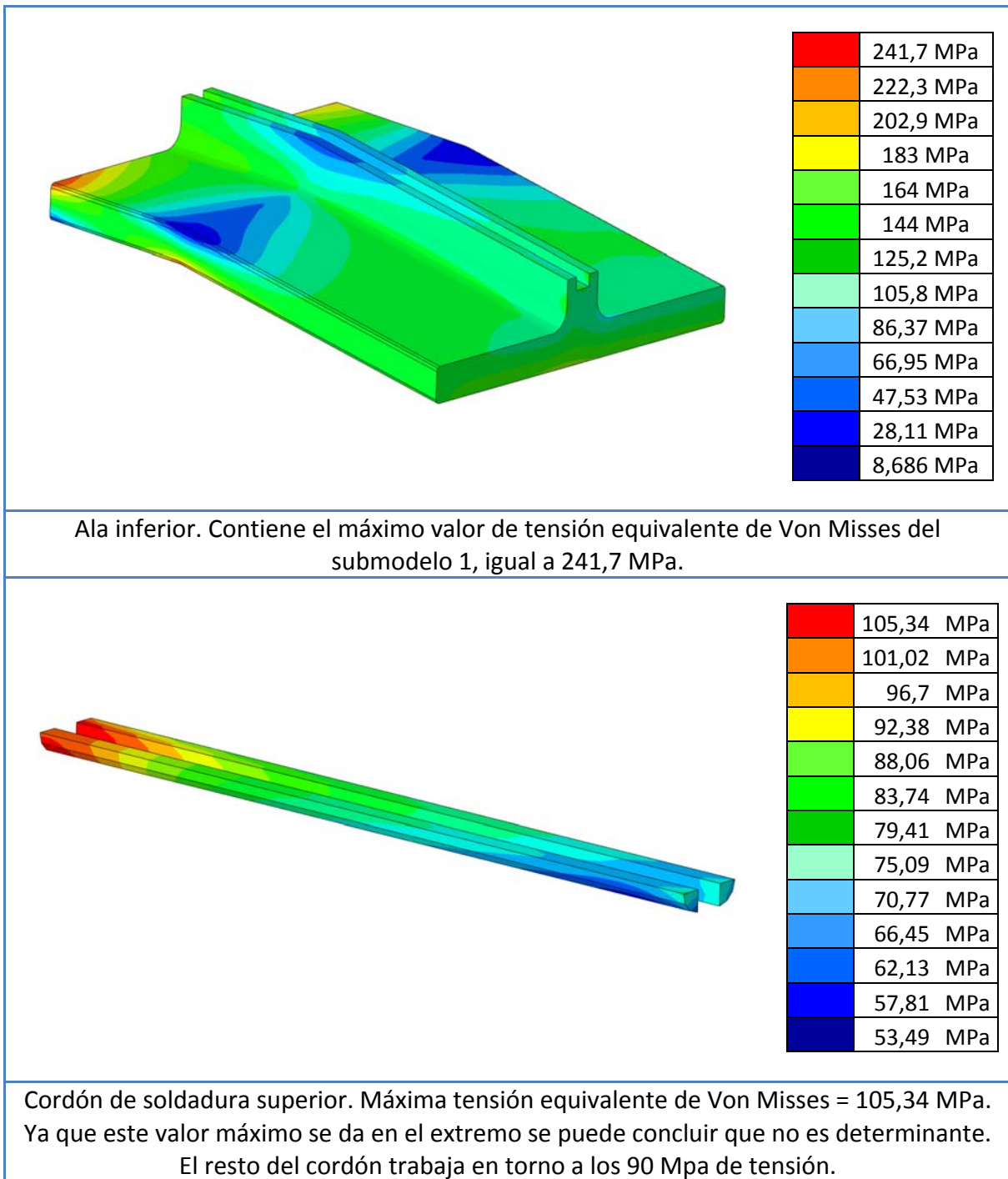
2.4.6.1 Análisis de tensiones del Submodelo 1:

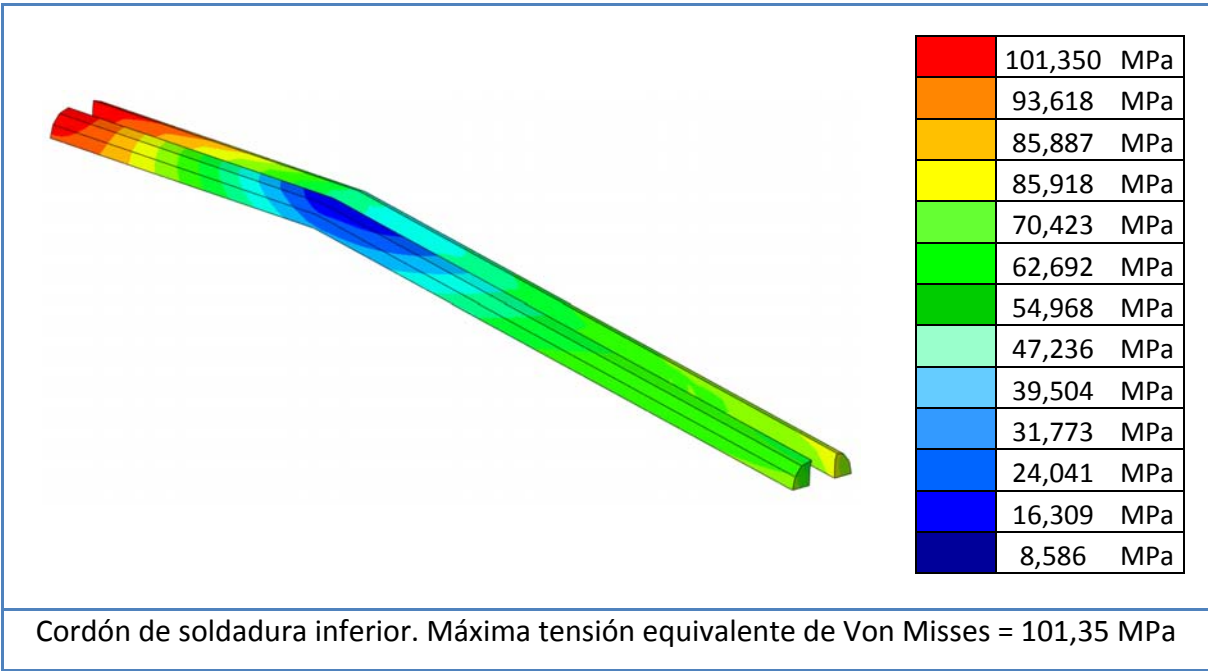
El valor máximo de tensión obtenido para el submodelo 1 es de **241,7 MPa** y se encuentra en el cambio de sección del larguero inferior.



Análisis de los componentes del submodelo 1:





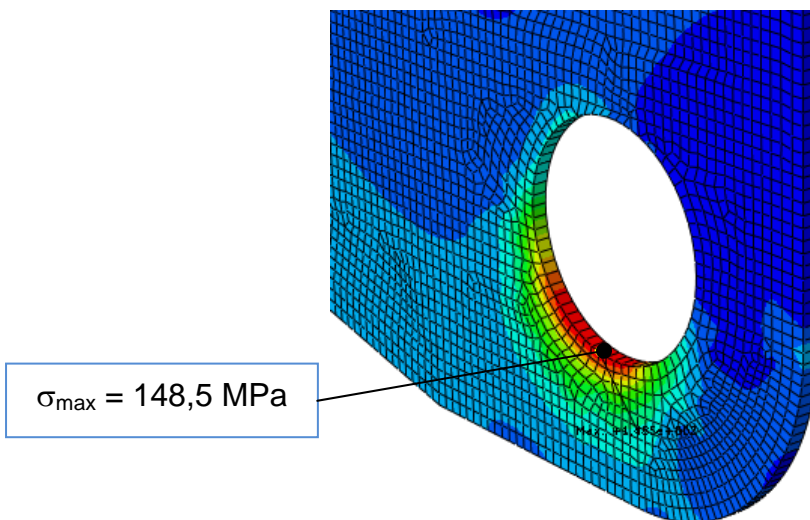
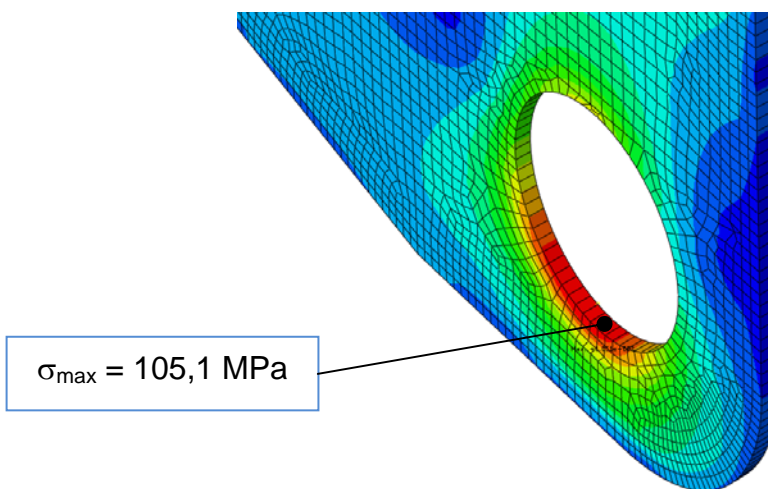


2.4.6.2 Análisis de tensiones del Submodelo 2:

Los valores máximos de tensión obtenidos para el submodelo 2 son de **105,1 MPa** y **148,5 MPa** y se encuentran respectivamente en la zona donde apoya el casquillo en el alma y en el agujero practicado en las placas de protección.

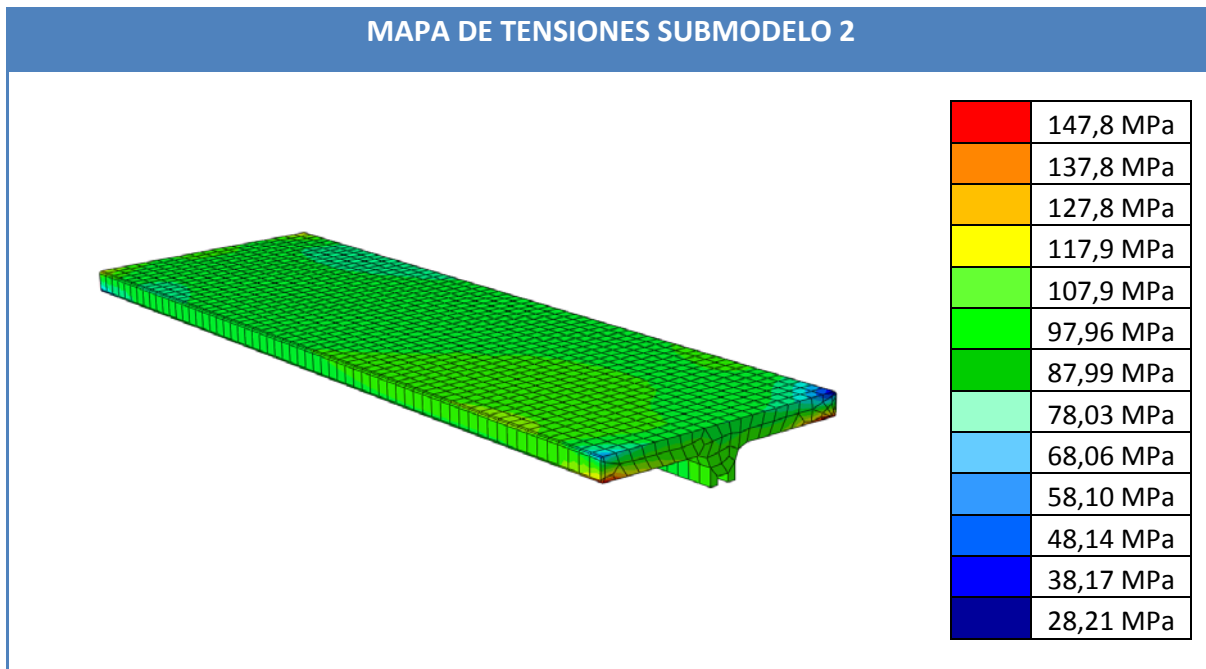
Estos puntos son las zonas más críticas ya que al tratarse de un agujero perforado actúa como concentrador de tensiones.

MAXIMA TENSION EN EL SUBMODELO 2

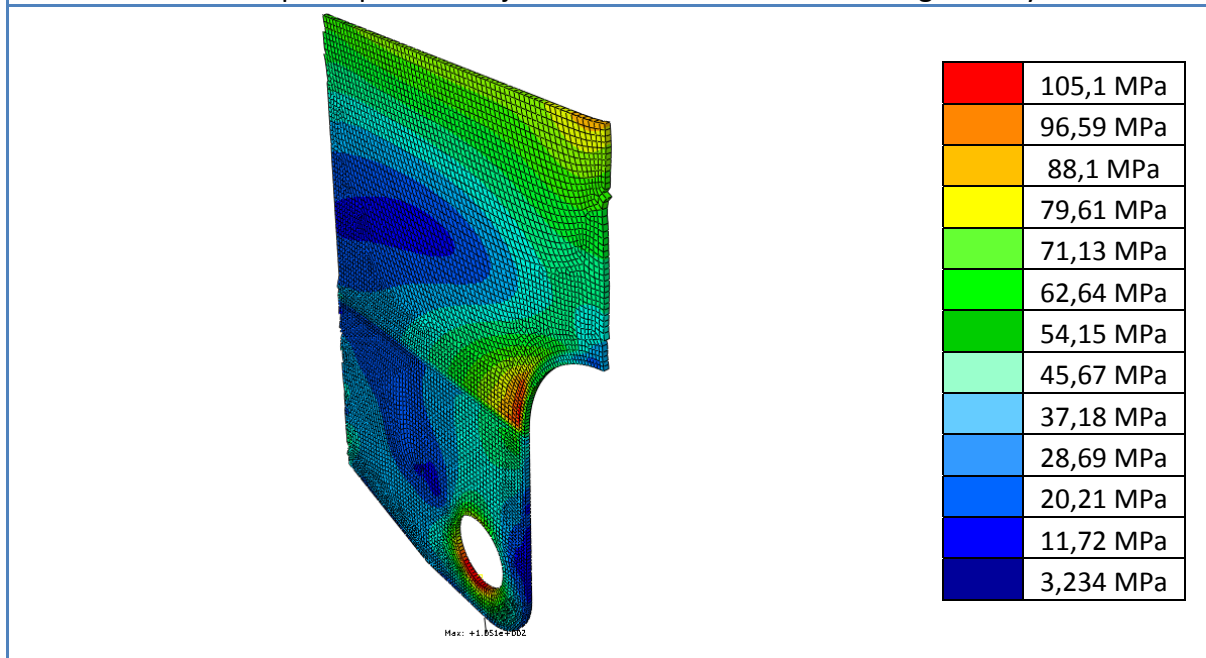


Vista ampliada de las regiones de máxima tensión del submodelo 2.

Análisis de componentes del submodelo 2:

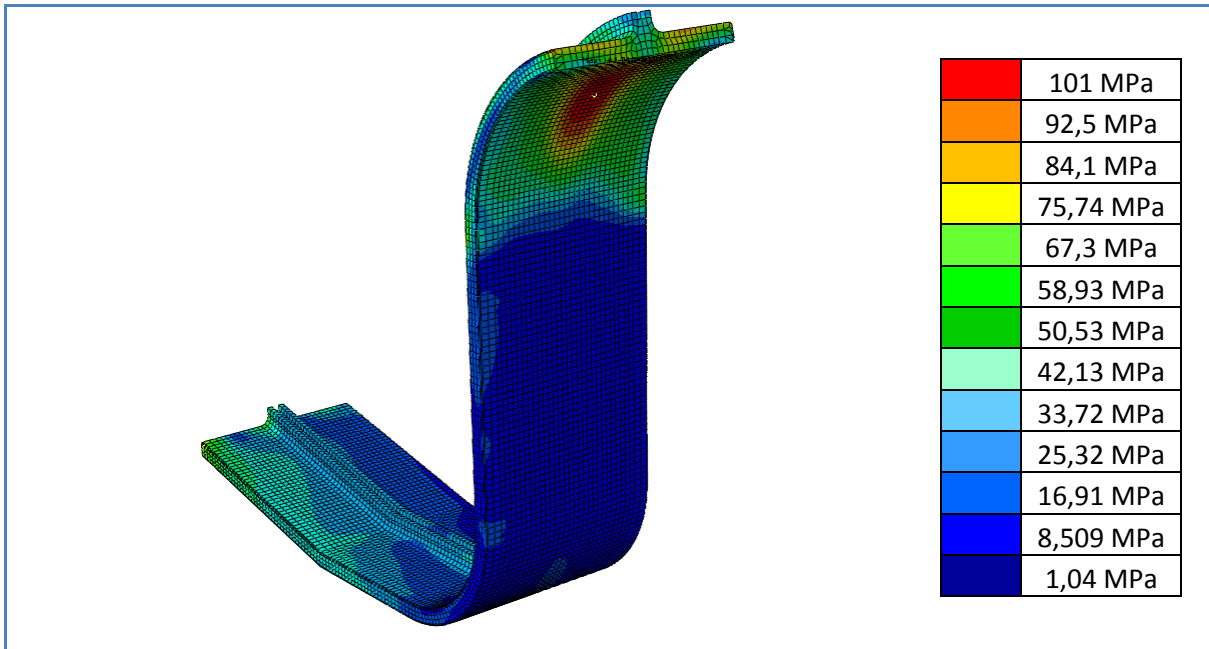


Ala superior. Tensión máxima equivalente Von Mises = 147,8 MPa. Esta tensión no se puede tener en cuenta ya que se da en la frontera del submodelo y no es representativa. Se observa que la pieza trabaja en torno a los 100 MPa en su gran mayoría.

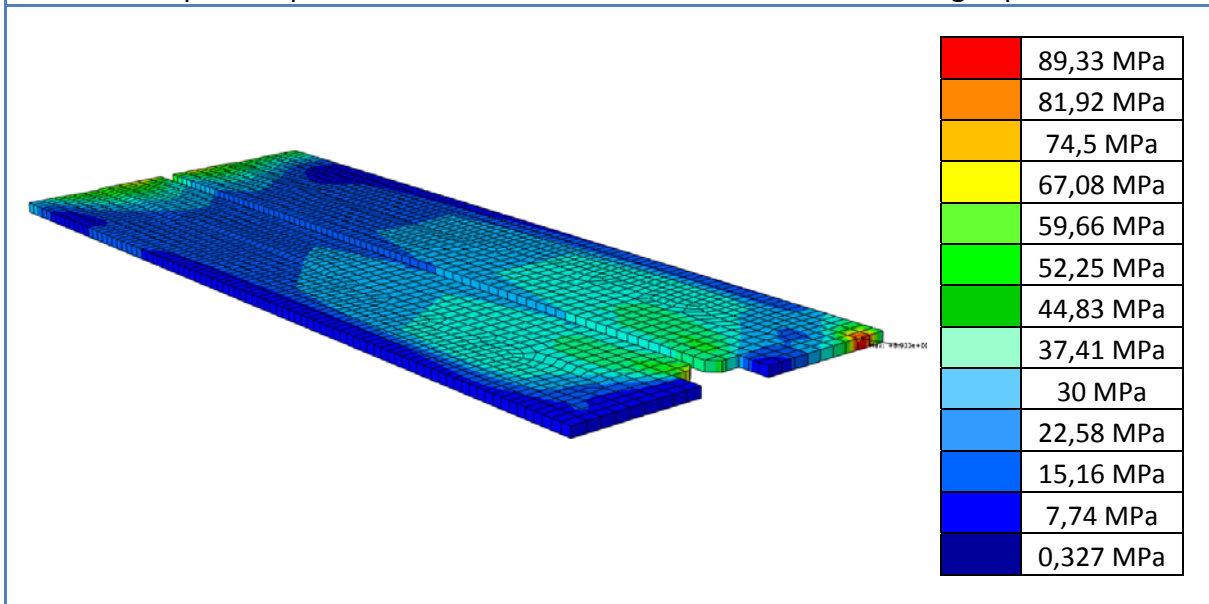


Alma. Tensión máxima equivalente Von Mises = 105,1 MPa

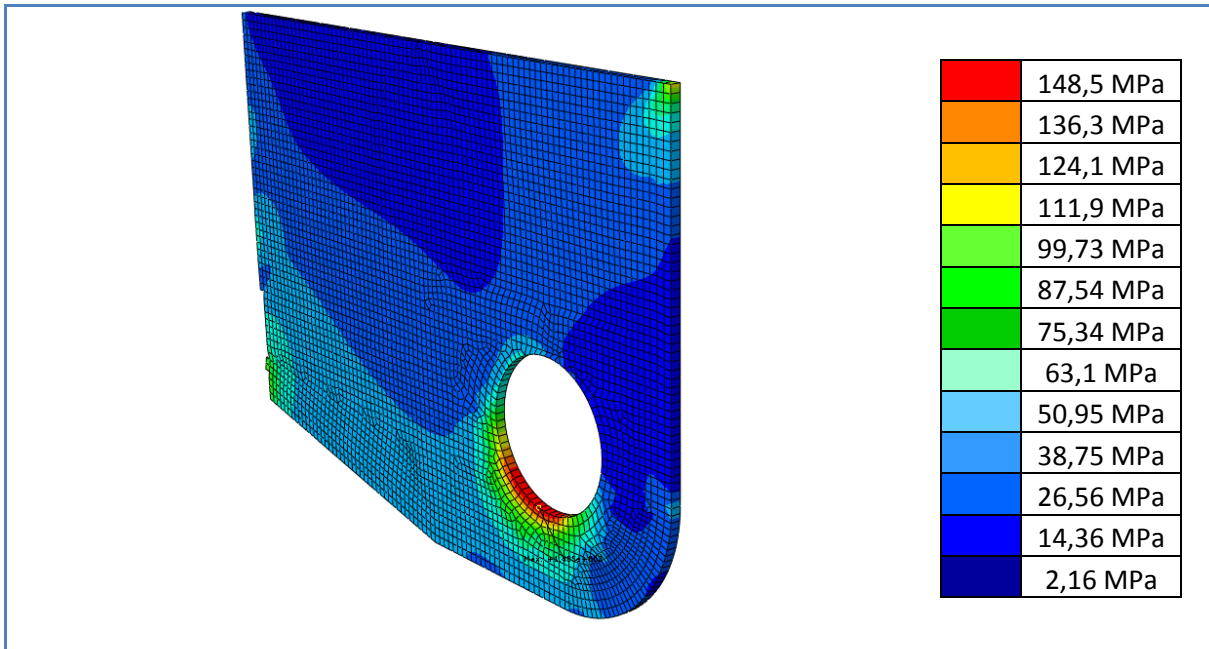
Se observan tres zonas diferenciadas. La parte superior donde transmite la carga el ala superior, la zona intermedia en contacto con el ala inferior, cercana a la zona donde dicha ala superior también tiene su máxima tensión, y por último el agujero donde apoya el casquillo que actúa como concentrador de tensiones.



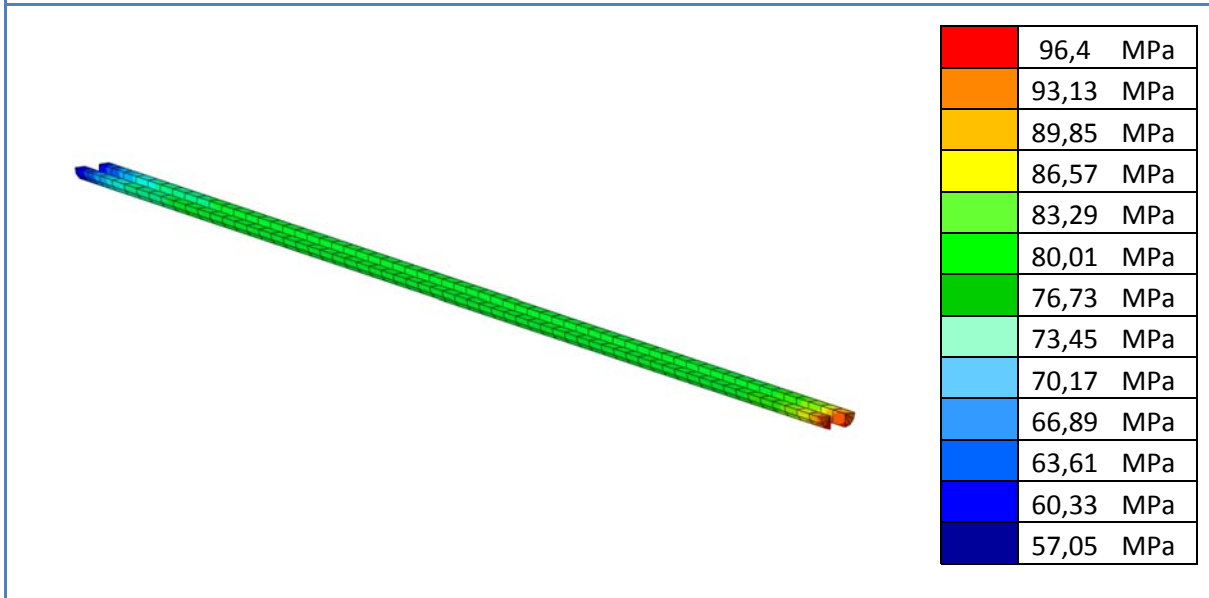
Larguero Inferior. Tensión máxima equivalente de Von Mises = 101 MPa.
En este mapa de tensiones se ve muy bien reflejado como trabaja el ala inferior ya que es en la parte superior de esta donde más esfuerzo transmite la carga aplicada.



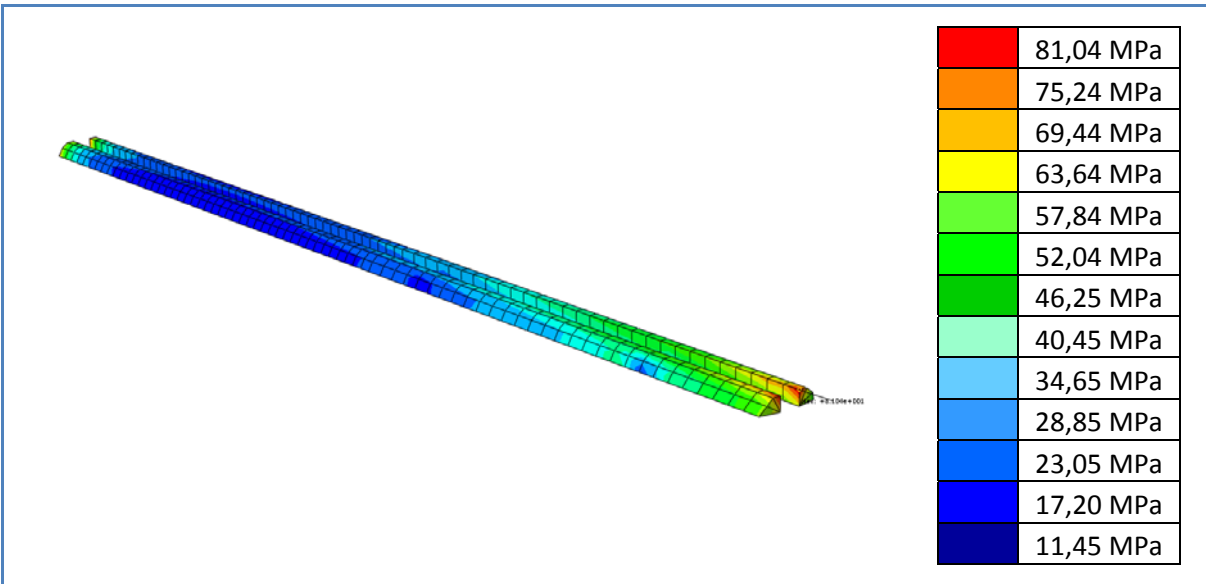
Chapas de protección. Tensión máxima equivalente Von Mises = 89,33 MPa
Se observa una distribución de tensiones uniforme con valores bajos en su gran mayoría. Existe una zona puntual con un gradiente de tensiones. Al estar localizado en el extremo junto a la frontera del modelo este valor se puede despreciar.



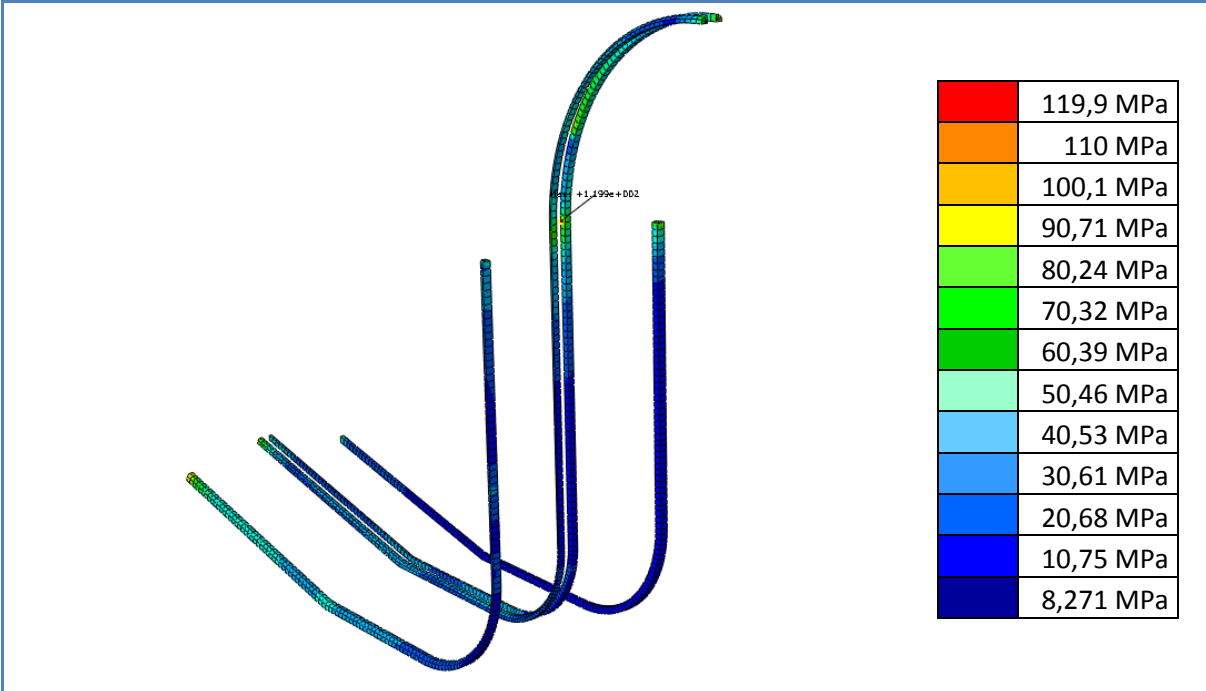
Placas de protección. Tensión máxima equivalente Von Mises = 148,5 MPa.
Al igual que sucede con el alma, el agujero realizado para apoyar el casquillo actúa como concentrador de tensiones.



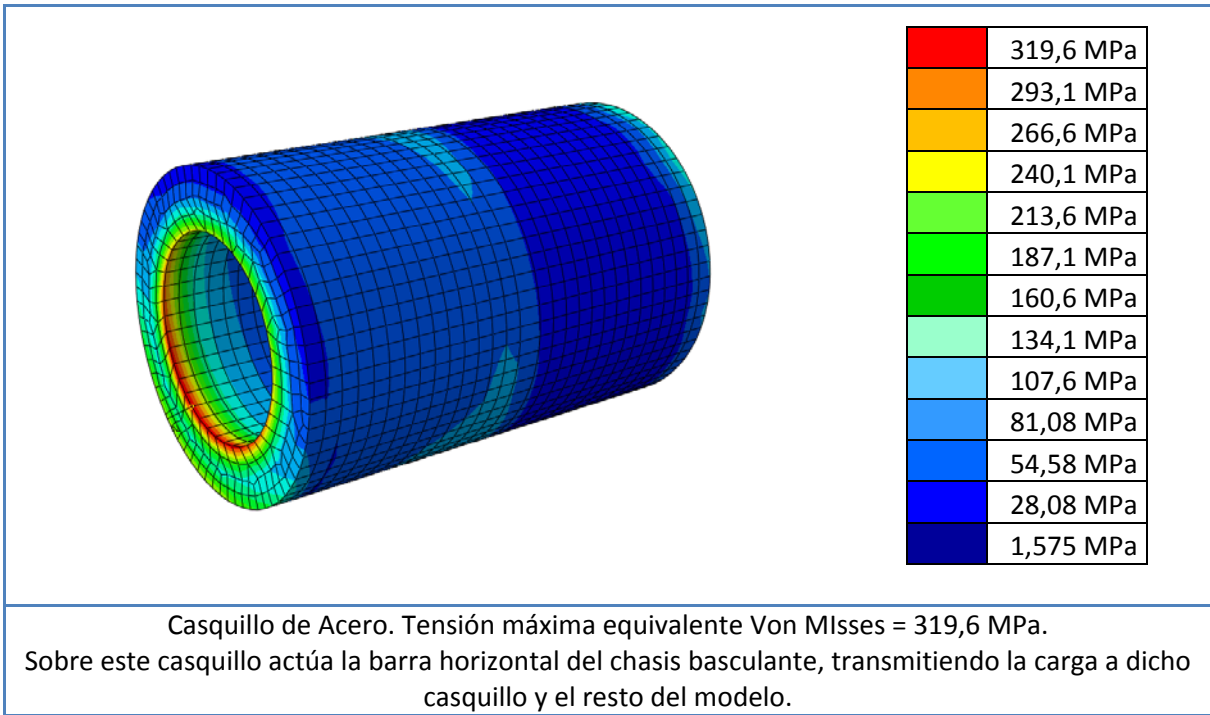
Cordones de soldadura superiores. Tensión máxima equivalente Von Mises = 96,4 MPa.
La zona de máxima tensión aparece cercana a una de las zonas de máxima tensión del modelo, a la altura intermedia del alma.



Cordones de soldadura intermedios. Tensión máxima equivalente Von Mises = 81,04 MPa. Se observa que la tensión aumenta al acercarse al extremo ya que en esta zona se encuentra la zona de tensión máxima del alma inferior.



Cordones de soldadura inferiores. Tensión máxima equivalente Von Mises = 119,9 MPa. La zona de máxima tensión coincide como en el caso anterior en la posición en que se encuentra la máxima tensión en el alma inferior a la que pertenece este cordón.



2.4.6.3 Calculo coeficientes de seguridad:

Una vez analizadas todas las piezas de ambos submodelos 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 sin llegar a romperse y la tensión máxima a la que tenemos que va a estar sometido:

$$C_s = \frac{\sigma_{\max adm}}{\sigma_{\max}}$$

Cs SUBMODELO 1			
COMPONENTE	σ_{\max} admisible (Mpa)	σ_{\max} (Mpa)	Cs
ALA SUPERIOR	310	105,1	2,950
ALMA	270	159,3	1,695
ALA INFERIOR	310	241,7	1,283
CORDON SUPERIOR	110	105,34	1,044
CORDON INFERIOR	110	101,35	1,085

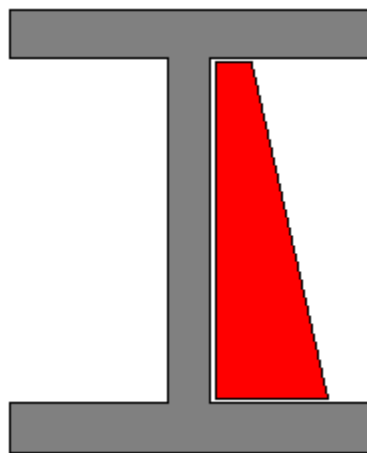
Cs SUBMODELO 2			
COMPONENTE	σ_{\max} admisible (Mpa)	σ_{\max} (Mpa)	Cs
ALA SUPERIOR	310	147,5	2,102
ALMA	270	105,1	2,569
ALA INFERIOR	310	101	3,069
CHAPAS	270	89,33	3,023
ESCUDOS	270	148,5	1,819
CORDONES INFERIORES	110	119,9	0,920
CORDONES SUPERIORES	110	96,4	1,141
CORDONES INTERMEDIOS	110	81,05	1,357
CASQUILLO	355	319,6	1,111

3. OPTIMIZACIONES

Gracias a los resultados obtenidos de coeficiente de seguridad (C_s) reflejados en las tablas anteriores se pueden proponer una serie de medidas encaminadas a aligerar el chasis y por tanto cumplir el objetivo de ahorrar material en la fabricación y consumo posterior en el transporte de mercancías sin afectar a la resistencia del chasis.

En el submodelo 1 se puede concluir que la parte superior trabaja muy por debajo de sus valores máximos admisibles ya que tenemos un valor de C_s igual a 2,95. Una modificación geométrica que se podría aplicar es una reducción en el espesor del alma superior. El valor concreto que podría alcanzar el espesor no ha sido objeto de este estudio pero siempre y cuando se cumpla el compromiso entre espesor y resistencia la pieza podría ser modificada.

Por el mismo motivo anterior, otra posible mejora tendría que ver con la transmisión de esfuerzos. Ya que se ha comprobado que las mayores tensiones se encuentran en el ala inferior se podría intentar repartir los esfuerzos que ahí se concentran a la zona superior que está menos solicitada. Para conseguir esto se propondría el uso de cartabones de una forma aproximada a como se indica en la siguiente figura:



En el alma del submodelo 1 se tiene un valor de C_s igual a 1,7. Pese a no ser un valor elevado se plantea lo siguiente: Ya que en el mapa de distribución de tensiones se observa que la zona central tiene tensiones muy bajas, en esta zona se podría hacer una perforación, circular u ovalada, a lo largo de toda su longitud. Esta modificación implicaría un aumento de tensión en toda la pieza al actuar estos agujeros como concentradores de tensiones. El objetivo sería alcanzar un compromiso entre el tamaño del agujero y la resistencia para conseguir valores en los que el modelo soportará las cargas en régimen elástico consiguiendo un gran ahorro de material y por tanto de peso.

En el caso del submodelo 2 las modificaciones geométricas son más complejas ya que modificar un componente afecta directamente al que se encuentra en contacto con él. Por esto las chapas de protección que tienen valores muy bajos de tensión y ya que no tienen una función resistiva evidente sino la de proteger como una carcasa al resto del modelo se pueden aligerar, disminuyendo su espesor hasta un valor determinado.

En ambos modelos tienen especial interés el análisis de los cordones de soldadura de aluminio ya que como se ha citado anteriormente se caracterizan por tener menor resistencia que el resto del modelo. Han sido simulados aproximando su geometría a la de cordones homogéneos y continuos. Esto es difícil de conseguir en la práctica, por mucho que se empleen robots y máquinas preparadas. Por ello los valores obtenidos deben ser orientativos. Si bien tanto en el submodelo 1 como en el submodelo 2, los cordones inferiores nos dan un CS bajo y se debería proponer su rediseño con un aumento del tamaño del cordón para aumentar su resistencia, o comprobar si con las medidas anteriormente propuestas estos cordones trabajan a menor tensión.

4. CONCLUSIONES

En el presente proyecto fin de carrera se han localizado y analizado las zonas donde presentan mayores esfuerzos dos submodelos de un chasis para basculante de cilindros centrales fabricado en aluminio. Para ello se ha aplicado una técnica poco generalizada que permite obtener mayor información a lo largo de las diferentes fases del proyecto denominada “submodeling”.

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

El estudio se comienza con el análisis de la geometría del modelo mediante la herramienta informática Patran que permite también la creación de modelos de elementos finitos en los que son posible definir todas y cada una de las variables del problema a analizar (materiales, condiciones de contorno, conjunto de solicitaciones,...).

El conjunto de solicitaciones reales que actúan sobre el chasis y por tanto sobre los submodelos han sido obtenidas por medio de análisis anteriores de los departamentos técnicos de la empresa Lecañena y el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza.

Una vez aplicadas dichas solicitaciones se ha pasado a realizar el cálculo de ambos submodelos mediante la aplicación informática Abaqus. Con los resultados obtenidos de los mapas de tensiones se ha procedido al análisis de los dos submodelos componente a componente.

Al análisis global de los submodelos se ha añadido el análisis de los valores obtenidos en los cordones de soldadura.

Por último se han comprobado que ambos submodelos nos orientan sobre cómo podría optimizarse el chasis 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.

5. BIBLIOGRAFÍA

MSC.Patran 301 Exercise Workbook

PATRAN 301 Exercise Workbook - Release 7.5

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.

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