



Universidad
Zaragoza

Proyecto Fin de Carrera

Optimización frente a choque frontal de un automóvil en base a la utilización de acero de alta resistencia

Autor

Manuel Alejandro Pastor Asensio

Director

Luis Castejón Herrero

Universidad de Zaragoza / Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2016



Optimización frente a choque frontal de un automóvil en base a la utilización de acero de alta resistencia

RESUMEN

El objetivo del proyecto es estudiar la posible optimización de un automóvil frente a choques frontales mediante el uso de aceros de alta resistencia. Se pretende evaluar el efecto del uso de aceros con diferentes características en los principales componentes que intervienen en el choque frontal de un vehículo automóvil, y evaluar las mejoras en cuanto a seguridad, ahorro de peso y otros factores que puede conllevar el uso de aceros de alta o incluso ultra alta resistencia.

Esta evaluación se realizará mediante simulaciones con el Método de los Elementos Finitos. Se utilizará como base el ensayo de choque frontal que actualmente deben cumplir los automóviles vendidos en la Comunidad Europea, el cual viene estipulado en la Directiva 97/26/CE. El ensayo consiste en un choque frontal con solapamiento del 40% contra una barrera deformable a 56km/h.

El objetivo principal del proyecto no es simular exactamente cómo reaccionará el modelo de vehículo durante el ensayo citado, sino evaluar cualitativamente el cambio que se produce en el comportamiento durante un choque frontal con el uso de aceros de alta resistencia en comparación con los aceros usados históricamente en la construcción de vehículos convencionales. Por tanto, lo descrito en la Directiva 97/26/CE se tomará únicamente como base para obtener un ensayo repetible, objetivo y diseñado con criterios reales. De esta forma se podrán comprobar los cambios que se obtienen con las diferentes configuraciones probadas en el vehículo.

Se utilizará un modelo de vehículo proporcionado por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza, al cual se le realizarán las modificaciones que se consideren oportunas, como el mallado más fino de los componentes con mayor relevancia en un choque frontal. La barrera deformable será modelada siguiendo los requisitos geométricos y de resistencia expuestos en la Directiva.

En los resultados de las simulaciones se podrá comprobar cuál es el efecto y las posibles ventajas de sustituir aceros convencionales por aceros de alta resistencia, en un vehículo frente a un choque frontal. Se comprobará cómo mejora el comportamiento del chasis en estos casos, sobretodo en cuanto a rigidez del mismo se refiere, obteniéndose unas intrusiones en el habitáculo menores cuando se compara con los resultados obtenidos utilizando solamente aceros convencionales. También se comprobará que en general el aumento de la rigidez supondrá un aumento en las aceleraciones sufridas por los ocupantes, y que se debe alcanzar un equilibrio o rediseñar en concordancia las zonas de deformación programada.

ÍNDICE

RESUMEN	3
ÍNDICE.....	4
1. Introducción	6
2. Objetivos y alcance del proyecto	6
3. Sumario de la seguridad en los vehículos en la actualidad	7
3.1. Tipos de seguridad en los vehículos	7
3.1.1. Seguridad Activa	7
3.1.2. Seguridad Pasiva.....	10
3.1.3. Seguridad Terciaria	11
3.2. Organismos de ensayo de vehículos	12
3.3. Importancia de los choques frontales	14
4. Simulación ensayo de choque frontal según la directiva 96/79/CE	15
4.1. Resumen Directiva 96/79/CE	16
4.1.1. Configuración del Ensayo	16
4.1.2. Definición de la barrera deformable fija	16
4.1.3. Evaluación post-ensayo	18
4.2. Simulación de la barrera para el ensayo de choque frontal	20
4.2.1. Determinación parámetros bloques alveolares	21
4.2.2. Modificaciones requeridas en la barrera	24
5. Modelo del vehículo FEM.....	26
5.1. Modelo utilizado.....	26
5.1.1. Características del Geo Metro.....	27
5.2. Adaptación previa del modelo original para su uso en patran	27
5.3. Nuevas modificaciones realizadas al modelo.....	29
5.3.1. Colores de las piezas	29
5.3.2. Ruedas y suspensiones	31
5.3.3. Masa del vehículo.....	31
6. Ensayos	44
6.1. Validación del modelo	44
6.2. Aceros de alta resistencia utilizados	46
6.3. Configuraciones ensayadas	48
6.3.1. Zonas en las que se sustituye el acero S355 por aceros de alta resistencia	48

6.4. Medidas durante las simulaciones	52
6.4.1. Aceleración	52
6.4.2. Intrusión en el habitáculo.....	53
6.5. Medida de las energías durante el ensayo.....	55
7. Resultados	56
7.1. Configuración optimizada	58
7.2. Comprobación en el ensayo con barrera fija	59
8. Conclusiones.....	61
9. Bibliografía.....	62
10. Agradecimientos.....	64
11. Anexos	65
Anexo 1. Anuario Estadístico de Accidentes 2013, DGT	65
Anexo 2. Primera importación modelo a Patran.....	67
2.1. Elementos del modelo original	67
2.2. Modificaciones realizadas por Jesús Segura	68
Anexo 3. Nuevas modificaciones en las uniones.....	71
Anexo 4. Resumen extendido de la Directiva 96/79/CE	73
4.1. Ensayo	73
4.2. Definición de la barrera deformable fija	73
4.3. Evaluación post-ensayo.....	77
Anexo 5. Datos y resultados extendidos de las simulaciones	79
5.1. Componentes modificados en cada ensayo	79
5.2. Curvas de aceleración	80

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el Informe Sobre la Situación Mundial de la Seguridad Vial 2015, elaborado por la OMS, cada año mueren en las carreteras más de 1.2 millones de personas debido a accidentes de tráfico. Es tal la magnitud del problema, que en el 2012 los accidentes viales fueron la primera causa de muerte entre personas de 15 a 29 años. [1]

Además, la mayoría de accidentes con heridos y/o fallecidos involucra un impacto frontal o fronto-lateral.

Existen diferentes estrategias para disminuir el número de víctimas en accidentes de tráfico. Estas incluyen tanto las destinadas a evitar o disminuir la severidad del accidente como las dirigidas a aumentar la seguridad que otorgan los vehículos a sus ocupantes cuando este se produce. El uso de aceros de alta resistencia puede contribuir a un aumento en la seguridad de los vehículos sin incrementar su peso.

El acero es el material más extendido en la producción de vehículos, y el cambio a un acero de alta resistencia puede resultar más sencillo para los fabricantes que el uso de otros materiales o geometrías.

2. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO

El objetivo del presente proyecto es comprobar y exponer de una manera clara y concisa los posibles beneficios que puede acarrear la sustitución de aceros normales por otros de alta o ultra-alta resistencia en la protección de los vehículos frente a choque frontal.

No es el objetivo evaluar qué tan seguro es el vehículo que se utilizará en la simulación, sino ver los efectos cualitativos que se producen al introducir cambios en diferentes componentes clave durante los choques frontales. El uso de aceros de alta resistencia está cada vez más extendido en la industria del automóvil, pero se pretende otorgar una biografía enfocada a constatar las ventajas que puede ofrecer su uso en diferentes zonas del vehículo y cómo afecta al conjunto final.

Tampoco entra dentro del alcance escoger el acero idóneo de entre todos los tipos y aleaciones que existen, sino contemplar cómo cambia el comportamiento utilizando aceros representativos más resistentes que los convencionales.

A modo de hipótesis se plantea que el uso de aceros de alta resistencia puede tener un efecto significativo en componentes que interese mantengan su integridad y no se deformen excesivamente, ya que tienen unos límites elásticos y de rotura mayores que los aceros convencionales. Sin embargo, su capacidad de absorción de energía es parecida, por lo que su uso en zonas de deformación programada puede no implicar ventajas.

3. SUMARIO DE LA SEGURIDAD EN LOS VEHÍCULOS EN LA ACTUALIDAD

Los automóviles modernos poco tienen que ver con los de antaño. Las prestaciones de los primeros vehículos fueron aumentando de manera drástica durante décadas, pero no así sus previsiones en cuanto a la seguridad de los pasajeros y demás usuarios de la vía. Incluso en los vehículos de competición de hace medio siglo no existían prácticamente consideraciones hacia la seguridad de los conductores, y podía ser tan inseguro salir despedido del vehículo como quedarse en él.



Figura 1. Accidente de Hans Herrmann durante el Gran Premio de Alemania. Circuito de Avus, 1959. Afortunadamente no resultó herido de gravedad

Por suerte, todo eso ha quedado en el pasado, y poco a poco se ha evolucionado hacia unos vehículos más seguros de lo que podrían imaginarse las generaciones anteriores. Inventos tan sencillos como el cinturón de seguridad, y tan complejos como los dispositivos anticolidión mediante cámaras y radares, velan por nuestra seguridad en los automóviles modernos.

3.1. TIPOS DE SEGURIDAD EN LOS VEHÍCULOS

Los sistemas de seguridad se pueden clasificar en tres grupos: Seguridad Activa, Pasiva y Terciaria. La primera abarca todos los sistemas relacionados con evitar el accidente en primer lugar o disminuir su severidad. La Seguridad Pasiva es la referente al comportamiento del vehículo durante el accidente. Y la Terciaria, no tan conocida o publicitada, engloba lo relativo a los momentos posteriores al accidente.

3.1.1. SEGURIDAD ACTIVA

Claramente, lo ideal sería lograr que nunca llegara a haber ningún accidente. Eso es lo que se trata de conseguir mediante los sistemas de Seguridad Activa, junto con reducir la

severidad del accidente si es inevitable. El rango de formas de disminuir las posibilidades de un accidente es muy amplio, y engloba temas que quizás no se nos ocurran en primer lugar.

Tenemos en este tipo de sistemas, por ejemplo, el sistema antibloqueo de frenos (ABS), sistema de estabilidad (ESP) y el control de tracción, todos ellos dedicados a mantener la adherencia del vehículo en situaciones extremas. No obstante, también se deben incluir por ejemplo la suspensión y puesta a punto del chasis, ya que un vehículo con buen comportamiento puede ayudarnos a esquivar un obstáculo o a no salirnos de una curva a la que se ha llegado a velocidad excesiva. Por supuesto otros componentes del vehículo como los neumáticos o frenos son también importantes en este aspecto.

Para ilustrar la importancia de las ayudas a la conducción, podemos tomar el caso del ESP. Diversos estudios han demostrado la efectividad de este sistema. Concretamente, el NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) estima la reducción en el número de accidentes si se equipan de ESP los vehículos en 34% para coches y 59% para SUV (Sports Utility Vehicles). Mayor sería aún la reducción en vuelcos, 71% y 84% respectivamente. También estima que se podrían reducir el número de fallecidos anuales entre 5300 y 10300, sólo en las carreteras de Estados Unidos, si todos los vehículos ligeros equiparan ESP. [2] Dada la importancia de este tipo de sistemas, desde finales del 2014 es obligatorio en todos los vehículos nuevos vendidos en la Unión Europea.

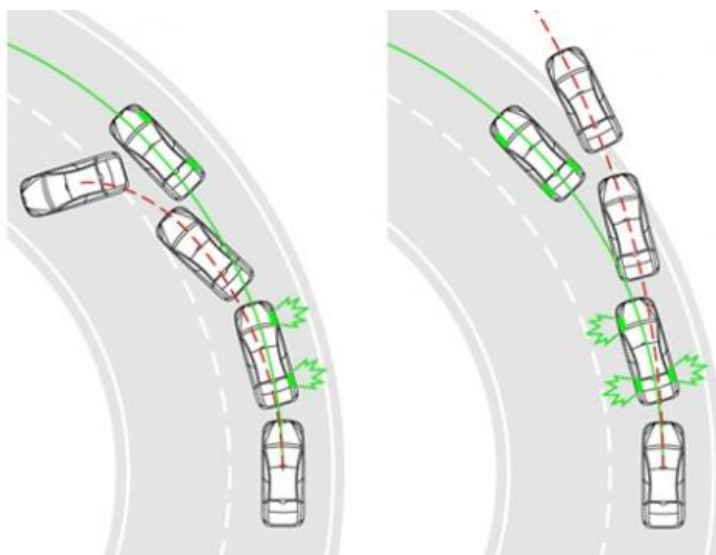


Figura 2. Trayectoria corregida gracias al ESP, en verde, contra trayectoria sin ESP. A la izquierda en caso de sobreviraje, a la derecha de subviraje. Fuente: Peugeot

Existen otros aspectos de la seguridad activa menos intuitivos, como son la comodidad del conductor. Una temperatura elevada o demasiado baja, una postura de conducción incómoda, o incluso un entorno que incite el sueño, pueden llevar a bajar la concentración y los tiempos de reacción del conductor ante situaciones de emergencia. Adicionalmente, describiendo algunas ideas del autor, se podría hacer uso de aromas estimulantes para aumentar la concentración o nivel de alerta cuando se detecte o prediga fatiga en el conductor, o el uso de luces con tonalidades más frías para ayudar a evitar la aparición del sueño.

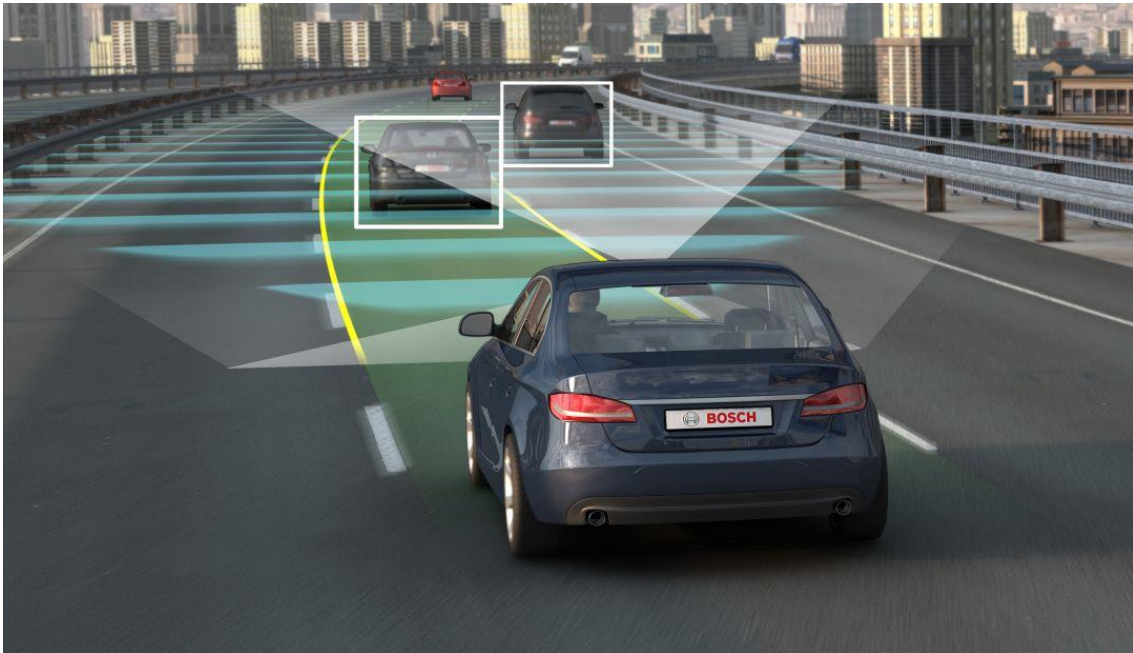


Figura 3. Sensores sistema de asistencia. Fuente: BOSCH

En la actualidad se están desarrollando sistemas cada vez más avanzados para ayudar al conductor activamente a reconocer su entorno, tales como el aviso de cambio involuntario de carril. Cada vez hay sistemas con más y mejores sensores, y ya existen equipos para recordar al conductor las últimas señales vistas o para frenar si se detecta un obstáculo con el cual se va a colisionar. La evolución es hacia un coche tan consciente de su entorno que pudiera llegar a conducirse solo, de estar permitido por las autoridades. Aunque no llegue a permitirse la conducción autónoma, está claro el avance en seguridad que supone un vehículo con esas capacidades si se utilizan como ayuda para evitar accidentes. El vehículo puede estar continuamente pendiente de posibles peligros, y se añade a la atención del propio conductor avisándole e incluso reaccionando para evitar o minimizar la severidad de un accidente.

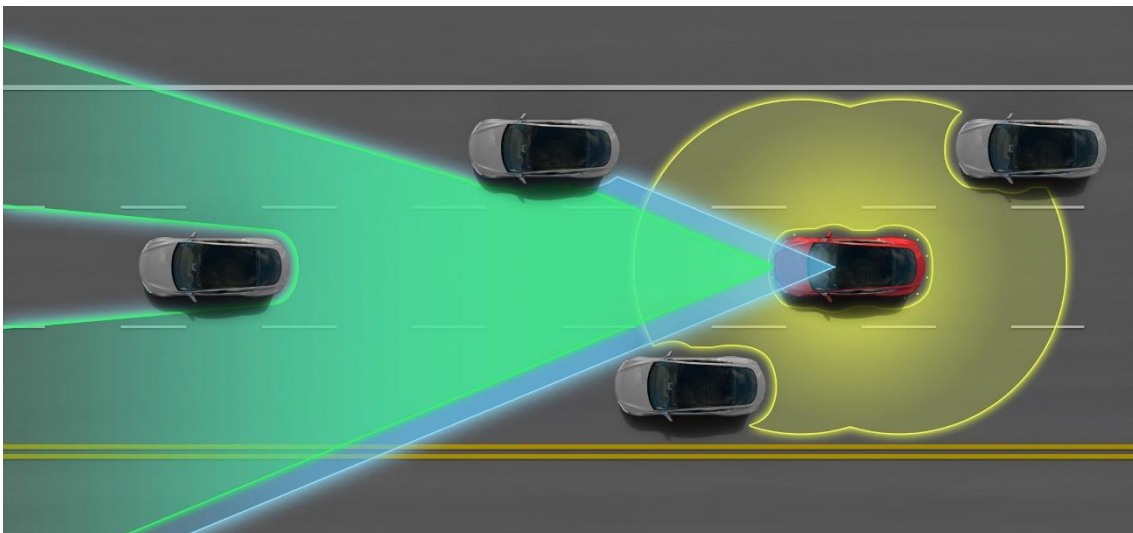


Figura 4. Sensores del sistema Tesla Autopilot. Fuente: Tesla

También se están desarrollando sistemas para mejorar la interacción con otros vehículos, como por ejemplo control automático de luces largas. La iluminación y visibilidad son también factores de seguridad activa. En un futuro se puede llegar a pensar que los vehículos se comuniquen unos con otros para avisar de incidencias, como su intención de cambiar de carril o de frenado, entre otras posibilidades.

La lista de elementos de seguridad activa podría seguir expandiéndose, y desde luego evitar los accidentes es el mejor camino, sobre todo en situaciones como atropellos. Sin embargo, no siempre será posible, ya sea por fallos técnicos, error humano, o situaciones excepcionales en la vía. Por ello se debe prestar atención al siguiente tipo de seguridad, la seguridad pasiva. De hecho, algunos de los sistemas de seguridad activa también juegan un rol en la seguridad pasiva, previniendo el accidente y actuando en consecuencia para minimizar los daños, por ejemplo pre-tensando los cinturones de seguridad.

3.1.2. SEGURIDAD PASIVA

La seguridad pasiva engloba todos aquellos componentes y sistemas de un vehículo que influyen en la seguridad en caso de un accidente. Estos incluyen tanto el diseño del propio chasis, con zonas de deformación programada y habitáculo rígido, como componentes auxiliares, tales como cinturones de seguridad, airbags y demás.

En el presente trabajo nos vamos a centrar en uno de los componentes más importantes de la seguridad pasiva, el comportamiento frente a choque frontal de la estructura del vehículo. A modo resumido, el chasis del vehículo tiene el objetivo doble de desacelerar de manera gradual a los ocupantes en caso de choque, y a la vez mantener un espacio de supervivencia.

Esto se logra mediante una primera zona diseñada para deformarse de manera controlada, absorbiendo la energía cinética del vehículo progresivamente. De este modo, se busca conseguir una aceleración continua durante el mayor tiempo posible, y por tanto, lo menor posible.

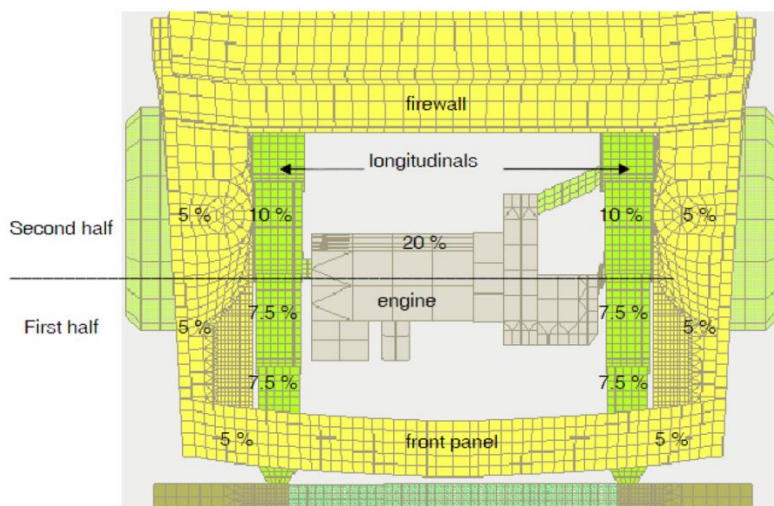


Figura 5. Vista superior del compartimento motor de un vehículo y estimación de la energía absorbida en caso de un choque frontal por los diferentes elementos [3]

La estructura alrededor de los ocupantes ha de mantenerse lo más estable posible, sin grandes deformaciones que puedan reducir el espacio disponible para ellos. También es

importante que no se desplacen dentro del vehículo elementos como los pedales o el volante durante una colisión, ya que podrían causar lesiones a los pasajeros.

El diseñador del vehículo tiene que llegar a una relación óptima, por un lado, entre costes de fabricación, diseño práctico y seguridad de los ocupantes. Por otro lado, se ha de hacer un compromiso para proteger de manera óptima a los ocupantes a unas determinadas velocidades. Un vehículo diseñado para reducir al máximo las aceleraciones en un choque a una velocidad muy alta tendrá unas aceleraciones mayores en un choque a velocidad inferior que otro optimizado para esa velocidad inferior. Por ejemplo, si se diseñara un vehículo que minimice las G's que sufren los ocupantes en un choque a 300Km/h, este tendría que ser muy rígido, tanto que a velocidades de choque más comunes podría resultar muy peligroso. A su vez, incluso disminuyendo al mínimo las desaceleraciones a 300Km/h, estas serían muy severas, seguramente demasiado para el cuerpo humano. Por ello los ensayos de choque se realizan a velocidades que pueden ser usuales en accidentes, como los 64Km/h del ensayo de choque frontal con *offset* de EuroNCAP. Esta puede ser la velocidad de un coche que circula por carretera y frena ligeramente antes de impactar.

Se ha extendido el uso de nuevos materiales en los vehículos modernos que permiten un notable incremento de seguridad sin aumentar la masa, o inversamente, que han permitido disminuir la masa de los vehículos para incrementar sus prestaciones y mejorar el consumo de combustible. Materiales como el aluminio, fibra de carbono en súper deportivos (y en los últimos años en vehículos más comunes como el BMW i3 [4]) y aceros de alta resistencia, son usados para encontrar el mejor equilibrio entre prestaciones y coste.



Figura 6. Chasis monocasco de CFRP (Plástico reforzado de fibra de carbono) del BMW i3. Fuente: BMW

3.1.3. SEGURIDAD TERCIARIA

Los momentos posteriores a un accidente son cruciales. Un rescate rápido de las víctimas incrementa en gran medida el índice de supervivencia. Así pues, sistemas que avisen a las autoridades al ocurrir un accidente, incluyendo datos como la localización y severidad, pueden ayudar a salvar vidas. Por otro lado, es importante señalar la presencia de un accidente, mediante los intermitentes por ejemplo, sobre todo en condiciones de poca visibilidad, para evitar colisiones posteriores en cadena.



Figura 7. Sistema Peugeot Connect SOS & Assistance. Fuente: Peugeot

También se ha de garantizar la seguridad de los equipos de rescate, por ejemplo desconectando las baterías de un vehículo eléctrico, y facilitar el trabajo de estos mismos previendo zonas donde poder cortar con facilidad el chasis para excarcelar a los ocupantes. En definitiva, existen diversos sistemas que se deben considerar y que ayudan a incrementar la seguridad de los vehículos incluso después de ocurrir un accidente.

3.2. ORGANISMOS DE ENSAYO DE VEHÍCULOS

Existen en el mundo multitud de organismos dedicados a los ensayos y pruebas de seguridad de vehículos. Muchos países tienen además normativa de cumplimiento obligatorio para los vehículos nuevos en materia de seguridad, como España.

De hecho, los fabricantes tienen que someter sus vehículos a multitud de pruebas si quieren venderlos en diferentes mercados, por ejemplo en la Figura 8 podemos ver las pruebas a las que ha de someter Mercedes-Benz sus vehículos antes de lanzarlos a los mercados europeo, estadounidense, chino y japonés. También se incluyen pruebas propias que consideran necesarias y que complementan las exigidas por los organismos gubernamentales.

3.3. IMPORTANCIA DE LOS CHOQUES FRONTALES

Una gran cantidad de accidentes de vehículos son de manera frontal o fronto-lateral, por ello es importante el estudio y la mejora de los vehículos ante este tipo de choques. La Figura 10 muestra una distribución típica del número de accidentes según el área afectada del vehículo.

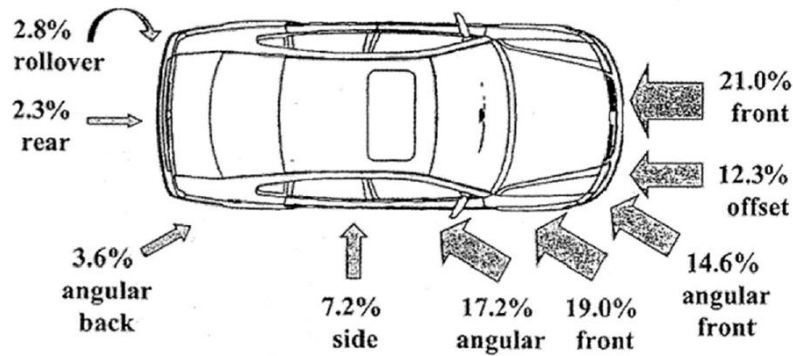


Figura 10. Distribución típica según el tipo de accidente [7]

Se adjunta en el *Anexo 1* una tabla en la que se han agrupado los datos del Anuario Estadístico de Accidentes de la DGT del año 2013 [8] de accidentes con víctimas en España de ese año. Se puede observar que los accidentes frontales, o los accidentes que incluirán una proporción grande de choques con componente frontal (como las salidas de carretera con choque) ocupan un porcentaje muy elevado del total.

4. SIMULACIÓN ENSAYO DE CHOQUE FRONTAL SEGÚN LA DIRECTIVA 96/79/CE

Actualmente en la Unión Europea, todos los vehículos nuevos que se ponen a la venta deben cumplir lo indicado en la Directiva 2007/46/CE (con entrada en vigor el 29.10.2007 y Plazo de transposición en los Estados miembros el 28.4.2009) en cuanto a protección a ocupantes se refiere. En esta Directiva comunitaria se indica que se utilizará el procedimiento expuesto en la Directiva 96/79/CE para los ensayos de choques frontales. Estos choques frontales han de realizarse y superarse obligatoriamente en todos los vehículos de motor de la categoría M1¹, exceptuando los vehículos fabricados en varias fases y en cantidades no superiores al límite fijado para las series pequeñas. Los vehículos más pesados y los fabricados en varias fases tienen la posibilidad de obtener la homologación a petición del fabricante.

El Reglamento R94 ECE es equivalente a la Directiva 96/79/CE. En él se describe el mismo procedimiento de ensayo. Al ser un Reglamento ECE su aplicación es obligatoria para todos los países firmantes del acuerdo de Ginebra de 1958. [9] Para simplificar, en este trabajo se referirá siempre a la Directiva CE en vez de al Reglamento ECE. También cabe mencionar que el Reglamento (CE) Nº 661/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo derogó la Directiva 96/79/CE del Parlamento Europeo Y Del Consejo, pero se sigue utilizando el procedimiento en ella descrito.

A la hora de redactar la Directiva 96/79/CE, se establecieron los criterios de ensayo tomando como base los resultados de investigaciones realizadas por el *European Experimental Vehicles Committee*, con el objetivo de que estos criterios de ensayo fueran acordes con los accidentes de carretera reales.

Se decidió por tanto utilizar el procedimiento de ensayo de la Directiva 96/79/CE de choque frontal en el presente proyecto debido a su relevancia, ya que es de carácter obligatorio, y que es un ensayo estandarizado y desarrollado con criterios objetivos y relevantes para la seguridad real de los ocupantes.

Como se ha explicado anteriormente, el objetivo del presente trabajo es evaluar cualitativamente cómo se modifica el comportamiento frente a choque frontal de un vehículo al emplear aceros de alta resistencia en vez de aceros convencionales en zonas críticas. Por tanto, se podrá simplificar o modificar ligeramente el ensayo por motivos de conveniencia. Más adelante se explicará con más detalle el porqué de algunas modificaciones, pero se puede resumir en una disminución de la complejidad del modelo de elementos finitos para reducir el tiempo de ensayo y los recursos necesarios. Con el modelo final del ensayo, cada simulación dura más de 4 horas utilizando un ordenador muy potente, por lo que se hace impráctico utilizar un modelo aún más exacto cuando lo relevante para este estudio no son resultados exactos, sino la variación entre una configuración y otra.

¹ Los vehículos M1, según la Directiva 70 / 156 / CEE, son aquellos vehículos destinados al transporte de personas que tengan, además del asiento del conductor, ocho plazas sentadas como máximo, y cuya masa total admisible no supere las 2,5 toneladas.

4.1. RESUMEN DIRECTIVA 96/79/CE

(Si se desea una explicación en detalle de la Directiva 96/79/CE se puede consultar el Anexo 4. Resumen extendido de la Directiva 96/79/CE. El presente resumen es una versión más concisa)

El ensayo detallado en la Directiva 96/79/CE consiste en el impacto del vehículo a una velocidad de 56km/h contra una barrera deformable con una superposición del 40%. Es muy similar a la prueba realizada por la EuroNCAP de choque frontal con *offset*, pero a una velocidad menor.

A continuación, se hará un breve resumen de los puntos principales de la Directiva y que nos interesan para simular un ensayo aproximado. Se cubren los tres principales puntos, los datos generales del ensayo, de la barrera, y de la recolección de datos del impacto.

4.1.1. CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO

La velocidad del vehículo en el momento del impacto será de 56 ± 1 km/h. Sin embargo, si el ensayo se efectuara a mayor velocidad y el vehículo cumple los requisitos, se considerará que el vehículo ha superado el ensayo.

El $40\% \pm 20$ mm del vehículo deberá coincidir con la cara de la barrera. La cara anterior de la barrera consistirá en una estructura deformable como se define más adelante. La última parte del carril de aceleración, deberá ser horizontal, plana y lisa.

El acristalamiento móvil del vehículo estará en la posición de cerrado, y las puertas estarán cerradas, pero no con llave. En el momento de la colisión, el vehículo no estará bajo la acción de ningún dispositivo auxiliar de guía o de propulsión.

4.1.2. DEFINICIÓN DE LA BARRERA DEFORMABLE FIJA

La barrera deformable fija está compuesta de dos bloques alveolares, el principal y el parachoques, y de tres láminas diferentes, la posterior, la de recubrimiento y la de contacto con la barrera.

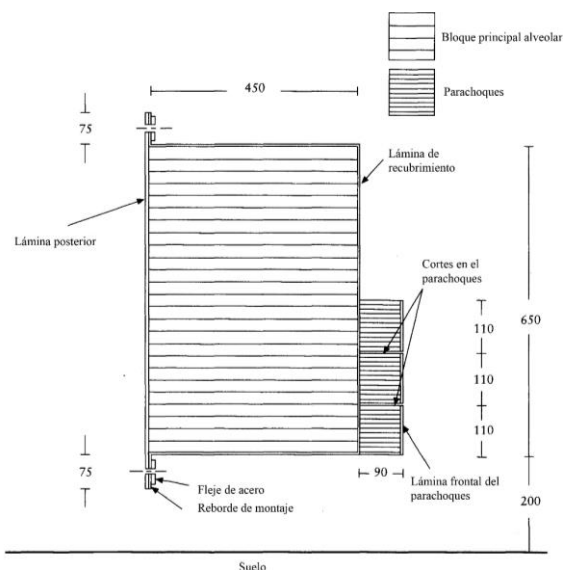


Figura 11 Barrera deformable para el ensayo de colisión frontal, vista lateral [10]

Esta barrera deformable y su sujeción serán simuladas de forma simplificada para nuestro ensayo. Se incluirán a continuación los datos de los bloques y láminas tal cual son descritos en la Directiva, pero en vez de utilizar paneles alveolares, se diseñará una barrera sólida que ofrezca una respuesta similar a la que se conseguiría con los paneles alveolares. Por eso, los datos que nos interesan de los bloques son únicamente los de resistencia al aplastamiento, densidad y dimensiones exteriores. Podremos simular una barrera que responda de manera similar a la original, pero sin tener el enorme costo computacional que supondría simular individualmente cada celdilla de los paneles.

Todas las dimensiones deben respetar una tolerancia de $\pm 2,5$ mm	Bloque principal alveolar	Parachoques
Altura (en la dirección del eje de la franja/hoja alveolar)	650 mm	330 mm
Anchura	1 000 mm	
Profundidad (en la dirección de los ejes de las celdillas alveolares)	450 mm	90 mm
Material	Aluminio 3003 (ISO 209 parte 1)	
Grosor de la hoja	0,076 mm	
Tamaño de las celdillas	19,14 mm	6,4 mm
Densidad	28,6 kg/m ³	82,6 kg/m ³
Resistencia al aplastamiento	0,342 MPa +0 % -10 % (1)	1,711 MPa + 0 % - 10 % (1)
Material lámina de recubrimiento	Aluminio 5251/5052 (ISO 209 parte 1)	

(1) De conformidad con el procedimiento de certificación descrito posteriormente.

Tabla 1. Principales características de la barrera deformable

4.1.2.1. CERTIFICACIÓN DE LAS LÁMINAS ALVEOLARES

En el documento NHTSA TP-214D [11] figura el procedimiento completo de ensayo para la certificación de las láminas de aluminio alveolares, tanto las usadas en el bloque principal como en el parachoques.

Con el fin de garantizar la uniformidad de la resistencia al aplastamiento de toda la cara de la barrera, se han de tomar ocho muestras. Estas muestras han de ser cortadas a partir de los paneles alveolares de una determinada manera, y en unos determinados lugares del panel. Para lograr la certificación, siete de esas ocho muestras deben cumplir los requisitos de resistencia establecidos.

Por supuesto en nuestro caso no se repetirá varias veces el test, ya que se obtendrían los mismos resultados al volver a simular con las mismas condiciones. Tampoco se tendrá en cuenta la velocidad de deformación, aunque se indiquen unos valores específicos en la Directiva, ya que utilizaremos un material con propiedades independientes de la velocidad de deformación.

4.1.2.1.1. Determinación de la resistencia al aplastamiento

En la Directiva se da una serie de indicaciones sobre cómo realizar las mediciones de resistencia de la barrera, dividiéndose estas mediciones en tres secciones. No consideramos necesario entrar en detalles exhaustivos. Sin embargo, sí que consideramos importante el dato de que no se tomarán en cuenta todos los datos previos a 6,4 mm de aplastamiento o posteriores a 16,5 mm de aplastamiento.

La Figura 12 da una idea de la curva fuerza-desplazamiento que podría esperarse durante el ensayo del bloque de barrera alveolar.

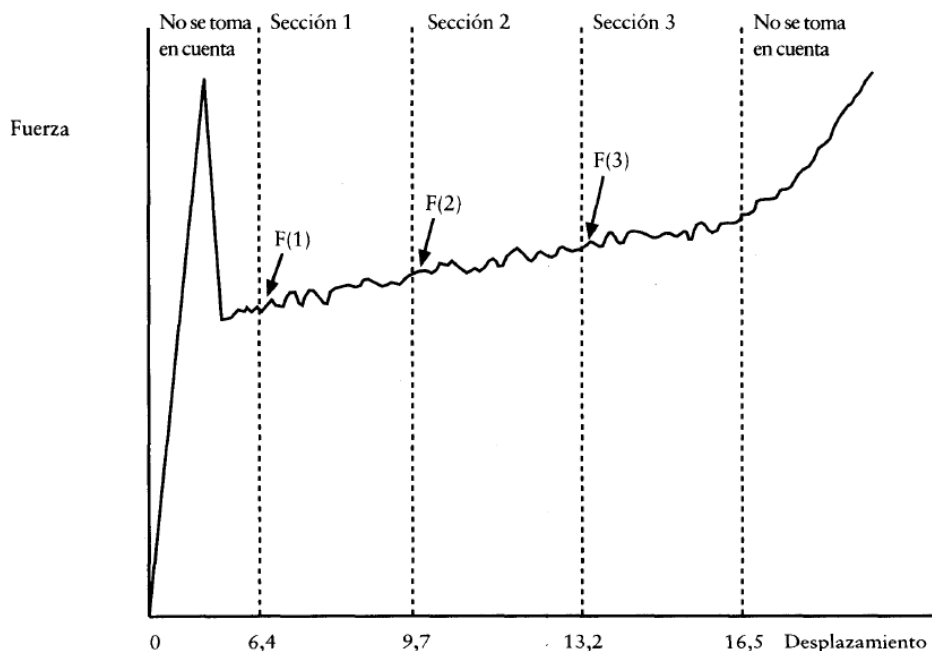


Figura 12. Ejemplo de curva Fuerza de aplastamiento-Desplazamiento esperada [10]

4.1.2.2. COLOCACIÓN Y MONTAJE DE LA BARRERA

La normativa indica que la barrera deformable rígida se debe sujetar firmemente al borde de una masa no inferior a 7×10^4 kg. También se menciona una serie de indicaciones referentes a la exactitud de la colocación de la barrera y para evitar interferencias de otras partes de la instalación con el vehículo.

En nuestro caso, se simplificará la sujeción de la barrera fijando rigidamente la cara posterior de esta, algo imposible de conseguir completamente en un ensayo físico, pero que es a lo que busca acercarse la normativa.

4.1.3. EVALUACIÓN POST-ENSAYO

Los criterios de comportamiento que se evalúan tras la prueba contemplan tanto la gravedad de las fuerzas y aceleraciones que sufren los maniqués como otros factores que pueden afectar a la seguridad de los ocupantes.

Tras el choque, se estudian las mediciones obtenidas en los maniqués situados en los asientos delanteros, y se evalúa si se han superado diversos criterios. Se pueden consultar con más detalle en el Anexo 4.

4.1.3.1. MEDICIONES QUE SE REALIZARÁN EN EL VEHÍCULO

En el vehículo en sí, se mide por un lado el desplazamiento residual del volante, que no debe superar unos valores tanto en vertical como en horizontal. Se dan también una serie de indicaciones sobre la apertura de las puertas, pero deben permanecer cerradas durante el ensayo. También se debe poder liberar al maniquí con una serie de requisitos. Sólo se permitirán pequeñas fugas del conjunto del circuito de alimentación de combustible durante o después de la colisión.

Se deben medir también las velocidades y aceleraciones en la estructura del vehículo. Ambas curvas, de velocidad y aceleración de la estructura, se determinarán basándonos en los valores dados por los acelerómetros longitudinales de la base del pilar B en el lado de colisión del vehículo.

4.2. SIMULACIÓN DE LA BARRERA PARA EL ENSAYO DE CHOQUE FRONTAL

El diseño de la barrera deformable para el ensayo simulado se basó en los requerimientos del ensayo descrito en la Directiva 96/79/CE, sin embargo, y como ya se ha comentado, el objetivo del presente proyecto no es simular exactamente este ensayo, sino tomarlo como referencia para crear un ensayo repetible y con unos criterios basados en las exigencias reales durante un choque.

Se optó por modelar una barrera con los bloques principal y de parachoques alveolares, y una capa en la parte frontal de ambos bloques de aluminio, de manera similar al ensayo de la Directiva, pero simplificando los componentes.

Los bloques alveolares se modelarán usando un sólido, ya que simular cada celda, incluso utilizando modelos simplificados, tiene un coste computacional enorme, como se puede comprobar en el estudio *Application of Shell Honeycomb Model to IIHS MDB Model*, realizado por investigadores de Toyota [12].

No se encontró bibliografía específica para poder simular el comportamiento de una placa de paneles alveolares utilizando el *software* Patran/Abaqus, aunque sí para otros programas como LS-Dyna, que tiene un material predeterminado diseñado para simular paneles alveolares, MAT_MODIFIED_HONEYCOMB. Se puede comprobar que los resultados obtenidos con un modelo sólido, aunque no totalmente precisos, sí que pueden resultar comparables hasta el nivel que buscamos en este ensayo [13].

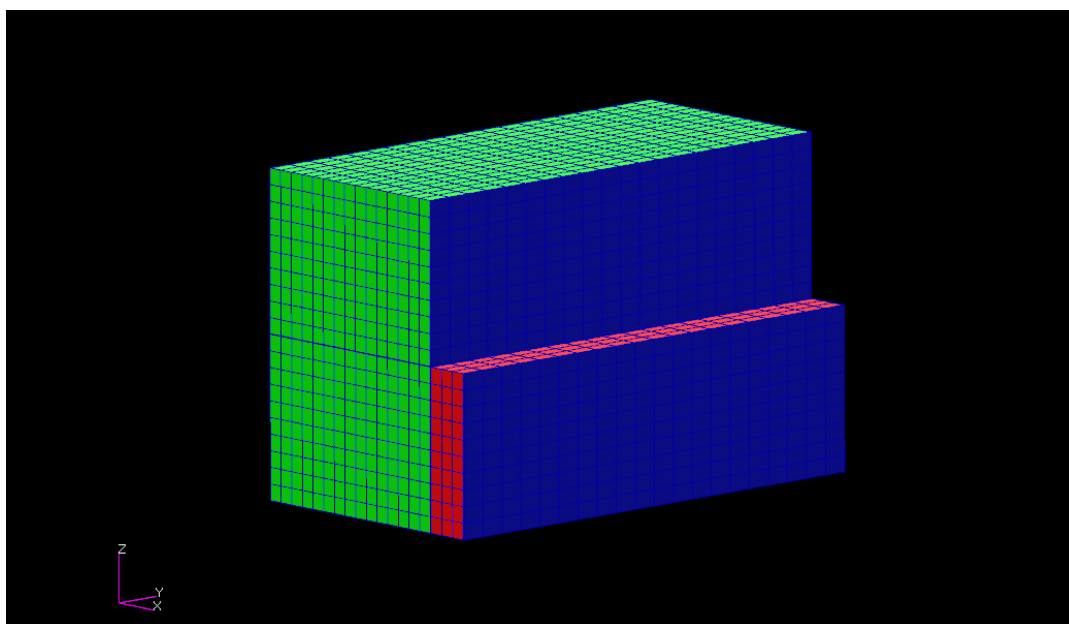


Figura 13. Modelo simulado barrera deformable. Bloque principal verde. Bloque parachoques rojo. Láminas aluminio azules.

Las láminas de aluminio apenas contribuirán a la respuesta de la barrera en nuestro caso por su pequeño espesor, y no serán necesarias ya que no tenemos paneles alveolares con cantos vivos, que puedan inducir tensiones excesivas focalizadas en el la parte frontal del vehículo, y que la lámina de aluminio se puede encargar de evitar. De todas formas se incluyeron aunque, como se verá más adelante, en algunas zonas se tendrán que modificar para evitar errores. El material usado para las láminas de la barrera, siguiendo la Directiva, es la aleación 5251-O [14].

4.2.1. DETERMINACIÓN PARÁMETROS BLOQUES ALVEOLARES

Para obtener bloques sólidos con una respuesta a compresión similar a la exigida a los paneles alveolares reales, se diseñó un experimento con bloques de dimensiones reducidas, tal como se describe en el apartado 4.1.2.1. *Certificación de las láminas alveolares*. Se modelaron y mallaron bloques de 15cm x 15 cm de lado y 5cm de espesor. El espesor es el indicado por la normativa para poder utilizar los criterios descritos en la misma en cuanto a deformación.

Determinar el material idóneo fue una tarea más difícil de lo esperado, y se probó con diversos materiales hasta que se decidió utilizar el mismo tipo de material hiperelástico que utilizó Jesús Segura en su proyecto en la barrera deformable para ensayo de choque lateral, que debía tener unas características parecidas. Un panel alveolar sufre unas deformaciones muy grandes, y su comportamiento debería poder modelizarse con un material plástico que se fuera comprimiendo bajo esfuerzo. Sin embargo, los materiales normales no responden correctamente en las simulaciones en Abaqus bajo grandes deformaciones.

El material utilizado, de tipo *Hyperelastic Marlow* no lineal, nos otorga una respuesta similar a la deseada incluso con grandes deformaciones, con el inconveniente de recuperar su forma al dejar de recibir esfuerzo, comportándose como un material muy elástico, como la goma. De todas formas, los esfuerzos que recibirá el vehículo hasta el momento de máximo esfuerzo, cuando el vehículo haya gastado toda su energía cinética y comience a retroceder, será similar a si se hubiera utilizado un material con deformación plástica.

Se fijaron los bloques por la cara posterior mediante una restricción de todos los grados de libertad de los nodos, y se aplastaron mediante una placa rígida con una masa muy grande en relación a la de la barrera y una velocidad inicial dada, de tal forma que se desplazará comprimiendo la barrera durante todo el ensayo. La duración del ensayo fue tal que se superara la deformación máxima que se ha de medir según la Directiva, 16,5mm.

Se restringieron también los desplazamientos de las caras externas de los bloques para evitar que, al aplastarse, se expandieran por los laterales, como ocurre en la Figura 14, sin la restricción. El material *Hyperelastic Marlow* no permite modificar el coeficiente de *Poisson* de manera sencilla, y en un bloque alveolar se requeriría un coeficiente muy bajo para imitar el comportamiento de aplastamiento sobre sí mismo de este tipo de bloques.

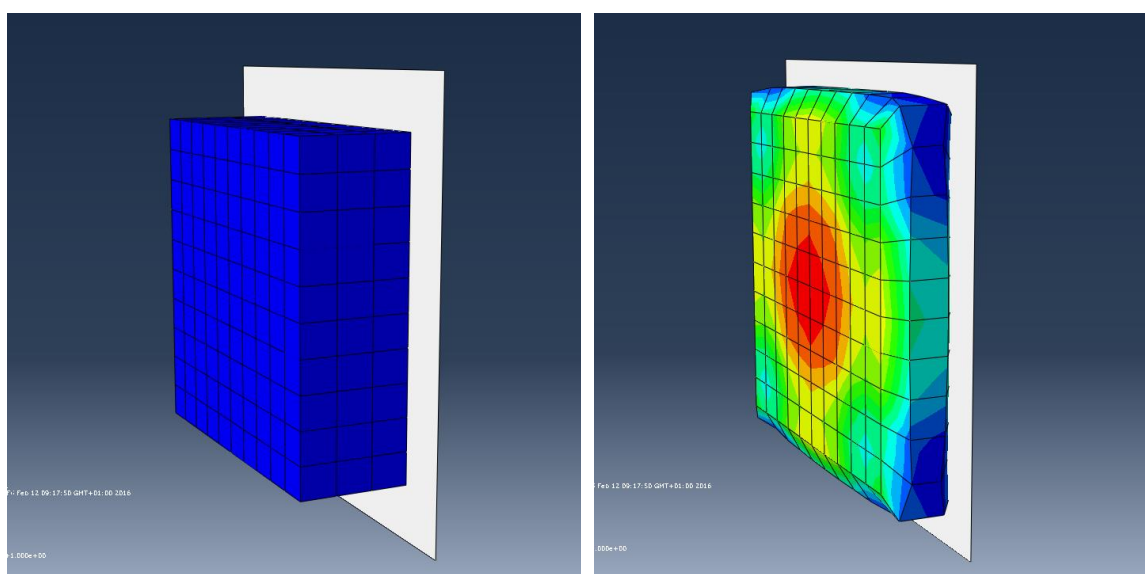


Figura 14. Bloque al principio y al final del ensayo de aplastamiento sin fijaciones en los laterales

Se tuvieron que modelar dos bloques con las respuestas pedidas, de 0,342 MPa y 1,711 MPa, y sus respectivas densidades, 28,6 kg/m³ y 82,6 kg/m³. Los primeros ensayos se realizaron con los parámetros esperados de resistencia del material, pero se comprobó que el comportamiento no era intuitivo, y se tuvo que realizar un proceso iterativo hasta conseguir que respondieran de la manera requerida. La velocidad de ensayo no era relevante para nuestros ensayos ya que se modelan los materiales con comportamiento independiente de esta. Sí que se tomó como base la exigencia de la normativa en cuanto a la tensión ejercida en función del desplazamiento, tal como se indica en el apartado 4.1.2.1.1. *Determinación de la resistencia al aplastamiento.*

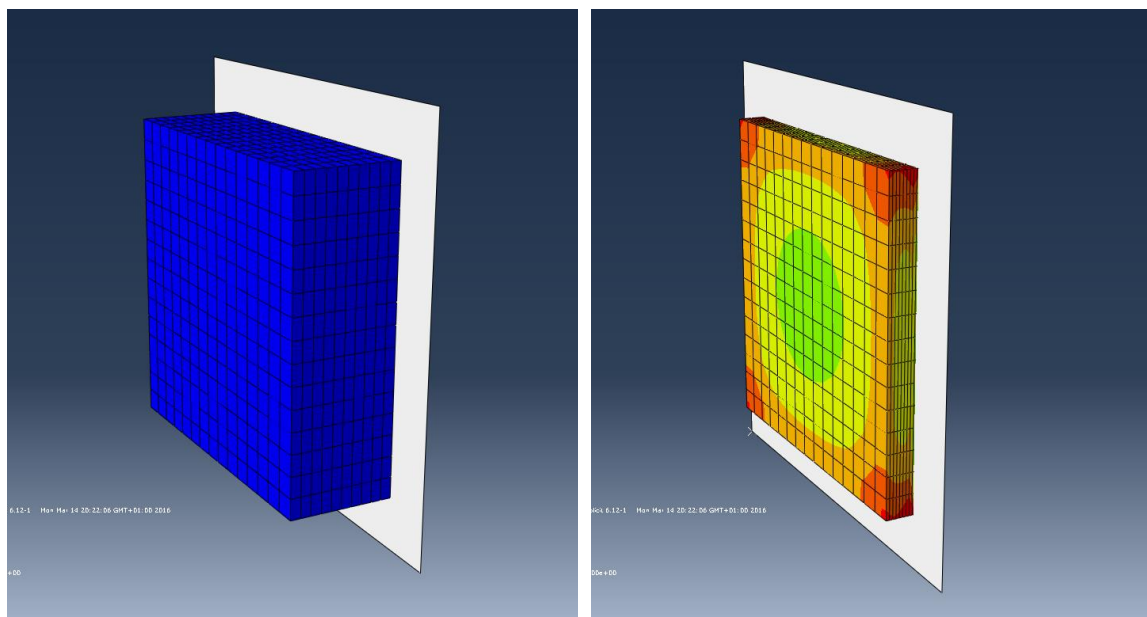


Figura 15. Bloque al principio y al final del ensayo de aplastamiento

Se han de convertir los valores de tensión en MPa a fuerza en Newtons, para poder evaluar los resultados obtenidos en Abaqus. Obtenemos la fuerza multiplicando la presión por el área sobre la que se ejerce. En nuestro caso el área es de 0,15m x 0,15m = 0,0225m². Recordemos que, según la normativa, el valor de fuerza obtenido en los diferentes tramos no deberá ser superior al valor nominal obtenido mediante este cálculo, ni más de un 10% inferior. Tomaremos estos valores como base, pero como se ha explicado, no se requiere una conformidad absoluta para los objetivos de este trabajo.

Tendremos por tanto que para la barrera principal, de 0,342MPa, los valores de fuerza deberán estar entre 6925,5N y 7695N. Para la barrera del parachoques, estos valores deberán estar entre 34647,75N y 38497,5N.

A continuación se exponen los parámetros finales así como las curvas tensión-desplazamiento obtenidas, junto con las líneas que delimitan los valores superior e inferior entre los que debería estar, aproximadamente, la fuerza de reacción, y las deformaciones entre las cuales se hace la medida. Recordemos que la respuesta fuera de este rango de deformación no se tiene en cuenta para la homologación de la barrera, por tanto idealmente las curvas deberían estar dentro de los rectángulos formados entre ambas limitaciones.

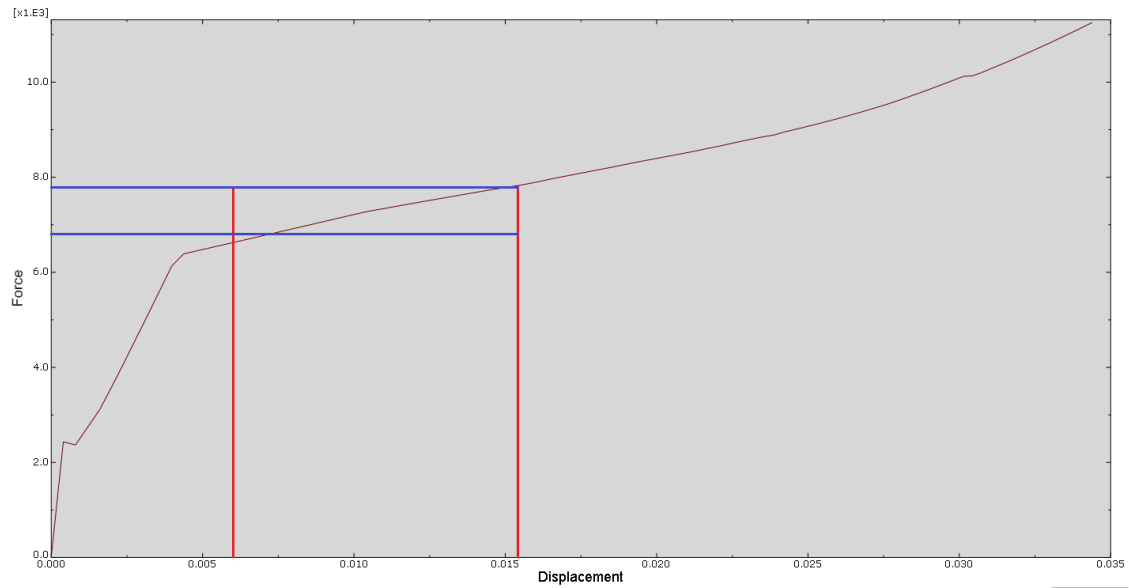


Figura 16. Curva Fuerza-Deformación bloque principal, 0,342MPa. Unidades: kN y m

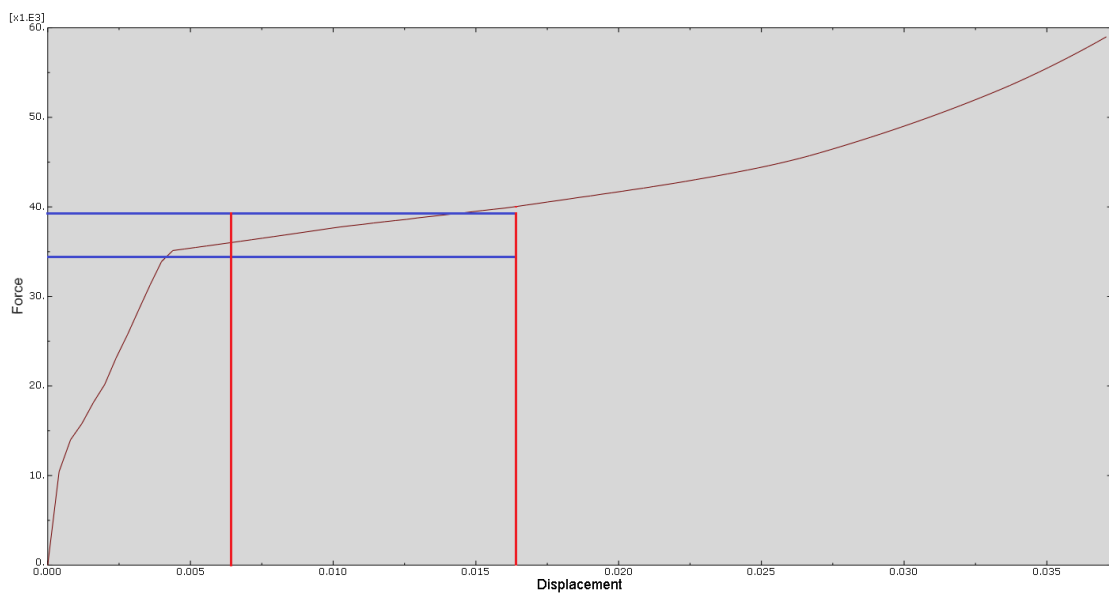


Figura 17. Curva Tensión-Deformación bloque parachoques, 1,711MPa. Unidades: kN y m

Se puede apreciar que para ambos bloques se cumplen prácticamente las especificaciones, y en todo caso con suficiente precisión para nuestro objetivo. Una vez obtenidos los datos del material que nos dan la reacción que buscamos, se aplicaron a los bloques de la barrera deformable creados en el modelo del vehículo. Sin embargo, los primeros ensayos demostraron que se deberían realizar cambios en la barrera.

4.2.2. MODIFICACIONES REQUERIDAS EN LA BARRERA

La forma de la barrera deformable, con el bloque parachoques unido al bloque principal, acarrea un problema al simularse como elementos sólidos. Se producen unas deformaciones de tipo *reloj de arena* muy grandes en los elementos frontera entre la parte superior del bloque parachoques y el bloque principal, y se detiene la simulación antes de tiempo.

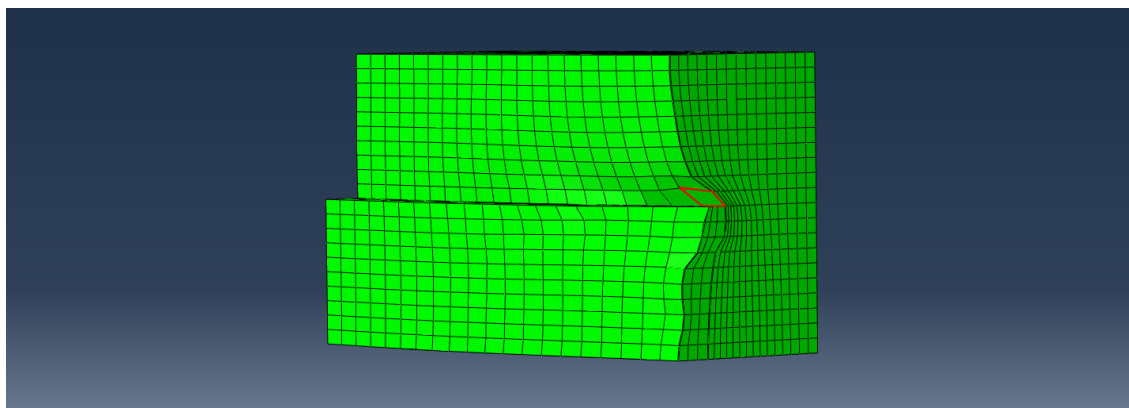


Figura 18. Momento en el que se detuvo la simulación por deformaciones excesivas en el elemento marcado

En un panel alveolar real se produciría desgarramiento al haber mucha diferencia de esfuerzo entre dos zonas colindantes, pero no podemos imitarlo de manera convincente con el material hiperelástico utilizado. La solución a la que se llegó fue dividir el bloque principal en dos bloques independientes, uno hasta la altura del bloque parachoques y otro el resto. La lámina de aluminio que recubre el bloque principal también se tuvo que dividir en dos. Se probaron diferentes alternativas, como modificar las restricciones impuestas a los nodos de las caras externas, añadir nuevas restricciones también a los elementos centrales, o limitar movimientos relativos mediante elementos barra, pero dividir el bloque en dos partes fue la única que funcionó consistentemente, y las posibles diferencias en los resultados comparados con el ensayo real no son relevantes en este proyecto.

A continuación se muestra la configuración final con colores diferenciados para contemplar las diferentes secciones. Tiene que existir una distancia entre la mitad superior y la inferior del bloque principal, de lo contrario, al utilizar el comando equivalencia de nodos en Patran se eliminarían nodos relevantes, pero se mantuvo al mínimo posible esta distancia.

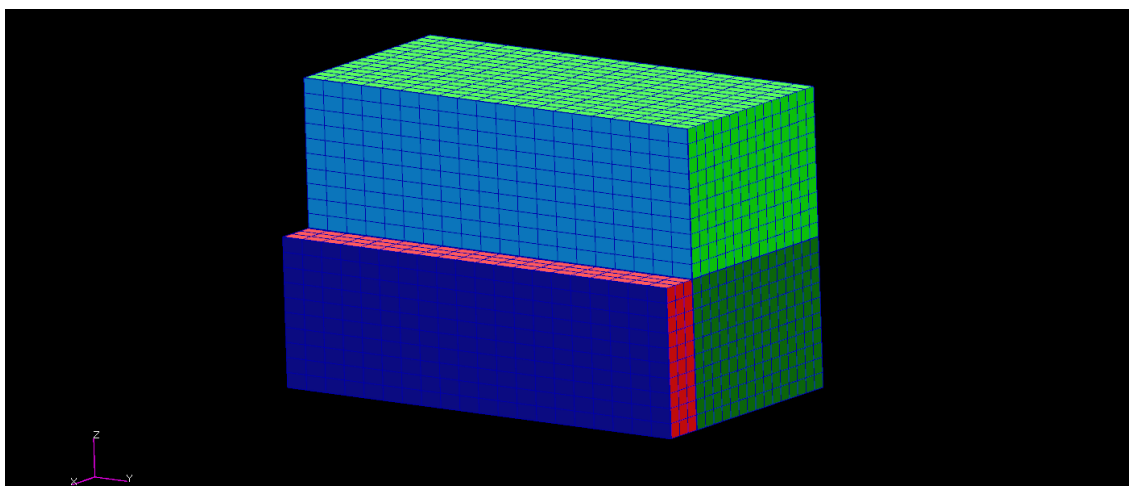


Figura 19. Modelo de barrera con bloque principal dividido en dos zonas

Aun habiendo realizado la separación de los bloques, durante las simulaciones se dieron casos en los cuales se producían deformaciones extrañas y se cancelaba la simulación antes de acabar, por lo que se decidió añadir elementos barra para limitar las deformaciones. Se introducirá un pequeño cambio en las propiedades de la barrera deformable, equivalente a si no se tuviera la lámina de aluminio en la zona de más esfuerzos, pero es un cambio que no importa para los objetivos de este proyecto, ya que es constante en todos los ensayos.

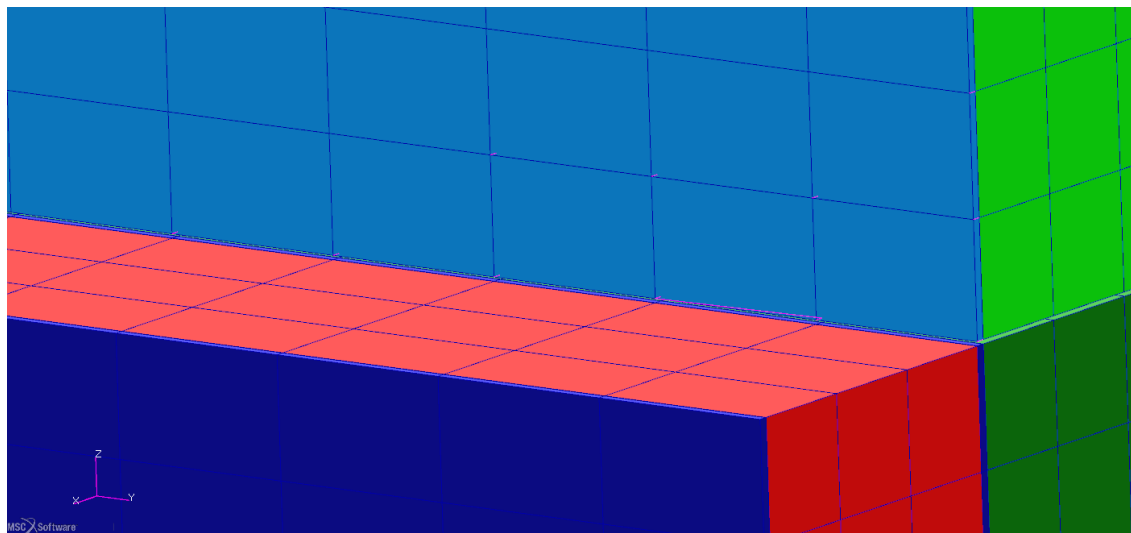


Figura 20. Elementos barra añadidos a una pequeña zona de la barrera deformable, representados en color morado

5. MODELO DEL VEHÍCULO FEM.

5.1. MODELO UTILIZADO

Para la realización del presente proyecto se ha utilizado el modelo de vehículo de un Geo Metro de segunda generación de 3 puertas. Este modelo fue provisto inicialmente por el NCAC (*The National Crash Analysis Center*)² y se trata exactamente el modelo *Geo Metro, Reduced model (16,100 elements)*. [15]

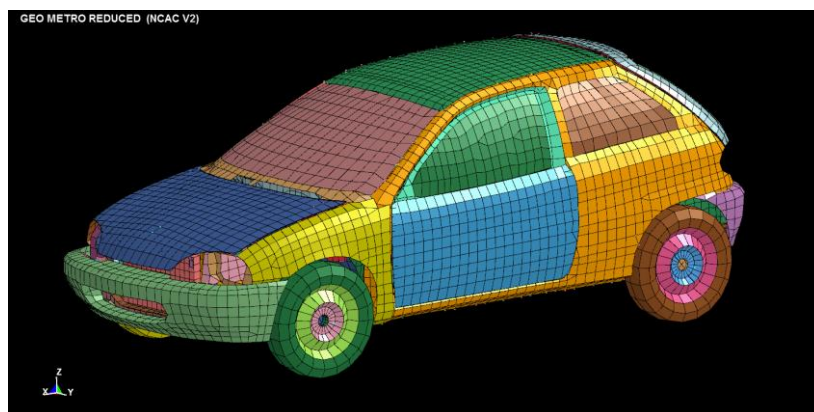


Figura 21. *Geo Metro, Reduced model en LS-Dyna* [15]

El NCAC tiene otro modelo del mismo vehículo más detallado, el *Geo Metro, Detailed model (193,200 elements)*. Este modelo tiene un mallado mucho más fino y cuenta con numerosos detalles que faltan en el modelo base, utilizado en este proyecto. El nivel de detalle es tan grande que se tienen 193.200 elementos en vez de los 16.100 del modelo de menor calidad. Esto supondría una carga muy elevada para realizar simulaciones, de hecho, el modelo finalmente utilizado para las simulaciones en este proyecto tiene en torno a 46.000 elementos, incluyendo la barrera deformable y el afino de mallado realizado en las zonas más importantes y con mayor deformación, y las simulaciones suponen más de 4 horas en un ordenador muy potente del Área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes. El afino de mallado se explicará con más detalle en el apartado 5.3.3.3. Modificación del mallado.

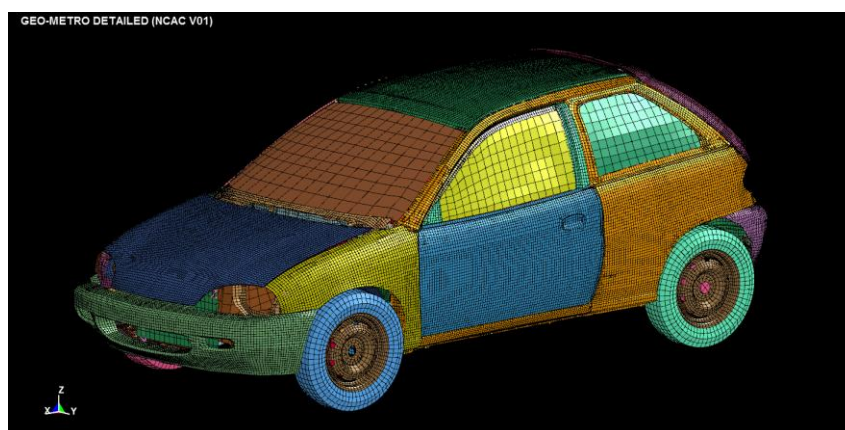


Figura 22. *Geo Metro, Detailed model en LS-Dyna* [15]

² Centro formado mediante la colaboración de la FHWA (*Federal Highway Administration*), el NHTSA (*National Highway Traffic Safety Administration*) y la GW (*The George Washington University*) de Estados Unidos.

5.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL GEO METRO

El Geo Metro de segunda generación es un coche de tamaño reducido, disponible con 3 o 4 puertas. Se vendió entre 1995 y 2001 en Norte América, aunque entre 1998 y 2001 su nombre cambió a Chevrolet Metro. También se vendió bajo los nombres Pontiac Firefly o Suzuki Swift según el mercado. En la Tabla 2 se exponen algunas de sus características:

Geo Metro (3 puertas)	
Configuración	Motor delantero transversal
Tracción	Delantera
Motores	1.0 L LP2 I3 (gasolina) 1.3 L L72 I4 (gasolina) 1.3 L LY8 I4 (gasolina)
Transmisión	Manual - 5 machas Automática - 3 marchas
Distancia entre ejes (Batalla)	2365 mm
Longitud	3795 mm
Anchura	4166 mm
Altura	1389 mm
Peso	831 kg

Tabla 2. Características técnicas del Geo Metro (3 puertas)

5.2. ADAPTACIÓN PREVIA DEL MODELO ORIGINAL PARA SU USO EN PATRAN

Antes de ser usado para este proyecto, el modelo de elementos finitos fue utilizado y optimizado para el funcionamiento con Patran por estudiantes e investigadores del departamento. Originalmente, el modelo estaba diseñado para su uso con el programa LS-Dyna, por lo que se tuvo que importar y adaptar para su uso con Patran.

En el Trabajo de Fin de *Master Optimización del pilar B de un automóvil en base a la directiva 96/27/CE*, de Jesús Segura [16], se documentan diferentes transformaciones que se le hicieron al modelo. A continuación, se indicarán algunas de ellas (se explican con más detalle en el Anexo 2), y se explicará más detalladamente porqué se han tenido que hacer, aun así, muchas más modificaciones al modelo antes de poder utilizarlo para ensayos de choque frontal.

Al realizar la importación del modelo de LS-Dyna a Patran se perdieron diferentes datos, entre ellos muchas de las uniones entre nodos. Esto se demuestra claramente en la Figura 1, en la que se ve la simulación del modelo, al cual se añadió gravedad y un suelo fijo, y se dejó calcular durante un segundo de tiempo.

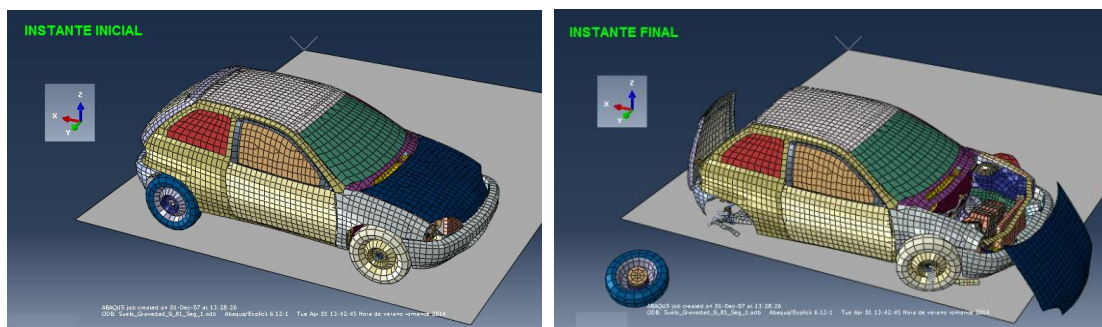


Figura 23. Modelo original antes y después de aplicar gravedad durante 1 segundo [16]

Así pues, se aplicaron nuevas uniones para fijar los diferentes elementos. Sin embargo, estas uniones realizadas fueron muy pocas, y sólo sirven para mantener unidos los componentes de manera sencilla y no son aptas para llevar a cabo un choque frontal. El único lugar donde se realizaron unas uniones más extensivas y cuidadosas fue en el lateral donde se llevó a cabo la simulación de impacto lateral y los elementos importantes en ella. Más adelante se expondrán las nuevas uniones que se introdujeron y de qué manera.

El modelo está compuesto básicamente por una serie de elementos, explicados con mayor profundidad en el apartado 2.1 *Elementos del modelo original*. A modo de resumen, el tipo de elementos presentes son los siguientes:

0 dimensiones	Nodos y elementos masa
1 dimensión	Elementos conectores, incluyendo muelles y amortiguadores
2 dimensiones	Elementos shell y superficies.
3 dimensiones	- Elementos sólidos

Tabla 3. Tipos de elementos en el modelo

Varios de estos tipos de componentes tuvieron desajustes durante la primera importación. En el Anexo 2. *Primera importación modelo a Patran*, se incluyen también con más detalle algunos de los fallos que tenía el modelo tras la importación y cómo se solucionaron.

5.3. NUEVAS MODIFICACIONES REALIZADAS AL MODELO

En primer lugar, se estudió el modelo y las modificaciones realizadas anteriormente en él y descritas en el Trabajo de Fin de *Master Optimización del pilar B de un automóvil en base a la directiva 96/27/CE*, de Jesús Segura [16].

Posteriormente se llevaron a cabo una serie de modificaciones en el modelo para facilitar el flujo de trabajo y facilitar la diferenciación de los componentes. Para empezar, se eliminaron centenares de grupos que no aportaban información después de agrupar sus componentes en un número reducido de grupos. También se volvieron a colorear las piezas del vehículo como se explica en el apartado 5.3.1. *Colores de las piezas*.

Una vez se tenía una base más ordenada e inteligible sobre la que trabajar, se incrementó el número de uniones y se afinó el mallado en las zonas más importantes. Se tomaron como base los modelos de alta y baja resolución de LS-Dyna. El número y el detalle de las uniones de estos modelos demostró ser insuficiente para realizar un ensayo de choque, pero sirvieron de base para navegar entre el embrollo de piezas y saber cuáles se tenían que unir a qué otras. En el apartado 5.3.3.2. *Uniones en el vehículo* se explica en detalle todas las cuestiones relacionadas con nuevas uniones.

5.3.1. COLORES DE LAS PIEZAS

Una de las primeras modificaciones que se vio necesaria en el modelo fue el cambio del color de las piezas. Originalmente muchos componentes adyacentes se encontraban modelados en el mismo o similar color, y no se aprovechaban todos los colores disponibles por igual (unos estaban muy repetidos y otros casi no aparecían). Esto dificultaba la identificación de las diferentes partes. Se optó también por colorear las piezas iguales existentes a ambos lados del vehículo del mismo color para facilitar la caracterización, por ejemplo, pintando el larguero derecho e izquierdo del mismo color.

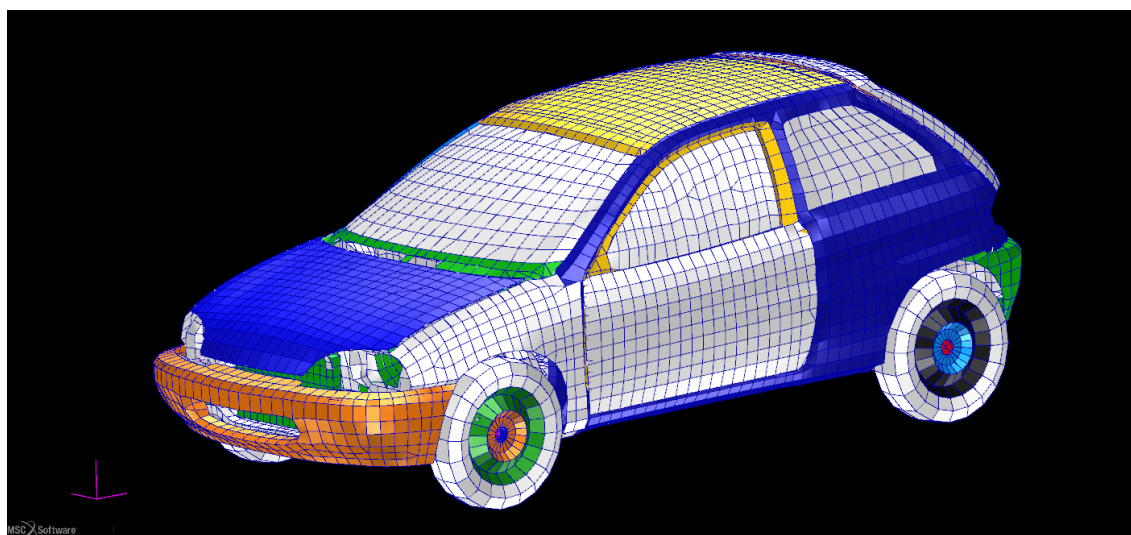


Figura 24. Modelo original [16]

Debido a la escasa gama de colores disponibles en Patran, se procedió dando colores sucesivamente en orden a todas las piezas o pares de pieza. De esta forma se utilizan todos los colores el mismo número de veces, y no se repiten más unos que otros. Por último, se comprobaron individualmente todas las piezas y se modificaron las que tenían colores iguales o parecidos estando cerca entre ellas. Además, se hicieron algunas modificaciones para hacer el modelo más interesante y/o intuitivo, como colorear las ventanillas de color azul claro.

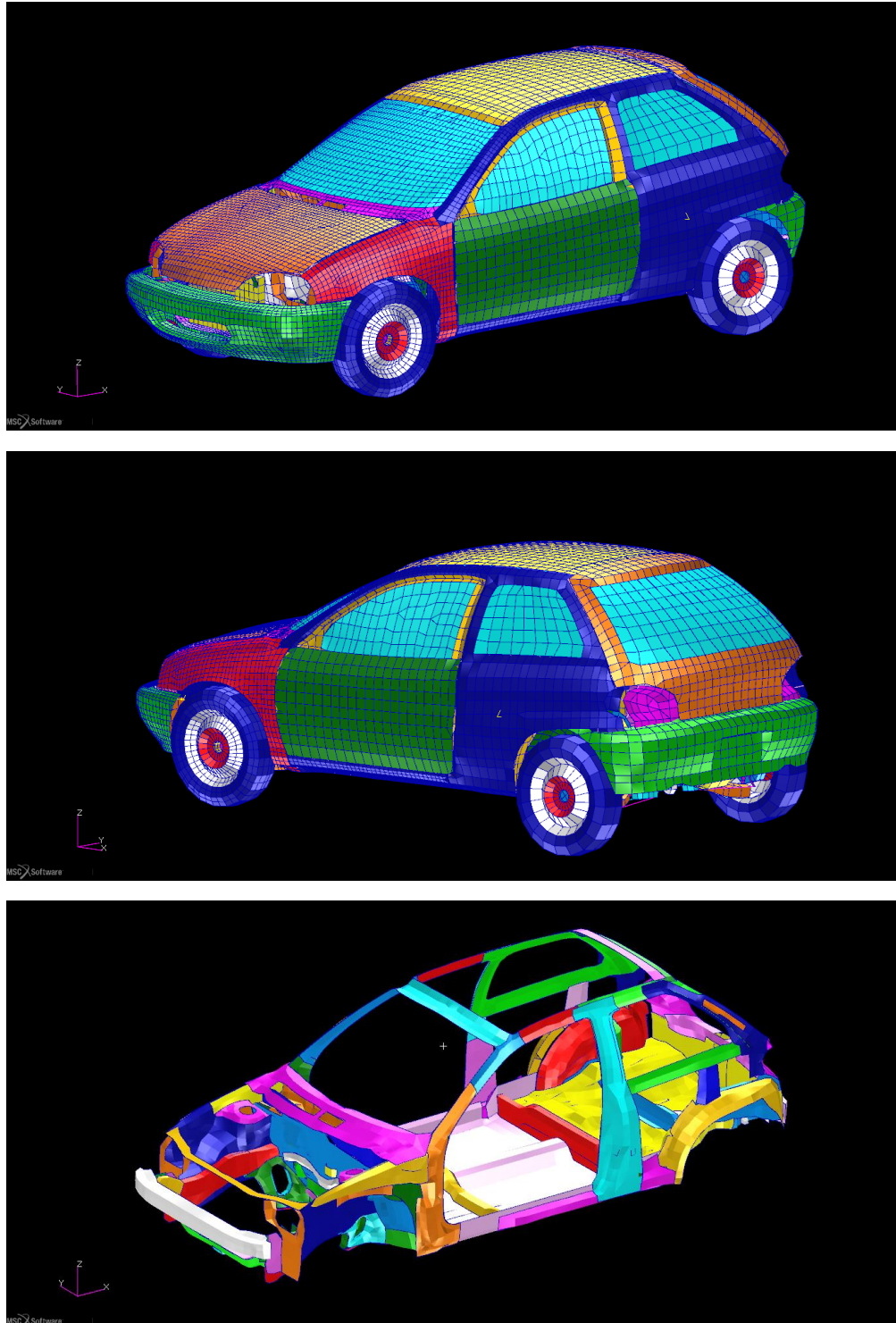


Figura 25. Modelo final. La última vista corresponde al chasis sin mallar, para mayor claridad

5.3.2. RUEDAS Y SUSPENSIONES

Se pensó en modelizar las ruedas como elementos giratorios, pero finalmente se decidió modelizarlas como si estuvieran bloqueadas. La diferencia es mínima, y al tratarse de un proyecto cualitativo, cuyo objetivo es valorar el cambio que se puede obtener utilizando aceros de alta resistencia, no importa la variación mínima que supondrá y será constante en todos los modelos. Se puede equiparar a que el coche está frenando. Teniendo un coeficiente de rozamiento de 0.3 entre el suelo y las ruedas (el coeficiente de fricción global utilizado en las simulaciones), el frenado que introducen las ruedas es de tan sólo alrededor de 3m/s^2 , lo cual son unos 1.5km/h por cada 100ms de simulación. En conclusión, es una diferencia pequeña la que va a aportar la falta de giro de las ruedas y para el objetivo del trabajo es indiferente.

Por otro lado, sí que se trabajaron los modelos de las suspensiones, ya que había un desplazamiento excesivo de las ruedas posteriores durante el choque.

5.3.3. MASA DEL VEHÍCULO

Durante la importación del modelo, Jesús Segura encontró una discrepancia entre la masa del vehículo real y la del modelo. El vehículo real tiene una masa de 831Kg , como se ha indicado en la *Tabla 2. Características técnicas del Geo Metro (3 puertas)*, mientras que el modelo importado llegaba a los $1243,8\text{Kg}$. Por tanto, había $412,8\text{Kg}$ extra.

El modelo original contenía una gran cantidad de elementos masa, que contribuían en total con $174,8\text{Kg}$. Se pueden apreciar en la Figura 26.

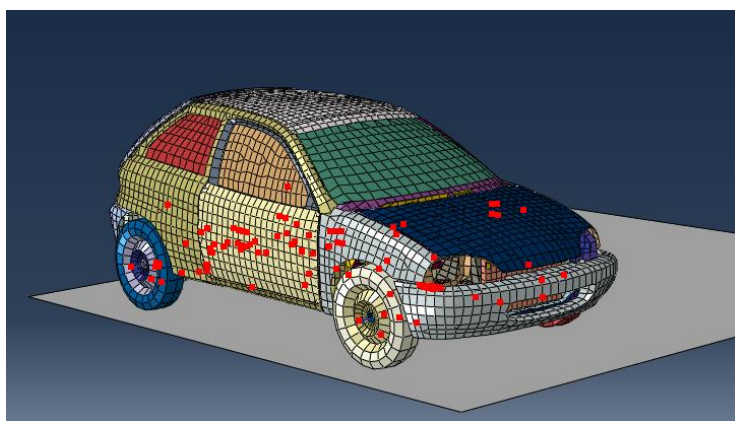


Figura 26. Elementos masa en el modelo original [16]

Según describe Jesús Segura, en el modelo importado existían una serie de materiales con características que no se asemejan a ningún material real. Se otorgó a la mayoría de materiales la propiedad del acero S355. En el siguiente apartado, 5.3.3.1, se describirán en mayor profundidad los materiales utilizados y sus propiedades.

Después de la modificación del material y la eliminación de varios de los elementos masa, la masa total del vehículo disminuyó hasta 1052Kg , algo más cercana a los 831Kg reales, pero todavía 231Kg por encima.

Durante la elaboración del presente proyecto se quiso ilustrar gráficamente los espesores de los elementos del chasis y la carrocería relevantes durante el choque. De esta

forma se descubrió que algunos de los espesores no eran correctos, tal como se puede apreciar en la Figura 27, coloreada según el espesor de los elementos:

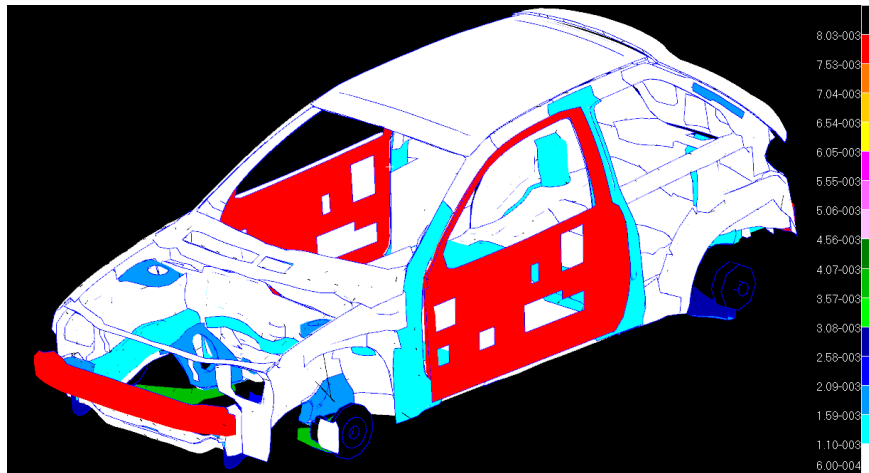


Figura 27. Chasis modelo original coloreado según espesores

El interior de las puertas tenía un espesor de 7.82mm, por eso se ve dibujado de rojo, destacando sobre los otros elementos con un espesor muy superior. Una plancha de casi 1cm de acero es claramente excesiva para el interior de una puerta. Se procedió a comprobar los valores originales utilizando el modelo de LS-Dyna, y se descubrió que se había aumentado en algún momento el espesor en un factor de 10. La corrección implicó que la masa de esas piezas pasara de unos 50Kg por puerta a unos 5Kg. Por tanto, se redujo la masa del vehículo en casi 100Kg, acercándonos más a la masa real.

Otro elemento que llama la atención es la parte interior del parachoques, la traviesa que une los dos largueros frontales. Esta tiene un espesor que coincide con el del modelo original de LS-Dyna, y que es muy grande para tratarse de acero. Se comprobó en la lista de materiales de LS-Dyna que efectivamente no se trataba de acero, sino de un material con características en el entorno de algún tipo de aluminio. La parte interior y exterior de los parachoques se modificaron por tanto para pasar a ser de aluminio. Con este cambio se redujo la masa de estos componentes a la mitad, algo no despreciable ya que teníamos unas láminas de acero de 8mm de espesor.

Otras piezas como el *bracket* de sujeción del radiador tenían valores de espesor excesivos y se corrigieron durante la puesta a punto del modelo, previa a las simulaciones.

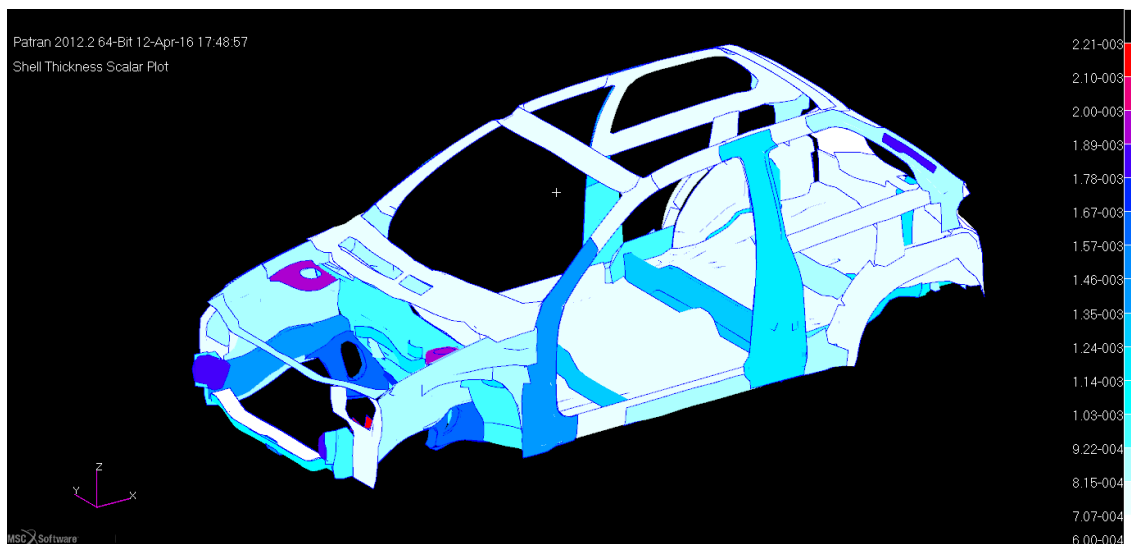


Figura 28. Chasis modelo final coloreado según espesores

El radiador tenía aplicado el mismo material que el bloque motor, con una densidad muy elevada, mientras que en el modelo de LS-Dyna se le aplicó un material con una densidad muy reducida. Esta densidad reducida simula la densidad del bloque del radiador en el vehículo real, que se halla compuesto de finas láminas de metal en su mayor parte y conductos para la circulación del agua también metálicos pero huecos. La nueva densidad aplicada al radiador es de 295kg/m^3 en vez de la del bloque motor de 2850kg/m^3 . El volumen del radiador es de $8.27\text{E-}3\text{ m}^3$, por lo que la masa pasa de $23,57\text{Kg}$ a tan sólo $2,44\text{Kg}$, una reducción de más de 21Kg en la masa total del vehículo.

El material del suelo en el modelo de LS-Dyna tiene una densidad ligeramente superior a la del acero, lo que se puede interpretar como una simplificación para añadir el peso de aislantes, moquetas o demás componentes solidarios al suelo. Se creó un nuevo material con los datos originales lo cual aumentó en algunos kilogramos la masa del modelo.

Todos estos valores deberían haberse importado correctamente desde el modelo original, pero o bien hubo fallos o en algún momento se modificaron los valores. Por ello se procedió a comprobar uno a uno los espesores y materiales utilizados en todas y cada una de las piezas. En el apartado 5.3.3.1. *Materiales*, se hablará más detalladamente de los materiales presentes en el modelo original y las modificaciones realizadas en el modelo.

Finalmente, después de haber realizado todas las modificaciones en los materiales y geometría, el peso del modelo completo de FEM del vehículo se sitúa en 766.3kg . Se aprecia que las masas existentes no son simétricas. En la parte inferior del vehículo esto es correcto, ya que se han añadido masas para simular el conjunto del tubo de escape, pero no así las masas en la zona de la suspensión delantera derecha. Después de añadir las 9 masas de 1.67kg que faltaban, se llega a una masa de 781.4kg .

Tenemos por tanto una diferencia de 49.6kg con el coche original. Esta puede deberse a componentes que faltan en el modelo de ordenador: guarnecidos, volante, insonorización y demás.

Para simular mejor el comportamiento del vehículo en caso de choque frontal, y siguiendo pautas de ensayos similares, se añadirá a la masa del vehículo el peso de dos

dummies Hybrid III 50th Male Dummy, en los asientos frontales. Estos *dummies* tienen una masa de 77.7kg cada uno, y simulan un cuerpo de varón de percentil 50. [17]

La masa de los ocupantes se dividirá entre los apoyos correspondientes a los tres anclajes de los cinturones de seguridad. Se aplicarán 37.7kg en los anclajes superiores, que se fijan al pilar B, Y 20kg en cada uno de los anclajes inferiores, que se situarán al lado de los anclajes posteriores de los asientos delanteros.

Para llegar a los 831kg que pesa el coche real se añadirán masas alrededor del vehículo hasta completar los 49,6kg que faltan. Ya existen masas en diferentes lugares, como en los cuatro anclajes de cada asiento delantero al suelo, así que se estudia en qué sitios pueden faltar. Los lugares elegidos para repartir las masas son: sobre la pared cortafuegos (3), los paneles de las puertas y los traseros (4), el techo (1) y en el eje de manera que simulen los guarnecidos, materiales aislantes/de insonorización, alfombrillas y el salpicadero. Por tanto, tenemos 8 masas repartidas, cada una de $49.6/8=6,2\text{kg}$.

Comprobamos finalmente la masa del modelo del vehículo entero y nos da 831kg sólo el vehículo, y 986.4kg sumando los 155.4kg de los dos *dummies*. Las masas repartidas en el modelo final son las señaladas en la Figura 29.

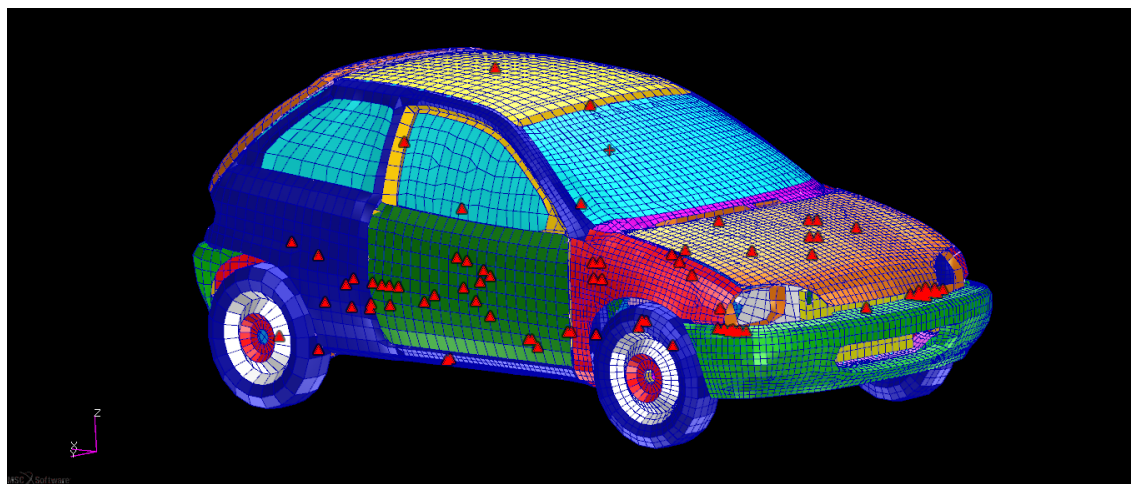


Figura 29. Elementos masa en el modelo final

5.3.3.1. MATERIALES

Al realizar la comprobación de los materiales utilizados en el modelo original de LS-Dyna se halló que existían en total 30 materiales diferentes, entre ellos 14 tipos de acero, 2 tipos de cristal, 3 aluminios³, 2 para elementos sólidos, y varios otros con densidades muy similares al acero para componentes como brazos de suspensión.

Toda esa información fue reducida por el anterior usuario del modelo de vehículo con el que se trabaja. De todos esos materiales, se pasó a tan sólo 4 en todo el vehículo, un acero convencional usado en la industria del automóvil (el acero S355), cristal, un material usado en el motor y radiador, y un material elástico para los neumáticos.

³ Existen 3 elementos con densidad de aluminio diferentes. Uno de estos materiales tiene una tensión de rotura 10 veces superior a las otras, por lo que puede tratarse de un error.

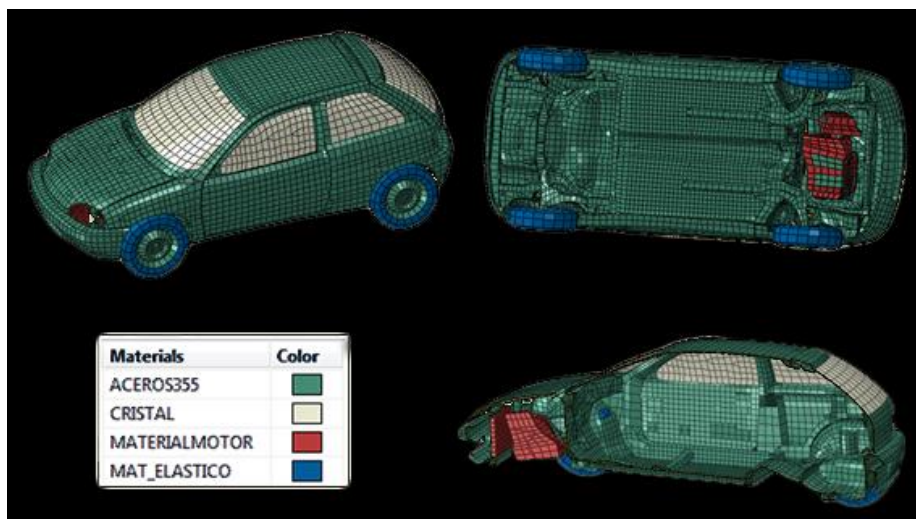


Figura 30. Materiales en el modelo antes de comenzar este Proyecto [16]

Como se ha comentado en el apartado 5.3.3. *Masa del vehículo*, se introdujeron diversas modificaciones en los materiales del vehículo. Siguiendo el modelo original de LS-Dyna, se introdujo un material de aluminio para su uso en los parachoques y largueros transversales anterior y posterior de un tipo comúnmente usado en los automóviles con unas buenas cualidades mecánicas y para extrusión, la aleación 6061.

También se modificaron los materiales del suelo y radiador, por las razones que se detallan en el apartado 5.3.3.

Para evaluar el impacto del uso de aceros de alta resistencia en los componentes más importantes durante un choque frontal, se sustituirá el acero convencional de determinadas piezas por otros de alta resistencia. Los aceros de alta resistencia utilizados y las diferentes configuraciones en las que se emplearán vienen detallados en los apartados 6.2 y 6.3.

5.3.3.2. UNIONES EN EL VEHÍCULO

Como se comentó anteriormente, muchas de las uniones realizadas originalmente entre componentes del vehículo se colocaron con el objetivo de mantener las piezas unidas, pero no para realizar una función estructural en caso de choque frontal. La única zona con uniones un poco más completas era la que interesaba al estudiante que realizó su Trabajo de Fin de Máster con el modelo del vehículo previamente, y se centran en el lateral donde se simuló el ensayo de choque lateral. Debido a ello, una gran parte de este Proyecto consistió en la mejora de las uniones entre piezas. Se centraron los esfuerzos en las zonas más importantes de cara a un choque frontal, pero como se verá, los cambios tuvieron que ser muy extensos.

Se utilizan en el modelo dos tipos básicos de uniones, las *uniones barra (beam)* y los *MPC beam fixed (fijados)*. Una unión barra es una unión entre dos nodos de tal forma que mantendrán la distancia entre sí y se transmitirán los esfuerzos longitudinalmente a lo largo del eje que los une. La identificación de estas uniones es el tipo CONN3D2 – JOIN. Utilizando varias uniones barra se puede simular un cordón de soldadura, o de manera sencilla uniones de otro tipo entre dos piezas.

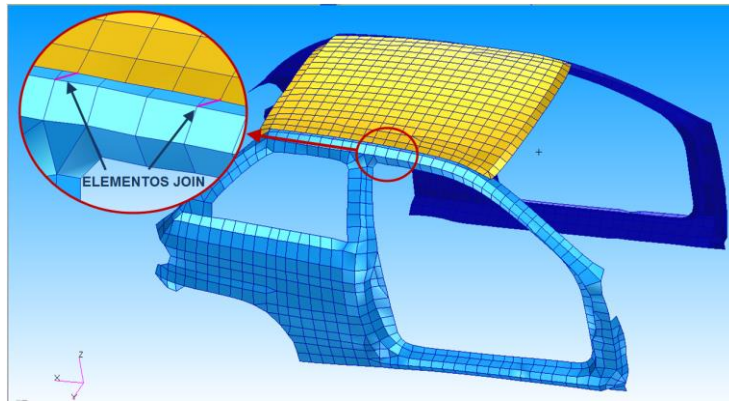


Figura 31. Uniones de tipo barra [16]

Una unión MPC une dos o más nodos, siendo uno de ellos el independiente, y al resto los dependientes. Al agregar la característica de *fixed*, los nodos independientes tendrán sus 6 grados de libertad restringidos respecto al nodo independiente. Pueden servir para hacer uniones tipo bisagra, o para simular una soldadura por puntos.

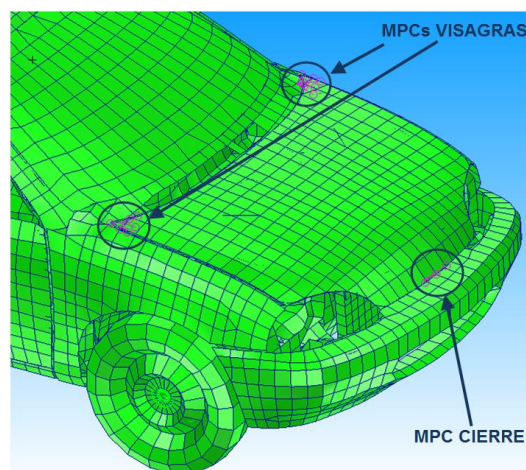


Figura 32. Uniones tipo MPC [16]

Una vez explicados los tipos de uniones podemos comprobar las que existían en el modelo del vehículo al comenzar a trabajar en este proyecto, representadas en la Figura 33.

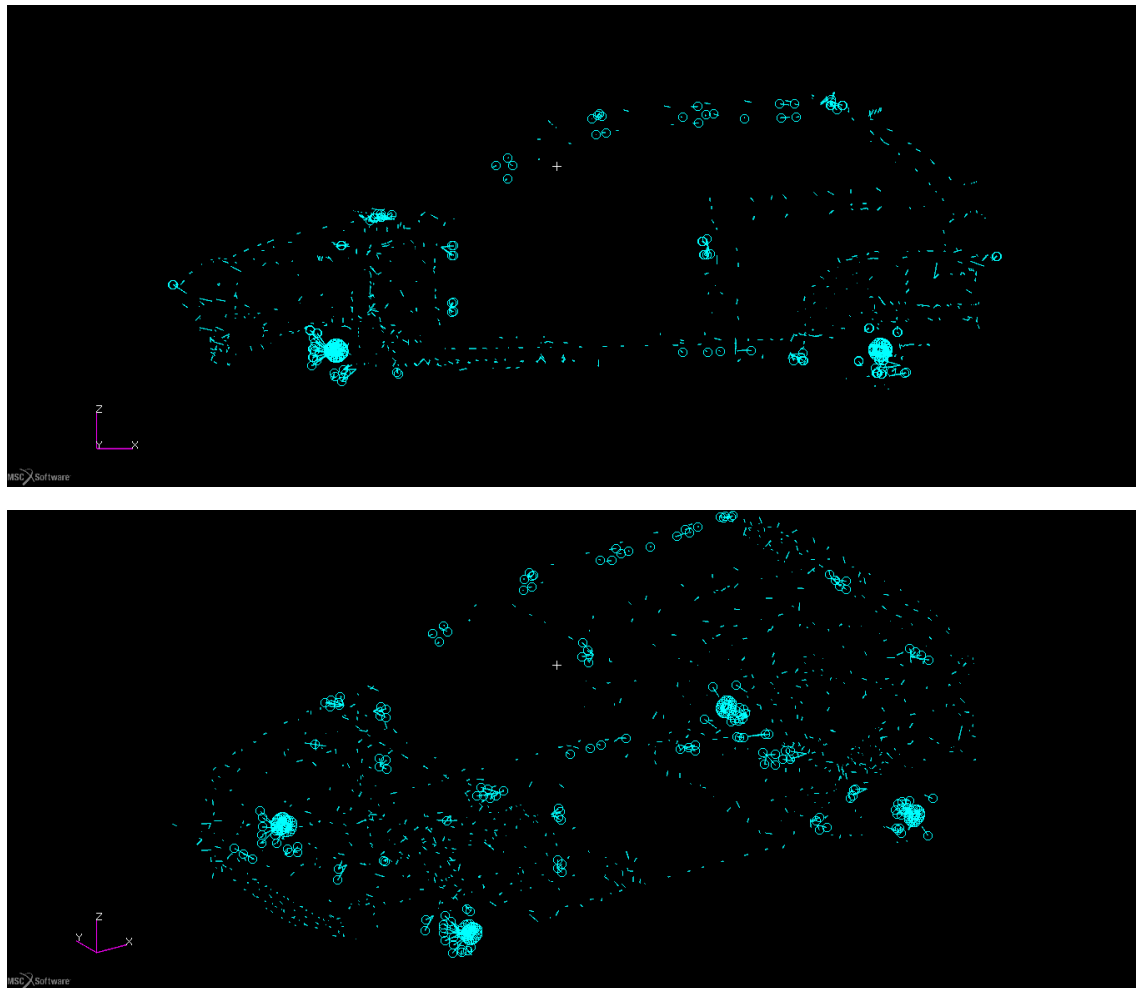


Figura 33. Uniones iniciales en el modelo. Vista lateral y en perspectiva

Se tomaron como guía las uniones existentes en los modelos *base* y *detallado* de LS-Dyna. Sin embargo, ni siquiera el modelo más detallado está optimizado para ensayos de choque, ya que el nivel de detalle de las uniones es bajo. Utilizan uniones poco escrupulosas, y, en todo caso, insuficientes para un ensayo de choque frontal. Por ejemplo, la unión entre los largueros delanteros y la barra que los une en el frontal, y que se realiza a través de una serie de planchas de acero, tan sólo tenía las uniones que se aprecian a continuación en la Figura 34. Al añadir nuevas uniones este problema quedó solventado con más uniones en la parte inferior, y entre las planchas y los largueros. Esta es una zona con altas exigencias durante un choque frontal, y es importante que se modelen correctamente las uniones.

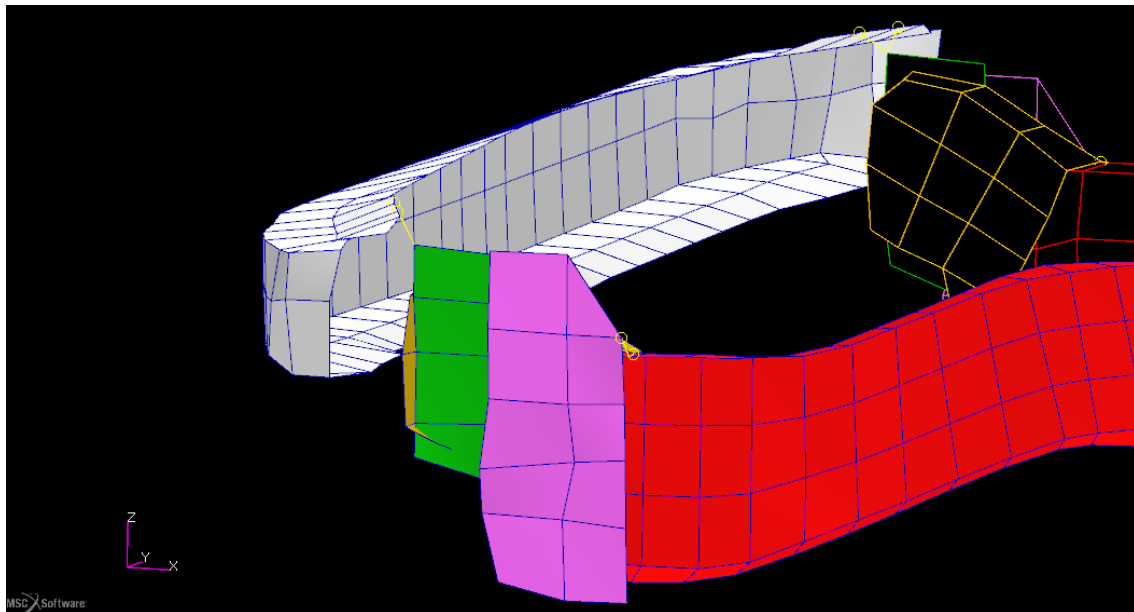


Figura 34. Unión largueros y barra frontal original

Aun así, las uniones en los modelos de LS-Dyna ayudaron para una primera comprobación, y se añadió una primera ronda de uniones nuevas basadas en estas, y que no existían en el modelo de Patran. Las nuevas uniones basadas en las de LS-Dyna se pueden ver en la Figura 35.

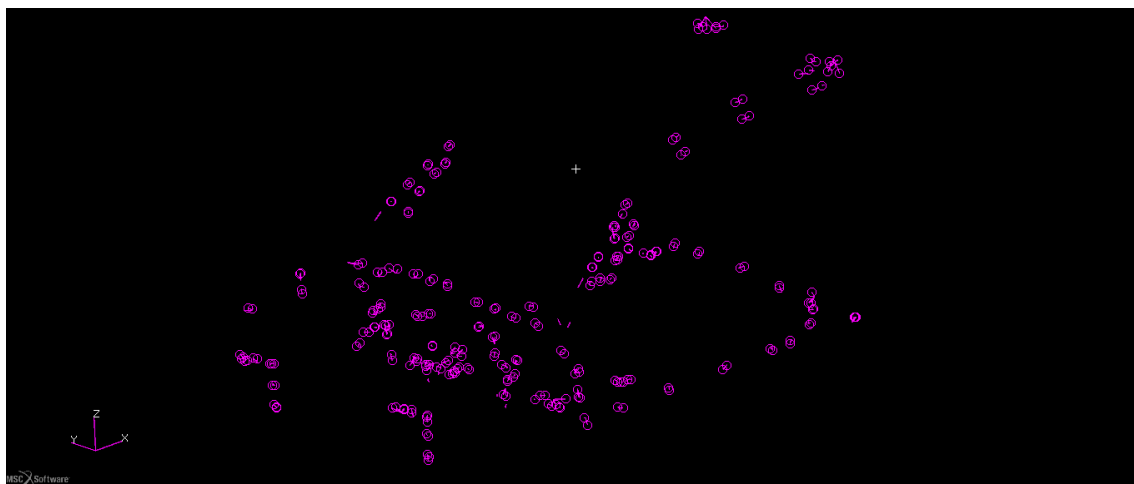


Figura 35. Uniones nuevas basadas en los modelos de LS-Dyna. Vista en perspectiva

Posteriormente, y como se ha comentado, se tuvieron que agregar una gran cantidad de uniones nuevas. Se estudiaron todas las piezas que componen el vehículo, y las relaciones que deberían existir entre ellas. También se tomaron como referencia imágenes del coche real, que permitieron comprobar, por ejemplo, cómo los largueros frontales estaban soldados al hueco de la rueda, algo que le proporciona mucha mayor resistencia a esta zona que si fueran dos piezas separadas, o unidas solo en sitios puntuales.



Figura 36. Vano motor del Geo Metro

En la Figura 37 se pueden observar las nuevas uniones creadas. Se pueden apreciar muy bien por ejemplo las uniones entre los diferentes componentes del pilar A, que faltaban en el modelo original y en el de LS-Dyna, y provocaban que hubiera una deformación excesiva en el pilar, ya que el pilar no tenía la rigidez suficiente al no estar unidas correctamente la parte exterior e interior del mismo, y ni siquiera las diferentes piezas que existen a lo largo del pilar. También se puede ver el cordón de soldadura entre los largueros y los huecos de las ruedas comentado anteriormente.

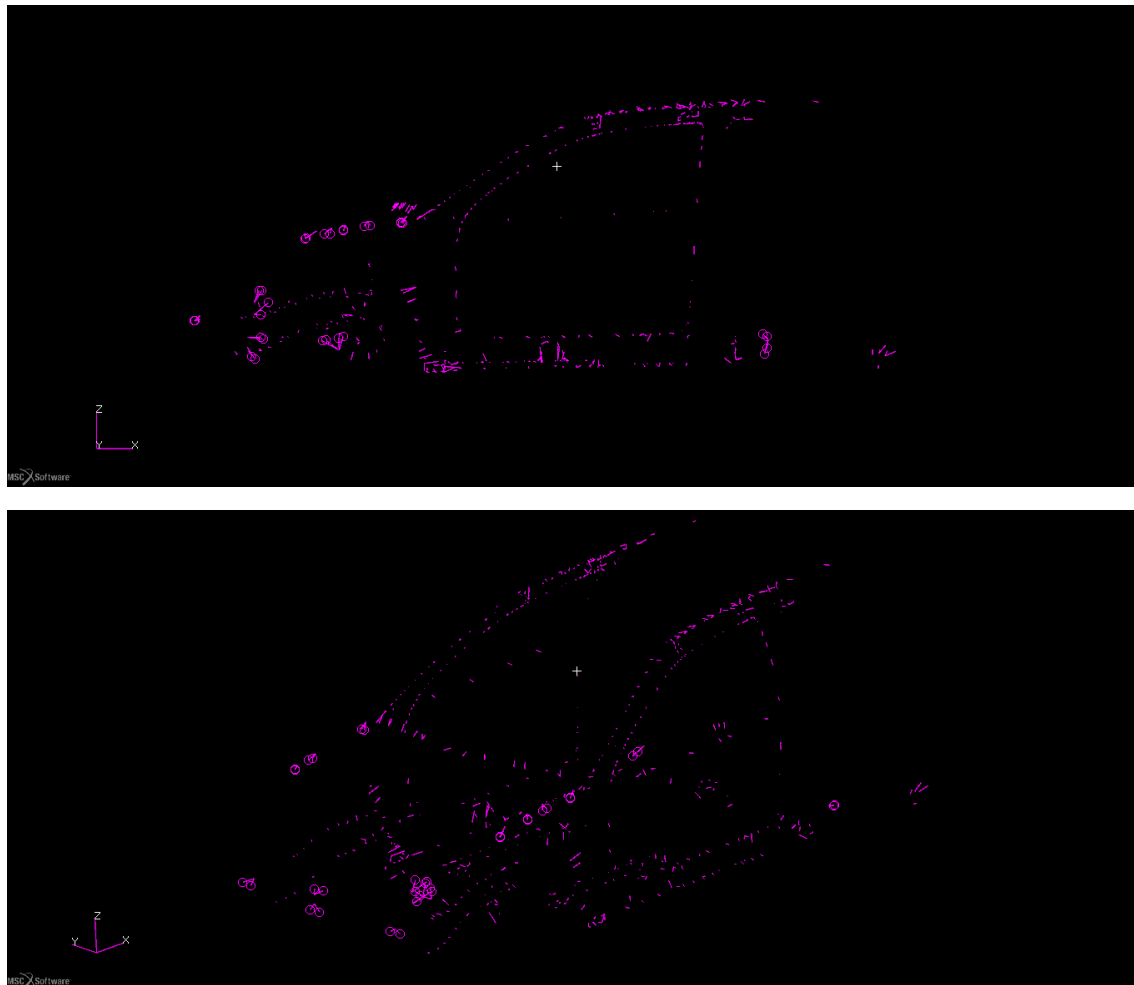


Figura 37. Uniones creadas en el modelo. Vista lateral y en perspectiva

Por último, una vista del modelo final, con las uniones ya existentes mostradas en color azul, y las nuevas en color morado pueden observarse en la Figura 38.

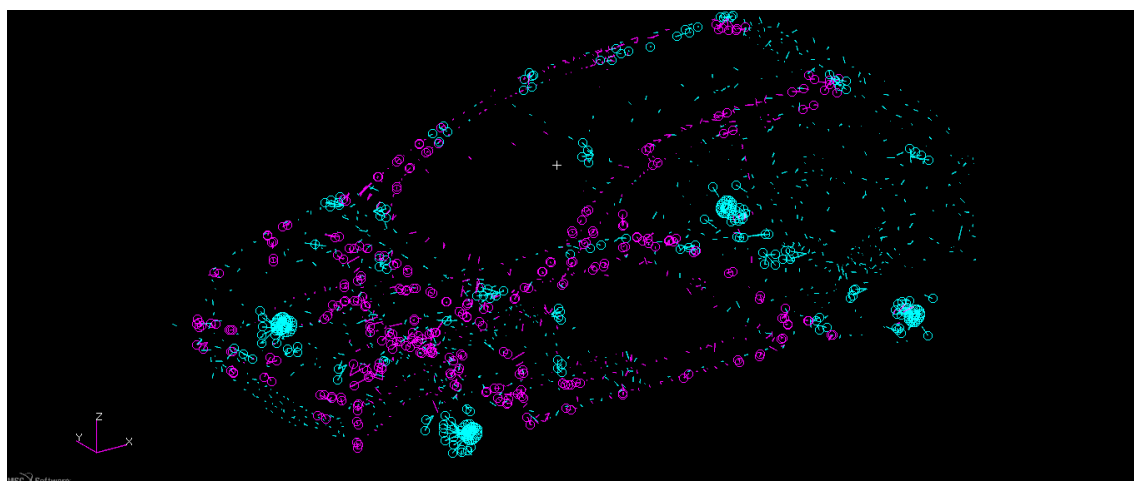


Figura 38. Uniones en el modelo final. Originales en azul, creadas en morado. Vista en perspectiva

En el Anexo 3. Nuevas modificaciones en las uniones se pueden observar los cambios y nuevas uniones desde diferentes perspectivas con mayor detalle.

5.3.3.3. MODIFICACIÓN DEL MALLADO

Con el objetivo de lograr una mayor fidelidad y mantener las energías ficticias que crea Abaqus durante la simulación en niveles aceptables, se procedió a afinar el mallado en componentes importantes durante el choque frontal, que pueden sufrir altas tensiones y grandes deformaciones.

Se optó por hacer una división de cada elemento existente en 4 nuevos elementos. En las piezas que requerían un remallado completo se procedió seleccionando todos los componentes y dividiendo tanto los elementos de 3 lados como los de 4 en otros 4 elementos, con nodos en la mitad de los bordes iniciales. De esta forma los nuevos elementos tienen nodos compartidos entre sí, y que coinciden con los nodos antiguos y los creados. Si surgía algún problema, se volvían a crear los elementos afectados manualmente. Finalmente se realiza una equivalencia para eliminar nodos duplicados y se comprueba mediante el comando *verify free edges* que no existen bordes libres en el interior de la pieza, y que por tanto el remallado es correcto. Cabe mencionar que previamente al remallado se comprobó que los diferentes componentes no están unidos mediante compartición de nodos, por lo que se pueden modificar sin peligro.

En piezas más grandes, como el lateral del vehículo, se afinó el mallado sólo en la parte en la cual se prevén mayores esfuerzos, tal como se puede ver en la Figura 39. Este proceso requiere más trabajo ya que se han de crear manualmente los nuevos elementos en las entre fases entre los dos tamaños de mallado, pero permite obtener un mallado más fino en las partes donde se necesita con un menor número total de elementos.

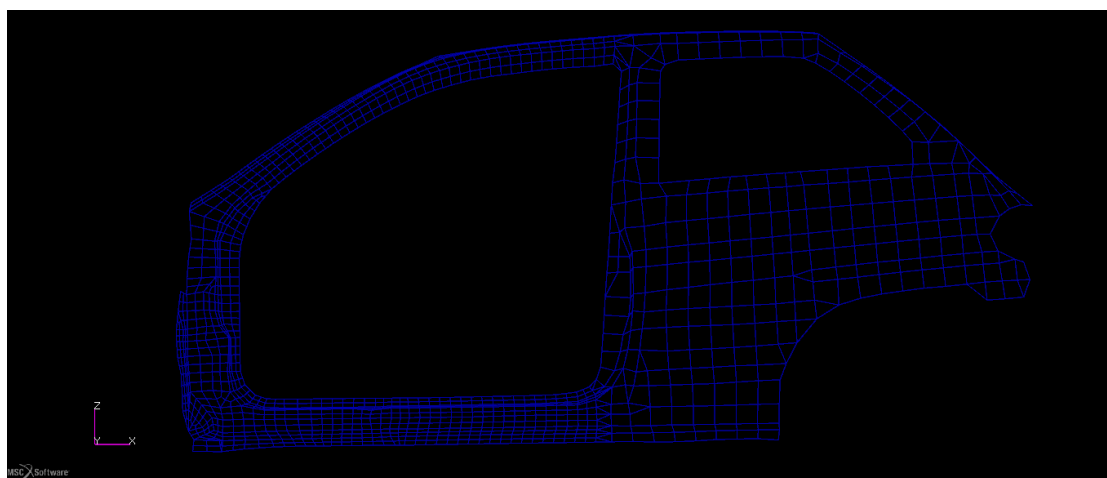


Figura 39. Panel lateral del vehículo después del remallado, con mallado más fino y grueso según el requerimiento

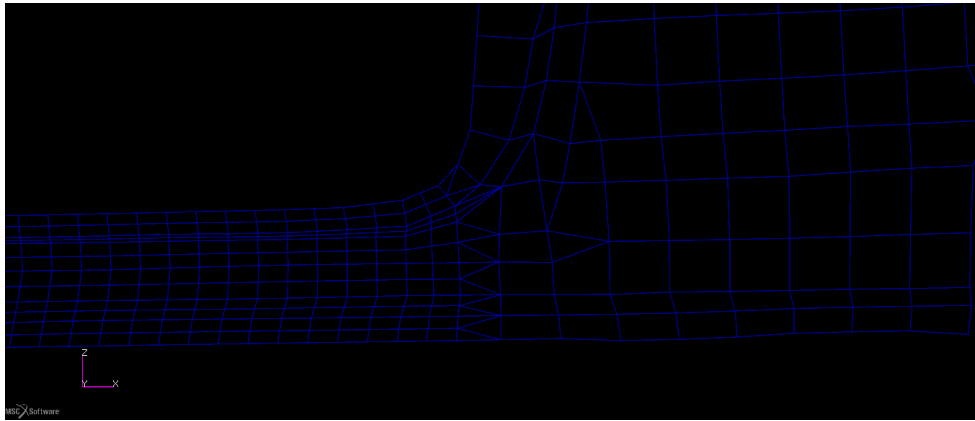


Figura 40. Detalle de la transición entre el mallado fino y grueso

Así pues, en la Figura 41 y la Figura 42 tenemos el modelo antes y después de realizar el remallado, respectivamente.

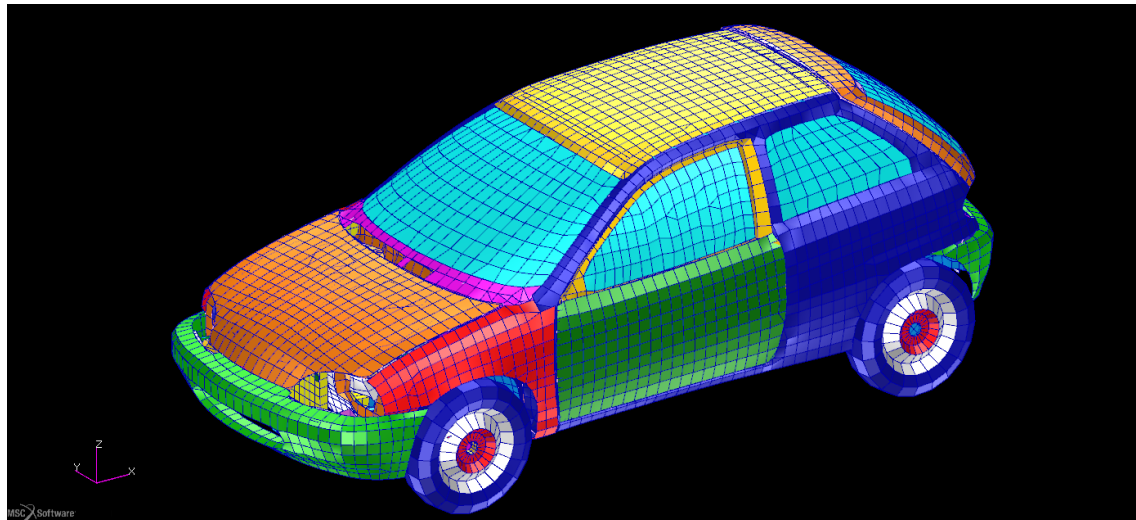


Figura 41. Modelo antes del remallado

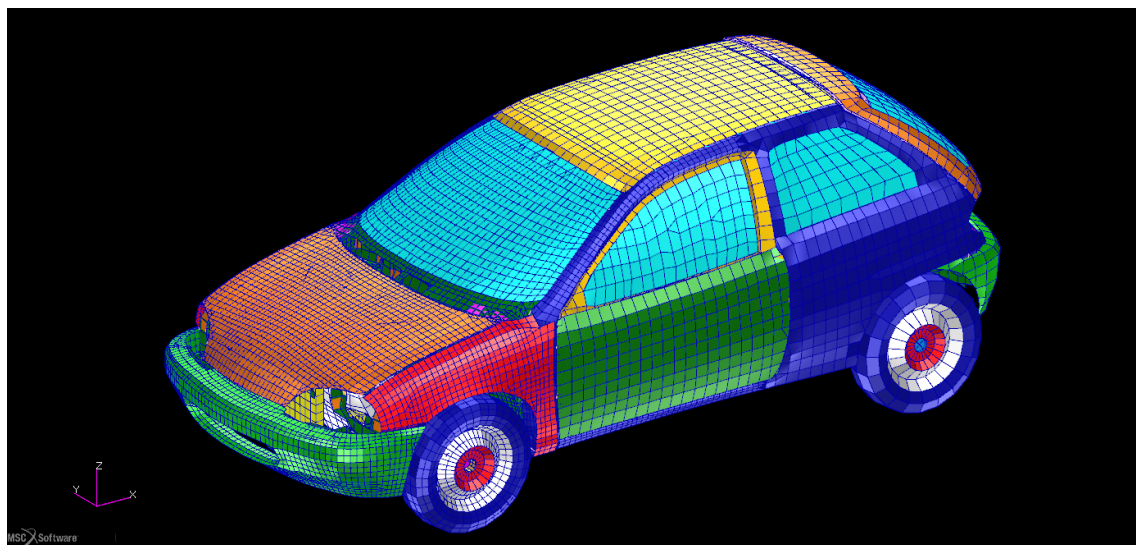


Figura 42. Modelo después del remallado

Otros componentes importantes en un choque frontal y que no se pueden apreciar en la figura anterior también están remallados, como puede observarse en la Figura 43, en la que se ven los componentes del chasis después del remallado, contando con un mallado más fino los de la parte frontal del vehículo.

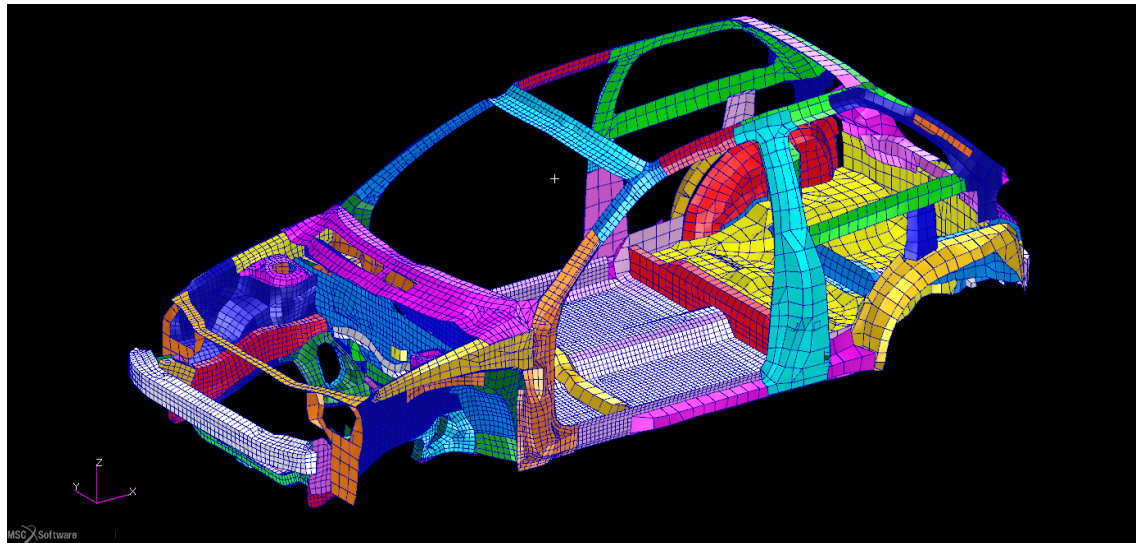


Figura 43. Modelo después del remallado. Vista del chasis

6. ENSAYOS

6.1. VALIDACIÓN DEL MODELO

Para comprobar la validez del modelo, se realizó una comparación entre una prueba real de choque y otra de similares características simulada con nuestro modelo después de haber realizado todas las modificaciones anteriormente descritas.

Se encontró en la base de datos del NHTSA [18] el informe de un ensayo de choque frontal realizado por *Transport Canada* con el mismo vehículo y a una velocidad muy parecida a la que indica la Directiva 96/79/CE. En concreto se trata del ensayo número 4506, de un Geo Metro 3 puertas, modelo 1998, a una velocidad de 56,16Km/h contra una barrera fija.

Se descargaron los vídeos relativos a este ensayo y se realizó una simulación con la misma configuración que en el ensayo real con nuestro modelo de elementos finitos. Se tuvo que diseñar una nueva barrera para este ensayo, en este caso una pared rígida vertical, la cual comienza en el suelo y se eleva hasta por encima del vehículo. La velocidad inicial del vehículo se fijó en 56.16Km/h, similar a la velocidad de aproximación final en el ensayo real.

Cabe mencionar que los materiales empleados en nuestro modelo son ligeramente diferentes a los del modelo real, como se describe en el apartado 5.3.3.1. *Materiales*. En nuestro caso sólo se usa un tipo de acero para la configuración inicial, mientras que en el vehículo real se tienen aceros de varios tipos, incluyendo algunos de hasta 500MPa de tensión de rotura. Por ello se han de tomar con cautela los resultados, y podemos esperar que las deformaciones del modelo simulado no sean exactamente iguales, pero sí bastante similares, a las del modelo real.



Figura 44. Ensayo de choque frontal del Geo Metro 3 puertas de 1998 contra una barrera fija a 56,16Km/h [18]

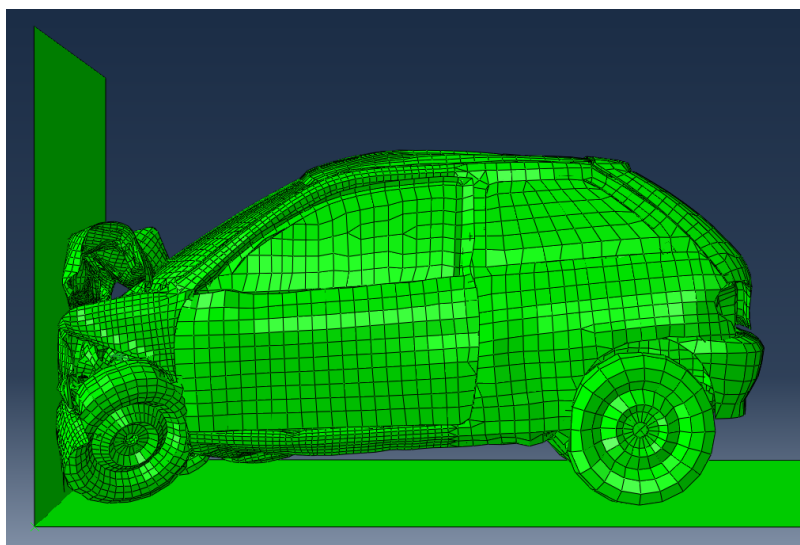


Figura 45. Ensayo simulado del modelo utilizado en este proyecto contra una barrera fija a 56,16Km/h

Comparando la Figura 44 y la Figura 45, podemos llegar a la conclusión de que nuestro modelo se comporta de manera muy parecida al modelo real bajo las mismas condiciones de ensayo de choque frontal, y por lo tanto queda validado de cara a los objetivos de este proyecto.

El modelo de suspensión trasera sigue permitiendo, aún después de haberse mejorado, demasiado movimiento en el eje longitudinal, con lo que la rueda llega a impactar con la carrocería, pero es un error que no afecta a nuestras simulaciones ya que la inercia de la rueda se sigue aplicando, aunque sea en un punto un poco alejado del real.

6.2. ACEROS DE ALTA RESISTENCIA UTILIZADOS

Existen multitud de tipos de acero, pero nos centraremos en los aceros de alta resistencia que, por sus características, se suelen utilizar en el sector automovilístico. Se elegirá un total de 3 aceros de alta a ultra-alta resistencia para los ensayos, pero primero veamos las características que separan un acero de alta resistencia de los aceros normales.

Los aceros de alta resistencia tienen el mismo módulo de Young que los aceros convencionales. Sin embargo, aguantan más tensión antes de empezar a plastificar. Una vez en la zona plástica también tienen un límite de tensión de rotura más alto, aunque generalmente se llega con una deformación unitaria menor.

Por otra parte, los aceros de alta resistencia no absorben necesariamente más energía durante su deformación y hasta su rotura que los aceros convencionales.

Estas características son clave para poder predecir a manera de hipótesis en qué nos puede beneficiar y en qué no su uso. En las zonas de absorción de energía, o de deformación programada, interesa utilizar materiales y componentes que absorban la mayor cantidad de energía posible, por lo que puede que no se obtengan ventajas utilizando aceros de alta resistencia, o al menos no todos. Sin embargo, interesa que el habitáculo mantenga su integridad estructural, y no se deforme excesivamente reduciendo el espacio de supervivencia de los ocupantes, y aquí el acero de alta resistencia puede ser muy útil. Se puede utilizar para reforzar zonas como el pilar A para que no se produzca demasiada deformación o incluso su colapso.

Se ha decidido utilizar la serie de aceros de alta resistencia DOCOL, del fabricante sueco SSAB. Esta serie está comercializada como idónea para aplicaciones automovilísticas, y es utilizada por diversos fabricantes [19]. La serie incluye multitud de aceros, y se han seleccionado tres diferentes, con unos valores de tensión de rotura de que van desde 1090MPa hasta 1800MPa. La Tabla 4 muestra sus características, así como las del acero convencional S355⁴, que es el utilizado en todos los componentes de acero del vehículo en su configuración básica.

Tipo de Acero	Módulo de Young, E (Mpa)	Límite elástico, Re (MPa)	Tensión de rotura, Rm (MPa)	Alargamiento a la rotura	
				%	Tanto por 1
S355	210000	355	550	22	0,22
DOCOL1000 LCEZE	210000	800	1090	8	0,08
DOCOL1400 MZE	210000	1150	1500	3	0,03
DOCOL1800 BOR	210000	1560	1800	6	0,06

Tabla 4. Características de los aceros utilizados

⁴ Características del acero S355 según la norma EN 10025:2004.

Teniendo los datos de los aceros que utilizaremos, podemos dibujar una gráfica con las curvas Tensión-Deformación características de cada uno de ellos para observar gráficamente lo que significan estos valores, tal como muestra la Figura 46.

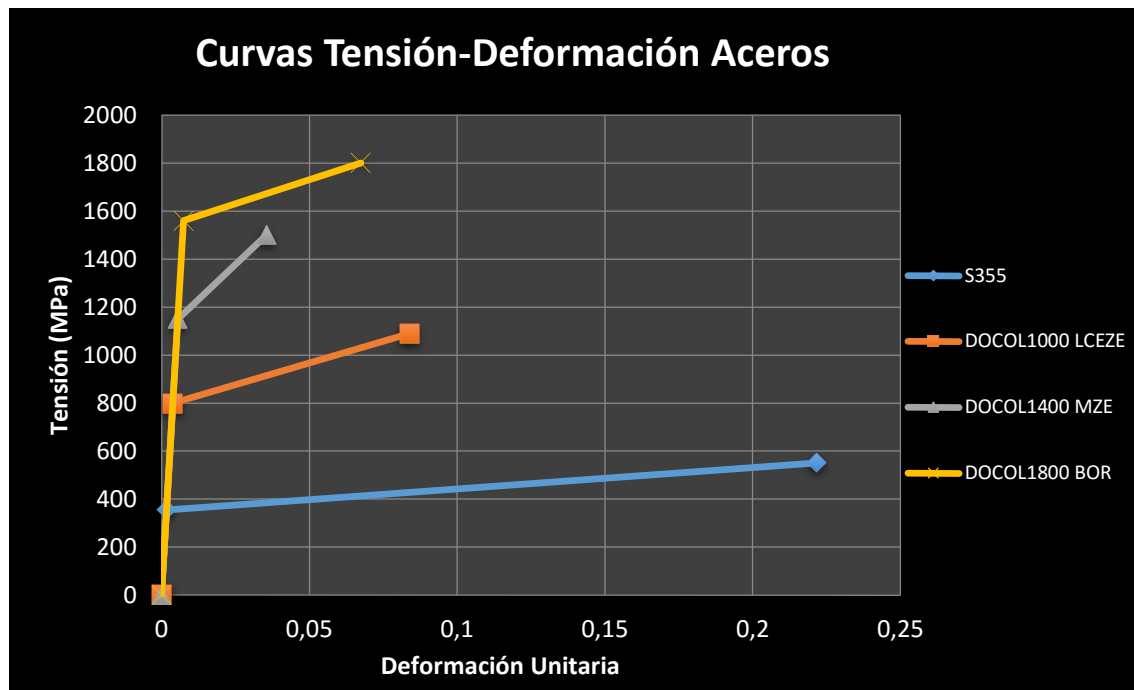


Figura 46. Curvas Tensión-Deformación de los aceros utilizados

Se puede apreciar claramente que existe una gran diferencia entre los aceros de alta resistencia y el convencional. A la izquierda de la gráfica en la Figura 46 tenemos las rectas de deformación elástica, las cuales tienen la misma pendiente para todos los aceros ya que todos tienen el mismo Módulo de Young ($E = \text{Tensión} / \text{Def. unitaria}$). Sin embargo, el límite elástico varía mucho entre todos ellos. Al llegar a este límite, las curvas siguen con una pendiente más horizontal, es decir, aumenta en menor medida la tensión que ejercen los aceros conforme se deforman, hasta que se llega al punto de rotura. Se puede apreciar que, a pesar de ser a una tensión menor, la rotura del acero S355 se produce con una deformación mucho mayor que en los aceros de alta resistencia.

La energía específica de deformación de cada acero es el área encerrada debajo de su curva Tensión-Deformación. No se puede evaluar a simple vista cómo se comparan estas áreas, por lo que se ha realizado el cálculo de las energías de deformación de cada acero y se ha calculado la proporción con respecto a las del acero S355, dándole a este un valor de 1 para facilitar la comparación por proporcionalidad. Se ha diferenciado también entre la energía que es capaz de absorber cada acero de manera elástica (energía específica de deformación elástica, que será el área debajo de cada curva hasta el límite elástico), y la energía específica de deformación plástica (el área restante hasta límite de rotura). Los resultados se pueden apreciar en la Tabla 5.

		S355		DOCOL1000 LCEZE		DOCOL1400 MZE		DOCOL1800 BOR	
		Deformación unitaria	Tensión (Mpa)	Deformación unitaria	Tensión (Mpa)	Deformación unitaria	Tensión (Mpa)	Deformación unitaria	Tensión (Mpa)
Límite elástico		0,0017	355	0,0038	800	0,0055	1150	0,0074	1560
Límite de rotura		0,2217	550	0,0838	1090	0,0355	1500	0,0674	1800
Energías específicas en tanto por 1 respecto al acero S355	De deformación elástica	1,00		5,08		10,49		19,31	
	De deformación plástica	1,00		0,76		0,40		1,01	
	Energía total de deformación	1,00		0,77		0,43		1,07	

Tabla 5. Características expandidas de los aceros utilizados

Se observa que existen unas diferencias muy grandes entre las energías específicas de deformación entre los diferentes aceros. Los de alta resistencia tienen unas energías de deformación elástica mucho mayores que el acero convencional. Sin embargo, sólo el DOCOL1800 BOR, tiene una energía de deformación total ligeramente mayor, y el DOCOL1400 MZE tiene tan sólo un 43% de la del S355. Esto se explica por la poca deformación en el punto de rotura de los aceros de alta resistencia, que en el caso del DOCOL1800 BOR se ve compensado por la altísima tensión de rotura.

6.3. CONFIGURACIONES ENSAYADAS

Para comprobar los efectos que tiene la sustitución de acero convencional por aceros de alta resistencia en el ensayo de choque frontal, se han realizado diferentes configuraciones en las que se modifican los materiales de partes clave en el vehículo, sustituyendo el acero convencional por los 3 tipos de acero de alta descritos en el apartado anterior.

6.3.1. ZONAS EN LAS QUE SE SUSTITUYE EL ACERO S355 POR ACEROS DE ALTA RESISTENCIA

Las principales áreas escogidas en las que se modificarán los aceros sucesivamente y por separado son las siguientes:

- Largueros frontales
- Pilar A
- Suelo
- Pared cortafuegos
- Todos los anteriores juntos

Los largueros frontales son unas de las piezas que más energía han de absorber en un impacto frontal. Estos están soldados al hueco de la rueda, y se ha de realizar ensayos tanto de los largueros por separado, como de estos junto con los huecos de rueda, ya que actúan de manera conjunta.

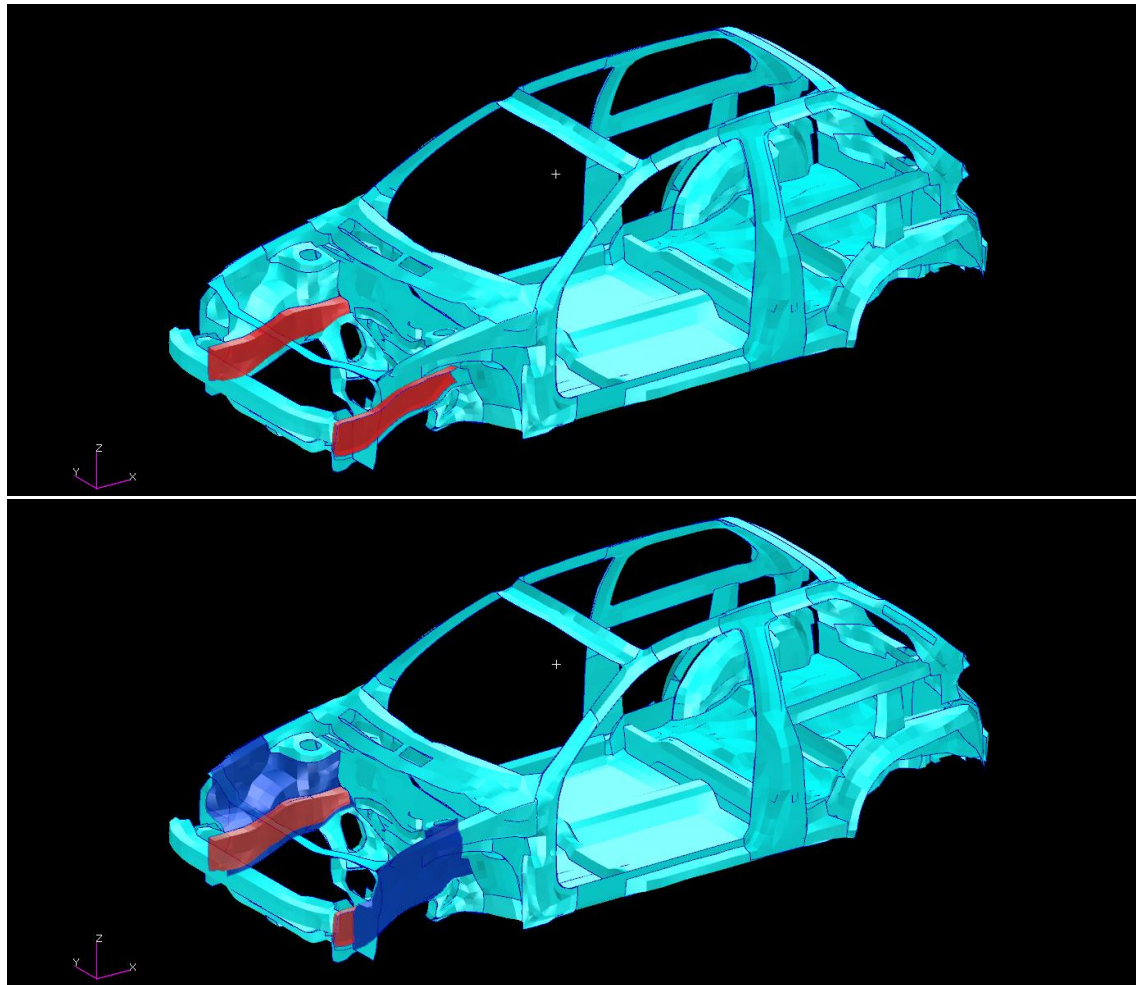


Figura 47. Largueros y largueros junto con huecos de rueda

Por otro lado, se ha modificado el acero de los diferentes componentes del Pilar A. Son varias piezas unidas entre sí, y se podría considerar también como parte del conjunto la plancha lateral exterior, pero al tener un tamaño muy grande supondría una inversión mucho mayor su sustitución por aceros de alta resistencia.

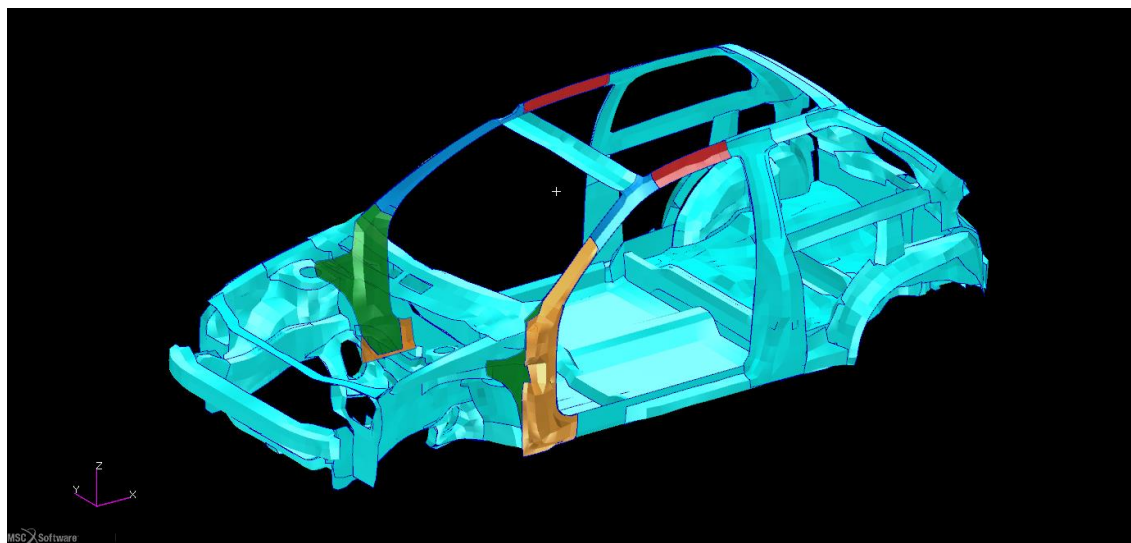


Figura 48. Pilar A

También se han considerado el suelo y los largueros de refuerzo inferiores. Estos componentes son muy importantes en el comportamiento frente a choque frontal del vehículo. No existe una talonera a lo largo de todo el lateral inferior del vehículo, a parte de la que forma el reborde del suelo, y la contribución del lateral exterior. Como se verá, es la modificación que más influencia tiene en los resultados.

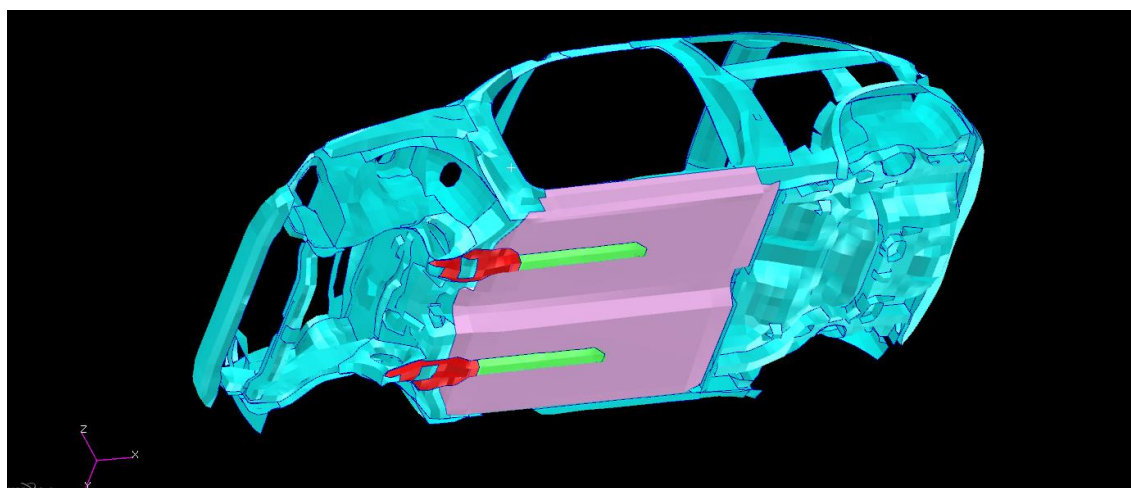


Figura 49. Suelo y largueros inferiores

Por último, se ha modificado el *firewall*, la pared cortafuegos que separa el vano motor del interior del vehículo. Es la superficie sobre la que se medirán las intrusiones en el vehículo, por lo que los resultados de intrusión pueden mejorar significativamente, pero se tendrán que tomar con prudencia.

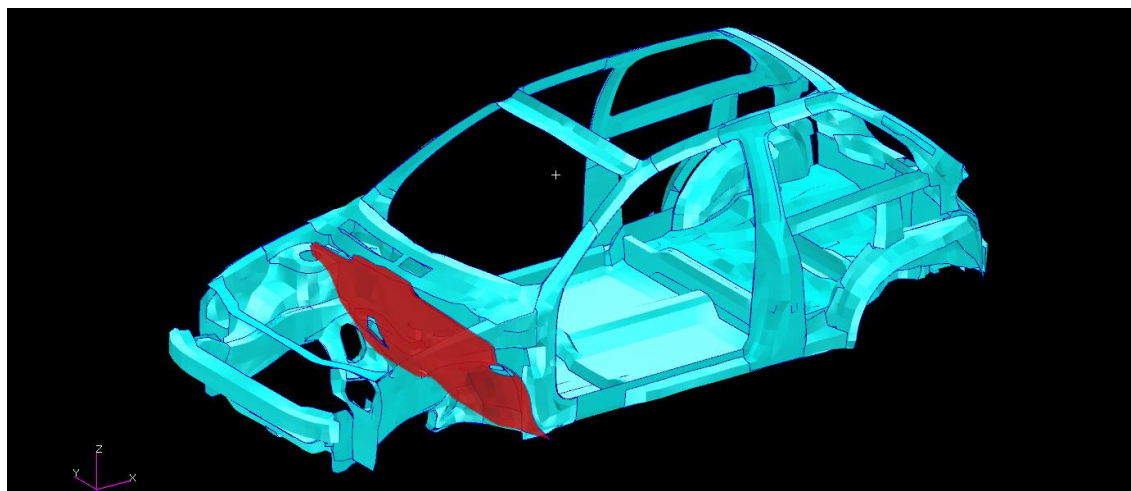


Figura 50. Firewall

En la Figura 51 se pueden observar claramente todas las piezas que se han modificado en las diferentes configuraciones.

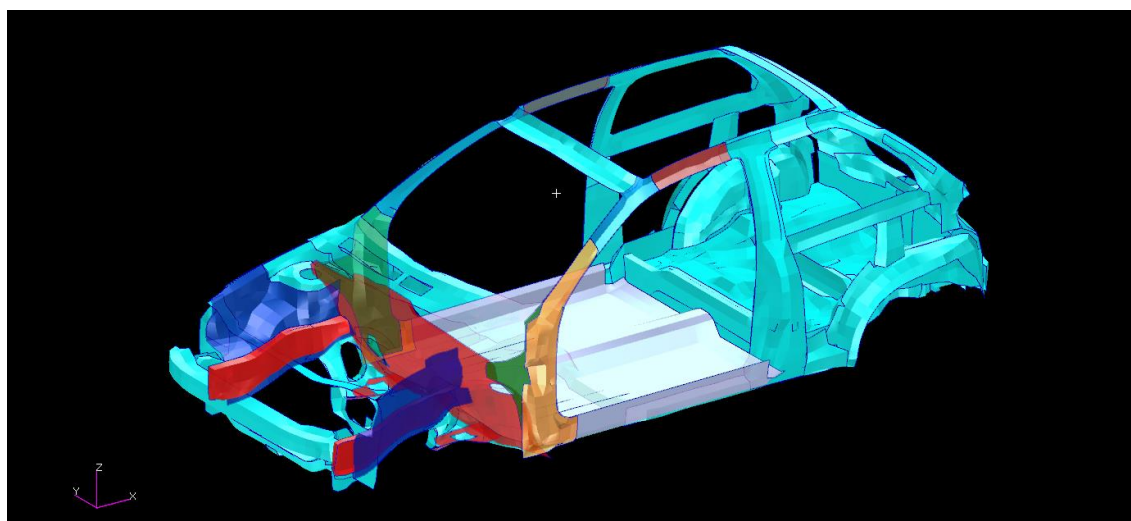


Figura 51. Todos los elementos en los que se utilizarán los diferentes aceros de alta resistencia

En el Anexo 5 se indica con mayor detalle cuáles son todos los componentes en los que se modifica el tipo acero según la zona que se está ensayando.

6.4. MEDIDAS DURANTE LAS SIMULACIONES

La magnitud de los efectos obtenidos en cada configuración y con cada acero se evaluará mediante tres tipos de medidas. Estos son aceleración, desplazamientos y evaluación visual.

6.4.1. ACELERACIÓN

Para evaluar de manera aproximada la aceleración sufrida por los ocupantes durante el choque, se tomarán los datos de aceleración longitudinal medidos en el anclaje posterior del asiento del piloto, mostrado en la Figura 52.

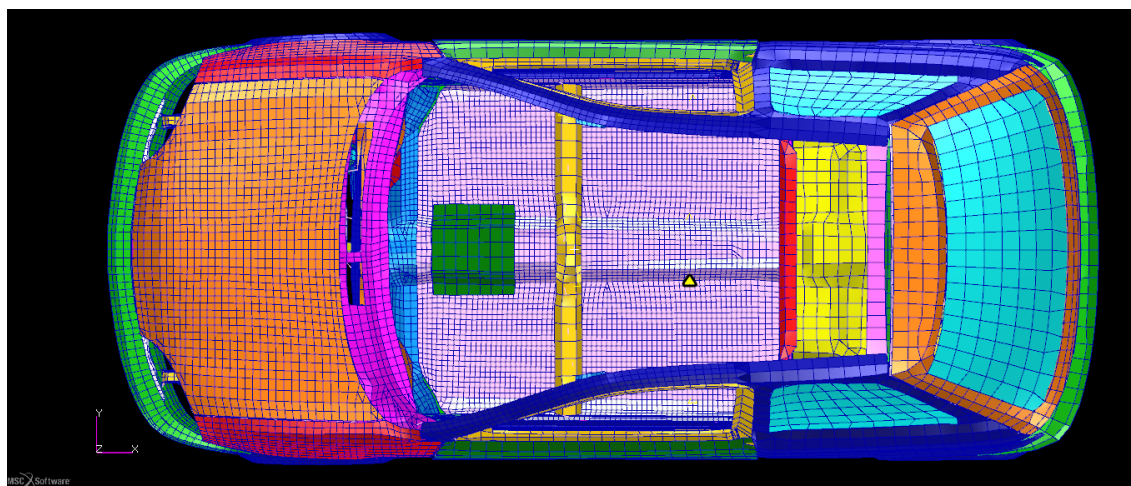


Figura 52. Nudo utilizado para medir las aceleraciones

Las aceleraciones obtenidas directamente de la simulación de Abaqus presentan muchos picos y variaciones, algo que es normal en las simulaciones mediante elementos finitos, por lo cual es necesario aplicarle un filtro que las nivele. Este procedimiento se realizó de dos maneras diferentes, y los resultados se pueden observar en la Figura 53.

Por un lado, se aplicó el filtro *Smooth2* directamente en Abaqus. Este toma la media entre un rango de mediciones, dando una lectura con menor variación de la aceleración.

El siguiente proceso aplicado a las aceleraciones es un cálculo basado al que se utiliza en el HIC⁵ (*Head Injury Criterion*). En el cálculo del HIC se suele tomar un periodo de 15ms [20], así que al tomar las mediciones cada 2ms tomaremos un periodo de 16ms. Esto quiere decir que en cada punto de medición se dará la media de la aceleración durante los 16ms anteriores, suavizando la forma de la curva de aceleración y dando una buena medida para un entorno real, en el que las aceleraciones puntuales son absorbidas por los diferentes componentes y el conductor recibe una aceleración más continua.

$$\bar{a} = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt$$

Ecuación 1. Aceleración media en el periodo de tiempo t_1 a t_2

⁵ El HIC (*Head Injury Criterion*) es un criterio basado en datos experimentales de la severidad de una aceleración sufrida en la cabeza. Se hace un cálculo por cada instante de medición de la aceleración media sufrida en un periodo determinado, generalmente los últimos 15ms, y se aplica un coeficiente experimental para obtener un número indicativo de la severidad de las lesiones producidas. Por ejemplo, un HIC-15 de 700, utilizado como límite en algunos ensayos, implica un 5% de probabilidad de lesión grave.

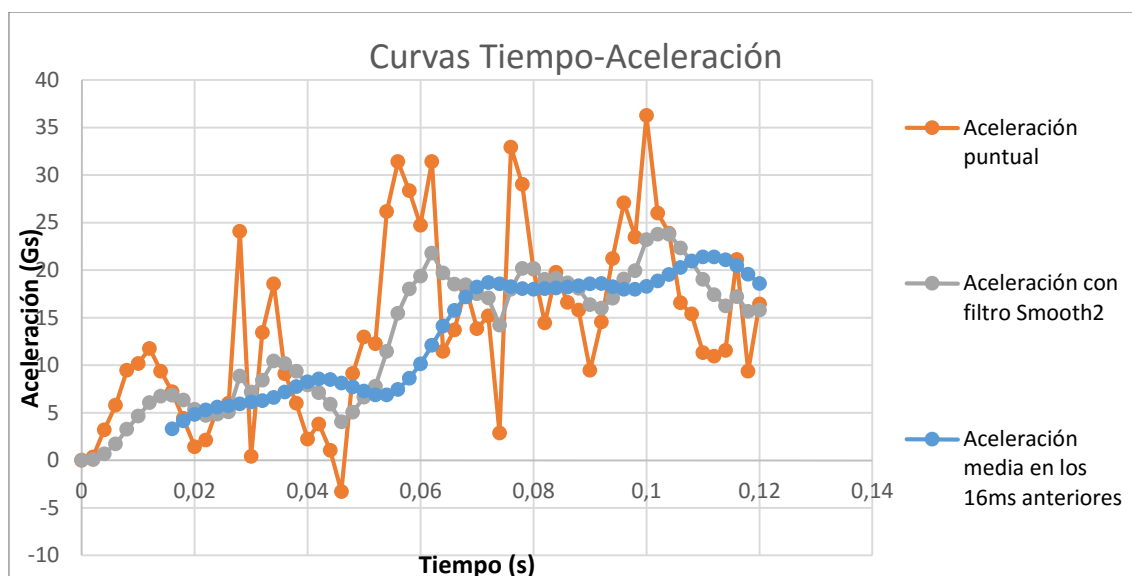


Figura 53. Curvas de aceleración después de aplicarles el filtro Smooth2 y de calcular la media en los 16 últimos milisegundos

Tanto el filtro *Smooth2* como el cálculo de la media de aceleración en un periodo determinado de tiempo dan unos resultados similares, siendo el último aún más nivelado. Será este último el que se use para analizar los resultados de los ensayos.

6.4.2. INTRUSIÓN EN EL HABITÁCULO

Para medir la deformación del espacio de supervivencia se calculará la intrusión en el habitáculo en dos de los puntos más afectados en el ensayo de choque realizado. Estos puntos son nodos del *firewall* a la altura del volante y de los pies del conductor. Se comprueba experimentalmente que con las configuraciones en las que hay una excesiva deformación del Pilar A y/o del suelo del vehículo, y en las que se reduce el espacio de supervivencia, estos dos nodos seleccionados penetran más en habitáculo.

Para realizar la medida del desplazamiento de estos dos puntos se tomó una línea de referencia formada por dos puntos del suelo del vehículo a la altura del Pilar B, zona que sufrirá poca deformación y será por tanto una base estable respecto a la cual medir el desplazamiento que nos interesa.

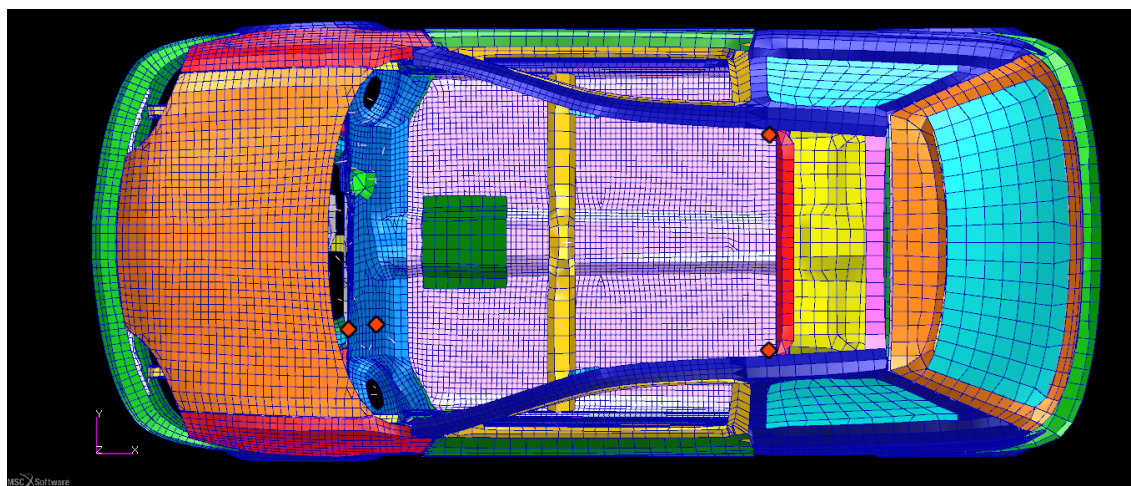


Figura 54. Nodos utilizados para medir la intrusión en el habitáculo

Se mide la variación en la distancia desde cada uno de los puntos estudiados, el de los pies y el del volante, hasta la línea de referencia en ángulo recto. Esta variación nos dará el nivel de intrusión en el vehículo.

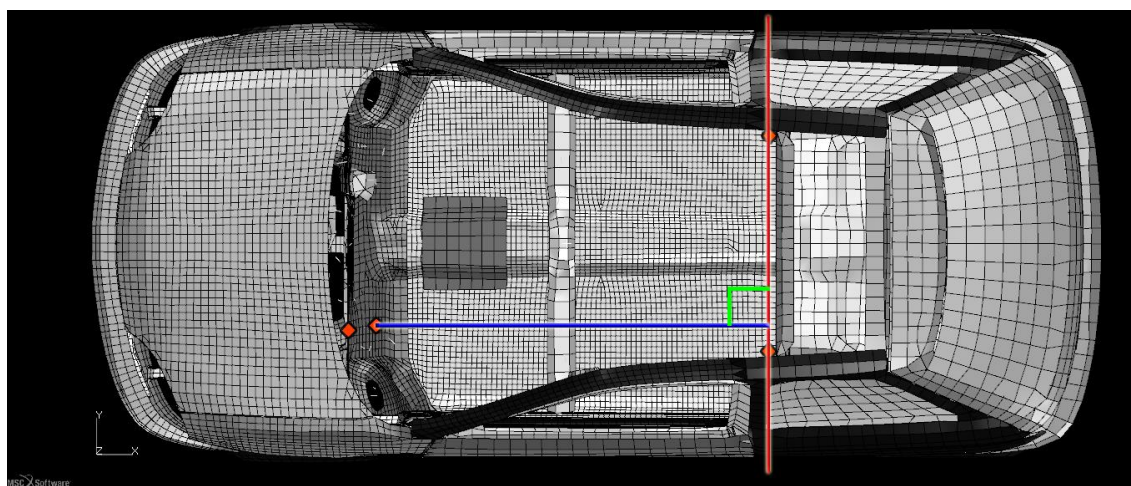


Figura 55. En rojo línea auxiliar tomada como referencia. En azul distancia perpendicular hasta la línea de referencia

Se podría tomar un tiempo aproximado en el que se supone que la deformación será máxima, pero se decidió llevar a cabo un cálculo en todos los momentos medidos y tomar posteriormente el nivel máximo de intrusión. Después de haber hecho los cálculos, se comprobó que merecían la pena los extensos cálculos realizados ya que, dependiendo de la configuración de componentes modificados con distintos aceros, existía gran variabilidad en el momento de máxima deformación. Este instante se encuentra entre 94ms y 104ms después del comienzo del choque, habiendo una diferencia de hasta casi 2cm en las mediciones si se hubieran utilizado los valores extremos. Es decir, se podría haber llegado una variación de en torno a un 20% de los valores registrados de intrusión.

6.5. MEDIDA DE LAS ENERGÍAS DURANTE EL ENSAYO

La Figura 56 representa la variación en los diferentes tipos de energía durante el ensayo de choque con barrera deformable para la configuración inicial con acero convencional.

Se puede observar cómo a medida que disminuye la energía cinética del vehículo (ALLKE), van aumentando el resto de energías, hasta que se llega al punto de mínima energía cinética, en el que se ha llegado a la máxima deformación y el vehículo ha perdido toda la velocidad en el sentido inicial. Se observa cómo a partir de ese momento se recupera cierta energía de deformación elástica (ALLSE) y se mantienen casi constante la energía de deformación plástica (ALLPD).

Por otro lado, la energía artificial de deformación (ALLAE) se mantiene en unos niveles razonables durante todo el ensayo. También se puede observar que la energía cinética inicial es mucho mayor que la energía interna total (ALLIE) final. Esta diferencia es la energía absorbida por la barrera deformable, ya que la energía total (ETOTAL) debe mantenerse constante. Por tanto, debe mantenerse constante la relación $ETOTAL = ALLIE + ALLKE + ALLVD$ (energía de deformación viscosa) – ALLWK (trabajo externo).

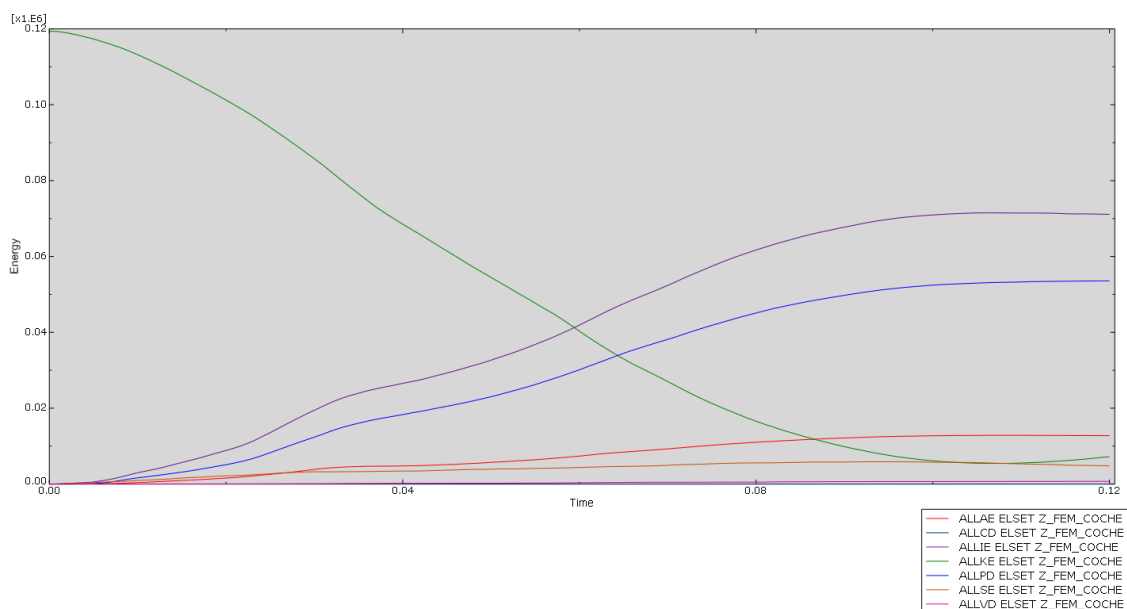


Figura 56. Medida de las energías en el modelo de vehículo durante el ensayo con aceros convencionales

7. RESULTADOS

Para los ensayos base se han calculado en total 6 configuraciones distintas, cada una de ellas con los 3 aceros de alta resistencia diferentes. Además, se tienen los ensayos con el acero convencional, tanto con la barrera deformable como con la fija, así como con la configuración optimizada a partir de los ensayos anteriores.

Cada uno de estos ensayos requirió un tiempo de simulación de más de 4 horas, además del tiempo dedicado al procesamiento de los resultados, por lo que el total de tiempo de cálculo es bastante elevado, pero a la vista de lo obtenido finalmente se considera bien empleado.

Los datos necesarios de aceleraciones y desplazamientos fueron extraídos de los archivos de resultados creados por Abaqus para ser analizados, y se trataron mediante una extensa hoja de cálculo para hallar las medidas explicadas en el apartado 6.4. Posteriormente se resumieron todas las medidas en la *Tabla 6*, y se ilustraron los resultados con un gradiente de color para facilitar su análisis, los más desfavorables se colorean con rojo y los más favorables, con verde.

		Desplazamiento (cm)		Aceleración media en 16ms (G)
		Zona volante	Zona pies	
Todo S355		15,70	25,75	21,40
Largueros	DOCOL1000	17,04	24,99	22,20
	DOCOL1400	15,56	21,26	23,47
	DOCOL1800	18,78	22,43	21,20
Largueros y arco rueda	DOCOL1000	20,29	25,14	21,43
	DOCOL1400	16,20	22,38	20,99
	DOCOL1800	20,59	22,89	21,22
Pilar A	DOCOL1000	15,99	25,93	20,29
	DOCOL1400	13,83	24,31	20,60
	DOCOL1800	8,76	18,60	24,23
Suelo y largueros inferiores	DOCOL1000	10,61	17,95	30,98
	DOCOL1400	11,47	18,78	27,26
	DOCOL1800	10,23	16,70	26,56
Firewall	DOCOL1000	16,16	22,64	21,86
	DOCOL1400	15,88	24,99	19,87
	DOCOL1800	16,37	24,16	22,57
Todos	DOCOL1000	17,91	16,02	24,63
	DOCOL1400	13,13	16,02	26,15
	DOCOL1800	16,10	12,10	32,78
Configuración optimizada		12,12	11,90	26,88

Tabla 6. Resultados finales de las simulaciones para el ensayo de barrera deformable con offset

Se pueden sacar diversas conclusiones de los resultados obtenidos para cada configuración. Su estudio es complicado ya que cada componente forma parte de un conjunto

más grande, y su modificación puede afectar negativamente otros componentes, dificultando obtener conclusiones claras sin un estudio en mayor profundidad.

Por un lado, se puede apreciar que, en la zona de deformación programada, los largueros y el hueco de rueda, no se obtienen ventajas significativas con el uso de aceros de muy alta resistencia. Contrariamente a lo que se esperaba, el DOCOL1400, con su baja energía de deformación, obtiene mejores resultados que el DOCOL1800. Esto puede deberse a que este último sea demasiado resistente y provoque deformaciones excesivas en otros componentes.

En los ensayos modificando el acero usado en el Pilar A se puede observar claramente el compromiso entre conseguir un chasis más rígido y las mayores aceleraciones que ello supondrá. Con el DOCOL1800 se obtienen unas intrusiones mucho menores que con los otros aceros, ya que el Pilar A mantiene más constante su forma, conservando mejor el espacio en el habitáculo, tal como se puede observar en la Figura 57.

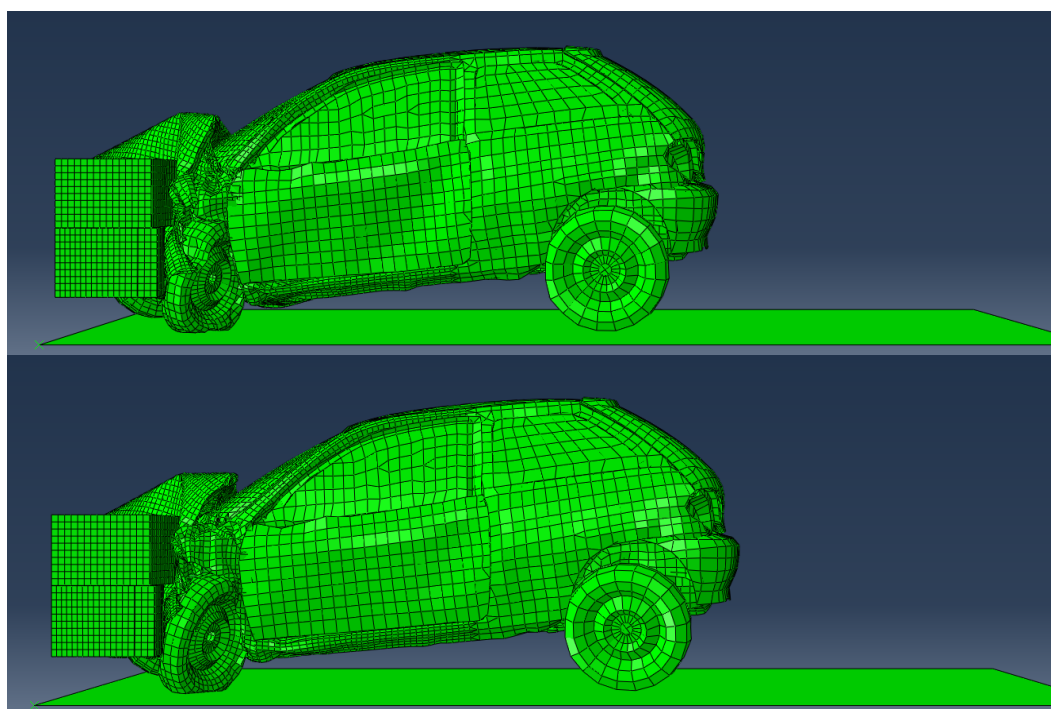


Figura 57. Imagen superior ensayo con acero S355, imagen inferior acero DOCOL1800 en el Pilar A

En la zona del suelo, el uso de aceros de alta resistencia tiene un efecto similar al observado en el Pilar A. Al aumentar la resistencia del suelo, el habitáculo mantiene mejor su integridad, observándose menor intrusión en el habitáculo con todos los aceros de alta resistencia que con el acero S355, tanto en la zona de los pies del conductor como en la del volante.

A pesar de ser la superficie donde se mide la intrusión, no se aprecian mejoras muy significativas al aplicar aceros de alta resistencia en el *firewall*. La explicación puede ser que se trata de una plancha que, por su geometría y puntos de unión, tiene poco momento de inercia. Si se desplazan sus extremos se desplazará toda ella, y el efecto de usar aceros de alta resistencia no es determinante. Es similar a si se sustituye acero convencional por un acero de alta resistencia en una plancha o en una viga. En la viga se notará mayor beneficio, ya que en

las almas se concentran mayores esfuerzos, que los aceros de mayor resistencia podrán soportar mejor.

7.1. CONFIGURACIÓN OPTIMIZADA

Finalmente, se creó una nueva configuración, la denominada configuración optimizada, utilizando en cada parte del vehículo los aceros que obtuvieron mejores resultados en los ensayos por separado. De esta manera, se tomaron en los largueros y el arco de la rueda el DOCOL1400, con el que se obtienen los menores resultados tanto de desplazamientos como de aceleración. En el Pilar A y la zona del suelo se eligió el DOCOL1800, el cual, aunque eleve un poco las aceleraciones, tiene el mejor comportamiento frente a intrusiones y el mejor compromiso global. Por último, en el *firewall* se utilizó el DOCOL1000, que logra los mejores resultados globalmente, y no se queda atrás en aceleraciones.

El resultado es la configuración con menor desplazamiento en conjunto, tal como se demuestra en la Tabla 6, y aunque la aceleración máxima aumenta, se debe llegar a un equilibrio entre incrementar la rigidez del habitáculo y las aceleraciones que sufrirán los ocupantes.

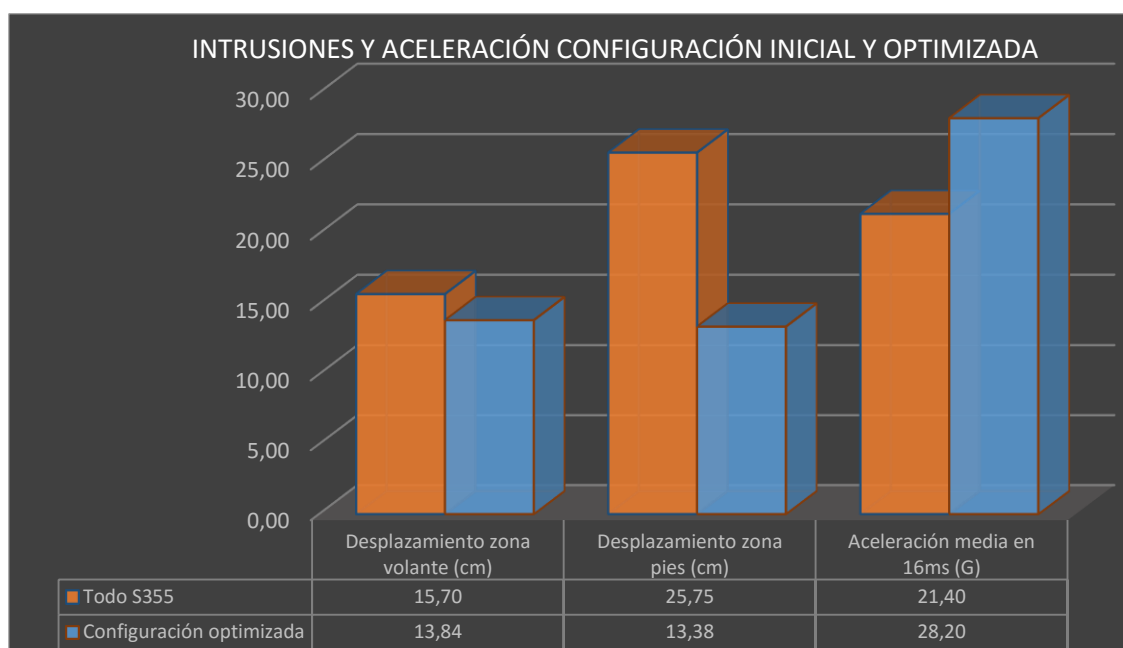


Figura 58. Comparación entre la configuración inicial y la optimizada

Se observa al comparar las curvas de aceleración de la configuración optimizada con la inicial, Figura 59, que la aceleración en los momentos iniciales del choque ha aumentado, lo cual es algo deseado para igualar la aceleración a lo largo de todo el choque y así obtener valores máximos más reducidos. Sin embargo, hay un pico en la aceleración similar al observado en las curvas de aceleración.

El futuro trabajo de optimización se podría seguir en las líneas obtenidas, estudiando más a fondo las relaciones entre los cambios en las diferentes zonas para conseguir un conjunto lo más integrado posible, en el que todos sus componentes trabajen de manera cooperativa. Por supuesto, existen limitaciones en el diseño, ya que además de tener un buen comportamiento en un choque frontal, los vehículos deben estar diseñados para cumplir

muchos otros requisitos, como una rigidez torsional elevada, buen comportamiento en otros tipos de accidentes, tener una buena relación entre el espacio interior y el exterior, y muchas otras consideraciones.

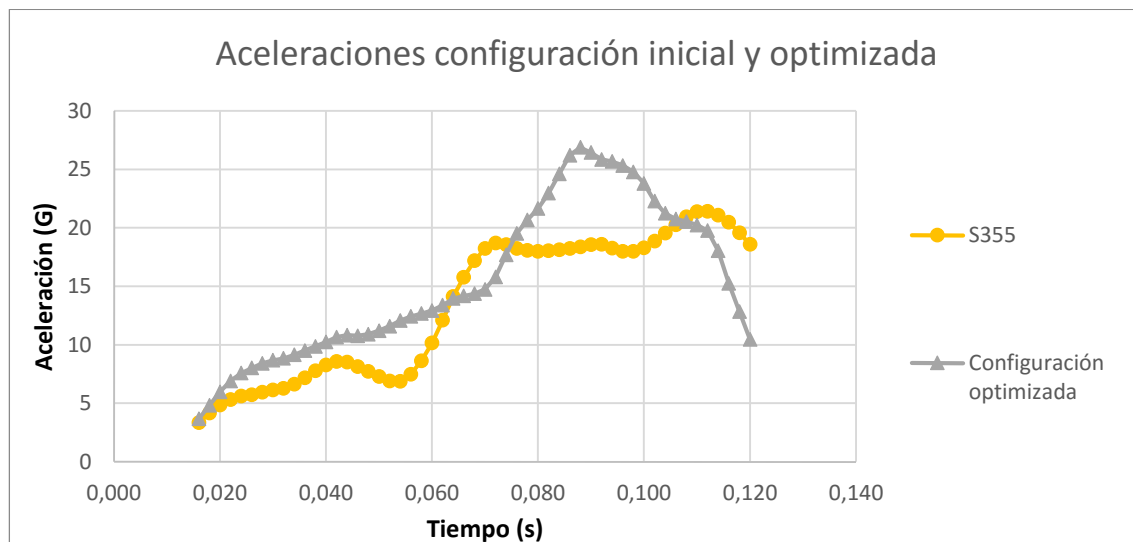


Figura 59. Curvas de aceleración configuración inicial y optimizada

7.2. COMPROBACIÓN EN EL ENSAYO CON BARRERA FIJA

Se repitió el ensayo realizado en el apartado 6.1. *Validación del modelo* con la configuración optimizada para comprobar si existen mejoras también en un ensayo de choque frontal con barrera fija en vez de deformable, y con un solapamiento completo del frontal del vehículo en vez de 40% en el ensayo con barrera deformable.

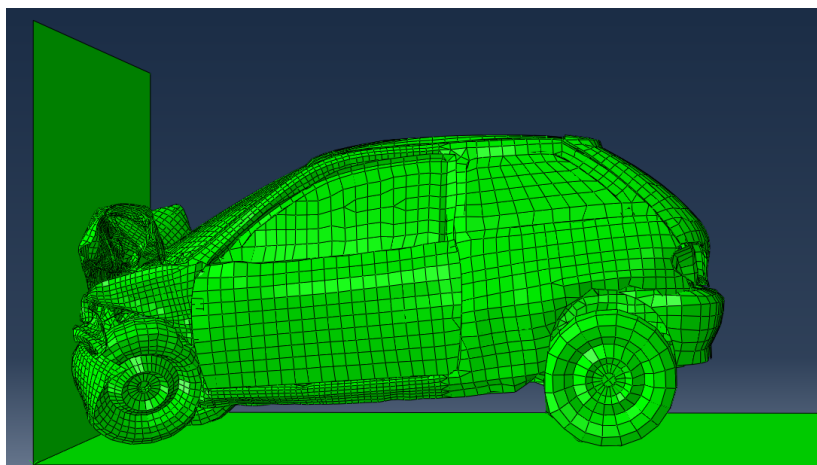


Figura 60. Momento de máxima deformación en el ensayo de barrera fija a 56,16Km/h con la configuración optimizada

Los resultados de la optimización mediante el uso de aceros de alta resistencia son notables. Por un lado, se ha reducido considerablemente la intrusión en el habitáculo. Por otro, se ha incrementado la aceleración. Esto es debido a que el vehículo ha sufrido una rigidización, y no se deforma tanto pero se detiene más bruscamente.

	Desplazamiento (cm)		Aceleración media en 16ms (G)
	Zona volante	Zona pies	
Todo S355	12,64	24,55	29,42
Configuración optimizada	9,47	13,53	44,30

Figura 61. Resultados de intrusión y aceleración en el ensayo de barrera fija

Se puede comprobar cómo la duración del choque es menor en la Figura 62. Aceleraciones medias durante los ensayos de barrera fija Estos resultados significan que el vehículo sería capaz de aguantar choques más severos que con los aceros convencionales, con la desventaja de mayores aceleraciones en choques menos severos. De nuevo se ha de llegar a un compromiso por parte del fabricante.

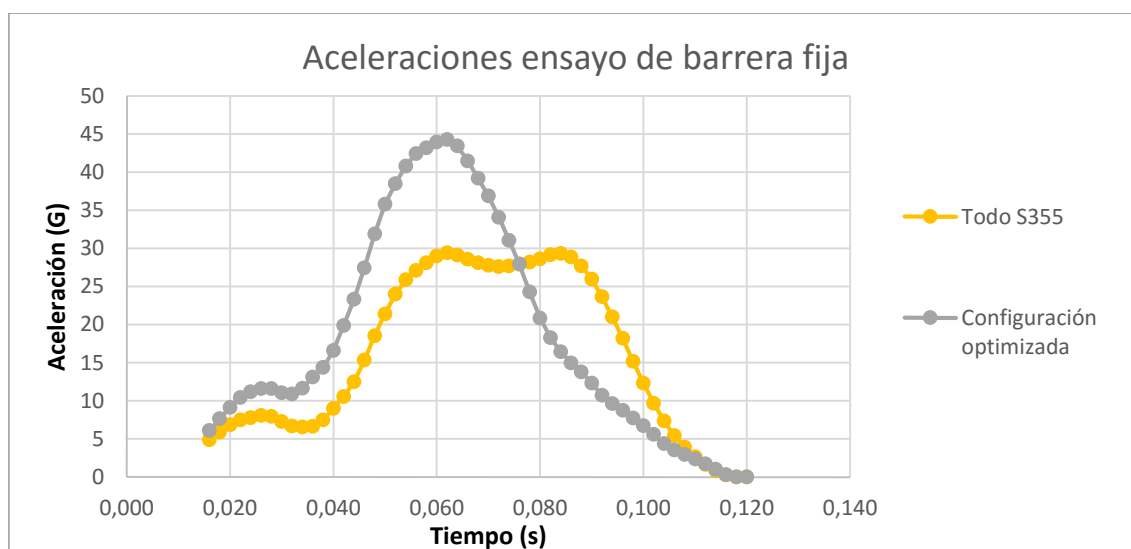


Figura 62. Aceleraciones medias durante los ensayos de barrera fija

8. CONCLUSIONES

Mediante el ensayo sistemático de diferentes configuraciones del vehículo, sustituyendo el acero convencional por diferentes tipos de aceros de alta resistencia en las zonas más importantes en un choque frontal, se han podido observar las ventajas y limitaciones que puede suponer el uso de este tipo de aceros ante choques frontales.

Se ha podido observar con claridad cómo el empleo de acero de alta resistencia puede conducir a un aumento de la resistencia del habitáculo. Su uso en zonas del Pilar A y del suelo y taloneras permite aguantar colisiones con menor deformación de estos elementos y, por tanto, con menor intrusión en el espacio de supervivencia de los ocupantes.

Por otro lado, un aumento en la rigidez del chasis supone que, a igualdad de velocidad de choque, se tendrán unas aceleraciones mayores. Es un problema inevitable si no se realizan más cambios, y para disminuirlo se deben modificar las zonas de deformación programada. El fabricante debe evaluar cuál es el compromiso que desea alcanzar y actuar en consecuencia.

Es importante también el hecho de que los componentes de un automóvil deben trabajar de forma conjunta. Sustituir el material de una pieza por un acero de ultra-alta resistencia, dejando todas las demás piezas inalteradas, puede conllevar a que se trasladen mayores esfuerzos al resto de las piezas y a resultados no deseados. Por ello se debe realizar un diseño cuidadoso, teniendo en cuenta todas las implicancias que conllevan las modificaciones de cada elemento.

Cabe recalcar que las mejoras obtenidas en el comportamiento frente a choque al utilizar un acero de alta resistencia en vez de uno convencional no suponen un incremento de peso, ya que ambos tipos de acero tienen la misma densidad. Alternativamente, se pueden conseguir unas prestaciones similares a las que se obtendrían con acero convencional disminuyendo el peso, según se busque en el diseño.

El Módulo de Young de los aceros de alta resistencia es el mismo que el de los aceros convencionales, por lo que si simplemente se sustituye uno por otro sin modificar el diseño no se obtendrán ventajas en cuanto a rigidez trabajando en zona elástica, aunque también se podrán soportar mayores esfuerzos antes de superar el límite elástico. Un rediseño de los componentes que aproveche el mayor límite elástico de los aceros de alta resistencia, por ejemplo utilizando secciones de vigas mayores que incrementen su momento de inercia, puede conllevar un incremento de la rigidez de los componentes, que puede aprovecharse para disminuir la masa del vehículo u obtener un chasis más rígido.

Hay otro tipo de consideraciones, como el coste de fabricación y de los materiales, o los posibles cambios en los procesos productivos, que pueden limitar la aplicación de aceros de alta resistencia, y que no se han estudiado en el presente proyecto. Sin embargo, el uso cada vez más extendido de este tipo de aceros en la industria del automóvil indica que con un buen diseño, las ventajas superan a los inconvenientes en determinadas aplicaciones.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Organización Mundial de la Salud, «Informe Sobre la Situación Mundial de la
1] Seguridad Vial 2015».
- National Highway Traffic Safety Administration , «Docket No. NHTSA–2006-
2] 25801,» 2006.
- J. Á. López Campos, A. Segade Robleda, J. A. Vilán Vilán, P. J. García Nieto y J.
3] Blanco Cordero, «Study of a Steel's Energy Absorption System for Heavy Quadricycles and
Nonlinear Explicit Dynamic Analysis of its Behavior under Impact by FEM,» *Materials*, pp.
6893-6908, 2015.
- BMW, 2013. [En línea]. Available:
4] <http://www.bmw.es/home/vehiculos/BMWi/i3/2013/seguridad.html#carbon>.
- «<http://www.mbusa.com/>,» Mercedes-Benz. [En línea]. [Último acceso: 2015].
5]
- GLOBAL NCAP, «Global policy update: Road map for safer vehicles,»
6] *Democratising car safety*, Noviembre 2015.
- L. Castejón, *Comportamiento de vehículos frente a choque*.
7]
- DGT, «Anuario Estadístico de Accidentes,» 2013.
8]
- Sociedad de Tecnicos de Automocion (STA), *El Vehículo Eléctrico. Desafíos
9] tecnológicos, infraestructuras y oportunidades de negocio*, Libbooks, - Business &
Economics , 2011.
- DIRECTIVA 96/79/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO*, 16 de
10] diciembre de 1996.
- NHTSA, «FMVSS No. 214, DYNAMIC SIDE IMPACT PROTECTION -Moving
11] Deformable Barrier Test Requirements Using Advanced Test Dummies,» Washington, DC,
2012.
- S. Kojima, T. Yasuki y K. Oono , «Application of Shell Honeycomb Model to IIHS
12] MDB Model,» de *6th European LS-DYNA Users' Conference*, Gotemburgo, 2007.
- M. E. Botkin, Y. Guo, H.-P. Wang y W. Cheng-Tang, «A coupled meshfree/finite
13] element method for automotive crashworthiness simulations,» *International Journal of
Impact Engineering*, vol. 36, nº 10-11, p. 1210–1222, Noviembre 2009.
- «<http://www.ulrich.com.au/rolled/rpmech8.php>,» Sheet and Plate: Alloy 5052 to
14] 5251. [En línea].

NCAC, «<http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>,» [En línea].

15]

J. Segura, «Master Optimización del pilar B de un automóvil en base a la directiva

16] 96/27/CE,» 2014.

«<http://www.humaneticsatd.com>,» HUMANETICS. Fabricantes Dummies Hybrid

17] III. [En línea].

«<http://www.nhtsa.gov/Research/Databases+and+Software>,» NHTSA. [En línea].

18] [Último acceso: 2016].

«<http://www.ssab.com/>,» SSAB, 2016. [En línea].

19]

B. G. McHenry, «Head Injury Criterion and the ATB,» McHenry Software, Inc..

20]

10. AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer la ayuda prestada por David Valladares durante la realización del presente proyecto, resolviendo todas las dudas acerca de unos programas que eran totalmente nuevos para mí.

También me gustaría agradecer a Luis Castejón, tutor del proyecto, por su experiencia y asesoría, y por la oportunidad de desarrollar mi Proyecto de Fin de Carrera con un tema tan interesante para mí y mi desarrollo profesional.

A los integrantes del Departamento de Transportes por hacer del departamento el lugar perfecto para realizar este trabajo.

Por último, a mi familia, especialmente a mi novia, por todo su apoyo, ayuda y paciencia durante el desarrollo del presente proyecto.

11. ANEXOS

ANEXO 1. ANUARIO ESTADÍSTICO DE ACCIDENTES 2013, DGT

La siguiente tabla se formó a partir de los datos del Anuario Estadístico de Accidentes 2013, DGT. Tabla 66.- Accidentes con víctimas, en función del tipo de accidente. [8]

TIPO DE ACCIDENTE	TOTAL GENERAL				
	Accidentes con víctimas				
	Total	Mortales	Muertos	Heridos graves	Heridos leves
COLISIÓN DE VEHÍCULOS EN MARCHA					
Frontal	2.661	170	222	787	4.050
Fronto-lateral	18.094	158	209	1.817	24.311
Lateral	6.908	32	37	499	8.578
Por alcance	16.790	81	109	850	25.008
Múltiple o en caravana	4.827	37	44	331	9.554
COLISIÓN VEHÍCULO-OBSTÁCULO EN CALZADA					
Vehículo estacionado o averiado	626	16	18	108	722
Valla de defensa	140	10	14	48	134
Barrera de paso a nivel	18	0	0	2	22
Otro objeto o material	1.731	12	15	133	1.989
ATROPELLO DE PERSONAS					
Peatón sosteniendo bicicleta	148	1	1	18	137
Peatón reparando vehículo	32	5	5	6	23
Peatón aislado o grupo	10.835	269	341	1.869	10.038
Conductor de animales	11	2	2	0	9
ATROPELLO DE ANIMALES					
Conducido o en rebaño	15	0	0	2	16
Animales sueltos	562	5	6	35	707
VUELCO EN LA CALZADA	3.334	24	30	434	3.317
SALIDA DE CALZADA (IZDA.)					
Choque con árbol o poste	448	20	23	88	512
Choque con muro o edificio	742	23	30	117	846
Choque con cuneta o bordillo	743	23	24	109	882
Otro tipo de choque	1.505	34	39	135	1.825
Con despeñamiento	191	18	22	53	202
Con vuelco	1.036	44	47	204	1.211

En llano	397	13	17	81	405
Otra salida	199	2	2	18	230
SALIDA DE CALZADA (DCHA.)					
Choque con árbol o poste	789	40	47	175	874
Choque con muro o edificio	819	20	23	137	964
Choque con cuneta o bordillo	1.047	26	29	186	1.227
Otro tipo de choque	2.291	60	80	263	2.692
Con despeñamiento	324	30	37	101	391
Con vuelco	1.904	46	59	328	2.241
En llano	644	22	25	130	677
Otra salida	3.309	3	4	45	4.097
OTRO TIPO DE ACCIDENTE	6.399	102	119	977	6.743
TOTAL	89.519	1.348	1.680	10.086	114.634

Tabla 7. Accidentes con víctimas, en función del tipo de accidente. Fuente: Anuario Estadístico de Accidentes 2013, DGT

ANEXO 2. PRIMERA IMPORTACIÓN MODELO A PATRAN

El modelo de elementos finitos utilizado en el presente proyecto había sido utilizado previamente por otros estudiantes e investigadores del Área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes, tal como se comenta en el apartado 5.1. Algunas de las modificaciones y características del modelo original se comentan en ese apartado y posteriores. A continuación, se describen en más detalle otras características y cambios que se realizaron en el modelo y se detallan en el Trabajo de Fin de *Master Optimización del pilar B de un automóvil en base a la directiva 96/27/CE*.

2.1. ELEMENTOS DEL MODELO ORIGINAL

El modelo importado de LS-Dyna se compone de diversos tipos de elementos. El más extenso y que compone la mayoría del vehículo es el tipo de 2 dimensiones *Shell*. Este es el equivalente a una superficie en elementos finitos. Se trata de una serie de elementos planos de 3 o 4 lados (llamados S3R y S4R respectivamente) que a su vez están delimitados por nodos.

Al compartir nodos con otros elementos *Shell*, se crea una superficie unida. Se pueden tomar estas superficies y otorgarles unas propiedades de material y espesor. De esta forma se imitan piezas formadas por planchas de acero, por ejemplo, o los neumáticos, que tendrán un material con características de goma de neumático.

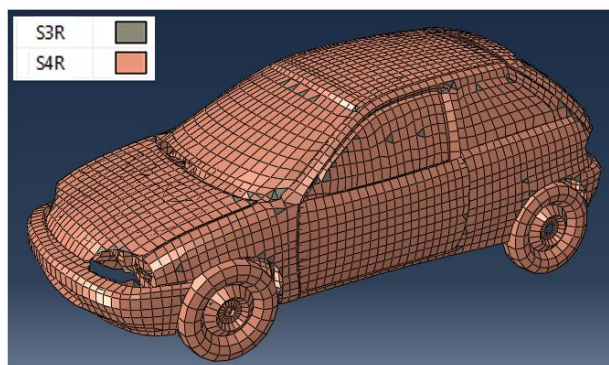


Figura 63. Elementos *Shell* en el modelo inicial [16]

Otro tipo de elemento son los *elementos sólidos*, en este caso elementos en 3 dimensiones. Este tipo de elemento se utiliza para la modelización de los discos y pinzas de freno, bloque motor y el radiador. Son elementos tipo C3D8R, formados por 8 nodos y 6 caras.

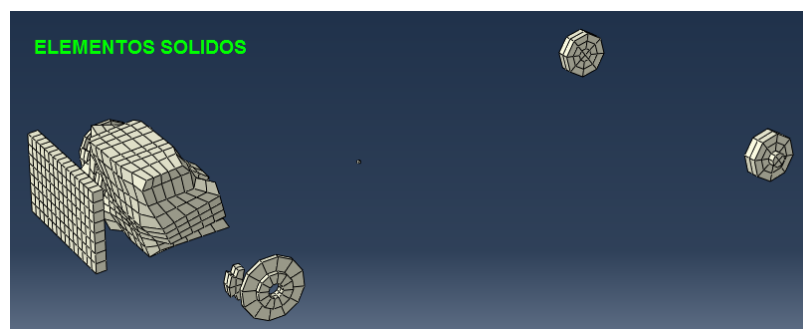


Figura 64. Elementos sólidos en el modelo inicial [16]

Existen también elementos *Beam* o *viga*. El tipo de elemento es B31, el formado únicamente por 2 nodos. Como se puede ver en la Figura 65, durante la importación no se logró un comportamiento adecuado de este tipo de elementos. Se requirió un trabajo de eliminación y modificación de elementos *Beam*.

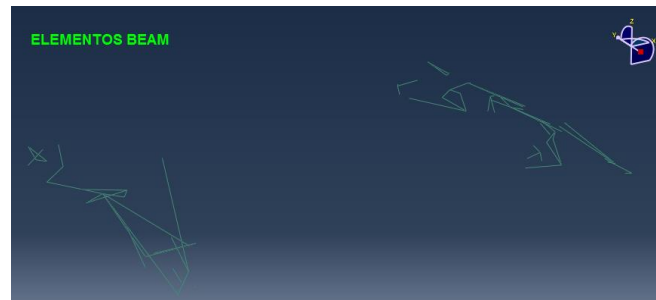


Figura 65. Elementos Beam en el modelo inicial

Existe otro tipo de elementos conectores de 1 dimensión, los *Springa* y *Dashpota*. Estos simulan el comportamiento de los muelles y amortiguadores respectivamente.

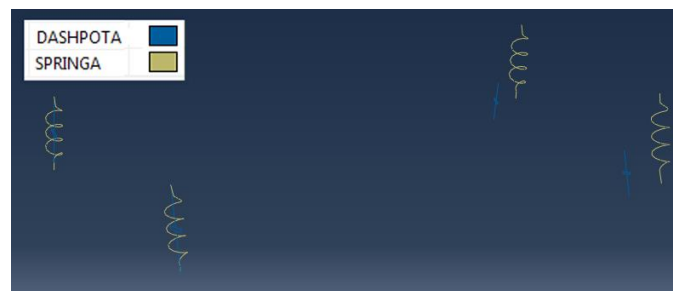


Figura 66. Elementos conectores en el modelo inicial

También existen *elementos masa*, los cuales son adimensionales y tan sólo agregan una propiedad de masa al nodo al que están relacionados.

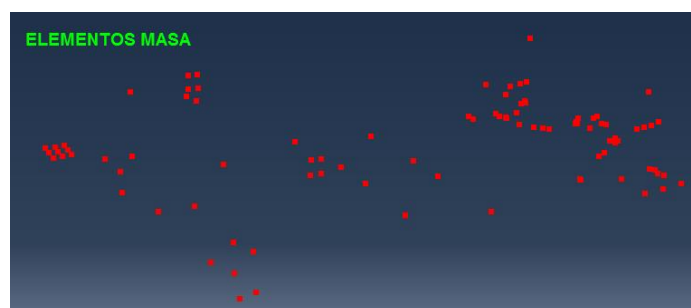


Figura 67. Elementos masa en el modelo inicial

2.2. MODIFICACIONES REALIZADAS POR JESÚS SEGURA

Para recrear las bisagras y el cierre de las puertas, capot y maletero se utilizaron uniones MPC. Estas uniones se crearon en las zonas aproximadas donde irían en la realidad. Para ello, se cogieron varios nodos dependientes del capó y uno independiente de la carrocería. De esta forma el movimiento del capó quedará ligado al de la carrocería. [16]

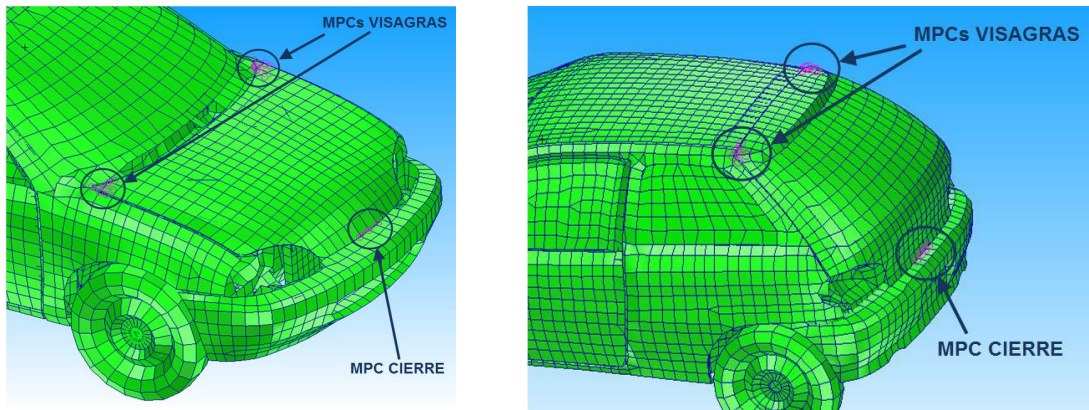


Figura 68. Uniones MPC Beam en el capot y portón del maletero [16]

También se encontró una discrepancia en la geometría de la suspensión trasera que fue solucionada.

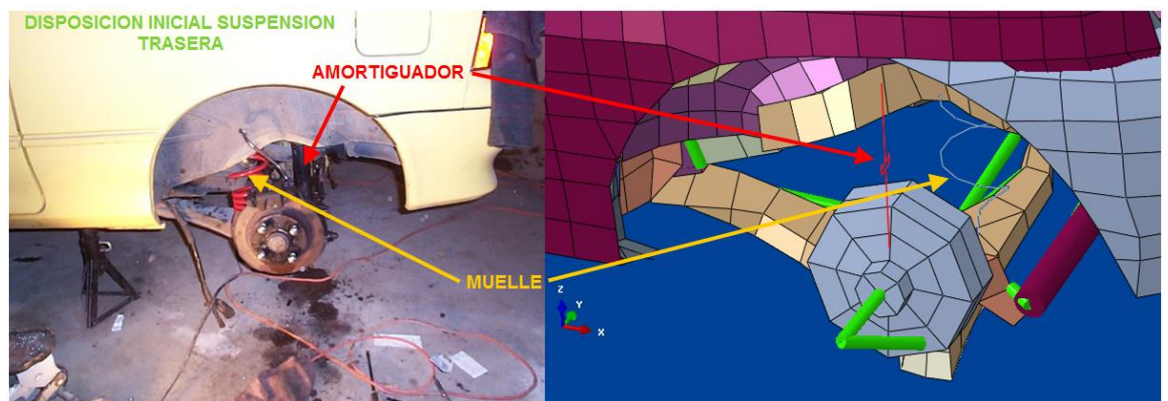


Figura 69. Disposición inicial suspensión trasera [16]

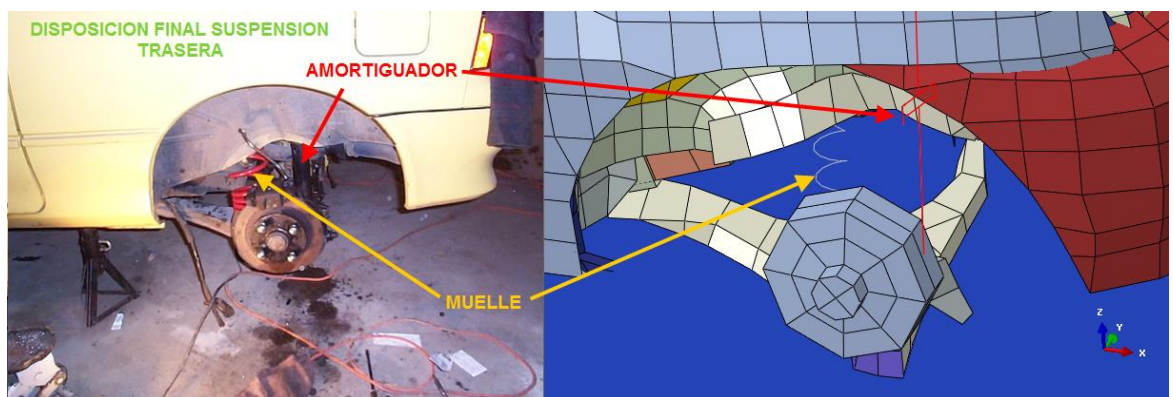


Figura 70. Disposición final suspensión trasera [16]

Se añadieron también uniones MPC para controlar la suspensión delantera.

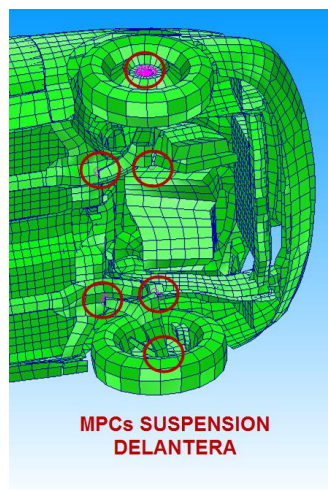


Figura 71. Uniones MPC Beam en la suspensión delantera [16]

En la Figura 72 se puede apreciar el resultado obtenido tras las modificaciones.

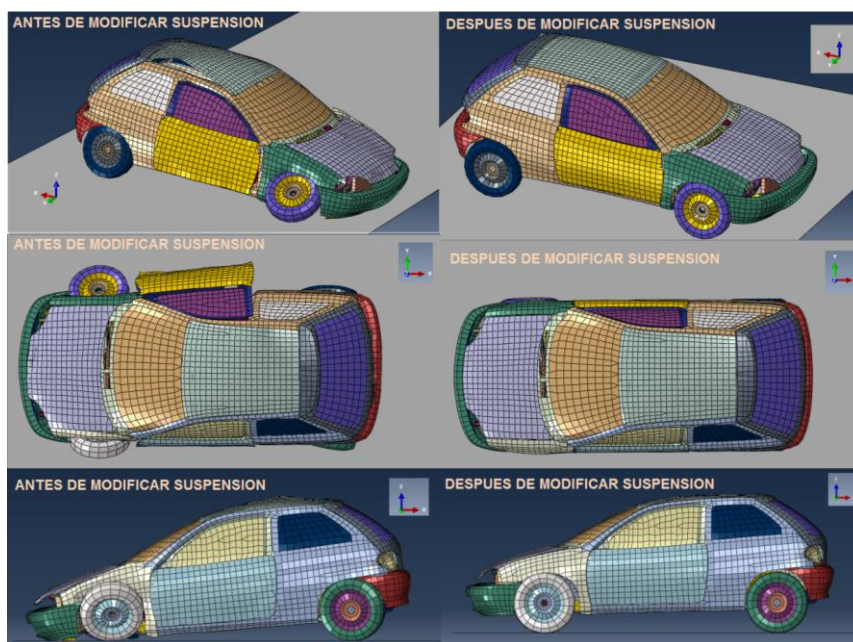


Figura 72. Comprobación de las modificaciones en la suspensión [16]

ANEXO 3. NUEVAS MODIFICACIONES EN LAS UNIONES

A continuación, se muestran composiciones de las uniones ya existentes en el modelo al empezar el trabajo y las creadas durante la realización del mismo, desde diferentes perspectivas para facilitar su visualización.

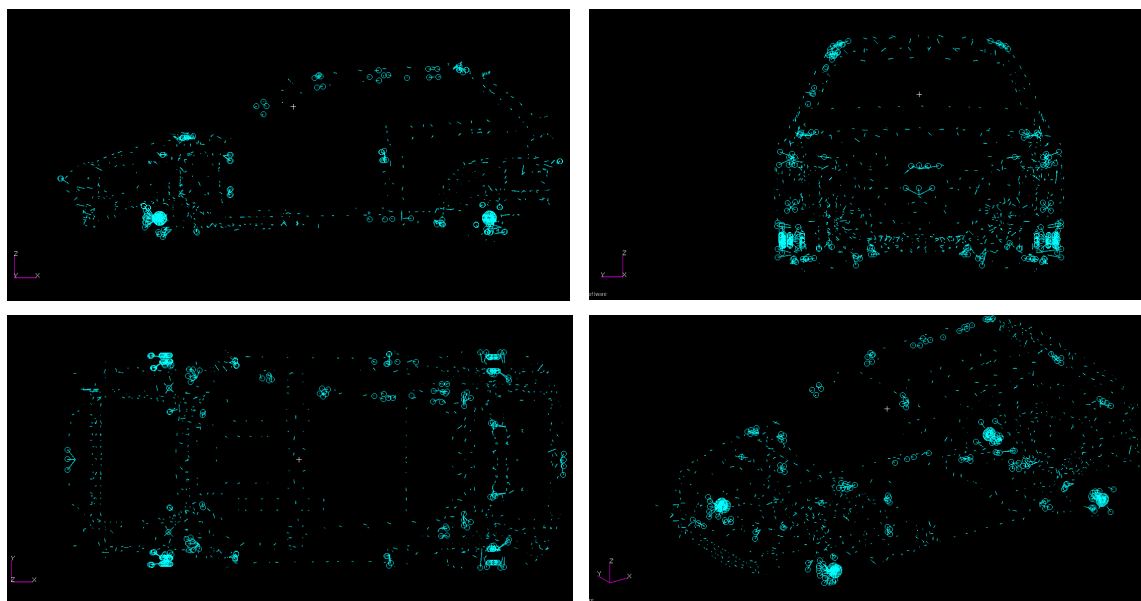


Figura 73. Uniones iniciales. Vistas lateral, frontal, superior y de perspectiva

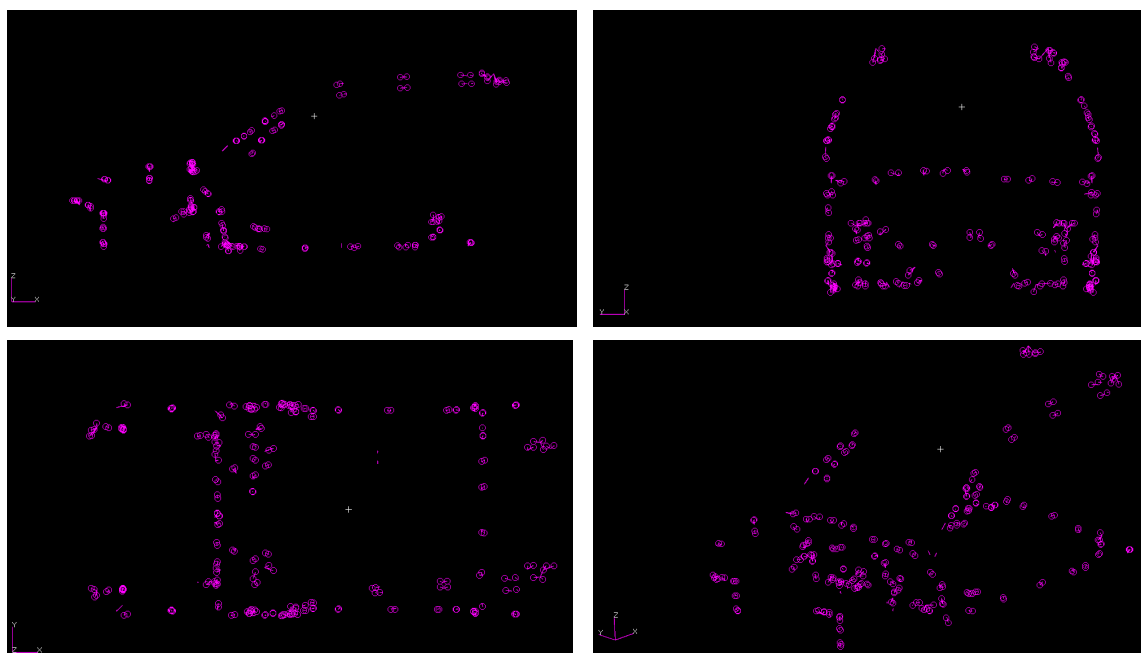


Figura 74. Uniones añadidas a partir de LS-Dyna. Mismas vistas que la figura anterior

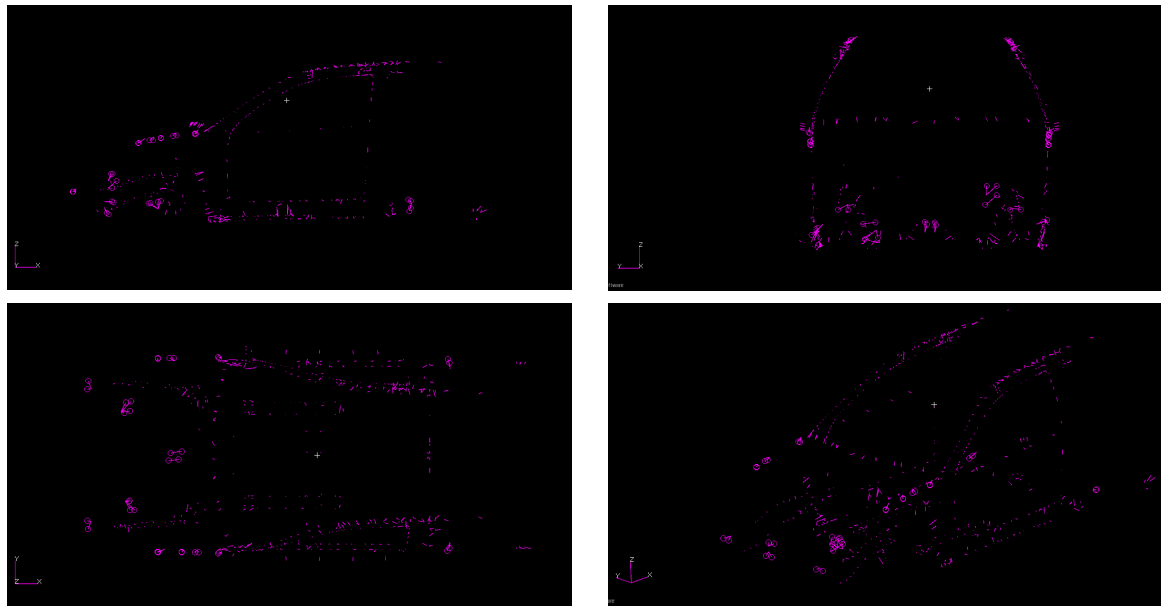


Figura 75. Uniones creadas. Mismas vistas que las figuras anteriores

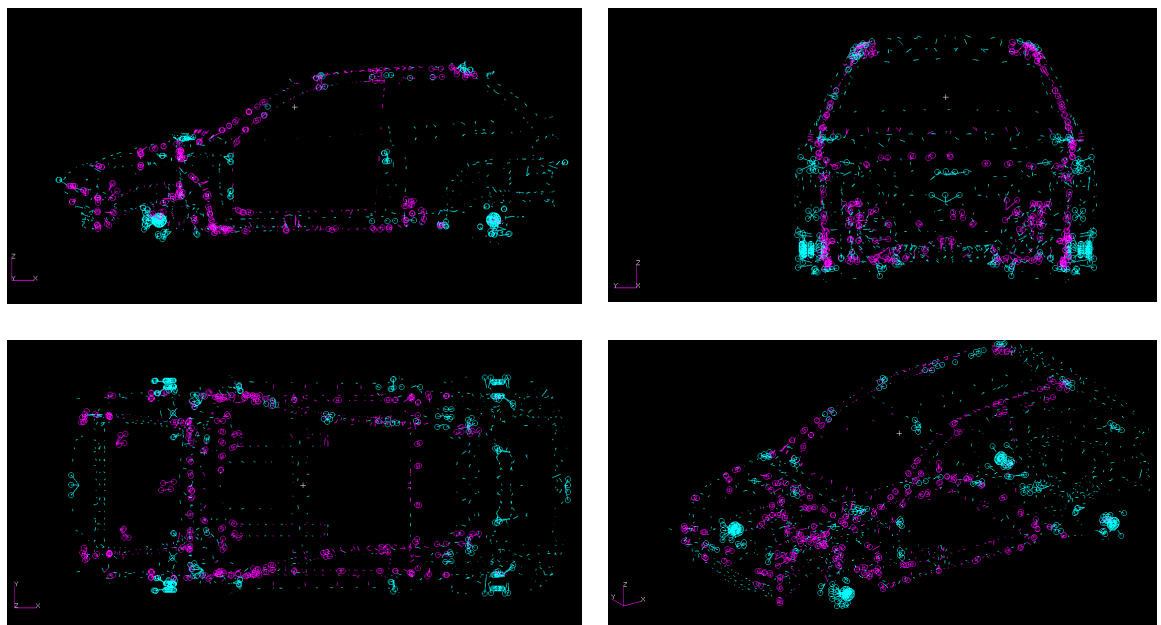


Figura 76. Uniones ya existentes en azul y creadas en morado. Mismas vistas que las figuras anteriores

ANEXO 4. RESUMEN EXTENDIDO DE LA DIRECTIVA 96/79/CE

(El apartado 4.1. Resumen Directiva 96/79/CE es un resumen más conciso de esta Directiva)

El ensayo detallado en la Directiva 96/79/CE consiste en el impacto del vehículo a una velocidad de 56km/h contra una barrera deformable con una superposición del 40%. Es muy similar a la prueba realizada por la Euroncap, pero a una velocidad menor.

A continuación, se hará un resumen de los puntos principales de la Directiva y que nos interesan para simular un ensayo aproximado. Se cubren los tres principales puntos, los datos generales del ensayo, de la barrera, y de la recolección de datos del impacto. A su vez, se describe con mayor profundidad la composición de los bloques alveolares que conforman la barrera.

4.1. ENSAYO

4.1.1. VELOCIDAD DE ENSAYO

La velocidad del vehículo en el momento del impacto será de 56 ± 1 km/h. Sin embargo, si el ensayo se efectuara a mayor velocidad y el vehículo cumple los requisitos, se considerará que los resultados son satisfactorios.

4.1.2. ALINEACIÓN DEL VEHÍCULO CON RESPECTO A LA BARRERA

El $40\% \pm 20$ mm del vehículo deberá coincidir con la cara de la barrera. La cara anterior de la barrera consistirá en una estructura deformable como se define más adelante. La cara anterior de la estructura deformable será perpendicular $\pm 1^\circ$ a la trayectoria del vehículo de ensayo, y estará en posición vertical $\pm 1^\circ$.

4.1.3. ÁREA DE ENSAYO

En lo referente a las características del área de ensayo, se prevé que esta sea lo suficientemente amplia como para dar cabida al carril de aceleración, la barrera y la instalación técnica necesaria para el ensayo. La última parte del carril, por lo menos los últimos cinco metros antes de la barrera, será horizontal, plana y lisa.

4.1.4. PREPARACIÓN DEL VEHÍCULO

El acristalamiento móvil del vehículo estará en la posición de cerrado. Podrá bajarse para hacer la medición en los ensayos y de acuerdo con el fabricante, siempre que la posición de la manivela sea equivalente a la de cerrado. Las puertas estarán cerradas, pero no con llave.

En el momento de la colisión el vehículo no estará bajo la acción de ningún dispositivo auxiliar de guía o de propulsión.

4.2. DEFINICIÓN DE LA BARRERA DEFORMABLE FIJA

La barrera deformable fija está compuesta de dos bloques alveolares, el principal y el parachoques, y de tres láminas diferentes, la posterior, la de recubrimiento y la de contacto con la barrera. También se define en la Directiva el adhesivo que se utilizará, así como las sujeciones mediante pernos y flejes de acero.

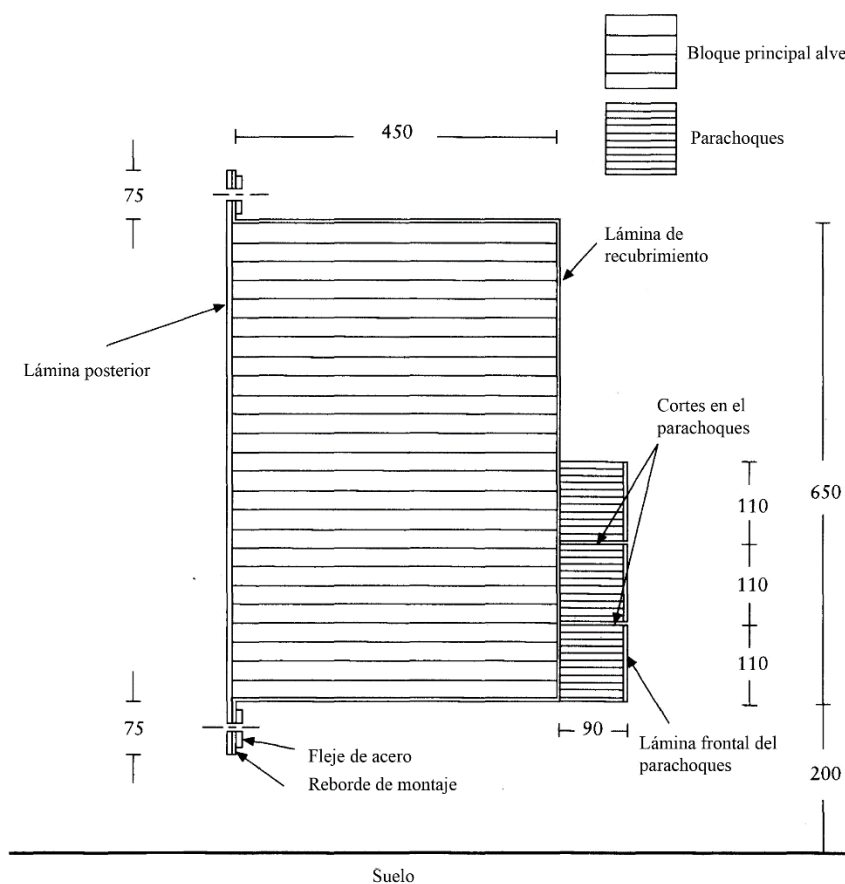


Figura 77 Barrera deformable para el ensayo de colisión frontal

Esta barrera deformable y su sujeción serán simuladas de forma simplificada para nuestro ensayo. Se incluirán a continuación los datos de los bloques y láminas tal cual son descritos en la Directiva, pero en vez de utilizar paneles alveolares se va a diseñar una barrera que ofrezca una respuesta similar a la que se conseguiría con los paneles alveolares. Por eso los datos que nos interesan de los bloques son únicamente los de resistencia al aplastamiento, densidad y dimensiones exteriores. Podremos simular una barrera que responda de manera similar a la original, pero sin tener el enorme costo computacional que supondría simular individualmente cada celdilla de los bloques.

Todas las dimensiones deben respetar una tolerancia de $\pm 2,5$ mm	Bloque principal alveolar	Parachoques
Altura (en la dirección del eje de la franja/hoja alveolar)	650 mm	330 mm
Anchura	1 000 mm	
Profundidad (en la dirección de los ejes de las celdillas alveolares)	450 mm	90 mm
Material	Aluminio 3003 (ISO 209 parte 1)	
Grosor de la hoja	0,076 mm	
Tamaño de las celdillas	19,14 mm	6,4 mm
Densidad	28,6 kg/m ³	82,6 kg/m ³
Resistencia al aplastamiento	0,342 MPa +0 % -10 % (1)	1,711 MPa + 0 % - 10 % (1)

(1) De conformidad con el procedimiento de certificación descrito posteriormente.

Tabla 8

	Lámina posterior	Lámina de recubrimiento	Lámina de contacto de la barrera
Altura	800 ± 2,5 mm	1 700 ± 2,5 mm	330 ± 2,5 mm
Anchura	1 000 ± 2,5 mm		
Espesor	2,0 ± 0,1 mm	0,81 ± 0,07 mm	
Material	Sin especificar	Aluminio 5251/5052 (ISO 209 parte 1)	

Tabla 9

4.2.1. CERTIFICACIÓN DE LAS LÁMINAS ALVEOLARES

En el documento NHTSA TP-214D [11] figura el procedimiento completo de ensayo para la certificación de las láminas de aluminio alveolares, tanto las usadas en el bloque principal como en el parachoques.

Con el fin de garantizar la uniformidad de la resistencia al aplastamiento de toda la cara de la barrera, se han de tomar ocho muestras de cuatro emplazamientos distintos situados a distancias iguales en cada lámina. Estas muestras han de ser cortadas a partir de los paneles alveolares de una determinada manera, y de unos determinados lugares del panel. Para lograr la certificación, siete de esas ocho muestras deben cumplir los requisitos de resistencia establecidos. Las celdas de los extremos de cada muestra pueden no estar completas, por lo que la dimensión equivalente es menor que si se tomaran muestras de un panel sólido, no alveolar. Se debe tener en cuenta por tanto que en nuestra simulación puedan aparecer unos valores de resistencia al aplastamiento ligeramente mayores que en el ensayo real (por tener mayor área real).

Por supuesto en nuestro caso no se repetirá el test ya que se obtendrían resultados iguales al volver a simular con las mismas condiciones.

4.2.1.1. Velocidad de aplastamiento y distancia

Las muestras se aplastarán a una velocidad superior a 5,1 mm/min e inferior a 7,6 mm/min. La distancia mínima de aplastamiento será de 16,5mm.

En nuestro caso, utilizaremos un material con propiedades independientes de la velocidad de deformación. Para realizar una simulación explícita mediante Abaqus de un ensayo similar al descrito por la normativa, de una duración del orden de dos minutos, se debería utilizar alguna modificación como *mass scaling*. Esto es debido a que el incremento de tiempo de la simulación lo determina el programa fijándose en diversos factores. Una simulación de dos minutos tendría un coste computacional muy grande con un factor de tiempo pequeño, y una de las maneras de aumentar el factor de tiempo es usando el *mass scaling*.

Podemos simular un material que se comporte de manera similar a la descrita independientemente del tiempo. Por lo que podemos realizar las simulaciones a una velocidad más alta y el resultado obtenido será el mismo que si se hiciera más lentamente.

4.2.1.2. Determinación de la resistencia al aplastamiento

No se tomarán en cuenta todos los datos previos a 6,4 mm de aplastamiento o posteriores a 16,5 mm de aplastamiento. Se dividirán los datos restantes en tres secciones o intervalos de desplazamiento ($N = 1, 2, 3$) (véase la Figura 12. Ejemplo de curva Fuerza de aplastamiento-Desplazamiento) de la siguiente manera:

Sección 1	6,4-9,7 mm ambos inclusive
Sección 2	9,7-13,2 mm ambos exclusive
Sección 3	13,2-16,5 mm ambos inclusive

Tabla 10

Se hallará la media de cada sección aplicando la siguiente fórmula:

$$F(n) = \frac{|F(n)1 + F(n)2 + \dots + F(n)m|}{m} ; \quad m = 1, 2, 3$$

Ecuación 2

siendo m el número de puntos de datos medidos en cada uno de los tres intervalos. Se calculará la resistencia al aplastamiento de cada sección aplicando la fórmula:

$$S(n) = \frac{F(n)}{A} ; \quad n = 1, 2, 3$$

Ecuación 3

Finalmente, para que una muestra alveolar sea homologada deberá cumplirse el siguiente requisito:

- $0,308 \text{ MPa} \leq S(n) \leq 0,342 \text{ MPa}$; $n = 1, 2, 3$. En el caso del material de resistencia al aplastamiento de 0,342 MPa
- $1,540 \text{ MPa} \leq S(n) \leq 1,711 \text{ MPa}$; $n = 1, 2, 3$. En el caso del material de resistencia al aplastamiento de 1,711 MPa

La Figura 78 da una idea de la curva fuerza-desplazamiento que podría esperarse durante el ensayo del bloque de barrera alveolar:

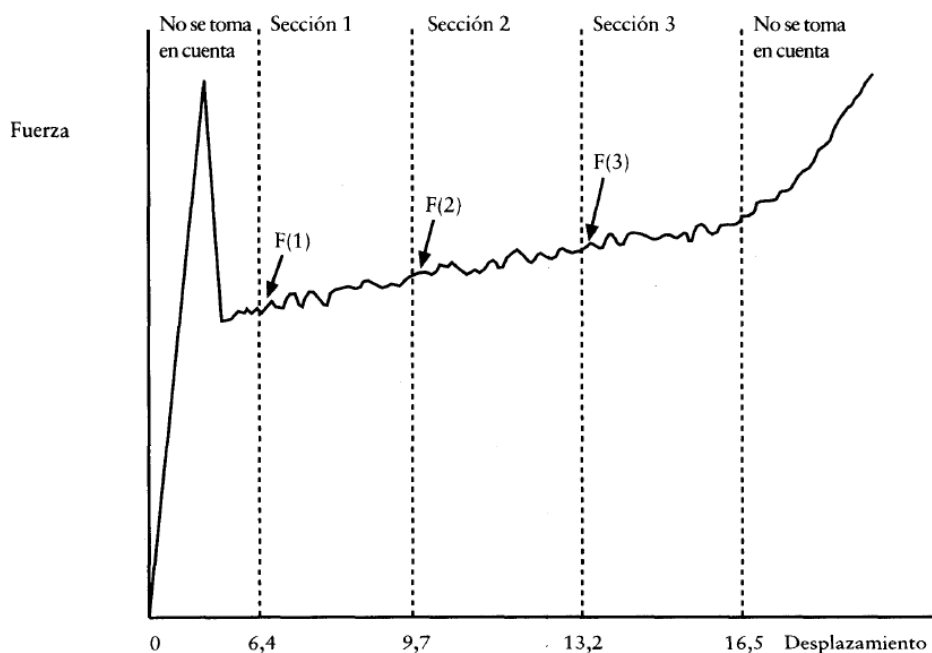


Figura 78. Curva Fuerza de aplastamiento-Desplazamiento esperada

4.2.1.3. Colocación y montaje de la barrera

La normativa indica que la barrera deformable rígida se debe sujetar firmemente al borde de una masa no inferior a 7×10^4 kg o a una estructura sujeta a ésta. La sujeción de la cara de la barrera se hará de manera que el vehículo no entre en contacto con ninguna parte de la estructura situada a más de 75 mm de la superficie superior de la barrera (excluido el reborde superior) en ningún momento de la colisión.

Como ya se ha mencionado, la cara delantera de la superficie a la que se sujetará la barrera deformable debe ser plana y continua en la altura y la anchura de la cara y estar en posición vertical $\pm 1^\circ$ y perpendicular $\pm 1^\circ$ al eje del carril de aceleración. La superficie de sujeción no deberá desplazarse más de 10 mm durante el ensayo. También se indica que, si fuera necesario, se utilizarían anclajes o dispositivos de sujeción adicionales que impidan el desplazamiento del bloque de cemento. El borde de la barrera deformable se alineará con el borde del bloque de cemento correspondiente al lado del vehículo que se esté ensayando.

En nuestro caso se simplificará la sujeción de la barrera fijando la cara posterior de esta, algo imposible de conseguir completamente en un ensayo físico, pero que es a lo que se busca acercarse con la normativa.

4.3. EVALUACIÓN POST-ENSAYO

Los criterios de comportamiento que se evalúan tras la prueba contemplan tanto la gravedad de las fuerzas y aceleraciones que sufren los maniqués como otros factores que pueden afectar a la seguridad de los ocupantes.

4.3.1. MEDICIONES QUE SE REALIZARÁN EN LOS MANIQUÉS

Tras el choque, se estudian las mediciones obtenidas en los maniqués situados en los asientos delanteros, y se evalúa si se han superado diversos criterios. Por ejemplo, la aceleración resultante de la cabeza no puede sobrepasar 80 G's a lo largo de más de 3 ms,

correspondiente a un cálculo acumulativo que excluye el movimiento de retroceso de la cabeza. También se comprueban los resultados obtenidos frente a la norma de referencia en el ensayo de comportamiento de la cabeza (NCC), aunque si no ha existido contacto entre la cabeza y cualquier componente del vehículo esta se dará por cumplida. Por otro lado, se verifican los datos frente a las normas de referencia en el ensayo de lesión del cuello (NLC) y la flexión del cuello. De similar manera, en el resto del cuerpo se evalúan diferentes parámetros en el tórax, fémur, tibia, y rodilla.

4.3.2. MEDICIONES QUE SE REALIZARÁN EN EL VEHÍCULO

En el vehículo en sí, se mide por un lado el desplazamiento residual del volante, que no debe superar unos valores tanto en vertical como en horizontal. Durante el ensayo no deberá abrirse puerta alguna, aunque tampoco deberán bloquearse los sistemas de bloqueo de las puertas delanteras. Asimismo, después de la colisión deberá ser posible, sin utilizar herramientas, a excepción de las necesarias para aguantar el peso del maniquí, abrir al menos una de las puertas por fila de asiento, si la hay, y, si no la hay, mover los asientos o inclinar sus respaldos como fuera preciso para permitir la evacuación de todos los ocupantes; no obstante, esto sólo será aplicable a los vehículos que posean un techo rígido.

Además, deberá ser posible liberar los maniquíes del sistema de retención, el cual deberá poder abrirse, en caso de estar bloqueado, aplicando una fuerza máxima de 60 N sobre el centro del mando de apertura, y extraer los maniquíes intactos del vehículo sin ajustar los asientos. Por último, en el caso de un vehículo propulsado por combustible líquido, sólo se permitirán pequeñas fugas del conjunto del circuito de alimentación de combustible durante o después de la colisión.

Se medirán también las velocidades y aceleraciones en la estructura del vehículo. Ambas curvas, de velocidad y aceleración de la estructura, se determinarán basándose en los valores dados por los acelerómetros longitudinales de la base del pilar B en el lado de colisión del vehículo.

ANEXO 5. DATOS Y RESULTADOS EXTENDIDOS DE LAS SIMULACIONES

5.1. COMPONENTES MODIFICADOS EN CADA ENSAYO

En la Tabla 11 se muestran detalladamente cuáles son los componentes en los que se modificará el acero empleado dependiendo de la configuración del ensayo.

Por ejemplo, al modificar los aceros en la zona del Pilar A, se tendrán que modificar los materiales de los componentes del modelo cuyo nombre comienza por A-PILLAR-MID-, A-PILLAR-I-, A-PILLAR-ROOF- y ROOF-RAIL-I-. Cada una de estas piezas contiene el componente derecho e izquierdo, denominados respectivamente con una R o L al final.

La primera columna de la Tabla 11 es un código interno utilizado durante la realización del proyecto para facilitar la identificación de las configuraciones. En los resultados del proyecto no se incluye la configuración D6 ya que se amplió el estudio para incluir el *firewall*. La última configuración, D9, indica el acero usado en cada componente, en base a los resultados obtenidos después de ensayar todas las demás configuraciones con los 3 tipos de aceros de alta resistencia empleados.

		RAIL-FT-	WHEELWELL-FT-O-	RAIL-PLATE-I-	A-PILLAR-MID-	A-PILLAR-I-	A-PILLAR-ROOF-	ROOF-RAIL-I-	FLOORBOARD-FT (cambiando material MAT_FLOORBOARD-FT)	RAIL-SUPP2-FT-	RAIL-MID-	FIREWALL
D0	Todo original, S355											
D2	Largueros	X										
D3	Largueros e interior y arco rueda	X	X	X								
D4	Todo pilar-A				X	X	X	X				
D5	Suelo y largueros inferiores								X	X	X	
D6	Todos los anteriores	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
D7	Firewall											X
D8	Todos	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
D9	Configuración final utilizando los 3 tipos de acero	1400	1400	1400	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1000

Tabla 11. Componentes en los que se cambia el tipo de acero según las diferentes configuraciones

5.2. CURVAS DE ACELERACIÓN

A continuación, se presentan las curvas de aceleración media durante 16ms obtenidas para las diferentes configuraciones ensayadas en el ensayo de barrera deformable.

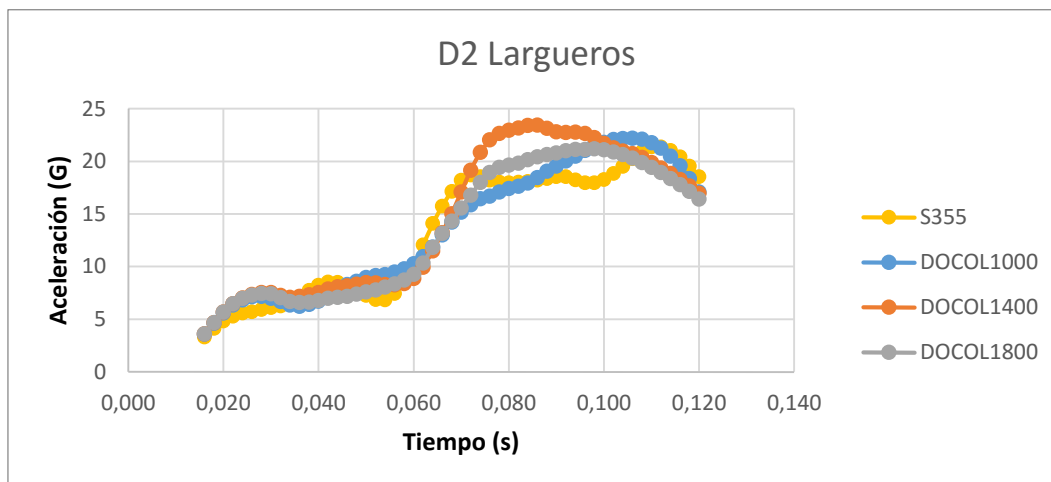


Figura 79. Aceleraciones medias en 16ms en el ensayo de barrera deformable

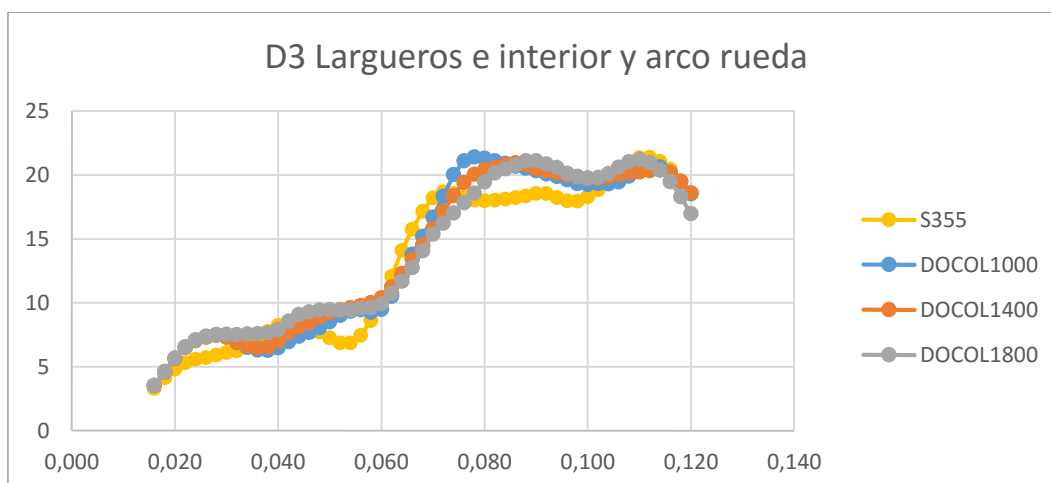


Figura 80. Aceleraciones medias en 16ms en el ensayo de barrera deformable

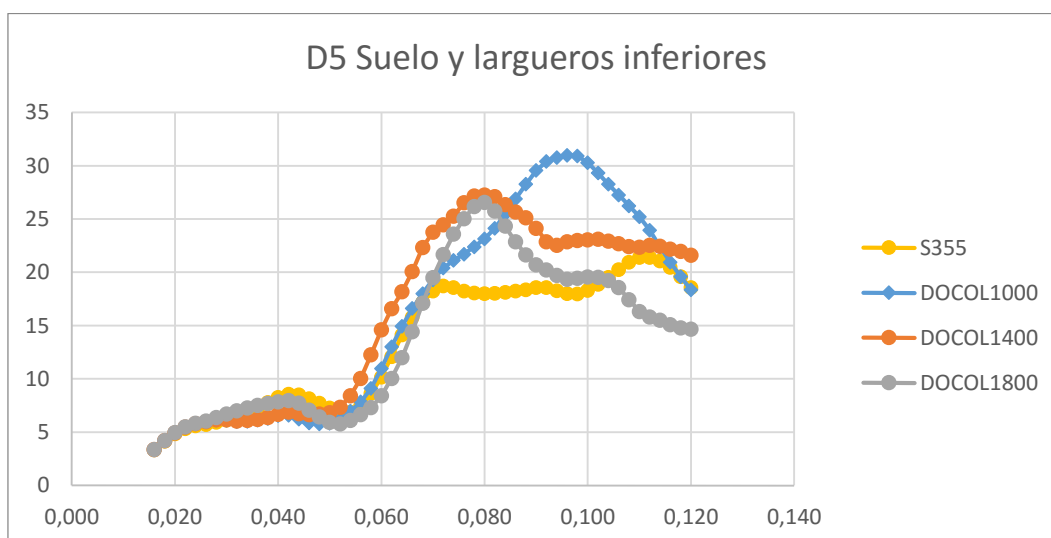


Figura 81. Aceleraciones medias en 16ms en el ensayo de barrera deformable

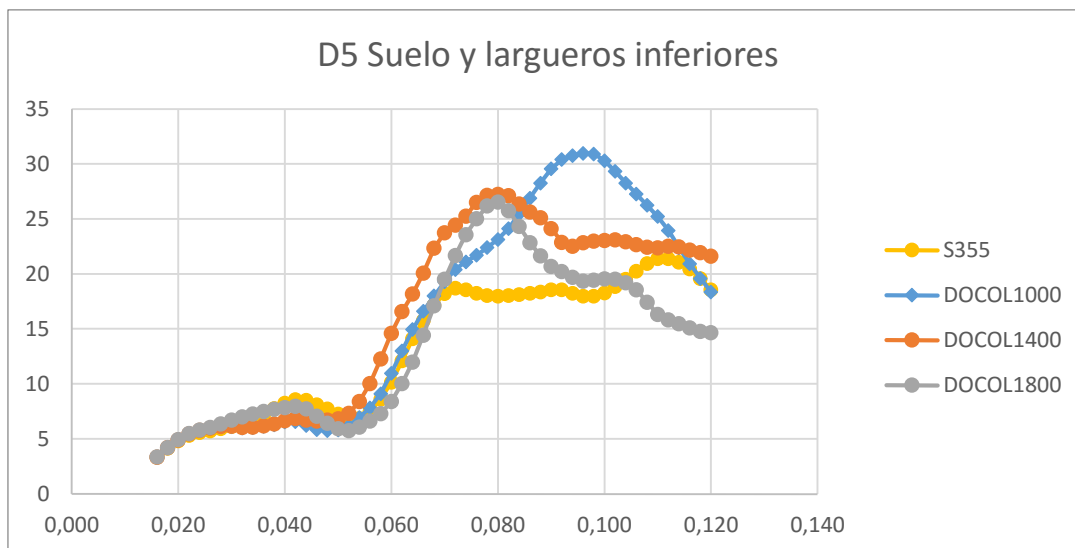


Figura 82. Aceleraciones medias en 16ms en el ensayo de barrera deformable

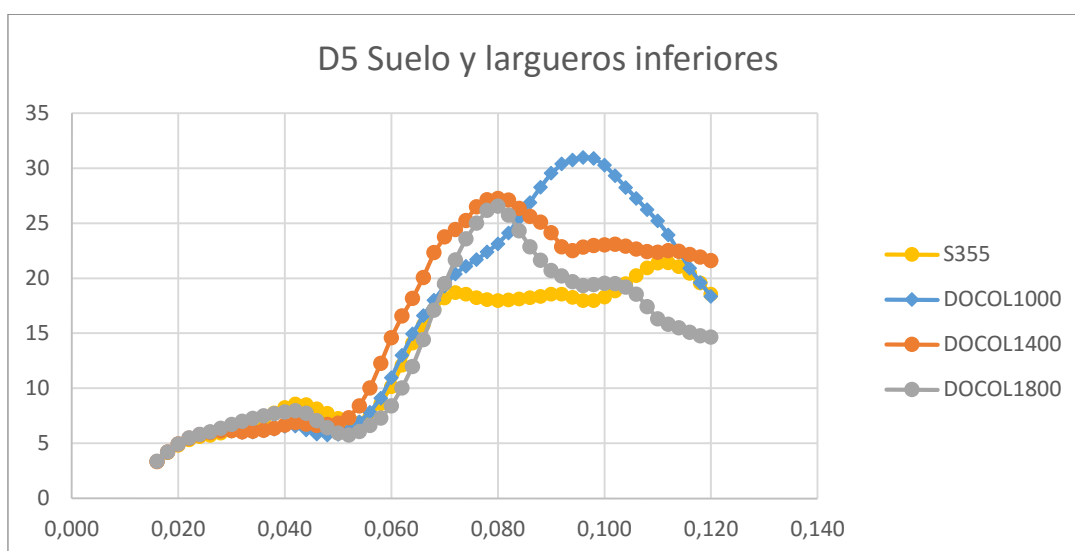


Figura 83. Aceleraciones medias en 16ms en el ensayo de barrera deformable

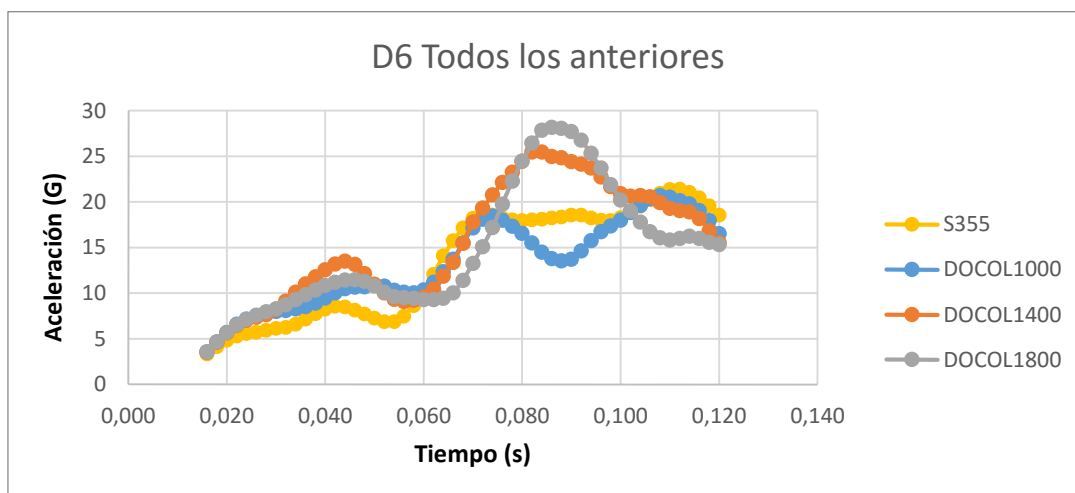


Figura 84. Aceleraciones medias en 16ms en el ensayo de barrera deformable

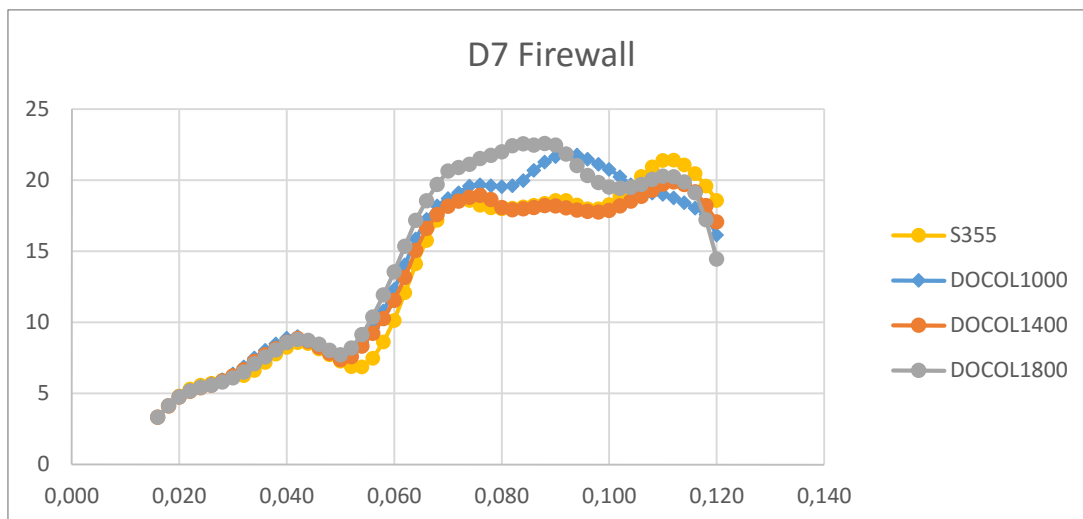


Figura 85. Aceleraciones medias en 16ms en el ensayo de barrera deformable

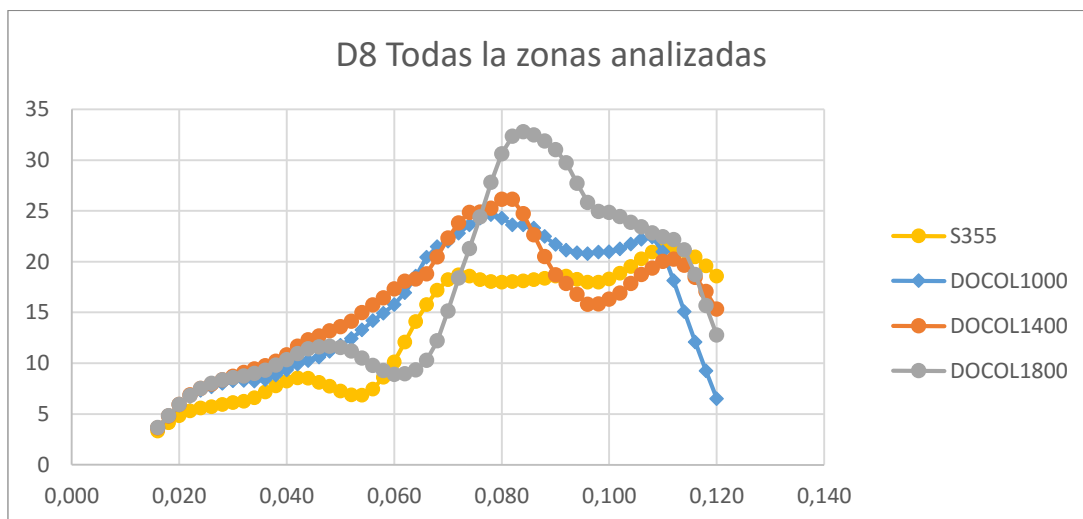


Figura 86. Aceleraciones medias en 16ms en el ensayo de barrera deformable