



# Universidad Zaragoza

## TRABAJO FIN DE MÁSTER:

Simulación del ensayo de impacto frontal con  
solapamiento pequeño de automóvil para análisis  
estructural del chasis

Directores

David Valladares Hernando  
Luis Castejón Herrer

Autor

Pablo Hériz Herrera

Titulación

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL  
2024



## Resumen

Este trabajo de fin de máster consiste en la simulación del ensayo de impacto frontal con solapamiento pequeño de automóvil para análisis estructural de piezas críticas en este tipo de choque. Se empezará haciendo una breve introducción sobre la historia de la seguridad en los automóviles. Una vez realizada la introducción, se comentarán brevemente los objetivos del trabajo fin de máster.

A continuación, se explicarán los distintos elementos de seguridad activa y pasiva que existen hoy en día, así como los procesos de fabricación de las piezas del chasis de los vehículos y los metales con los cuales están fabricados.

Antes de empezar con el modelo se explicará brevemente la metodología que se va a seguir para proponer mejoras. Empezando con el grueso de este trabajo se explicará brevemente la puesta en marcha del modelo y luego se hará un análisis de los resultados obtenidos con el vehículo sin modificar.

Una vez analizado la colisión con el modelo original se propondrán una serie de materiales que se usan hoy en día y llevará a cabo un estudio sobre la influencia de distintos componentes estructurales en el comportamiento del ensayo estudiado. Una vez determinado un ranking de los componentes según el impacto se realizarán más simulaciones enfocada en ir modificando poco a poco el vehículo para ver cómo va mejorando poco a poco su comportamiento. Sobre el modelo con todas las mejoras implementadas se disminuirá el espesor de algunas piezas para ahorrar peso. Tras comentar las limitaciones de este trabajo de fin de máster y proponer posibles mejoras en caso de querer hacer una tesis doctoral se dará por concluido este trabajo.



# Índice

1. Introducción.....	1
2. Objetivos .....	2
3. Alcance.....	2
4. Estado del Arte .....	3
4.1. Seguridad Pasiva.....	3
4.2. Seguridad Activa .....	6
4.3. Organismos de ensayos .....	7
4.4. Choque Frontal con pequeño solapamiento.....	7
4.5. Aceros .....	9
4.6. Métodos de fabricación.....	11
4.7. Métodos de unión. .....	12
4.7.1. Adhesivos.....	12
4.7.2. Uniones soldadas.....	12
5. Metodología Aplicada .....	13
6. Modelo de elementos finitos .....	14
7. Análisis y resultados de la primera simulación.....	19
7.1. Definiciones .....	19
7.2. Análisis de la primera simulación .....	20
7.2.1. Introducción .....	20
7.2.2. Elección de las piezas críticas y creación de conjuntos .....	20
7.2.3. Materiales asignados a las piezas e identificación de los mismos .....	22
7.2.4. Análisis de resultados .....	23
8. Planteamiento de modificaciones y resultados.....	30
8.1. Elección del material del Suelo.....	32
8.2. Elección del Pilar A .....	36



Universidad Zaragoza

8.3.	Elección del Fender .....	39
8.4.	Elección del Front Rail.....	41
8.5.	Simulación de las optimizaciones .....	44
8.6.	Optimización del peso del modelo.....	48
8.7.	Comparativa visual de las simulaciones .....	52
9.	Conclusión .....	53
10.	Bibliografía .....	55



## 1. Introducción

La realización de este trabajo fin de máster se centrará en simular un ensayo de impacto frontal con pequeño solapamiento con el Dodge Neon del año 1997. Este vehículo permitirá simular los aceros que se usaban hace más de veinte años y los que se usan en la actualidad pudiendo ver en qué han mejorado.

La primera persona en fallecer por un accidente de tráfico fue Mary Ward en 1869 [1]. De pasar a ser una anécdota se convirtió en un suceso corriente a partir de la llegada de la producción en masa de automóviles. A partir de 1930 se convirtió en un producto común pero peligrosos debido a la rigidez de ciertos elementos metálicos en el salpicadero y a la falta de elementos de seguridad como el cinturón de seguridad o el airbag entre otros. A partir de esa década la universidad Wayne State de Detroit fue la primera universidad que empezó a recabar información sobre los efectos que los choques en vehículos a alta velocidad tenían sobre el cuerpo humano. Para ello utilizaban cadáveres, aunque no tardaron en sustituirlos por razones ética, después pasaron a los animales usando osos, chimpancés, pero los más usados fueron los cerdos. Esta práctica se impidió con el paso del tiempo y se introdujeron los dummies. [2]

La seguridad automovilística representa un pilar fundamental en el automóvil. Esto se debe al crecimiento del parque vehicular a nivel global que superó los 1.500 millones de unidades en circulación. Una cifra que no solo refleja la dependencia que tenemos del coche, sino que además recalca la importancia de garantizar la protección de los ocupantes y de terceros en las vías públicas. [3]

Para poder llevar a cabo un desarrollo tecnológico y actualizar los estándares de seguridad, la industria automovilística empezó a invertir en la implementación de sistemas avanzados de seguridad como cinturones de seguridad, airbags, sistemas de frenado automático de emergencia, control de estabilidad, asistencia de mantenimiento de carril y cámaras de visión trasera, la seguridad pasiva y activa se ha convertido en un componente integral del diseño y fabricación de vehículos.

Aun así, siguen muriendo muchas personas debido a accidentes de tráfico, 1,19 millones a nivel global [4] y 1.145 personas en España el año pasado [5]. La seguridad automovilística no sólo es deber de los fabricantes de automóviles sino también de las organizaciones gubernamentales que tienen que mantener las vías en buen estado, concienciar a los conductores y los peatones de los peligros que conlleva una mala práctica y poner en marcha leyes y normativas que aseguren la seguridad de los usuarios de las vías públicas. Estos mismos usuarios deben también circular con seguridad y respetar la ley. Todos estos actores son responsables de la seguridad automovilística.

La seguridad de un vehículo ya es un aspecto de suma importancia cuando se quiere adquirir un coche nuevo, es un factor que no siempre se tuvo en cuenta. Uno de los métodos para evaluar la resistencia estructural y la seguridad de un vehículo ante impactos frontales es el ensayo de impacto frontal con solapamiento pequeño. Este tipo de prueba, definida por el Instituto de Seguros para la Seguridad en las Carreteras (IIHS por sus siglas en inglés), simula colisiones en las que sólo una parte



**Universidad Zaragoza**

del frontal del vehículo impacta contra una barrera deformable a una velocidad específica.

Es una prueba que data de 2012 y es actualmente un punto de referencia importante para evaluar la seguridad de los vehículos en Estados Unidos debido dado que el choque es bastante critico al afectar solo un cuarto del frontal del vehículo. Este tipo de choques es bastante común porque simula un intento fallido de evitar una colisión frontal [6].

Para obtener buenos resultados en esta prueba los fabricantes deben aportar mejoras en elementos estructurales del vehículo para lograr una mejor distribución de la energía de impacto, mejorar los travesaños delanteros y el pilar A ayudan a cumplir el objetivo. Mejorar los cinturones de seguridad y los airbags también ayuda a obtener una buena puntuación.

## **2. Objetivos**

Los diferentes objetivos propuestos en este proyecto son: Analizar con el software LS-dyna el ensayo de impacto frontal con solapamiento pequeño del lado del copiloto empleando un modelo de automóvil de la NHTSA, y proponer diferentes mejoras en piezas que ayudan en la seguridad como pueden ser el pilar A o el larguero lateral delantero ya sea cambiando el material y modificando el espesor para poder aumentar la seguridad del vehículo y disminuyendo el peso las piezas.

## **3. Alcance**

Partiendo del modelo original se han cambiado los materiales de las piezas más críticas por unos de última generación para poder mejorar el comportamiento ante el impacto frontal. Se han clasificado los cambios del más al menos influyente y se han ido añadiendo progresivamente al vehículo para ver como poco a poco mejoraba su comportamiento. Para cumplir con el objetivo de la disminución de peso se ha disminuido el espesor de ciertas piezas para ver cuánto peso se podía rebajar sin empeorar el comportamiento de este con respecto al vehículo original.



## 4. Estado del Arte

Hoy en día es impensable subirse a un coche sin airbag o cinturones de seguridad, sin embargo, hace no mucho era lo habitual. Estas innovaciones son debidas al interés que han puesto los fabricantes a la seguridad de un vehículo y los estándares legislativos que han creado los estados. Lo primero que se hizo fue añadir seguridad activa básica y después se añadió seguridad pasiva al vehículo y a medida que la tecnología fue avanzando se implementó seguridad activa más avanzada. Puede que en un futuro se deje de desarrollar la seguridad pasiva debido a que la seguridad activa sea tan buena que el número de accidentes se reduzca drásticamente.

### 4.1. Seguridad Pasiva

Son aquellos elementos que entran en funcionamiento cuando se sufre una colisión. Este trabajo trata de la mejora de sistemas de seguridad pasiva, entre ellos el pilar A y los largueros delanteros que son elementos estructurales muy importantes en caso de accidente. Los más conocidos son el cinturón de seguridad que tiene pretensores, los sistemas de retención infantil, los reposacabezas para evitar latigazos cervicales y airbags entre otros.

- Carrocería deformable.

Su función es absorber gran parte de la energía para que no la absorban los ocupantes del vehículo. Es de suma importancia ya que es la última línea entre el impacto y los usuarios. Su función es irse deformando para evitar cualquier intrusión en el habitáculo. [7]

En los primeros automóviles la seguridad no era una prioridad pues había líneas de investigación más interesantes como puede ser las mejoras mecánicas y poder producir coches en masa. Después de la segunda guerra mundial se patentó una idea de Béla Barényi, considerado como padre de la seguridad pasiva en la que estableció que un coche tenía que tener células de deformación, el habitáculo tenía que ser lo más rígido posible mientras que las demás zonas como maletero y zona del capó sí que tenían que serlo como se observa en la figura 2 de la ilustración 1. Este reconocido ingeniero fue nominado al premio Ingeniero de Automoción del siglo. [8]

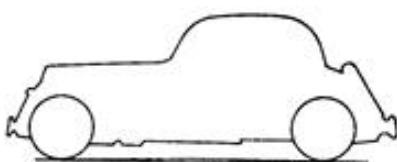


Fig. 1



Fig. 2

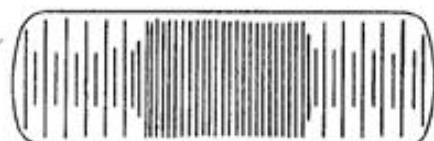
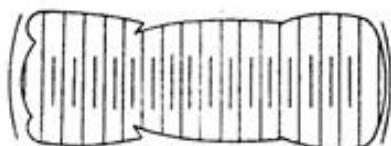


Ilustración 1: Patentschrift Nr: 854 157 [9]



Hoy en día la deformación de la carrocería está programada, es decir unas zonas se fabrican con materiales capaces de absorber la energía de impacto deformándose.

Al producirse una colisión una cantidad dada de fuerza se hace presente, está depende del peso del vehículo, de la velocidad y de lo que se golpea, esta fuerza se mide con la desaceleración del vehículo. Como se puede ver en la siguiente ilustración la fuerza de impacto no es constante, sino que tiene una serie de picos, el primer pico que está a 8 ms corresponde a la fuerza ejercida sobre los largueros (front rail) mientras que el segundo pico corresponde a la fuerza ejercida sobre el motor, este al ser un elemento rígido actúa casi como una barrera mientras que los largueros ayudan a disminuir la fuerza de impacto.

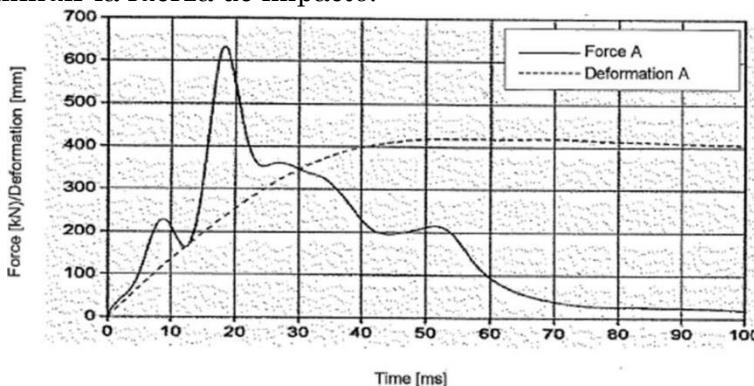


Ilustración 2: Fuerza que absorbe un vehículo en un impacto frontal [10]

Los front rails son un elemento de seguridad pasiva importantísimos ya que reducen la desaceleración durante unos pocos milisegundos que pueden ser vitales para el ocupante del vehículo ya que disminuyen la fuerza de impacto. *“La absorción de energía se genera a partir de las deformaciones a lo largo de la trayectoria de la carrocería reduciéndose en la célula central”* [11]. La carrocería posee una serie de exigencias como la resistencia mecánica y el peso de la misma.

Las zonas deformables también ayudan a distribuir la fuerza antes de que llegue a los ocupantes. Algunas partes están diseñadas para romperse con el fin de protegernos usando puntos fusibles y concentradores de tensiones. *“Los puntos fusibles son zonas con un diseño específico, donde permite deformarse en la zona más próxima a la zona de impacto. Estos diseños son generalmente surcos o ranuras que permiten realizar este efecto, otorgando mayor absorción de energía y los concentradores de esfuerzos son orificios que disipan la energía y la redirecciona a otras zonas adyacentes a la estructura.”* [11]

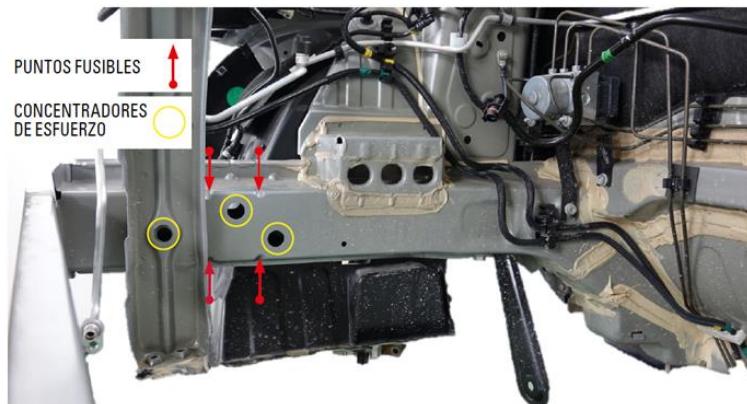


Ilustración 3: Front Rail [11]

Los vehículos están diseñados de manera que el módulo trasero y delantero sean deformables mientras que el habitáculo no lo sea para proteger los ocupantes.



Ilustración 4: Carrocería Deformable [12]

Las células deformables tienen por objetivo reducir la mortalidad en un choque frontal pues son los más habituales como se puede ver en la siguiente ilustración.

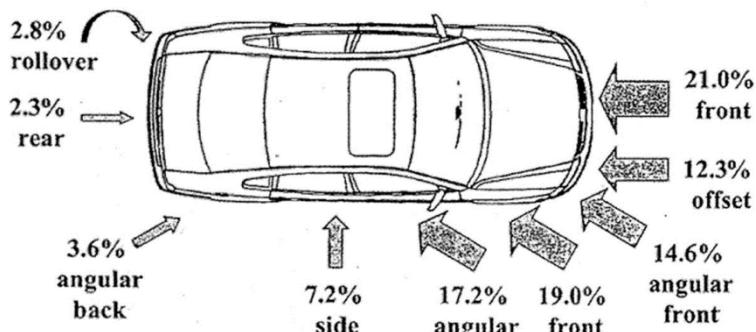


Ilustración 5: Distribución típica según el tipo de accidente [10]

- Corte de inyección.

Con el fin de evitar incendios después de un accidente se corta automáticamente el suministro de combustible al motor y así la cámara de combustión queda sellada.

- eCall

Es un sistema que en cuanto detecta que el vehículo ha estado involucrado en un accidente llama a los cuerpos de emergencia. Es un sistema relativamente nuevo el cual es bastante primitivo, se podrían añadir algún tipo de medidor de constantes



vitales y un sistema de inteligencia artificial que describa el percance para dar todas las informaciones necesarias a los cuerpos de emergencia.

## 4.2. Seguridad Activa

Son aquellos que contribuyen a un mejor funcionamiento de un vehículo con el fin de evitar accidentes, entre los más conocidos está los frenos, la suspensión, neumáticos y el control de tracción.

- Frenos ABS (anti-lock brake systems).

Antiguamente cuando se pisaba el freno con mucha fuerza podían bloquearse las ruedas alargando la distancia de frenado. Midiendo la velocidad de las ruedas se puede determinar si están bloqueadas y cuales, el sistema liberaría presión del freno de la rueda bloqueada para que la rueda vuelva a girar y que el conductor no pierda el control del vehículo.

Hay casos en los cuales es mejor desactivar el ABS como terrenos de gravilla, nieve o cuando se pasa sobre una placa de hielo.

- Sistema de freno EBD (Electronic Brake Pressure Distribution).

Es un sistema de distribución de frenado que mide el peso que ejerce el vehículo sobre cada rueda. Esto hace que el peso no se distribuya mayoritariamente en el eje delantero y se consiga reducir la distancia de frenado.

- Freno de emergencia BAS (brake assist system).

Una cosa de lo que peca la gente es no utilizar toda la fuerza del freno en caso de emergencia, quizás por miedo a que perder el control de coche y tener un accidente mucho peor. El BAS es una muy buena ayuda pues mide la velocidad con la cual se deja de presionar el acelerador y se presiona del freno, también mide la fuerza con la que se pisa el freno. Con estas dos variables determina se es un frenado de emergencia y en caso de que lo sea activa los frenos a su máxima capacidad.

- Control de tracción.

Es similar al EBD, pero en vez de centrarse en el frenado se centra en la tracción. Evita que el coche patine, en cuanto detecta que la velocidad de una rueda es mayor a la de las demás reduce la velocidad de esa rueda para que agarre de nuevo.

Las mejoras obtenidas en el rendimiento de un coche ante una colisión han sido gracias a avances en estos campos, los aceros empleados en la estructura, los procesos de unión, así como el proceso de conformado entre otros.

- Control de estabilidad ESP (electronic stability program)

Ante cambio brusco de dirección ser corre el riesgo de hacer sobrevirar el coche, aquí es donde actúa el control de estabilidad pues lo que hace es corregir la dirección del vehículo.



- Alerta de Cambio de Carril

Manda una alerta o bien corrigiendo la trayectoria del vehículo o mandando una señal sonora.

- Detección de punto ciego

Una pequeña señal luminosa en el retrovisor indica si un vehículo se acerca y está en el punto muerto.

[13], [14]

### 4.3. Organismos de ensayos

Existen multitud de organismos que ponen a prueba la seguridad de los coches que están en el mercado. A nivel europeo Euro NCAP es un programa de seguridad de automóviles respaldado por gobiernos, fabricantes u organizaciones relacionadas con el sector. A nivel estadounidense la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) es una agencia dependiente del gobierno cuyo principal objetivo es salvar vidas, realiza pruebas de seguridad pasiva en vehículos nuevos, parece ser menos exigente que la Euro NCAP y la IIHS pues varios modelos obtienen mejores resultados cuando este organismo realiza las pruebas. En estados unidos también realiza pruebas el IIHS-HLDI (Insurance Institute for Highway Safety and Highway Loss Data Institute) más conocido como IHSS, que es una agencia independiente que evalúa la seguridad pasiva de los coches mediante ensayos. [15], [16]

### 4.4. Choque Frontal con pequeño solapamiento

El choque en el que se va a centrar este trabajo es un choque frontal con un pequeño solapamiento homologado por el IIHS. El ensayo se realiza a 40 millas por hora con una tolerancia de  $\pm 0.6$  mph (64.4 km/h  $\pm$  1 km/h) y un solapamiento del  $25\% \pm 1\%$ .

El vehículo con el que se realiza el ensayo está alineado con una barrera rígida de tal manera que el borde derecho de la cara de la barrera está desplazado hacia la izquierda del centro del vehículo por un  $25 \pm 1\%$  del ancho del vehículo.

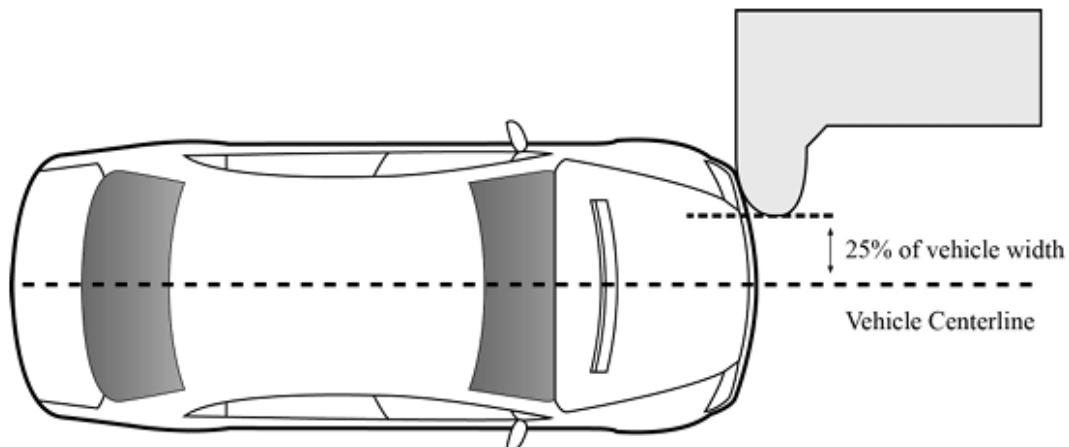


Ilustración 6: Vehicle Overlap with Flat 150 Small Overlap Barrier [17]



La anchura del vehículo está definida y medida según lo indicado en la Society of Automotive Engineers (SAE), en la Práctica Recomendada para Vehículos de Superficie J1100 (2009), que establece: "La dimensión máxima medida entre la parte más ancha del vehículo, excluyendo espejos exteriores, faldones de barro flexibles y lámparas indicadoras, pero incluyendo parachoques, molduras, protrusiones de chapa metálica o ruedas dobles, si son equipo estándar".

El vehículo es acelerado por el sistema de propulsión a una media de 0,3 g hasta alcanzar la velocidad de prueba y luego es liberado del sistema de propulsión aproximadamente 25 cm antes de la barrera. El sistema de frenado a bordo, que aplica los frenos de servicio del vehículo en las ruedas traseras, se activa 1 segundo después de que el vehículo sea liberado del sistema de propulsión.

La barrera rígida está compuesta por una placa de acero vertical, con un radio en el borde derecho. Está compuesta de acero laminado y hormigón armado con una masa total de 145,150 kg. La barrera rígida se monta en el lado derecho de la unidad base, lo que permite el movimiento continuo hacia adelante del vehículo después del contacto primario con la barrera rígida.

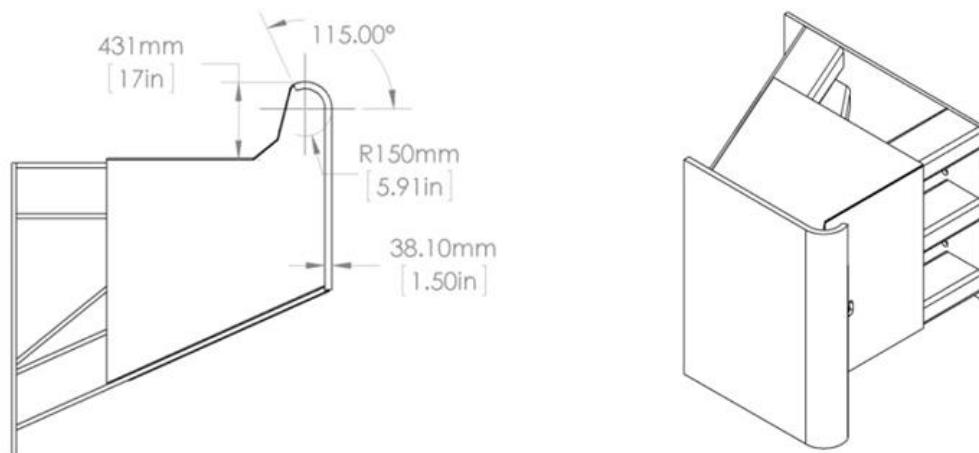


Ilustración 7: Diferentes vistas de la barrera Flat 150 [17]

Antes de realizar el ensayo hay que preparar el coche y esto supone hacer un análisis del vehículo para ver si este tiene algún defecto (fugas, piezas que faltan, etc.) y poder subsanarlos para así obtener resultados fiables. También se drenan todos los fluidos del motor y la transmisión del vehículo antes de la prueba. La gasolina es retirada del tanque de combustible y las líneas de combustible, y reemplazada con solvente Stoddard hasta el 90–95% de la capacidad utilizable. Se ha añadido tinte púrpura al solvente Stoddard para identificar mejor posibles fugas después del choque. El motor se enciende por un breve período para asegurar que el solvente Stoddard haya llenado las líneas de combustible. El electrolito es drenado de la batería. El refrigerante del sistema de aire acondicionado es recuperado de acuerdo con las regulaciones ambientales aplicables. Los botines y la grasa del eje delantero izquierdo son retirados. Se añaden 4 cámaras con iluminación para poder visualizar el impacto desde dentro. Todos los sistemas antichoque del vehículo se desactivan. Se añaden acelerómetros. También es necesario preparar el dummy para el ensayo. [17], [18].

## 4.5. Aceros

Los aceros más avanzados que existen en el mercado para el sector del automóvil son los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) y los aceros de ultra alta resistencia (UHSS).

Los aceros AHSS son calidades que ofrecen una resistencia mínima a la rotura de 440 MPa la cual se obtiene controlando el proceso químico y los parámetros de los tratamientos térmicos.

Existen varios tipos de aceros capaces de alcanzar las tensiones de rotura de los aceros AHSS como pueden ser:

- Martensíticos

La martensita se obtiene templando muy rápidamente un hierro austenítico. La austenita se transforma en una microestructura cristalina con una dureza muy alta denominada “martensita”.

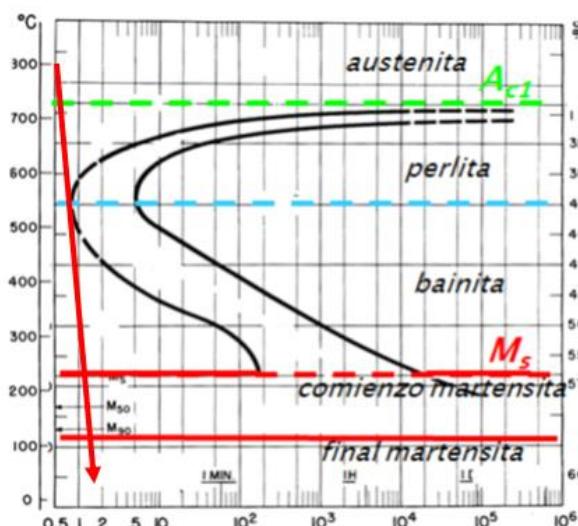


Ilustración 8: Diagrama TTT que muestra la obtención de un acero martensítico [19]

Los aceros martensíticos se pueden someter a un revenido posterior al templado para mejorar su ductilidad y así por conformarlos en frío. [20]

- Acero conformado en caliente

Los Press Hardened Steels deben su nombre a la menara en la que se usan.

Los aceros PHS tienen una microestructura ferrítica-perlítica, pero al calentarlas para estamparlos se convierte en austenítico para después convertirse parcialmente en martensítico.

Estos aceros tienen una resistencia muy alta que permite aligerar significativamente el peso de componentes estructurales. [21]



- Fase dual

Son aceros ferríticos con islas de martensita. La ferrita proporciona una ductilidad excelente. Para aumentar la resistencia basta con aumentar la cantidad de martensita y bainita. Son aceros muy adecuados cuando se requiere un conformado con mucho estiramiento. [22]

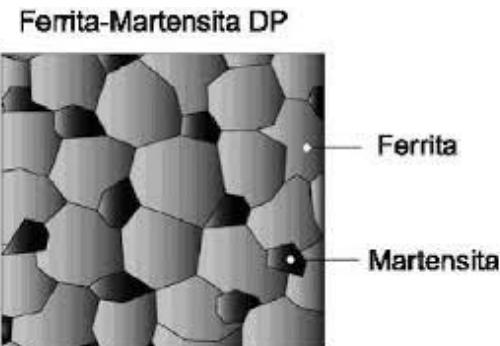


Ilustración 9: Acero Dual Phase [23]

- Fase dual con alta capacidad de conformado

Tienen una microestructura de múltiples fases que presenta una matriz de ferrita con incrustaciones de martensita, bainita y austenita retenida.

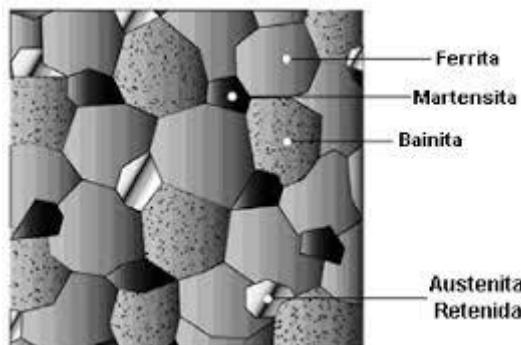


Ilustración 10: Fase Dual con Alta Capacidad de Conformado [24]

Con respecto a los aceros fase dual tiene una fase de endurecimiento por deformación que persiste a niveles de tensión más altos. Estos aceros ofrecen una capacidad de conformado mejorada además de una absorción de energía en colisiones extraordinaria y progresiva a través del endurecimiento por altas tensiones durante la deformación provocada por la colisión. [25]



## 4.6. Métodos de fabricación

La estampación se usa mucho en la industria del automóvil dado que permite obtener buenas propiedades mecánicas y se suelen usar aceros AHSS y UHSS para obtener las mejores propiedades posibles. Desde que se aplicó por primera vez en el SAAB9000 en 1984 se ha popularizado tanto que ahora casi el 50% de la masa de acero de la estructura de un vehículo se hace mediante este proceso.

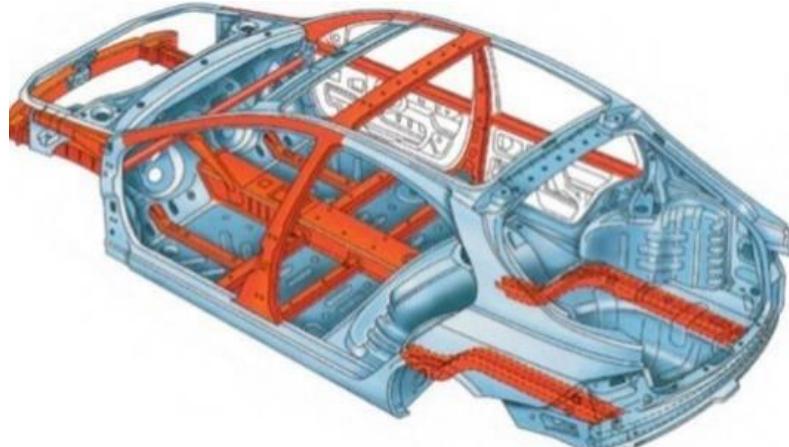


Ilustración 11: Piezas hechas por estampación

Un avance importante fue el de tener una misma lámina con distintos espesores usando el método “hot formed tailor rolled” que permite aligerar unos 15kg el vehículo mejorando el comportamiento ante impactos.

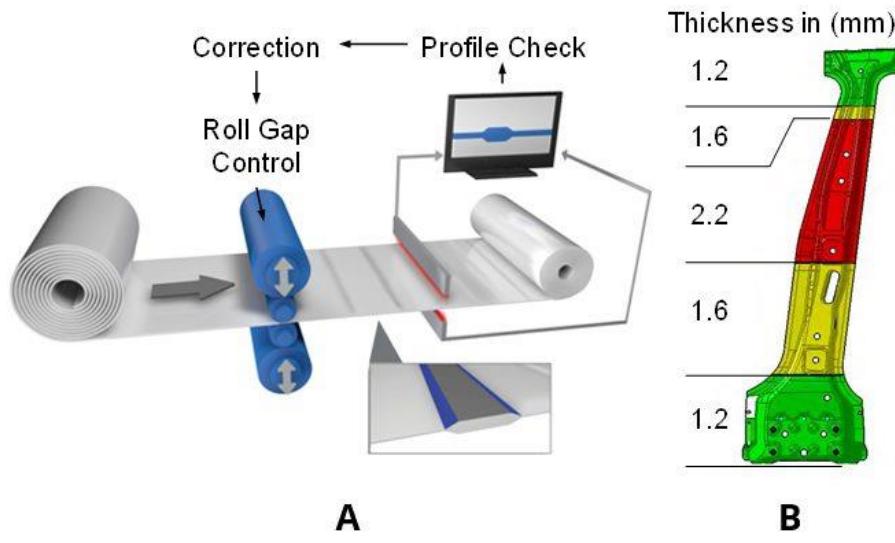


Ilustración 12: Proceso de Tailor Rolling [26]

La estampación en caliente tiene futuro y aún se puede mejorar el proceso, por ejemplo, hay varias líneas de investigación abiertas como las de quitar hornos y calentar mediante inducción (furnace free) o refrigerar los troqueles con nitrógeno para poder asegurar la repetibilidad del proceso. [26], [27], [28]



## 4.7. Métodos de unión.

### 4.7.1. Adhesivos

Se usan varios métodos de unión entre los cuales se encuentran los adhesivos. Un adhesivo es una sustancia con capacidad de mantener dos materiales juntos mediante la adhesión de superficies.

La ventaja de un buen adhesivo frente a una unión de soldadura o tornillos es que está tiene una distribución uniforme de las tensiones, es más económico, reduce el número de componentes y mejora el aspecto del producto. Como es de esperar cuanta con desventajas como puede ser la necesidad de una preparación superficial de la pieza, tiempo de curado, resistencia limitada y que no existen ensayos no destructivos.

Puede parecer un método de unión poco útil, pero se usa para reducir el peso, mejorar la rigidez del vehículo y mejorar la durabilidad debido a que ofrece una capa de protección ante la humedad. También tienen cabida en el sector aeronáutico pues se usan en elementos como el motor ya que ofrecen un escudo térmico a ciertos componentes. [10]

### 4.7.2. Uniones soldadas

Dentro de los muchos tipos de soldadura el que realmente destaca en la industria automotriz es la soldadura por puntos de resistencia ya que se hacen unos 4.000 puntos de soldadura por vehículo. [29]

Este método favorece la productividad, así como un bajo coste que es crucial en este sector. Tiene aplicaciones en el sector aeronáutico, por ejemplo, la cubierta del intercambiador de calor del Airbus A320 neo en la cual dos chapas de titanio se sueldan mediante este método.



## 5. Metodología Aplicada

Este trabajo empieza con una investigación exhaustiva de la normativa pertinente en cuanto a la realización del ensayo, con el objetivo de garantizar un ajuste preciso los estándares establecidos. Es un paso crucial para asegurar el buen desarrollo de este trabajo al adquirir un profundo entendimiento de las directrices y requisitos del ensayo y asegurar la calidad y la coherencia del trabajo.

El programa que se va a usar para simular es el LS-DYNA que es un programa de elementos finitos que utiliza un enfoque explícito, es decir, calcula en base a equilibrios de energía. Se centra en el comportamiento transitorio y la evolución de los sistemas. Permite simular eventos violentos como choques, despliegue del Airbag, respuesta de los cinturones de seguridad y por eso es el software más utilizado para hacer simulaciones de choques en vehículos. [30]

En el sitio web oficial de la NHTSA, se encuentran disponibles una serie de modelos numéricos de vehículos desarrollados directamente por la agencia. Estos modelos tienen un valor académico muy alto porque son modelos muy realistas que pueden servir en el campo de la investigación. [31]

Una vez descargado el modelo que se va a estudiar se prepara con el programa LS-PrePost que es un pre y post procesador que viene incluido con el LS-DYNA. El modelo se prepara poniendo las condiciones de contorno que establece la normativa pertinente al ensayo. Para ello hubo que añadir la barrera previamente modelada con el programa Autodesk Inventor de Autodesk siguiendo las medidas que establece la norma. [17]

Una vez listo el modelo se puede simular el choque con el LS-DYNA. Se obtienen y analizan unas gráficas resultado para los elementos que deseamos en los cuales se puede ver la energía absorbida.

Después de esto se proponen mejoras que se van a implementar en el modelo y se vuelve a simular. Es necesario saber que la energía interna que absorban las piezas del capó deformándose será energía que ya no llegue al habitáculo y por lo tanto a los ocupantes. Se van a utilizar modelos de material de última generación que se encuentren ya sea en el portal de SSAB, en WorldAutoSteel o en apuntes de asignaturas impartidas durante el máster. [10],[19],[32],[33]. Para ello se hará un análisis paramétrico para cada conjunto de piezas viendo qué acero es óptimo para cada conjunto. La siguiente etapa consistirá en ir introduciendo progresivamente las mejoras hasta llegar al modelo totalmente mejorado. Para acabar se llevará a cabo una reducción de peso de las piezas estudiadas.



## 6. Modelo de elementos finitos

El modelo escogido se ha descargado a través de la página web de NHTSA. Para poder realizar la simulación hay que añadir las condiciones de contorno o modificarlas en el caso de que estén ya creadas.

El programa no usa unidades, hay que escoger un sistema de unidades congruente.

Tabla 1: Sistemas de Unidades de LS-DYNA [34]

	(a)	(b)	(c)
Length unit	meter	millimeter	millimeter
Time unit	second	second	millisecond
Mass unit	kilogram	tonne	kilogram
Force unit	Newton	Newton	kiloNewton
Young's Modulus of Steel	210.0E+09	210.0E+03	210.0
Density of Steel	7.85E+03	7.85E-09	7.85E-06
Yield stress of Mild Steel	200.0E+06	200.0	0.200
Acceleration due to gravity	9.81	9.81E+03	9.81E-03
Velocity equivalent to 30 mph	13.4	13.4E+03	13.4

Como ya se tiene el vehículo descargado del portal de la NHTSA [31], podemos coger un elemento como puede ser el panel de la puerta y ver que dato proporciona acerca de su masa.

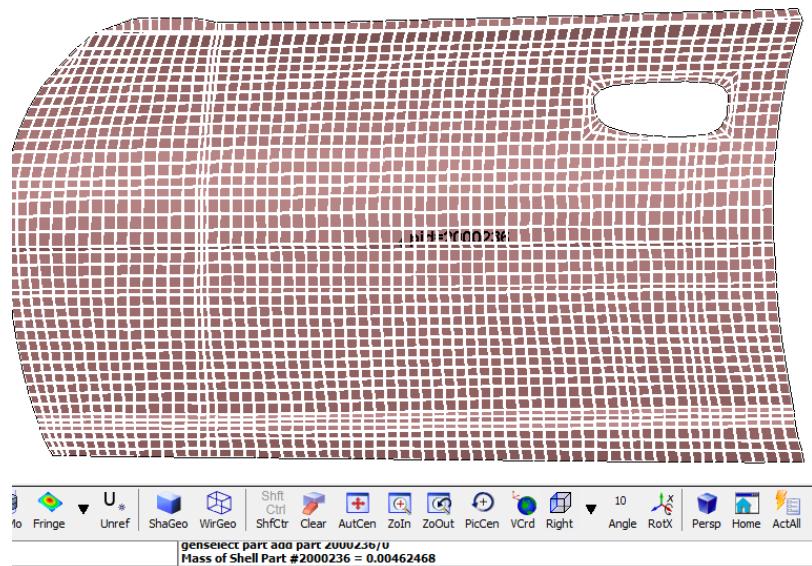


Ilustración 13: Peso del panel de la puerta

La masa es de 0.00462 y con la tabla 1 se puede deducir que la masa está en toneladas por lo tanto se usa el sistema de unidades (B).

El primer paso es hacer el modelo de la barrera. Siguiendo las dimensiones que indica el protocolo IIHS sobre el ensayo [17] se modela a través del programa Inventor de Autodesk y se guarda el archivo con formato **igs**. Este tipo de archivo se puede abrir con LS-PrePost.

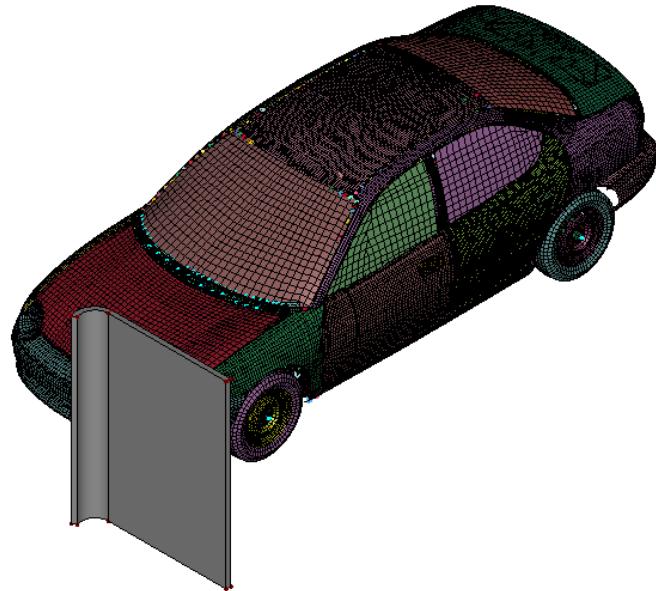


Ilustración 14: vehículo con barrera sin malla

En este mismo programa se aplica una malla con la opción “Auto Mesh” y se pone una malla de tamaño 20.

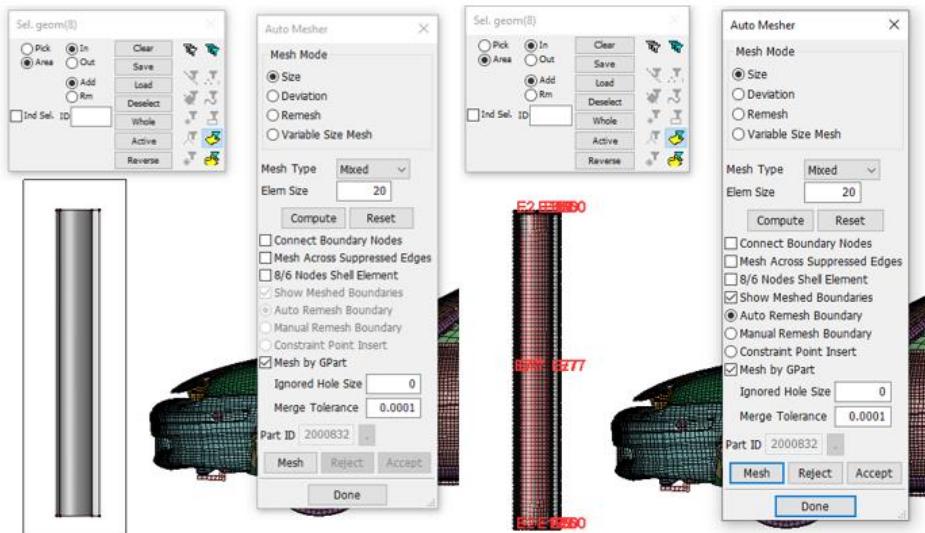


Ilustración 15: Mallado de la barrera

Después hay que añadir propiedades a la barrera y asignarle un material. La barrera está mallada con elementos tipo Shell y se les asignan propiedades. En el form (Opciones de formulación de los elementos) se escribe 16 que corresponde a “Elemento Shell totalmente integrado y modificado para una mayor precisión” y en T1 se añade un espesor de 1 milímetro que va a definir el espesor del elemento



## Keyword Input Form

<input type="button" value="NewID"/> <input type="button" value="Draw"/>	<input type="button" value="RefBy"/> <input type="button" value="Sort/T1"/> <input type="button" value="Add"/> <input type="button" value="Accept"/> <input type="button" value="Delete"/> <input type="button" value="Default"/> <input type="button" value="Done"/>	2000617 2000618 2000619 2000620 2000621 2000622 2000623 2000624 2000625 2000626 2000627 2000628 2000629 2000632 2000810 2000811 2000812 2000814 2000815 2000816 2000817 2000818 2000819 2000822 2000827 2000828 2000829 2000830 2000831 1.0mm
<input type="checkbox"/> Use *Parameter <input type="checkbox"/> Comment (Subsys: 1 Neon.k) <input type="button" value="Setting"/>		
*SECTION_SHELL_(TITLE) (296)		
<b>TITLE</b> 1.0mm		
1 <u>SECID</u> <u>ELFORM</u> <u>SHRF</u> <u>NIP</u> <u>PROPT</u> <u>OR/IRID</u> <input checked="" type="radio"/> <u>ICOMP</u> <u>SETYP</u> 2000831 16 0.0 3 1 0 0 1		
2 <u>T1</u> <u>T2</u> <u>T3</u> <u>T4</u> <u>NLOC</u> <u>MAREA</u> <u>IDOF</u> <u>EDGSET</u> 1.0000000 1.0000000 1.0000000 1.0000000 0.0 0.0 0.0 0		
Repeated Data by Button and List		
<input type="button" value="Data Pt."/> <input type="button" value="Replace"/> <input type="button" value="Insert"/> <input type="button" value="Delete"/> <input type="button" value="Help"/>		
Total Card: 296 Smallest ID: 2000156 Largest ID: 2000831 Total deleted card: 0		

Ilustración 16: Definición de las propiedades generales

Se añade a continuación el material, tiene que ser un material rígido pues la barrera no puede deformarse ni dañarse durante el ensayo y se indican los datos en las unidades del sistema (B) de la tabla 1.

<input type="button" value="NewID"/> <input type="button" value="MatDB"/> <input type="button" value="RefBy"/> <input type="button" value="Pick"/> <input type="button" value="Add"/> <input type="button" value="Accept"/> <input type="button" value="Delete"/> <input type="button" value="Default"/> <input type="button" value="Done"/>	2000217 2000218 2000219 2000367 2000368 2000369 2000370 2000429 2000430 2000431 2000432 2000433 2000434 2000435 2000436 2000615 2000616 2000801 2000802 2000803 2000804 2000805 2000806 2000807 2000822 2000827 2000828 2000829 2000830
<input type="checkbox"/> Use *Parameter <input type="checkbox"/> Comment (Subsys: 1 Neon.k) <input type="button" value="Setting"/>	
*MAT_RIGID_(TITLE) (020) (48)	
<b>TITLE</b> Barrera	
1 <u>MID</u> <u>RQ</u> <u>E</u> <u>PR</u> <u>N</u> <u>COUPLE</u> <u>M</u> <u>ALIAS</u> 2000831 7.890e-10 2.000e+05 0.3000000 0.0 0 0.0 0.	
2 <u>CMO</u> <u>CON1</u> <u>CON2</u> 0.0 0 0	
3 <u>LCO OR A1</u> <u>A2</u> <u>A3</u> <u>V1</u> <u>V2</u> <u>V3</u> 0.000 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0	
COMMENT: \$lco or a1 a2 a3 v1 v2 v3	
MID:=Material identification. A unique number has to be used.	

Ilustración 17: Definición del material

Después de haber definido la propiedad de la sección y un material hay que asignárselo a la barrera. A continuación, se añade el apoyo de la barrera con la opción *spc*. Con seleccionar un par de nodos es suficiente para crear el apoyo.

Para añadir la velocidad al vehículo hay que añadir también la velocidad angular de la rueda, para eso se mide el radio de la rueda con la herramienta “*Measure*” que indica que tiene un radio de 301,705 mm. Con la velocidad del ensayo y el radio de la rueda ya se puede incluir la velocidad en el modelo.

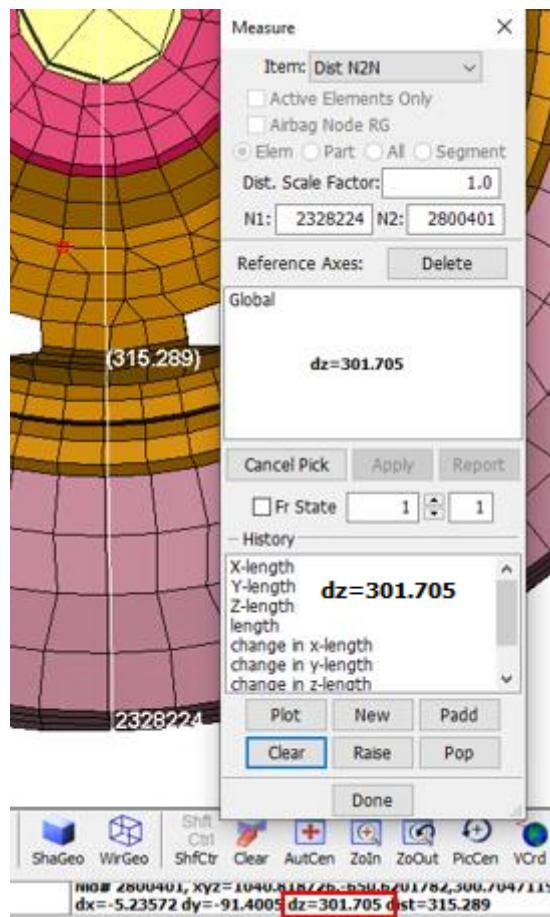


Ilustración 18: Medición del radio de la rueda

Cuando en la pestaña “keyword” se selecciona “*inicial velocity\_generation*” se observa que existen cuatro velocidades, la uno y la dos que son para los nodos normales y los puntos de masa y las velocidades 3 y 4 que definen la velocidad lineal y angular de las ruedas traseras y delanteras.

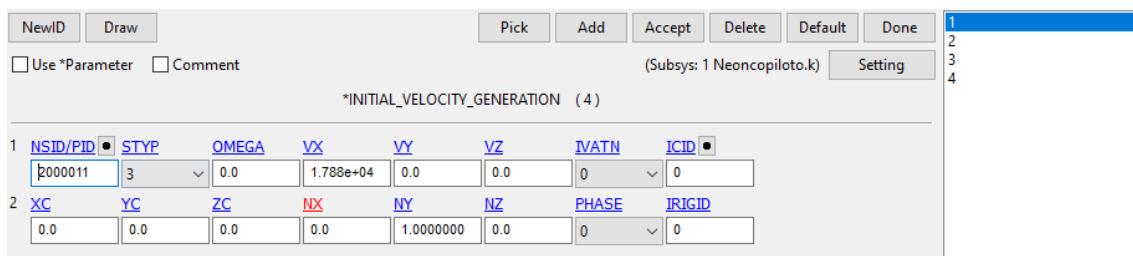


Ilustración 19: Velocidad del chasis

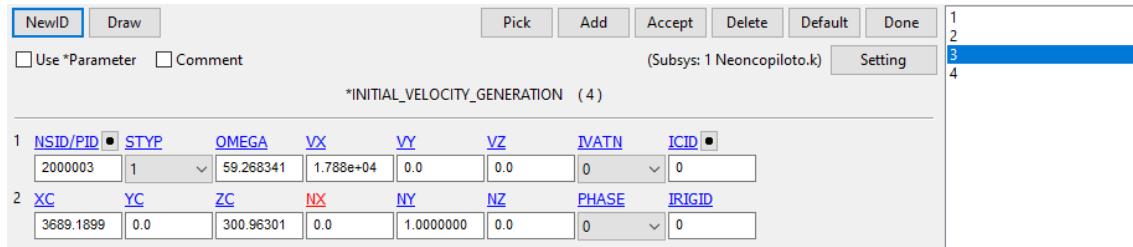


Ilustración 20: Velocidad de las ruedas



## Universidad Zaragoza

El siguiente paso es comprobar si hay algún contacto creado y hay un contacto del tipo “*Contact Automatic Single Surface*”. Estos tipos de contacto son las opciones de contacto más utilizadas en LS-DYNA, especialmente para aplicaciones de resistencia al impacto. Con estos tipos, la superficie esclava se define típicamente como una lista de ID de pieza (SSID). No se define ninguna superficie maestra (MSID). El contacto se considera entre todas las piezas de la lista de esclavos, incluyendo el auto contacto de cada pieza. Si el modelo está definido con precisión, estos tipos de contacto son muy fiables y precisos. [35]

Keyword Input Form

NewID		Draw		Pick	Add	Accept	Delete	Default	Done	
<input type="checkbox"/> Use *Parameter		<input type="checkbox"/> Comment		(Subsys: 1 Neon.k) <input type="button" value="Setting"/>						
*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_(ID/TITLE/MPP) (1)										
1	CID	TITLE		<input type="checkbox"/> MPP1 <input type="checkbox"/> MPP2						
2	IGNORE	BCKET	LCBCKT	NS2TRK	INITITR	PARMAX	UNUSED	CPARM8		
3	UNUSED	CHKSEGS	PENSE	GRPABLE	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1.0 <input type="checkbox"/> 0					
4	<input checked="" type="radio"/> SSID	<input checked="" type="radio"/> MSID	<input checked="" type="radio"/> SSTYP	<input checked="" type="radio"/> MSTYP	<input checked="" type="radio"/> SBOXID	<input checked="" type="radio"/> MBOXID	<input checked="" type="radio"/> SPR	MPR		
5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT		
	0.0100000	0.0050000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0		

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

Ilustración 21: Propiedades del contacto

El ID del conjunto de segmentos esclavo es el 2000001 entonces a ese ID de piezas hay que añadirle la barrera, esto se hace desde part data.

El modelo queda montado.



## 7. Análisis y resultados de la primera simulación

### 7.1. Definiciones

Se van a definir algunos de los parámetros que se van a analizar:

- Energía interna: Energía de deformación elástica y plástica en los componentes. [36]
- Energía cinética: Depende de la masa y la velocidad  $E_{cin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ . El vehículo pesa 1374,38 kg y va a una velocidad igual a 40 mph, la energía cinética máxima será 219,91 kJ
- Spring & Dumper Energy: Energía de muelles y amortiguadores
- Hourglass energy: Lo primero de todo es entender el efecto hourglass que es un modo de deformación en espiral de una malla de elementos finitos, resultante de la excitación de grados de libertad de energía cero. Normalmente se manifiesta como un mosaico de formas de elementos en forma de reloj de arena, en el que los elementos individuales se deforman gravemente, mientras que la sección general de la malla no se deforma. Esto ocurre en elementos sólidos 2D. Para contrarrestar este efecto el sistema añade una energía artificial. [37]
- Sliding Energy: se Energía disipada debido al deslizamiento entre dos superficies en contacto. Esta energía es una medida del calentamiento por fricción y la deformación que se produce como resultado del movimiento relativo entre las superficies.
- External Work: En este caso es casi cero porque la pared está fija y no realiza ningún trabajo sobre el coche.
- Mass Scaling: Es una técnica utilizada para aumentar la masa de ciertos elementos del modelo en una simulación. Tiene como objetivo reducir el tiempo de cálculo. El tiempo de cada paso está limitado por la estabilidad numérica que depende del tamaño de los elementos de la malla. A menor tamaño el tiempo de cómputo para mantener la estabilidad aumenta. Modificando la masa de estos elementos ayuda a disminuir el tiempo de cálculo.



## 7.2. Análisis de la primera simulación

### 7.2.1. Introducción

La primera simulación es el punto de partida para ver cómo reacciona el vehículo sin modificar ante el ensayo propuesto y proponer las modificaciones oportunas.

Se lanza la simulación en LS-DYNA en un periodo de 150ms, en la captura de pantalla siguientes se muestran el primer y último estado del vehículo.

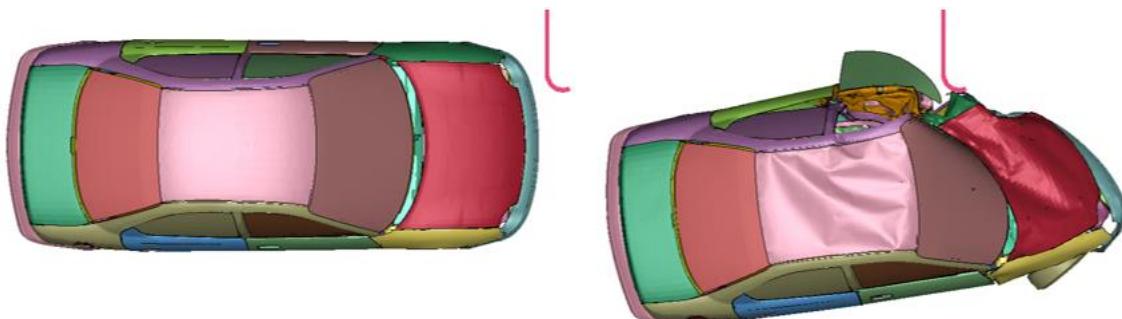
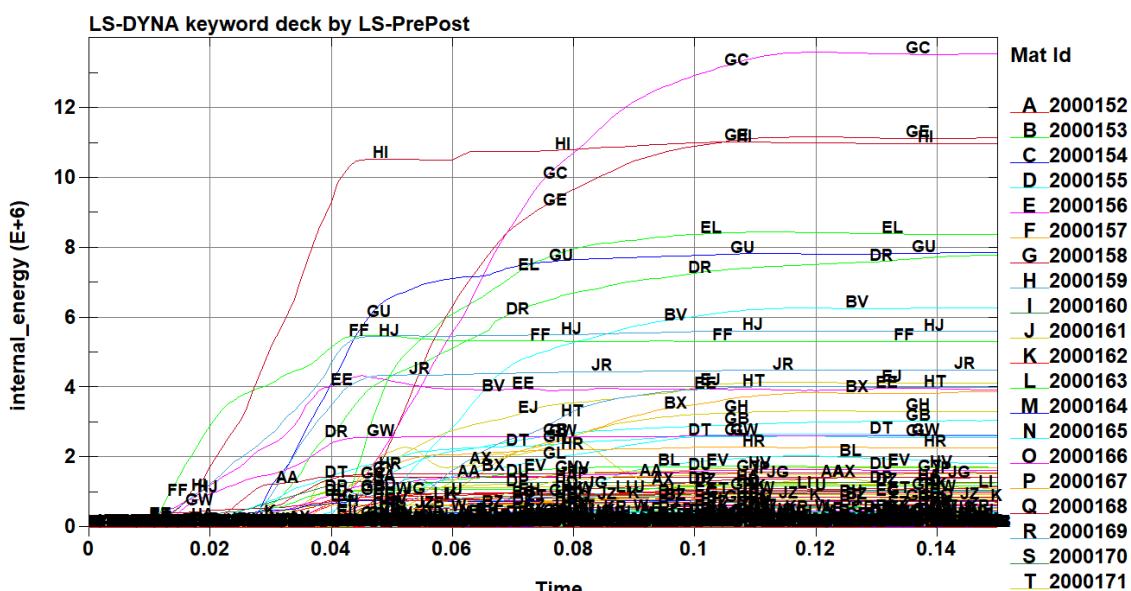


Ilustración 22: Primer y Último Instante Simulado

### 7.2.2. Elección de las piezas críticas y creación de conjuntos

Para saber cuáles son las piezas críticas se saca la energía interna por piezas y se escogen las que mayor energía interna tengan.

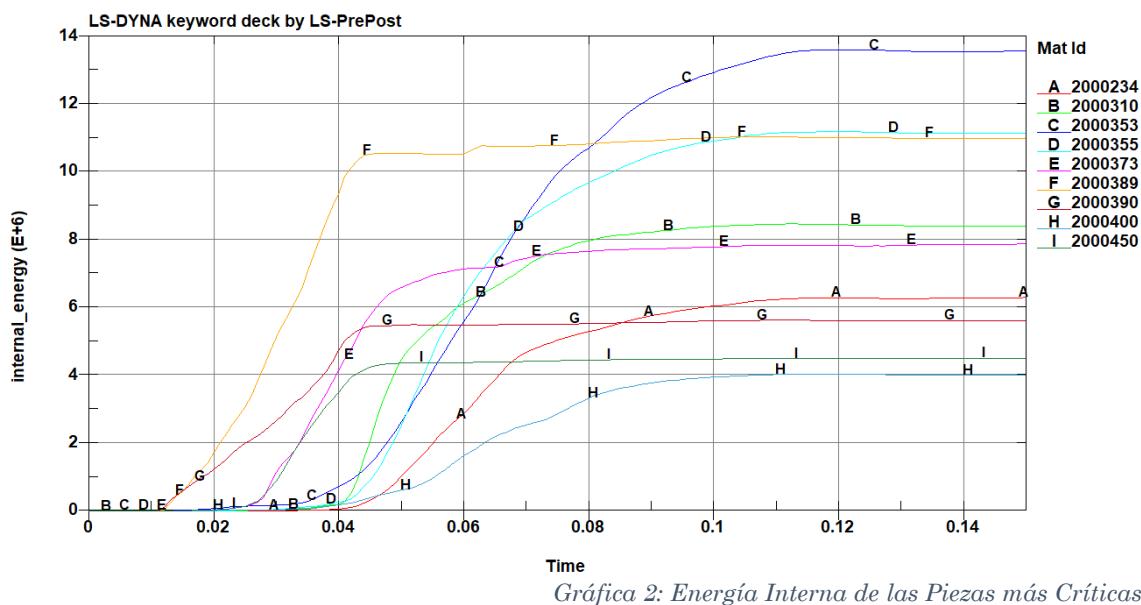


Gráfica 1: Energía Interna de Todas las Piezas



Universidad Zaragoza

Se limpia la gráfica 1 y para aislar los componentes más críticos:



A continuación, se muestran el primer y último instante simulado de las piezas más críticas.

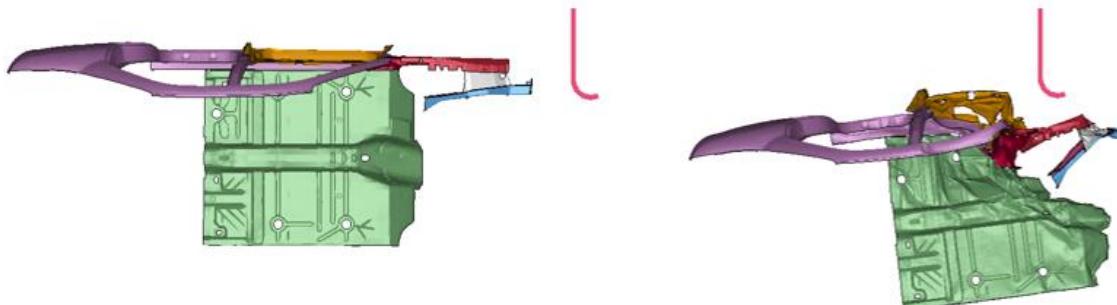


Ilustración 23: Primer y Último Instante Simulados

Los números de piezas que aparecen en la gráfica 2 corresponden a las siguientes piezas:

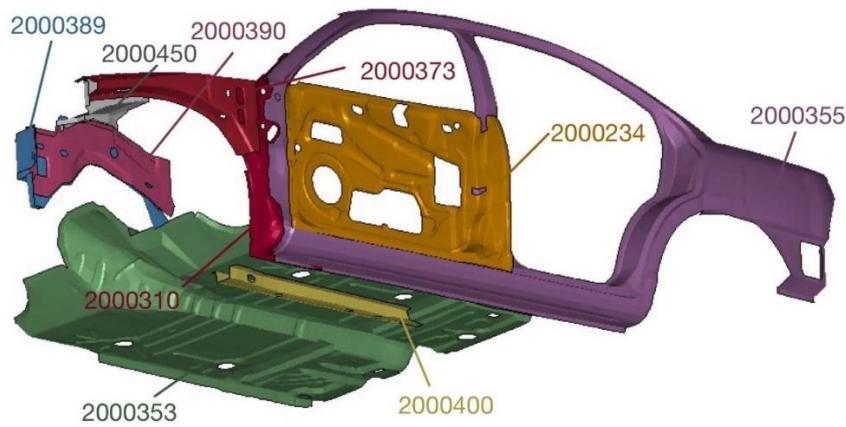


Ilustración 24: Vista de las piezas analizadas del Neon



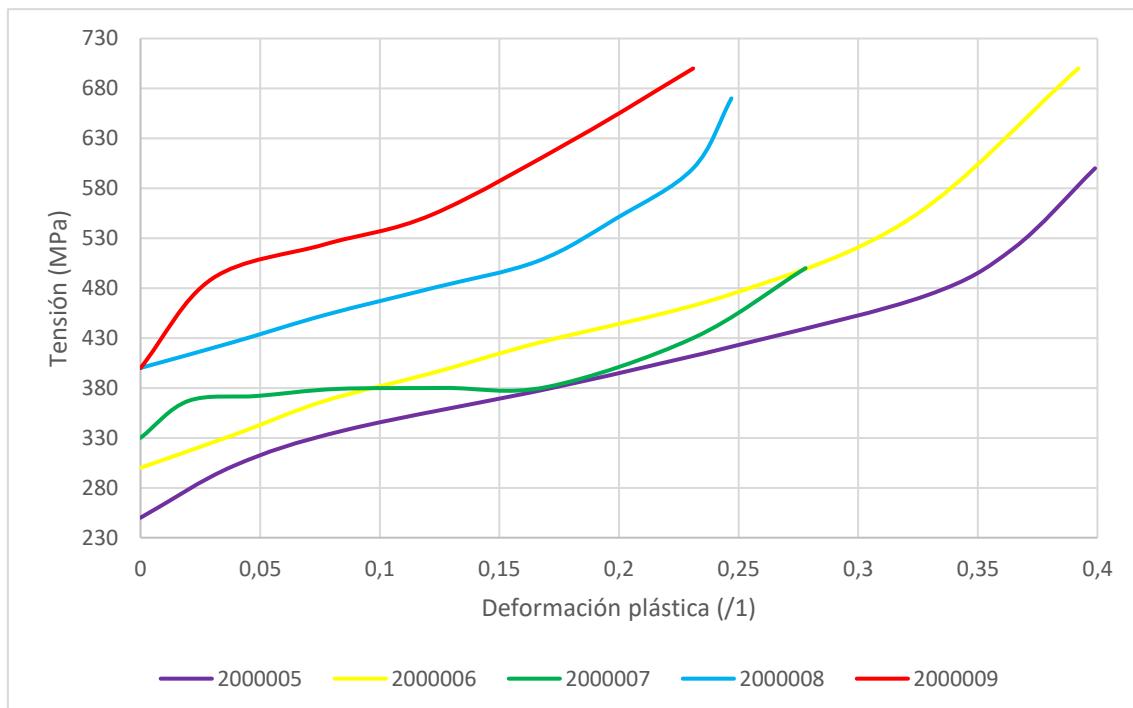
Para el análisis del ensayo se van a crear 4 conjuntos de piezas (Suelo, Pilar A, Fender y Front Rail) que son lo que se observan en la siguiente ilustración:



Ilustración 25: Conjuntos que se van a analizar Suelo, Pilar A, Fender y Front Rail

#### 7.2.3. Materiales asignados a las piezas e identificación de los mismos

Cada pieza tiene asignado un material, en total hay cinco materiales distintos que son los que se muestran en la siguiente gráfica:



Gráfica 3: Materiales asignados a las piezas analizadas

En la ilustración siguiente se muestran las piezas analizadas coloreadas según los materiales correspondientes en la gráfica anterior, permitiendo una identificación visual directa de los materiales en función de sus colores asignados.

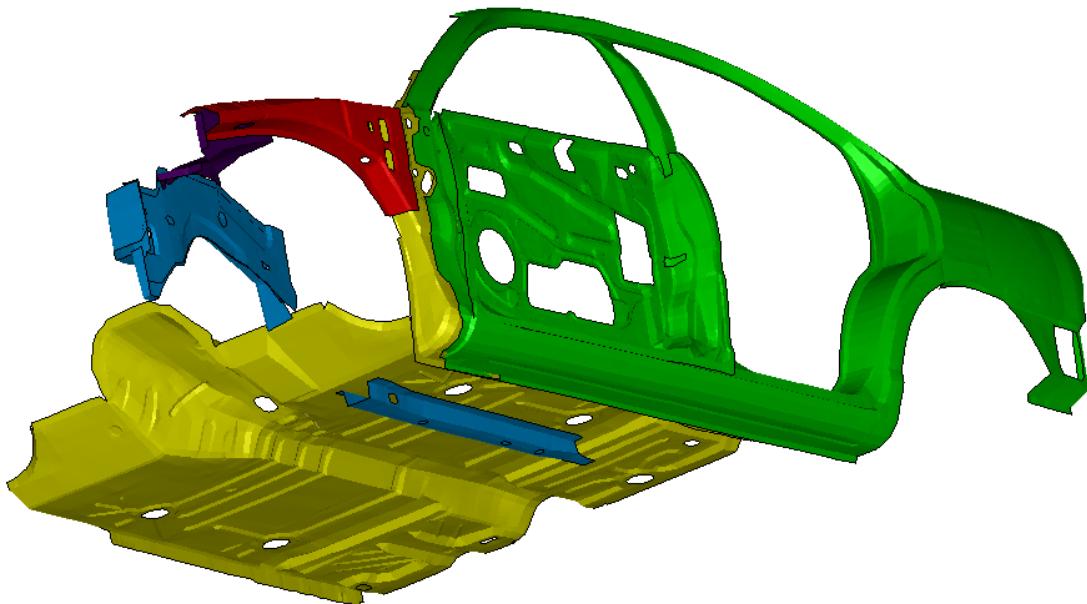


Ilustración 26: Piezas coloreadas según el material asignado

Se va a tratar de identificar los cinco materiales que han sido asignados a las piezas analizadas.

El 2.000.005 va desde los 250 MPa hasta los 600 MPa a una deformación de 0.399, este material se parece a un S500 dado que comienza con una resistencia baja que va aumentando hasta los 600MPa. El 2.000.006 tiene unas características levemente superiores al 2.000.005 lo que hace que se parezca al S550. El 2.000.007 es sin duda el más fácil de identificar pues es casi idéntico al acero S355Jr, tanto por su deformación que llega hasta el 27% como por la tensión. Si se comparan las curvas del acero 2.000.008 y el DP600 se parecen bastante si bien existen diferencias se consideran aceptables. El acero S690QL parece coincidir con los valores de elongación y tensión proporcionados. [38]

Tras realizar este análisis, se ha determinado que es poco probable que el Dodge Neón estuviese originalmente fabricado con los aceros mencionados. Sin embargo, para los fines de este trabajo se procederá bajo la suposición de que dichos materiales fueron empleados en la fabricación del vehículo.

Se busca proporcionar un marco de referencia coherente que permita el análisis estructural del vehículo.

#### 7.2.4. Análisis de resultados

Una vez se conocen todos los parámetros iniciales se puede llevar a cabo un análisis pertinente sobre la colisión. Lo primero que se puede hacer es mirar las energías internas de los conjuntos creados que se muestran en la siguiente tabla:



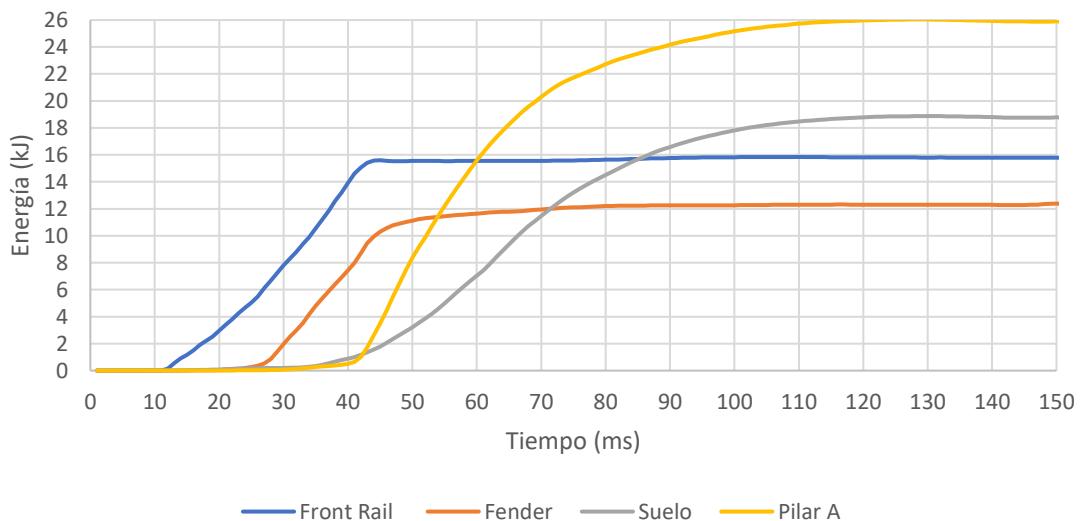
Universidad Zaragoza

Tabla 2: Resumen de Energías por Subconjuntos

	Front Rail	Fender	Pilar A	Suelo
Energía interna (kJ)	15,85	12,39	26,05	18,87
Peso (kg)	5,79	2,97	18,94	14,7
Energía interna específica (kJ/kg)	2,74	4,17	1,38	1,28

Se puede observar que el pilar A y el suelo son los elementos que más energía interna absorben, pero al mismo tiempo tienen poca energía interna específica, esto se debe que son piezas relativamente pesadas si se comparan con el fender y el front rail.

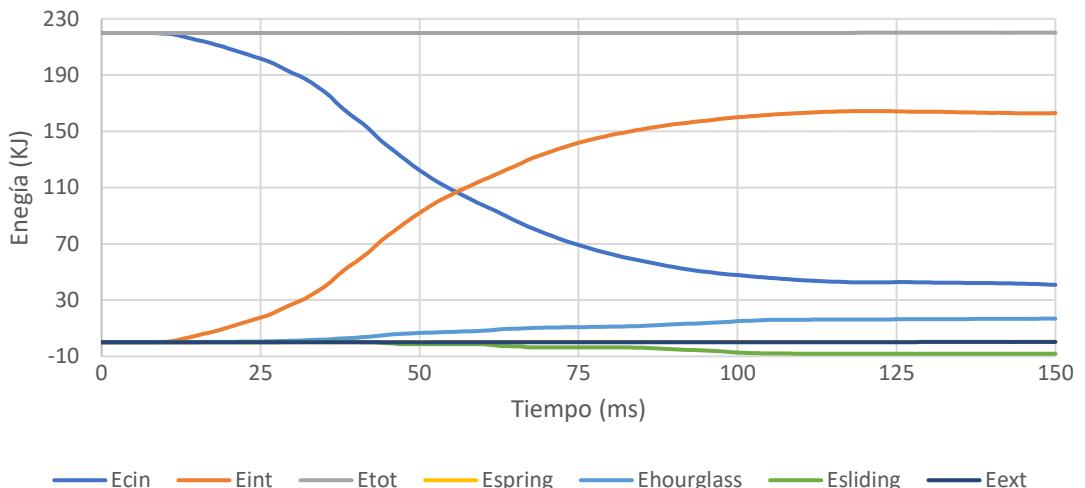
El fender absorbe el triple de energía interna por kilogramo de peso que el pilar A y el suelo y el front rail el doble.



Gráfica 4: Energías Internas por Conjuntos

Sabiendo como es el choque y qué cuatro conjuntos hay se puede adivinar a qué curva corresponde a cada conjunto. La primera en aumentar corresponde al conjunto que primero actúa que es el front rail, la segunda curva corresponde al fender delantero, la tercera al pilar A y la cuarta la suelo.

El front rail empieza a deformarse a partir de 12 ms, el fender delantero empieza a deformarse a partir de 25 ms, el pilar A y el suelo empiezan a deformarse a partir de 40 ms.



Gráfica 5: Energías del Vehículo

Tabla 3: Energías máximas en kJ

E cinética	E interna	E total	E spring	E hourglass	E sliding	E externa
219,91	164,398	220,119008	0,366839	16,8127	0,516948	0,227946

Comparando estos resultados con los de la gráfica 5 y la tabla 2 se observa que el pilar A es el que más energía interna absorbe con un 15,8% de la total, luego el suelo que absorbe un 10,7%, el front rail un 10,1% y el fender que absorbe un 7,5% de la total.

Durante la simulación la energía total se mantiene constante pues hay una variación mínima del 0,1% entre el valor máximo y mínimo, aparte de eso también es importante que la energía hourglass no supere un 10% la energía total, en nuestro caso es un 7,65% de la total. Otro parámetro a importante a la hora de ver si una simulación es válida es la masa añadida al vehículo durante la simulación que es del 6,24 % y es muy inferior al 10% estipulado. [39]

Las deformaciones dentro del habitáculo son un parámetro a tener en cuenta pues este se tiene que deformar lo menos posible para mantener en vida a sus ocupantes.

En la siguiente ilustración se observan las tensiones de von mises. Se observa a simple vista que el suelo no tiene tensiones muy altas (en el suelo no superan los 1.100 MPa) aunque en algún nodo del conjunto de piezas estudiado alcanza los 1692 MPa.



Universidad Zaragoza

Effective Stress (v-m)

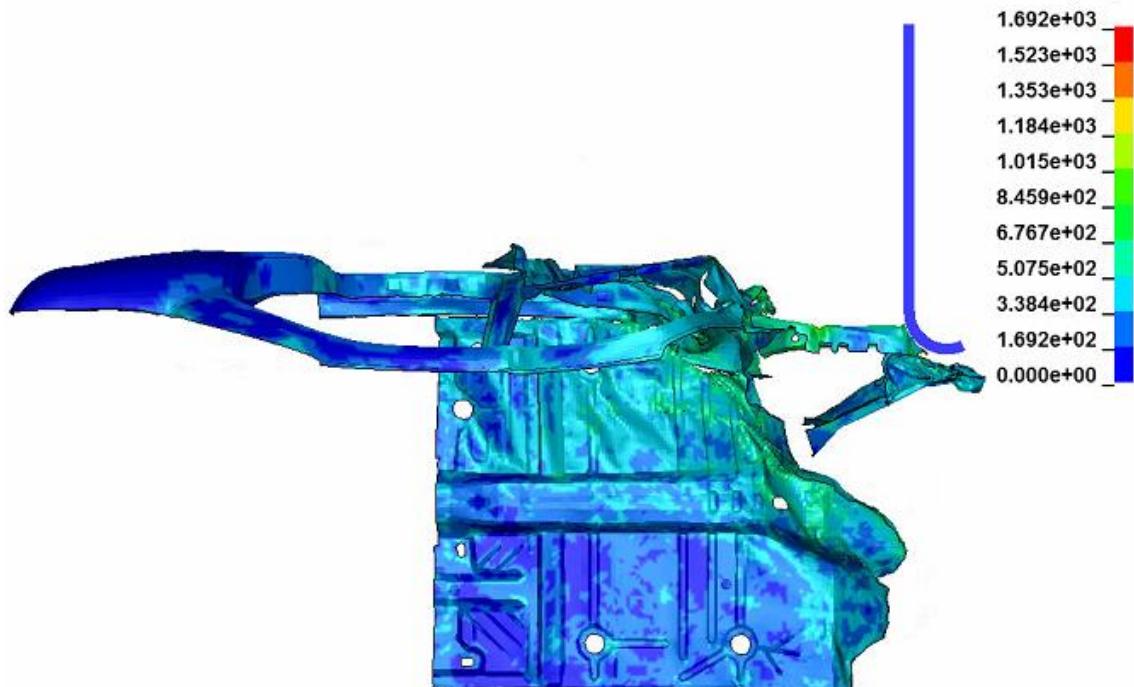
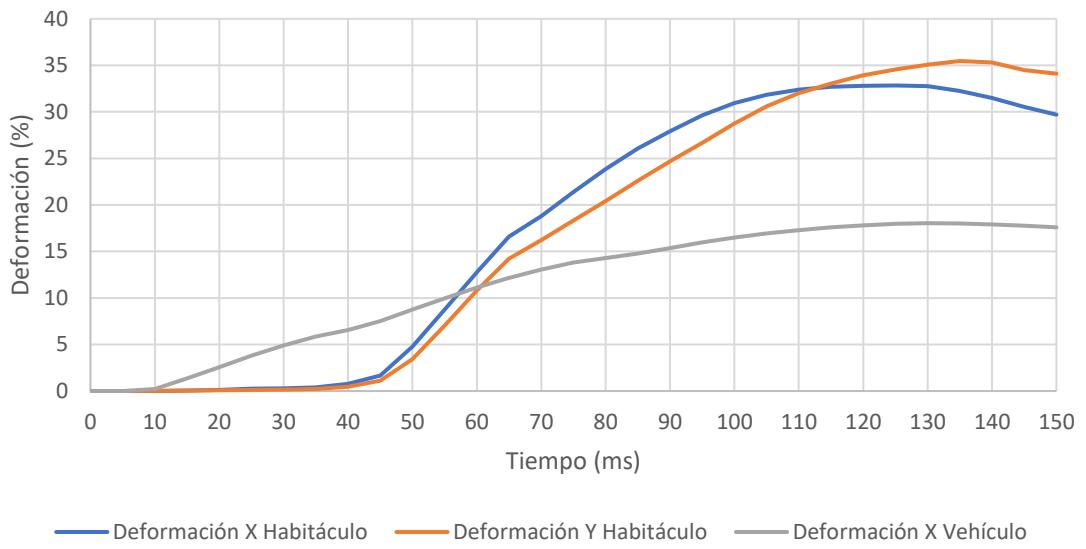


Ilustración 27: Representación de la tensión de Von Mises en el instante 0,075 s



Ilustración 28: Nodos Usados Para Medir las Deformaciones y Aceleraciones

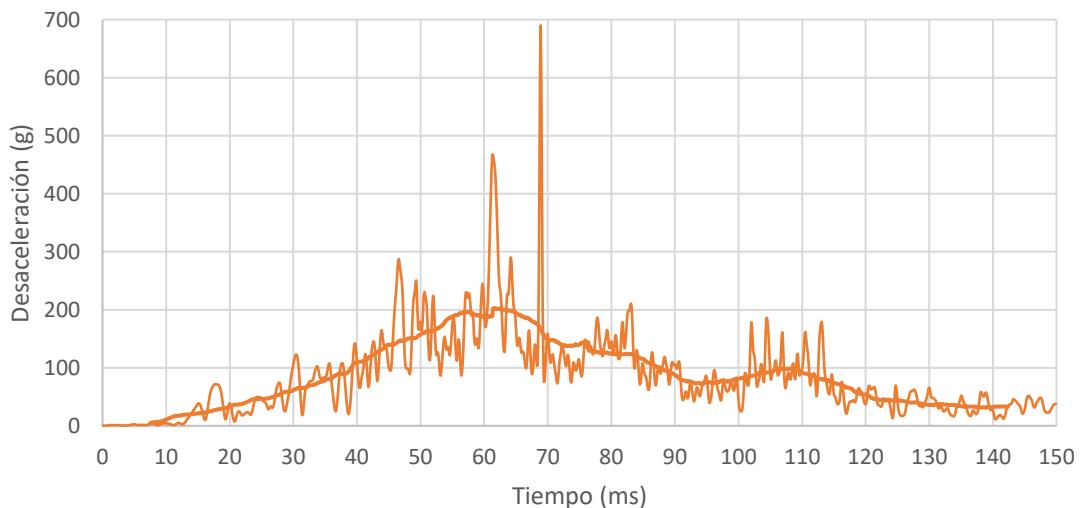
Hay tres nodos se sitúan en el suelo del habitáculo y se sitúan alineados en el eje X (eje longitudinal) e Y (eje transversal) respectivamente y otros dos que se sitúan delante y detrás del vehículo alineados en el eje X.



Gráfica 6: Deformaciones medidas

La deformación máxima del habitáculo en el eje X es de 32,84% mientras que la del eje Y es de 35,46% y la del vehículo es del 18,04%.

Las aceleraciones resultantes de la colisión se ven reflejadas en la siguiente gráfica y se sacan de un acelerómetro que hay entre los dos conductores más o menos a la altura del salpicadero.



Gráfica 7: Aceleración filtrada con media móvil ( $\pm 7.5$  ms) y con filtro butterworth de 1kHz.

Se muestran dos aceleraciones, la línea más constante que es la aceleración media sobre 15 milisegundos y luego la aceleración a la cual se le ha aplicado un filtro Butterworth de 1 kHz. [40]

Tabla 4: Resumen de las aceleraciones

Aceleración filtrada media (g)	83,74
Aceleración filtrada máxima (g)	689,75



A continuación, se va a analizar las posibles lesiones que van a ocurrir como resultado de la colisión. La exposición a altos niveles de desaceleración origina la aparición de síntomas y signos clínicos, incluyendo el riesgo de pérdida de conciencia si se someten a ella durante un tiempo determinado. Este fenómeno se debe a la rápida reducción de la velocidad, que somete al cuerpo humano a fuerzas extremas que pueden superar sus límites fisiológicos.

Uno de los efectos más comunes de la intensa desaceleración es el latigazo cervical. Este tipo de lesión ocurre porque la cabeza, a diferencia del torso, no está sujetada por ningún cinturón de seguridad. Durante un impacto frontal, el torso se detiene abruptamente debido al cinturón de seguridad, pero la cabeza continúa moviéndose hacia adelante por inercia, lo que puede causar una hiperextensión seguida de una rápida flexión del cuello. Esta acción puede provocar daños en los músculos, ligamentos y discos intervertebrales del cuello, resultando en dolor crónico, rigidez y, en casos graves, daño neurológico. [41]

Los ocupantes del vehículo pueden sufrir lesiones en las espinillas debido al impacto de las piernas con la columna de dirección, al estar menos protegidas las lesiones van desde rasguños hasta fracturas de la tibia o el peroné.

El propio despliegue del airbag que está diseñado para salvar vidas puede provocar lesiones como roturas de costillas o hematomas en la parte del pectoral, esto es debido a la brutalidad del accidente, lo mismo para el cinturón de seguridad. A pesar de estos posibles daños es de vital importancia usar estos dos elementos de seguridad pasiva nos salvan de una muerte casi segura en cualquier accidente.

Cabe recalcar que este choque es uno de los accidentes frontales más críticos que existen. La ilustración 5 que recoge los porcentajes de cada tipo de accidente muestra que los choques frontales con offset ocurren en un 12,3% de los accidentes.

Dentro de este porcentaje, cabe señalar que muy pocos accidentes implican una barrera rígida dado que las estrictas normativas de seguridad vial impiden la presencia de elementos rígidos desprotegidos en vías.

Para hacerse una idea de la magnitud del accidente también se puede usar el HIC (head injury criterion) o “*criterio de lesión encefálica que es un índice relacionado con la probabilidad de sufrir algún tipo de traumatismo craneoencefálico como resultado de un impacto o deceleración violenta de la cabeza en algún tipo de accidente. El HIC se usa como índice estándar en la industria automovilística, en la industria de equipamientos deportivos y en la de fabricación de cascos militares como índice estándar para predecir posibles daños encefálicos.*

El valor del CLE se obtiene a partir de la curva de deceleración, generalmente obtenida de ensayos mediante un acelerómetro colocado en el centro de gravedad de un dummy de ensayos de choque sometido a las fuerzas típicas de un choque frontal.” [42]



## Universidad Zaragoza

En este caso no hay ningún dummy con lo cual los resultados no son fiables, pero sirve para hacerse una idea

$$HIC = \max_{0 \leq t_1 < t_2 \leq \Delta} \left\{ \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2,5} (t_2 - t_1) \right\}$$

Se obtiene un valor de HIC de 8776.

La masa encefálica sólo puede soportar grandes aceleraciones si son de muy corta duración, en caso contrario se produce algún tipo de traumatismo encefálico.

*“Estadísticamente se ha determinado con para un HIC de 1000, una de cada seis personas sufre una lesión con riesgo de muerte en su masa encefálica (más exactamente existe un 18% de probabilidad de lesión cerebral grave, un 55% de lesión de consideración y un 90% de lesión moderada en un adulto medio)”. [42]*

Hay que tener en cuenta que en la cabeza del dummy estaría sometida a menos desaceleración que los nodos seleccionados pues está estaría protegida por los airbags que ayudan a disminuir la desaceleración.

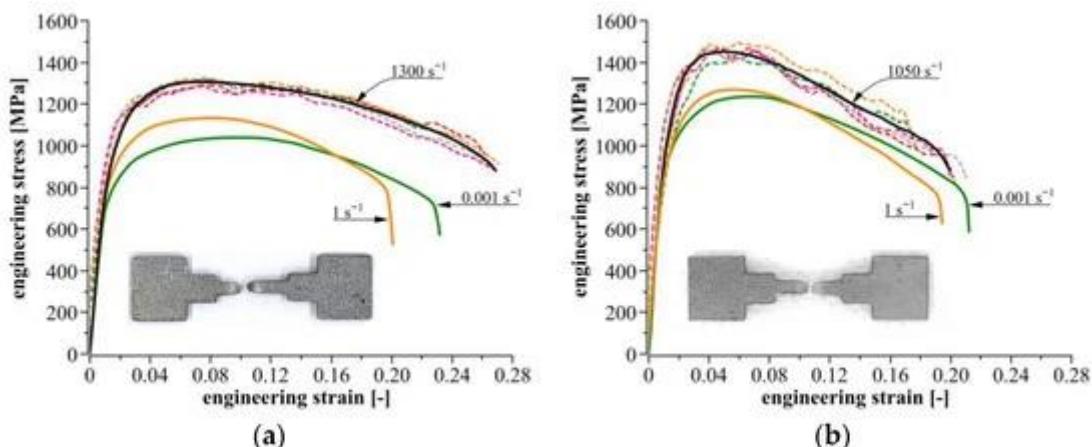
## 8. Planteamiento de modificaciones y resultados

Para mejorar el rendimiento del vehículo ante el ensayo propuesto se han escogido cuatro aceros que se usan hoy en día en el mundo de la automoción que son el Docol® 800DP dual fase, el Docol® 1000DP dual phase, Docol® 1200M martensítico, Docol® 1400M martensítico. [43],[44],[45],[46].

Con aceros con buenas propiedades mecánicas, los aceros dual fase (DP) “*ofrecen un excelente equilibrio entre ductilidad, una alta tensión de rotura, se conforman en frío fácilmente y tienen una capacidad muy elevada para absorber energía en caso de impactos*” [47]. Los aceros martensíticos combinan altas resistencias a tracción con una buena ductilidad, esto los convierte en aceros ideales “*para el aligerado de vehículos como para la protección mejorada contra impactos, especialmente en zonas anti-intrusión*” [48] como puede ser el habitáculo.

Para introducir estos materiales en LS-DYNA se requieren una serie de parámetros conocidos, pero otros que hay que calcular que son los coeficientes de Cowper-Symonds, que dictaminan el comportamiento del material a diferentes velocidades de deformación. [49]

Se va a usar la gráfica de abajo [50] para sacar los coeficientes, la gráfica (a) nos va a permitir sacar los coeficientes para los dos materiales fase dual que tenemos (800DP y 1000DP) y la gráfica (b) nos permitirá sacar los coeficientes para materiales martensíticos (1200M y 1400M).



Gráfica 8: Curvas tensión-deformación cuasiestáticas ingenieriles y de alta velocidad de deformación determinadas a partir de experimentos de resistencia a la tracción para: (a) Docol 1000DP; (b) Docol 1200M [50].



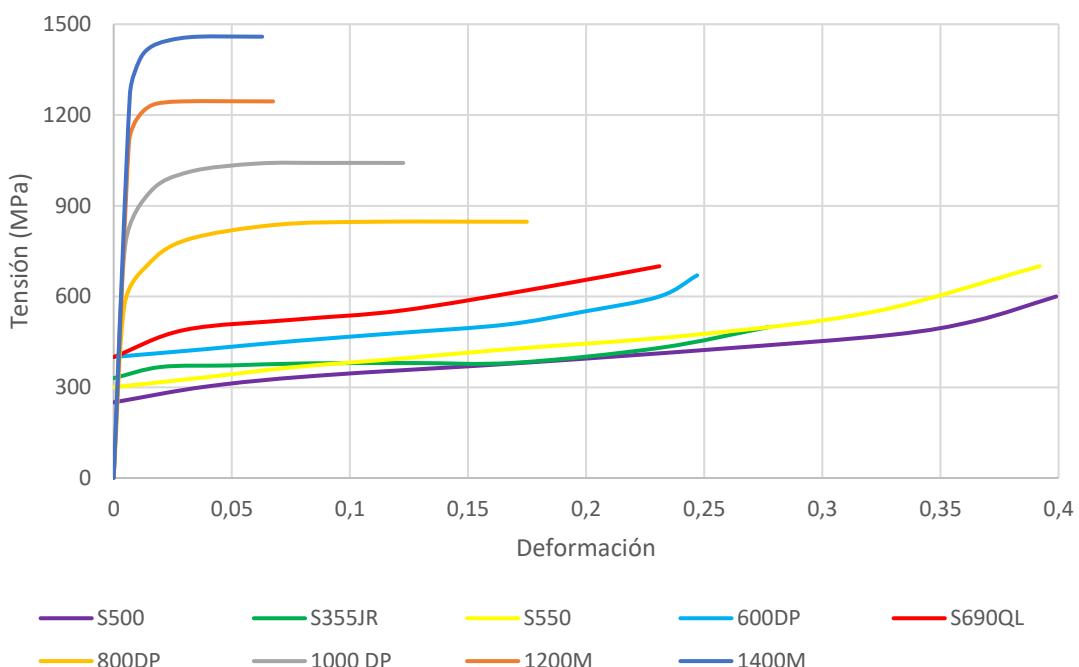
El cálculo de coeficientes se efectúa con la siguiente fórmula:

$$\frac{\sigma_{dinámica}}{\sigma_{estática}} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{1/P}$$

Dado que hay dos incógnitas se necesitan dos ecuaciones. La  $\sigma_{estática}$  se saca da curva con una deformación de  $0,001\text{s}^{-1}$  y las  $\sigma_{dinámicas}$  de las otras dos curvas. Por ejemplo, con el docol 1000DP las dos ecuaciones serían las siguientes:

$$\frac{1100}{1000} = 1 + \left(\frac{1}{C}\right)^{1/P} \quad y \quad \frac{1300}{1000} = 1 + \left(\frac{1300}{C}\right)^{1/P}$$

Para los aceros fase dual estos son los coeficientes:  $C = 1,353\text{e+07}$  y  $P = 8,23$  y para los martensíticos:  $C = 9,871\text{e+06}$  y  $P = 5,696$ .



Gráfica 9: Curvas tensión deformación cuasiestáticas de varios metales usados en la automoción.

Si se hace una comparativa de los materiales se observa que los seleccionados frente a los de origen tienen más límite elástico, pero llegan a menos deformación, esto significa que absorberán menos energía de deformación que los materiales de origen y por lo tanto deformarán menos protegiendo así al ocupante del vehículo.

La tensión de los aceros anteriores del modelo son true stress mientras que la de los aceros nuevos son engineering stress. En el rango elástico no cambian, pero en el plástico sí que hay diferencia, mientras que las verdaderas aumentan las ingenieriles disminuyen. Se obtendrán unos resultados más conservadores, pero menos precisos.

Calculando la tenacidad de cada material con el área bajo la curva se obtiene un ranking de los materiales según su tenacidad, de menor a mayor queda de la



Universidad Zaragoza

siguiente manera: 1200M, 1400M, S355JR, 800DP, 600DP, S690QL, 1000DP, S500 y S550.

Para saber qué combinación de materiales es mejor se va a hacer un análisis para saber qué material ofrece mejor protección ante el ensayo. Para ello se harán cuatro simulaciones por conjunto, lo que se resumen en un total de 16 simulaciones en vez de las 256 que harían falta para simular todas las combinaciones posibles.

Una vez escogidos los materiales de cada conjunto se procederá a analizar la variación específica en comparación al vehículo original. Para ello cada variación se dividirá entre el peso de cada conjunto para así poder ordenar los conjuntos según su aportación relativa por kilogramo.

Se crearán cuatro modelos, el modelo con una optimización que será solo modificando el material de la pieza que más aporta, la segunda optimización modificando los materiales de los dos conjuntos que más aportan y así hasta la cuarta. Estos modelos se compararán entre ellos y con el vehículo original.

A continuación, para aligerar el peso del vehículo se tratará de disminuir el espesor de las piezas estudiadas sin empeorar el comportamiento con respecto al vehículo original.

## 8.1. Elección del material del Suelo

Se van a llevar a cabo cuatro simulaciones cambiando los materiales de las piezas pertenecientes al conjunto del suelo y se van a analizar los resultados.

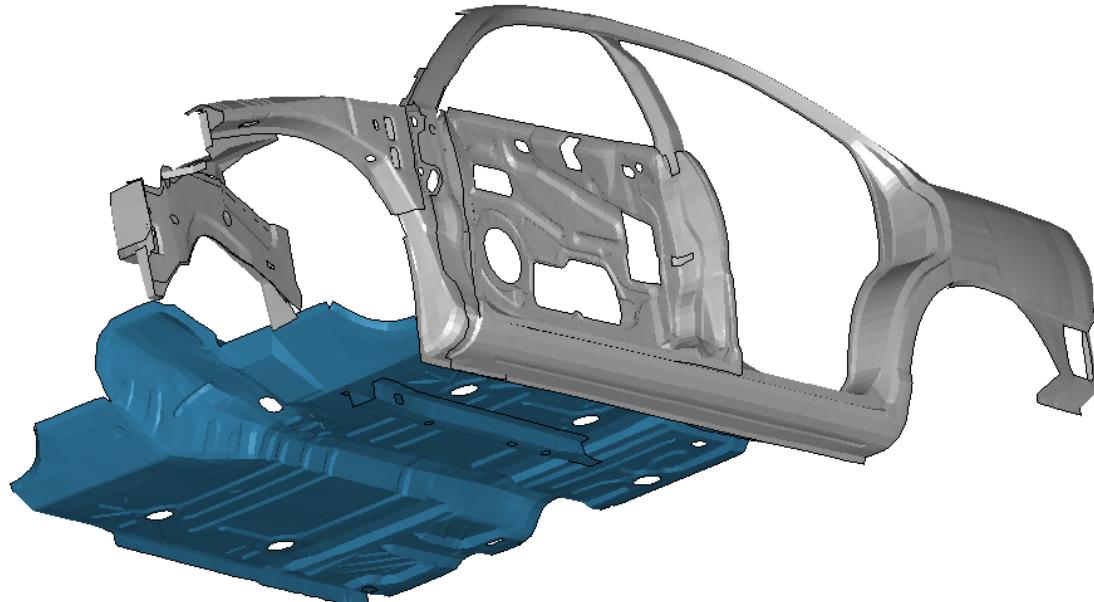
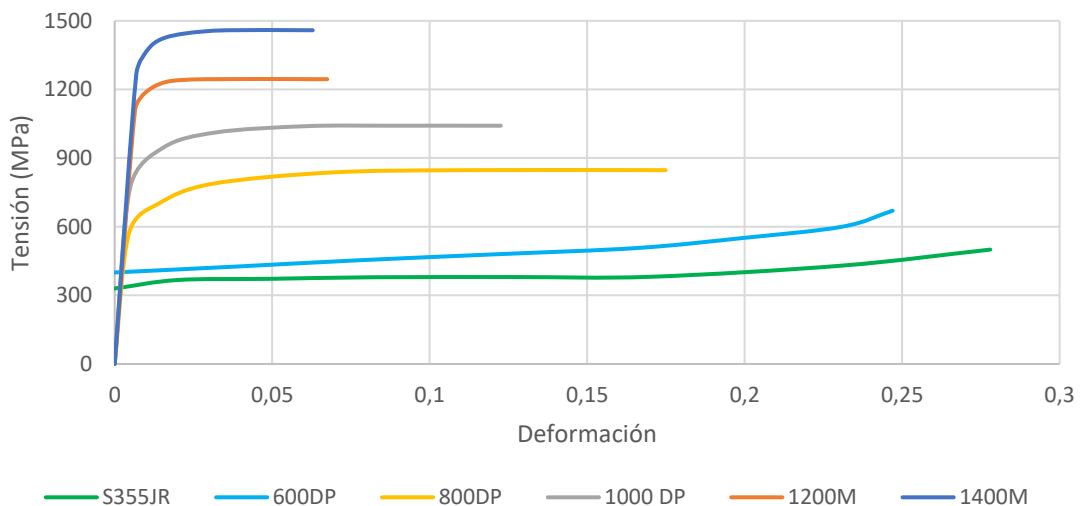


Ilustración 29: Piezas del Conjunto del Suelo

En la siguiente gráfica se exponen los materiales de origen, así como los que los van a sustituir.

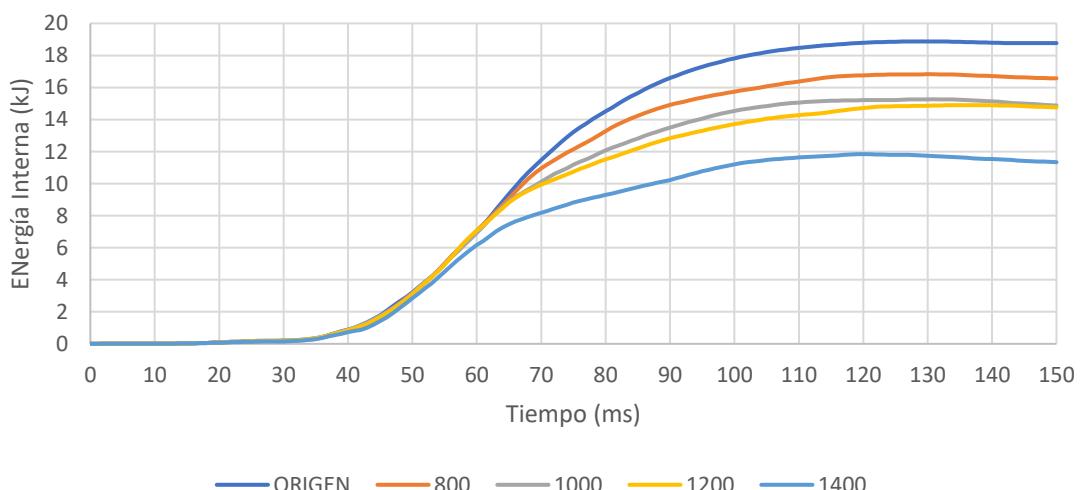


Gráfica 10: Materiales de Origen del suelo vs Nuevos

De las curvas de la gráfica anterior se puede sacar que en el conjunto modificado la resistencia va aumentando y su capacidad para deformarse va disminuyendo a medida que se aumenta el límite elástico, esto tendrá como consecuencia una disminución de la capacidad de la pieza para absorber energía interna como se puede observar en la columna “Suelo” de la tabla siguiente.

Tabla 5: Energías Internas Máximas de Cada Material Simulado por Subconjuntos

	Front Rail	Fender	Pilar A	Suelo
Energía Interna modelo original (kJ)	15,85	12,39	26,05	18,87
Energía Interna con 800 DP (kJ)	19,28	12,93	29,24	16,82
Energía Interna con 1000 DP (kJ)	16,28	12,47	27,70	15,26
Energía Interna con 1200 M (kJ)	16,09	13,02	27,99	14,9
Energía Interna con 1400 M (kJ)	15,96	12,88	27,37	11,84



Gráfica 11: Energías Internas del Suelo en Función de los Materiales Asignados



## Universidad Zaragoza

La energía Interna del suelo disminuye a medida que se va aumentando el límite elástico, pero en las demás piezas va aumentando, esto puede ser a que el hecho de que el suelo al ser más rígido deforma menos, pero hace que los otros elementos deformen más y por ende absorban más energía interna. Por ahora parece que el Docol 1400M es una buena opción dado que el suelo es un conjunto que no tiene que deformarse, a continuación, se verá si los demás datos confirman esta suposición.

Tabla 6: Energía Interna Máxima para cada Material Simulado

	Original	800DP	1000DP	1200M	1400M
Energía Interna Máxima (kJ)	165,65	170,68	165,64	168,30	165,54

La variación de energía interna máxima es de un 3,13% con lo cual significa que, aunque la energía interna del suelo disminuya aumenta la de otras piezas.

En la siguiente tabla vienen recogidas las máximas deformaciones del habitáculo y del vehículo:

Tabla 7: Deformaciones Máximas

	ORIGINAL	800DP	1000DP	1200M	1400M
Deformación X Habitáculo	-32,84%	-30,24%	-31,5%	-30,06%	-23,48%
Deformación Y Habitáculo	-35,46%	-37,93%	-40,39%	-42,73%	-36,4%
Deformación X Vehículo	-18,04%	-17,69%	-17,77%	-18,65%	-16,91%

Son parámetros muy importantes si se combinan con las aceleraciones pues se tiene que buscar un equilibrio entre los dos parámetros si la aceleración es relativamente baja pero la deformación es muy alta el accidente es mortal, en el caso contrario también.

Si sólo se tuviera en cuenta en la deformación el mejor material a priori sería el DOCOL 1400M que pese a tener una deformación en Y un punto superior al original tiene menos deformación en X en el habitáculo (-10 puntos) y una deformación en X del vehículo un poco menos (-1 punto).

Tabla 8: Aceleraciones en Función del Material

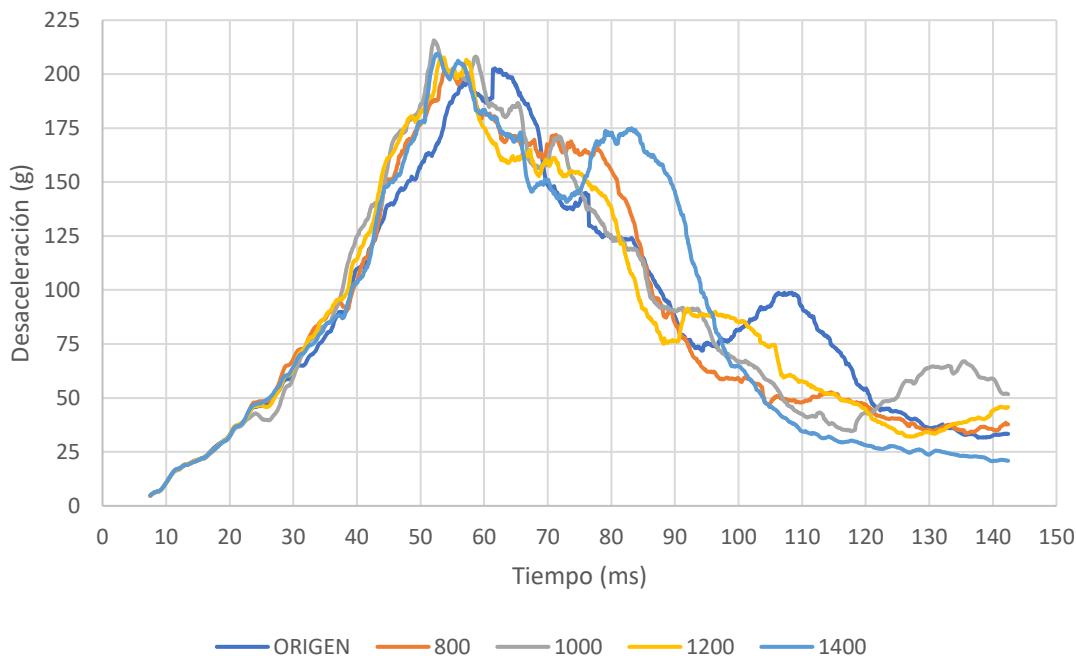
	ORIGINAL	800DP	1000DP	1200M	1400M
Aceleración media (g)	83,74	82,08	85,50	83,37	81,57
Aceleración máx. (g)	689,8	371,0	454,4	391,4	468,5
HIC (15ms)	8775	8776	10245	9329	9515

En la tabla superior vienen datos de la aceleración media durante el choque y máxima, así como el HIC.

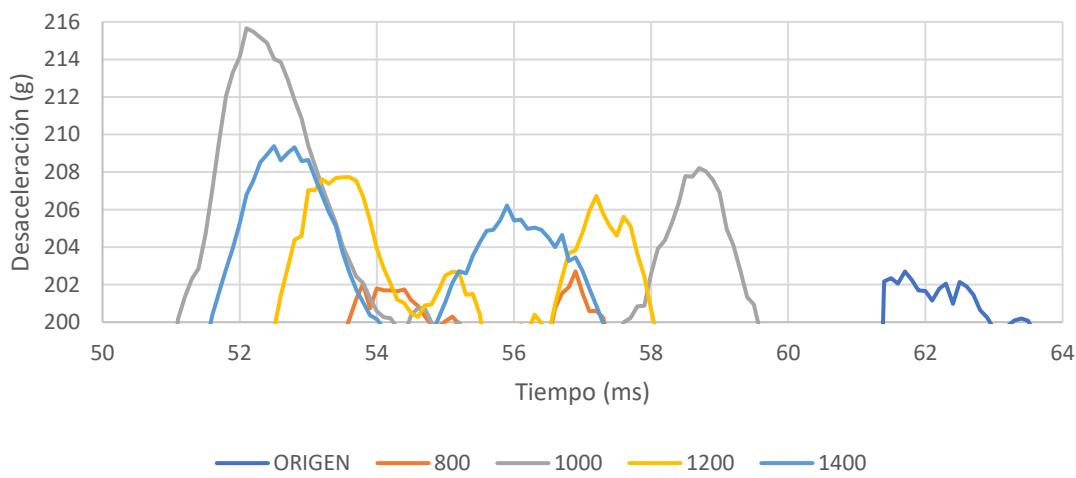
Ordenando los materiales según la aceleración máxima de menor a menor queda así: 800DP, 1200M, 1000DP, 1400M y Original y haciendo lo mismo con el HIC queda: Original, 800DP, 1200M, 1400M y 1000DP.



Esta diferencia se debe a que para el cálculo del HIC se tiene en cuenta la aceleración promedio durante unos quince milisegundos, en la aceleración filtrada. Por ejemplo, en la simulación usando el modelo original se ve que el valor máximo de la aceleración es el más alto, pero sin embargo el HIC es valor más bajo lo que demuestra que en la aceleración filtrada hay un pico que sube hasta los 690 g.



Gráfica 12: Aceleración filtrada con media móvil ( $\pm 7.5$  ms)



Gráfica 13: Detalle de la aceleración filtrada con media móvil ( $\pm 7.5$  ms)

Como se puede ver en la gráfica detallada si ordenamos los materiales según la aceleración máxima el orden coincidirá con el que se ha hecho antes con el HIC.

Las curvas de la gráfica 12 son más o menos parecidas hasta los 75 milisegundos, luego hay curvas que se separan de las demás.



Universidad Zaragoza

Una vez analizado los resultados se procede a hacer un ranking del más optimo al menos optimo.

El material más óptimo para el suelo es el DOCOL 1400M pues es el que presenta menor aceleración media, así como el que menos deforma en total en comparación con los demás materiales, su único punto débil es que tiene un HIC ligeramente superior a los demás materiales, pero es algo que se puede sacrificar si se quiere una menor deformación estructural.

El segundo puesto es para el DOCOL 800M que destaca por tener el valor de HIC más bajo de todos los materiales simulados y además logra menores deformaciones en el eje X tanto en el habitáculo como en el vehículo, no se logra disminuir la deformación en Y con respecto al modelo original. Si se considerara el costo del material como un factor determinante, el DOCOL 800M podría ser la primera opción debido a su excelente relación precio-calidad.

La tercera opción sería dejar el material original pues con respecto a los demás materiales ya que ofrece unos valores aceptables en términos de deformación, aceleración, como de HIC en comparación con los materiales alternativos.

Las dos últimas opciones son el 1000DP y el 1200M, el 1200M tiene un HIC más elevado, así como deformaciones en el eje y del habitáculo y del vehículo más altas por lo tanto el acero 1000DP es más adecuado que el acero 1200M.

## 8.2. Elección del Pilar A

Se procede a simular la colisión cambiando los materiales asignados al pilar A, a continuación, se muestra las piezas pertenecientes al conjunto del pilar A, así como una gráfica que compara los materiales que se van a simular con los originales.

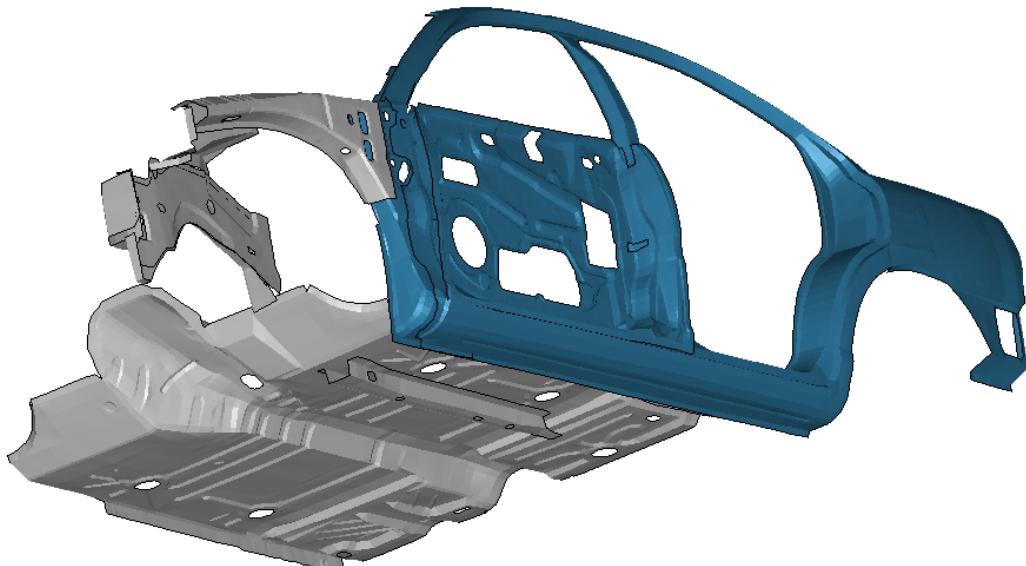
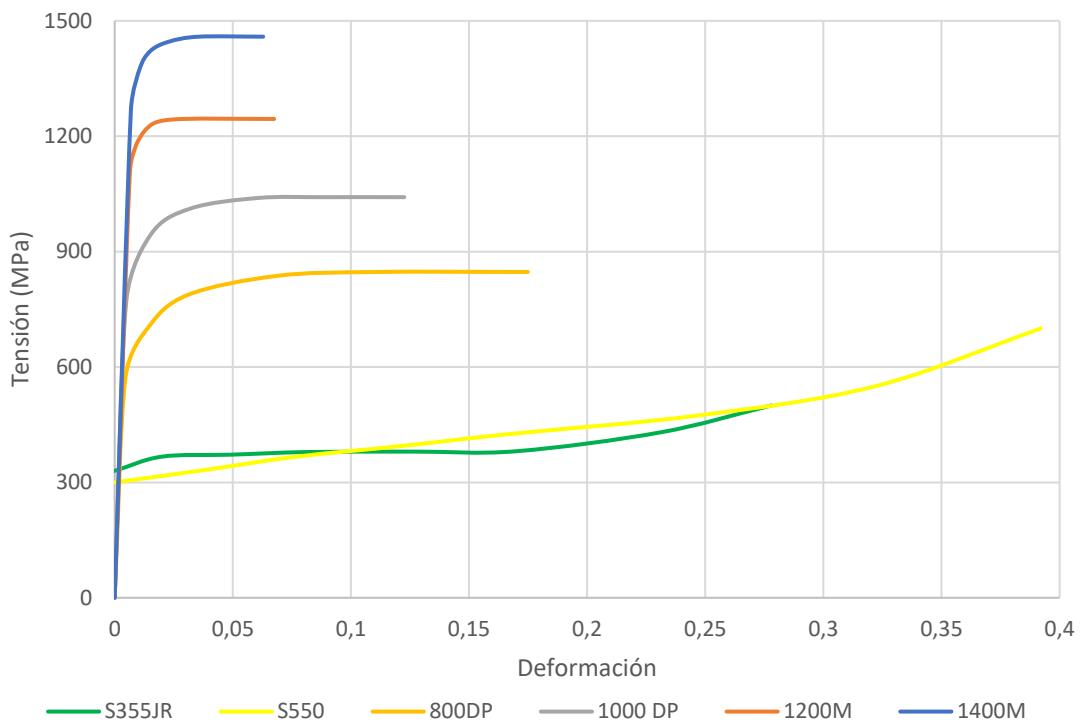
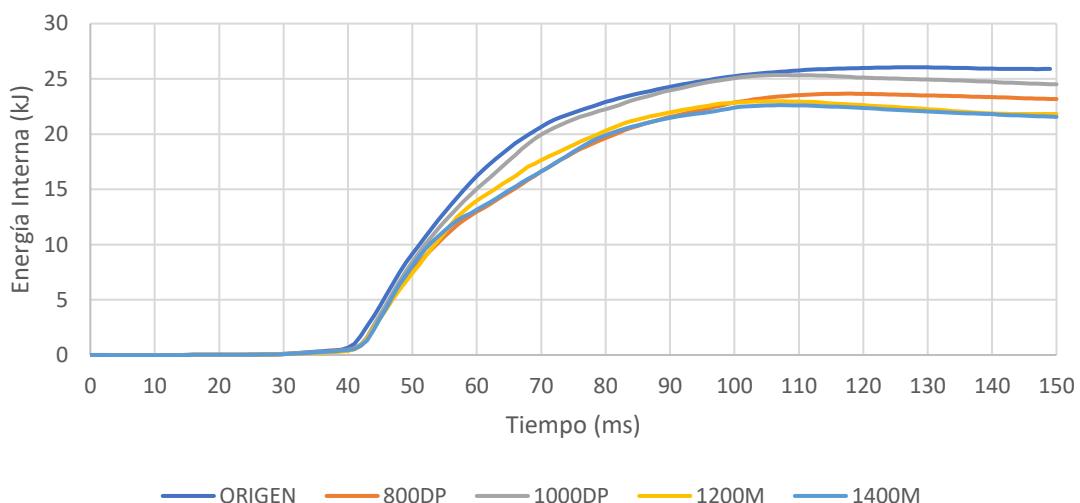


Ilustración 30: Piezas del Pilar A



Gráfica 14: Materiales del Pilar A Nuevos vs Originales

Se ven unos materiales de origen a priori más tenaces, con menor límite elástico pero mayor capacidad de deformación antes de rotura.



Gráfica 15: Energía Interna del Pilar-A con distintos materiales

El material que interesaría sería el 1400M otra vez dado que el Pilar A tiene que deformarse poco y este es el que menos energía absorbe.



Universidad Zaragoza

Tabla 9: Deformaciones cambiando el material del Pilar A

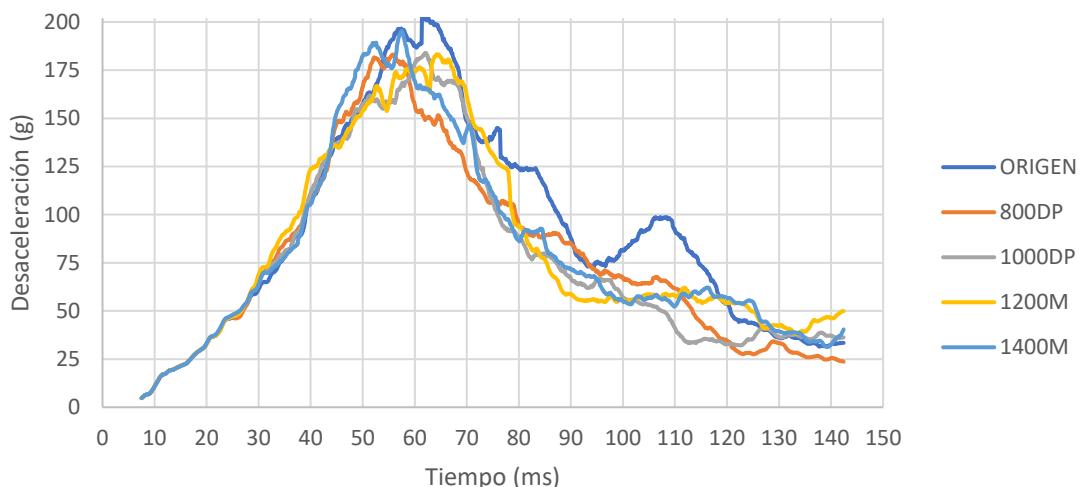
	ORIGINAL	800DP	1000DP	1200M	1400M
Deformación X Habitáculo	-32,84%	-29,47%	-27,37%	-26,57%	-27,61%
Deformación Y Habitáculo	-35,46%	-33,37%	-30,57%	-29,90%	-30,81%
Deformación X Vehículo	-18,04%	-17,19%	-15,88%	-15,14%	-15,61%

De mejor a peor material en términos de deformación se ordenarían de la siguiente manera: 1200M, 1000DP, 1400M y 800DP.

Tabla 10: Aceleraciones cambiando el material del Pilar A

	ORIGINAL	800DP	1000DP	1200M	1400M
Aceleración media (g)	83,74	71,90	71,86	77,23	75,98
Aceleración máx. (g)	689,8	358,2	360,6	659,1	426,0
HIC (15ms)	8775	6811	6883	6817	8004

Entre el 1200M y el 1000DP hay una clara diferencia en términos de aceleración, viendo estos resultados se prefiere sacrificar un poco la buena deformación que tiene el 1200M con respecto al 1000DP, al final el docol 1000DP tiene unas características de aceleración mucho mejores que el 1200M.



Gráfica 16: Aceleraciones filtradas con media móvil ( $\pm 7.5$  ms) cambiando el material del Pilar A

Tabla 11: Resumen de las variaciones de los parámetros al cambiar materiales del Pilar A

	800DP	1000DP	1200M	1400M
Aceleración media	14,14%	<b>14,19%</b>	7,78%	9,26%
Aceleración máx.	<b>48,1%</b>	47,7%	4,4%	38,2%
HIC (15ms)	<b>22,4%</b>	21,6%	22,3%	8,8%
Deformación X Habitáculo	10,25%	16,65%	<b>19,10%</b>	15,93%
Deformación Y Habitáculo	5,89%	13,81%	<b>15,69%</b>	13,12%
Deformación X Vehículo	4,68%	11,99%	<b>16,07%</b>	13,45%



En la tabla se destacan en negrita los mejores materiales para cada parámetro analizado. A primera vista, el 1000DP, seleccionado para el pilar A, no sobresale en ninguno de los aspectos evaluados. Sin embargo, lo que se busca en el pilar A es una mínima deformación, y el material que ofrece las mejores prestaciones en este sentido es el 1200M, aunque el 1000DP se aproxima bastante a estos resultados. Si se escoge como parámetro crítico la desaceleración, el 1000DP supera al 1200M, lo que justificaría su elección como material para el pilar A.

### 8.3. Elección del Fender

Las piezas que componen el fender se muestran en la siguiente ilustración. El conjunto fender esta una pieza que sale del pilar A y otra pieza que une la primera con el larguero frontal.

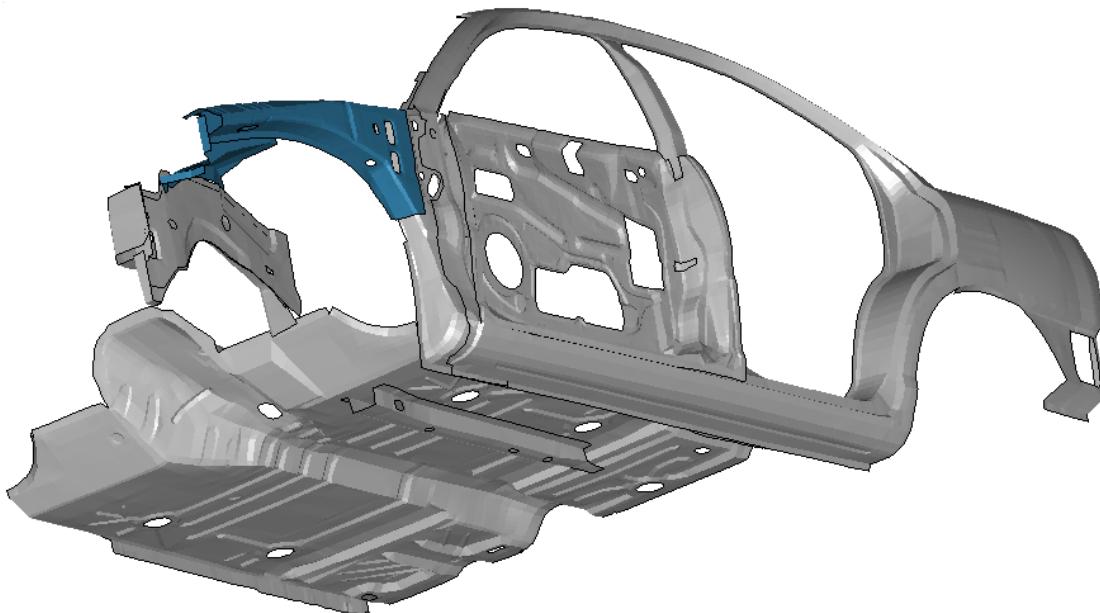
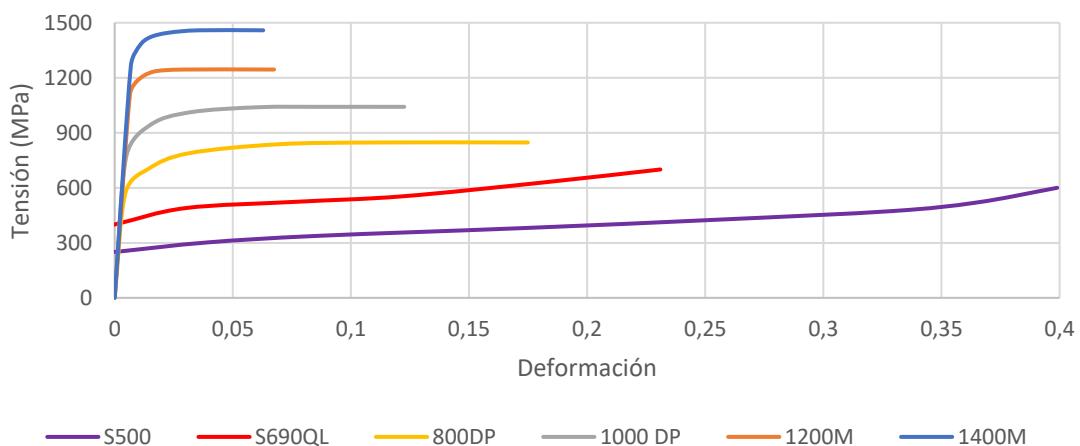


Ilustración 31: Piezas del Fender

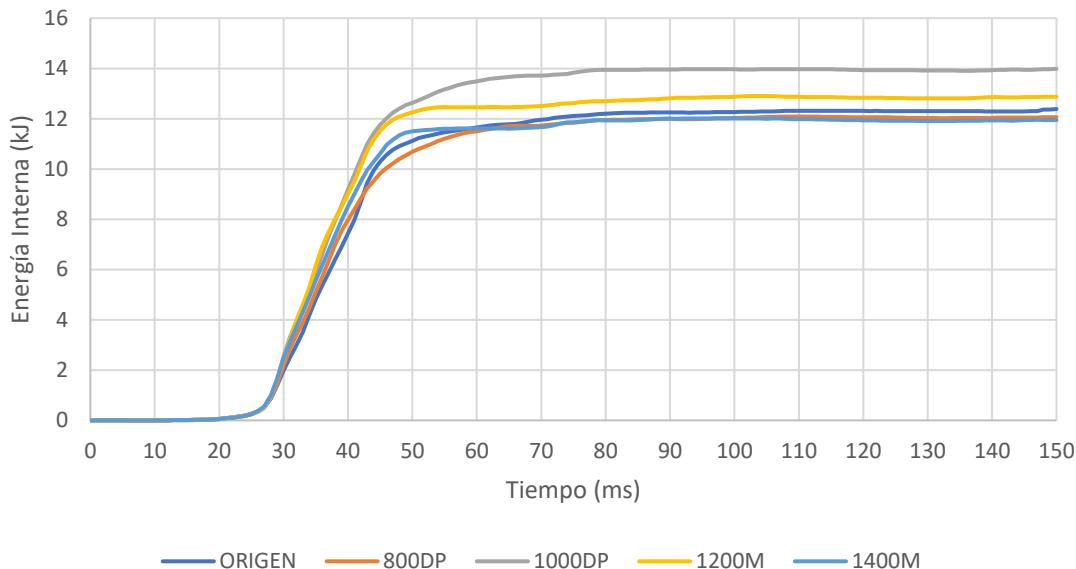
Se muestra a continuación los materiales originales y los nuevos.



Gráfica 17: Materiales del Fender Nuevos vs Originales



El fender es una pieza que está en la parte delantera del coche, al no estar en el habitáculo interesa que se deforme o que absorba energía interna para que cuando la colisión llegue al habitáculo, este tenga una velocidad baja, el fender, así como el front rail son encargados de frenar el vehículo. Viendo sólo la gráfica de energía interna del fender se puede decir que el material óptimo es el docol 1000DP.



Gráfica 18: Energía Interna del Fender con distintos materiales

En el caso de la deformación se puede afirmar que el cambio de material en este componente no afecta mucho, aun así, el docol 1000DP es el acero que mejores prestaciones tiene.

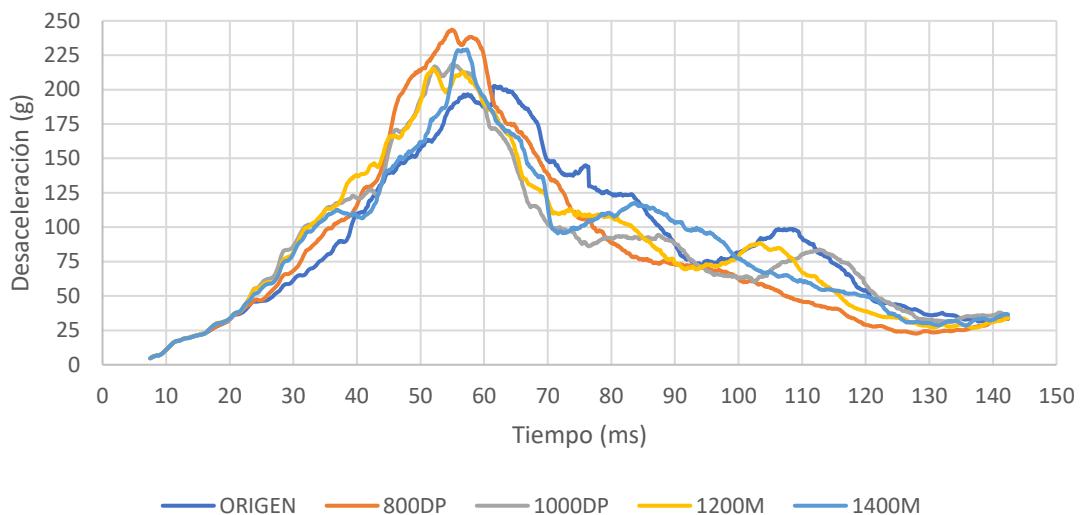
Tabla 12: Deformaciones cambiando el material del Fender

	ORIGINAL	800DP	1000DP	1200M	1400M
Deformación X Habitáculo	-32,84%	-32,19%	-32,60%	-32,98%	-33,06%
Deformación Y Habitáculo	-35,46%	-37,75%	-35,16%	-35,49%	-34,71%
Deformación X Vehículo	-18,04%	-18,06%	-17,96%	-18,07%	-18,00%

En términos de aceleración las prestaciones del docol 1000DP vuelven a ser buenas.

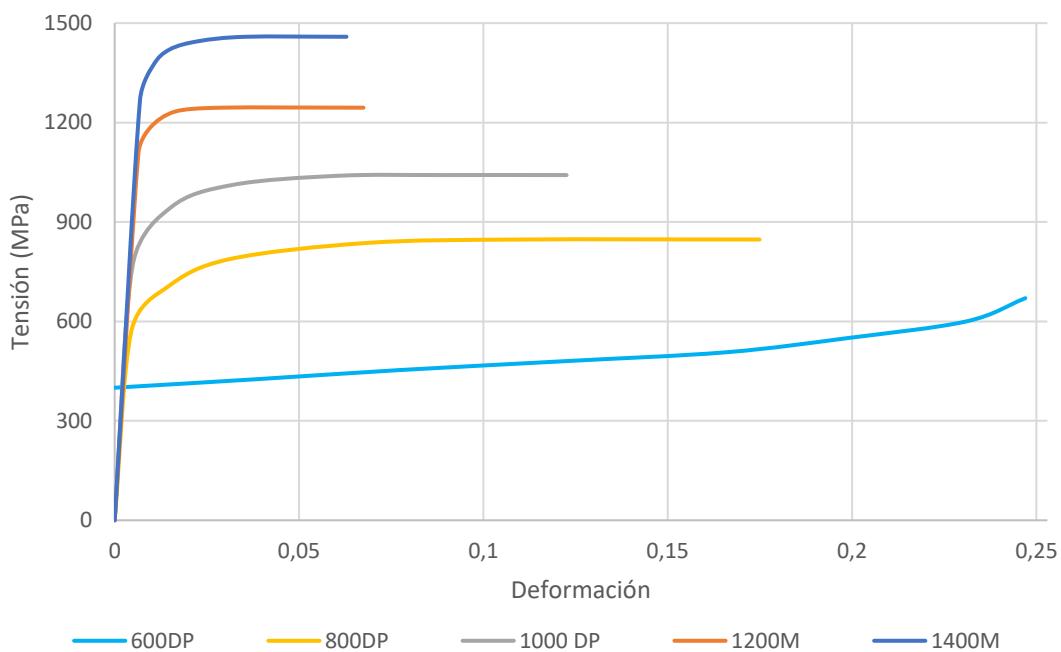
Tabla 13: Aceleraciones cambiando el material del Fender

	ORIGINAL	800DP	1000DP	1200M	1400M
Aceleración media (g)	83,74	78,71	80,92	81,25	81,11
Aceleración máx. (g)	689,8	454,0	419,0	430,6	573,4
HIC (15ms)	8775	13899	10608	10200	11929



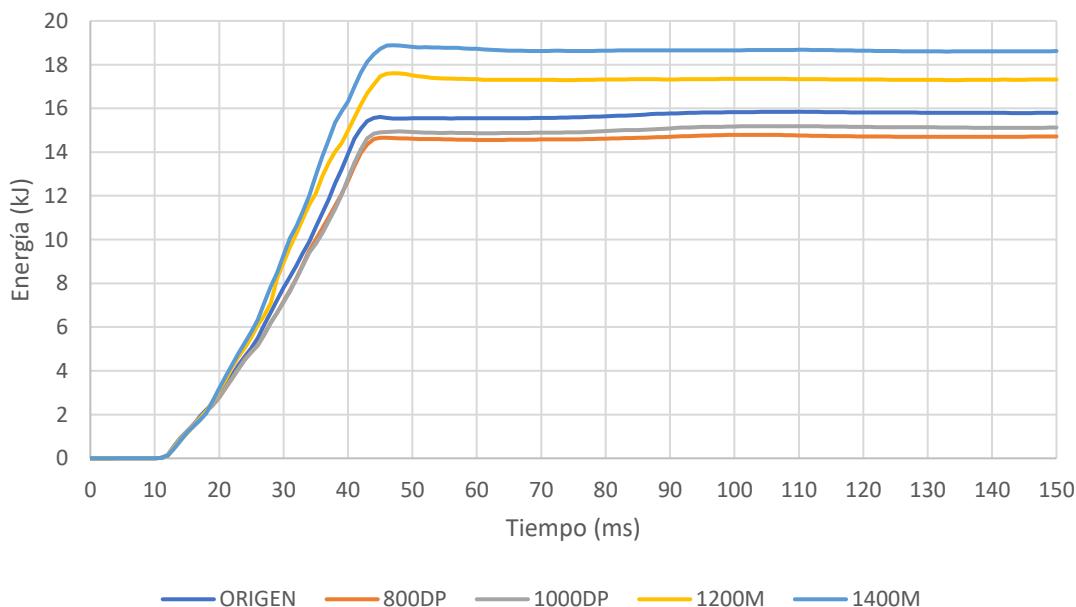


A continuación, se grafican los materiales que van a sustituir a los originales.



Gráfica 20: Materiales del Front Rail Nuevos vs Originales

Al igual que el fender, el front rail es una pieza que está en la parte delantera del coche, al no estar en el habitáculo interesa que se deforme o que absorba energía interna como se ha explicado en el apartado anterior. Viendo sólo la gráfica de energía interna del front rail se puede decir que el material óptimo es el docol 1400DP.



Gráfica 21: Energía Interna del Front Rail con distintos materiales



## Universidad Zaragoza

Cambiar el material en el front rail afecta a la deformación del habitáculo pues si este no cumple su función los siguientes elementos que serán afrontados a la colisión estarán sometidos a un esfuerzo superiores con lo cual la energía que llegará al habitáculo será mayor. Se ve que el mejor material es el docol 1400M dado deforma menos que los demás.

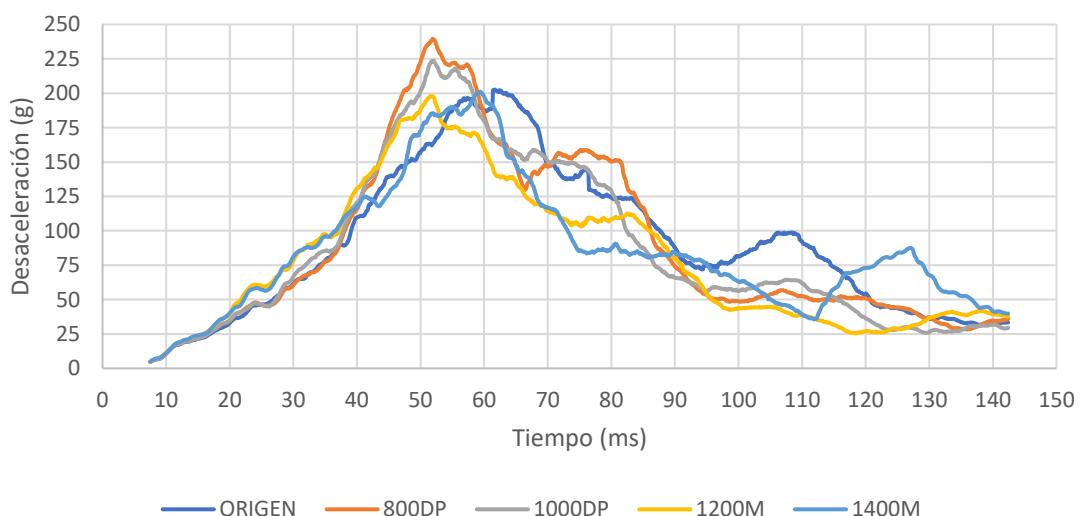
Tabla 15: Deformaciones cambiando el material del Front Rail

	ORIGINAL	800DP	1000DP	1200M	1400M
Deformación X Habitáculo	-32,84%	-33,63%	-34,24%	-31,16%	-28,75%
Deformación Y Habitáculo	-35,46%	-37,82%	-38,41%	-31,39%	-30,72%
Deformación X Vehículo	-18,04%	-18,06%	-17,12%	-16,54%	-15,50%

La aceleración resulta ser mejor con el docol 1200M, pero se prioriza la deformación.

Tabla 16: Aceleraciones cambiando el material del Front Rail

	ORIGINAL	800DP	1000DP	1200M	1400M
Aceleración media (g)	83,74	82,46	79,19	73,70	79,37
Aceleración máx. (g)	689,8	381,9	357,7	357,7	452,0
HIC (15ms)	8775	13316	11209	8281	8600



Gráfica 22: Aceleraciones filtradas con media móvil ( $\pm 7.5$  ms) cambiando el material del Front Rail



Tabla 17: Resumen de las variaciones de los parámetros al cambiar materiales del Front Rail

	800DP	1000DP	1200M	1400M
Aceleración media	1,52%	5,43%	<b>11,98%</b>	5,22%
Aceleración máx.	44,6%	48,1%	<b>48,1%</b>	34,5%
HIC (15ms)	-51,8%	-27,7%	<b>5,6%</b>	2,0%
Deformación X Habitáculo	-2,40%	-4,27%	5,13%	<b>12,46%</b>
Deformación Y Habitáculo	-6,65%	-8,32%	11,47%	<b>13,38%</b>
Deformación X Vehículo	-0,12%	5,09%	8,30%	<b>14,10%</b>

Observando la tabla resumen se podría elegir el docol 1200M si se eligiese como criterio la aceleración, en este caso se elige la deformación como parámetro clave por lo tanto el material seleccionado será el docol 1400M.

## 8.5. Simulación de las optimizaciones

Una vez seleccionados los materiales que van a sustituir a los originales en los diferentes conjuntos se va a calcular un ranking según la aportación específica de cada conjunto a las prestaciones del vehículo ante el ensayo.

Tabla 18: Variaciones de cada Material Simulado por Conjunto con Respecto al Vehículo Original

	SUELO	PILAR A	FENDER	FRONT RAIL
Aceleración media	2,59%	14,2%	3,37%	5,22%
Aceleración máx.	32,1%	47,7%	39,3%	34,5%
HIC (15ms) 368	-8,4%	21,6%	-20,9%	1,99%
Deformación X Habitáculo	28,5%	16,7%	0,731%	12,5%
Deformación Y Habitáculo	-2,65%	13,8%	0,846%	13,4%
Deformación X Vehículo	6,26%	12,0%	0,443%	14,1%

Teniendo en cuenta la anterior tabla y el peso de cada conjunto se puede sacar una variación específica (%/kg)

Tabla 19: Variaciones Específicas de cada Material Simulado por Conjunto con Respecto al Vehículo Original

	SUELO	PILAR A	FENDER	FRONT RAIL
Aceleración media	0,176%	0,751%	1,13%	0,902%
Aceleración máx.	2,18%	2,53%	13,2%	5,95%
HIC (15ms)	-0,574%	1,14%	-7,02%	0,3437%
Deformación X Habitáculo	1,94%	0,882%	0,246%	2,15%
Deformación Y Habitáculo	-0,1803%	0,730%	0,284%	2,31%
Deformación X Vehículo	0,426%	0,634%	0,149%	2,43%

Para calcular qué conjunto afecta más a las prestaciones del coche se vuelve a hacer la tabla dando una puntuación de un 0 al elemento que menos afecta para cada categoría y un 1 al que más afecta.



Tabla 20: Puntuación de cada Material Simulado por Conjunto con Respecto al Vehículo Original.

	SUELO	PILAR A	FENDER	FRONT RAIL
Aceleración media	0	0,601	1	0,758
Aceleración máx.	0	0,031	1	0,343
HIC (15ms)	0,790	1	0	0,902
Deformación X Habitáculo	0,889	0,334	0	1
Deformación Y Habitáculo	0	0,366	0,187	1
Deformación X Vehículo	0,121	0,212	0	1

Dado que no todos los parámetros analizados tienen la misma importancia se tiene que ponerle un coeficiente a cada uno yendo del cero para uno que no tenga importancia y un diez para otro cuya importancia sea muy alta.

Se pueden dividir los parámetros en dos categorías, la aceleración media, máxima, así como el HIC son datos relacionados con la aceleración y los otros tres son deformaciones.

La aceleración media es un valor importante pues refleja la violencia de la colisión por eso se le asigna un coeficiente igual a 8. Para la máxima se le asigna un coeficiente de 6 pues no es un dato muy revelador, se puede tener un pico de 700g, pero sólo sobre un milisegundo y como se ha comentado anteriormente el cuerpo no se entera realmente de esta aceleración, si es prolongada sí que es grave. Para el HIC no se le va a dar mucha importancia pues el acelerómetro no está colocado en la cabeza de un dummy ni está en esa posición, está en el salpicadero, por eso se le asigna un 4.

En el caso de las deformaciones las del habitáculo son muy importantes pues este tiene que mantenerse intacto por eso ambas tendrán un coeficiente de 9 y la deformación total del vehículo en el eje x es un parámetro importante pero no se le va a dar el mismo coeficiente que a las del habitáculo. Se prefiere una deformación del 10% en el habitáculo y un 30% en el vehículo que al revés y por eso esta deformación se le asigna un coeficiente de 7.

Se calcula la nota final y el componente que menos afecta por kilogramo al comportamiento ante el choque es el suelo con una puntuación de 2,792 sobre 10, el siguiente es el fender con un 3,647, el segundo mejor componente es el Pilar A con un 3,647 y en el primer puesto el front rail que saca un notable 8,542.

Esto sirve para hacer una serie de simulaciones, la primera optimización sería modificar solo el material del front rail, la segunda será cambiar además el del pilar A y así hasta la cuarta que se le habrían modificado los materiales de todas las piezas estudiadas.

A continuación, se van a mostrar los resultados obtenidos de las diferentes optimizaciones comparándolo con el modelo original pero primero se indican los materiales de los conjuntos en cada optimización



Universidad Zaragoza

Tabla 21: Resumen de los materiales de las optimizaciones

	Front Rail	Pilar A	Fender	Suelo
Original	600 DP	S550 / S690QL	S500 / 600DP	S355Jr / 600DP
1 <sup>a</sup> Optimización	1400 M	S550 / S690QL	S500 / 600DP	S355Jr / 600DP
2 <sup>a</sup> Optimización	1400 M	1000 DP	S500 / 600DP	S355Jr / 600DP
3 <sup>a</sup> Optimización	1400 M	1000 DP	1000 DP	S355Jr / 600DP
4 <sup>a</sup> Optimización	1400 M	1000 DP	1000 DP	1400 M

Siguiendo con las deformaciones:

Tabla 22: Deformaciones a lo largo de las optimizaciones

	Original	1 <sup>a</sup> OPT	2 <sup>a</sup> OPT	3 <sup>a</sup> OPT	4 <sup>a</sup> OPT
Conjuntos Cambiados	Ninguno	Front-Rail	FR + Pilar A	FR + P-A + Fender	Todos
Deformación X Habitáculo	-32,84%	-28,75%	-24,27%	-24,08%	-17,43%
Deformación Y Habitáculo	-35,46%	-30,72%	-25,45%	-25,96%	-27,92%
Deformación X Vehículo	-18,04%	-15,50%	-13,36%	-13,14%	-13,48%

Las deformaciones van mejorando poco a poco, en el caso de la cuarta optimización empeoran un poco en la deformación transversal del habitáculo como la longitudinal del vehículo. A continuación, se quiere ver si hay congruencia entre la tabla 18 que muestra las variaciones del material escogido por conjunto con respecto al vehículo original y la tabla 22.

Tabla 23: Tabla 18

	Original	Front Rail	Pilar A	Fender	Suelo
Deformación X Habitáculo	-32,84	-12,5%	-16,7%	-0,731%	-28,5%
Deformación Y Habitáculo	-35,46	-13,4%	-13,8%	-0,846%	+2,65%
Deformación X Vehículo	-18,04	-14,1%	-12,0%	-0,443%	-6,26%

En la siguiente tabla se calculan los resultados de las optimizaciones a partir de los valores originales y de los porcentajes dados en la tabla 23.

Tabla 24: Deformaciones de las Optimizaciones calculas a mano

	1 <sup>a</sup> OPT	2 <sup>a</sup> OPT	3 <sup>a</sup> OPT	4 <sup>a</sup> OPT
Conjuntos Cambiados	Front-Rail	FR + Pilar A	FR + P-A + Fender	Todos
Deformación X Habitáculo	-28,75	-23,96	-23,79	-17,01
Deformación Y Habitáculo	-30,72	-26,48	-26,26	-26,96
Deformación X Vehículo	-15,5	-13,64	-13,58	-12,73

Comparando esta tabla con la tabla 22 se observa que la diferencia máxima es de un punto porcentual con lo cual los resultados calculados para las deformaciones son congruentes con los de las simulaciones.

La deformación al ser un parámetro más estable es sencilla de predecir.



Se va a ver si se puede hacer lo mismo con las aceleraciones.

Tabla 25: Aceleraciones a través de las optimizaciones

	ORIGINAL	1 <sup>a</sup> OPT	2 <sup>a</sup> OPT	3 <sup>a</sup> OPT	4 <sup>a</sup> OPT
Conjuntos Cambiados	Ninguno	Front-Rail	FR + Pilar A	FR +P-A + Fender	Todos
Aceleración media (g)	83,74	79,37	83,61	81,25	76,09
Aceleración máx. (g)	689,8	452,0	334,3	475,2	377,4
HIC (15ms)	8775	8600	9993	11794	10264

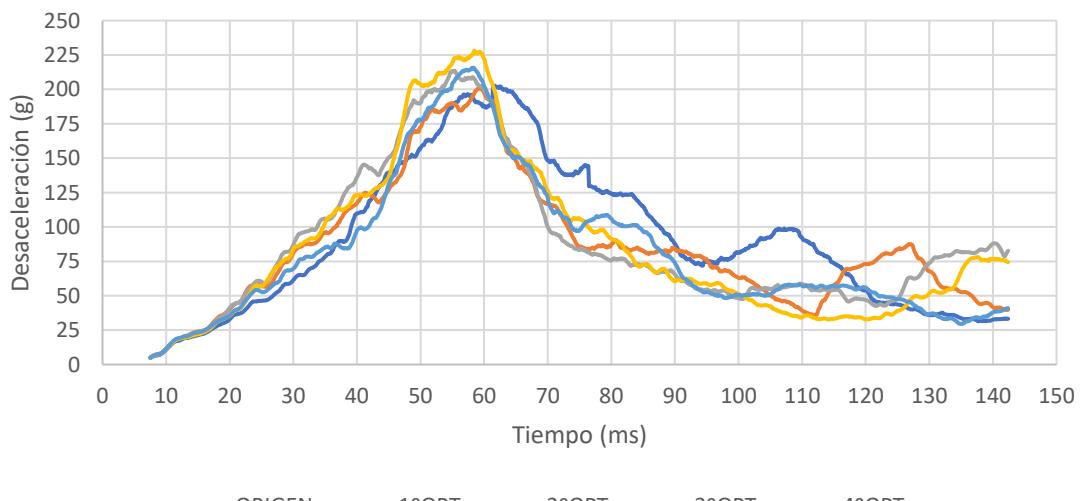
La aceleración media final es la más baja pero no disminuye progresivamente, cuando se cambia el material del pilar A aumenta 4g debido a que se priorizo la deformación.

La aceleración máxima, así como el HIC disminuyen y aumentan a medida que se van introduciendo cambios

Al comparar las tablas 25 y 26 se nota que no existe congruencia entre los porcentajes de mejora de la tabla 18 con los resultados obtenidos a medida que se va optimizando el modelo. Esto es debido a que la aceleración es una función donde se miden valores instantáneos con lo cual al presentar unos gradientes muy elevados (grandes cambios en poco tiempo) es mucho más difícil de predecir que la deformación.

Tabla 26: Aceleraciones calculadas manualmente

	1 <sup>a</sup> OPT	2 <sup>a</sup> OPT	3 <sup>a</sup> OPT	4 <sup>a</sup> OPT
Conjuntos Cambiados	Front-Rail	FR + Pilar A	FR +P-A + Fender	Todos
Aceleración media	79,37	68,10	65,81	64,10
Aceleración máx.	452,0	236,3	143,5	97,51
HIC (15ms) 368	8600	6746	8155	8844





Universidad Zaragoza

Viendo la gráfica 23 y la tabla 25 se observa que los resultados obtenidos en término de aceleración son los mejores cuando se han cambiado los materiales en todos los conjuntos.

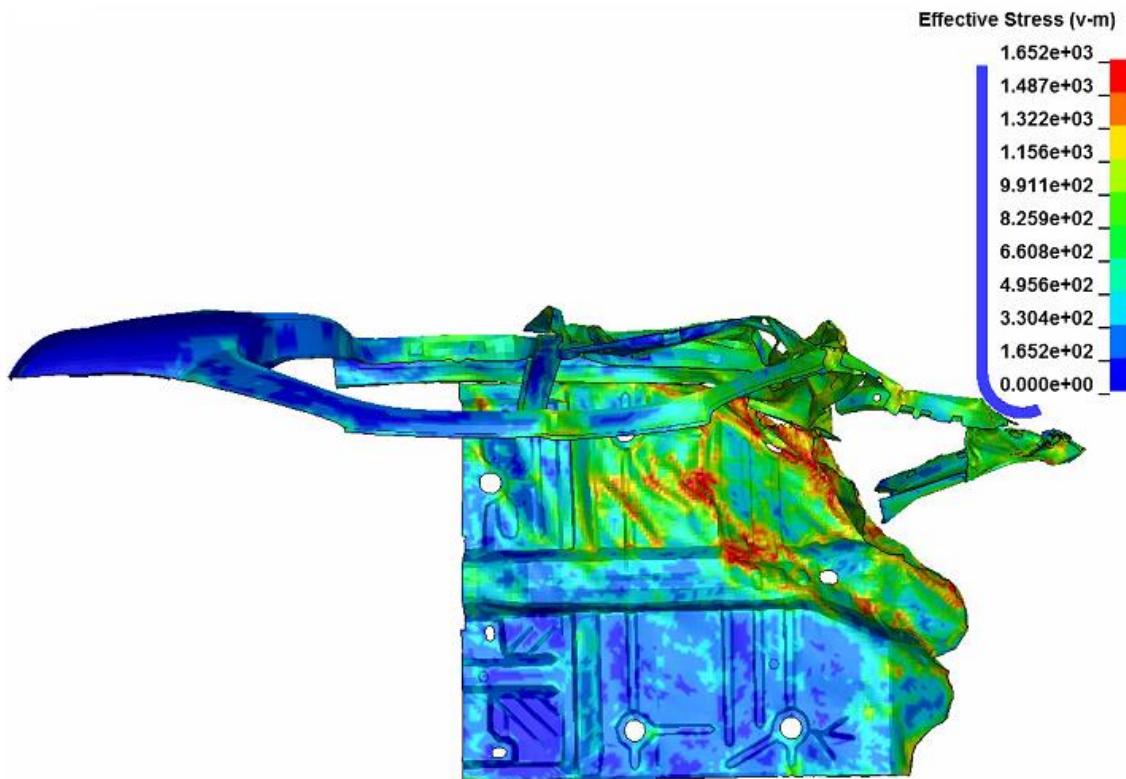


Ilustración 33: Representación de la Tensión de Von Mises en el instante 75ms

La tensión de Von Mises del suelo a priori parece más elevada que en el modelo original, en el suelo se alcanzan los 1652 MPa, aunque si se hace la media de la tensión de Von Mises sería inferior a la del modelo inicial. Al cambiar el material por uno con mejores características se distribuyen mejor los esfuerzos.

## 8.6. Aligeramiento del modelo

El modelo pesa 1374,38 kg y se quiere hacer una disminución de peso, para llevar a cabo dicho objetivo se partirá del modelo con los materiales cambiado en todos los conjuntos y se tratará de reducir el espesor de algunas partes para llegar a los valores de deformación del vehículo de origen.

Tabla 27: Peso y espesor de las piezas estudiadas

Conjunto	Pilar A			Suelo		Front Rail		Fender	
Pieza	234	310	355	353	400	389	390	373	450
Espesor (mm)	0,678	1,611	0,829	0,705	1,156	1,895	1,522	1,524	0,801
Peso (kg)	3,8706	3,4357	11,6361	13,1599	1,53816	3,81812	1,97122	2,32731	0,64662

El peso total de los elementos estudiado es de 42,4 kilogramos, aunque si cogemos las piezas del lado del copiloto el peso aumenta a 71,65 kilogramos.



Universidad Zaragoza

Para saber qué piezas modificar para disminuir el peso un buen punto de partida es analizar las diferencias en las energías internas de los componentes del modelo original con el modelo optimizado.

Tabla 28: Comparativa de la Energía interna del modelo original con el optimizado

	Pilar A	Suelo	Front Rail	Fender
E.int modelo Original (kJ)	26,0461	18,8739	15,8461	12,3858
E.int modelo Optimizado (kJ)	24,5912	10,4864	18,9595	14,4162

Analizando estos resultados se puede concluir que la deformación disminuye gracias a la acción del suelo y del pilar A que absorben menos energía interna una vez que se han cambiado los materiales.

Dado que en el pilar A la energía interna disminuye un 6% se reduce el espesor en un 6% de las piezas que componen este conjunto, para las piezas del suelo dado que la energía interna disminuye un 44% se reducirá un 44% el espesor de dichas piezas.

Dado que en un vehículo hay muchas soldaduras por puntos el espesor de las piezas no podrá ser menor que 0,4 ya que a partir de ese espesor la soldadura se vuelve inviable.

Tabla 29: Comparativa de pesos y espesores de las piezas analizadas

	Pilar A			Suelo		Front Rail		Fender	
	234	310	355	353	400	389	390	373	450
Espesor Modelo Original (mm)	0,678	1,611	0,829	0,705	1,156	1,895	1,522	1,524	0,801
Peso Modelo Original (kg)	3,871	3,436	11,636	13,160	1,538	3,818	1,971	2,327	0,647
Espesor Modelo Aligerado (mm)	0,641	1,522	0,783	0,4	0,643	0	0	1,524	0,801
Peso Modelo Aligerado (kg)	3,602	3,274	10,966	7,318	0,857	3,818	1,971	2,327	0,647

Se pasaría de 71,65 kilogramos a 62,24 kilogramos lo que supone una reducción de peso del 13,13% sobre el conjunto estudiado y un 0,68% sobre el peso total del vehículo

Tabla 30: Comparativa de deformaciones

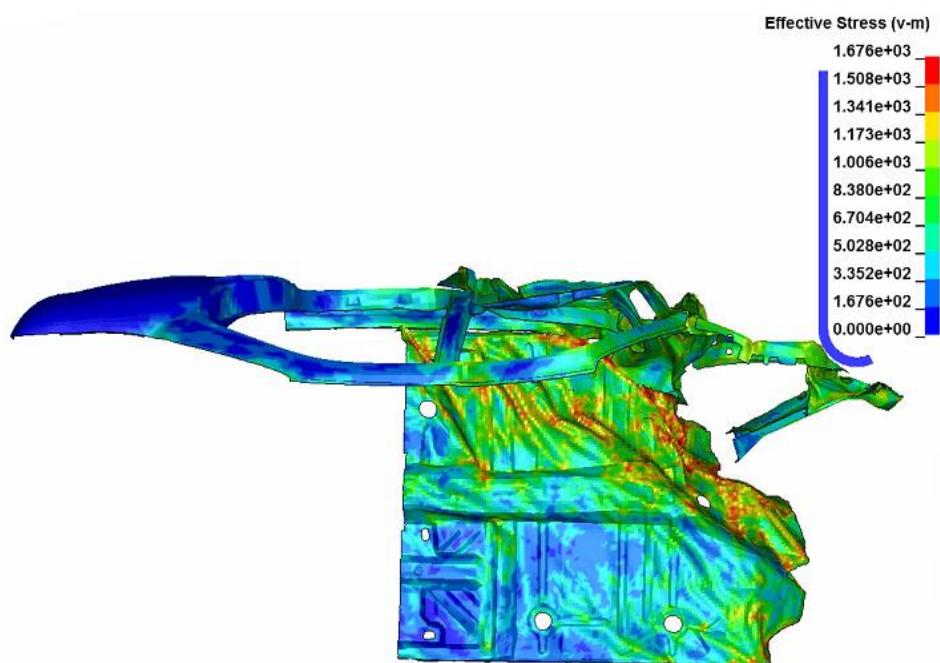
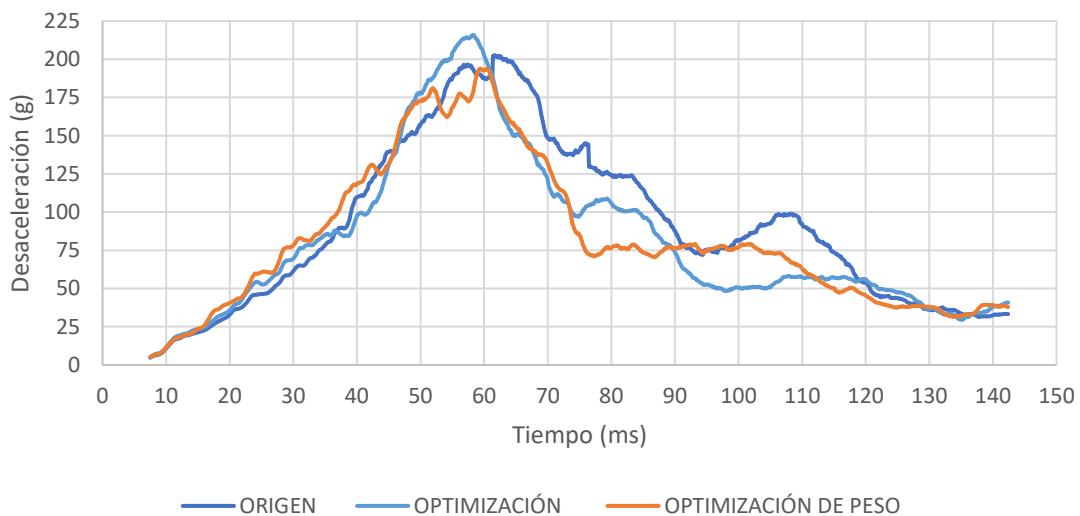
	Original	Aligerado
Deformación X Habitáculo	32,84%	33,29%
Deformación Y Habitáculo	35,46%	35,63%
Deformación X Vehículo	18,04%	15,49%

Se obtienen unas deformaciones muy similares en el habitáculo y en el total del vehículo son un poco mejores, bajando el espesor de las piezas que no se tienen que deformar hace que la tensión aumente y que deformen más ante el mismo ensayo.



	ORIGINAL	OPTIMIZADO	ALIGERADO
Aceleración media (g)	83,74	76,09	76,02
Aceleración máx. (g)	689,8	377,4	362,7
HIC (15ms)	8775	10264	7851

Se observa que, pese a haber disminuido el espesor la desaceleración es menor incluso que con el modelo optimizado, esto se debe a que el suelo y el pilar A al deformar más frenan más lentamente el vehículo. Graficando la aceleración se nota que el mejor resultado se obtiene cambiando los materiales y haciendo una reducción del peso del vehículo.





## Universidad Zaragoza

Comparando la tensión de Von Mises de este modelo aligerado con el modelo optimizado salta a la vista que las zonas rojas son más delgadas, al tener menor espesor los esfuerzos se distribuyen peor.

Aunque los 9,4 kilogramos ahorrados por vehículo pueden parecer insignificantes, se fabricaron 2.228.202 unidades entre el Dodge Neon y el Plymouth Neon [51], esto representa un ahorro total de 20.945 toneladas de material. Este ahorro es significativo no solo en términos de reducción de materiales, sino también en el impacto energético, ya que menos material implica menos recursos necesarios para su procesamiento y transporte.

Asumiendo que el material se transportaba en camiones con la capacidad máxima legal en los Estados Unidos (36,287 toneladas por camión) [52], este ahorro habría reducido en al menos 577 el número de viajes de camión necesarios.

En cuanto al consumo de combustible, el vehículo tiene un consumo promedio de 7,9 litros por cada 100 kilómetros [53]. Si consideramos que cada coche recorre 300.000 kilómetros a lo largo de su vida útil, esto implica un consumo total de 23.700 litros por coche, lo que llevaría a un consumo total de 52.808 millones de litros de combustible para todos los Neons fabricados.

Además, se sabe que, por cada 100 kg de peso ahorrado, se reduce el consumo en 0,5 litros por cada 100 km [54]. Por lo tanto, con un ahorro de 9,4 kilogramos por vehículo, se habrían podido ahorrar 0,047 litros por cada 100 km. A lo largo de la vida útil de un coche, esto equivale a 141 litros de combustible ahorrados. Multiplicado por el número total de unidades producidas, el ahorro asciende a 314 millones de litros de combustible, lo que supone 783.430 toneladas menos de CO<sub>2</sub> liberadas a la atmósfera [55]

## 8.7. Comparativa visual de las simulaciones

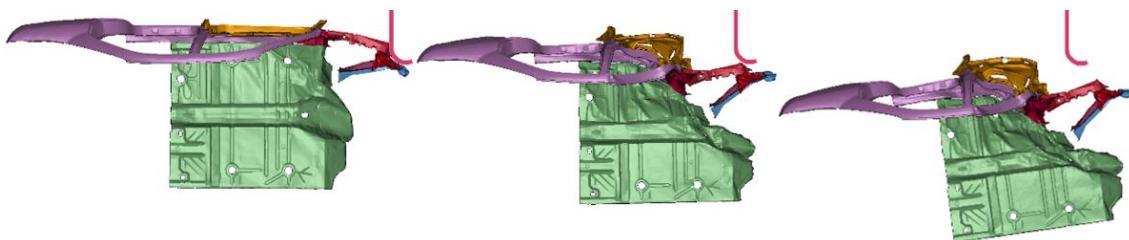


Ilustración 35: Vista en Planta de la Simulación con el Modelo Original



Ilustración 36: Vista en Planta de la Simulación con el Modelo Optimizado

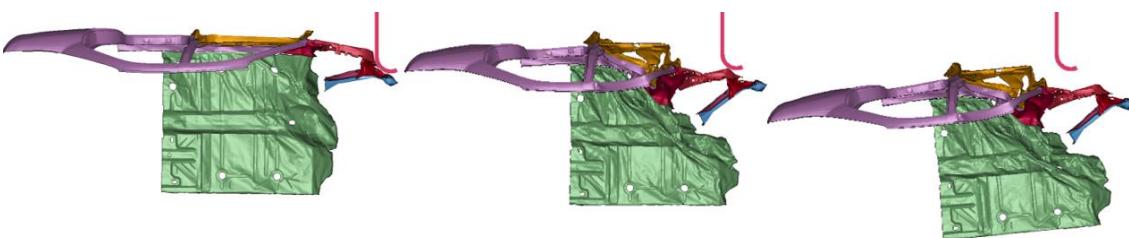


Ilustración 37: Vista en Planta de la Simulación con el Modelo Aligerado



Ilustración 38: Vista Lateral de la Simulación con el Modelo Original

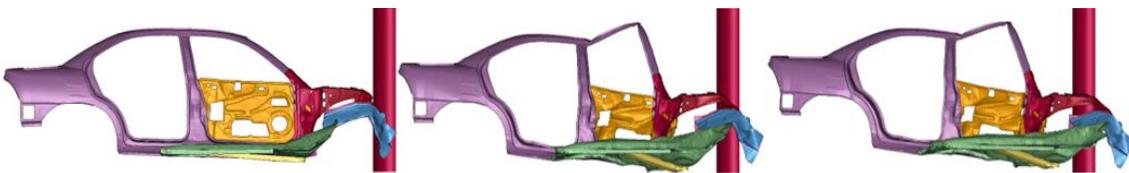


Ilustración 39: Vista Lateral de la Simulación con el Modelo Optimizada

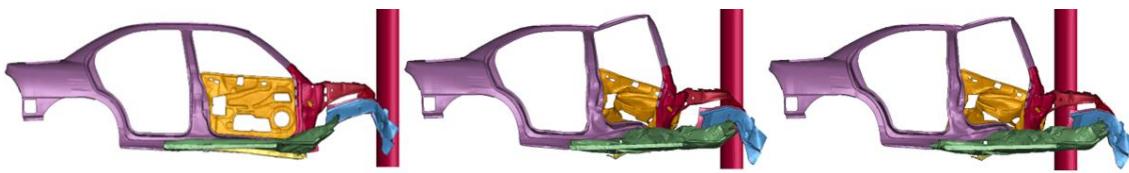


Ilustración 40: Vista Lateral de la Simulación con el Modelo Aligerado

Se ve claramente como el vehículo aligerado y el original tienen una deformación en el habitáculo similar y mayor al vehículo optimizado, sin embargo, se observa que la deformación a lo largo del vehículo del modelo original es superior a los otros dos que son similares.

## 9. Conclusión

Se han cumplido los objetivos propuestos al modificar los materiales del vehículo por unos de última generación los cuales han permitido disminuir la desaceleración y también disminuir la deformación tanto del habitáculo como del vehículo permitiendo así aumentar la probabilidad de supervivencia de los ocupantes del vehículo. Asimismo, con el modelo modificado se ha reducido el peso del vehículo en 9,4 kilogramos sin empeorar las deformaciones con respecto al vehículo original teniendo incluso mejores datos de aceleración con respecto al vehículo original y modificado. Se ha calculado el impacto medioambiental que supone ahorrar esos 9,4 kilogramos.

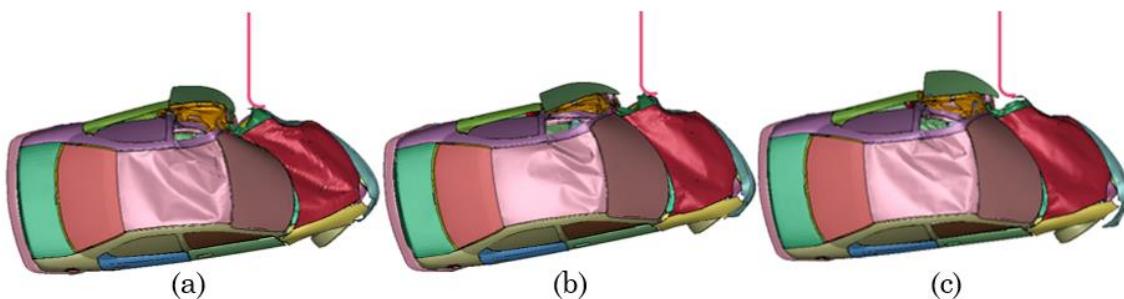


Ilustración 41: (a) vehículo original, (b) modelo optimizado, (c) modelo aligerado

Como se puede observar en la ilustración anterior entre el modelo original el optimizado la diferencia se nota a simple vista, el techo del vehículo está menos deformado, se observa también que el capó se introduce menos en el habitáculo viendo el parabrisas y el mismo capó deforma menos. Comparando el modelo original con el modelo optimizado con reducción de peso no hay grandes diferencias en el techo, pero si en el capó a que el coche en total deforma menos que en el modelo original.

En cuanto a aspectos a mejorar de este trabajo hay dos posibles mejoras, la primera sería colocar asientos y dummies para poder conocer con más precisión las lesiones que podría causar la colisión. La segunda mejora sería tener unos modelos de materiales más precisos pero la falta de medios ha imposibilitado dicha tarea. Mediante ensayos destructivos de probetas se hubiesen podido sacar los parámetros necesarios para obtener un modelo de material muy cercano al real pero ese trabajo en sí ya es otro proyecto de fin de master.

Este trabajo ha servido para asentar los conocimientos de la rama de mecánica adquiridos a lo largo de la carrera y específicamente los conocimientos de la asignatura de nuevas tecnologías en máquinas y vehículos y llevarlos a un caso real. Ha sido un proyecto muy cambiante en el que se han aportado maneras de trabajar nuevas a menudo permitiendo que este se convierta en un trabajo de fin de master bastante mejor al planteado originalmente.

Aprovecho para agradecer a los directores de este Proyecto Final de Master, David Valladares Hernando y Luis Castejón Herrer por su interés y esfuerzo constantes. Sus conocimientos y experiencia han constituido un elemento fundamental para el resultado obtenido, sin olvidar el buen trato recibido, la paciencia y la confianza en



**Universidad Zaragoza**

mí depositada. Sin duda su labor y apoyo durante estos meses han sido esenciales para la consecución de este proyecto. Agradecer también familiares y amigos que me han motivado para entregar el proyecto en septiembre.



## 10. Bibliografía

- [1] <https://www.racc.es/blog/coche/1896-primera-multa-de-trafico-y-primer-fallecimiento-por-accidente/>
- [2] <https://neomotor.epe.es/conduccion/animales-cadaveres-y-hombres-bala-la-oscura-historia-de-los-crash-test-DJNM8630>
- [3] <https://mexico.as.com/motor/cuantos-autos-existen-en-el-mundo-y-en-que-regiones-hay-mas-n/>
- [4] <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries#:~:text=Cada%20a%C3%B1o%20aproximadamente%201%2C19,los%20cuales%20provocar%C3%A1n%20una%20discapacidad.>
- [5] [https://www.dgt.es/comunicacion/notas-de-prensa/1.145-personas-fallecieron-en-siniestros-de-trafico-en-carretera-durante-2023#:~:text=1.145%20personas%20fallecieron%20en%20siniestros%20de%20tr%C3%A1fico%20en%20carretera%20durante%202023,-Fecha%20actualizaci%C3%B3n%3A%2004&text=Se%20mantiene%20estable%20el%20n%C3%BAmero%20de%20conductores%20\(%20B0%2C4\).](https://www.dgt.es/comunicacion/notas-de-prensa/1.145-personas-fallecieron-en-siniestros-de-trafico-en-carretera-durante-2023#:~:text=1.145%20personas%20fallecieron%20en%20siniestros%20de%20tr%C3%A1fico%20en%20carretera%20durante%202023,-Fecha%20actualizaci%C3%B3n%3A%2004&text=Se%20mantiene%20estable%20el%20n%C3%BAmero%20de%20conductores%20(%20B0%2C4).)
- [6] <https://www.iihs.org/news/detail/small-overlap-front-crash-rating-program-delivers-real-world-benefits>
- [7] <https://www.kia.com/pe/util/news/que-es-carroceria-deformacion-programada-camionetas.html>
- [8] [https://es.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9nito\\_B%C3%A1rbaro](https://es.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9nito_B%C3%A1rbaro)
- [9] <https://mercedes-benz-publicarchive.com/marsClassic/de/instance/picture/Patentschrift-DRP-Nr-854-157.xhtml?oid=130662>
- [10] Apuntes de la asignatura de Nuevas tecnologías en máquinas y vehículos
- [11] <https://www.revistaautocrash.com/por-que-el-diseno-y-el-material-de-la-carroceria-es-fundamental-en-la-seguridad-del-vehiculo/>
- [12] <https://seguridadactivaypasivas.blogspot.com/2015/07/deformacion-programada-en-los-vehiculos.html>
- [13] Optimización frente a choque frontal de un automóvil en base a la utilización de acero de alta resistencia, Manuel Alejandro Pastor Asensio
- [14] <https://www.nexu.mx/blog/sistemas-de-seguridad-activa-y-pasiva-que-todo-auto-debe-tener#:~:text=Los%20elementos%20de%20seguridad%20pasiva,cortes%20de%20inyecci%C3%B3n%20entre%20otras>



- [15] <https://www.autofacil.es/seguridad/organismos-ponen-prueba-seguridad-coches/25772.html>
- [16] <https://www.xataka.com/vehiculos/crash-tests-asi-destrozan-las-marcas-los-coches-para-que-a-ti-no-te-pase-nada>
- [17] <https://www.iihs.org/media/ebf69e3a-cde3-4eca-858b-8bb945da5f20/tmsMpA/Ratings/Protocols/archive/small overlap test protocol VII 1212.pdf>
- [18] <https://www.iihs.org/ratings/about-our-tests>
- [19] Apuntes de la asignatura Fundamentos de Ingeniería de Materiales
- [20] <https://www.ssab.com/es-mx/marcas-y-productos/docol/calidades-de-acero-para-automocion/acero-martensitico>
- [21] <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/phs-grades/>
- [22] <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/dual-phase/>
- [23] [https://www.researchgate.net/figure/Diagrammatic-representation-of-the-microstructure-of-a-steel-biphasic fig4\\_305468835](https://www.researchgate.net/figure/Diagrammatic-representation-of-the-microstructure-of-a-steel-biphasic-fig4_305468835)
- [24] <http://eprints.uanl.mx/24665/1/1080328694.pdf>
- [25] <https://www.ssab.com/es-mx/marcas-y-productos/docol/calidades-de-acero-para-automocion/aceros-de-fase-dual/alta-capacidad-de-conformado>
- [26] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/rolled-blank>
- [27] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612519301574>
- [28] <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/15122/1/TFM-I-134.pdf>
- [29] <https://www.intran.mx/es/por-que-la-soldadura-por-puntos-para-automoviles-es-mas-tan-popular-hoy-en-dia/>
- [30] <https://en.wikipedia.org/wiki/LS-DYNA>
- [31] <https://www.nhtsa.gov/crash-simulation-vehicle-models>
- [32] <https://www.ssab.com/es-es>
- [33] <https://www.worldautosteel.org/>
- [34] [https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna\\_manual\\_volume\\_i\\_r13.pdf](https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna_manual_volume_i_r13.pdf)
- [35] <https://www.dynasupport.com/tutorial/ls-dyna-users-guide/contact-modeling-in-ls-dyna>



- [36] [https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa\\_interna](https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_interna)
- [37] <https://www.dynasupport.com/howtos/element/hourglass>
- [38] <https://www.shlionmetal.com/es/steel-plate/s460-s500-s550-s620-s690-s890-s960-european-standard-high-strength-steel-plate-composition-performance-introduction/>
- [39] Norma UNE-EN 16303
- [40] Norma UNE-EN 1317-1
- [41] <https://www.mayoclinic.org/es/diseases-conditions/whiplash/symptoms-causes/syc-20378921>
- [42] [https://es.wikipedia.org/wiki/Criterio\\_de\\_lesi%C3%B3n\\_encef%C3%A1lica](https://es.wikipedia.org/wiki/Criterio_de_lesi%C3%B3n_encef%C3%A1lica)
- [43] <https://www.ssab.com/es-es/marcas-y-productos/docol/calidades-de-acero-para-automocion#dualPhase>
- [44] <https://www.ssab.com/es-es/marcas-y-productos/docol/calidades-de-acero-para-automocion#martensitic>
- [45] [https://www.researchgate.net/figure/Tensile-tests-on-martensitic-steels-a-engineering-stress-strain-curves-and-b-true\\_fig4\\_366833806](https://www.researchgate.net/figure/Tensile-tests-on-martensitic-steels-a-engineering-stress-strain-curves-and-b-true_fig4_366833806)
- [46] [https://www.researchgate.net/figure/Tensile-tests-on-DP-steels-a-engineering-stress-strain-curves-and-b-true\\_fig3\\_366833806](https://www.researchgate.net/figure/Tensile-tests-on-DP-steels-a-engineering-stress-strain-curves-and-b-true_fig3_366833806)
- [47] <https://www.ssab.com/es-es/marcas-y-productos/docol/calidades-de-acero-para-automocion/aceros-de-fase-dual>
- [48] <https://www.ssab.com/es-es/marcas-y-productos/docol/calidades-de-acero-para-automocion/acero-martensitico>
- [49] [https://www.dynalook.com/conferences/8th-european-ls-dyna-conference/session-11/Session11\\_Paper4.pdf](https://www.dynalook.com/conferences/8th-european-ls-dyna-conference/session-11/Session11_Paper4.pdf)
- [50] <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/11/2808>
- [51] <https://www.allpar.com/d3/neon/index.html>
- [52] <https://www.technogroupusa.com/es/leyes-de-tamanos-y-pesos/#:~:text=Los%20remitentes%20deben%20tener%20en,UU.>
- [53] <https://www.km77.com/coches/chrysler/neon/1999/estandar/estandar/neon-se-20/datos>
- [54] <https://www.emesa-m30.es/reducir-consumo-gasolina-5-pasos/>
- [55] <https://coches.idae.es/consumo-de-carburante-y-emisiones#:~:text=Por%20cada%20litro%20de%20gasolina,64%20kg%20de%20CO2>